

Initiale Entwicklung von Eichenkulturen nach Bodenbearbeitung in Deutschland

(Mit 14 Abbildungen und 16 Tabellen)

DOMINIK TAMKE^{*)}, HOLGER SENNHENN-REULEN und REGINA PETERSEN¹⁾

(Angenommen September 2022)

DOI-Nummer: 10.23765/afj0002086

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Bodenbearbeitung; Eichenverjüngung; Wachstumsmodellierung.

Soil preparation; oak regeneration; growth modelling.

1. EINLEITUNG

Eichenwälder haben im mitteleuropäischen Raum seit jeher eine hohe Bedeutung. In der Vergangenheit wurden Eichenwälder aufgrund der vielseitigen Nutzung (Waldweide, Schiffbau, Bauholz, Brennholz) geschätzt (von SCHÜTZ, 1870) und gegenwärtig aufgrund 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 zu (THÜNEN-INSTITUT, 2014). Unter dem Gesichtspunkt des Waldumbaus als aktive Anpassung an den Klimawandel 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 der Eichenanteile 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 Begründung von Eichenbeständen empfehlen im Vorfeld eine Bodenbearbeitung (ENDRES, 1901; MÖLDER et al., 2017; MORTZFELDT, 1896; VON SCHÜTZ, 1870). Bodenbearbeitungen lassen sich mit zunehmender Intensität in plätzeweise, streifenweise und flächige Verfahren unterteilen. Flächige Bodenbearbeitungen werden für Kulturen mit hohen Ausgangspflanzenzahlen, wie bei Eiche üblich, empfohlen (BEHRNDT, 1969). Im Zuge der Mechanisierung, Rationalisierung und als Folge ausgedehnter Freiflächen durch Kalamitäten, wurden in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts immer tiefer greifende Methoden der Bodenbearbeitung entwickelt (BEHRNDT, 1979; BEHRNDT, 1968; KRAMER, 1978; NOPP et al., 1998; RIPKEN, 1979;

RIPKEN, 1973). Die stärksten Eingriffe werden durch den Vollumbruch hervorgerufen (BEHRNDT, 1979; RIPKEN, 1973), bei dem im Vorfeld der Schlagabraum mit Raupen auf Wällen im Abstand von 40–60 m zusammengeschooben und die Fläche im Anschluss gepflügt wird.

Aufgrund der massiven Eingriffsstärke, bei der negative Effekte wie Nährstoffverlagerung (NOPP et al., 1998; STRUCK, 1999), Bodenverdichtungen (CAMBI et al., 2017; LABELLE et al., 2019) Erosion (ALCÁZAR et al., 2002) oder Zerstörung des Bodenaufbaus als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte (LÖF et al., 2006) zu Tage treten, stehen Bodenbearbeitungen in Deutschland in der Kritik. Dies spiegelt sich in den nationalen Richtlinien der FSC- und PEFC-Zertifizierungen wider, welche zur Verjüngung keinen Eingriff in den Mineralboden gestatten (FSC DEUTSCHLAND UND VEREIN FÜR VERANTWORTUNGSVOLLE WALDWIRTSCHAFT E.V., 2018) oder dies nicht vollflächig zulassen (PEFC DEUTSCHLAND E.V., 2014). Bei der jüngsten Gesetzesnovelle des Niedersächsischen Gesetzes über den Wald und die Landschaftsordnung (NWARDLG, 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 für die Land- und Forstwirtschaft üblichen Regelungen der ordnungsgemäßen Bewirtschaftung anhand bewährter Methoden aus Wissenschaft und Praxis dar.

Nichtsdestotrotz steigern Bodenbearbeitungen den Kulturerfolg bei Eiche (MÖLDER et al., 2019). Dies ist im Überwiegenden auf eine Verbesserung des Wärmehaushalts (WALLERTZ und MALMQVIST, 2013), der Bodenfeuchte (LÖF et al., 1998; ÖRLANDER et al., 1998) und durch eine daraus resultierende verbesserte Nährstoffverfügbarkeit durch erhöhte Mineralisationsraten (LUNDMARK-THELIN und JOHANSSON, 1997) zurückzuführen. Darüber hinaus wird die Konkurrenz durch Begleitwuchs reduziert (LÖF und BIRKEDAL, 2009) und die Überlebenswahrscheinlichkeit gesteigert (HANSSEN et al., 2003; LÖF et al., 2006; ÖRLANDER et al., 1998). Zudem wird die Lagerungsdichte des Bodens verringert, wodurch die Pflanzen eine geringere Energie aufbringen müssen, um mit ihrer Wurzel den Bodenraum zu erschließen. Dieses verbessert die Wurzelentwicklung (DASSOT und COLLET, 2021) und führt zu erhöhten Wuchsraten nach Bodenbearbeitungen (HALLSBY und ÖRLANDER, 2004; LÖF et al., 1998; NORDBOG et al., 2006; SIKSTRÖM et al., 2020). JANDL et al. (2007) konnten in ihrem Review zeigen, dass Kohlenstoff-Verluste, hervorgerufen durch Boden-

¹⁾ Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Grätzelstraße 2, D-37079 Göttingen, Telefon: 0551-69401-0.

^{*)} Korrespondierender Autor: DOMINIK TAMKE.
E-Mail: dominik.tamke@nw-fva.de

Die Untersuchung ist im Rahmen des FNR geförderten Projektes „Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf den Nährstoffhaushalt von Waldböden sowie den Erfolg von Eichenkulturen“ mit dem Förderkennzeichen 22001817 entstanden.

bearbeitung, eine Kompensation durch ein erhöhtes Wachstum infolge der Bodenbearbeitung erfahren. Weitere Reviews kommen ebenfalls zu dem Schluss, dass Bodenbearbeitungen die Pflanzenentwicklung fördern (LÖF et al., 2012; SUTTON, 1993). Darüber hinaus können Bodenbearbeitungen einen negativen Effekt auf biologische Schadorganismen ausüben (SIKSTRÖM et al., 2020; VILLALOBOS et al., 2020; WALLERTZ et al., 2018).

In dieser Untersuchung wird ein neu entwickeltes Bodenbearbeitungsverfahren der Anstalt Niedersächsischen Landesforsten mit einer Kontrolle (keine Bodenbearbeitung) und den örtlich etablierten Bearbeitungsverfahren in drei Eichenanbauswerpunkten im Hessischen Ried (Hessen), Hohen Fläming (Sachsen-Anhalt) und Ostbraunschweigischen Flachland (Niedersachsen) hinsichtlich der Wirkungen auf das Wuchsverhalten (Höhen- und Wurzelhalsdurchmesserentwicklung (WHD) sowie Überlebensrate) von Eichenkulturen verglichen.

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1 Flächenbeschreibungen

In drei Regionen Deutschlands mit einem Schwerpunkt auf dem Eichenanbau wurden Versuchsflächen eingerichtet (Abbildung 1). In jeder Region wurde eine

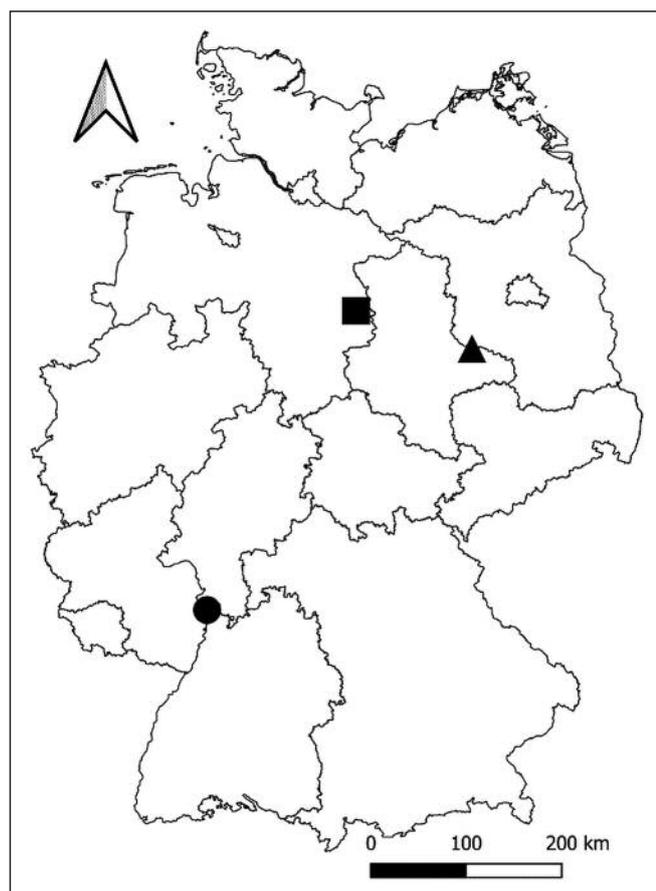


Abb. 1

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

Map of the research regions.

Tab. 1

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

Overview of study area parameter. The annual precipitation and the annual average temperature were regionalised for the reference period 1981–2010 from weather data of the German Meteorological Service (Deutscher Wetterdienst).

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

Bodenbearbeitung mit dem Silvafixverfahren (im Folgenden: Silvafix) als Referenzverfahren durchgeführt. Das Silvafixverfahren bezeichnet eine baggergestützte Flächenräumung mit einem von den Niedersächsischen Landesforsten entwickeltem Räumrechen. Mittels diesem wird der Schlagabraum von der Kulturfläche auf den Gassen abgelagert. Neben dem Silvafix gab es in jeder Region eine Kontrolle ohne Bodenbearbeitung. Neben diesen Varianten wurde das örtliche „Bestverfahren“ auf die Wirksamkeit geprüft (Tabelle 1). 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. Im Hohen Fläming wurden die zur Verjüngung anstehenden Bestände traditionell mit dem Streifenpflug bearbeitet. Die Bodenbearbeitungen wurden auf allen Flächen im Oktober 2018 durchgeführt, die Bestandesbegründungen fanden im Frühjahr 2019 auf gezäunten Flächen statt. Über einen Zeitraum von 3 Wuchsjahren wurden die Kulturen bis zum Ende der Vegetationsperiode 2021 beobachtet.

2.1.1 Hessisches Ried

Im Hessischen Ried lagen sandige Standorte eines mäßig trockenen Wasserhaushalts und einer mesotrophen Nährstoffversorgung in der Rheinebene vor. Es wurde eine Freiflächenaufforstung nach Kalamität eines Buchen-Kiefern-Mischbestandes mit vollflächigem Unterstand aus Spätblühender Traubenkirsche (*Prunus serotina* [EHRH.]) durchgeführt. Auf der Kontrollparzelle wurde die verbliebene Vegetation vor der Pflanzung

Tab. 2

Übersicht der verwendeten Eichen-Herkünfte im Hessischen Ried
(TEi = Traubeneiche, SEi = Stieleiche).
Overview of planted oak provenances in the region of Hessisches Ried.

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 ++

motormanuell auf den Stock gesetzt. Bei Versuchsanlage konnte auf ein Spektrum von 6 Eichen-Herkünfte unterschiedlicher Sortimente (Tabelle 2) zurückgegriffen werden, welche in einem Verband von 2x0,5 m mittels Erdbohrer gepflanzt wurden. Für Wurzel- und Sprossanalysen des Ausgangsmaterials wurden je Herkunft 30 Pflanzen zufällig ausgewählt und beprobt (Abbildung 2) und das Wurzel/Spross-Verhältnis errechnet (Abbildung 3). Während des Beobachtungszeitraumes wurden fünf Pflegemaßnahmen auf der Kontrollparzelle durchgeführt, da ansonsten ein Totalausfall durch die Stockausschläge der Spätblühenden Traubeneiche zu befürchten war. Auf der Silvafix- und der Fräspartelle wurden lediglich einmal, im zweiten Standjahr, auf Teilflächen die überwiegend aus Gras- und Amerikanischer Kermesbeere (*Phytolacca americana* [L.]) bestehende Begleitvegetation zurückgeschnitten.

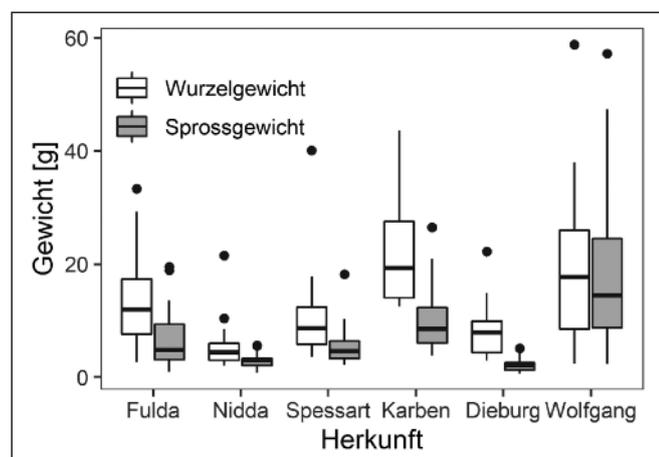


Abb. 2

Boxplots der Wurzel- und Sprossgewichte des Ausgangspflanzenmaterials im Hessischen Ried unterteilt nach Eichen-Herkünften.

Boxplots of root and shoot weights of the planted oak provenances in the region of Hessisches Ried.

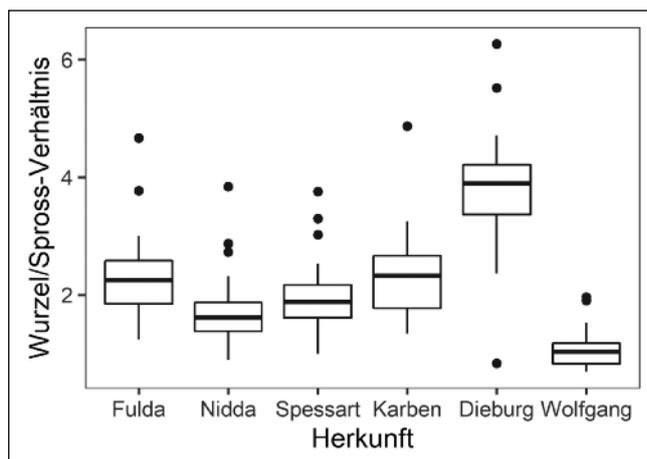


Abb. 3

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

Boxplots of root-shoot-ratios of the provenances planted in the region of Hessisches Ried at planting time.

2.1.2 Ostbraunschweigisches Flachland

Die Versuchsfläche im Ostbraunschweigischen Flachland lag im Urstromtal der Aller und Nebenflüssen. Lehme prägten die Bodenart des Standortes, wodurch ein wechselfeuchter Wasserhaushalt vorlag, bei einer mesotrophen Nährstoffversorgung. Den Vorbestand der Versuchsfläche bildete ein 200-jähriger Stieleichenwald mit Buche und Hainbuche im Unterstand, welcher vollständig geräumt wurde. Es wurde eine zweijährige Stieleiche (*Quercus robur* [L.]) des Sortimentes 2+0 50-80 in einem Verband von 2x0,6 m mit dem Göttinger Fahrradlenker gepflanzt. Das mittlere Wurzel- und Sprossgewicht des Pflanzgutes betrug 13,0 g und 10,3 g, woraus sich ein Wurzel/Spross-Verhältnis von 1,3 errechnet. Ein Pflegedurchgang wurde im Sommer 2021 vor der letzten Aufnahme durchgeführt.

2.1.3 Hoher Fläming

Auf einer Endmoräne aus der Saale-Kaltzeit lag die Versuchsfläche im Hohen Fläming. Ein schwach lehmiger Sand stellte die Bodenart des mäßig trockenen und oligotrophen Standortes dar. Bei der Kultur im Hohen Fläming handelte es sich um eine Traubeneichen-Saat (*Quercus petraea* [(MATTUSCHKA) LIEBL.]) unter einem 90-jährigen Kiefernreinbestand, welcher zuvor auf einen Bestockungsgrad von 0,5 aufgelichtet worden war. Es wurden Eicheln mit einer Saatmenge von 120 kg/ha Nettosaatfläche ausgebracht. Die Eicheln stammten aus einem Saatgutbestand der Forsterei. Das Saatgut hatte eine Keimfähigkeit von 60,5% und ein Tausendkorngewicht von 3,65 kg (ISOGEN GmbH & Co. KG, Göttingen). Der Boden war vollständig mit Moosen, Landreitgras (*Calamagrostis epigejos* [(L.) ROTH]) und Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus* [L.]) bedeckt, so dass bei der Kontrollvariante mit einer Hacke der Mineralboden auf einem schmalen Streifen von 10 cm breite freigelegt wurde, in den die Eicheln gesät wurden.

2.2 Aufnahmen

Im Ostbraunschweigischen Flachland und im Hessischen Ried wurden nach der Pflanzung systematisch in den inneren Reihen (jede dritte Pflanze) Probestämme markiert. Im Ostbraunschweigischen Flachland wurden 84–96 Probestämme markiert und im Hessischen Ried wurden je Herkunft und Bearbeitungsvariante 60 Probestämme markiert. An den Probestämmen wurden nach der Pflanzung, sowie nach den Vegetationsperioden 2019, 2020 und 2021, die Höhe und der Wurzelhalsdurchmesser (in einer Höhe von 5 cm über dem Boden) gemessen. Des Weiteren fand eine Schadansprache statt.

Aufgrund des Vorkommens des Waldmaikäfers (*Melontha hippocastani* [FABRICIUS]) im Hessischen Ried (IMMLER, 2006) wurden Schädigungen der Kultur durch Wurzelfraß der Engerlinge befürchtet. Um den Einfluss der Engerlinge auf den Versuch abschätzen zu können, wurde im Mai 2021 eine Engerlinggrabung auf der Versuchsfläche, in einem systematischen Raster mit 12 Grabungspunkten je Parzelle, durchgeführt. In diesem Jahr befanden sich die Engerlinge in der Population des Hessischen Rieds im 3. 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 Saatreihe durchgeführt. So wurden auf der Kontrollparzelle 4, auf der Silvafixparzelle 181 und auf der Streifenpflugparzelle 185 Probestämme ausgewählt. 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 Auswertungen

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

Für jede Region wurden bayesianische Regressionsmodelle der Überlebenswahrscheinlichkeiten, sowie der Höhen- und Durchmesserentwicklung unter Verwendung des Zusatzpaketes *brms* (BÜRKNER, 2018; BÜRKNER, 2017) (Version 2.6.1) für die Statistiksoftware R (R CORE TEAM, 2021) (Version 4.1.0) auf einer Linux-gnu x86_64 Plattform berechnet. 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 Datenaufbereitungen und Darstellungen wurden mit dem *tidyverse* Paket (WICKHAM et al., 2019)

und der Erweiterung *ggthemes* (ARNOLD, 2021) ausgeführt. Das Arrangement der Abbildungen wurde mit dem *gridExtra* Paket (AUGUIE, 2017) umgesetzt.

Bei der Modellierung der Überlebenswahrscheinlichkeiten arbeiten wir mit Intervall-zensierten Beobachtungen der Verweildauern im Zustand „ungeschädigt“, da ein Probestamm im Zeitraum zwischen zwei Aufnahme-terminen ausfiel und somit der exakte Zeitpunkt des Eintritts des Ereignisses „Ausfall“ unbekannt war (KLEIN und MOESCHBERGER, 2003). Überlebten Probestämme den gesamten Beobachtungszeitraum, handelte es sich um rechtszensierte Beobachtungen, da bis zum letzten Beobachtungstermin das Ausfallereignis nicht eingetreten war (KLEIN und MOESCHBERGER, 2003). Behandlungsbedingte Schädigungen, welche z. B. Pflegeingriffe zur Kultursicherung hervorgerufen wurden, wurden zusätzlich zu tot aufgefundenen Probestämmen als Ausfall gewertet, da sie im Zusammenhang mit der Bodenbearbeitungsvariante stehen konnten. Als Verteilungsmodelle für die Verweildauer einer Pflanze im vitalen Ausgangszustand wurden die Gamma-, Lognormal- und Weibullverteilungen geprüft, welche für Zufallsvariablen mit stetig positivem Wertebereich definiert sind. Als „technische“ Notwendigkeit für Gamma-, Lognormal- und Weibullverteilungen, dass eine Verweildauer – in diesem Kontext – echt größer 0 sein muss, treffen wir für die jede Intervall-zensierte Beobachtung die Annahme, dass der jeweilige Probestamm die ersten 24 Stunden nach dem Pflanz- bzw. letzten Aufnahme-datum überlebte. Dies scheint in der Anwendung absolut gerechtfertigt, und auch das Ergebnis der Modellierung ist robust gegenüber geringfügigen Änderungen dieser Setzung. Die Weibullverteilung 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 bei jungen Bäumen positive Messwerte mit gleichzeitig bedeutsamer Variabilität im Bereich nahe eines allometrischen Minimalwertes von 0 ergeben, ergibt die Annahme einer bedingten Normalverteilung an die Messungen kein inhaltlich valides statistisches Modell. Folglich wurden Wahrscheinlichkeitsverteilungen genutzt, welche nur im positiven Wertebereich definiert sind. Hierbei schied die Lognormalverteilung aus, da sie biologischen Grundlagen bei Integration in einer Wachstumsfunktion widerspricht (da $\exp(0)=1$, ist ein Verlauf des bedingten Erwartungswertes von Höhe oder Durchmesser durch den Wert 0 im Alter 0 nicht möglich). Ein Vergleich der Gamma- und Weibullverteilung zeigte in vier von sechs Fällen eine bessere Anpassung der Weibullverteilung an die Daten. Aus Gründen der einheitlichen Interpretation der Modelle wurden immer die Ergebnisse der Weibullverteilung dargestellt (Eine Sensitivitätsanalyse bezüglich der Wahl der Verteilung ergab hier keine relevante Differenz in den Ergebnissen bezüglich der inhaltlich relevanten Modellparameter, wenn die Weibullverteilung anstatt der Gammaverteilung gewählt wurde).

Wie beschrieben, nutzen wir die Weibullverteilung als statistisches Modell für den unbekanntem Prozess, der unsere Daten erzeugt haben könnte. Die Weibullverteilung ist über Lageparameter $scale_i$ und Formparameter $shape_i$ parametrisiert: $Y_i \sim Weibull(scale_i, shape_i)$. In der Regressionsmodellierung interessieren wir uns 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 Weibullverteilung besteht der folgende Zusammenhang zwischen dem bedingten Erwartungswert und den beiden Verteilungsparametern $scale_i$ und $shape_i$:

Formel 1 / formula 1

wobei $\Gamma(0)$ die Gammafunktion bezeichnet. Für ein inhaltlich direkter zu interpretierendes Ergebnis parametrisiert $brms$ die Weibullverteilung direkt auf μ_i . Um die Positivität dieses bedingten Erwartungswertes einzuhalten, wurde dieser dabei mit dem natürlichen Logarithmus als Link-Funktion an den linearen Prädiktor geknüpft.

2.3.1 Modellierung der Überlebenszeit im Hessischen Ried

Der lineare Prädiktor für den bedingten Erwartungswert μ_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:

Formel 2 / formula 2

mit dem Intercept $\beta_{\mu,0}$ (steht für Bearbeitungsvariante „Kontrolle“ und Herkunft „Fulda“), 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, so resultierte die jeweilige Indikatorfunktion im Wert 1; der jeweilige Modellterm beeinflusste den bedingten Erwartungswert. Führte die Bedingung hingegen zu einer falschen Aussage, dann resultiert die Indikatorfunktion im Wert 0; durch Multiplikation wurde der betroffene Modellterm gleich dem Wert 0 und verändert dadurch nicht den bedingten Erwartungswert.

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

Formel 3 / formula 3

Es wurden schwach informative Prioriverteilungen (BANNER et al., 2020; LEMOINE, 2019) gewählt (Tabelle 3). Eine Prüfung dieser Prioriverteilungen ergab keine sensitive Beeinflussung des Modellergebnisses im Vergleich zu flachen Prioriverteilungen.

2.3.2 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 Vari-

Tab. 3

Parameter und Priori der Überlebenszeitmodellierung im Hessischen Ried.

Model terms and priors of survival time model for region Hessisches 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)
$\beta_{shape,0}$	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)
$\beta_{shape,V}$	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{shape,H}$	<i>Normal</i> (0; 100)

Formel 1 / formula 1

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

Formel 2 / formula 2

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

Formel 3 / formula 3

$$\begin{aligned} \exp(shape_i) &= \beta_{shape,0} + \beta_{shape,V2} \cdot (V_i = V2) + \beta_{shape,V3} \cdot (V_i = V3) \\ &+ \beta_{shape,H2} \cdot (H_i = H2) + \beta_{shape,H3} \cdot (H_i = H3) + \dots \end{aligned}$$

Tab. 4

Parameter und Priori der Überlebenszeitmodellierung im Ostbraunschweigischen Flachland.

Model terms and priors of survival time model for region Ostbraunschweigisches Flachland.

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

able Herkunft entfiel. Die Verteilungsparameter der Weibullverteilung wurden hier wie folgt modelliert:

Formel 4 / formula 4

2.3.3 Modellierung der Überlebenszeit im Hohen Fläming

Die Modellierung der Überlebenswahrscheinlichkeit im Hohen Fläming erfolgte analog zu der 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 Höhenwachstumsmodell Hessisches Ried

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

Formel 5 / formula 5

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 μ_i durch das Produkt

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 $\beta_{\mu,V2,V2,Z} \cdot (H_i = H2) \cdot (V_i = V2) \cdot Z_i$ 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 $1, \dots, m$ (m ist Anzahl der Probebäume) berechnet.

Analog zur Höhenschätzung wurde die Schätzung des Wurzelhalsdurchmessers durchgeführt. Es wurden schwach informative Prioriverteilungen (BANNER et al., 2020; LEMOINE, 2019) gewählt (Tabelle 5). Eine Prüfung der Prioriverteilungen ergab keine sensitive Beeinflussung des Modellergebnisses im Vergleich zu einer flachen Prioriverteilung.

2.3.5 Höhenwachstumsmodell Ostbraunschweigisches Flachland

Analog zum Höhenwachstumsmodell für das Hessische Ried wurde die Höhe (in cm) $Y_i, i = 1, \dots, m$, im

Tab. 5

Prioriverteilungen der Parameter für die Höhen- und Wurzelhalsdurchmessermodellierung im Hessischen Ried.

Priors of Hessisches Ried for the height and root collar diameter estimation.

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)

Formel 4 / formula 4

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

$$\exp(shape_i) = \beta_{shape,0} + \beta_{shape,V2} \cdot (V_i = V2) + \beta_{shape,V3} \cdot (V_i = V3)$$

Formel 5 / formula 5

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

Tab. 6

Prioriverteilungen der Höhen- und Wurzelhalsdurchmessermodellierung im Ostbraunschweigischen Flachland.

Priors of Ostbraunschweigisches Flachland for height and root collar diameter estimation.

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)
$\beta_{\mu,V_{Silva\ fix}}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu,V_{Mulle\ hen}}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu,Z}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu,V_{Silva\ fix},Z}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu,V_{Mulle\ hen},Z}$	<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)

Ostbraunschweigischen Flachland als Weibullverteilte 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:

Formel 6 / formula 6

Die Modellierung des Wurzelhalsdurchmessers folgte dem Modell der Höhenentwicklung (Tabelle 6).

2.3.6 Höhenwachstumsmodell Hoher Fläming

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

Da das Höhenwachstum keine plötzliche – im Sinne von z.B. Sprüngen – Veränderung durch Verpflanzen erfuhr 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 μ_i mit der Identity Link-Funk-

Formel 6 / formula 6

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

Formel 7 / formula 7

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

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

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

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

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

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

tion in Abhängigkeit des Alters $Alter_i$ (Jahre), der kategorialen Bodenbearbeitungsvariante $V_i \in \{1, 2\}$ und eines Gruppeneffektes durch wiederholte Messungen an demselben Probestamm $B_i \in \{1, \dots, m\}$ berechnet:

Formel 7 / formula 7

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

Abweichend zur Höhenmodellierung waren in die WHD-Modellierung lediglich zwei Aufnahmen (Alter 2 und 3) eingegangen, das Höhenwachstumsmodell wurde hier dennoch ebenfalls unverändert angewendet. Da es sich in diesem Fall um ein nichtlineares Modell handelt, verlangt *brms* die Wahl informativer Prioriverteilungen (Tabelle 7). Dies hat eine Steuerungswirkung, die mit dem Festlegen von Startwerten in frequentistischen, numerischen Lösungsverfahren zum Auffinden des

Tab. 7

Prioriverteilungen für das Wachstumsmodell der Höhen- und Wurzelhalsdurchmesserschätzung im Hohen Fläming.

Priors of Hoher Fläming for height and root collar diameter growth model.

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)
$\beta_{V_{Streifenpflug},a}$	<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)

Maximum-Likelihood Schätzers vergleichbar ist. In 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)).

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

Dargestellt werden die Ergebnisse der Überlebenszeitmodellierung als monoton fallende Treppenfunktionen (10 Replikationen je Teilpopulation, darum je 10 Linien pro Farbe). Jede dieser Funktionen bildet einen plausiblen – gegebenen Daten und Modellierung – zeitlichen Verlauf der Entwicklung des Anteil 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 zugrundeliegenden Ereigniszeitpunkte können dabei jede mögliche, monoton fallende Funktion zwischen zweier solcher Punkte ergeben.

Dargestellt werden die Ergebnisse der Wachstumsmodellierung in Form von Posterioriverteilungen des bedingten Erwartungswertes mit Median, sowie der inneren 50%-, 75%-, 90%- und 95% Wahrscheinlich-

keitsintervalle. Die Auswahl der Wahrscheinlichkeitswerte für diese Intervalle wurde getroffen, da sie nach MCELREATH (2015) eine gute Darstellung der Verteilungen ermöglicht.

3. ERGEBNISSE

3.1 Überlebenswahrscheinlichkeiten

Im Anhang (Tabelle 11 bis Tabelle 13) sind die Erwartungswerte der parameterspezifischen Posterioriverteilungen der Überlebenszeitmodellierung gegeben. Eine Darstellung der Modellprädiktionsgüte war aufgrund der zensierten Beobachtungen nicht möglich.

3.1.1 Hessisches Ried

Nach drei Vegetationsperioden zeigten alle Herkünfte und Bearbeitungsvarianten geringe Überlebenswahrscheinlichkeiten von 10–80% (Abbildung 4). Bei drei von sechs Herkünften erzielte die Fräsbearbeitung am Ende des Beobachtungszeitraumes die geringsten Überlebenswahrscheinlichkeiten. Bei der Kontrolle waren über alle Herkünfte hinweg die Überlebenswahrscheinlichkeiten in der ersten Vegetationsperiode am geringsten. In der zweiten und dritten Vegetationsperiode hatten die Überlebenswahrscheinlichkeiten der bearbeiteten Varianten stärker abgenommen.

In Tabelle 8 sind die geschätzten Erwartungswerte für den Todeszeitpunkt einer Eiche ab Pflanzzeitpunkt angegeben. Entsprechend der geringen Überlebenswahrscheinlichkeiten wurden sehr geringe Erwartungswerte für den Eintritt eines Absterbeereignisses von maximal 10,5 Jahre errechnet (Kontrolle Herkunft Dieburg).

Unter Einbeziehung der Ergebnisse der Engerlingsgrabung spiegeln sich diese Ergebnisse in den Ausfällen wieder. Im Mittel wurden die höchsten Dichten an Engerlingen des E3 Stadiums auf der Fräsparzelle gefunden (Abbildung 5).

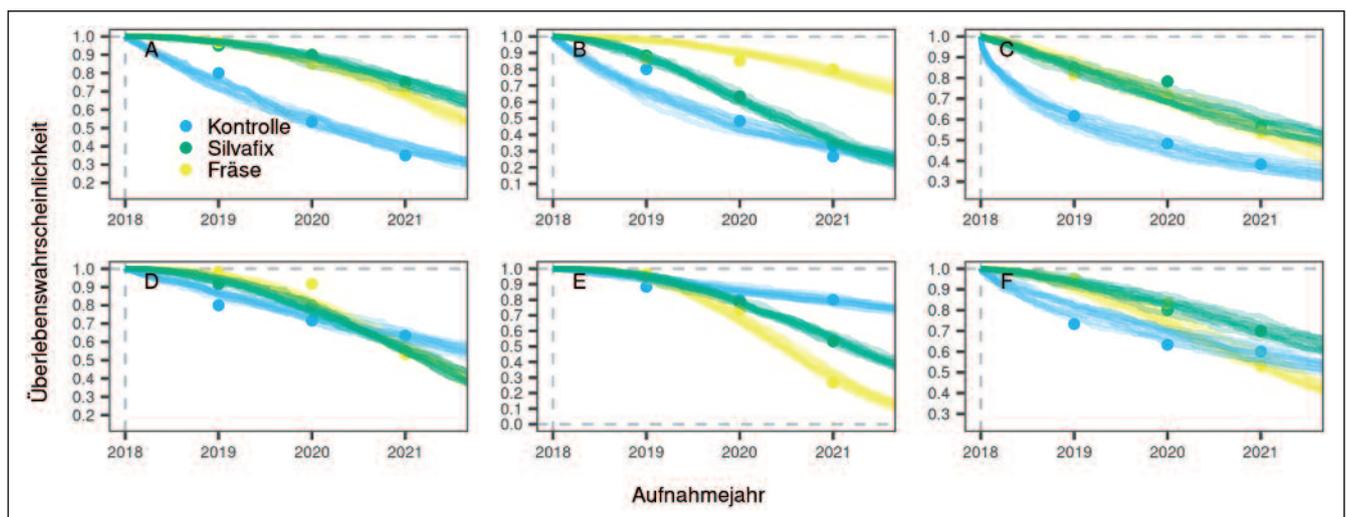


Abb. 4

Beobachtete Überlebensanteile (Punkte) und modellierte Überlebenswahrscheinlichkeiten (monoton abfallende Treppenfunktionen) im Hessischen Ried nach Herkünften (A: Fulda, B: Nidda, C: Spessart, D: Karben, E: Dieburg, F: Wolfgang). Survival shares (dots) and probabilities (monotonically decreasing step functions) in the region of Hessisches Ried by provenances.

Tab. 8

Posteriori Erwartungswerte 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.

Posterior expectation values and 95% credibility intervals (values in brackets) of conditional expectation of survival time (in years since planting), and pair-wise differences, for sample oaks in the region of Hessisches 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
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
	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
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
	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
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]

Es wurden keine Engerlinge in den Bereichen der Herkünfte Nidda und Fulda auf der Fräsfläche gefunden, hingegen aber in den Bereichen der anderen Herkünfte mit 1–10 Engerlingen/m². Bei der Silvafixbearbeitung lag die Dichte bei 1–3 Engerlingen/m² und bei der Kontrolle bei 1 Engerling/m².

3.1.2 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 6).

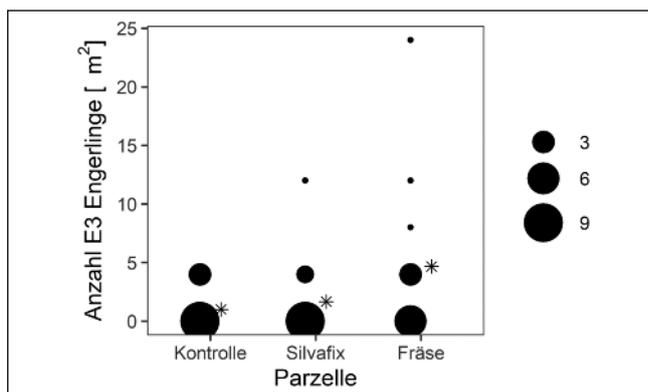


Abb. 5

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

Grub digging in the region of Hessisches Ried. Circles showing the frequencies of observed grubs and the star represents the mean value by soil preparation method.

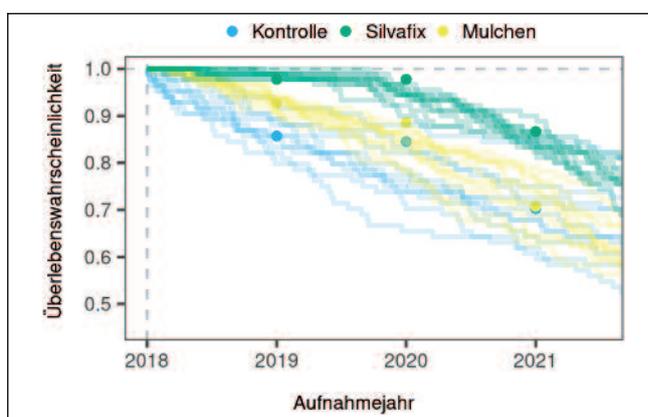


Abb. 6

Beobachtete Überlebensanteile (Punkte) und modellierte Überlebenswahrscheinlichkeiten (monoton abfallende Treppenfunktionen) im Ostbraunschweigischen Flachland.

Survival shares (dots) and probabilities (monotonically decreasing step functions) in the region of Ostbraunschweigisches Flachland.

Tabelle 9 gibt die geschätzten Erwartungswerte für den Todeszeitpunkt einer gepflanzten Eiche an. Den geringsten Erwartungswert zeigt die Mulchbehandlung.

3.1.3 Hoher Fläming

Unter Einbeziehung von Keimfähigkeit, Tausendkorngewicht und Auflaufprozent errechnete sich eine Anzahl von 15.500 bzw. 14.100 Eichen/ha für die Streifenflugparzelle bzw. Silvafixparzelle. Die Überlebenswahrscheinlichkeit der bearbeiteten Varianten lag nach 3 Vegetationsperioden annähernd bei 90% (Abbildung 7). Die Überlebenswahrscheinlichkeiten der Probestämme der Streifenflugparzelle lagen noch über denen der Silvafixparzelle. Im Gegensatz zu den bearbeiteten Parzellen lag die Überlebenswahrscheinlichkeit der Kontrolle nach drei Vegetationsperioden nahe „Null“. Interessanterweise zeigten die Probestämme nach der ersten Aufnahme nur sehr geringe Ausfallraten.

Tab. 9

Posteriori Erwartungswerte 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 Ostbraunschweigischen Flachland.

Posterior expectation values and 95% credibility intervals (values in brackets) of conditional expectation of survival time (in years since planting), and pair-wise differences, for sample oaks in the region of Ostbraunschweigisches 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]

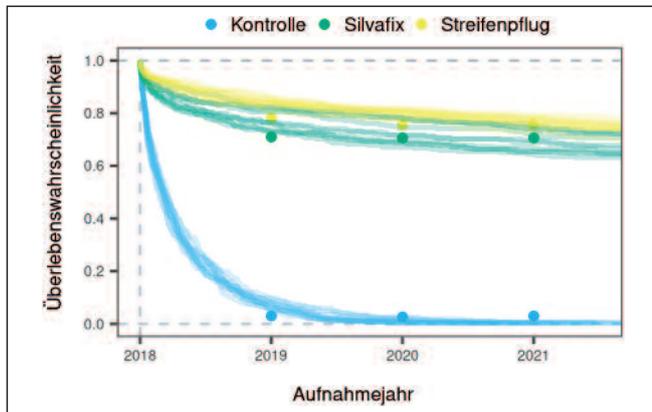


Abb. 7

Beobachtete Überlebensanteile (Punkte) und modellierte Überlebenswahrscheinlichkeiten (monoton abfallende Treppenfunktionen) im Hohen Fläming.

Survival shares (dots) and probabilities (monotonically decreasing step functions) in the region of Hoher Fläming.

In *Tabelle 10* werden die Erwartungswerte für den Todeszeitpunkt einer Eiche ab dem Aussaatzeitpunkt angegeben. Auch durch die nur intervall- oder rechtszensierten beobachteten Ereignisse kommt es insbesondere in Teilpopulationen mit einem nur geringen relativen Anteil an abgestorbenen Eichen zu einer großen Breite des 95% Unsicherheitsintervalls.

3.2 Ergebnisse der Wachstumsmodellierung

Überprüfungen der Güte der Modellvorhersage, basierend auf der durch die Posterioriverteilungen voll spezifizierten bedingten (Weibull-)Verteilung für jede Beobachtungseinheit (auch als Posterior-Predictive-Check bezeichnet), zeigten eine gute Anpassung der Modelle an die Daten (*Anhang Abbildung 14*).

Im Anhang werden die jeweils zugehörigen Ergebnisse der Parameterschätzungen wiedergegeben (*Tabelle 14* bis *Tabelle 16*).

Tab. 10

Posteriori Erwartungswerte 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 Hohen Fläming.

Posterior expectation values and 95% credibility intervals (values in brackets) of conditional expectation of survival time (in years since planting), and pair-wise differences, for sample oaks in the region of Hoher Fläming.

Bearbeitungsverfahren	Posteriori
Kontrolle (K)	0,33 [0,26; 0,41]
Silvafix (Si)	408,91 [58; 1919,12]
Streifenflug (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]

3.2.1 Wachstumsmodellierung Hessisches Ried

Mit zunehmendem Alter nahm der Höhenzuwachs zu (*Abbildung 8*). Spalte 2 zeigt die Differenzen aus der Silvafixbearbeitung abzüglich der Kontrolle. Lagen die Werte im positiven Bereich, war die Silvafixvariante höher als die Kontrolle. Anhand der Steigung war die Entwicklung über der Zeit ablesbar. Lagen positive Steigungen vor, entwickelte sich die Silvafixvariante besser als die Kontrolle. Die Teilabbildungen B2 und E2 zeigen evident bessere Entwicklungen der Kontrolle gegenüber der Silvafixvariante und Teilabbildung C2 eine evident 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 evident besseres Wachstum der Kontrolle. Die weiteren Teilabbildungen in Spalte 3 zeigen ein besseres Wachstum der Fräsbearbeitung, aufgrund der positiven Steigung, bei der alle bis auf Plot F3 mit einer Wahrscheinlichkeit von 75% und mehr evident sind. Spalte 4 vergleicht die Fräsbearbeitung mit dem Silvafix. In allen Teilabbildungen außer E4 zeigt sich eine Überlegenheit im Höhenwachstum der Fräsbearbeitung gegenüber dem Silvafix, von denen zwei eine Wahrscheinlichkeit von über 97,5% zeigen. Teilabbildung E4 zeigt eine bessere Entwicklung des Silvafix gegenüber der Fräsbearbeitung.

Bei allen Herkünften und Bearbeitungen nahm mit zunehmendem Alter der Wurzelhalsdurchmesserzuwachs zu (*Abbildung 9*). (Das Ergebnis der Parameterschätzungen ist in *Tabelle 14* des Anhangs gegeben). In Spalte 2 ist ersichtlich, dass die Kontrolle in Teilabbildung B2 eine evident bessere Entwicklung des Wurzelhalsdurchmessers aufwies als die Bearbeitung mit dem Silvafix. In zwei Fällen zeigte sich eine gleiche Entwicklung und in drei Fällen war die Silvafixvariante der Kontrolle überlegen. Beim Vergleich der Fräsvariante mit der Kontrolle zeigte sich lediglich in Teilabbildung B3 keine positive Steigung, ansonsten war die Entwicklung auf der Fräsvariante der Kontrolle immer überlegen, in drei Fällen mit Wahrscheinlichkeiten von über 97,5%. Beim Vergleich der Bodenbearbeitungen miteinander, zeigte sich immer eine positive Steigung. Dies

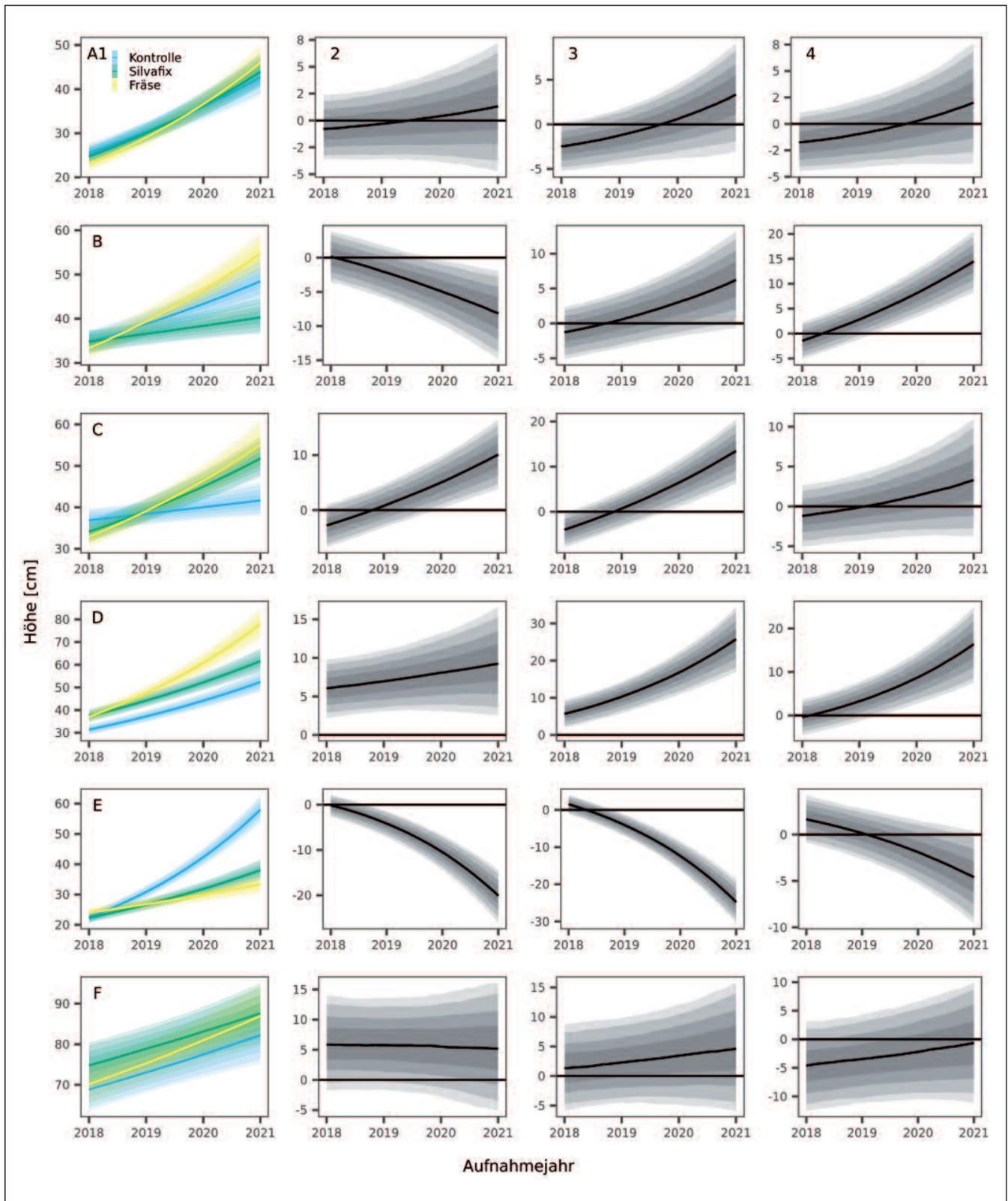


Abb. 8

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

Shoot height development of provenances in the region of Hessisches Ried by year and soil preparation method. Rows represent provenances and 1st column shows $E(Y_i|V_i)$, 2nd column shows $E(Y_i|V_i=Silvafix) - E(Y_i|V_i=Kontrolle)$, 3rd column shows $E(Y_i|V_i=Fräse) - E(Y_i|V_i=Kontrolle)$ and 4th column $E(Y_i|V_i=Fräse) - E(Y_i|V_i=Silvafix)$.

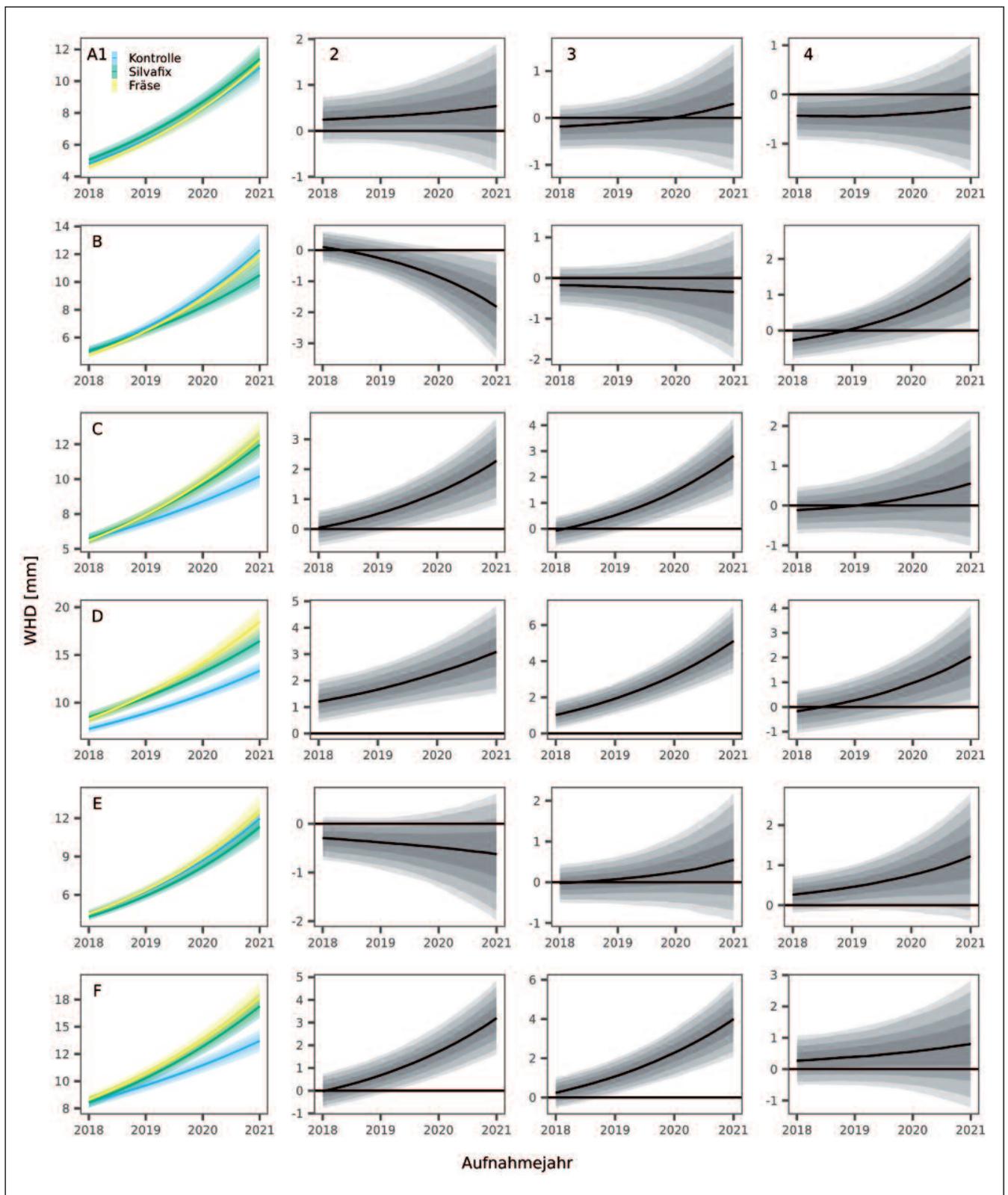


Abb. 9

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% und 95%-Quantil von $E(Y_i|V_i)$, analog dazu in der zweiten Spalte $E(Y_i|V_i=Silvafix) - E(Y_i|V_i=Kontrolle)$; dritten Spalte $E(Y_i|V_i=Fräse) - E(Y_i|V_i=Kontrolle)$, vierten Spalte $E(Y_i|V_i=Fräse) - E(Y_i|V_i=Silvafix)$.

Root collar diameter development of the planted provenances in the region of Hessisches Ried by year and soil preparation method. Rows represent provenances and 1st column shows $E(Y_i|V_i)$, 2nd column shows $E(Y_i|V_i=Silvafix) - E(Y_i|V_i=Kontrolle)$, 3rd column shows $E(Y_i|V_i=Fräse) - E(Y_i|V_i=Kontrolle)$ and 4th column $E(Y_i|V_i=Fräse) - E(Y_i|V_i=Silvafix)$.

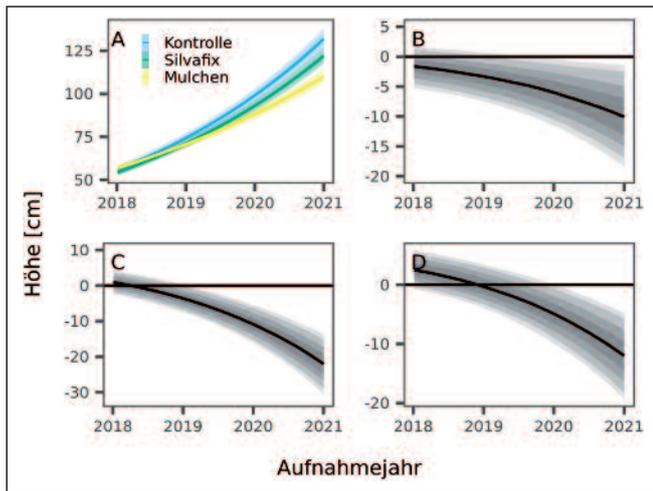


Abb. 10

Ergebnisse der Höhenmodellierung im Ostbraunschweigischen Flachland (A zeigt $E(Y_i|V_i)$, B zeigt $E(Y_i|V_i=Silvafix) - E(Y_i|V_i=Kontrolle)$, C zeigt $E(Y_i|V_i=Mulchen) - E(Y_i|V_i=Kontrolle)$, D zeigt $E(Y_i|V_i=Mulchen) - E(Y_i|V_i=Silvafix)$.
Results of shoot height development in the region of Ostbraunschweigisches Flachland.

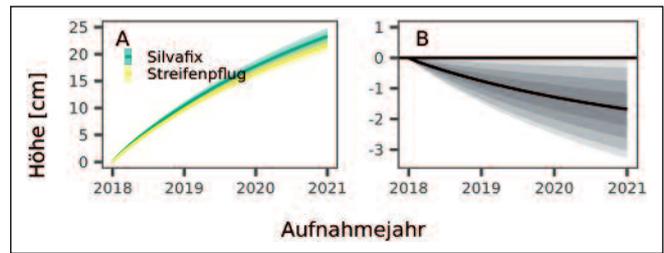


Abb. 12

Ergebniss der Höhenwachstumsmodellierung im Hohen Flämung (A zeigt $E(Y_i|V_i)$, B zeigt $E(Y_i|V_i=Streifenpflug) - E(Y_i|V_i=Silvafix)$.
Results of shoot height development in the region of Hoher Flämung.

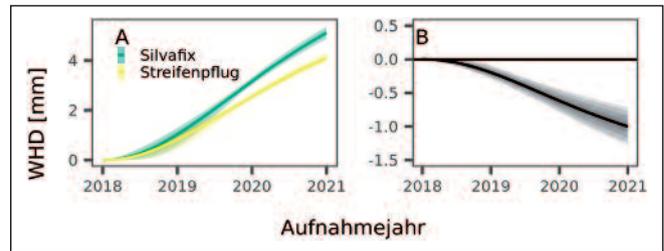


Abb. 13

Ergebniss der Wurzelhalsdurchmesserentwicklung im Hohen Flämung (A zeigt $E(Y_i|V_i)$, B zeigt $E(Y_i|V_i=Streifenpflug) - E(Y_i|V_i=Silvafix)$.
Results of root collar diameter development in the region of Hoher Flämung.

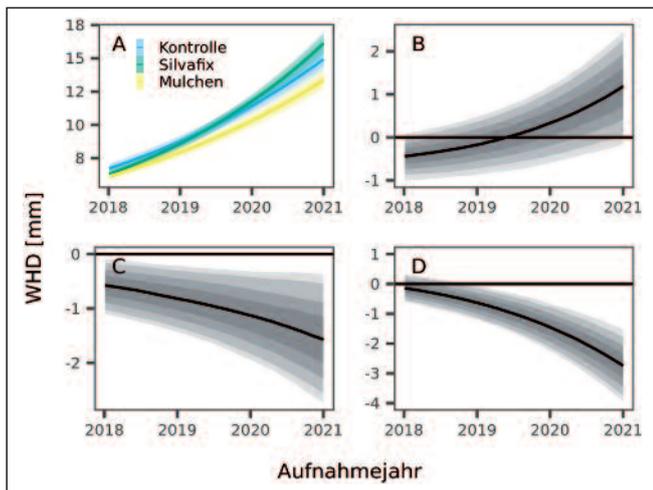


Abb. 11

Ergebnisse der Wurzelhalsdurchmesserentwicklung im Ostbraunschweigischen Flachland (A zeigt $E(Y_i|V_i)$, B zeigt $E(Y_i|V_i=Silvafix) - E(Y_i|V_i=Kontrolle)$, C zeigt $E(Y_i|V_i=Mulchen) - E(Y_i|V_i=Kontrolle)$, D zeigt $E(Y_i|V_i=Mulchen) - E(Y_i|V_i=Silvafix)$.
Results of shoot height development in the region of Ostbraunschweigisches Flachland.

kam einer Überlegenheit der Entwicklung des Wurzelhalsdurchmessers bei der Fräsvariante gegenüber dem Silvafix gleich. In zwei Fällen zeigten sich Wahrscheinlichkeiten von über 97,5%.

3.2.2 Wachstumsmodellierung Ostbraunschweigisches Flachland

Die Kontrolle zeigte gegenüber den Bodenbearbeitungsvarianten ein evident besseres Höhenwachstum (Teilabbildungen B und C) (Abbildung 10). In Teilabbil-

dung D zeigt sich ein evident besseres Höhenwachstum der Eichen nach der Silvafixbearbeitung gegenüber dem Mulchen.

Bei den Ergebnissen der Wurzelhalsdurchmesserentwicklung (Abbildung 11) zeigte sich ein anderes Bild als bei der Höhenentwicklung. Hier wiesen die Pflanzen mit der Silvafixbearbeitung die größten Zuwächse gegenüber der Kontrolle (Teilabbildung B) und der Mulchvariante (Teilabbildung D) auf. Gegenüber der Kontrolle waren die Pflanzen der Mulchvariante im Wurzelhalsdurchmesserzuwachs unterlegen (Teilabbildung C).

3.2.3 Wachstumsmodellierung Hoher Flämung

Teilabbildung A veranschaulicht das Modell (Abbildung 12), Teilabbildung B lässt ein evident besseres Höhenwachstum der Silvafixbearbeitung gegenüber der Streifenpflugbearbeitung erkennen.

Die Wurzelhalsdurchmessermodellierung (Abbildung 13) zeigte eine evident bessere Entwicklung nach Bearbeitung mit dem Silvafix als mit dem Streifenpflug.

4. DISKUSSION

4.1 Überlebenswahrscheinlichkeit

Die Ergebnisse der Überlebenswahrscheinlichkeiten im Hessischen Ried werden im Folgenden anhand der Wurzel- und Sprossgewichte, den Wurzel/Spross-Verhältnissen sowie den Ergebnissen der Engeringgrabung

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 3*) und auch einen sehr guten Anwuchs auf allen Parzellen nach der ersten Vegetationsperiode. Dies galt ebenso für die Herkünfte „Fulda“ und „Karben“. Die Herkünfte mit einem nicht so günstigen Wurzel/Spross-Verhältnis zeigten einen nicht so guten Anwuchs. Die Herkunft „Wolfgang“ mit dem ungünstigsten Wurzel/Spross-Verhältnis schnitt hingegen nicht am schlechtesten ab. Auf den bearbeiteten Flächen waren am wenigsten Ausfälle nach der ersten Vegetationsperiode, aufgrund der Begleitwuchsregulierung durch die Bodenbearbeitung und der dadurch besseren Bodenfeuchte (LÖF et al., 1998; ÖRLANDER et al., 1998). Die Entwicklungen nach der zweiten Vegetationsperiode zeigen ebenfalls eine Überlegenheit der bodenbearbeiteten Flächen, auch wenn die Ausfälle zugenommen haben. Nach der dritten Vegetationsperiode zeigen sich unerwartet hohe Ausfälle auf allem Parzellen, welche mit Vorsicht zu interpretieren sind. Neben den zum Teil erheblichen Mähschäden in der ersten und zweiten Vegetationsperiode auf der Kontrolle, wodurch es zu hohen Ausfällen gekommen war, wurde Engerlingsfraß auf der Fläche festgestellt. Die Ausführung der Bodenbearbeitungen hatte nach der Eiablage der E3 Stadien stattgefunden. Von daher scheint die Häufigkeit der Funde weitere unbekannte Ursachen zu haben, die nicht kausal mit der Bodenbearbeitung im Zusammenhang gebracht werden können.

Da durch das Fräsen der Begleitwuchs am effektivsten reduziert wurde, liegt die Vermutung nahe, dass sich dadurch der Engerlingsfraß auf die Eichenkultur konzentriert hat (HUITING et al., 2006) und Herkünfte mit geringen Wurzelbiomassen stärker in Mitleidenschaft gezogen wurden. Besonders auffällig war hier die Herkunft „Nidda“ mit dem absolut niedrigsten Wurzelgewicht (*Abbildung 2*) und den geringsten Ausfällen auf der gefrästen Parzelle sowie keinen Engerlingsfunden. Es ist wahrscheinlich, dass auf der Kontrollparzelle der üppige Begleitwuchs einer Fraßkonzentration auf die Kultur entgegenwirkte.

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

Die Überlebenswahrscheinlichkeiten sind im Ostbraunschweigischen Flachland mit über 70 % in allen Varianten akzeptabel und liegen geringfügig unter dem Rahmen von 75–100 %, welcher von LÖF et al. (2004) angegeben wird. Wie LÖF et al. (2004) zeigen konnten, führen die Bearbeitungen 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 Pflege vermieden werden können. Die deutlich geringeren Ausfälle bei dem Silva-fixverfahren sprechen für einen geringeren Begleit-

wuchs gegenüber der Mulchvariante und der Kontrolle. Das Mulchen konnte den Schlagabraum zerkleinern, aber eine langfristige Unterdrückung von Gräsern und Kräutern durch die oberflächennahe Arbeitsweise nicht gewährleisten.

Die Überlebenswahrscheinlichkeit von weniger als 5 % auf der Kontrollparzelle im Hohen Fläming kommt einem Totalausfall gleich und ist vermutlich ein Resultat aus zu geringer Bodenfeuchte und Prädation. Durch die geschlossene Vegetationsdecke konnte im Winter der Oberboden nicht durchfeuchtet und die Keimung der Eicheln wurde gehemmt. In einem Experiment unter Ausschluss von Prädation hat die Anzahl aufgelaufener Eicheln mit Zunahme der Vegetation abgenommen (DE LOMBAERDE et al., 2020). Von einem Totalausfall in eine Grasdecke gesäter Eicheln berichten auch ERDŐS et al. (2021). Die üppige Vegetation in der Krautschicht bietet Mäusen einen guten Lebensraum. Werden in diese nun noch Eicheln eingebracht, ist ein Verlust durch Mäuse unausweichlich. Saaten sind generell durch Mäuse gefährdet (BIRKEDAL et al., 2009). Es konnte nachgewiesen werden, dass mit Zunahme des Flächenbewuchses die Prädation durch Mäuse zunimmt (VILLALOBOS et al., 2020). Der gute Anwuchs in den bearbeiteten Varianten von über 70 % liegt im oberen Bereich im Vergleich zu Angaben aus der Literatur. LÖF et al. (2021) konnten lediglich eine Überlebensrate von 25 % feststellen. DE LOMBAERDE et al. (2020) geben eine Überlebensrate von 50 % nach zwei Jahren an und LÖF et al. (2004) berichten von 50–90 % lebenden Eichen nach vier Jahren. Empfehlungen anderer Autoren für eine gelungene Saat sind eine Durchführung unter Schirm für einen geringen Begleitwuchs (FLEDER, 1981), eine geringe Saattiefe für ein schnelles Auflaufen, aber nicht oberflächlich als Schutz vor Fraß (BIRKEDAL et al., 2010; NILSSON et al., 1996b; RÖHRIG, 1976), eine Saat im Frühjahr (Löf und BIRKEDAL, 2009; RUMPF, 2007) und das Entfernen von Schlagabraum und Bewuchs zur Reduzierung der Prädation von Eicheln (BIRKEDAL et al., 2010). PREUHLER et al. (1994) geben für eine Eichensaart von 380 kg/ha in Frässtreifen unter Kieferschirm nach 3 Jahren eine Anzahl von 19.000 Eichensämlingen an. Trotz der im Vergleich hier um 60 % geringeren Saatmenge werden diese Werte lediglich um 25 % in den bearbeiteten Parzellen unterschritten. Zudem wird mit einem Auflaufen von Kiefernaturverjüngung gerechnet, welche hier nicht Gegenstand der Untersuchung war, aber Sämlingsdichten von über 30.000 Pflanzen/ha annehmen können (PREUHLER et al., 1994), so dass ein früher Bestandesschluss für eine gute Qualitätsentwicklung der Eiche (AMMER und DINGEL, 1997) gewährleistet ist.

4.2 Höhenentwicklung

Fünf von sechs Herkünften zeigen einen deutlichen Vorteil der Bodenbearbeitungsvarianten für den Höhenzuwachs gegenüber der Kontrolle im Hessischem Ried. Dies wird auf eine geringere Konkurrenz durch Begleitwuchs zurückgeführt, welche von anderen Autoren bestätigt wird (LÜPKE, 1982) und auch für andere Baumarten gezeigt werden konnte (COLL et al., 2004; DINGER und ROSE, 2009; MASON et al., 2007; NILSSON et al.,

1996a; ROSE und ROSNER, 2005). JENSEN et al. (2012) haben eine sehr flexible Reaktion der Eiche auf Umweltbedingungen nachweisen können, wonach durch Konkurrenz der Höhenzuwachs weniger stark beeinflusst wird als der Biomassezuwachs. Nach JENSEN und LÖF (2017) spiegelt sich dieser Effekt in einem ähnlichen Höhenwachstum unter Konkurrenzbedingungen aber monopodialeren Pflanzen wider.

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

Es scheint, dass das Wachstum gesäter Eichen von einer intensiveren Bodenbearbeitung profitiert. Dies bestätigen auch andere Autoren, die einen positiven Effekt auf das Wachstum gesäter Eichen durch Bodenbearbeitung und Begleitwuchsregulierung nachweisen (Löf et al., 2004; LÖF und BIRKEDAL, 2009; NILSSON et al., 1996b). Die von uns beobachteten Höhen von ca. 10 cm nach einer Vegetationsperiode liegen unter denen von anderen Autoren ermittelten Werte von 13–40 cm in Abhängigkeit von Lichtgenuss und Bodenfeuchte (DEVETAKOVIĆ et al., 2019; ERDŐS et al., 2021; VAN HEES, 1997). Mit Abnahme des Lichtangebotes und der Bodenfeuchte nimmt auch das Höhenwachstum ab (VAN HEES, 1997). Somit sind die hier ermittelten Werte plausibel, da es zum einen sehr trockene Jahre waren und zum anderen die Saat unter Schirm ausgeführt wurde. Das Wachstum in den Folgejahren verläuft moderat. Nach drei Wuchsperioden gibt RUMPF (2007) eine Höhe von ca. 30 cm im Median nach Streifenpflugbearbeitung an. Dieser Wert liegt ca. 10 cm über den hier gemessenen Werten. ERDŐS et al. (2021) konnten nur ein geringes Höhenwachstum bis zum Ende der vierten Vegetationsperiode von ca. 17 cm nachweisen. PREUHLER et al. (1994) beobachteten bei zwei Drittel aller Pflanzen nach 3 Jahren eine Höhe von unter 25 cm und begründen dies mit einem verstärkten Wurzelwachstum bei Eichen im Sämlingsstadium.

4.3 Wurzelhalsdurchmesserentwicklung

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

Auf den Parzellen mit Bodenbearbeitung im Hessischen Ried konnte gegenüber der Kontrolle ein besseres Durchmesserwachstum beobachtet werden. Die Bodenbearbeitung in beiden Verfahren lockert den Oberboden und beseitigt die Konkurrenzvegetation. Hierdurch ist eine gute Ausführung der Pflanzung gewährleistet und

die Pflanzen können den Boden leichter erschließen. Auf der Kontrollparzelle minderte die Konkurrenzvegetation – im überwiegenden Spätblühende Traubenkirsche – das Durchmesserwachstum, welches mit geringeren Wurzelmassen einhergeht (ANDERSEN, 2004). Ein den Bodenbearbeitungsverfahren überlegenes Durchmesserwachstum kann bei keiner der Herkünfte auf der Kontrollparzelle festgestellt werden. Die Bodenlockerung wird nicht als Hauptkriterium der Überlegenheit im Wachstum angesehen, da sandiges Ausgangssubstrat nicht verdichtungsempfindlich ist, eher wirkt ein Effekt der Konkurrenzreduktion. Unter Ausschluss von Vegetation konnte LÜPKE (1982) nach vier Vegetationsperioden einen fast doppelt so großen Wurzelhalsdurchmesser ermitteln wie mit Vegetationseinfluss. JENSEN und LÖF (2017) bestätigen die Beobachtung, dass besonders bei baumartiger Konkurrenz das Wachstum des Wurzelhalsdurchmessers frühzeitig nachlässt.

Aus der Beziehung zwischen Wurzelmasse und Wurzelhalsdurchmesser wird nach DASSOT und COLLET (2021) für den Standort des Ostbraunschweigischen Flachlands deutlich, dass die Mulchbearbeitung die schlechteste Wurzelentwicklung aufweist. Dies kann vielerlei Gründe haben. Einerseits durch Bodenverdichtungen aufgrund der ganzflächigen Befahrung während des Mulchens, andererseits durch eine schlechtere Pflanzung aufgrund der Mulchaufgabe. Indessen zeigt die Variante, bei der der Mineralboden durch den Silvafix aufgelockert wurde, das beste Wurzelhalsdurchmesserwachstum. Durch das Auflockern können die Pflanzen den Boden leichter erschließen und ein größeres Wurzelsystem ausbilden (DASSOT und COLLET, 2021). Vermutlich wirken beide Effekte, da die Werte der Kontrollvariante zwischen den beiden Varianten liegen.

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

5. SCHLUSSFOLGERUNG

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

res Ergebnis. Das Fräsen erbringt, als intensiveres Bearbeitungsverfahren, bei der konkurrenzstarken Begleitvegetation eine bessere Wirkung als das Silvafixverfahren. Hieraus kann geschlussfolgert werden, dass mit zunehmender Konkurrenzkraft der Begleitvegetation auch zunehmend intensivere Bearbeitungsverfahren zu wählen sind. Der kontraproduktiven Wirkung der Bodenbearbeitung auf den Einfluss von Fraßschäden durch Engerlinge an Kulturen könnte durch eine Ein-saat einer Nutzpflanzendecke entgegengewirkt werden, wodurch ein größeres Nahrungsangebot geschaffen wird und ein konzentrierter Fraß an den Kulturen vermindert werden könnte. Entsprechende Versuche sind hierzu durchzuführen. Da Bodenbearbeitungen im Wald einen erheblichen Eingriff in das Ökosystem darstellen, sind weitere Untersuchungen der Wirkungen von Bodenbearbeitungen wie z. B. auf den Nährstoffhaushalt oder die Mikrobiologie durchzuführen. Darüber hinaus unterscheiden sich die Bodenbearbeitungsverfahren in ihren Kosten. Eine ökonomische Bewertung der Verfahren bis zur Kultursicherung steht aus.

6. DANKSAGUNG

Wir bedanken uns für die Finanzierung des Projektes „ABoNae – Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf den Nährstoffhaushalt von Waldböden sowie den Erfolg von Eichenkulturen“ bei der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Förderkennzeichen: 22001817). Darüber hinaus danken wir NIKOLAS VON LÜPKE sowie zwei anonymen Gutachtern für ihre wertvollen Hinweise und Kommentare.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Bodenbearbeitungen werden zur erfolgreichen Begründung von Eichenkulturen aus forstpraktischer Sicht als notwendig erachtet, aus Gründen des Bodenschutzes hingegen kritisch gesehen. In drei Regionen mit einem Schwerpunkt auf den Eichenanbau (Hessisches Ried, Hoher Fläming, Ostbraunschweigesches Flachland) wurden unterschiedliche Bodenbearbeitungsverfahren (Silvafix [spezielles baggergestütztes Verfahren] und die drei Regionalverfahren Streifenpflug, Fräsen, Mulchen) hinsichtlich ihrer Wirkung auf Kulturmaßnahmen untersucht. Neben den Ausfällen wurden die Höhen- und Wurzelhalsdurchmesser aufgenommen. Eine Analyse der Überlebenszeiten und Wachstumsparameter ist unter Bildung bayesianischer Regressionsmodelle erfolgt. Saaten in vergrasteten Beständen des Hohen Flämings ohne Bodenbearbeitung sind komplett ausgefallen, mit Bodenbearbeitung hingegen gelungen. In Beständen mit geringer Konkurrenz durch Begleitwuchs (Ostbraunschweigesches Flachland) war der Anwuchs gepflanzter Eichen auch ohne Bodenbearbeitung zufriedenstellend, hingegen scheint eine Bodenbearbeitung in Beständen mit einer konkurrenzstarken Begleitvegetation (Hessisches Ried) als zwingend notwendig, da ansonsten hohe Ausfälle (auch durch Pflegeaktivitäten) zu erwarten sind. Die Kulturen der mit dem Silvafix verglichenen Regionalverfahren Fräse und Streifenpflug zeigen ähnlich gute Entwicklungen, lediglich das Mulchverfahren führt zu schlechteren Ergebnis-

sen als der Silvafix. Die Ergebnisse werden auch hinsichtlich biotischer Schadeinflüsse diskutiert. Es wird geschlussfolgert, dass das Silvafixverfahren als Alternative gegenüber den Regionalverfahren hinsichtlich der Kulturentwicklung gelten kann, allerdings sind weitere Untersuchungen bezüglich bodenkundlicher und ökonomischer Fragestellungen durchzuführen. Im Allgemeinen sind mit zunehmender Konkurrenzkraft des Begleitwuchses intensivere Bodenbearbeitungsverfahren zu wählen, um einen sicheren Anwuchs von gesäten und gepflanzten Eichen zu gewährleisten.

8. ABSTRACT

Title of the paper: *Initial development of oak after soil preparation in Germany.*

Soil preparation is considered necessary for the successful establishment of oak stands from a forestry practical point of view, but is viewed critically for soil protection reasons. In three regions with a focus on oak cultivation (Hessisches Ried, Hoher Fläming, Ostbraunschweigesches Flachland), different tillage methods (Silvafix [special slash removal method by excavator] and the three regional methods strip ploughing, milling, mulching) were investigated with regard to their effect on stand establishment. In addition to survival time, the height and root collar diameters were measured. The survival probability and growth parameters were analysed using Bayesian regression models. Seeds in grassy stands of the High Fläming without soil preparation failed completely, but with soil preparation they succeeded. In stands with low competition from associated vegetation (Ostbraunschweigesches Flachland), the growth of planted oaks was satisfactory even without soil preparation, whereas soil preparation in stands with highly competitive associated vegetation (Hessisches Ried) seems to be absolutely necessary, as otherwise high failures (also due to mowing activities) are expected. The young oak stands of the regional soil preparation method by milling and strip ploughing show similarly good developments in comparison to Silvafix, only the mulching method leads to worse results than Silvafix. The results are also discussed in terms of biotic damage influences. It is concluded that the Silvafix method can be considered a well performing alternative to the regional methods with regard to stand development, but further investigations are to be carried out with regard to soil science and economic issues. In general, with increasing competitive vigour of the associated growth, more intensive tillage methods have to be chosen to ensure a successful establishment of sown and planted oaks.

9. RÉSUMÉ

Titre de l'article: *Développement initial des cultures de chênes après travail du sol en Allemagne.*

Les travaux du sol sont considérés comme nécessaires à la réussite des créations de cultures de chênes du point de vue de la pratique forestière, mais ils sont critiqués pour des raisons de protection des sols. Dans trois régions axées sur la culture du chêne (Ried hessois, Haut flamain, Plaine du Brunswick oriental), différentes

méthodes de travail du sol (Silvafix [méthode spéciale à l'aide d'une pelleteuse] et les trois méthodes régionales de labour en bandes, fraissage, mulching) ont été étudiées pour leur impact sur les modes de culture. Outre les pertes, les diamètres en hauteur et au collet racinaire ont été relevés. Une analyse des temps de survie et des paramètres de croissance a été effectuée à l'aide de modèles de régression linéaire bayésienne. Les semis dans les peuplements enherbés du Haut flamain sans travail du sol ont complètement échoué, alors que ceux avec travail du sol ont réussi. Dans les peuplements avec une faible concurrence avec une végétation d'accompagnement (Plaine du Brunswick oriental), la croissance des chênes plantés a été satisfaisante même sans travail du sol, alors que dans les peuplements où la concurrence de la végétation d'accompagnement est forte (Ried hessois), le travail du sol semble indispensable, car sinon il faut s'attendre à des pertes importantes (également dues aux activités d'entretien). Les cultures issues de méthodes régionales de fraissage et de labour en bandes comparées à celles du Silvafix présentent des évolutions similaires, seul le mulching donne de moins bons résultats que le Silvafix. Les résultats sont également discutés en ce qui concerne l'influence biotique des dommages. On en conclut que le procédé Silvafix peut être considéré comme une alternative aux procédés régionaux en ce qui concerne le développement des cultures, mais que des études supplémentaires doivent être menées sur les questions pédologiques et économiques. En général, il convient de choisir des méthodes de travail du sol plus intensives au fur et à mesure que la concurrence de la végétation d'accompagnement augmente, afin de garantir une croissance sûre des chênes semés et plantés.

10. LITERATURVERZEICHNIS

- ALBRECHT, A., M. HANEWINKEL, J. BAUHUS 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): S. 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): S. 5–13.
- AMMER, C. und C. DINGEL (1997): Untersuchungen über den Einfluß starker Weichlaubholzkonkurrenz auf das Wachstum und die Qualität junger Stieleichen. *In: Forstwissenschaftliches Centralblatt* **116** (1–6): S. 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): S. 37–47.
- ARNOLD, J. B. (2021): ggthemes: Extra Themes, Scales and Geoms for „ggplot2“. Internet: <https://CRAN.R-project.org/package=ggthemes>.
- AUGUIE, B. (2017): gridExtra: Miscellaneous Functions for „Grid“ Graphics. Internet: <https://CRAN.R-project.org/package=gridExtra>.
- 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): S. 882–889.
- 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): S. 261–269.
- BEHRNDT, W. (1979): Eichenkulturen und Bodenbearbeitung im Forstamt Görzde. *In: AFZ, Allgemeine Forst Zeitschrift* **34** (13): S. 309–313.
- BEHRNDT, W. (1969): Großmaschinen in der Schlag- abraumbeseitigung. *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): S. 104–108.
- 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): S. 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): S. 2382–2389.
- 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.
- BÜRKNER, P.-C. (2018): Advanced Bayesian Multilevel Modeling with the R Package brms. *In: The R Journal* **10** (1): S. 395.
- BÜRKNER, P.-C. (2017): brms: An Package for Bayesian Multilevel Models Using Stan. *In: Journal of Statistical Software* **80** (1). Internet: <http://www.jstatsoft.org/v80/i01/> (26.03.2020).
- 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**: S. 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). Internet: <http://www.jstatsoft.org/v76/i01/> (26.03.2020).
- COLL, L., P. BALANDIER und C. PICON-COCHARD (2004): Morphological and physiological responses of beech (*Fagus sylvatica*) seedlings to grass-induced below-ground competition. *In: Tree Physiology* **24** (1): S. 45–54.
- 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): S. 17–30.
- DAVIS, A. S. und D. F. JACOBS (2005): Quantifying root system quality of nursery seedlings and relationship to out-planting performance. *In: New Forests* **30** (2–3): S. 295–311.
- DE LOMBAERDE, E., H. BLONDEEL, L. BAETEN, D. LANDUYT, M. P. PERRING, L. DEPAUW, S. L. MAES, B. WANG und K.

- VERHEYEN (2020): Light, temperature and understorey cover predominantly affect early life stages of tree seedlings in a multifactorial mesocosm experiment. *In: Forest Ecology and Management* **461**: 117907.
- DEVETAKOVIĆ, J., M. NONIĆ, B. PROKIĆ, V. POPOVIĆ und M. ŠLJAČIĆ-NIKOLIĆ (2019): Acorn size influence on the quality of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) one-year old seedlings. *In: Reforesta* (8). Internet: <http://journal.reforestationchallenges.org/index.php/REFOR/article/view/115> (29.11.2021).
- DINGER, E. J. und R. ROSE (2009): Integration of soil moisture, xylem water potential, and fall–spring herbicide treatments to achieve the maximum growth response in newly planted Douglas-fir seedlings. *In: Canadian Journal of Forest Research* **39** (7): S. 1401–1414.
- ENDRES, G. (1901): Über Eichen-Nachzucht im kgl. bayr. Forstamte Rohrbrunn (Spessart). *In: Forstwissenschaftliches Centralblatt* **23** (6): S. 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 seeding and watering experiment. *In: European Journal of Forest Research*. Internet: <http://link.springer.com/10.1007/s10342-020-01344-x> (27.03.2021).
- FLEDER, W. (1981): Begründung von Werteichenbeständen durch Saat. *In: Forst und Holzwirt* **36** (12): S. 275–277.
- FSC DEUTSCHLAND UND VEREIN FÜR VERANTWORTUNGSVOLLE WALDWIRTSCHAFT E.V. (2018): Deutscher FSC-Standard 3.0. Freiburg (Brsg.).
- 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): S. 107–117.
- HANSEN, K. H., A. GRANHUS, F. H. BRÆKKE und O. HAVERAAEN (2003): Performance of Sown and Naturally Regenerated *Picea abies* Seedlings Under Different Scarification and Harvesting Regimens. *In: Scandinavian Journal of Forest Research* **18** (4): S. 351–361.
- 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): S. 9–18.
- 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): S. 80–85.
- 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.
- IMMLER, T. (2006): Wenn Maikäfer zur Plage werden. *In: LWF aktuell* **54**: S. 48–49.
- 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): S. 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**: S. 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**: S. 176–183.
- KENK, G. K. (1993): New perspectives in German oak silviculture. *In: Annales des Sciences Forestières* **50** (6): S. 563–570.
- KLEIN, J. P. und M. L. MOESCHBERGER (2003): Survival analysis: techniques for censored and truncated data. Statistics for biology and health. New York.
- KRAHL-URBAN, J. (1952): Die maximale Wertholzleistungsfähigkeit in Eichenbeständen. *In: Forstwissenschaftliches Centralblatt* **71** (5–6): S. 141–151.
- KRAMER, W. (1978): Mechanische Bodenbearbeitung oder chemische Behandlung bei der Begründung von Kulturen im Forstamt Syke. *In: Allg. Forst Zeitschr* **33**: S. 456–461.
- 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**: S. 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): S. 164–178.
- LEMOINE, N. P. (2019): Moving beyond noninformative priors: why and how to choose weakly informative priors in Bayesian analyses. *In: Oikos* **128** (7): S. 912–928.
- LÖF, M., J. BARRERE, M. ENGMAN, L. K. PETERSSON und A. VILLALOBOS (2021): The influence of fencing on seedling establishment during reforestation of oak stands: a comparison of artificial and natural regeneration techniques including costs. *In: European Journal of Forest Research*. Internet: <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01369-w>.
- LÖF, M. und M. BIRKEDAL (2009): Direct seeding of *Quercus robur* L. for reforestation: The influence of mechanical site preparation and sowing date on early growth of seedlings. *In: Forest Ecology and Management* **258** (5): S. 704–711.
- LÖF, M., J. BRUNET, A. FILYUSHKINA, M. LINDBLADH, J. P. SKOVGAARD 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): S. 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): S. 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): S. 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): S. 19–25.
- LÖF, M., A. THOMSEN und P. MADSEN (2004): Sowing and transplanting of broadleaves (*Fagus sylvatica* L., *Quercus robur* L., *Prunus avium* L. and *Crataegus monogyna* Jacq.) for afforestation of farmland. *In: Forest Ecology and Management* **188** (1–3): S. 113–123.

- 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): S. 101–110.
- LÜPKE, B. VON (1982): Versuche zur Einbringung von Lärche und Eiche in Buchenbestände. Band 74. Frankfurt a.M.
- 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): S. 795–805.
- MCÉLREATH, R. (2015): Statistical rethinking: a Bayesian course with examples in R. *In: Stan R and stan*, 1st ed. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC.
- 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): S. 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): S. 49.
- MORTZFELDT (1896): Über horstweisen Vorverjüngungsbetrieb. *In: Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen* **28** (1): S. 2–31.
- 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).
- NILSSON, U., P. GEMMEL und J. HALLGREN (1996a): Competing vegetation effects on initial growth of planted *Picea abies*. *In: New Zealand J. For. Sci.* **1–2**.
- NILSSON, U., P. GEMMEL, M. LÖF und T. WELANDER (1996b): Germination and early growth of sown *Quercus robur* L. in relation to soil preparation, sowing depths and prevention against predation. *In: New Forests* **12** (1): S. 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): S. 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): S. 356–363.
- NWALDLG (2020): Niedersächsisches Gesetz über den Wald und die Landschaftsordnung.
- ÖRLANDER, G., G. HALLSBY, P. GEMMEL und C. WILHELMS-SON (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): S. 160–168.
- 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.
- 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): S. 2–22.
- PREUHSNER, T., S. KÜHNEL und K. BOCK (1994): Zum Wachstum von Eichensaat unter Kieferschirm im Forstamt Nürnberg. *In: Forst und Holz* **49** (5): S. 123–128.
- R CORE TEAM (2021): R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria. Internet: <https://www.R-project.org/>.
- RANIUS, T., P. H. 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): S. 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): S. 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): S. 653–662.
- RIPKEN, H. (1979): Rationalisierte Eichensaatverfahren in den Niedersächsischen Landesforsten. *In: AFZ* **34**: S. 314–317.
- RIPKEN, H. (1973): Zum Anbau und Kulturverfahren der Eiche auf wertholztauglichen Standorten Nordniedersachsens. *In: Forst und Holzwirt* **32** (5): S. 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): S. 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): S. 481–492.
- RUMPF, H. (2007): Erste Ergebnisse eines Freisaatversuches mit Traubeneiche im Nordwestdeutschen Flachland. *In: Forst und Holz*, 62. Jg. (3): S. 13–18.
- 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): S. 1636–1652.
- 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).
- SIKSTRÖM, U., K. HJELM, K. HOLT HANSSON, T. SAKSA und K. WALLERTZ (2020): Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in Fennoscandia – a review. *In: Silva Fennica* **54** (2). Internet: <https://www.silvafennica.fi/article/10172> (08.04.2020).
- SSYMAN, A. (2016): Biodiversität und Naturschutz in Eichen-Lebensraumtypen. *In: AFZ-DerWald* **71** (20): S. 10–13.
- STRUCK, G. (1999): Effekte von Pflanzverband, Kulturdüngung und Schlagräumung am Beispiel junger Traubeneichenbestände. Band 8. Göttingen.

SUTTON, R. F. (1993): Mounding site preparation: A review of European and North American experience. *In: New Forests* **7** (2): S. 151–192.

THÜNEN-INSTITUT (2014): Dritte Bundeswaldinventur – Ergebnisdatenbank. Internet: <https://bwi.info> (11.01.2022).

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.

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): S. 553–562.

WALD UND HOLZ NRW (Hrsg.) (2014): Empfehlungen zur naturnahen Bewirtschaftung von Stiel- und Traubeneichenbeständen in Nordrhein-Westfalen.

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): S. 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): S. 71–78.

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.

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**: S. 98–112.

11. ANHANG

Ergebnisse der Modellschätzung

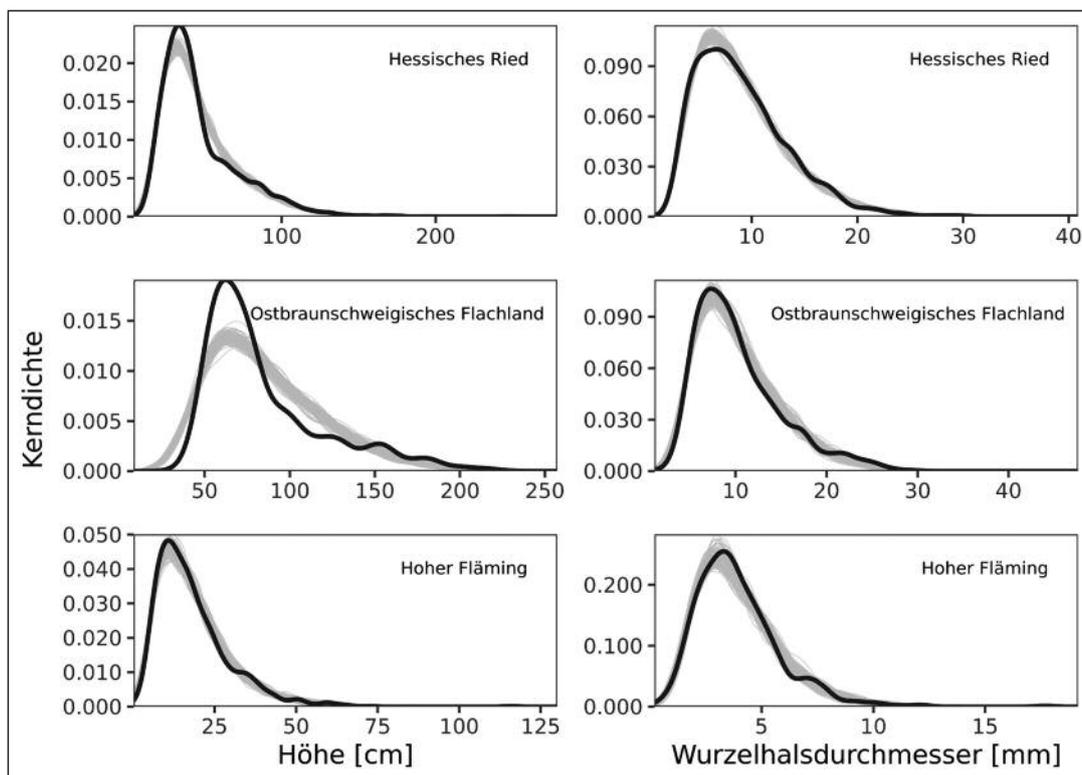


Abb. 14

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 $\tilde{y}_i^{(s)}$, $i = 1, \dots, n$ (zufällige Ziehungen aus den voll spezifizierten Weibullverteilungen) basierend auf den Kovariablenwerten x_i .

Visualisation of the posterior predictive check for each of the height and root collar diameter models. Shown in each case is a kernel density estimate of the measured data y_i (black), and for 100 randomly selected samples s from the posterior in each case a kernel density estimate (grey) for simulated predictions $\tilde{y}_i^{(s)}$, $i = 1, \dots, n$ (random draws from the fully specified Weibull distributions) based on the covariate values x_i .

Tab. 11

Erwartungswerte und 95% Kreditabilitätsintervalle (Werte in eckigen Klammern) der Parameter-spezifischen Posteriori-Verteilungen in der Überlebenszeitmodellierung für das Hessische Ried.

Expectation values and 95% credibility intervals (values in brackets) of parameter-specific posterior-distributions for the survival time model for the region of Hessisches Ried.

Parameter	Posteriori
$\beta_{\mu,0}$	1,10 [0,79; 1,49]
$\beta_{\mu,V\text{Silvafix}}$	0,52 [0,08; 0,96]
$\beta_{\mu,V\text{Fräse}}$	0,32 [-0,10; 0,70]
$\beta_{\mu,II\text{Nidda}}$	-0,09 [-0,58; 0,41]
$\beta_{\mu,II\text{Spessart}}$	0,58 [-0,13; 1,48]
$\beta_{\mu,II\text{Karben}}$	0,69 [0,12; 1,35]
$\beta_{\mu,II\text{Dieburg}}$	1,19 [0,54; 1,96]
$\beta_{\mu,II\text{Wolfgang}}$	0,99 [0,29; 1,90]
$\beta_{\mu,V\text{Silvafix},II\text{Nidda}}$	-0,56 [-1,12; -0,03]
$\beta_{\mu,V\text{Fräse},II\text{Nidda}}$	0,36 [-0,19; 0,88]
$\beta_{\mu,V\text{Silvafix},II\text{Spessart}}$	-0,56 [-1,40; 0,22]
$\beta_{\mu,V\text{Fräse},II\text{Spessart}}$	-0,61 [-1,48; 0,13]
$\beta_{\mu,V\text{Silvafix},II\text{Karben}}$	-1,07 [-1,76; -0,46]
$\beta_{\mu,V\text{Fräse},II\text{Karben}}$	-0,89 [-1,56; -0,32]
$\beta_{\mu,V\text{Silvafix},II\text{Dieburg}}$	-1,62 [-2,39; -0,96]
$\beta_{\mu,V\text{Fräse},II\text{Dieburg}}$	-1,70 [-2,47; -1,03]
$\beta_{\mu,V\text{Silvafix},II\text{Wolfgang}}$	-0,89 [-1,75; -0,13]
$\beta_{\mu,V\text{Fräse},II\text{Wolfgang}}$	-1,10 [-2,02; -0,43]
$\beta_{\text{shape},0}$	0,07 [-0,21; 0,35]
$\beta_{\text{shape},V\text{Silvafix}}$	0,63 [0,39; 0,87]
$\beta_{\text{shape},V\text{Fräse}}$	0,81 [0,57; 1,06]
$\beta_{\text{shape},II\text{Nidda}}$	-0,12 [-0,48; 0,22]
$\beta_{\text{shape},II\text{Spessart}}$	-0,60 [-0,97; -0,26]
$\beta_{\text{shape},II\text{Karben}}$	0,01 [-0,35; 0,38]
$\beta_{\text{shape},II\text{Dieburg}}$	0,11 [-0,23; 0,46]
$\beta_{\text{shape},II\text{Wolfgang}}$	-0,31 [-0,67; 0,06]

Tab. 12

Erwartungswerte und 95% Kreditabilitätsintervalle (Werte in eckigen Klammern) der Parameter-spezifischen Posteriori-Verteilungen in der Überlebenszeitmodellierung für das Ostbraunschweigische Flachland.

Expectation values and 95% credibility intervals (values in brackets) of parameter-specific posterior-distributions for the survival time model for the region of Ostbraunschweigisches Flachland.

Parameter	Posteriori (Höhen-Modell)	Posteriori (WHD-Modell)
$\beta_{\mu,0}$	4,02 [3,98; 4,07]	1,90 [1,85; 1,96]
$\beta_{\mu,V\text{Silvafix}}$	-0,03 [-0,10; 0,03]	-0,07 [-0,15; 0,01]
$\beta_{\mu,V\text{Muldchen}}$	0,02 [-0,04; 0,08]	-0,09 [-0,17; -0,01]
$\beta_{\mu,Z}$	0,29 [0,27; 0,31]	0,27 [0,25; 0,28]
$\beta_{\mu,V\text{Silvafix},Z}$	-0,02 [-0,04; 0,04]	0,05 [0,02; 0,07]
$\beta_{\mu,V\text{Muldchen},Z}$	-0,07 [-0,09; -0,05]	-0,01 [-0,03; 0,02]
$\gamma_{\mu,m}$	0,16 [0,14; 0,18]	0,23 [0,20; 0,25]
shape	6,32 [5,95; 6,69]	6,50 [6,12; 6,89]

Tab. 13

Erwartungswerte und 95% Kreditabilitätsintervalle (Werte in eckigen Klammern) der Parameter-spezifischen Posteriori-Verteilungen in der Überlebenszeitmodellierung für den Hohen Fläming.

Expectation values and 95% credibility intervals (values in brackets) of parameter-specific posterior-distributions for the survival time model for the region of Hoher Fläming.

Parameter	Posteriori
$\beta_{\mu,0}$	-1,12 [-1,35; -0,89]
$\beta_{\mu,V\text{Silvafix}}$	6,63 [5,16; 8,65]
$\beta_{\mu,V\text{Streijsenputz}}$	6,73 [5,00; 8,98]
$\beta_{\text{shape},0}$	-0,27 [-0,40; -0,13]
$\beta_{\text{shape},V\text{Silvafix}}$	-0,76 [-1,04; -0,49]
$\beta_{\text{shape},V\text{Streijsenputz}}$	-0,67 [-1,01; -0,35]

Tab. 14

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

Expectation values and 95% credibility intervals (values in brackets) of parameter-specific posterior-distributions for height and root collar growth models for the region of Hessisches Ried.

Parameter	Posteriori (Höhen-Modell)	Posteriori (WHD-Modell)
$\beta_{\mu,0}$	3,24 [3,16; 3,32]	1,57 [1,50; 1,64]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix}}$	-0,03 [-0,14; 0,09]	-0,05 [-0,05; 0,15]
$\beta_{\mu,V_{Frzsc}}$	-0,10 [-0,22; 0,01]	-0,04 [-0,14; 0,06]
$\beta_{\mu,H_{Nata}}$	0,30 [0,19; 0,41]	0,03 [-0,08; 0,13]
$\beta_{\mu,H_{Speckart}}$	0,37 [0,26; 0,48]	0,17 [0,06; 0,27]
$\beta_{\mu,H_{Karben}}$	0,20 [0,08; 0,31]	0,41 [0,31; 0,51]
$\beta_{\mu,H_{Ueburg}}$	-0,13 [-0,24; -0,02]	-0,05 [-0,16; 0,05]
$\beta_{\mu,H_{Wolfgang}}$	0,99 [0,88; 1,10]	0,52 [0,42; 0,61]
$\beta_{\mu,z}$	0,17 [0,14; 0,21]	0,27 [0,24; 0,31]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix} \cdot H_{Nata}}$	0,03 [-0,13; 0,19]	-0,03 [-0,17; 0,12]
$\beta_{\mu,V_{Frzsc} \cdot H_{Nata}}$	0,06 [-0,10; 0,22]	0,01 [-0,13; 0,15]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix} \cdot H_{Speckart}}$	-0,05 [-0,22; 0,10]	-0,04 [-0,19; 0,10]
$\beta_{\mu,V_{Frzsc} \cdot H_{Speckart}}$	-0,01 [-0,17; 0,14]	0,03 [-0,12; 0,17]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix} \cdot H_{Karben}}$	0,21 [0,04; 0,37]	0,10 [-0,04; 0,24]
$\beta_{\mu,V_{Frzsc} \cdot H_{Karben}}$	0,27 [0,12; 0,43]	0,17 [0,04; 0,32]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix} \cdot H_{Ueburg}}$	0,02 [-0,13; 0,18]	-0,12 [-0,26; 0,04]
$\beta_{\mu,V_{Frzsc} \cdot H_{Ueburg}}$	0,17 [0,01; 0,32]	0,03 [-0,11; 0,17]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix} \cdot H_{Wolfgang}}$	0,11 [-0,05; 0,27]	-0,05 [-0,19; 0,09]
$\beta_{\mu,V_{Frzsc} \cdot H_{Wolfgang}}$	0,12 [-0,03; 0,27]	0,07 [-0,06; 0,21]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix} \cdot z}$	0,02 [-0,02; 0,06]	0,00 [-0,04; 0,04]
$\beta_{\mu,V_{Frzsc} \cdot z}$	0,06 [0,01; 0,10]	0,02 [-0,02; 0,07]
$\beta_{\mu,H_{Nata} \cdot z}$	-0,06 [-0,11; -0,01]	0,03 [-0,02; 0,07]
$\beta_{\mu,H_{Speckart} \cdot z}$	-0,13 [-0,17; -0,09]	-0,08 [-0,12; -0,03]
$\beta_{\mu,H_{Karben} \cdot z}$	-0,00 [-0,04; 0,04]	-0,07 [-0,11; -0,03]
$\beta_{\mu,H_{Ueburg} \cdot z}$	0,14 [0,11; 0,18]	0,05 [0,01; 0,09]
$\beta_{\mu,H_{Wolfgang} \cdot z}$	-0,11 [-0,15; -0,07]	-0,09 [-0,14; -0,05]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix} \cdot H_{Nata} \cdot z}$	-0,08 [-0,14; -0,02]	-0,06 [-0,13; 0,01]
$\beta_{\mu,V_{Frzsc} \cdot H_{Nata} \cdot z}$	-0,01 [-0,07; 0,05]	-0,02 [-0,08; 0,04]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix} \cdot H_{Speckart} \cdot z}$	0,08 [0,02; 0,14]	0,06 [0,01; 0,13]
$\beta_{\mu,V_{Frzsc} \cdot H_{Speckart} \cdot z}$	0,07 [0,01; 0,14]	0,06 [0,00; 0,13]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix} \cdot H_{Karben} \cdot z}$	-0,02 [-0,08; 0,03]	0,02 [-0,04; 0,08]
$\beta_{\mu,V_{Frzsc} \cdot H_{Karben} \cdot z}$	0,02 [-0,04; 0,08]	0,04 [-0,02; 0,11]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix} \cdot H_{Ueburg} \cdot z}$	-0,16 [-0,21; -0,10]	0,00 [-0,06; 0,06]
$\beta_{\mu,V_{Frzsc} \cdot H_{Ueburg} \cdot z}$	-0,26 [-0,32; -0,20]	-0,00 [-0,07; 0,06]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix} \cdot H_{Wolfgang} \cdot z}$	-0,03 [-0,08; 0,03]	0,07 [0,02; 0,12]
$\beta_{\mu,V_{Frzsc} \cdot H_{Wolfgang} \cdot z}$	-0,05 [-0,11; 0,01]	0,05 [-0,01; 0,12]
$\gamma_{\mu,m}$	0,26 [0,24; 0,27]	0,22 [0,21; 0,23]
<i>shape</i>	5,64 [5,44; 5,84]	6,41 [6,19; 6,63]

Tab. 15

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

Expectation values and 95% credibility intervals (values in brackets) of parameter-specific posterior-distributions for height and root collar growth models for the region of Ostbraunschweigisches Flachland.

Parameter	Posteriori (Höhen-Modell)	Posteriori (WHD-Modell)
$\beta_{\mu,0}$	4,02 [3,98; 4,07]	1,90 [1,85; 1,96]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix}}$	-0,03 [-0,10; 0,03]	-0,07 [-0,15; 0,01]
$\beta_{\mu,V_{Mulg \cdot hen}}$	0,02 [-0,04; 0,08]	-0,09 [-0,17; -0,01]
$\beta_{\mu,z}$	0,29 [0,27; 0,31]	0,27 [0,25; 0,28]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix} \cdot z}$	-0,02 [-0,04; 0,04]	0,05 [0,02; 0,07]
$\beta_{\mu,V_{Mulg \cdot hen} \cdot z}$	-0,07 [-0,09; -0,05]	-0,01 [-0,03; 0,02]
$\gamma_{\mu,m}$	0,16 [0,14; 0,18]	0,23 [0,20; 0,25]
<i>shape</i>	6,32 [5,95; 6,69]	6,50 [6,12; 6,89]

Tab. 16

Erwartungswerte und 95% Kreditabilitätsintervalle (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% Kreditabilitätsintervalls).

Expectation values and 95% credibility intervals (values in brackets) of parameter-specific posterior-distributions for height and root collar growth models for the region of Hoher Fläming.

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]
$\beta_{V_{Streifenpflug} \cdot a}$	-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]
<i>shape</i>	3,65 [3,44; 3,87]	4,68 [4,30; 5,08]