

# Modell zur Abschätzung der natürlichen Verjüngung von Buche im Hessischen Bergland

Andreas Sommerfeld<sup>1</sup>, Matthias Schmidt<sup>2</sup>

## Zusammenfassung

Wälder sind Hotspots der Biodiversität und bedeutend für die Lebensgrundlage für Menschheit. Da Wälder besonders stark durch den Klimawandel bedroht sind, kommt der Waldverjüngungsphase eine besondere Bedeutung bei, da hier die Anpassungsfähigkeit eines Waldbestandes am größten ist. In dieser Studie entwickeln wir ein Modell der natürlichen Verjüngung der Buche, welches mit Hilfe von Daten parametrisiert wird, die in größeren Forstbetrieben allgemein vorhanden sind. Die Daten des Landesbetriebes HessenForst beinhalten Standortparameter, wie der Bodenfeuchte und der Nährstoffversorgung und Bestandescharakteristiken, wie den Bestandesmittendurchmesser, Grundflächen und Kronenprojektionsflächen. Die Buchenverjüngung als abhängige Variable wird für jeden Plot der Betriebsinventur von HessenForst Anteilsflächen abgeschätzt. Als statistisches Modell nutzen wir ein Generalisiertes Additives Modell (GAM) um das Auftreten und die Dichte der natürlichen Verjüngung von Buche zu modellieren. Der Einsatz von GAMs ermöglicht es uns nicht-lineare Zusammenhänge und nicht-monotone Beziehungen in den Daten zu modellieren. Mit Hilfe unseres Buchenverjüngungsmodells war es uns möglich 41.8 % der Varianz der Flächengröße der Buchennaturverjüngung zu erklären, welche sich aus plausiblen und größtenteils signifikanten Einzeleffekten zusammensetzte.

Keywords: Buche, Verjüngung, GAM, Betriebsinventur, Forsteinrichtung

## 1 Einführung

Die Wälder der Erde sind eines der bedeutendsten Ökosysteme, da sie zum einen Hotspots der Biodiversität als auch Quellen wichtiger Ökosystemdienstleistungen sind (Parrotta et al. 2012, MEA 2005). Die Leistungen des Ökosystems Wald für die Gesellschaft sind mannigfaltig und können unterschiedlichste Bedürfnisse erfüllen – etwa durch die Bereitstellung von Rohstoffen, durch die regulierende Leistungen wie Erosionskontrolle, durch kulturelle Leistungen wie die Erholung im Wald als auch durch unterstützende Leistungen wie die Erhaltung der Biodiversität. Im Unterschied zu anderen Ökosystemen zeichnen sich Bäume durch eine besonders hohe Lebenserwartung aus bei der einzelne Waldentwicklungsphasen Jahrzehnte andauern können. Dies führt zu einer besonderen Vulnerabilität von

Wäldern, da sich die Umweltbedingungen im globalen Wandel im selben Zeitraum eklatant verändern werden. Die Phase der Waldverjüngung, ist die Entwicklungsphase mit der höchsten Anpassungsfähigkeit von Waldökosystemen (Kolström et al., 2011, Qiu et al., 2021) und daher von entscheidender Bedeutung für die Adaption der Wälder an klimatische Veränderungen. Das Verständnis der Prozesse und Parameter, welche zu sich natürlich verjüngenden Waldbeständen führen ist jedoch weiterhin nicht ausreichend erforscht (Käber, 2023) und akkurate Schätzungen von Verjüngung bedürfen oft eines hohen Aufwandes im Waldbestand.

Mit dieser Studie wollen wir ein Modell der natürlichen Buchenverjüngung präsentieren, welches mit Hilfe von Daten parametrisiert wird, die in größeren Forstbetrieben allgemein vorhanden sind. Wir wollen zum einen Parameter identifizieren, welche auf höheren räumlichen Ebenen für eine erfolgreiche Naturverjüngung verantwortlich sind. Zum anderen wollen wir durch die Beschränkung auf allgemeine Forstbetriebsdaten die operative Forstwirtschaft in der großräumlichen Planung und Vorbereitung von Naturverjüngungen unterstützen.

---

<sup>1</sup> Abteilung Waldwachstum  
Nordwestdeutsche Forstliche  
Versuchsanstalt  
Göttingen, Deutschland  
andreas.sommerfeld@nw-fva.de

<sup>2</sup> Abteilung Waldwachstum  
Nordwestdeutsche Forstliche  
Versuchsanstalt  
Göttingen, Deutschland  
matthias.schmidt@nw-fva.de

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Die Daten für die Modellentwicklung stammen aus dem hessischen Bergland in Zentraldeutschland (Abbildung 1). Hierbei wurden Flächen des Landesforstbetriebs HessenForst genutzt, in denen eine flächendeckende Forsteinrichtung, eine Standortkartierung und auch eine Betriebsinventur (Stichprobeninventur) existierten. Das Untersuchungsgebiet umfasste dabei 28 Forstämter mit insgesamt ca. 326.000 ha Wald. Die Waldflächen setzten sich im Altbestand aus 47,0 % Buche, 23,5 % Fichte, 8,5 % Kiefer, 7,0 % Eiche und weiteren Baumarten zusammen. Klimatisch werden die Berglandgebiete Hessens durch eine mittlere Jahrestemperatur von 7,2°C und 10,7°C und jährliche Niederschlagssummen von 576mm bis 995mm geprägt (Referenzzeitraum 1993 bis 2023).

### 2.2 Datensatz

Für die Parametrisierung des Buchenverjüngungsmodells wurden Daten aus insgesamt drei Datenquellen genutzt – der Betriebsinventur, der Forsteinrichtung und der Standortkartierung (Tabelle 1).

Zwei verschiedene Varianten der Betriebsinventuraufnahmen wurden bei dieser Analyse verwendet – 1. über stratifizierte Zufallsauswahl

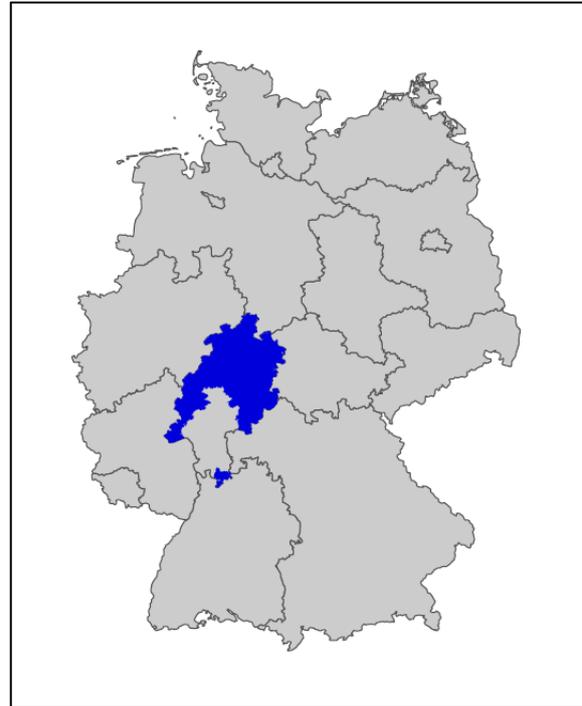


Abbildung 1: Das Studiengebiet Hessisches Bergland (blau).

(Auswahlstratum war die Entwicklungsklasse der Waldbestände) als auch 2. eine geometrisch Rasterauswahl (Rasterauflösung 100 m) in den Staatswaldflächen. Die Betriebsinventur findet auf konzentrischen Probekreisen statt, auf denen Bäume bis 30 cm Brusthöhendurchmesser (BHD) auf einem Probekreis mit einem Radius

Tabelle 1: Datengrundlage der Parametrisierung des GAM der Buchennaturverjüngung.

Datenquelle	Variable	Räumliche Ebene	Abkürzung	Einheit	Wert bei Sensitivitätsanalyse
Betriebsinventur	Bestandesmitteldurchmesser	Plot	Dg	cm	16.24 (mean)
	Kronenprojektionsfläche	Plot	Kpf	m <sup>2</sup> / m <sup>2</sup>	9697.25 (mean)
	Samenbaum im Plot	Plot	SaPI	%	33,9 (mean)
	Geografische Koordinaten (UTM)	Plot	RW/HW	m	5642350/ 3532150 (median)
Forsteinrichtung	Grundfläche Buchenaltbestand	Bestand	GrFl_BuAlt	m <sup>2</sup>	3,74 (median)
Standortkartierung	Geländewasserhaushalt	Waldfläche	GWH	dim.los	„mäßig frisch“
	Trophiestufe	Waldfläche	Troph	dim.los	„Mesotroph“
Verbiss	Buchenverbiss modelliert nach Werten der BWI	Waldfläche	BuVer	%	35.69 (mean)

von 6 m aufgenommen werden. Bäume mit einem BHD ab 30 cm werden hingegen auf einem Probekreis mit einem Radius von 13 m aufgenommen. Die abhängige Variable Buchennaturverjüngung wurde am größeren BI-Punkt ( $r = 13$  m) flächendeckend geschätzt. Hierbei wurde die Deckungsgrad der überschirmten Fläche getrennt nach Baumart und Höhenklasse (bis 50 cm, 50 cm -130 cm, ab 130 cm Höhe) in 10 cm Stufen (z. B. 50 % - 60 % Deckung) geschätzt. Liegt die Gesamtüberschirmung einer Baumart unter 20 % bzw. 10 %, so wird der Deckungsgrad in 5%-Stufen bzw. 1 %-Stufen angegeben. Für die Datenanalyse wurde nur Verjüngung der zweiten und dritten Höhenklasse (ab 50cm Höhe) genutzt. Die Genauigkeit der Schätzung wird differenziert nach Gesamtdichte der Verjüngung angegeben - Die maximale Verjüngung an einem Probekreis konnte 100 % betragen. Darüber hinaus wurden auf den Probekreisen als erklärende Variable die Baumart sowie die BHDs aller Einzelbäume des Hauptbestandes als auch die Lage des Probekreises aufgenommen (Tabelle 1).

Die Forsteinrichtung des Landesbetriebs HessenForst liefert flächendeckende Informationen zu den auftretenden Baumarten und deren Grundflächen in der Umgebung des BI-Stichprobenpunktes. Diese Informationen wurden stellvertretend für das Vorhandensein von Mutterbäumen für die untersuchte Naturverjüngung genutzt.

Die forstliche Standortskartierung des Landes Hessen liefert flächendeckende Daten zur Nährstoffausstattung der Böden durch Trophiestufen und zur grundsätzlichen Wasserverfügbarkeit durch Geländewasserhaushaltsstufen (Schmidt et al, 2015). Die Trophiestufen werden vorwiegend vegetationskundlich als auch durch Ansprache von Ausgangssubstrat und Humusform bestimmt. Der Geländewasserhaushalt wird anhand ökologischer Artengruppen, Waldgesellschaften sowie mit Boden- und Reliefmerkmalen differenziert.

### 2.3 Methoden

Für die statistische Auswertung des Auftretens von Buchenverjüngung wurde ein Generalisiertes Additives Modell (GAM) genutzt. GAMs ermöglichen es nicht-lineare und auch nicht-monoton

steigende bzw. fallende Beziehungen zwischen der Zielvariable Buchenverjüngung und den unabhängigen Umwelt-Kovariablen zu modellieren. Für die Durchführung der statistischen Analysen wurde die Statistikumgebung R (R Core Team, 2019) und für die GAMs im speziellen das Package *mgcv* genutzt (Wood, 2011). Die Verteilung der Zielvariable Buchenverjüngung wurde als eine quasi-binomial Verteilung (Verjüngungsdichte zwischen 0 % und 100 % Verjüngung) mit einer logit Linkfunktion angenommen. Als erklärende, unabhängige Variablen wurde die folgenden Variablen mit *thin plate spline* Glättfunktionen genutzt: 1.) Kronenschirmfläche am Plot, 2.) der Anteil der Buchengrundfläche an der Gesamtgrundfläche des Hauptbestandes im Plot, 3.) die Buchengrundfläche im umgebenden Bestand sowie 4.) die geografischen Koordinaten des Plots. Darüber hinaus wurden ebenfalls die Trophiestufe sowie die Stufe des Geländewasserhaushalts des Plots genutzt (Tabelle 1). Die *residual maximum marginal likelihood* (REML) Methode von Wood (2011) wurde genutzt um Glättung eines Kovariablen-Effekts zu optimieren, falls diese nicht manuell angepasst wurden.

## 3 Ergebnisse

Unser GAM erklärt 41.8 % der Varianz der Flächengröße der Buchennaturverjüngung, was auf eine gute Modellanpassung und Parameterauswahl hindeutet. Das Modell wurde mit den Daten aus 51063 Probepunkten angepasst und der Großteil der parametrischen und geglätteten nicht-linearen Variablen übt einen signifikanten Einfluss auf die Fläche der Buchennaturverjüngung aus. Die Zusammenfassung der Modellstatistik ist in Tabelle 2 für die geglätteten Variablen und in Tabelle 3 für die linearen, parametrischen Variablen des GAMs zusehen.

**Tabelle 2: Geglättete Variablen des GAMs der Buchennaturverjüngung (EDF = Estimated Degrees of Freedom, Ref.DF = Reference Degrees of Freedom, F = Teststatistik, für die Abkürzungen der Variablennamen vergleiche Tabelle 1).**

Geglättete Variable	EDF	Ref.DF	F	p-Wert
RW/HW	27.063	28.733	19.981	< 0.0001
GrFL_BuAlt	8.902	8.994	291.584	< 0.0001
SaPI	7.575	8.471	100.170	< 0.0001
Kpf	8.452	8.913	243.067	< 0.0001
Dg	9.651	9.966	127.984	< 0.0001
BuVer	6.526	7.690	4.838	< 0.0001

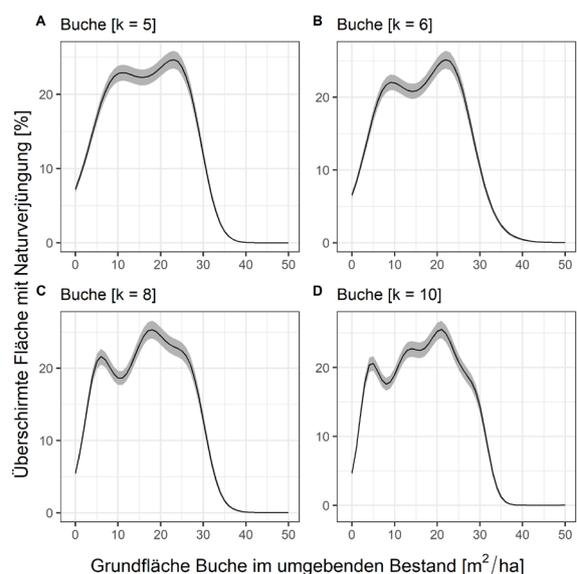
**Tabelle 3: Parametrische lineare Variablen des GAMs der Buchennaturverjüngung (Estimate = Schätzung des Koeffizienten, t-Wert = Teststatistik, für die Abkürzungen der Variablennamen vergleiche Tabelle 1)**

Parametrische Variable	Estimate	Standard- Fehler	t-Wert	p-Wert	
Intercept	-2.648.254	0.043925	-60.290	< 0.0001	
GWH	frisch	0.070855	0.023901	2.964	0.00303
	mäßig frisch	-0.147807	0.018556	-7.965	< 0.0001
	mäßig trocken	-0.456822	0.050087	-9.121	< 0.0001
	trocken	-1.336.702	0.451685	-2.959	0.00308
	feucht	-0.094992	0.073532	-1.292	0.19641
	wechselfeucht	-0.522001	0.040660	-12.838	< 0.0001
	sickerfeucht	-0.251191	0.090784	-2.767	0.00566
	nass	-1.276.106	0.264339	-4.828	< 0.0001
Trophie	Oligotroph	-0.788144	0.076135	-10.352	< 0.0001
	Schwach Mesotroph	-0.246765	0.024307	-10.152	< 0.0001
	Gut Mesotroph	0.006004	0.022515	0.267	0.78974
	Eutroph	-0.121318	0.029167	-4.160	< 0.0001
	Kalkeutroph	0.102565	0.046358	2.212	0.02694

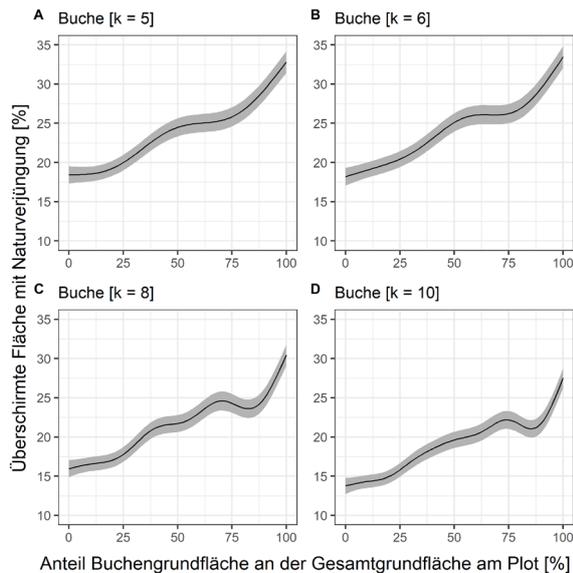
Um die Effekte der einzelnen Parameter besser veranschaulichen zu können wurden Sensitivitätsabbildungen (Abbildungen 2 bis 7) erstellt. Hierfür wurde ein Dummy-Datensatz erzeugt, welcher für den abzubildenden Parameter den gesamten Datenbereich abdeckt, alle Werte der anderen Parameter aber auf Mittelwerte oder Mediane setzt. Somit kann der Einflusstrend eines einzelnen Parameters auf die Fläche der Buchennaturverjüngung, bei mittleren Verhältnissen der anderen Parameter, dargestellt werden.

Die Verfügbarkeit von Samenbäumen im angrenzenden Waldbestand hat einen großen Einfluss auf die von Naturverjüngung überschirmte Fläche (Abbildung 2). Die Naturverjüngungsfläche steigt im unteren Bereich der Grundflächen bis ca. 10m<sup>2</sup>/ha stark an. Zwischen 10m<sup>2</sup>/ha und 25m<sup>2</sup>/ha übt die Grundfläche einen relativ gleichbleibenden Einfluss auf die Fläche der Naturverjüngung aus. Die Anzahl der Basisfunktionen der Glättfunktion (k) variiert zwischen den Abbildungen 2A bis 2D wobei geringere k-Werte die Glättfunktion weniger durch einzelne Datencluster führt und eher den größeren Trends in den Grundflächendaten folgt. Ab einer Grundfläche von 25m<sup>2</sup>/ha verschwindet der positive Einfluss der Grundfläche von Samenbäumen auf die Fläche der Naturverjüngung und bei weiter steigender Grundfläche fällt die Naturverjüngungsfläche steil ab.

Der Anteil der potenziellen Buchen-Samenbäume an der Gesamtgrundfläche des Hauptbestandes auf Plot-Ebene hatte einen starken positiven Effekt auf die Fläche der Naturverjüngung (Abbildung 3). Der Effektverlauf war hierbei über den gesamten Wertebereich ansteigend mit einem geringeren Abflachen der Kurve zu Beginn (0 % bis 25 %) sowie in der Mitte (50 % bis 75 %)



**Abbildung 2: Mit Buchennaturverjüngung überschirmte Fläche (%) in Abhängigkeit der Grundfläche von Buchen im Altbestand in m<sup>2</sup>/ha (sonstige Variablen des GAMs sind mittlere Werte, siehe Tabelle 1). Die Einzelgrafiken A bis D zeigen den Effekt unterschiedlicher Basisfunktionen (k) der Glättfunktion des GAMs.**



**Abbildung 3:** Mit Buchennaturverjüngung überschirmte Fläche (%) in Abhängigkeit des Anteils der Buche an den Bäumen im Plot in % (sonstige Variablen des GAMs sind mittlere Werte, siehe Tabelle 1). Die Einzelgrafiken A bis D zeigen den Effekt unterschiedlicher Basisfunktionen ( $k$ ) der Glättfunktion des GAMs.

des Wertebereiches. Die Reduktion der Basisfunktionen  $k$  der Glättfunktion (von  $k=10$  in Abbildung 3D zu  $k=5$  in Abbildung 3A) zeigt den zugrundeliegenden Trend.

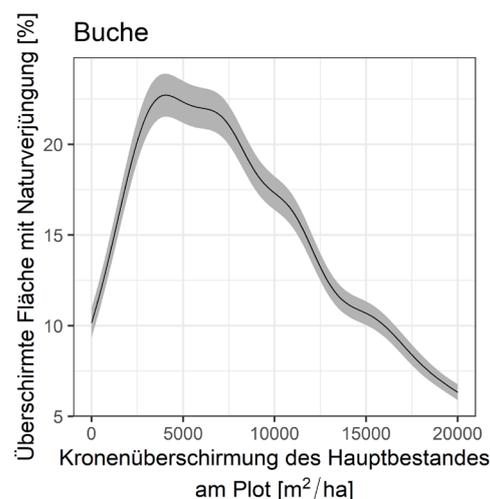
Die Kronenüberschirmung des Hauptbestandes hat einen variablen Einfluss auf die Fläche der Naturverjüngung (Abbildung 4). Die größte flächige Ausdehnung erreicht die Naturverjüngung bei Kronenüberschirmung des Hauptbestandes zwischen  $3000\text{m}^2/\text{ha}$  und  $7000\text{m}^2/\text{ha}$  Blattfläche je Hektar Waldbodenfläche. Werte unter  $3000\text{m}^2/\text{ha}$  Kronenüberschirmung führen rasch zu einer Abnahme der Fläche der Buchennaturverjüngung von ungefähr 24 % auf 10 % der der Probekreisfläche. Kronenüberschirmungen von über  $7000\text{m}^2/\text{ha}$  führen graduell zu einem Rückgang auf ein Viertel der Fläche der Naturverjüngung bei  $20000\text{m}^2/\text{ha}$  Kronenüberschirmung des Hauptbestandes (24 % zu 6 %).

Die Bestandesmitteldurchmesser der Samenbäume am Plot zeigen einen zunächst irritierenden Einfluss auf die Fläche der Naturverjüngung (Abbildung 5). Der plausiblere Teil der Grafik zeigt die geringste Flächenausdehnung der Buchennaturverjüngung wenn die überstockenden Buchenbestände einen mittleren Dg von 20cm bis 40cm aufweisen. Bei Werten des Dg zwischen 40cm und 60cm zeigt die Buchennaturverjüngung einen raschen Anstieg auf bis zu 30% Anteilsfläche des Probekreises. Oberhalb von

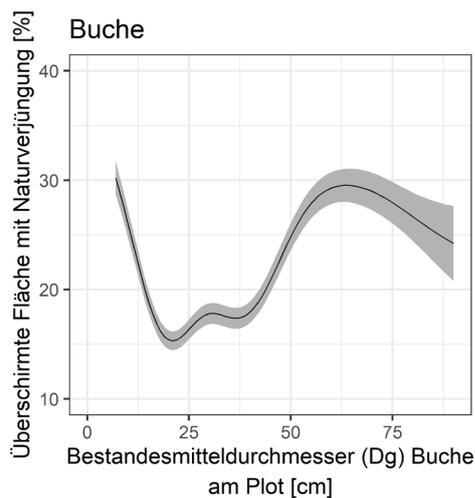
60cm Dg stagniert bzw. vermindert sich leicht die Fläche der Naturverjüngung. Auffallend bei der Betrachtung der Sensitivitätsgrafik des Dgs ist jedoch der steile Abfall der Naturverjüngungsfläche im niedrigen Dg-Bereich von 7cm bis circa 20cm. Beginnend bei der Kluppschwelle von 7cm fällt die Verjüngungsfläche von ihrem Maximalwert mit ca. 30 % auf ihren Minimalwert von ca. 15 % bei einem Dg von 20cm. Die Variabilität dieses Zusammenhangs ist relativ gering und der Datenbereich ist gut besetzt (ca. 12400 Einzelwerte bzw. 24 % der aller Ausgangsdaten lagen in diesem Dg-Wertebereich).

Die Verjüngungsfläche der Buche steigt mit zunehmender Nährstoffversorgung des Standorts stark an (Abbildung 6). Mittlere und bessere Trophiestufen (Mesotroph bis Kalkeutroph) weisen dabei im Durchschnitt doppelt so große Verjüngungsflächen aus verglichen mit Oligotrophen Standorten. Schwach Mesotrophe Standorte, als Zwischenstufe zwischen Oligotroph und Mesotroph, weisen intermediäre Verjüngungsflächengrößen auf, welche zwischen denen der Oligotrophen und denen der besseren Trophiestufen liegen.

Die Ausprägung des Geländewasserhaushalts übt ebenfalls einen starken Einfluss auf die Flächengröße der Buchennaturverjüngung aus (Abbildung 7). Entlang der terrestrischen Standorte (betont frisch bis trocken) kommt es zu einer Reduktion um ca. 60 % der Verjüngungsfläche von gut wasserversorgten Standorten (betont frisch



**Abbildung 4:** Mit Buchennaturverjüngung überschirmte Fläche (%) in Abhängigkeit der Kronenprojektionsfläche im Plot in  $\text{m}^2/\text{ha}$  (sonstige Variablen des GAMs sind mittlere Werte, siehe Tabelle 1).



**Abbildung 5:** Mit Buchennaturverjüngung überschirmte Fläche (%) in Abhängigkeit des Bestandesmitteldurchmesser (Dg) des Hauptbestandes am Plot in cm (sonstige Variablen des GAMs sind mittlere Werte, siehe Tabelle 1).

und frisch) hin zu trockenen Standorten. Hydro-morphe Standorte, welche hauptsächlich durch Stauwasser beeinflusst sind, weisen hingegen keinen so eindeutigen Trend auf. Je nach Länge des Stauwassereinfluss kann die Buchenverjüngung auf diesen Standorten ähnliche Flächen-größen wie besser wasserversorgte, terrestrische Standorte (feucht mit ca. 18 % Verjüngungsfläche) erreichen oder aber auch so geringe Flächen-größen wie trockenen Standorte (6 % Verjüngungsflächen-größe).

#### 4 Diskussion

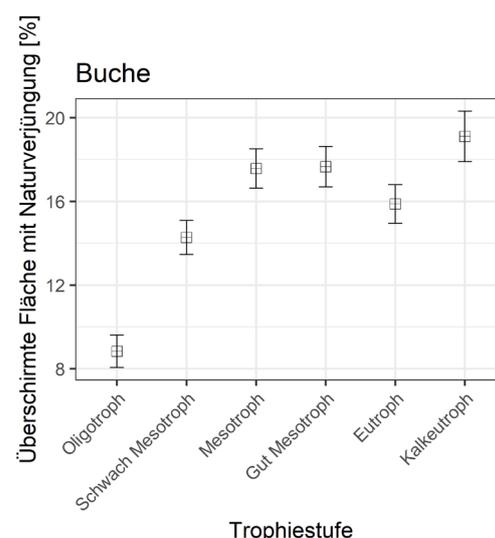
Die Verjüngungsphase von Waldökosystemen ist die entscheidende Phase für die langfristige Anpassung der Wälder an die sich ändernden Umweltbedingungen (Kolström et al., 2011, Qiu et al., 2021). Die klimaangepasste Baumartenwahl bei der Verjüngung ist somit eine der grundlegenden Aufgaben des Waldbaus in den bewirtschafteten Wäldern. Die natürliche Verjüngung ist eine weithin verfügbare und kostengünstige Variante der Bestandesbegründung (Ling et al. 2023), jedoch sind die kausalen Zusammenhänge für das Auftreten von Naturverjüngung auf größeren räumlichen Ebenen weiterhin nicht ausreichend erforscht (Käber et al., 2023).

Mit unserem Buchenverjüngungsmodell können wir zeigen, dass die Modellierung von Buchen-

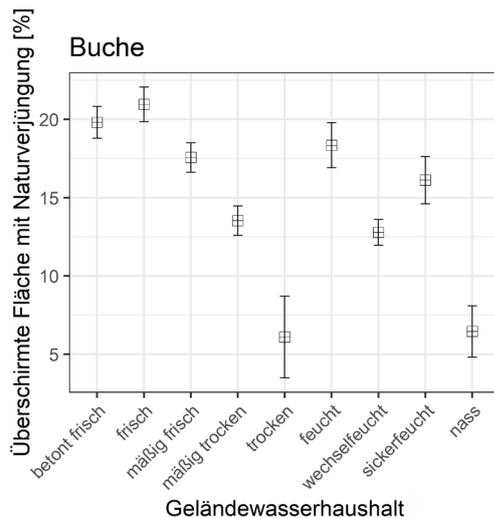
verjüngung mit allgemein verfügbaren Forstbetriebsdaten bei Buchenverjüngung zu guten Modellierungsergebnissen führt. Zu ähnlichen Aussagen gelangten auch Käber et al. (2023), Zell et al. (2019) und Klopčič et al. (2012) bei der Analyse großräumigen Forsteinrichtungsdaten. Besonders der Abfall des Verjüngungserfolgs bei hohen Grundflächen und das Beschattungspotenzials des Oberstandes konnten als die bedeutendsten Erfolgsfaktoren identifiziert werden.

Der positive Effekt von nahen Buchensamenbäume im Oberstand auf die Etablierung von Buchenverjüngung steht im Einklang mit weitere Studien (Kutter & Gratzler 2006, Klopčič et al. 2012). Dabei konnten diese positiven Effekte sowohl direkt durch die Entfernung der Verjüngung zu einzelnen Samenbäumen (Kutter & Gratzler 2006) als auch indirekt durch die Anwesenheit von Samenbäumen im gleichen Inventurplot nachgewiesen werden (Klopčič et al., 2012).

Der positive Einfluss des Durchmessers der Samenbäume auf die Etablierung der Verjüngung bei mittleren Dg-Werten (20 cm – 60 cm) findet sich ebenfalls in vorangehenden Studien (Wagner 1999, Axer et al. 2021). Während Wagner (1999) eine direkte Abhängigkeit der Samenproduktion von Stammdurchmesser feststellt, finden Axer et al. (2021) einen positiven Einfluss des Dg auf die Wahrscheinlichkeit und die Dichte der Buchenverjüngung. Die deutlichen Abweichungen unserer Ergebnisse zu denen von Axer



**Abbildung 6:** Mit Buchennaturverjüngung überschirmte Fläche (%) in Abhängigkeit der Trophiestufe (sonstige Variablen des GAMs sind mittlere Werte, siehe Tabelle 1).



**Abbildung 7:** Mit Buchennaturverjüngung überschirmte Fläche (%) in Abhängigkeit der Geländewasserhaushaltsstufe (sonstige Variablen des GAMs sind mittlere Werte, siehe Tabelle 1).

et al. (2021) treten wahrscheinlich durch die zugrundeliegenden Aufnahmemethoden der Daten auf. Besonders der nicht plausible Trend von großen Verjüngungsflächen bei kleinsten Dg-Werten (Abbildung 4) scheint ein Artefakt der Datenerhebung zu sein. Bäume, welche die BHD Kluppschwelle von 7 cm überschritten haben zählen zum Hauptbestand obwohl die Kohorte an Bäumen der sie entspringen hauptsächlich unter 7 cm BHD liegen kann. Somit könnten einzelne Bäume dieser Kohorte zur erklärenden Variable (Dg-Wert) gehören während ein Großteil der Kohorte noch zur abhängigen, erklärten Variable gehört (Verjüngungsfläche). Somit erklärt das Modell im Bereich geringer Dg-Werte die Fläche der Buchenverjüngung durch Individuen eben dieser Verjüngung selbst (partiell keine Unabhängigkeit zwischen erklärender und erklärter Variable). Der Anwendungszweck dieses Modells ist die Vorhersage der natürlichen Buchenverjüngungsfläche in hiebsreifen Beständen, welche deutlich über einem Dg von 20 cm liegen, weswegen dieses methodische Artefakt nur eine geringe Relevanz entwickelt.

Die meisten Studien, welche sich mit der statistischen Modellierung der Verjüngung auseinandersetzen nutzen die Anzahl der Verjüngungspflanzen oder Individuen, welche in die Baumschicht eingewachsen sind, als abhängige Variable. Obwohl die hier genutzten Schätzwerte zur Verjüngungsdichte auf einer anderen methodischen Grundlage aufbauen und das Modell die

speziellen Aufnahmebedingungen von Hessen-Forst angepasst ist, sind vergleichbar großräumige Analysen auch mit gemessenen Werten möglich (Rudolph & Schmidt, 2017).

Bei guter Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit erreicht die Buchenverjüngung ihr größtes Flächenmaß. Diese Erkenntnisse stehen im Einklang mit Ergebnissen von Madsen (1995) der mindestens eine Gleichgewichtung von Licht-, Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit sieht, als auch Ammer et al. (2008), bei denen die unterirdische Ressourcen Wasser und Nährstoffe in den ersten Jahren nach der Keimung einen größeren Effekt als Lichtverfügbarkeit haben. Auch anderweitige Studien bestätigen, dass eine gute Wasserverfügbarkeit am Standort für das Wachstum und die Dichte von Buchenverjüngung (Klopčič et al. 2012, Wagner 1999, Madsen 1995) von großer Bedeutung sind. Eine geringere Dichte von Buchenverjüngung auf hydromorphen Standorten (stau- oder grundwasserbeeinflusst) konnten ebenfalls Axer et al. (2021) nachweisen, jedoch zeigen unsere Ergebnisse eine hohe Variabilität innerhalb der hydromorphen Standorte. Ebenfalls konnte eine erhöhte Dichte von Buchenverjüngung bei besserer Nährstoffversorgung durch weitere Studien belegt werden (Rudolph & Schmidt 2017, Klopčič et al., 2012).

Ein verlässliches Verjüngungsmodell besitzt den Vorteil, dass für die operative Forstwirtschaft eine großräumliche Planung und Vorbereitung von Naturverjüngung ermöglicht wird. Im forstwissenschaftlichen Bereich bietet ein Verjüngungsmodell mögliche Schnittstelle zu anderen Waldwachstums- und Biomassemodelle, um mit einfachen Parameter ein zukünftiges Verjüngungspotenzial und mögliche Waldentwicklungspfade aufzuzeigen. Für die Wahl der Baumartenzusammensetzungen, besonders unter dem Aspekt der sich ändernden Klimabedingungen, liefert ein Verjüngungsmodell entscheidende Informationen um klimaangepasst und ressourcen-effizient die zukünftige Waldentwicklung zu gestalten.

## 5 Literaturverzeichnis

Ammer C., Stimm B., Mosandl R. (2008) Ontogenetic variation in the relative influence of light and belowground resources on European beech seedling growth. *Tree physiology*, 28: 721-728

- Axer, M., Martens, S., Schlicht, R., & Wagner, S. (2021). Modelling natural regeneration of European beech in Saxony, Germany: identifying factors influencing the occurrence and density of regeneration. *European Journal of Forest Research*, 140(4). <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01377-w>
- Käber, Y., Meyer, P., Stillhard, J., de Lombaerde, E., Zell, J., Stadelmann, G., Bugmann, H., & Bigler, C. (2021). Tree recruitment is determined by stand structure and shade tolerance with uncertain role of climate and water relations. *Ecology and Evolution*, 11(17). <https://doi.org/10.1002/ece3.7984>
- Klopcic, M., Poljanec, A., & Boncina, A. (2012). Modelling natural recruitment of European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Forest Ecology and Management*, 284, 142–151. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2012.07.049>
- Kolström, M., Lindner, M., Vilén, T., Maroschek, M., Seidl, R., Lexer, M. J., Netherer, S., Kremer, A., Delzon, S., Barbati, A., Marchetti, M., & Corona, P. (2011). Reviewing the Science and Implementation of Climate Change Adaptation Measures in European Forestry. *Forests*, 2(4), 961–982. <https://doi.org/10.3390/f2040961>
- Kutter, M. & Gratzner, Georg. (2006). Current methods for estimation of seed dispersal of trees - An example of seed dispersal of *Picea abies*, *Abies alba* and *Fagus sylvatica*. *Austrian Journal of Forest Science*. 123. 103-120.
- Ling, P.-Y., Aguilar-Amuchastegui, N., Baldwin-Cantello, W., Rayden, T., Gordon, J., Dainton, S., Bagwill, A. L., & Pacheco, P. (2023). Mapping global forest regeneration—an untapped potential to mitigate climate change and biodiversity loss. *Environmental Research Letters*, 18(5), 054025. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/accfaf>
- Madsen, P. (1995). Effects of soil water content, fertilization, light, weed competition and seedbed type on natural regeneration of beech (*Fagus sylvatica*). *Forest Ecology and Management*, 72(2–3), 251–264. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(95\)97453-Y](https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)97453-Y)
- MEA (2005). *Ecosystems and human well-being* (Vol. 5, p. 563). Island Press, Washington, DC.
- Parrotta, J. A.; Wildburger, C.; and Mansourian, S. (2012). Understanding relationships between biodiversity, carbon, forests and people: The key to achieving REDD+ objectives. A global assessment report prepared by the Global Forest Expert Panel on Biodiversity, Forest Management, and REDD+. IUFRO World Series Volume 31. Vienna. 161 p.
- Qiu, T., Sharma, S., Woodall, C. W., & Clark, J. S. (2021). Niche Shifts From Trees to Fecundity to Recruitment That Determine Species Response to Climate Change. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.719141>
- R Core Team (2019): *R: A Language and Environment for Statistical Computing* (Version 4.3.1). <https://www.R-project.org/>
- Rudolph, J.; Schmidt, M. (2017) Vorhersage der Verjüngungsetablierung von Fichte und Buche in Abhängigkeit von Bestandes- und Standortsparmetern. In: Beiträge zur Jahrestagung 2017. DVFFA – Sektion Ertragskunde
- Schmidt, W., Stüber, V., Ullrich, T., Paar, U., Evers, J., Dammann, K., Hövelmann, T., & Schmidt, M. (2015). Synopse der Hauptmerkmale der forstlichen Standortskartierungsverfahren der Nordwestdeutschen Bundesländer. Beiträge Aus Der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. <https://doi.org/10.17875/gup2015-797>
- Wagner, S. (1999): The initial phase of natural regeneration in mixed ash-beech stands—ecological aspects. Sauerländer
- Wood, S. N. (2011). Fast Stable Restricted Maximum Likelihood and Marginal Likelihood Estimation of Semiparametric Generalized Linear Models. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 73(1), 3–36. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2010.00749.x>
- Zell, J., Rohner, B., Thüring, E., & Stadelmann, G. (2019). Modeling ingrowth for empirical forest prediction systems. *Forest Ecology and Management*, 433, 771–779. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2018.11.052>