Vorhersage der Verjüngungsetablierung von Fichte und Buche in Abhängigkeit von Bestandes- und Standortsparametern

Julia Rudolph und Matthias Schmidt
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Abt. Waldwachstum, Göttingen

Zusammenfassung

Naturverjüngung ist in standortgerechten Beständen ein Element der naturgemäßen Forstwirtschaft. Um daher die Bestandesentwicklung in Wachtumssimulationen realistischer vorhersagen zu können, wurden Modelle zur Abschätzung der Verjüngungsetablierung für Fichte *(Picea abies)* und Rotbuche *(Fagus sylvatica)* entwickelt. Datengrundlage waren Wiederholungsaufnahmen von 31.930 Stichprobenpunkten (Plots) aus 18 Forstämtern der Betriebsinventur in Niedersachsen. Die Betriebsinventur ist eine zweiphasige permanente Inventur mit 2 konzentrischen Stichprobenkreisen für das Derbholz (r=6m für BHD 7 bis < 30cm, r=13m für BHD ≥ 30cm). Die Modelle wurden als generalisierte additive Modelle (GAM) mit der Verteilungsannahme einer geordneten kategorischen Antwortvariablen parametrisiert, um die Etablierungswahrscheinlichkeit für unterschiedliche Höhenstufen der Verjüngung gleichzeitig zu modellieren. Als Kovariablen mit plausiblen Effekten gingen der Grundflächenmittelstamm der Verjüngungsbaumart und die Überschirmungsfläche aller Derbholzbäume des Plots sowie der Anteil der Buche und der Anteil der Lichtbaumarten an der Überschirmungsfläche ins Modell ein. Zwei kategoriale Variablen, die Nährstoffversorgung und das Vorhandensein der Verjüngungsbaumart im Derbholz des Plots und des Bestandes, wurden ebenfalls ausgewählt. Die Variablenselektion erfolgte manuell schrittweise vorwärts anhand des Bayes'schen Informationskriteriums. Zur Erfassung eines eventuell auftretenden räumlich strukturierten Fehlers, der z.B. auf nicht beobachtete Faktoren wie unterschiedliche Bewirtschaftungs- oder Verbissintensitäten zurückzuführen sein könnte, wurde ein 2-dimensionaler glättender Spline als Funktion der Mittelpunkte der Plots modelliert. Die Wahrscheinlichkeiten für die 4 Kategorien *keine Verjüngung, Verjüngung in der 2. Höhenklasse (0.5m-1.3m), Verjüngung in der 2. und 3. Höhenklasse, Verjüngung in der 3. Höhenklasse (>1.3m)* wurden simultan modelliert. Das Fichten- und das Buchenmodell ähneln sich bzgl. der ausgewählten Kovariablen weitgehend. Das Vorhandensein von Samenbäumen und die Lichtverfügbarkeit je nach Überschirmung sind die wichtigsten kausalen Einflussgrößen. In beiden Modellen sinkt mit steigender Überschirmung die Wahrscheinlichkeit einer höheren Verjüngungskategorie, mit steigender Anzahl von Derbholzbäumen der Verjüngungsbaumart steigt sie ebenfalls. Der Effekt des Grundflächenmittelstamms steigt monoton an, für Fichte bis zu einem DG von ca. 50 cm, für Buche bis ca. 60 cm, danach kann ein gleichbleibendes Niveau unterstellt werden. Der Anteil der Buche an der Überschirmungsfläche zeigt für Fichte und Buche einen gegenteiligen Effekt; für Buche steigt er monoton an, für Fichte fällt er monoton. Ein zunehmender Anteil von Baumarten mit lichtdurchlässigerer Krone (Kiefer, Birke, Esche, Eiche und Lärche) an der Überschirmungsfläche wirkt sich sowohl für Fichte als auch für Buche positiv aus. Ebenso steigt für Buche die Wahrscheinlichkeit einer höheren Verjüngungskategorie mit steigender Nährstoffversorgung; im Fichtenmodell wirkt der Effekt der Nährstoffversorgung bis zur mesotrophen Stufe positiv, auf den besser versorgten Standorten sinkt er wieder. Beide Modelle zeigen plausible Effekte in der Sensitivitätsanalyse und treffsichere Ergebnisse auf der Ebene von Straten in der Kreuzvalidierung.

1 Einleitung

Naturverjüngung ist in standortgerechten Beständen ein Element der naturgemäßen Forstwirtschaft. Ihre Bevorzugung entspricht dem 4. Grundsatz des Programms zur langfristigen ökologischen Waldentwicklung (LÖWE), dass 1991 von den Niedersächsischen Landesforsten beschlossen wurde. Obwohl sich der niedersächsische Landeswald derzeit in einer Übergangsphase befindet, in der viele Bestände noch

nicht den forstlichen Leitbildern entsprechen und daher nicht allein auf Naturverjüngung zurückgegriffen werden kann, ist der überwiegende Teil des Nachwuchses seit Programmbeginn aus Naturverjüngung und Stockausschlag hervorgegangen. Der Anteil der Naturverjüngung an der Bestandesbegründung liegt aktuell bei 60% und wird auch zukünftig wachsen. Buche und Fichte haben den höchsten Anteil an der Verjüngungsfläche der letzten 25 Jahre, wobei die Buche zu über 50% und die Fichte ganz überwiegend naturverjüngt wird (NIEDERSÄCHSISCHE LANDESFORSTEN 2016).

Unser Verständnis von Naturverjüngung läßt noch zu wünschen übrig, und das nicht nur, weil der ökonomische Anreiz bei der Beschäftigung mit Derbholz höher ist. Die Entstehung von Naturverjüngung umfasst neben komplexen ökologischen Zusammenhängen (HASENAUER et al. 2000) auch stark stochastische Prozesse wie z.B. Keimung oder Etablierung, und läßt sich daher nur eingeschränkt von messbaren Einflussgrößen ableiten (MIINA et al. 2006). Naturverjüngung beinhaltet außerdem eine Vielzahl von Teilprozessen und Entwicklungsphasen. Je nach Herangehensweise und Fragestellung können Samenverbreitung, Keimung, Ankommen der Sämlinge und schließlich Etablierung der Verjüngungsbäume betrachtet werden. In den unterschiedlichen Entwicklungsphasen der Naturverjüngung herrschen z.T. verschiedene Einflußfaktoren vor oder sie haben ein anderes Gewicht. In der Literatur variiert die Definition der einzelnen Entwicklungsphasen. In diesem Beitrag geht es um die Etablierung von Verjüngung in Übereinstimmung mit der Auffassung von MIINA ET AL. (2006). Sie wird hier als die Entwicklungsphase definiert, in der die Verjüngungsbäume keine Sämlinge mehr sind, sondern eine Höhe von >0,5 m erreicht haben. Die Anzahl der überlebenden Verjüngungsbäume hat sich gegenüber der vorhergehenden Phase des Ankommens schon deutlich reduziert, ihre Überlebenswahrscheinlichkeit ist dafür umso höher. Die Obergrenze der Etablierung bildet die Derbholzgrenze von 7 cm BHD, ab der von Einwuchs gesprochen wird.

Als Einflußfaktoren auf die Verjüngungsetablierung sind ganz allgemein inter- und intraspezifische Konkurrenz um Wasser- und Nährstoffversorgung und Strahlung (Licht) zu nennen. Gerade Lichtverfügbarkeit ist oft die entscheidende Ressource (WAGNER 1999). Hinzu kommen neben der Ausstattung des Standortes biotische Faktoren wie z.B. Verbiß. Die Verjüngungsökologie ist außerdem baumartenspezifisch und beinhaltet Wechselwirkungen der einzelnen Faktoren. Die Abbildung der Einflußfaktoren durch Kovariablen in der Modellierung wird im Wesentlichen durch die zugrundeliegenden Daten bestimmt. Beispielsweise werden bei vorhandenen Einzelbaumdaten des Altbestandes häufig Konkurrenzindizes zur Charakterisierung der Überschirmungssituation eingesetzt (STERBA et al. 1997, KINDERMANN ET AL. 2002, LEDERMANN 2002). Qualitative, nicht oder schwer quantifizierbare Unterschiede können besser als Faktorvariablen (z.B. Bodengruppe, Humustyp, Vegetationstyp) oder als Proxyvariablen (z.B. Koordinaten einer Untersuchungsfläche) beschrieben werden. Proxyvariablen subsummieren eine oder mehrere nicht quantifizierbare Einflussgrößen und haben selbst keinen direkten Einfluß auf die Zielgröße; ihre Effekte sind aber kausal interpretierbar, was auch eine Plausibilitätsprüfung ermöglicht. Unter der Annahme, dass die Relationen der Effekte der eigentlichen Einflussgrößen konstant sind, stellen Proxyvariablen eine valide Alternative dar.

In Bezug auf die Modellwahl lassen sich zwei Gruppen unterscheiden: statistische Modelle und Prozessmodelle. Während Prozessmodelle eher dem Verständnis und der Analyse der Zusammenhänge dienen, besteht der Vorteil von statistischen Modellen darin, Beobachtungsmuster möglichst genau zu reproduzieren. Sie eignen sich daher besonders für die Vorhersage der Zielgröße, vor allem innerhalb des Parametrisierungsbereiches. Bei den statistischen Modellen der Verjüngungsmodellierung überwiegen regressionsanalytische Ansätze. Häufig werden logistische Regressionsmodelle mit dichotomer Zielvariable verwendet, um die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens von Verjüngung oder des Vorkommens bestimmter Baumarten innerhalb der Verjüngung zu schätzen (FERGUSON 1996, SCHWEIGER &

STERBA 1997, STERBA ET AL. 1997, KINDERMANN ET AL. 2002, WIKBERG 2004, LEXEROD & EID 2005). Als Alternative zu Regressionsmodellen stellen KINDERMANN et al. (2002) dar, dass die Verwendung eines neuralen Netzes oder eines Entscheidungsbaumes für die Abschätzung des Ankommens der Verjüngung ähnlich gute Ergebnisse zeitigt wie ein LOGIT-Modell. Einwuchsmodelle, die die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens der Derbholzschwelle beschreiben, nutzen ebenfalls z.T. logistische Regressionsmodelle mit dichotomer Zielvariable (LEDERMANN 2002). Aber auch hier gibt es Alternativen: HYNYNEN et al. (2002)verwenden ein heuristisches Modell, um die Anzahl neuer Verjüngungsbäume pro Hektar zu schätzen, die innerhalb der nächsten 5 Jahresperiode einwachsen, während NAGEL (2008) die Wahrscheinlichkeit des Einwuchses mittels nicht-linearer Regression für separate Rasterflächen schätzt.

Verjüngungsetablierung wird meist mit Hilfe einer Abfolge von aufeinander aufbauenden Modellen geschätzt. Nach der Schätzung der Wahrscheinlichkeit des Vorkommens schließen sich Modelle zur Dichte-, Höhen- und Artenverteilung der Verjüngung an. WIKBERG (2004) schätzt die Verjüngungsdichte mit Hilfe nicht-linearer Regression, KINDERMANN et al. (2002)verwendet multinomiale logistische Regression. SCHWEIGER & STERBA (1997)ermitteln die Anzahl und Höhenverteilung der Verjüngung mittels einer zwei-dimensionalen Weibull-Verteilung. TREMER (2008) beschreibt die in seinem Modell ordinal skalierte Zielvariable Pflanzendichte mit Hilfe eines kumulativen logistischen Modells, welches einen Vektor von n-1 Wahrscheinlichkeiten für die Anzahl n der Pflanzendichteklassen schätzt. Die letzte Wahrscheinlichkeit ergibt sich aus der Differenz zu eins, und alle Wahrscheinlichkeiten zusammen summieren sich wieder zu eins auf. Fehlende Verjüngung ist als Pflanzendichteklasse null bereits in der Schätzung enthalten, so dass eine vorhergehende Schätzung des Vorkommens von Verjüngung mit dichotomer Zielvariable entfällt. Die Schätzung des Vorkommens und der Anzahl der Verjüngung erfolgt also in einem Schritt.

Die Modellwahl wird ganz wesentlich durch die zugrundeliegenden Daten bestimmt. Nur im Idealfall stehen Daten zur Verfügung, die speziell im Rahmen eines Verjüngungsexperiments erhoben wurden. Oft werden Inventurdaten verwendet; entweder von Inventuren, deren vorrangiges Ziel die Verjüngungsaufnahme darstellt, oder aber die Verjüngung wurde quasi nebenbei und vorsorglich mit aufgenommen. Inventurdaten haben mehrere Vorteile. Da die Stichprobenpunkte (Plots) entweder systematisch oder in Straten verteilt vorliegen, sind Inventurdaten für das Aufnahmegebiet repräsentativ. Des Weiteren deckt die große Plotanzahl auch größere Gradienten von Kovariablen ab. Da Verjüngungsetablierung auch eine hohe Stochastizität beinhaltet, können plausible Kausaleffekte nur erkannt werden, wenn die Datenbasis ausreichend groß ist, so dass zufällige Ereignisse weniger Gewicht haben. Ein weiterer Vorteil von Inventuren ist, dass die Aufnahmeplots häufig permanent sind und deshalb für einen Plot Folgemessungen vorhanden sind oder durchgeführt werden. Modelle können demnach mit Folgedaten auf den neuesten Stand gebracht und verbessert werden.

Da Naturverjüngung im Waldbau eine zunehmende Rolle spielt, ist die Bewertung des Verjüngungserfolges auf bestimmten Flächen eine wichtige Fragestellung. Für die strategische Waldbauplanung heißt das konkret: Unter welchen Bedingungen kann mit Naturverjüngung gearbeitet werden, um den Ziel-WET zu erreichen? Wo sollte auf Kunstverjüngung gesetzt werden? Um dies großflächig und nicht nur im Einzelfall vor Ort einschätzen zu können, müssen Vorhersagewerkzeuge (Simulatoren) in der Lage sein, die Etablierung von Naturverjüngung abzubilden. Unser Ziel war es daher, statistische standorts- und bestandessensitive Etablierungsmodelle für Buche (*Fagus sylvatica*) und Fichte (*Picea abies*) zu entwickeln, die in einen einzelbaum-basierten Waldwachstumssimulator integriert werden können, um Szenariosimulationen realistischer zu gestalten. Zugleich soll geprüft werden, welche der potentiellen Einflussfaktoren auf die Etablierung von vorrangiger Bedeutung sind. Die Ergebnisse der Etablierungsmodelle sollen ggf. als Vorschätzung in ein späteres Einwuchsmodell eingehen.

2 Daten

Die Datengrundlage dieser Arbeit waren Wiederholungsaufnahmen von 31.930 Stichprobenpunkten (Plots) aus der Betriebsinventur der Niedersächsischen Landesforsten. Zusätzlich wurden Informationen aus der Forsteinrichtung und der Standortskartierung verwendet. Die Betriebsinventur beruht auf einem zweiphasigen Stichprobenverfahren mit Stratenbildung (SABOROWSKI ET AL. 2010). Es wurden über 50 000 Aufnahmen aus 18 Forstämtern, die von den Niedersächsischen Landesforsten betreut werden, verwendet (Abbildung 1). Es überwiegen Berglandplots gegenüber Tieflandplots. Die ältesten Aufnahmen stammen von 1996, die jüngsten von 2014.

Jeder Plot besteht aus drei konzentrischen Aufnahmekreisen. Im größten Kreis (Radius = 13 m) werden Bäume mit einem BHD ≥ 30 cm aufgenommen und im mittleren Kreis (Radius = 6 m) Bäume mit einem BHD ≥ 7 cm und < 30cm. Im innersten Kreis (Radius = 3m) wird die Verjüngung aufgenommen, also Bäume mit einem BHD unter der Derbholzgrenze von 7 cm.

Im Inventurdesign werden drei Höhenklassen der Verjüngung unterschieden. Die erste Höhenklasse (HK1) beinhaltet Verjüngungsbäume, die bis zu 0.5 m hoch sind. Die zweite Höhenklasse (HK2) umfasst Verjüngungsbäume von > 0.5 m bis 1.3 m Höhe und die dritte Höhenklasse (HK3) Verjüngungsbäume > 1.3 m Höhe bis zu einem BHD < 7 cm. Das Vorkommen von Verjüngung ist als Anzahl der Verjüngungsbäume getrennt nach Baumarten und Höhenklassen pro Plot dokumentiert. In den verwendeten Daten überwiegen deutlich die Plots ohne Verjüngung der betrachteten Baumart (Tabelle 1).

Aus den gesamten zur Verfügung stehenden Daten wurden Plots mit Kunstverjüngung oder mit unsicherer Verjüngungsherkunft entfernt. Ebenso wurden Plots ohne Forsteinrichtungs- und Standortsinformationen aussortiert. Für die Fichte ergab sich damit ein Datensatz mit 51020 Aufnahmen, für Buche ein Datensatz mit 51373 Aufnahmen.

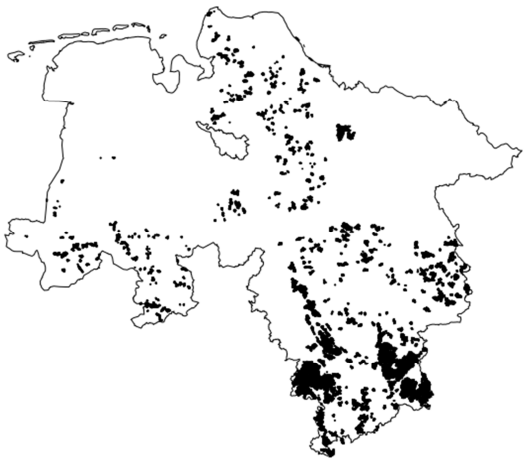

Abbildung 1: Verteilung der Betriebsinventurplots der Datengrundlage aus 18 Forstämtern in Niedersachsen

Tabelle 1: Anzahl der Aufnahmen mit unterschiedlicher Verjüngungssituation für Buchen- und Fichtendatensatz

		Keine Verjüngung	Verjüngung in 2. Höhenklasse	Verjüngung in 2. *und* 3. Höhenklasse	Verjüngung in 3. Höhenklasse
Aufnahmeanzahl	**Fichtendaten**	44939	2983	2219	879
	Buchendaten	38850	4020	6219	2284

Aus den Standorts- und Bestandesdaten wurden elf Variablen abgeleitet, mit denen das Gros der potentiellen Einflußfaktoren auf die Verjüngung abgedeckt wird. Die Variablen, die für die entwickelten Modelle von Bedeutung sind, werden im Folgenden kurz vorgestellt. Die numerischen Modellvariablen und die Höhe über Normalnull werden außerdem nach Quantilen (Tabelle 2) bzw. die Faktorvariablen nach Plotanzahl je Ausprägungsstufe aufgelistet (Tabelle 3).

Die Summe der Kronenprojektionsfläche aller Derbholzbäume auf dem Plot (KPF in m²/ha) ist ein einfaches Konkurrenzmaß. Dabei handelt es sich nicht nur um Konkurrenz um Licht: KPF spiegelt auch den Einfluß des Wurzelraumes und somit Wurzelkonkurrenz um Wasser und Nährstoffe wieder. Gleichzeitig lassen sich Annahmen über Streumenge, Mikroklima und Frostgefährdung der Verjüngungspflanzen ableiten. Der prozentuale Anteil der Buchen an der KPF (BU_PROZ in %) läßt Rückschlüsse auf die Lichtdurchlässigkeit des Kronendaches zu und gibt im Falle des Buchenmodells zusätzlich Auskunft über das Vorhandensein der Verjüngungsbaumart. Der prozentuale Anteil von Bäumen mit lichtdurchlässigeren Kronen, nämlich Kiefer, Birke, Esche, Eiche und Lärche, an der KPF (LI_PROZ in %) ist hauptsächlich ein Maß für die Lichtverfügbarkeit auf dem Plot. Der Grundflächenmittelstamm (DG in cm) aller Derbholzbäume der Verjüngungsbaumart auf dem Plot ist zugleich ein Strukturmaß der Verjüngungsbaumart und eine Information über das Vorhandensein von potentiellen Samenbäumen auf dem Plot. Mehr noch als das Alter sagt der DG etwas über die baumartenspezifische Mannbarkeit oder Reife eines Baumes aus, deren Beginn davon abhängt, ob der Baum im Bestand oder als Solitär aufwächst. Sowohl Fichten- als auch Buchensamen können über Distanzen verteilt werden, die über den Radius des größten Aufnahmekreises hinausgehen. Potentielle Samenbäume können also auch im Bestand, in dem der Plot liegt, wirken. Das Vorkommen der Verjüngungsbaumart im Derbholz (VOR_VBA) wurde deshalb mit einer Faktorvariablen beschrieben. Ausprägungsstufen in Bezug auf das Vorkommen von potentiellen Samenbäumen sind *kein Vorkommen* (0), *Vorkommen auf dem Plot oder im Bestand* (1) und *Vorkommen sowohl auf dem Plot als auch im Bestand* (2) (siehe auch Tabelle 3). Fünf Nährkraftstufen (NÄHR) wurden aus der sogenannten Nährstoffzahl aus der Forstlichen Standortskartierung in Niedersachsen abgeleitet (siehe auch Tabelle 3). Die Gruppe mit der höchsten Plotanzahl ist sowohl bei Buche als auch bei Fichte die dritte (*gut mesotroph*). Außerdem wurden die Koordinaten des Plotmittelpunktes (Gauß-Krüger-Koordinatensystem, 3. Meridian) in die Modellierung einbezogen, um den räumlich strukturierten Fehler zu erfassen. Dieser kann durch etwaige räumlich korrelierte, nicht durch die Prädiktoren erfasste Einflüsse hervorgerufen werden.

Die Höhe über Normalnull in m (HNN) wurde nicht im Modell verwendet, die Datengrundlage deckt jedenfalls eine sehr große Höhenspanne ab (Tabelle 2). Des Weiteren wurden die Kovariablen Wasserhaushaltsstufe, nutzbare Feldkapazität und Bodenart als Prädiktoren im Modell geprüft. Da sie nicht ins Modell eingehen, werden sie hier nicht weiter vorgestellt. Die Kovariable *Prozentuale Bodenbedeckung mit störender Begleitvegetation* wurde trotz plausiblen und signifikanten Modelleffekten letztlich nicht in die Modellselektion einbezogen, da diese Information für Daten, die nicht aus der Betriebsinventur der Niedersächsischen Landesforsten stammen, meist nicht vorliegt und das Modell daher nur eingeschränkt anwendbar wäre.

Tabelle 2: Quantile der in den Modellen verwendeten numerischen Variablen und von der Höhe über NN (m)

Numerische Variable	Quantil	5%	25%	50%	75%	95%	100%
KPF [m²/ha]	Buchenverjüngung	2968	6070	8287	10731	15173	34721
	ohne Buchenverjüngung	2564	5813	7778	10022	14950	60524
	Fichtenverjüngung	1095	4800	6656	8470	11992	38741
	ohne Fichtenverjüngung	3010	6292	8619	11730	18334	60524
DG [cm]	Buchenverjüngung	0.0	0.0	35.4	48.7	62.4	128.0
	ohne Buchenverjüngung	0.0	0.0	0.0	0.0	43.7	114.0
	Fichtenverjüngung	0.0	0.0	37.7	45.2	54.7	89.2
	ohne Fichtenverjüngung	0.0	0.0	0.0	35.1	48.5	108.2
BU_PROZ [%]	Buchenverjüngung	0	0	61	100	100	100
	ohne Buchenverjüngung	0	0	0	0	84	100
	Fichtenverjüngung	0	0	0	12	100	100
	ohne Fichtenverjüngung	0	0	8	72	100	100
LI_PROZ [%]	Buchenverjüngung	0	0	0	28	97	100
	ohne Buchenverjüngung	0	0	10	71	100	100
	Fichtenverjüngung	0	0	0	41	100	100
	ohne Fichtenverjüngung	0	0	11	57	100	100
HNN [m]	Buchenverjüngung	36.5	192.9	278.2	364.5	508.9	700.4
	ohne Buchenverjüngung	22.0	56.6	222.7	396.8	584.3	952.6
	Fichtenverjüngung	19.4	78.3	315.9	456.5	584.2	902.6
	ohne Fichtenverjüngung	26.6	83.6	244.0	353.3	549.3	944.4

Tabelle 3: Aufnahmeanzahl (n_{Auf}) je nach Vorkommen der Verjüngungsbaumart im Derbholz (VOR_VBA) bzw. nach Nährkraftstufe (NÄHR) des Bodens

VOR_VBA	kein Vorkommen (0)	Plot oder Bestand (1)	Plot und Bestand (2)
Buchenverjüngung n_{Auf}	548	3426	8549
ohne Buchenverjüngung n_{Auf}	15075	17811	5964
Fichtenverjüngung n_{Auf}	232	1732	4117
ohne Fichtenverjüngung n_{Auf}	15029	14934	14976

NÄHR	oligotroph (1)	mesotroph (2)	gut mesotroph (3)	eutroph (4)	karbonatisch-eutroph (5)
Buchenverjüngung n_{Auf}	296	205	7276	2022	2724
ohne Buchenverjüngung n_{Auf}	4971	2223	25151	3839	2666
Fichtenverjüngung n_{Auf}	556	1422	3637	375	91
ohne Fichtenverjüngung n_{Auf}	3509	5843	21925	6518	7144

3 Methoden

3.1 Modellentwicklung

Der Modellentwicklung gingen verschiedene Überlegungen bezüglich des Datenausschnittes voraus. Da es sich um Etablierungsmodelle handelt, wurde die Verjüngung der ersten Höhenklasse nicht berücksichtigt. In dieser frühen Verjüngungsphase variiert die Anzahl der Verjüngung stark; es entstehen viele Jungpflanzen, ihre Zahl reduziert sich aufgrund der dichtebedingten natürlichen Mortalität aber auch wieder. Die Baumanzahl in der ersten Höhenklasse gibt daher keine sichere Auskunft darüber, ob dauerhafte Verjüngung entstanden ist. Da die erste Höhenklasse keine sinnvolle Untergrenze hat, besteht außerdem die Gefahr, dass Sämlinge aufgenommen werden. Eine andere Überlegung betraf den Hauptbestand. Das Etablierungsmodell wird vor allem in Situationen benötigt, in denen der Hauptbestand in die Nutzung geht und damit ein Generationswechsel ansteht. Modellbasiert wurden daher im Fichtendatensatz Plots mit einem DG ≤ 30 cm eliminiert und im Buchendatensatz Plots mit einem DG ≤ 25 cm, sofern die Verjüngungsbaumart auf dem Plot vorkommt. Plots mit DG = 0 blieben jedoch in beiden Datensätzen erhalten. Die Verjüngungsetablierung wurde statisch geschätzt, d.h. Daten der Erst- und der Zweitaufnahme wurden gemeinsam verwendet um den Etablierungszustand zu schätzen.

Für beide Baumarten wurden Generalisierte Additive Regressionsmodelle (GAM) verwendet, um die Prädiktoren auf eventuelle nicht-lineare Modelleffekte zu testen. Die allgemeine Modellgleichung mit einem Term zur Beschreibung eines räumlichen Trends, sieht wie folgt aus:

$$g\big(P(y_{ij} \leq r)\big) = \theta_{\mathrm{r}} + f_1\big(x1_{ij},\big) + f_2\big(x2_{ij}\big) + \cdots + f_{\mathrm{k}}\big(xn_{ij}\big) + f_l(RW_i, HW_i) \qquad \text{(Gl. 1)}$$

mit g : Linkfunktion (Logit)

$f_1 \ldots f_k$: eindimensionale Glättungsfunktionen

f_l : zweidimensionale Glättungsfunktion in Abhängigkeit von Rechtswert (RW) und Hochwert (HW)

3.2 Kategorische Regression

Das Vorkommen von Verjüngung auf dem Plot wurde mit Hilfe geordneter kategorischer Regression modelliert. Vier verschiedene mögliche Verjüngungssituationen beschreiben die Ausprägungsstufen des Vorkommens und damit die Kategorien der beobachteten Variablen: Kategorie1 = keine Verjüngung, Kategorie 2 = Verjüngung in Höhenklasse 2, Kategorie 3 = Verjüngung in Höhenklasse 2 und 3, Kategorie 4 = Verjüngung in Höhenklasse 3 (Tabelle 1). Diese Kategorien sind geordnet, d.h. sie bauen aufeinander auf und bilden eine logische (zeitliche) Abfolge. Für jede Zielvariable werden simultan vier Wahrscheinlichkeiten geschätzt. Diese Wahrscheinlichkeiten jeweils zu einer der vier Kategorien zu gehören, werden mit Hilfe einer latenten (unbeobachtbaren) Variable U geschätzt, die hinter den Kategorien steht (FAHRMEIR ET AL. 2009). Die latente Variable steht zur Kovariablenausprägung x' in folgender Beziehung

$$U_i = -x'_i\beta + \varepsilon_i$$

wobei β einen Parametervektor darstellt und ε_i eine Störvariable mit einer Verteilungsfunktion F.

Der beobachtete Wert y_i, der zur Kategorie r gehört, ist mit der latenten Variablen über das Schwellenwertkonzept verknüpft:

$$Y_i = r \Leftrightarrow \theta_{r-1} < U_i \leq \theta_r, \quad r = 1, \ldots, q$$

wobei $-\infty = \theta_0 < \theta_1 < \ldots < \theta_c = \infty$ Schwellenwerte sind, die auf dem latenten Kontinuum liegen.

Daraus ergibt sich ein kumulatives Modell mit Verteilungsfunktion F:

$$P(Y_i \leq r|\, x_i) = F(\theta_r + x'_i\beta), \quad r = 1, \ldots, \mathrm{c}$$

wobei $P(Y_i \leq r) = P(Y_i = 1) + \ldots + P(Y_i = r)$ die kumulativen Wahrscheinlichkeiten sind.

Die Schwellenwerte werden zusammen mit den Glättungsparametern des Modells geschätzt. Aus der Wahrscheinlichkeit, dass die latente Variable zwischen zwei bestimmten Schwellenwerten liegt, ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, dass die Zielvariable zur entsprechenden Kategorie gehört (WOOD ET AL. 2016). Eine Erhöhung des Modelleffektes bewirkt daher eine steigende Wahrscheinlichkeit der Zielvariablen, einer höheren Kategorie anzugehören. D.h., war die Ausgangskategorie *Vorkommen in der 2. Höhenklasse*, kann ein positiver Modelleffekt eine Änderung hin zu *Vorkommen in der 2. und 3. Höhenklasse* oder sogar *Vorkommen in der 3. Höhenklasse* bewirken.

Standardsoftware zur Parametrisierung des hier vorgestellten Modelltyps steht in Form der R-Programmbibliothek (R CORE TEAM 2017) und speziell dem Package mgcv zur Verfügung (WOOD 2006).

4 Ergebnisse

Die Variablenselektion wurde manuell schrittweise vorwärts anhand des Bayes'schen Informationskriteriums (BIC) durchgeführt (Tabelle 4 und Tabelle 5). Nach jedem Selektionsschritt wurde geprüft, ob die Variable signifikant und ihr Effekt plausibel ist. Die Variablenselektion wurde beim niedrigsten BIC abgebrochen.

Tabelle 4: Bayes'sches Informationskriterium (BIC) und erklärte Abweichung des Modells für die Modellselektionsstufen des Fichtenmodells

Ausgewählte Variablen	Erklärte Abweichung (%)	BIC
f_1(RW, HW)	7.5	46502
VOR_VBA, f_1(RW, HW)	13.9	44360
VOR_VBA, f_2(KPF), f_1(RW, HW),	17.8	43163
VOR_VBA, f_2(KPF), f_3(DG), f_1(RW, HW),	18.5	42921
VOR_VBA, f_2(KPF), f_3(DG), NÄHR, f_1(RW, HW),	19.6	42749
VOR_VBA, f_2(KPF), f_3(DG), NÄHR, f_4(BU_PROZ), HV, f_1(RW, HW)	20.0	42622

Tabelle 5: Bayes'sches Informationskriterium (BIC) und erklärte Abweichung des Modells für die Modellselektionsstufen des Buchenmodells

Ausgewählte Variablen	Erklärte Abweichung (%)	BIC
f_1(RW, HW)	6.2	78223
VOR_VBA, f_1(RW, HW)	19.8	69126
VOR_VBA, f_2(BU_PROZ), f_1(RW, HW)	20.7	68487
VOR_VBA, f_2(BU_PROZ), f_3(KPF), f_1(RW, HW)	21.6	67997
VOR_VBA, f_2(BU_PROZ), f_3(KPF), f_4(DG), f_1(RW, HW)	22.0	67757
VOR_VBA, f_2(BU_PROZ), f_3(KPF), f_4(DG), NÄHR, f_1(RW, HW)	22.3	67591
VOR_VBA, f_2(BU_PROZ), f_3(KPF), f_4(DG), NÄHR, LI_PROZ, f_1(RW, HW)	22.6	67422

4.1 Fichtenmodell

Im Zuge der Modellselektion gingen zusätzlich zum räumlichen Trend fünf Kovariablen in das Fichtenmodell ein (Gl. 2). Alle Kovariablen sind hoch signifikant, sie werden im Folgenden der Reihenfolge ihrer Auswahl nach aufgeführt.

$$g\left(P(y_{ij} \leq r)\right) = \theta_r + f_1(RW_i, HW_i) + VOR_VBA_{ij} + f_2\left(KPF_{ij}\right) + f_3\left(DG_{ij}\right) \times Z_{ij} + NÄHR_i + f_4\left(BU_PROZ_{ij}\right) + HV_{ij} \quad \text{(Gl. 2)}$$

wobei $\pi_{ij,r} = P\left(y_{ij} \leq r\right)$ mit $y_{ij} \sim$ multinomial $\left(\pi_{ij1}, \ldots, \pi_{ij4}\right)$: Erwartungswert $E\left(y_{ij}\right)$ als Wahrscheinlichkeiten der vier Kategorien des Vorkommens von Verjüngung auf Plot i in Inventur j, g: Linkfunktion (Logit), f_1: zweidimensionale Glättungsfunktion (penalised thin plate regression spline), $f_2 \ldots f_4$: eindimensionale Glättungsfunktionen, RW_i: Rechtswert des Plots i, HW_i: Hochwert des Plots i, VOR_VBA_{ij}: Vorkommen der Verjüngungsbaumart im Derbholz des Plots i während Inventur j, KPF_{ij}: Kronenprojektionsfläche aller Derbholzbäume auf Plot i während Inventur j, DG_{ij}: Grundflächenmittelstamm der Verjüngungsbaumart im Derbholz auf Plot i während Inventur j, Z_{ij}: Dummy-Variable für DG-Glättungsfunktion, $NÄHR_i$: Nährkraftstufe auf Plot i, BU_PROZ_{ij}: Prozentualer Anteil der Buche an der KPF auf Plot i während Inventur j, HV_{ij}: Hilfsvariable.

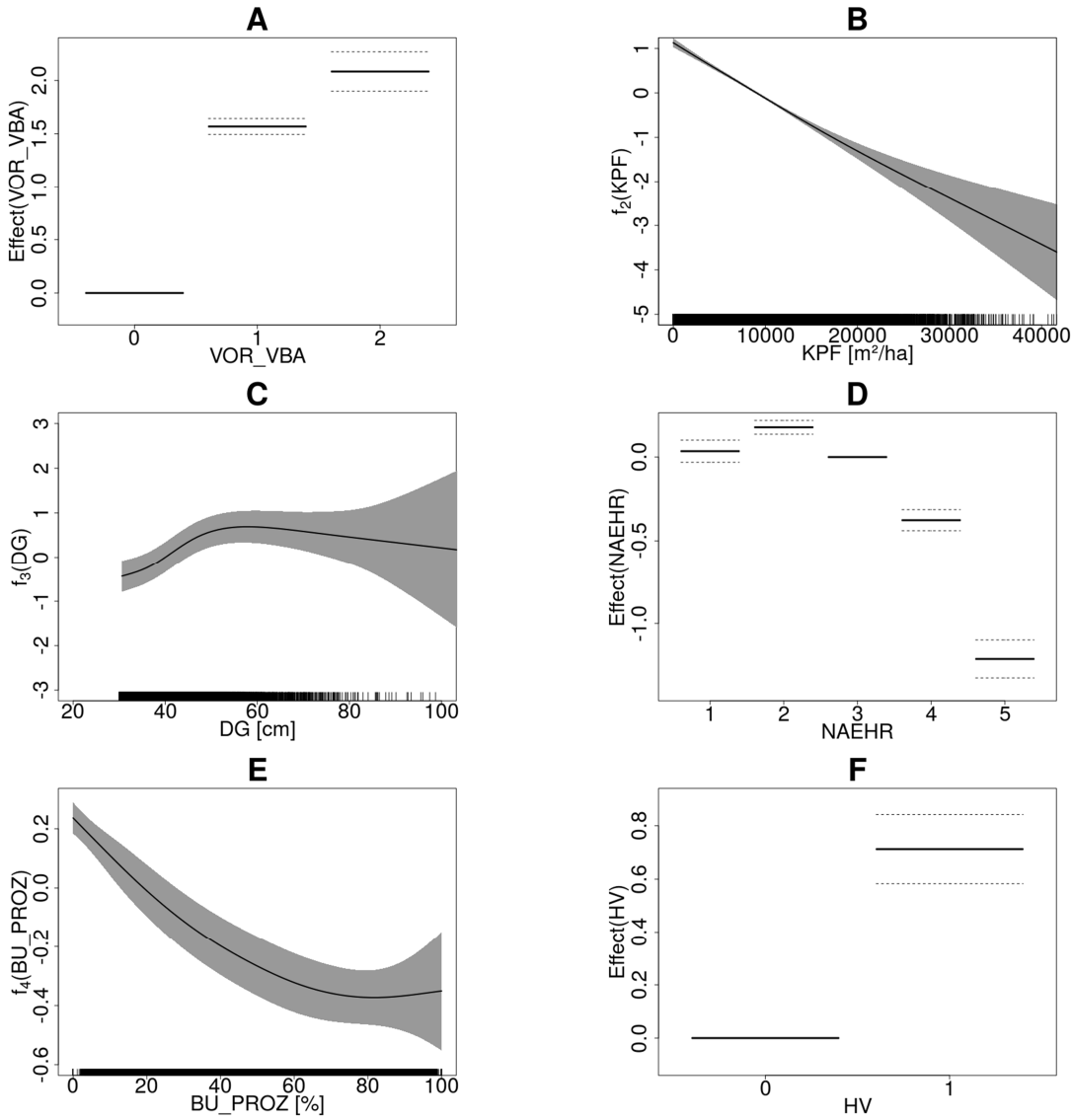

Abbildung 2: Effekte der Kovariablen des Fichtenmodells; Konfidenzbänder (95%) grau hinterlegt, Datendichte als schwarze Markierungen an der x-Achse; Konfidenzbereich (95%) mit Punktlinien markiert

Die stärkste Reduktion des BIC bewirkt VOR_VBA. Gehört die Verjüngungsbaumart zum Derbholz, steigt der Effekt von VOR_VBA und - bei gleichbleibenden übrigen Kovariableneffekten - damit die Wahrscheinlichkeit einer höheren Verjüngungskategorie. Ist die Verjüngungsbaumart sowohl auf dem Plot als auch im Bestand im Derbholz nachweisbar, steigt die Wahrscheinlichkeit wiederum, allerdings nicht mehr so stark (Abbildung 2, A). Der Effekt der KPF fällt monoton und fast linear. Eine steigende KPF bewirkt damit eine größere Wahrscheinlichkeit einer niedrigeren Verjüngungskategorie (Abbildung 2, B). Beginnend bei einem DG von 30 cm steigt der Effekt dieser Kovariablen bis zu einem DG von ca. 50 cm, danach kann aufgrund der Breite des Konfidenzbandes unterstellt werden, dass der Effekt gleichbleibt (Abbildung 2, C). Für den Fall, dass die Verjüngungsbaumart nicht im Derbholz des Plots vorkommt, muss eine Dummy-Variable bei der Modellierung des DG-Effektes verwendet werden. Der Effekt der Nährkraftstufe und damit die Wahrscheinlichkeit einer höheren Verjüngungskategorie steigen von oligotroph (1) zu mesotroph (2), danach fallen sie von den gut mesotroph (3) versorgten Standorten über die eutroph (4) bis zu den karbonatisch-eutroph versorgten Standorten monoton ab (Abbildung 2, D). Nimmt BU_PROZ zu, fällt der BU_PROZ-Effekt monoton. Ab einem BU_PROZ von ca. 60% kann unterstellt werden, dass der Effekt gleich bleibt (Abbildung 2, E). Wenn BU_PROZ 100% erreicht, sind keine Fichten auf dem Plot vorhanden und der DG-Effekt fällt im Fichtenmodell weg. HV wurde ins Modell aufgenommen, da ohne sie die anderen Kovariableneffekte wegen des fehlenden DG-Effekts verzerrt werden, was sich vor allem beim BU_PROZ-Effekt auswirkt (Abbildung 2, F).

4.2 Buchenmodell

Im Buchenmodell gingen zusätzlich zum räumlichen Trend sechs Kovariablen ein (Gl. 3), die ebenfalls hoch signifikant sind. Auch hier werden die Kovariablen der Reihenfolge ihrer Auswahl nach aufgeführt.

$$g\left(P(y_{ij} \le r)\right) = \theta_r + f_1(RW_i, HW_i) + VOR_{VBA_{ij}} + f_2(BU_PROZ_{ij}) + f_3(KPF_{ij}) + f_4(DG_{ij}) \times Z_{ij} + NÄHR_i + LI_PROZ_{ij} \quad \text{(Gl. 3)}$$

wobei $\pi_{ij,r} = P(y_{ij} \le r)$ mit $y_{ij} \sim$ multinomial $(\pi_{ij1}, \dots, \pi_{ij4})$: Erwartungswert $E(y_{ij})$ als Wahrscheinlichkeiten der vier Kategorien des Vorkommens von Verjüngung auf Plot i in Inventur j, g: Linkfunktion (Logit), f_1: zweidimensionale Glättungsfunktion (penalised thin plate regression spline), $f_2 \dots f_4$: eindimensionale Glättungsfunktionen, RW_i: Rechtswert des Plots i, HW_i: Hochwert des Plots i, VOR_VBA_{ij}: Vorkommen der Verjüngungsbaumart im Derbholz des Plots i während Inventur j, BU_PROZ_{ij}: Prozentualer Anteil der Buche an der KPF auf Plot i während Inventur j, KPF_{ij}: Kronenprojektionsfläche aller Derbholzbäume auf Plot i während Inventur j, DG_{ij}: Grundflächenmittelstamm der Verjüngungsbaumart im Derbholz auf Plot i während Inventur j, Z_{ij}: Dummy-Variable für DG-Glättungsfunktion, $NÄHR_i$: Nährkraftstufe auf Plot i, LI_PROZ_{ij}: Prozentualer Anteil von Baumarten mit lichtdurchlässigeren Kronen an der KPF auf Plot i während Inventur j.

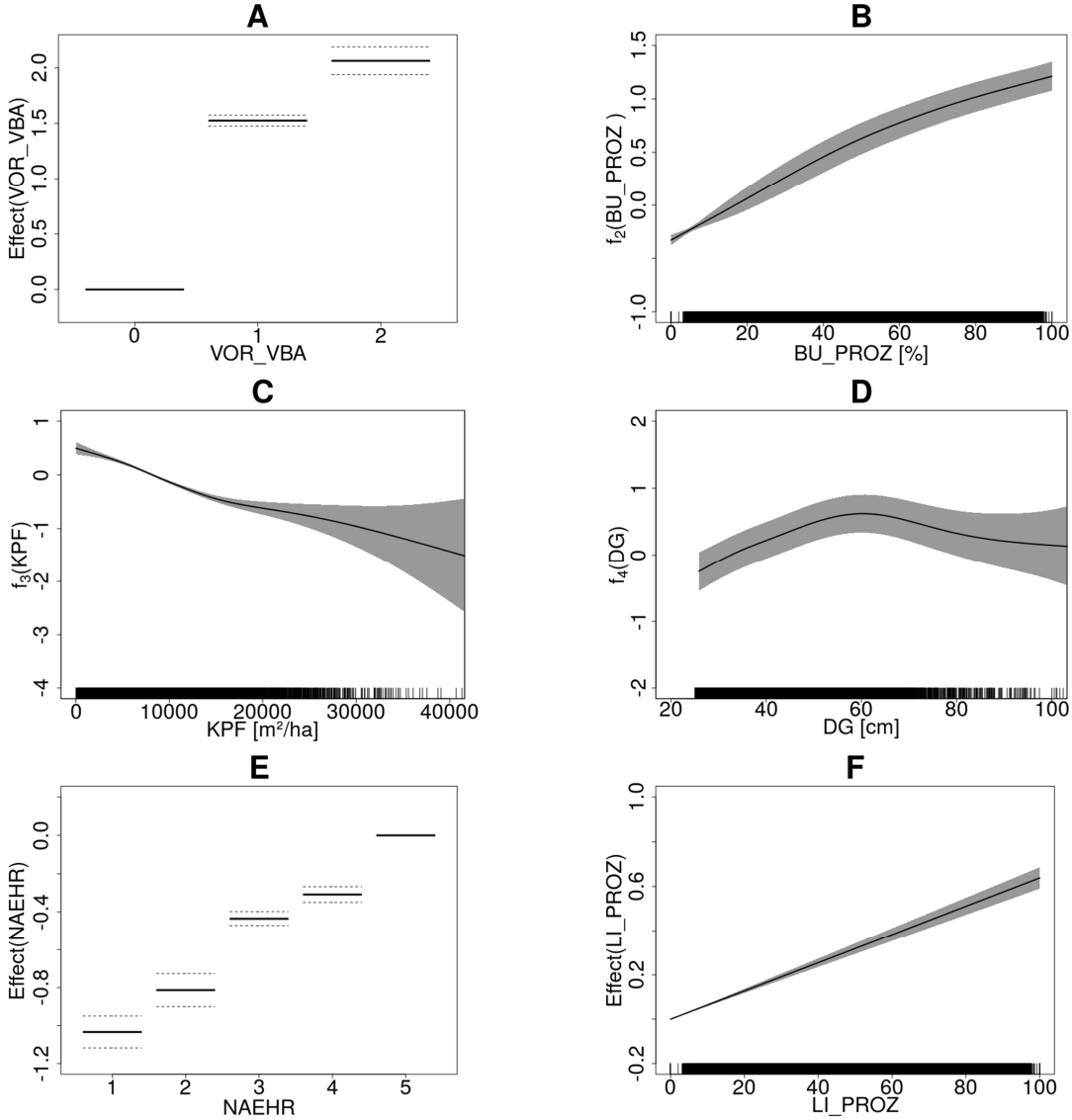

Abbildung 3: Effekte der Kovariablen des Buchenmodells; Konfidenzbänder (95%) grau hinterlegt, Datendichte als schwarze Markierungen an der x-Achse; Konfidenzbereich (95%) mit Punktlinien markiert

Auch im Buchenmodell steht die kategoriale Variable VOR_VBA an erster Stelle. Der Effekt von VOR_VBA ist am höchsten und die Wahrscheinlichkeit einer höheren Verjüngungskategorie am größten, wenn die Buche im Derbholz sowohl auf dem Plot als auch im Bestand vorkommt (Abbildung 3, A). Mit steigendem BU_PROZ steigt auch der Effekt dieser Kovariablen monoton an. Aufgrund der Breite des Konfidenzbandes kann hier fast ein linearer Verlauf unterstellt werden (Abbildung 3, B). Der Effekt der KPF fällt mit sinkender KPF monoton und annähernd linear. Ab einer KPF von ca. 25 000 m²/ha dünnen sich die Daten deutlich aus, das Konfidenzband läßt keine eindeutige Interpretation mehr zu (Abbildung 3, C). Von einem DG von 25 cm bis 60 cm steigt der DG-Effekt leicht an. Ab einem DG von 60 cm steigt der Effekt nicht weiter. Darüber hinaus kann aufgrund abnehmender Datendichte und der Breite des Konfidenzbandes keine klare Aussage abgeleitet werden (Abbildung 3, D). Der Effekt von NÄHR steigt von oligotroph (1) über mesotroph (2), gut mesotroph (3) und eutroph (4) bis karbonatisch-eutroph (5) an (Abbildung 3, E). Mit steigendem LI_PROZ steigt der Effekt dieser Kovariablen linear an (Abbildung 3, F).

4.3 Sensitivitätsanalyse

Um zu überprüfen, wie die Modelleffekte auf Änderungen der Parametersetzungen reagieren, wurde eine Sensitivitätsanalyse sowohl für das Buchen- als auch für das Fichtenmodell durchgeführt. Hier sollen exemplarisch nur die Auswirkungen der Variation von VOR_VBA und BU_PROZ am Beispiel der KPF im Buchenmodell gezeigt werden. Die Parametersetzung wurde innerhalb der durch den Datensatz abgedeckten Spannbreite variiert. DG und NÄHR wurden dabei auf für die Buchenverjüngung optimale Werte gesetzt (Tabelle 6), welche aus den Modelleffekten abgeleitet wurden (Abbildung 3, D und E).

Tabelle 6: Variation der Parametersetzung für die Sensitivitätsanalyse des Buchenmodells am Beispiel der KPF [m²/ha], dargestellt in Abb. 4.

Variante in Abbildung 4	VOR_VBA	BU_PROZ [%]	DG [cm]	NÄHR
A	0	0	0	karbonatisch-eutroph
B	1	0	0	karbonatisch-eutroph
C	1	20	60	karbonatisch-eutroph
D	2	20	60	karbonatisch-eutroph
E	1	80	60	karbonatisch-eutroph
F	2	80	60	karbonatisch-eutroph

Der Trend des KPF-Effektes ist in allen Variationen außer A klar zu erkennen. Sind keine Samenbäume vorhanden, ist auch der Einfluß der Lichtverfügbarkeit auf die Verjüngung zu vernachlässigen (Abbildung 4, A). Gibt es Buchen im Derbholz zwar nicht auf dem Plot, aber im den Plot umgebenden Bestand, sinkt die Wahrscheinlichkeit nichtverjüngter Plots deutlich, im Schnitt um 20% (Abbildung 4, B). Ebenso ist ersichtlich, dass sich das Vorhandensein von Samenbäumen besonders positiv auswirkt, wenn sie – und je mehr sie – auf dem Plot vertreten sind (Abbildung 4, C und E). Aber auch das Vorhandensein im Bestand zusätzlich zum Vorkommen auf dem Plot bei gleichem BU_PROZ erhöht die Wahrscheinlichkeit einer höheren Kategorie der Buchenverjüngung (Abbildung 4, D und F).

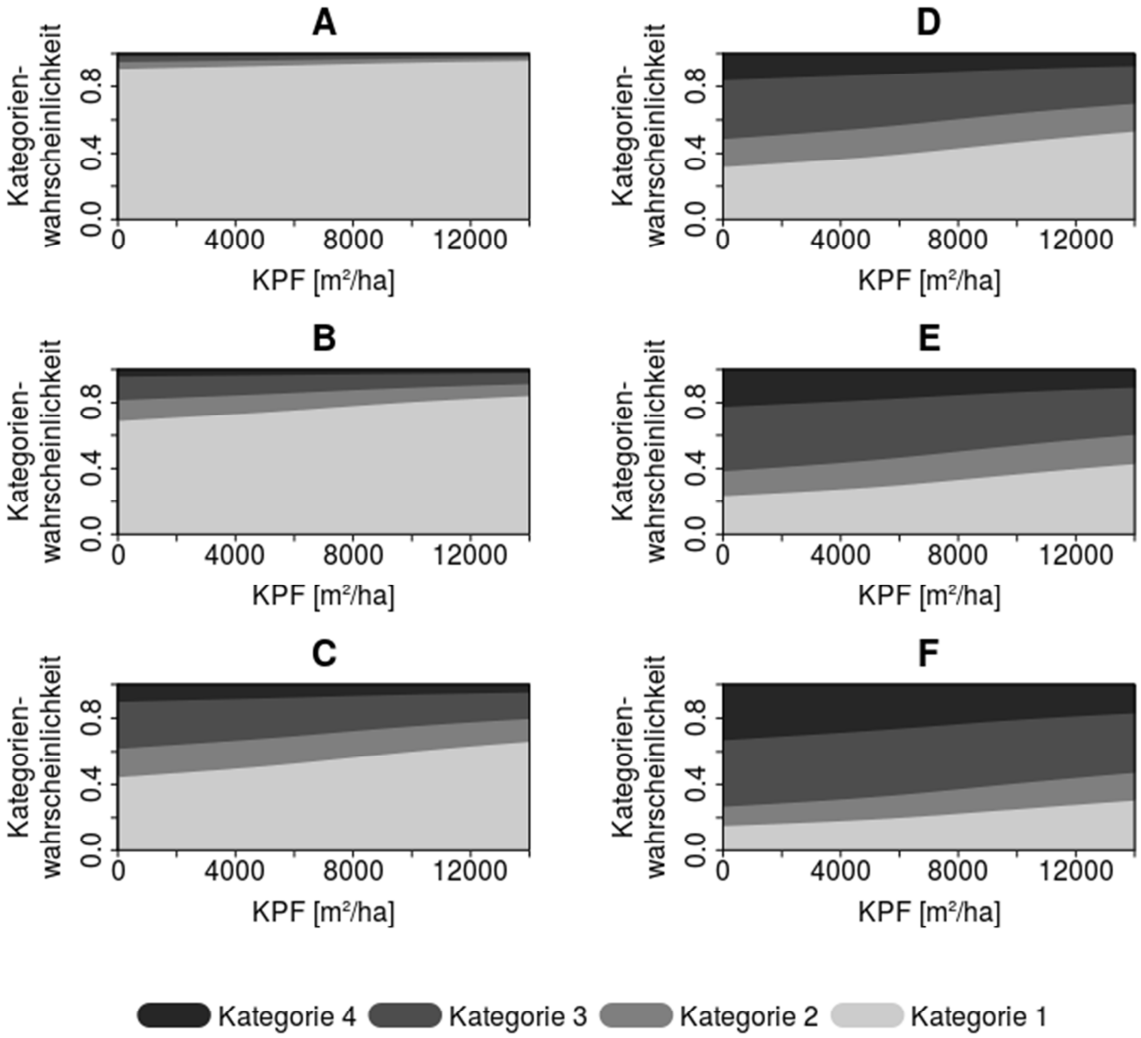

Abbildung 4: Auswirkungen der Variation der Parametersetzung auf den Effekt der Kronenprojektionsfläche aller Derbholzbäume auf dem Plot (KPF in m²/ha) im Buchenmodell (siehe auch Tabelle 6); Kategorie1 = keine Verjüngung, Kategorie 2 = Verjüngung in Höhenklasse 2, Kategorie 3 = Verjüngung in Höhenklasse 2 und 3, Kategorie 4 = Verjüngung in Höhenklasse 3

4.4 Kreuzvalidierung

Für Buchen- und Fichtenmodell wurde jeweils eine 100-fache Kreuzvalidierung durchgeführt. 80% des Datensatzes wurden dabei für die Anpassung des Modells und 20% für die Vorhersage verwendet. Vorgehensweise und Ergebnisse der Kreuzvalidierung werden hier am Beispiel von VOR_VBA im Buchenmodell dargestellt. Verglichen wurde der beobachtete prozentuale Anteil der Plots je Faktorstufe von VOR_VBA mit der mittleren Wahrscheinlichkeit der Plotanteile je Faktorstufe aus 100 Schätzungen der Kreuzvalidierung. Analog wurden bei numerischen Variablen die Anteile für Straten dieser Variablen verglichen. Der Fehlerbalken der Schätzsäulen indiziert die Range vom minimalen zum maximalen mittleren Schätzwert (Abbildung 5). Minimale und maximale mittlere Wahrscheinlichkeit der Plotanteile von 100 Kreuzvalidierungsläufen liegen dabei naturgemäß dichter beieinander als der beobachtete prozentuale Anteil der Plots und die mittlere Wahrscheinlichkeit der Plotanteile. In allen Kategorien zeigen sich die größten Unterschiede in der Faktorstufe 2, wobei sowohl unter- als auch überschätzt wird.

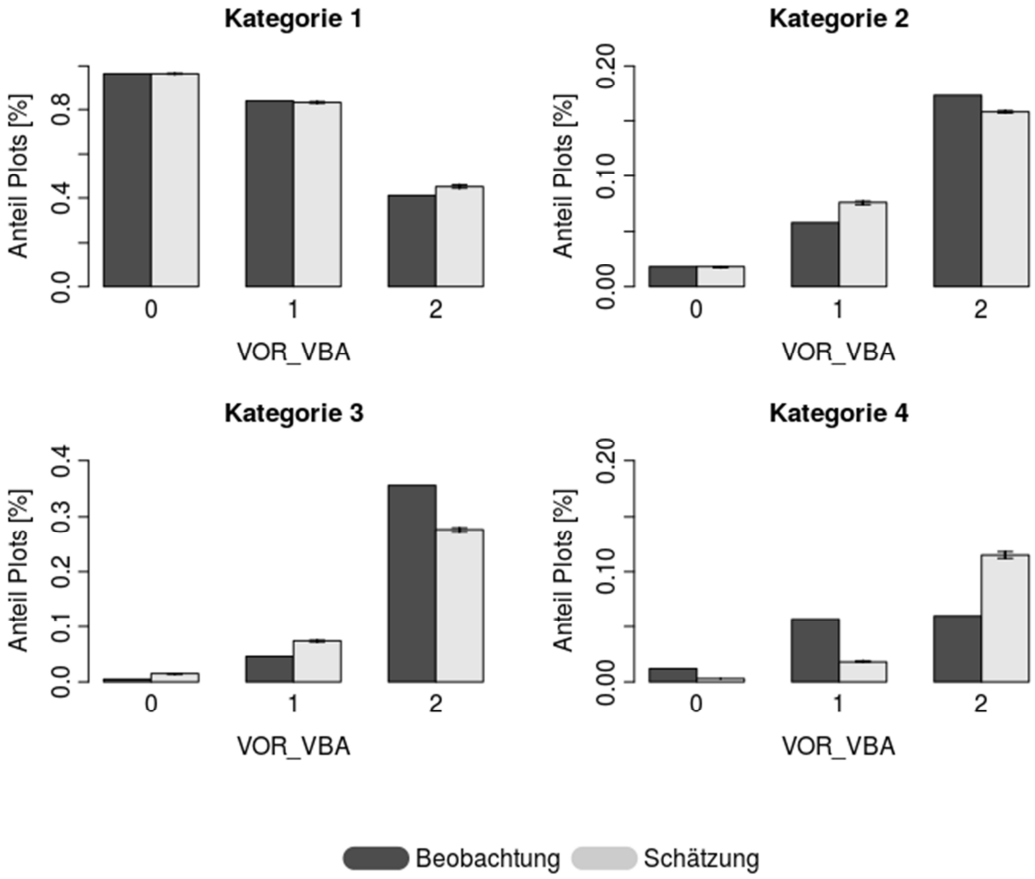

Abbildung 5: Vergleich der beobachteten und der mittleren geschätzten prozentualen Anteile der Plots für das Vorkommen der Verjüngungsbaumart im Derbholz des Plots (VOR_VBA) im Buchenmodell, getrennt nach Kategorien; der Fehlerbalken gibt die Range vom minimalen zum maximalen mittleren Schätzwert der 100-fachen Kreuzvalidierung an; Faktorstufen VOR_VBA: 0 = kein Vorkommen, 1 = Vorkommen auf dem Plot oder im Bestand, 2 = Vorkommen sowohl auf dem Plot als auch im Bestand; Kategorie 1 = keine Verjüngung, Kategorie 2 = Verjüngung in Höhenklasse 2, Kategorie 3 = Verjüngung in Höhenklasse 2 und 3, Kategorie 4 = Verjüngung in Höhenklasse 3

5 Diskussion

Die zweite und dritte Höhenklasse decken eine relativ große Spannbreite der Verjüngungsentwicklung ab. Als mögliche Vorschätzung für eine zukünftig angedachte Einwuchsmodellierung schien es nicht ausreichend, beide Höhenklassen zusammenzulegen und das Vorkommen als dichotome Zielvariable zu modellieren; wichtige Informationen über Struktur der Verjüngung und Entwicklungsstadium der Etablierung wären damit verlorengegangen. TREMER (2008) verwendet ebenfalls Betriebsinventurdaten der Niedersächsischen Landesforsten und schätzt Vorkommen und Anzahl der Verjüngung für einzelne Baumart-Höhenklassen-Kombinationen in einem Schritt mit Hilfe eines kumulativen logistischen Modells. Seine Zielvariable ist die Pflanzendichte, die ordinal skaliert ist und bei null beginnt. Diese Art der Modellierung vereinfacht die sonst häufige Vorgehensweise, Vorkommen und Dichte mittels zweier aufeinanderfolgender Modelle zu schätzen. Im Hinblick auf eine spätere Einwuchsmodellierung ist der Ansatz der vorliegenden Arbeit, das Vorkommen in den Höhenklassen, dem eine zeitliche Abfolge zugrunde liegt, simultan zu schätzen, aber möglicherweise aussagekräftiger und zielführender.

Die Datengrundlage ist für den niedersächsischen Landeswald repräsentativ und ausreichend groß, um trotz hoher stochastischer Komponenten der Verjüngungsetablierung eine unverzerrte Modellschätzung zu gewährleisten. Sowohl Buchen- als auch Fichtenmodell leisten zufriedenstellende Vorhersagen in der Kreuzvalidierung für die einzelnen Stufen der Faktorvariablen bzw. für zum Zwecke der Validie-

rung gebildeten Straten der numerischen Kovariablen. Die Sensitivitätsanalyse zeigt eine sehr gute Resonanz und plausible Reaktionen beider Modelle auf eine Änderung der Parametersetzungen. Wichtigste Einflußgröße ist dabei das Vorhandensein von potentiellen Samenbäumen. Erst wenn diese vorhanden sind, wirkt sich die Variation der anderen Parameter deutlich aus und spiegelt bei *ceteris paribus* den Effekt der jeweils variierten Kovariable.

VOR_VBA hat sich als wichtigste Kovariable herausgestellt, sowohl anhand des Bayes'schen Informationskriteriums als auch in der Sensitivitätsanalyse. Vor allem bei Buche ist wegen der sehr unterschiedlichen Samenproduktion und des geringeren Samenverteilungsradius der Anteil der Baumart im Derbholz als signifikante Variable anzusehen (SAGNARD et al. 2007). Die Autoren wiesen eine mittlere Samenverbreitungsdistanz von nur 6,5 m für Buche im Bestand nach, allerdings ziehen sie dabei keine Samenverteilung durch Tiere in Betracht, die gerade bei Buche eine ganz wesentliche Rolle spielt. STARKE (1996) gibt einen maximalen Samenverbreitungsradius von 50 m für Buche an. Für die Weißtanne ermittelten SAGNARD et al. (2007) eine mittlere Samenverbreitungsdistanz von 13,2 m – 19,2 m im Bestand, und für Weißfichte in Canada geht die Samenmenge nach 100 m Abstand zum Samenbaum deutlich zurück, aber selbst nach 300 m lassen sich noch etwa 3% der Samenmenge im Bestand nachweisen (DOBBS 1976). Diese Angaben rechtfertigen sowohl für Buche als auch für Fichte die Einführung der Faktorvariablen VOR_VBA, die nicht nur den Plot sondern – im Gegensatz zu DG (und im Buchenmodell auch BU_PROZ) – zusätzlich den den Plot umgebenden Bestand hinsichtlich des Vorkommens potentieller Samenbäume beschreibt. Im Modell besteht selbst bei scheinbar fehlendem Vorkommen von Samenbäumen eine geringfügige Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins von Verjüngungsbäumen (Abbildung 4, A). Diese läßt sich dadurch erklären, dass die Information aus der Forsteinrichtung bezüglich des Vorkommens von Baumarten im Bestand keine absolute Aussage über das Vorhandensein einer Baumart ist; d.h. es werden dort nur Baumarten aufgelistet, die einen Anteil von mindestens 10% an der Gesamtgrundfläche des Bestandes erreichen. Ein geringerer, nicht notierter Anteil kann demnach durchaus vorhanden sein und zur Samenverbreitung beitragen, entsprechende Ausgangssituationen finden sich auch im Modelldatensatz.

Nach der Verfügbarkeit von Samenbäumen ist die Konkurrenz mit dem Altbestand, insbesondere um Licht, der wichtigste Einflußfaktor in den hier vorgestellten Modellen. Dies ist konform mit einer Reihe von Arbeiten zum Thema des Vorkommens von Naturverjüngung. Im Modell zur Vorhersage der Wahrscheinlichkeit des Ankommens von Verjüngung von KINDERMANN ET AL. (2002) ist ein Konkurrenzindex für den Überschirmungseinfluß des Bestandes die Hauptkovariable neben baumartenspezifischen maximalen BHD. SCHWEIGER & STERBA (1997) beziehen den Crown Competition Factor nach KRAJICEK ET AL. (1961) in ihr Modell zur Vorhersage der Wahrscheinlichkeit des Vorkommens von Fichtenverjüngung ein und konstatieren, dass dieser sich als das beste inverse Maß der Lichtverfügbarkeit herausstellte. EERIKÄINEN ET AL. (2007) verwenden sowohl die Bestandesgrundfläche als auch die horizontale Winkelsumme als Konkurrenzmaße in Modellen zur Vorhersage der Anzahl etablierter Verjüngung. TREMER (2008) fasst den Einfluß des Altbestandes mit Hilfe von Altersklasse und Grundfläche (unterteilt in Grundfläche Verjüngungsbaumart und andere Baumarten) und der Bestandesdichte. Gegenüber der Grundfläche hat die Verwendung der KPF mehrere Vorteile: sie repräsentiert die Raumansprüche der Baumkronen und ist daher besonders in Mischbeständen enger mit dem Lichtregime korreliert. Gleichzeitig kann KPF als grobes Maß für Wurzelkonkurrenz durch das Derbholz gelten. Der tatsächliche Einzugsbereich der Wurzeln im Altbestand ist meist größer als die Kronenprojektionsfläche (KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2002), aber der Hauptkonkurrenzbereich kann damit durchaus abgebildet werden. Altholzwurzelkonkurrenz wirkt sich ebenso wie mangelnde Lichtverfügbarkeit negativ auf Verjüngung aus; sie kann Trockenstress, geringere Schattentoleranz und insgesamt erhöhte Mortalität der Verjüngung bewirken (COOMES & GRUBB 2000). Welchen Anteil Lichtverfügbarkeit bzw. Wurzelkonkurrenz am Effekt von KPF hat, läßt

sich allerdings nicht nachverfolgen. Das Lichtregime wird außerdem durch BU_PROZ und LI_PROZ näher beschrieben, da für beide Baumartenanteile unterschiedlich hohe Lichttransmission durch die Kronen unterstellt werden kann (CANHAM ET AL. 1994). Interessant ist, dass LI_PROZ gerade im Buchenmodell ausgewählt wurde, und nicht im Fichtenmodell. Vermutet wurde eher ein signifikant positiver Effekt auf die Verjüngungswahrscheinlichkeit der Halbschattbaumart Fichte. Im Modelldatensatz findet sich ein beachtlicher Anteil von Plots mit LI_PROZ von 90 - 100 %, auf denen Buchen- bzw. Fichtenverjüngung in allen Höhenklassen vorhanden ist.

Der Anstieg des DG-Effektes bei steigendem DG läßt sich mit einer der Verjüngung förderlicheren Struktur wenigerer dickerer Bäume gegenüber mehreren dünneren Bäumen erklären. Nicht überraschen sollte die DG-Spannbreite mit sehr hohen Werten: hier handelt es sich schließlich um Grundflächenmittelstammberechnungen für nur eine Baumart und nur auf einem Plot, nicht im ganzen Bestand. Ursprünglich war DG auch als Indikator für die Mannbarkeit potentieller Samenbäume gedacht. Fichte erreicht ihre Reife im Bestand etwa im Alter um 60 Jahre, Buche im Alter von 50 bis 80 Jahren, je nachdem, ob es sich um einen Solitär oder einen Baum im Bestand handelt (SCHÜTT ET AL. 2002). Dabei ist davon auszugehen, dass diese Angaben für Bäume im Herrschenden (Kraft'sche Klassen 1 und 2) gelten. Samenbäume sollten idealerweise mannbar sein, da fruktifizierende Bäume dann nicht nur eine größere Anzahl Samen produzieren, sondern auch die Fertilität der Samen höher ist. Da der Ausgangsdatensatz im Zuge der Modellbildung auf Plots mit einem Mindest-DG > 30 cm (Buche) bzw. > 25 cm (Fichte) bei Vorkommen der Verjüngungsbaumart reduziert wurde, ist die Mannbarkeit zumindest eines Teils dieser Bäume in jedem Falle gegeben.

NÄHR ist die einzige standortssensitive Kovariable sowohl im Buchen- als auch im Fichtenmodell. Die Effekte von NÄHR sind in beiden Modellen plausibel. Die Vorliebe der Buche für mindestens gut versorgte Standorte und insbesondere Kalkstandorte ist klar erkennbar (Abbildung 3, E), ebenso die Tendenz der Fichte, Standorte mit Kalk zu meiden (Abbildung 2, D). KINDERMANN et al. (2002)geben an, dass keine der geprüften Standortsvariablen Humustyp, Vegetationstyp und Bodengruppe signifikant in das von ihnen entwickelte Modell zur Wahrscheinlichkeit des Ankommens der Verjüngung einging. LEDERMANN (2002)verwendet als standortsspezifische Kovariablen im Modell zur Schätzung der Wuchsklasse Jugend-II (Höhe >1,3 m bis BHD= 10,4 cm) die Seehöhe, den Wuchsraum und die Bodengruppe. Bei TREMER (2008) ist die Nährstoffversorgung als Kovariable im Fichtenmodell, aber nicht im Buchenmodell zur Schätzung von Vorkommen und Anzahl der Verjüngung vorhanden. Ein negativer Effekt auf die Fichtenverjüngung zeigt sich in seinem Modell erst im karbonatisch-eutrophen Bereich. Eine Faktorvariable, die angibt, ob der Boden kalkhaltig ist, ist in seinem Buchenmodell, aber nicht im Fichtenmodell ausgewählt, während die Seehöhe in beide eingeht.

Insgesamt läßt sich sagen, dass - bei Vorhandensein potentieller Samenbäume - aus Bestandesdaten abgeleitete Variablen, die die Konkurrenz, die Lichtverfügbarkeit und die Bestandesstruktur beschreiben, in der Modellselektion an erster Stelle stehen, während Standortsfaktoren als nachrangig bezeichnet werden können.

6 Literatur

CANHAM, C. D., FINZI, A. C., PACALA, S. W., & BURBANK, D. H.: Causes and consequences of resource heterogeneity in forests: interspecific variation in light transmission by canopy trees. Canadian Journal of Forest Research 2 (24): 337–349, 1994

COOMES, D. A. & GRUBB, P. J.: Impacts of root competition in forests and woodlands: a theoretical framework and review of experiments. Ecological monographs 70 (2): 171–207, 2000

DOBBS, R. C.: White Spruce Seed Dispersal in Central British Columbia. The Forest Chronicle 52 (5), 1976

EERIKÄINEN, K., MIINA, J., & VALKONEN, S.: Models for the regeneration establishment and the development of established seedlings in uneven-aged, Norway spruce dominated forest stands of southern Finland. Forest Ecology and Management 242 (2–3): 444–461, 2007

FAHRMEIR, L., KNEIB, T., & LANG, S.: Regression - Modelle, Methoden ind Anwendungen. Springer, 501 S., 2009

FERGUSON, D. E.: Modeling natural regeneration establishment in the northern Rocky Mountains of the U.S.A. Modelling regeneration success and early growth of forest stands: Proceedings from the IUFRO Conference; 10-13 June, 1996; Copenhagen, Denmark. Horsholm, Denmark: Danish Forest and Landscape Research Institute, 1996

HASENAUER, H., KINDERMANN, G., & MERKL, D.: Zur Schätzung der Verjüngungssituation in Mischbeständen mit Hilfe Neuraler Netze. Centralblatt für das gesamte Forstwesen 119: 350–366, 2000

HYNYNEN, J., OJANSUU, R., HÖKKA, H., SIIPILEHTO, J., SALMINEN, H., et al.: Models for predicting stand development in MELA System. Vantaa Research Center, Vantaa, 116 S., 2002

KINDERMANN, G., HASENAUER, H., & GASCH, J.: Ankommen und Wachstum von Naturverjüngung in Mischbeständen. Centralblatt für das gesamte Forstwesen 119 (2): 159–186, 2002

KRAJICEK, J. E., BRINKMAN, K. A., & GINGRICH, S. F.: Crown Competition - A Measure of Density. Forest Science 7 (1): 35–42, 1961

KUTSCHERA, L. & LICHTENEGGER, E.: Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. Leopold Stocker, Graz, 2002

LEDERMANN, T.: Ein Einwuchsmodell aus den Daten der Österreichischen Waldinventur 1981-1996. Centralblatt für das gesamte Forstwesen 119 (1): 40–77, 2002

LEXEROD, N. & EID, T.: Recruitment models for Norway spruce, Scots pine, birch and other broadleaves in young growth forests in Norway. Silva Fennica 39 (3): 391, 2005

MIINA, J., EERIKÄINEN, K., & HASENAUER, H.: Modeling Forest Regeneration. Sustainable Forest Management - Growth Models for Europe. Springer, 2006

NAGEL, J.: BWINPro ForestSimulator7, Version 7.5, vorläufige Version.: 50, 2008

NIEDERSÄCHSISCHE LANDESFORSTEN: 25 Jahre ökologische Waldentwicklung in den Niedersächsischen Landesforsten. Aus dem Walde 60, 2016

R Development Core Team: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2017

SABOROWSKI, J., MARX, A., NAGEL, J., & BÖCKMANN, T.: Double sampling for stratification in periodic inventories—Infinite population approach. Forest Ecology and Management 260 (10): 1886–1895, 2010

SAGNARD, F., PICHOT, C., DREYFUS, P., JORDANO, P., & FADY, B.: Modelling seed dispersal to predict seedling recruitment: Recolonization dynamics in a plantation forest. Ecological Modelling 203 (3–4): 464–474, 2007

SCHÜTT, P., SCHUCK, H.-J., & STIMM, B.: Lexikon der Baum- und Straucharten. Nikol, Hamburg, 581 S., 2002

SCHWEIGER, J. & STERBA, H.: A model describing natural regeneration recruitment of Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.) in Austria. Forest ecology and management 97 (2): 107–118, 1997

STARKE, R.: Die Reproduktion der Buche (Fagus sylvatica L.) unter verschiedenen waldbaulichen Gegebenheiten. Biodiversität und nachhaltige Forstwirtschaft. ecomed, 1996

STERBA, H., GOLSER, M., SCHWEIGER, J., & HASENAUER, H.: Modelle für das Ankommen und das Wachstum der Naturverjüngung. Centralblatt für das gesamte Forstwesen 114 (1): 11–33, 1997

TREMER, N.: Untersuchungen zur Verjüngung von Waldbeständen. Cuvillier Verlag, 2008

WAGNER, S.: Ökologische Untersuchungen zur Initialphase der Naturverjüngung in Eschen-Buchen-Mischbeständen. J. D. Sauerländer, Frankfurt am Main, 262 S., 1999

WIKBERG, P.-E.: Occurence, morphology and growth of understory saplings in Swedish forests. Swedish University of Agricultural Sciences, 2004

WOOD, S. N.: Generalized Additive Models: An Introduction with R. CRC Press, 410 S., 2006

WOOD, S. N., PYA, N., & SÄFKEN, B.: Smoothing Parameter and Model Selection for General Smooth Models. Journal of the American Statistical Association 111 (516): 1548–1563, 2016