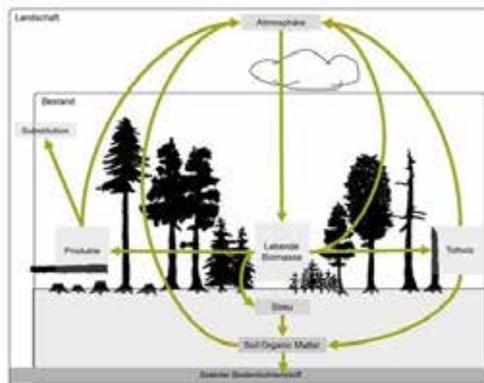


FABio-Waldmodell

Modellbeschreibung Version 0.54
Stand Nov. 2017

Berlin, 26. Februar,
2018



Autorinnen und Autoren

Dr. Hannes Böttcher
Dr. Klaus Hennenberg
Christian Winger

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1. Einleitung	6
2. Datengrundlage	7
3. Modellbeschreibung	8
3.1. Software und Modellierungsansatz	8
3.2. Waldwachstumsmodell	9
3.3. Mortalitätsmodell	11
3.4. Einwuchsmodell	12
3.5. Vorrats-, Biomasse- und Kohlenstoffberechnung	13
3.6. Bodenkohlenstoffmodell	17
3.7. Totholzmodell	19
3.8. Holzverwendungsmodell	20
3.9. Kohlenstoff in Holzprodukten	22
4. Modelleinstellungen	23
4.1. Unterscheidung von Bewirtschaftungsoptionen	23
4.2. Modellparameter zur Beschreibung des Managements	24
Annex A: Glossar	27
Annex B: Modellparameter und Einstellungen	29

Zusammenfassung

Seit 2015 wird am Öko-Institut das *Forestry and Agriculture Biomass Model* (FABio) entwickelt. FABio ist ein Simulationsmodell, das mit Hilfe der Methode der Systemdynamik und agentenbasierten Modellierung Biomasseproduktion und Nutzung in der Land- und Forstwirtschaft und deren Auswirkungen auf bestimmte Umweltindikatoren beschreibt.

Das Waldmodell in FABio basiert auf Daten der **Bundeswaldinventur** (BWI). Es beschreibt das Wachstum einzelner durch die Inventuren erfassten Bäume als distanzunabhängiges Einzelbaumwachstumsmodell. Dabei werden die Bäume als Agenten mit unterschiedlichen Eigenschaften, wie Art, Alter, Durchmesser, Höhe, etc. im Modell angelegt. Diese werden mittels Wachstumsfunktionen fortgeschrieben. Zudem gibt es Module für die Beschreibung des Kohlenstoffs in Holzprodukten, in der Streu und im Boden. Das Modell basiert auf folgenden Teilmodellen: ein **Einzelbaumwachstumsmodell** zur Beschreibung des Baumwachstums anhand von Durchmesser, Höhe, Bonität (d.h. Produktivität) und Bestandesdichte, ein **Einwuchsmodell** für das Entstehen neuer Bäume basierend auf Bestandesdichte und Baumart, ein **Mortalitätsmodell** abhängig von Baumart, Bonität und Bestandesdichte für die Darstellung von Absterbeprozessen, ein **Totholzmodell**, das die Zersetzung der abgestorbenen Bäume beschreibt, ein **Bodenkohlenstoffmodell**, das den Abbau von Biomasse in Streu und Boden über die Zeit in Abhängigkeit vom Klima simuliert, und ein **Holzsortierungs- und Holzproduktmodell**, das die geernteten Bäume in Verwendungsklassen einteilt und die Verweildauer des Kohlenstoffs in Holzprodukten darstellt.

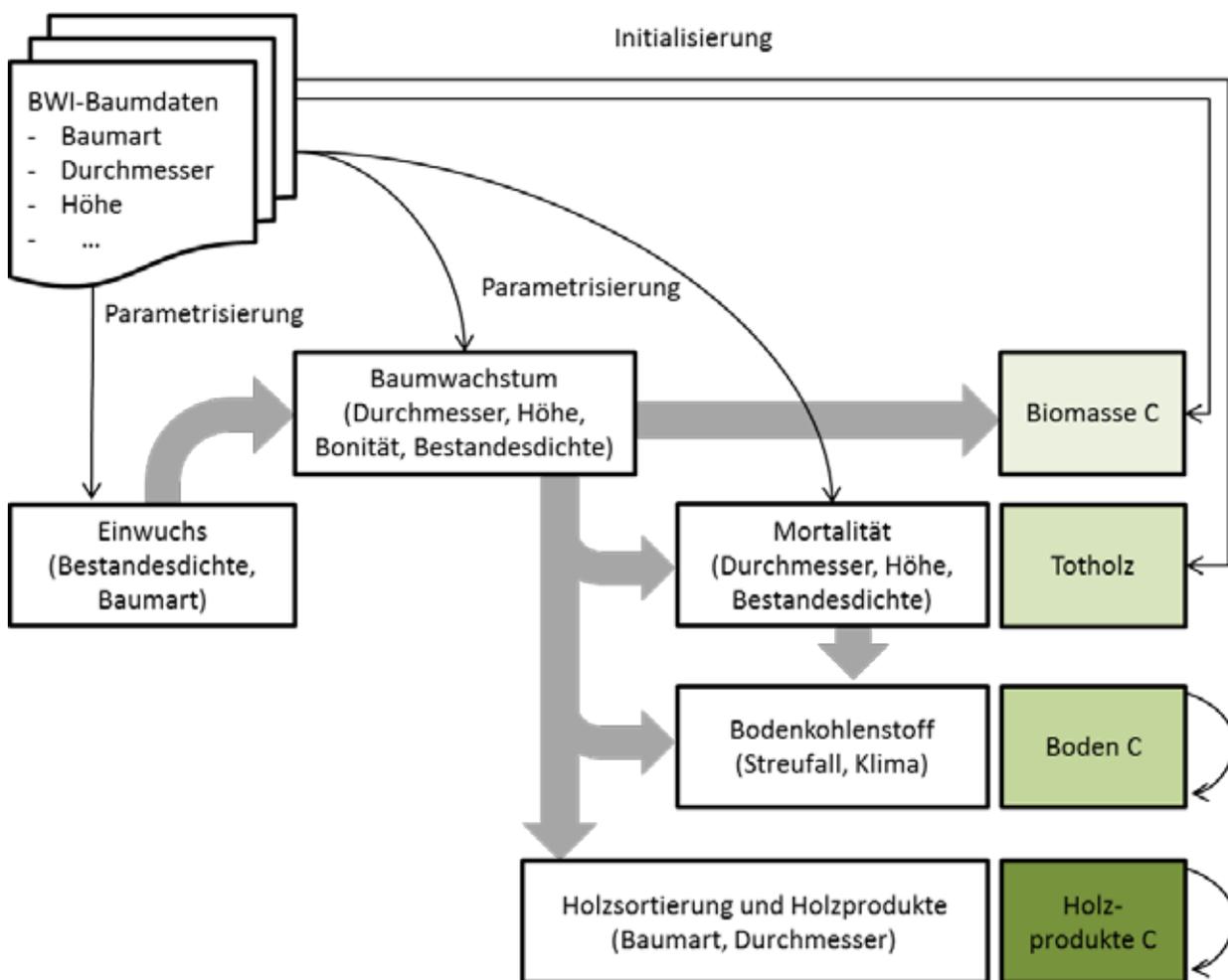
Das Modell ist in der Software AnyLogic¹ implementiert. AnyLogic beinhaltet eine graphische Modellierungssprache und ermöglicht es dem Benutzer zugleich, Simulationsmodelle mit Java-Code zu erweitern.

¹ <http://www.anylogic.de/>

1. Einleitung

Wäldern in Deutschland kommt eine wichtige ökologische, wirtschaftliche und soziale Bedeutung zu. Dazu zählen **Schutzfunktion** (d.h. die dauernde Leistungsfähigkeit des Naturhaushaltes, die Reinhaltung der Luft, Erhalt der Biodiversität, Kohlenstoffspeicherung und Klimaschutz, Bodenschutz und Speicherung und Filterung von Wasser), **Nutzfunktion** (z.B. durch die Vermarktung von Holzprodukten und anderer Nicht-Holz-Dienstleistungen) und **Erholungsfunktion** (z.B. Freizeit und Erholung). Schutz-, Nutz- und Erholungsfunktion sollen nach dem Bundeswaldgesetz erhalten bleiben, wo nötig ausgebaut und nachhaltig gesichert werden. Waldbesitzer stehen vor der planerischen Herausforderung, ihren Wald so zu bewirtschaften, dass die vielen Ziele einer multifunktionalen Forstwirtschaft erreicht werden.

Abbildung 1-1: Flussdiagramm des Modells und der Datenverwendung



Quelle: Eigene Darstellung. BWI – Bundeswaldinventur, BHD - Brusthöhendurchmesser

Aufbauend auf Annahmen über den Zuwachs und die Waldbewirtschaftung können **Simulationsmodelle** zur Waldentwicklung Planungsinstrument und Entscheidungshilfe sein. Dieses Dokument beschreibt das Waldbewirtschaftungs-Modul des am Öko-Institut entwickelten FABio Modells (Forestry and Agriculture Biomass Model) sowie im Modell verwendete Daten und Methoden der Modellierung alternativer Waldbauoptionen. Das Modell (siehe Abbildung 1-1)

basiert auf Daten der **Bundeswaldinventur** (BWI). Es beschreibt das Wachstum einzelner durch die Inventuren erfassten Bäume als distanzunabhängiges Einzelbaumwachstumsmodell. Dabei werden die Bäume als Agenten mit unterschiedlichen Eigenschaften, wie Art, Alter, Durchmesser, Höhe, etc. im Modell angelegt. Diese werden mittels Wachstumsfunktionen fortgeschrieben. Zudem gibt es Module für die Beschreibung des Kohlenstoffs in Holzprodukten, in der Streu und im Boden. Das Modell basiert auf folgenden Teilmodellen: ein **Einzelbaumwachstumsmodell** zur Beschreibung des Baumwachstums anhand von Durchmesser, Höhe, Bonität (d.h. Produktivität) und Bestandesdichte, ein **Einwuchsmodell** für das Entstehen neuer Bäume basierend auf Bestandesdichte und Baumart, ein **Mortalitätsmodell** abhängig von Baumart, Bonität und Bestandesdichte für die Darstellung von Absterbeprozessen, ein **Totholzmodell**, das die Zersetzung der abgestorbenen Bäume beschreibt, ein **Bodenkohlenstoffmodell**, das den Abbau von Biomasse in Streu und Boden über die Zeit in Abhängigkeit vom Klima simuliert, und ein **Holzsortierungs- und Holzproduktemodell**, das die geernteten Bäume in Verwendungsklassen einteilt und die Verweildauer des Kohlenstoffs in Holzprodukten darstellt.

2. Datengrundlage

Als zentrale Datengrundlage für die Beschreibung des Waldzustands, der Initialisierung und der Parametrisierung des Modells dient die Datenbank der Bundeswaldinventur (BWI) des Thünen-Instituts, die die Ergebnisse der Auswertung der BWI-2 (2002) und BWI-3 (2012) zusammenstellt (BWI-Ergebnisdatenbank unter: <https://bwi.info/>). Die dritte Bundeswaldinventur stellt nach der zweiten Bundeswaldinventur die erste flächendeckende Erhebungswiederholung in Deutschland dar, die Aussagen über eine zeitliche Entwicklung des Waldes ermöglicht.

Das Inventurverfahren der Bundeswaldinventur basiert auf Stichproben in einem Basisnetz von 4km mal 4km Kantenlänge. In einigen Regionen wurde dieses Netz noch einmal auf 2,83km mal 2,83km, bzw. auf 2km mal 2km verdichtet. An jedem Knotenpunkt des Netzes (Trakt) wird ein Quadrat von 150m mal 150m gezogen. Die vier entstehenden Traktecken bilden die Aufnahmepunkte für die Inventur (sofern sie sich im Wald befinden). Insgesamt umfasst der BWI-Datensatz auf diese Weise mehr als 47.000 Traktecken auf denen Bäume stehen.

An den vier Traktecken eines jeden Netzknotens werden Baummerkmale wie Baumart, Brusthöhendurchmesser, Baumhöhe und Anzahl der Bäume über 7 cm Durchmesser durch eine Winkelzählprobe erfasst. Zudem werden umfangreiche Daten zu z.B. Totholz (Totholztypen, Zersetzungsgrad, Durchmesserklassen), Habitaten (besonders geschützte Biotope) und Bäumen mit ökologisch bedeutsamen Strukturen (Biotopbäume wie Höhlenbäume) sowie Schutzgebieten und Nutzungseinschränkungen erfasst. Außerdem werden Merkmale wie Eigentumsart, Bundesland oder bestehende Nutzungseinschränkungen erhoben.

Je nach Fragestellung und Rechenkapazität wird der in das Modell eingespeiste Datensatz angepasst (Abbildung 2-1). Der Stichprobenumfang der Bundeswaldinventur ist repräsentativ für den gesamten deutschen Wald und die meisten Länder. Ist die betrachtete Region allerdings zu klein oder die Fragestellung zu detailliert, dann leidet die Repräsentativität der Stichprobe, so dass Aussagen für kleinräumige Fragestellungen nicht zuverlässig getroffen werden können.

Die in der BWI aufgenommenen Baumarten werden im Modell zu 24 Baumartengruppen zusammengefasst (Tabelle B-1).

Abbildung 2-1: Darstellung des flexiblen Datennetzes der BWI-Daten. Links die höchste Auflösung (Basisnetz und Verdichtungsnetze, 12.104 Trakte). Rechts eine mittlere Auflösung (1.574 Probeflächen). Die Fläche der Quadrate entspricht etwa der durch die Traktecken repräsentierten Waldfläche.



Quelle: Eigene Darstellung

3. Modellbeschreibung

3.1. Software und Modellierungsansatz

Das Modell ist in der Software AnyLogic² implementiert. AnyLogic beinhaltet eine graphische Modellierungssprache und außerdem ermöglicht es dem Benutzer, Simulationsmodelle mit Java-Code zu erweitern. AnyLogic verbindet drei verschiedene Modellierungsarten: ereignisorientierte oder prozesszentrierte (DE), systemdynamische (SD) und agentenbasierte (AB) Modellierung.

Zum Einsatz im Waldmodell kommen vor allem der systemdynamische und der agentenbasierte Simulationsansatz. Während sich der systemdynamische Ansatz hauptsächlich mit kontinuierlichen Prozessen befasst, etwa dem Abbau von Kohlenstoff bei der Zersetzung von Biomasse in Streu und Boden, funktionieren agentenbasierte Modelle dahingegen meist zeitdiskret, d. h. sie wechseln von einem Ereignis zum anderen, zum Beispiel bei der Änderung der Bewirtschaftungsform.

² <http://www.anylogic.de/>

Die AnyLogic Simulationssprache besteht aus Lager- und Flussdiagrammen, die in der systemdynamischen Modellierung verwendet werden. Zustandsdiagramme werden hauptsächlich in der agentenbasierten Modellierung zur Bestimmung von Agentenverhalten verwendet.

Das Waldmodell behandelt einzelne Bäume, der durch die Waldinventur ermittelten Flächen, als Agenten mit unterschiedlichen Eigenschaften, wie Baumart, Alter, Durchmesser, Höhe, etc. Diese werden mittels Wachstumsfunktionen fortgeschrieben und interagieren in Form von Konkurrenzdruck mit anderen auf der Fläche stehenden Bäumen. Dabei gibt es allerdings keine individuelle Konkurrenz durch räumliche Nähe, sondern vielmehr durch das Kollektiv der Bäume, also die Dichte des Bestandes. Mit Hilfe der Statistiken der Inventur werden diese Inventurflächen auf die Gesamtwaldfläche Deutschlands hochskaliert.

Für die Beschreibung der Kohlenstoffdynamik in Streu und Boden wird ein systemdynamischer Ansatz verwendet. Verschiedene Kohlenstoffpools mit unterschiedlichen Abbauraten können sehr gut mit der Logik von Lager- und Flussgrößen in Abhängigkeit von chemischer Zusammensetzung und Klimaparametern beschrieben werden. Auch die Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten folgt den Gesetzen der Systemdynamik und lässt sich in Form von Vorräten in verschiedenen Produktklassen mit verschiedenen Halbwertszeiten darstellen.

3.2. Waldwachstumsmodell

Eine zentrale Anforderung für moderne Waldwachstumsmodelle ist, dass das Modell die Entwicklung von Volumen und Zuwachs in differenzierten Wäldern nicht in Form eines Altersklassenmodells darstellt. Waldbauoptionen orientieren sich nicht immer nur am Bestandesalter, sondern richten sich auch nach den gewünschten Baumdurchmessern (Zieldurchmesser) und lassen sich damit in Altersklassenmodellen nicht präzise genug darstellen. Stattdessen wird Waldwachstum in baumartenspezifischen Durchmesser-Modellen beschrieben. Gerade für die Modellierung von Übergängen zwischen den Konzepten muss aber auch das Alter der Bäume Berücksichtigung finden.

Um diesen Anforderungen zu entsprechen wurde basierend auf den BWI Daten und einer Abwandlung des existierenden Modells (Monserud und Sterba 1996) ein einfaches Einzelbaumwachstumsmodell entwickelt. Es ist ein logarithmisches Modell zur Beschreibung des Grundflächen- und Höhenzuwachses als eine Funktion von Baumstärke (SIZE, ausgedrückt durch Durchmesser und Höhe), Konkurrenz (COMP, ausgedrückt durch die Grundfläche der stärkeren Bäume) und des Standorts (SITE, ausgedrückt durch die Bonität).

$$\ln(BAI) = d_{a1} + SIZE + COMP + SITE \quad (1)$$

$$SIZE1 = d_{b1} * \ln(DBH) + d_{b2} * DBH^2 + d_{b3} * \ln(HGT) + d_{b4} * HGT^2 \quad (2)$$

$$COMP1 = d_{c1} * BAL + d_{c2} * BAS + d_{c3} * NUM \quad (3)$$

$$SITE1 = d_{d1} * BON \quad (4)$$

$$\ln(HGI) = h_{a1} + SIZE + COMP + SITE \quad (5)$$

$$SIZE2 = h_{b1} * \ln(DBH) + h_{b2} * DBH^2 + h_{b3} * \ln(HGT) + h_{b4} * HGT^2 \quad (6)$$

$$COMP2 = h_{c1} * BAL + h_{c2} * BAS + h_{c3} * NUM \quad (7)$$

$$SITE2 = h_{d1} * BON \quad (8)$$

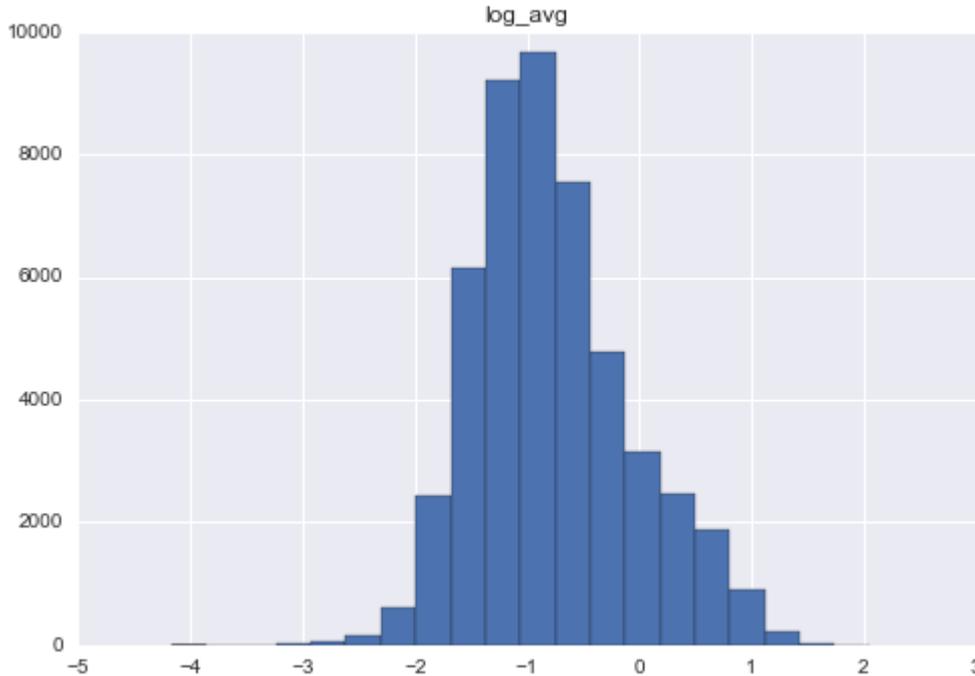
BAI ist der Grundflächenzuwachs, HGI ist der Höhenzuwachs, DBH ist der Brusthöhendurchmesser und HGT die Höhe des Einzelbaums, BAL ist die Grundfläche der jeweils stärkeren Bäume, BAS ist die Bestandesgrundfläche und NUM die Anzahl der Bäume im Bestand pro Hektar. BON ist die aus den Einzelbaumdaten abgeleitete Bonität, um standörtliche Unterschiede darzustellen.

Das Wachstumsmodell ist distanzunabhängig, d.h. es berücksichtigt nicht die Abstände zwischen Bäumen. Für eine detailliertere Modellierung vom biophysikalischen Baumwachstum wäre dies wichtig um Überschildung und Nährstoff- und Wasser Konkurrenz besser darzustellen. Für die Zwecke der Modellierung in diesem Projekt reicht ein distanzunabhängiges Modell aber aus. Zudem sind in der BWI keine Informationen über den genauen Standort der Bäume zu erhalten.

Für jede Baumart wurde das Wachstumsmodell basierend auf Daten der BWI-2 und BWI-3 parametrisiert. Die Koeffizienten des Höhen- und Durchmesserwachstums werden für jede Baumart in einem Optimierungsproblem mit Wichtung nach Anzahl der Bäume für den Zeitraum von 10 Jahren bestimmt (Tabelle B-2).

Abbildung B-1 bis Abbildung B-2 beschreiben den statistischen Zusammenhang zwischen Durchmesser- bzw. Höhenwachstum. Die Bonität BON wird für jede Traktecke ermittelt. Dazu wird das mittlere Vorratswachstum in Abhängigkeit vom Vorrat bestimmt und über alle Stichprobenpunkte auf einen Wert zwischen 0 und 100 normalisiert. Die Bonität ist in etwa logarithmisch normalverteilt wie Abbildung 3-1 zeigt.

Abbildung 3-1: Häufigkeitsverteilung der Bonität (logarithmisch skaliert) über alle Stichprobenpunkte der BWI



Quelle: Eigene Darstellung.

3.3. Mortalitätsmodell

Unter natürlichen Verhältnissen sterben durch den Dichtestress einzelne Bäume im Bestand mit der Zeit ab. Mortalitätsmodelle beschreiben diesen Vorgang in Abhängigkeit von Bestandesparametern. Ein Beispiel ist das Mortalitätsmodell von Monserud und Sterba (1999). Mit dem für FABio erstellten Modell wird eine individuelle Mortalität auf Baumebene beschrieben, aber keine Effekte durch Extremereignisse wie Sturm und Kalamitäten. Das Mortalitätsmodell beschreibt diesen Vorgang in Abhängigkeit von Bestandes- und Baumparametern wie Durchmesser, Grundfläche der stärkeren Bäume und auch Baumalter.

Zur Modellierung der Einzelbaum mortalität werden Daten der BWI-2 und BWI-3 miteinander verglichen. In Beständen, die in den 10 Jahren zwischen den Inventuren nicht bewirtschaftet wurden, werden alle Bäume analysiert, die in diesem Zeitraum abgestorben sind. Basierend auf Alter, Durchmesser und Baumart des gestorbenen Einzelbaums, aber auch der Baumartenzusammensetzung, Dichte und Bonität des Gesamtbestandes wird eine Absterbewahrscheinlichkeit berechnet.

Für die Mortalität wird in jedem Zeitschritt eine Wahrscheinlichkeit des Absterbens p_{mort} berechnet. Zunächst wird die Wahrscheinlichkeit innerhalb eines Zeitraums von 10 Jahren bestimmt, weil die Parametrisierung über diesen Zeitraum erfolgte

$$p = e^{(mABS+mBAL*BAL+mBON\cdot SITE+mAGE*AGE+mBHD*BHD+mDIV*DIV)} \tag{9}$$

$$p_{mort} = \frac{p}{1+p} \tag{10}$$

Die jährliche Mortalitätswahrscheinlichkeit ergibt sich dann als

$$p_{mort} = 1 - (1 - p_{mort10})^{\frac{1}{10}} \quad (11)$$

Die Parameter m_x wurden aus der Analyse der zwei BWI-Datensätze bestimmt, wobei BAL die Summe der Grundfläche der im Vergleich mit dem entsprechenden Baum größeren Bäume und DBH den Brusthöhendurchmesser darstellen. Monserud und Sterba (1999) stellten fest, dass andere Konkurrenzmaße bei der Mortalität keine Rolle spielen. Aufgrund des relativ kleinen Datensatzes der sterbenden Bäume, der aus der BWI ablesbar ist, wurde das Modell um die Bonität der Fläche (BON), das Alter des Baumes (AGE), und den Simpson-Diversitätsindex der Fläche (DIV) erweitert. Letzterer bildet ab, dass sich die Mortalität in Mischbeständen von der in Reinbeständen unterscheidet.

Die Anzahl der absterbenden Bäume innerhalb eines durch einen Agenten simulierten Clusters von Bäumen ergibt sich schließlich durch

$$n_{mort} = Poi(p_{mort} * n) \quad (12)$$

als ein Poisson-verteilter Zufallswert mit n Bäumen im Cluster.

3.4. Einwuchsmodell

Neue Bäume entstehen aus Naturverjüngung oder aus Pflanzung oder Saat. Bei ausreichenden baumartenspezifischen Bestandesverhältnissen (ausreichend Licht, d.h. geringe Dichte) tritt Naturverjüngung spontan und permanent auf. Bestandesbegründung durch Pflanzung oder Saat dagegen wird meist nur nach flächiger Nutzung oder größeren Eingriffen auf (Ausnahme Buchenunterbau). Die Entwicklung einzelner Bäume aus Samen oder Sätzligen zu beschreiben ist relativ aufwändig und wird im Detail für die meisten Fragestellung der Waldentwicklung nicht benötigt. Wichtiger ist die Beschreibung des Prozesses, wenn nachwachsende Bäume eine ausreichende Größe haben und damit Vorrat und Konkurrenzverhältnisse des Bestandes mitbestimmen. Wann dies passiert, wird in FABio durch ein Einwuchsmodell beschrieben.

Mit Hilfe des Einwuchsmodells werden Anzahl und Baumart jener Bäume geschätzt, die innerhalb von einem Jahr den Grenzdurchmesser von 7 cm überschreiten. Die nachwachsenden Bäume haben damit eine bestimmte Stammzahl und Durchmesserverteilung, die dann mit dem Wachstumsmodell fortgeschrieben wird.

Der jährliche Einwuchs der Baumart s ergibt sich aus einem Zufallswert einer Poissonverteilung über einen Erwartungswert n_s^*

$$n_s = Poiss(n_s^*) \quad (13)$$

Der Erwartungswert pro Baumart ergibt sich aus dem Erwartungswert des Plots und Wahrscheinlichkeiten für jede Baumart.

$$n_s^* = n^* * p_s \quad (14)$$

Die Wahrscheinlichkeiten für jede Baumart ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Bei aktiven Fördermaßnahmen (Waldumbau) wird die Einwuchswahrscheinlichkeit vom Managementsystem modifiziert. Bei natürlichem Einwuchs ist die Wahrscheinlichkeit ein Mittelwert aus einer globalen Einwuchswahrscheinlichkeit für diese Baumart und dem existierenden Anteil der Baumart am Bestand auf der Traktecke. Bei flächiger Nutzung kann durch das Managementsystem eine Baumart zum Nachwachsen festgelegt werden.

Der Erwartungswert für die gesamte Anzahl der Bäume je Plot ergibt sich aus der Anzahl der existierenden Bäume NUM, der Höchstzahl der existierenden Bäume NUM_{max} und einer globalen Konstante α, die experimentell bestimmt wird.

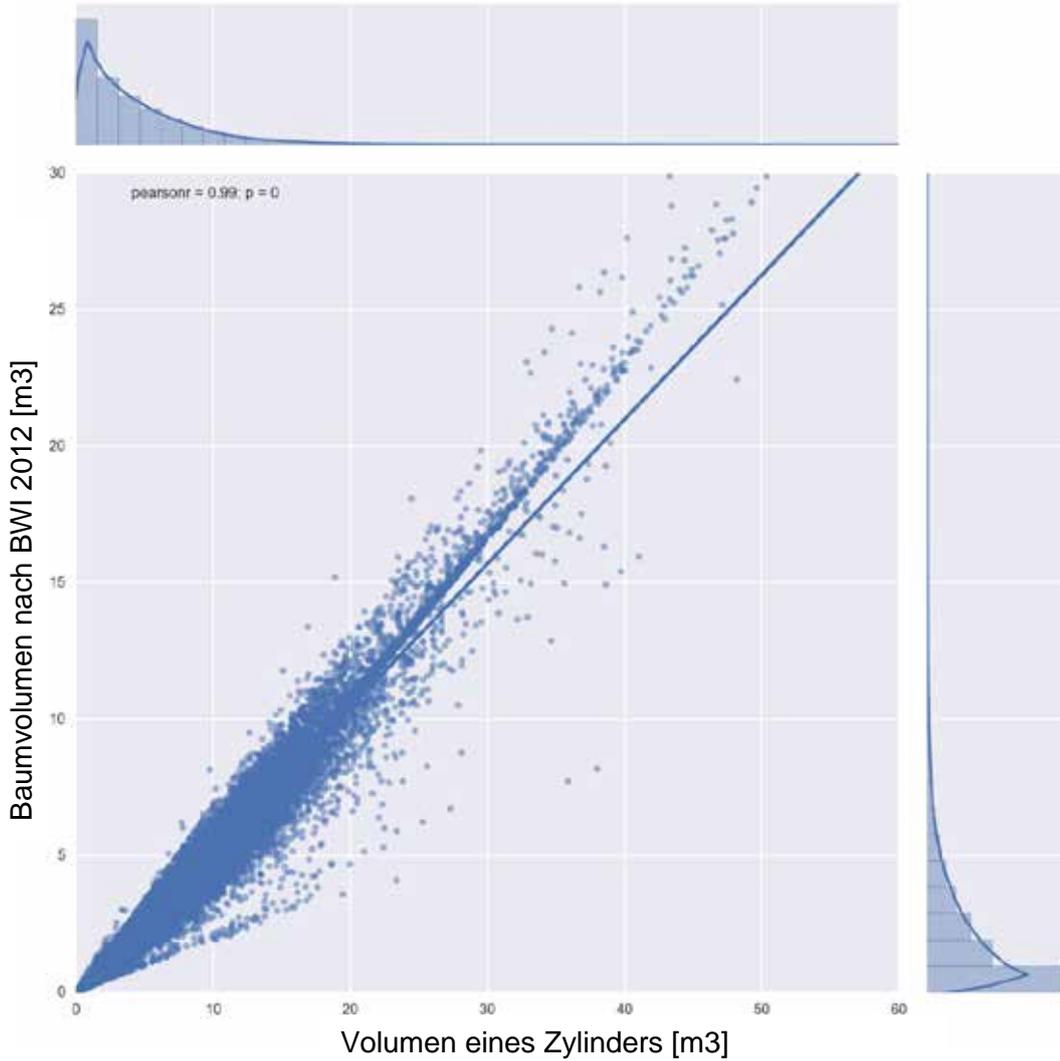
$$n^* = \alpha * \left(1 - \frac{NUM}{NUM_{max}}\right) * NUM_{max} \quad (15)$$

3.5. Vorrats-, Biomasse- und Kohlenstoffberechnung

Das Waldwachstumsmodell ermittelt den Zuwachs an Höhe und Durchmesser (Grundfläche). Der Derbholzvorrat (V) kann durch einen parametrisierten Kegelstumpf mit der ermittelten neuen Baumhöhe und Brusthöhendurchmesser gut angenähert werden, da das tatsächliche Volumen stark linear mit einem einfachen Zylindermodell aus Durchmesser (d) und Höhe (h) korreliert (siehe zum Beispiel für Buche Abbildung 3-2). Formfaktoren (λ) können so für jede Baumart (s) in einem Optimierungsproblem mit Wichtung nach Anzahl der Bäume auf der Stichprobenfläche bestimmt werden (Tabelle 3-1).

$$V = \lambda_s * h_{BWI} * \pi * \left(\frac{d_{BWI}}{200}\right)^2 \approx V_{BWI} \quad (16)$$

Abbildung 3-2: Verhalten des angegebenen Derbholzvolumens der Buche in der BWI Datenbank zum Volumen eines Zylinders aus Grundfläche und Höhe



Quelle: Eigene Darstellung, Daten aus BWI 2012 und eigene Berechnungen.

Tabelle 3-1: Ermittelte Formfaktoren für die 24 Baumartengruppen im Modell basierend auf BWI-Daten

Baumart	Formfaktor
Fichten-Arten	0,4436359
Kiefern-Arten	0,4371654
Tannen-Arten	0,47491393
Douglasie	0,40439088
Lärchen-Arten	0,43206531
sonstige Nadelbäume	0,43946024
Rot-Buche	0,48157774
Stiel-/Traubeneiche	0,49996538
Roteiche	0,43190733
Esche-Arten	0,47474226
Hainbuche	0,44702795
Ahorn-Arten	0,45905931
Linden-, Ulmenarten	0,4701348
Robinie	0,46006861
Edelkastanie	0,47169916
Sonstige Laubbäume mit hoher Lebensdauer	0,4813388
Birken-Arten	0,40849712
Erlen-Arten	0,45150789
Pappel-Arten	0,41502084
Vogelbeere	0,40969377
Weiden-Arten	0,4790985
Vogelkirsche	0,46140056
Spätblühende Traubenkirsche	0,41727556
Sonstige Laubbäume mit niedriger Lebensdauer	0,46411231

Quelle: Eigene Berechnung

Der Derbholzvorrat umfasst das oberirdische Holzvolumen mit einem Durchmesser von über 7 cm mit Rinde. Für eine umfassende Bilanzierung des Kohlenstoffvorrats in der Waldbiomasse, muss das Holzvolumen zunächst in Holzbiomasse (Trockengewicht) umgerechnet werden. Zudem müssen weitere Kompartimente der Biomasse, d.h. die unterirdische Holzmasse (Wurzeln), das oberirdische Nicht-Derbholz (Äste) und die Blatt- beziehungsweise Nadelmasse ermittelt werden (siehe auch Abbildung 3-4). Dazu wird auf Biomassefunktionen zurückgegriffen, die artspezifisch diese Kompartimente für Einzelbäume in Abhängigkeit von leichter ermittelbaren Größen wie Durchmesser in Brusthöhe (DBH) und Baumhöhe schätzen. Funktionen wie die in Tabelle 3-2 beschriebenen, beinhalten bereits eine Umwandlung des Volumens in Trockenmasse.

Der Kohlenstoffkonzentration im Holz beträgt in etwa 0.5 kgC pro kg Trockengewicht Holz. Die Kohlenstoffkonzentration in nichtverholzten Pflanzenteilen wie Blättern und Feinwurzeln variiert im Jahresverlauf. Zur Vereinfachung wird für diese Kompartimente dieselbe Konzentration wie für Holz angenommen.

Tabelle 3-2: Biomasseregressionsfunktionen in FABio. DBH ist der Brusthöhendurchmesser in cm, HGT die Baumhöhe in m. Oberirdische Holzbiomasse = Derbholz + Nicht-Derbholz, Stamm = Stammholz inklusive Rinde

Art	Quelle	Kompartiment	Regressionsmodelle und -koeffizienten
Buche	Wutzler et al. 2008	Stamm	$=0.0293*(DBH^2*HGT)^{0.974}$
		Äste	$=0.466*DBH^{1.85}*HGT^{-0.349}$
		Blätter	$=0.0377*DBH^{2.43}*HGT^{-0.913}$
		Wurzeln	$=0.0282*DBH^{2.39}$
Fichte	Wirth et al. 2004	Stamm	$=EXP(-2.50602+2.44277*LN(DBH))$
		Lebende Äste	$=EXP(-3.61106+2.99487*LN(DBH)-0.8759*LN(HGT))$
		Totäste	$=EXP(-3.22406+1.6732*LN(DBH))$
		Nadeln	$=EXP(-3.19632 + 1.9162*LN(DBH))$
		Wurzeln	$=EXP(-5.98132+2.32428*LN(DBH)+0.834968*LN(HGT))$
Eiche	Cienciala et al. 2008	Stamm	$=EXP(-3.731+1.933*LN(DBH)+1.036*LN(HGT))$
		Äste	$=EXP(-2.707+2.949*LN(DBH)+0.94*LN(HGT))$
	Wutzler et al. 2008 (wie Buche)	Blätter	$=0.0377*DBH^{2.43}*HGT^{-0.913}$
		Wurzeln	$=0.0282*DBH^{2.39}$
Kiefer	Cienciala et al. 2006	Stamm	$=0.03191*DBH^{1.89823}*HGT^{-0.89869}$
		Lebende Äste	$=0.41818*DBH^{3.66562}*HGT^{-2.59501}$
		Totäste	$=0.04335*DBH^{4.68497}*HGT^{-3.42106}$
		Nadeln	$=0.44583*DBH^{1.70154}*HGT^{-0.95354}$
	Wutzler et al. 2008 (wie Buche)	Wurzeln	$=0.0282*DBH^{2.39}$

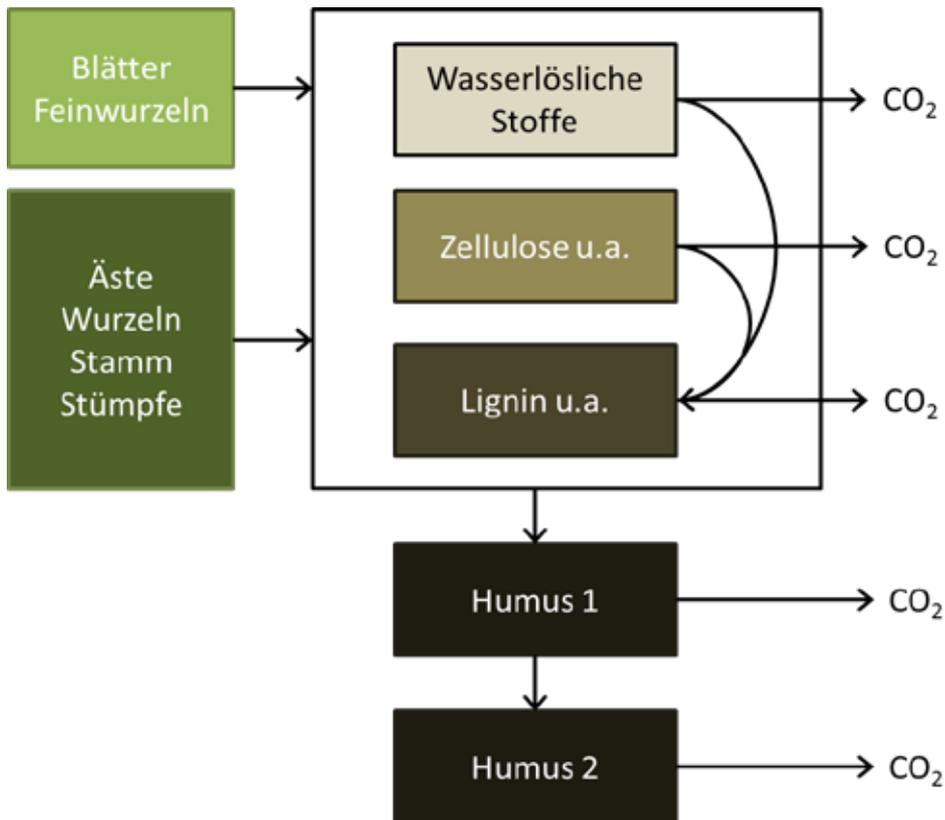
Quelle: Verschiedene Autoren, siehe Spalte „Quelle“

3.6. Bodenkohlenstoffmodell

Die lebende Biomasse produziert Streu von abgestorbenen Pflanzenteilen, wie Blätter, Rinde, Zweige und Äste. Diese Streu wird von einem Bodenkohlenstoffmodell aufgenommen und nach und nach abgebaut. Das YASSO Modell wurde von Liski et al. entwickelt (Liski und Palosuo 2003; Liski et al. 2005). Es benötigt als Eingangsgrößen Informationen zu der Streumenge, Streuqualität, d.h. die chemische Zusammensetzung und Klimaparameter. Das Modell basiert auf folgenden Annahmen, die bei der Anwendung des Modells und der Interpretation von Ergebnissen berücksichtigt werden müssen: Streu und organischer Bodenkohlenstoff bestehen aus verschiedenen Komponenten mit spezifischen Abbauraten. Der Abbau der Streu hängt von der chemischen Zusammensetzung, also dem Anteil leichter und schwerer abbaubarer Komponenten ab. Durch den Abbau verlieren die Komponenten im Zeitverlauf an Masse, wenn der Kohlenstoff veratmet wird. Ein Teil der abgebauten Biomasse verlässt das Ökosystem durch heterotrophe Atmung oder Auswaschung, während die verbleibende Masse stabilere Kohlenstoffverbindungen eingehen kann. Die mikrobielle Aktivität hängt von Temperatur und Bodenfeuchtigkeit ab (Liski et al., 2005). Im YASSO-Modell werden fünf Abbaupools und zwei Streupools unterschieden (Abbildung 3-3).

Es ist bereits auf verschiedene Ökosysteme und Klimabedingungen angewendet worden (Repo et al. 2012; Repo et al. 2011; Liski et al. 2002). Zur Anwendung kommt das Modell in der Version YASSO 05. Tabelle 3-3 macht Angaben zu Modellparametern und deren Quellen. Die Initialisierung des Modells erfolgt über einen sogenannten „spin-up“-Lauf des Modells von 300 Jahren, in denen sich die verschiedenen Kohlenstoffpools füllen. Während dieser Zeit stellt sich noch kein völliges Gleichgewicht der Pools ein aber es werden dadurch künstliche Bedingungen, die bei einem „Kaltstart“ mit leeren Pools auftreten vermieden. Für eine Initialisierung mit Messdaten fehlen Bodenkohlenstofferhebungen, die sich mit dem Netz der BWI verschneiden lassen. Zudem unterscheidet das Modell keine Bodenhorizonte und berücksichtigt nicht die Bodentiefe, so dass Erhebungsdaten und Modellvariablen nicht gleich definiert wären.

Abbildung 3-3: Logik des YASSO Modells



Quelle: Liski et al. 2005

Tabelle 3-3: Parameterwerte für die Beschreibung der Streuqualität im YASSO-Modell. Es werden vier grobe Baumartengruppen unterschieden. Datenquellen: (1) Burschel et al. 1993; (2) Muukkonen und Lehtonen 2004; (3) Mund 2004; (4) Muukkonen 2005; (5) eigene Schätzung (6) für Wurzeln wurden dieselben Umsatzraten angenommen wie für Äste mangels Daten; (7) Masera et al. 2003

Parameter		Einheit	Fichte	Buche	Kiefer	Eiche	Datenquelle
Holzdichte		[%]	0.37	0.56	0.43	0.56	(1,1,1,1)
Umsatzrate	Äste	[1/yr]	0.04	0.03	0.02	0.02	(2,3,4,4)
	Blätter	[1/yr]	0.20	1.00	0.40	1.00	(2,5,4,5)
	Wurzeln	[1/yr]	0.04	0.03	0.02	0.02	(6)
Nicht-Holzstreu	Löslich	[%]	0.27	0.38	0.27	0.38	(7)
	Zellulose	[%]	0.51	0.36	0.51	0.36	(7)
	Ligninartig	[%]	0.22	0.26	0.22	0.26	(7)
Fein-Holzstreu	Löslich	[%]	0.03	0.03	0.03	0.03	(7)
	Zellulose	[%]	0.65	0.65	0.65	0.65	(7)
	Ligninartig	[%]	0.32	0.32	0.32	0.32	(7)
Holzstreu	Löslich	[%]	0.03	0.03	0.03	0.03	(7)
	Zellulose	[%]	0.69	0.75	0.69	0.75	(7)
	Ligninartig	[%]	0.28	0.22	0.28	0.22	(7)

Quelle: Eigene Darstellung

3.7. Totholzmodell

Der Anteil an Totholz im Wald ist ein wichtiger Indikator für die potenzielle Biodiversität in Wäldern. Totholz entsteht durch natürliches Absterben von Bäumen oder den Verbleib von Teilen gefällter Bäume im Wald. Aufgrund der Simulation des Wachstums und Absterbens einzelner Bäume sind Durchmesser und Baumart verbleibender Stämme und das Volumen verbleibender Baumteile auf der Fläche bekannt. Diese werden dem Totholzvorrat in den drei unterschiedenen Baumartengruppen für Totholz zugeführt (Nadelholz, Eiche, anderes Laubholz). Die Vorräte bauen sich durch Zersetzung nach spezifischen Raten ab, die der Literatur entnommen wurden (Kroiher und Oehmichen 2010; Rock et al. 2008). Von der Baumart und dem Durchmesser des Totholzes, hängt auch die Eignung als Habitat für Lebewesen ab. Die BWI unterscheidet zudem folgende Eigenschaften von aufgenommenem Totholz: Holzart (Nadelholz, Eiche, anderes Laubholz), Entstehungstyp und Lage (Abfuhrreste, Wurzelstock, stehendes Bruchstück, stehender ganzer Baum, liegend) und vier Zerfallsstufen (unzersetzt, beginnende Zersetzung, fortgeschrittene Zersetzung, stark vermodert). Das Modell berücksichtigt dagegen nur die Baumart.

$$V = V * e^{-const_s} \quad (17)$$

Zur Initialisierung der Totholzvorräte im Modell wurde auf Daten der Ergebnistabellen der Waldinventur zurückgegriffen. Dazu wurden die Totholzvorräte nach Bundesländern und Baumartengruppe getrennt. Auf der Grundlage der Grundflächenanteile wurden diese dann den

Baumarten auf den Stichprobenpunkten in dem jeweiligen Bundesland zugeordnet. Dieses Verfahren der Initialisierung ist relativ grob, da angenommen wird, dass alle Flächen in einem Bundesland die gleichen relativen Totholzanteile besitzen. Allerdings erlauben die Daten zu Totholz in der BWI-Datenbank keine detailliertere Zuordnung.

Tabelle 3-4 präsentiert die Totholzvorräte in den Bundesländern, aggregiert nach Totholzbaumartenklassen, die auf die Traktecken verteilt wurden.

Tabelle 3-4: Globale Startwerte für Totholzvorräte im Modell basierend auf Daten der BWI 2012 in m³

Land	Nadelbäume	Laubbäume ohne Eiche	Eiche	alle Baumartengruppen von Totholz
Baden-Württemberg	27.436.799	9.068.337	1.605.830	38.110.966
Bayern	43.040.840	10.218.240	1.573.784	54.832.864
Brandenburg + Berlin	6.326.098	4.443.882	956.665	11.726.644
Hessen	11.696.219	8.074.276	1.807.466	21.577.962
Mecklenburg-Vorpommern	3.445.942	4.603.736	807.951	8.857.628
Niedersachsen	11.176.835	6.972.723	1.289.771	19.439.329
Nordrhein-Westfalen	12.658.797	5.668.395	2.436.838	20.764.030
Rheinland-Pfalz	10.557.228	5.050.690	3.036.306	18.644.224
Saarland	1.287.688	1.156.743	436.642	2.881.072
Sachsen	4.081.189	1.204.413	420.039	5.705.640
Sachsen-Anhalt	4.905.435	2.874.794	990.066	8.770.295
Schleswig-Holstein	1.260.998	1.031.587	324.747	2.617.332
Thüringen	7.414.992	2.558.551	335.567	10.309.110
Hamburg + Bremen	12.399	101.451	27.913	141.763
Deutschland (alle Länder)	145.301.457	63.027.817	16.049.585	224.378.859

Quelle: BWI-3 2012

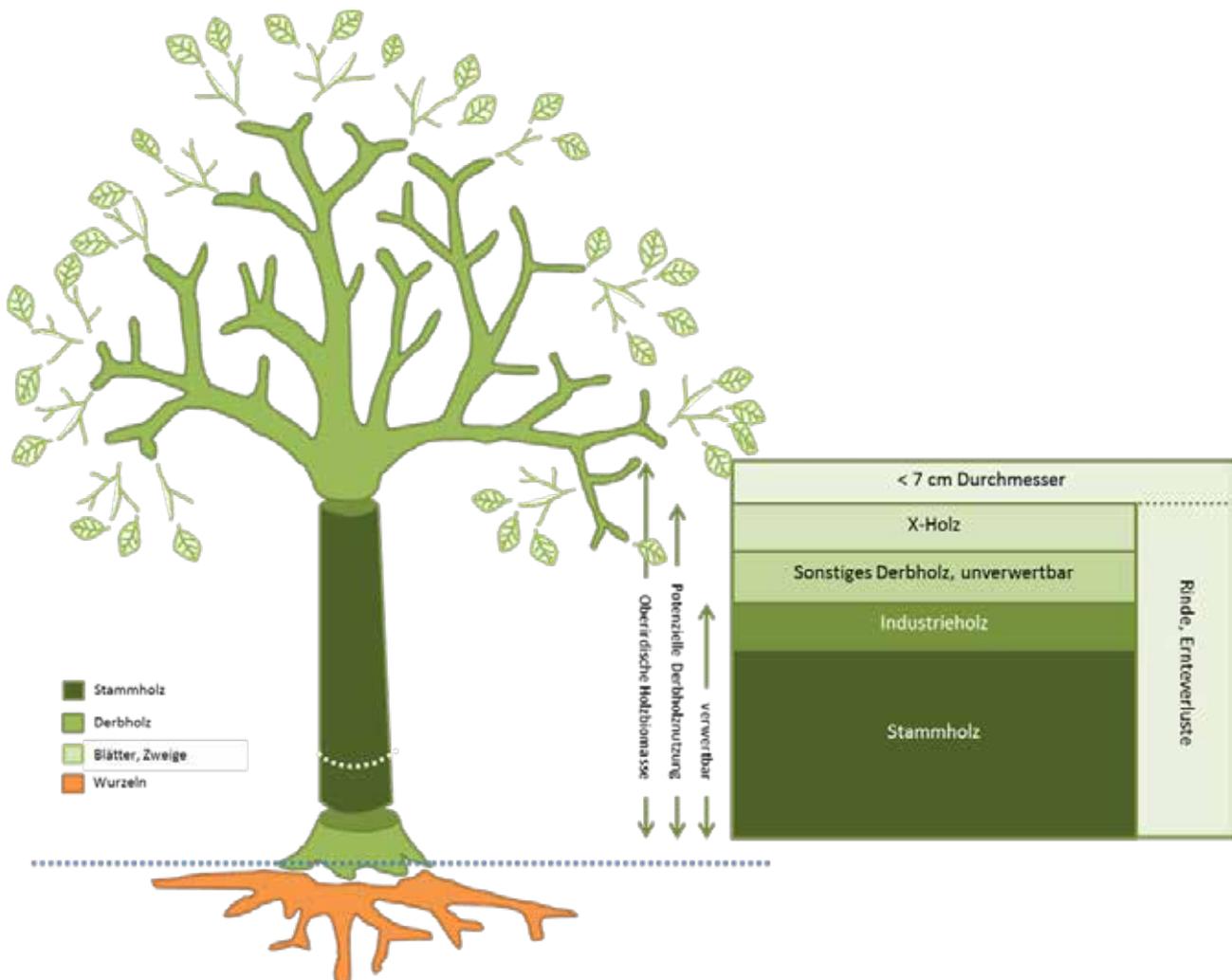
3.8. Holzverwendungsmodell

Das Holzverwendungsmodell teilt das geerntete Holz in Größenklassen ein. Da detaillierte Merkmale zur Qualität des Holzes fehlen (Astigkeit, Schaffform, Fäuleanteil, etc.), orientiert sich das Modell hauptsächlich an der Baumart und den Durchmesser des zu sortierenden Baumes. Die Sortierung kann je nach Bundesland, Baumart, Durchmesserstufe und Zopfdurchmesser variieren. Unterschieden werden Stammholz, Industrieholz und X-Holz.

Das Volumen der noch stehenden Bäume (Vorratsfestmeter) wird bei der Ernte um die Verluste bei der Holzernte (Rinde, Äste und Stubben) reduziert (Erntefestmeter) wie in Abbildung 3-4 dargestellt.

Geerntetes und sortiertes Holz wird vier Gruppen von Holzprodukten zugeordnet, unterschieden nach Holzart (Laubholz/Nadelholz): Sägeholz (für die Produktion von Schnittholz), Plattenholz (für die Produktion von Span- und Faserplatten), Papierholz (für die Produktion von Papier und Pappe) und Energieholz (für die Produktion von Strom und Wärme, Tabelle 3-5).

Abbildung 3-4: Biomassekompartimente und Holzverwendung



Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 3-5: Beispielhafte Zuordnung von Holzsortimenten zu Holzprodukten

Holzart	Variable	Anteil in Prozent
Laubholz	Stammholz zu Sägeholz	60
	Stammholz zu Plattenholz	20
	Stammholz zu Papierholz	0
	Stammholz zu Energieholz	20
Nadelholz	Stammholz zu Sägeholz	60
	Stammholz zu Plattenholz	20
	Stammholz zu Papierholz	20
	Stammholz zu Energieholz	0
Laubholz	Industrieholz zu Sägeholz	0
	Industrieholz zu Plattenholz	0
	Industrieholz zu Papierholz	20
	Industrieholz zu Energieholz	80
Nadelholz	Industrieholz zu Sägeholz	0
	Industrieholz zu Plattenholz	40
	Industrieholz zu Papierholz	40
	Industrieholz zu Energieholz	20
Laubholz	X-Holz zu Sägeholz	0
	X-Holz zu Plattenholz	0
	X-Holz zu Papierholz	0
	X-Holz zu Energieholz	100
Nadelholz	X-Holz zu Sägeholz	0
	X-Holz zu Plattenholz	0
	X-Holz zu Papierholz	0
	X-Holz zu Energieholz	100

Quelle: Eigene Darstellung

3.9. Kohlenstoff in Holzprodukten

Bei der Ernte von Holz wird der dort gespeicherte Kohlenstoff nicht unmittelbar emittiert sondern in Holzprodukte verschiedener Verweildauer überführt. Holzprodukte können so einen positiven Beitrag zur Kohlenstoffbilanz des Sektors beitragen, wenn die Nutzungsdauer oder der Produktspeicher erhöht werden. Eine Zunahme des einen führt allerdings automatisch zu einer Abnahme des anderen. Deshalb ist es wichtig, Holzprodukte nicht unabhängig von der Waldbiomasse zu bilanzieren. In einem Holzproduktmodell werden diese Effekte modelliert.

Kohlenstoff in Holzprodukten wird in drei Kompartimenten mit unterschiedlichen Verweildauern betrachtet: Papier, Holzwerkstoffplatten und Sägeholz (Tabelle 3-6). Es wird angenommen, dass Kohlenstoff aus Holz für die energetische Nutzung direkt bei der Ernte emittiert wird. Die Initialisierung des Holzproduktmodells erfolgt wie beim Bodenmodell über einen sogenannten „spin-up“-Lauf des Modells von 300 Jahren, in denen sich die verschiedenen Kohlenstoffpools füllen und sich nahe eines Gleichgewichts zwischen Zufluss und Abbau befinden und deshalb bei

Fortschreibung der gleichen Waldbewirtschaftung und bei ausgeglichener Altersstruktur konstant bleiben.

Tabelle 3-6: Halbwertszeiten von Holzproduktkategorien nach IPCC in Jahren

IPCC Kategorie	Modell Kategorie	Halbwertszeiten
Paper	Industrieholz (Nadelholz)	2
Wood Panels	Industrieholz (Laubholz)	25
Sawnwood	Stammholz (Laub- und Nadelholz)	35

Quelle: IPCC 2013

4. Modelleinstellungen

4.1. Unterscheidung von Bewirtschaftungsoptionen

Es wurden zusammen die folgenden Modellparameter bzw. Unterscheidungsmerkmale für Managementoptionen identifiziert, die im Modell umgesetzt werden sollen um die Szenarien möglichst realitätsnah gestalten zu können.

Unterscheidungsmerkmale:

- **Bundesländer:** stellen nicht per se ein Unterscheidungsmerkmal für Waldbauoptionen dar, werden aber bereits bei der Datenausgabe vom Modell unterschieden, sind also bereits implementiert.
- **Eigentumsarten:** Es werden Privatwald (ohne Unterscheidung von klein oder groß wie in der BWI) und Staatswald (beinhaltet Körperschaftswald, Landeswald und Bundeswald) unterschieden.
- **Baumarten:** statt der momentan sechs Baumarten bei der Datenausgabe des Modells sollen die neun Baumartengruppen der BWI unterschieden werden (Eiche, Buche, andere Laubbäume hoher Lebensdauer, andere Laubbäume niedriger Lebensdauer, Fichte, Tanne, Douglasie, Kiefer, Lärche)
- **Bestandestypen:** zusätzlich zu den neun Baumartengruppen werden zusätzlich drei Bestandestypen unterschieden (Reinbestand, Mischung mit Laubbäumen, Mischung mit Nadelbäumen, siehe Tabelle B-5)
- **Behandlungstypen:** (Waldbauphasen): Der Behandlungstyp unterscheidet Bestände in verschiedenen Entwicklungsphasen. Mittels des Medians des Durchmessers sollen diese Waldbauphasen unterschieden und den jeweiligen Bestandestypen zugewiesen werden. Zu unterscheiden sind:
 - Jungbestandspflege
 - Durchforstung

- Vorratspflege
- Nutzung

4.2. Modellparameter zur Beschreibung des Managements

Parameter [Einheit]

- **Waldumbau_ID** [ID Nummer des Waldumbauplans], diese wird in einer gesonderten Tabelle geregelt und beschreibt eine zur Standardbehandlung des Bestandestyps abgeänderte Intensität der Nutzung für einzelne Baumarten, sowie die in der Verjüngung zu fördernden Baumarten
- **Start Durchforstung ab Durchmesser** [cm]
- **Ende Durchforstung ab Durchmesser** [cm]
- **Intensität Durchforstung** [% der Anzahl der Bäume, die in das Raster fallen]
- **Alter flächige Nutzung** [Jahre]
- **Zieldurchmesser** [cm]
- **Intensität der Zielstärkennutzung** [% der Anzahl der Bäume, die in das Raster fallen]

Abbildung 4-1: Unterscheidung von Managementoptionen und Parametern in FABio



Quelle: Eigene Darstellung

Literaturverzeichnis

- Burschel, P.; Kürsten, E.; Larson, B. C. (1993): Die Rolle von Wald und Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt - Eine Betrachtung für die Bundesrepublik Deutschland. In: *Forstliche Forschungsberichte München - Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München und der forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt 126*, S. 1–135.
- Cienciala, E.; Černý, M.; Tatarinov, F.; Alptauer, J.; Exnerová, Z. (2006): Biomass functions applicable to Scots pine. In: *Trees* 20 (4), S. 483–495. DOI: 10.1007/s00468-006-0064-4.
- Cienciala, Emil; Alptauer, J.; Exnerova, Z.; Tatarinov, F. (2008): Biomass functions applicable to oak trees grown in Central-European forestry. In: *Journal of Forest Science* 54 (3), S. 109–120, zuletzt geprüft am 18.08.2016.
- ForstBW Praxis (2014): Richtlinie Landesweiter Waldentwicklungstypen. Hg. v. Landesbetrieb Forst Baden-Württemberg. Online verfügbar unter http://www.forstbw.de/fileadmin/forstbw_infothek/forstbw_praxis/wet/ForstBW_Waldentwicklung_web.pdf.
- IPCC (2013): 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol. Intergovernmental Panel on Climate Change. Online verfügbar unter http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/pdf/KP_Supplement_Entire_Report.pdf.
- Kroiher, Franz; Oehmichen, Katja (2010): Das Potenzial der Totholzakkumulation im deutschen Wald | Potential of deadwood accumulation in German forests. In: *Swiss Forestry Journal* 161 (5), S. 171–180. DOI: 10.3188/szf.2010.0171.
- Liski, J.; Perruchoud, D.; Karjalainen, T. (2002): Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe. In: *Forest Ecology and Management* 169 (1-2), S. 159–175. Online verfügbar unter <Go to ISI>://000177680700014.
- Liski, Jari; Palosuo, Taru (2003): The simple dynamic soil carbon model Yasso (August), S. 1–40.
- Liski, Jari; Palosuo, Taru; Peltoniemi, Mikko; Sievänen, Risto; Sievanen, R. (2005): Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. In: *Ecological Modelling* 189 (1-2), S. 168–182. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.005.
- Masera, O. R.; Garza-Caligaris, J. F.; Kanninen, M.; Karjalainen, T.; Liski, J.; Nabuurs, G. J. et al. (2003): Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach. In: *Ecological Modelling* 164 (2-3), S. 177–199.
- Monserud, Robert A.; Sterba, Hubert (1996): A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria. In: *Forest Ecology and Management* 80 (1–3), S. 57–80. DOI: 10.1016/0378-1127(95)03638-5.
- Monserud, Robert A.; Sterba, Hubert (1999): Modeling individual tree mortality for Austrian forest species. In: *Forest Ecology and Management* 113 (2–3), S. 109–123. DOI: 10.1016/S0378-1127(98)00419-8.
- Mund, Martina (2004): Carbon pools of European beech forests (*Fagus sylvatica*) under different silvicultural management. In: *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 189*, S. 256.
- Muukkonen, P. (2005): Needle biomass turnover rates of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) derived from the needle-shed dynamics. In: *Trees-Structure and Function* 19 (3), S. 273–279. Online verfügbar unter <Go to ISI>://000229510100004.

- Muukkonen, P.; Lehtonen, A. (2004): Needle and branch biomass turnover rates of Norway spruce (*Picea abies*). In: *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* 34 (12), S. 2517–2527. Online verfügbar unter <Go to ISI>://000226595800012.
- Repo, A.; Känkänen, R.; Tuovinen, J. P.; Antikainen, R.; Tuomi, M.; Vanhala, P.; Liski, J. (2012): Forest bioenergy climate impact can be improved by allocating forest residue removal. In: *GCB Bioenergy* 4 (2), S. 202–212. Online verfügbar unter <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84866512367&partnerID=40&md5=e0daf5f30200f5c985b43a86838fa497>.
- Repo, A.; Tuomi, M.; Liski, J. (2011): Indirect carbon dioxide emissions from producing bioenergy from forest harvest residues. In: *GCB Bioenergy* 3 (2), S. 107–115. Online verfügbar unter <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84867677308&partnerID=40&md5=941768420024ae4de59e979639eb6a1a>.
- Rock, Joachim; Badeck, Franz-W.; Harmon, Mark E. (2008): Estimating decomposition rate constants for European tree species from literature sources. In: *Eur J Forest Res* 127 (4), S. 301–313. DOI: 10.1007/s10342-008-0206-x.
- Wirth, C.; Schumacher, J.; Schulze, E. D. (2004): Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe - a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. In: *Tree physiology* 24 (2), S. 121–139. Online verfügbar unter <Go to ISI>://000188786300001.
- Wutzler, Thomas; Wirth, Christian; Schumacher, Jens (2008): Generic biomass functions for Common beech (*Fagus sylvatica*) in Central Europe. Predictions and components of uncertainty. In: *Can. J. For. Res.* 38 (6), S. 1661–1675. DOI: 10.1139/X07-194.

Annex A: Glossar

Baumartengruppe	Im Modell FABio werden Baumarten gleicher oder ähnlicher Eigenschaften in 24 Baumartengruppen zusammengefasst (siehe Tabelle B-1). Bei der Ausgabe von Ergebnissen werden diese jedoch weiter aggregiert und wie in der Bundeswaldinventur zu neun Gruppen zusammengefasst.
Behandlungstyp	Der Behandlungstyp beschreibt welche waldbauliche Behandlung (z.B. Jungbestandspflege, Durchforstung etc.) in einem Bestand zu erwarten ist. Über den Behandlungstyp erfolgen die zeitliche und inhaltliche Spezifizierung des waldbaulichen Vorgehens.
Bestand	Bewirtschaftungseinheit des Waldes; Waldteil, der sich hinsichtlich Baumart, Alter oder Struktur wesentlich von seiner Umgebung abhebt.
Bestandesstruktur	Zusammensetzung des Baumbestandes einer Fläche nach Qualität und Quantität, räumlicher und zeitlicher Differenzierung.
Bestandestyp	<p>Der Bestandestyp charakterisiert die Baumartenmischung. Es werden Reinbestands- und Mischungsformen unterschieden: Die Reinbestandsform ist durch einen Standflächenanteil der führenden Baumart von über 80% definiert, sobald Mischbaumarten (andere Nadel- und/oder Laubbaumarten) einen Anteil von zusammen über 20% erreichen, werden Mischbestandstypen festgelegt. Bei den Mischbaumarten wird nur noch nach Nadel- und Laubbäumen unterschieden. Es werden so 27 verschiedenen Bestandestypen unterschieden:</p> <ul style="list-style-type: none"> · X-Reinbestand · X-Mischbestand mit Laubbäumen · X-Mischbestand mit Nadelbäumen <p>, wobei X für die neun Baumartengruppen steht (siehe Tabelle B-5).</p>
Bonität	Einstufung der Produktivität einer Baumart durch ein relatives Bezugssystem. Im Modell wird die Bonität für jeden Stichprobenpunkt ermittelt. Dazu wird das mittlere Vorratswachstum pro Vorrat bestimmt und über alle Stichprobenpunkte auf einen Wert zwischen 0 und 100 normalisiert.
Bestandesgrundfläche	Summe der Stammquerschnittsflächen in 1,3 m Höhe über dem Boden. Eingeschlossen sind alle Bäume mit einem Brusthöhendurchmesser ab 7 cm.
Brusthöhendurchmesser (DBH)	Der Durchmesser eines Baumes in 1,3 m Höhe.
Derbholz	Oberirdische Holzmasse mit einem Durchmesser von über 7 cm mit Rinde. Bäume unter 7 cm Brusthöhendurchmesser sind kein Derbholz.
Erntefestmeter (Efm)	Maßeinheit für das Volumen des Holzes in Kubikmetern Derbholz ohne Rinde bei Planung, Einschlag, Verkauf und Buchung
Festmeter	Ein Festmeter Holz entspricht 1 m ³ massivem Holz, d. h. ohne Zwischenräume in der Schichtung.

Industrieholz	Schwächeres oder minderwertiges Derbholz, das nicht als Stammholz nutzbar ist. Es wird in der Holzwerkstoff- und Papierindustrie verarbeitet. In FABio wird der Industrieholzanteil in Abhängigkeit von der Dimension der geernteten Stämme ermittelt.
Potentielle Natürliche Vegetation	Die Potenzielle natürliche Vegetation (PNV) beschreibt eine hypothetische Zusammensetzung der Vegetation, die sich in einem bestimmten Gebiet mit den derzeitigen Umweltbedingungen einstellen würde, wenn der menschliche Einfluss ausbleiben würde und sich die Vegetation langfristig entwickeln könnte.
Stammholz	Teil des geernteten Derbholzes, das aufgrund seiner Dimension und Qualität überwiegend für die Verwendung in der Säge- und Furnierindustrie bestimmt ist. In FABio wird der Stammholzanteil in Abhängigkeit von Baumart und Durchmesser ermittelt.
Verjüngung	Verjüngung ist die natürliche oder künstliche Begründung eines neuen Waldes. Natürliche Verjüngung entsteht durch Samen oder Stockausschlag. Bei der künstlichen Verjüngung werden auf einer bestimmten Fläche Bäume gesät oder gepflanzt.
Vorrat (syn. Holzvorrat, Derbholzvorrat)	Derbholz, gemessen in Vorratsfestmeter oder Erntefestmeter.
X-Holz	Als unverwertbar bezeichnetes Derbholz am unteren Ende des Stammes. Entsteht in der Regel durch Abschneiden von faulen Stammteilen.
Zielstärke	Brusthöhendurchmesser zur Festlegung der Hiebsreife von Einzelstämmen.

Annex B: Modellparameter und Einstellungen

Tabelle B-1: Liste der Baumartengruppen in FABio

Baumartengruppen für Darstellung	Baumartengruppen im Modell	Beschreibung
Fichte	Fichten-Arten	Gemeine Fichte, Omorikafichte, Sitkafichte, Schwarzfichte, Blaufichte, Stechfichte, Sonstige Fichten
	sonstige Nadelbäume	Lebensbaum, Hemlockstanne, Eibe, Lawsonszyprisse, Übrige Nadelbäume
Kiefer	Kiefern-Arten	Gemeine Kiefer, Bergkiefer, Schwarzkiefer, Rumelische Kiefer, Zirbelkiefer, Weymouthskiefer, Murraykiefer, Gelbkiefer, Sonstige Kiefern
Tanne	Tannen-Arten	Weißtanne, Amerikanische Edeltanne, Küstentanne, Nikkotanne, Nordmannstanne, Veitchtanne, Sonstige Tannen
Douglasie	Douglasie	Douglasie
Lärche	Lärchen-Arten	Europäische Lärche, Japanische Lärche (+Hybrid)
Buche	Rot-Buche	Buche
	Hainbuche	Hainbuche (Weißbuche)
Eiche	Stiel-/Traubeneiche	Stieleiche, Traubeneiche, Sumpfeiche
	Roteiche	Roteiche
LB mit hoher Lebensdauer	Esche-Arten	Gemeine Esche, Weißesche
	Ahorn-Arten	Bergahorn, Spitzahorn, Feldahorn, Silberahorn
	Linden-, Ulmenarten	Linde (heimische Arten), Ulme (Rüster), heimische Arten
	Robinie	Robinie
	Edelkastanie	Edelkastanie
	Sonstige Lb. mit hoher Lebensdauer	Rosskastanie, Speierling, Weißer Maulbeerbaum, Echte Mehlbeere Nußbaum-Arten (Wal-, Schwarz-, Butternuß), Stechpalme, Übrige Lb. mit hoher Lebensdauer
LB mit niedriger Lebensdauer	Birken-Arten	Gemeine Birke, Moorbirke (+Karpatenbirke)
	Erlen-Arten	Schwarzerle, Grauerle, Grünerle
	Pappel-Arten	Aspe, Europäische Schwarzpappel (+Hybriden), Graupappel (+Hybriden), Silberpappel, Weißpappel, Balsampappel (+Hybriden)
	Vogelbeere	Vogelbeere
	Weiden-Arten	Weide
	Spätblühende Traubenkirsche	Spätblühende Traubenkirsche
	Vogelkirsche	Vogelkirsche
	Sonstige Laubbäume mit niedriger Lebensdauer	Gewöhnliche Traubenkirsche, Gemeiner Faulbaum, Wildapfel, Wildbirne, Baumhasel, Elsbeere, Übrige Laubbäume mit niedriger Lebensdauer

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle B-2: Parameter des Wachstumsmodells

Baumarten- gruppe	d_a1	d_b1	d_b2	d_b3	d_b4	d_c1	d_c2	d_c3	d_d1	h_a1	h_b1	h_b2	h_b3	h_b4	h_c1	h_c2	h_c3	h_d1
Fichten-Arten	0,018633	1,227946	-0,00001	-0,193359	-0,000585	-0,018643	-0,001818	-0,000032	0,007452	-0,336931	0,466518	-0,000004	-0,614226	-0,001324	-0,011664	-0,000002	0	0,011305
Kiefern-Arten	-0,137571	1,098127	-0,000123	-0,101473	-0,000069	-0,026067	-0,002367	-0,000004	0,009331	0,028388	0,790552	-0,000002	-1,326993	-0,001263	-0,00408	0	0	0,016813
Tannen-Arten	-0,009895	0,971459	-0,000002	0,156429	-0,000569	-0,015643	-0,002353	-0,000007	0,007189	-0,40519	0,126683	-0,000005	-0,275818	-0,001116	-0,012643	-0,000001	0	0,012545
Douglasie	-0,417726	1,582691	-0,00008	-0,373089	-0,000024	-0,015178	-0,00105	0	0,003463	-0,326232	0,674762	-0,000074	-0,772398	-0,000619	-0,00967	-0,000027	0	0,008904
Lärchen-Arten	0,231104	1,088203	0	-0,181349	-0,000366	-0,017515	-0,001409	-0,000043	0,004843	1,010577	0,453373	-0,000001	-1,192485	-0,00086	-0,001223	-0,000002	0	0,012384
sonstige Nadelbäume	-9,999852	2,52432	-0,000023	2,002671	-0,003555	-0,004135	0	-0,00025	0,009537	-2,562829	0,257627	0	0,467072	-0,001374	-0,006787	0	0	0,001611
Rot-Buche	-0,628916	1,219898	-0,000028	-0,076711	-0,000391	-0,014248	-0,002243	0	0,007127	-0,514648	0,580274	-0,000026	-0,857611	-0,000905	-0,004872	-0,000493	0	0,013555
Stiel- /Traubeneiche	-0,263644	1,306597	-0,000017	-0,380472	-0,000048	-0,014779	-0,000045	0	0,003014	-0,499538	0,544925	-0,000005	-0,980139	-0,0008	-0,003436	-0,000133	0	0,014612
Roteiche	-0,100089	1,63101	-0,000083	-0,627821	0	-0,016883	-0,001013	0	0,004818	0,844553	0,496392	-0,000002	-1,192607	-0,001229	-0,010256	-0,000005	-0,000013	0,017842
Esche-Arten	0,630256	1,315961	-0,000001	-0,627908	-0,000037	-0,01498	-0,000693	-0,000005	0,004914	-0,029438	0,840517	-0,000046	-1,315233	-0,00104	-0,002184	-0,000001	0	0,016397
Hainbuche	-0,889911	1,505413	-0,000114	-0,467067	0	-0,014498	-0,00001	-0,000043	0,00401	-2,17949	1,092085	-0,000041	-0,877512	-0,001905	0	0	0	0,013437
Ahorn-Arten	0,832818	0,99562	0	-0,331069	-0,000121	-0,021336	-0,000048	0	0,004562	-0,242914	0,650664	-0,000021	-1,024235	-0,001127	-0,003753	0	0	0,012849
Linden-, Ulmenarten	-0,097308	1,631831	0	-0,764166	-0,000398	-0,012354	-0,002563	0	0,005607	-0,503936	0,855343	-0,000109	-1,155881	-0,000912	-0,005149	-0,000118	0	0,010492
Robinie	-1,424123	1,111166	0	0,409077	-0,000733	-0,018276	0	0	0,001127	-2,300907	0,39857	0	-0,135259	-0,002423	-0,000001	0	0	0,021381
Edelkastanie	-0,977591	1,190956	0	0,176253	-0,000347	-0,014945	-0,008766	0	0,002682	0,209746	0,535404	-0,000001	-1,34379	-0,000592	-0,000154	0	0	0,022265
Sonst. Lb. (hohe Lebensdauer)	-0,559805	0,884417	0	0,279052	0	-0,027593	-0,003922	-0,00017	0,006605	-1,455418	0,250443	-0,000103	-0,335192	0	-0,003022	0	-0,00016	0,014554
Birken-Arten	1,371884	1,137509	-0,000065	-0,79566	-0,000133	-0,026898	0	-0,000036	0,007403	1,578922	0,349466	-0,000003	-1,524317	-0,00052	-0,008069	0	0	0,015664
Erlen-Arten	0,471266	1,153695	-0,000068	-0,449223	0	-0,017888	0	-0,000017	0,00385	1,598435	0,763889	-0,000001	-2,029421	-0,000862	0	0	-0,000011	0,020302
Pappel-Arten	-2,052324	1,27677	-0,000003	0,38782	0	-0,008268	0	-0,00002	0,000941	0,706082	0,890429	0	-1,702135	-0,000554	-0,000005	0	-0,000006	0,018009
Vogelbeere	-0,358076	1,366988	-0,000188	-0,42227	-0,001777	-0,024986	-0,000002	-0,000081	0,010664	-0,248938	0,230649	-0,000094	-0,725865	-0,000001	-0,001471	-0,00001	0	0,00486
Weiden-Arten	-0,017607	1,442189	0	-0,386142	0	-0,017136	-0,005181	0	0,00002	-0,031859	0,504458	-0,000002	-1,253406	-0,002293	-0,000864	0	0	0,032193
Vogelkirsche	0,985074	1,157453	0	-0,564036	-0,000231	-0,027339	-0,00268	0	0,006959	0,041042	0,724459	-0,00017	-1,355964	-0,000868	-0,005042	0	0	0,019385
Spätblühende Traubenkirsche	-0,595182	0,331607	0	1,264837	0	-0,044714	0	-0,000154	0,000116	-2,298713	1,515805	-0,00182	-0,749967	0	-0,008143	0	-0,000017	0,000275
Sonst. Lb. (nied. Lebensdauer)	-9,999998	3,282447	0	0,393963	-0,001041	0	0	0	0	-3,966898	0,928028	-0,000615	0,210278	-0,001979	0	0	0	0,0071

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle B-3: Parameter des Mortalitätsmodells

Baumartengruppe	m_abs	m_bal	m_bon	m_age	m_dbh	m_div
Fichten-Arten	-2,1912654	0,0197892	0	0,0114019	-0,1036686	0,5277512
Kiefern-Arten	-2,744322	0,03843	0	0,005418	-0,089582	1,792444
Tannen-Arten	-3,917412	0	-0,010798	0	0	0
Douglasie	-1,650693	0,03603	0,014926	0,029351	-0,228364	0
Lärchen-Arten	-2,016307	0,021577	0	0,028855	-0,161454	0
sonstige Nadelbäume	-2,15064685	0,02895655	0	0	-0,14576715	0
Rot-Buche	-3,693961	0,027465	-0,011262	0	-0,019163	-1,425718
Stiel-/Traubeneiche	-2,7401263	0,0302403	0	0	-0,0465202	-0,5851626
Roteiche	-4,45029	0	0	0,07275	-0,13094	0
Esche-Arten	-3,053321	0,020946	0	0	-0,025695	-1,225397
Hainbuche	-2,719426	0	0	0	-0,067545	-1,397236
Ahorn-Arten	-3,735504	0,023515	0	0	0	0
Linden-, Ulmenarten	-3,359	0	0	0	0	0
Robinie	-3,320149	0	0	0	0	0
Edelkastanie	-5,263814	0,06884	0	0,023123	-0,084086	0
Sonstige Lb. mit hoher Lebensdauer	-3,060515	0	0,021491	0,023753	-0,058008	0
Birken-Arten	-3,2596302	0,0170794	0	0,026926	-0,0469448	0
Erlen-Arten	-1,644934	0,010231	0	0	-0,0818	1,180481
Pappel-Arten	-2,420742	0	0	0,014713	0	-0,979447
Vogelbeere	0	0,028577	0	0	0	0
Weiden-Arten	-1,691162	0,017925	0	0	0	0
Vogelkirsche	-2,954383	0,038518	0	0	0	0
Spätblühende Traubenkirsche	0	0,028577	0	0	0	0
Sonstige Lb. mit niedriger Lebensdauer	0	0,028577	0	0	0	-2,249048

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle B-4: Zusätzliche Modellparameter

Baumartengruppe	Zerfallsrate Totholz	Max. Baumhöhe	Max. Durchmesser	Holzdichte
Fichten-Arten	0,0525	60	150	0,4
Kiefern-Arten	0,0575	48	120	0,42
Tannen-Arten	0,0525	65	450	0,4
Douglasie	0,0575	100	440	0,45
Lärchen-Arten	0,0575	60	270	0,46
sonstige Nadelbäume	0,0575	60	150	0,4
Rot-Buche	0,067	50	200	0,58
Stiel-/Traubeneiche	0,0372	40	400	0,58
Roteiche	0,0372	40	400	0,58
Esche-Arten	0,067	45	200	0,57
Hainbuche	0,067	35	100	0,63
Ahorn-Arten	0,067	30	150	0,52
Linden-, Ulmenarten	0,067	40	100	0,43
Robinie	0,067	35	200	0,63
Edelkastanie	0,067	35	600	0,48
Sonstige Lb. mit hoher Lebensdauer	0,067	30	140	0,57
Birken-Arten	0,067	30	90	0,51
Erlen-Arten	0,067	40	100	0,45
Pappel-Arten	0,067	40	200	0,35
Vogelbeere	0,067	25	40	0,49
Weiden-Arten	0,067	15	40	0,45
Vogelkirsche	0,067	32	150	0,49
Spätblühende Traubenkirsche	0,067	40	120	0,49
Sonstige Lb. mit niedriger Lebensdauer	0,067	50	200	0,49

Quelle: Eigene Darstellung, verschiedene Quellen.

Tabelle B-5: Liste der Bestandestypen in FABio

Name	Beschreibung
BU-R Buchen-Reinbestand	Standflächenanteil Buche über 80%
BU-ML Buchen-Mischbestand mit Laubbäumen	Standflächenanteil Buche unter 80%, Mischbaumarten sind Laubbaumarten
BU-MN Buchen-Mischbestand mit Nadelbäumen	Standflächenanteil Buche unter 80%, Mischbaumarten sind Nadelbaumarten
EI-R Eichen-Reinbestand	Standflächenanteil Eiche über 80%
EI-ML Eichen-Mischbestand mit Laubbäumen	Standflächenanteil Eiche unter 80%, Mischbaumarten sind Laubbaumarten
EI-MN Eichen-Mischbestand mit Nadelbäumen	Standflächenanteil Eiche unter 80%, Mischbaumarten sind Nadelbaumarten
FI-R Fichten-Reinbestand	Standflächenanteil Fichte über 80%
FI-ML Fichten-Mischbestand mit Laubbäumen	Standflächenanteil Fichte unter 80%, Mischbaumarten sind Laubbaumarten
FI-MN Fichten-Mischbestand mit Nadelbäumen	Standflächenanteil Fichte unter 80%, Mischbaumarten sind Nadelbaumarten
KI-R Kiefern-Reinbestand	Standflächenanteil Kiefer über 80%
KI-ML Kiefern-Mischbestand mit Laubbäumen	Standflächenanteil Kiefer unter 80%, Mischbaumarten sind Laubbaumarten
KI-MN Kiefern-Mischbestand mit Nadelbäumen	Standflächenanteil Kiefer unter 80%, Mischbaumarten sind Nadelbaumarten
AL-R Andere Laubbäume-Reinbestand	Standflächenanteil andere Laubbäume über 80%
AL-ML Andere Laubbäume-Mischbestand mit Laubbäumen	Standflächenanteil andere Laubbäume unter 80%, Mischbaumarten sind Laubbaumarten
AL-MN Andere Laubbäume-Mischbestand mit Nadelbäumen	Standflächenanteil andere Laubbäume unter 80%, Mischbaumarten sind Nadelbaumarten
TA-R Tannen-Reinbestand	Standflächenanteil Tanne über 80%
TA-ML Tannen-Mischbestand mit Laubbäumen	Standflächenanteil Tanne unter 80%, Mischbaumarten sind Laubbaumarten
TA-MN Tannen-Mischbestand mit Nadelbäumen	Standflächenanteil Tanne unter 80%, Mischbaumarten sind Nadelbaumarten
DGL-R Douglasie-Reinbestand	Standflächenanteil Douglasie über 80%
DGL-ML Douglasie -Mischbestand mit Laubbäumen	Standflächenanteil Douglasie unter 80%, Mischbaumarten sind Laubbaumarten
DGL-MN Douglasie-Mischbestand mit Nadelbäumen	Standflächenanteil Douglasie unter 80%, Mischbaumarten sind Nadelbaumarten
LAE-R Lärche-Reinbestand	Standflächenanteil Lärche über 80%
LAE-ML Lärche-Mischbestand mit Laubbäumen	Standflächenanteil Lärche unter 80%, Mischbaumarten sind Laubbaumarten
LAE-MN Lärche-Mischbestand mit Nadelbäumen	Standflächenanteil Lärche unter 80%, Mischbaumarten sind Nadelbaumarten

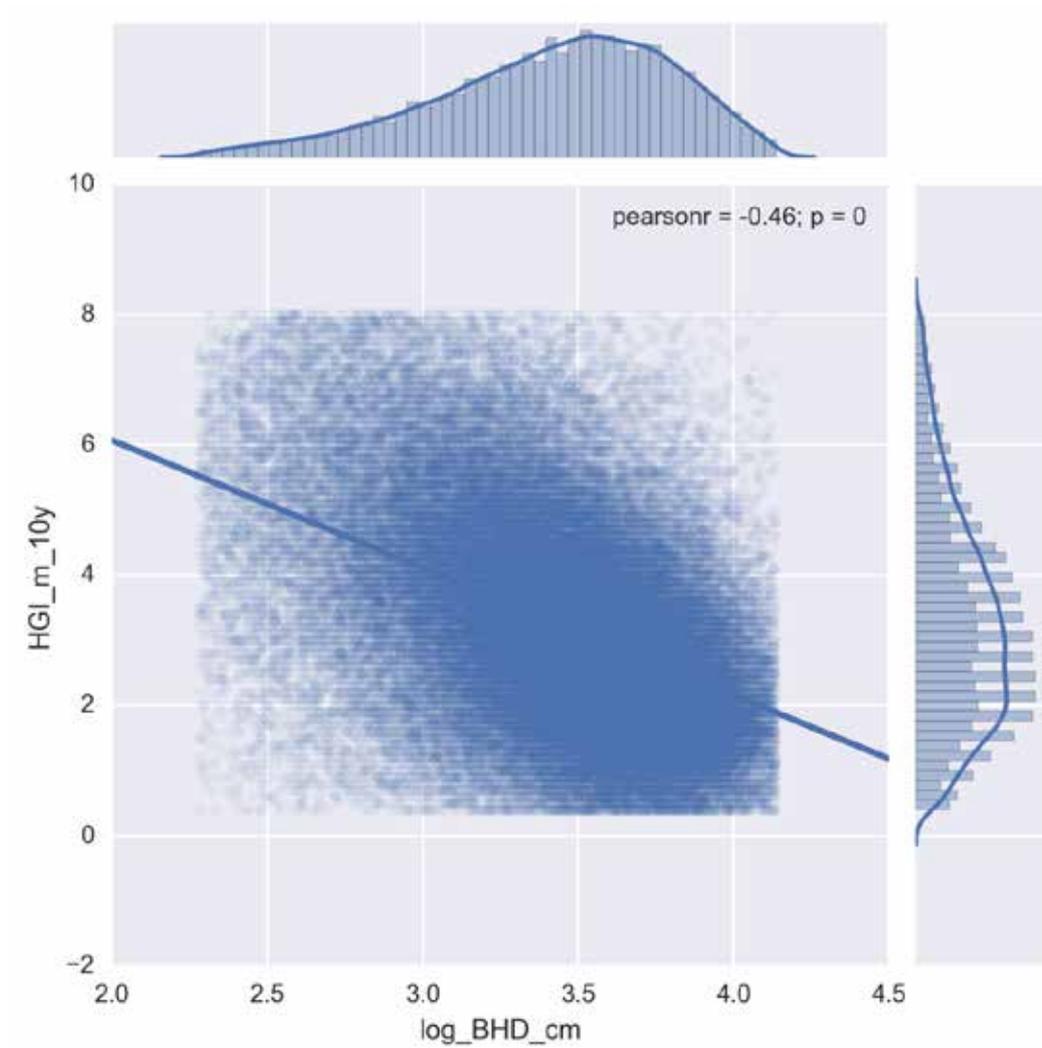
Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle B-6: Liste der Behandlungstypen in FABio

Name	Beschreibung
JP Jungwuchspflege	Die Jungwuchspflege umfasst die Waldentwicklungsphase vom gesicherten Nachwuchs bis zum Beginn der Durchforstung mit dem Ziel, die Holzqualität zu verbessern oder das Mischungsverhältnis der Baumarten zu beeinflussen (ForstBW Praxis 2014).
DF Durchforstung	<p>Durch die Einzelbaummodellierung ist sowohl das Alter als auch der Durchmesser und das Vorrat der einzelnen Bäume bekannt. Dadurch können gezielte Eingriffe vorgenommen werden, die an bestimmten Zieldurchmessern oder Durchmesserklassen ausgerichtet sind. Das Wachstumsmodell der verbleibenden Bäume reagiert dynamisch auf den Eingriff, da die sich ändernden Konkurrenzverhältnisse dargestellt werden können.</p> <p>Die Durchforstung fasst Jung- und Altdurchforstung zusammen. Sie beginnt im Modell ab Erlangen eines gewissen baumartenspezifischen Brusthöhendurchmessers. Durch gezielte Entnahme von Bäumen minderer Qualität (sog. Bedränger) soll der Zuwachs auf vitale und qualitativ gute Bäume (sog. Zukunftsbäume, ForstBW Praxis 2014) gelenkt werden.</p>
VP Vorratspflege	Die Vorratspflege ist eine Bewirtschaftungsphase innerhalb der Hauptnutzung vieler Waldbaukonzepte. Sie dient zur Förderung der Wertzuwachsträger durch Entnahme geringwertiger Bäume, der Nutzung hiebsreifer Baumarten sowie der Vorbereitung der Verjüngung. Hier findet Vorratsanreicherung bzw. Zuwachsabschöpfung statt.
NZ Nutzung	Ein wichtiges Merkmal alternativer Bewirtschaftungsformen ist die Abkehr von starren Betriebszieltypen hin zur Zielstärkennutzung im Wald. Diese kann mit dem Wachstumsmodell dargestellt werden, da der Durchmesser eines jeden Baumes und somit die Anzahl hiebsreifer Bäume bekannt ist. Die Nutzung im Modell kann deshalb einzelbaumweise durch Zielstärkennutzung, aber auch als flächige Räumung (Kahlschlag) nach Bestandesalter erfolgen.

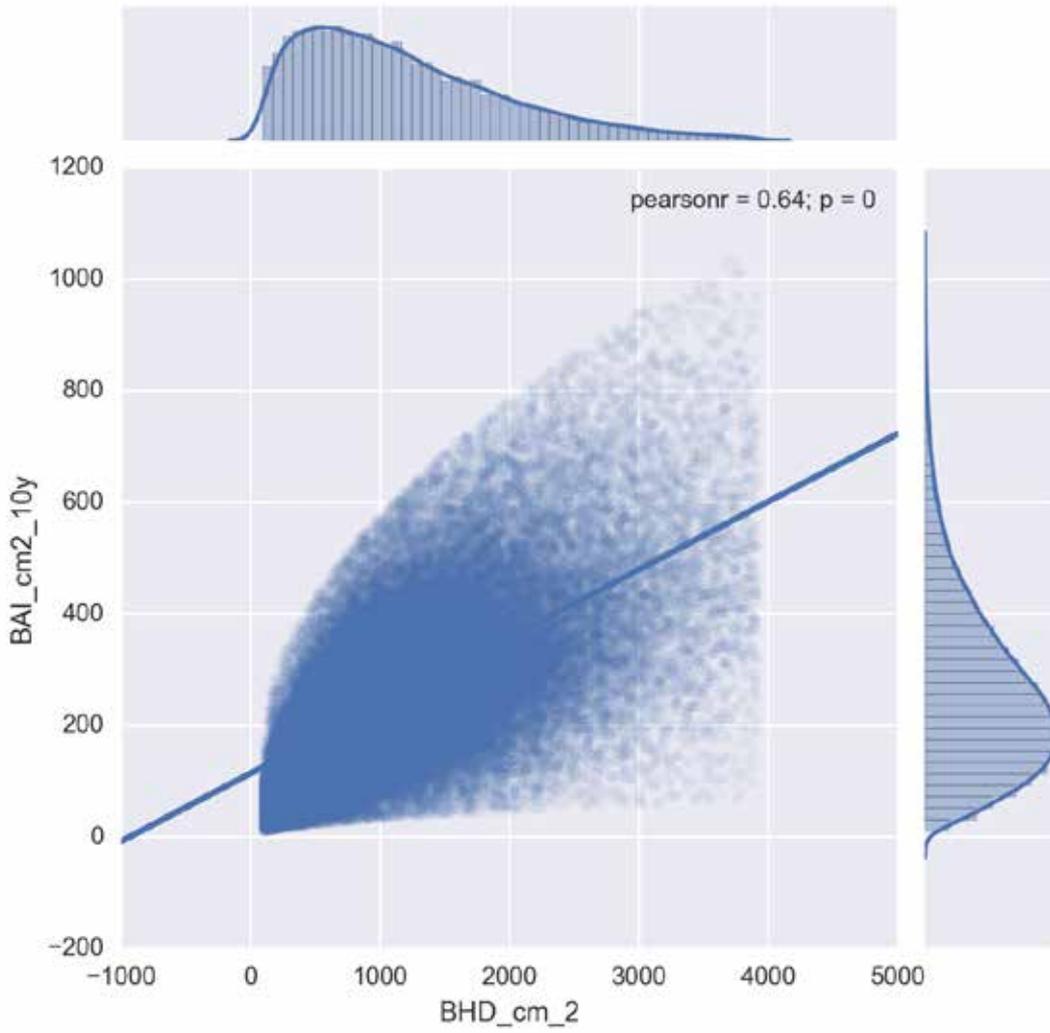
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung B-1: Höhenwachstum (10 Jahre) über Durchmesser (logarithmisch), alle Baumarten



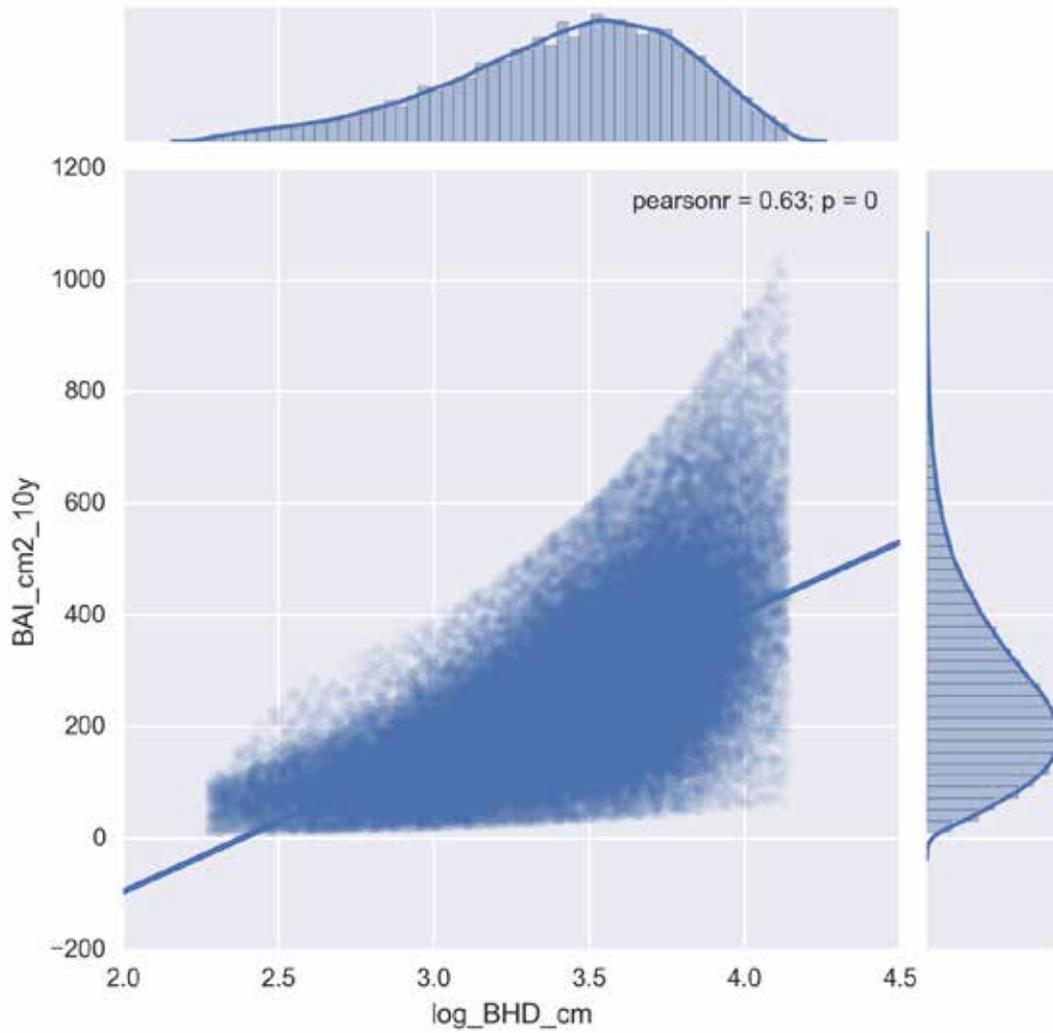
Quelle: Eigene Darstellung, Daten aus BWI-3 2012 und eigene Berechnungen.

Abbildung B-2: Grundflächenwachstum (10 Jahre) über Durchmesser, alle Baumarten



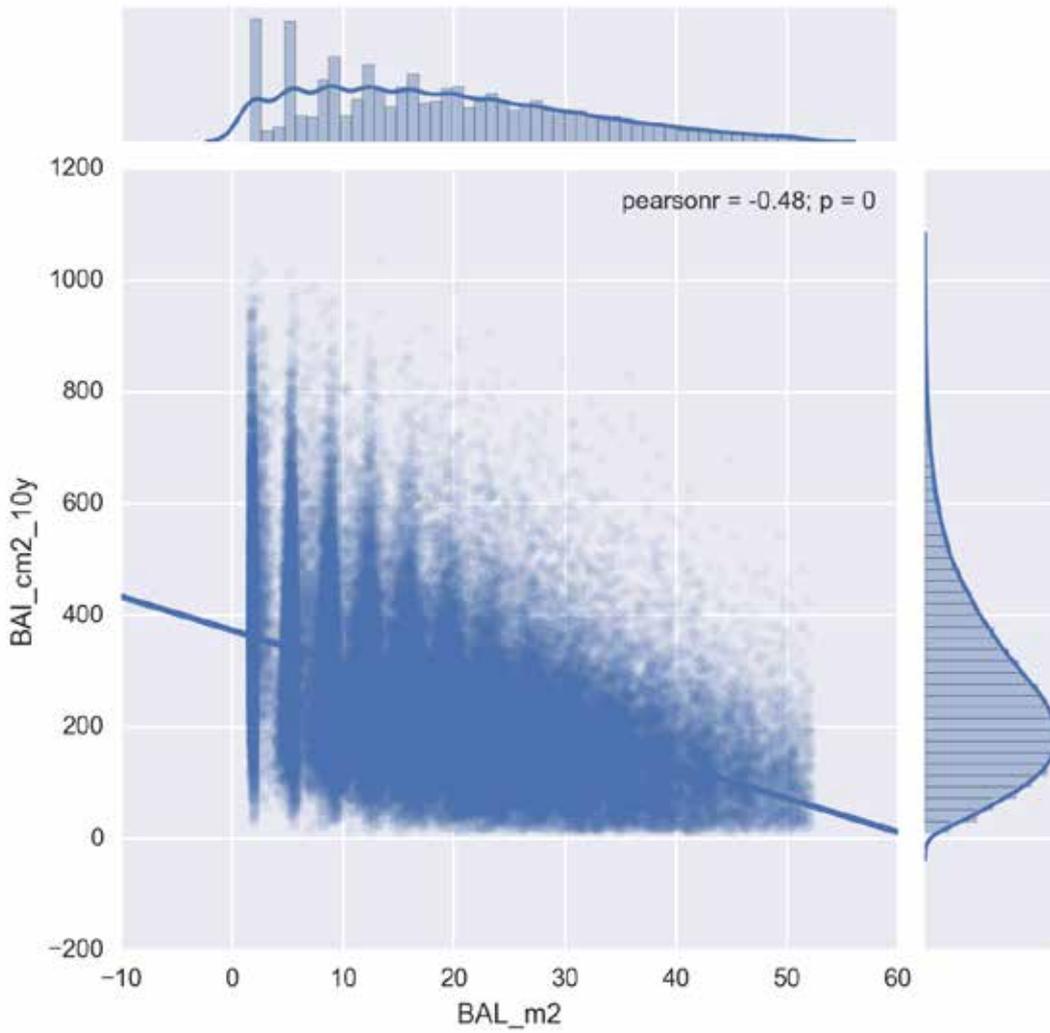
Quelle: Eigene Darstellung, Daten aus BWI-3 2012 und eigene Berechnungen.

Abbildung B-3: Grundflächenwachstum (10 Jahre) über Durchmesser (logarithmisch), alle Baumarten



Quelle: Eigene Darstellung, Daten aus BWI-3 2012 und eigene Berechnungen.

Abbildung B-4: Grundflächenwachstum (10 Jahre) über Konkurrenz stärkerer Bäume (BAL), alle Baumarten



Quelle: Eigene Darstellung, Daten aus BWI-3 2012 und eigene Berechnungen.