

Waldvision Deutschland

Beschreibung von Methoden, Annahmen
und Ergebnissen

Berlin, 26. Februar 2018

im Auftrag von Greenpeace

Autorinnen und Autoren

Dr. Hannes Böttcher
Dr. Klaus Hennenberg
Christian Winger
Öko-Institut e.V.

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

Die Szenarientwicklung, die Beschreibung unterschiedlicher Waldbauoptionen und die Analyse der BWI-Daten hinsichtlich der Auswahl von Flächen ohne Nutzung fand in Zusammenarbeit mit der Naturwald Akademie statt. Kapitel 3 (Szenarientwicklung) enthält inhaltliche Beiträge von:

- Dr. Torsten Welle, Naturwald Akademie
- Knut Sturm, Naturwald Akademie
- Yvonne Bohr, Naturwald Akademie

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Einleitung	5
Methoden	5
Szenarien	6
Ergebnisse und Diskussion	7
Schlussfolgerungen	10
1. Einleitung	12
2. Methoden	17
2.1. Modellbeschreibung	17
2.2. Datengrundlage für die Modellierung	18
2.3. Darstellung von Indikatoren im Modell	19
2.3.1. Holzvorrat und -zuwachs	19
2.3.2. CO ₂ -Speicherleistung	20
2.3.3. Bestandesstrukturen und starke Bäume	21
2.3.4. Totholzvorrat	21
2.3.5. Holzaufkommen und Holzprodukte	21
2.4. Darstellung der Waldbewirtschaftung im Modell	22
2.4.1. Waldumbau	22
2.4.2. Nutzungsintensität	22
2.4.3. Flächen ohne Holznutzung	23
3. Szenarienentwicklung	24
3.1. Basisszenario	24
3.1.1. Waldumbau	24
3.1.2. Nutzungsintensität	24
3.1.3. Flächen ohne Holznutzung	24
3.2. Holzscenario	25
3.2.1. Waldumbau	25
3.2.2. Nutzungsintensität	25
3.2.3. Flächen ohne Holznutzung	25
3.3. Waldvision	25
3.3.1. Waldumbau	26
3.3.2. Nutzungsintensität	26
3.3.3. Flächen ohne Holznutzung	26

3.4.	Auswahl von Flächen ohne Holznutzung in den Szenarien	28
3.5.	Annahmen zum zeitlichen Übergang in die Szenarien	33
4.	Grenzen der Modellierung	35
4.1.	Indikatoren und Datenbasis	35
4.2.	Projektionszeitraum und Unsicherheiten	35
5.	Ergebnisse	37
5.1.	These 1: Erhöhung der Vorräte im Wald	37
5.2.	These 2: Erhalt bzw. Erhöhung des Zuwachses	40
5.3.	These 3: Erhöhung des Kohlenstoffvorrats und der CO ₂ -Senke im Wald, Verbesserung der erweiterten CO ₂ -Bilanz	42
5.4.	These 4: Erhöhung des Anteils starker Bäume im Wald	47
5.5.	These 5: Erhöhung des Totholzvorrats	50
5.6.	These 6: Erhöhung der Naturnähe und des Laubholzanteils	52
5.7.	These 7: Verringerung und Verlagerung des Holzaufkommens	53
6.	Diskussion	58
6.1.	Vorrats- und Zuwachsentwicklung	58
6.2.	Betrachtung von Naturschutzaspekten - Totholz	59
6.3.	Waldsenke und Kohlenstoffbilanz	60
7.	Schlussfolgerungen	61
8.	Literatur	64
	Annex 1: Glossar	68
	Annex 2: Modellparameter und Einstellungen	71

Zusammenfassung

Einleitung

Ziel dieser Studie war die Entwicklung, Beschreibung und Bewertung des Szenarios einer alternativen ökologischen Waldbewirtschaftung in Deutschland, genannt „Waldvision“. Diese soll eine Diskussionsgrundlage für die Entwicklung einer zukunftsfähigen und ökologischen Forstwirtschaft in Deutschland darstellen. Dazu wurde, ausgehend von den Ergebnissen der letzten Bundeswaldinventur (BWI-3), die Waldentwicklung von 2012 bis zum Jahr 2102 mit dem Waldwachstumsmodell FABio des Öko-Instituts simuliert. Es wurden drei alternative Szenarien der Bewirtschaftung im Modell beschrieben und umgesetzt. Die Unterschiede zwischen den Szenarien wurden im Hinblick auf ausgewählte Indikatoren wie Zuwachs und Bestandesvorrat, Baumarten- und Durchmesserverteilung, Totholzvorrat, CO₂-Speichervermögen und Holzaufkommen bewertet.

Methoden

Seit 2015 wird am Öko-Institut das *Forestry and Agriculture Biomass Model* (FABio)¹ entwickelt. FABio ist ein Simulationsmodell basierend auf der Methode der systemdynamischen und agentenbasierten Modellierung für die Beschreibung von Biomassewachstum und Nutzung in der Land- und Forstwirtschaft.

Das Waldmodell in FABio basiert auf Daten der **Bundeswaldinventuren** (BWI) von 2002 und 2012 (BWI-2, bzw. BWI-3). Es beschreibt das Wachstum einzelner, durch die Inventuren erfasster Bäume als distanzunabhängiges Einzelbaumwachstumsmodell. Dabei werden die Bäume als Agenten mit unterschiedlichen Eigenschaften, wie Art, Alter, Durchmesser, Höhe etc. abgebildet. Die Einzelbäume werden auf einer Fläche von einem Hektar an den BWI-Traktecken entsprechend ihrer Häufigkeit im Bestand vervielfältigt. Mit Hilfe von Wachstumsfunktionen wird deren Entwicklung fortgeschrieben und somit Zuwachs- und Vorratsentwicklung der Waldbestände geschätzt. Zudem umfasst FABio Module für die Berechnung der Kohlenstoffmenge in Waldbiomasse, Holzprodukten, in der Streu und im Boden.

Eine Reihe von Indikatoren beschreibt die Entwicklung des Waldes und dient dazu, die Modellergebnisse unterschiedlicher Szenarien bewerten und vergleichen zu können. Modelliert werden neben dem **Holzvorrat** und der Biomasse in Stämmen, Ästen, Blättern und Wurzeln auch der **Zuwachs** an Holz pro Jahr und die **CO₂-Senkenleistung** (d.h. Kohlenstoffbindungsrate) des Waldes. Durch die Verwendung eines Einzelbaummodells können auch Aussagen über die Änderung der **Bestandesstruktur** gemacht werden (Baumartenzusammensetzung, Durchmesserverteilung, Stammzahlverteilung, Anteil alter Bäume etc.). **Totholzvorrat** und -qualität sind zentrale Merkmale für die Bewertung von Biodiversität im Wald. Basierend auf einem Mortalitätsmodell können Aussagen über die anfallenden Mengen an Totholz und dessen Verbleib getroffen werden.

Modelliert werden zudem das potenzielle **Holzaufkommen**, also die aus dem Wald unter den im Modell berücksichtigten Bewirtschaftungsregeln erzielbare Erntemenge, und **Holzprodukte**, sortiert nach verschiedenen Nutzungen. Unterschieden werden die Sortierungen Stammholz, Industrieholz und X-Holz anhand von Baumart und Durchmesser. Das sortierte Holz kann

¹ Siehe Detailbeschreibungen zum Modell in Öko-Institut 2018, FABio Waldmodell Modellbeschreibung Version 0.54 <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/FABio-Wald-Modellbeschreibung.pdf>

wiederum vier Gruppen von Holzprodukten zugeordnet werden: Sägeholz, Holzwerkstoffplatten, Papierholz und Energieholz. Der Kohlenstoff in Holzprodukten wird anhand von verschiedenen Lebensdauern dieser Produkte bilanziert. Für Kohlenstoff im Energieholz wird allerdings angenommen, dass dieser direkt bei der Ernte emittiert wird.

Durch die Verwendung von Holz anstelle von anderen, energieintensiveren Materialien oder auch durch die Verdrängung von fossilen Energieträgern durch Holzbiomasse, ergeben sich potenzielle **Substitutionseffekte**. Aufgrund fehlender Daten für eine fundierte Beschreibung der Effekte wurden diese bei der Betrachtung der Gesamtkohlenstoffbilanz ausgeklammert. Unberücksichtigt blieben auch Auswirkungen des Klimawandels und natürlicher Störungen auf den Wald. Je nach Region, Bodenbedingungen, Baumartenzusammensetzung und Bestandesbeschaffenheit können diese das Waldwachstum negativ oder auch positiv beeinflussen.

Im Modell können verschiedene **Bewirtschaftungsoptionen** dargestellt werden. Einzelne Maßnahmen im Wald werden an acht verschiedene Baumartengruppen (Fichte, Kiefer, Lärche, Tanne, Douglasie, Buche, Eiche und andere Laubbäume) angepasst und orientieren sich an bestimmten Phasen der Bestandesentwicklung:

- **Waldumbau:** eine Veränderung der Baumartenzusammensetzung, die durch den gezielten Einschlag und Einflussnahme auf die **Verjüngung** gesteuert wird. Dabei können gezielt einzelne Baumartengruppen gefördert oder zurückgedrängt und so die Baumartenverteilung beeinflusst werden.
- **Nutzungsintensität:** eine Beschreibung der Stärke von Eingriffen für die Holzproduktion. Eine zentrale Stellgröße ist der **Durchmesser** der Bäume, ab dem **Durchforstungen** vorgenommen oder Bäume durch **Zielstärkenutzung** geerntet werden. Die **Stärke** und **Häufigkeit** der Eingriffe entscheidet darüber, wie viel des hiebsreifen Vorrats dann tatsächlich entnommen wird. Auf diese Weise werden die Vorräte im Wald erhöht oder abgebaut und die Alters- und Durchmesserstruktur der Bestände geändert.
- **Flächen ohne Holznutzung:** Bestände können der **natürlichen Waldentwicklung** überlassen und nicht weiter forstlich genutzt werden. Die Auswahl der Flächen kann anhand verschiedener Kriterien erfolgen, wie der **Naturnähe** des Waldes durch Vergleich der aktuellen Baumartenzusammensetzung mit der potentiellen natürlichen Waldgesellschaft, des Alters von Beständen oder bestimmter **Nutzungseinschränkungen**, z.B. Geländeneigung etc.

Szenarien

Auf Basis der oben beschriebenen Bewirtschaftungsoptionen wurden **drei Szenarien** entwickelt, die alternative Bewirtschaftungsweisen auf der Waldfläche Deutschlands umsetzen.

Das **Basisszenario** stellt ein Fortschreibungsszenario dar. Die Parametereinstellungen sind so gewählt, dass sie die zurzeit vorherrschende Nutzungsintensität abbilden. Die Einstellungen zu Zieldurchmessern und Nutzungsintensitäten lehnen sich an das WEHAM Basisszenario an (BMEL, 2016c). Ein Waldumbau findet nicht explizit statt. Der zwischen den beiden Bundeswaldinventuren 2002 und 2012 bereits umgesetzte Waldumbau wird nicht ausgedehnt. Im Basisszenario wird davon ausgegangen, dass auf 4,1 % der Waldfläche eine natürliche Waldentwicklung stattfindet. Zu diesen Flächen ohne Holznutzung wurden neben Flächen, die bereits als Schutzgebiet (z.B. Nationalpark oder Naturschutzgebiet) ausgewiesen wurden, auch aktuell ungenutzte Flächen ohne gesicherten Schutzstatus gezählt.

Das **Holzscenario** beschreibt den Wald unter der Annahme, dass die Bewirtschaftung intensiviert wird. Die Nutzungsintensität wird im Vergleich zum Basisszenario erhöht, indem Durchforstungs- und Entnahmemengen pro Eingriff – bei Beibehaltung ähnlicher Zieldurchmesser – in etwa verdoppelt werden. Zudem werden Nadelbäume bei der Verjüngung der Bestände gefördert. Die Flächen ohne Holznutzung verändern sich im Vergleich zum Basisszenario nicht.

Das Szenario **Waldvision** setzt eine ökologische Waldwirtschaft in ganz Deutschland um. Dazu werden in allen Beständen die Zieldurchmesser um 17-22 % erhöht und Stärke und Frequenz von Eingriffen um 10-65 % verringert. Im Vergleich zum Basisszenario werden Laubbäume bei der Verjüngung von Beständen auf ihren heimischen Standorten gefördert und Nadelbäume verdrängt. Der Anteil an Flächen ohne Holznutzung wird im Szenario Waldvision auf 16,6 % erhöht und damit gegenüber dem Basisszenario (4,1 %) vervierfacht. Die Auswahl der Flächen ohne Holznutzung orientiert sich an bestimmten schützenswerten natürlichen Waldgesellschaften (z.B. Schlucht- und Auenwälder), der Naturnähe der Bestockung (d.h. Vergleich zwischen natürlicher und tatsächlicher Baumartenzusammensetzung der Waldfläche) sowie dem Alter.

Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 0-1 fasst die wichtigsten Ergebnisse der Hauptindikatoren zusammen.

Tabelle 0-1: Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse

Indikator	Einheit und Bezug	Basis	Holz	Vergleich zu Basis	Waldvision	Vergleich zu Basis
Holzvorrat	Mrd. m ³ im Jahr 2102	5,0	3,8	76%	7,1	142%
	m ³ /ha im Jahr 2102	484	368	76%	686	142%
Holzzuwachs	m ³ /Jahr/ha 2012-2102	9,3	8,6	93%	9,9	107%
CO ₂ -Speicherung Waldbiomasse	Mio. t CO ₂ /Jahr 2012-2102	17,2	1,4	8%	48,2	280%
CO ₂ -Speicherung Gesamt*	Mio. t CO ₂ /Jahr 2012-2102	31,9	17,2	54%	56,3	177%
Vorrat in Durchmesser- klassen über 60 cm	Mrd. m ³ im Jahr 2102	0,62	0,41	66%	1,67	269%
Totholzvorrat	m ³ /ha im Jahr 2102	22,5	16,2	73%	26,2	118%
Holzaufkommen	m ³ /Jahr/ha 2012-2102	6,8	7,8	115%	5,1	75%
	Mio. m ³ /Jahr im Jahr 2102	71,8	78,0	109%	61,8	86%

Quelle: eigene Darstellung

* umfasst lebende Waldbiomasse, Totholz, Streu, Boden und Holzproduktspeicher

Ein zentraler Indikator für die Bewertung der Auswirkungen durch alternative Waldbewirtschaftungsszenarien ist die **Entwicklung des Holzvorrats** im Wald. Der Holzvorrat in Deutschland erhöhte sich laut BWI-3 zwischen 2002 (3,4 Mrd. m³) und 2012 (3,7 Mrd. m³) um 9 %. Im Basisszenario wachsen die Gesamtholzvorräte im Wald bis 2052 auf etwa 4,1 Mrd. m³ und bis 2102 auf 5,0 Mrd. m³. Das entspricht einem Anstieg von 11 % im Jahr 2052, bzw. 35 % im Jahr 2102 im Vergleich zu 2012. Das Holzscenario bewirkt dagegen, dass die Holzvorräte für alle Baumarten zusammen bis 2032 zunächst um 11% sinken. Im Jahr 2052 erreicht das Szenario dann den Ausgangswert von 2012 um danach bis 2102 auf 3,8 Mrd. m³, d.h. um 3% im Vergleich zu 2012, zu steigen. Im Szenario der Waldvision errechnet das Modell stattdessen eine deutliche Erhöhung der Vorräte von 3,7 Mrd. m³ in 2012 auf 5,2 Mrd. m³ bis 2052 (ein Anstieg von 40 %). Bis 2102 erreicht der Holzvorrat schließlich 7,1 Mrd. m³, was einer Erhöhung um 92 % und damit nahezu einer Verdoppelung der Vorräte im Vergleich zu 2012 entspricht. Das Szenario Waldvision erreicht am Ende der Simulationszeit zudem einen Holzvorrat, der um 42 % höher liegt als im Basisszenario. Ein Vergleich zu WEHAM-Ergebnissen des Basisszenarios für die überlappende Periode 2012-2052 zeigt, dass beide Modelle ähnliche Entwicklungen erwarten lassen. Mehr Details finden sich in Abbildung 5-1.

Auf einen Hektar gerechnet erreicht das Szenario Waldvision 2052 einen mittleren Vorrat von 501 m³/ha im Jahr 2102 686 m³/ha. Auf der gleichen Waldfläche ergeben sich im Jahr 2102 für das Basisszenario 484 m³/ha und im Holzscenario 368 m³/ha. Neben großen Unterschieden in der Höhe der Vorräte gibt es in den Szenarien eine deutliche **Änderung der Baumartenzusammensetzung des Vorrats**. Während laut BWI-3 Laubhölzer 2012 nur 39 % des Vorrats ausmachten, wachsen diese im Szenario Waldvision bis 2052 auf 50 % und bis 2102 auf 58 % Laubholzanteil an. Allein die Buche macht davon 29 % aus und damit die Hälfte des mittleren Laubholzvorrats. Auch im Basis- und Holzscenario erhöhen sich die relativen Vorratsanteile an Laubholz. Im Holzscenario passiert dies vor allem durch eine Verringerung der Nadelholzvorräte, die stark genutzt werden. Hervorzuheben ist, dass im Jahr 2102 im Szenario Waldvision gegenüber dem Basisszenario die Vorräte für Buche um 69 %, für Eiche um 55 % und für andere Laubbäume um 81 % höher liegen. Mehr Informationen bietet Abbildung 5-2.

Die Auswirkungen verschiedener Bewirtschaftungsoptionen auf den **Holzzuwachs** sind weniger ausgeprägt. Allerdings lassen sich einige Trends identifizieren. Die produktivste Baumart in allen Szenarien ist die Douglasie, die im Holzscenario einen mittleren Zuwachs von 22,4 m³/Jahr/ha erreicht. Die geringste Produktivität weist in allen drei Szenarien die Kiefer auf. Sie liegt mit 5,8-6,3 m³/Jahr/ha deutlich hinter jeder anderen Baumart. Eine Änderung der Bewirtschaftung nach den Regeln des Szenarios Waldvision führt zu einer Erhöhung des Zuwachses von Laubbäumen, die im 90-Jahresmittel 2012-2102 im Vergleich zum Basisszenario um 20-24 % stärker zuwachsen. Im Holzscenario ändert sich für die Laubbaumarten der mittlere Zuwachs gegenüber dem Basisszenario kaum. Das Wachstum der Nadelbäume erhöht sich im Szenario Waldvision dagegen nur leicht im Vergleich zum Basisszenario (Tanne, Douglasie) oder verringert sich eher (Fichte, Kiefer). Im Mittel über alle Baumarten stellt das Szenario Waldvision das zuwachsstärkste der drei Szenarien dar. Über die simulierte Periode wachsen die Bäume im Schnitt jährlich 9,9 m³/ha zu. Das sind 7 % mehr als im Basisszenario (9,3 m³/Jahr/ha) und 15 % mehr als im Holzscenario (8,6 m³/Jahr/ha). Auswirkungen auf den Zuwachs sind in Abbildung 5-3 dargestellt.

Der Vorratsaufbau im Szenario Waldvision schlägt sich auch in der **CO₂-Speicherleistung** der Wälder nieder. Durch die Umsetzung des Szenarios Waldvision auf der gesamten Waldfläche in Deutschland wird im Zeitraum von 2012 bis 2102 eine durchschnittliche CO₂-Senke durch lebende Biomasse von 48 Mio. t CO₂ pro Jahr geschaffen. Werden neben lebender Biomasse auch Totholz, Boden und Holzprodukte betrachtet, beträgt die Speicherleistung im Mittel über den Zeitraum 56 Mio. t CO₂ pro Jahr. Insgesamt kann so die von Deutschland für das Jahr 2015

berichtete Senke von 54 Mio. t CO₂ im Szenario Waldvision in etwa gehalten werden. Holzprodukte stellen dabei in der Waldvision eine Quelle von 7,4 Mio. t CO₂/Jahr dar wenn angenommen wird, dass sich Holzverwendung und Importe über die Simulationszeit nicht ändern. Im HolzszENARIO speichert die lebende Waldbiomasse über 90 Jahre 1,4 Mio. t CO₂/Jahr. Zählt man die leichte Senke durch Holzprodukte von weiteren 1,4 Mio. t CO₂/Jahr und erwartete Speicherungen des Bodens hinzu, liegt die mittlere Senke im HolzszENARIO bei 17 Mio. t CO₂/Jahr. Allerdings ist der Wald in diesem Szenario bis zum Jahr 2032 eine Quelle für CO₂. Das Basisszenario erreicht insgesamt eine mittlere Speicherung von 32 Mio. t CO₂/Jahr, von der etwa die Hälfte auf die lebende Biomasse entfällt. Bei der Bewertung der Gesamtklimawirkung der Szenarien ist zu berücksichtigen, dass Substitutionseffekte nicht bilanziert wurden. Ändert sich die Verwendung des Holzes nicht und bleibt die Nachfrage nach Produkten gleich, können potenziell Emissionen durch die vermehrte Verwendung von Nicht-Holzprodukten entstehen. Bei steigenden Anteilen an erneuerbaren Energien im System ist allerdings gleichzeitig von insgesamt sinkenden Effekten, sowohl bei der Energie- als auch bei der Produktsubstitution auszugehen, so dass eine überschlägige Abschätzung der Nettoeffekte nicht einfach möglich ist. Für mehr Informationen zur Kohlenstoffbilanz siehe Abbildung 5-5 bis Abbildung 5-7.

Anhand der Verteilung des Vorrats über verschiedene Durchmesserklassen lassen sich Aussagen über **den Anteil alter bzw. starker Bäume** im Wald machen. Die Bewirtschaftungsart hat darauf einen wesentlichen Einfluss. Im Basisszenario konzentriert sich der Vorrat im Nadelholz mit 79 % vor allem auf die Durchmesser bis 50 cm. Im HolzszENARIO machen alle Nadelbäume bis 50 cm 74 % des Vorrats der Nadelbäume aus. Im Szenario Waldvision nimmt die Konzentration auf das Starkholz zu. Auf die Durchmesserklassen bis 50 cm entfallen 61 % des Vorrats. Bei Laubbäumen sind in Basis- und HolzszENARIO die Bäume der Durchmesserklassen bis 60 cm mit 81 % bzw. 89 % besonders stark am Vorrat beteiligt. Im Szenario Waldvision nehmen hingegen in 2102 nur 70 % der Laubbäume Durchmesserklassen bis 60 cm ein während 30 % auf höhere Durchmesserklassen entfallen. Der Vorrat in der Durchmesserklasse über 60 cm beträgt über alle Baumarten im Basisszenario 2102 400 Mio. m³, im HolzszENARIO mit 200 Mio. m³ gerade einmal die Hälfte, im Szenario Waldvision dagegen mit 1.200 Mio. m³ das Dreifache. Aus Naturschutzsicht ist insbesondere der Anteil der Laubbäume über 80 cm von Bedeutung, da in starkdimensionierten Bäumen meist mehr Habitatstrukturen für gefährdete Arten zu finden sind. Laubbäume über 80 cm Durchmesser machen im HolzszENARIO im Jahr 2102 gerade einmal 2,4 % (50 Mio. m³) des Vorrats aus, im Basisszenario 5,9 % (144 Mio. m³) und im Szenario Waldvision 6,1 % (262 Mio. m³). Der absolute Anstieg von Laubbäumen größer 80 cm im Szenario Waldvision entspricht einer Erhöhung um 80 % gegenüber dem Basisszenario. Abbildung 5-8 gibt Details dazu.

Aus Naturschutzsicht ist **Totholz** als Lebensraum und Nahrung für zahlreiche Totholzspezialisten heute in zu geringem Umfang in den Wäldern in Deutschland vorhanden. Das betrifft vor allem die Laubholzvorräte. Einfluss auf die Totholzvorräte nimmt vor allem die Mortalität in den Waldbeständen, die für den Zufluss an Totholz sorgt und im Modell von der Dichte der Bestände abhängt. Es zeigt sich, dass die intensivere Nutzung im HolzszENARIO mit im Mittel 16 m³/ha zu den niedrigsten Totholzmengen aller drei Szenarien führt, da die Dichte (eine wichtige Einflussgröße für die Mortalität) durch stärkere Entnahme von Bäumen verringert wird. Im Basisszenario werden 22 m³/ha erreicht. Die deutlich extensivere Nutzung im Szenario Waldvision führt im Gegenzug aber nicht direkt zu einer sofortigen Erhöhung von Totholz, da die Mortalität in den Beständen nicht sofort mit der Änderung der Bewirtschaftung zunimmt. Allerdings gibt es eine frühe Verschiebung der Qualität des Totholzes zu mehr Laubholz- und vor allem Eichenanteilen. Diese liegen 2102 im Mittel fast doppelt so hoch wie im HolzszENARIO. Die Gesamtotholzvorräte liegen 2102 im Szenario Waldvision bei 26 m³/ha. Abbildung 5-9 gibt Details zum Indikator Totholzvorrat.

Die Zuwachsbilanz aus Zuwachs, Mortalität und Holzernte zeigt, dass die beschriebenen Vorratsänderungen sich vor allem aus der Änderung der Höhe der Holzernte und zu einem kleineren Anteil aus Änderungen des Zuwachses und der Mortalität ergeben (Abbildung 5-4). Durch eine verringerte Nutzungsintensität ist das potenzielle **Holzaufkommen** im Szenario Waldvision im Mittel geringer als in den anderen Szenarien. Über den Zeitraum von 90 Jahren (2012-2102) verringert sich das mittlere Holzaufkommen im Szenario Waldvision mit $5,1 \text{ m}^3/\text{Jahr/ha}$ gegenüber dem Basisszenario ($6,8 \text{ m}^3/\text{Jahr/ha}$) um 25 %. Im Holzscenario kann dagegen mit $7,8 \text{ m}^3/\text{Jahr/ha}$ potenziell 14 % mehr Holz als im Basisszenario geerntet werden. Allerdings nimmt die jährliche Erntemenge im Szenario Waldvision im Vergleich zum Basisszenario stetig über den Simulationszeitraum zu. Im Jahr 2102 liegt der unter den Szenarioannahmen nachhaltig mögliche Einschlag im Szenario Waldvision bei 86 % des Einschlags im Basisszenario. Die möglichen Erntemengen von Fichtenholz gleichen dabei denen im Basisszenario. Zudem werden im Szenario Waldvision mehr stärkere Bäume geerntet. Für mehr Informationen siehe Abbildung 5-12.

Schlussfolgerungen

Die Studie zeigt, dass sich Maßnahmen für mehr Naturschutz im Szenario Waldvision und deren Auswirkungen auf den Wald mit Hilfe des Modells FABio und basierend auf den öffentlich zugänglichen Daten der Bundeswaldinventuren realistisch darstellen lassen. Die dargestellten Maßnahmen umfassen:

- a) eine Förderung von Laubholz,
- b) die Verringerung der Nutzungsintensität und Erhöhung der Zieldurchmesser und
- c) die Unterschutzstellung naturschutzrelevanter Flächen wie besonderer Waldtypen oder alter Wälder.

Die Modellergebnisse zeigen, dass sich durch diese Maßnahmen über die simulierten 90 Jahre die Vorräte in Wäldern in Deutschland gegenüber dem Basisszenario um 42 % steigern lassen. Der Wald stellt über den gesamten Zeitraum hinweg eine starke Senke für CO₂ dar. Gleichzeitig erhöhen sich die Naturschutzleistungen und auch der Zuwachs, besonders von Laubbäumen. Damit wird deutlich, dass sich ambitionierte Klima- und Naturschutzziele im Wald nicht ausschließen müssen.

Im Szenario der Waldvision werden 12,5 % des Waldes zusätzlich zu den heute ungenutzten Flächen aus der Nutzung genommen. Auf insgesamt mehr als 83 % der Fläche wird der Wald damit bewirtschaftet. Das Holzaufkommen verringert sich durch die genannten Maßnahmen insgesamt im Mittel um 25 %, wobei für das Holzaufkommen der Fichte ähnliche Werte wie im Basisszenario zu erwarten sind. Die Abnahme des Holzaufkommens im Vergleich zum Basisszenario stellt sich vor allem bei den Laubbaumarten ein, wobei sich die Szenarien über die Zeit wieder annähern.

Für eine erfolgreiche Vereinigung von Klima- und Naturschutzzielen im Wald, wird vor allem aber die Verwendung des geernteten Holzes andere Bahnen gehen müssen als heute. Beim Klimaschutz auf Substitutionseffekte durch Holznutzung allein zu bauen, wie es Intensivierungsszenarien vielfach anstreben, wird durch sinkende Substitutionseffekte nicht zielführend sein, zumal eine Intensivierung meist Naturschutzzielen entgegensteht. Vielmehr ist eine deutliche Erhöhung der Effizienz der Holznutzung durch mehr stoffliche und weniger energetische Nutzung, vor allem beim Laubholz, und eine Erhöhung der Kaskadennutzung von

Holz generell, nicht nur aus Sicht des Klima- und Naturschutzes, sondern auch zum Erreichen einer nachhaltigen Ressourcennutzung insgesamt, geboten.

1. Einleitung

Wäldern in Deutschland kommt eine wichtige ökologische, wirtschaftliche und soziale Bedeutung zu. Dazu zählt ihre **Schutzfunktion** (d.h. die dauernde Leistungsfähigkeit des Naturhaushaltes, die Reinhaltung der Luft, Erhalt der natürlichen Biodiversität, Kohlenstoffspeicherung und Klimaschutz, Bodenschutz sowie 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 und wo nötig ausgebaut und nachhaltig gesichert werden. Je nachdem wie der Wald beschaffen ist, kann der Wald seine Funktionen besser oder schlechter erfüllen. Eine nachhaltige Nutzung zeichnet sich dadurch aus, dass alle Waldfunktionen auf lange Sicht erhalten bleiben.

Die Bundeswaldinventur (BWI) erfasst alle zehn Jahre die Waldbestände in Deutschland. Mit den Bundeswaldinventuren BWI-2 aus dem Jahr 2002 und BWI-3 aus dem Jahr 2012 liegt zum ersten Mal für ganz Deutschland eine konsistente Wiederholungserhebung vor. Anhand dieser Daten kann der Zustand der Wälder im Jahr 2002 und 2012, sowie die Veränderung zwischen beiden Erhebungen, beschrieben und bewertet werden. Beispielsweise wurden für eine naturschutzfachliche Bewertung der Wälder in Deutschland und ihrer Entwicklung in Reise et al. (2017) Parameter wie die Baumartenverteilung, Durchmesserverteilung, Holzvorräte, Totholzvorräte und Stammschäden inklusive Baumhöhlen herangezogen. Wie steht es demnach um den Wald in Deutschland aus naturschutzfachlicher Sicht?

Ein wichtiger Naturschutzaspekt sind Flächen ohne forstwirtschaftliche Nutzung. Bei der Umsetzung des Ziels der nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt, 5 % des Waldes einer **natürlichen Entwicklung** zu überlassen, sollten vorrangig diejenigen Wälder geschützt werden, die eine zentrale Bedeutung für die hier heimische Biodiversität haben (z.B. besonders naturnahe Wälder, alte Waldstandorte, Biodiversitätshotspots). Insgesamt werden aktuell etwas mehr als 4 % der Wälder in Deutschland nicht genutzt. Mehr als die Hälfte der Flächen wird aus wirtschaftlichen oder der schlechten Erreichbarkeit wegen nicht genutzt. Darunter sind auch naturschutzfachlich wertvolle Standorte, allerdings stellen die Flächen keinen repräsentativen Querschnitt der heimischen Waldgesellschaften dar. Zurzeit sind lediglich ca. 2 % des Waldes dauerhaft geschützt (Engel et al., 2016).

Die Waldfläche in Deutschland entspricht zu hohen Anteilen nicht der potentiellen natürlichen Vegetation (PNV). Waldflächen mit einer sehr **naturnahen** bis naturnahen Baumartenzusammensetzung, d.h. vereinfachend, Flächen auf denen PNV und tatsächlich wachsende Baumarten zu einem gewissen Grad übereinstimmen, nehmen 3,9 Mio. ha (32 %) der gesamten Waldfläche von 11,4 Mio. ha ein. Dieser Anteil an Waldflächen änderte sich von 2002 bis 2012 im Grunde kaum (BMEL, 2016a). Fichten- und Kiefernbestände machten in Deutschland im Jahr 2012 26 %, bzw. 23 % der Fläche aus (Tabelle 1-1). Häufig stehen diese auf Standorten, deren natürliche Vegetation Buchen, bzw. Eichenwälder wären. Diese beiden Baumarten bedeckten 2012 16 %, bzw. 11 % der Fläche (Tabelle 1-1). Zwischen 2002 und 2012 stieg der Anteil der Laubbäume um 315.000 ha (2,8 %-Punkte) an. Allerdings gibt es auch Empfehlungen, diesen Trend zu verlangsamen bzw. sogar umzukehren (BMEL, 2016b).

Tabelle 1-1: Zusammensetzung der Waldfläche in Deutschland

Baumarten- gruppe	BWI-2 (2002)		BWI-3 (2012)		Differenz
	Fläche (ha)	Anteil	Fläche (ha)	Anteil	Flächen- änderung (ha)
Eiche	1.059.485	10,0%	1.129.706	10,6%	70.221
Buche	1.577.748	14,9%	1.680.072	15,8%	102.324
Andere Laubbäume	1.774.659	16,8%	1.917.482	18,0%	142.823
Laubbäume	4.411.892	41,7%	4.727.260	44,5%	315.368
Fichte	3.005.706	28,4%	2.763.219	26,0%	-242.487
Tanne	164.217	1,6%	182.757	1,7%	1.854
Douglasie	182.399	1,7%	217.604	2,0%	35.205
Kiefer	2.514.397	23,8%	2.429.623	22,9%	-84.774
Lärche	300.754	2,8%	30.705	0,3%	6.296
Nadelbäume	6.167.473	58,3%	5.900.253	55,5%	-26.722
Gesamt	10.579.365		10.627.513		

Quelle: www.bwi.info

Der **Holzvorrat** in Deutschland lag 2012 bei 3,7 Mrd. m³ (im Mittel sind dies 356 m³ pro ha). Hiervon entfielen mit 2,20 Mrd. m³ ca. zwei Drittel auf Nadelbäume (vor allem Fichte und Kiefer, BMEL, 2012). Der Holzvorrat von Laubbäumen (vor allem Buche und Eiche) war mit 1,34 Mrd. m³ (ca. ein Drittel) deutlich geringer. Zwischen 2002 und 2012 nahm der Holzvorrat der Laubbäume um 160 Mio. m³ (14,1 %) und der der Nadelbäume um 52 Mio. m³ (2,4 %) zu. Die Fichte ist die einzige Baumart, bei der der Vorrat in diesem Zeitraum abgenommen hat und zwar um etwa 4 % (ca. 49 Mio. m³). Die verstärkte Nutzung der Fichte entspricht zum einen der waldbaulichen und forstpolitischen Zielsetzung der letzten Jahre, aber auch Stürme und Insektenkalamitäten trugen zu einer verstärkten Nutzung, gerade von Nadelbäumen, bei.

Der **Zuwachs** der Wälder in Deutschland betrug in der Periode von 2002 bis 2012 im Mittel 114 Mio. m³ pro Jahr. Entsprechend der Baumartenverteilung entfiel ca. ein Drittel des Zuwachses auf Laubbäume (39 Mio. m³/Jahr) und ca. zwei Drittel auf Nadelbäume (75 Mio. m³/Jahr; BMEL, 2012). Im Zeitraum von 2002 bis 2012 betrug die **Holznutzung** in Deutschland laut BWI 76 Mio. Efm (Erntefestmeter ohne Rinde) Holz pro Jahr, wobei der sogenannte Abgang (inklusive Ernteverlusten und Rinde) bei 96 Mio. m³/Jahr lag. Diese Menge entspricht einer mittleren Intensität der **Nutzung** von 84 % des Zuwachses. Laut den Angaben des Statistischen Bundesamtes² wurden im Jahr 2016 etwa 18 % des Holzeinschlags als Energieholz eingesetzt. Eingeschlagenes Buchenholz wurde zu 40 % direkt energetisch genutzt. Allerdings werden durch

² <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/WaldundHolz/Aktuell.html>

diese amtliche Einschlagsstatistik nur etwa 75% des tatsächlichen Einschlages erfasst, den die BWI ausweist (Jochem et al., 2013). Es ist davon auszugehen, dass ein Großteil des nicht erfassten Holzeinschlages vor allem der Brennholznutzung zuzurechnen sind. Damit könnte der Anteil der direkten energetischen Nutzung insgesamt bis zu 35 % ausmachen.

Alte Wälder stellen wichtige **Kohlenstoffspeicher** dar, wobei sie häufig auch weiterhin noch Kohlenstoff aufnehmen und damit eine CO₂-Senke darstellen (Knohl et al., 2003). Insgesamt mehren sich Beobachtungen, die der verbreiteten Annahme widersprechen, dass alte Wälder keinen Kohlenstoff mehr aufnehmen (Köhl et al., 2017; Luysaert et al., 2008; Stephenson et al., 2014). Weniger das Alter der Bäume, als die Waldstruktur bestimmen den Netto-Austausch zwischen Atmosphäre und Pflanzen, u.a. durch die vorhandene Blattfläche (Schulze et al., 2009). Im Jahr 2015 stellte die lebende Biomasse im Wald in Deutschland mit etwa -40 Mio. t CO₂ eine deutliche Senke dar (UBA, 2017a) Die Modellierung des Thünen Instituts im Rahmen des Projektionsberichts 2017 (UBA, 2017b) mit Hilfe des WEHAM-Modells zeigt allerdings, dass bei der Fortsetzung der Bewirtschaftung der letzten Jahre, dargestellt durch das WEHAM Basisszenario, diese Senke abnehmen wird (2020 auf -11 Mio. t CO₂; 2035 -21 Mio. t CO₂).

Die Effekte der Bewirtschaftung von Wäldern auf den **Bodenkohlenstoff** werden kontrovers diskutiert. Intensive Erntemaßnahmen, die auch Kronenholz und andere Erntereste entfernen, wirken sich deutlich negativ auf die Kohlenstoffvorräte im Boden aus (Achat et al., 2015a). Effekte moderater Eingriffe sind auch wegen fehlender langer Zeitreihen nicht eindeutig feststellbar (Achat et al., 2015b; Jandl et al., 2007). Allerdings sind Bodenkohlenstoffvorräte in alten Wäldern typischerweise höher als die in Wirtschaftswäldern (Gleixner et al., 2009; Pan et al., 2011). In Deutschland stellten mineralische Waldböden 2015 eine Senke von 14,6 Mio. t CO₂/Jahr dar, sie nahmen also Kohlenstoff auf. Eine Quelle dagegen waren die 244,000 ha Moorwälder in Deutschland, die größtenteils entwässert wurden, weshalb sich der organische Boden nach und nach abbaut und CO₂ emittiert. Als eine effektive Klimaschutzmaßnahme könnten diese Flächen wiedervernässt werden (Osterburg et al., 2013), was vielfach auch dem Naturschutz dienen würde.

Neben der Speicherung von Kohlenstoff bietet der Wald Lebensraum für Tier- und Pflanzenarten. Besonders **Totholzvorräte** von verschiedenen Baumarten, Stärkeklassen und Zersetzungsstufen spielen für den Wert des Waldes als Habitat eine wichtige Rolle (Lassauce et al., 2011) und stellen damit einen wichtigen Indikator für die Bewertung des Waldes als Lebensraum für die biologische Vielfalt dar. In Deutschland lagen die Totholzvorräte im Jahr 2012 mit durchschnittlich 20,6 m³/ha relativ niedrig. Der Totholzanteil wurde mit zwei Dritteln stark von Nadelbäumen dominiert. Für eine höhere Habitatqualität der Wälder fehlt es vor allem an stark dimensioniertem, stehendem Totholz heimischer Laubbölder (Reise et al., 2017).

Im Hinblick auf die **Altersstruktur** werden die Waldflächen in Deutschland von Baumaltersklassen unter 100 Jahren dominiert. Sie nahmen im Jahr 2012 mit 8,0 Mio. ha 74 % der Gesamtwaldfläche ein. Der Anteil alter Wälder über 160 Jahre betrug lediglich 350.000 ha (3,2 %). Der Anteil dieser alten Wälder stieg von 2002 bis 2012 um 109.000 ha (1 %) an. Alte Wälder sind nicht zuletzt für den **Erhalt der Biodiversität** bedeutend. Ihr geringer Anteil an der Waldfläche in Deutschland spiegelt sich darin wieder, dass zahlreiche Arten von Brutvögeln, Fledermäusen, Käfern, Moosen, Flechten und Pilzen, die auf diese Lebensräume angewiesen sind, in Deutschland gefährdet oder bereits ausgestorben sind (Reise et al., 2017). Stark dimensionierte Laubbäume sind in Deutschland ebenfalls unterrepräsentiert. So nehmen Laubbäume mit einem Durchmesser von mehr als 60 cm mit 235 Mio. m³ nur knapp 7 % des Holzvorrats in Deutschland ein (BMEL, 2012). Es ist jedoch positiv zu bewerten, dass in den letzten zehn Jahren der Anteil dieser stark dimensionierten Bäume um 66 Mio. m³ zugenommen hat.

Auf nationaler Ebene wurde die Waldentwicklung in verschiedenen Szenarien durch **WEHAM** (Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodell) projiziert (BMEL, 2016c). Unter Beteiligung von Interessensvertretern wurden 2017 neue Szenarien mit unterschiedlicher Ausrichtung entwickelt und berechnet (Holzpräferenzszenario und Naturschutzpräferenzszenario³). Diese Szenarien zeigen, dass es nicht unbedingt einen Konflikt zwischen Holznutzung, Klimaschutz und Naturschutz im Wald geben muss. So führen die im Modell dargestellten Maßnahmen für Naturschutz kaum zu einer Verringerung des möglichen Einschlags aber deutlich höherer CO₂-Speicherung im Wald. Auswirkungen auf Substitutionseffekte wurden dabei nicht quantifiziert. Dabei wurden allerdings nur geringe Flächenanteile aus der Nutzung genommen und die Verringerung der Bewirtschaftungsintensität nur auf bestimmten Flächen verringert.

Ziel dieser Studie ist die Entwicklung, Beschreibung und Bewertung des Szenarios einer alternativen ökologischen Waldbewirtschaftung, genannt „Waldvision“ auf der gesamten Waldfläche Deutschlands. Diese soll eine Diskussionsgrundlage für die Entwicklung einer zukunftsfähigen und ökologischen Forstwirtschaft in Deutschland darstellen. Dazu wurde, ausgehend von den Ergebnissen der letzten Bundeswaldinventur (BWI-3), die Waldentwicklung von 2012 bis zum Jahr 2102 modelliert. Zunächst wurden alternative Bewirtschaftungsoptionen in einem Waldwachstumsmodell beschrieben und dann in Szenarien basierend auf unterschiedlichen Maßnahmen umgesetzt. Die Unterschiede zwischen den Szenarien wurden im Hinblick auf ausgewählte Indikatoren wie Zuwachs- und Vorratsentwicklung, Baumartenverteilung, Totholzvorrat, Altersstruktur bzw. Durchmesserverteilung, CO₂-Speicherungsrate und Holzaufkommen bewertet.

Die Studie geht von folgenden **Hypothesen** aus, die das Szenario Waldvision charakterisieren:

- 1) Der durchschnittliche Vorrat in den Wäldern wird deutlich erhöht.
- 2) Die Zuwächse in den Wäldern werden gehalten oder sogar erhöht.
- 3) Die Kohlenstoffsенке des Waldes kann gehalten oder sogar vergrößert werden.
- 4) Der Anteil an Bäumen mit starken Durchmessern wird erhöht.
- 5) Im Wald erhöht sich die Menge an Totholz.
- 6) Durch Förderung von Laubholz werden die Naturnähe der Wälder und der Laubholzanteil erhöht.
- 7) Das Holzaufkommen verringert sich und wird verlagert zu relativ mehr Starkholz.

Die oben genannten Ziele sollen im Szenario Waldvision durch die folgenden drei zentralen Maßnahmen erreicht werden:

- a) eine Förderung von Laubholz;
- b) die Verringerung der Nutzungsintensität und die Erhöhung der Zieldurchmesser;
- c) die Unterschützstellung naturschutzrelevanter Flächen wie seltene Waldtypen oder alte Wälder.

³ <http://www.weham-szenarien.de/>

Dieser Bericht beschreibt die Datengrundlage, die Methoden der Modellierung und der Szenarientwicklung, stellt die zentralen Ergebnisse zu einzelnen Indikatoren vor und diskutiert diese im Hinblick auf die Konsequenzen der Umsetzung der Waldvision.

2. Methoden

2.1. Modellbeschreibung

Seit 2015 wird am Öko-Institut das *Forestry and Agriculture Biomass Model* (FABio) entwickelt. FABio ist eine Gruppe von Simulationsmodellen, die mit Hilfe der Methode der Systemdynamik und agentenbasierten Modellierung Biomasseproduktion und Nutzung in der Land- und Forstwirtschaft und ihre Auswirkungen auf Umweltindikatoren beschreiben.

Das Waldmodell in FABio (siehe Abbildung 2-1) basiert auf Daten der **Bundeswaldinventuren** (BWI) von 2002 und 2012 (BWI-2, bzw. BWI-3). Es beschreibt das Wachstum einzelner durch die Inventuren erfasster 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. Das Modell basiert auf folgenden Teilmodellen:

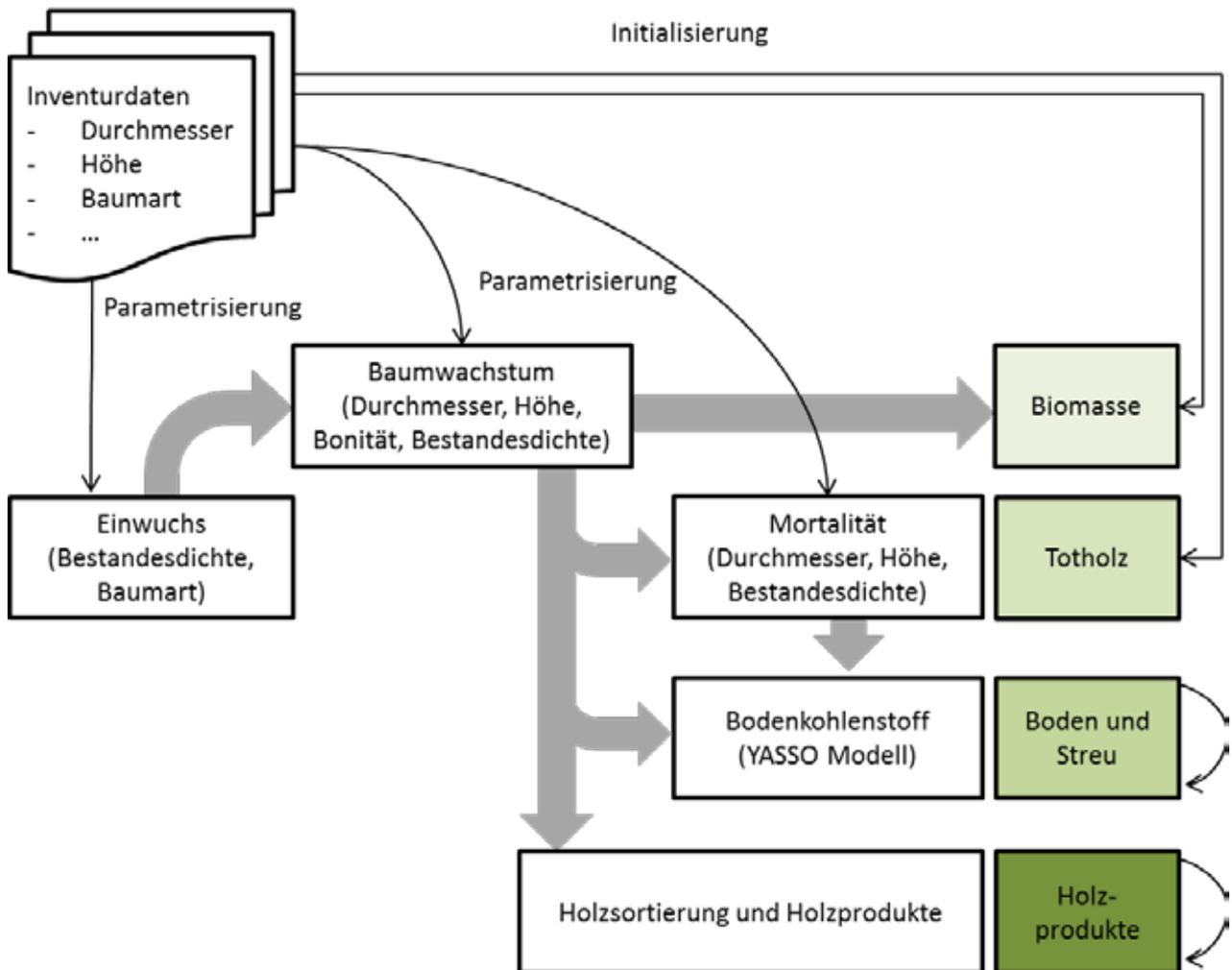
- ein Modell zur Beschreibung des **Baumwachstums** anhand von Durchmesser, Höhe, Bonität (d.h. relative Produktivität) und Bestandesdichte,
- ein **Einwuchsmodell** für das Entstehen neuer Bäume basierend auf Bestandesdichte und Baumart,
- ein **Mortalitätsmodell** zur Darstellung von Absterbeprozessen in Abhängigkeit von Baumart, Bonität, Alter und Bestandesdichte,
- 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 berechnet.

Das Modell ist in der Software AnyLogic⁴ implementiert. AnyLogic beinhaltet eine graphische Modellierungssprache und ermöglicht es dem Benutzer Simulationsmodelle mit Java-Code zu erweitern. Eine ausführliche Modellbeschreibung findet sich hier⁵.

⁴ <http://www.anylogic.de/>

⁵ <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/FABio-Wald-Modellbeschreibung.pdf>

Abbildung 2-1: Flussdiagramm des Modells und der Datenverwendung



Quelle: eigene Darstellung

2.2. Datengrundlage für die Modellierung

Als zentrale Datengrundlage für die Beschreibung des Waldzustands zu Beginn der Simulation (Initialisierung) und der Einstellung der Modellparameter (Parametrisierung) dient die Datenbank der Bundeswaldinventur (BWI) des Thünen-Instituts, die die Ergebnisse der Auswertung der BWI-2 (2002) und BWI-3 (2012) zusammenstellt⁶. Die dritte Bundeswaldinventur stellt nach der zweiten Bundeswaldinventur die erste flächendeckende Erhebungswiederholung in Deutschland dar, die Aussagen über eine zeitliche Entwicklung des gesamten Waldes ermöglicht.

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

⁶ Verfügbar über die BWI-Ergebnisdatenbank unter <https://bwi.info/>

Datensatz auf diese Weise mehr als 47.000 Traktecken, auf denen Bäume stehen und auch erfasst wurden.

An den vier Traktecken eines jeden Netzknotens wird die Anzahl der Bäume je Probepunkt erfasst und diese anhand von Baummerkmalen wie Baumart, Brusthöhendurchmesser und Baumhöhe charakterisiert. Zudem werden umfangreiche Daten zu Totholz (Totholztypen, Zersetzungsgrad, Durchmesserklassen), besonders geschützten Biotopen und Bäumen mit ökologisch bedeutsamen Strukturen (Biotopbäume wie Höhlenbäume), sowie Schutzgebieten und Nutzungseinschränkungen aufgenommen. Die in der BWI vorkommenden Baumarten werden im Modell zu 24 Baumartengruppen zusammengefasst, auf deren Basis die Berechnungen im Modell erfolgen. Für die Darstellung der Ergebnisse werden wiederum acht Übergruppen gebildet: Fichte, Kiefer, Tanne, Douglasie, Lärche, Buche, Eiche und sonstige Laubbäume.

In die Parametrisierung des Modells gingen alle verfügbaren Datenpunkte der Inventuren ein. Die Simulationsläufe des Modells fanden wegen beschränkter Rechenkapazität mit dem reduzierten Datensatz der 6,500 Plots des 4km-Basisrasters statt, von denen jeweils nur eine Traktecke ausgewählt wurde. In Testläufen wurde festgestellt, dass diese Auswahl ausreichend robust und repräsentativ für Aussagen zum Gesamtwald ist.

Die Fläche des Waldes kann nicht einfach aus den Probepunkten abgeleitet werden, da diese keine feste Flächengröße haben, sondern mittels Winkelzählprobe aufgenommen wurden. Je nach Durchmesser der Bäume variiert dadurch die Fläche. Die Flächenanteile der Baumarten wurden stattdessen aus der angenommenen Standfläche der aufgenommenen Bäume über der Derbholzgrenze zu Beginn geschätzt. Die Waldfläche mit der das Modell rechnet, beläuft sich so auf insgesamt 10,4 Mio. ha. Das ist eine Million Hektar weniger als die tatsächliche Waldfläche Deutschlands von 11,4 Mio. ha. Die Abweichung kommt dadurch zustande, dass Lücken oder Freiflächen im Wald nicht berücksichtigt werden und dass nur Bäume über der Derbholzgrenze zu dieser Fläche beitragen. Es ergeben sich dadurch leichte Abweichungen zwischen den vom Modell ermittelten Werten pro Hektar und anderen Quellen, wenn diese einen anderen Flächenbezug annehmen.

2.3. Darstellung von Indikatoren im Modell

Eine Herausforderung der Modellierung ist es, klare Indikatoren zu entwickeln, die die Entwicklung des Waldes beschreiben, und anhand derer sich die Modellergebnisse unterschiedlicher Szenarien vergleichen und die Hypothesen des Projekts testen lassen. Die zuvor aufgestellten Hypothesen erfordern, dass das Modell Aussagen zu den folgenden Indikatoren treffen kann:

2.3.1. Holzvorrat und -zuwachs

Zur Feststellung ob und wie sich der durchschnittliche Vorrat in den Wäldern ändert, muss der Derbholzvorrat, d.h. das oberirdische Holzvolumen mit einem Mindestdurchmesser von 7 cm, ein zentraler Indikator im Modell sein. Der Gesamtholzvorrat und seine Verteilung über Durchmesser und Baumartengruppen sowie der Holzzuwachs sind zentrale Ausgabevariablen des Modells. Eine zentrale Anforderung für moderne Waldwachstumsmodelle ist, dass das Modell die Entwicklung von Vorrat und Zuwachs in differenzierten Wäldern nicht in Form eines Altersklassenmodells darstellt. Dafür stellen sich Einzelbaumwachstumsmodelle (z.B. FABio oder WEHAM) als geeignet dar. In diesen können Bäume verschiedener Höhen und Durchmesser individuell fortgeschrieben und behandelt werden, was einer realistischen Beschreibung der Waldbewirtschaftung in Deutschland näher kommt als Altersklassenmodelle.

Die zweite Hypothese erwartet, dass der Zuwachs an Holz in den Wäldern durch die Waldvision gehalten oder sogar erhöht werden kann. Der Zuwachs beschreibt die Bruttoproduktion an Holz pro Jahr und ergibt sich direkt aus dem Wachstumsmodell. Waldwachstum wird in FABio mit einem baumartenspezifischen Durchmesser-Höhen-Modell beschrieben. Es ist ein logarithmisches Modell zur Beschreibung des Grundflächen- und Höhenzuwachses als eine Funktion von Baumstärke (Durchmesser und Höhe), Konkurrenz (Grundfläche der stärkeren Bäume in der Nachbarschaft) und des Standorts (Bonität). Die Bonität wird dabei für jede verwendete Traktecke ermittelt. Dazu wird das mittlere Vorratswachstum in Abhängigkeit vom bestehenden Vorrat bestimmt und über alle Stichprobenpunkte auf einen Wert zwischen 0 und 100 normalisiert. Das Wachstumsmodell unterscheidet 24 Baumartengruppen. Für die Parametrisierung wurden Baumarten mit geringer Individuenzahl bei Bedarf weiter zusammengefasst, um robustere Ergebnisse der Parametrisierung zu erzielen.

2.3.2. CO₂-Speicherleistung

Neben dem Derbholzvorrat errechnet das Modell auch die Biomasse in Stämmen, Ästen, Blättern und Wurzeln sowie den Kohlenstoffvorrat in diesen Kompartimenten. Dieser ist für die Bewertung der CO₂-Speicherleistung relevant. Dass sich die Kohlenstoffsinke im Wald durch einen ökologischen Waldumbau vergrößert, ist eine zentrale Hypothese des Projekts. Für eine umfassende Bilanzierung der CO₂-Speicherleistung des Waldes in der lebenden Biomasse muss das Holzvolumen zunächst in Holzbiomasse umgerechnet werden. Mit Hilfe von Biomassefunktionen werden die Anteile von Ästen, Nadeln, Blättern und Wurzeln an der Gesamtbiomasse geschätzt, in Abhängigkeit von Durchmesser und Baumhöhe. Die angenommene Kohlenstoffkonzentration im Holz beträgt 0.5 kg Kohlenstoff pro kg Trockengewicht Holz.

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 Modell YASSO 05 (Liski et al., 2005) schätzt die Veränderung der Kohlenstoffvorräte im Boden und der Streu anhand der chemischen Zusammensetzung der abgestorbenen Pflanzenteile (Anteil von Zellulose, Hemizellulose und Lignin) und mittlerer Klimaparameter. Die Initialisierung des Bodenkohlenstoffmodells erfolgt über einen sogenannten „spin-up“-Lauf des Modells von 300 Jahren, in denen sich die verschiedenen Kohlenstoffpools füllen und sich dann nahe eines Gleichgewichts zwischen Zufluss und Abbau befinden. Dies bedeutet, dass der Bodenkohlenstoffvorrat bei Fortschreibung der gleichen Waldbewirtschaftung und bei einer ausgeglichenen Altersstruktur konstant bleiben würde.

Geerntetes Holz verlässt zwar den Waldkohlenstoffspeicher, geht aber in den Holzproduktespeicher über. Solche Verschiebungen müssen bei der Berechnung des Indikators CO₂-Bilanz berücksichtigt werden. Neben dem Kohlenstoff in lebender und toter Biomasse und im Boden wird deshalb auch der Kohlenstoffvorrat in Holzprodukten in drei Kompartimenten mit unterschiedlichen Verweildauern betrachtet: Papier, Holzwerkstoffplatten und Sägeholz. Die Initialisierung des Holzproduktmodells erfolgt wie auch beim Bodenkohlenstoffmodell über einen „spin-up“-Lauf des Modells von 300 Jahren.

Durch die Verwendung von Holz anstelle von anderen, energieintensiveren Materialien oder auch die Verdrängung von fossilen Energieträgern ergeben sich potenzielle Substitutionseffekte. Diese treten auf, wenn Holzprodukte, wie z.B. Holzfensterrahmen, funktionsgleiche Produkte aus Nichtholzmaterialien ersetzen (z.B. Aluminiumfensterrahmen), die höhere Emissionen bei der Produktion verursachen, als die entsprechenden Holzprodukte. Allerdings hängen diese Effekte von zahlreichen Annahmen ab, die spezifiziert werden müssen, darunter die

Produktionsbedingungen der jeweiligen Produkte, der verwendete Energiemix und zukünftige Nachfragen. Zudem ist bei steigenden Anteilen an Erneuerbaren im Energiesystems mit deutlich sinkenden Effekten, sowohl bei der Energie- als auch bei der Produktsubstitution auszugehen. Aufgrund dieser Einschränkungen und fehlender Daten für eine fundierte Beschreibung der Effekte wurden diese explizit von der Modellierung ausgeklammert und werden im Modell nicht berechnet.

2.3.3. Bestandesstrukturen und starke Bäume

Hypothese vier erfordert, dass sich im Modell Bäume mit unterschiedlichen Durchmessern differenzieren lassen. Das ist durch das Einzelbaummodell gewährleistet, da mit diesem keine gleichförmigen Bestände simuliert werden, sondern sich aus den Einzelbäumen komplexe Bestandesstrukturen ergeben können. Durch die Verwendung eines Einzelbaummodells können Aussagen über die Änderung von Durchmesser-, Stammzahlverteilung, und dem Alter der Bäume gemacht werden.

2.3.4. Totholzvorrat

Totholzvorrat und -qualität sind zentrale Merkmale für die Bewertung von Biodiversität im Wald. Basierend auf einem Mortalitätsmodell können Annahmen über die anfallenden Mengen an Totholz getroffen werden. Unter natürlichen Verhältnissen sterben z.B. durch den Dichtestress einzelne Bäume im Bestand mit der Zeit ab. Zur Modellierung der Einzelbaummortalität 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 der gestorbenen Einzelbäume, aber auch der Baumartenzusammensetzung, Dichte und Bonität des Gesamtbestandes wird eine Absterbewahrscheinlichkeit berechnet. Abgestorbene Bäume werden in drei Baumartengruppen von Totholz überführt, die unterschiedliche Abbauraten des Holzes aufweisen: Eiche mit der langsamsten Abbaurate, Nadelholz mit einer mittleren Abbaurate und anderes Laubholz (inklusive Buche), das die schnellste Abbaurate hat.

2.3.5. Holzaufkommen und Holzprodukte

Eine weitere wichtige Hypothese ist, dass die Umsetzung der Waldvision dazu führen wird, dass das sich die möglichen Holzerntemengen verringern. Das Modell errechnet deshalb das potenzielle Holzaufkommen, also die, entsprechend der Szenarioeinstellungen, aus dem Wald maximal erzielbare Erntemenge. Daraus lässt sich auch die Menge an Holz, die für verschiedene Holzprodukte genutzt werden kann, ableiten.

Das Holzverwendungsmodell teilt das geerntete Holz in Größenklassen ein. Da detaillierte Merkmal zur Qualität des Holzes wie Astigkeit, Schaffform, Fäuleanteil, etc. fehlen, orientiert sich das Modell hauptsächlich an der Baumart und den Durchmessern 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, Sägeverluste und Stubben) reduziert (Erntefestmeter). Geerntetes und sortiertes Holz wird dann 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).

2.4. Darstellung der Waldbewirtschaftung im Modell

Verschiedene **Bewirtschaftungsoptionen**, beschrieben durch konkrete Maßnahmen, können im Modell dargestellt werden. Sie führen in ihrer Umsetzung zu einer Veränderung der Waldbestände im Hinblick auf Durchmesserverteilung, Baumartenzusammensetzung, Altersstruktur und damit auch Zuwachs und Vorrat. Die Maßnahmen werden an die 24 modellierten Baumartengruppen angepasst und orientieren sich an bestimmten Phasen der Bestandesentwicklung. Drei wesentliche Optionen werden unterschieden:

- Waldumbau;
- Änderung der Nutzungsintensität und
- Bestimmung von Flächen ohne Holznutzung.

Die konkreten Maßnahmen werden durch **Steuerparameter** beschrieben. Darunter werden Modellparameter verstanden, die vom Nutzer eingestellt werden können und mit denen sich das Modell „steuern“ lässt. Sie sind die wesentlichen Faktoren für die Unterscheidung von Szenarien, indem sie die Indikatoren direkt oder indirekt beeinflussen und verändern. Ein Set von verschiedenen Einstellungen der Steuerparameter wird dann zu einem Szenario zusammengefasst.

2.4.1. Waldumbau

Der Waldumbau stellt eine Veränderung der Baumartenzusammensetzung, des Vorrats der Baumarten und der durch Baumarten belegten Fläche dar, die durch die unterschiedliche Intensität der Bewirtschaftung bestimmter Baumarten und durch Beeinflussung der **Verjüngung** gesteuert wird. Dabei können gezielt einzelne Baumartengruppen eingeführt oder nach der Naturverjüngung vorhandene Baumarten ausselektiert oder gefördert werden. Auf diese Weise kann die Entwicklung von Waldbeständen z.B. stärker an Naturnähe ausgerichtet werden, d.h. heimische Baumarten der **natürlichen Waldgesellschaft** werden gefördert.

2.4.2. Nutzungsintensität

Eine zentrale Stellgröße ist der Durchmesser der Bäume, ab dem **Durchforstungen** vorgenommen werden oder Bäume durch **Zielstärkennutzung** geerntet werden. Die Stärke und Häufigkeit der Eingriffe entscheidet darüber, wie viele der hiebsreifen Bäume dann tatsächlich entnommen werden. Auf diese Weise können Vorräte im Wald erhöht oder abgebaut und die Alters- und Durchmesserstruktur der Bestände beeinflusst werden. Die Nutzungsintensität unterscheidet bestimmte Phasen der Bestandesentwicklung und wird an die Baumartengruppen angepasst. Folgende Phasen werden unterschieden:

Bestandesbegründung: Neue Bäume werden durch ein Einwuchsmodell modelliert. Dabei können Naturverjüngung und Pflanzung unterschieden werden. Für die verschiedenen Bewirtschaftungsoptionen werden Regeln festgelegt, welche Art der Verjüngung in Abhängigkeit von Standort, vorkommenden Baumarten, Zielbaumart etc. stattfinden soll.

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).

Durchforstung: Durch die Einzelbaummodellierung sind sowohl das Alter, als auch der Durchmesser und die Höhe 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 vom Modell dargestellt werden.

Die Durchforstung fasst Jung- und Altdurchforstung zusammen. Sie beginnt im Modell wenn der Median einen festgelegten baumartenspezifischen Brusthöhendurchmesser im Bestand erreicht. 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. Im Modell werden aufgrund des Fehlens einer räumlichen Zuordnung, durchschnittliche Bedränger entnommen, d.h. Bäume stärkerer Durchmesserklassen.

Vorratspflege: Die Vorratspflege ist eine Bewirtschaftungsphase innerhalb der Hauptnutzung vieler Waldbaukonzepte. Sie dient zur Förderung der Wertzuwachssträger durch Entnahme geringwertiger Bäume, der Nutzung hiebsreifer Bäume sowie der Vorbereitung der Verjüngung. Hier findet Vorratsanreicherung bzw. Zuwachsabschöpfung statt.

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 auf einer Fläche bekannt ist. Die Nutzung im Modell kann deshalb einzelbaumweise durch Zielstärkennutzung, aber auch als flächige Räumung (Kahlschlag) nach Bestandesalter erfolgen.

2.4.3. Flächen ohne Holznutzung

Bestände können der **natürlichen Waldentwicklung** überlassen und nicht weiter forstlich genutzt werden. Die Auswahl der Schutzgebiete kann über verschiedene Kriterien erfolgen, wie die **Naturnähe** des Waldes durch Vergleich der aktuellen Baumartenzusammensetzung mit der potentiellen natürlichen Waldgesellschaft oder durch bestehende **Nutzungseinschränkungen** wie z.B. Steilhangflächen aber auch das Alter von Beständen. Die Datengrundlage für diese Auswahl bietet die Bundeswaldinventur. Für alle Probepunkte gibt es z.B. eine Zuordnung zu Schutzgebieten und anderen Nutzungseinschränkungen, die bereits bestehen. Zudem können die Datenpunkte nach Hauptbaumart, mittlerem Alter, der natürlichen Waldgesellschaft, Durchmesser etc. selektiert werden.

3. Szenarientwicklung

Durch unterschiedliche Einstellungen zu den oben beschriebenen Bewirtschaftungsoptionen im Modell werden drei Szenarien entwickelt. Tabelle 3-1 gibt eine allgemeine Übersicht über die Steuerparameter, die für die Einstellung der Szenarien verändert wurden. Die Ausgestaltung der Szenarien im Modell erfolgt durch eine Kombination der Bewirtschaftungsoptionen verschiedener Intensität oder durch unterschiedliche Flächenbelegungen. Die spezifischen Parameter zu den **Nutzungsintensitäten** in den Szenarien sind in Tabelle A-3 und Tabelle A-4 hinterlegt. Annahmen zur Auswahl von **Flächen ohne Holznutzung** beschreibt Kapitel 3.4.

3.1. Basisszenario

Das Basisszenario stellt ein Fortschreibungsszenario dar, das eine Referenz zu den folgenden Szenarien bildet. Dabei werden Parametereinstellungen gewählt, die die vergangene Entwicklung zwischen BWI-2 und BWI-3 abbilden aber auch gängige Praxis in der Forstwirtschaft in Deutschland beschreiben. Damit entspricht es weitgehend dem WEHAM-Basisszenario, das die Entwicklung der Waldentwicklung und des Holzaufkommens für die Periode 2012 bis 2052 projiziert (BMEL, 2016c).

3.1.1. Waldumbau

Ein weiterer Waldumbau findet im Basisszenario nicht explizit statt. Der in der Vergangenheit, d.h. zwischen den beiden Waldinventuren 2002 und 2012 umgesetzte Waldumbau wird übernommen, aber nicht weiter aktiv ausgedehnt. Änderungen der Baumartenzusammensetzung passieren dabei dynamisch und ohne gezielte Förderung durch Pflanzung oder Selektion in der Jungwuchspflege oder bei Durchforstung oder Nutzung.

3.1.2. Nutzungsintensität

Die Parametereinstellungen des Basisszenarios sind so gewählt, dass sie die zurzeit vorherrschende Nutzungsintensität abbilden. Die Einstellungen zu Zieldurchmessern und Nutzungsintensitäten lehnen sich am WEHAM Basisszenario⁷ an. Für die Zuordnung der WEHAM-Durchforstungstypen zu den in FABio unterschiedenen Bewirtschaftungsoptionen werden vereinfachte Annahmen getroffen und Durchforstungstypen zusammengefasst. So werden z.B. einheitliche Intensitäten der Durchforstung von 20 % des Vorrats angenommen, da diese aus den verfügbaren Daten nicht ablesbar sind. Für eine bessere Kompatibilität der Parametersätze werden die Bewirtschaftungsoptionen zudem nach Bundesland und Besitzart differenziert. Im Mittel beträgt die Zielstärke für Nadelholz 54 cm und für Laubholz 59 cm. Die Intensität der Zielstärkennutzung liegt für Nadelholz bei 76 % und für Laubholz bei 79 % (Tabelle 3-1).

3.1.3. Flächen ohne Holznutzung

Das Basisszenario geht davon aus, dass die Größe der Flächen ohne Holznutzung sich nicht ändert. Als bestehende Schutzgebiete und andere Flächen mit Nutzungseinschränkungen wie Steilhangflächen (festgestellt durch die Bundeswaldinventur), werden all jene Flächen von einer Nutzung ausgenommen, auf denen laut BWI eine Holznutzung nicht zulässig oder nicht zu erwarten ist oder die als Nationalparkflächen gekennzeichnet sind. Insgesamt umfasst die Fläche,

⁷ WEHAM-Parameter des Basisszenarios sind verfügbar unter dem Link <https://bwi.info/WehamParameter.aspx> (letzter Zugriff 23. August 2016).

auf der grundsätzlich keine Nutzung angenommen wird, 4,1 % oder 427.700 ha. Im Basisszenario wird davon ausgegangen, dass auf dieser Waldfläche eine natürliche Waldentwicklung stattfindet. Eine ausführlichere Beschreibung der Auswahl der Flächen befindet sich im anschließenden Kapitel 3.4.

3.2. Holzscenario

Das Holzscenario beschreibt den Wald unter der Annahme, dass die Bewirtschaftung intensiviert wird. Die Nutzung wird im Vergleich zum Basisszenario verstärkt, indem Durchforstungs- und Nutzungsintensität bei Beibehaltung ähnlicher Zieldurchmesser erhöht werden. Zudem werden Nadelbäume bei der Verjüngung der Bestände gefördert. Die Annahmen und Grundsätze für ein auf Holzproduktion konzentriertes Waldbaukonzept werden von aktuellen Waldbaurichtlinien verschiedener Bundesländer (ForstBW Praxis, 2014; Hessen-Forst, 2008) sowie von Waldbaukonzepten der Privatwaldwirtschaft bezogen.

3.2.1. Waldumbau

Es wird in diesem Szenario ebenfalls kein aktiver Waldumbau angestrebt. Nadelholz wird jedoch, dort wo es bereits vorkommt, gefördert. Eine Förderung von schnellwachsenden Baumarten wie z.B. Douglasie wird an bestehenden Nadelbaumstandorten durch Pflege gefördert. Es finden jedoch keine Pflanzungen statt.

3.2.2. Nutzungsintensität

Das Holzscenario fokussiert sich auf zuwachsstarke Baumarten wie Douglasie, Fichte und Tanne. Die Nutzung führt zu einer vollständigen Abschöpfung des Zuwachses und damit zu einem in etwa gleichbleibenden Vorrat. Es finden vor allem intensive Pflegeeingriffe beim Jungbestand und innerhalb der Durchforstung statt. Letztere ist in der Intensität um 80 % für Laubholzbestände und um 40 % in Nadelholzbeständen im Vergleich zum Basisszenario erhöht. Die Produktionszeiträume sind relativ kurz, wobei aber nur Zielstärkennutzung betrieben wird. Die angestrebten Zielstärken wurden nach Wuchsdynamik und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen festgelegt. Im Mittel liegen diese sogar leicht über denen des Basisszenarios (63 cm für Laubholz und 56 cm für Nadelholz). Jedoch beträgt die Intensität der Zielstärkennutzung 100 % (Tabelle 3-1). Eine detaillierte Liste der Parametereinstellung zur Nutzungsintensität befindet sich in Tabelle A-4.

3.2.3. Flächen ohne Holznutzung

Lediglich bestehende Schutzgebiete und Flächen ohne Nutzung werden in diesem Szenario wie im Basisszenario forstlich nicht genutzt. Diese Flächen machen ca. 4,1 % der Waldfläche aus. Es werden darüber hinaus keine zusätzlichen Flächen aus der Nutzung genommen. Eine ausführliche Beschreibung der Auswahl der Flächen befindet sich im anschließenden Kapitel 3.4.

3.3. Waldvision

Das Konzept des ökologischen Waldbaus, das im Szenario Waldvision parametrisiert wird, basiert auf dem Gedanken des integrativen Prozessschutzes von Sturm (1993) und orientiert sich an den natürlichen Prozessen eines Urwaldes bzw. Naturwaldes, mit dem Ziel, die Entwicklung von naturnahen, dynamischen Waldökosystemen und ihren Selbstregulationsmechanismen zu fördern. Dabei werden die drei Säulen der nachhaltigen Entwicklung (Ökonomie, Ökologie, Gesellschaft)

gleichwertig behandelt. Durch ein ökologisch optimales Funktionieren ist die Voraussetzung für ökonomisch positive Ergebnisse und somit die Erfüllung sozialer und kultureller Anforderungen an Wälder gegeben.

Diese Art der Waldnutzung wurde 1996 von Umweltschutzverbänden wie Greenpeace, BUND, WWF und Robin Wood als ökologisch verträglich eingestuft. Weiterhin entspricht diese Form der Waldnutzung den Kriterien der Naturland-Zertifizierung für ökologische Waldnutzung und übertrifft teilweise die Kriterien des Forest Stewardship Council (FSC). Aktuell wird diese Form der Waldbewirtschaftung in mehreren Stadtwäldern Deutschlands, wie z.B. Göttingen und Lübeck praktiziert.

3.3.1. Waldumbau

Im Szenario der Waldvision findet eine Förderung von Laubholz statt. Baumarten der natürlichen Waldgesellschaft, die sich ohne menschlichen Einfluss von Natur aus durchgesetzt hätten, werden durch Jungwuchspflege und in Durchforstungen gefördert. Im Vergleich zum Basisszenario werden Laubbäume bei der Verjüngung von Beständen auf ihren heimischen Standorten gefördert und Nadelbäume, die nicht zur natürlichen Waldgesellschaft gehören, verdrängt. Die Erneuerung der Wälder erfolgt durch natürliche Verjüngung, es finden also auch hier keine Pflanzungen statt.

3.3.2. Nutzungsintensität

Die Waldvision ist ein Szenario, das eine ökologische Waldwirtschaft in ganz Deutschland umsetzt. Durch Pflege der Wälder sollen die Lebens- und Reproduktionsfähigkeit der natürlichen Waldgesellschaft und die Holzqualität der Erntebäume gefördert werden. Eingriffe erfolgen nach dem Minimum-Prinzip nur dann, wenn nicht-heimische, nicht-standortgerechte und qualitativ schlechte Bäume, qualitativ gute, heimische Bäume bedrängen. Im Szenario wird eine Erhöhung des Vorrates je Hektar angestrebt, die sich an Vorräten in Naturwäldern orientiert.

Dazu werden in allen Beständen die Zieldurchmesser im Mittel um 20 % erhöht und Intensität und Frequenz von Eingriffen im Schnitt um 50 % verringert. Im Mittel beträgt die Zielstärke dadurch ca. 64 cm für Nadelholz, 76 cm für Laubholz. Bei der Nutzung werden nur einzelne Bäume oder kleine Baumgruppen entnommen. Eine Zusammenfassung der Parametereinstellung zur Nutzungsintensität befindet sich in Tabelle A-3.

3.3.3. Flächen ohne Holznutzung

Die Umsetzung der Waldvision im Modell beinhaltet auch die Ausweisung zusätzlicher Flächen ohne Holznutzung. Ein Anteil der Waldfläche wird als Referenzflächen nicht mehr bewirtschaftet. Er dient der Beobachtung und Dokumentation der natürlichen Entwicklung. Zudem werden zusätzliche Naturschutzflächen mit seltenen Waldgesellschaften und altem Baumbestand ausgewiesen.

Die Auswahl der Flächen orientiert sich gemäß Bundesnaturschutzgesetz §30 (gesetzlich geschützte Biotop) zum einen an bestimmten schützenswerten natürlichen Waldgesellschaften, wie z.B. Bruch-, Schlucht- und Auenwäldern, aber auch an der tatsächlicher Bestockung, d.h. der Waldstruktur und Baumartenzusammensetzung auf diesen Flächen. Die Abfrage der Flächen erfolgt in einem mehrstufigen Auswahlverfahren, basierend auf den einzelnen zugewiesenen Waldgesellschaften. Die Schutzflächen für das Szenario Waldvision ergeben insgesamt eine Fläche von 1.714.100 ha, das entspricht 16,6 % der Waldfläche in Deutschland, wovon 10,5 % auf

den öffentlichen Wald und 6,1 % auf den Privatwald entfallen. Eine ausführliche Beschreibung der Auswahl dieser Flächen befindet sich im anschließenden Kapitel 3.4.

Tabelle 3-1: Übersicht über die mittleren Einstellungen von wichtigen Steuerparametern der Bewirtschaftung in den Szenarien

Parameter		Basis	Holz	Vergleich zu Basis [%]	Wald-vision	Vergleich zu Basis [%]
Waldumbau		-	Förderung Nadelholz		Förderung Laubholz	
Intensität von Durchforstungen [%]	Jungbestands-pflege (Laubholz)	20	17	83%	13	63%
	Durchforstung (Laubholz)	20	36	181%	13	64%
	Vorratspflege (Laubholz)	20	21	103%	7	34%
	Jungbestands-pflege (Nadelholz)	20	26	130%	18	90%
	Durchforstung (Nadelholz)	20	28	140%	26	128%
	Vorratspflege (Nadelholz)	20	23	115%	22	108%
Zieldurchmesser [cm]	Laubholz	59	63	108%	71	122%
	Nadelholz	54	56	103%	64	117%
Intensität der Zieldurchmesser-nutzung [%]	Laubholz	79	100	127%	75	95%
	Nadelholz	76	100	131%	92	120%
Flächen ohne Nutzung [%]		4.1%	4.1%		16.6%	

Quelle: eigene Darstellung

3.4. Auswahl von Flächen ohne Holznutzung in den Szenarien

In der Bundeswaldinventur werden vier Klassen von Nutzungseinschränkungen unterschieden: keine Einschränkung der Holznutzung, Holznutzung nicht zulässig oder nicht zu erwarten, etwa 1/3 des üblichen Aufkommens erwartbar und etwa 2/3 des üblichen Aufkommens erwartbar. Flächen auf denen die Holznutzung nicht zulässig oder zu erwarten ist, belaufen sich auf 407.000 ha und ergeben 3,9 % der bundesdeutschen Waldfläche. Darunter sind zum einen Flächen, auf denen die Holznutzung aus Schutzgründen untersagt ist. So weisen ca. 150.000 ha eine außerbetriebliche Auflage und 62.000 ha eine innerbetriebliche Eigenbindung an den Naturschutz auf. Diese Flächen machten im Jahr 2012 1,9 % der Gesamtwaldfläche aus und können als dauerhaft geschützt angesehen werden. Nur sie entsprechen den Anforderungen der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt an Flächen auf denen eine natürliche Waldentwicklung (NWE) stattfinden soll (NWE5 Projekt, Engel et al., 2016).

Die BWI weist weitere Flächen aus, auf denen die Nutzung aus anderen Gründen nicht zu erwarten ist, z.B. wegen ungünstiger Geländeeigenschaften. Diese Flächen haben keinen dauerhaften Schutzstatus, können aber zum größten Teil als potenzielle NWE-Flächen gesehen werden (Engel et al., 2016). Für die Darstellung von Flächen ohne Nutzung in den Szenarien wurden zusätzlich Flächen gewählt, die als Nationalparkflächen gekennzeichnet sind, in denen aber laut obiger Nutzungseinschränkung dennoch Holz genutzt werden darf. Diese Flächen belaufen sich auf 25.100 ha und umfassen 0,2 % der Waldfläche in Deutschland. Insgesamt umfasst die Fläche, in der grundsätzlich in allen Szenarien keine Nutzung angenommen wird 4,1 %, bzw. 432.100 ha Waldfläche.

Tabelle 3-2 stellt die Flächen mit bestehenden Schutzgebieten und Flächen mit Nutzungseinschränkungen dar. Neben den Flächen ohne Nutzung weist die BWI 4,3 % an Fläche mit eingeschränkter Nutzung aus, die z.T. in Schutzgebieten liegen. Hier kann die Holznutzung aus verschiedenen Gründen als leicht (1/3) oder stärker (2/3) eingeschränkt betrachtet werden. Flächen mit eingeschränkter Nutzung werden im Weiteren nicht gesondert behandelt sondern genutzt, sofern sie nicht in Schutzgebieten liegen oder anderweitig als schutzbedürftig angesehen werden.

Schutzgebiete, die nach dem Stichtag der Bundeswaldinventur aus der Nutzung genommen wurden, z.B. der im Jahr 2014 eingerichtete Nationalpark Schwarzwald in Baden-Württemberg oder der im Jahr 2015 eröffnete, länderübergreifende Nationalpark Hunsrück-Hochwald in Rheinland-Pfalz und dem Saarland, sind von der Nutzung nicht ausgenommen, da diese Flächen nicht hinreichend genau den Traktecken der BWI zugeordnet werden können.

Die Umsetzung einer ökologischen Waldbewirtschaftung sieht die Ausweisung eines zusätzlichen Anteils an Flächen ohne Holznutzung vor. Sie sollen dem Schutz der biologischen Vielfalt und der Beobachtung und Dokumentation der natürlichen Entwicklung dienen. Die Auswahl dieser Flächen wird anhand von Kriterien vorgenommen, die sich aus den BWI-Daten ablesen lassen. Die Auswahlkriterien für zusätzliche Flächen ohne Holznutzung und ihre Rangfolge sind in Tabelle 3-3 aufgelistet.

Tabelle 3-2: Übersicht zu existierenden Schutzgebieten und Flächen mit eingeschränkter Nutzung im Jahr 2012 in ha

Beschreibung	BWI-3			NWE5		
	Öffentlicher Wald	Gesamt-wald	%	Öffentlicher Wald	Gesamt-wald	%
1) existierende Schutzgebiete, keine Nutzung	250.800	323.900	3,1	172.921	213.145	1,9
2) keine Nutzung aus anderen Gründen als Schutzgebiete	38.400	83.100	0,8			
3) Nationalparke, eingeschränkte Nutzung	22.500	25.100	0,2			
Gesamt existierende Flächen ohne/eingeschränkte Holznutzung	311.700	432.100	4,1	172.921	213.145	1,9
4) andere Schutzgebiete, eingeschränkte Nutzung	200.400	353.900	3,4			
5) eingeschränkte Nutzung aus anderen Gründen als Schutzgebiete	36.900	92.000	0,9			
Gesamt existierende Flächen ohne Holznutzung oder mit eingeschränkter Nutzung	549.000	878.000	8,4			

Quelle: eigene Darstellung, basierend auf Daten der BWI-3 <https://bwi.info/> und Daten aus Engel et al., 2016

Neben bestehenden Schutzgebieten und Nutzungseinschränkungen werden in den Szenarien zusätzliche Flächen aus der Nutzung genommen. Die Auswahl der Flächen orientiert sich gemäß Bundesnaturschutzgesetz §30 (gesetzlich geschützte Biotope) zum einen an bestimmten schützenswerten natürlichen Waldgesellschaften, wie z.B. Bruch-, Schlucht- und Auenwäldern, aber auch an deren tatsächlicher Bestockung, d.h. der Waldstruktur und Baumartenzusammensetzung auf diesen Flächen. Die Auswahl der Flächen ohne Holznutzung erfolgt in einem mehrstufigen Auswahlverfahren (siehe Auswahlsschritte Tabelle 3-3), basierend auf den einzelnen zugewiesenen Waldgesellschaften. Dazu werden die 40 im BWI-Datensatz unterschiedenen Waldgesellschaften zu zwölf Waldtypen zusammengefasst (Tabelle A-5 im Anhang).

Die Ausweisung der Flächen ohne Holznutzung erfolgt nach den Kriterien in Tabelle 3-3 und Tabelle 3-4. Zuerst werden Flächen ausgewählt, die bereits im Jahr 2012 laut BWI-3 nicht genutzt wurden ausgewählt (Stufe 1). Hinzugenommen werden dann Waldflächen in Schutzgebieten, die bisher genutzt wurden (Stufe 2). Als nächstes werden alle seltenen Waldtypen, sowohl im öffentlichen Wald als auch im Privatwald, aus der Nutzung genommen (siehe beispielsweise Block- und Schluchtwälder in Tabelle 3-4; Stufe 3). Weiterhin werden für schützenswerte Waldtypen, wie z.B. „Bodensaurer Eichenmischwald“ jeweils 10 % der naturnahen Flächen dieses

Typs im öffentlichen Wald und 5 % im Privatwald, sowie 10 % der naturfernen Flächen im öffentlichen Wald und 5 % der naturfernen Flächen im Privatwald aus der Nutzung genommen (Stufe 4). Dabei werden Waldflächen, die bereits in niedrigeren Stufen (Stufe 1 – 3) aus der Nutzung genommen wurden, angerechnet. Innerhalb der naturnahen und naturfernen Waldflächen werden dann sukzessive die Nutzungsbeschränkung, der Schutzstatus, die Waldentwicklungsphase und das Alter (z.B. Buchenbestände >180 Jahre) berücksichtigt, um die anvisierten Prozentanteile zu erreichen.

Die so ermittelten Waldflächen ohne Holznutzung ergeben insgesamt eine Fläche von 1.715.100 ha. Dies entspricht 16,6 % der Waldfläche in Deutschland, wovon 10,5 % auf den öffentlichen Wald und 6,1 % auf den Privatwald entfallen (siehe Tabelle 3-4). Die Einstellung der Holznutzung auf Schutzflächen im Privatwald setzt voraus, dass entsprechende Anreizsysteme (z.B. durch Vertragsnaturschutz) existieren müssen, um diese umzusetzen.

Die Verteilung über die Bundesländer ist nicht gleichmäßig, da die naturräumliche Ausstattung variiert, d.h. schutzwürde Waldtypen nicht in jedem Bundesland gleich häufig vorkommen. (Abbildung 3-1). Abbildung 3-2 stellt die geografische Verteilung der existierenden und zusätzlichen Schutzgebiete dar.

Tabelle 3-3: Auswahlkriterien für Flächen ohne Holznutzung

Stufe	Kriterien
1	Flächen ohne Holznutzung, wie in der BWI ausgewiesen (d.h. Holznutzung nicht zulässig oder nicht zu erwarten)
2	Schutzstatus wie in der BWI ausgewiesen (d.h. Nationalparke, Naturschutzgebiete und FFH-Gebiete)
3	Schützenswerte Waldgesellschaften (d.h. Block- und Schluchtwälder, wärmeliebende Eichenmischwälder, Bruchwälder und naturnaher Anteil der Auen- und Feuchtwälder sowie ¾ des feuchten reichen Eichenmischwaldes)
4	Waldentwicklungsphase (Bestände in der Dauerwaldphase bevorzugt)
5	Median des Baumalters des Bestandes liegt über einem baumartenspezifischen Alter (z.B. Buchenbestände >180 Jahre)

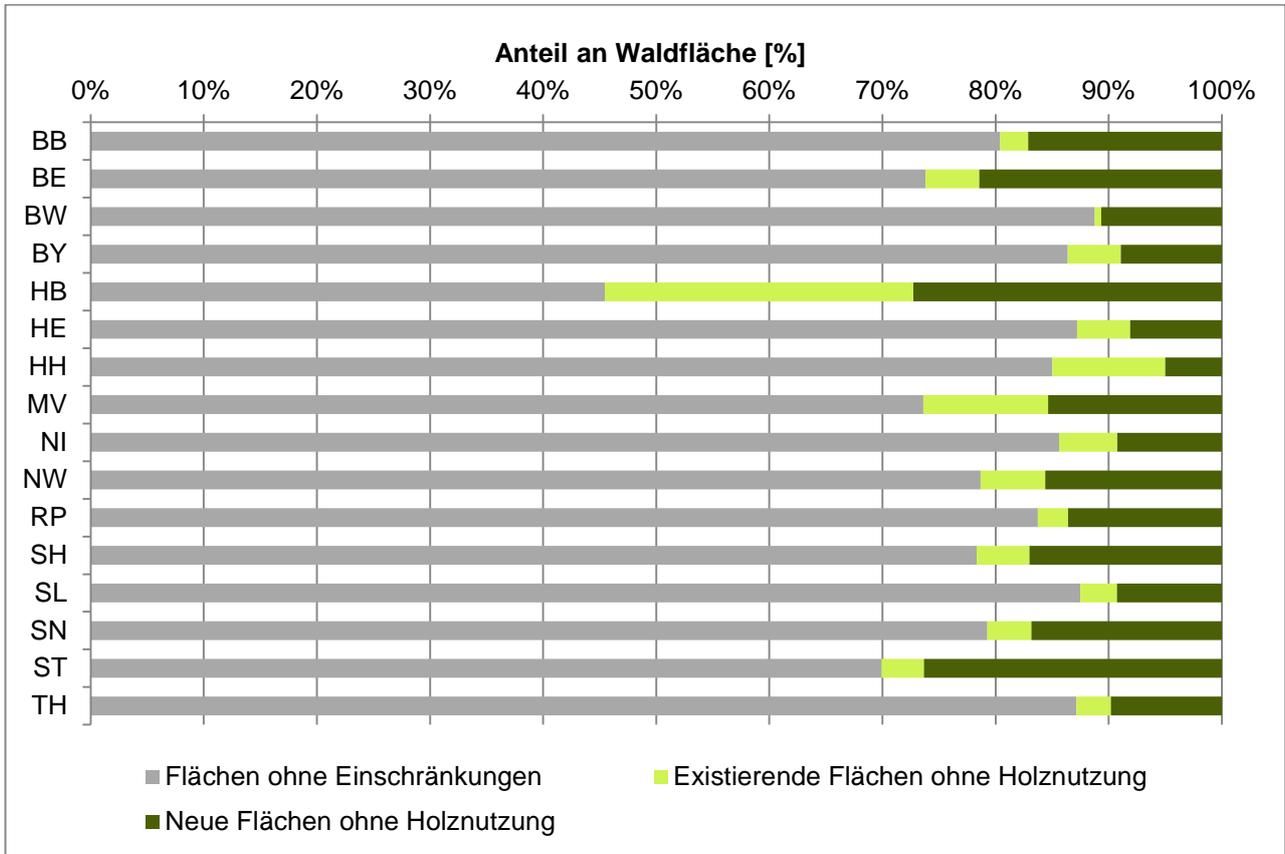
Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 3-4: Annahmen zu Flächen ohne Holznutzung

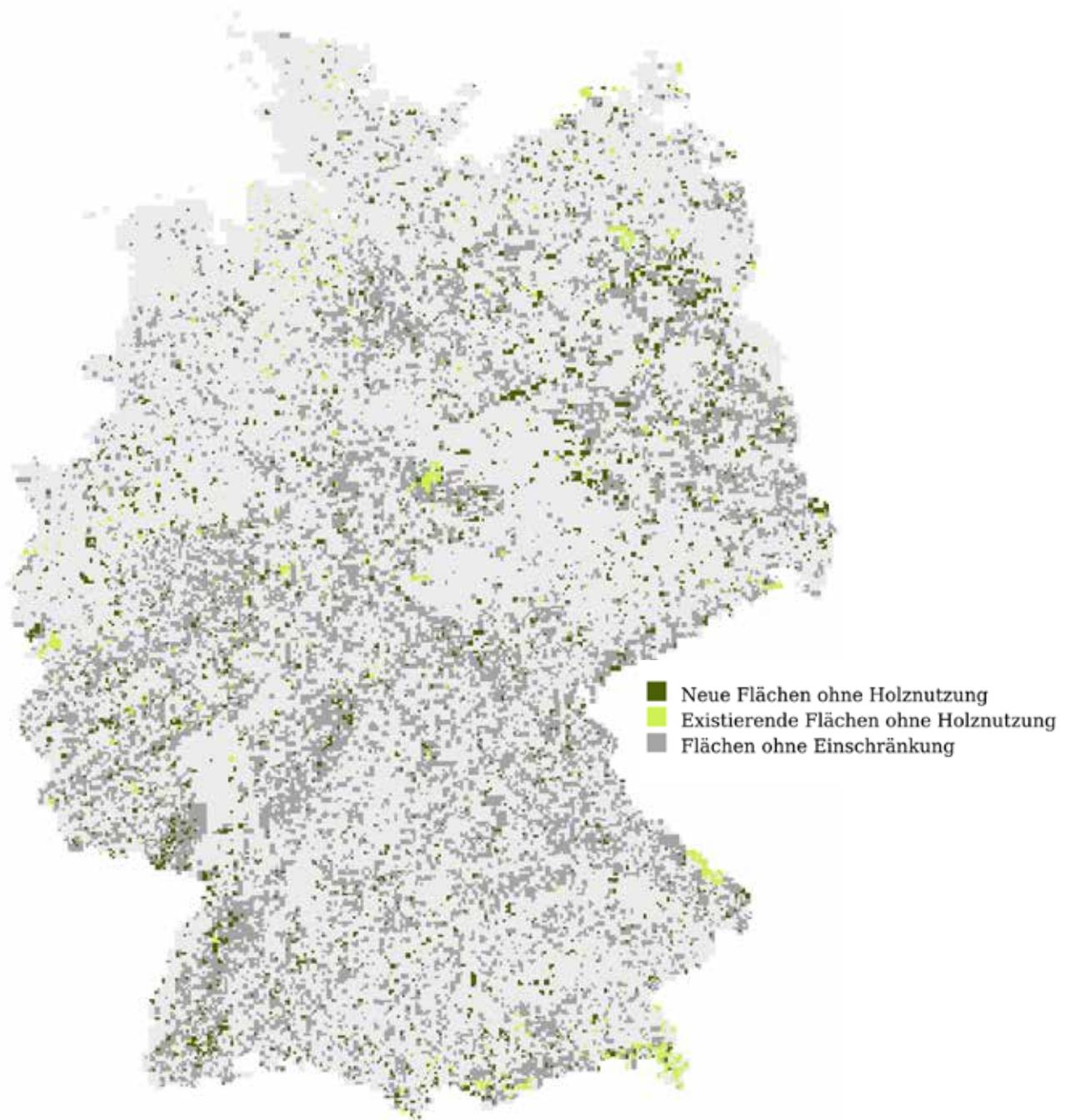
Waldtyp	Besitzart und Flächen ohne Holznutzung	Fläche [ha]	Anteil Schutzfläche am Gesamtwald
Auen- und Feuchtwälder	Öffentlicher Wald (nur naturnahe Flächen)	101.100	0,98 %
	Privatwald (nur naturnahe Flächen)	93.900	0,91 %
Block- und Schluchtwälder	Öffentlicher Wald (alle Flächen)	99.100	0,96 %
	Privatwald (alle Flächen)	93.900	0,91 %
Wärmeliebende	Öffentlicher Wald (alle Flächen)	8.300	0,08 %
Eichenmischwälder	Privatwald (alle Flächen)	5.200	0,05 %
Feuchte reiche	Öffentlicher Wald (nur naturnahe Flächen)	106.300	1,03 %
Eichenmischwälder	Privatwald (nur naturnahe Flächen)	93.900	0,91 %
Mesophile	Öffentlicher Wald (naturnah: 10 %; naturfern 10 %)	16.500	0,16 %
Eichenmischwälder	Privatwald (naturnah: 5 %; naturfern 5 %)	10.300	0,10 %
Bodensaure	Öffentlicher Wald (naturnah: 10 %; naturfern 10 %)	41.300	0,40 %
Eichenmischwälder	Privatwald (naturnah: 5 %; naturfern 5 %)	34.000	0,33 %
Bodensaure	Öffentlicher Wald (naturnah: 10 %; naturfern 5 %)	339.500	3,29 %
Buchenmischwälder	Privatwald (naturnah: 5 %; naturfern 2,5 %)	104.200	1,01 %
Mesophile	Öffentlicher Wald (naturnah: 10 %; naturfern 5 %)	102.100	0,99 %
Buchenmischwälder	Privatwald (naturnah: 5 %; naturfern 2,5 %)	39.200	0,38 %
Basen- und kalkreiche	Öffentlicher Wald (naturnah: 10 %; naturfern 5 %)	81.500	0,79 %
Buchenmischwälder	Privatwald (naturnah: 5 %; naturfern 2,5 %)	32.000	0,31 %
Bruchwälder	Öffentlicher Wald (alle Flächen)	94.900	0,92 %
	Privatwald (alle Flächen)	118.700	1,15 %
Hochlagen-Fichtenwälder	Öffentlicher Wald (naturnah: 50 %; naturfern 50 %)	86.700	0,84 %
	Privatwald (Nationalpark)	1.000	0,01 %
Kiefernwälder	Öffentlicher Wald (naturnah: 50 %; naturfern 50 %)	9.300	0,09 %
	Privatwald (mit Nutzungseinschränkung)	2.100	0,02 %
Gesamt		1.715.000	16,6 %

Quelle: eigene Darstellung basierend auf Daten der BWI3 <https://bwi.info/>

Abbildung 3-1: Relativer Anteil der existierenden und neuen Flächen ohne Holznutzung an der Waldfläche in den Bundesländern



Quelle: eigene Darstellung basierend auf Daten der BWI3 <https://bwi.info/>

Abbildung 3-2: Geografische Verteilung der Waldflächen mit und ohne Holznutzung

Quelle: eigene Darstellung basierend auf Daten der BWI3 <https://bwi.info/>

3.5. Annahmen zum zeitlichen Übergang in die Szenarien

Es wird angenommen, dass die in den Szenarien beschriebenen Maßnahmen sofort umgesetzt werden. Das bedeutet, dass ab dem Jahr 2013 die definierten Bewirtschaftungsregeln sofort auf ganzer Fläche greifen und auch Flächen ohne Nutzung von Beginn an forstlich unbewirtschaftet bleiben. Das hat den Vorteil, dass keine Priorisierung des Übergangs erfolgen muss, im Hinblick darauf, welche Flächen wann von einer Umstellung betroffen sind. Zudem werden die Auswirkungen deutlich schneller sichtbar und lassen sich so besser analysieren. Ein Nachteil ist

aber, dass diese Annahme realitätsfern ist, da bei einer tatsächlichen Umsetzung keine Maßnahme umgehend auf ganzer Fläche greifen würde. Es muss deshalb davon ausgegangen werden, dass alle Wirkungen der Szenarien in der Realität verzögert auftreten würden.

Eine Ausnahme stellt die Umsetzung der Holzentnahme im Modell dar. Aufgrund der sofortigen Wirkung der alternativen Bewirtschaftungsregeln gäbe es starke Sprünge im Holzaufkommen, des Vorrats und des Wachstums, da z.B. im Holz- aber auch im Basisszenario in kurzer Zeit ein Überhang an hiebsreifen Bäumen geerntet würde. Um diese Sprünge in den Modellindikatoren abzupuffern, wurde für den Übergang bei Änderungen der Nutzungsintensität ein Durchmesserfenster definiert, das die zu erntenden Durchmesser nicht nur nach unten, sondern auch nach oben begrenzt. Die obere Grenze wird dabei über einen Zeitraum von 40 Jahren schrittweise erhöht. Auf diese Weise kann davon ausgegangen werden, dass Änderungen in der Intensität nach dieser Phase ganzflächig umgesetzt wurden, andererseits aber unrealistisch Sprünge, z.B. in der Vorratsentwicklung von einem Jahr aufs andere vermieden werden. Zusätzlich werden die Ergebnisse in 10-Jahresschritten ausgegeben. Jährliche Änderungsgrößen wie der Zuwachs, die Mortalität oder Erntemengen werden über diesen Zeitraum gemittelt, bei den Zustandsgrößen wie Derbholzvorrat oder Kohlenstoffvorrat wird der letzte Wert der Periode ausgegeben.

Alle Szenarien gehen von einer konstanten Waldfläche über den Zeitraum der Simulation aus, was nicht der Realität entspricht, da zur Zeit jährlich einige tausend Hektar neuer Wald in Deutschland entstehen. Aus Gründen der Vereinfachung der Modellierung werden diese Flächen aber nicht betrachtet.

4. Grenzen der Modellierung

4.1. Indikatoren und Datenbasis

Die vorgestellten Indikatoren wurden aufgrund verschiedener Kriterien ausgewählt. Neben der Darstellbarkeit im Modell spielte vor allem die **Datenverfügbarkeit** eine Rolle. Einige Grundsätze der ökologischen Waldnutzung, wie z.B. der Erhalt von Biotopbäumen, die Weite von Rückegassenabständen, die in der Praxis der waldbaulichen Konzepte wichtig sind, oder auch, wie im Falle der Rückegassendichte erheblichen Einfluss auf die Produktion haben können, lassen sich im Modell nicht quantifizieren und konnten deshalb nicht betrachtet werden. Zudem fehlt es für viele potenziell interessante Indikatoren an Daten über die Startbedingungen. Im Falle des Bodenkohlenstoffvorrats und des Holzproduktepools wurden modellinterne Gleichgewichtsläufe verwendet, da eine Initialisierung durch empirische Daten nicht einfach möglich war.

Im Modell nicht dargestellt werden **wirtschaftliche Indikatoren**, wie die Erlöse oder Kosten von Maßnahmen. Für die Berücksichtigung von Kosten und Erlösen wäre die Datenlage sicher ausreichend. Eine Berücksichtigung würde das Modell aber noch komplexer machen. Generell wurden wirtschaftliche Erwägungen und Einflüsse wie die Entwicklung von Nachfrage und Preis, oder auch forsttechnische Bedingungen wie zum Beispiel Geländeneigung oder die Erschließungsgrade der Bestände außer Acht gelassen. Für die Ausrichtung der Studie an Fragen des Klima- und Naturschutzes wird diese Einschränkung für hinnehmbar gehalten.

Die gewählten Einstellungen berücksichtigen keine Eigentümerziele zur Höhe und Intensität der Nutzung und Baumartenwahl, da sie in der Regel unbekannt sind. Bei der Auswertung der Ergebnisse der Szenarien ist zu berücksichtigen, dass Eigentümer das potenzielle Ernteaufkommen eventuell nicht realisieren. Es werden in der Bewirtschaftung des Waldes generell keine **Besitzverhältnisse** berücksichtigt (Ausnahme: Wahl der Flächen ohne Holznutzung). Alle beschriebenen Maßnahmen gehen vereinfacht davon aus, dass entsprechende Förderinstrumente existieren, die diese in der Umsetzung sowohl im Staats- als auch im Privatwald begleiten.

Das Szenario Waldvision hat eine relativ starke Veränderung der Waldstrukturen zum Ziel. Diese Strukturen herrschen in nur wenigen Beständen bereits vor, so dass die Anzahl der Datensätze zur Beschreibung des Wuchs- und Konkurrenzverhaltens von Bäumen in solchen Wäldern gering ist. Für solche Bestände besitzt die BWI demnach eine geringere **Repräsentativität**, so dass mit höheren Unsicherheiten in der Modellierung zu rechnen ist. Das gewählte Wachstumsmodell hat durch die Modellierung von Einzelbäumen das Potenzial diese Verhältnisse abzubilden, im Gegensatz zu Altersklassenmodellen, die auf Ertragstafeln beruhen. Zur adäquaten Beschreibung der Wachstumsdynamik in naturnah bewirtschafteten Wäldern wäre eine detailliertere Darstellung der Inanspruchnahme von Licht, Wasser und Nährstoffen z.B. durch ein distanzabhängiges Modell und die Verwendung passenderer Datensätze zur Parametrisierung sinnvoll (Fichtner et al., 2012). Es war jedoch das Ziel ein einfaches, deutschlandweites Modell zu nutzen, das auf den Daten der BWI aufbaut. Durch den Vergleich mit unabhängigen Inventurdaten aus Naturwäldern kann zumindest die Plausibilität der Modellergebnisse für die wichtigsten Baumarten getestet werden.

4.2. Projektionszeitraum und Unsicherheiten

Unsicherheiten von Modellanwendungen sind vielfältig und für die Interpretation der Ergebnisse von Belang. Die einfachste Darstellung ist die einer Spanne (Minimum und Maximum). Mittels Fehlerfortpflanzungsmethoden kann die Spanne durch Konfidenzintervalle qualifiziert werden, d.h. der Angabe einer Wahrscheinlichkeit dafür, dass der Wert innerhalb der Intervallbreite liegt. Die

Unsicherheit von Stichproben lässt sich ebenfalls statistisch beschreiben. Informationen zur Unsicherheit liefern auch Sensitivitätsanalysen, bei denen bewertet werden kann, wie empfindlich Indikatoren auf Änderungen von Eingangsparametern reagieren. Sensitivitätsanalysen lassen auch Rückschlüsse auf den Beitrag einzelner Parameter oder Einstellungen zu. Derartige Sensitivitätsanalysen wurden durchgeführt, um die Plausibilität des Modells zu testen. So wurden Sensitivitätsläufe mit und ohne einzelne Maßnahmen und mit unterschiedlicher Ausprägung vorgenommen. Die Ergebnisse gingen in die Wahl der Einstellungen ein.

Die Unsicherheit von Modellanwendungen steigt mit der Entfernung vom ursprünglichen Modellzweck und den zugrundeliegenden Daten. Der Stichprobenumfang der Bundeswaldinventur, der dem Modell zu Grunde liegt, ist repräsentativ für den gesamten Wald in Deutschland und größeren Bundesländern. Für kleinere Regionen ist die Repräsentativität der Stichprobe allerdings nicht gewährleistet, so dass Aussagen für kleinräumige Fragestellungen nicht zuverlässig getroffen werden können und von einer Darstellung der Ergebnisse einzelner Bundesländer abgesehen wird.

Unsicherheiten der Modellergebnisse steigen auch mit der Länge des Projektionszeitraums. Diese Unsicherheit lässt sich nicht in Fehlerprozent fassen. Grund für diese Unsicherheiten ist die Reduktion des Modells auf wesentliche Faktoren, so dass nicht alle Einflussgrößen in die Projektion Eingang finden können. Modellergebnisse dieser Art dienen jedoch auch nicht als Vorhersagen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, sondern vielmehr als Beschreibung einer möglichen Entwicklung unter bestimmten Randbedingungen. So müssen die Ergebnisse immer im Kontext der zugrunde liegenden Einstellungen betrachtet werden. Trotz zunehmender Unsicherheiten bei langen Projektionszeiträumen, lassen sich aus diesen wichtige Trends und Muster ablesen, die für Entscheidungsträger von Bedeutung sind.

Aufgrund der ausgedehnten Phasen der Waldentwicklung und damit langen Produktionszeiträumen wurden Modellläufe bis zum Jahr 2102 (90 Jahre) vorgenommen, um langfristige Auswirkungen der Änderung der Waldbewirtschaftung sichtbar zu machen. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist jedoch zu beachten, dass das Modell wichtige Einflussfaktoren, wie Klimaänderungen, Störungen durch Stürme oder Insekten, die die Entwicklung beeinflussen, nicht berücksichtigt.

5. Ergebnisse

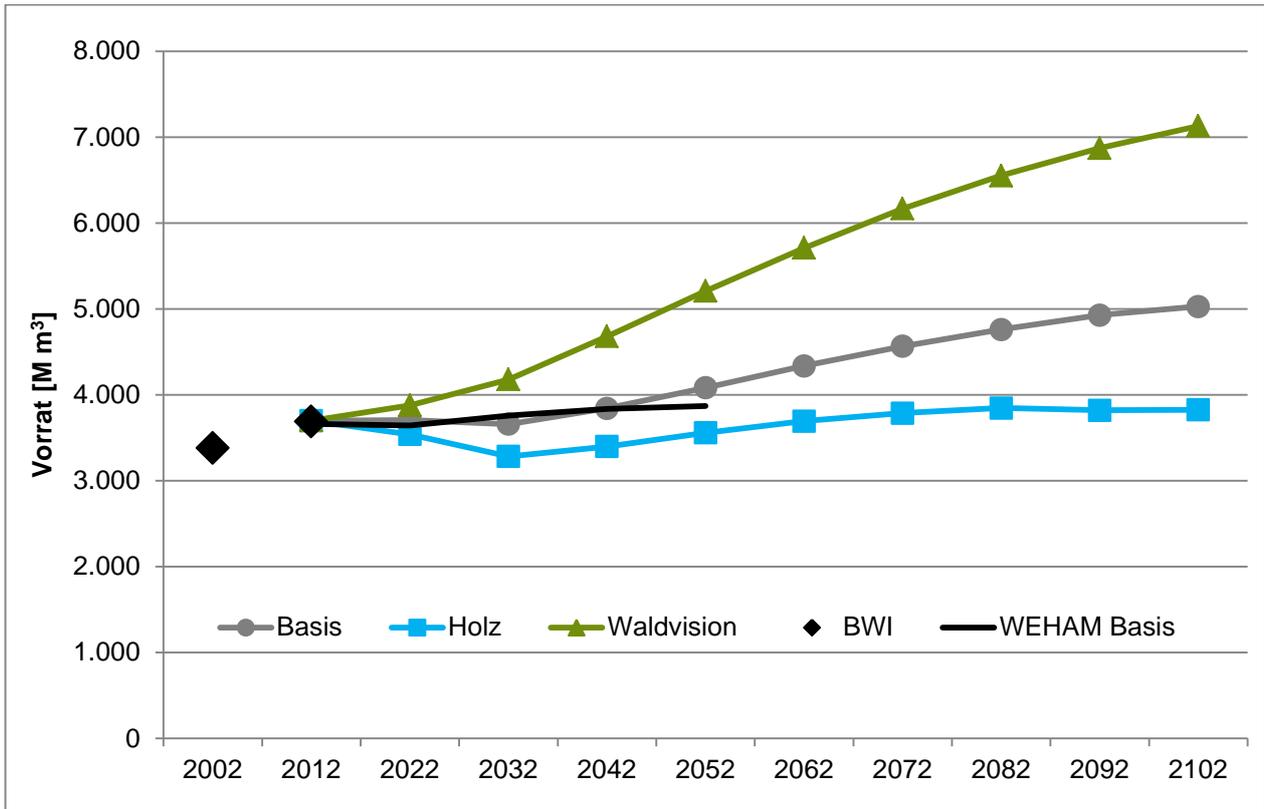
5.1. These 1: Erhöhung der Vorräte im Wald

Ein zentraler Indikator für die Bewertung der Auswirkungen alternativer Waldbewirtschaftungsszenarien, ist die Entwicklung des Holzvorrats im Wald. Der Holzvorrat im Wald erhöhte sich laut BWI-3 zwischen 2002 (3,4 Mrd. m³) und 2012 (3,7 Mrd. m³) um 9 %. Abbildung 5-1 zeigt die Entwicklung zwischen 2012 und 2102 für die Szenarien in 10-Jahres-Schritten. Im Basisszenario wachsen die Gesamtholzvorräte im Wald bis zum Jahr 2052 auf etwa 4,1 Mrd. m³ und 2102 auf 5,0 Mrd. m³. Das entspricht einem Anstieg von 11 % bis 2052, bzw. 35 % bis 2102 im Vergleich zu 2012. Das Holzscenario bewirkt dagegen, dass die Holzvorräte bis 2032 zunächst um 11% sinken. Im Jahr 2052 erreicht das Szenario dann den Ausgangswert von 2012, um danach bis 2102 auf 3,8 Mrd. m³, d.h. um 3% im Vergleich zu 2012, zu steigen. Im Szenario Waldvision errechnet das Modell stattdessen eine deutliche Erhöhung der Vorräte von 3,7 Mrd. m³ auf 5,2 Mrd. m³ bis 2052 (ein Anstieg von 40 %). Bis 2102 erreicht der Holzvorrat in diesem Szenario schließlich 7,1 Mrd. m³, was einer Erhöhung um 92 % entspricht und damit nahezu eine Verdoppelung im Vergleich zu 2012 bedeutet. Das Szenario Waldvision erreicht damit am Ende der Simulationszeit einen Holzvorrat der um 42 % höher liegt als im Basisszenario. Ein Vergleich mit WEHAM-Ergebnissen zeigt, dass das FABio Basisszenario für den überlappenden Zeitraum von 2012 bis 2052 eine ähnliche Entwicklung annimmt wie das WEHAM-Basisszenario (Abbildung 5-1). Verglichen wurden auch nach Baumartengruppen unterschiedene Ergebnisse der beiden Modelle, die ebenfalls eine gute Übereinstimmung zeigten. Im Mittel betragen die Abweichungen weniger als 10 %. Auf aggregierter Ebene stellen sich die beiden Szenarien deshalb durchaus als vergleichbar dar.

Auf einen Hektar gerechnet erreicht die das Szenario Waldvision 2052 einen mittleren Vorrat von 501 m³/ha. Im Mittel erreichen die Vorräte im Jahr 2102 686 m³/ha. Auf der gleichen Waldfläche ergeben sich in 2102 für das Basisszenario 484 m³/ha, im Holzscenario 368 m³/ha (Abbildung 5-2). Zwischen den drei Szenarien kommt es zu deutlichen Baumartenverschiebungen bezüglich der Vorratsanteile (Tabelle 5-1). Im Jahr 2012 setzte sich der mittlere Holzvorrat von 356 m³/ha aus 18 % Buche, 10 % Eiche, 11 % anderen Laubbäumen, 32 % Fichte, 21 % Kiefer und 8 % anderen Nadelbäumen zusammen. Laubbäume machten also zusammen 39 % des mittleren Vorrats aus, die Douglasie 2 %. Im Basis- und Holzscenario erhöhen sich die relativen Vorratsanteile von Laubholz pro Hektar. Im Holzscenario passiert dies bis 2052 vor allem durch eine Verringerung der Nadelholzvorräte, die stark genutzt werden. Im Basisszenario erreicht der Laubholzanteil 2102 48 % des Vorrats, im Holzscenario sogar 54 %.

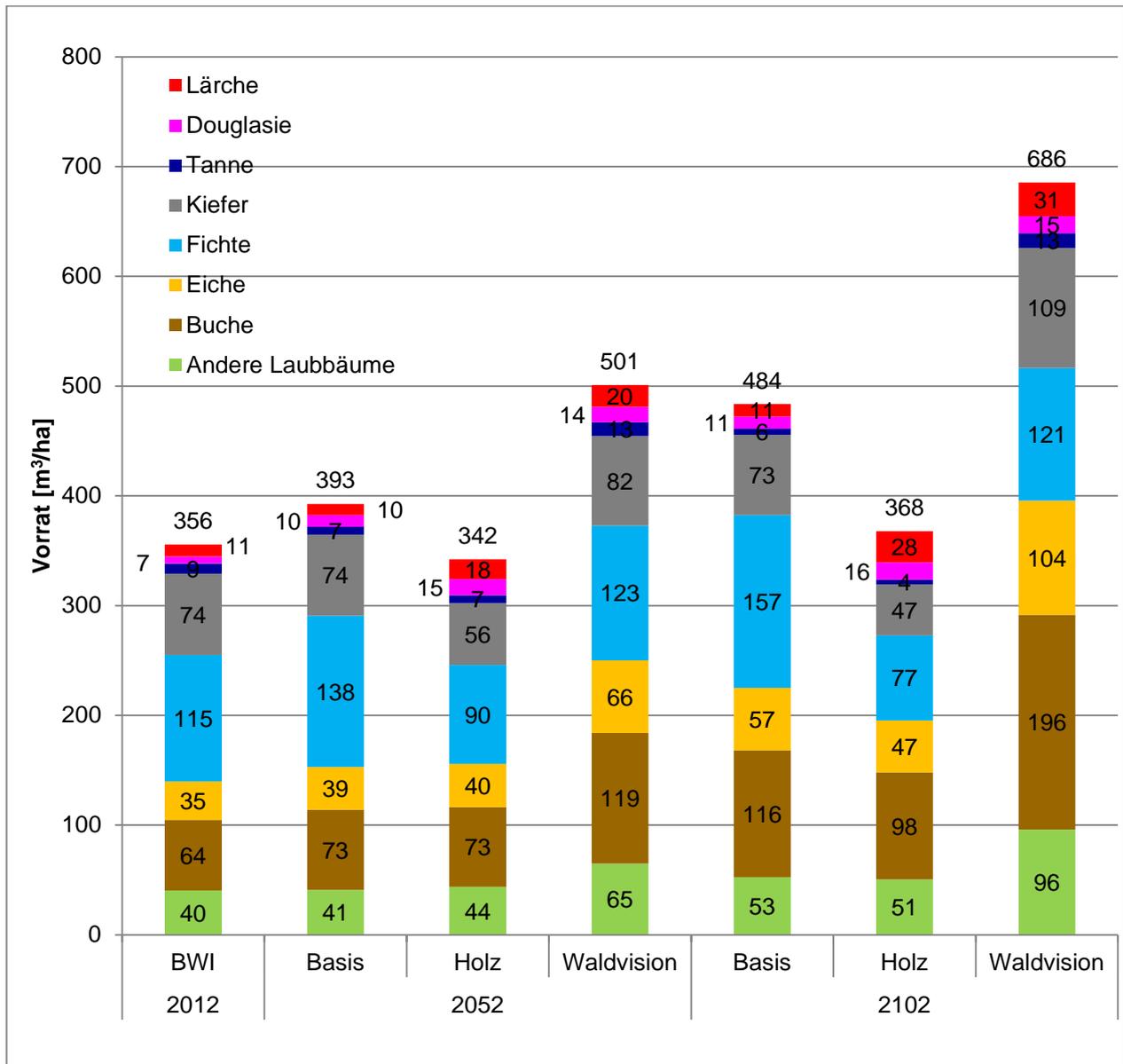
Im Szenario Waldvision steigt der mittlere Holzvorrat absolut für alle Baumartengruppen an, bis auf die Fichte, bei der er konstant bleibt (Abbildung 5-2, Tabelle 5-1). Deren relativer Anteil am mittleren Vorrat verringert sich aber deutlich von 32 % im Jahr 2012 auf 18 % im Jahr 2102. In relativen Anteilen sinkt auch der Beitrag der Kiefer zum Vorrat (16 % in 2102), andere Nadelbäume halten im Mittel ihre prozentualen Anteile. Der Laubholzanteil wächst insgesamt bis 2102 auf 58 %, darunter macht die Buche allein 29 % aus und stellt damit die Hälfte des Laubholzvorrats. Hervorzuheben ist, dass im Jahr 2102 im Szenario Waldvision der Vorrat von Buche um 69 %, für Eiche um 55% und für andere Laubbäume um 81% höher liegt als im Basisszenario.

Abbildung 5-1: Holzvorrat im Wald, Entwicklung 2002-2102, Werte für 2002 und 2012 aus der Bundeswaldinventur (BWI-3)



Quelle: eigene Darstellung, FABio-Ergebnisse und Daten der BWI Ergebnisdatenbank, sowie Ergebnisse des WEHAM Basisszenarios (<https://bwi.info/>)

Abbildung 5-2: Mittlerer Holzvorrat in Deutschland im Jahr 2012 laut BWI-3 und in verschiedenen Szenarien im Jahr 2052 und 2102 nach Baumartengruppen



Quelle: eigene Darstellung, FABio-Ergebnisse und Daten der BWI Ergebnisdatenbank (<https://bwi.info/>)

Tabelle 5-1: Relative Anteile der Baumartengruppen am Vorrat

		Andere Laubbäume	Buche	Eiche	Fichte	Kiefer	Tanne	Douglasie	Lärche
2012	BWI-3	11%	18%	10%	32%	21%	3%	2%	3%
2052	Basis	10%	19%	10%	35%	19%	2%	3%	3%
	Holz	13%	21%	12%	26%	17%	2%	4%	5%
	Waldvision	13%	24%	13%	25%	16%	3%	3%	4%
2102	Basis	11%	24%	12%	33%	15%	1%	2%	2%
	Holz	14%	27%	13%	21%	13%	1%	4%	8%
	Waldvision	14%	29%	15%	18%	16%	2%	2%	4%

Quelle: eigene Darstellung, FABio-Ergebnisse und Daten der BWI Ergebnisdatenbank (<https://bwi.info/>)

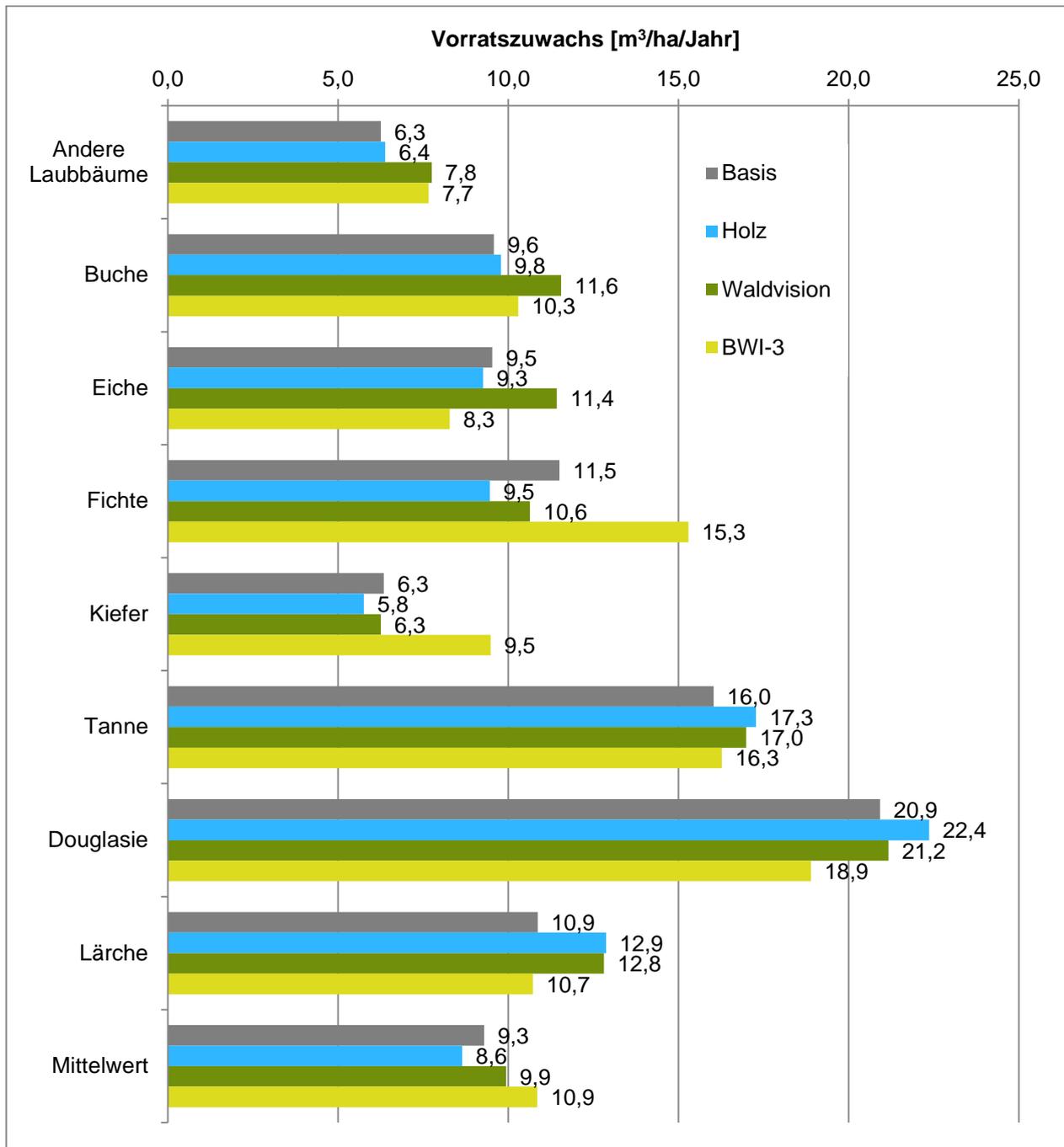
5.2. These 2: Erhalt bzw. Erhöhung des Zuwachses

Die Auswirkungen verschiedener Bewirtschaftungsstrategien auf den Holzzuwachs sind weniger ausgeprägt (Abbildung 5-3) als die Entwicklung des Vorrats. Allerdings lassen sich einige Trends ausmachen. Die produktivste Baumart in allen Szenarien ist die Douglasie, die im HolzszENARIO einen mittleren Zuwachs über den Betrachtungszeitraum von 2012-2102 von 22,4 m³/Jahr/ha erreicht. Die geringste Produktivität weist in allen drei Szenarien die Kiefer auf. Sie liegt mit einem mittleren Zuwachs von 5,8-6,3 m³/Jahr/ha deutlich hinter jeder anderen Baumart. Eine Änderung der Bewirtschaftung nach den Regeln des Szenarios Waldvision führt zu einer Erhöhung des Zuwachses von Laubbäumen, die im 90-Jahresmittel 2012-2102 im Vergleich zum Basisszenario um 20-24 % stärker zuwachsen als im Basisszenario. Im HolzszENARIO ändert sich für die Laubbaumarten der mittlere Zuwachs gegenüber dem Basisszenario kaum. Das Wachstum der Nadelbäume erhöht sich im Szenario Waldvision dagegen nur leicht im Vergleich zum Basisszenario (Tanne, Douglasie) oder verringert sich eher (Fichte, Kiefer). Im Mittel über alle Baumarten stellt das Szenario Waldvision das zuwachsstärkste der drei Szenarien dar. Über die simulierte Periode wachsen die Bäume im Schnitt jährlich 9,9 m³/ha zu. Das sind 7 % mehr als im Basisszenario (9,3 m³/Jahr/ha) und 15 % mehr als im HolzszENARIO (8,6 m³/Jahr/ha).

Die Zuwachsbilanz ergibt sich aus dem Zuwachs, der Mortalität und der Holzernte (inklusive Ernteverluste) und resultiert in der Vorratsveränderung (Abbildung 5-4). Sind Mortalität und Holzernte kleiner als der Zuwachs, so stellt sich eine positive Vorratsveränderung ein (Vorratsaufbau). Übersteigen Mortalität und Holzernte den Zuwachs dagegen, ergibt sich eine negative Vorratsänderung (Vorratsabbau). Besonders im HolzszENARIO ist es auffällig, dass die Holzernte zu Beginn der Simulation sehr hoch ist, da besonders viele Altbestände genutzt werden (Abbildung 5-4). Die Nutzung von mehr als 100 Mio. m³ übersteigt dabei in den ersten zwei Jahrzehnten den Zuwachs, der zwischen 94 und 98 Mio. m³ liegt, und führt damit zum Vorratsabbau. In den Dekaden 2042 bis 2082 findet im HolzszENARIO ein leichter Vorratsaufbau statt. Im Szenario Waldvision führt die Zuwachsbilanz vor allem durch eine im Mittel über die gesamte Periode 25 % geringere Holzernte zu einem deutlich höheren Vorratsaufbau im Vergleich zum Basisszenario. Die Unterschiede zwischen den Szenarien unterliegen einer zeitlichen Dynamik. So ist im Szenario Waldvision der Vorratsaufbau mit 53 Mio.m³/Jahr im Jahr 2052 mehr

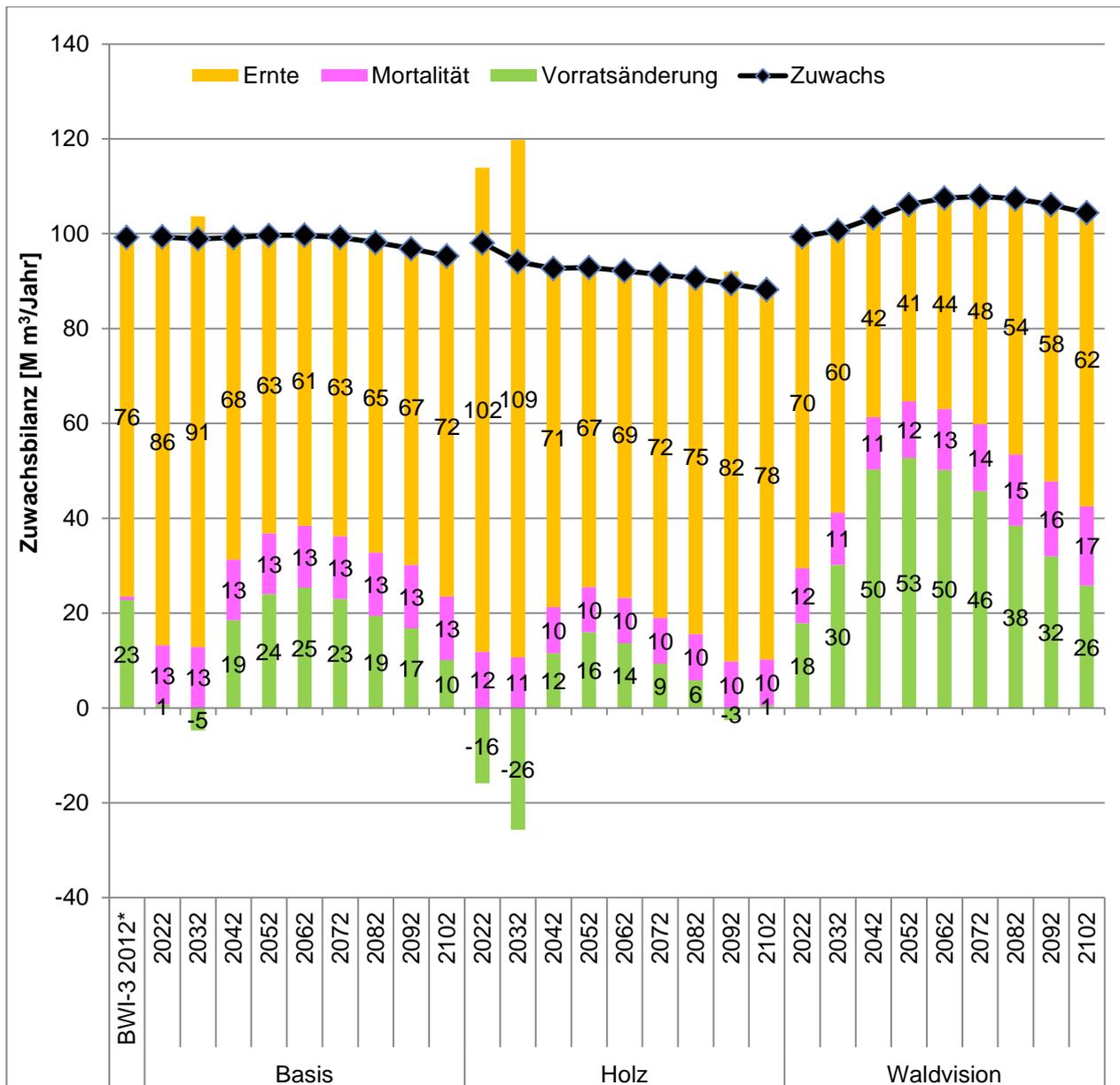
als doppelt so hoch wie im Vergleich zum Basisszenario, das Ernteaufkommen liegt hingegen mit 41 Mio. m³ im Jahr 2052 um 35% niedriger als das Basisszenario (63 Mio. m³). Im Jahr 2102 liegt das Szenario Waldvision im Vorratsaufbau noch immer mehr als doppelt so hoch wie das Basisszenario, erreicht aber mit 62 Mio. m³ ein Ernteaufkommen, das nur 15 % unter dem Basisszenario liegt (Abbildung 5-4).

Abbildung 5-3: Mittlerer jährlicher Vorratszuwachs in den Szenarien (2012-2102) und der BWI-3 (2002-2012) zum Vergleich nach Baumartengruppen



Quelle: eigene Darstellung, FABio-Ergebnisse und Daten der BWI Ergebnisdatenbank (<https://bwi.info/>)

Abbildung 5-4: Jährliche Zuwachsbilanz in 2012 und in den Szenarien bis 2102 in Mio. m³



Quelle: eigene Darstellung, FABio-Ergebnisse und Daten der BWI Ergebnisdatenbank (<https://bwi.info/>).

* Mortalität aus BWI-Daten nur geschätzt.

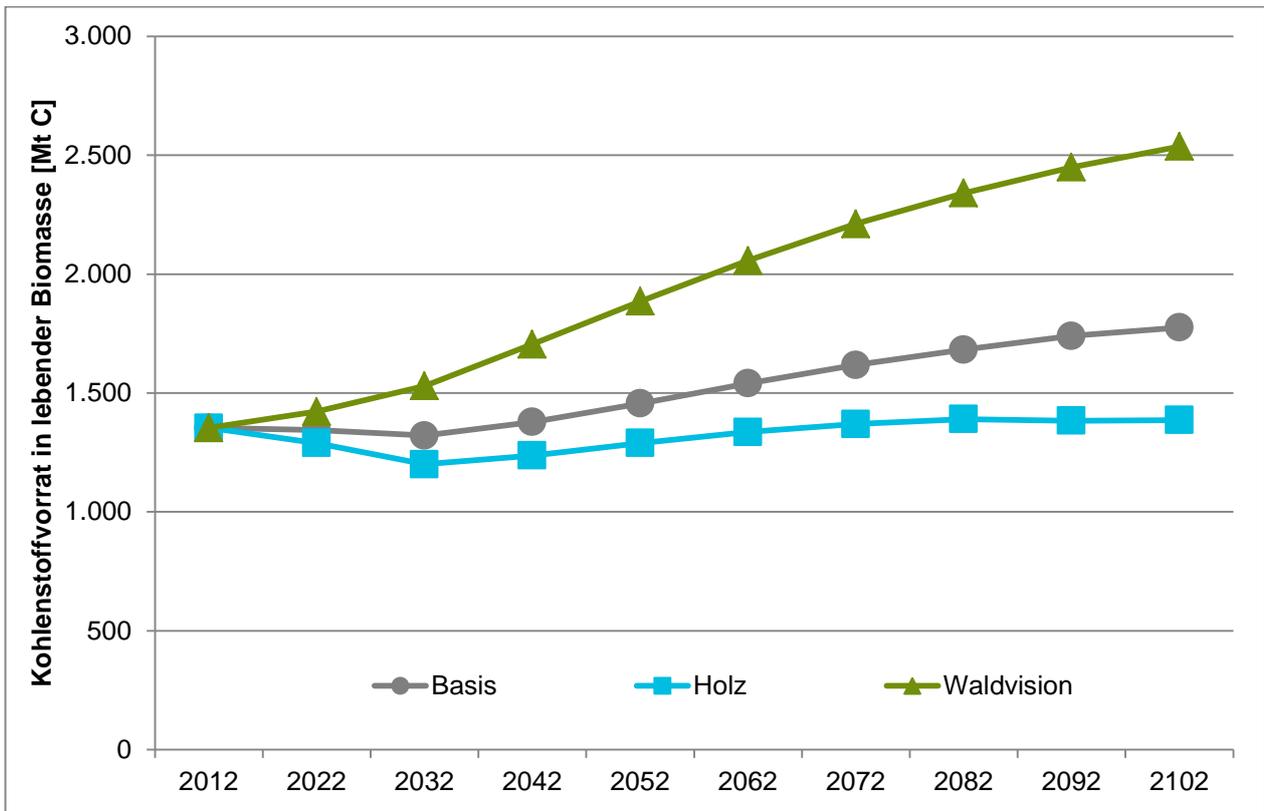
5.3. These 3: Erhöhung des Kohlenstoffvorrats und der CO₂-Senke im Wald, Verbesserung der erweiterten CO₂-Bilanz

Der erhöhte Zuwachs der Bestände im Szenario Waldvision schlägt sich auch in der CO₂-Speicherleistung dieser Wälder nieder. Wenn die Menge an Kohlendioxid, die durch Photosynthese aus der Atmosphäre gebunden wird, die Menge an Kohlendioxid, die durch Absterbe- und Veratmungsprozesse der Bäume wieder entweicht, übersteigt, ist der Wald eine CO₂-Senke und der Kohlenstoffvorrat erhöht sich. Abbildung 5-5 beschreibt die Entwicklung des Kohlenstoffvorrats in der lebenden Biomasse in den drei Szenarien. Im Szenario Waldvision steigt der Kohlenstoffvorrat in oberirdischer und unterirdischer Biomasse bis zum Jahr 2052 um 40 % im

Vergleich zum Jahr 2012, auf 1,9 Mrd. t C. Bis zum Jahr 2102 beträgt die Erhöhung fast 90 %, die Vorräte verdoppeln sich also nahezu auf 2,5 Mrd. t C. Im Vergleich zum Holzvorrat (vgl. Abbildung 5-1), fällt die relative Steigerung der Kohlenstoffvorräte im Szenario Waldvision etwas stärker aus, da der Anteil der Laubbäume am Vorrat zunimmt und diese natürlicherweise eine höhere spezifische Holzdichte und damit auch einen höheren Kohlenstoffgehalt pro Kubikmeter Holz haben. Im Basisszenario werden im gleichen Zeitraum 1,5 Mrd. t C, bzw. 1,8 Mrd. t C erreicht (Abbildung 5-5). Im Holzscenario kommt es zu keiner Erhöhung der Kohlenstoffvorräte. Es treten vielmehr leichte Verluste bis 2052 auf und der Vorrat stabilisiert sich bis 2102.

Neben der lebenden Biomasse speichern auch Totholz, Boden und Holzprodukte Kohlenstoff. Für eine Gesamtbilanz der CO₂-Speicherung sind diese deshalb mit zu betrachten. Durch die Umsetzung der Waldvision auf der ganzen Waldfläche in Deutschland wird im Zeitraum von 2012 bis 2102 eine durchschnittliche CO₂-Senke durch lebende Biomasse von 48 Mio. t CO₂ pro Jahr geschaffen. Zwischen 2012 und 2102 werden in dem Szenario insgesamt 4,5 Mrd. t CO₂ in Biomasse gebunden und der Atmosphäre entzogen. Werden Totholz, Boden und Holzprodukte mitbetrachtet erhöht sich die Speicherleistung im Mittel auf 56 Mio. t CO₂ pro Jahr. In der CO₂-Bilanz stellen Holzprodukte eine Quelle von 7,4 Mio. t CO₂/Jahr dar (Abbildung 5-7, Tabelle 5-2). Damit kann die von Deutschland für das Jahr 2015 berichtete Senke von 54 Mio. t CO₂ im Szenario Waldvision zwar gehalten, aber nicht mehr groß gesteigert werden. Im Holzscenario kompensieren Emissionen durch die starke Holznutzung die Einlagerung von CO₂ durch den Zuwachs nahezu vollständig. Im Mittel über 90 Jahre speichert die lebende Waldbiomasse 1,4 Mio. t CO₂/Jahr. Zählt man die leichte Senke durch Holzprodukte von 1,4 Mio. t CO₂/Jahr und erwartete Speicherungen des Bodens hinzu, liegt die mittlere Senke im Holzscenario bei 17 Mio. t CO₂/Jahr. Allerdings ist der Wald in diesem Szenario bis zum Jahr 2032 eine Quelle für CO₂. Das Basisszenario erreicht insgesamt eine mittlere Speicherleistung von 32 Mio. t CO₂/Jahr, von der etwa die Hälfte auf die lebende Biomasse entfällt.

Abbildung 5-5: Entwicklung des Kohlenstoffvorrats in der lebenden Biomasse im Wald in den Szenarien



Quelle: eigene Darstellung (FABio-Ergebnisse).

Die Berechnung der CO₂-Senkenleistung (siehe Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7) erfolgt über einen Vergleich der periodischen Kohlenstoffvorräte über die Zeit (Vorratsänderungsansatz). Das bedeutet, dass für das erste Jahr, bzw. die erste Periode kein Wert für die CO₂-Senkenleistung ermittelt werden kann. Der erste Wert für die CO₂-Senkenleistung im Jahr 2022 bezieht sich deshalb auf die Periode 2012 bis 2022.

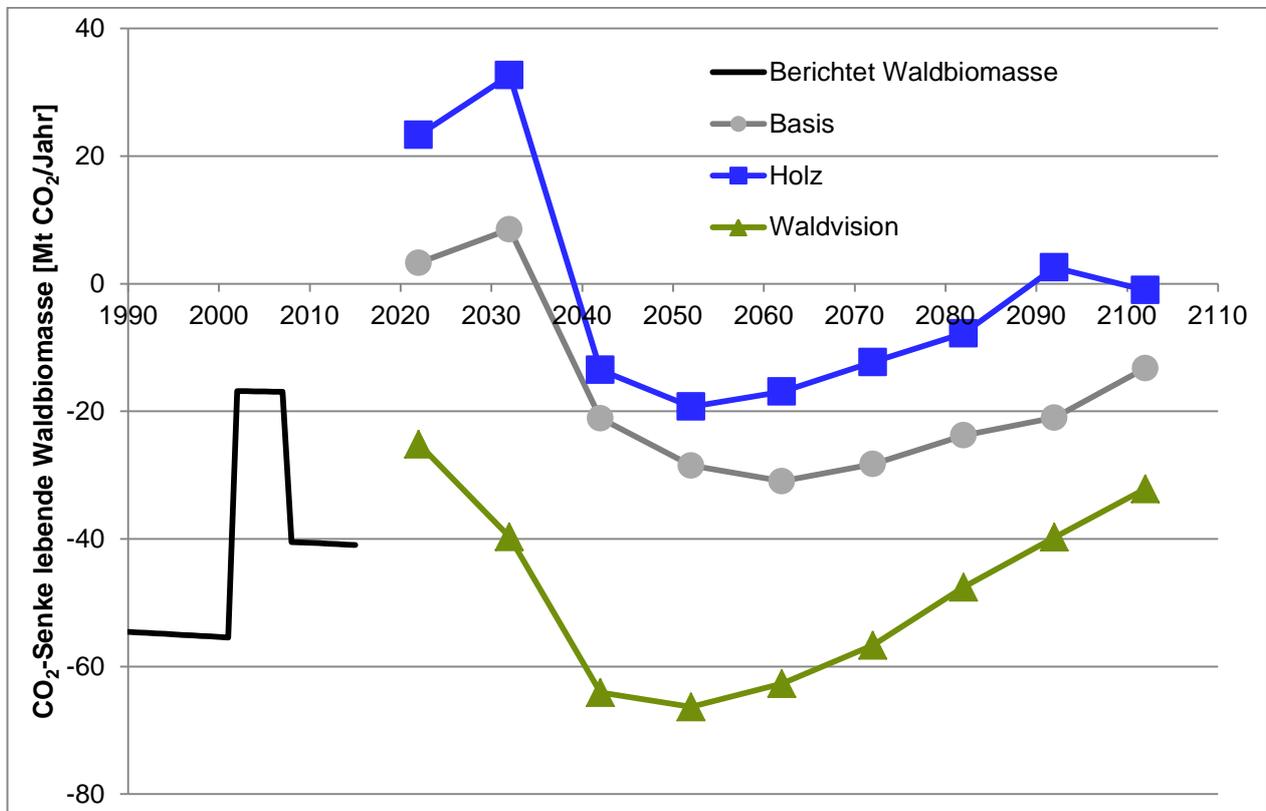
Der historische Verlauf der Waldsenke in Deutschland ist Bestandteil der jährlichen Berichterstattung an die UNFCCC in Form des Nationalen Inventurberichts (UBA, 2017a). Die historische Entwicklung in Abbildung 5-6 basiert auf Auswertung historischer Waldinventuren. Der stark schwankende Verlauf erklärt sich durch das Verfahren der Berechnung. So werden die durch die Bundeswaldinventuren und Zwischeninventuren ermittelten Vorräte als Basis verwendet. Sich ergebende Vorratsänderungen zwischen Erhebungszeitpunkten werden nicht interpoliert, sondern als konstante Rate angenommen. Auf diese Weise kommt es auch in der Kohlenstoffbilanz zu Sprüngen an den Inventurzeitpunkten (Abbildung 5-6).

Tabelle 5-2: Mittlere CO₂-Speicherungsleistung des Waldes und durch Holzprodukte in den Szenarien. Positive Werte stellen eine Quelle, negative Werte eine Senke für CO₂ dar. Werte in Mio. t CO₂ pro Jahr

	Szenario	Lebende Biomasse	Boden und Streu*	Totholz	Holzprodukte	Gesamt
2012-2052	Basis	-9.4	-15.5	0.1	-0.6	-25.5
	Holz	5.8	-15.8	1.1	-2.9	-12.8
	Waldvision	-48.8	-15.2	0.5	13.9	-50.2
2012-2102	Basis	-17.2	-14.8	-0.1	0.2	-31.9
	Holz	-1.4	-15.0	0.6	-1.4	-17.2
	Waldvision	-48.2	-15.0	-0.5	7.4	-56.3

Quelle: eigene Darstellung (FABio-Ergebnisse), Werte für den Boden beinhalten Änderungen zwischen den Szenarien wie vom Modell berechnet und einen empirischen Wert der in der Vergangenheit ermittelten CO₂-Speicherung von -14,6 Mio. t CO₂/Jahr, der allen Szenarien hinzugefügt wurde (UBA, 2017a).

Abbildung 5-6: CO₂-Senkenleistung der lebenden Biomasse im Wald in den Szenarien. Historische Zahlen entsprechen den von Deutschland an die UNFCCC berichteten Daten des aktuellen Inventarberichts (UBA, 2017a). Negative Werte stellen eine Senke, positive Werte eine Quelle von CO₂ dar.



Quelle: eigene Darstellung. FABio-Ergebnisse und UBA, 2017a.

Wird der Holzproduktespeicher durch verringerte Holzernte weniger befüllt, und ändern sich Holzverwendung und Importe über die Simulationszeit nicht ändern, treten vermehrt Emissionen aus dem Holzprodukt pool auf, wenn die Abbaurate den Zufluss an Holz übersteigt. Jedoch sind die Festlegungen von Kohlenstoff im Wald, wenn das Holz dort belassen wird, deutlich höher als die Verluste aus Holzprodukten (Abbildung 5-7). Die Emissionen aus Holzprodukten können theoretisch verringert werden, wenn verstärkt eine Kaskadennutzung umgesetzt wird, die die Holzprodukte länger nutzbar, wiederverwendbar und recyclebar macht und die energetische Nutzung erst ganz ans Ende der Nutzung stellt. Zu solchen Entwicklungen wurden in den Szenarien jedoch keine Annahmen getroffen. Bei der Bewertung der Gesamtklimawirkung der Szenarien ist zu berücksichtigen, dass Substitutionseffekte auftreten. Ändert sich die Verwendung des Holzes nicht und bleibt die Nachfrage nach Produkten gleich, können potenziell Emissionen durch die vermehrte Verwendung von Nicht-Holzprodukten entstehen, die hier ebenfalls nicht berücksichtigt wurden.

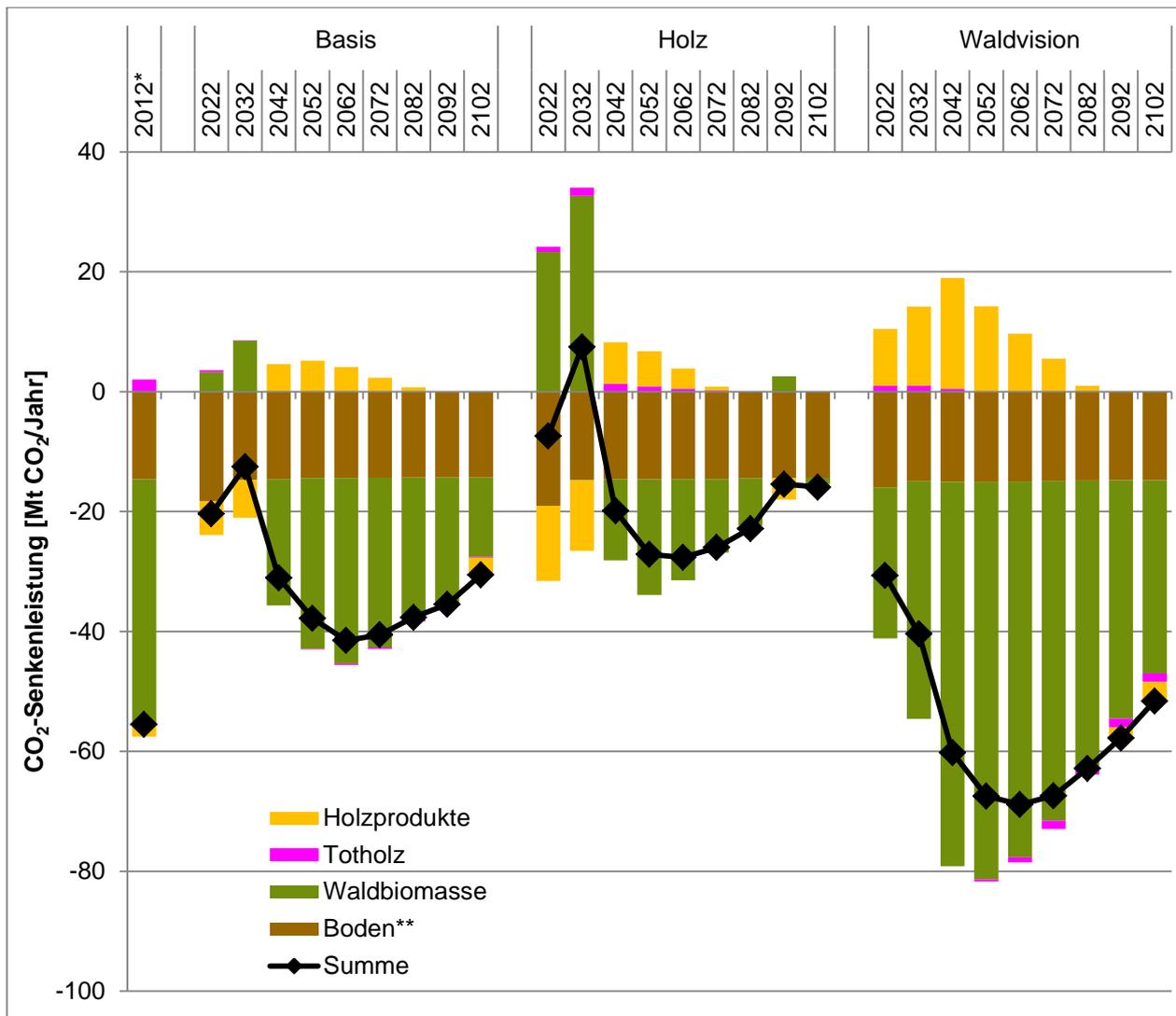
Holz das abstirbt und im Wald verbleibt, gibt nicht allen Kohlenstoff sofort ab. Über verschiedene Zersetzungsstufen unter teilweiser CO₂-Freisetzung wird letztlich schwer abbaubarer Kohlenstoff dem Bodenkohlenstoffpool als Humus zugeführt. Der Boden trug 2015 etwa 14 Mio. t CO₂ zur Senke bei. Änderungen der Bodenkohlenstoffvorräte wurden mit dem Bodenmodell YASSO 05 ermittelt. Das Modell wurde dazu mittels eines Vorlaufs initialisiert (vgl. Kapitel 2.3.2). Dieser Vorlauf bewirkt, dass sich die Kohlenstoffvorräte im Modell nahezu im Gleichgewicht befinden, also bei Fortschreibung der gleichen Bewirtschaftungsweise stabil bleiben. Tatsächlich ist der mineralische Boden unter Wald in Deutschland aber wahrscheinlich eine deutliche Senke. So berichtete es Deutschland an die UNFCCC im jährlichen Inventarbericht (UBA, 2017a). Diese Senke ist u.a. durch die Nutzungsgeschichte bedingt. Um Vergleichbarkeit der Waldsenke mit historischen Daten zu erhalten wurde die Änderung der Kohlenstoffvorräte aus dem Modell um die historischen Emissionen korrigiert. Die Unterschiede zwischen den Szenarien selbst sind daher sehr gering. Diese Beobachtung deckt sich mit Literaturdaten, die bisher keine starken Auswirkungen einer Bewirtschaftung auf den Bodenkohlenstoff feststellen konnten, solange Waldrestholz im Wald verbleibt (z. B. Achat et al., 2015b).

Das Pariser Klimaschutzabkommen aus dem Jahr 2015 als Vereinbarung von 195 Mitgliedsstaaten der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) hat das Ziel, die menschengemachte globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C gegenüber vorindustriellen Werten zu begrenzen. Es ist das Nachfolgeabkommen des Kyoto-Protokolls. Die Europäische Union hat sich als Beitrag zum Pariser Abkommen das Ziel gesetzt, ihre Treibhausgase bis 2030 um 40 % im Vergleich zu 1990 zu verringern. Dabei soll auch die Bewirtschaftung von Wäldern eine Rolle spielen. Im Juli 2016 veröffentlichte die EU Kommission einen Vorschlag wie Waldbewirtschaftung auf das Klimaziel anzurechnen sei. Dazu sollen, wie auch schon unter dem Kyoto-Protokoll, Referenzwerte ermittelt werden, die die zukünftige Senkenleistung des Waldes schätzen, unter der Annahme, dass die Bewirtschaftungsintensität der Vergangenheit sich nicht verändert. Der Vorschlag sieht vor, dass dazu keine Annahmen über den zukünftigen Holzbedarf gemacht werden, sondern, so wie in dieser Studie vorgenommen, die Bewirtschaftungsregeln der Vergangenheit fortgeschrieben werden. Die tatsächlich erzielte Senkenleistung in der Anrechnungsperiode 2020-2030 wird dann mit diesem Referenzniveau verglichen. Eine positive Abweichung würde als Gutschrift, eine negative Abweichung als Lastschrift bilanziert werden.

Das vorgestellte Basisszenario stellt eine Fortschreibung der historischen Bewirtschaftungsintensität dar, so dass die Ergebnisse des Basisszenarios als Referenzwert für den Anrechnungszeitraum dienen können. Das Referenzniveau des Waldes in Deutschland für Waldbiomasse, Boden und Holzprodukte würde demnach für 2020 bis 2030 etwa 22 Mio. t CO₂/Jahr betragen (siehe Basisszenario in den Jahren 2022 und 2032 in Abbildung 5-7).

Gegen diesen Referenzwert würde Deutschland durch Umsetzung des Holz Szenarios eine Lastschrift von 16 Mio. t CO₂/Jahr erwarten. Die Umsetzung der Waldvision würde dagegen Gutschriften von etwa 28 Mio. t CO₂/Jahr in der Verpflichtungsperiode 2020-2030 verbuchen.

Abbildung 5-7: CO₂-Bilanz der Biomasse im Wald (lebende Biomasse und Totholz), des Bodens und des Holzproduktspeichers im Zeitverlauf abgeleitet von Änderungen im Kohlenstoffvorrat.



Quelle: eigene Darstellung (FABio-Ergebnisse). * die von Deutschland an UNFCCC berichteten Werte für 2012 aus dem National Inventory Report (UBA, 2017a). ** Änderungen im Boden wurden geschätzt und auf Basis der nationalen Berichterstattung extrapoliert.

5.4. These 4: Erhöhung des Anteils starker Bäume im Wald

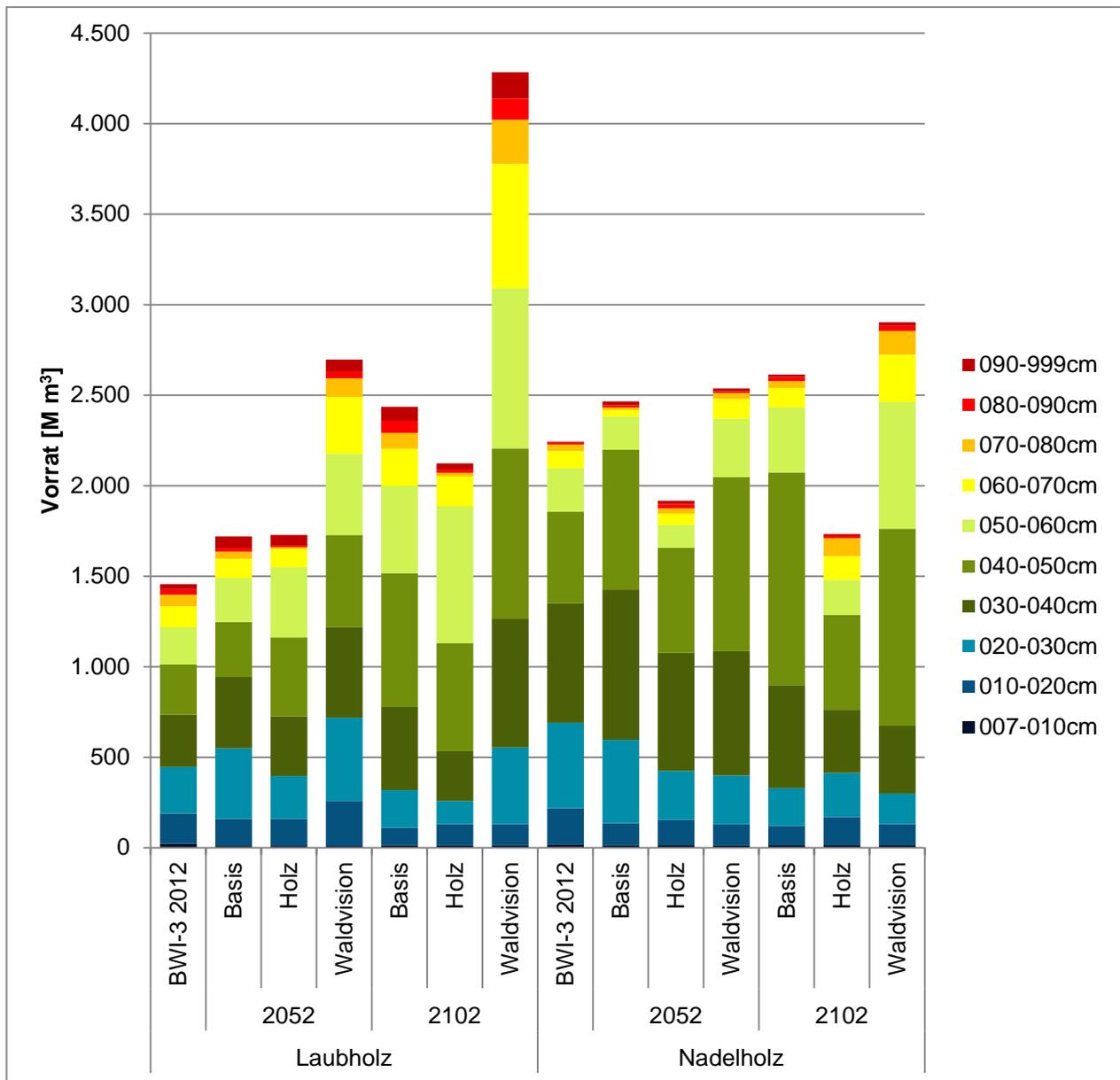
In Abbildung 5-8 sind – getrennt nach Laub- und Nadelbäumen – die Holzvorräte nach Durchmesserklassen für die Jahre 2012, 2052 und 2102 dargestellt. Tabelle 5-2 gibt die entsprechende prozentuale Verteilung an. Anhand der Verteilung des Vorrats über verschiedene Durchmesserklassen lassen sich Aussagen über die Bestandesstrukturen und den Anteil alter,

bzw. starker Bäume im Wald machen. Die Bewirtschaftungsart hat auf das Vorkommen starker Bäume einen wesentlichen Einfluss. Im Basisszenario konzentriert sich der Vorrat im Nadelholz mit 45 % stark auf die Durchmesserklassen 40 bis 50 cm. Der Anteil des Vorrats der Nadelbäume bis 50 cm Durchmesser beträgt im Jahr 2102 insgesamt 79 %, im Holzscenario machen diese 74 % aus. Im Szenario Waldvision dagegen nimmt die Konzentration auf das Starkholz zu. Auf die Durchmesserklassen bis 50 cm entfallen hier 61 % des Vorrats.

Bei Laubbäumen stellen im Jahr 2102 im Basisszenario die Bäume mit einem Durchmesser bis 60 cm mit 81 % den größten Anteil des Vorrats. Im Holzscenario entfallen in 2102 sogar 89 % der Laubbäume auf Durchmesserklassen bis 60 cm. Im Szenario Waldvision nehmen hingegen bis zum Jahr 2102 Laubbäume in den Durchmesserklassen bis 60 cm 72 % ein. Aus Naturschutzsicht sind insbesondere die Durchmesserklassen der Laubbäume über 80 cm von Bedeutung, da in starkdimensionierten Bäumen meist deutlich mehr Habitatstrukturen für gefährdete Arten zu finden sind. Laubbäume über 80 cm Durchmesser machen im Holzscenario im Jahr 2102 2,4 % (50 Mio. m³) des Vorrats aus, im Basisszenario 5,9 % (144 Mio. m³) und im Szenario Waldvision 6,1 % (262 Mio. m³). Der absolute Anstieg von Laubbäumen größer 80 cm im Szenario Waldvision entspricht einer Erhöhung um 80 % gegenüber dem Basisszenario.

Im Szenario Waldvision können sich die Vorräte im Laubstarkholz vor allem dadurch entwickeln, dass in den mittlern Durchmesserklassen weniger eingeschlagen wird und mehr Laubbäume „durchwachsen“ können. Diese Entwicklungsmöglichkeit wird im Holzscenario durch starke Durchforstungen in mittleren Durchmessern unterbunden. Zudem werden im Szenario Waldvision bestehende starke Durchmesserklassen nicht oder nur sehr extensiv genutzt. Einen Beitrag leisten auch die zusätzlichen Flächen ohne Holznutzung, unter denen sich vor allem Altbestände befinden.

Abbildung 5-8: Durchmesserverteilung des Holzvorrates (verbleibender Bestand) nach Laub- und Nadelholzgruppe in 2012 und in den Szenarien im Jahr 2052 und 2102



Quelle: eigene Darstellung, FABio-Ergebnisse und Daten der BWI Ergebnisdatenbank (<https://bwi.info/>).

Tabelle 5-3: Durchmesserverteilung des verbleibenden Bestandes nach Laub- und Nadelholzgruppe in 2012 und in den Szenarien im Jahr 2102 in %

Baumartengruppe	Laubholz				Nadelholz			
	2012		2102		2012		2102	
Jahr	BWI-3	Basis	Holz	Waldvision	BWI-3	Basis	Holz	Waldvision
007-010cm	1,6%	0,5%	0,5%	0,3%	0,7%	0,5%	0,9%	0,5%
010-020cm	11,3%	4,0%	5,6%	2,8%	9,0%	4,1%	8,9%	4,0%
020-030cm	17,8%	8,5%	6,0%	9,9%	21,1%	7,9%	14,1%	5,9%
030-040cm	19,8%	18,9%	12,9%	16,6%	29,4%	21,8%	20,1%	12,9%
040-050cm	19,0%	30,3%	28,1%	22,0%	22,6%	45,0%	30,2%	37,4%
050-060cm	14,1%	19,8%	35,6%	20,6%	10,7%	13,7%	11,2%	24,2%
060-070cm	8,0%	8,4%	7,8%	16,0%	4,3%	4,1%	7,6%	9,0%
070-080cm	4,5%	3,6%	0,9%	5,7%	1,6%	1,4%	5,7%	4,5%
080-090cm	2,0%	2,8%	0,9%	2,7%	0,5%	0,9%	0,9%	0,9%
090-999cm	1,9%	3,2%	1,5%	3,4%	0,2%	0,5%	0,4%	0,7%

Quelle: eigene Darstellung, FABio-Ergebnisse und Daten der BWI Ergebnisdatenbank (<https://bwi.info/>).

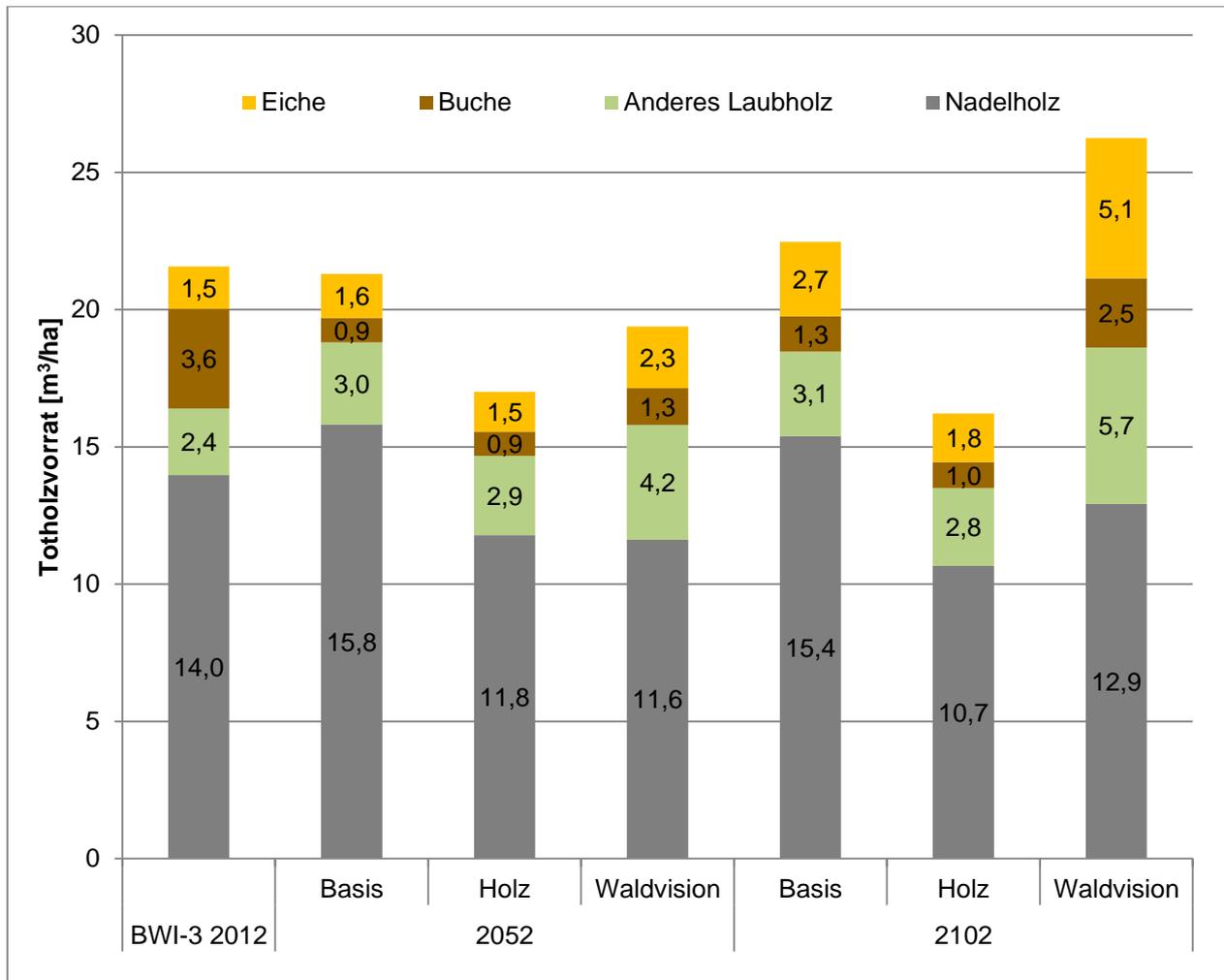
5.5. These 5: Erhöhung des Totholzvorrats

In Abbildung 5-9 sind die modellierten Totholzvorräte im Jahr 2052 und 2102 für die drei Szenarien dargestellt. Zum Vergleich werden die aus der BWI-3 ermittelten Werte für 2012 aufgeführt. Im Mittel erreicht die Totholzmenge im Jahr 2052 im Szenario Waldvision 19 m³/ha. Im HolzszENARIO liegt sie mit 17 m³/ha etwas niedriger, im Basisszenario mit 21 m³/ha darüber. Erst 2102 differenzieren sich die Vorräte stärker. Im Basisszenario liegen diese dann im Mittel bei 22 m³/ha, im HolzszENARIO bei 16 m³/ha und in der Waldvision bei 26 m³/ha.

Allerdings treten schon früh Verschiebungen in der Zusammensetzung des Totholzes auf. So erhöht sich im Szenario Waldvision der Anteil der Eiche am mittleren Totholzvorrat besonders stark. Diese erreichen 2052 mit 2,3 m³/ha 40 % und 2102 mit 5,1 m³/ha fast 90 % höhere Vorräte als im Basisszenario (1,6 bzw. 2,7 m³/ha). Auch die Vorräte an Buchentotholz liegen in der Waldvision in ähnlicher Größenordnung über denen des Holz- und des Basisszenarios. Im Vergleich zu den durch die BWI-3 ermittelten Werten, sinken Totholzvorräte für Buche bis 2052 und auch 2102 in allen Szenarien. Ursache dafür ist zum einen die relativ geringe Mortalität der Buche und eine relativ schnelle Abbaurate im Vergleich zu anderen Baumartengruppen. Als Startwerte für das Modell wurden die mittleren Totholzvorräten aus der BWI verwendet. Diese Form der Initialisierung ist schwierig und mit Fehlern behaftet, da die Modelllogik nicht zwangsläufig die beobachteten Vorräte erklären kann. Für eine adäquatere Initialisierung wären umfangreiche Modellläufe der historischen Bewirtschaftung notwendig, die nicht realisierbar sind. So ist die beobachtete Abnahme in den Szenarien zum Teil auch ein Artefakt der Modellierung.

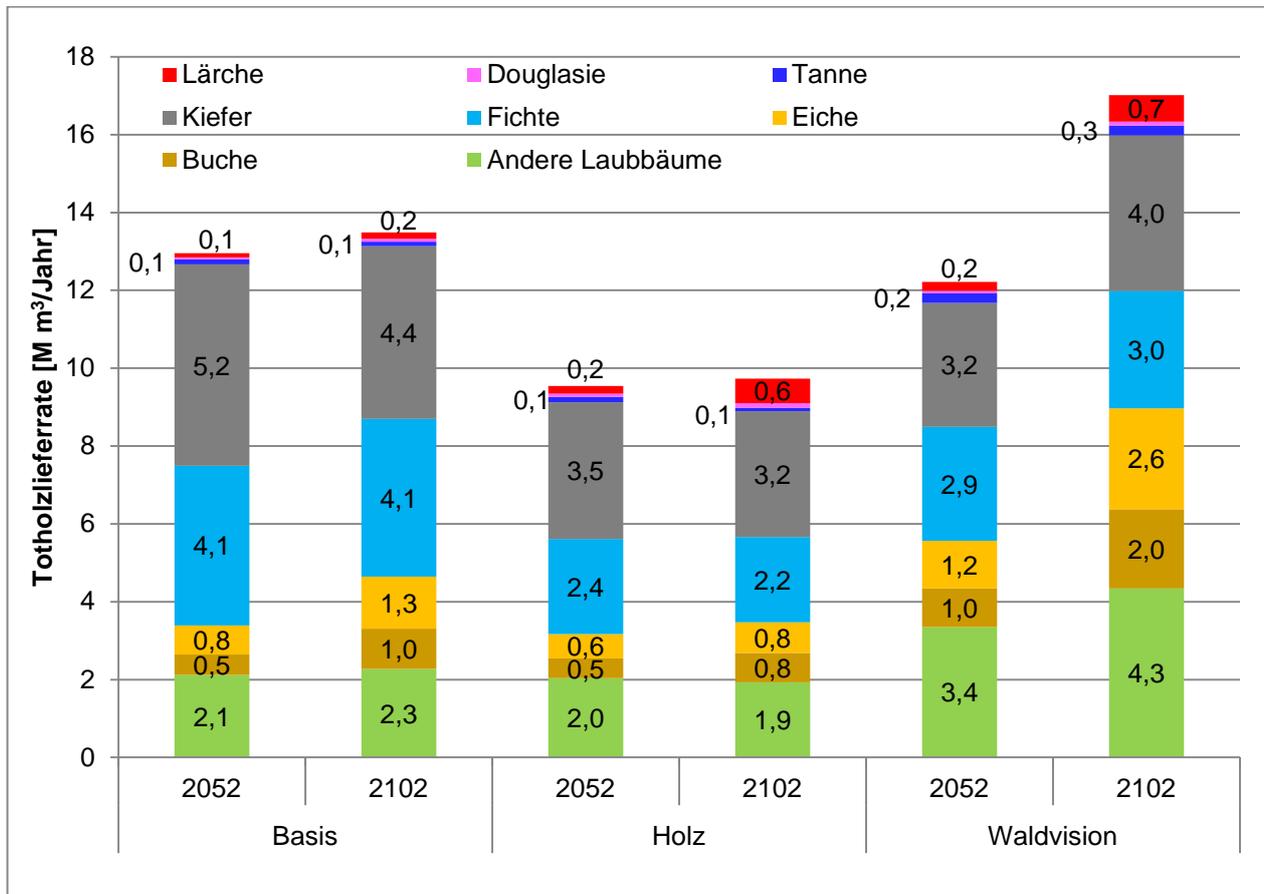
Abbildung 5-10 zeigt die Totholzlieferrate oder auch natürliche Mortalität im zeitlichen Verlauf der drei Szenarien. Das Mortalitätsmodell berechnet das Absterben von Bäumen in Abhängigkeit von Baumart, Alter, Durchmesser aber auch Bestandesdichte. Im Basisszenario steigt letztere leicht zwischen 2052 und 2102 mit den Bestandesvorräten an. Im HolzszENARIO liegt sie in beiden Jahren unter dem Basisszenario. In der Waldvision bleibt die Mortalität 2052 noch auf dem Niveau des Basisszenarios, steigt dann stark an, besonders im Bereich des Laubholzes.

Abbildung 5-9: Anteile der wichtigsten Baumartengruppen am mittleren Totholzvorrat im Jahr 2012 (BWI-3) 2052 und 2102



Quelle: eigene Darstellung, FABio-Ergebnisse und Daten der BWI Ergebnisdatenbank (<https://bwi.info/>).

Abbildung 5-10: Totholzlieferrate verschiedener Baumartengruppen in den Jahren 2052 und 2102 für die drei Szenarien



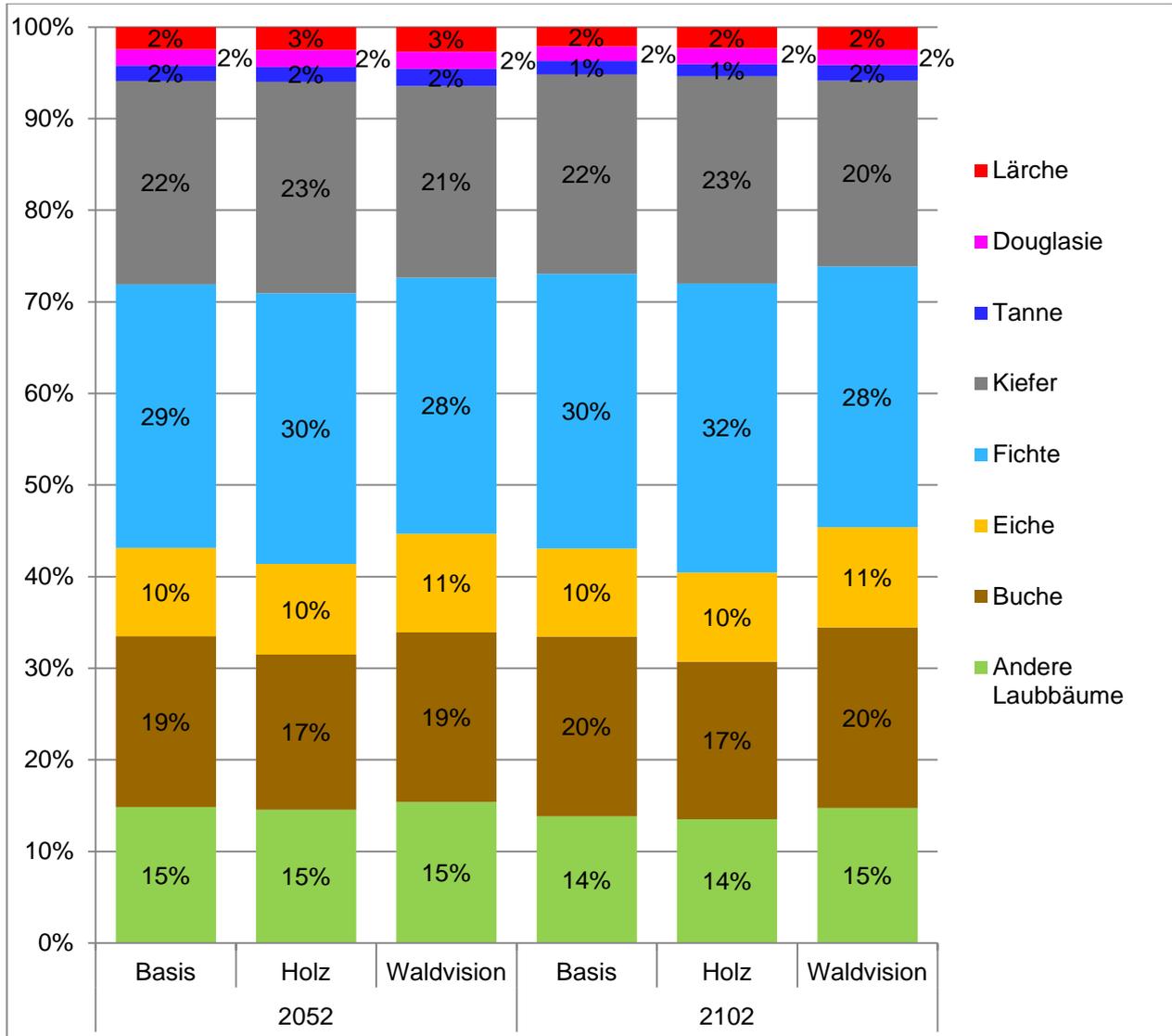
Quelle: eigene Darstellung (FABio-Ergebnisse).

5.6. These 6: Erhöhung der Naturnähe und des Laubholzanteils

Abbildung 5-11 macht deutlich, dass sich die Baumartenanteile an der Fläche weniger stark verschieben als die Vorratsanteile (Vergleich Abbildung 5-2). Im Basisszenario findet über die Modelllaufzeit von 2012 bis 2102 eine leichte Verschiebung zu mehr Fläche mit Laubholz statt (+ 100.000 ha, ca. 1 % der Waldfläche in Deutschland). Im HolzszENARIO geht die Fläche mit Laubholz dagegen um 140.000 ha (1,4 %) zurück. Dort profitiert vor allem die Fichte. Im Jahr 2102 liegt der Laubholzanteil an der Fläche im Szenario Waldvision dagegen um etwa 350.000 ha (3,3 %) höher im Vergleich zu 2012 und 250.000 ha (2,4 %) höher als zum selben Zeitpunkt im Basisszenario und zwar auf Kosten der Fläche an Nadelwald. Laubbäume bedecken damit im Jahr 2102 47 % der Fläche im Szenario Waldvision. Dabei nimmt vor allem die Buche an Fläche im Vergleich zum Start des Modells zu (ca. 250.000 ha; 2,4 %). Die Zugewinne an Laubholzfläche finden auf Standorten statt, auf denen als natürliche Vegetation auch Laubbäume erwartet werden. Auf diese Weise erhöht sich potenziell auch die Naturnähe des Waldes für diese Standorte. Bei der Umsetzung des Waldumbaus finden jedoch keine Pflanzungen statt sondern nur eine Steuerung des Nachwuchses der vorkommenden Baumarten. Diese werden zunächst durch die im Bestand vorkommenden Baumarten im Altbestand bestimmt, ergänzt durch eine Zufallsstreuung anderer Arten. Deshalb vollzieht sich der Umbau insgesamt mit relativ geringen Flächenänderungen pro Jahr.

In der Summe zeigt sich in Kombination mit den Ergebnissen zur Veränderung der Vorräte und der Veränderung der Zusammensetzung der Durchmesserklassen je Baumart, dass sich insbesondere Laubwälder hin zu natürlicheren Beständen entwickeln, die sich durch erhöhte Vorräte vor allem bei stärker dimensionierten Laubbäumen auszeichnen.

Abbildung 5-11: Anteile der Baumartengruppen an der Fläche



Quelle: eigene Darstellung (FABio-Ergebnisse).

5.7. These 7: Verringerung und Verlagerung des Holzaufkommens

Die Umsetzung der Annahmen im Szenario Waldvision führt durch die Einstellung der Holznutzung auf zusätzlichen 12,5% der Waldfläche und die Verringerung der Nutzungsintensität auf der gesamten bewirtschafteten Waldfläche wie erwartet zu einem geringerem Holzaufkommen. Abbildung 5-12 stellt das mittlere Holzaufkommen der Periode 2012-2102 für die einzelnen Baumartengruppen in den drei Szenarien dar.

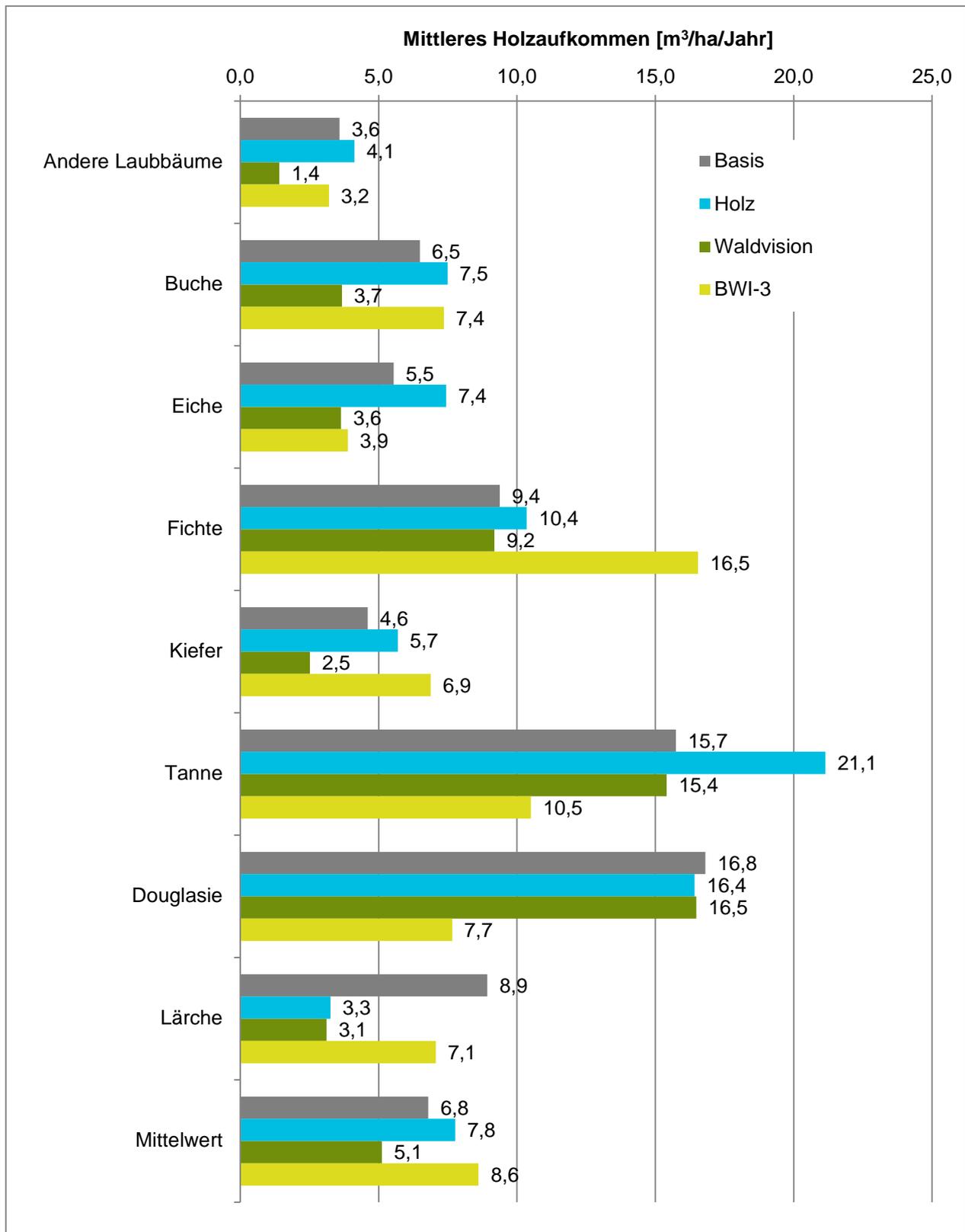
Über den Zeitraum von 90 Jahren (2012-2102) verringert sich das mittlere Holzaufkommen im Szenario Waldvision mit $5,1 \text{ m}^3/\text{Jahr}/\text{ha}$ gegenüber dem Basisszenario ($6,8 \text{ m}^3/\text{Jahr}/\text{ha}$) im Mittel um 25 %. Im Holzscenario kann dagegen mit $7,8 \text{ m}^3/\text{Jahr}/\text{ha}$ 14 % potenziell mehr als im Basisszenario geerntet werden. Dabei weist das Basisszenario im Mittel ein geringeres Holzaufkommen aus, als zwischen 2002 und 2012 laut BWI in Deutschland tatsächlich eingeschlagen wurde ($8,6 \text{ m}^3/\text{Jahr}/\text{ha}$). Nach einem durch Sturmereignisse sehr hohen Holzeinschlag in den Jahren 2006 und 2007 ging dieser zuletzt leicht zurück (Jochem et al., 2013) und lag im Jahr 2015 bei etwa $8 \text{ m}^3/\text{Jahr}/\text{ha}$.⁸ Die Szenarien beschreiben den nach den im Modell umgesetzten Bewirtschaftungsregeln nachhaltigen möglichen Einschlag. Diese Mengen stellen also vielmehr die potenziell nutzbare Holzmenge dar als die tatsächlich geerntete Menge, die von der Nachfrage nach Holz und anderen Bedingungen abhängt, die bei der Modellierung nicht berücksichtigt wurden.

Die Analyse der Zeitreihe zur Erntemenge in Abbildung 5-4 (siehe Kapitel 5.2) zeigt, dass in den Jahren 2023 bis 2052 die Erntemenge im Szenario Waldvision um 36 % niedriger liegt als im Basisszenario. In den letzten drei Dekaden reduziert sich dieser Wert auf 15 %. Für den Zeitraum nach 2102 ist zu erwarten, dass dieser Unterschied in der Erntemenge weiter abnimmt. Das Holzaufkommen von Fichtenholz im Vergleich zu anderen Szenarien ändert sich durch die intensive Nutzung der Baumart im Szenario Waldvision kaum.

Abbildung 5-13 zeigt die Einschlagsmenge in der ersten Hälfte und der zweiten Hälfte des Betrachtungszeitraums. Daraus wird deutlich, dass insgesamt die Verringerung des Holzaufkommens im Szenario Waldvision nicht dauerhaft ist, sondern gegen Ende des Projektionszeitraums das Aufkommen wieder steigen wird. Zu diesem Zeitpunkt gibt es auch eine Verlagerung des Holzaufkommens zu mehr Starkholz, insbesondere bei den Laubbaumarten. So werden im Szenario Waldvision im Zeitraum von 2053 bis 2102 im Mittel 9 Mm^3 Laubholz in der Durchmesserklasse 60-70 cm und $1,7 \text{ Mm}^3$ Laubholz in der Durchmesserklasse 70-80 cm geerntet. Im Basisszenario liegen die Werte für diese Durchmesserklassen lediglich bei 1 Mm^3 bzw. bei $0,2 \text{ Mm}^3$. Eine Änderung der Holzverwendung wurde nicht explizit modelliert. Durch den höheren Anteil von Starkholz ergeben sich allerdings automatisch leichte Änderungen in der Sortierung. Tatsächlich stellt das vermehrte Aufkommen von Starkholz eine technologische Herausforderung für Holzernte und Sägeindustrie dar. Die in Deutschland in den letzten Jahren im Zuge der Mechanisierung entwickelten Ernteverfahren mit sogenannten Vollerntern sind für schwaches und mittelstarkes Holz geeignet. Ein höheres Starkholzaufkommen würde deshalb wieder mehr motormanuelle Verfahren erfordern, die besseren Bodenschutz und Bodenpflege ermöglichen. Durch stärkere Sortimenten werden nicht immer auch höhere Erlöse erzielt. Eine Entwertung des Holzes mit höherem Alter stellt ebenfalls ein Risiko dar. Flankierende Maßnahmen zur Aktivierung von Wertschöpfungspotenzialen bei der Verwendung von Starkholz sind daher wichtig (Bäuerle et al., 2009).

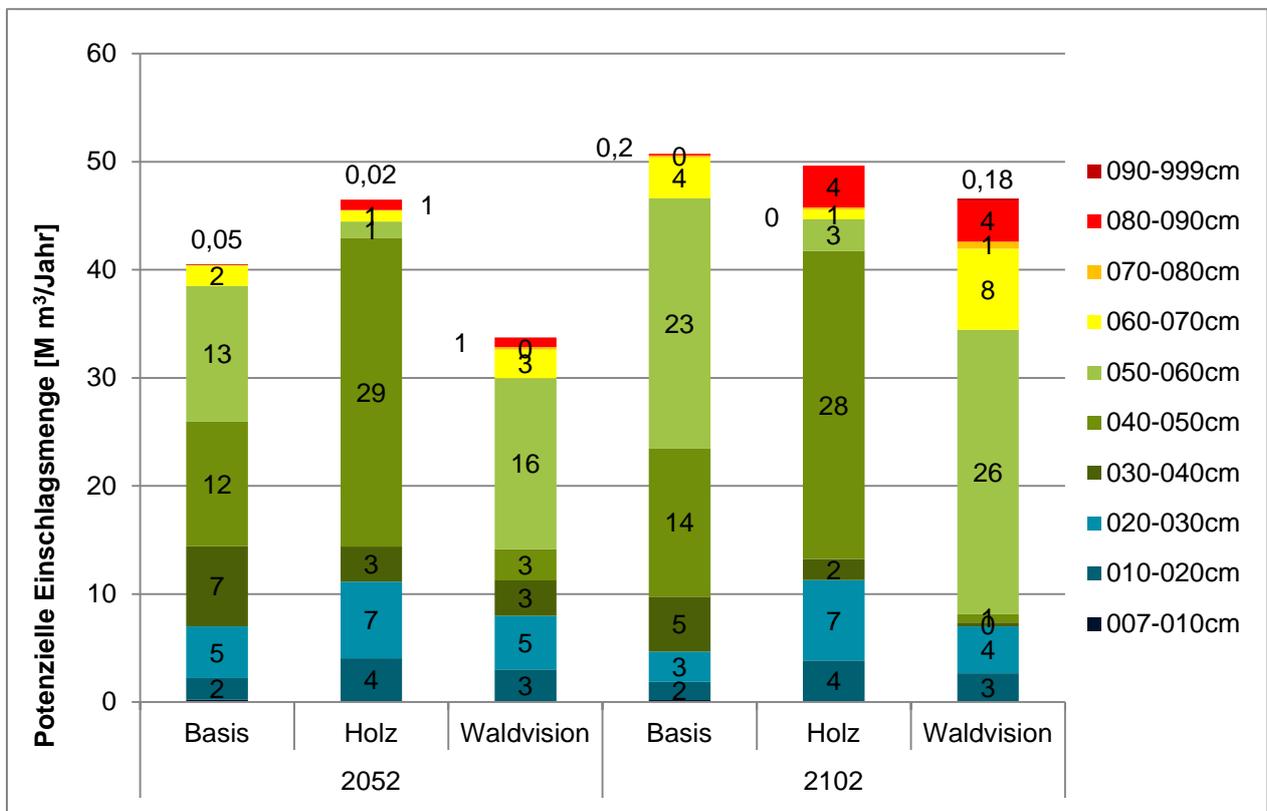
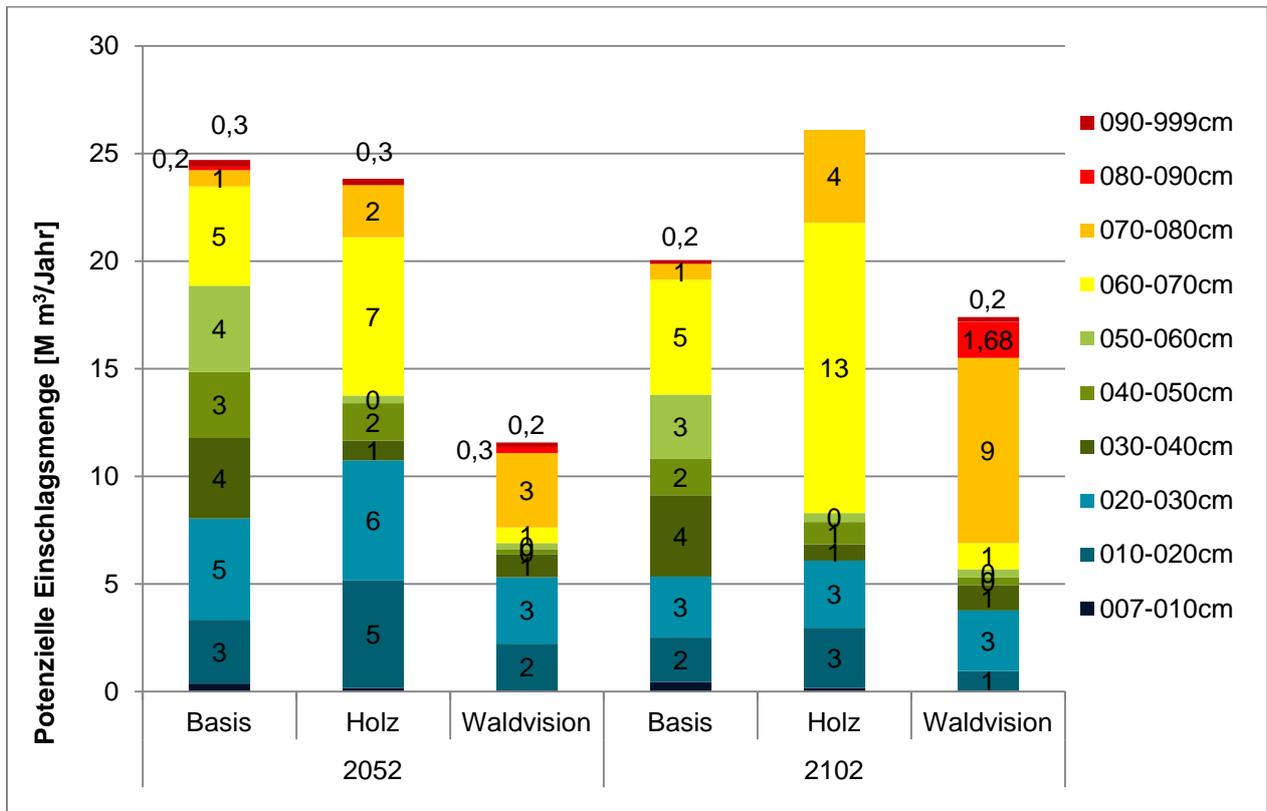
⁸ <https://www.thuenen.de/de/wf/zahlen-fakten/waldwirtschaft/holzeinschlag-und-rohholzverwendung/>

Abbildung 5-12: Mittleres Holzaufkommen in den Szenarien (2012-2102) und ermittelt durch BWI-3 zum Vergleich nach Baumartengruppen



Quelle: eigene Darstellung, FABio-Ergebnisse und Daten der BWI Ergebnisdatenbank (<https://bwi.info/>).

Abbildung 5-13: Einschlagsmengen nach Durchmesserklassen im Jahr 2052 und 2102 (Laubholz oben, Nadelholz unten) in Mio. m³ pro Jahr



Quelle: eigene Darstellung (FABio-Ergebnisse).

6. Diskussion

Das Modell FABio wurde unter Verwendung der Datenbasis, die die Bundeswaldinventur durch die Aufnahmen von BWI-2 (2002) und BWI-3 (2012) bietet, parametrisiert. Wie im Kapitel zu den Grenzen der Modellierung dargelegt, müssen die Ergebnisse der Modellläufe vor dem Hintergrund dieser Datenbasis interpretiert werden. Die im Modell angelegten Systemgrenzen der Betrachtung, vor allem bezüglich der Kohlenstoffbilanz und die Annahmen in den Szenarien sind weitere wichtige Rahmenbedingungen der Interpretation. Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Vorrats- und Zuwachsentwicklung, Betrachtung von Naturschutzaspekten, insbesondere Totholz, und der Kohlenstoffbilanz des Waldes diskutiert.

6.1. Vorrats- und Zuwachsentwicklung

Der vom Modell geschätzte mittlere Vorrat über die Gesamtwaldfläche im Szenario Waldvision für das Jahr 2102 von 686 m³/ha ist ein hoher Wert. Er setzt sich aus den Vorräten der Wälder ohne Holznutzung, die 16,6 % der Fläche ausmachen und den Vorräten der extensiv bewirtschafteten Fläche zusammen. Er resultiert aus 90 Jahren natürlicher Waldentwicklung, bzw. extensiver Nutzung der Bestände. Pro Hektar erreichen die Vorräte im Jahr 2102 im Mittel Werte, die in Naturwäldern vorkommen, aber in Wirtschaftswäldern normalerweise nicht entstehen. In der Waldvision bevorraten Buchenbestände im Jahr 2102 im Mittel 990 m³/ha. Derartige Vorräte werden auf Kernflächen in Naturwäldern aber auch in Buchenurwäldern durchaus erreicht. Tabaku (1999) fand Vorräte in Buchenurwäldern Albaniens von 800 m³/ha, Drössler (2006) berichtete von Vorräten bis zu 1.000 m³/ha in der Optimalphase von Buchenurwäldern in der Slowakei.

Für modellierte Buchenbestände unter natürlicher Entwicklung wurden im Mittel über die Entwicklungsphasen 600-700 m³/ha errechnet (Rademacher & Winter, 2003). Aus der BWI-3 geht hervor, dass 4 % der Traktecken mittlere Vorräte über 800 m³/ha aufweisen. Mehr als 12 % haben Vorräte über 600 m³/ha, vor allem Fichten- und Buchenbestände.

Die hohen Vorräte, die sich im Szenario Waldvision entwickeln, lassen sich also in den bewirtschafteten Wäldern in Deutschland bisher nicht oft finden. Deshalb sind auch die Zuwächse für derartige Bestände nur anhand weniger Zahlen zu validieren. In der Literatur werden in Buchennaturwäldern durchaus auch noch bei hohen Bestandesdichten hohe Zuwächse beobachtet (Korpel, 1995). Weniger spielt die Dichte der Bestände, als das Entwicklungsstadium dabei eine Rolle (Rademacher & Winter, 2003). Während in der Optimalphase die Zuwächse noch bis zu 15 m³/Jahr/ha erreichen können, brechen diese mit der Zerfallsphase ein. Durch die fortdauernde Bewirtschaftung der Buchenwälder im Szenario Waldvision ist davon auszugehen, dass die Zerfallsphase für die wenigsten der naturnah bewirtschafteten Bestände im Simulationszeitraum eine Rolle spielt. Allerdings muss hier deutlich gemacht werden, dass durch die Parametrisierung mittels der Daten der Bundeswaldinventur, Aussagen des Modells zur Entwicklung naturnah bewirtschafteter Bestände nur mit Einschränkungen gemacht werden können, da die wenigen existierenden Bestände mit hohen Vorräten in Deutschland durch die Inventur in zu geringem Umfang erfasst werden.

Der jährliche Vorratszuwachs ist in der Realität bedingt durch klimatische und bodenökologische Standortsfaktoren, aber auch durch die Bestandsstruktur, die letztlich durch die Bewirtschaftung beeinflusst wird. Im Modell ist der Zuwachs konkret abhängig von Höhe und Durchmesser des Einzelbaums, von der Bonität des Standorts und der Dichte des umliegenden Bestandes. Mit höherem Laubholzanteil und -vorräten erhöht sich der Zuwachs im Vergleich zum Basisszenario, da Laubbaumarten typischerweise spätere Kulminationspunkte ihrer Wachstumskurve haben (Kramer, 1988). Für viele Nadelbaumarten, die früher kulminieren, bedeuten längere

Umtriebszeiten, bzw. höhere Zieldurchmesser dagegen eher eine Verringerung des mittleren Zuwachses. Durch die unterschiedliche Beanspruchung des Lebensraumes führt eine Mischung von Arten oft dazu, dass sich die unterschiedlichen Baumarten im Zuwachs und der Vorratsentwicklung ergänzen, d.h. mortalitäts- oder störungsbedingte Ausfälle gegenseitig kompensieren (Pretzsch, 2003). Das Wuchsverhalten in gemischten und reinen Beständen wurde hier nicht weiter untersucht. Allerdings steigt durch die natürliche Waldentwicklung der Anteil der gemischten Bestände über die Zeit, was ebenfalls zur Vorrats- und Zuwachsentwicklung beiträgt, aber als Effekt nicht separat quantifiziert werden kann.

6.2. Betrachtung von Naturschutzaspekten - Totholz

Aus Naturschutzsicht ist Totholz als Lebensraum und Nahrung für zahlreiche Totholzspezialisten in zu geringem Umfang in den Wäldern in Deutschland vorhanden. Das betrifft vor allem die Laubholzvorräte. Beispielsweise hängt rund die Hälfte der xylobionten Käferarten Deutschlands, die auf der Roten Liste stehen, von diesem Totholzvorkommen ab und insbesondere vom Totholz heimischer Laubbaumarten. Besonders Vorräte an Eichentotholz sind unterrepräsentiert (Reise et al., 2017). Die absolut steigenden Totholz mengen im Laubholz im Szenario Waldvision können als ein Beitrag zur Verbesserung des Naturschutzes angesehen werden. Der relative Anteil toter Bäume am Gesamtvorrat steigt jedoch nicht und liegt mit 5 % weit unter dem von Urwäldern erwarteten 20-40 % (Nilsson et al., 2002).

Einfluss auf die Totholzvorräte im Modell nimmt vor allem die Mortalität in den Waldbeständen, die für den Zufluss an Totholz sorgt und von Durchmesser, Grundfläche der stärkeren Bäume (ein Maß für die Dichte der Bestände) und dem Baumalter abhängt. Es zeigt sich, dass die intensivere Nutzung im Holzscenario zu den niedrigsten Totholz mengen führt, da die Dichte und damit die Mortalität durch eine stärkere Entnahme von Bäumen verringert wird. Die deutlich extensivere Nutzung im Szenario Waldvision führt im Gegenzug aber nicht direkt zu einer sofortigen Erhöhung der Totholzmenge, da im Zeitraum bis 2052 die Mortalität der verhältnismäßig jungen Bäume trotz steigender Vorräte noch nicht deutlich ansteigt. Diese liegt mit etwa 15 % des Zuwachses nach 2052 zwar über der des Basisszenarios, aber trotzdem im Vergleich zu Urwäldern noch sehr niedrig (Drössler, 2006; Tabaku, 1999).

Die von Meyer (1999) in Naturwäldern Niedersachsens ermittelten Totholzvorräte bewegten sich zwischen 9 und 79 m³/ha. Im Szenario Waldvision wurden bis 2102 im Mittel 26 m³/ha erreicht. Vor allem in Eichennaturwäldern wurde jedoch festgestellt, dass die Mortalität der Baumart nicht unbedingt allein durch Konkurrenz erklärt werden kann, sondern vielmehr biotische und abiotische Störungen eine Rolle spielen (Meyer & Mölder, 2017). Störungen werden im Modell nicht explizit abgebildet, auch wenn sie implizit durch die Datenbasis der BWI in die Parametrisierung der Mortalität einfließen. Deshalb gilt für die Ergebnisse der modellierten Eichenbestände, besonders in den unbewirtschafteten Flächen, dass für die berechneten Totholz mengen entsprechende Unsicherheiten bestehen.

Totholzvorräte, die in Buchenurwäldern der Slowakei gemessen wurden, erreichten zwischen 30 und 130 m³/ha (Drössler, 2006). Im Szenario Waldvision liegen die Vorräte bei der Buche jedoch noch deutlich darunter. Auch hier kann vermutet werden, dass die natürliche Mortalität im Modell unterschätzt wird, da keine anderen Einflüsse außer die Dichte der Bestände, Alter und Durchmesser eine Rolle spielen. Da extensiver bewirtschaftete und aus der Nutzung genommene Wälder erst nach einiger Zeit Totholzvorräte durch den natürlichen Alterungsprozess und als Folge von Störungen aufbauen, ist es umso wichtiger, bestehende alte Wälder und Totholzvorkommen zu schützen und zu entwickeln.

6.3. Waldsenke und Kohlenstoffbilanz

Die Entwicklung der CO₂-Speicherleistung der Waldbiomasse korrespondiert direkt mit der Vorratsentwicklung. Die in der Waldvision über den Zeitraum von 90 Jahren anhaltende mittlere Speicherleistung von 48 Mio. t CO₂/Jahr ist ähnlich hoch wie die der vergangenen Jahre. Die jährliche Netto-CO₂-Festlegung im Szenario Waldvision steigt zunächst auf 65 Mio. t CO₂/Jahr um dann kontinuierlich abzufallen. Diese Beobachtung macht deutlich, dass alte Wälder nicht nur wichtige Kohlenstoffspeicher darstellen, sondern auch in späteren Entwicklungsphasen noch Kohlenstoff aufnehmen können. Mittels Messungen des Gasaustausches wurde diese andauernde Speicherkapazität auch in unbewirtschafteten Wäldern festgestellt (Knohl et al., 2003) Insgesamt mehrten sich Beobachtungen, die der verbreiteten Annahme widersprechen, dass alte Wälder keinen Kohlenstoff mehr aufnehmen können (Köhl et al., 2017; Luyssaert et al., 2008; Stephenson et al., 2014). Weniger das Alter der Bäume als die Waldstruktur bestimmen den Netto-Austausch zwischen Atmosphäre und Pflanzen, u.a. durch die vorhandene Blattfläche (Schulze et al., 2009). Auch wenn es eine Kapazitätsgrenze der Kohlenstoffaufnahme zweifelsohne gibt, so ist zumindest nicht eindeutig, wo diese liegt und wie schnell sie erreicht wird.

Die von einigen Autoren in den bewirtschafteten Wäldern Europas beobachteten Sättigungseffekte der Waldsenke (Nabuurs et al., 2013) implizieren nicht notwendigerweise, dass für den Erhalt der Senke eine Intensivierung der Bewirtschaftung notwendig ist, wie von Nabuurs et al. (2015) angenommen wird. Vielmehr zeigt das Szenario Waldvision, dass eine Extensivierung dabei helfen kann, die in der Vergangenheit abgebauten Kohlenstoffvorräte in diesen Wäldern wieder aufzubauen (Naudts et al., 2016).

Neben der Speicherung von Kohlenstoff in der Waldbiomasse, in Totholz und Boden, ist auch die Verwendung des geernteten Holzes für die Gesamtklimawirksamkeit, also die Wirkung des Waldes und seiner Nutzung auf die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, eine wichtige Komponente. Aus Klimaschuttsicht ist zum einen eine lange Verweildauer des Kohlenstoffs in Holzprodukten von Bedeutung. Die Verweildauer hängt von deren Lebensdauer der Holzprodukte und dem Grad des Recyclings ab. So kann durch eine stärkere Kaskadennutzung, also die Mehrfachverwendung des Rohstoffes Holz, die THG-Bilanz der Holzprodukte verbessert werden (Gärtner et al., 2013; Sikkema et al., 2013). Die energetische Nutzung würde dadurch erst ganz ans Ende der Holzverwendung gestellt werden. Durch ein verstärktes Recycling und eine erhöhte Lebensdauer von Holzprodukten kann eine Steigerung der Ressourceneffizienz der Holznutzung erreicht werden. Dadurch könnte die Frischholznachfrage sinken und damit der Nutzungsdruck auf den Wald verringert werden. Derart flankierende Maßnahmen sind notwendige Voraussetzungen für eine Extensivierung der Waldbewirtschaftung, wie sie in der Waldvision umgesetzt wird, um zu verhindern, dass verstärkt Holz importiert wird und negative Effekte ins Ausland verlagert werden. Es ist hervorzuheben, dass auch die CO₂-Bilanz der anderen Szenarien von einer solchen Erhöhung der Ressourceneffizienz profitieren würde. Allerdings steht den intensiveren Szenarien gegenüber, dass in der Waldvision ein hohes Maß an Klimaschutz zusammen mit einem hohen Maß an Naturschutz erreicht werden kann.

Zusätzlich zur Speicherung von Kohlenstoff in Holzprodukten, kann Holz andere Materialien und Rohstoffe wie Aluminium, Stahl und Beton, deren Erzeugung viel Energie benötigt und dadurch hohe CO₂ Emissionen verursacht, ersetzen und die Emissionen aus der Produktion so mindern. Dieser sogenannte Substitutionseffekt setzt voraus, dass diese Materialien mehr Emissionen verursachen als die Verwendung von Holz. Das ist für viele Materialien heute noch gegeben. Unter der Annahme von konstanten Substitutionsfaktoren kann die Intensivierung der Bewirtschaftung auf lange Zeiträume von 50-300 Jahren bezogen aus Sicht einer THG-Gesamtbilanz gegenüber einer Extensivierung besser dastehen (Böttcher et al., 2012; Mund et al., 2014). Allerdings ist die

Annahme konstanter Substitutionsfaktoren fragwürdig und liefert nur ein theoretisches Potenzial. Wieviel Emissionen sich tatsächlich durch Substitution vermeiden lassen, ist schwer abzuschätzen. Für eine solide Abschätzung für die Holzverwendung in Deutschland aber auch im Ausland (ein Teil des zukünftig geernteten Holzes wird voraussichtlich exportiert) müssten genaue Zuordnungen von Holzprodukten zu Nicht-Holzalternativen hinsichtlich ihrer Funktionalität und umfassende Lebensweganalysen der Produkte, Nebenprodukte und deren Entsorgung erstellt werden. Eine solche Analyse konnte im Projekt nicht vorgenommen werden. Das Modell berücksichtigt deshalb keine Substitutionseffekte durch das geerntete Holz, was bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen ist. Detaillierte Literaturwerte nach den neuesten DIN-Vorschriften, die z.B. verlangen zwischen dem erneuerbaren und nicht erneuerbaren Ressourceneinsatz zu unterscheiden, liegen nur für wenige Verwendungen vor, wie z.B. den Holzbau (Hafner et al., 2017). Während pauschale Substitutionsfaktoren für die Holzverwendung keine genaue Zuordnung zu Produkten vornehmen, sondern ein theoretisches Potenzial beschreiben (z.B. Sathre et al., 2010), ordnet eine normkonforme Berechnung die Holzprodukte ganzen funktionellen Einheiten zu und ermittelt die THG-Einsparung durch Holzverwendung für die gesamte Einheit, z.B. ein Fertighaus. Zu berücksichtigen ist, dass sich die CO₂ Emissionen der substituierten Produkte in den nächsten Jahrzehnten durch den Ersatz von Kohle, Öl und Gas durch erneuerbare Energieträger wahrscheinlich verringern werden. Damit wird auch der Emissionsminderungsbeitrag durch Holznutzung sinken oder könnte auch negativ werden.

Aus der globalen Perspektive wird – neben einer Verringerung des Waldverlustes und der Wiederaufforstung von Wäldern – die naturnahen Bewirtschaftung und Regeneration von Wäldern als eine kosteneffiziente natürliche Minderungsmaßnahme (Natural Climate Solution) gesehen. Ihr Beitrag zur Vermeidung einer gefährlichen Erwärmung und Erreichung des Pariser 2°-Ziels wird auf ein Potenzial von 0,5-1,5 Gt CO₂/Jahr beziffert (Griscom et al., 2017). Damit verbundene Zusatznutzen, wie positive Effekte für den Naturschutz, sind ein wichtiges Argument. Das Szenario Waldvision zeigt deutlich, dass dies nicht auf Entwicklungsländer beschränkt sein muss, sondern auch in Industrieländern mit einer fast flächendeckend bestehenden Nutzung der Wälder zum Tragen kommen kann.

7. Schlussfolgerungen

Die Studie zeigt, dass sich Maßnahmen für mehr Naturschutz im Szenario Waldvision und deren Auswirkungen auf den Wald mit Hilfe des Modells FABio und basierend auf den öffentlich zugänglichen Daten der Bundeswaldinventuren realistisch darstellen lassen. Die dargestellten Maßnahmen umfassen im Szenario Waldvision neben der Förderung von Laubholz, die Verringerung der Nutzungsintensität und Erhöhung der Zieldurchmesser und die Unterschutzstellung naturschutzrelevanter Flächen, wie besonderer Waldtypen oder alter Wälder.

In dem Szenario Waldvision werden mehr als 83% der Waldfläche extensiv genutzt und tragen damit zur Holzproduktion bei. Die Modellergebnisse machen deutlich, dass sich durch die gewählten Maßnahmen die Holzvorräte in Deutschland erhöhen lassen. Dies geschieht gleichzeitig mit einer Erhöhung der Naturschutzleistungen des Waldes (durch mehr alte Bäume und mehr Totholz vor allem im Laubholz) und einer Steigerung des Zuwachses besonders von Laubbäumen (Buche 19 %, Eiche 25 %, andere Laubbaumarten 20 %). Im Einzelnen stellt sich das Fazit zu den anfangs aufgestellten Thesen wie folgt dar:

These 1: Der durchschnittliche Vorrat in den Wäldern wird deutlich erhöht

Mit den Maßnahmen im Szenario Waldvision kann ein starker Vorratsaufbau erreicht werden. Im Vergleich zum Basisszenario kann der mittlere Vorrat bis zum Jahr 2052 um 28 % und bis zum

Jahr 2102 um 42 % gesteigert werden. Da der erhöhte Vorratsaufbau im Szenario Waldvision zu deutlich mehr Vorrat von Laubbäumen und mehr alten bzw. stärker dimensionierten Bäumen führt, sind auch positive Effekte für den Erhalt der Biodiversität zu erwarten, da gerade alte Laubbäume wichtige Habitatstrukturen für gefährdete Arten ausbilden.

These 2: Die Zuwächse in den Wäldern werden gehalten oder sogar erhöht

Die Ergebnisse des Szenarios Waldvision und des Holzszenarios gegenüber dem Basisszenario zeigen deutlich, dass die im Szenario Waldvision simulierte Extensivierung der Nutzung zu einem erhöhten Zuwachs führen kann, eine Intensivierung wie im HolzszENARIO hingegen den Holzzuwachs reduziert. Dieses Ergebnis unterstreicht, dass ein Umbau der Wälder hin zu Laubbäumen und älteren Beständen die Produktivität der Wälder (im Laub- und Nadelholz) nicht reduziert. Aus einer langfristigen Perspektive über das Jahr 2052 hinaus birgt dieses Erkenntnis das Potenzial, die Wälder in Deutschland hin zu naturnahen Waldbeständen mit hohen Vorräten und weiterhin hohem Zuwachs umzubauen. Dies hätte Vorteile für die Kohlenstoffsенке des Waldes und für die Biodiversität, da in diesen Beständen deutlich mehr biodiversitätsrelevante Habitatstrukturen als in intensiver bewirtschafteten, jüngeren Waldbeständen zu erwarten sind.

These 3: Die Kohlenstoffsенке des Waldes vergrößert sich

Die sofortige Umsetzung der Maßnahmen im Szenario Waldvision im Modell führt bis 2102 zu einer Erhöhung der Kohlenstoffvorräte im Wald im Vergleich zum Basisszenario von 30 %. Im Szenario Waldvision erzielt die Waldsenke dadurch ähnlich hohe CO₂-Festlegungen wie in der jüngeren Vergangenheit. Durch die verringerte Nutzung baut sich der Vorrat an Holzprodukten allerdings leicht ab. Dem kann entgegengewirkt werden, wenn die mittlere Lebensdauer von Holzprodukten erhöht wird, z.B. durch eine Verringerung der direkten energetischen Nutzung vor allem des geernteten Laubholzes. Im HolzszENARIO würde die Waldsenke in Wäldern in Deutschland dagegen auf null fallen.

These 3: Der Anteil an Bäumen mit starken Durchmessern wird erhöht

Durch die Reduktion der Intensität von Durchforstungen und Zielstärkennutzung, sowie durch die deutliche Erhöhung des Anteils an Flächen ohne Nutzung, verbleiben mehr starke Bäume im Wald. Dieser Effekt stellt sich schnell ein und spiegelt auch die Dringlichkeit der Maßnahme wieder, da im Fall des Basisszenarios heute ein Großteil der alten Bäume von morgen genutzt werden würde. Diese Beobachtung macht deutlich, dass eine schnelle Umsetzung der Waldvision notwendig ist, um zeitnah die Entwicklung von alten Baumbeständen nachhaltig zu fördern.

These 5: Im Wald erhöht sich die Menge an Totholz

Die Maßnahmen im Szenario Waldvision führen nicht zu einer sofortigen Erhöhung der Totholzvorräte. Im Vergleich zum Basis- und HolzszENARIO erhöhen sich diese bis 2102 deutlich. Es kommt zudem zu einer Verschiebung in der Baumartenverteilung. Mittlere Totholzvorräte für Laubholz erhöhen sich, die für Nadelholz sinken. Dies hat wiederum positive Auswirkungen auf die Biodiversität, da gefährdete xylobionte Arten häufig auf Laub-Totholz angewiesen sind.

These 6: Im Wald erhöhen sich die Naturnähe und der Laubholzanteil

Die Umsetzung der Waldvision erhöht vor allem die Anteile von Laubholz am Gesamtvorrat des Waldes. Die Flächenanteile von Laubholz steigen durch den Verzicht auf Pflanzungen nur langsam. Die Erhöhung des Vorrats und der Flächenanteile durch Extensivierung und Bevorzugung von Laubholz passiert vor allem auf Flächen, die bisher eine naturferne Bestockung durch Nadelholz aufweisen. In dem modellierten Zeitraum von 90 Jahren spielt aber vor allem die

veränderte Nutzung (Extensivierung, Null-Nutzung) in bestehenden Laubwäldern eine Rolle. So entwickeln sich in diesen Beständen Vorräte an stark-dimensionierten Laubbäumen mit entsprechend positiven Auswirkungen auf die Habitatverfügbarkeit bedrohter Arten.

These 7: Das Holzaufkommen verringert sich und wird verlagert zu relativ mehr Starkholz

Im Szenario Waldvision werden 16,6 % des Waldes nicht bewirtschaftet, das sind 12,5 % zusätzlich zur heute nicht genutzten Fläche. Auf insgesamt fast 84 % der Fläche wird der Wald extensiv bewirtschaftet. Die Modellergebnisse des Szenarios Waldvision zeigen, dass das Holzaufkommen gegenüber dem Basisszenario um etwa 25 % niedriger ausfällt. Aus ökonomischer Sicht bedeutet die Reduktion des Holzaufkommens eine Verringerung der Erlöse für Waldbesitzer. Zu deren Kompensation sind geeignete Förderungen für die erhöhten Klima- und Naturschutzleistungen sinnvoll. Die Umstellung der Forstwirtschaft, gemäß den Vorgaben des Szenarios Waldvision, führt zu einer Verringerung des Holzaufkommens vor allem bei den Baumarten, die aktuell zu einem großen Anteil als Energieholz genutzt werden (Laubholz). Das Holzaufkommen der Bauholzarten, insbesondere der Fichte, geht weniger stark zurück. Dies bedeutet, dass eine Umstellung der Holzindustrie auf veränderte Holzprodukte nicht von heute auf morgen erfolgen muss, sondern eine Anpassung bzw. Umstellung von Verarbeitungsprozessen aufgrund geänderter Baumartensortimente über mehrere Jahrzehnte hinweg vollzogen werden kann. Derartige ökonomische und technologische Auswirkungen wurden in dieser Studie nicht betrachtet.

Vor dem Hintergrund, dass aktuell etwa die Hälfte des verbrauchten Holzes in Deutschland energetisch genutzt wird, dass die energetische Nutzung von Holz bereits heute und zukünftig verstärkt durch andere erneuerbare Energiequellen und Einsparung von Wärme durch bessere Dämmung ersetzt werden kann, und dass zukünftig Substitutionseffekte sehr wahrscheinlich geringer sein werden, ist das Szenario Waldvision aus dem Blickwinkel der langfristigen Klimawirkung als vorteilhafter gegenüber den anderen Szenarien einzuschätzen. Beim Klimaschutz auf Substitutionseffekte durch Holznutzung allein zu bauen, wird durch zeitnah sinkende Substitutionseffekte nicht zielführend sein, zumal eine Intensivierung Naturschutzzielen meist entgegensteht.

Mit der Umsetzung der Waldvision kann ein wichtiger Beitrag zum Erreichen der Naturschutzziele *und* ein Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden. Damit wird deutlich, dass sich ambitionierte Klima- und Naturschutzziele im Wald nicht ausschließen müssen. Insgesamt ist aber als Voraussetzung eine deutliche Erhöhung der Effizienz der Holznutzung durch mehr stoffliche und weniger direkte energetische Nutzung und eine Erhöhung der Kaskadennutzung von Holz für eine nachhaltigere Ressourcennutzung und besseren Klimaschutz geboten.

8. Literatur

- Achat, D. L.; Deleuze, C.; Landmann, G.; Pousse, N.; Ranger, J. & Augusto, L. (2015a). Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth – A meta-analysis. *Forest Ecology and Management* 348, S. 124–141. Verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112715001814>.
- Achat, D. L.; Fortin, M.; Landmann, G.; Ringeval, B. & Augusto, L. (2015b). Forest soil carbon is threatened by intensive biomass harvesting. *Scientific reports* 5, S. 15991.
- Bäuerle, H.; Becker, G.; Beimgraben, T.; Bleile, K.; Glos, P.; Hehn, M.; Henning, M.; Holzmann, M.; Kändler, G.; Krowas, I.; Ohnesorge, D.; Pahler, A.; Sauter, U. H.; Schröder, S.; Siemes, P.; Stablo, J.; Stoleru, C.; Tausch, A. & Wehrhausen, M. (2009). Aktivierung von Wertschöpfungspotenzialen zur nachhaltigen Nutzung und Verwendung von Nadel- und Laubstarkholz (Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Nr. 83). Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.
- BMEL (2012). Ergebnisdatenbank der Bundeswaldinventur. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Verfügbar unter <https://bwi.info/>, zuletzt abgerufen am 31.08.2017.
- BMEL (2016a). Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft.
- BMEL (2016b). Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, zuletzt abgerufen am 03.04.2017.
- BMEL (2016c). Wald und Rohholzpotenzial der nächsten 40 Jahre. Ausgewählte Ergebnisse der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung 2013 bis 2052. Berlin: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, zuletzt abgerufen am 16.01.2017.
- Böttcher, H.; Freibauer, A.; Scholz, Y.; Gitz, V.; Ciais, P.; Mund, M.; Wutzler, T. & Schulze, E.-D. D. (2012). Setting priorities for land management to mitigate climate change. *Carbon Balance and Management* 7 (5), S. 5. Verfügbar unter <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84862980759&partnerID=40&md5=cd66e2cd082b6db73b8501fd6867a53d>.
- Drössler, L. (2006). Struktur und Dynamik von zwei Buchenurwäldern in der Slowakei. Dissertation Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen.
- Engel, F.; Bauhus, J.; Gärtner, S.; Kühn, A.; Meyer, P.; Reif, A.; Schmidt, M.; Schultze, J.; Späth, V.; Stübner, S.; Wildmann, S. & Spellmann, H. (2016). Wälder mit natürlicher Entwicklung in Deutschland: Bilanzierung und Bewertung (Naturschutz und biologische Vielfalt Nr. 145). Bundesamt für Naturschutz.
- Fichtner, A.; Sturm, K.; Rickert, C.; Härdtle, W. & Schrautzer, J. (2012). Competition response of European beech *Fagus sylvatica* L. varies with tree size and abiotic stress: minimizing anthropogenic disturbances in forests. *Journal of Applied Ecology* 49 (6), S. 1306–1315. Verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02196.x>.
- ForstBW Praxis (2014). Richtlinie Landesweiter Waldentwicklungstypen (Landesbetrieb Forst Baden-Württemberg, Hrsg.). Verfügbar unter http://www.forstbw.de/fileadmin/forstbw_infothek/forstbw_praxis/wet/ForstBW_Waldentwicklung_web.pdf.
- Gärtner, S.; Hienz, G.; Keller, H. & Müller-Lindenlauf, M. (2013). Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz - Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme. Heidelberg: IFEU.
- Gleixner, G.; Tefs, C.; Jordan, A.; Hammer, M.; Wirth, C.; Nueske, A.; Telz, A.; Schmidt, U. E. & Glatzel, S. (2009). Soil Carbon Accumulation in Old-Growth Forests. In C. Wirth et al. (Hrsg.),

- Old-Growth Forests: Function, Fate and Value* (S. 231–266). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Griscom, B. W.; Adams, J.; Ellis, P. W.; Houghton, R. a.; Lomax, G.; Miteva, D. A.; Schlesinger, W. H.; Shoch, D.; Siikamäki, J. V.; Smith, P.; Woodbury, P.; Zganjar, C.; Blackman, A.; Campari, J.; Conant, R. T.; Delgado, C.; Elias, P.; Gopalakrishna, T.; Hamsik, M. R.; Herrero, M.; Kiesecker, J.; Landis, E.; Laestadius, L.; Leavitt, S. M.; Minnemeyer, S.; Polasky, S.; Potapov, P.; Putz, F. E.; Sanderman, J.; Silvius, M.; Wollenberg, E. & Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114 (44), S. 11645–11650.
- Hafner, A.; Rüter, S.; Ebert, S.; Schäfer, S.; König, H.; Cristofaro, L.; Diederichs S.; Kleinhenz, M. & Krechel, M. (2017). Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau) (Forschungsprojekt: 28W-B-3-054-01 Waldklimafonds ISBN: 978-3-00-055101-7). BMEL/BMUB. Verfügbar unter http://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn058600.pdf, zuletzt abgerufen am 13.02.2018.
- Hessen-Forst (2008). Hessische Waldbaufibel - Grundsätze und Leitlinien zur naturnahen Wirtschaftsweise im hessischen Staatswald. Landesbetrieb Hessen-Forst. Verfügbar unter https://www.hessen-forst.de/download.php?file=uploads/service/download/hf-waldfibel_web_03.pdf.
- Jandl, R.; Lindner, M.; Vesterdal, L.; Bauwens, B.; Baritz, R.; Hagedorn, F.; Johnson, D. W.; Minkinen, K. & Byrne, K. A. (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137 (3-4), S. 253–268. Verfügbar unter <http://www.scopus.com/scopus/inward/record.url?eid=2-s2.0-33845884289&partnerID=40&rel=R5.6.0>.
- Jochem, D.; Weimar, H.; Bösch, M.; Mantau, U. & Dieter, M. (2013). Der Holzeinschlag - eine Neuberechnung: Ergebnisse der verwendungsseitigen Abschätzung des Holzeinschlags in Deutschland für 1995 bis 2013. *Holz Zentralbl* 141 (30), S. 752–753.
- Knohl, A.; Schulze, E. D.; Kolle, O. & Buchmann, N. (2003). Large carbon uptake by an unmanaged 250-year-old deciduous forest in Central Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 118 (3-4), S. 151–167. Verfügbar unter <Go to ISI>://000185517100001.
- Köhl, M.; Neupane, P. R. & Loffiomran, N. (2017). The impact of tree age on biomass growth and carbon accumulation capacity: A retrospective analysis using tree ring data of three tropical tree species grown in natural forests of Suriname. *PLoS ONE* 12 (8), S. e0181187.
- Korpel, S. (1995). Die Urwälder der Westkarpaten: G. Fischer.
- Kramer, H. (1988). *Waldwachstumslehre*. Hamburg, Berlin: Verlag Paul Parey.
- Lassaue, A.; Paillet, Y.; Jactel, H. & Bouget, C. (2011). Deadwood as a surrogate for forest biodiversity: Meta-analysis of correlations between deadwood volume and species richness of saproxylic organisms. *Ecological Indicators* 11 (5), S. 1027–1039. Verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X11000380>.
- Liski, J.; Palosuo, T.; Peltoniemi, M. & Sievänen, R. (2005). Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling* 189 (1–2), S. 168–182. Verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380005002012>.
- Luyssaert, S.; Schulze, E.-D. D.; Börner, A.; Knohl, A.; Hessenmöller, D.; Law, B. E.; Ciais, P.; Grace, J.; Börner, A. & Hessenmoller, D. (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455 (7210), S. 213–215. Verfügbar unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18784722>.
- Meyer, P. (1999). Totholzuntersuchungen in nordwestdeutschen Naturwäldern. Methodik und erste Ergebnisse. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 118 (1-6), S. 167–180.

- Meyer, P. & Mölder, A. (2017). Mortalität von Buchen und Eichen in niedersächsischen Naturwäldern. *Forstarchiv* 88 (3), S. 127–135.
- Mund, M.; Frischbier, N.; Profft, I.; Raacke, J.; Richter, F. & Ammer, C. (2014). Klimaschutzwirkung des Wald- und Holzsektors: Schutz- und Nutzungsszenarien für drei Modellregionen in Thüringen (BfN-Skripten 396), zuletzt abgerufen am 20.01.2016.
- Nabuurs, G.-j.; Delacote, P.; Ellison, D.; Hanewinkel, M.; Lindner, M.; Nesbit, M.; Ollikainen, M. & Savaresi, A. (2015). A new role for forests and the forest sector in the EU post-2020 climate targets (From science to policy, Bd. 2). Verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/944947390>, zuletzt abgerufen am 18.05.2016.
- Nabuurs, G.-j.; Lindner, M.; Verkerk, P. J.; Gunia, K.; Deda, P.; Michalak, R. & Grassi, G. (2013). First signs of carbon sink saturation in European forest biomass. *Nature Climate Change* 3 (9), S. 792–796.
- Naudts, K.; Chen, Y.; McGrath, M. J.; Ryder, J.; Valade, A.; Otto, J. & Luyssaert, S. (2016). Europe's forest management did not mitigate climate warming. *Science* 351 (6273), S. 597–600. Verfügbar unter <http://science.sciencemag.org/content/sci/351/6273/597.full.pdf>.
- Nilsson, S. G.; Niklasson, M.; Hedin, J.; Aronsson, G.; Gutowski, J. M.; Linder, P.; Ljungberg, H.; Mikusiński, G. & Ranius, T. (2002). Densities of large living and dead trees in old-growth temperate and boreal forests. *Forest Ecology and Management* 161 (1), S. 189–204.
- Osterburg, B.; Rüter, S.; Freibauer, A.; Witte, T. D.; Elsasser, P.; Kätsch, S.; Leischner, B.; Paulsen, H. M.; Rock, J.; Röder, N.; Sanders, J.; Schweinle, J. & Steuk, J. (2013). Thünen Report 11 - Handlungsoptionen für den Klimaschutz in der deutschen Agrar- und Forstwirtschaft. Verfügbar unter http://www.ti.bund.de/no_cache/de/startseite/thuenen-publikationen/thuenen-report/thuenen-report-detailseite/Bestellartikel/handlungsoptionen-fuer-den-klimaschutz-in-der-deutschen-agrar-und-forstwirtschaft.html.
- Pan, Y.; Birdsey, R. a.; Fang, J.; Houghton, R.; Kauppi, P. E.; Kurz, W. a.; Phillips, O. L.; Shvidenko, A.; Lewis, S. L.; Canadell, J. G.; Ciais, P.; Jackson, R. B.; Pacala, S. W.; McGuire, a. D.; Piao, S.; Rautiainen, A.; Sitch, S. & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science (New York, N.Y.)* 333 (6045), S. 988–993. Verfügbar unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21764754>.
- Pretzsch, H. (2003). The elasticity of growth in pure and mixed stands of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Journal of Forest Science* 49 (11), S. 491–501. Verfügbar unter <http://www.agriculturejournals.cz/web/jfs.htm?volume=49&firstPage=491&type=publishedArticle>.
- Rademacher, C. & Winter, S. (2003). Totholz im Buchen-urwald: generische Vorhersagen des Simulationsmodells BEFORE-CWD zur Menge, räumlichen Verteilung und Verfügbarkeit. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 122, S. 337–357.
- Reise, J.; Hennenberg, K.; Winter, S.; Winger, C. & Höltermann, A. (2017). Analyse und Diskussion naturschutzfachlich bedeutsamer Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. BfN-Skript 427. Bundesamt für Naturschutz.
- Sathre, R.; Gustavsson, L. & Bergh, J. (2010). Primary energy and greenhouse gas implications of increasing biomass production through forest fertilization. *Biomass and Bioenergy* 34 (4), S. 572–581. Verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953410000528>.
- Schulze, E.-D.; Hessenmoeller, D.; Knohl, A.; Luyssaert, S.; Boerner, A. & Grace, J. (2009). Temperate and Boreal Old-Growth Forests: How do Their Growth Dynamics and Biodiversity Differ from Young Stands and Managed Forests? In C. Wirth et al. (Hrsg.), *Old-Growth Forests:*

- Function, Fate and Value* (S. 343–366). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
Verfügbar unter http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-92706-8_15.
- Sikkema, R.; Junginger, M.; McFarlane, P. & Faaij, A. (2013). The {GHG} contribution of the cascaded use of harvested wood products in comparison with the use of wood for energy—A case study on available forest resources in Canada. *Environmental Science & Policy* 31 (0), S. 96–108. Verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901113000658>.
- Stephenson, N. L.; Das, A. J.; Condit, R.; Russo, S. E.; Baker, P. J.; Beckman, N. G.; Coomes, D. A.; Lines, E. R.; Morris, W. K.; Rüger, N.; Alvarez, E.; Blundo, C.; Bunyavejchewin, S.; Chuyong, G.; Davies, S. J.; Duque, A.; Ewango, C. N.; FLORES, O.; Franklin, J. F.; Grau, H. R.; Hao, Z.; Harmon, M. E.; Hubbell, S. P.; Kenfack, D.; Lin, Y.; Makana, J.-R.; Malizia, A.; Malizia, L. R.; Pabst, R. J.; Pongpattananurak, N.; Su, S.-H.; Sun, I.-F.; Tan, S.; Thomas, D.; van Mantgem, P. J.; Wang, X.; Wiser, S. K. & Zavala, M. A. (2014). Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. *Nature* 507 (7490), S. 90–93.
- Sturm, K. (1993). Prozeßschutz—ein Konzept für naturschutzgerechte Waldwirtschaft. *Zeitschrift für Ökologie und Naturschutz* 2 (3), S. 181–192.
- Tabaku, V. (1999). Struktur von Buchen-Urwäldern in Albanien im Vergleich mit deutschen Buchen-Naturwaldreservaten und -Wirtschaftswäldern. Dissertation an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen. Göttingen: Georg-August-Universität Göttingen.
- UBA (2017a). German Greenhouse Gas Inventory 1990 - 2015. National Inventory Report. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change, Dessau. Verfügbar unter http://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-14_lcds_pams_projections/projections/envwqc4_g/170426_PB_2017_-_final.pdf.
- UBA (2017b). Projektionsbericht 2017 für Deutschland gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013. Umweltbundesamt. Verfügbar unter http://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-14_lcds_pams_projections/projections/envwqc4_g/170426_PB_2017_-_final.pdf.

Annex 1: Glossar

Baumartengruppe	Im Modell FABio werden Baumarten gleicher oder ähnlicher Eigenschaften in 24 Bauartengruppen zusammengefasst (siehe Tabelle B-1). Bei der Ausgabe von Ergebnissen werden diese jedoch weiter aggregiert und wie in der Bundeswaldinventur zu acht Gruppen zusammengefasst (Fichtenarten, Kiefernarten, Tannenarten, Lärchenarten, Douglasie, Buchenarten, Eichenarten, andere Laubbäume).
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.
Bestandesgrundfläche	Summe der Stammquerschnittsflächen in 1,3 m Höhe über dem Boden. Eingeschlossen sind alle Bäume mit einem Brusthöhendurchmesser ab 7 cm.
Bestandesstruktur	Zusammensetzung des Baumbestandes einer Fläche nach Qualität und Quantität, räumlicher und zeitlicher Differenzierung.
Bestandestyp	Der Bestandestyp charakterisiert die Baumartenmischung. Es werden Reinbestands- und Mischungsformen unterscheiden: 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:
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.
Brusthöhendurchmesser (DBH, BHD)	Der Durchmesser eines Baumes in 1,3 m Höhe.
BWI	Bundeswaldinventur
CO ₂ -Senke/CO ₂ -Speicherleistung	Nettospeicherung von CO ₂ durch Ökosysteme (hier Wälder), die mehr CO ₂ durch Photosynthese aufnehmen als durch Absterbe und Zerfallsprozesse wieder abgeben. Die Holzernte zählt dabei als Emission von CO ₂ . Holzprodukte, die aus dem geernteten Holz gefertigt werden können in der Kohlenstoffbilanz berücksichtigt werden, stellen aber per se keine Senke dar.
Derbholz	Oberirdische Holzmasse mit einem Durchmesser von über 7 cm mit Rinde. Bäume unter 7 cm Brusthöhendurchmesser sind kein Derbholz.

Durchforstung	Entnahme von Bäumen von eventuell minderer Qualität (sog. Bedränger) vor der eigentlichen Hiebsreife. Dadurch soll der Zuwachs auf vitale und qualitativ gute Bäume gelenkt werden.
Erntefestmeter (Efm)	Maßeinheit für das Volumen des Holzes in Kubikmetern Derbholz ohne Rinde bei Planung, Einschlag, Verkauf und Buchung
FABio	Forestry and Agriculture Biomass Model
Festmeter	Ein Festmeter Holz entspricht 1 m ³ massivem Holz, inklusive Rinde und mögliche Ernteverluste (siehe Erntefestmeter).
FSC	Forest Stewardship Council
Holzaufkommen	Unter den im Modell berücksichtigten Bewirtschaftungsregeln potenziell nachhaltig verfügbare Erntemenge an Derbholz, gemessen in Festmetern.
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.
Kohlenstoffbilanz	Verrechnung der Festlegungen von Kohlenstoff in Form von CO ₂ durch Photosynthese und Abgabe durch Absterbe- und Zerfallsprozesse, sowie Holzernte. In der erweiterten Kohlenstoffbilanz wird der Kohlenstoff in Holzprodukten berücksichtigt.
Naturnähe	Naturnähe vergleicht die aktuell vorkommenden Baumarten mit denen der natürlichen Waldgesellschaft, d.h. der potenziellen natürlichen Vegetation (PNV).
Naturverjüngung	Regeneration des Waldes durch natürliche Verjüngung, d.h. der Bestand sorgt selbst durch Samenausbreitung in der Nähe stehender Mutterbäume oder durch vegetative Vermehrung für Nachwuchs
Natürliche Waldentwicklung (NWE)	Waldentwicklung ohne Eingriffe des Menschen durch Nutzung oder Verjüngung
Öffentlicher Wald	Wald im Eigentum des Bundes, eines Landes, einer Anstalt oder Stiftung des öffentlichen Rechts, Körperschaftswald, dem Körperschaftswald zugerechneter Kirchen-, Gemeinschafts- und Genossenschaftswald, Gemeindewald, Treuhandwald.
Potentielle 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.
Privatwald	Wald im Eigentum von natürlichen oder juristischen Personen oder auch Personengesellschaften, Stiftungen des privaten Rechts sowie dem Privatwald zugerechneter Kirchen-, Gemeinschafts- und Genossenschaftswald.
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.

Traktecke	Stichprobenpunkt der BWI
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)	Das in Stamm und starken Ästen gebildete Derbholz, gemessen in Vorratsfestmetern.
Vorratspflege	Die Vorratspflege ist eine Bewirtschaftungsphase innerhalb der Hauptnutzung vieler Waldbaukonzepte. Sie dient zur Förderung der Wertzuwachssträger durch Entnahme geringwertiger Bäume, der Nutzung hiebsreifer Baumarten sowie der Vorbereitung der Verjüngung. Hier findet Vorratsanreicherung bzw. Zuwachsabschöpfung statt.
Waldrestholz	Holzrückstände aus der Primärproduktion, die beim Holzeinschlag im Wald anfallen. Waldrestholz besteht aus Bestandteilen des Schlagabraums: Schaftholz (Stubbenholz, Strunkholz), Baumstumpf, Nichtderbholz (Reisholz), sowie Wipfeln, X-Holz (nichtverwertbares Derbholz und minderwertige Stammteile, stockfaule Erdstämme, sowie liegengelassene, gefällte Bäume)
WEHAM	Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodell des Thünen Instituts
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 2: Modellparameter und Einstellungen

Tabelle A-1: 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 A-2: Phasen der Bestandesentwicklung 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
DF Durchforstung	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) gelenkt werden.
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	Die Nutzung im Modell kann einzelbaumweise durch Zielstärkennutzung, aber auch als flächige Räumung (Kahlschlag) nach Bestandesalter erfolgen

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle A-3: Einstellungen zur Nutzungsintensität für das Szenario Waldvision

Bestandes- typ	Behand- lungstyp	Start Durch- forstung ab BHD	Ende Durch- forstung ab BHD	Intensität Durchforstung	Ziel- durch- messer	Intensität der Zielstärkenutzung in %
BU-R	JP	7	15	0	70	50
BU-R	DF	15	35	12	70	20
BU-R	VP	35	70	0	70	20
BU-R	NZ				70	85
BU-R	DW	15	70	12	70	85
BU-MN	JP	4	15	15	65	60
BU-MN	DF	15	35	20	65	30
BU-MN	VP	35	70	20	65	30
BU-MN	NZ				65	70
BU-MN	DW	7	65	12	65	85
BU-ML	JP			0	70	40
BU-ML	DF	15	35	15	70	20
BU-ML	VP	35	70	5	70	20
BU-ML	NZ				70	70
BU-ML	DW	15	70	12	75	70
EI-R	JP			0	80	30
EI-R	DF	7	35	5	80	10
EI-R	VP	35	80	5	80	20
EI-R	NZ				80	75
EI-R	DW	7	80	5	80	75
EI-MN	JP	7	15	10	70	50
EI-MN	DF	15	35	15	70	30
EI-MN	VP	35	70	10	70	30
EI-MN	NZ				70	75
EI-MN	DW	7	70	10	70	75
EI-ML	JP			0	75	30
EI-ML	DF	7	35	5	75	30
EI-ML	VP	35	75	5	75	30
EI-ML	NZ				75	75
EI-ML	DW	7	80	5	80	75
FI-R	JP	7	15	15	50	95
FI-R	DF	15	30	25	50	95
FI-R	VP	30	50	25	50	95
FI-R	NZ				50	95
FI-R	DW	7	50	20	50	90
FI-MN	JP	7	15	15	50	95
FI-MN	DF	15	30	25	50	95
FI-MN	VP	30	50	25	50	95
FI-MN	NZ				50	95
FI-MN	DW	7	50	20	50	90
FI-ML	JP	7	15	20	60	80
FI-ML	DF	15	30	20	60	80
FI-ML	VP	30	50	20	60	80
FI-ML	NZ				60	80
FI-ML	DW	7	50	15	60	80
TA-R	JP	7	15	15	60	90

TA-R	DF	15	30	25	60	90
TA-R	VP	30	60	25	60	90
TA-R	NZ				60	90
TA-R	DW	7	60	20	60	90
TA-ML	JP	7	15	15	70	90
TA-ML	DF	15	30	25	70	90
TA-ML	VP	30	70	25	70	90
TA-ML	NZ				70	90
TA-ML	DW	7	70	20	70	80
TA-MN	JP	7	15	15	60	90
TA-MN	DF	15	30	25	60	90
TA-MN	VP	30	60	25	60	90
TA-MN	NZ				60	90
TA-MN	DW	7	60	20	60	90
DGL-R	JP	7	15	20	80	95
DGL-R	DF	15	40	15	80	95
DGL-R	VP	40	80	15	80	95
DGL-R	NZ				80	95
DGL-R	DW	7	80	10	80	90
DGL-MN	JP	7	15	20	65	95
DGL-MN	DF	15	40	15	65	95
DGL-MN	VP	40	65	15	65	95
DGL-MN	NZ				65	95
DGL-MN	DW	7	70	10	70	90
DGL-ML	JP	7	15	20	80	95
DGL-ML	DF	15	40	15	80	95
DGL-ML	VP	40	80	10	80	95
DGL-ML	NZ				80	95
DGL-ML	DW	7	80	10	80	90
KI-R	JP	7	15	10	60	95
KI-R	DF	15	30	20	60	95
KI-R	VP	30	60	20	60	95
KI-R	NZ				60	95
KI-R	DW	7	60	15	60	90
KI-MN	JP	7	15	15	50	95
KI-MN	DF	15	30	25	50	95
KI-MN	VP	30	50	25	50	95
KI-MN	NZ				50	95
KI-MN	DW	7	50	20	50	90
KI-ML	JP	7	15	5	70	80
KI-ML	DF	15	30	15	70	80
KI-ML	VP	30	70	15	70	80
KI-ML	NZ				70	80
KI-ML	DW	7	70	15	70	80
LAE-R	JP	7	15	25	70	95
LAE-R	DF	15	40	25	70	95
LAE-R	VP	40	70	20	70	95
LAE-R	NZ				70	95
LAE-R	DW	7	70	20	70	90
LAE-MN	JP	7	15	25	60	95
LAE-MN	DF	15	40	25	60	95
LAE-MN	VP	40	60	20	60	95

LAE-MN	NZ				60	95
LAE-MN	DW	7	60	20	60	90
LAE-ML	JP	7	15	25	70	90
LAE-ML	DF	15	40	25	70	90
LAE-ML	VP	40	70	20	70	90
LAE-ML	NZ				70	90
LAE-ML	DW	7	70	20	70	80
AL-R	JP			0	70	75
AL-R	DF	7	30	15	70	75
AL-R	VP	30	70	5	70	75
AL-R	NZ				70	75
AL-R	DW	7	70	5	70	75
AL-MN	JP			0	70	75
AL-MN	DF	7	30	15	70	75
AL-MN	VP	30	70	5	70	75
AL-MN	NZ				70	75
AL-MN	DW	7	70	5	70	75
AL-ML	JP					
AL-ML	DF					
AL-ML	VP					
AL-ML	NZ					
AL-ML	DW					

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle A-4: Einstellungen zur Nutzungsintensität für das Szenario Holz

Bestandes- typ	Behand- lungstyp	Start Durch- forstung ab Durch- messer	Ende Durch- forstung ab Durch- messer	Intensität Durchforstung	Ziel- durch- messer	Intensität der Zielstärke in %
BU-R	JP	5	13	10	60	100
BU-R	DF	14	34	40	60	100
BU-R	VP	34	59	25	60	100
BU-R	NZ		60	100	60	100
BU-R	DW					
BU-MN	JP	5	13	10	60	100
BU-MN	DF	14	34	40	60	100
BU-MN	VP	34	59	25	60	100
BU-MN	NZ		60	100	60	100
BU-MN	DW					
BU-ML	JP	5	13	10	60	100
BU-ML	DF	14	34	40	60	100
BU-ML	VP	34	59	25	60	100
BU-ML	NZ		60	100	60	100
BU-ML	DW					
EI-R	JP	7	15	15	70	100
EI-R	DF	16	50	25	70	100
EI-R	VP	51	69	10	70	100
EI-R	NZ		70	100	70	100
EI-R	DW					
EI-MN	JP	7	15	15	70	100
EI-MN	DF	15	35	35	70	100
EI-MN	VP	35	69	20	70	100
EI-MN	NZ		70	100	70	100
EI-MN	DW					
EI-ML	JP	7	15	15	70	100
EI-ML	DF	15	35	40	70	100
EI-ML	VP	35	69	20	70	100
EI-ML	NZ		70	100	70	100
EI-ML	DW					
FI-R	JP	7	12	40	45	100
FI-R	DF	13	34	30	45	100
FI-R	VP	35	44	25	45	100
FI-R	NZ		45	100	45	100
FI-R	DW					
FI-MN	JP	7	12	40	45	100
FI-MN	DF	13	34	30	45	100
FI-MN	VP	35	44	25	45	100
FI-MN	NZ		45	100	45	100
FI-MN	DW					
FI-ML	JP	7	12	50	45	100
FI-ML	DF	13	34	30	45	100
FI-ML	VP	35	44	25	45	100
FI-ML	NZ		45	100	45	100
FI-ML	DW					
TA-R	JP	6	12	20	50	100

TA-R	DF	13	36	25	50	100
TA-R	VP	37	49	25	50	100
TA-R	NZ		50	100	50	100
TA-R	DW					
TA-ML	JP	6	12	20	50	100
TA-ML	DF	13	36	25	50	100
TA-ML	VP	37	49	25	50	100
TA-ML	NZ		50	100	50	100
TA-ML	DW					
TA-MN	JP	6	12	20	50	100
TA-MN	DF	13	36	25	50	100
TA-MN	VP	37	49	25	50	100
TA-MN	NZ		50	100	50	100
TA-MN	DW					
DGL-R	JP	13	18	25	80	100
DGL-R	DF	19	46	25	80	100
DGL-R	VP	47	79	20	80	100
DGL-R	NZ		80	100	80	100
DGL-R	DW					
DGL-MN	JP	13	18	25	80	100
DGL-MN	DF	19	46	25	80	100
DGL-MN	VP	47	79	20	80	100
DGL-MN	NZ		80	100	80	100
DGL-MN	DW					
DGL-ML	JP	13	18	25	80	100
DGL-ML	DF	19	46	25	80	100
DGL-ML	VP	47	79	20	80	100
DGL-ML	NZ		80	100	80	100
DGL-ML	DW					
KI-R	JP	9	13	15	45	100
KI-R	DF	14	38	30	45	100
KI-R	VP	39	44	15	45	100
KI-R	NZ		45	100	45	100
KI-R	DW					
KI-MN	JP	9	13	15	45	100
KI-MN	DF	14	38	30	45	100
KI-MN	VP	39	44	25	45	100
KI-MN	NZ		45	100	45	100
KI-MN	DW					
KI-ML	JP	9	13	20	45	100
KI-ML	DF	14	38	30	45	100
KI-ML	VP	39	44	20	45	100
KI-ML	NZ		45	100	45	100
KI-ML	DW					
LAE-R	JP	4	15	25	60	100
LAE-R	DF	16	42	30	60	100
LAE-R	VP	43	59	25	60	100
LAE-R	NZ		60	100	60	100
LAE-R	DW					
LAE-MN	JP	4	15	25	60	100
LAE-MN	DF	16	42	30	60	100
LAE-MN	VP	43	59	25	60	100

LAE-MN	NZ		60	100	60	100
LAE-MN	DW					
LAE-ML	JP	4	15	25	60	100
LAE-ML	DF	16	42	30	60	100
LAE-ML	VP	43	59	25	60	100
LAE-ML	NZ		60	100	60	100
LAE-ML	DW					
AL-R	JP	7	15	25	60	100
AL-R	DF	16	30	35	60	100
AL-R	VP	31	59	20	60	100
AL-R	NZ		60	100	60	100
AL-R	DW					
AL-MN	JP	7	15	25	60	100
AL-MN	DF	16	30	35	60	100
AL-MN	VP	31	59	20	60	100
AL-MN	NZ		60	100	60	100
AL-MN	DW					
AL-ML	JP	7	15	25	60	100
AL-ML	DF	16	30	35	60	100
AL-ML	VP	31	59	20	60	100
AL-ML	NZ		60	100	60	100
AL-ML	DW					

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle A-5: Aggregation der Waldgesellschaften aus der BWI in 12 übergeordnete Waldtypen mit Flächenanteilen

Waldtypen und die dazugehörigen Waldgesellschaften	Flächengröße [ha]
(1) Auen und Feuchtwälder	
Bach-Eschenwälder	66.200
Grauerlenuwald	9.900
Hainmieren-Schwarzerlen-Auenwald	22.100
Silberweiden-Weichholzauewald	7100
Stieleichen-Ulmen-Hartholzauewald	39.500
Traubenkirschen-Erlen-Eschenwälder	82000
Summe	226.800
(2) Basen- und kalkreiche Buchenmischwälder	
Alpenheckenkirschen-Tannen-Buchenwald	173.200
Seggen-Buchenwald	83.100
Waldgersten-Buchenwald, z.T. mit Tanne	674.600
Summe	930.900
(3) Block- und Schluchtwald	
Ahorn-Eschenwald	63.900
Alpenrosen-Latschengebüsche	3.000
Edellaubbaum-Steinschutt- und Blockhangwälder	28.400
Grünerlengebüsch	200
Karpatenbirken-Ebereschen-Blockwald	1.600
Traubeneichen-Linden-Wälder	95.000
Summe	192.100
(4) Bodensaurer Buchenmischwald	
Buchen-Traubeneichenwald	254.400
Drahtschmielen-Buchenwald	1.017.100
Fichten-Buchenwald	79.200
Hainsimsen-Buchenwald, z.T. mit Tanne	4.271.800
Summe	5.622.500
(5) Bodensaurer Eichenmischwald	
Birken-Stieleichenwald	187.600
Birken-Traubeneichenwald	155.300
Preiselbeer-Eichenwald	402.800
Preiselbeer-Eichenwald und Weißmoos-Kiefernwald	3.100
Bodensaurer Eichenmischwald Ergebnis	748.800
(6) Bruchwald	
Rauschbeeren-Moorwälder	94.700
Schwarzerlen-Bruch- und Sumpfwälder	118.500
Summe	213.200
(7) Feuchter reicher Eichenmischwald	
Sternmieren-Hainbuchen-Stieleichenwald	273.000
Summe	273.000
(8) Hochlagen Fichtenwald z.T. Tanne	
Alpenlattich-Fichtenwald	9.000
Bergreitgras-Fichtenwald	34.600
Block-Fichtenwald	2.600
Hainsimsen-Fichten-Tannenwald	46.600
Labkraut-Fichten-Tannenwald	30.600
Peitschenmoos-Fichtenwald	9.100

Preiselbeer-Fichten-Tannenwald	87.700
Wintergrün-Fichten-Tannenwald	4.600
Summe	224.800
(9) Kiefernwald	
Schneeheide-Kiefernwälder	2.800
Weißmoos-Kiefernwald	130.600
Summe	133.400
(10) Mesophile Buchenmischwälder	
Bergahorn-Buchenwald	4.000
Waldmeister-Buchenwald, z.T. mit Tanne	1.442.800
Summe	1.446.800
(11) Mesophiler Eichenmischwald	
Waldlabkraut-Hainbuchen-Traubeneichenwald	291.500
Summe	291.500
(12) Wärmeliebende Eichenmischwälder	
Xerotherme Eichen-Mischwälder	14.300
Summe	14.300
Gesamtsumme	10.318.100

Quelle: eigene Darstellung basierend auf bwi.info