

Working Paper

Referenzszenario der Holzverwendung und der Waldentwicklung im
UBA-Projekt BioSINK

Öko-Institut Working Paper 4/2023

Dr. Mirjam Pfeiffer, Dr. Klaus Hennenberg, Dr. Hannes Böttcher, Judith Reise
(Öko-Institut e.V.)

Prof. Dr. Udo Mantau (INFRO)



Öko-Institut e.V. / Oeko-Institut e.V.

info@oeko.de

www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg / Freiburg Head Office

Postfach / P.O. Box 17 71

79017 Freiburg. Deutschland / Germany

Tel.: +49 761 45295-0

Fax: +49 761 45295-288

Büro Darmstadt / Darmstadt Office

Rheinstraße 95

64295 Darmstadt. Deutschland / Germany

Tel.: +49 6151 8191-0

Fax: +49 6151 8191-133

Büro Berlin / Berlin Office

Borkumstraße 2

13189 Berlin. Deutschland / Germany

Tel.: +49 30 405085-0

Fax: +49 30 405085-388

Working Paper

Referenzszenario der Holzverwendung und der Waldentwicklung im UBA-Projekt BioSINK

Dr. Mirjam Pfeiffer, Dr. Klaus Hennenberg, Dr. Hannes Böttcher, Judith Reise
(Öko-Institut e.V.)

Prof. Dr. Udo Mantau (INFRO)

Oktober 2023

Download: www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Referenzszenario-BioSINK.pdf



Dieses Werk bzw. Inhalt steht unter einer Creative Commons
Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 Lizenz.
Öko-Institut e.V. 2023

This work is licensed under Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0.
Oeko-Institut e.V. 2023

Die Working Paper Series des Öko-Instituts ist eine Sammlung wissenschaftlicher Beiträge aus der Forschungsarbeit des Öko-Instituts e.V. Sie präsentieren und diskutieren innovative Ansätze und Positionen der aktuellen Nachhaltigkeitsforschung. Die Serie ist offen für Arbeiten von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus anderen Forschungseinrichtungen. Die einzelnen Working Paper entstehen in einem sorgfältigen wissenschaftlichen Prozess ohne externes Peer Review.

Oeko-Institut's Working Paper Series is a collection of research articles written within the scope of the institute's research activities. The articles present and discuss innovative approaches and positions of current sustainability research. The series is open to work from researchers of other institutions. The Working Papers are produced in a scrupulous scientific process without external peer reviews.

Zusammenfassung

Im Rahmen des UBA-Projekts BioSINK¹ wurde die Auswirkung der energetischen Nutzung forstlicher Biomasse in Deutschland auf deutsche und internationale Kohlenstoffsinken im Landnutzungssektor untersucht. Dazu wurde die zukünftig zu erwartende Nachfrage nach Holz mit dem Holzverwendungsmodell TRAW sowie die mögliche Waldentwicklung mit dem Waldmodell FABio-Forest modelliert. In diesem Bericht wird ein Referenzszenario für Deutschland für die Holznachfrage bis zum Jahr 2050 und für die Waldentwicklung bis zum Jahr 2076 dargestellt.

Die Modellierung der Holzverwendung unterscheidet zwischen energetischer Holznutzung in Haushalten und in größeren Biomasseanlagen sowie stofflicher Nutzung (Baubereich, Möbel, Holzverpackungen sowie Zellstoff). Als Holzrohstoffe werden frisch geerntetes Waldholz und sekundäres Holz wie Altholz oder Industrierestholz abgebildet.

Die Nachfrage nach Waldholz aus TRAW wird an das Waldmodell übergeben und wirkt dort als Treiber der Holzentnahme. FABio-Forest modelliert die Waldentwicklung in Deutschland an über 36.000 Erhebungspunkten der Bundeswaldinventur. Die Holznachfrage bestimmt als zentraler Treiber, wieviel Holz im Wald innerhalb der Bewirtschaftungsregeln entnommen wird.

Die Ergebnisse zeigen:

- Es kann bis zum Jahr 2050 mit einer steigenden Holznachfrage gerechnet werden. Besonders stark betroffen ist die Nachfrage nach Nadelholz, was durch den steigenden Bedarf an Holz zur stofflichen Nutzung angetrieben wird. Dem gegenüber steht eine Abnahme der Nachfrage nach Holz zur energetischen Nutzung, wovon vor allem Laubholz betroffen ist.
- Der Wald in Deutschland kann die Nachfrage nach Laubholz im Betrachtungszeitraum decken. Dabei liegt die Holzentnahme unter dem Zuwachs, was zu einem kontinuierlichen Aufbau des Laubholzvorrates im Wald führt.
- Die Nachfrage nach Nadelholz übersteigt hingegen die mögliche Entnahmemenge. Unter Annahme geringer natürlicher Störungen (Trockenheit, Käferkalamitäten, Windwurf) tritt eine Nadelholzlücke gegen Ende der 2040er Jahre auf. Werden mittlere bis starke natürliche Störungen angenommen, können ab Mitte der 2030er ca. 25 Mio. m³ der Nadelholznachfrage nicht mehr aus dem Wald in Deutschland bereitgestellt werden. Mit steigenden natürlichen Störungen verschlechtert sich zudem die Treibhausgasbilanz der Waldfläche.

Die ausführlich dargestellten Annahmen und Ergebnisse zum Referenzszenario stellen eine Grundlage für den wissenschaftlichen Diskurs zur Modellierung der Holzverwendung und Waldentwicklung in Deutschland dar. Es ist geplant, dieses Working Paper als „lebendes Dokument“ unter Berücksichtigung neuer Forschungsarbeiten fortzuschreiben.

Mit dieser Studie wurde erstmals für Deutschland die zu erwartende Holznachfrage direkt mit den Auswirkungen auf die Waldentwicklung verbunden und zudem Sensitivitäten zur Auswirkung natürlicher Störungen auf die Waldentwicklung berücksichtigt. Das in diesem Papier beschriebene Referenzszenario stellt eine wichtige Grundlage für den politischen Diskurs und die Entwicklung von Politikinstrumenten zur Holznutzung und Waldbewirtschaftung, zur Honorierung von Ökosystemleistungen im Wald bis hin zur Ausgestaltung der Nationalen Biomassestrategie dar.

¹ UBA-Projekt „Auswirkung der energetischen Nutzung forstlicher Biomasse in Deutschland auf deutsche und internationale LULUCF-Senken“ (FKZ: 3720 43 502 0).

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1 Einleitung	7
1.1 Hintergrund	7
1.2 Ziel des Working Papers	8
2 Modellverbund im Projekt BioSINK	9
2.1 Überblick über den Modellverbund	9
2.2 Holzverwendungsmodellierung mit TRAW	10
2.3 Waldmodellierung mit FABio-Forest	12
2.3.1 Waldentwicklung und Klimaveränderung	14
2.3.2 Waldbewirtschaftung und Holzentnahme	15
3 Entwicklung des Referenzszenarios	17
3.1 Energetische Holzverwendung im Referenzszenario	17
3.1.1 Private Haushalte	17
3.1.2 Biomassefeuerungsanlagen	19
3.2 Stoffliche Holzverwendung im Referenzszenario	19
3.2.1 Baunachfrage	19
3.2.2 Möbelprodukte und Holzverpackungen	21
3.2.3 Zellstoffnachfrage	21
3.2.4 Sonstige Holzverwendungen	21
3.2.5 Berücksichtigung des Außenhandels	22
3.3 Waldbewirtschaftung	24
4 Ergebnisse zum Referenzszenario	25
4.1 Modellierung der Holzverwendung	25
4.1.1 Energetische Holzverwendung	25
4.1.2 Stoffliche Holzverwendung	28
4.1.2.1 Bau	28
4.1.2.2 Möbelmarkt	34
4.1.2.3 Holzverpackungen	35
4.1.2.4 Zellstoffindustrie	36
4.1.2.5 Bestimmung nicht erfasster Holzverwendungen im Endwarenbereich	37
4.1.3 Datenübergabe TRAW an FABio-Forest	40
4.2 Modellierung der Waldentwicklung im Referenzszenario	42

4.2.1	Entwicklung der Holzentnahme	42
4.2.2	Entwicklung der Baumartengruppen anhand von Flächenanteilen	44
4.2.3	Entwicklung des Holzvorrats	47
4.2.4	Entwicklung des Zuwachses	50
4.2.5	Entwicklung der Totholzvorräte	54
4.2.6	Entwicklung der Durchmesser- und Verteilung der Baumartengruppen	56
4.2.7	Entwicklung des CO ₂ -Speichers in der Waldbiomasse und der Senkenleistung	58
5	Ausblick	62
6	Literaturverzeichnis	64
7	Anhang	68
7.1	Detaillierte Modellbeschreibung	68
7.1.1	Modellbeschreibung TRAW	68
7.1.1.1	Grundlagen der Vorausberechnung zur Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung	68
7.1.1.2	Ableitung einer Datengrundlage zum Temperatureinfluss	70
7.1.2	Modellbeschreibung FABio-Forest – Weiterentwicklung	72
7.1.2.1	Steuerung des Holzeinschlags	72
7.1.2.2	Optimierung der Mortalitätsfunktion	77
7.1.2.3	Zusätzliche Dichtemortalität	78
7.1.2.4	Anbindung der Mortalitätsfunktion an Ergebnisse der Waldzustandserhebung	78
7.1.2.5	Zuwachsabhängige Sensitivitätsanalysen	82
7.1.2.6	Parametrisierung für den Zeitraum 2013 bis 2017 und 2018 bis 2021	82
7.1.2.7	Modellierung für den Zeitraum 2018 bis 2021	85
7.2	Holzentnahme	87
7.3	Erläuterungen und Definitionen zur Baustatistik	90

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Wälder bedecken knapp 1/3 der Landesfläche Deutschlands und nehmen somit wichtige Funktionen im Naturhaushalt als Kohlenstoffspeicher (z.B. Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz²), aber auch als Holzlieferant und somit als Wirtschaftsfaktor ein. Hervorzuheben sind außerdem weitere durch den Wald bereitgestellte Ökosystemleistungen, die sich zum Beispiel durch die Auswirkungen des Waldes auf den Wasserhaushalt, die Bodenbeschaffenheit und das Lokalklima ergeben. Artenreiche naturnahe Laubmischwälder leisten außerdem einen wichtigen Beitrag zur Biodiversität und als Lebensraum für walddtypische Flora und Fauna.

Nach der Treibhausgasberichterstattung (UBA 2022) stellten Wälder bisher im Gegensatz zu Agrarland eine Kohlenstoffsенке dar und trugen somit dazu bei, Emissionen aus dem LULUCF-Sektor aus anderen Landnutzungen auszugleichen und insgesamt eine Nettosenke des Sektors zu erreichen. Die aktuellen Inventarzahlen weisen allerdings eine Netto-Quelle für den LULUCF-Sektor aus (UBA 2023). Ein Grund dafür ist neben anhaltend hohen Emissionen, vor allem aus Moorböden, eine Abnahme der Waldsenke. Durch den zunehmenden Einfluss natürlicher Störungen auf die Waldentwicklung wie zum Beispiel Trockenheit, Käferkalamitäten und Windwurf ist zu erwarten, dass die Netto-Kohlenstoffspeicherung im Wald weiter abnehmen wird. Dies gilt besonders für die Extremjahre 2018 bis 2020. Eine datenbasierte quantitative Abschätzung hierzu werden aber erst die Analysen der 4. Bundeswaldinventur (BWI) erlauben (Auswertung im Jahr 2024 erwartet).

Bis zum Vorliegen der Daten aus der BWI 4 sind modellbasierte Abschätzungen ein guter Ansatz, um den Einfluss klimabedingter Störungen während der letzten Jahre bereits vorab einschätzen zu können. Außerdem besteht eine große Unsicherheit hinsichtlich der Frage, wie die zukünftige Entwicklung natürlicher Störungen sich auf die Waldentwicklung und damit auch auf die mit dem Wald verbundenen Funktionen und Ökosystemleistungen auswirken wird. Diese Unsicherheiten lassen sich mithilfe von Modellen im Rahmen von Sensitivitätsanalysen abschätzen und einordnen.

Ungewissheiten bestehen auch im Hinblick auf die zu erwartende zukünftige Entwicklung der Holzverwendung, sowohl zur stofflichen als auch zur energetischen Nutzung. Bei der Holzverwendung werden frisch entnommenes Waldholz und Sekundärholz (z.B. Altholz, Sägenebenprodukte und Industrierestholz) unterschieden. Wie sich die resultierende Nachfrage nach Waldholz entwickelt, steht in direkter Wechselwirkung mit der Waldentwicklung: sie beeinflusst einerseits die Intensität der Holzentnahme, andererseits setzen Regeln zur Waldbewirtschaftung in Kombination mit der Waldentwicklung eine Obergrenze für die mögliche Holzentnahme und damit das Aufkommen von Waldholz in Deutschland.

Im vom Umweltbundesamt geförderten Projekt „BioSINK“³ werden die Folgen der Holzenergienutzung und die damit einhergehenden Auswirkungen auf die Waldentwicklung und die Kohlenstoffsенкеleistung der Wälder abgeschätzt. Um diese darzustellen, findet eine Kopplung des Holzverwendungsmodells TRAW (Total Resource Assessment of Wood) mit

² <https://www.bmuv.de/download/aktionsprogramm-natuerlicher-klimaschutz>

³ UBA-Projekt „Auswirkung der energetischen Nutzung forstlicher Biomasse in Deutschland auf deutsche und internationale LULUCF-Senken“ (FKZ: 3720 43 502 0).

dem empirischen Waldwachstumsmodell FABio-Forest (Forestry and Agriculture Biomass Model) statt. Hierbei sollen mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen auch Unsicherheiten berücksichtigt werden, die sich für zukünftige Projektionen der Waldentwicklung durch natürliche Störungen ergeben können.

1.2 Ziel des Working Papers

Dieses Working Paper stellt das sogenannte Referenzszenario für die Holzverwendung vor, das im Rahmen des Projekts BioSINK erarbeitet wird. Es beschreibt die Entwicklung der Holznachfrage unter Annahmen zur Fortschreibung der heutigen wirtschaftlichen und politischen Ausgangslage. Dabei liegt ein Fokus auf der energetischen Holznutzung. Die stoffliche Holzverwendung wird aber ebenfalls modelliert, woraus sich die inländische Gesamtnachfrage nach Waldholz ergibt.

Anhand der Nachfrage nach Waldholz wird die Bewirtschaftung der Wälder in Deutschland modelliert und deren Entwicklung fortgeschrieben. Damit soll einerseits ermittelt werden, wo die Kapazitätsgrenzen für eine nachhaltige Holznutzung anzusetzen sind, d.h. ab welchem Punkt die Holznachfrage die Menge übersteigt, die der Wald nachhaltig liefern kann. Zudem werden die Auswirkungen der Holzentnahme auf die Vorratsentwicklung im Wald, die Kohlenstoffspeicherung und weitere Parameter zur Waldzustandsbeschreibung abgebildet. Mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen können Aussagen zum Einfluss von natürlichen Störungen getroffen werden.

Das vorliegende Arbeitspapier ist als „lebendes Dokument“ konzipiert, das in regelmäßigen Abständen aktualisiert wird und einen Diskurs mit Wissenschaftler*innen anstrebt. Dies wird durch einen hohen Detaillierungsgrad erreicht, der über die Darstellung im Abschlussbericht im Projekt BioSINK hinausgeht. Im Rahmen weiterer Projekte, insbesondere im Waldklimafond-Projekt DIFENS, wird der Modellverbund aus dem Holzverwendungsmodell TRAW und dem Waldmodell FABio-Forest weiterentwickelt. Ergebnisse daraus sollen in zukünftigen Versionen dieses Working Papers Wissenschaftler*innen zur Verfügung gestellt werden.

2 Modellverbund im Projekt BioSINK

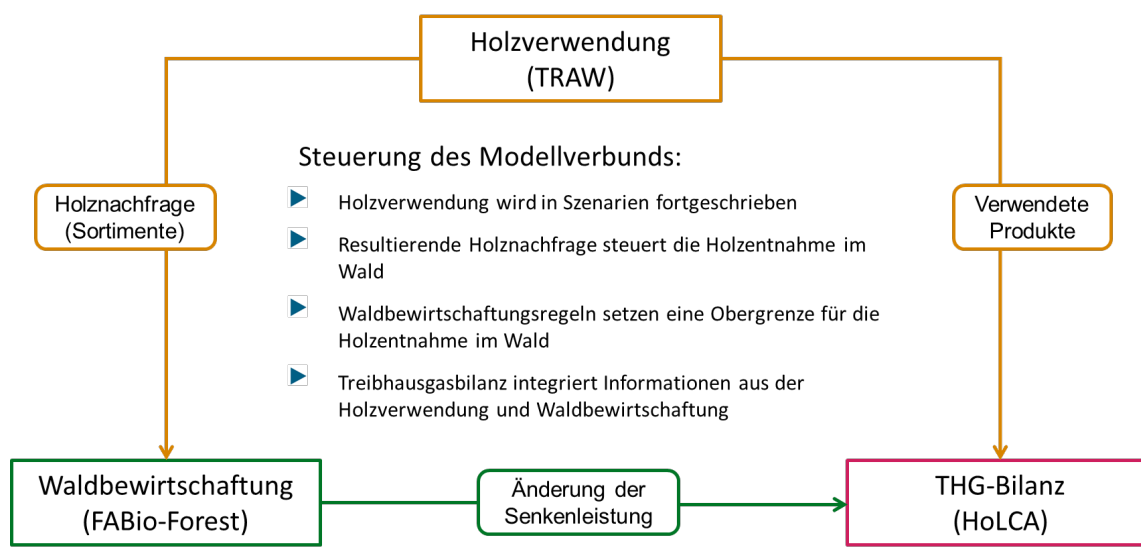
2.1 Überblick über den Modellverbund

Der Modellverbund, der im Projekt BioSINK eingesetzt wird, setzt sich aus drei Modellen zusammen (Abbildung 2-1):

- Das Holzverwendungsmodell TRAW (Total Resource Assessment of Wood) modelliert Szenarien zur künftigen Entwicklung stofflicher und energetischer Holzverwendung in Deutschland (siehe Kap. 2.2).
- Das Waldmodell FABio-Forest (Forestry and Agriculture Biomass Model) simuliert Entwicklungen auf der Waldfläche in Deutschland (siehe Kap. 2.3).
- Das Treibhausgasbilanzmodell HoLCA bilanziert die Treibhausgasemissionen, die entlang der Prozesskette von Holzprodukten entstehen (nicht Teil dieses Working Papers).

Für die Entwicklung von Szenarien nimmt die Modellierung der Holzverwendung eine zentrale Rolle ein. Ausgehend von historischen Trends der Holzverwendung wird in TRAW auf Basis ökonomischer und politischer Annahmen die zukünftige Verwendung von Holzprodukten in Deutschland für Endwarenssektoren (z.B. Energie, Bau) fortgeschrieben. Daraus werden die dafür eingesetzten Zwischenprodukte (Halbwaren) abgeleitet. Aus der Menge der eingesetzten Halbwaren (z.B. Pellets, Spanplatten) werden die verwendeten Mengen an Holzrohstoffen bestimmt. TRAW unterscheidet dabei zwischen Waldholz und Rest- und Recyclingholz. Die von TRAW ermittelte Nachfrage nach Waldholz wird als Treiber an FABio-Forest übergeben. Dabei wird nach Stammholz, das in der Sägeindustrie verarbeitet wird, sonstigem Derbholz (Rundholz)⁴, genutztem Waldrestholz sowie Rinde unterschieden (Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2).

Abbildung 2-1: Struktur des Modellverbunds und Treiber



Quelle: Eigene Darstellung. TRAW = Total Resource Assessment of Wood, FABio = Forestry and Agriculture Biomass Model.

⁴ Derbholz hat einen Durchmesser größer 7 cm. Derbholz, das in der Sägeindustrie verwendet wird, wird als Stammholz bezeichnet. Derbholz, das außerhalb der Sägeindustrie verwendet wird, wird als Rundholz geführt. Waldrestholz hat einen Durchmesser kleiner 7 cm.

In FABio-Forest wird anhand der Holznachfrage die Holzentnahme im Wald gesteuert (Abbildung 2-1). Hierbei muss sich die Holzentnahme an die eingestellten Bewirtschaftungsregeln halten, die eine Obergrenze für die Holzentnahme setzen. Wird mehr Holz nachgefragt, als entnommen werden darf, wird die Differenz als Lücke ausgewiesen, die z.B. durch Holzimporte gedeckt werden kann. In diesem Bericht werden vor allem Ergebnisse zur Entwicklung der Holzentnahme, der Baumartengruppen nach Basalfläche, des Holzvorrats, des Zuwachses, der Totholzvorräte, der Bestandesstruktur (Durchmesserklassen), sowie der im Wald gespeicherte Menge an CO₂ und die CO₂-Speicherleistung dargestellt (Abbildung 2-2).

Die Treibhausgasbilanz für Holzprodukte, die in HoLCA abgebildet wird, beschränkt sich im Projekt BioSINK auf die Nutzung von Holzenergie im Vergleich zu fossilen Vergleichsprodukten. Die in Deutschland verwendeten Mengen an Energieholz werden als Input-Daten aus der Holzverwendungsmodellierung übernommen (vgl. Abbildung 2-1) und die THG-Emissionen entlang der Prozesskette bilanziert. Zudem fließen Ergebnisse zur Veränderung der Senkenleistung der Waldfläche durch die Holzentnahme in die THG-Bilanz ein. Als Ergebnisse werden THG-Bilanzen für einzelne Energieholzprodukte und als Summe für die Energieholznutzung in Deutschland ausgegeben (Abbildung 2-2). Methoden und Ergebnisse der THG-Bilanzierung sind nicht Gegenstand dieses Working Papers.

Abbildung 2-2: Ergebnisse des Modellverbunds

Holzverwendung (TRAW)	Waldbewirtschaftung (FABio-Forest)	THG-Bilanz (HoLCA)
<ul style="list-style-type: none"> - Verwendete Holzprodukte (stofflich und energetisch) - Holzaufkommen: Derbholz (Laub und Nadel), Resthölzer (primär und sekundär), Recyclingholz 	<ul style="list-style-type: none"> - Holzentnahme - Zuwachs - Verteilung der Baumartengruppen - Bestandesstruktur (Durchmesserklassen) - Holzvorrat (lebende Biomasse, Totholz) - Gespeichertes CO₂, Senkenleistung 	<ul style="list-style-type: none"> - THG-Bilanz von Holzenergie inkl. der Senkenleistung im Wald - Substitution - Treibhausgasminderung

Quelle: Eigene Darstellung. Methode und Ergebnisse der THG-Bilanzierung sind nicht Gegenstand dieses Working Paper.

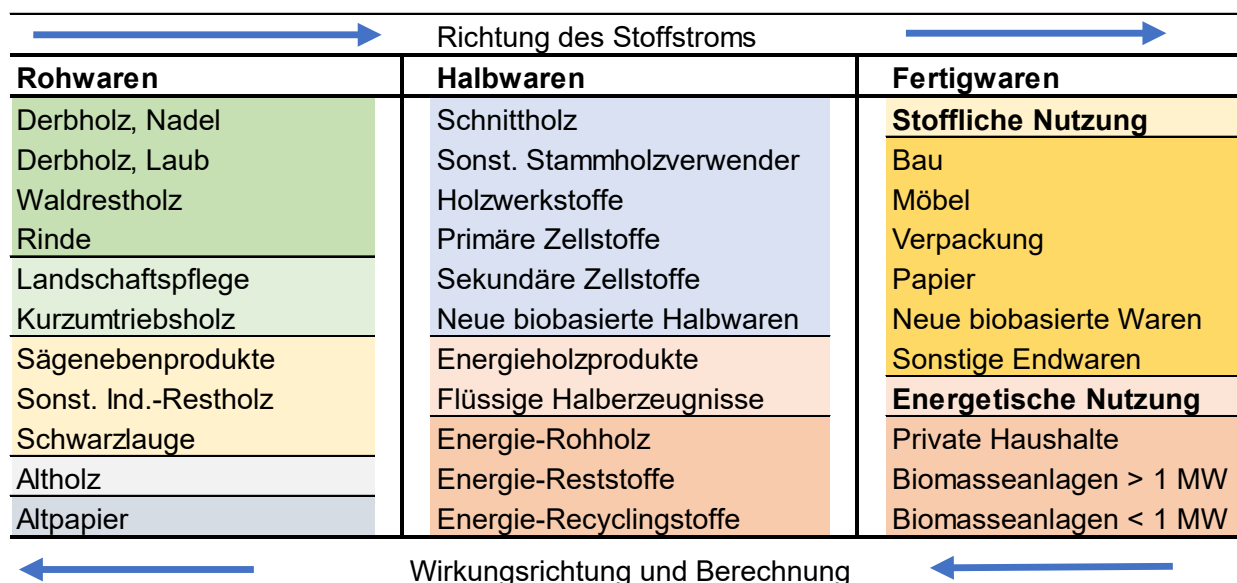
Der Modellverbund im Projekt BioSINK verwendet zwischen den Projektpartnern vereinbarte Annahmen und Datensätze und ermöglicht so eine miteinander gekoppelte Modellierung von Holzverwendung und Waldentwicklung. Die Ergebnisse zur Holznachfrage aus dem Referenzszenario zur Holzverwendung beeinflussen somit direkt die Modellierung der Waldentwicklung. Auf der Waldebene können zusätzlich mögliche Auswirkungen des Klimawandels mit Sensitivitäten für jährlichen Zuwachs und Mortalität analysiert werden.

2.2 Holzverwendungsmodellierung mit TRAW

Eine Wertschöpfungskette der Holznutzung beginnt mit der Rohstoffverwendung in Form von Wald-, Rest- und Recyclingholz, setzt sich in der Produktion von Halbwaren (z. B. Schnittholz, Platten, Zellstoff und Energieholz) und Energieholz fort und endet schließlich in der Verwendung von Holzprodukten in den Endwarenssektoren (z. B. Bau, Möbel, Energie). Die Wirkungskette verläuft dem entgegengesetzt: Die Entwicklung und Verwendung von Holzprodukten in den Endwarenssektoren löst Nachfrage nach Halbwaren aus. Die Produktion von Halbwaren und Energieholz bedingt schließlich den Einsatz von Rohwaren. Das Holzverwendungsmodell TRAW folgt dem Verlauf der Nachfrage und modelliert damit die

Wirkungskette ausgehend von der Ebene der Endwaren. Private, staatliche und industrielle Verwender von Holzprodukten treiben durch ihre Nachfrage die Produktion von Fertigwaren an. Um die Fertigwaren herzustellen, werden Halbwaren benötigt, die aus Holzrohwaren hergestellt werden. Wesentliche Voraussetzung für die Vorgehensweise in TRAW ist die Kenntnis der Rohstoffzusammensetzung auf allen Ebenen der Wertschöpfungskette. Die Grundlagen dafür wurden weitgehend im Rohstoffmonitoring Holz geschaffen (Mantau et al. 2018b, Mantau et al. 2018c, Mantau 2023). Abbildung 2-3 fasst den Modellierungsansatz in TRAW zusammen und weist die Marktsektoren aus, die dabei grundsätzlich berücksichtigt werden.

Abbildung 2-3: Struktur des Holzverwendungsmodells TRAW



Quelle: eigene Darstellung, INFRO.

Die Holzverwendung in Deutschland resultiert aus der stofflichen und energetischen Nachfrage in Endverwendungssektoren. Im Holzverwendungsmodell TRAW werden folgende Sektoren abgebildet:

- Energetische Verwendung:
 - Für **private Haushalte** werden die Anzahl der Einzelfeuerungsanlagen und Holzcentralheizungen sowie die verwendete Menge an Holz abgebildet.
 - Als **Biomasseanlagen** werden größere Anlagen außerhalb der privaten Haushalte zusammengefasst. Diese werden unterteilt nach Kleinf Feuerungsanlagen (<1 MW Feuerungswärmeleistung, FWL) und Großfeuerungsanlagen (>1 MW FWL).
- Stoffliche Verwendung:
 - Der **Bausektor** deckt den Neubau der Gebäudegruppen Wohnbau (Eigenheime, Mehrfamilienhäuser) und Nichtwohnbau (industrielle, wohnähnliche und landwirtschaftliche Betriebsgebäude) ab. Hinzu kommt die Modernisierung in bestehenden Wohn- und Nichtwohngebäuden und der Tiefbau.
 - Der **Möbelsektor** umfasst unterschiedliche Möbel, die aus Vollholz oder Holzwerkstoffen (Platten, Furnier, etc.) hergestellt werden.

- Im **Verpackungssektor** werden unterschiedliche Verpackungsmaterialien aus Holz (z.B. Paletten, Kisten, etc.) eingesetzt. Verpackungspapiere werden dem Papiersektor zugerechnet. Die Treiber können jedoch ähnlich sein.
- Der **Papiersektor** teilt sich in die Segmente Druckpapiere, Zeitungspapiere, Verpackungspapiere und Hygienepapiere auf. Relevant für diesen Bereich ist die Zellstoffproduktion, die ihrerseits für die Waldholzentnahme von Bedeutung ist.
- Unter der Gruppe „**Neue biobasierte Waren**“ werden Produkte zusammengefasst, die in Bioraffinerien oder mithilfe anderer, meist chemischer, Prozessen gewonnen werden. Ihre quantitative Bedeutung ist derzeit gering, aber ihr werden große Entwicklungspotenziale zugeschrieben.
- Die Gruppe „**Sonstige Endwaren**“ fasst Produkte zusammen, die den zuvor genannten Sektoren nicht zugeordnet werden können. Beispiele hierfür sind Holzspielzeug, Bleistifte, Campingbesteck oder Armaturenblechverkleidungen. Da diese Produkte mengenmäßig eine sehr untergeordnete Rolle spielen und zudem eine Datengrundlage fehlt, werden sie im Projekt BioSINK nicht modelliert bzw. als Teil der Datenlücke zwischen End- und Halbwaren ausgewiesen.

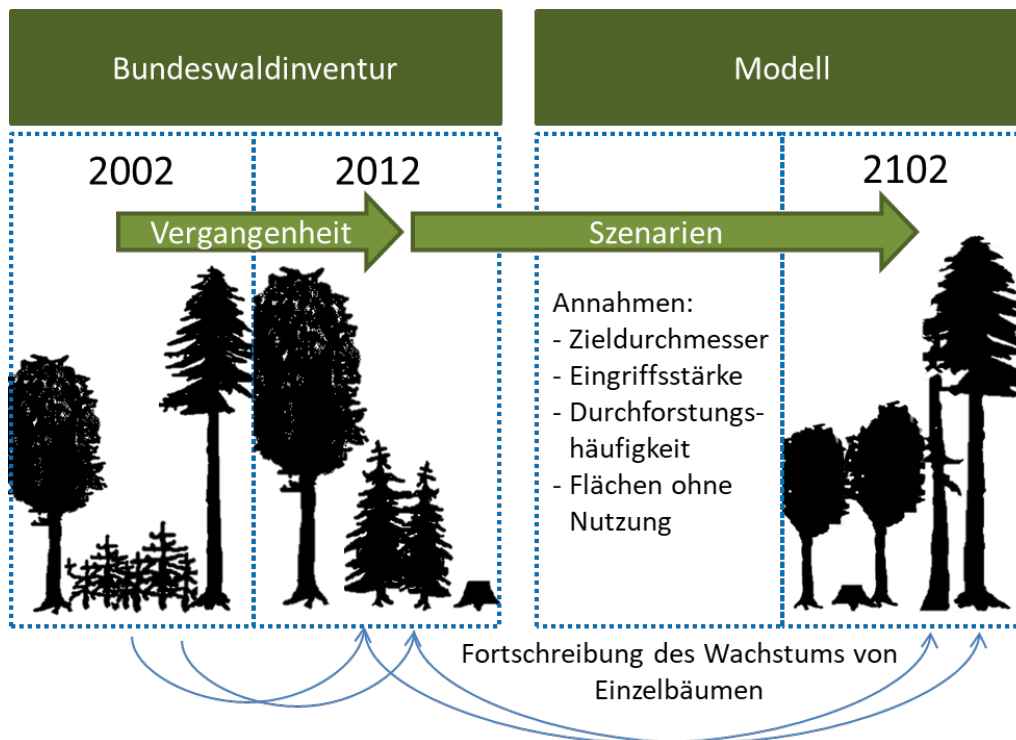
Ausgehend von der Nutzung von Endwaren in den Sektoren werden die Halbwaren entsprechend ihres Einsatzes ermittelt. In Halbwaren gehen verschiedene Rohwaren ein. Die Rohstoffzusammensetzungen für Halbwaren wurden im Rohstoffmonitoring Holz (Mantau et al. 2018b, Mantau et al. 2018c, Mantau 2023) bestimmt und in TRAW eingepflegt. Im Endwarenbereich liegen Daten für Bau (Mantau et al. 2018a), Möbel (Mantau et al. in press.) und Papier (VDP - Leistungsberichte⁵) sowie die energetischen Verwendungen (Mantau 2023) vor. Die Parametrisierung in anderen Sektoren wie Verpackung basieren auf früheren Arbeiten im WEHAM-Modell (Glasenapp et al. 2017). Zusammen ergibt dies eine gute Verfügbarkeit der erforderlichen Ausgangsdaten. Mit der Bilanzierung entlang der Wertschöpfungskette stoßen verschiedene statistische Erfassungssysteme aufeinander. Das erfordert dann Abstimmungsverfahren wie z. B. bei der Einschlagsrückrechnung (Jochem et al. 2015).

2.3 Waldmodellierung mit FABio-Forest

Das Öko-Institut entwickelt seit 2015 den FABio-Modellverbund (Forestry and Agriculture Biomass Model). Er besteht aus drei Teilmodellen: FABio-Land (LULUCF), FABio-Forest (Wald) und dem Agrarmodell LiSE (Landwirtschaft). Diese Modelle nutzen Methoden der Systemdynamik- und Szenarienmodellierung, um die Produktion und Nutzung von Biomasse in der Land- und Forstwirtschaft und deren Auswirkungen auf Umweltindikatoren zu beschreiben.

⁵ <https://www.papierindustrie.de/papierindustrie/statistik>

Abbildung 2-4: Allgemeine Beschreibung der Arbeitsweise des Waldmodells FABio-Forest



Quelle: Eigene Darstellung in Böttcher et al. (2018a).

Das Waldsimulationsmodell FABio-Forest wird im Detail in Böttcher et al. (2018b) beschrieben. Es basiert auf Daten der Bundeswaldinventur (BWI) und beschreibt das Wachstum einzelner durch die Inventuren erfasster Bäume mithilfe eines empirischen, distanzunabhängigen Einzelbaumwachstumsmodells. Dabei wird die Entwicklung und Dynamik der Bäume mit unterschiedlichen Zustandsvariablen wie Baumart, Alter, Durchmesser, Höhe, etc. abhängig von artspezifischen Eigenschaften im Modell beschrieben und mittels Wachstumsfunktionen fortgeschrieben (Abbildung 2-4). Die in FABio-Forest abgebildeten Prozesse untergliedern sich in die folgenden Sub-Modelle:⁶

- **Waldwachstumsmodell:** Zuwachs einzelner Bäume in Abhängigkeit von Baumart⁷, Durchmesser, Höhe, Konkurrenz und Standortbedingungen sowie von einfachen Annahmen zu Auswirkungen des Klimawandels (Kap. 2.3.1 und Anhang 7.1.2.5).
- **Einwuchsmodell:** Einwuchs von Baumarten aus dem im Bestand vorhandenen Artenpool sowie zufällig hinzukommenden bzw. gezielt geförderten weiteren Baumarten. Eine Überprägung durch Durchforstung ist möglich.
- **Mortalitätsmodell:** Mortalität einzelner Bäume in Abhängigkeit von Baumart, Durchmesser, Alter, Konkurrenz, Standortbedingungen und Baumartenvielfalt sowie von Annahmen zu natürlichen Störungen (Kap. 2.3.1 und Anhang 7.1.2.2 bis 7.1.2.4).

⁶ Siehe Details unter www.waldvision.de.

⁷ FABio-Forest simuliert 24 Arten bzw. Artengruppen. Für die meisten Auswertungen werden die Arten zu neun Baumartengruppen aggregiert: Fichte, Kiefer, Tanne, Douglasie und Lärche, Buche, Eiche, sonstige langlebige Laubbäume und sonstige kurzlebige Laubbäume.

- Totholzmodell: Entwicklung des Totholzvorrates (ergibt sich aus dem Input durch Erntereste und natürliche Mortalität sowie der Zersetzung des Holzes im Zeitverlauf).
- Bodenkohlenstoffmodell: Simuliert den Abbau von Kohlenstoff in Streu und Boden über die Zeit in Abhängigkeit von Klima und Streuqualität.
- Holzentnahme-Modell⁸: Im Holzverwendungsmodell TRAW wird die jährliche Nachfrage nach Waldholz modelliert. In FABio-Forest wird diese Nachfrage genutzt, um die Holzentnahme im Wald zu steuern (Kap. 2.3.2 und Anhang 7.1.2.1).

Als Indikatoren bzw. Ausgabevariablen werden in FABio momentan berechnet: Zuwachs der Bestände und Entwicklung des Holzvorrats, CO₂-Speicherleistung⁹ (lebende Biomasse, Bodenkohlenstoff, Totholz und Holzprodukte), Bestandsstruktur (Baumarten- und Durchmesser-Verteilung), Totholzvorrat nach Artengruppen sowie Holzentnahme nach Baumarten und Sortimenten basierend auf Derbholz-Durchmesser- und anfallendem Kronenrestholz.

Die Entwicklung des Waldes in Deutschland hängt vor allem von den biotischen und abiotischen Bedingungen auf Bestandesebene, von klimatischen Veränderungen und von der gewählten Art der Waldbewirtschaftung ab. Auf entsprechende Parametrisierungen in FABio-Forest wird in den folgenden Kapiteln eingegangen.

2.3.1 Waldentwicklung und Klimaveränderung

In FABio-Forest wird die Entwicklung des Waldes an jeder der simulierten Traktecken¹⁰ durch die folgenden Funktionen beeinflusst:

- Waldwachstumsmodell: Das Kernstück des Waldwachstumsmodells ist die Zuwachsfunktion, die auf jeden Einzelbaum in einem 1 ha Plot angewendet wird (Kap. 3.2 in Böttcher et al. 2018b). Modelliert wird der Grundflächenzuwachs eines Baums in Abhängigkeit von seinem Durchmesser und seiner Höhe, der Summe der Grundfläche der jeweils stärkeren Bäume im Plot (Konkurrenz), der bestehenden Bestandesgrundfläche des Plots, der Anzahl der Bäume im Bestand, und der Bonität des Plots (standortabhängige Wüchsigkeit; siehe Details in Böttcher et al. 2018b). Auf Basis der Daten aus BWI-2 und BWI-3 wurde der Zuwachs in FABio-Forest individuell für 24 Baumartengruppen parametrisiert.
- Mortalitätsmodell (siehe Details in Anhang 7.1.2.2 bis 7.1.2.4): FABio-Forest nutzt eine Mortalitätsfunktion, die in jedem Jahr für jeden Baum die Wahrscheinlichkeit errechnet, abzusterben. Eine durch einen Zufallsgenerator gezogene Zahl wird mit der durch die Mortalitätsfunktion bestimmten Absterbewahrscheinlichkeit verglichen und bestimmt jährlich für jeden Baum, ob er abstirbt. Die Mortalitätsfunktion berücksichtigt das Alter und den Brusthöhendurchmesser des Baums, die Grundfläche der jeweils stärkeren Bäume (Konkurrenz), die Bonität des Standorts, und die Baumartenvielfalt der Fläche. Junge und

⁸ In dem Fall, dass FABio-Forest nicht in einem Modellverbund integriert ist, kann intern im Holzprodukte-Modell das geerntete Holz in Verwendungsklassen eingeteilt und die Kohlenstoffvorräte in Holzprodukten errechnet werden.

⁹ Die verwendeten Berechnungsmethoden genügen den IPCC-Anforderungen im LULUCF-Sektor.

¹⁰ In der Bundeswaldinventur wird ein Erhebungsfläche als Trakt bezeichnet. In dem Trakt werden an vier Traktecken Daten erhoben (Riedel et al. 2017).

ältere Bäume haben ein höheres Mortalitätsrisiko als mittelalte Individuen. Gleichzeitig steigt die Mortalität mit steigender Konkurrenz.

Die Parametrisierung der baumartspezifischen Mortalitäts- und Zuwachsfunktionen basiert auf dem mittleren Zuwachs unter den mittleren Witterungsbedingungen im Zeitraum 2002 bis 2012 (s.o.). Wetterextreme wie die Trockenperioden in den Extremjahren 2018 bis 2020 können mit der bestehenden Mortalitäts- und Zuwachsfunktion nicht direkt abgebildet werden, da Niederschlag und Temperatur aufgrund fehlender Datengrundlage in den BWI-Plots bisher nicht als Eingangsparameter in der Zuwachsfunktion nutzbar sind. FABio-Forest nutzt derzeit folgende Ansätze, um dennoch Sensitivitäten zu Klimaveränderungen bzw. starke natürliche Störungen berücksichtigen zu können.

- Sensitivität der Mortalität (siehe Details in Anhang 7.1.2.4): Die jährlichen Waldzustandserhebungen (WZE) erfassen die Mortalität von Bäumen als einen Parameter. Daher ermöglichen es die Daten der WZE-Zeitreihe, die mittlere Mortalität in der Periode 2002-2012 (BWI-2 bis BWI-3) mit der Mortalität in anderen Perioden zu vergleichen. So stieg z.B. die Mortalität für Fichte von 2,04 % (Mittel 2002-2012) um den Faktor 4,40 auf 8,98 % in der Periode 2018-2021 an. Tabelle 7-2 in Anhang 7.1.2.4 listet die aus der WZE abgeleiteten Anpassungsfaktoren für Baumartengruppen und unterschiedliche Perioden auf. Die Anpassungsfaktoren spiegeln klimabedingte, unterschiedlich extreme Bedingungen wider. In FABio-Forest können die Faktoren für unterschiedliche Mortalitätsperioden ausgewählt und das Ergebnis der Basismortalitätsfunktion mit diesen Faktoren skaliert werden. Auf diese Weise lassen sich Sensitivitäten für die Waldentwicklung und Kohlenstoffspeicherung abschätzen, die sich durch klimabedingt zeitlich variierende Mortalität ergeben.
- Klimaabhängige Sensitivität des Zuwachses (siehe Details in Anhang 7.1.2.5): In der im Projekt BioSINK verwendeten FABio-Forest-Modellversion kann als ein vereinfachter Ansatz¹¹ für Sensitivitätsanalysen eingestellt werden, dass für Baumarten der Zuwachs 100 %, 75 %, 50 % oder 25 % vom Zuwachs der Referenzperiode 2002-2012 annimmt. Dieser Skalierungsfaktor wird auf den mithilfe der Zuwachsfunktion für einen Baum ermittelten Zuwachs angewendet. Dabei wird nicht zwischen Durchmesserklassen unterschieden. Durch die Möglichkeit zur Zuwachsskalierung können jahresscharf Annahmen zur Mortalität mit Annahmen zum Zuwachs abgestimmt werden (z.B. Mortalität wie in 2018-2021 mit 25 % oder 50 % des Zuwachses; Mortalität wie in 2002-2012 mit 75 % oder 100 % des Zuwachses).

2.3.2 Waldbewirtschaftung und Holzentnahme

In FABio-Forest können Annahmen zur Waldbewirtschaftung eingestellt werden. Wichtige Stellgrößen sind die Durchforstungsintensität (Baumdurchmesser, Eingriffsstärke), die Intensität der Zielstärkennutzung (Zieldurchmesser, Eingriffsstärke), die Extraktionsrate (Verbleib von Holz und Ernteresten im Wald) und die Baumartenanteile beim Jungwuchs (siehe Böttcher et al. 2018a). Vier Waldbewirtschaftungstypen sind in FABio als Standard hinterlegt, die differenziert nach Bundesland, Privat- bzw. Staats-/Körperschaftswald und Waldtyp (Laub-, Nadel- oder Mischwald) ausgewählt werden können:

¹¹ Im Waldklimafond-Projekt „Waldentwicklung als Folge von Veränderung der Holznachfrage, Klimaveränderung, natürlichen Störungen und Politikanforderungen - Eine Analyse der Reaktionsmöglichkeiten von Forst- und Holzwirtschaft“ (DIFENS, FZK: 2220WK32A4) wird eine Anbindung der Zuwachsfunktion in FABio-Forest an Klimaparameter erarbeitet.

- Business as Usual (BAU): Der Waldbewirtschaftungstyp BAU schreibt die gängige Praxis in der Forstwirtschaft in Deutschland fort. Zielstärkennutzung und Nutzungsintensität betragen im Mittel für Nadelbäume 54 cm und 76% und für Laubbäume 59 cm und 79%. Zielstärkendurchmesser und Nutzungsintensität variieren abhängig von Bestandstyp, Bundesland, und Besitztyp (Privatwald und Nichtprivatwald). Durchforstung erfolgt für Bäume ab 7 cm BHD bis maximal 80% des Zielstärkendurchmessers, und zwar alle 7-11 Jahre bei einer Durchforstungsintensität für Nadelbäume von 20 % des Vorrats und bei Laubbäumen von 10 % des Vorrats (weichlaubdominierte Bestände: 5 % des Vorrats).
- Intensivierung: Ausgehend von BAU wird die Nutzung intensiviert. Der jährliche Zuwachs wird vollständig abgeschöpft, die Durchforstungsintensität wird erhöht und Nadelbäume werden gegenüber Laubbäumen gefördert (mittlere Zieldurchmesser und Nutzungsintensität bei Nadelbäumen von 56 cm und 100% und bei Laubbäumen von 63 cm und 100%).
- Extensivierung: Gegenüber dem BAU wird die Nutzung extensiviert. Die Zieldurchmesser werden um ca. 20% erhöht (Nadelbäume 64 cm, Laubbäume 71 cm) und die Einschlagsintensität wird angepasst (Nadelbäume 92 %, Laubbäume 75 %). Die Durchforstungsintensität wird verringert und Laubbäume werden gegenüber Nadelbäumen gefördert.
- Nutzungsaufgabe: Alle Waldbewirtschaftungsmaßnahmen werden eingestellt.

In den BioSINK-Szenarien gelten für Laubbaum-dominierte Bestände der Waldbewirtschaftungstyp BAU und für Nadelbaum-dominierte Bestände der Waldbewirtschaftungstyp Intensivierung, aber ohne Förderung der Nadelbäume gegenüber Laubbäumen. Für das simulierte Subset „8A“ an BWI-Datenpunkten (8er-Grid mit jeweils bis zu 4 Traktecken, entspricht 36.692 simulierten Datenpunkten) wurde für 6% der Datenpunkte eine Null-Nutzung (Schutzgebietsstatus) simuliert. Der gewählte Waldbewirtschaftungstyp legt durch seine Vorgaben implizit jährlich eine Obergrenze für die maximale Holzentnahme fest. Sie ist dadurch bestimmt, welche und wie viele Bäume gemäß den Einstellungen des Waldbewirtschaftungstyps entnommen werden dürfen. In FABio-Forest ist eine hierarchische Entnahmelogik implementiert, die Sonderpflagemassnahmen (Schadholzentnahme), Durchforstung, und Zielstärkennutzung berücksichtigt (siehe Anhang 7.1.2.1). Dieser Entnahmelogik folgend wird die Menge an Waldholz, die im Holzverwendungsmodell TRAW nachgefragt wird, aus dem Wald entnommen. Übersteigt die Waldholznachfrage die maximal möglich Holzentnahme, so wird die nicht gestillte Nachfrage als Defizit ausgewiesen, das dann beispielsweise über Importe abgedeckt werden muss.

3 Entwicklung des Referenzszenarios

3.1 Energetische Holzverwendung im Referenzszenario

Das Referenzszenario geht für den Zeitraum 1990 bis 2020 von der Datengrundlage des Rohstoffmonitorings aus. Für die zukünftige Entwicklung wird das Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) für feste Biomasse als Ausgangslage unterstellt (BReg 2021). Für Großfeuerungsanlagen wird die Summe aus Energiewirtschaft und Industrie angenommen, für Kleinfeuerungsanlagen die Entwicklung des GHD-Bereichs¹², und für private Haushalte die der Haushalte im MMS-Szenario getrennt nach Art der Heizungsanlagen.

3.1.1 Private Haushalte

Nach der letzten Haushaltsbefragung zum Jahr 2020 (Jochem et al. 2023) betrug die energetische Holzverwendung in privaten Haushalten 27,0 Mio. m³_{swe}. Aufbauend auf den Haushaltsbefragungen des Rohstoffmonitoring wird die Energieholzverwendung in privaten Haushalten über die Anzahl der Feuerungsstätten und der durchschnittlichen Holzverwendung pro Haushalt fortgeschrieben. Der Anteil der privaten Haushalte mit einer Holz-Zentralheizungen (HZH) betrug laut Mikrozensus (MZ) im Jahr 2018 2,7 % (Jochem et al. 2023). Der Bundesverband der deutschen Heizungsindustrie (BDH) stellt heraus, dass ihr Anteil aktuell um jährlich 75.000 Biomasse-Wärmeerzeuger (0,2 % der privaten Haushalte) zunimmt.¹³ Daten zum Marktanzahlprogramm bzw. zur Bundesförderung für effiziente Gebäude stützen die Annahmen zu dieser Entwicklung.¹⁴ Ausgehend von diesen historischen Daten wird im Referenzszenario angenommen, dass sich der Anteil der Holz-Zentralheizungen ab 2021 entsprechend des MMS für private Haushalte entwickelt. Damit steigt er bis Mitte der 2030er Jahr auf 3,4 % und geht in der Folge bis 2050 auf 3,1 % zurück (Abbildung 3-1).

Für die Holz-Einzelraum-Feuerungsanlagen (EZF) wird laut Hennenberg et al. (2022) erwartet, dass sie aufgrund der verschärften BImSchV¹⁵ zwischen den Jahren 2019 und 2024 um ca. 20 % aus der Nutzung gehen werden. Bestätigt wird diese Tendenz bereits durch die Studien des Rohstoffmonitorings Holz, das bezogen auf die Wohneinheiten im Wohngebäudebestand für 2018 15,2 % EZF und für 2020 11,6 % EZF berichtet. Im Referenzszenario wird vom Jahr 2021 bis 2030 ein weiterer geringfügiger Rückgang auf 10,4 % angenommen. Bis zum Jahr 2050 wird im Referenzszenario unterstellt, dass der Bestand ab 2030 weitgehend stabil bleibt (10,0 %; Abbildung 3-1). An dieser Stelle weicht die Modellierung der EZF somit vom MMS ab, das von 2020 bis 2039 noch jährlich ein Wachstum von 0,8 % annimmt und erst ab 2040 von einem Rückgang ausgeht.

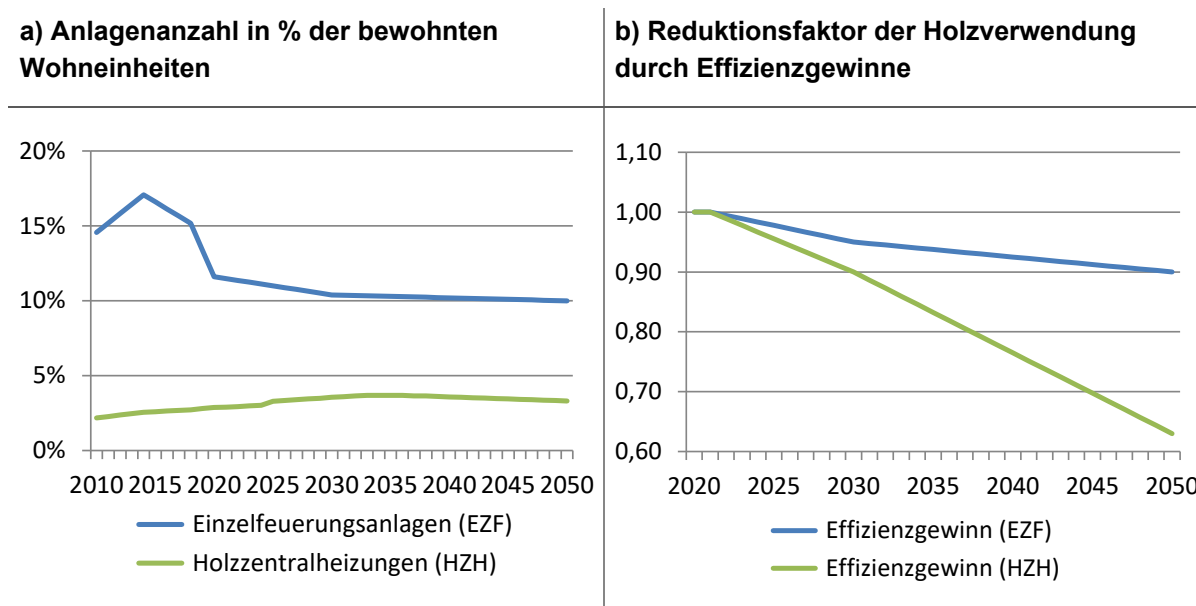
¹² GHD = Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

¹³ https://www.bdh-industrie.de/fileadmin/user_upload/Pressemeldungen/Marktentwicklung_Waermemarkt_2022-10.pdf

¹⁴ Z.B. Erneuerbare Energien in Zahlen (https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=1)

¹⁵ Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes

Abbildung 3-1: Entwicklung der Anlagenanzahl und der Nutzungseffizienz



Quelle: eigene Darstellung, INFRO. Anlagenzahlen bis 2018 nach Döring et al. (2020). Zur Fortschreibung ab 2021 siehe Text. EZF = Holz-Einzelraum-Feuerungsanlagen, HZH = Holzcentralheizungen. Abbildung b) berücksichtigt auch den Austausch ineffizienter Altanlagen.

Der Wohnungsbestand in Deutschland betrug in Wohn- und Nichtwohngebäuden im Jahr 2020 42,8 Mio. Wohneinheiten (Statistisches Bundesamt, Wohnungsfortschreibung)¹⁶, wovon 91,8 % (Mikrozensus 2018)¹⁷ als bewohnt galten. Die Basis für die absoluten Zahlen auf Grundlage der zuvor genannten Anteile betrug somit 39,3 Mio. Wohneinheiten.

Die genannten Anteile der EZF und HZH werden auf die bewohnten Wohneinheiten bezogen. Im Referenzszenario wird die historische Entwicklung von Fertigstellungen und Gebäudeabgang fortgeschrieben. Als Ausgangswert für die durchschnittliche Holzverwendung wird der Mittelwert der letzten Erhebungen (Jochem et al. 2023) angenommen: Für EZF 3,95 m³/a und für HZH 9,00 m³/a. Ausgehend von diesen Werten werden die jährlichen Verbräuche im Zeitverlauf mit Hilfe eines Reduktionsfaktors der Holzverwendung angepasst. Dieser Reduktionsfaktor berücksichtigt zu erwartende Effizienzgewinne und einen sinkenden Temperatureinfluss und verringert so die Verbräuche je Wohneinheit. Für die Effizienzgewinne wird – ausgehend von einer Nutzungseffizienz von 1,00¹⁸ im Jahr 2020 – im Referenzszenario angenommen, dass sich diese bis 2030 bei EZF auf 0,95 und bei HZH auf 0,90 verbessern. Nach 2030 wird für EZF eine leichte Effizienzsteigerung und für HZH eine starke Effizienzsteigerung angenommen (Expertenschätzung durch INFRO und ifeu). Zusätzlich zu den Effizienzgewinnen werden Annahmen zur Abnahme des Kälteeinflusses unterstellt (siehe Ableitung in Anhang 7.1.1.2). Die zeitliche Entwicklung des Reduktionsfaktors der Holzverwendung ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

Die Rohstoffanteile (Scheitholz, Altholz, Holzpellets, Holzhackschnitzel etc.) entsprechen bis zum Jahr 2020 den Ergebnissen und Fortschreibungen des Rohstoffmonitoring Holz (siehe Zusammenstellung in Hennenberg et al. 2022). Im Referenzszenario werden sie in den

¹⁶ <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/fortschreibung-wohnungsbestand-pdf-5312301.html>

¹⁷ <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/wohnen-in-deutschland-5122125189005.html>

¹⁸ Als Indexbasis wurde der Mittelwert 1987-2021 gewählt.

Folgejahren konstant gehalten. Der Grund für diese Annahme ist, dass die Rohstoffzusammensetzung stabilisierende strukturelle Abhängigkeiten aufweist: Bei privaten Haushalten ist z.B. der Anteil des Gebrauchtholzes relativ gering und variiert mit dem Anfall und nicht mit dem Markt. Auch wären größere Anteilsverschiebungen zwischen z.B. Scheitholz und Pellets erst bei deutlich stärkeren Anteilsverschiebungen zwischen EZF und HZH als im Referenzszenario angenommen zu erwarten. Großfeuerungsanlagen werden aus Kostengründen weiterhin bevorzugt auf Altholz zugreifen, die Papierindustrie wird wie bisher Schwarzlaube einsetzen, und Kleinfeuerungsanlagen werden aufgrund ihrer Heterogenität einen breiten Rohstoffmix aufweisen (z. B. kommunaler Waldbesitz, Restholz im Handwerk). Nennenswerte Veränderungen dürften erst mit starken Verknappungen an Holz auftreten, die im Referenzszenario als Salden (*gap projection*) ausgewiesen werden.

Aufgrund von Energiepreissteigerungen als Folge des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine kann für 2022/23 mit einem Sondereffekt bei der Holznachfrage in privaten Haushalten gerechnet werden. Da weder zu der Ausprägung dieses Effekts noch zur Höhe von Lagerbeständen aufgrund des milden Winters in 2022/23 Daten vorliegen, wurde auf eine Abbildung des Sondereffekts im Sinne einer konsistenten Anwendung langfristiger Modellgrundlagen vergleichbar mit dem MMS verzichtet.

3.1.2 Biomassefeuerungsanlagen

Biomassefeuerungsanlagen (BMA) werden in Großfeuerungsanlagen (GFA, BMA > 1 MW) und Kleinfeuerungsanlagen (KFA, BMA < 1 MW) kategorisiert. Ausgangspunkt zur Modellierung der Biomassefeuerungsanlagen sind die Erhebungen zu Biomassefeuerungsanlagen des Rohstoffmonitorings Holz (Döring et al. 2021a, Döring et al. 2021b). Für die Szenarien wird die Trendentwicklung in den Mit-Maßnahmen-Szenarien (MMS) für feste Brennstoffe des Projektionsberichtes der Bundesregierung unterstellt (BReg 2021). Für BMA über 1 MW werden die Entwicklungen der Energiewirtschaft und der Industrie im MMS angenommen, und für die BMA unter 1 MW die Entwicklung im MMS für den GHD-Bereich (Gewerbe, Handel, Dienstleistung). Das Referenzszenario für Biomassefeuerungsanlagen folgt der Entwicklung des MMS, und es werden keine weiteren Temperatureinflüsse oder Effizienzgewinne unterstellt. Analog zur Vorgehensweise bei den Haushalten wird im Referenzszenario der Rohstoffmix an die Ergebnisse zu Biomassefeuerungsanlagen im Rohstoffmonitoring Holz angelehnt und ab 2021 konstant gehalten.

3.2 Stoffliche Holzverwendung im Referenzszenario

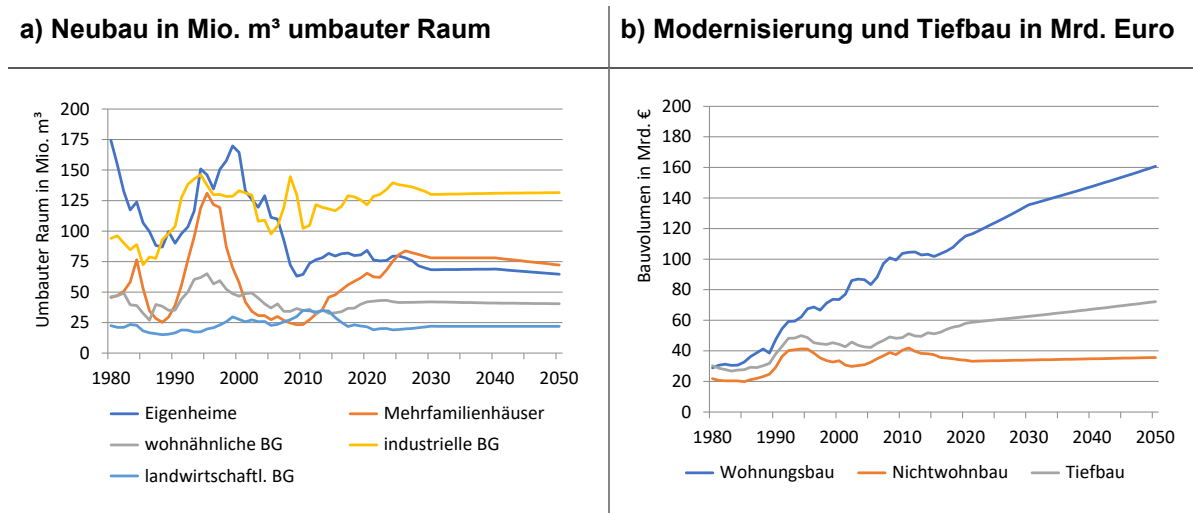
3.2.1 Baunachfrage

Die Holznachfrage des Bausektors im **Neubau** ergibt sich aus Bauaktivitäten im Bereich der Gebäudegruppen Wohnbau (Eigenheime, Mehrfamilienhäuser) und Nichtwohnbau (industrielle, wohnähnliche und landwirtschaftliche Betriebsgebäude). Eine Darstellung baustatistischer Begriffe finden sich im Anhang 7.3. Die Berechnungen erfolgen über die Baufertigstellungen des umbauten Raumes, Holzbauquoten und Holzeinsatzfaktoren nach Gebäudearten und überwiegend verwendeten Baustoffen (Holzbau und andere Baustoffe). Letzteres ist wichtig, da mehr als die Hälfte des eingesetzten Holzes im Neubau auf Gebäude mit überwiegend anderen Baustoffen entfällt. Diese enthalten weniger Holz pro Gebäude, ihre Anzahl ist aber viel größer als die von Häusern in Holzbauweise. Die Holzmengen pro Einheit (z. B. m³ Holz pro 1.000 m³ umbautem Raum für Eigenheime in Holzbauweise) stammen aus der Studie „KlimaBau“ (Mantau et al. 2018a) und werden im Referenzszenario konstant

gehalten. Die Holzbauquoten wurden für alle Gebäudearten bis 2021 aktualisiert¹⁹. Im Referenzszenario werden sie ab 2022 als konstant unterstellt. Die Veränderung der Holzbauquote ist eine geeignete Größe, um die stoffliche Nutzung in Szenarien zu adressieren.

Die Trendfortschreibung im Referenzszenario erfolgt anhand der folgenden Entwicklungen und Annahmen, die auf die Trendanalyse bis zum Jahr 2024 des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (Gornig et al. 2022) aufbauen. Der Eigenheimbau hatte im Jahr 2021 aufgrund der Förderung durch das s. g. Baukindergeld²⁰ ein hohes Niveau erreicht. Er wird für die Zukunft tendenziell zurückgehen (Abbildung 3-2). Dafür sprechen vor allem demografische Gründe in der Altersgruppe 25 bis 40 Jahre. Der Mehrfamilienhausbau wird aktuell durch hohe Bauüberhänge und hohe Fördermaßnahmen noch bis 2025 wachsen. In der Folge führen Sättigungseffekte zu einer leicht rückläufigen Entwicklung auf hohem Niveau. Im Nichtwohnbau bleibt der umbaute Raum industrieller Betriebsgebäude nach aktuellem Aufschwung (Warenlager) auf hohem Niveau. Wohnähnliche und landwirtschaftliche Betriebsgebäude verharren weitgehend auf dem aktuellen Durchschnittsniveau (Abbildung 3-2). Der umbaute Raum weist im Nichtwohnbau große Unterschiede in der Bausubstanz (Warenlager, Bankgebäude) auf. Dies wird durch die Holzeinsatzquoten abgebildet.

Abbildung 3-2: Entwicklung der bauwirtschaftlichen Marktsegmente



Quelle: Statistisches Bundesamt, Bautätigkeitsstatistik, Fachserie 5, Reihe 1, Genesis. Gornig et al. (2022) bis zum Jahr 2024 und eigene Darstellung, INFRO. (BG = Betriebsgebäude). Neubau: Wohnungsbau = Eigenheime und Mehrfamilienhäuser; Nichtwohnbau = landwirtschaftliche BG, wohnähnliche BG und industrielle BG.

Unter dem Begriff „**Modernisierung**“ werden im Baubereich alle „Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden“ zusammengefasst, also Baumaßnahmen, die nicht zum Neubau gehören. Auch Anbauten und Reparaturen fallen darunter. Bezogen auf das Hochbauvolumen in Deutschland hatte das Modernisierungsvolumen im Jahr 2021 im Wohnungsbau einen Anteil von 69,1 % und im Nichtwohnbau von 55,9 % (Gornig et al. 2022). Für das

¹⁹ Statistisches Bundesamt: Baugenehmigungen und Baufertigstellungen nach überwiegend verwendetem Baustoff (2007-2021; <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Bautaetigkeit/baugenehmigungen-baustoff-pdf-5311107.html>)

²⁰ Mit dem Baukindergeld fördert das Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat den erstmaligen Erwerb von selbstgenutztem Wohneigentum für Familien mit Kindern (<https://www.bmwsb.bund.de/Webs/BMWSB/DE/themen/stadt-wohnen/wohnraumfoerderung/baukindergeld/baukindergeld-node.html>).

Referenzszenario wird im Wohnungsbau unterstellt, dass das Trendwachstum vom Jahr 2000 bis zum Jahr 2020 des realen Bauvolumens bis 2030 anhält. Ab dem Jahr 2031 führen Sättigungseffekte zu einer Reduzierung des Trendwachstums auf die hälftige Zuwachsrate.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Hochbau (Wohnungsbau, Nichtwohnbau) und Tiefbau. Im Hochbau des Nichtwohnbaus weist das Modernisierungsvolumen aktuell geringere Wachstumsraten auf (Steigungsmaß 0,241). Im Referenzszenario wird angenommen, dass sich dies fortsetzt. Im Tiefbau ist das Trendwachstum mit einem Steigungsmaß von 0,719 höher als in der Modernisierung des Nichtwohnbaus, aber geringer als im Wohnungsbau (Steigungsmaß 1,706). Die genannten Wachstumsraten werden im Referenzszenario konstant gehalten.

Für die Modernisierung und den Tiefbau sind nur monetäre Werte verfügbar, die auf die Berechnungen des Deutschen Instituts für Wirtschaft (Gornig et al. 2022) zum Bauvolumen zurückgehen. Dabei handelt es sich um nominale Werte, die noch nicht inflationsbereinigt sind. In TRAW werden die nominalen Werten über Kettenindizes in reale, inflationsbereinigte Werte umgewandelt, damit aus Preissteigerungen keine Materialzuwächse entstehen. Ferner ist zu berücksichtigen, dass bei Umbasierung (Basisjahr 2010 wechselt zu 2015) auch die Holzverwendungsmengen entsprechend anzupassen sind.

3.2.2 Möbelprodukte und Holzverpackungen

Zur Holzverwendung im Möbelmarkt liegen aktuelle Analysen vor (Mantau et al., in press.). Im Verpackungssektor baut die Modellierung auf den WEHAM-Szenarien auf (Glasenapp et al. 2017).

Entsprechend der Fortschreibung der volkswirtschaftlichen Sektoren (siehe Anhang 7.1.1.1) und demografischer Entwicklungen wurden für das Referenzszenario Entwicklungsverläufe abgeleitet. Im Möbelsektor stellten die Entwicklungen der privaten Verwendung und des Außenhandels signifikante Treiber dar. Im Bereich der Holzverpackungen wurde basierend auf der Export- und Haushaltsentwicklung der Jahre 2000 bis 2020 eine empirisch begründete Schätzung erstellt.

3.2.3 Zellstoffnachfrage

Der Papiersektor wird in die Segmente Druckpapiere, Zeitungspapiere, Verpackungspapiere und Hygienepapiere aufgeteilt. Für die Holzverwendung in Deutschland ist der Holzeinsatz bei der Produktion von Holz- und Zellstoff von Bedeutung. Die Waldholzentnahme ist für den Papiersektor von geringerer Relevanz, da die Altpapiereinsatzquote bei ca. 75 % und die der Primärzellstoffe also entsprechend bei ca. 25 % liegt. Die Produktion von Holz- und Zellstoff verläuft sehr stabil. Im Referenzszenario wird die Nachfrage nach Holz- und Zellstoff in Anlehnung an demografische und volkswirtschaftliche Entwicklungen fortgeschrieben. Die Rohstoffanteile ergeben sich bis 2020 aus dem Rohstoffmonitoring und werden im Referenzszenario konstant gehalten.

3.2.4 Sonstige Holzverwendungen

Sonstige Holzverwendungen reichen von Holzspielzeug, Bleistiften, Campingbesteck bis zu Armaturenblettverkleidungen. Aufwand und Bedeutung einer Modellierung dieses Bereichs

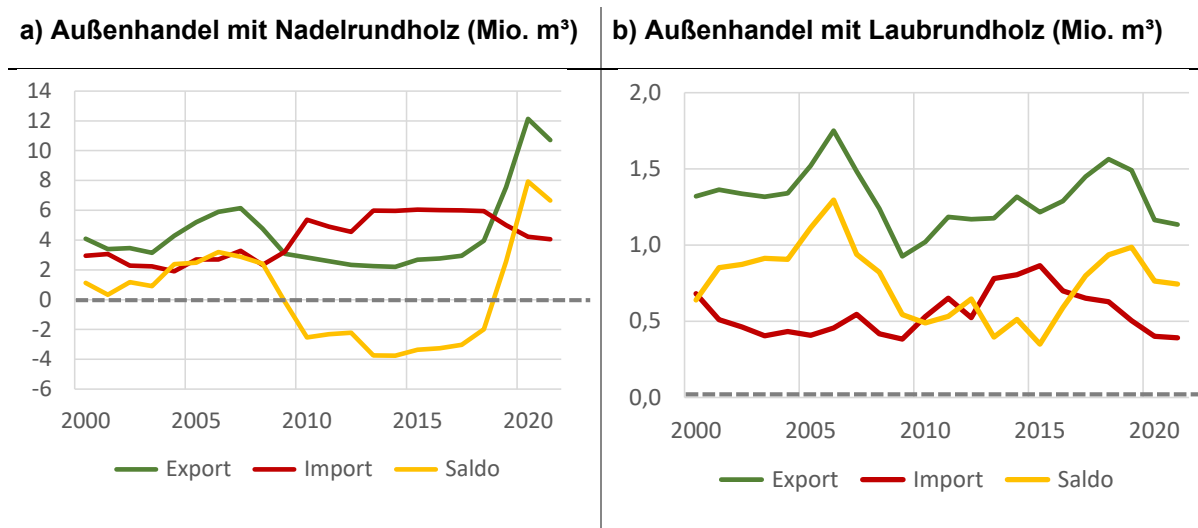
stehen in keinem sinnvollen Verhältnis. Im Referenzszenario werden sonstige Holzverwendungen nicht modelliert. Dies betrifft auch mögliche neue biobasierte Produkte²¹.

3.2.5 Berücksichtigung des Außenhandels

Die Holzverwendung in den Endwarenssektoren schließt Inlandsproduktion und Außenhandel ein. Für die Rohwarenimporte und die Halbwaren (z. B. Zellstoff) wird er in der bisherigen Form dargestellt und fortgeschrieben. Sofern sich im Rahmen der Modellierung Defizite oder Überschüsse ergeben (z.B. Holznachfrage in FABio-Forest nicht gedeckt), wird qualitativ zu argumentieren sein, inwieweit der Außenhandel eine Lösung/Ventil sein kann (siehe Kap. 4.1.3). Der Aufwand einer Modellierung – sofern er überhaupt realisierbar ist – steht in keinem Verhältnis zu den Fragestellungen, die im Projekt BioSINK beantwortet werden sollen. Der Außenhandel von Energieholzprodukten wurde in Hennenberg et al. (2022) bereits sehr umfangreich behandelt.

Der Außenhandel mit Rundholz (Derbholz) muss zusätzlich zu den vorangegangenen Berechnungen für die Ermittlung der Waldholzentnahme berücksichtigt werden. Ein Außenhandelsdefizit reduziert die Waldholzentnahmen, da die inländische Verwendung durch den Importüberschuss gedeckt wird. Ein Außenhandelsüberschuss steht in einem Zusammenhang mit einer erhöhten Waldholzentnahme. Der Außenhandelsaldo von Nadelrundholz (Abbildung 4-16) war im ersten Jahrzehnt der Darstellung überwiegend positiv, wies dann Defizite aus und erreichte mit der Zunahme an Waldschäden (vgl. Abbildung 4-14) erhebliche Überschüsse. So ist in den Jahren ab 2020 die Waldholzentnahme für Nadelrundholz um gut 10 Mio. m³ höher als die inländische Holzverwendung (vgl. Abbildung 4-16).

Abbildung 4-3: Außenhandel mit Nadel- und Laubrundholz



Quelle: Statistisches Bundesamt nach Rohstoffmonitoring 2022²². INFRO.

²¹ Im laufenden Waldklimafond-Projekt DIFENs (FZK: 2220WK32B4)¹¹ finden vertiefte Analysen zu neuen biobasierten Produkten im Rahmen einer Delphi-Studie statt.

²² Das Rohstoffmonitoring setzt sich aus zahlreichen Einzelstudien zusammen (siehe Mantau 2023 sowie Mantau 2018).

Der Außenhandel mit Laubrundholz weist für die gesamte Zeit zwischen dem Jahr 2000 und dem Jahr 2021 einen Überschuss aus. Für die Holzentnahme von Laubholz bedeutet dies eine über die Inlandsverwendung hinausgehende Entnahme von etwa 0,5 bis 1,0 Mio. m³ (Abbildung 4-16).

Um im Referenzszenario Auswirkungen durch den Außenhandel auf die Waldbewirtschaftung zu berücksichtigen, wird das Außenhandelsaldo als Mittelwert der Jahre 2002 bis 2021 fortgeschrieben und auf die im Waldmodell anzustrebende Holzentnahme angerechnet. Zudem gilt für Nadel- und Laubholz, dass nach der Außenhandelsstatistik eine Aufteilung nach Sägerundholz und sonstigem Rundholz nicht möglich ist. Aufgrund der hohen Transportkostenintensität von Rundholz spricht vieles für die Annahme, dass es sich bei Importen und Exporten überwiegend um höherwertigeres Sägerundholz handelt. Als Annahme im Referenzszenario wird ein Verhältnis von 75:25 (Sägerundholz zu sonstigem Derbholz) angenommen.

3.3 Waldbewirtschaftung

Tabelle 3-1 stellt die Annahmen zur Waldmodellierung im Referenzszenario zusammen. Ausgehend von den Daten der BWI-3 im Jahr 2012 beginnt die Waldmodellierung im Jahr 2013. Bis zum Jahr 2021 wird die Nachfrage nach Waldbiomasse (Stammholz, industrielles Holz und Restholz) aus historischen Daten abgeleitet (Tabelle 7-6). Ab dem Jahr 2022 wird die im Referenzszenario modellierte Holznachfrage verwendet (Tabelle 7-7). Um die Holznachfrage zu bedienen wird anfallendes Holz aus Schadholznutzung, Waldpflege und Durchforstung verwendet und zusätzlich Bäume entsprechend der Zielstärkennutzung eingeschlagen. Für die Schadholznutzung wird angenommen, dass 90% des im Stammholzsegment ($\varnothing > 20$ cm) anfallenden Schadholzes entnommen und genutzt wird. Für das Industrielholzsegment wird eine Nutzung von 50% und für Restholz von 10% angesetzt. Als Waldbewirtschaftungstyp wird im Referenzszenario für laubdominierte Bestände *Business as Usual* (BAU) und für nadelholzdominierte Bestände eine Bewirtschaftung gemäß des Intensivierungsszenarios, jedoch ohne Waldumbau zu mehr Nadelholz, angenommen (vgl. Kap. 2.3.2). Für den Zuwachs wird aufgrund der ungünstigen Witterungsbedingungen für die Jahre 2018 bis 2021 von einer deutlichen Minderung ausgegangen (siehe Details in Anhang 7.1.2.6). Ab dem Jahr 2022 werden für die drei Sensitivitäten „geringe Störungen“, „mittlere Störungen“ und „starke Störungen“ von unterschiedlich stark ausgeprägten Zuwachsminderungen ausgegangen (siehe Tabelle 3-1 und Anhang 7.1.2.5). Für die Jahre 2013 bis 2021 wird die Mortalitätsrate jährlich basierend auf den historischen Daten der WZE skaliert. Für die Fortschreibung ab 2021 werden für die drei Sensitivitäten unterschiedliche Annahmen zur Mortalität getroffen (siehe Tabelle 3-1 und Anhang 7.1.2.47.1.2.5).

Tabelle 3-1: Annahmen zur Waldmodellierung im Referenzszenario

Jahre	Waldbewirtschaftungstyp	Annahmen zum Zuwachs	Annahme zur Mortalität	Nachfrage nach Waldbiomasse
2013	Nadeldominierte Bestände: Intensivierung	Faktorielle Anpassung der Zuwachsmittelwerte rechnerischer Reinbestände (vgl. Anhang 7.1.2.6, Tabelle 7-3)	Jahresscharfe Skalierung der Basismortalität gemäß WZE	Historische Nachfrage jahresscharf nach ERR (Tabelle 7-6 in Anhang 7.2)
2014				
2015				
2016		Reduzierung des Zuwachses gegenüber 2013-2017 auf 50% bei Nadelbäumen und auf 75% bei Laubbäumen (vgl. Anhang 7.1.2.6)		
2017				
2018				
2019				
2020	Laubdominierte Bestände: <i>Business as Usual</i> (BAU)	Geringe Störungen: Mittelwert 2013-2017; Mittlere Störungen: Mittelwert 2002-2017; Starke Störungen: 0,9 * Mittelwert 2002-2017; (vgl. Anhang 7.1.2.5)	Geringe Störungen: Mittelwert 2013-2017 (WZE); Mittlere Störungen: Mittelwert 2002-2017 (WZE); Starke Störungen: Mittelwert 2002-2021 (WZE); (Anhang 7.1.2.4)	Modellierte Nachfrage jahresscharf nach TRAW (Tabelle 7-8 in Anhang 7.2)
2021				
ab 2022	(vgl. Kap. 2.3.2)			

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut. ERR = Einschlagsrückrechnung (Jochem et al. 2022), WZE = Waldzustandserhebung (siehe Details in Anhang 7.1.2.4).

4 Ergebnisse zum Referenzszenario

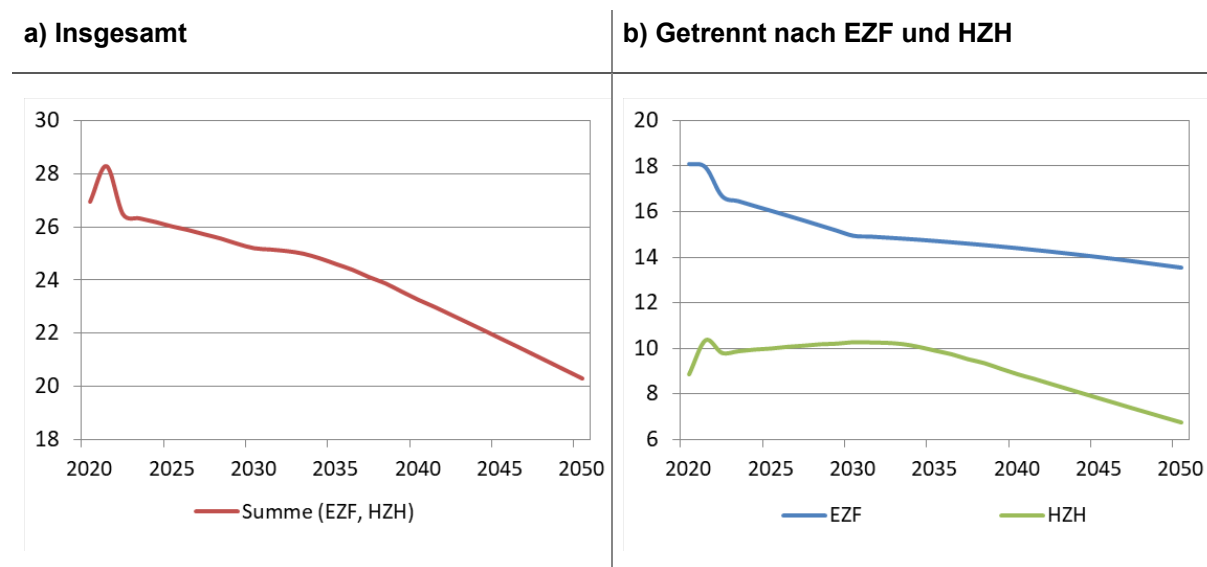
4.1 Modellierung der Holzverwendung

Aufgrund ihrer inhaltlichen Bedeutung für die Fragestellungen des Projektes BioSINK werden im Folgenden die Verwendungssektoren der energetischen Holznutzung ausführlicher dargestellt. Aufgrund der hohen Massenströme wird außerdem detaillierter auf den Baubereich eingegangen. Die Ergebnisse zu den Bereichen Möbelmarkt, Holzverpackung und Zellstoffindustrie sowie zum Außenhandel werden komprimiert wiedergegeben.

4.1.1 Energetische Holzverwendung

Im historischen Verlauf erfolgte während der 2000er-Jahren ein starker Anstieg der Energieholzverwendung (Abbildung 4-4). Abbildung 4-1 a zeigt die Entwicklung der Energieholzverwendung in den privaten Haushalten im Referenzszenario. Ausgehend von einer Energieholzverwendung von 27,0 Mio. m^3_{swe} im Jahr 2020 machte sich im Jahr 2021 eine Kälteeinfluss in den bis 2021 verfügbaren Wetterdaten bemerkbar. Ab 2022 greift die Trendfortschreibung des Kälteeinflusses, die zu einer kontinuierlichen leichten Abnahme der Holzenergieverwendung führt. Deutlich stärker wirken sich aber die Modellannahmen bezüglich der beiden Heizungsanlagentypen aus (Abbildung 4-1 b). Die Zunahme der Holzzentralheizungen führt trotz Effizienzsteigerungen und der Berücksichtigung von Temperatureffekten bis Mitte der 2030er Jahre zu einer steigenden Holzverwendung. Neben der Anlagenentwicklung ist dieses Ergebnis vor allem eine Folge des höheren durchschnittlichen Holzverbrauchs im Durchschnitt der Jahre 2021 bis 2030 in HZH ($8,0 m^3$) gegenüber Holz-Einzelraum-Feuerungsanlagen (EZF, $3,6 m^3$). Dennoch geht in Summe die Energieholzverwendung von 27,0 Mio. m^3_{swe} im Jahr 2020 auf 25,2 Mio. m^3_{swe} im Jahr 2030 zurück, da die EZF in diesem Zeitraum z.B. zu Gunsten der HZH deutlich zurückgehen. Bis zum Jahr 2050 nimmt im Referenzszenario die Energieholzverwendung um weitere 4,9 Mio. m^3_{swe} auf 20,3 Mio. m^3_{swe} ab (Abbildung 4-1).

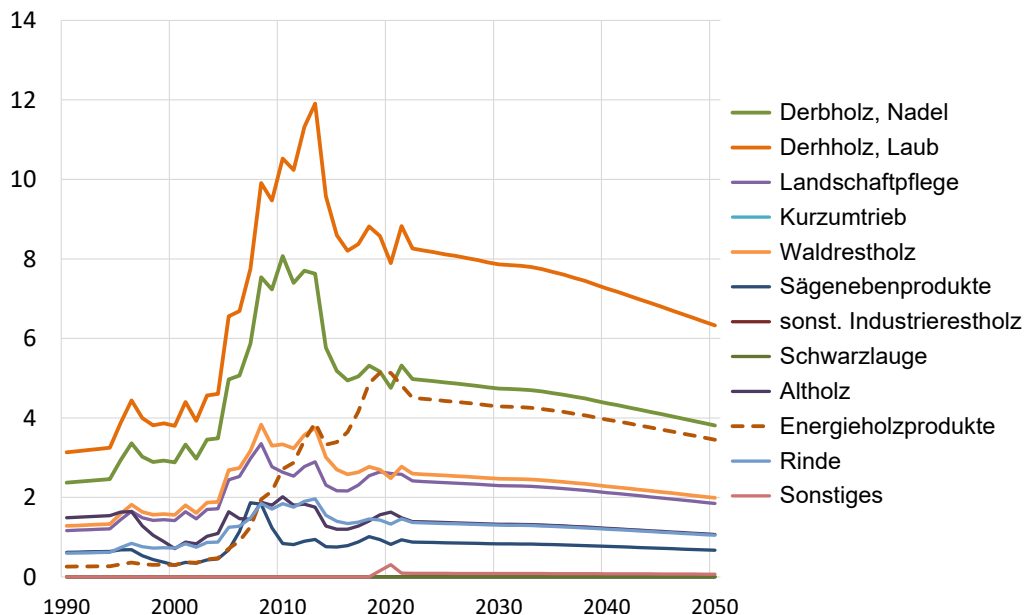
Abbildung 4-1: Entwicklung der Energieholzverwendung in privaten Haushalten in Mio. m^3_{swe}



Quelle: eigene Darstellung, INFRO. REF = Referenzszenario, EZF = Holz-Einzelraum-Feuerungsanlagen, HZH = Holzzentralheizungen.

In Abbildung 4-2 ist die Energieholzverwendung in privaten Haushalten nach Sortimenten differenziert dargestellt. In der historischen Entwicklung entfiel die starke Zunahme der Energieholzverwendung während 2000er-Jahren vor allem auf Energieholzprodukte (Pellets, Holzbriketts) und auf Laub- und Nadelholz. Im Jahr 2020 wurden zu 47,0 % Waldscheitholz (29,3 % Laubholz, 17,7 % Nadelholz) eingesetzt. Auf Energieholzprodukte (Pellets, Holzbriketts) entfielen 19,0 % und auf die übrigen Sortimente 33 %. Unter der Annahme, dass die Anteile der eingesetzten Holzsortimente in Zukunft konstant bleiben, entwickelt sich die Verwendung von Energieholz in privaten Haushalten entsprechend der Darstellung in Abbildung 4-2. Im Referenzszenario sinkt die Verwendung an Energieholz in privaten Haushalten in allen Sortimenten bis zum Jahr 2035 geringfügig und danach stärker (Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2). Letzteres ist zu deutlichen Anteilen eine Folge des ab 2035 erwarteten Rückgangs der Nachfrage nach Energieholz im MMS für HZH und deren Effizienzsteigerung.

Abbildung 4-2: Entwicklung der Sortimente der Energieholzverwendung in Mio. m³_{swe} in privaten Haushalten nach Holzsortimenten

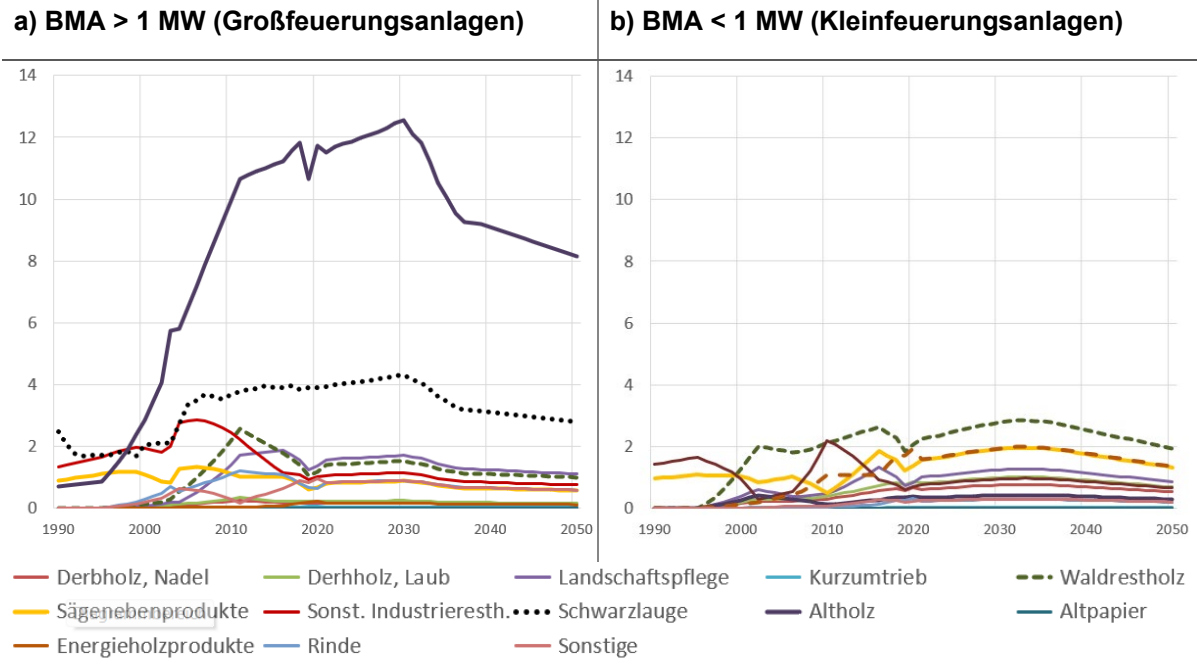


Quelle: eigene Darstellung, INFRO.

Die Holzverwendung in Großfeuerungsanlagen (GFA, BMA > 1 MW) und Kleinfeuerungsanlagen (KFA, BMA < 1 MW) unterscheidet sich sehr deutlich im Hinblick auf das Volumen des verwendeten Energieholzes und den eingesetzten Sortimenten (Abbildung 4-3). Im Jahr 2020 verwendeten Großfeuerungsanlagen 22,1 Mio. m³_{swe} Holzrohstoffe und dabei überwiegend Altholz (53,1 %). Auch der starke Anstieg der Holzverwendung in GFA in den 2000er-Jahren entfiel auf Altholz. KFA verwendeten mit 9,3 Mio. m³_{swe} knapp halb so viel an Energieholz wie GFA. Zudem streute die Sortimentsstruktur breiter. In KFA kamen vor allem Waldrestholz, Sägenebenprodukte und Energieholzprodukte zum Einsatz. Im Referenzszenario steigt die Verwendung von Energieholz in GFA bis zum Jahr 2030 weiter an, geht bis zum Jahr 2035 deutlich zurück, und setzt sich dann in einem moderaten Abschwung fort. Gegenüber dem Jahr 2020 beträgt der Rückgang 6,2 Mio. m³_{swe} (-29,2 %). Die Energieholzverwendung in KFA steigt bis in die frühen 2030er-Jahre und geht dann in einen mit den GFA vergleichbaren Abschwung über. Gegenüber 2020 beträgt der Rückgang

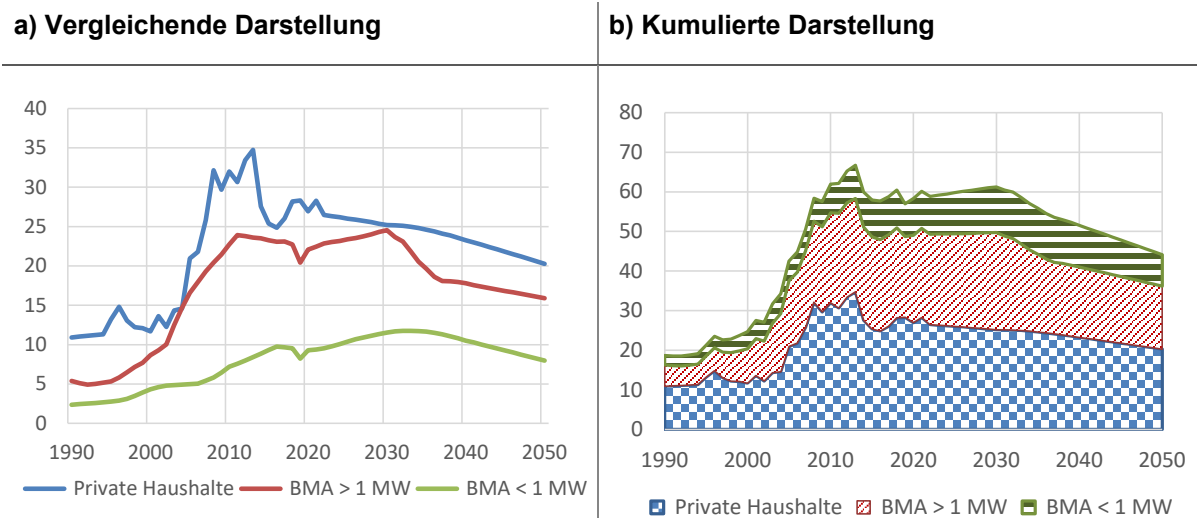
1,3 Mio. m³_{swe} (-14,9 %). Die Verteilung der Sortimente im Jahr 2020 wird wie bei privaten Haushalten bis zum Jahr 2050 als konstant fortgeschrieben (Abbildung 4-3).

Abbildung 4-3: Entwicklung der Sortimente der Energieholzverwendung in Mio. m³_{swe} in Biomassefeuerungsanlagen nach Holzsortimenten



Quelle: eigene Darstellung, INFRO. BMA = Biomassefeuerungsanlage.

Abbildung 4-4: Entwicklung der Energieholzverwendung in Mio. m³_{swe} nach Verwendungsgruppen im Referenzszenario



Quelle: eigene Darstellung, INFRO. BMA = Biomassefeuerungsanlage.

In Abbildung 4-4 wird die Entwicklung der historischen Energieholzverwendung zwischen den Jahren 1990 und 2020 sowie die Entwicklung im Referenzszenario für die Jahre 2021 bis 2050 visualisiert. Im Referenzszenario weist die Energieholzverwendung bis 2030 insgesamt einen leichten Anstieg bis auf 61,3 Mio. m³_{swe} auf. Danach geht die Energieholzverwendung in allen Bereichen zurück. Gegenüber dem Basisjahr 2020 (58,3 Mio. m³_{swe}) reduziert sich die Energieholzverwendung im Jahr 2050 auf 44,1 Mio. m³_{swe}. Dies ist ein Rückgang um 14,2 Mio. m³_{swe} (-24,3 %).

4.1.2 Stoffliche Holzverwendung

4.1.2.1 Bau

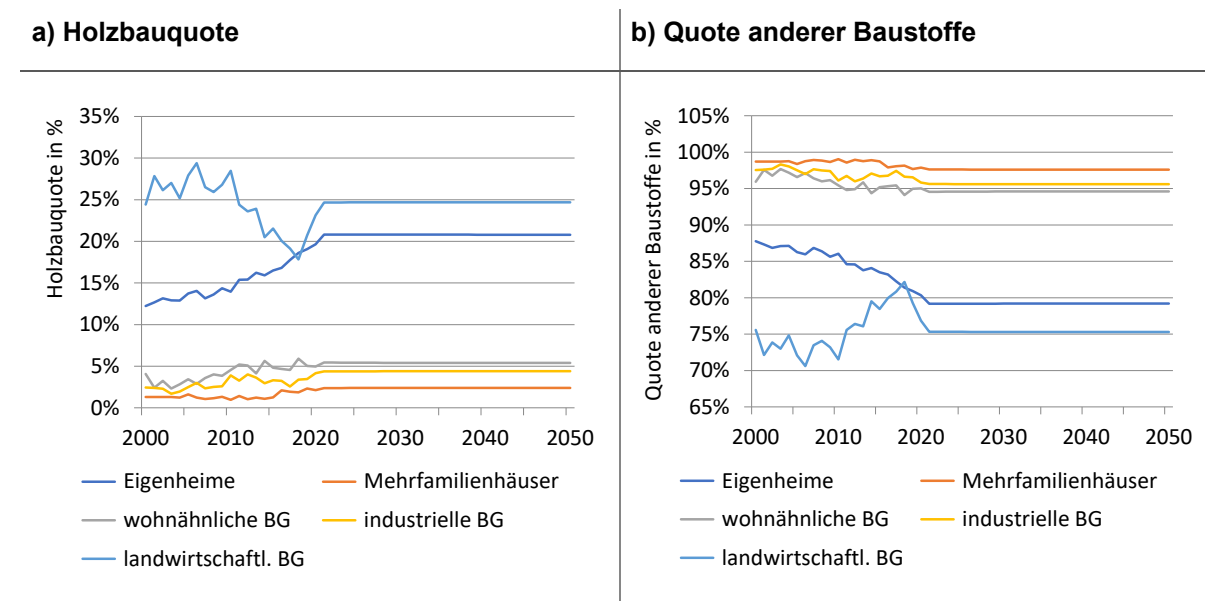
Neubau

Die historische Entwicklung der Holzbauquoten und die modellierte Entwicklung sind in Abbildung 4-5 dargestellt. Die konjunkturelle Entwicklung im Neubau wird entsprechend der in Kap. 3.2.1 geschilderten Annahmen und Prognosen fortgeschrieben. Für die Jahre 2007 bis 2021 wurde die Holzbauquote für die Gebäudebereiche den Sonderauswertungen des Statistischen Bundesamtes entnommen. Die höchste Holzbauquote wies der landwirtschaftliche Bau mit 24,7 % auf. Diese ging jedoch zurück, während die Holzbauquote im Eigenheimbau kontinuierlich auf 20,8 % stieg (Abbildung 4-5).

Definition: Die Holzbauquote wird in diesem Bericht über den umbauten Raum bestimmt. Somit kann es im Vergleich zu Quoten, die auf der Grundlage der Anzahl an Gebäuden oder Wohneinheiten gebildet werden, zu geringfügigen Abweichungen kommen. Der Grund für die Wahl des umbauten Raumes liegt, im Vergleich zum Gebäude, an der präziseren Basis und an den abgeleiteten Holzverwendungskennziffern, die sich auf 1.000 m³ umbauten Raum beziehen.

Die geringste Holzbauquote findet sich im Mehrfamilienhausbau. Sie lag 2021 bei 2,4 %, hat sich aber seit dem Jahr 2008 (1,2 %) verdoppelt (Abbildung 4-5). Eine Öffnung der Gesetzgebung für den Holzeinsatz im mehrgeschossigen Wohnungsbau und verbesserte konstruktive Möglichkeiten haben die Anteilsgewinne in dieser Gebäudegruppe ermöglicht. Sowohl bei wohnähnlichen Betriebsgebäuden (5,4 %) als auch bei industriellen Betriebsgebäuden (4,4 %) kam es bis zum Jahr 2021 zu leichten Anteilszuwächsen. Im Referenzszenario werden die Holzbauquoten aus dem Jahr 2021 als konstant bis zum Jahr 2050 fortgeschrieben. Die im Folgenden dargestellten Veränderungen in der Holzverwendung resultieren im Referenzszenario somit ab dem Jahr 2022 ausschließlich aus konjunkturellen Veränderungen.

Abbildung 4-5: Entwicklung der Holzbauquoten und Quoten anderer Baustoffe am umbauten Raum im Neubau



Quelle: eigene Darstellung, INFRO. BG = Betriebsgebäude.

In den Projekten „Holz im Bau“ und „KlimaBau“ wurden Kennziffern für die Holzverwendung nach Gewerken (z.B. Fenster, Dämmung) und Holzprodukten (z.B. Kantholz, Treppenstufen) erfasst (Weimar und Jochem 2013, Mantau et al. 2018a). Hierauf aufbauend werden die für die Produkte eingesetzten Halbwaren und Verschnittfaktoren in der Produktion und auf der Baustelle ermittelt, um die eingesetzten Halbwarenvolumen insgesamt (brutto) zu bestimmen. Zur näheren Erläuterung der Begriffe der Baustatistik (Gebäudeart, Bauweise, Baustoff) wird auf den Anhang 7.3 verwiesen. Eine systematische Darstellung der Teilsegmente des Holzmarktes ist in Abbildung 2-3 dargestellt.

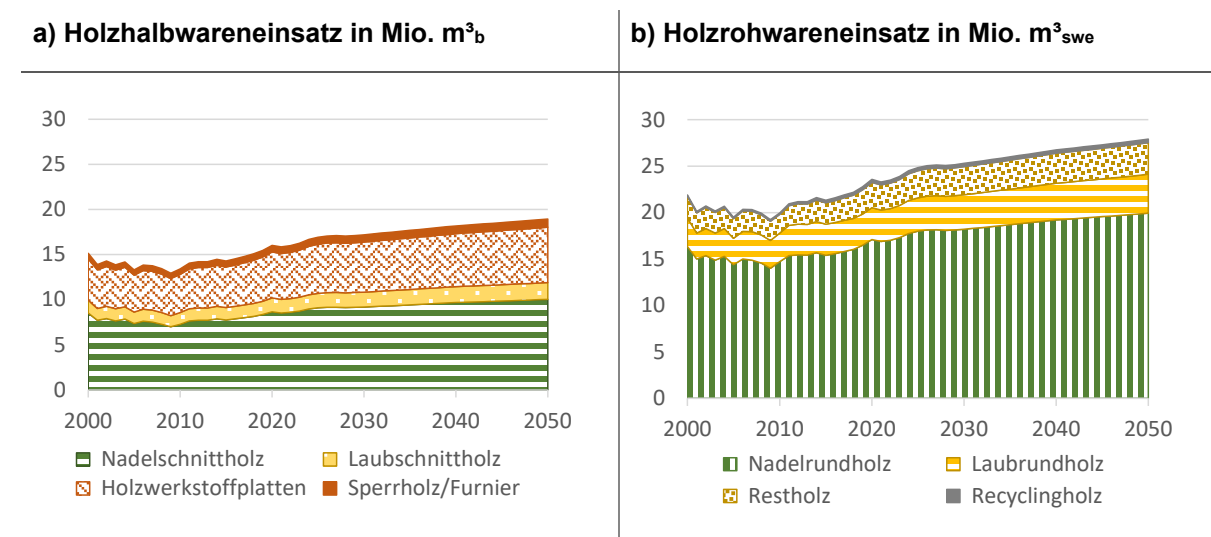
Im Eigenheimbau wird zwischen Holzbau in Fertigteilbauweise und sonstigen Holzbauten unterschieden. Letztere enthalten einen Anteil an Massivholzhäusern mit hohem Holzanteil. Bei den übrigen Gebäudearten wurde lediglich zwischen Holzbau und anderen Baustoffen unterschieden. Gebäude sind Megaprojekte, in denen die verschiedensten Baustoffe verwendet werden. Das Statistische Bundesamt teilt die Gebäude nach Baustoffen entsprechend des überwiegend verwendeten Baustoffs in der Konstruktion ein. So ist ein Haus, das mit Ziegeln gebaut wurde, aber einen Dachstuhl aus Holz hat, ein Ziegelhaus und ein Haus dessen Konstruktion vor allem mit Holz erstellt wurde ein Holzhaus, auch wenn es im Erdgeschoss mit Ziegeln verkleidet ist. Die Materialverwendung ist folglich nicht über die statistische Kategorie bestimmbar, sondern nur über empirische Erhebungen zu den Materialien in den verschiedenen Bauteilen. Entsprechend reicht der Holzeinsatz in m^3 Holz pro 1.000 m^3 umbauten Raum von $2,4 \text{ m}^3$ in industriellen Betriebsgebäuden der Kategorie andere Baustoffe bis zu $145,0 \text{ m}^3$ in Eigenheimen der Kategorie sonstiger Holzbau (Nicht-Fertigteilbau).

Auch Eigenheime mit überwiegend anderen Baustoffen in der Konstruktion kommen auf beachtliche $24,2 \text{ m}^3$ Holz pro 1.000 m^3 umbautem Raum. Das bedeutet für die Modellierung, dass bei einer Erhöhung der Holzbauquote nicht nur die höhere Holzverwendung in Holzhäusern zu berücksichtigen ist, sondern auch, dass der Holzanteil der verdrängten Nichtholzhäuser entfällt, da deren Anteil an den neu gebauten Häusern sinkt.

Definition: Für die außergewöhnliche Bandbreite der Produkte im Bau wurde als einheitliches Maß der Baukubikmeter entwickelt. Ein Baukubikmeter (m^3_b) entspricht dem Volumen, das ein Produkt im Baukörper einnimmt. Dies ist erforderlich, um die Dokumentationsunterlagen eines Baukörpers (Baupläne, Ausschreibung) adäquat erfassen zu können.

Im Jahr 2020 wurden im Baubereich 18,7 Mio. m^3_b Holzhalbwaren im Baukörper eingesetzt. Der Anteil des eingesetzten Rundholzes betrug in diesem Jahr 87,0 % und der der eingesetzten Rest- und Recyclinghölzer 13,0 %. Der eingesetzte Laubholzanteil am Rundholz ist zwischen den Baumarktsegmenten unterschiedlich und schwankt zwischen 14,6 % in der Modernisierung des Wohnungsbaus und 2,1 % im Neubau industrieller Betriebsgebäude. Im Innenausbau (z. B. Treppe, Boden) wird mehr Laubholz verwendet als in der Konstruktion. Da im Modernisierungsbereich tendenziell mehr Innenausbauten als Konstruktionen erfolgen, ist der Laubholzanteil dort höher. Die linke Seite der Abbildung 4-6 zeigt das Volumen der verbauten Holzhalbwaren im Baukörper (m^3_b). Die rechte Seite stellt das höhere Volumen der dafür eingesetzten Rohwaren unter Berücksichtigung von Kompression (z.B. Spanplatte) und der Berücksichtigung von Reststoffen beim Schnittholz (m^3_{swe}) dar.

Abbildung 4-6: Verbautes Holzvolumen im Neubau

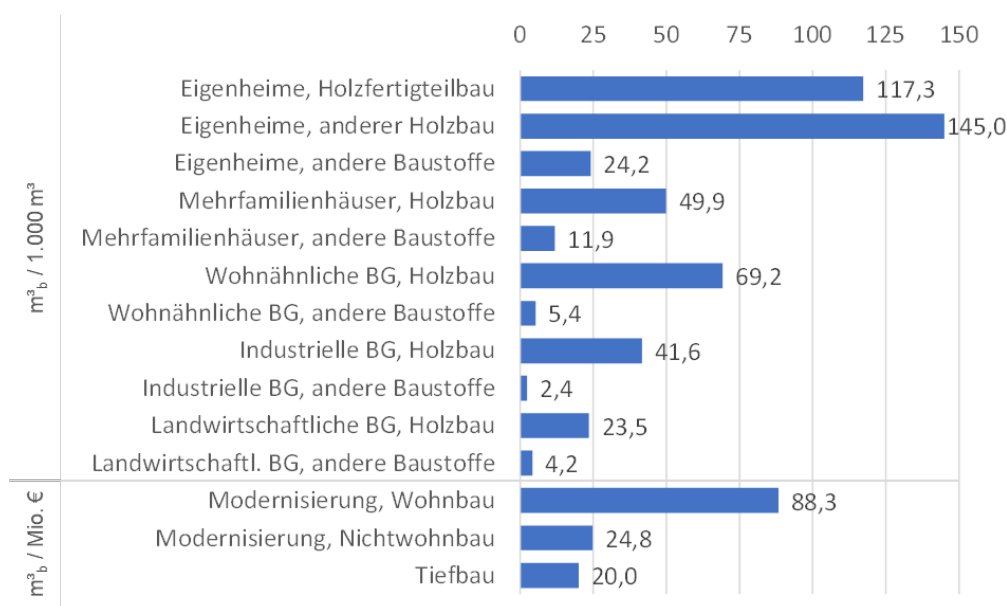


Zur Rückrechnung auf die eingesetzten Holzrohstoffe ist auch der Verschnitt von Bedeutung. Verschnitt kann bei der Produktion und auf der Baustelle anfallen. Er unterscheidet sich nach Produkt und auch nach Gebäudeart, weil jeweils verschiedene Produkte eingesetzt werden. Beispielsweise betrug der Verschnitt bei einem Eigenheim in Holzbauweise 19,5 % und bei einem Eigenheim mit überwiegend anderen Baustoffen in der Konstruktion 22,3 %. Bei der Rückrechnung in Rohwaren ist zudem die Dichte der Halbwaren und die Ausbeute zu berücksichtigen. Dies führt dazu, dass im Jahr 2050 ein Holzhalbwareneinsatz von 18,9 Mio. m^3_b einem Holzrohwareneinsatz von 27,9 Mio. m^3_{swe} entspricht (Abbildung 4-6). Das bedeutet aber nicht, dass die Speicherkapazität nur 66% beträgt, da es sich um Kubikmeter handelt, die auf der Halbwarenebene höher verdichtet sein können (Spanplatte) oder als Reststoffe der Schnittholzproduktion in Faserplatten zurückgeführt werden können.

Die Holzverwendung unterscheidet sich je nach Bauweise. Während bei Gebäuden in Holzbauweise die Holzverwendung breit streut, ist sie bei Gebäuden der Kategorie andere Bauweise stärker auf Schnittholz (Dachstuhl) konzentriert. Die Abbildung 4-8 a zeigt für das Jahr 2016 das verbaute Holzvolumen in m^3_b pro 1.000 m^3 umbauten Raum, bzw. in der

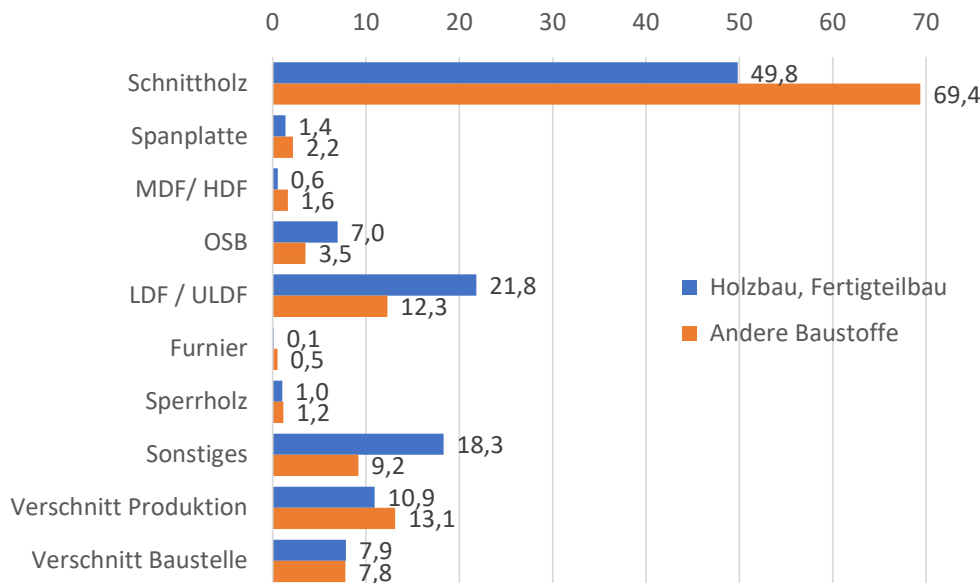
Modernisierung m^3_b pro Mio. Euro realem Bauvolumen. Am Beispiel der Eigenheime wird in Abbildung 4-8 deutlich, dass in Gebäuden mit geringen Holzanteilen vorwiegend Schnittholz eingesetzt wird. In Gebäuden mit hohen Holzanteilen steigt der Anteil anderer Holzhalbwaren deutlich an. In Holzhalbwaren wie OSB und LDF sind höhere Anteile an Laubholz enthalten als im Schnittholz, was die oben genannten Zunahme des Einsatzes von Laubholz in Gebäuden in Holzbauweise führt. Der Bereich der „Sonstigen Materialien“ enthält Materialien, die in engem Zusammenhang oder im Verbund mit Holzprodukten stehen (Zellulosedämmung, Metallteile einer Platte). Sie haben aber keinen Einfluss auf die in diesem Zusammenhang untersuchten Holzrohstoffe.

Abbildung 4-7: Verbautes Holzvolumen in m^3_b pro 1.000 m^3 umbauten Raum im Neubau bzw. m^3_b pro Mio. Euro realem Bauvolumen bei Modernisierung und Tiefbau im Jahr 2016



Quelle: Mantau et al. (2018a). BG = Betriebsgebäude.

Abbildung 4-8: Anteil der verwendeten Holzhalbwaren, des Verschnitts und sonstiger Materialien in % vom eingesetzten Holzvolumen (m³_b) im Eigenheimbau (2016)



Quelle: Mantau et al. (2018a). BG = Betriebsgebäude, MDF/HDF = Medium (MDF) / High (HDF) density fibre board (Faserplatten), OSB = Oriented strand board, LDF/ULDF = Low und ultra low density fibre board (Dämmplatten).

In einem folgenden Schritt wird der Verschnitt proportional auf die Holzhalbwaren umgelegt, sodass neben dem Baukubikmeter die brutto eingesetzten Kubikmeter Holz berücksichtigt sind. Aus dem Rohstoffmonitoring Holz ist der Rohstoffmix der Holzhalbwaren bekannt. Diese Anteile werden zur Unterteilung in Laub- und Nadelholz genutzt, sodass die Mengen an eingesetztem Kubikmeter Holz je Produkt vorliegen. Bei Produkten aus Rundholz ist zudem die Ausbeute zu berücksichtigen. Ein Kubikmeter Nadel Schnittholz wird aus 1,67 m³ Rundholz gewonnen. Bei den Plattenwerkstoffen handelt es sich um besondere Dichten. Ein Kubikmeter Spanplatte enthält gepresst 1,3 m³ Holz. Ein Kubikmeter Faserplatte sogar 1,7 m³, aber ein Kubikmeter LDF (Dämmplatte) nur 0,6 m³ Festmaß Holz (Mantau et al. 2018a). Unter Berücksichtigung der sehr vielfältigen Faktoren sowie der Verwendung von Reststoffströmen ergibt sich aus der Entwicklung eines Neubausegmentes die Holzrohstoffverwendung.

Modernisierung und Tiefbau

Das Bauvolumen des Wohnungsbaus hatte im Jahr 2020 einen Anteil von 39,6% am nominalen Bauvolumen insgesamt²³. Folglich wird die Entwicklung der meisten Bauprodukte sehr stark von der Entwicklung der Modernisierungsmaßnahmen im Wohnungsbau beeinflusst. Die Berechnungen für verwendete Baukubikmeter Holz beliefen sich auf 38,7 %.

Das verwendete Holzvolumen für Modernisierungsmaßnahmen in Wohnungsbau belief sich im Jahr 2020 auf 9,2 Mio. m³_b. Im Referenzszenario steigt es bis 2050 um +39,6 % auf 12,9 Mio. m³_b. Das entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Zuwachsrate von +1,3 %. Die Holzverwendung bei der Modernisierung entfällt vor allem auf die Wärmedämmung mit

²³ DIW Wochenbericht Nr. 1/2 2023: Bauboom geht zu Ende – politischer Strategiewechsel erforderlich (https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.862940.de/23-1-1.pdf)

Dämmstoffen auf Holzbasis, da z.B. bei der Fenstermodernisierung der Holzanteil gering ist. Technologische Sanierungen von Heizungsanlagen führen zu einem höheren Modernisierungsvolumen, haben jedoch keine Auswirkung auf die Holzverwendung.

Gemessen an den wohnungsbaupolitischen Zielen ist die oben genannte Zuwachsrate eher gering, da im Referenzszenario keine vollständige Zielerreichung unterstellt wird. Grund hierfür sind die aktuellen Entwicklungen im Baumarkt, der unter erheblichen Einschränkungen bei Arbeitskapazität und Materialverfügbarkeit leidet.

Das verwendete Holzvolumen für Modernisierungsmaßnahmen in Nichtwohnungsbau belief sich im Jahr 2020 auf 0,9 Mio. m³_b. Im Referenzszenario wird es bis 2050 um +5,5 % auf 1,0 Mio. m³_b ansteigen. Nichtwohnbau ist traditionell Stein- und Metallbau. Das führt zu geringen Holzanteilen bei deren Modernisierung. Auch sind die Zuwachsraten in der Modernisierung des Nichtwohnbau traditionell deutlich geringer als im Wohnungsbau.

Das verwendete Holzvolumen für den Tiefbau musste weitgehend auf Annahmen gestützt werden. Im Tiefbau ist Schalungsmaterial aus Holz von großer Bedeutung. Die Menge des verwendeten Schalungsmaterials ist erheblich geringer als es Daten zur jährlichen Verwendung vermuten lassen, da Schalungsmaterial mehrfach verwendet wird. Die Holzverwendung im Tiefbau belief sich im Jahr 2020 auf 0,5 Mio. m³_b. Im Referenzszenario steigt sie bis 2050 um +24,6 % auf 0,9 Mio. m³_b an.

Gesamter Bausektor

Die Tabelle 4-1 zeigt die Entwicklung der Holzverwendung im gesamten Bausektor im Mittel von Jahrzehnten. Bis zum Jahr 2020 basieren die Ergebnisse auf den zuvor genannten Quellen. Die Ergebnisse von 2021 bis 2050 spiegeln die Annahmen zum Referenzszenario wider. Das Jahrzehnt 2011 bis 2020 war sehr stark von einem bauwirtschaftlichen Aufschwung geprägt, der über ausstehende Fertigstellungen infolge hoher Bauüberhänge noch in das folgende Jahrzehnt hineinwirkt. Auch starke Zuwächse in der Wohnungsmodernisierung tragen zur anhaltenden Dynamik der Holznachfrage im Bau zwischen 2021-2030 und bis zum Jahr 2050 bei. Dies resultiert aus der im Referenzszenario angenommenen stetigen Steigerung der Modernisierung im Wohnungsbau. Im Vergleich zum Neubau nimmt die Holzverwendung für die Modernisierung bis zum Jahr 2050 stärker zu, sodass ab dem Jahr 2031 die Zunahme der Holzverwendung im Bausektor weitgehend auf die Wohnungsmodernisierung zurückgeht.

Tabelle 4-1: Verwendung der Holzrohwaren im Baubereich

Jahrzehnt	Nadelrundholz		Laubrundholz		Restholz		Recyclingholz		Insgesamt	
	Mio. m ³ _{swe}	%	Mio. m ³ _{swe}	%	Mio. m ³ _{swe}	%	Mio. m ³ _{swe}	%	Mio. m ³ _{swe}	%
2001-2010	14,807	-2,9	2,960	2,0	2,167	0,3	0,163	49,0	20,097	-1,6
2011-2020	15,825	6,9	3,344	13,0	2,369	9,4	0,285	74,5	21,823	8,6
2021-2030	17,765	12,3	3,578	7,0	2,891	22,0	0,340	19,5	24,574	12,6
2031-2040	18,747	5,5	3,849	7,6	3,126	8,1	0,359	5,4	26,080	6,1
2041-2050	19,603	4,6	4,078	6,0	3,312	6,0	0,374	4,3	27,367	4,9

Quelle: eigene Darstellung, INFRO. %-Werte geben die Steigerungsrate zur vorangegangenen Periode an.

Von den verwendeten 27,4 Mio. m³_{swe} im Jahrzehnt 2041-2050 entfallen 71,6 % auf Nadelschnittholz, 14,9 % auf Laubschnittholz, 12,1% auf Restholz und 1,4 % auf Recyclingholz. Die Anteile der Materialien sind weitgehend unverändert zur Ausgangssituation, da die Holzbauquoten und technischen Einsatzquoten konstant gehalten wurden. Lediglich die unterschiedlichen konjunkturellen Entwicklungen führen, aufgrund unterschiedlicher Holzverwendungsanteile, zu leichten Verschiebungen der Materialzusammensetzung insgesamt.

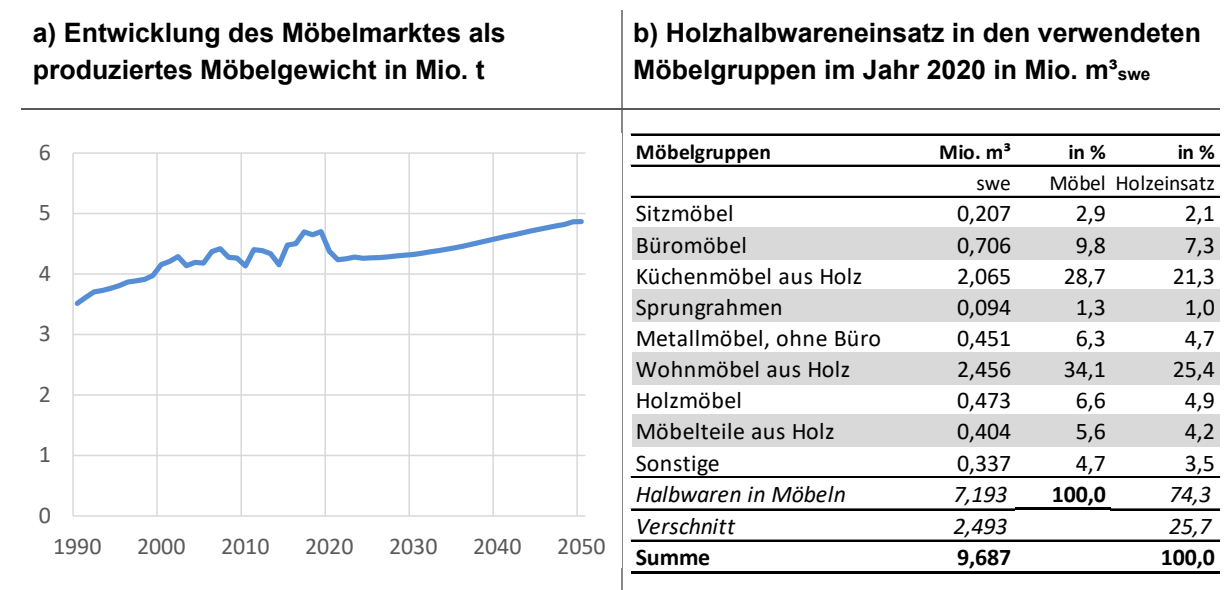
4.1.2.2 Möbelmarkt

Für den Möbelmarkt werden in der Produktionsstatistik über 60 Möbelsortimente unterschieden, die Holz enthalten können. Im Jahr der Untersuchung des Möbelmarktes (Mantau et al., in press.) wies die Statistik 106 Mio. Möbelstücke nach Anzahl und Gewicht aus. Die Studie unterscheidet zwischen Holzbestandteil im Möbelstück (3,6 Mio. t) und Holzeinsatz in der Möbelproduktion, einschließlich Verschnitt (4,4 Mio. t).

Die Möbelproduktion entwickelt sich vom Jahr 1990 bis 2020 relativ stabil entlang eines moderaten Trendwachstums (Abbildung 4-9 a). Die im Referenzszenario verwendete Fortschreibung anhand volkswirtschaftlicher Sektoren folgt am aktuellen Rand der Schwäche der privaten Verwendung, aber kehrt dann wieder auf das Trendwachstum zurück.

Die 60 Möbelsortimente werden in TRAW zu branchenüblichen Gruppen zusammengefasst (Abbildung 4-9 b). In Summe wurden im Jahr 2020 ca. 7,2 Mio. m³_{swe} Holzhalbwaren in Möbeln eingesetzt. Dabei weisen Wohnmöbel aus Holz (34,1 %) und Küchenmöbel aus Holz (28,7 %) die größte Mengenbedeutung auf. Der Verschnitt wurde für einzelne Möbelsortimente über Literaturstudien bestimmt. Er macht im Mittel einen Anteil am eingesetzten Holz von 25,7 % oder 2,49 Mio. m³_{swe} aus (Abbildung 4-9 b).

Abbildung 4-9: Entwicklung des Möbelmarktes und Holzhalbwareneinsatz in den verwendeten Möbelgruppen im Jahr 2020

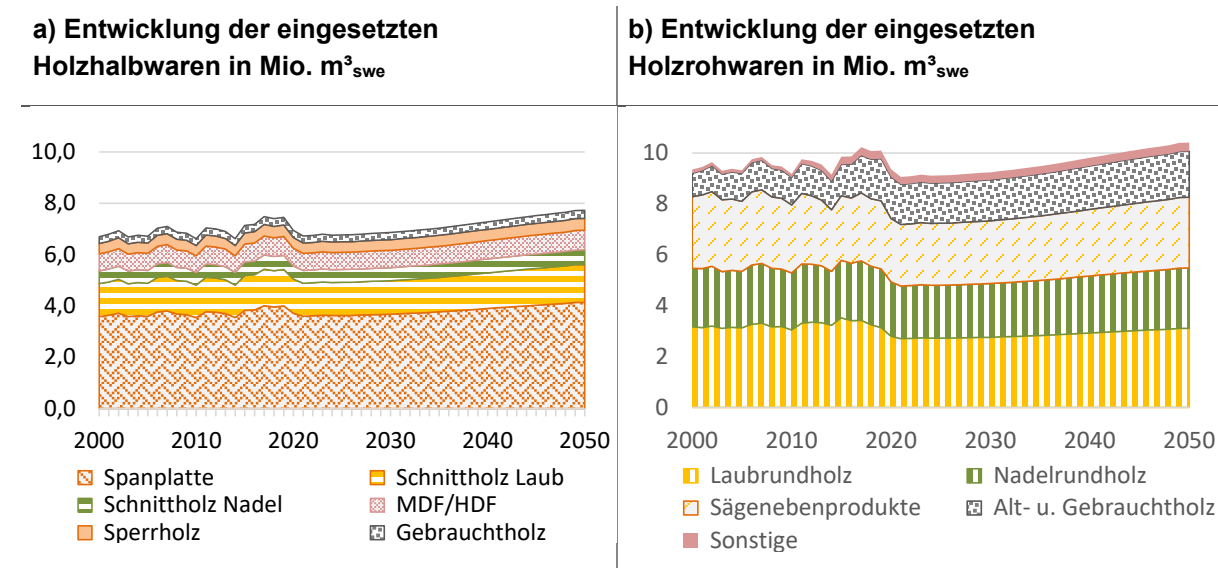


Quelle: eigene Darstellung, INFRO. Mantau et al. (in press.).

Wie bei der Bestimmung des Holzeinsatzes im Baubereich wird in TRAW zunächst die Menge der eingesetzten Holzhalbwaren bestimmt. Unter Berücksichtigung des Verschnitts beim den Holzhalbwaren zugrundeliegenden Rohstoffmixes inklusive Anteile an Laub- und Nadelholz

sowie über Faktoren zur Rohholzausbeute erfolgte die Rückrechnung auf den Einsatz an Holzrohwaren (m^3_{swe} , zu Umrechnungsfaktoren siehe Mantau et al., in press.). Die Strukturen der Möbelsortimente und die Rohstoffzusammensetzung werden im Referenzszenario anhand der Werte aus dem Jahr 2020 konstant fortgeschrieben. Die Veränderungen im Referenzszenario resultieren so direkt aus der zuvor abgeleiteten Entwicklung der Möbelproduktion (Abbildung 4-9 a).

Abbildung 4-10: Entwicklung der Holzverwendung in der Möbelproduktion



Bis zum Jahr 2050 steigt die Möbelproduktion moderat an und damit die Verwendung an Holzrohwaren auf $10,4 \text{ Mio. m}^3_{\text{swe}}$. Den größten Anteil der eingesetzten Holzrohstoffe machte im Jahr 2020 – und damit auch in der Fortschreibung bis 2050 – Laubrundholz (36,8 %) aus. Nadelholz erreichte 29,9 %. Durch den hohen Anteil an Spanplatten kamen Sägenebenprodukte auf 34,7 % des Rohwareneinsatzes. Altholz im Sinne des Abfallgesetzes machten 22,1 % aus. Gebrauchtholz im Sinne direkter Wiederwendung scheint ein wachsender Trend zu sein und erreichte 3,9 % des gesamten Holzeinsatzes. Ein gutes Drittel des Holzeinsatzes (34,5 %) entfällt auf Massivholz, während Holzwerkstoffe zu 65,5 % eingesetzt werden.

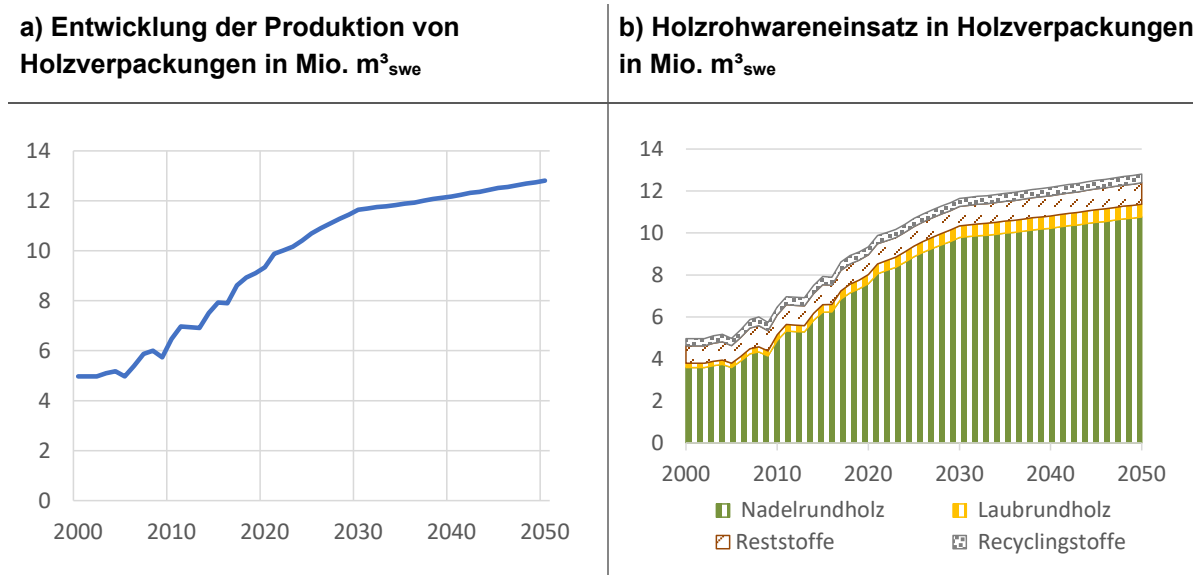
4.1.2.3 Holzverpackungen

Die Strukturdaten zur Holzverwendung im Verpackungssektor sind noch nicht in der Tiefe empirisch analysiert wie z. B. im Möbelsektor. Die Berechnung in TRAW basiert in der Struktur auf den Kennwerten aus den WEHAM-Szenarien zur Holzverwendung (Glasenapp et al. 2017). Die Entwicklung der Verwendung von Holzverpackungen wurde bis zum Jahr 2020 aktualisiert und anhand der zu erwartenden konjunkturellen Entwicklung mit einem Regressionsansatz fortgeschrieben. Dieser verwendet die Entwicklung der Exporte und einen Index der Haushaltsentwicklung, der die konsumstärkeren Altersgruppen höher gewichtet.

Der Verpackungsmarkt erlebte in den letzten Jahren starke Zuwächse. Diese waren eine Folge des konjunkturellen Wachstums, der Globalisierung und der Nadelholzverfügbarkeit. Nach einer Stagnation um das Jahr 2022 infolge von Materialknappheit werden Nachholeffekte und weitere Anforderungen an logistische Dienstleistungen zunächst erneut zu einer Belebung führen. Die weitere Fortschreibung resultiert aufgrund der demografischen Entwicklung und

anzunehmender geringerer Außenhandelstätigkeit ab dem Jahr 2030 in verringerten Wachstumsraten für Holzverpackungen (Abbildung 4-11 a).

Abbildung 4-11: Entwicklung der Produktion von Holzverpackungen und des Rohwareneinsatzes in Holzverpackungen



Holzverpackungen bestehen überwiegend aus Nadelholz (Abbildung 4-11 b). Insbesondere die Seitenware²⁴, die traditionell im konstruktiven Bereich (Träger, Sparren) keine Verwendung fand, wurde in der Vergangenheit für Paletten und andere Verpackungsprodukte genutzt. Inzwischen wird die Seitenware auch zunehmend im Baubereich verwendet (Brettschichtholz), sodass bei knapper werdenden Ressourcen die Rohstoffverfügbarkeit das Produktionswachstum von Holzverpackungen begrenzt.

Die Holzverwendung im Verpackungsbereich steigt vom Jahr 2020 mit einer Höhe von 9,3 Mio. m³_{swe} auf 12,8 Mio. m³_{swe} im Jahr 2050. Der überwiegende Anteil entfällt auf Nadelholz (84,0 %). Es folgen Sägenebenprodukte (7,5 %), Laubholz (4,8 %) und Altholz (3,3 %) sowie anderes Industrierestholz und Rinde (0,4 %).

4.1.2.4 Zellstoffindustrie

Der Papiersektor in Deutschland frägt als Rohware vor allem auf Altpapier nach. So lag die Altpapiereinsatzquote im Papiersektor im Jahr 2020 bei 79 %.²⁵ Das entsprach 14,5 Mio. Tonnen Altpapier. Faserholz aus Waldholz und Sägenebenprodukten wurde im Umfang von 9,2 Mio. m³_{swe} (Abbildung 4-12 a) eingesetzt, was einer Produktion von 2,3 Mio. t Zellstoff entsprach. Für die Rohholznachfrage ist die Produktion von Holz- und Zellstoff von Bedeutung. Deshalb beschränkt sich für den Papiersektor die Modellierung der Rohholznachfrage auf die Entwicklung der Zellstoffproduktion. Die Daten der konjunkturellen Entwicklung und der

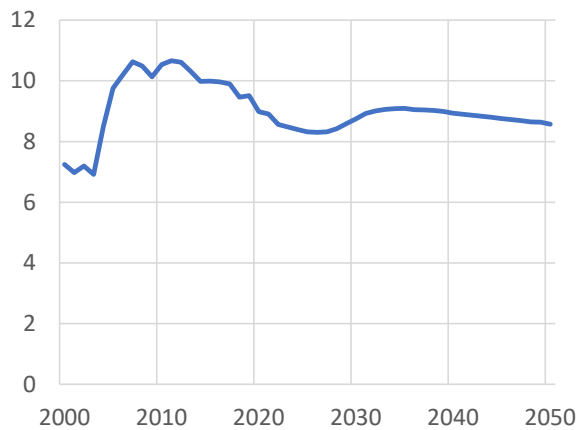
²⁴ Als Seitenware bezeichnet man Nebenprodukte wie Bretter, die bei der Produktion des Hauptprodukts (z.B. Konstruktionsholz) anfallen.

²⁵ VDP 2021 – Statistiken zum Leistungsbericht: https://www.papierindustrie.de/fileadmin/0002-PAPIERINDUSTRIE/07_Dateien/XX-LB/PAPIER2021-digital.pdf

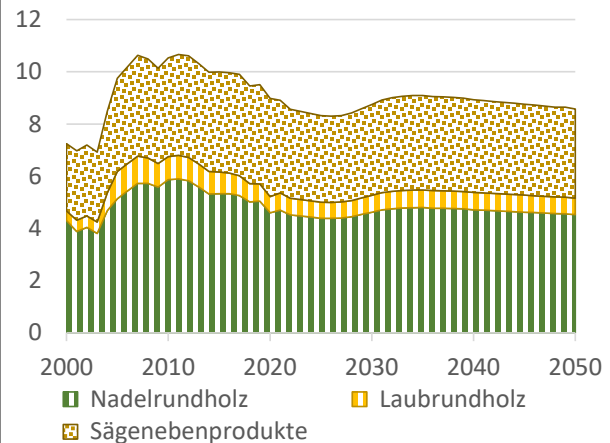
Rohstoffverwendung wurden bis 2020 aktualisiert (Mantau 2023). Die Fortschreibung in TRAW erfolgte über demografische Entwicklungen und Außenhandelsaktivitäten.

Abbildung 4-12: Holzverwendung und Holzrohwareneinsatz in der Zellstoffproduktion

a) Entwicklung der Zellstoffproduktion in Mio. m³_{swe}



b) Holzrohwareneinsatz in der Zellstoffprodukten in Mio. m³_{swe}



Quelle: eigene Darstellung, INFRO.

Der Anstieg zu Beginn der Darstellung in Abbildung 4-12 b geht auf den Kapazitätsausbau durch zwei neue Sulfatzellstoffwerke zurück. Der folgende Rückgang im Zeitraum von 2015 bis 2020 liegt an einer sinkenden Produktion von Holzstoff. Nach Überwindung der aktuellen Konjunkturschwäche werden bis zum Jahr 2030 Nachholeffekte erwartet. Auch wirkt die demografische Entwicklung stabilisierend. Mit abnehmender Bevölkerungszahl ist langfristig jedoch eher mit einem Rückgang der Zellstoffproduktion in Deutschland zu rechnen.

Die Holzverwendung im Zellstoffbereich geht vom Jahr 2020 mit einer Höhe von 9,3 Mio. m³_{swe} auf 8,6 Mio. m³_{swe} im Jahr 2050 zurück. Der überwiegende Anteil entfällt auf Nadelrundholz (52,8 %). Es folgen Sägenebenprodukte (39,8 %) und Laubrundholz (7,4 %).

4.1.2.5 Bestimmung nicht erfasster Holzverwendungen im Endwarenbereich

Holz ist ein Werkstoff mit außerordentlichen Anwendungsmöglichkeiten. Die Entwicklungen in den großen Verwendungssektoren (Bau, Möbel, Verpackung, Zellstoff) wurden in Kap. 4.1.2.1 bis 4.1.2.4 analysiert. Angesichts der zahlreichen Nischenmärkte war zu erwarten, dass einzelne Verwendungen sowie der Außenhandel im Endwarenbereich unvollständig erfasst wurden. Daraus ergibt sich eine Differenz zwischen der Halbwarenmenge, die für die erfassten Endwaren benötigt würden, und der im Inland verfügbaren Menge an Halbwaren. Somit unterschätzt die Holzverwendung in den betrachteten Endwarenmärkten die Waldholzverwendung. Die methodische Durchdringung dieser Diskrepanz erfolgt im laufenden Waldklimafond-Projekt DIFENS¹¹. An dieser Stelle wird eine pragmatische Lösung gesucht, um das Delta zu bestimmen, damit weiterhin die Holzverwendung insgesamt nicht unterschätzt wird. Dazu werden historische Daten aus zwei Datenerhebungen verwendet:

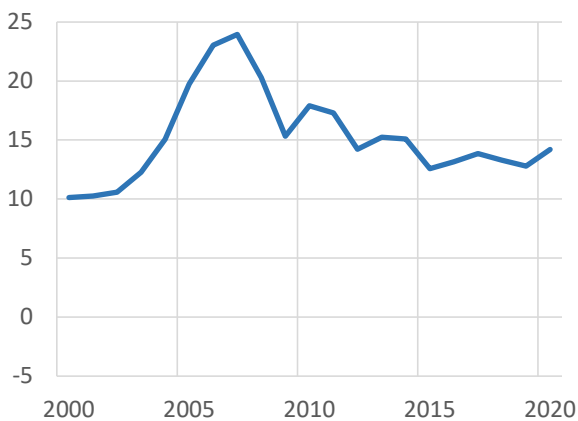
- Im Rohstoffmonitoring Holz wird die Menge der stofflich verwendeten Holzrohwaren über die Inlandsproduktion der Holzhalbwaren bestimmt. Dies ergibt eine genauere Einschätzung

der Waldholzverwendung als die Einschlagsstatistik. Daher erfolgt die sogenannte Einschlagsrückrechnung auf Basis des Rohstoffmonitoring Holz (siehe Jochem et al. 2015).

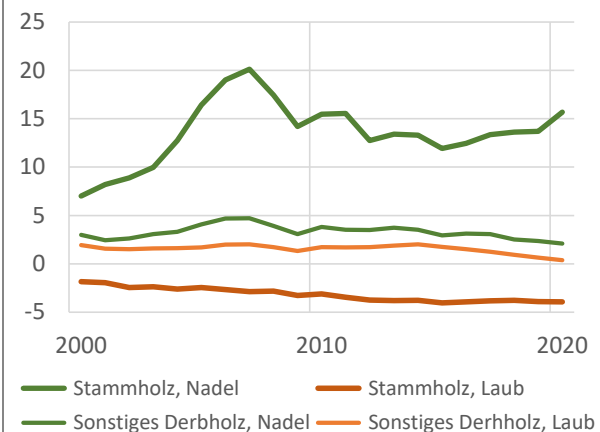
- In der Weiterentwicklung des Rohstoffmonitorings wird die Holzverwendung in den oben genannten großen Endwarenmärkten ermittelt (Mantau et al. 2018a, Mantau et al. in press.).
- Somit können Ergebnisse aus beiden Erhebungen sowohl auf der Ebene der Holzhalbwaren als auch auf der Ebene der Holzrohwaren verglichen werden. Da im Modellverbund die Waldholzverwendung ein zentraler Parameter ist, der von TRAW an FABio übergeben wird und in FABio die Waldbewirtschaftung steuert, fokussiert der folgende Vergleich auf die Ebene der Holzrohwaren.

Abbildung 4-13: Entwicklung der Verwendung von Holzrohwaren unbestimmter Sektoren

a) Entwicklung der Verwendung von Holzrohwaren unbestimmter Sektoren insgesamt in Mio. m³_{swe}



b) Entwicklung der Verwendung von Holzrohwaren unbestimmter Sektoren nach Derbholzsortimenten in Mio. m³_{swe}



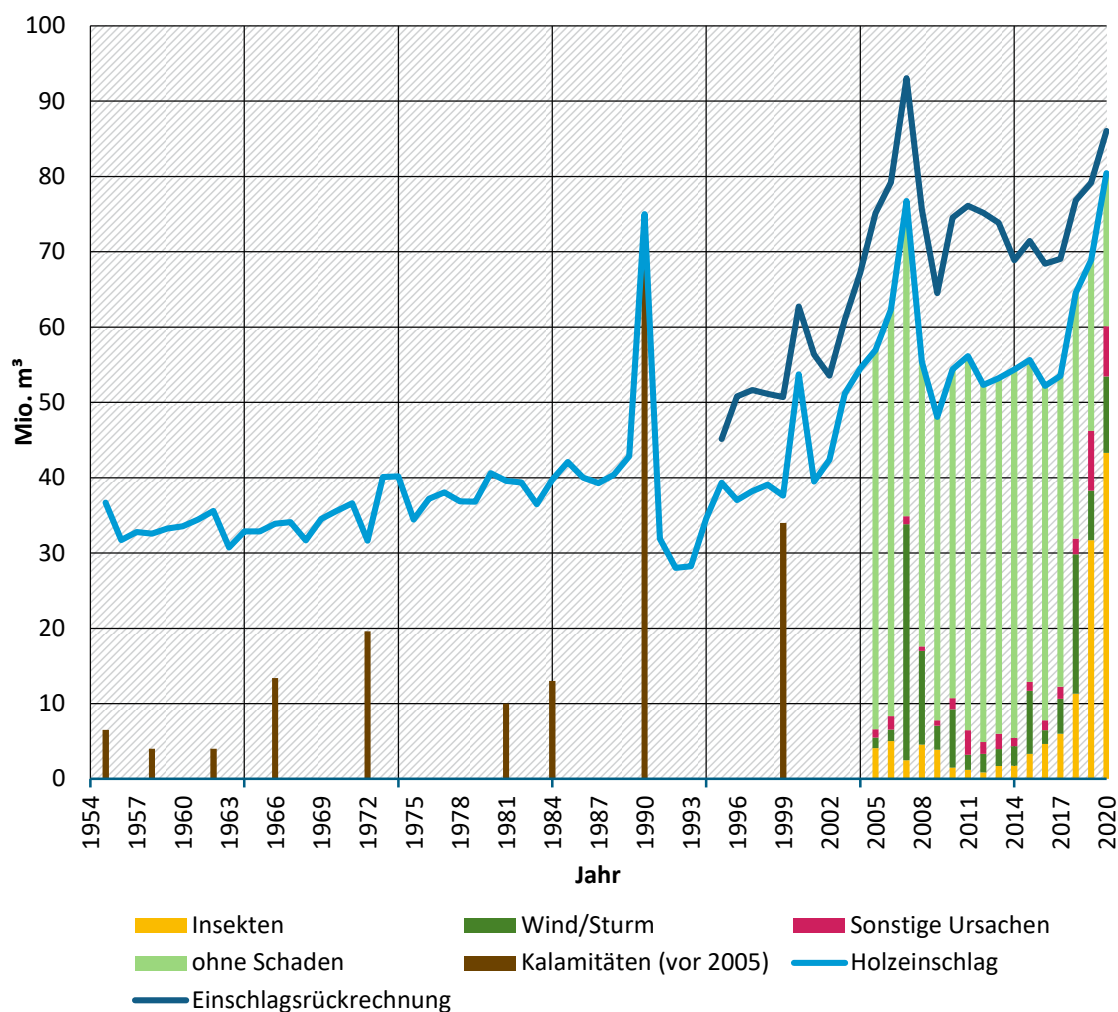
Quelle: vorläufige Ergebnisse aus dem DIFENs-Projekt¹¹, INFRO.

Die Differenz entspricht den Holzverwendungen, die im Endwarenbereich noch nicht erfasst sind. Danach können durch die Endwarenanalyse, bezogen auf den Durchschnitt des Zeitraums 2016-2020, 13,7 Mio. m³_{swe} Nadelrundholz nicht bestimmt werden, während 3,9 Mio. m³_{swe} Laubrundholz mehr verwendet werden. Ein Delta zwischen den beiden Berechnungsmethoden kann sowohl durch nicht erfasste Verwendungen entstehen als auch durch Außenhandelsbeziehungen oder Kalamitäten. Dies sei an zwei Beispielen erläutert.

- Im Jahr 2020 wurden in Deutschland 1,2 Mio. m³ Sperrholz verwendet, aber nur 0,1 Mio. m³ inländisch produziert. Mitte der 70er-Jahre lag die Sperrholzproduktion in Deutschland noch bei 0,5 Mio. m³. Hierbei handelt es sich um ein Problem bei der Laubholzverwendung in Deutschland: Der Rohstoff ist verfügbar, die Technologie auch, aber aufgrund der hohen Lohnkostenanteile können sich nur noch spezifische Nischenmärkte mit hoher Wertschöpfung im deutschen Markt halten. Das trifft für zahlreiche andere Produkte ebenso zu. Aus dem Grunde ist es plausibel, dass das Delta im Laubholzbereich negativ ist. Für die Bestimmung der Laubholzverwendung in Deutschland ist die Menge der genannten Inlandsproduktion relevant.

Der starke Anstieg der Differenz bei Nadelstammholz um das Jahr 2007 ist durch entsprechende Entwicklungen der Holzverwendung in den Endwarenssektoren nicht zu erklären. In diesem Zeitraum nahm die Nadelholzentnahme in Deutschland stark zu, auch aufgrund natürlicher Störungen wie Orkan Janette (2002), Dürre (2003) und Orkan Kyrill (2007; siehe Abbildung 4-14). Im ersten Jahrzehnt des neuen Jahrtausends baute die deutsche Nadelschnittholzindustrie ihre Exportaktivitäten deutlich aus, und die erhöhte Holzentnahme floss zu deutlichen Anteilen in den Export (siehe auch Export-Bilanz in den CRF-Tabellen zu UBA 2022).

Abbildung 4-14: Holzeinschlag, Einschlagsrückrechnung und Schadholz von 1954 bis 2020



Quelle: Darstellung in Hennenberg et al. (2022) auf Basis verschiedener Datenquellen.

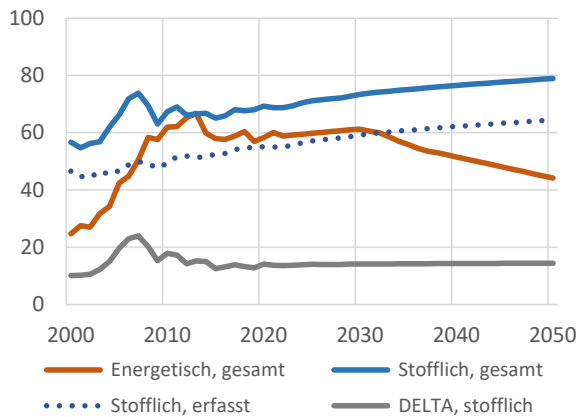
Die genaue Analyse nicht erfasster Holzverwendungen erfolgt im Waldklimafond-Projekt DIFENS¹¹. Für die Szenarienbestimmung im Projekt BioSINK ist es ausreichend, die nicht erfasste Verwendungsmenge zu bestimmen und für die Fortschreibung der zukünftigen Verwendung mit zu berücksichtigen. Ausgehend von einem gleitenden Fünf-Jahres-Durchschnitt wird die Holzverwendung in den nicht näher bestimmten Verwendungssektoren proportional zur Entwicklung der erfassten Verwendungen fortgeschrieben.

Da die energetische Nutzung durch die Verwendung in privaten Haushalten und Biomassefeuerungsanlagen vollständig abgebildet ist, ist das Delta überwiegend der stofflichen Nutzung zuzurechnen. Für die Fortschreibung ist es wichtig, diesen relevanten Teil

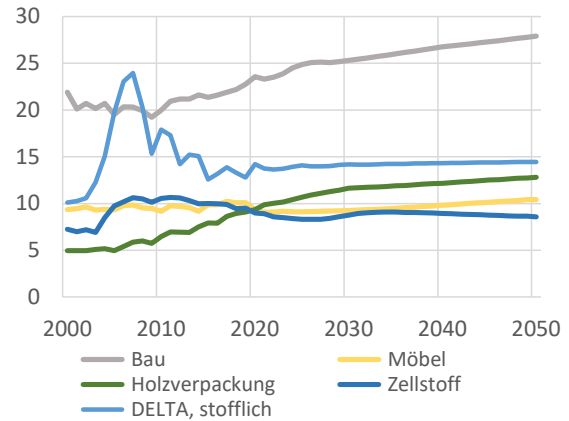
der Holzverwendung als Teil der Gesamtnachfrage zu berücksichtigen. Eine differenzierte Klärung seiner Zusammensetzung erfordert Analysen, wie sie für das DIFENs-Projekt¹¹ vorgesehen sind.

Abbildung 4-15: Entwicklung und Fortschreibung der Verwendung von Holzrohwaren

a) Entwicklung und Fortschreibung der stofflichen und energetischen Verwendung der Holzrohwaren in Mio. m³_{swe}



b) Entwicklung und Fortschreibung der stofflichen Verwendung der Holzrohwaren nach Endwarenssektoren in Mio. m³_{swe}



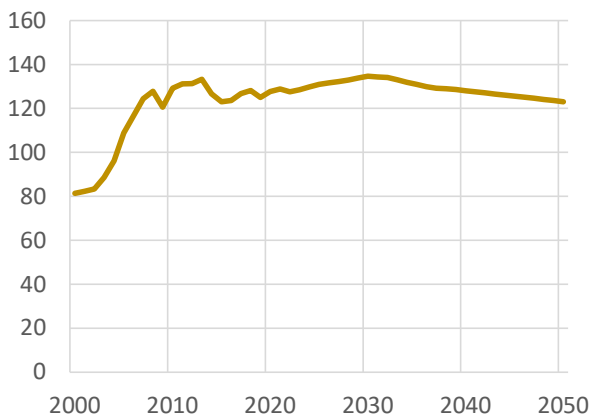
Quelle: vorläufige Ergebnisse aus dem DIFENs-Projekt¹¹, INFRO.

4.1.3 Datenübergabe TRAW an FABio-Forest

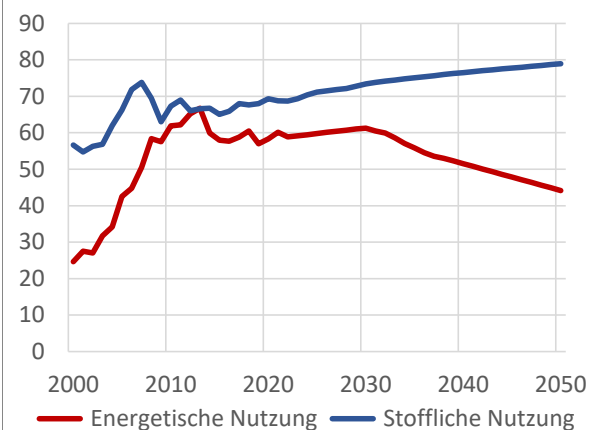
Im Folgenden werden die Ergebnisse des Referenzszenarios zur stofflichen und energetischen Holzverwendung in grafischer Form dargestellt. Dabei steht die Waldholznachfrage, wie sie von TRAW an FABio-Forest übergeben wird, im Fokus (Abbildung 4-17 b).

Abbildung 4-16: Holzverwendung im Referenzszenario

a) Holzverwendung im Referenzszenario in Mio. m³_{swe}



b) Stoffliche und energetische Holzverwendung im Referenzszenario in Mio. m³_{swe}



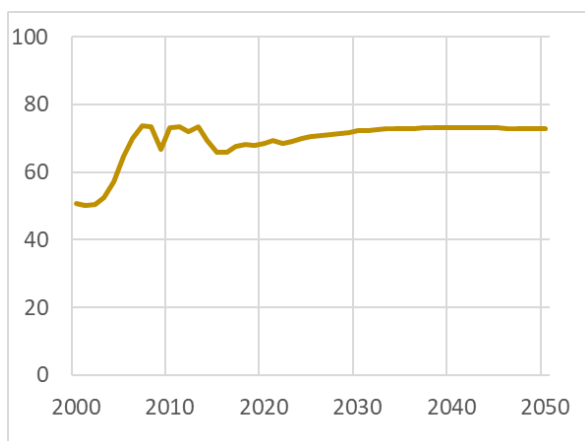
Quelle: Statistisches Bundesamt nach Rohstoffmonitoring 2022²² und Berechnung des Referenzszenarios, INFRO.

Die Summe der stofflichen und energetischen Holzverwendung steigt im Referenzszenario vom Jahr 2020 von 127,6 Mio. m^3_{swe} auf 134,7 Mio. m^3_{swe} im Jahr 2030 und geht bis zum Jahr 2050 auf 123,1 Mio. m^3_{swe} zurück (Abbildung 4-17). Die weitgehend stabile Entwicklung resultiert aus der moderat fallenden energetischer Holzverwendung und gleichzeitig moderat steigenden stofflichen Holzverwendung. Die Holznachfrage entfällt im Jahr 2050 überwiegend auf Nadelstammholz (49,0 %). Es folgen Sägenebenprodukte (13,9 %), Laubstammholz (10,2 %) und Altholz (9,8 %) sowie andere sonstige Einsatzmengen in Höhe von 17,1 %.

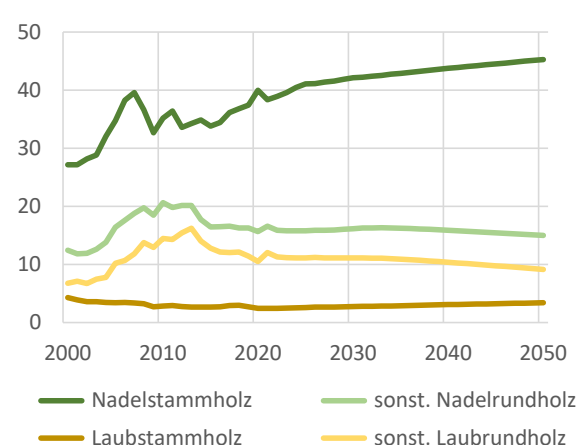
Die in Abbildung 4-17 dargestellten Ergebnisse zur Holzverwendung im Referenzszenario berücksichtigen nicht nur Waldholz, sondern auch andere Quellen wie Altholz, Industrierestholz, Landschaftspflegeholz, Holz aus Kurzumtriebsplantagen bis hin zu Schwarzlaube. Nach Umrechnung in Festmeteräquivalente (m^3_{swe}), Berücksichtigung der Rohstoffzusammensetzung und des Rundholzhandels ergeben sich die verwendeten Waldholzmengen.

Abbildung 4-17: Nachfrage nach Waldderbstholz

a) Summe der Nachfrage nach Waldderbstholz in Mio. m^3_{swe}



b) Nachfrage nach Waldderbstholzsortimenten in Mio. m^3_{swe}



Quelle: Statistisches Bundesamt nach Rohstoffmonitoring 2022²² und Berechnung des Referenzszenarios, INFRO. Im Anhang 7.2 findet sich eine Tabelle zur detaillierten Holznachfrage.

Im Referenzszenario liegt die Nachfrage nach Walderbstholz ohne Rinde im Jahr 2030 bei 72 Mio. m^3_{swe} (Abbildung 4-18 a). Waldrestholz (6,8 Mio. m^3_{swe}) und verwendete Rinde (2,6 Mio. m^3_{swe}) werden gesondert ausgewiesen.

Die Holzverwendung unterscheidet zudem nach den Sortimenten Stammholz und sonstiges Rundholz. Die Nachfrage nach Nadelstammholz steigt im Referenzszenario aufgrund der Baunachfrage von 2020 bis 2050 um ca. 5,3 Mio. m^3 . Sie erreicht eine Nachfrage von ca. 45,3 Mio. m^3_{swe} im Jahr 2050 (Abbildung 4-18 b). Unter den im Referenzszenario getroffenen Annahmen und der als stabil angenommenen Verteilung der Rohstoffzusammensetzung wächst die Nachfrage nach Laubstammholz ab dem Jahr 2020 nur moderat um ca. 1,2 Mio. m^3_{swe} an und erreicht im Jahr 2050 einen Wert von 3,4 Mio. m^3_{swe} (Abbildung 4-18 b). Die Nachfrage nach sonstigem Nadelrundholz verändert sich im Referenzszenario kaum, und sonstiges Laubrundholz, dass stärker von der abnehmenden energetischen Nachfrage beeinflusst ist, geht im modellierten Zeitraum um etwa 2 Mio. m^3_{swe} auf gut 9 Mio. m^3_{swe} zurück.

Die in Abbildung 4-18 dargestellten und im Anhang 7.2 detailliert aufgeführten Ergebnisse zur Nachfrage nach Waldholz werden über die definierte Schnittstelle an das Waldmodell FABio-Forest übergeben. Dort stellen sie die Grundlage für die Steuerung der Holzentnahme im Wald dar. Dazu wird für die nachgefragte Derbholzentnahme ohne Rinde in FABio der Rindenanteil am Stamm berechnet (siehe Anhang 7.1.2.1), um die Holzentnahme in FABio-Forest nach Derbholz mit Rinde zu steuern.

4.2 Modellierung der Waldentwicklung im Referenzszenario

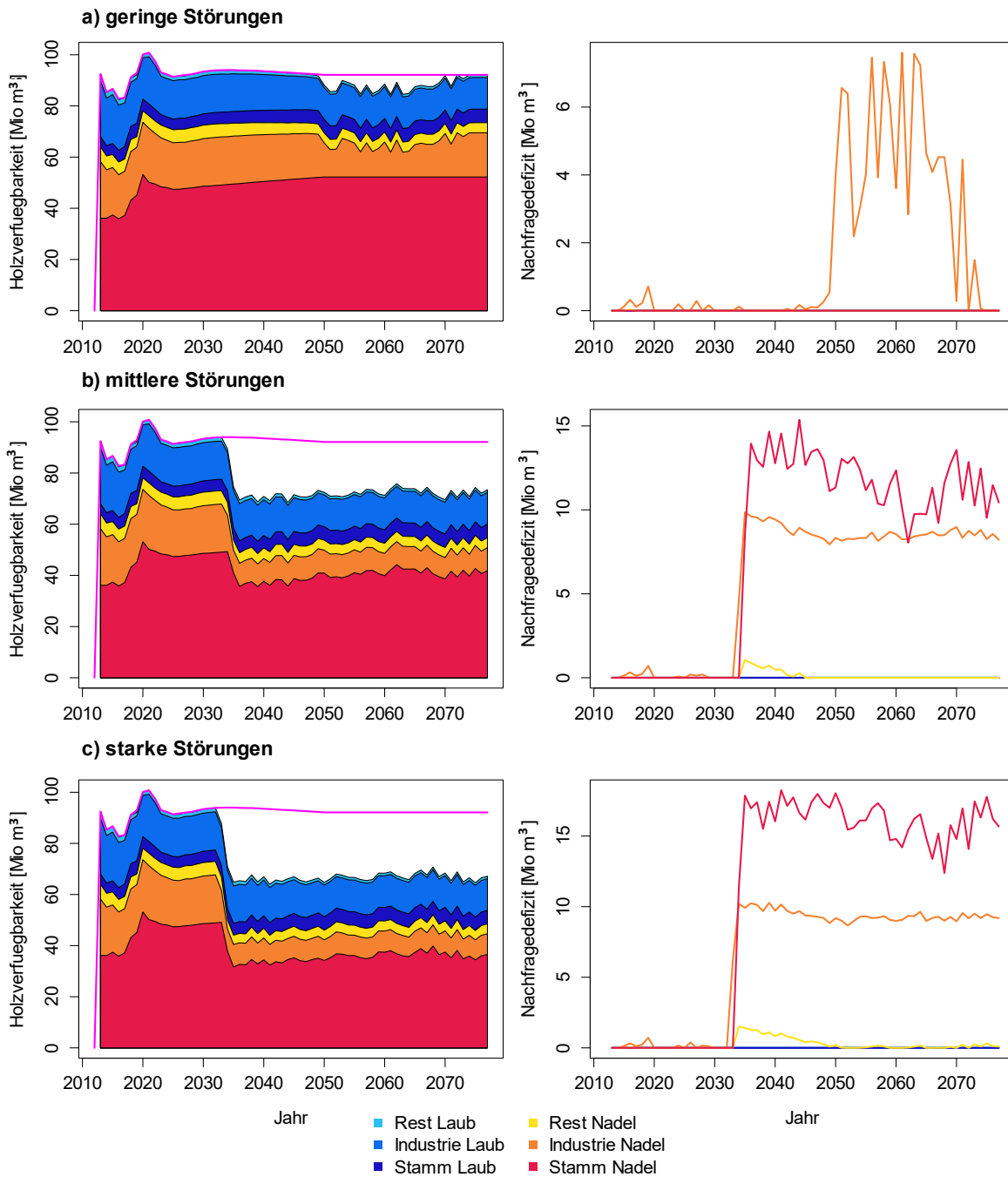
Das Ergebnis zur Holzverwendungsmodellierung aus TRAW zur Nachfrage nach Nadel- und Laubholz (Kap. 4.1.4, Tabelle 7-7) steuert die Holzernte in FABio-Forest. Hierzu werden die Holznachfragen ohne Rinde aus TRAW in Werte mit Rinde umgerechnet. Zudem wird ein Aufschlag für eingeschlagenes, aber nicht aus dem Wald entnommenes Holz angerechnet (siehe Anhang 7.2, Tabelle 7-8). Ab dem Jahr 2050 wird die Holznachfrage als konstant fortgeschrieben. Der Modellierungszeitraum reicht vom Startjahr in 2012 bis zum Jahr 2076 und deckt somit 64 Jahre ab.

In der folgenden Ergebnisbeschreibung zur Waldmodellierung im Referenzszenario werden immer die drei Sensitivitäten „geringe Störungen“, „mittlere Störungen“ und „starke Störungen“ (siehe Tabelle 3-1) zusammen dargestellt, um Unsicherheiten transparent ausweisen zu können. Die Beschreibung der Ergebnisse fokussiert dabei im Schwerpunkt auf die Sensitivität „mittlere Störung“.

4.2.1 Entwicklung der Holzentnahme

Die Holzentnahme erfolgt bei der Sonderpflege von Beständen (Schadholzentnahme), der Durchforstung und bei der als letztem Schritt simulierten gezielten Ernte lebender Bäume. Die Entnahme durch Ernte wird dabei durch die Holznachfrage gesteuert (Anhang 7.1.2.1). Abbildung 4-19 zeigt in der linken Teilabbildung die entnommene Menge an Derbholz gruppiert nach Laub- und Nadelholz und jeweils untergliedert nach Stammholz ($\varnothing > 20$ cm), Industrieholz (\varnothing zwischen 7 und 20 cm), und Restholz ($\varnothing < 7$ cm). Die rechte Teilabbildung stellt dar, wie viel an nachgefragtem Holz für die sechs Kategorien nicht durch die Entnahme gedeckt werden kann. Während die Nachfrage nach Laubholz für alle Sortimente grundsätzlich in allen Störungssensitivitäten und Jahren gedeckt ist, ergeben sich beim Nadelholz jahresabhängig schwankende Versorgungslücken. Während in der Sensitivität „geringe Störungen“ erst ab ca. 2050 beim Nadel-Industrieholz eine Versorgungslücke sichtbar wird, tritt die Lücke in den Sensitivitäten „mittlere Störungen“ und „starke Störungen“ bereits ab 2034 bzw. 2033 auf und betrifft sowohl das Stammholz- als auch das Industrieholz-Segment. Außerdem nimmt die Größe der Versorgungslücke mit der Störungsintensität zu, d.h. durch stärkere Störungen steht zunehmend weniger entnehmbares Nadelholz zur Verfügung. Mehr Störungen führen zwar zunächst zu einem höheren Anfall an nutzbarem Schadholz, resultieren aber gleichzeitig in höherer Mortalität und einer Abnahme der Zuwächse. Im Zeitverlauf sind somit insgesamt weniger Bäume vorhanden, die zudem schlechter zuwachsen als beispielsweise in der Sensitivität „geringe Störungen“. In Kombination führt dies über die Zeit zu einer verminderten Menge an entnehmbarem Nadelholz.

Abbildung 4-18: Simulierte Derbholzentnahme und offenbleibende Nachfrage



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung in FABio-Forest, Öko-Institut. Die **magentafarbene Linie** in der ersten Teilabbildung zeigt die Höhe der Gesamtnachfrage.

4.2.2 Entwicklung der Baumartengruppen anhand von Flächenanteilen

Wie sich die relative Baumartenverteilung im Referenzszenario entwickelt, ist in Abbildung 4-20 dargestellt. Die angegebenen Flächenanteile geben an, wieviel die Baumartengruppen zur bundesweiten Gesamtbasalfläche beitragen. Es wird angenommen, dass die Gesamtwaldfläche im Simulationsverlauf konstant bleibt.

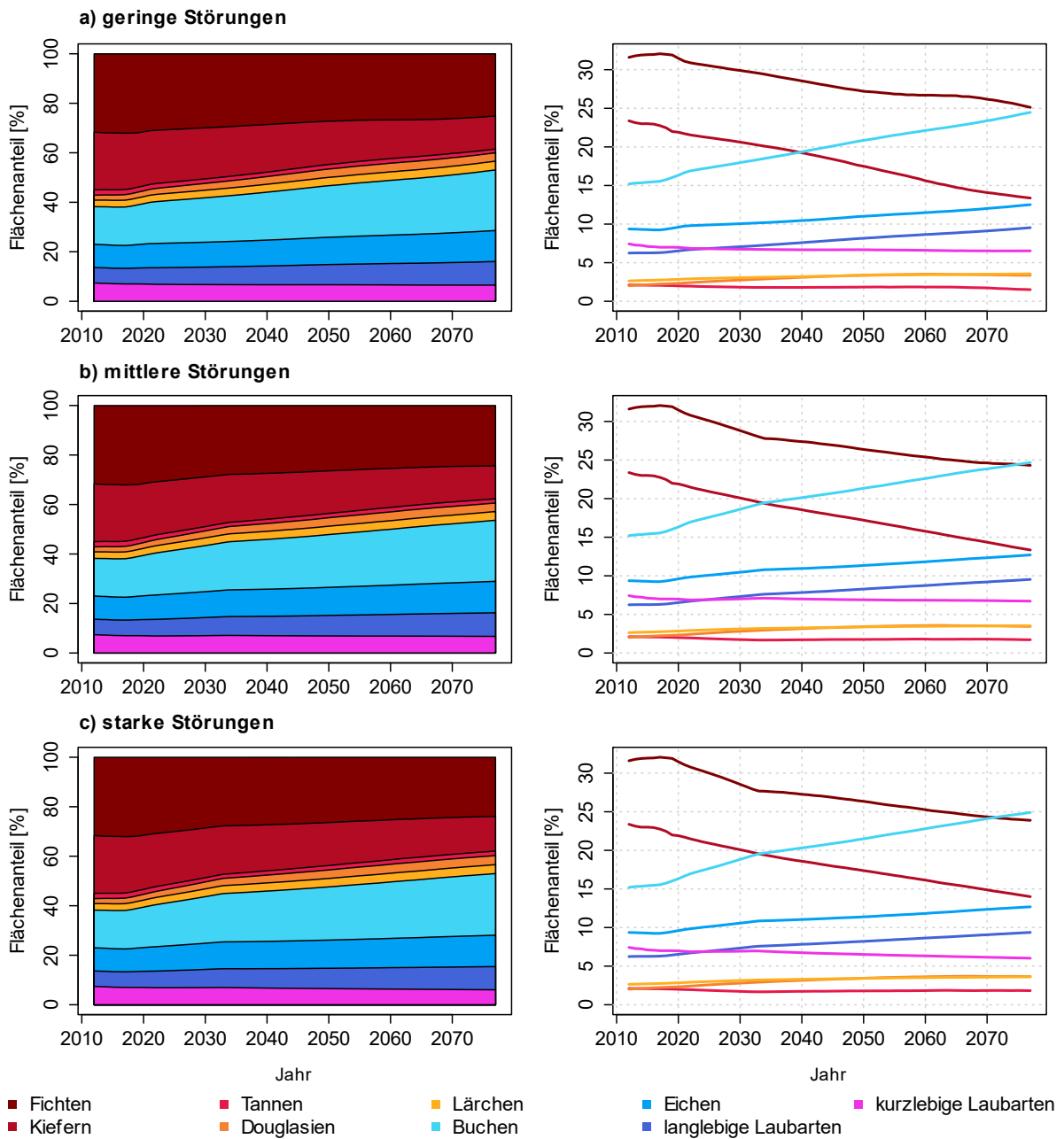
Sensitivität mittlere Störungen

Fichten tragen 2012 mit 31,0 % zur deutschlandweiten Gesamtbasalfläche bei. In der Sensitivität mittlere Störungen sinkt der Fichtenanteil bis zum Jahr 2023 um ca. 1,7% ab und erreicht im Jahr 2076 einen Wert von ca. 24,4% (Abbildung 4-20 b). Kiefern machen zu Beginn der Simulationsperiode mit ca. 21% Anteil die zweitstärkste Artengruppe aus, sind aber zugleich die Baumartengruppe, deren Anteil über die Zeit am stärksten abnimmt und im Jahr 2076 nur noch 13,5% Flächenanteil erreicht. Der Anteil der drei weiteren Nadelholz-Artengruppen liegt jeweils bei weniger als 3% und ist bei Douglasie (Anstieg von 2,4 auf 3,4% Flächenanteil) und Lärche (Anstieg von 2,9 auf 3,5% Flächenanteil) durch eine leichte Zunahme geprägt. Die prozentuale Abnahme bei Kiefer wird vor allem durch eine Zunahme des Basalflächenanteils bei Laubbäumen kompensiert. Die anteilig stärkste Laubbaumgruppe ist Buche, deren Flächenanteil 2021 16,7% ausmacht und bis 2076 auf 24,6% ansteigt. Eichen zeigen ebenfalls eine Zunahme von 9,7% auf 12,6% von 2021 bis 2076. Eine leichte Abnahme von 6,9 auf 6,7% ist lediglich beim kurzlebigen Laubholz zu verzeichnen.

Sensitivität geringe und starke Störungen

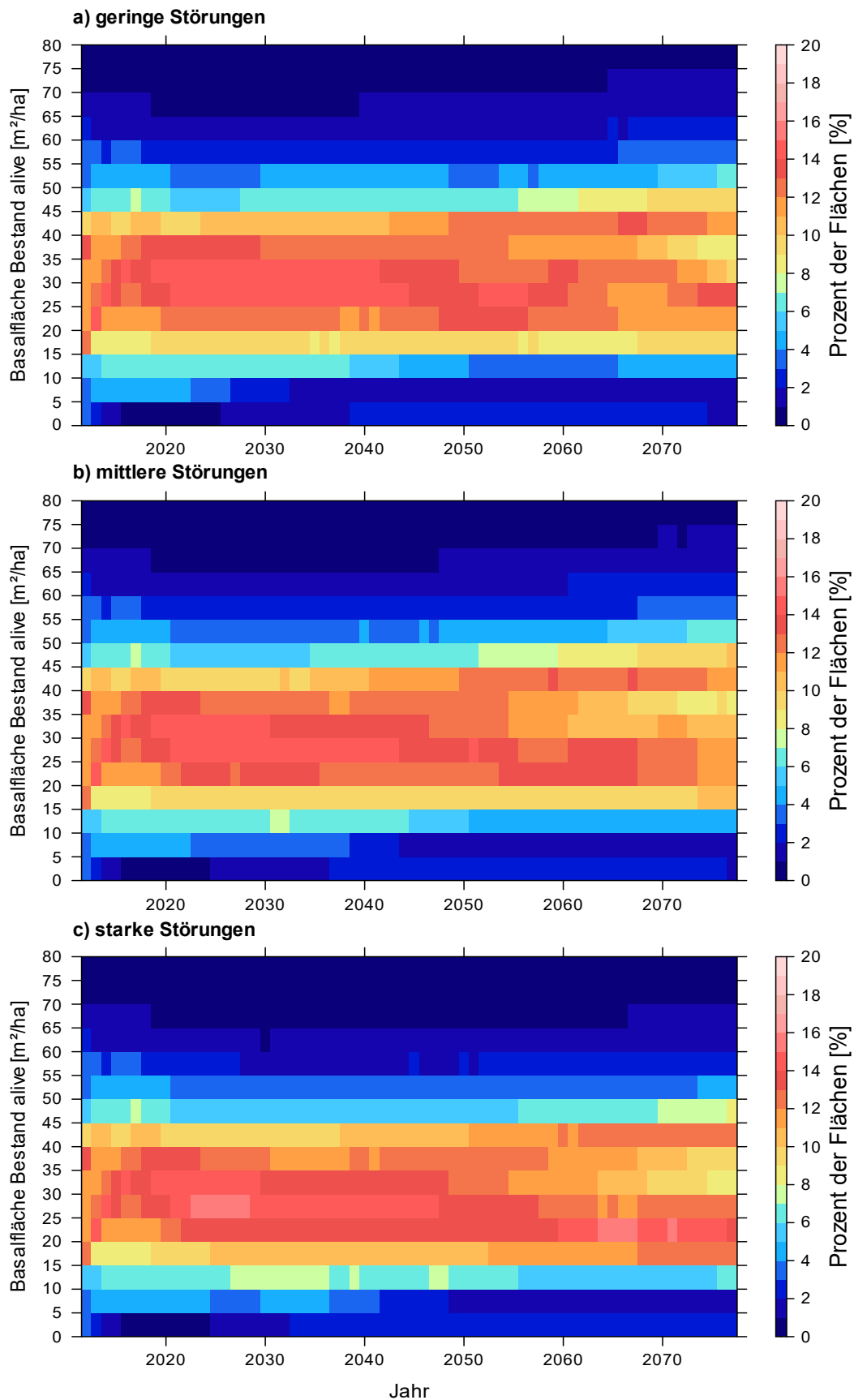
Vergleicht man die Beiträge zur Gesamtbasalfläche im Jahr 2076 zwischen den drei Störungssensitivitäten, so trägt Fichte bei geringer Störung im Jahr 2076 25,3% zur Gesamtbasalfläche bei, im Fall starker Störung sinkt ihr Beitrag auf 23,9%. Im Gegenzug erhöht sich der Beitrag von Buche zur Gesamtbasalfläche im Jahr 2076 von 24,3% bei geringer Störung auf 24,8% bei starker Störung. Gerade bei der Fichte zeigt sich auch ein Unterschied in der Entwicklung des zeitlichen Verlaufs zwischen den Sensitivitäten. Zwar nimmt ihr Anteil an der Fläche in allen Szenarien über die Zeit ab, doch erfolgt diese Abnahme über die Zeit in der Sensitivität „geringe Störungen“ gerade im Zeitraum bis 2040 deutlich gradueller als in der Sensitivität „starke Störungen“. Die größte Differenz zwischen beiden Sensitivitäten wird im Jahr 2033 sichtbar, wo die Fichte im Fall geringer Störungen 1,9% mehr zur Gesamtbasalfläche beiträgt als im Fall starker Störungen. Der im Fall „starke Störungen“ sichtbare Knick im Jahr 2033 kommt dadurch zustande, dass in diesem Jahr erstmalig die Nachfrage nach Nadelholz die Menge übersteigt, die dem Wald entnommen werden kann. In den Folgejahren sinkt dadurch die Gesamtmenge, die dem Wald entnommen werden kann, so dass sich die Abnahmerate des Basalflächenbeitrags über die Zeit reduziert.

Abbildung 4-19: Flächenanteil der Baumartengruppen basierend auf der Basalfläche im Referenzszenario für die Sensitivitäten geringe, mittlere und starke Störungen von 2013 bis 2076



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung mit FABio-Forest, Öko-Institut.

Abbildung 4-20: Zeitliche Entwicklung der Bestandsbasalflächen nach Häufigkeit



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung in FABio-Forest, Öko-Institut.

Abbildung 4-21 zeigt, wie sich die Häufigkeitsverteilung von simulierten Einzelflächen mit bestimmten Bestandsbasalflächen im Lauf der Zeit entwickelt. Grundsätzlich ist in allen drei Störungssensitivitäten im Zeitverlauf eine Entwicklung hin zu höheren Bestandsbasalflächen zu verzeichnen. Allerdings steigt bei höherer Störungsintensität der Prozentsatz an Flächen mit geringeren Bestandsbasalflächen in einem gegebenen Jahr, und Flächen benötigen mehr Zeit, um höhere Bestandsbasalflächen auszubilden. Vergleicht man beispielsweise den Prozentanteil der Flächen mit 10-15 m²/ha Bestandsbasalfläche zwischen den Sensitivitäten „geringe Störungen“ und „starke Störungen“, so wird ersichtlich, dass bei starken Störungen im Zeitverlauf mehr Flächen auf diese Kategorie entfallen als in der Sensitivität mit weniger Störungen. Während in der Sensitivität mit wenig Störungen in den Jahren 2014-2038 6-7% der Flächen in diese Kategorie einzuordnen sind und danach der Anteil Flächen in dieser Kategorie bis zum Jahr 2066 abnimmt, entfallen in der Sensitivität mit starken Störungen zwischen 2014-2055 sogar bis zu 8% der Flächen in diese Kategorie. Es ergibt sich somit insgesamt auf weniger Flächen ein schneller Aufstieg in höhere Bestandsbasalflächenklassen. Dies zeigt sich auch im Vergleich der oberen Bestandsbasalflächenklassen. In der Sensitivität „geringe Störungen“ haben bereits in den Jahren 2056-2061 zwischen 7-8% der Flächen eine Bestandsbasalfläche von 45-50 m²/ha erreicht, während dies in der Sensitivität „starke Störungen“ erst in den Jahren 2069-2075 der Fall ist.

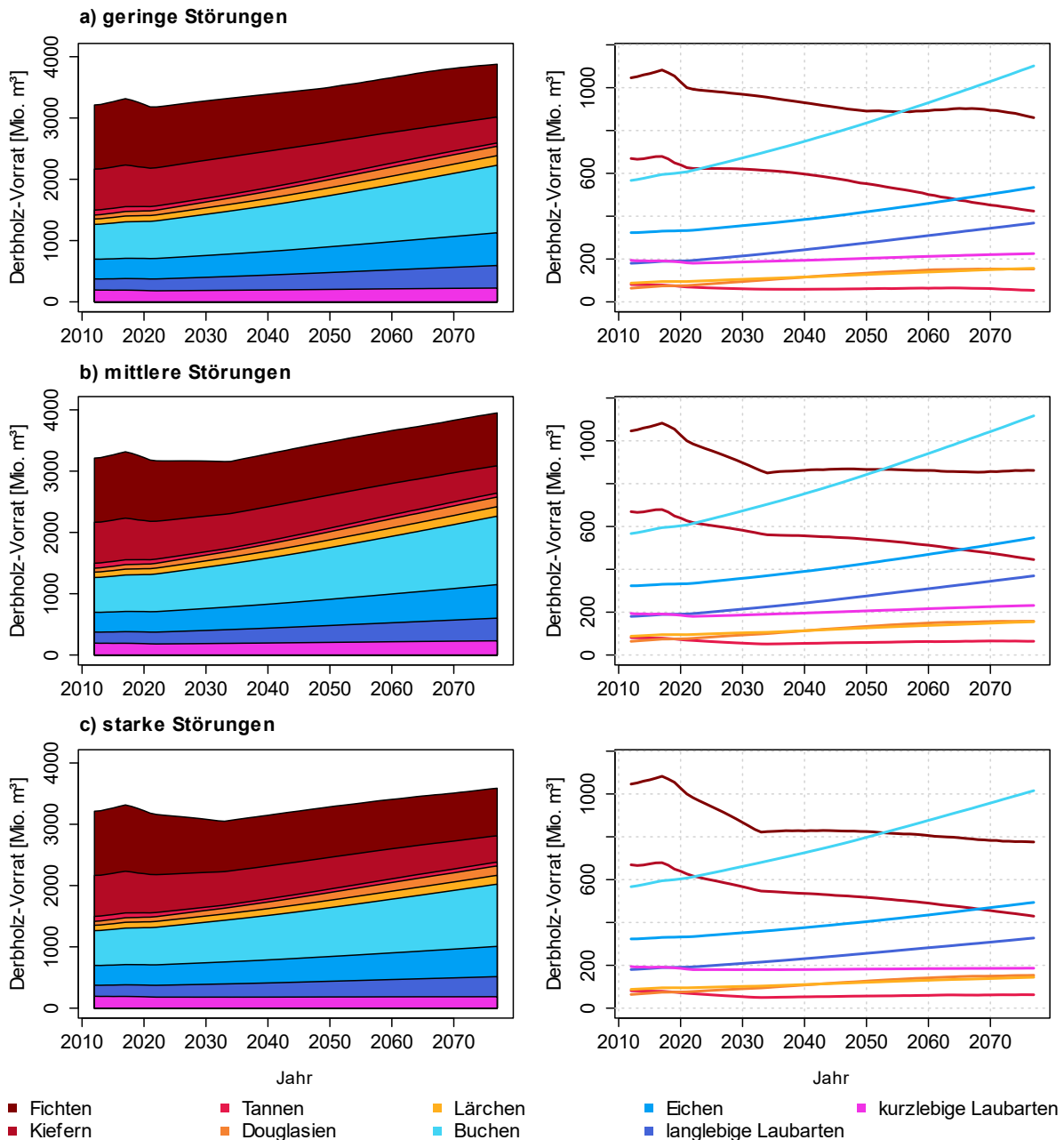
4.2.3 Entwicklung des Holzvorrats

Abbildung 4-22 zeigt den auf Deutschlandebene im Lebendbestand verfügbaren Derbholzvorrat in Mio. Erntefestmetern ohne Rinde. Der Ausgangswert im Jahr 2012 liegt bei 3.213 Mio. m³ und steigt bis zum Jahr 2017 auf 3.316 Mio. m³ an, um danach bis zum Jahr 2021 durch die Annahmen zu den Störungen in den Extremjahren 2018 bis 2021 (Kap. 3.3) auf 3.182 Mio. m³ abzunehmen. Diese Abnahme ist den Vorratseinbrüchen beim Nadelholz geschuldet, das von 2.011 Mio. m³ im Jahr 2017 auf 1.868 Mio. m³ im Jahr 2021 zurückgeht. Im gleichen Zeitraum steigt der simulierte Laubholzvorrat marginal von 1.305 Mio. m³ auf 1.313 Mio. m³ an.

Sensitivität mittlere Störungen

Am Ende der Simulationsperiode im Jahr 2076 beträgt der Gesamtvorrat in Erntefestmetern in der Sensitivität „mittlere Störungen“ 3.935 Mio. m³, wovon 1.689 Mio. m³ auf Nadel- und 2.245 Mio. m³ auf Laubholz entfallen (Abbildung 4-22). Während beim Nadelholz im Jahr 2012 Fichte gefolgt von Kiefer die höchsten Vorräte bereitstellen (1.046 Mio. m³ und 669 Mio. m³), dominieren beim Laubholz Buche (567 Mio. m³) und Eiche (323 Mio. m³) den Vorrat. Im Simulationsverlauf steigen die Vorräte beim Laubholz über die Zeit in allen drei Störungssensitivitäten an, während die Vorräte beim Nadelholz bis 2076 durch den starken Abfall der Vorräte, insbesondere bei Fichte und Kiefer, abnehmen. So übersteigen die Vorräte der Buche in der Sensitivität „mittlere Störung“ im Jahr 2076 mit 1.106 Mio. m³ die der Fichte um ca. 28%, während die Vorräte der Eichen mit 542 Mio. m³ die der Kiefer um knapp 21% übersteigen. Beim Nadelholz ist lediglich bei Douglasie und Lärche eine Vorratzzunahme zwischen 2021 und 2076 zu verzeichnen, die jedoch mit einem Anstieg von 76 auf 158 Mio. m³ bei Douglasie bzw. von 95 auf 154 Mio. m³ bei Lärche die Verluste bei Fichte und Kiefer nicht kompensieren kann (Abbildung 4-22).

Abbildung 4-21: Derbholzvorrat in lebender Biomasse nach Baumartengruppen



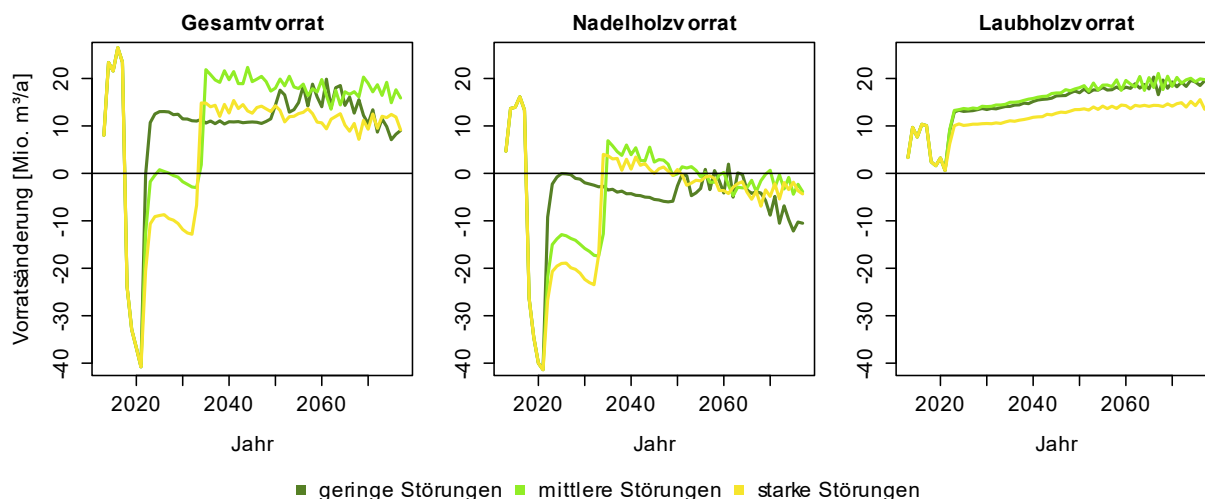
Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung in FABio-Forest, Öko-Institut. Derbholz-Vorräte (Holzvolumen der lebenden Bäume ab einem Durchmesser von 7 cm) in Erntefestmetern (ohne Rinde).

Sensitivität geringe versus starke Störungen

Erwartungsgemäß beeinflusst die Störungsintensität die Derbholzvorräte im Wald. In der Sensitivität „starke Störungen“ ist der Gesamtderbholzvorrat am Ende der Simulationsperiode mit 3.569 Mio. m³ um 290 Mio. m³ niedriger als in der Sensitivität „geringe Störungen“ (Gesamtvorrat im Jahr 2076 von 3.869 Mio. m³, Abbildung 4-22). Wie in Abbildung 4-22 ersichtlich tragen die durch stärkere Störungen auftretenden Verluste durch Mortalität und reduziertes Wachstum beim Nadelholz zu einer Vorratsverringerung bei (5,3 % Vorratsreduktion im Jahr 2076 bei starker gegenüber geringer Störung, bzw. 1.571 vs. 1.659

Mio. m³). Doch auch beim Laubholz, das zum Ende der Simulationsperiode insgesamt höhere Vorräte als das Nadelholz aufweist, wirken sich die Störungen aus (9.1% weniger Laubholzvorräte im Jahr 2076 bei starker gegenüber geringer Störung, bzw. 2.009 vs. 2.210 Mio. m³; Abbildung 4-22). Laubholzvorräte weisen jedoch im Gegensatz zum Nadelholz grundsätzlich in allen Störungssensitivitäten eine Zunahme über die Zeit auf. Beim Nadelholz nehmen die Vorräte lediglich bei Douglasie und Lärche im Zeitverlauf schwach zu, während die Vorräte der beiden mengenmäßig dominierenden Arten Fichte und Kiefer in allen Sensitivitäten im Zeitraum 2021 bis 2076 abnehmen. Für die Unterschiede in der zeitlichen Entwicklung zwischen Laub- und Nadelholz spielt auch die Nutzungsintensität eine Rolle. So wird nicht nur deutlich mehr Nadel- als Laubholz zur Nutzung aus dem Wald entnommen (siehe Abbildung 4-19), sondern es kommt zusätzlich durch die hohe Nachfrage auch zu einem Einbruch der Versorgung mit Nadelholz. Der Eintrittszeitpunkt und Umfang dieses Einbruchs ist mit der Intensität der Störungen gekoppelt (Abbildung 4-22). Während in der Sensitivität „geringe Störungen“ erst ab ca. dem Jahr 2050 die Nachfrage nach Nadelholz nicht mehr vollständig gedeckt werden kann und jährlich zwischen 4-7 Mio. m³ Industrienadelholz fehlen, tritt die Versorgungslücke in der Sensitivität „starke Störungen“ bereits ab dem Jahr 2033 auf, und es fehlt sowohl an Stamm- als auch an Industrieholz (offenbleibende Nachfrage von ca. 25-28 Mio. m³ pro Jahr). Vor allem in der Sensitivität „starke Störungen“ (Abbildung 4-22 c) sieht man deutlich, dass bis 2033 jährlich gerade bei Fichte ein bedeutsamer Vorratsabbau stattfindet, da jährlich mehr Derbholz aus den Lebendbeständen abgeht als nachwächst. Ab dem Jahr 2033 kann nur noch die Menge abgeschöpft werden, die jährlich in die hiebsreifen Durchmesserklassen einwächst, wodurch der Vorratsabbau zum Erliegen kommt.

Abbildung 4-22: Veränderung des Derbholzvorrats in lebender Biomasse im Vergleich der Sensitivitäten geringe, mittlere und starke Störungen



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung in FABio-Forest, Öko-Institut. Jährliche Änderung der Derbholz-Vorräte (Holzvolumen der lebenden Bäume ab einem Durchmesser von 7 cm) in Erntefestmetern (ohne Rinde).

Eine vergleichende Übersicht der jährlichen Vorratsänderungen in den drei Sensitivitäten ist in Abbildung 4-23 dargestellt. Deutlich sichtbar ist der jährliche Vorratsverlust in den Jahren 2018-2021 (kumulierter Gesamtverlust der vier Jahre: 134.3 Mio. m³), der vor allem der hohen Mortalität und den Zuwachseinbußen beim Nadelholz geschuldet ist. Beim Laubholz geht im selben Zeitfenster der Vorratszugewinn auf nahe Null zurück, es treten jedoch keine Vorratsverluste auf. Für die Entwicklung der Vorratsdynamik ab dem Jahr 2021 differenziert sich das Bild abhängig von den Annahmen zur Entwicklung der Mortalitäts- und Zuwachsdynamik in Wechselwirkung mit der Holznachfrage und der daraus resultierenden

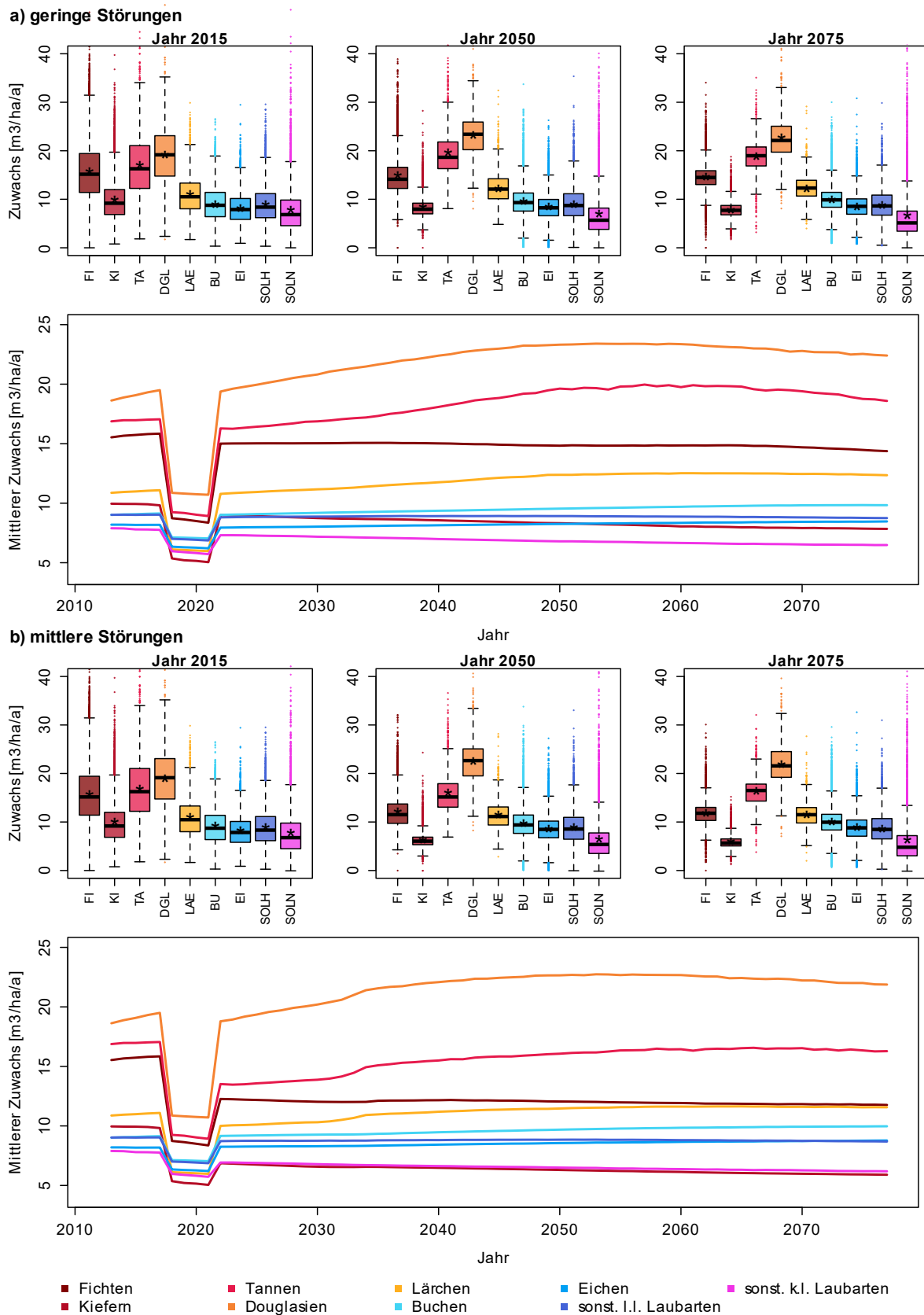
Holzentnahme. Während beim Laubholz der Vorrat über die Zeit stetig zunimmt und sich zwischen den Sensitivitäten lediglich ein Unterschied in der Höhe der Vorratzzunahme abzeichnet, nehmen die Vorräte beim Nadelholz aufgrund der hohen Nachfrage nach 2021 zunächst weiter ab. Die Rate der Vorratsverluste beim Nadelholz ist hierbei stärker ausgeprägt in den Sensitivitäten mit mehr Störungen und fällt erwartungsgemäß in der Sensitivität „geringe Störungen“ am niedrigsten aus. Ab dem Zeitpunkt, an dem die Nachfrage nach Nadelholz nicht mehr vollständig bedient werden kann, reduzieren sich die Vorratsverluste auf nahe Null bzw. wechseln zu leicht positiven Werten. Es wird nur noch so viel an Nadelholz entnommen, wie in einem Jahr ins hiebsreife Segment einwachsen kann (Abbildung 4-23).

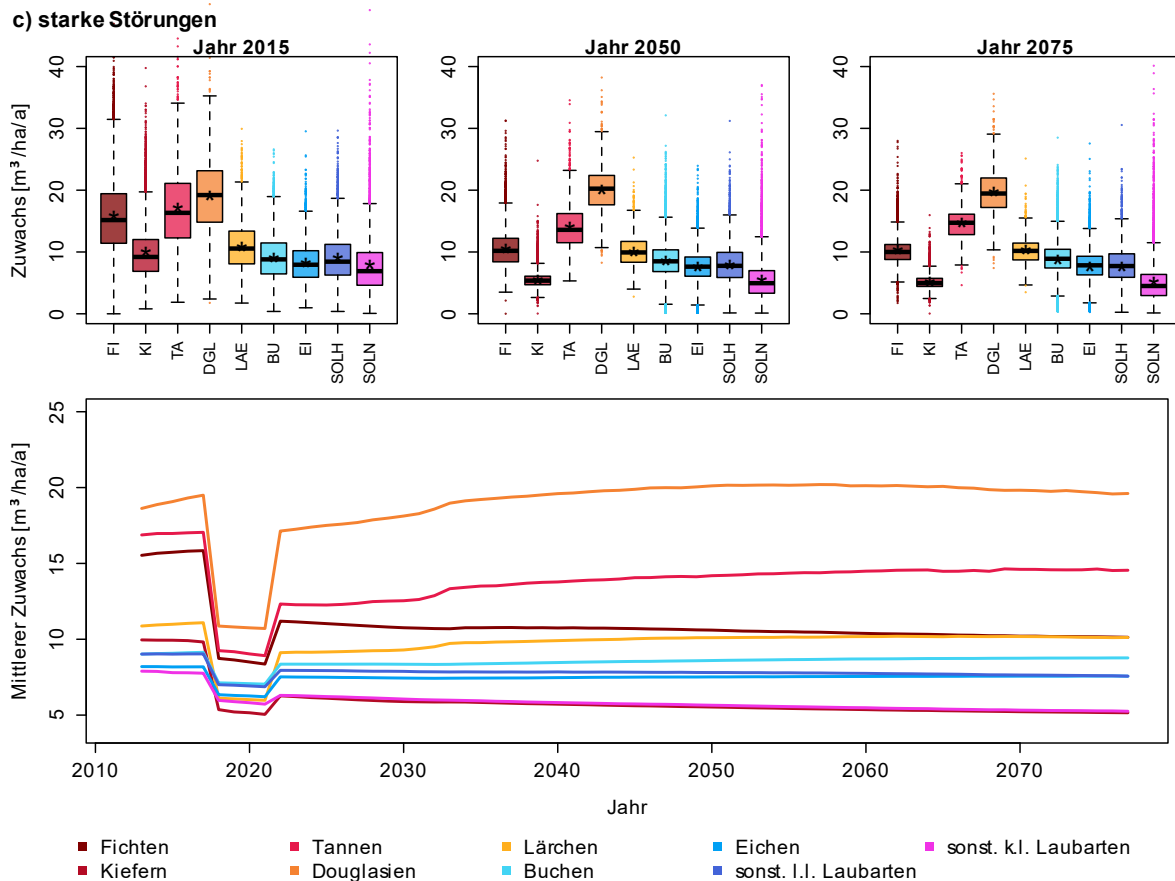
4.2.4 Entwicklung des Zuwachses

Die Zuwachsentwicklung in den simulierten rechnerischen Reinbeständen ist stark von den getroffenen Annahmen zur Sensitivität des Zuwachses gegenüber Störungen (Anhang 7.1.2.5) beeinflusst und unterscheidet sich daher ab dem Jahr 2022 zwischen den drei Sensitivitäten. Wie in Anhang 7.1.2.6 erläutert, wurde der Zuwachs der rechnerischen Reinbestände der Artengruppen für den Zeitraum 2013-2016 so parametrisiert, dass die Mediane der simulierten Flächen den Medianen der Treibhausgasinventur (TI-2017) entsprechen (siehe Boxplot-Abbildungen für das Jahr 2015 in Abbildung 4-24). In der Sensitivität „mittlere Störungen“ (Abbildung 4-24 b) steigt der mittlere Zuwachs der rechnerischen Reinbestände für die Artengruppen Douglasie, Tanne und Lärche ab dem Jahr 2022 bis zum Jahr 2034 leicht an, während er für Fichten und Kiefern leicht abnimmt. Da ab dem Jahr 2034 die Nachfrage nach Nadelholz in der Sensitivität „mittlere Störungen“ nicht mehr vollständig bedient werden kann, kommt es zu einem Rückgang der Ernteentnahmen, was sich in den folgenden zwei bis drei Jahren in einem verstärkten Anstieg der Zuwachsleistungen bei Douglasien, Tannen und Lärchen bemerkbar macht. Den maximalen Zuwachs erreichen Douglasien im Jahr 2053, danach fällt die Zuwachsleistung wieder leicht ab. Bei Tannen und Lärchen wird das mittlere Zuwachsmaximum hingegen erst ca. 1 Jahrzehnt später Mitte der 2060er Jahre erreicht, während Fichten und Kiefern bis zum Ende der Simulationsperiode nie mehr den mittleren Zuwachs von 2022 erreichen. Beim Laubholz steigt der Zuwachs bei Buchen und Eichen von 2022 bis 2076 kontinuierlich leicht an, während die anderen Laubarten im Zeitverlauf quasi konstant bleiben (Abbildung 4-24).

Die Verläufe der Zuwachskurven für die rechnerischen Reinbestände der Artengruppen sehen für die Sensitivitäten „geringe Störungen“ und „starke Störungen“ ähnlich aus wie für die Sensitivität „mittlere Störungen“, jedoch unterscheiden sich die mittleren Werte der Zuwachskurven entsprechend den Annahmen zur Zuwachsreduktion in den jeweiligen Sensitivitäten (Abbildung 4-24). Die Boxplots für die Jahre 2015, 2050 und 2075 zeigen zudem, dass, insbesondere beim Nadelholz und in geringerem Maß auch beim Laubholz, die Streubreite der Bestände über den Zeitverlauf tendenziell abnimmt. Dies entspricht einer Tendenz zur Homogenisierung der Bestände, d.h. die Bestände werden sich im Zeitverlauf strukturell ähnlicher.

Abbildung 4-23: Hektarspezifischer Zuwachs nach Baumartengruppen





Die Boxplots zeigen die Lage des ersten und dritten Quartils (farbig gefüllte Boxen), den Median (horizontaler schwarzer Querbalken) und den Mittelwert (schwarzes Sternchen) der statistischen Verteilung der Flächen. Die Länge der Whisker beträgt das 1.5fache des Interquartilsabstands, farbige Punkte kennzeichnen Flächen mit Zuwächsen, die außerhalb dieses Bereichs liegen. Abkürzungen: FI: Fichten, KI: Kiefern, Ta: Tannen, DG: Douglasien, LA: Lärchen, BU: Buchen, EI: Eichen, LL: Langlebige Laubbaumarten, KL: kurzlebige Laubbaumarten.

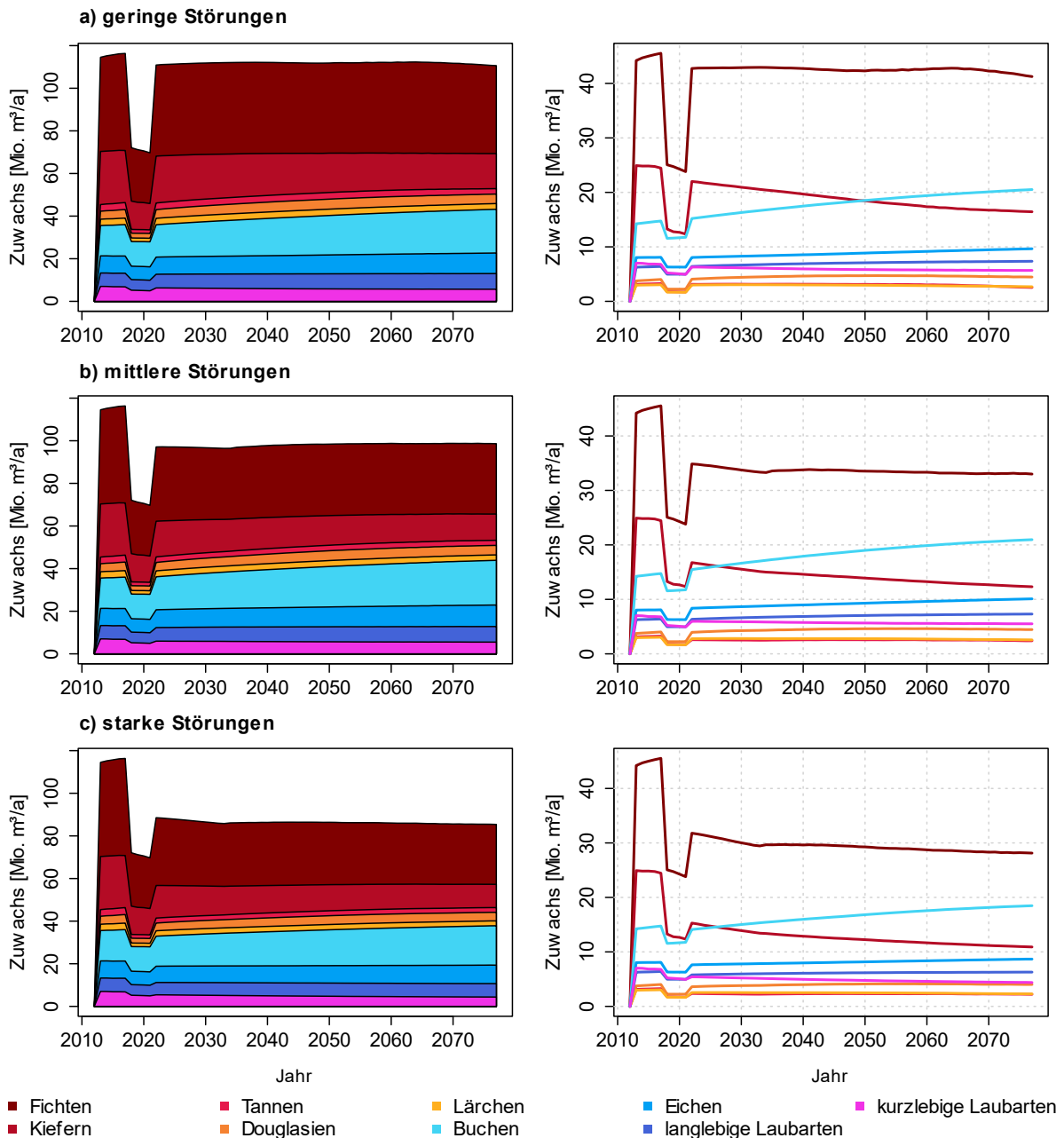
Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung in FABio-Forest, Öko-Institut. Die hektarspezifischen Zuwachsraten beziehen sich auf rechnerische Reinbestände der jeweiligen Baumartengruppen.

Auf Landesebene wird der jährliche Derbholzzuwachs direkt von den Annahmen zur Auswirkung natürlicher Störungen auf die Zuwachsfunktionen der Artengruppen beeinflusst (Abbildung 4-25; Anhang 7.1.2.5). Der Gesamtwuchs einer Artengruppe ergibt sich aus dem Vorrat dieser Artengruppe und der artspezifischen Zuwachsleistung (Abbildung 4-24). Den größten Beitrag zum Gesamtwuchs leisten somit die vorratsdominierenden Artengruppen Fichte, Kiefer und Buche, wobei der Beitrag der Buche im Zeitverlauf ansteigt und den sinkenden Zuwachsbeitrag der Kiefer übertrifft.

Sensitivität mittleres Störungsregime

Bei Annahme eines mittleren Störungsregimes ab 2022 beträgt der durchschnittliche Gesamtwuchs $98,0 \pm 0,8$ Mio. m³ pro Jahr und steigt im Zeitverlauf nur geringfügig an (vgl. Abbildung 4-25). Während Laubholz im Jahr 2022 mit 36,2 Mio. m³ Zuwachs 37,2 % zum Gesamtwuchs beiträgt, erhöht sich dieser Beitrag bis zum Jahr 2076 auf 44,4% bei einem Gesamtwuchs von 43,8 Mio. m³ im Laubholz. Es ist somit also ein Anstieg der Zuwächse im Laubholzbereich zu verzeichnen, während die Zuwächse im Nadelholz über die Zeit von 61,0 Mio. m³ im Jahr 2022 auf 54,9 Mio. m³ im Jahr 2076 abnehmen. Hieraus ergibt sich die in der Summe aller Baumartengruppen etwa konstante Gesamtwuchsleistung.

Abbildung 4-24: Deutschlandweiter Derbholzzuwachs nach Baumartengruppen



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung in FABio-Forest, Öko-Institut.

Sensitivität geringe versus starke Störungen

Der direkte Vergleich der Zuwächse für die Sensitivität „geringe Störungen“ versus die Sensitivität „starke Störungen“ zeigt deutliche Unterschiede. Während der Gesamtzuwachs bei geringer Störung ab 2022 im Mittel bei ca. $111,9 \pm 0,4$ Mio. m³ liegt, reduziert sich dieser Betrag bei Annahme starker Störungen um 22,8% auf $86,3 \pm 0,7$ Mio. m³. Da derzeit leider noch keine Daten zur Zuwachsminderung in den Trockenjahren 2018-2020 vorliegen, basiert die vorliegende Sensitivitätsanalyse auf den im Anhang 7.1.2.5 vorgestellten Annahmen zur Zuwachsreduktion und unterliegt somit einer großen Unsicherheit. Dennoch zeigen die großen Unterschiede zwischen beiden Sensitivitäten, dass der Einfluss von Störungen auf artspezifische Zuwächse eine mindestens genauso große Rolle spielen kann wie störungsbedingt erhöhte Mortalitäten. Gerade im Fall trockenheitsbedingter Störungen

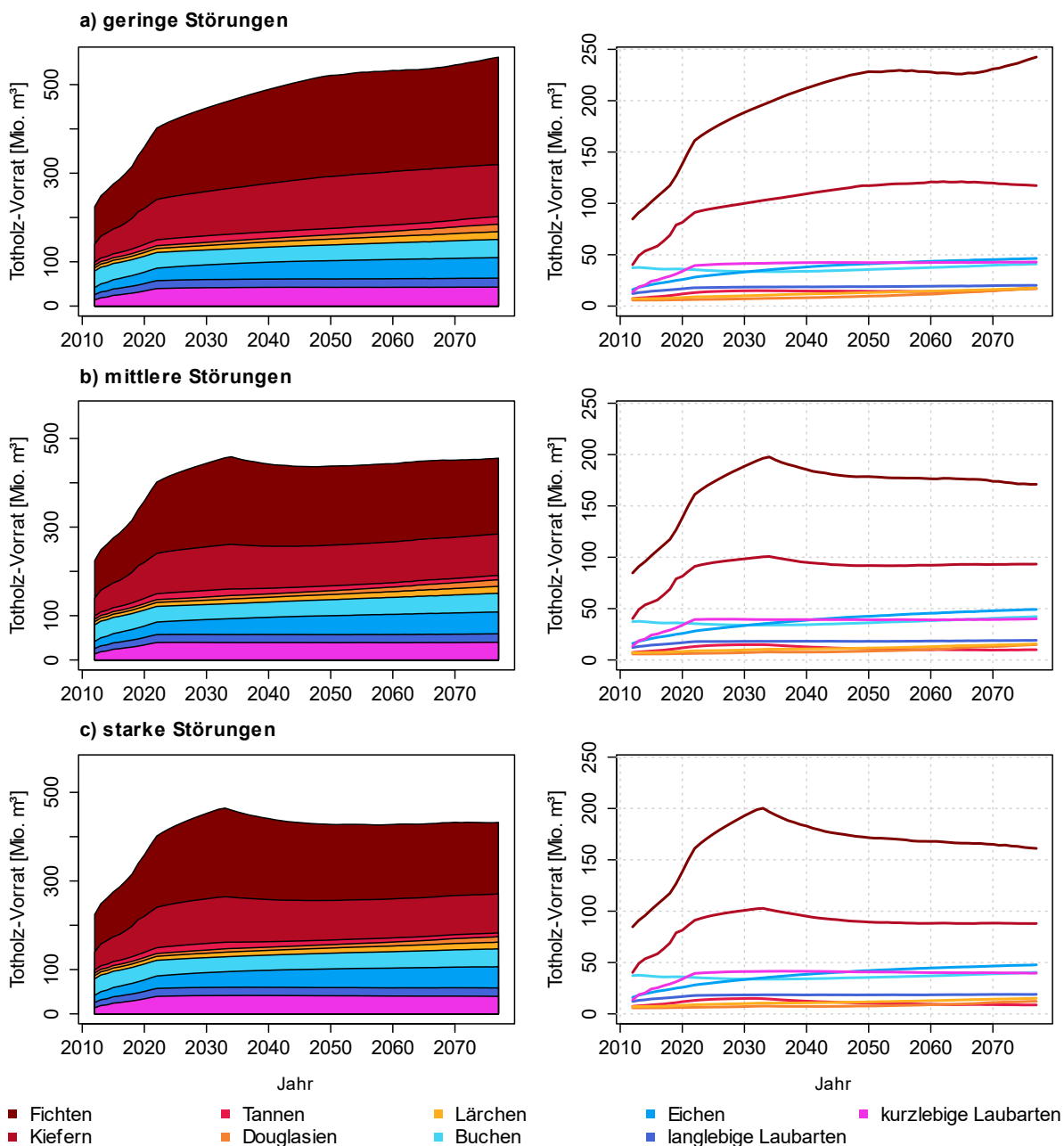
verstärken sich die Auswirkungen, da beide Effekte (erhöhte Mortalität, reduzierter Zuwachs) in Kombination auftreten.

4.2.5 Entwicklung der Totholzvorräte

Die simulierte Entwicklung der Totholzvorräte zeigt einen starken Anstieg von 224,4 Mio. m³ im Jahr 2012 auf 381,5 Mio. m³ im Jahr 2021 (Abbildung 4-26). Hierzu muss erwähnt werden, dass in FABio-Forest neben Derbholz in der derzeitigen Modellversion auch oberirdisches Nichtderbholz (Kronenrestholz) sowie die Rinde abgestorbener, nicht der Nutzung zugeführter Bäume enthalten ist. Dies ist jedoch im Startwert im Jahr 2012 derzeit noch nicht berücksichtigt, so dass der Anstieg bei entsprechend höherem Startwert unter Einbezug des Nichtderbholzes und der Rinde flacher ausfallen wird. Da die BWI-Daten nur den Derbholz-Anteil des Totholzes berichten, wäre für die Neufestlegung des Startwerts im Jahr 2012 ein Spin-up Modelllauf der Jahre 2002-2012 nötig, um den Gleichgewichtswert der Totholzvorräte im Jahr 2012 unter Berücksichtigung des Nichtderbholzes zu ermitteln. Solch ein Spin-up Lauf war im Rahmen des Projektes jedoch zeitlich nicht möglich. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zum Totholz zu berücksichtigen.

Abgesehen vom vermutlich zu niedrigen Startwert im Jahr 2012 ist der starke Anstieg im Totholz bis zum Jahr 2020 jedoch auch durch die Berücksichtigung der jahresscharfen Mortalitäten in Anlehnung an die Waldzustandserhebung (WZE) zu erklären. Damit gehen hohen Mortalitäten insbesondere beim Nadelholz, vor allem bei Fichte und Kiefer, einher. Zwar wird ein Teil des Totholzes der Nutzung zugeführt (siehe Anhang 7.1.2.1), doch ist der Anteil, der entnommen wird, derzeit zeitlich konstant, so dass die Höhe des im Wald verbleibenden Totholzes proportional mit der anfallenden Gesamtmenge ansteigt. Nach 2021 verflacht sich der Anstieg im Totholz durch die in allen drei Sensitivitäten als im Vergleich zu den Jahren 2018-2020 geringer angenommene Mortalität (Abbildung 4-26). In der Sensitivität „mittlere Störungen“ steigt die Totholzmenge zunächst weiter bis zum Jahr 2034 an, geht dann bis zum Jahr 2045 leicht zurück, und verbleibt danach bis Simulationsende auf einem nahezu konstanten Niveau. Dies resultiert aus dem Einbruch der Nadelholzversorgung, die ab dem Jahr 2034 nicht mehr vollständig bedient werden kann. Zuvor wurde, wie bereits im Kapitel 4.2.3 dargestellt, jährlich mehr Derbholzvolumen durch Ernte abgeschöpft als nachwachsen konnte, d.h. es fand ein Vorratsabbau insbesondere in den durchmesserstärksten Altersklassen statt (siehe auch Abbildung 4-27). Die obersten Durchmesserklassen sind altersbedingt gleichzeitig stärker von Mortalität betroffen sind als die mittelstarken Durchmesserklassen (siehe Anhang 7.1.2.2). Nach dem Jahr 2034 wird nur noch so viel durch Ernte entnommen, wie pro Jahr in die hiebsreifen Durchmesserklassen einwächst. Gleichzeitig werden die oberen Durchmesserklassen, die überproportional viel Totholzvolumen pro Baum anfallen lassen, im Rahmen der zulässigen Bewirtschaftung abgeschöpft, so dass nun insgesamt weniger Totholzvolumen anfällt (Abbildung 4-26, siehe auch Abbildung 4-28). Der Totholz-Rückgang zwischen den Jahren 2034 und 2045 spiegelt die Zeitspanne wider, die benötigt wird, um den Turnover des Totholzpool mit dem jährlichen Zufluss an neuem Totholz ins Gleichgewicht kommen zu lassen. Der Gesamtotholzvorrat im Jahr 2076 beträgt unter Annahme eines mittleren Störungsregimes 454,6 Mio. m³, wovon 304,5 Mio. m³ (67,0%) auf Nadel- und 150,1 Mio. m³ (33,0%) auf Laubholzsprung entfallen.

Abbildung 4-25: Totholzvorrat nach Baumartengruppen



Quelle: Eigene Berechnung in FABio-Forest, Öko-Institut. Totholz-Vorräte (Holzvolumen der toten Biomassekompartimente ab einem Stammdurchmesser von 7 cm) kumuliert und hochskaliert über alle simulierten Traktecken.

Sensitivität geringe versus starke Störungen

Zwar ist die Mortalität in der Sensitivität „geringe Störungen“ gegenüber der Sensitivität „starke Störungen“ reduziert, so dass insgesamt weniger Bäume sterben, doch ist gleichzeitig der Zuwachs deutlich höher (Kap. 4.2.4). Dies hat höhere Gesamtvorräte in der Sensitivität „geringe Störung“ zur Folge (Kap. 4.2.3, Abbildung 4-22), und damit ein höheres Input-Potenzial für die Totholzbildung (Abbildung 4-26). Gleichzeitig werden in dieser Sensitivität die Nadelholzvorräte erst ca. ab dem Jahr 2050 knapp mit einem moderaten Defizit von jährlich 4-6 Mio. m³ im Industrieholzsegment (Abbildung 4-19), d.h. es gibt bis zu diesem Zeitpunkt

noch durchmesser- und volumenstarke Bäume mit erhöhtem Mortalitätsrisiko, die zur Totholzneubildung beitragen. Im Gegensatz dazu ist in der Sensitivität „starke Störungen“ zwar die Mortalität erhöht, dafür aber zugleich der Zuwachs und damit der Vorratsaufbau und die zur Verfügung stehende Menge an Vorrat, die absterben und ins Totholz übergehen kann, reduziert. Zugleich macht sich der bereits für das mittlere Störungsszenario beschriebene Effekt der ab 2033 eintretenden Übernutzung im Nadelholzbereich bemerkbar. In Kombination führt dies in der Sensitivität „starke Störungen“ auf lange Sicht zu einem geringeren Totholzaufkommen als in der Sensitivität „geringe Störungen“ (559,7 versus 432,5 Mio. m³ im Jahr 2076, Beitrag Nadelholz 73,2% versus 66,1% zum jeweiligen Gesamtaufkommen, Abbildung 4-26).

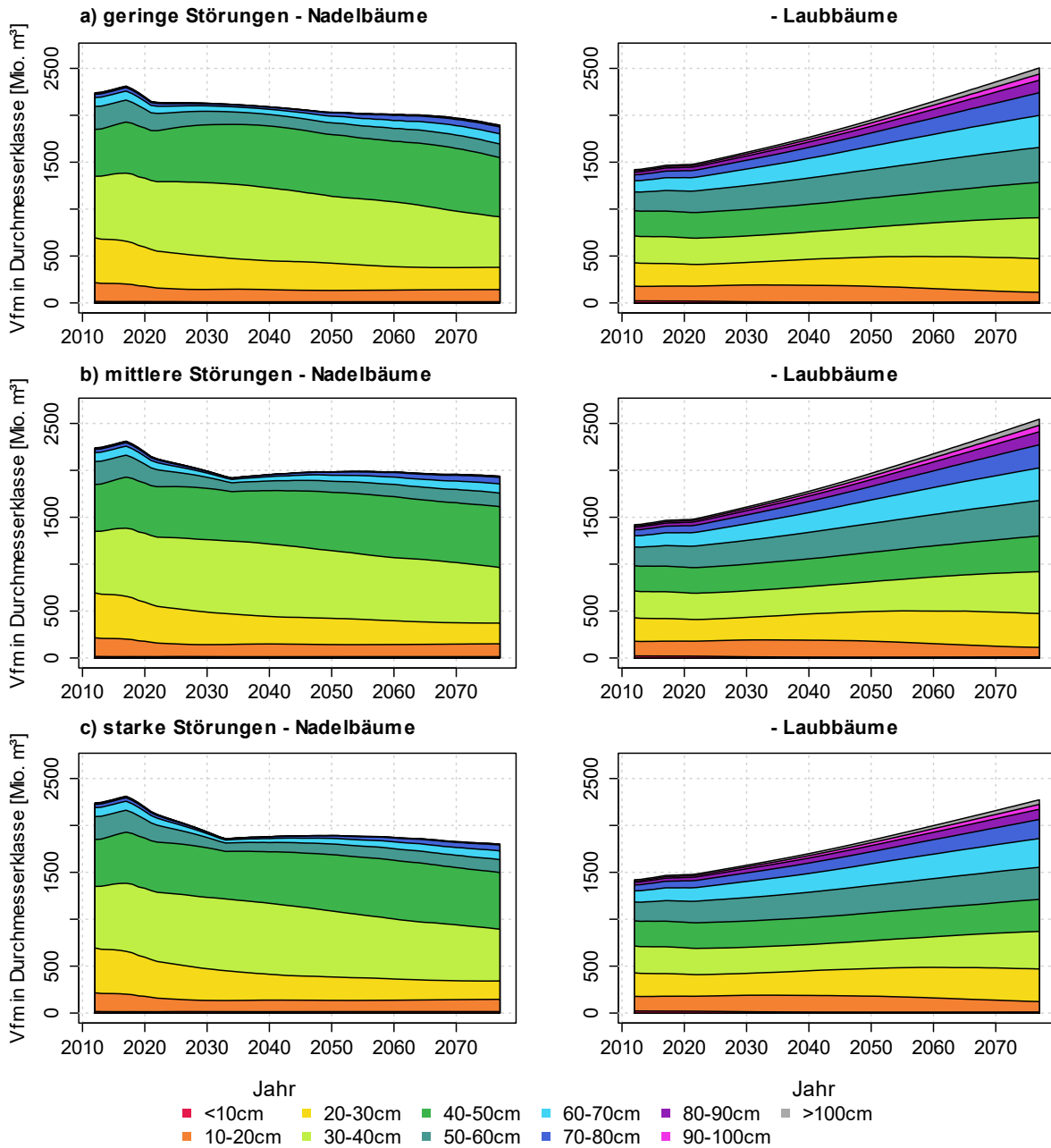
4.2.6 Entwicklung der Durchmesser- und Baumartengruppen

Betrachtet man die Vorratsentwicklung der Bestände differenziert nach Durchmesser- und Baumartengruppen in Abbildung 4-27, so zeigt sich, dass zum Beginn der Simulationsperiode die höchsten Bestandsvorräte beim Nadelholz im Durchmesserbereich 30-40 cm (656,2 Mio. m³ im Jahr 2012) auftreten, gefolgt von den Durchmesser- und Baumartengruppen 40-50 cm (499,2 Mio. m³) und 20-30 cm (478,2 Mio. m³). Beim Laubholz ist die Verteilung nach Durchmesser- und Baumartengruppen vom Durchmesserbereich 20-30 cm bis zum Durchmesserbereich 50-60 cm relativ homogen und bewegt sich zwischen 200,1 bis 286,5 Mio. m³ pro Durchmesser- und Baumartengruppe. Deutlich geringere Vorräte finden sich bei den Laubbäumen in den Durchmesser- und Baumartengruppen >60cm, sowie den Durchmesser- und Baumartengruppen <20cm (Abbildung 4-27).

In der Sensitivität „mittlere Störungen“ nimmt der Gesamtbestand im Nadelholzbestand bis zum Jahr 2034 ab, wobei eine überproportionale Abnahme in den Durchmesser- und Baumartengruppen >50cm zu verzeichnen ist. Der Volumenabbau in den oberen Durchmesser- und Baumartengruppen kommt durch den intensiven Ernteeinschlag von Bäumen im Bereich der Zielstärkennutzung zustande (Abbildung 4-27). Nach dem Jahr 2033 verbleibt der Gesamtbestand im Nadelholz auf etwa konstantem Niveau, mit einer leichten Zunahme der Vorräte in den Durchmesser- und Baumartengruppen >40cm bei gleichzeitiger Vorratsabnahme in den Durchmesser- und Baumartengruppen 20-30 cm und 30-40 cm im Zeitraum 2033-2076. Beim Laubholz steigt der Vorrat zwischen den Jahren 2033 und 2076 in allen Durchmesser- und Baumartengruppen >20 cm an (Abbildung 4-27). Die Abnahme an Vorrat in den unteren Durchmesser- und Baumartengruppen sowohl beim Nadel- als auch beim Laubholz ist ein Indiz für die fortschreitende Entwicklung der Bestände hin zu älteren Stadien und ggf. ein Hinweis darauf, rechtzeitig die Bestandsverjüngung und Etablierung neuer Jungbestände im Blick zu haben.

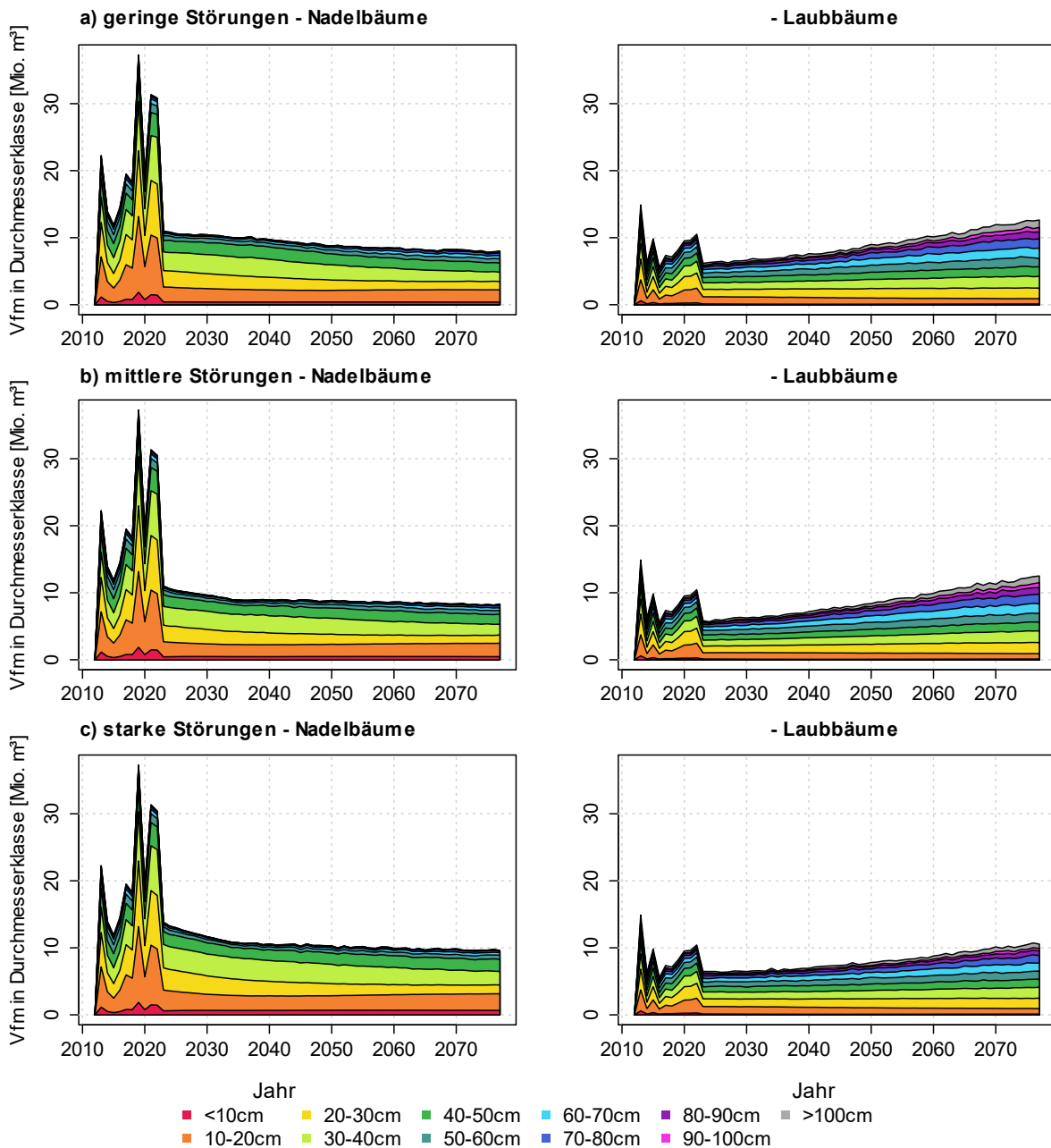
Abbildung 4-28 zeigt den jährlichen Abgang durch Mortalität nach Durchmesser- und Baumartengruppen für Nadel- und Laubholz. Aggregiert über alle Durchmesser- und Baumartengruppen ist das durch Mortalität ausgeschiedene Nadelholzvolumen im Jahr 2019 mit 37,3 Mio. m³ am höchsten. Mit 11,6% Ausscheiderate in der Durchmesser- und Baumartengruppe 0-10cm und 12,2% in der Durchmesser- und Baumartengruppe >100cm war der mortalitätsbedingte Volumenverlust in diesen Durchmesser- und Baumartengruppen am höchsten. Die mit 0,7% Vorratsverlust niedrigste Ausscheiderate bei Nadelbäumen hatte die Durchmesser- und Baumartengruppe 40-50 cm. Beim Laubholz lag der Verlust im Jahr 2019 insgesamt bei 8,2 Mio. m³, mit einer maximalen Verlustrate von 2,2% in der Durchmesser- und Baumartengruppe >100 cm und einer minimalen Verlustrate von 0,4% in den Durchmesser- und Baumartengruppen zwischen 40 und 70 cm (Abbildung 4-27).

Abbildung 4-26: Bestandsstruktur als Derbholtzvorrat (Vorratsfestmeter) von Laub- und Nadelbäumen für lebende Bäume nach Durchmesserklassen



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung in FABio-Forest, Öko-Institut.

Abbildung 4-27: Abgestorbenes Derbholtzvolumen (Vorratsfestmeter) von Laub- und Nadelbäumen nach Durchmesserklassen



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung in FABio-Forest, Öko-Institut.

4.2.7 Entwicklung des CO₂-Speichers in der Waldbiomasse und der Senkenleistung

Das in der Biomasse im Wald gespeicherte CO₂ nimmt grundsätzlich in allen drei modellierten Sensitivitäten zwischen den Jahren 2012 und 2076 zu (Abbildung 4-29). Im Jahr 2012 beträgt die insgesamt in lebender Biomasse und Totholz im Wald gebundene Menge an CO₂ deutschlandweit 4.816 Mio. t und steigt bis zum Jahr 2017 auf 5.010 Mio. t. an, um danach – bedingt durch die extremen Störungen in den Jahren 2018 bis 2020 – auf 4.488 Mio. t. abzunehmen. In der Sensitivität „mittlere Störungen“ steigt die gespeicherte Gesamtmenge an CO₂ anschließend bis zum Jahr 2034 nur sehr langsam um insgesamt 60 Mio. t CO₂ an. Nach dem Einbruch der Nadelholzbereitstellung im Jahr 2033 nimmt die jährliche CO₂-

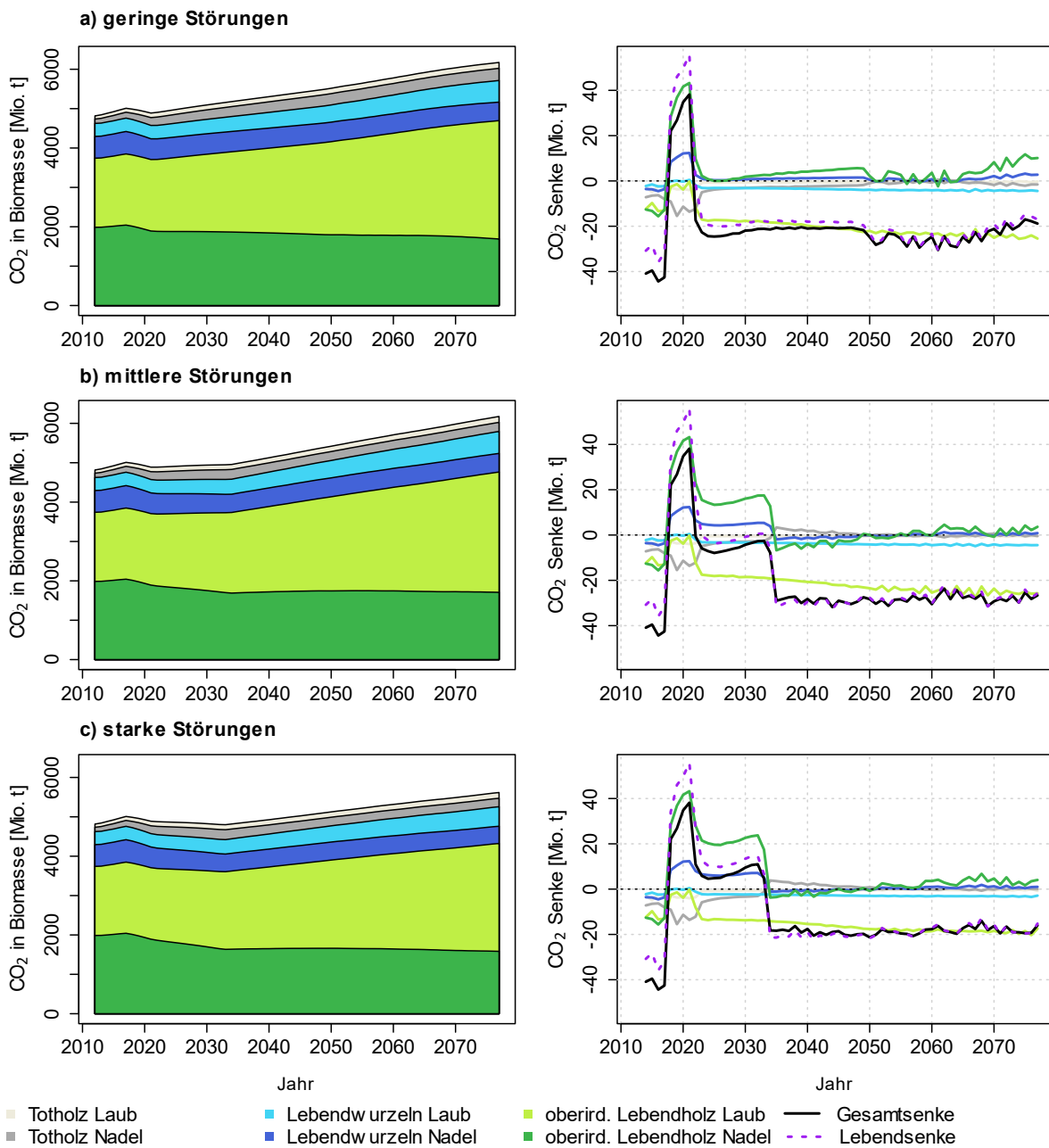
Speicherungsrate zu, sodass im Jahr 2076 schließlich 6.149 Mio. t CO₂ in Waldbiomasse und Totholz gebunden sind (Abbildung 4-29). Eine detailliertere Betrachtung differenziert nach Nadel- und Laubbäumen zeigt, dass Nadelbäume in den Jahren 2018 bis 2021 in der Sensitivität „mittlere Störungen“ von einer CO₂-Senke zu einer CO₂-Quelle werden, während die Senkenleistung im Laubholz auf nahe Null abnimmt. Auch nach dem Jahr 2021 bleibt der landesweite Nadelholzbestand bis zum Jahr 2034 eine CO₂-Quelle, was sich erst nach dem Einbruch der Nadelholzbereitstellung um einen Wert \pm Null einpendelt (Mittelwert 2035-2076: $-0,2 \pm 3,0$ Mio. t; Abbildung 4-29), da nun jährlich in etwa so viel Nadelholz entnommen wird wie nachwächst. Durch die im Laubholz ab dem Jahr 2022 vorhandene Senkenleistung verbleibt der Wald als Gesamtheit in der Sensitivität „mittlere Störungen“ eine CO₂-Senke, wobei die Senkenleistung nach dem Jahr 2034 durch den Einfluss des Nadelholzes deutlich zunimmt.

Wie empfindlich die CO₂-Senkenleistung des Waldes auf die künftig zu erwartende Störungsintensität und damit verbundene Mortalität sowie Zuwachsleistung reagiert, wird im direkten Vergleich der drei Störungssensitivitäten deutlich. Während in der Sensitivität „geringe Störungen“ der Wald lediglich in den Jahren 2018-2021 zu einer Quelle wird, bleibt er in der Sensitivität „starke Störungen“ bis zum Jahr 2033 eine Quelle und wird erst nach Einbruch der Nadelholzbereitstellung zu einer Senke (Abbildung 4-29).

Da die Gesamtmenge an im Wald gespeichertem CO₂ um mehr als zwei Größenordnungen (Faktor 1.00) über der jährlichen Veränderung des Speichers liegt, ist die Unsicherheit hinsichtlich der exakten Größe der Senke relativ hoch. Dies spiegelt sich auch im Vergleich der Zahlen zwischen den im deutschen Treibhausgasinventar berichteten Werten (UBA 2022) und den vom Modell simulierten Werten wider. Die kleine Anzahl an Stichprobenpunkten für die Treibhausgasberichterstattung im Jahr 2017 erhöht die Gesamtunsicherheit weiter, da sie ihrerseits bereits zu einer vergleichsweise hohen Unsicherheit der Werte beiträgt (Anhang 7.1.2.6 und 7.1.2.7). Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den im Treibhausgasinventar berichteten Werten und den Simulationsergebnissen zu erreichen, wird in Abbildung 4-30 der in Anhang 7.1.2.6 hergeleitete Korrekturfaktor (Parallelverschiebung) herangezogen. Dieser Korrekturfaktor basiert auf dem Zeitraum von 2013 bis 2017 (FABio_2017 (korr) in Abbildung 4-30).

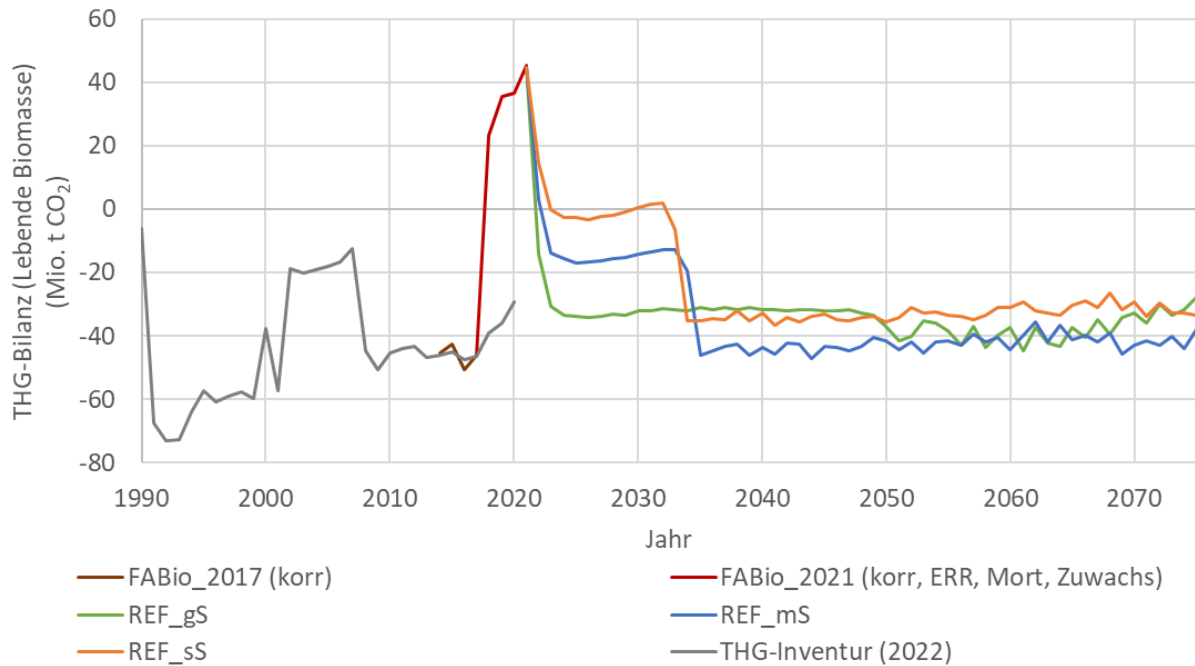
Unter Berücksichtigung der an die WZE angelehnten Mortalitätsfaktoren sowie der getroffenen Annahmen zur Zuwachsreduktionen bei Laub- und Nadelbäumen zwischen 2018 und 2021 (siehe Kap. 2.3.1 und Anhang Kap. 7.1.2.7) wird die lebende Biomasse in Wäldern in Deutschland im Jahr 2021 mit mehr als 40 Mio. t freigesetztem CO₂ zu einer deutlichen Quelle (Abbildung 4-30). Wie sich die Senkenleistung der lebenden Biomasse im Wald ab 2021 weiterentwickelt, hängt stark davon ab, von welcher Störungssensitivität für künftige Entwicklungen ausgegangen wird. So variiert die Größe der Senke zwischen den Sensitivitäten „geringe Störungen“ und „starke Störungen“ im kommenden Jahrzehnt um mehr als 30 Mio. t CO₂ Speicherleistung pro Jahr (Abbildung 4-30). Ein weiterer bedeutender Einflussfaktor für die Senkenleistung liegt in der Holzentnahmeintensität, wie sich durch das Beispiel Nadelholzentnahme bis zum Jahr 2034 bzw. 2033 in den Sensitivitäten „mittlere und starke Störungen“ anschaulich zeigt. Solange jährlich mehr Nadelholz durch Ernte aus den zur Zielstärkennutzung ausgewiesenen Durchmesserklassen entnommen wird als nachwachsen kann, bleibt das Nadelholz eine CO₂-Quelle und die Gesamtsenkenleistung der lebenden Biomasse reduziert sich dadurch. Erst nachdem die vorhandenen Vorräte im Nadelholz abgeschöpft sind, die Nadelholznachfrage nicht mehr vollständig bedient werden kann, und sich die Nadelholzentnahme dadurch auf die Menge verringert, die jährlich nachwachsen kann, erhöht sich die Senkenleistung im Vergleich zur Vorperiode (Abbildung 4-30).

Abbildung 4-28: In Waldbiomasse gespeichertes CO₂ und jährliche Senkenleistung.



Quelle: Eigene Berechnung in FABio Forest, Öko-Institut.

Abbildung 4-29: THG-Bilanz der lebenden Biomasse im Wald im Referenzszenario für die Sensitivitäten geringe, mittlere und starke Störungen



Quelle: Eigene Berechnungen und Darstellung in FABio-Forest, Öko-Institut. THG-Inventur in UBA (2022) und zugehörige CRF-Tabellen. REF = Referenzszenario, gS = geringe Störungen, mS = mittlere Störungen, sS = starke Störungen. Zu FABio_2017 (korr) und FABio_2021 (korr, ERR, Mort, Zuwachs) = Parametrisierung der Jahre 2013 bis 2021 (siehe Anhang 7.1.2.7).

5 Ausblick

Das vorliegende Arbeitspapier dient der detaillierten Darstellung des Referenzszenarios für die Holzverwendung bis zum Jahr 2050 und der sich hieraus ergebenden Konsequenzen für die Entwicklung der Waldbestände in Deutschland. Diese Arbeiten sind im UBA-Projekt BioSINK eingebettet. Basierend auf den Ergebnissen der Holzverwendungsmodellierung in TRAW ergibt sich für das Referenzszenario die Tendenz einer zukünftig steigenden Nachfrage nach Waldderbholz. Hiervon besonders stark betroffen ist die Nachfrage nach Nadelholz, was durch den steigenden Bedarf nach Holz zur stofflichen Nutzung angetrieben wird. Dem gegenüber steht eine sinkende Nachfrage nach Holz zur energetischen Nutzung, wovon vor allem Laubholz betroffen ist, das derzeit – im Gegensatz zu Nadelholz – zu einem höheren Anteil energetisch verwertet wird.

Aufbauend auf dem hier detailliert vorgestellten Referenzszenario werden im UBA-Projekts BioSINK weitere Szenarien zur energetischen Holzverwendung erarbeitet und den Ergebnissen des Referenzszenarios vergleichend gegenübergestellt. Eine über den Holzenergiesektor hinausgehende Weiterführung der Arbeiten zur Holzverwendung wird derzeit im vom Waldklimafonds geförderten Projekt „DIFENS“ erarbeitet. DIFENS konzentriert sich darauf, wie sich Veränderungen in der Holznachfrage, Klimaveränderungen, natürlichen Störungen und Politikanforderungen, sowie die sich hieraus ergebenden Reaktionsmöglichkeiten von Forst- und Holzwirtschaft auf die natürliche Waldentwicklung auswirken. Auch in DIFENS kommen die Modelle TRAW und FABio-Forest sowie das Modell HoLCA zum Einsatz, um verschiedene Entwicklungsmöglichkeiten als Szenarien beschreiben und in ihren Auswirkungen zu quantifizieren. Weitere Vertiefungen sind hier zum Beispiel im Bereich der Holznachfragemodellierung für die stofflichen Holznutzung geplant.

Für die Waldmodellierung mit dem Waldmodell FABio ist die erst kürzlich implementierte nachfragebasierte Holzentnahme als erfolgreiche Erweiterung des bestehenden Modells hervorzuheben. Im Gegensatz zur zuvor verwendeten aufkommensbasierten Holzentnahmeroutine erlaubt die nachfragebasierte Einschlagsteuerung nun, konkret die Auswirkungen von Veränderungen im Holzmarkt und die sich daraus ergebenden Folgen für die Holznachfrage und Holzentnahme im Wald abzubilden und zu analysieren. Hier ist die Offline-Kopplung der Modelle TRAW und FABio-Forest als ein wichtiger Meilenstein hervorzuheben. Die Interaktion der beiden Modelle kann bei Bedarf in zukünftigen Projekten weiter ausgebaut werden.

Eine weitere erfolgreiche Anpassung erfolgte durch die Re-Parametrisierung der Median-Zuwächse für die rechnerischen Reinbestände der Baumartengruppen auf die in der Treibhausgasinventur 2017 berichteten Werte. Die Re-Parametrisierung wurde vorgenommen, um eine bessere Übereinstimmung der Modellergebnisse für den Zeitraum 2013 bis 2017 mit den im deutschen Treibhausgasinventar (UBA 2022) berichteten Werten zu schaffen. Insbesondere zur Berücksichtigung der trockenheitsbedingten Kalamitäten seit 2018 wurden zudem die Daten aus der WZE genutzt, um jahresscharfe Skalierungsfaktoren für die Mortalitäten der Hauptbaumartengruppen abzuleiten. Dies ist ein erster Schritt, um den Einfluss natürlicher Störungen auf die Simulation der Waldentwicklung im empirischen Waldmodell FABio-Forest zu erfassen. Obwohl baumartengruppenspezifische Unterschiede berücksichtigt werden, bleiben standortsbedingte Unterschiede der Klimaauswirkungen sowie Asymmetrien der Auswirkungen abhängig vom Baumalter jedoch vorerst noch unberücksichtigt. Größere Unsicherheiten bestehen bei der Abschätzung von

Klimaauswirkungen auf Sensitivitäten der Zuwächse, da hierzu bisher keine aktuellen Daten aus den Extremjahren 2018-2020 vorliegen. Die hierdurch sehr wahrscheinlich landesweit erfolgten Zuwachseinbrüche werden sich flächendeckend erst mit Vorliegen der BWI 4 quantitativ abschätzen lassen. Um dennoch eine vorläufige Berücksichtigung der klimabedingten negativen Auswirkungen auf die Zuwachsleistungen vornehmen zu können, wurden Experten-basierte Abschätzungen für als plausibel zu erwartenden Zuwachsreduktionen bei Laub- und Nadelholzarten getroffen, die sowohl für die Simulation der historischen Entwicklung in den Jahren 2018-2021 als auch die drei verschiedenen getesteten Klimasensitivitätsszenarien herangezogen wurden. Durch die Variation der Annahmen zur zukünftigen Entwicklung von Mortalität und Zuwächsen als Resultat von natürlichen Störungsereignissen kann eine erste Spannbreite für die möglicherweise zu erwartenden Sensitivitäten der Waldentwicklung angegeben werden.

Eine detailliertere Berücksichtigung von klimatischen Auswirkungen auf Mortalität, Zuwachs und Waldentwicklung wird aktuell im angesprochenen Projekt DIFENs erarbeitet, in dem mithilfe des prozessbasierten Waldmodells 4C (Gutsch et al. 2018) Beziehungen zwischen Klimavariablen, artspezifischen Zuwächsen und Mortalitäten abgeleitet und in FABio-Forest integriert werden sollen.

6 Literaturverzeichnis

- Böttcher, H.; Hennenberg, K. J.; Winger, C. (2018a): Waldvision Deutschland - Beschreibung von Methoden, Annahmen und Ergebnissen. Öko-Institut e.V. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Waldvision-Methoden-und-Ergebnisse.pdf>.
- Böttcher, H.; Hennenberg, K.; Winger, C. (2018b): FABio-Waldmodell, Modellbeschreibung Version 0.54 Stand Nov. 2017. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/FABio-Wald-Modellbeschreibung.pdf>.
- Boysen-Hogrefe, J.; Gern, K.-J.; Groll, D.; Hoffmann, T.; Janssen, N.; Kooths, S.; Meuchelböck, S.; Reents, J.; Sonnenberg, N.; Stolzenburg, U. (2022): Kieler Konjunkturberichte. Mittelfristprojektion für Deutschland im Herbst 2022. Nr. 96. Kieler Institut für Weltwirtschaft. Kiel.
- BReg - Bundesregierung (2021): Projektionsbericht 2021 für Deutschland gemäß Artikel 18 der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie §10 (2) des Bundes-Klimaschutzgesetzes. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/projektionsbericht_2021_bf.pdf, zuletzt geprüft am 30.03.2022.
- destatis (2022): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Inlandsproduktberechnung. Detaillierte Jahresergebnisse (Fachserie 18 Reihe 1.4). Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Publikationen/Downloads-Inlandsprodukt/inlandsprodukt-endgueltig-pdf-2180140.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 29.09.2023.
- Döring, P.; Glasenapp, S.; Mantau, U. (2020): Energieholzverwendung in privaten Haushalten 2018, Marktvolumen und verwendete Holzsortimente, Rohstoffmonitoring Holz. Informationssysteme für Rohstoffe. Hamburg. Online verfügbar unter http://www.info.eu/downloads/studien/HH_2018_Teilbericht.pdf, zuletzt geprüft am 29.09.2023.
- Döring, P.; Weimar, H.; Mantau, U. (2021a): Die energetische Nutzung von Holz in Biomassefeuerungsanlagen unter 1 MW in Nichthaushalten im Jahr 2019. Informationssysteme für Rohstoffe. Hamburg. Online verfügbar unter http://www.info.eu/downloads/studien_neu_2022/S08%20Kleinfeuerungsanlagen%202019.pdf, zuletzt geprüft am 29.09.2023.
- Döring, P.; Weimar, H.; Mantau, U. (2021b): Einsatz von Holz in Biomasse-Großfeuerungsanlagen 2019. Informationssysteme für Rohstoffe. Hamburg. Online verfügbar unter http://www.info.eu/downloads/studien_neu_2022/S07%20Grossfeuerungsanlagen%202019.pdf, zuletzt geprüft am 29.09.2023.
- Glasenapp, S.; Döring, P.; Blanke, C.; Mantau, U. (2017): Entwicklung von Holzverwendungsszenarien. Abschlussbericht. WEHAM - AP 3.2. Zentrum Holzwirtschaft, Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft (Hg.). Hamburg. Online verfügbar unter https://www.weham-szenarien.de/fileadmin/weham/Ergebnisse/Glasenapp__Doering__Blanke__Mantau__2017

- 7__Entwicklung_von_Holzverwendungsszenarien__WEHAM_Projekt_.pdf, zuletzt geprüft am 29.09.2023.
- Gornig, M.; Michelsen, C.; Révész, H. (2022): Strukturdaten zur Produktion und Beschäftigung im Baugewerbe – Berechnungen für das Jahr 2021. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/1Wertsc hoepfung/2008/StrukturdatenBaugewerbe/Downloads/DL_Structurdaten_Endbericht2021.pdf;jsessionid=A59103DDA94D5F4004C1646EA22FFBC0.live21323?__blob=publication File&v=3, zuletzt geprüft am 29.09.2023.
- Grassi, G.; Pilli, R. (2017): Projecting the EU forest carbon net emissions in line with the “continuation of forest management”: the JRC method (JRC106814). Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Gutsch, M.; Lasch-Born, P.; Kollas, C.; Suckow, F.; Reyer, C. P. O. (2018): Balancing trade-offs between ecosystem services in Germany’s forests under climate change. In: *Environ. Res. Lett.* 13 (4), S. 45012. DOI: 10.1088/1748-9326/aab4e5.
- Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Köhler, B.; Reise, J.; Köppen, S.; Bischoff, M.; Fehrenbach, H.; Pehnt, M.; Werle, M.; Mantau, U. (2022): Aktuelle Nutzung und Förderung der Holzenergie - Teilbericht zu den Projekten BioSINK und BioWISE (Climate Change, 12/2022). Öko-Institut; ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; Informationssysteme für Rohstoffe. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_12-2022_aktuelle_nutzung_und_foerderung_der_holzenergie.pdf, zuletzt geprüft am 29.03.2022.
- Huber, M. O. (2010): Assessing the long-term species composition predicted by PrognAus. In: *Forest Ecology and Management* 259 (3). DOI: 10.1016/j.foreco.2009.11.020.
- Jochem, D.; Morland, C.; Glasenapp, S.; Weimar, H. (2023): Energetischer Holzverbrauch der privaten Haushalte, Abschlussbericht (Texte, 15/2023). Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.fnr.de/fileadmin/heizenmitholz/HH_2018_Teilbericht.pdf, zuletzt geprüft am 29.09.2023.
- Jochem, D.; Weimar, H.; Bösch, M.; Mantau, U.; Dieter, M. (2015): Estimation of wood removals and fellings in Germany: a calculation approach based on the amount of used roundwood. In: *Eur J Forest Res* 134 (5), S. 869–888. DOI: 10.1007/s10342-015-0896-9.
- Jochem, D.; Weimar, H.; Dieter, M. (2022): Holzeinschlag steigt im Jahr 2021 auf 84,2 Mio. m³. In: *Holz-Zentralblatt* (41), S. 713–714. Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn065561.pdf, zuletzt geprüft am 06.04.2023.
- Mantau, U. (2018): Rohstoffmonitoring Holz: Erwartungen und Möglichkeiten. Unter Mitarbeit von Döring, P.; Weimar, H.; Glasenapp, S.; Jochem, D. und Zimmermann, K. Informationssysteme für Rohstoffe; Thünen-Institut. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hg.). Gülzow-Prüzen. Online verfügbar unter https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Broschuere_Kurzfassung_Rohstoffmonitoring_Web.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2021.
- Mantau, U. (2023): Holzrohstoffbilanzierung - Kreislaufwirtschaft und Kaskadennutzung, 20 Jahre Rohstoffmonitoring Holz (Schriftenreihe nachwachsende Rohstoffe, Band 40). Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Gülzow-Prüzen.

- Mantau, U.; Blank, C.; Döring, P. (2018a): Strukturbericht zum Holzeinsatz im Baubereich – Verwendung der Holzprodukte nach Baubereichen und Bauteilen, Teilbericht des WKF-Projektes KlimaBau. Hamburg. Online verfügbar unter <https://www.fnr.de/ftp/pdf/berichte/22WB403201.pdf>, zuletzt geprüft am 29.09.2023.
- Mantau, U.; Döring, P.; Weimar, H.; Glasenapp, S. (2018b): Rohstoffmonitoring Holz - Mengenmäßige Erfassung und Bilanzierung der Holzverwendung in Deutschland (Schriftenreihe nachwachsende Rohstoffe, Band 38). Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Gülzow-Prüzen. Online verfügbar unter https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Rohstoffmonitoring_SR38_Final_Web_20180612.pdf, zuletzt geprüft am 29.09.2023.
- Mantau, U.; Döring, P.; Weimar, H.; Glasenapp, S.; Jochem, D.; Zimmermann, K. (2018c): Rohstoffmonitoring Holz - Erwartungen und Möglichkeiten, Kurzfassung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Gülzow-Prüzen. Online verfügbar unter https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Broschuere_Kurzfassung_Rohstoffmonitoring_Web.pdf, zuletzt geprüft am 29.09.2023.
- Mantau, U.; Hiller, D.; Giesecking, L.; Blanke, C. (in press.): Holzverwendung im Möbelbereich – Verwendung von Massivholz und Holzwerkstoffen nach Möbelgruppen, FNR FKZ 22015918. Celle.
- Monserud, R. A.; Sterba, H. (1999): Modeling individual tree mortality for Austrian forest species. In: *Forest Ecology and Management* 113 (2), S. 109–123. DOI: 10.1016/S0378-1127(98)00419-8.
- Pfeiffer, M.; Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Reise, J.; Benndorf, A. (2022): Nachfragegesteuerte Holzentnahme und Klimasensitivität – Weiterentwicklungen im Waldmodell FABio. In: Nagel, R.-V. und Schmidt, M. (Hg.): Jahrestagung 2022 der Sektion Ertragskunde des DVFFA Jahrestagung 2022 (12. bis 14. September 2022). Jahrestagung 2022. Martinshaus Rendsburg, S. 47–60. Online verfügbar unter https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfv/publikationen/pdf/nagel_2022_tagungsband_der_jahrestagung_der.pdf, zuletzt geprüft am 29.09.2023.
- Riedel, T.; Hennig, P.; Kroiher, F.; Polley, H.; Schmitz, F.; Schwitzgebel, F. (2017): Die dritte Bundeswaldinventur (BWI 2012). Inventur- und Auswertemethoden. Thünen Institut, Institut für Waldökosysteme. Eberswalde. Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn060229.pdf, zuletzt geprüft am 29.09.2023.
- UBA - Umweltbundesamt (2022): Treibhausgas-Emissionen in Deutschland, Emissionsübersichten in Sektoren. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung>, zuletzt geprüft am 09.11.2022.
- UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2023): Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2021, Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2023. Online verfügbar unter https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envy8fz9q/DE_EU-NIR_2023_DE.pdf, zuletzt geprüft am 23.03.2023.
- Vizzarri, M.; Pilli, R.; Korosuo, A.; Blujdea, V. N. B.; Rossi, S.; Fiorese, G.; Abad Viñas, R.; Colditz, R. R.; Grassi, G. (2021): Setting the forest reference levels in the European Union: overview and challenges. In: *Carbon Balance Manage* 16 (1). DOI: 10.1186/s13021-021-00185-4.

- Weimar, H.; Jochem, D. (Hg.) (2013): Holzverwendung im Bauwesen – Eine Marktstudie im Rahmen der „Charta für Holz“ (Thünen Report, 9). Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn052249.pdf, zuletzt geprüft am 29.09.2023.
- Welle, T.; Sturm, K.; Bohr, Y. (2018): Alternativer Waldzustandsbericht. Eine Waldökosystemtypen-basierte Analyse des Waldzustandes in Deutschland anhand naturschutzfachlicher Kriterien. Naturwald Akademie. Lübeck. Online verfügbar unter https://naturwald-akademie.org/wp-content/uploads/2020/06/Alternativer-Waldzustandsbericht_Stand_24_04_2018_1.pdf.

7 Anhang

7.1 Detaillierte Modellbeschreibung

7.1.1 Modellbeschreibung TRAW

An dieser Stelle werden Details zur Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung und zum Temperatureinfluss bei Holzenergie in TRAW ausgeführt.

7.1.1.1 Grundlagen der Vorausberechnung zur Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung

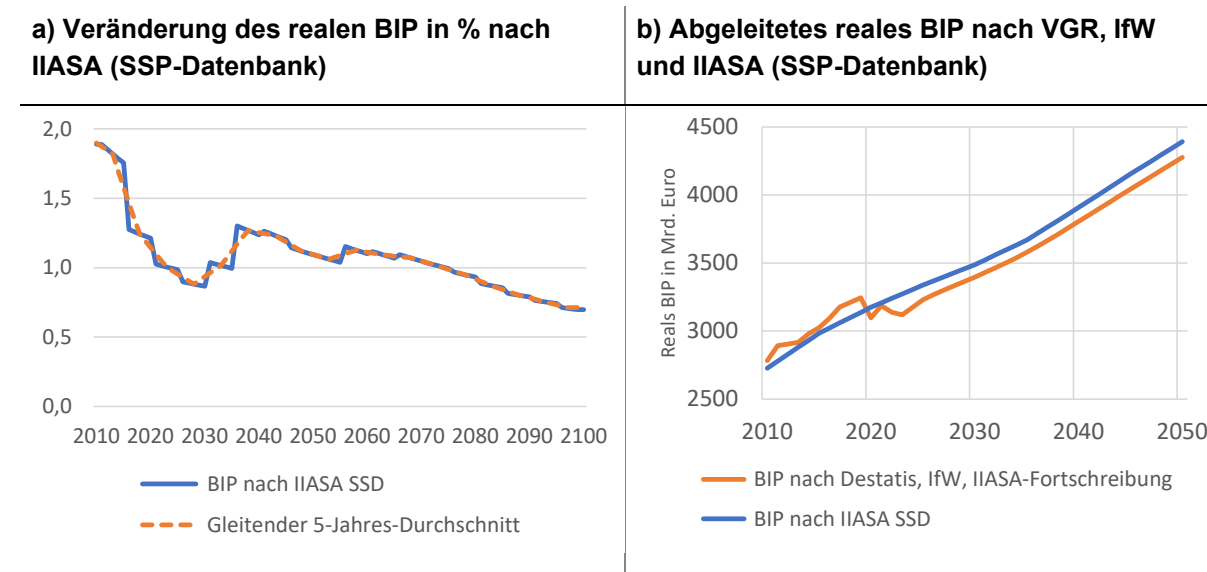
Für die Vorausberechnung wirtschaftlicher Entwicklungen werden empirische Grundlagen zur Anbindung benötigt. Wichtige Sektoren der wirtschaftlichen Entwicklung werden in der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung dokumentiert. Diese wurde bis zum Jahr 2021 aktualisiert (destatis 2022). Für die Prognose bieten sich die Berichte der volkswirtschaftlichen Institute an. Diese prognostizieren in der Regel für zwei Jahre und in einigen Fällen für einen mittelfristigen Zeitraum. Für Letzteres wurde die Mittelfristprojektion des Instituts für Weltwirtschaft, Kiel (IfW) vom 12. September 2022 verwendet (Boysen-Hogrefe et al. 2022). Diese reicht bis zum Jahr 2027. Für den Zeitraum bis zum Jahr 2050 wurde die SSP-Datenbank des IIASA zugrunde gelegt.²⁶

Die Daten zur Veränderung des realen Bruttoinlandprodukts (BIP) wie in der SSP-Datenbank haben den Nachteil, dass sie in stufigen Abschnitten angegeben sind. Das führt zu Schwankungen in den Zielwerten, die sachlogisch in den Modellierungsergebnissen nur schwer zu erklären sind. Außerdem entsprechen die langfristigen Szenarien am aktuellen Rand nicht den bereits dokumentierten Daten des Statistischen Bundesamtes. Schließlich stellen sie Veränderungsraten dar, die sich nicht auf Sektoren der wirtschaftlichen Gesamtrechnung aufteilen lassen.

Um diese Nachteile zu überwinden, wurden die Daten des realen BIP vom Statistischen Bundesamtes bis zum Jahr 2021 verwendet. Anschließend wurde die Mittelfristprognose des IfW darauf angewendet. Schließlich wurde das reale BIP mit den geglätteten SSP-Daten bis zum Jahr 2050 fortgeschrieben. Das Ergebnis des realen BIP in Milliarden Euro für Deutschland ist in Abbildung 7-1 dargestellt.

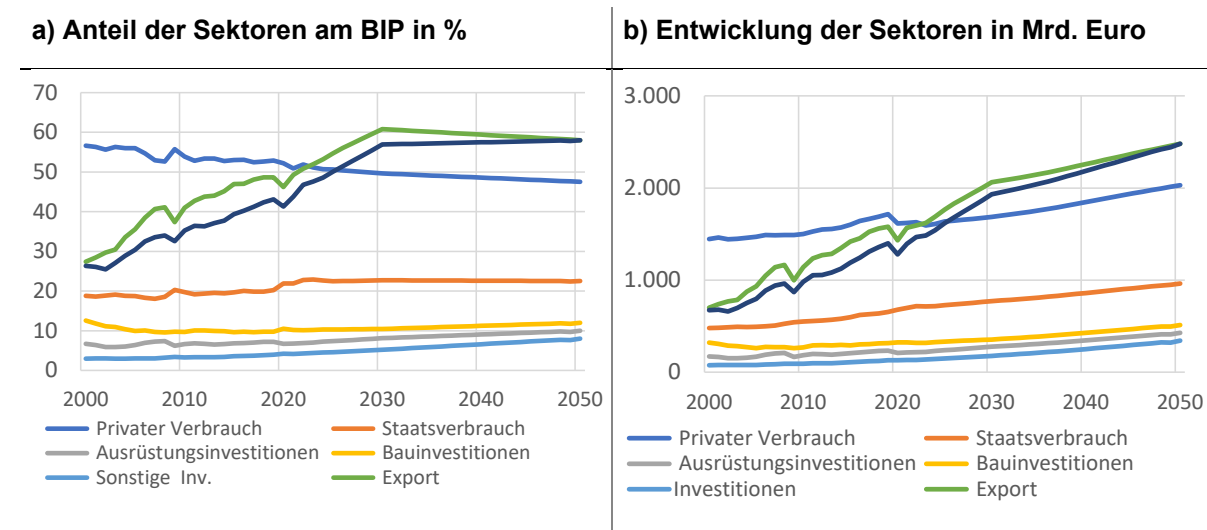
²⁶ IIASA SSP. Database (Shared Socioeconomic Pathways) - Version 2.0 (<https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb>).

Abbildung 7-1: Umsetzung der IIASA-Szenarien in reales Bruttoinlandsprodukt (BIP)



Quelle: eigene Berechnungen (INFRO) auf Basis von destatis (2022), Boysen-Hogrefe et al. (2022) und der SSP Database (Shared Socioeconomic Pathways) von IIASA²⁶.

Abbildung 7-2: Differenzierung der IIASA-Szenarien nach Sektoren des realen BIP



Quelle: eigene Darstellung, INFRO. Daten bis zum Jahr 2020 aus Statistisches Bundesamt²⁷.

In einem zweiten Schritt wurden Annahmen über die künftigen Anteile der volkswirtschaftlichen Sektoren getroffen. Der Anteil der privaten Verwendung am BIP ging in den letzten zwanzig Jahren kontinuierlich zurück. Dieser Trend wurde leicht abgeschwächt fortgeschrieben. Ferner wurde davon ausgegangen, dass der Export seinen Anteil nicht weiter ausbauen kann. Hierfür sprechen die de-Globalisierung und die drohende Abwanderung industrieller Bereiche. Es wird aber kein Rückgang des Anteils angenommen. Mit dem Wachstum des BIP insgesamt steigt auch der reale Export weiter. Andererseits ist Deutschland als großer Absatzmarkt zunehmend

²⁷ Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung, Fachserie 18, Reihe 1.4. (<https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/publikationen-fachserienliste-18.html>)

für Import interessant und muss Energie und Waren importieren. Der Import nähert sich dem Exportanteil. Langfristig bedeutet dies keine Schrumpfung des Außenhandels, sondern geringeres Wachstum. In dem Umfang, in dem der Außenhandelsaldo ausgeglichen wird, erbringt der Außenhandel keinen Nettobeitrag mehr zum Wachstum des Bruttoinlandsproduktes. Der Anteil der staatlichen Verwendung bleibt konstant bzw. wächst real mit dem BIP. Der Investitionsbedarf für den Umbau der Wirtschaft und die Bewältigung des Klimawandels bleibt hoch.

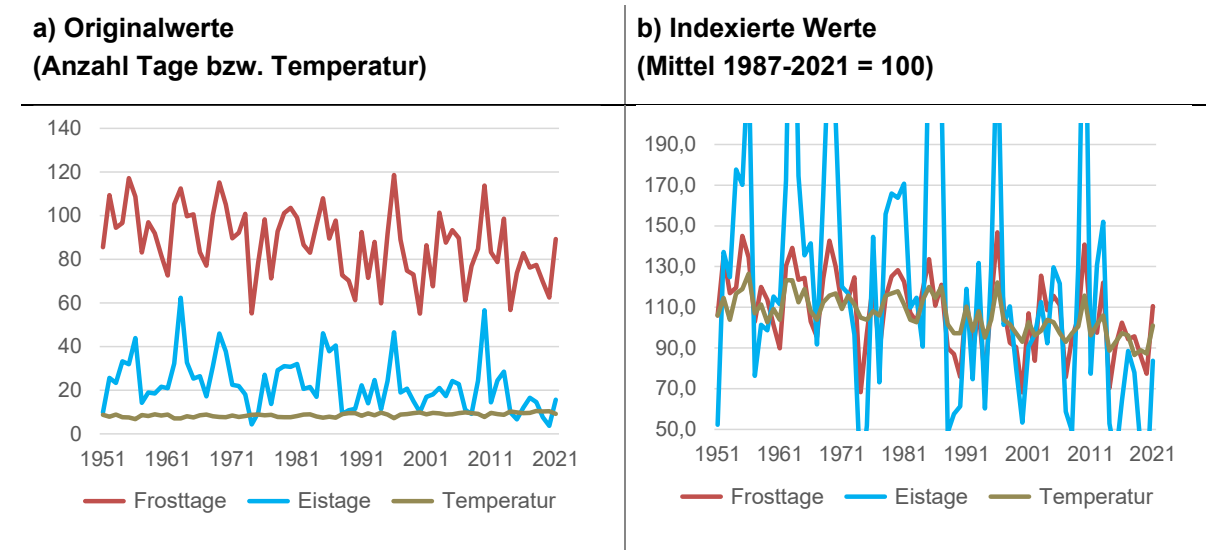
Mit diesen Annahmen kann ein differenzierteres Datenbündel für Szenarien gebildet werden als mit der sonst üblichen Vorausschätzung auf der Grundlage von Rohdaten des BIP. Weitere Grundlagen für die Szenarien sind demografische Entwicklungen (Haushalte, Bevölkerungsgruppen) und Variable zu relativ stabilen Entwicklungen wie Wohnungsbestand und Bruttoanlagevermögen.

7.1.1.2 Ableitung einer Datengrundlage zum Temperatureinfluss

Es herrscht Einigkeit darüber, dass der Klimawandel tendenziell zu einer Erhöhung der Temperatur führen wird. Wenn die Winter tendenziell wärmer werden, kann als Effekt erwartet werden, dass der Heizbedarf und so auch der Bedarf zum Einsatz von Holz sinken werden.

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) liefert Daten zu Frosttagen, Eistagen und Jahresmitteltemperatur.²⁸ Es handelt sich dabei um unterschiedlich und teilweise sehr stark schwankende Werte. Außerdem erfolgt die Angabe der Frost- und Eistag in Anzahl Tagen und die Temperatur in Grad (Abbildung 7-3).

Abbildung 7-3: Entwicklung von Frosttagen, Eistagen und Jahresmitteltemperatur



Quelle: eigene Darstellung, INFRO, auf Basis der Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD).²⁹

Zur Erarbeitung eines Indikators für den Kälteeinfluss wurde die Wirkung der Wetterdaten für Kamine in privaten Haushalten, Holz-Zentralheizungen, Klein- und Großfeuerungsanlagen unterschiedlich gewichtet. Die eingehenden Größen sind Frosttage, Eistage und

²⁸ DWD: Ein Frosttag ist ein Tag, an dem das Minimum der Lufttemperatur unterhalb des Gefrierpunktes (unter 0,0 °C) liegt. Ein Eistag ist ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur unterhalb des Gefrierpunktes (unter 0 °C) liegt, d.h. es herrscht durchgehend Frost.

²⁹ https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/regional_averages_DE/annual/

Jahresmitteltemperatur (Tabelle 7-1). Frost- und Eistage beeinflussen Zusatzheizungen stärker als Großfeuerungsanlagen. Während der Index bei Kaminheizern mit den Gewichten Frosttage (0,450), Eistage (0,100) und Jahresmitteltemperatur (0,450) abgeleitet wird, betragen die Gewichte in gleicher Reihenfolge bei Großfeuerungsanlagen (0,225; 0,025; 0,750). Da eine empirische Ableitung mangels verfügbarer Daten nicht möglich ist, wurden die Gewichte zwischen den zuvor genannten Polen linear verringert, bzw. erhöht.

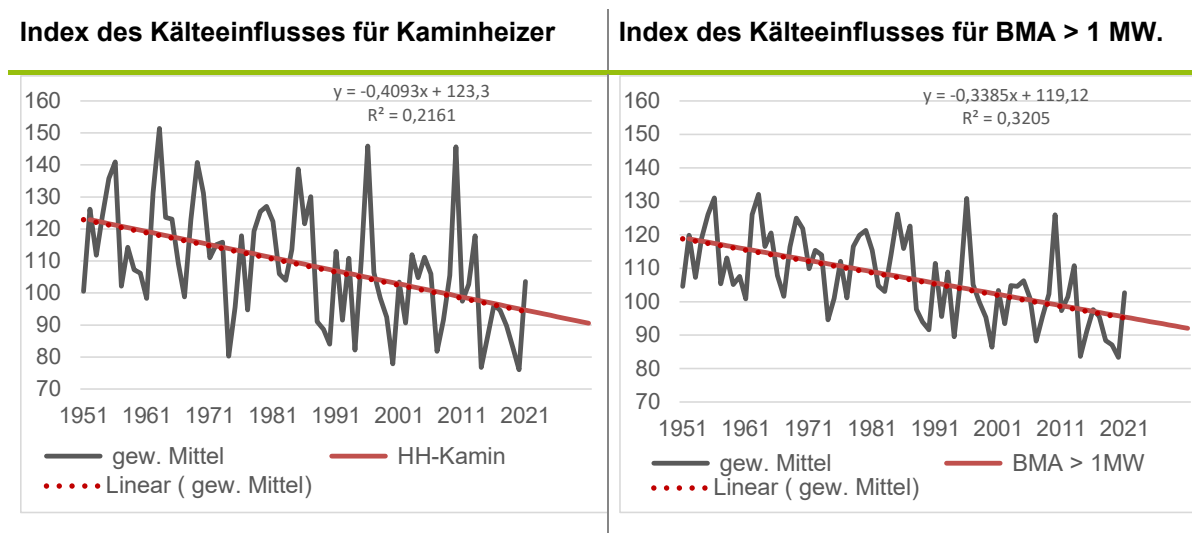
Tabelle 7-1: Annahmen zu Frosttagen, Eistagen und der Jahresmitteltemperatur je Heizanlagentyp

Private Haushalte Kamine		Private Haushalte HZH		BMA < 1 MW		BMA > 1 MW	
0,450	Frosttage	0,375	Frosttage	0,300	Frosttage	0,225	Frosttage
0,100	Eistage	0,075	Eistage	0,050	Eistage	0,025	Eistage
0,450	Temperatur	0,550	Temperatur	0,650	Temperatur	0,750	Temperatur

Quelle: Eigene Darstellung.

Durch diese Annahmen ist es möglich, die drei Einflussgrößen zusammenzufassen und ihren Trend zu berechnen. Die beiden Beispiele in Abbildung 7-4 zeigen, dass die unterstellten Wetterdaten auf Kaminheizern einen größeren Einfluss haben als auf Großfeuerungsanlagen.

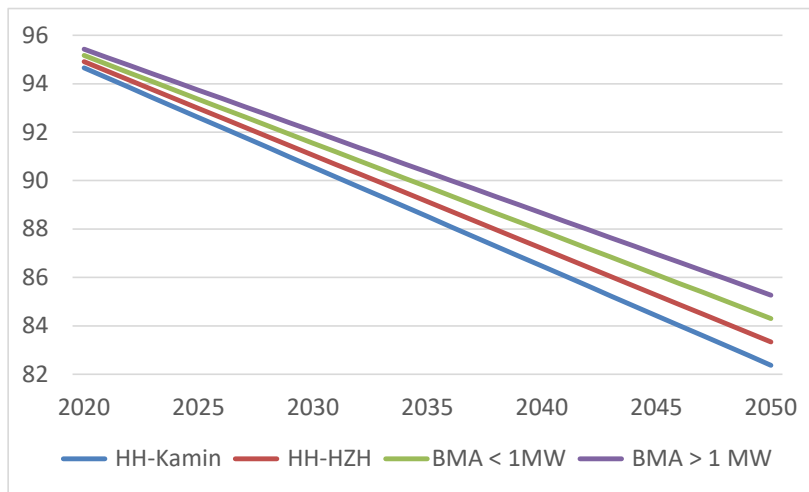
Abbildung 7-4: Beispiele des fiktiven Kälteeinflusses auf verschiedene Energieholznutzer



Quelle: eigene Darstellung, INFRO, auf Basis der Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD)²⁹.

Eines der Grundprobleme langfristiger Szenarien ist die Verfügbarkeit von Einflussgrößen für den gewünschten Zeitraum. Die Originalwerte der Wetterdaten fortzuschreiben, ist ein unmögliches Unterfangen. Mit dieser Vorgehensweise lässt sich jedoch der ermittelte Trend fortschreiben. Der Kälteeinfluss sinkt bei den Energieholznutzern stärker, die auf Extremereignisse stärker reagieren. Extremereignisse nehmen entsprechend der langfristigen Wetterdaten stärker ab. Dadurch enthalten die Trends auch einen unabhängigen empirischen Hintergrund. Unbestritten enthält das Modell überwiegend Annahmen, die plausibel, aber nicht empirisch ableitbar sind.

Abbildung 7-5: Fortschreibung des fiktiven Kälteeinflusses für verschiedene Energieholznutzer



Quelle: eigene Darstellung, INFRO, auf Basis der Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD)²⁹.

7.1.2 Modellbeschreibung FABio-Forest – Weiterentwicklung

Eine detaillierte Beschreibung der Modellfunktionen findet sich in Böttcher et al. (2018b). An dieser Stelle werden Weiterentwicklungen von FABio-Forest erläutert.

7.1.2.1 Steuerung des Holzeinschlags

In FABio-Forest sind vier Waldbewirtschaftungstypen hinterlegt: Business as Usual (BAU), Intensivierung, Extensivierung und Aufgabe der Nutzung. Diese Waldbewirtschaftungstypen werden über Annahmen zur Durchforstungsintensität, Intensität der Zielstärkennutzung, Extraktionsrate von Ernteresten und Baumartenwahl bei der Verjüngung definiert (Böttcher et al. 2018b). Im Grundzug setzen diese Annahmen eine Obergrenze für die Holzmenge, die aus dem Wald entnommen werden darf. Die bewirtschaftungsabhängige Obergrenze entspricht dem möglichen potenziellen Holzaufkommen für den angenommenen Waldbewirtschaftungstyp.

In Deutschlands Wäldern wird aktuell weniger Holz entnommen als die Bewirtschaftungsregeln z.B. im BAU erlauben würden. Dies ist ein wichtiger Grund, weshalb der Holzvorrat in Wäldern in Deutschland kontinuierlich ansteigt und in der THG-Berichterstattung eine Senkenleistung ausgewiesen wird. In den Datensätzen der BWI-3 sind zahlreiche Bestände mit Bäumen erfasst, die gemäß den in den Modellszenarien vorgegebenen Regeln erntereif sind und in einer Holzaufkommensmodellierung zu Beginn eines Modellaufs entnommen werden. Die aufkommensbasierte Ernte führt somit zu Verzerrungen, z. B. ergeben sich zu hohe Holzentnahmen insbesondere während der ersten Jahre eines Simulationslaufs, ein zu starker Vorratsabbau und eine zu starke Abnahme der Senkenleistung der lebenden Biomasse im Wald.

Bisher war FABio-Forest als Holzaufkommensmodell mit den beschriebenen Problemen implementiert. In der jetzigen Modellversion wurde FABio-Forest von einem Holzaufkommensmodell zu einem Holznachfragemodell umgebaut. Dies bedeutet, dass die Holznachfrage als externer Treiber die Holzentnahme steuert. So wird im Rahmen der Waldbewirtschaftungs-

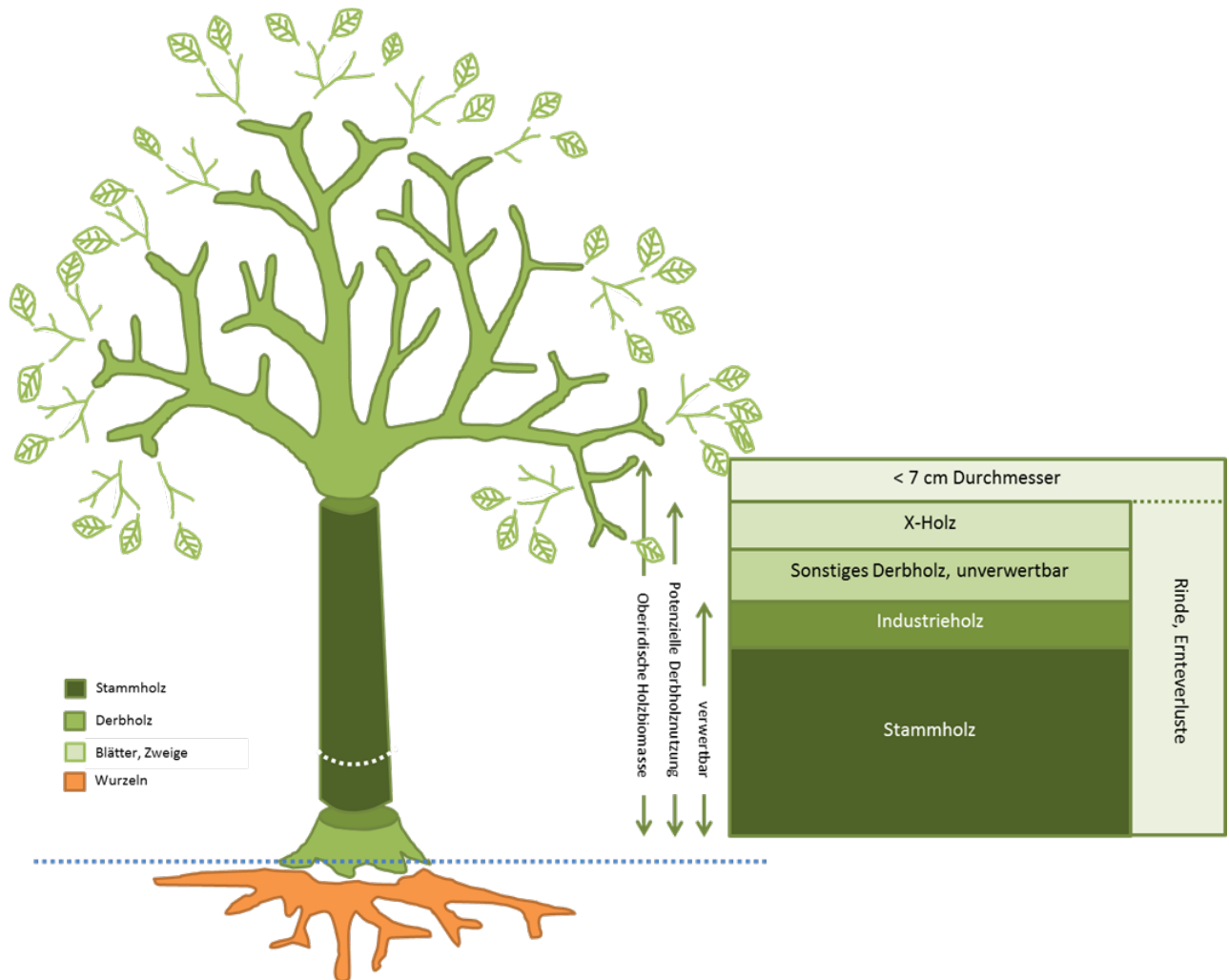
regeln maximal so viel Holz im Wald geerntet, wie nötig ist, um die Holznachfrage bedienen zu können. Sollte die Holznachfrage höher liegen als das mögliche Holzaufkommen im angenommenen Waldbewirtschaftungstyp, wird die Holznachfrage nicht gestillt und das verbleibende Defizit als solches vom Modell quantifiziert und ausgegeben. Der Vorteil dieses Modellierungsansatzes ist, dass die oben genannten Verzerrungen ausbleiben und die Intensität der Waldbewirtschaftung direkt von der angenommenen Holznachfrage abhängt.

In FABio-Forest werden aktuell die folgenden Holzsortimente basierend auf Stammdurchmesser unterschieden:

- Stammholz ($\varnothing > 20$ cm)
- Industrielles Holz (\varnothing zwischen 7 und 20 cm)
- Restholz (Kronenrestholz mit nicht explizit quantifiziertem Durchmesser; erlaubte Extraktionsrate wird im Waldbewirtschaftungstyp hinterlegt)
- Rinde (Entnahme erfolgt in Verbindung mit der Entnahme von Derbholz, d.h. es wird angenommen, dass am Derbholz anhaftende Rinde unter Berücksichtigung von Verlusten mit aus dem Wald entnommen wird. Die als Verlust anfallende Rinde wird dem Totholzpools im Wald zugeführt.)

Bei Entnahme eines Baumes fallen die verschiedenen Holzsortimente zu unterschiedlichen Anteilen an (vgl. Abbildung 7-6). Stammholz kann nötigenfalls auch dazu verwendet werden, die Nachfrage nach Industrie- oder Restholz zu decken, und Industrieholz-Überschüsse können zur Befriedigung einer gegebenenfalls noch offenen Restholznachfrage genutzt werden (Abwertung der Holzsortimente). Im Gegenzug kann aber Restholz nicht die Nachfrage nach Stamm- oder Industrieholz und Industrieholz nicht die Nachfrage nach Stammholz stillen.

Abbildung 7-6: Biomassekompartimente und Holzverwendung



Quelle: Böttcher et al. (2018b).

Holz wird in FABio-Forest einmal jährlich entnommen, und zwar sequenziell in Abfolge der folgenden Bewirtschaftungsschritte:

- **Sonderpflfegemaßnahmen:** Tritt Schadholz aufgrund natürlicher Mortalität auf, kann eingestellt werden, zu welchen Anteilen dieses Schadholz entnommen und nach den durchmesserabhängigen Sortimentskriterien auf die Holznachfrage angerechnet wird. Derzeit wird angenommen, dass im Stammholz-Segment 90% des anfallenden Schadholzes genutzt werden kann, während der nutzbare Anteil beim Industrieholz-Segment auf 50% und beim Restholz-Segment auf 10% gesetzt ist.
- **Durchforstung:** die Durchforstung erfolgt gemäß den vorgegebenen Waldbewirtschaftungstypen. Entnommenes Holz wird nach den durchmesserabhängigen Sortimentskriterien auf die Holznachfrage angerechnet. Da Durchforstung als waldpflegerische Maßnahme unabhängig von der Holznachfrage stattfinden muss, ist die durchforstungsbedingte Holzentnahme von der Nachfragesteuerung entkoppelt. Fällt für ein Sortiment mehr Durchforstungsholz an, als nachgefragt wird, verbleibt das Holz im Waldlager, wo es in folgenden Jahren dazu genutzt wird, die durch Ernte zu erbringenden

Anteile der Holzentnahme zu unterstützen bzw. ggf. die zu erntenden Mengen zu reduzieren.

- Zielstärkennutzung: hiebsreife Bäume werden gemäß des vorgegebenen Waldbewirtschaftungstyps entnommen. Die Ernte-Entnahme wird über die nach Abzug der Schadholzentnahme und der Durchforstungsentnahme noch nicht abgedeckte Holznachfrage gesteuert. Entnommenes Holz wird nach den durchmesserabhängigen Sortimentskriterien auf die Nachfrage angerechnet. Sollte die Nachfrage nach einem bestimmten Holzsortiment bereits gestillt sein, kann das gegebenenfalls für dieses Sortiment bei der Ernte angefallene Holz für die Bedarfsdeckung nachgeschalteter Sortimentsklassen verwendet werden, oder verbleibt als Vorrat für kommende Jahre im Waldlager, sobald die Nachfrage in allen Sortimentsklassen abgedeckt ist. Letzter Fall spielt im Gegensatz zur Durchforstung bei der Ernte jedoch eine untergeordnete Rolle, da die Holzernte eingestellt wird, sobald die Nachfrage nach allen Sortimenten bedient werden konnte, und somit allenfalls kleinere Überschüsse aus der Ernte anfallen sollten.
- Entnahme von Rinde: Entsprechend der vorgegebenen Nachfrage wird angenommen, dass ein vorgegebener Rindenanteil im Zuge der Holzentnahmeaktivitäten mit aus dem Wald entfernt wird. Der verbleibende übrige Anteil an Rinde verbleibt als Verlust im Wald und wird dem TotholzpooL zugeführt.

Um die Holznachfrage und den nötigen Holzeinschlag in FABio-Forest abzubilden, wird der folgende hierarchische Ansatz verwendet (siehe graphische Darstellung in Pfeiffer et al. 2022):

- Schadholzentnahme: entnommenes Schadholz wird basierend auf Durchmesser der Stammsegmente auf die Sortimentsklassen der Nachfrage angerechnet und so die Nachfrage nach diesen Sortimenten um die entsprechenden Mengen reduziert. Für die Schadholzentnahme wird getrennt nach Baumarten und Sortimentsklassen eine Entnahmeintensität analog zur Durchforstung vorgegeben, die festlegt, welcher Anteil des anfallenden Schadholzes der Nutzung zugeführt werden soll. Der als nicht nutzbar angenommene Schadholzanteil wird dem TotholzpooL zugeführt.
- Durchforstung: Durchforstung als Pflegemaßnahme erfolgt jahresscharf auf allen Flächen gemäß des vorgegebenen Waldbewirtschaftungstyps als zweiter Schritt nach der Schadholzentnahme. Durchforstung findet zeitlich variabel ca. alle 7 bis 10 Jahre und zeitlich versetzt auf unterschiedlichen Flächen statt, so dass jedes Jahr eine gewisse Anzahl Flächen zur Durchforstung ansteht. Der genaue Zeitpunkt der Durchforstung wird flächenspezifisch durch Zufallsgenerator ab dem 7. Jahr seit der letzten Durchforstung bestimmt. Das bei der Durchforstung anfallende Stammholz wird gemäß den durchmesserabhängigen Sortimentskriterien auf die Sortimentsklassen der Nachfrage angerechnet und diese um die entsprechenden Mengen reduziert. Hierbei folgt die Zuordnung einem hierarchischen Kaskadenmodell, welches davon ausgeht, dass sich Stammholz auch als Industrieholz oder Restholz und Industrieholz als Restholz nutzen lässt (wirtschaftliche Abwertung qualitativ höherrangiger Holzsortimente), während dies in umgekehrter Reihenfolge nicht möglich ist. Fällt beispielsweise mehr Stammholz bei der Durchforstung an als nachgefragt war, fließt der Überschuss an Stammholz über ins Industrieholz, während Industrieholz-Überschüsse ins Restholz überführt werden. Sollten Überschüsse in allen drei Sortimentsklassen auftreten, so verbleiben Stamm- und Industrieholz-Überschüsse im Waldlager und werden auf die Sortimentsnachfragen im Folgejahr angerechnet, während Restholz-Überschüsse als Totholz im Wald verbleiben. Dieser Ansatz geht derzeit davon aus, dass Überschüsse theoretisch für unbestimmte Dauer im Waldlager verbleiben bzw. sich dort akkumulieren können. Künftige Modellentwicklungen sehen eine Verfeinerung dieses Ansatzes vor, bei dem zum Beispiel

eine Turnover-Funktion zum Einsatz kommen könnte, die die zeitliche Verweildauer im Holzspeicher begrenzt und bereits länger im Wald liegendes Lagerholz allmählich ins Totholz überführt.

- Nach erfolgter Schadholzentnahme und Durchforstung wird für das aktuelle Jahr das im Rahmen der vorgegebenen Waldbewirtschaftungstypen verfügbare Holzaufkommen getrennt nach Laub- und Nadelholz ermittelt und mit der noch offen gebliebenen nachgefragten Holzmenge in Relation gesetzt. So wird bestimmt, wieviel des potenziell entnehmbaren Holzes prozentual nötig ist, um die noch offene Nachfrage bedienen zu können. Dieser Prozentsatz wird herangezogen, um prozentuale Einschlagsziele pro Fläche festzulegen. Momentan wird davon ausgegangen, dass alle bewirtschafteten Flächen proportional gleich stark beerntet werden. Diese Annahme stellt eine Vereinfachung dar und kann ggf. zukünftig verfeinert und modifiziert werden.
- Stammholz- Nachfrage: Nach der Durchforstung und Anrechnung von Überschüssen aus Vorjahren wird geprüft, ob noch offene Nachfrage nach Stammholz existiert. Ist dies der Fall, wird so viel Holz durch Ernte entnommen wie nötig ist, um die noch offene Stammholznachfrage zu schließen. Eine Obergrenze der Stammholzernte setzt dabei die gemäß den Waldbewirtschaftungskriterien maximal entnehmbare Holzmenge. Die Nachfrage an Stammholz wird nicht gedeckt, sobald die noch offene Nachfrage die entnehmbare Holzmenge übersteigt. Da sich Stämme im Durchmesser zur Spitze hin verjüngen, fallen bei der Stammholz-Ernte anteilig ebenfalls Industrie- und Restholzmengen an, die zur Füllung dieser beiden Nachfrageklassen verwendet werden, sofern dort noch Bedarf besteht. Ist die Industrieholz-Nachfrage bereits bedient, so geht das mit der Stammholz-Ernte anfallende Industrieholz ins Waldlager. Restholz-Überschüsse werden dem Totholz-Pool zugeführt.
- Industrieholz- Nachfrage: Falls nach der Stammholz-Ernte immer noch eine offene Industrieholz-Nachfrage existiert und noch hiebsreife Bäume verfügbar sind, wird weiter geerntet, um den noch offenen Industrieholzbedarf zu bedienen. Hierbei anfallendes Stammholz geht nun zu 100% ins Industrieholz, zusammen mit dem Anteil der geernteten Stämme, der im Industrieholz-Durchmesserbereich liegt. Anteilig anfallendes Restholz wird zur Bedienung von ggf. noch offener Restholz-Nachfrage genutzt oder verbleibt als Totholz im Wald, falls die Restholz-Nachfrage bereits gedeckt ist.
- Restholz-Nachfrage: Sollte nach Schadholzentnahme, Durchforstung sowie Ernte für Stamm- und Industrieholz immer noch eine offene Restholz-Nachfrage vorhanden sein, so erfolgt keine weitere Ernte, um diesen Bedarf zu decken, da es wirtschaftlich unrentabel erscheint, komplette Bäume mit Stamm- und Industrieholzanteilen zum Zweck der Restholznutzung heranzuziehen.
- Rinden-Nachfrage: Das Rindenvolumen, dass mit Schadholzentnahme, Durchforstung und Ernte von Derbholz anfällt, wird derzeit im Modell erfasst und ist ein artspezifischer Anteil des Gesamtderbholzvolumens (Unterschied zwischen entnommenem Vorratsfestmeter mit Rinde und ausgewiesenem Erntefestmeter ohne Rinde). Derzeit werden Anteile der Rinde mit dem Derbholz entnommen und der nicht entnommene Anteil als Ernteverlust dem Totholz-Pool auf der Waldfläche zugeführt. Die Rindenennteanteile lassen sich artspezifisch und getrennt nach Schadholz und Lebendholz ansprechen. Derzeit wird angenommen, dass 70% der an lebenden Bäumen sowie 10% der an abgestorbenen Bäumen (Schadholz) anhaftenden Rinde zusammen mit dem Derbholz aus dem Wald entnommen wird.

7.1.2.2 Optimierung der Mortalitätsfunktion

In FABio-Forest wird für jeden Baum und jeden Zeitschritt die Wahrscheinlichkeit errechnet abzusterben. Ist eine gewählte Zufallszahl kleiner als diese Wahrscheinlichkeit, so gilt ein Baum als abgestorben. Die folgende Mortalitätsfunktion wird verwendet, um die Mortalitätswahrscheinlichkeit p_{mort} zu berechnen (vgl. Böttcher et al. 2018b, Kap. 3.3):

$$p = e^{(m_{\text{ABS}}+m_{\text{BAL}}*\text{BAL}+m_{\text{SITE}}*\text{SITE}+m_{\text{AGE}}*\text{AGE}+m_{\text{BHD}}*\text{BHD}+m_{\text{DIV}}*\text{DIV})} \quad (1)$$

$$p_{\text{mort}} = p / (1+p) \quad (2)$$

BAL ist die Grundfläche der jeweils stärkeren Bäume, SITE ist die Bonität des Standorts, AGE ist das Alter, BHD ist der Brusthöhendurchmesser und DIV ist der Simpson-Diversitätsindex der Baumarten der Fläche.

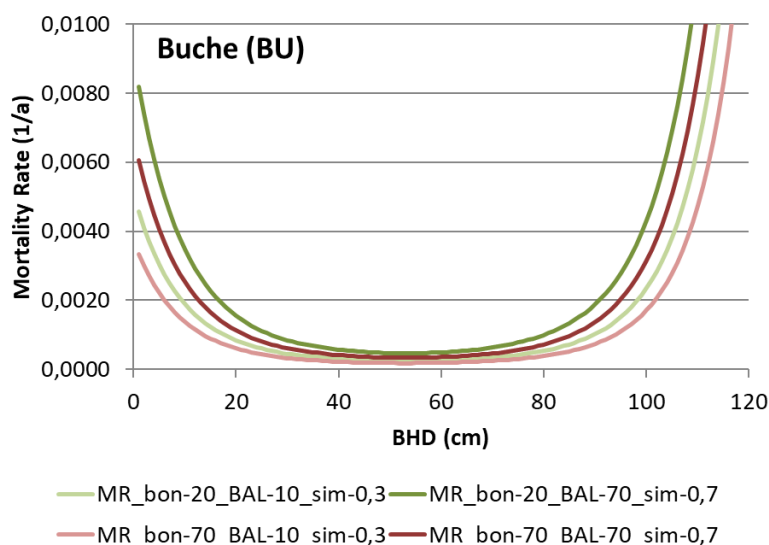
Analysen der Ergebnisse zur Mortalität zeigten, dass die Mortalität alter Bäume deutlich unterschätzt wird. Um dieses Problem anzugehen, wurde in Anlehnung an Monserud und Sterba (1999, siehe auch Huber 2010) in die Mortalitätsfunktion ein quadratischer Term für den Brusthöhendurchmesser eingefügt:

$$p = e^{(m_{\text{ABS}}+m_{\text{BAL}}*\text{BAL}+m_{\text{SITE}}*\text{SITE}+m_{\text{AGE}}*\text{AGE}+m_{\text{BHD}}*\text{BHD}+m_{\text{DIV}}*\text{DIV} + m_{\text{BHD}^2}*\text{BHD}^2)} \quad (3)$$

$$p_{\text{mort}} = p / (1+p) \quad (4)$$

Dies erlaubt eine Flexibilität der Mortalität für Bäume mit kleinen und Bäumen mit großen Brusthöhendurchmesser. Beispielhaft ist die Mortalitätsfunktion für unterschiedliche Einstellungen in Abbildung 7-7 dargestellt. Buchen mit mittlerem Brusthöhendurchmesser zeigen die geringste Mortalitätsrate, während diese bei Buchen mit kleinem und mit großem Brusthöhendurchmesser jeweils höher liegt. Bei alten Bäumen mit einem Brusthöhendurchmesser von über 100 cm steigt die Mortalität sehr stark an. Zusätzlich steigt die Mortalität, wenn es mehr größere Bäume im Bestand gibt (Konkurrenzeffekt). Hingegen verringert eine höhere Diversität der Baumartenzusammensetzung die Mortalitätsrate (Abbildung 7-7).

Abbildung 7-7: Beispiele für Ergebnisse der Mortalitätsfunktion für Buche



Quelle: Eigene Darstellung. BHD = Brusthöhendurchmesser. Einstellungen der Mortalitätsannahmen (MR): bon-20 = Bonität von 20 (Skala 0-100); BAL-10 = Grundfläche der jeweils stärkeren Bäume von 10 m²/ha, sim-0,7 = Simson-Index von 0,7 (Skala von 0-1).

7.1.2.3 Zusätzliche Dichtemortalität

Ergebnisse der Waldmodellierung in FABio-Forest zeigen, dass bei Extensivierung oder völliger Aufgabe der Waldbewirtschaftung die Bestandsbasalfläche hohe Werte von im Mittel über 50 m²/ha annimmt. Eine Literaturanalyse in Welle et al. (2018) ergibt, dass in Naturwäldern bei 680 m³/ha eine Grundfläche zwischen 39 und 45 m²/ha zu erwarten ist.

In FABio-Forest fließt die Dichte der Bestände noch nicht in die Mortalitätsfunktion ein (siehe Anhang 7.1.2.2 und Kap. 3.3 in Böttcher et al. 2018b). Die Parametrisierung allein auf Basis der Bundeswaldinventurdaten reicht allerdings nicht aus, um die Dichtemortalität in vorratsreichen, dichten Beständen ausreichend abzubilden. Dies liegt vor allem daran, dass die meisten Wälder in Deutschland bewirtschaftet sind und entsprechend vorratsreiche, dichte Bestände nur einen geringen Anteil der Erhebungspunkte ausmachen. Beobachtete Mortalitätsereignisse in diesen Beständen sind entsprechend niedrig, weshalb die zu erwartende Dichtemortalität bei sehr vorratsreichen Beständen unterschätzt wird.

Um die Dichtemortalität in FABio-Forest in dichten Beständen zu verbessern, wurde eine zufällige Mortalität von Bäumen in Abhängigkeit der Basalfläche implementiert, die auf jeden modellierten Plot angewandt wird. Bei der Auswahl der Bäume, die absterben, wird weder nach Baumarten noch nach Baumalter unterschieden. Folgenden Einstellungen werden gewählt:

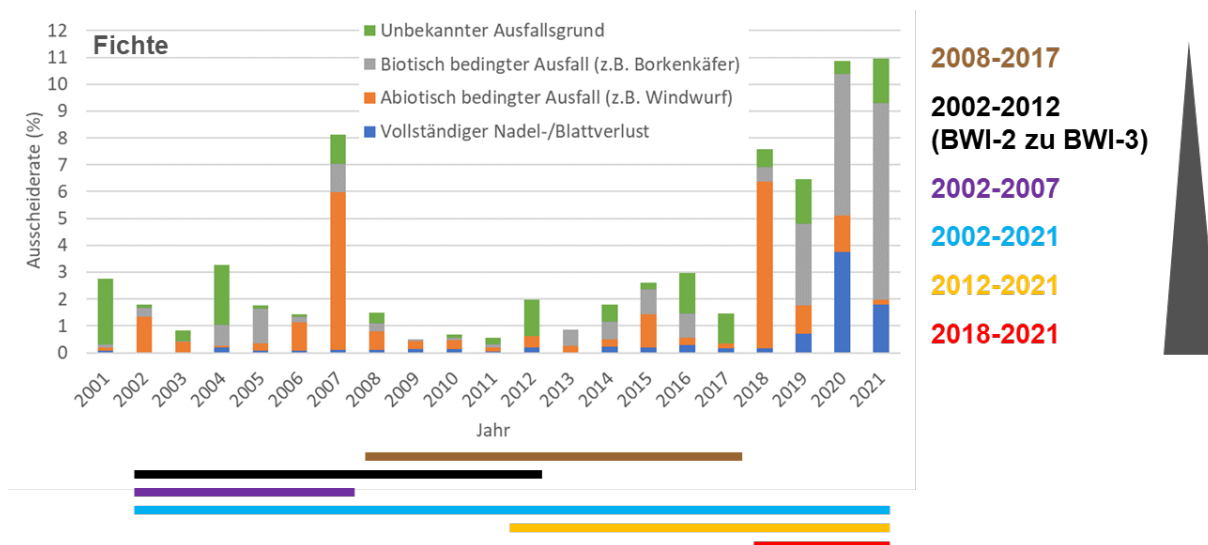
- Basalfläche > 40 m²: zwei zufällig ausgewählte Baum sterben ab
- Basalfläche > 60 m²: drei zufällig ausgewählte Baum sterben ab
- Basalfläche > 80 m²: vier zufällig ausgewählte Baum sterben ab

Mit dieser gewählten Parametrisierung zeigen Testläufe mit vorgeschriebener Nutzungsaufgabe der Flächen nach einer Laufzeit von 300 Jahren stabile mittlere Basalflächen für Deutschland von 42 m²/ha. Diese Parametrisierung wird in der aktuellen Version von FABio-Forest als festgelegte Einsteinstellung zur Dichtemortalität angenommen.

7.1.2.4 Anbindung der Mortalitätsfunktion an Ergebnisse der Waldzustandserhebung

Die Waldentwicklung in FABio-Forest resultiert aus der Summe der Prozesse in den genannten Submodellen (siehe Kap. 2.3 und Böttcher et al. 2018b). Dabei kann die Veränderung des Klimas eine wichtige Rolle spielen. Gerade Extremjahre wie die Trockenjahre 2018 bis 2020 und das Jahr 2022 können die Waldentwicklung stark prägen. So stieg die Mortalitätsrate von Bäumen in Jahren mit geringen Niederschlägen und damit einhergehenden Käferkalamitäten stark an. Dies spiegeln auch die Daten der Waldzustandserhebung (WZE)³⁰ wider. In Abbildung 7-8 ist beispielhaft die Mortalitätsrate der Baumartengruppe Fichte laut WZE dargestellt. Im Zeitraum 2002-2012 lag die mittlere Mortalitätsrate für Fichte bei 2,0 %. Dieser Zeitraum, der dem Erhebungszeitraum der dritten Bundeswaldinventur (BWI-3) entspricht, war durch natürliche Störungen geprägt (2002 Orkan Janette, 2003 Dürre, 2007 Orkan Kyrill). Gerade die Mortalität durch Windwurf stieg im Jahr 2007 stark an (Abbildung 7-8). Im Zeitraum 2008-2017 mit nur geringen natürlichen Störungen lag die Mortalitätsrate mit 1,5 % im Mittel niedriger als im Zeitraum der BWI-3. In anderen Zeiträumen, die in Abbildung 7-8 farbig markiert sind, können gegenüber dem Zeitraum der BWI-3 aber deutlich höhere Mortalitätsraten festgestellt werden. Der höchste Mittelwert der Mortalitätsrate für Fichte von 9,0 % mit Maximalwerten von knapp 11 % trat im Zeitraum 2018-2021 auf.

Abbildung 7-8: Entwicklung der Mortalitätsrate der Fichte



Quelle: Ergebnisse und Darstellung der bundesweiten Waldzustandserhebung³⁰ sowie eigene Ergänzungen. BWI = Bundeswaldinventur.

Die Mortalitätsraten weiterer Baumartengruppen sind in Tabelle 7-2 zusammengestellt. Die zugehörigen Zeitreihen der WZE finden sich in Abbildung 7-9. Im Zeitraum 2002 bis 2012 waren die Mortalitätsraten dieser Baumartengruppen mit 0,8 bis 1,2 % um Faktor 2 niedriger als für Fichte. Für die Baumartengruppen Kiefer, andere Nadelbäume und andere Laubbäume ist im Zeitraum 2017 bis 2021 ein deutlicher Anstieg der Mortalitätsraten zu sehen, der aber geringer ausfällt als bei Fichte. Für Buche und Eiche fiel der Anstieg der Mortalitätsrate jedoch deutlich geringer aus (Tabelle 7-2 und Abbildung 7-9).

Tabelle 7-2: Mittlere Mortalitätswahrscheinlichkeit gemäß Waldzustandserhebung nach Baumartengruppen für unterschiedliche Zeitfenster

	MW 2002-2012	MW 2002-2007	MW 2008-2017	MW 2002-2021	MW 2012-2021	MW 2018-2021
Fichte	2,04% (1,00)	2,87% (1,41)	1,49% (0,73)	3,40% (1,67)	4,76% (2,33)	8,98% (4,40)
Kiefer	0,85% (1,00)	0,84% (0,98)	0,85% (0,99)	1,04% (1,22)	1,29% (1,51)	1,85% (2,16)
Andere Nadelbäume	0,84% (1,00)	0,89% (1,06)	0,97% (1,16)	1,27% (1,52)	1,73% (2,06)	2,59% (3,09)
Buche	0,97% (1,00)	0,67% (0,69)	1,08% (1,11)	0,98% (1,01)	1,31% (1,35)	1,20% (1,23)
Eiche	0,95% (1,00)	0,81% (0,85)	0,91% (0,96)	0,93% (0,98)	1,14% (1,20)	1,16% (1,21)
Andere Laubbäume	1,23% (1,00)	1,29% (1,05)	1,42% (1,16)	1,72% (1,40)	2,46% (2,00)	3,10% (2,52)

Quelle: Ergebnisse der bundesweiten Waldzustandserhebung.³⁰ Die dargestellte Mortalität bezieht sich auf die „Ausscheiderate nach Grund (Zeitreihe)“ und berücksichtigt die Summe der Gründe „Vollständiger Nadel-/Blattverlust (z.B. Trockenheit)“, „Abiotisch bedingter Ausfall (z.B. Windwurf)“, „Biotisch bedingter Ausfall (z.B. Borkenkäfer)“ und „Unbekannter Ausfallsgrund“.

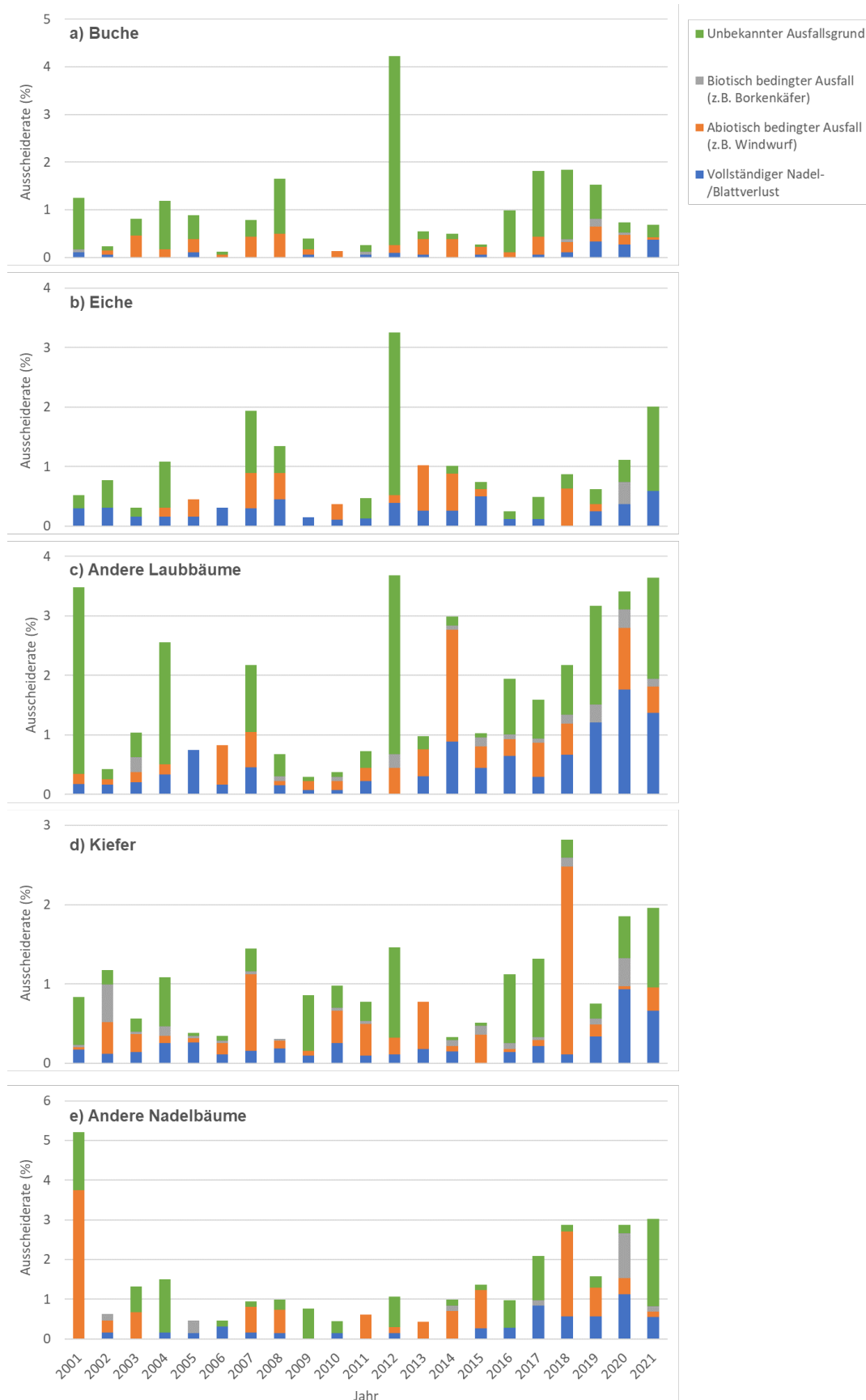
³⁰ <https://wo-apps.thuenen.de/apps/wze/> (Datenabruf: 20.12.2022).

In FABio-Forest wurde die natürliche Mortalität anhand der BWI-3 Daten parametrisiert (Anhang 7.1.2.2 und Kap. 3.3 in (Böttcher et al. 2018b)). Im Erhebungszeitraum von 2002 bis 2012 traten zwar natürliche Störungen auf (s.o.), die in die Parametrisierung einfließen. Extremereignisse wie in den Jahren 2018 bis 2020 sind aber in den Daten der BWI-2 bis BWI-3 nicht repräsentiert und fehlen entsprechend in der Mortalitätsfunktion in FABio-Forest. Um diese Lücke zu schließen, wird aufbauend auf den Ergebnissen der WZE ein Faktor errechnet, der die Abweichung der Mortalität vom Zeitraum der BWI-3 angibt (siehe Werte in Klammern in Tabelle 7-2).

In FABio-Forest kann für einen Modelllauf für jedes einzelne Jahr ausgewählt werden, welche Bedingungen nach Tabelle 7-2 für die Mortalität angenommen werden (z.B. extreme Bedingungen wie in den Jahren 2018-2021). Die Mortalitätswahrscheinlichkeit, die für ein Baumindividuum nach der Mortalitätsfunktion in FABio-Forest ermittelt wird, wird nach der getroffenen Auswahl entsprechend mit dem Faktor der Baumartengruppe multipliziert, der das Individuum angehört.

Dies ist ein erster Ansatz, um mortalitätsbedingte Sensitivitäten für Aspekte wie Zuwachsentwicklung, Holzvorräte und Kohlenstoffspeicherung abschätzen zu können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Mortalitätswahrscheinlichkeiten der WZE sich auf ältere, bestandsbildende Bäume beziehen. Die abgeleiteten Faktoren werden aber in FABio-Forest auch für kleinere Durchmesserklassen angewandt. Diese Unsicherheit wird mangels anderer Daten in Kauf genommen.

Abbildung 7-9: Entwicklung der Mortalitätsrate von Buche, Eiche, anderen Laubbäumen, Kiefer und anderen Nadelbäume



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Ergebnisse der bundesweiten Waldzustandserhebung.³⁰

7.1.2.5 Zuwachsabhängige Sensitivitätsanalysen

In der Zuwachsfunktion in FABio-Forest wird nach Baumarten unterschieden und es fließen Informationen zum Brusthöhendurchmesser und Alter, zur Konkurrenz und Bestandesdichte sowie zum Standort ein (Kap. 3.2 in Böttcher et al. 2018b).

Der Zuwachs von Bäumen hängt stark von abiotischen Bedingungen an einem Standort ab. In FABio-Forest wurde als Summenparameter für die Beschreibung der Wuchsbedingungen an den BWI-Erhebungspunkten eine Bonität abgeleitet (Böttcher et al. 2018b). Diese Bonität spiegelt die mittleren Wuchsbedingungen in den Jahren 2002 bis 2012 wider und beinhaltet sowohl klimaabhängige als auch klimaunabhängige Standortaspekte. Gerade in Trockenperioden kann daher damit gerechnet werden, dass diese Bonität aufgrund der klimaabhängigen Aspekte abnimmt und Zuwachsminderungen auftreten. In feuchteren Jahren kann es aber auch zu verbesserten Zuwächsen kommen.

In der jetzigen FABio-Forest-Version kann je Baumartengruppe der Zuwachs über einen einfachen Faktor („Faktor-Zuwachs“) verändert werden. Dieser Faktor kann jahresscharf für alle Durchmesserklassen einer Baumartengruppe angesteuert werden. Damit besteht die Möglichkeit, zur Berechnung von Sensitivitäten vereinfacht anzunehmen, dass für alle Durchmesserklassen einer Baumartengruppe der Zuwachs z.B. 100 %, 75 %, 50 % oder 25 % vom in der Zuwachsfunktion ermittelten Default-Zuwachs annimmt. So können faktoriell Annahmen zur Mortalität mit Annahmen zum Zuwachs abstimmt werden (z.B. Mortalität wie in 2017-2021 mit 50 % des Zuwachses; Mortalität wie in 2002-2012 mit 100 % des Zuwachses). Zudem wird der Faktor-Zuwachs bei der Parametrisierung von FABio-Forest im Zeitraum 2013 bis 2017 herangezogen (siehe Anhang 7.1.2.6).

Im laufenden Waldklimafond-Projekt DIFENs¹¹ werden in Zusammenarbeit mit dem PIK auf Basis des prozessbasierten Waldmodells 4C Funktionen entwickelt, mit denen eine Abhängigkeit des Zuwachses in FABio-Forest vom Klima, insbesondere Wasserverfügbarkeit und Temperatur, ermöglichen soll. Nach Abschluss dieser Arbeiten wird diese „Klima-Funktion“ über den Faktor-Zuwachs in FABio-Forest eingebunden.

7.1.2.6 Parametrisierung für den Zeitraum 2013 bis 2017 und 2018 bis 2021

Schritt 1: Auswahl der Daten

Die Modellierung in FABio-Forest basiert auf den Daten der dritten Bundeswaldinventur (BWI-3³¹; siehe Böttcher et al. 2018b). Mit der Treibhausgasinventur aus dem Jahr 2017 (TI-2017³¹) liegt für das Jahr 2017 eine Stichprobe der Vollerhebung in der BWI-3 vor. Mit der Stichprobe bestehen Unsicherheiten, wie gut die Vollerhebung der BWI-3 durch die TI-2017 repräsentiert wird. Dem wurde mit dem folgenden Auswahlverfahren Rechnung getragen:

- Mit den Daten der TI-2017 kann der Bestand im Jahr 2012 zurückgerechnet werden.
- Diese Rückrechnung wurde mit verschiedenen Datensätzen der BWI-3 für den Parameter Holzvorrat verglichen.
- Es zeigte sich, dass der Mittelwert zum Holzvorrat für den Datensatz „8A“ (Achter-Grid, alle vier Traktecken, 36.692 Simulationsplots) die geringste Abweichung zum Mittelwert der für das Jahr 2012 rückgerechneten Holzvorräte nach der TI-2017 aufwies (siehe Tabelle 7-4). Daher wurde dieser Datensatz für die Modellierung in FABio-Forest als Startdatensatz ausgewählt.

Schritt 2: Parametrisierung des Zuwachses im Zeitraum 2013 bis 2017

Die Modellierung in FABio-Forest startet im Jahr 2013. Damit liegen für den Zeitraum von 2013 bis 2017 Ergebnisse aus FABio-Forest und der TI-2017 vor. Die Modellierung der Holzvorräte in FABio-Forest hängt vor allem von drei Punkten ab: (1) der Mortalität, (2) der Erntemenge und (3) dem Zuwachs. Diese drei Punkte werden bei der Parametrisierung in den Jahren 2013 bis 2017 wie folgt berücksichtigt:

- **Mortalität:** Über die Mortalitätsdaten der Waldzustandserhebung erfolgt eine jahresscharfe Korrektur der Mortalität (vgl. Anhang 7.1.2.4)
- **Erntemenge:** Die jahresscharfen Erntemengen gemäß Einschlagsrückrechnung (Jochem et al. 2022) werden als Inputdaten für die Einschlagssteuerung in FABio-Forest verwendet (siehe Anhang 7.1.2.1)
- **Zuwachs:** Wie in Anhang 7.1.2.5 beschrieben besteht in FABio-Forest die Möglichkeit, je Baumartengruppe den Zuwachs über einen „Faktor-Zuwachs“ anzupassen. Nachdem Mortalität und Erntemenge bereits berücksichtigt sind, wird der Faktor-Zuwachs genutzt, um den Zuwachs iterativ für rechnerische Reinbestände der verschiedenen Baumartengruppen zu parametrisieren:
 - Der Median des Zuwachses über den Zeitraum 2013 bis 2017 wird je Baumartengruppe aus der TI-2017 berechnet.
 - Der Median des Zuwachses über den Zeitraum 2013 bis 2017 wird je Baumartengruppe, die in FABio-Forest simuliert wird, errechnet. Dies spiegelt die Situation des Zuwachses im Zeitraum 2002 bis 2012 wider, da die Zuwachsfunktion in FABio-Forest mit Daten aus diesem Zeitraum (BWI-3) parametrisiert wurde.
 - Die jeweiligen Mediane des Zuwachses einer Baumartengruppe aus der TI-2017 und aus FABio-Forest werden miteinander verglichen. Iterativ wird der Faktor-Zuwachs so lange angepasst, bis die Abweichung der Mediane für das Mittel über die rechnerischen Reinbestände weniger als 0.1% beträgt.

Die so erhalten Parametrisierungsfaktoren (Faktor-Zuwachs) für den Zuwachs der Baumartengruppen in der Zeitperiode von 2013 bis 2027 sind in Tabelle 7-3 zusammengestellt. Sie werden für die Jahre 2013 bis 2017 verwendet, um den Default-Zuwachs der Zuwachsfunktion anzupassen.

Tabelle 7-3: Zuwachs-Parametrisierungsfaktoren für den Zeitraum 2013-2017 je Baumartengruppe

Baumartengruppen	Zuwachs-Parametrisierungsfaktoren (2013-2017)
FI	1,42788185
KI	1,63598787
TA	1,37658933
DGL	1,04889826
LAE	1,13492731
BU	0,97165234
EI	0,93787756
LLB	1,01409764
KLB	1,09117247

Quelle: Eigene Berechnungen in FABio-Forest, Öko-Institut.

Schritt 3: Parametrisierung des Zuwachses im Zeitraum 2013 bis 2017

Mit den dargestellten Parametrisierungen zu Mortalität, Erntemenge und Zuwachs wurden die Jahre 2013 bis 2017 in FABio-Forest modelliert. Die Summe der modellierten Holzvorräte im Jahr 2017 sind in Tabelle 7-4 den Holzvorräten in der TI-2017 gegenübergestellt. Für die Summe aller Baumartengruppen zeigt sich eine nur sehr geringe Abweichung zwischen den modellierten und den berichteten Werten von 99 Mio. m³ (2,6%). Dieses Ergebnis ist als sehr gut einzustufen, da der Fehlerbereich der TI-2017 für die Summe der Vorräte bei +/-3,6% (95%-Konfidenzintervall) liegt. Für einzelne Baumartengruppen liegen die Unterschiede aber höher.

Tabelle 7-4: Derbholtzvorrat in Datensätzen der BWI-3 und TI-2017 und Modellergebnisse in FABio-Forest (Mio. m³)

Baumartengruppen	2012 (BWI-3)	2012 (BWI-3, Plotauswahl „8A“)	2017 (TI-2017)	2017 (FABio-Ergebnis)
FI	1.206	1.202	1.229	1.244
KI	768	769	828	781
TA	93	93	103	91
DGL (inkl. sonstige NB)	74	74	96	85
LAE	102	101	109	109
Alle NB	2.243	2.240	2.365	2.311
BU	635	637	664	668
EI	361	363	378	371
LLB	204	203	219	213
KLB	220	218	251	215
Alle LB	1.420	1.421	1.512	1.467
Total	3.663	3.661	3.877	3.778

Quelle: Eigene Darstellung und Berechnungen in FABio-Forest, Öko-Institut. BWI-3 = dritte Bundeswaldinventur³¹, TI-2017 = Treibhausgasinventur 2017³¹.

Schritt 4: Korrektur der Senkenleistung 2013 bis 2017

Die Ergebnisse der TI-2017 werden verwendet, um die CO₂-Bilanz der lebenden Biomasse in der deutschen Treibhausgasinventur zu berechnen. Die Grundlage ist dabei die Veränderung der Vorräte. Auch mit den Ergebnissen aus FABio-Forest kann diese CO₂-Bilanz berechnet werden.

Wie oben gezeigt weicht die Summe der modellierten Holzvorräte geringfügig von den Ergebnissen der TI-2017 ab. Die Abweichungen werden aber größer, sobald die Veränderung der Holzvorräte betrachtet wird. Dies ergibt sich dadurch, dass nicht mehr die große Menge des gesamten Vorrats die Vergleichsgröße ist, sondern die deutlich kleinere Menge der Vorratsveränderung.

Diese Abweichung ist kaum zu vermeiden, obwohl sich die in FABio-Forest modellierten Holzvorräte im Fehlerbereich der TI-2017 befinden. Die Unterschiede sind u.a. auf die unterschiedliche Datenverarbeitung und Aggregation zurückzuführen. Um die systematische Abweichung zwischen den berichteten und modellierten Ergebnissen zu korrigieren und eine

³¹ <https://bwi.info/>

gewisse Konsistenz zwischen den Zeitreihen des THG-Inventars und Modell zu erreichen, ist ein gängiges Verfahren eine Skalierung der modellierten Ergebnisse vorzunehmen (Vizzarri et al. 2021, Grassi und Pilli 2017). Dazu wird im Kalibrierungszeitraum ein Korrekturfaktor ermittelt, der auf die danach modellierten Ergebnisse angewandt wird (Grassi und Pilli 2017).

Zur Ermittlung des Korrekturfaktors wurde die Daten der Jahre 2014 bis 2017 herangezogen. Das Jahr 2013 als Startjahr der Modellierung weist zu große Abweichungen auf. Als Mittelwert der Abweichungen der vier Jahre ergibt sich ein Wert von -13,771 Mio. t CO₂, der als Korrekturfaktor der THG-Bilanz der lebenden Biomasse im Wald verwendet wird (Parallelverschiebung, Tabelle 7-5).

Tabelle 7-5: Ermittlung des Korrekturfaktors für die THG-Bilanz der lebenden Biomasse im Wald

Jahr	THG-Bilanz der lebenden Biomasse im Wald in der THG-Inventur (Mio. t CO ₂)	THG-Bilanz der lebenden Biomasse im Wald in FABio-Forest (Mio. t CO ₂)	Abweichung (Korrekturfaktor)
2014	-46,014	-31,669	-14,345
2015	-44,982	-28,942	-16,040
2016	-47,372	-36,726	-10,646
2017	-46,333	-32,280	-14,053
Mittelwert	-46,175	-32,404	-13,771

Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung in FABio-Forest. THG-Inventur in UBA (2022) und den zugehörigen CRF-Tabellen.

7.1.2.7 Modellierung für den Zeitraum 2018 bis 2021

Im Treibhausgasinventar (UBA 2022) wird auf Basis der Ergebnisse der TI-2017 und der bekannten Holzernte in den Jahren 2018 bis 2020 eine Trendfortschreibung vorgenommen. Es sind also noch keine Effekte der erhöhten Mortalität und der Abnahme des Zuwachses in der THG-Inventur berücksichtigt. Vor dieser Ausgangslage erfolgt die Modellierung in FABio-Forest für den Zeitraum von 2018 bis 2021 in drei Schritten:

- Vergleichbar mit der THG-Inventur (UBA 2022) werden in einem ersten Modelllauf die Mortalitätsanpassung und der Zuwachs-Mittelwert der Jahre 2013 bis 2017 in FABio-Forest ausgewählt. Für die Holzernte werden die Daten der ERR verwendet. Zudem wird – wie in Anhang 7.1.2.6 beschrieben (Tabelle 7-5) – eine Korrektur der THG-Bilanz durchgeführt.

Mit diesen Einstellungen in FABio-Forest ist es möglich, die Entwicklung der THG-Bilanz der lebenden Biomasse der Waldfläche im THG-Inventar mit geringen Abweichungen abzubilden (mittlere Abweichung vom THG-Inventar von 3,3 Mio. t CO₂/Jahr in den Jahren 2018 bis 2020; FABio_2017 (korr, ERR) in Abbildung 7-10)

- In einem zweiten Modelllauf werden für die Mortalitätsanpassung die jahresscharf berichteten Werte der WZE verwendet. Die übrigen Einstellungen in FABio-Forest entsprechen dem ersten Modelllauf.

Die Erhöhte Mortalität in den Jahren 2018 bis 2021 führt zu einer weiteren Verschlechterung der THG-Bilanz der lebenden Biomasse im Wald von ca. 5 Mio. t CO₂/Jahr (mittlere Abweichung THG-Inventar von 8,7 Mio. t CO₂/Jahr in den Jahren 2018 bis 2020; FABio_2017 (korr, ERR, Mort) in Abbildung 7-10). Dass sich die THG-Bilanz durch die erhöhte Mortalität nur gemäßigt verschlechtert, liegt daran, dass für einen deutlichen Anteil der abgestorbenen Bäume eine Nutzung angenommen wird (90% Stammholz, 50%

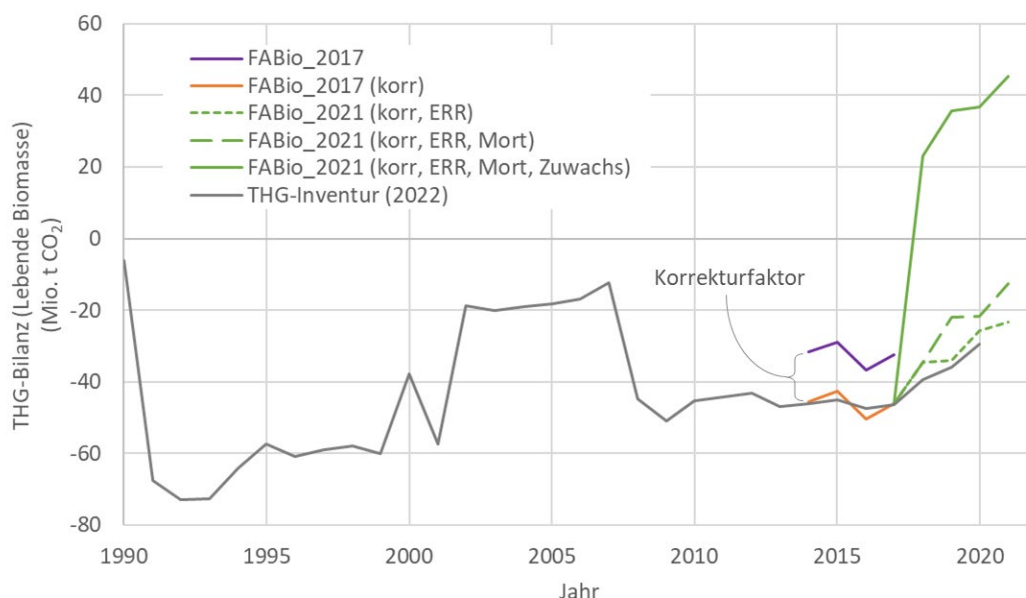
Industrieholz, 10% Restholz). Hierdurch reduziert sich der Einschlag vitaler Bäume zur Deckung der Gesamtholznachfrage.

- In einem dritten Modelllauf wird angenommen, dass sich zusätzlich die Wuchsleistung der Bäume verringert. Da hierfür noch keine empirischen Daten verfügbar sind, werden Schätzwerte herangezogen:
 - Für Nadelbäume wird eine Zuwachsminderung von 50% gegenüber den Jahren 2013 bis 2017 angenommen. Zum Vergleich: in der Periode 2002 bis 2012 mit weniger ungünstigen Wuchsbedingungen lagen bereits die Zuwächse von z.B. Fichte um 30 % und von Kiefer um 39 % niedriger (vgl. Tabelle 7-3).
 - Für Laubbäume wird eine Zuwachsminderung von 25% gegenüber den Jahren 2013 bis 2017 eingestellt, da z.B. die Zuwächse Laubbäume in der BWI-3 gegenüber der TI-2017 geringere Unterschiede zeigten (vgl. Tabelle 7-3).

Die Ergebnisse diese Modelllauf zeigen, dass die THG-Bilanz der lebenden Bäume sehr sensitiv auf die Veränderung der Zuwächse reagiert (FABio_2017 (korr, ERR, Mort, Zuwachs) in Abbildung 7-10). Abweichungen zum THG-Inventar liegen bei 60 bis 70 Mio. t CO₂/Jahr. Dieses Ergebnis stellt sich dadurch ein, dass der jährliche Zuwachs kleiner ist als die Abgänge durch Holzernte, Durchforstung und Mortalität. In Summe wird die lebende Biomasse zu einer CO₂-Quelle von 20 bis 30 Mio. t CO₂/Jahr.

Die hier vorgestellte Parametrisierung der Jahre 2018 bis 2021 wird in allen Szenarienläufen in diesem Bericht zugrunde gelegt, um so die Veränderung der Waldstruktur in den Extremjahren 2018 bis 2020 zu berücksichtigen.

Abbildung 7-10: Modellierung der THG-Bilanz der lebenden Biomasse für den Zeitraum 2018 bis 2021



Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung in FABio-Forest, Öko-Institut. THG-Inventur in UBA (2022) und den zugehörigen CRF-Tabellen. Korr = Anwendung des Korrekturfaktors (siehe Text), ERR = Einschlag nach Einschlagsrückrechnung (Jochem et al.2022), Mort = Mortalität angepasst an die Waldzustandserhebung (siehe Anhang 7.1.2.4), Zuwachs = Annahmen zum Zuwachs (Nadelbäume: 50 % Reduktion gegenüber 2013-2017, Laubbäume: 25 % Reduktion gegenüber 2013-2017). Siehe auch Tabelle 3-1 in Kap. 2.3.

7.2 Holzentnahme

Für die historische Holzentnahme zwischen 2013 und 2021 wurden die Daten der Einschlagsrückrechnung (ERR) zugrunde gelegt (Tabelle 7-6).

Tabelle 7-6: Historische Entnahme an Waldbiomasse in Mio. m³_{swe} (2013-2020)

Jahr	Stammholz	Industrielles Holz	Restholz	Rinde
2013	35,665	39,268	8,436	3,108
2014	35,714	33,567	7,635	2,819
2015	37,102	33,776	7,261	2,699
2016	35,978	31,551	7,069	2,620
2017	37,458	30,809	6,737	2,547
2018	42,883	32,624	6,487	2,492
2019	44,754	33,067	5,629	2,314
2020	51,332	32,719	5,750	2,216
2021	48,683	35,393	6,478	2,438

Quelle: Jochem et al. (2022).

Für den Zeitraum ab 2021 bis 2050 wurde die Nachfrage nach Waldbiomasse mithilfe von TRAW modelliert (Tabelle 7-7) und an FABio-Forest übergeben, um festzulegen, welche Holzentnahme im Modell unter Berücksichtigung der Bewirtschaftungsregeln anzustreben ist (Tabelle 7-8).

Tabelle 7-7: Nachfrage nach Waldbiomasse im Referenzszenario in Mio. m³_{swe} (Übergabedaten von TRAW an FABio-Forest)

Jahr	Nadelholz				Laubholz			
	Stammholz	Industrielles Holz	Restholz	Rinde	Stammholz	Industrielles Holz	Restholz	Rinde
2022	42,728	17,146	5,125	1,907	3,013	11,472	1,240	0,461
2023	42,178	16,678	5,155	1,906	3,061	11,379	1,265	0,468
2024	41,891	16,291	5,194	1,905	3,110	11,332	1,289	0,473
2025	41,292	15,895	5,231	1,902	3,177	11,328	1,327	0,483
2026	41,347	15,985	5,280	1,905	3,234	11,396	1,347	0,486
2027	41,631	15,963	5,333	1,912	3,250	11,339	1,351	0,484
2028	41,781	16,012	5,379	1,918	3,266	11,318	1,357	0,484
2029	42,087	16,119	5,426	1,926	3,286	11,302	1,360	0,483
2030	42,374	16,217	5,463	1,930	3,326	11,298	1,364	0,482
2031	42,453	16,338	5,445	1,908	3,360	11,311	1,359	0,476
2032	42,631	16,376	5,431	1,894	3,382	11,294	1,351	0,471
2033	42,774	16,388	5,366	1,857	3,412	11,255	1,330	0,460
2034	42,958	16,375	5,283	1,817	3,442	11,189	1,303	0,448
2035	43,129	16,336	5,213	1,785	3,475	11,109	1,279	0,438
2036	43,266	16,260	5,125	1,749	3,511	11,015	1,251	0,427
2037	43,468	16,202	5,047	1,724	3,545	10,908	1,222	0,418
2038	43,658	16,144	4,985	1,712	3,582	10,812	1,200	0,412
2039	43,819	16,055	4,910	1,696	3,620	10,686	1,173	0,405
2040	43,987	15,945	4,822	1,677	3,663	10,555	1,144	0,398
2041	44,142	15,870	4,753	1,659	3,699	10,447	1,120	0,391
2042	44,302	15,781	4,677	1,641	3,725	10,329	1,094	0,384
2043	44,429	15,693	4,600	1,622	3,758	10,210	1,069	0,377
2044	44,627	15,618	4,524	1,604	3,791	10,091	1,042	0,370
2045	44,785	15,527	4,447	1,586	3,824	9,970	1,017	0,363
2046	44,908	15,439	4,369	1,567	3,858	9,849	0,992	0,356
2047	45,076	15,349	4,292	1,549	3,889	9,727	0,967	0,349
2048	45,230	15,258	4,214	1,530	3,922	9,605	0,942	0,342
2049	45,373	15,188	4,135	1,511	3,959	9,486	0,918	0,336
2050	45,515	15,071	4,056	1,492	3,997	9,358	0,894	0,329
ab 2051	45,515	15,071	4,056	1,492	3,997	9,358	0,894	0,329

Quelle: Eigene Darstellung, INFRO.

Da die Derbholzentnahme in FABio-Forest in Form von Vorratsfestmetern (Vfm.) erfolgt, wurden die von TRAW gelieferten Derbholz-Holznachfragewerte (Tabelle 7-7) vor der Übergabe an FABio um einen Rindenfaktor von 1,126 für Nadel- und 1,109 für Laubholz

expandiert. Zusätzlich erfolgte vor der Expansion um den Rindenfaktor eine Expansion um Faktor 1,019 für Nadel- und 1,192 für Laubholz. Diese Werte ergaben sich als Mittel beim Vergleich der von TRAW modellierten Historie der Holzverwendung mit den Daten der ERR und spiegeln wider, wieviel des eingeschlagenen Holzes am Ende tatsächlich Verwendung in der Nutzung findet (Verlustrate zwischen Einschlag und Nutzung, z.B. durch zwar eingeschlagenes, aber dann doch im Wald verbliebenes Holz).

Tabelle 7-8: Angestrebte Holzentnahme im Referenzszenario in Mio. m³ (mit Rinde)

Jahr	Nadelholz			Laubholz		
	Stammholz	Industrielles Holz	Restholz	Stammholz	Industrielles Holz	Restholz
2022	49,484	19,857	4,822	4,547	17,315	1,544
2023	48,391	19,135	4,988	4,047	15,047	1,432
2024	48,062	18,691	5,024	4,112	14,984	1,459
2025	47,375	18,236	5,056	4,202	14,980	1,501
2026	47,437	18,340	5,103	4,276	15,069	1,524
2027	47,763	18,314	5,155	4,298	14,994	1,528
2028	47,935	18,370	5,200	4,319	14,966	1,536
2029	48,286	18,493	5,247	4,345	14,946	1,539
2030	48,615	18,606	5,283	4,398	14,940	1,543
2031	48,706	18,745	5,266	4,443	14,957	1,538
2032	48,910	18,788	5,253	4,472	14,934	1,529
2033	49,074	18,802	5,190	4,512	14,883	1,506
2034	49,286	18,787	5,111	4,551	14,796	1,475
2035	49,482	18,742	5,044	4,595	14,690	1,448
2036	49,639	18,655	4,960	4,643	14,566	1,416
2037	49,871	18,589	4,885	4,688	14,424	1,385
2038	50,089	18,522	4,825	4,737	14,297	1,359
2039	50,273	18,420	4,754	4,786	14,131	1,329
2040	50,466	18,293	4,670	4,844	13,957	1,296
2041	50,645	18,208	4,603	4,891	13,815	1,270
2042	50,827	18,106	4,531	4,926	13,659	1,240
2043	50,974	18,005	4,457	4,970	13,501	1,212
2044	51,200	17,919	4,385	5,013	13,344	1,182
2045	51,382	17,815	4,311	5,057	13,184	1,154
2046	51,523	17,714	4,236	5,102	13,023	1,126
2047	51,716	17,610	4,162	5,143	12,863	1,097
2048	51,892	17,505	4,087	5,186	12,702	1,069
2049	52,056	17,425	4,011	5,235	12,544	1,042
2050	52,219	17,291	3,935	5,286	12,375	1,015
ab 2051	52,219	17,291	3,935	5,286	12,375	1,015

Quelle: Eigene Darstellung, INFRO, Öko-Institut. Die Entnahme von Rinde erfolgt in Verbindung mit der Entnahme von Derbholz (vgl. Anhang 7.1.2.1).

7.3 Erläuterungen und Definitionen zur Baustatistik

Die offizielle Baustatistik basiert auf zwei Erhebungsgrundlagen³²:

- Bautätigkeitsstatistik (Meldebogen des Architekten bei Abgabe des Genehmigungsantrages im Hochbau / Gebäude)
- Baugewerbestatistik (Meldung der Betriebe zu Auftragseingängen, Umsätzen und geleisteten Arbeitsstunden)

Die Bautätigkeitsstatistik ist bezüglich des Neubaus von Gebäuden vollständig. Bei Fertigstellungen wird allerdings nicht neu erfasst, sondern der Meldebogen zur Genehmigung verwendet. Bezüglich der „Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden“ werden nur genehmigungspflichtige Maßnahmen erfasst.

Die Bautätigkeitsstatistik basiert auf einem Gebäudeschlüssel, der in der Baumarktforschung zu Gruppen zusammengefasst wird. Im Wohnungsbau (Neubau) unterscheidet man Eigenheime und Mehrfamilienhäuser.

Eigenheime	Eigenheime (Ein- und Zweifamilienhäuser) sind frei stehende oder gereimte Wohngebäude mit einer oder zwei Wohnungen, wobei untergeordnete Einliegerwohnungen zulässig sind.
------------	---

Mehrfamilienhäuser	Freistehende oder eingebaute Wohngebäude mit drei oder mehr Wohnungen. Mehrfamiliengebäude erstrecken sich regelmäßig über mehrere Geschosse (z. B. Wohnblocks, Hochhäuser).
--------------------	--

Im Nichtwohnbau ist die Gebäudestruktur deutlich heterogener. Hier fasst man die Gebäude zu industriellen, wohnähnlichen und landwirtschaftlichen Gebäudegruppen zusammen. Es können aber weitere Untergruppen gebildet werden.

Industrielle Betriebsgebäude	Die industriellen Betriebsgebäude gehören zur Gruppe der Nichtwohngebäude. Dazu gehören folgende Gebäudearten: <ul style="list-style-type: none"> • Fabrik- und Werkstattgebäude • Handels- und Lagergebäude (Markt- und Messehallen, Einzelhandelsgebäude, Warenlagergebäude) • Verkehrsgebäude (Garagengebäude, Bahnhofshallen, Flugzeughallen, Fernsehtürme)
------------------------------	--

Wohnähnliche Betriebsgebäude	Die wohnähnlichen Betriebsgebäude gehören zur Gruppe der Nichtwohngebäude. Dazu gehören folgende Gebäudearten: <ul style="list-style-type: none"> • Anstaltsgebäude (Krankenhäuser, Heime, Kasernen, Strafanstalten, Ferienheime) • Büro- und Verwaltungsgebäude (Amts-, Büro-, Bank-, Gerichts- und Regierungsgebäude) • Hotels und Gaststätten
------------------------------	---

³² Siehe auch <https://www.baudatenonline.de/glossar/>

	<ul style="list-style-type: none"> • Sonstige Nichtwohngebäude (Schulgebäude, Kindertagesstätten, Museen, Theater, Bibliotheken, Kirchen, medizinische Institute, Sportgebäude, Freizeit- und Gemeinschaftshäuser)
--	---

Landwirtschaftliche Betriebsgebäude

Zum landwirtschaftlichen Bau zählt die Errichtung von Hochbauten, die überwiegend landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen, Gärtnerei- oder Fischereizwecken dienen. Zum landwirtschaftlichen Hochbau zählen z. B. Scheunen, Silos, Ställe und Garagen für Traktoren, Wohnhäuser nur dann, wenn die Nutzfläche überwiegt, falls Wohn- und Nutzfläche in einem Gebäude gleichzeitig auftreten.

Die Bautätigkeitsstatistik erfasst verschiedene Merkmale. Dazu gehören die Anzahl der Gebäude und der Wohnungen oder der umbaute Raum, die veranschlagten Baukosten und Wohn- und Nutzfläche.

Darüber hinaus wird erhoben, in welcher Bauweise der Gebäude errichtet wird und mit welchem Baustoff die Konstruktion „überwiegend“ errichtet wurde. Hybridbauten werden dem höheren Materialanteil zugeordnet.

Die Bauweisen unterscheiden nach:

Fertigteilbau

Errichtung eines Bauwerkes mit vorgefertigten Bauteilen (Fertigteilen). Ein Bauwerk gilt im Hochbau als Fertigteilbau, wenn überwiegend geschosshohe oder raumbreite Fertigteile, z. B. großformatige Wandtafeln für Außen- oder Innenwände verwendet werden. Hierbei ist es notwendig, dass der überwiegende Teil der tragenden Konstruktion aus Fertigteilen besteht. Die meist konventionell errichteten Fundamente oder Kellergeschosse sind für die Beurteilung zu berücksichtigen.

Konventioneller Bau	Errichtung eines Bauwerkes mit nicht vorgefertigten Bauteilen (siehe „Fertigteilbau“).
---------------------	--

Konventioneller Bau ist somit ein Auffangbegriff für alle Gebäude, die nicht Fertigteilbau sind.

Innerhalb der Bauweisen lässt sich weiter nach Massivbau und Skelettbau unterscheiden:

Massivbauweise Bezeichnet im Baubereich eine Form des Tragwerks, bei der raumabschließende Elemente wie Wände und Decken auch die statisch tragende Funktion erfüllen. Massivbauweise steht dabei als Gegenbegriff zur Skelettbauweise (siehe „Skelettbauweise“).

Skelettbauweise	Bezeichnet im Baubereich eine Form des Tragwerks, bei der der Rohbau des Bauwerks aus Elementen zusammengesetzt wird, die eine primär tragende Funktion haben. Skelettbauweise steht dabei als Gegenbegriff zur Massivbauweise (siehe „Massivbauweise“).
-----------------	--

Nach überwiegend verwendetem Baustoff wird wie folgt unterschieden:

Überwiegend verwendeter Baustoff. Der überwiegend verwendete Baustoff ist derjenige Baustoff, der bei der Erstellung der tragenden Konstruktion des Gebäudes überwiegend Verwendung findet. Es wird unterschieden zwischen folgenden Baustoffen:

- Stahl
- Stahlbeton
- Ziegel
- Kalksandstein
- Porenbeton
- Leichtbeton/Bims
- Holz
- Sonstiger Baustoff

Im Rahmen des Berichts werden in diesem Zusammenhang alle Baustoffe außer „Holz“ als „andere Baustoffe“ bezeichnet.

Über die Bautätigkeitsstatistik lassen sich weder die Modernisierungsmaßnahmen, noch der Tiefbau erfassen. Hierfür wird auf die Baugewerbestatistik zurückgegriffen, die allerdings auf monetären Größen (Umsatz) basiert.

Bauvolumensrechnung

Die dargestellten Daten entsprechen bis 2021 den Berechnungen des DIW-Instituts: „Strukturdaten zur Produktion und Beschäftigung im Baugewerbe - Berechnungen für das Jahr 2021 Endbericht“ (Oktober 2022). Die Differenzierungen der Prognose nach Neubau und Modernisierung sowie nach Hoch- und Tiefbau erfolgen teilweise durch die Heinze-Marktforschung.

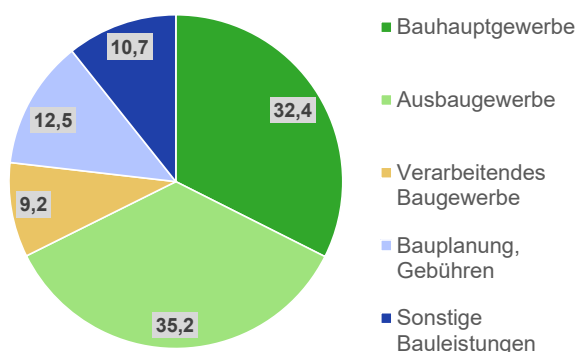
Aufkommensbereiche des Bauvolumens

Das Bauvolumen erfasst alle im Inland erbrachten Bauleistungen, also Neu-, Um- oder Erweiterungsbauten und Reparaturen. Neben den Leistungen des Bauhauptgewerbes (32,4 %) und des Ausbaugewerbes (35,2 %) zählen dazu auch alle in Bauwerke eingehenden Leistungen des Verarbeitenden Gewerbes (9,2 %) (Aufzugbau, Stahl- und Leichtmetallbau, Holzkonstruktionen, Beiträge der elektrotechnischen Industrie); ferner Dienstleistungen (12,5 %), wie Architektenleistungen, amtliche Gebühren, Grundstücksübertragungskosten;

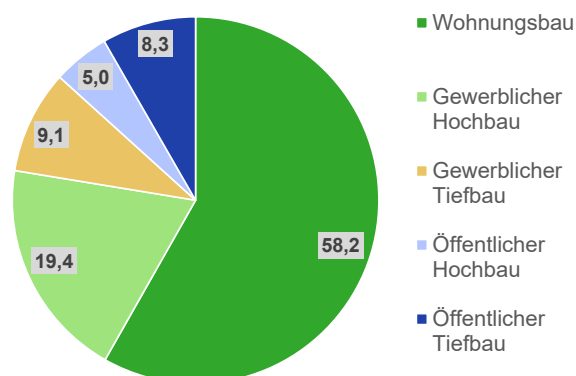
außerdem sonstige Leistungen (10,7 %) wie Eigenleistungen der Investoren, auch der privaten Haushalte beim Wohnungsbau (einschließlich Schwarzarbeit) wie auch die Regiearbeiten der öffentlichen Hand. Zu den Bauleistungen rechnen auch die Außenanlagen der Bauwerke (DIW).

Abbildung 7-11: Anteile verschiedener Aufkommens- und Verwendungsbereiche am Bauvolumen im Jahr 2021 in %

Aufkommensbereiche



Verwendungsbereiche



Quelle: DIW (2022)³³.

Struktur des Bauvolumens

Jeder Auftrag wird nach der Art des Auftraggebers kategorisiert. Daraus lässt sich zuordnen, ob ein Auftrag zum Wohnungsbau (58,2 %), zum gewerblichen Bau (28,5 %) (Wirtschaftsbau) oder öffentlichen Bau (13,3 %) gehört. Gewerblicher Bau und öffentlicher Bau werden nochmals in Hochbau (24,4 %) und Tiefbau (17,4 %) unterschieden. Der Wohnungsbau (58,2 %) und die Hochbaubereiche des gewerblichen (19,4 %) und des öffentlichen Baus (5,0 %) werden zudem nach Neubauvorhaben und Bauvorhaben an bestehenden Gebäuden (Modernisierung) eingeteilt.

Modernisierung (Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden)

Die Modernisierung kann auch über die Baugewerbestatistik nicht erfasst werden. Deshalb führt das DIW-Institut eine Restrechnung durch. Die veranschlagten Baukosten im Neubau (z.B. Wohnungsbau) werden mit den fehlenden Teilen des Bauvolumens (Architektenleistung, Gebühren, DiY) hochgerechnet und vom Wohnungsbauvolumen abgezogen. Die Restgröße ist das Modernisierungsvolumen.

³³ Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) (2022): Strukturdaten zur Produktion und Beschäftigung im Baugewerbe – Berechnungen für das Jahr 2021 Endbericht. https://www.diw.de/de/diw_01.c.869346.de/publikationen/datensammlungen/2022/strukturdaten_zu_r_production_und_beschaeftigung_im_baugewerbe_berechnungen_fuer_das_jahr_2021_endbericht.html

Grundlage der Bauvolumensrechnung ist die Umsatzentwicklung der Gewerbe

Die Zusammenfügung der verschiedenen Aufkommensbereiche der Leistungen und die Anknüpfung an die gewerblichen Umsätze führt letztlich auch dazu, dass sich das Bauvolumen tendenziell weniger sprunghaft entwickelt als die Baugenehmigungen. Die betrachteten Schwankungen der Baugenehmigungen beziehen sich ausschließlich auf den Neubau, der nur noch etwa ein Drittel des Bauvolumens ausmacht. Somit senkt auch die Einbeziehung der Modernisierung, die deutlich weniger Schwankungen unterliegt, die Volatilität des Bauvolumens. Da es auf Umsatzstatistiken basiert, repräsentiert es stärker die allgemeine Umsatzentwicklung im Baugewerbe.

Reales Bauvolumen oder Kettenindex?

Die realen Entwicklungen der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung werden von den Instituten nur noch als Kettenindex für zurückliegende Werte ausgewiesen. Der Kettenindex ist jedoch nicht so anschaulich wie das reale Bauvolumen in Mrd. Euro. Man kann den Kettenindex jedoch in reale Bauvolumenwerte umrechnen. Richtig ist aber auch, dass dem „realen“ Wert in Milliarden Euro kein wirklicher Wert in Euro gegenübersteht. Für die Bestimmung von Absatzentwicklungen (ohne Preissteigerung) in Form von Menge pro Mrd. Euro eignet sich das reale Bauvolumen weiterhin besser als das nominale Bauvolumen oder der Kettenindex.

Holzvolumen

Das Holzvolumen kommt in keiner Statistik vor. Es kann nur durch Ergänzung primärstatistischer Erhebungen ermittelt werden. Dabei wird über Befragung oder Erfassung von Ausschreibungsunterlagen der Holzeinsatz pro Basiseinheit ermittelt. Im Neubau ist die mit dem umbauten Raum eine reale Größe. Im Nichtwohnbau ist es mit dem Bauvolumen eine monetäre Größe. Mit der Inflation wächst aber der Holzeinsatz nicht. Deshalb eignet sich die reale Größe. Der Kettenindex (2010 = 100) wird jedoch alle 5 bzw. 10 Jahre angepasst (2020 = 100). Damit würde rechentechnisch der Holzeinsatz auch erhöht. Mit jeder Aktualisierung der Basis (höheren monetäres Niveau) ist somit Holzeinsatz pro Mrd. Euro entsprechend so zu reduzieren, dass er dem Erhebungsjahr (hier 2016) entspricht. Ferner wird berücksichtigt, dass bestimmte Bauteile (Sanitär, Heizung, elektrische Anlagen) für das Holzvolumen keine Bedeutung haben. Die Hochrechnungsbasis (Bauvolumen) reduziert sich dadurch etwa um ein Viertel des ausgewiesenen monetären, realen Bauvolumens.

Modernisierungsvolumen

Die Bestimmung der Modernisierung bzw. der Baumaßnahmen unterliegt somit deutlich größeren Herausforderungen als die Bestimmung des Neubaus. Das gilt auch für alle daraus berechneten Materialien, Produkte oder Bauteile, denn sie ist eine Restrechnung, die auf monetären Größen basiert und die bei primärstatistischen Erhebungen mit größeren Unsicherheiten belastet ist. Da die Modernisierung bereits Zweidrittel des Bauvolumens ausmacht, ist sie im Rahmen von Bewertungen aller Art Umsicht und Vorsicht geboten.

Tiefbauvolumen

Das Tiefbauvolumen wird in der Baugewerbestatistik als monetäre Größe (Umsatz) erfasst. Erschwerend kommt hinzu, dass es keine empirischen Erhebungen über Materialverwendung im Tiefbau gibt. Als Arbeitshypothese wurde für das Basisjahr 2016 angenommen, dass pro Mrd. Euro im Tiefbau die Hälfte des Holzeinsatzes der Modernisierung im Nichtwohnbau eingesetzt werden.