

TREIBHAUSGAS-PROJEKTIONEN FÜR DEUTSCHLAND

Kurzstudie zur Modellierung der THG- Bilanz der lebenden Bäume im Mit-Maßnahmen- Szenario (MMS) des Projektionsberichts



TREIBHAUSGAS-PROJEKTIONEN FÜR DEUTSCHLAND

KLIFOPLAN des Bundesministeriums für Wirtschaft und
Klimaschutz

Forschungskennzahl 3722 41 511 0
FB001564

Kurzstudie zur Modellierung der THG-Bilanz der lebenden Bäume im Mit-Maßnahmen- Szenario (MMS) des Projektionsberichts

von

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

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e.V.
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt

Abschlussdatum:

August 2024

Redaktion:

Fachgebiet V 1.2 Strategien und Szenarien zu Klimaschutz und Energie
Kai Wehnemann, Karlotta Schultz, (Kirsten op de Hipt - Layout)

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

Dessau-Roßlau, Oktober 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Kurzstudie zur Modellierung der THG-Bilanz der lebenden Bäume im Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) des Projektionsberichts

Die CO₂-Einbindung lebender Bäume im Wald wird durch ein komplexes Zusammenspiel von Faktoren bestimmt: dem Zuwachs der Waldbestände, natürliche Störungen wie Stürme, Trockenheit und Käferkalamitäten sowie die Intensität der Holzentnahme. Für die Projektionen der nationalen Treibhausgasemissionen im Waldsektor kommt das Matrixmodell des Thünen-Instituts zum Einsatz. Dieser Kurzbericht präsentiert vergleichende Ergebnisse der Waldmodellierung mit dem Modell FABio-Forest des Öko-Instituts und Sensitivitätsanalysen zu natürlichen Störungen. Die Ergebnisse beider Modelle weisen nur geringfügige Abweichungen auf, die vermutlich eher auf unterschiedliche Annahmen zur Waldbewirtschaftung als methodische Differenzen zwischen beiden Modellen zurückzuführen sind. Die Sensitivitätsanalysen mit FABio-Forest zu variierenden Störungsintensitäten zeigen, dass störungsbedingte Unterschiede in der THG-Bilanz lebender Bestände 20-35 Mio. t CO₂ betragen können. Dieser modellierte Effekt übertrifft die Abweichungen zwischen den beiden Waldmodellen deutlich. Für künftige Projektionen der nationalen Treibhausgasemissionen empfiehlt es sich daher, die Unsicherheiten bezüglich natürlicher Störungen im Wald explizit auszuweisen.

Abstract: Brief Study on Modeling the Greenhouse Gas Balance of Living Trees in the With-Measures Scenario (WMS) of the Projection Report

The CO₂ sequestration of living trees in forests is determined by a complex interplay of factors: the growth of forest stands, natural disturbances such as storms, drought, and bark beetle infestations, as well as the intensity of timber harvesting. The matrix model of the Thünen-Institute is used for projections of national greenhouse gas emissions in the forest sector. This brief report presents comparative results of forest modelling using the FABio-Forest model of the Oeko-Institut and sensitivity analyses on natural disturbances. The results of both models show only minor deviations, which are likely due to different assumptions about forest management rather than methodological differences between the two models. Sensitivity analyses with FABio-Forest on varying disturbance intensities show that disturbance-related differences in the greenhouse gas balance of living stands can amount to 20-35 million tons of CO₂. This modelled effect significantly exceeds the deviations between the two forest models. For future projections of national greenhouse gas emissions, it is therefore recommended to explicitly indicate the uncertainties regarding natural disturbances in forests.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	7
Abkürzungsverzeichnis	8
Zusammenfassung.....	9
Summary	10
1 Hintergrund	11
2 Methode.....	14
2.1 Beschreibung des Waldmodells FABio-Forest	14
2.2 Mit-Maßnahmen-Szenario und Sensitivitäten zu natürlichen Störungen	16
2.2.1 Waldmodellierung im Projektionsbericht 2024.....	16
2.2.2 Waldmodellierung in FABio-Forest.....	16
3 Ergebnisse und Diskussion	18
3.1 Unterschiede zwischen Matrixmodell und FABio-Forest.....	18
3.2 Auswirkungen durch natürliche Störungen	19
4 Fazit	22
5 Quellenverzeichnis	23
A Anhang	24

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Treibhausgasbilanz der lebenden Bäume im Wald von 1990 bis 2022	12
Abbildung 2:	Holzeinschlag, Thünen-Einschlagsrückrechnung und Schadholzentnahme im Wald von 1990 bis 2022	12
Abbildung 3:	Allgemeine Beschreibung der Arbeitsweise des Modells FABio-Forest.....	14
Abbildung 4:	THG-Bilanz der lebenden Bäume im Wald, berichtete und modellierte Ergebnisse	18
Abbildung 5:	Sensitivitäten zur THG-Bilanz der lebenden Bäume im Wald für niedrige, mittlere und hohe natürliche Störungen	20
Abbildung 6:	Differenz der Sensitivitäten zur THG-Bilanz der lebenden Bäume für geringe, mittlere und hohe natürliche Störungen..	21
Abbildung 7:	Simulierte Derbholzentnahme und offenbleibende Nachfrage (ohne Rinde), Sensitivität geringe Störungen.....	24
Abbildung 8:	Simulierte Derbholzentnahme und offenbleibende Nachfrage (ohne Rinde), Sensitivität mittlere Störungen.....	24
Abbildung 9:	Simulierte Derbholzentnahme und offenbleibende Nachfrage (ohne Rinde), Sensitivität hohe Störungen	25
Abbildung 10:	Derbholzvorrat (ohne Rinde) in lebender Biomasse nach Baumartengruppen, Sensitivität geringe Störungen.....	26
Abbildung 11:	Derbholzvorrat (ohne Rinde) in lebender Biomasse nach Baumartengruppen, Sensitivität mittlere Störungen.....	26
Abbildung 12:	Derbholzvorrat (ohne Rinde) in lebender Biomasse nach Baumartengruppen, Sensitivität hohe Störungen.....	26
Abbildung 13:	Veränderung des Derbholzvorrats (ohne Rinde) in lebender Biomasse im Vergleich der Sensitivitäten geringe, mittlere und starke Störungen	27
Abbildung 14:	Bestandsstruktur als Derbholzvorrat (Vorratsfestmeter, mit Rinde) von Laub- und Nadelbäumen für lebende Bäume nach Durchmesserklassen, Sensitivität geringe Störungen	27
Abbildung 15:	Bestandsstruktur als Derbholzvorrat (Vorratsfestmeter, mit Rinde) von Laub- und Nadelbäumen für lebende Bäume nach Durchmesserklassen, Sensitivität mittlere Störungen	28
Abbildung 16:	Bestandsstruktur als Derbholzvorrat (Vorratsfestmeter, mit Rinde) von Laub- und Nadelbäumen für lebende Bäume nach Durchmesserklassen, Sensitivität hohe Störungen	28

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
BWI-3 / BWI-4	Dritte / vierte Bundeswaldinventur
CI-2017	Kohlenstoffinventur 2017 (Zwischeninventur im Wald im Jahr 2017)
ESRR	Einschlagsrückrechnung
FABio	Forestry and Agriculture Biomass Model
gS / mS / hS	Geringe / mittlere / hohe natürliche Störungen
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
LULUCF	Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Wald (Land Use, Land Use Change and Forestry)
MMS	Mit-Maßnahmen-Szenario
MWMS	Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario
THG	Treibhausgasemissionen
Vfm	Vorratsfestmeter
WZE	Waldzustandserhebung

Zusammenfassung

Im Rahmen des UBA-Vorhabens „Politiksznarien XI“¹ werden Projektionen der nationalen Treibhausgasemissionen gemäß den IPCC-Richtlinien erstellt. Für die THG-Bilanz im Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Wald (Land Use, Land Use Change and Forestry, LULUCF) sind insbesondere die Kohlestofffestlegungen durch die Senkenleistung der Waldfläche und THG-Emissionen der landwirtschaftlich genutzten organischen Böden von Bedeutung.

Die CO₂-Einbindung durch lebende Bäume im Wald schwankt historisch betrachtet erheblich zwischen -70 und -10 Mio. t CO₂-Äq. Diese Variabilität resultiert aus dem komplexen Zusammenspiel aus Zuwachs der Waldbestände, natürlichen Störungen wie Stürmen, Trockenheit und Käferkalamitäten sowie der Höhe der Holzentnahme. Angesichts der Relevanz der Senkenleistung im Wald für die THG-Bilanz im LULUCF-Sektor ist die Identifizierung und Quantifizierung von Unsicherheiten in den Projektionen essenziell. Zur Quantifizierung von Unsicherheiten werden zwei Ansätze verfolgt: 1) der Vergleich von Szenario-Ergebnissen unterschiedlicher Modelle und 2) die Durchführung von Sensitivitätsanalysen zu natürlichen Störungen in Form von Stürmen, Trockenheit und Käferkalamitäten, für die eine große Spannbreite erwartet werden kann.

Die Waldprojektionen in der nationalen Treibhausgasberichterstattung werden mit dem Matrixmodell des Thünen-Instituts simuliert. Dieser Kurzbericht präsentiert dazu vergleichende Ergebnisse der Waldmodellierung mit dem Modell FABio-Forest² des Öko-Instituts sowie Sensitivitätsanalysen zu natürlichen Störungen.

Die Ergebnisse beider Modelle weisen nur geringfügige Abweichungen auf, die vermutlich eher auf unterschiedliche Annahmen zur Waldbewirtschaftung als auf methodische Differenzen zurückzuführen sind. Eine detaillierte Analyse der getroffenen Annahmen und ggf. weitere Testszenarien mit abgestimmten Parametern könnten hier Klarheit schaffen. Zukünftige Untersuchungen sollten zudem weitere Waldmodelle einbeziehen.

Die Sensitivitätsanalysen mit FABio-Forest zu variierenden Störungsintensitäten zeigen, dass störungsbedingte Unterschiede in der THG-Bilanz lebender Bestände in der Größenordnung von 20-35 Mio. t CO₂ liegen können. Dieser modellierte Effekt ist übertrifft die Abweichungen zwischen den beiden Waldmodelle deutlich. Für künftige Projektionen der nationalen Treibhausgasemissionen empfiehlt es sich daher, Unsicherheiten bezüglich natürlicher Störungen im Wald explizit auszuweisen.

¹ THG-Projektionen: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der Europäischen Governance-Verordnung und des Bundes-Klimaschutzgesetzes im Projektionsbericht 2023 („Politiksznarien XI“), FKZ: 3722 41 511 0.

² FABio = Forestry and Agriculture Biomass Model

Summary

As part of the UBA project 'Policy Scenarios XI', projections of national greenhouse gas emissions are being prepared in accordance with IPCC guidelines. For the greenhouse gas balance in the Land Use, Land Use Change and Forestry (LULUCF) sector, carbon sequestration through the sink capacity of forest areas and greenhouse gas emissions from agriculturally used organic soils are particularly significant.

Historically, CO₂ sequestration by living trees in forests has fluctuated considerably between -70 and -10 million tons of CO₂ equivalent. This variability results from the complex interplay of forest stand growth, natural disturbances such as storms, drought, and bark beetle infestations, as well as the extent of timber harvesting. Given the relevance of forest sink performance for the greenhouse gas balance in the LULUCF sector, identifying and quantifying uncertainties in projections is essential. Two approaches are pursued to quantify uncertainties: 1) comparing scenario results from different models, and 2) conducting sensitivity analyses on natural disturbances in the form of storms, drought, and bark beetle infestations, for which a wide range can be expected.

The matrix model of the Thünen Institute is used for forest projections as part of the national greenhouse gas emissions. This brief report presents comparative results of forest modeling using the FABio-Forest model of the Oeko-Institut as well as sensitivity analyses on natural disturbances.

The results of both models show only minor deviations, which are likely due to different assumptions about forest management rather than methodological differences. A detailed analysis of the underlying assumptions in both models and possibly further testing with coordinated parameters could provide clarity in this regard. Future studies should also include additional forest models.

Sensitivity analyses with FABio-Forest on varying disturbance intensities show that disturbance-related differences in the greenhouse gas balance of living stands can be in the range of 20-35 million tons of CO₂. This modeled effect significantly exceeds the deviations between the two forest models. For future projections of national greenhouse gas emissions, it is therefore recommended to explicitly indicate the uncertainties associated with natural disturbances in forests.

1 Hintergrund

Im Rahmen des UBA-Vorhabens „Politiksznarien XI“³ werden Projektionen der nationalen Treibhausgasemissionen erstellt. Diese werden im Projektionsbericht 2024 dokumentiert und umfassen zwei Szenarien, das sogenannte „Mit-Maßnahmen-Szenario“ (MMS) sowie das „Mit-weiteren-Maßnahmen-Szenario“ (MWMS). Bei den Projektionen werden alle Sektoren gemäß den IPCC-Richtlinien zur nationalen THG-Berichterstattung sowie den Anforderungen des Bundes-Klimaschutzgesetzes berücksichtigt. Für die THG-Bilanz im Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Wald (Land Use, Land Use Change and Forestry, LULUCF) spielen vor allem Kohlestofffestlegungen durch die Senkenleistung der Waldfläche und THG-Emissionen der landwirtschaftlich genutzten organischen Böden eine bedeutende Rolle.

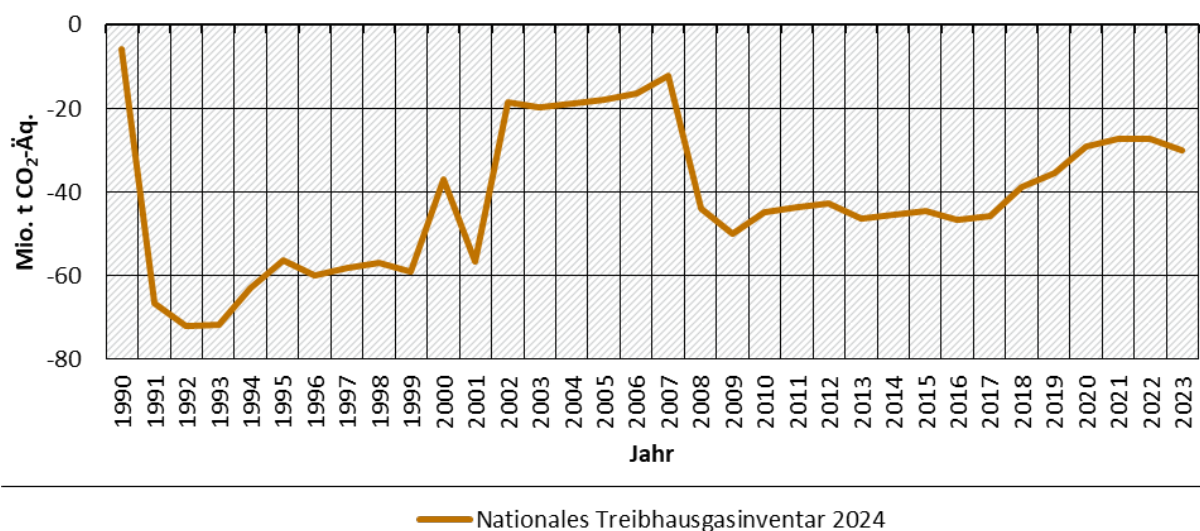
Die historische Entwicklung zeigt, dass die Einbindung von CO₂ durch die lebenden Bäume im Wald deutlich schwankt (Abbildung 1). Dies hängt von einem Wechselspiel des Zuwachses der Waldbestände, natürlicher Störungen wie Sturm, Trockenheit und Käferkalamitäten sowie der Höhe der Holzentnahme ab (vgl. Abbildung 2). In Abbildung 2 ist der Holzeinschlag nach statistisch erfassten Daten dargestellt. Da ein Teil der Waldholzentnahme unzureichend in Holzeinschlagsstatistiken abgebildet wird, wird vom Thünen-Institut eine s.g. Einschlagsrückrechnung erstellt (Jochem et al. 2023), die diese Lücke schließt (siehe rosa und weinrote Linie in Abbildung 2). Seit dem Jahr 2005 wird für die statistischen Erhebungen zusätzlich ausgewiesen, welche Schadholzmengen in einem Jahr entnommen werden. Davor liegen nur einzelne Nennungen vor. So zeigt sich, dass im Jahr 2007 etwa 45 % der Holzentnahme auf Schadholz, u.a. als Folge des Orkans Kyrill, entfielen. Im Jahr 2020 stieg durch Käferkalamitäten, Trockenheit und Windwurf der Anteil an Schadholz an der Holzentnahme auf ca. 75 % (Abbildung 2).

Da die Entwicklung der Senkenleistung im Wald für die THG-Bilanz im LULUCF-Sektor von Bedeutung ist, ist es wichtig, Unsicherheiten der Projektion zu identifizieren und quantifizieren. Eine Möglichkeit zur Quantifizierung von Unsicherheiten ist der Vergleich von Szenario-Ergebnissen, die mit unterschiedlichen Modellen berechnet wurden. Modelle der Waldentwicklung können sich methodisch stark unterscheiden, da sie andere Aspekte der Waldentwicklung in den Vordergrund stellen und verschiedene Algorithmen und Basisdaten verwenden.

Eine weitere Möglichkeit, Unsicherheiten zu ermitteln, bieten Sensitivitätsanalysen für bestimmende Parameter, für die eine größere Spannbreite erwartet werden kann. Im Fall der Waldmodellierung sind insbesondere Parameter zu nennen, die die Häufigkeit und Intensität von natürlichen Störungen durch Sturm, Trockenheit und Käferkalamitäten beschreiben. So kann durch Modellläufe mit nur einem Modell durch Variieren von Parametern die Wirkung auf die Ausgabevariablen, z.B. Entwicklung der Kohlenstoffsенке im Wald, dargestellt und damit Unsicherheiten verdeutlicht werden.

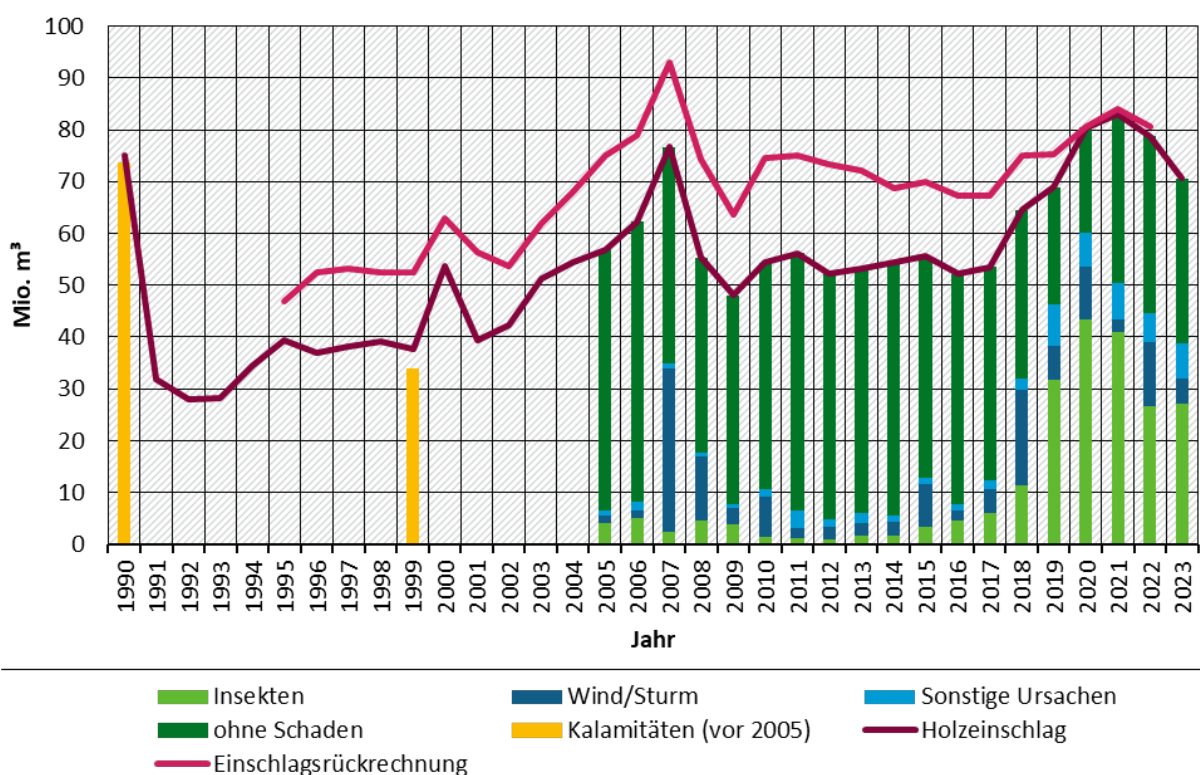
³ THG-Projektionen: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der Europäischen Governance-Verordnung und des Bundes-Klimaschutzgesetzes im Projektionsbericht 2023 („Politiksznarien XI“), FKZ: 3722 41 511 0.

Abbildung 1: Treibhausgasbilanz der lebenden Bäume im Wald von 1990 bis 2022



Quelle: UBA (2024).

Abbildung 2: Holzeinschlag, Thünen-Einschlagsrückrechnung und Schadholzentnahme im Wald von 1990 bis 2022



Quelle: Zusammenstellung in Hennenberg et al. (in press.) und Jochem et al. (2023).

Im Projektionsbericht werden diese Möglichkeiten der Darstellung von Unsicherheiten bisher nicht genutzt. So stand z.B. die Projektion der Waldentwicklung durch das WEHAM-Modell im Projektionsbericht 2021 in der Kritik, da dies aufgrund der Art der Modellierung (Ermittlung des Holzaufkommens aufgrund von festgelegten Bewirtschaftungsregeln) eine zu stark steigende Holzentnahme in der nahen Zukunft annahm (z.B. Hennenberg et al. 2021). Im Projektionsbericht 2023 und 2024 wird das Matrixmodell des Thünen-Instituts (Rock et al.

2021) für die Modellierung der Waldbestände in Deutschland eingesetzt. Dieses Modell ist auch holzaufkommensbasiert, aber simuliert stärker eine „business-as-usual“ Holzernteintensität. Im Projektionsbericht 2024 werden mit dem Matrixmodell die Bedingungen der Jahre 2013 bis 2017 mit der Annahme von eher geringen natürlichen Störungen fortgeschrieben, allerdings ohne die Darstellung von Sensitivitäten. Die Unsicherheiten der Entwicklung der Kohlenstoffsенke im Wald werden dadurch unzureichend abgebildet.

Ein Vergleich von verschiedenen Modellen unter vergleichbaren Szenario-Annahmen und Sensitivitätsanalysen helfen, Unsicherheiten zu kommunizieren. Zum Vergleich der Ergebnisse aus dem Matrixmodell eignen sich Ergebnisse aus dem Modell FABio-Forest. Das Modell wurde am Öko-Institut entwickelt (Böttcher et al. 2018b) und wird fortlaufend weiterentwickelt, um u.a. unterschiedlich intensive natürliche Störungen zu modellieren (siehe Pfeiffer et al. 2023).

In dieser Kurzstudie werden zwei Fragestellungen adressiert, mit denen Unsicherheiten in der Modellierung im MMS zu lebenden Bäumen und der resultierenden THG-Bilanz analysiert werden sollen:

- ▶ **Frage 1:** Wie unterscheiden sich die Ergebnisse der modellierten THG-Bilanz lebender Bäume im MMS zwischen dem Matrixmodell und FABio-Forest?
- ▶ **Frage 2:** Wie stark wirken sich unterschiedlich starke natürliche Störungen auf die THG-Bilanz lebender Bäume im MMS aus?

- ▶ **Waldwachstumsmodell:** Zuwachs einzelner Bäume in Abhängigkeit von Baumart⁶, Durchmesser, Höhe, Konkurrenz und Standortbedingungen sowie von einfachen Annahmen zu Auswirkungen des Klimawandels (z.B. Abnahme der Wuchsleistung durch Trockenheit).
- ▶ **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:** Sterblichkeit einzelner Bäume in Abhängigkeit von Baumart, Durchmesser, Alter, Konkurrenz, Standortbedingungen und Baumartenvielfalt sowie von Annahmen zu natürlichen Störungen.
- ▶ **Totholzmodell:** Entwicklung des Totholzvorrates, der sich aus dem Eintrag durch Erntereste und natürliche Mortalität und dem Austrag durch Holzersetzung im Zeitverlauf ergibt.
- ▶ **Boden-Kohlenstoff-Modell:** Simulation des Kohlenstoffabbaus in Streu und Boden über die Zeit in Abhängigkeit von Klima und Streuqualität.
- ▶ **Holzentnahme-Modell:** Exogen wird eine Holznachfrage modelliert oder abgeleitet. In FABio-Forest wird diese Nachfrage genutzt, um die Holzentnahme durch Ernte im Wald zu steuern.

In FABio-Forest stellen die Waldbestände aus der 3. Bundeswaldinventur (BWI-3) aus dem Jahr 2012 den Startpunkt dar. Sie werden vom Jahr 2013 bis zum Jahr 2021 fortgeschrieben. Hierzu werden berichtete Daten aus der Kohlenstoffinventar (CI-2017)⁷, zum Holzeinschlag nach der Einschlagsrückrechnung des Thünen-Instituts (Jochem et al. 2023) und zur Mortalität der Bauartengruppen (Waldzustandserhebung⁸) herangezogen und Abschätzungen zur Zuwachsveränderung der Baumartengruppen getroffen (siehe Details in Pfeiffer et al. 2023). Dieses Vorgehen wurde gewählt, da die Ergebnisse der 4. Bundeswaldinventur (BWI-4) noch ausstehen.

Für die Fortschreibung ab dem Jahr 2022 müssen Annahmen zur Mortalität, zur Zuwachsveränderung und zur Holzentnahme getroffen werden. Die Holzentnahme wird – wie im Projektionsbericht-2024 – als Mittel der Jahre 2013-2017 angenommen. Für Mortalität und Zuwachsveränderung werden die folgenden drei Sensitivitäten unterschieden, die unterschiedlich hohe natürliche Störungen widerspiegeln (siehe Details zu den getroffenen Mortalitätsraten und Zuwachsveränderungen in Pfeiffer et al. 2023):

- ▶ **Geringe natürliche Störungen (gS):** Mortalität und Zuwachs verhalten sich wie der Mittelwert der Jahre 2013 bis 2017.
- ▶ **Mittlere natürliche Störungen (mS):** Mortalität und Zuwachs verhalten sich wie der Mittelwert der Jahre 2002 bis 2017.

⁶ 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.

⁷ <https://bwi.info> (zuletzt geprüft am 22.07.2024); die Kohlenstoffinventar wurde auf ca. ¼ der Erhebungspunkte der BWI-3 durchgeführt.

⁸ <https://wo-apps.thuenen.de/apps/wze/> (Datenabruf: 20.12.2022).

- **Hohe natürliche Störungen (hS):** Mortalität verhält sich wie der Mittelwert der Jahre 2002 bis 2021 und der Zuwachs wie der Mittelwert der Jahre 2002-2017 multipliziert mit dem Faktor 0,9.

2.2 Mit-Maßnahmen-Szenario und Sensitivitäten zu natürlichen Störungen

2.2.1 Waldmodellierung im Projektionsbericht 2024

Für den Projektionsbericht 2024 (PB-2024, Harthan et al. 2024) wird das Mit-Maßnahmen-Szenario im LULUCF-Sektor vom Thünen-Institut modelliert. Die Entwicklung der Waldfläche wird mit dem Matrixmodell abgebildet, das bereits im Projektionsbericht 2023 und bei der Erstellung des Forest Reference Levels (FRL) nach EU-VO 2018/841 verwendet wurde (Rock et al. 2021). Input-Daten sind die Zustände und Veränderungen der Periode 2012-2017 aus der Datenbank der Bundeswaldinventur. Im ersten Schritt der Berechnung werden Kalamitätsflächen verteilt, um die Extremjahre 2018 bis 2020, die besonders durch Trockenheit und Käferkalamitäten geprägt waren, zu berücksichtigen.

Ab dem Jahr 2022 werden die so modifizierten Waldbestände in die Zukunft fortgeschrieben. Dazu werden Informationen zu Zuwächsen, Mortalität und Holzentnahme aus der Periode 2012-2017 herangezogen. Zudem werden 40.000 ha Buchenwälder mit einem Alter von mehr als 120 Jahren ab der Periode 2023-2027 dauerhaft aus der Nutzung genommen. Weitere 75.000 ha Waldfläche werden für 20 Jahre nicht genutzt, um eine natürliche Waldentwicklung zuzulassen (siehe Details in Harthan et al. 2024).

2.2.2 Waldmodellierung in FABio-Forest

In Fabio-Forest ist der Startpunkt der Modellierung der Datensatz der BWI-3 aus dem Jahr 2012. Bis zum Jahr 2022 wird der Waldbestand basierend auf 36.692 BWI-Erhebungspunkten wie in Pfeiffer et al. (2023) beschrieben modelliert. Wichtige Einstellungen und Annahmen sind (siehe Details in Pfeiffer et al. 2023):

- Holzentnahme jahresscharf entsprechend der Einschlagrückrechnung für Nadel- und Laubholz (Jochem et al. 2023).
- Anpassung der Mortalität jahresscharf nach Daten der Waldzustandserhebung⁸ differenziert nach Baumartengruppen. In den Extremjahren mit starken natürlichen Störungen sterben so vermehrt Bäume ab. Dies findet aber nicht punktuell, sondern gemittelt auf die gesamte Waldfläche statt. Im Matrixmodell werden Störungen in der betroffenen Baumaltersklasse einer Baumartengruppe berücksichtigt und so ebenfalls nicht räumlich explizit modelliert.
- Zuwachs in 2013-2017:
Ausgehend von der BWI-3 wurden Vorräte für das Jahr 2017 mit den Zuwachsraten aus der Parametrisierungsperiode 2002-2012 modelliert und mit den Ergebnissen der Treibhausgasinventur aus dem Jahr 2017 verglichen. Der Zuwachs einzelner Baumarten wurde für die Periode 2013-2017 so angepasst, dass die Abweichung unter 0,1 % lag (siehe Details in Pfeiffer et al. 2023).
- Zuwachs in 2018-2022:
Da durch die ungünstigen Wuchsbedingungen in diesen Jahren reduzierte Zuwächse zu erwarten sind, wurde für Nadelbäume eine Zuwachsminderung von 50 % gegenüber den Jahren 2013 bis 2017 angenommen. Für Laubbäume wird eine Zuwachsminderung von 25 % gegenüber den Jahren 2013 bis 2017 eingestellt.
Diese Zuwachsänderungen sind Expert*innen-Schätzungen durch das Öko-Institut. Der

Unterschied zwischen Nadel- und Laubbäumen wird damit begründet, dass sich laut Waldzustandserhebung⁸ in den Jahren 2018 bis 2021 die Kronenverlichtung für Nadelbäume stärker verschlechterte als für Laubbäume. Die Annahmen sollten anhand der ausstehenden BWI-4 überprüft werden.

Ab dem Jahr 2022 werden für die Fortschreibung in FABio-Forest vergleichbare Annahmen wie für das Matrixmodell im PB-2023 getroffen (Sensitivität FABio_MMS-2024_gS):

- ▶ Für die Holzentnahme wird der Mittelwert der Jahre 2013-2017 aus der Einschlagrückrechnung angenommen und bis zum Jahr 2050 als konstant fortgeschrieben.
- ▶ Für den Zeitraum bis 2050 werden geringe natürliche Störungen (gS, siehe oben) fortgeschrieben. Dies spiegelt die Situation in den Jahren 2013 bis 2017 wider.

Zusätzlich zum Szenario mit geringen natürlichen Störungen werden zwei Sensitivitäten modelliert: Annahme mittlerer natürlicher Störungen (Sensitivität FABio_MMS-2024_mS) und Annahme hoher natürlicher Störungen (Sensitivität FABio_MMS-2024_hS).

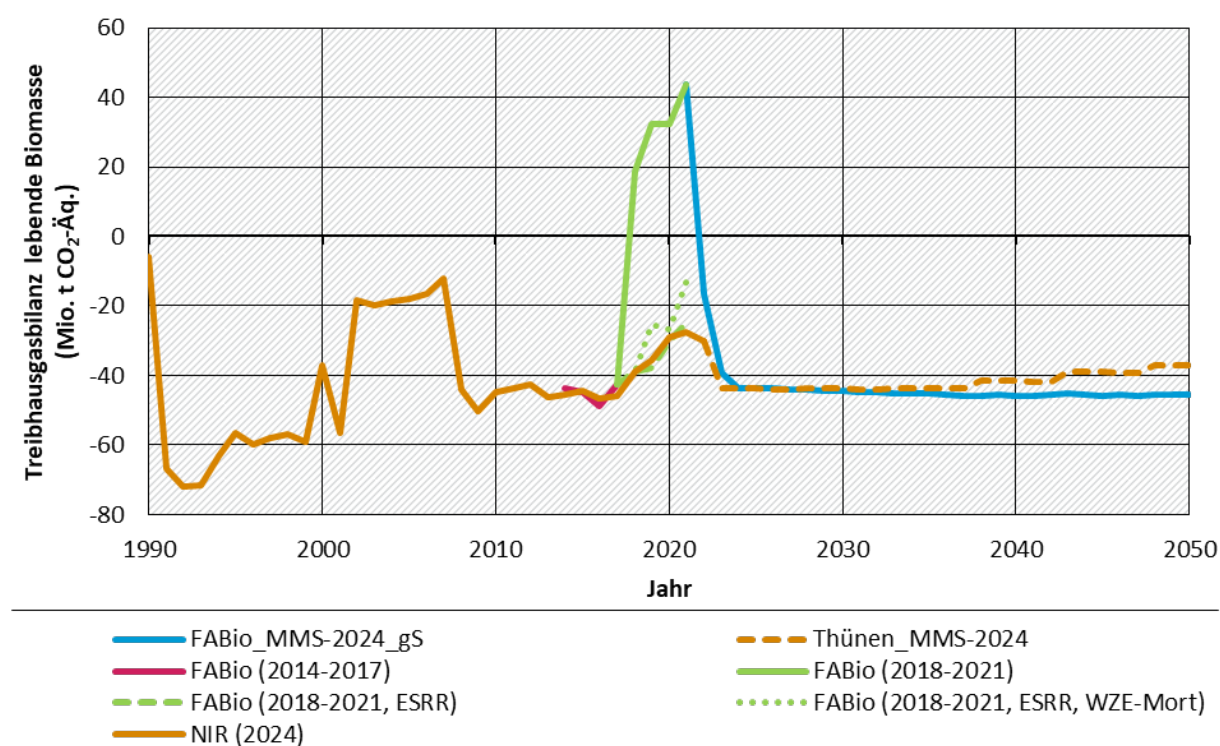
3 Ergebnisse und Diskussion

In der folgenden Ergebnisdarstellung liegt der Fokus auf der THG-Bilanz der lebenden Bäume in den Waldbeständen in Deutschland. Zusätzlich sind Ergebnisse zu weiteren Kenngrößen im Anhang als Abbildungen zusammengestellt.

3.1 Unterschiede zwischen Matrixmodell und FABio-Forest

Im Treibhausgasinventar der Bundesregierung wird die Senkenleistung der lebenden Biomasse im Wald, also der lebenden Bäume, berichtet. Dabei werden die Daten der Waldinventuren⁹ und Daten zur jährlichen Holzentnahme berücksichtigt. In der historischen Zeitreihe in Abbildung 4 zeigen sich Perioden mit geringen natürlichen Störungen, in denen die THG-Bilanz der lebenden Bäume starke Senken waren (z.B. 2008-2017 im Mittel -45 Mio. t CO₂/Jahr). In Perioden mit hohen natürlichen Störungen sank die Senkenleistung der lebenden Bäume auf Werte von ca. -12 bis -20 Mio. t CO₂/Jahr, so z.B. von 2002 bis 2007. In diese Periode fielen insbesondere der Orkan Kyrill im Jahr 2007 sowie die Dürre im Jahr 2003 und der Orkan Jeanett im Jahr 2002. Da die letzten Waldinventur-Daten nur bis zum Jahr 2017 vorliegen, als die letzte Treibhausgasinventur erhoben wurde, erfolgt im THG-Inventar eine Fortschreibung der Senkenleistung auf Basis der berichteten Periode 2013-2017 unter Berücksichtigung der jährlichen Holzentnahme (orange durchgezogene Linie in Abbildung 4).

Abbildung 4: THG-Bilanz der lebenden Bäume im Wald, berichtete und modellierte Ergebnisse



gS = geringe natürliche Störungen, WZE-Mort = Mortalität der Waldzustandserhebung, ESRR = Einschlagsrückrechnung des Thünen-Instituts, MMS = Mit-Maßnahmen-Szenario.

Quelle: Eigene Berechnungen in FABio-Forest, Modellierungsergebnisse des Thünen-Instituts zum MMS im Projektionsbericht 2024 (Harthan et al. 2024) und Daten zum Nationalen Treibhausgasinventar 2024 (UBA 2024).

⁹ Bundeswaldinventur alle 10 Jahre; um 5 Jahre versetzt Zwischeninventuren mit kleinerem Stichprobenumfang.

In FABio-Forest wird der Zeitraum von 2013 bis 2017 für die Kalibrierung der Baumzuwächse verwendet und damit erreicht, dass sich die Modellergebnisse gut mit den berichteten Werten im THG-Inventar decken (purpurne Linie in Abbildung 4, siehe Kap. 2.2.2 und Details in Pfeiffer et al. 2023). Bei Fortschreibung der Bedingungen aus der Periode 2013-2017 sowie der zugehörigen jährlichen Holzentnahme kann zudem mit FABio-Forest die berichtete THG-Bilanz der lebenden Bäume in den Jahren 2018-2021 gut nachgestellt werden (hellgrün gestrichelte Linie in Abbildung 4). Werden allerdings in FABio-Forest für diesen Zeitraum Informationen zur natürlichen Mortalität aus der Waldzustandserhebung berücksichtigt, verringert sich die Senkenleistung im Mittel um 6,8 Mio. t CO₂/Jahr (hellgrün gepunktete Linie in Abbildung 4). Die getroffenen Annahmen zur Zuwachsminderungen (siehe Kap. 2.2.2) reduzieren die Senkenleistung noch deutlicher, so dass die lebende Biomasse in den Jahren 2018-2022 zu einer Quelle mit einem Maximum von ca. 40 Mio. t CO₂ wird (hellgrün durchgezogene Linie in Abbildung 4).

Die Modellierung der THG-Bilanz der lebenden Bäume im MMS¹⁰ mit Hilfe des Matrixmodells des Thünen-Institutes ergibt bis zum Jahr 2037 eine Senke von ca. -44 Mio. t CO₂/Jahr. Im Anschluss nimmt die Senkenleistung leicht ab bis auf ca. -37 Mio. t CO₂/Jahr (orange gestrichelte Linie in Abbildung 3).

Die Ergebnisse der Modellierung mit FABio-Forest analog zum MMS (hellblaue Linie in Abbildung 4) stimmen bis Mitte der 2030er Jahre sehr gut mit den Ergebnissen des Matrixmodells überein. Anschließend bleiben die modellierten Werte in FABio-Forest auf einem niedrigeren Niveau von ca. -45 Mio. t CO₂/Jahr. So beträgt die Abweichung zwischen den beiden Szenarien im Jahr 2030 0,7 Mio. t CO₂/Jahr und im Jahr 2045 6,8 Mio. t CO₂/Jahr. Aus modelltechnischer Sicht sind die festgestellten Unterschiede von 6,8 Mio. t CO₂/Jahr im Jahr 2045 sehr klein, denn die Berechnungsgrundlage basiert auf Veränderungen eines deutschlandweiten Holzvorrats von über 3,5 Mrd. m³ (siehe Abbildung 10; entspricht ca. 3,2 Mrd. t gespeichertes CO₂). Aus Sicht der Projektion der CO₂-Emissionen in Deutschland sind die Unterschiede jedoch bedeutend. Zum Vergleich: Das ambitionierte Ziel im Bundes-Klimaschutzgesetz, die THG-Minderung auf landwirtschaftlich genutzten Moorböden bis zum Jahr 2030 um 5 Mio. t CO₂-Äq. zu reduzieren, liegt in einer vergleichbaren Größenordnung.

Ein Grund für die steigenden Unterschiede zwischen den Szenarien kann in Annahmen zur Bewirtschaftung der Bestände liegen. Im Matrixmodell werden die Entnahmestrukturen aus der Periode 2013-2017 fortgeschrieben. Laut der Kohlenstoffinventur 2017 (CI-2017)⁷ wurden in dieser Periode z.B. ältere Fichtenbestände unterdurchschnittlich stark eingeschlagen. Das Fortschreiben dieses Musters führt zu einem weiteren Altern dieser Bestände mit stetig abnehmenden Zuwächsen. In FABio-Forest wird hingegen die Holzentnahme über alle erntbaren Baumaltersgruppen gleichmäßig verteilt, wodurch ältere Fichtenbestände ähnlich stark wie jüngere beerntet werden, so dass der Effekt weniger ausgeprägt sein sollte. Detailliertere Analysen als die, die in dieser Kurzstudie möglich waren, sind nötig, um die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Ergebnisse der beiden angewandten Modelle besser zu verstehen.

3.2 Auswirkungen durch natürliche Störungen

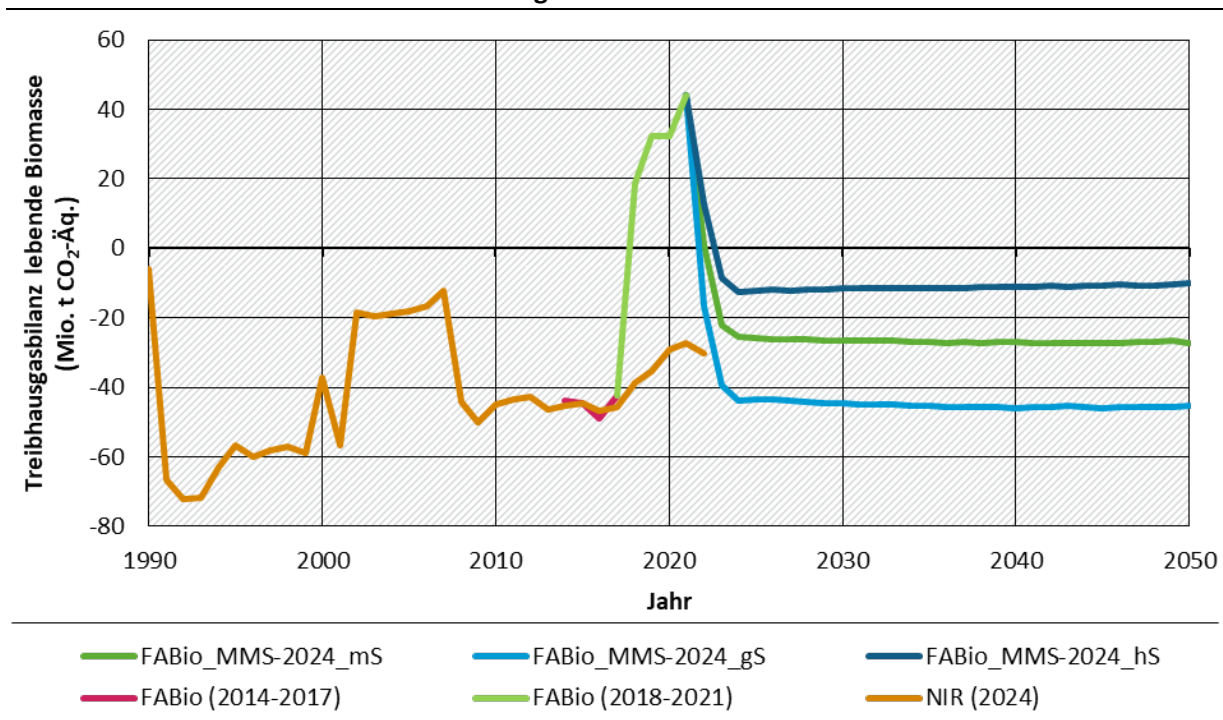
Die Annahmen, die im MMS für die Waldentwicklung getroffen werden, entsprechen der Situation in den Jahren 2013-2017 ergänzt durch Annahmen zur Nutzungseinschränkung auf 115.000 ha (siehe Kapitel 2.2.1). Gerade die Intensität natürlicher Störungen ist in dieser Periode als niedrig einzustufen (vgl. z.B. Abbildung 2). In FABio-Forest wurden dem MMS mit

¹⁰ MMS = Mit-Maßnahmen-Szenario im Projektionsbericht (UBA 2024).

geringen Störungen eine Sensitivität mit mittleren natürlichen Störungen und eine Sensitivität mit hohen natürlichen Störungen gegenübergestellt.

Die THG-Bilanz unter Fortschreibung geringer natürlicher Störungen liegt in der Größenordnung der Jahre 2013-2017 (hellblaue Linie in Abbildung 5). Die angenommenen mittleren natürlichen Störungen führen zu einer deutlichen Verringerung der Senkenleistung (dunkelgrüne Linie in Abbildung 5). Allerdings ist die THG-Bilanz immer noch etwas besser als in der Periode 2002-2007, die durch einzelne Stürme und das Hitzejahr 2003 geprägt war. Die Annahme von hohen natürlichen Störungen führt zu einer THG-Bilanz, die schlechter ausfällt als in der Periode 2002-2007. Es konnte aber immer noch eine Senkenleistung der lebenden Bäume von gut -10 Mio. t CO₂/Jahr verzeichnet werden (dunkelblaue Linie in Abbildung 5).

Abbildung 5: Sensitivitäten zur THG-Bilanz der lebenden Bäume im Wald für niedrige, mittlere und hohe natürliche Störungen

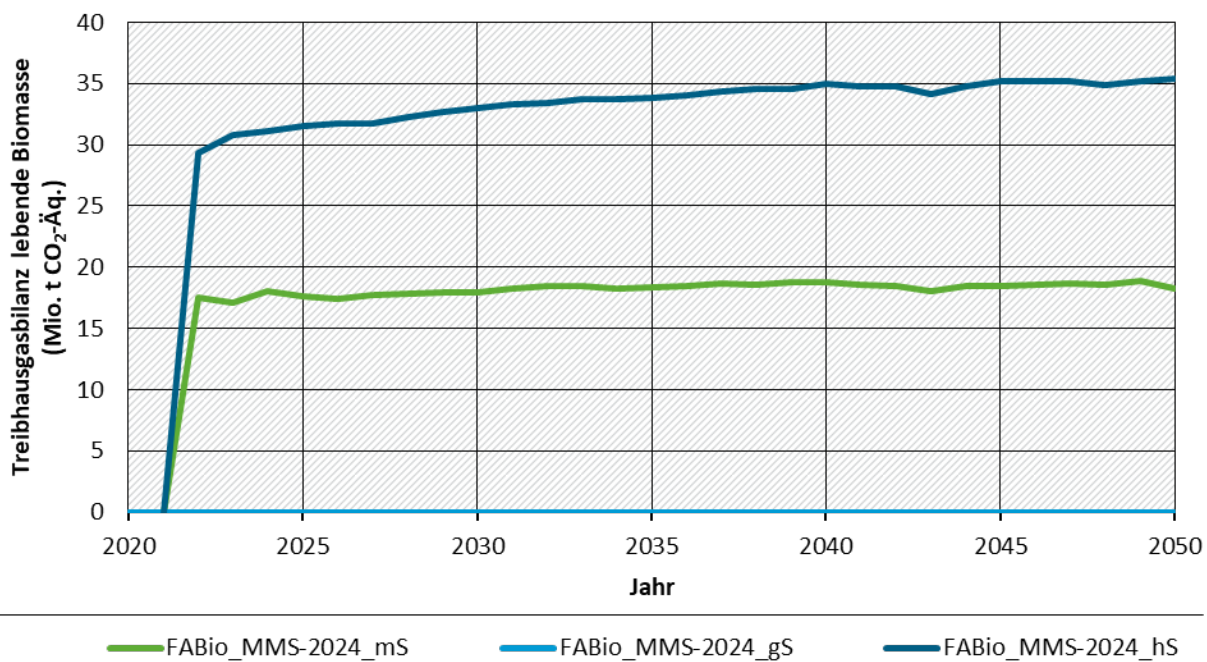


gS / mS / hS = geringe / mittlere / hohe natürliche Störungen, MMS = Mit-Maßnahmen-Szenario.

Quelle: Eigene Berechnungen in FABio-Forest, Öko-Institut, und Daten zum Nationalen Treibhausgasinventar 2024 (UBA 2024). gS / mS / hS = geringe / mittlere / hohe natürliche Störungen, MMS = Mit-Maßnahmen-Szenario.

In Abbildung 6 ist als Ergänzung zu Abbildung 5 die Differenz der Szenarien-Ergebnisse für die THG-Bilanz der lebenden Bäume dargestellt. So zeigt sich deutlich, dass z.B. im Jahr 2045 durch die modellierten mittleren natürlichen Störungen die Senkenleistung der Wälder gegenüber der Annahme geringer natürlicher Störungen um 18 Mio. t CO₂/Jahr abnimmt. In der Sensitivität mit hohen natürlichen Störungen beträgt die Abnahme der Senkenleistung sogar 35 Mio. t CO₂/Jahr (Abbildung 6). Im Vergleich zu den Unterschieden, die zwischen dem Matrixmodell des Thünen-Instituts und FABio-Forest bei MMS festgestellt wurden, sind die Risiken von Fehleinschätzungen durch unzutreffende Annahmen zu natürlichen Störungen somit deutlich höher.

Abbildung 6: Differenz der Sensitivitäten zur THG-Bilanz der lebenden Bäume für geringe, mittlere und hohe natürliche Störungen



gS / mS / hS = geringe / mittlere / hohe natürliche Störungen, MMS = Mit-Maßnahmen-Szenario.
 Quelle: Eigene Berechnungen in FABio-Forest, Öko-Institut.

4 Fazit

Frage 1: Wie unterscheiden sich die Ergebnisse der modellierten THG-Bilanz lebender Bäume im MMS zwischen dem Matrixmodell und FABio-Forest?

In Summe sind die Unterschiede zwischen den Modellergebnissen aus dem Matrixmodell und FABio-Forest für das MMS gering. Vermutlich resultieren die Ergebnisse nicht aus methodischen Unterschieden der Modelle, sondern vielmehr aus den getroffenen Annahmen zur Waldbewirtschaftung. Um dies zu klären wäre ein genauer Abgleich der getroffenen Annahmen im MMS und ggf. weitere Testszenarien mit abgestimmten Veränderungen nötig. Eine derartige Arbeit sollte sich aber nicht nur auf diese beiden Modelle beschränken, sondern weitere Waldmodelle wie 4C¹¹ (z.B. Gutsch et al. 2018) oder FORMIND¹² (z.B. Fischer et al. 2019) hinzuziehen.

Frage 2: Wie stark wirken sich unterschiedlich starke natürliche Störungen auf die THG-Bilanz lebender Bäume im MMS aus?

Der Vergleich der Sensitivitäten mit unterschiedlichen natürlichen Störungen für das MMS zeigt, dass störungsbedingte Unterschiede in der THG-Bilanz lebender Bestände in der Größenordnung von 20-35 Mio. t CO₂ liegen können. Dieser modellierte Effekt ist deutlich höher als die Unterschiede zwischen den Ergebnissen des Matrixmodells des Thünen-Instituts und FABio-Forest. Es empfiehlt sich daher, im Projektionsbericht Unsicherheiten, die hinsichtlich natürlicher Störungen bestehen, auszuweisen. Zudem sollte geprüft werden, ob es möglich ist, im Matrixmodell des Thünen-Instituts ebenfalls Sensitivitäten zu natürlichen Störungen abzubilden.

¹¹ <https://www.pik-potsdam.de/4c/> (zuletzt geprüft am 22.07.2024).

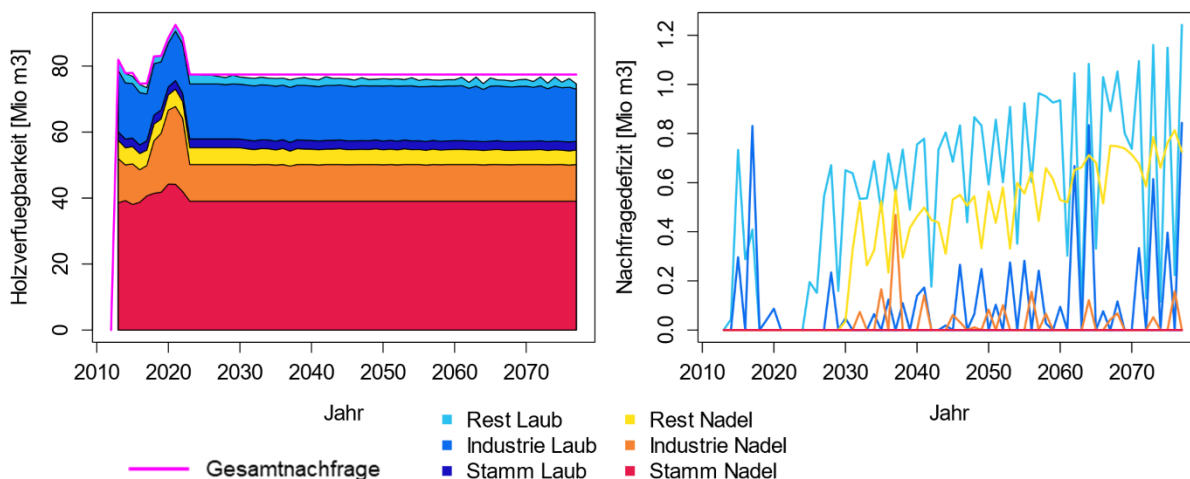
¹² <https://formind.org/> (zuletzt geprüft am 22.07.2024).

5 Quellenverzeichnis

- Böttcher, H.; Hennenberg, K. J.; Winger, C. (2018a): Waldvision Deutschland - Beschreibung von Methoden, Annahmen und Ergebnissen. Öko-Institut. Berlin. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Waldvision-Methoden-und-Ergebnisse.pdf> (20.08.2024).
- Böttcher, H.; Hennenberg, K.; Winger, C. (2018b): FABio-Waldmodell, Modellbeschreibung Version 0.54 Stand Nov. 2017. Öko-Institut. Berlin. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/FABio-Wald-Modellbeschreibung.pdf> (20.08.2024).
- Harthan, R. O.; Förster, H.; Borkowski, K.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Cook, V.; Emele, L.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; Jansen, L. L.; Jörß, W.; Kasten, P.; Loreck, C. et al. (2024): Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/projektionen_technischer_anhang_0.pdf (20.08.2024).
- Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Reise, J.; Herold, A.; Bohn, F.; Gutsch, M.; Reyer, C. (2021): Interpretation des Klimaschutzgesetzes für die Waldbewirtschaftung verlangt adäquate Datenbasis, Reaktion auf die Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats für Waldpolitik beim BMEL (vom 22.06.2021). Öko-Institut Working Paper 03/21, Öko-Institut, Berlin. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/03-WP-Klimaschutzgesetz-Waldbewirtschaftung.pdf> (20.08.2024).
- Hennenberg, K.; Köppen, S.; Banse, M.; Böttcher, H.; Brödner, R.; Cyffka, K.-F.; Fehrenbach, H.; Iost, S.; Jordan, M.; Kilian, D.; Morland, C.; Pfeiffer, M.; Reise, J. et al. (in press.): Hintergrundinformationen zum Status Quo der Land- und Forstwirtschaft in Deutschland und zukünftigen Biomassepotenzial für die Erarbeitung der NABIS. Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu), Heidelberg.
- Hennenberg, K.; Pfeiffer, M.; Benndorf, A.; Böttcher, H.; Reise, J.; Mantau, U.; Köppen, S.; Fehrenbach, H.; Bürck, S. (2024): Auswirkungen der energetischen Nutzung forstlicher Biomasse in Deutschland auf deutsche und internationale LULUCF-Senken (BioSINK). Abschlussbericht, Climate Change 33/2024, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_33-2024_biosink.pdf (20.08.2024).
- Jochem, D.; Morland, C.; Glasenapp, S.; Weimar, H. (2023): Energetischer Holzverbrauch der privaten Haushalte. Abschlussbericht, Texte 15/2023, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_15-2023_energetischer_holzverbrauch_der_privaten_haushalte.pdf (20.08.2024).
- Pfeiffer, M.; Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Reise, J.; Mantau, U. (2023): Referenzszenario der Holzverwendung und der Waldentwicklung im UBA-Projekt BioSINK. Öko-Institut Working Paper 4/2023, Öko-Institut, Berlin. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Referenzszenario-BioSINK.pdf> (20.08.2024).
- Rock, J.; Dunger, K.; Rüter, S.; Stümer, W. (2021): National Forestry Accounting Plan for Germany – annotated and revised edition (Thünen Working Paper, 185). Johann Heinrich von Thünen-Institut Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Braunschweig. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn064291.pdf (20.08.2024).
- UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2024): Nationales Inventardokument zum deutschen Treibhausgasinventar 1990-2022, Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2024. Climate Change Nationaler Inventarbericht – 2024, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/qovreq/inventory/envzfm0va/DE_NID_2024_clean_13.03.2024_de.pdf (20.08.2024).

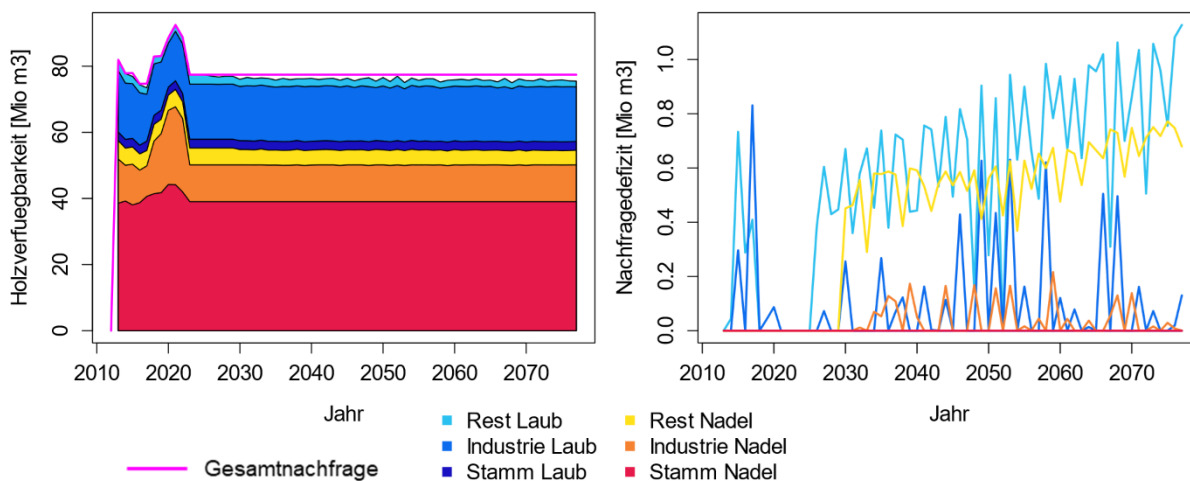
A Anhang

Abbildung 7: Simulierte Derbholzentnahme und offenbleibende Nachfrage (ohne Rinde), Sensitivität geringe Störungen



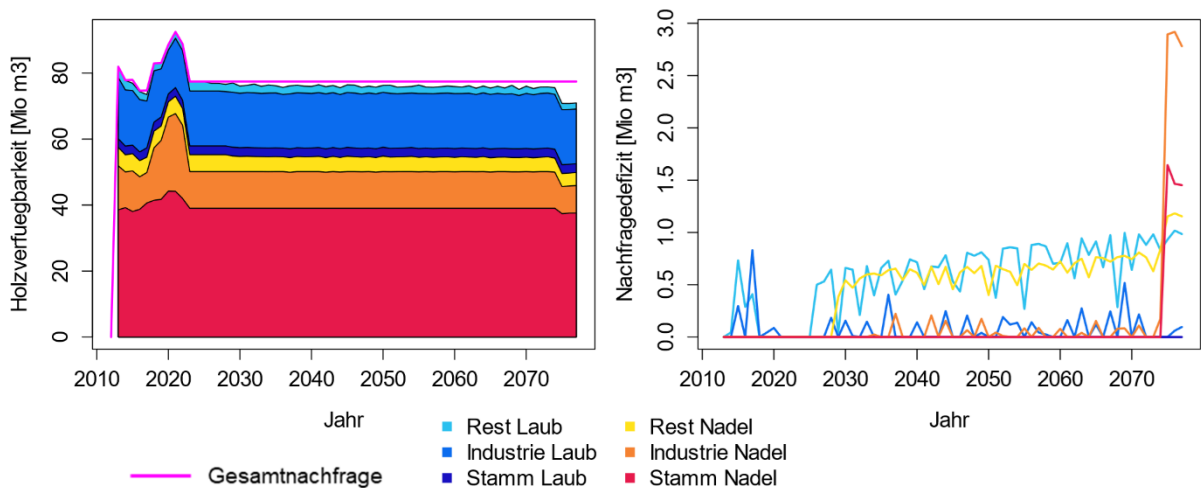
Quelle: Eigene Berechnungen und Darstellung in FABio-Forest, Öko-Institut.

Abbildung 8: Simulierte Derbholzentnahme und offenbleibende Nachfrage (ohne Rinde), Sensitivität mittlere Störungen



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

Abbildung 9: Simulierte Derbholzentnahme und offenbleibende Nachfrage (ohne Rinde), Sensitivität hohe Störungen



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

Abbildung 10: Derbholzvorrat (ohne Rinde) in lebender Biomasse nach Baumartengruppen, Sensitivität geringe Störungen

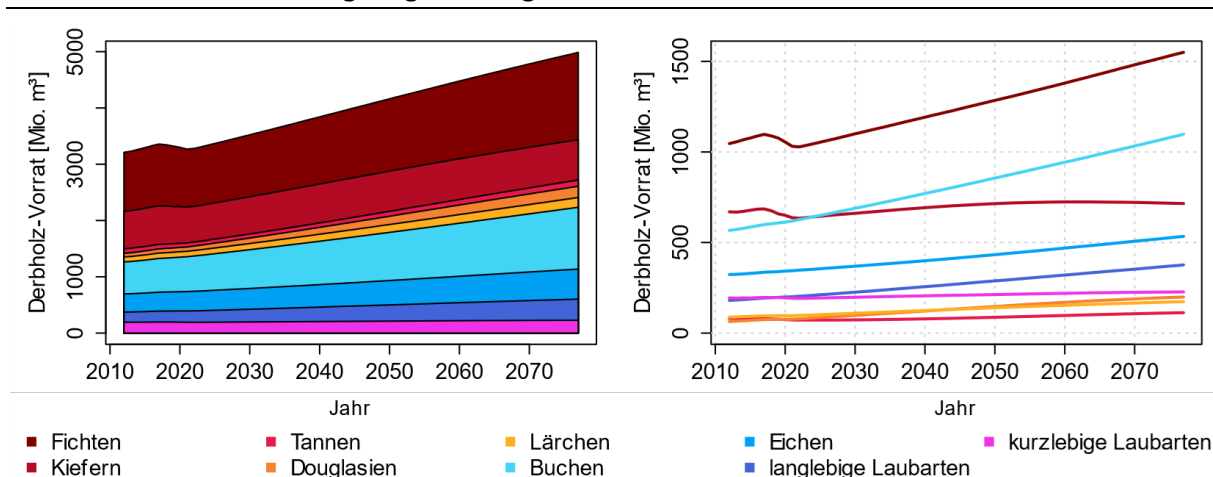


Abbildung 11: Derbholzvorrat (ohne Rinde) in lebender Biomasse nach Baumartengruppen, Sensitivität mittlere Störungen

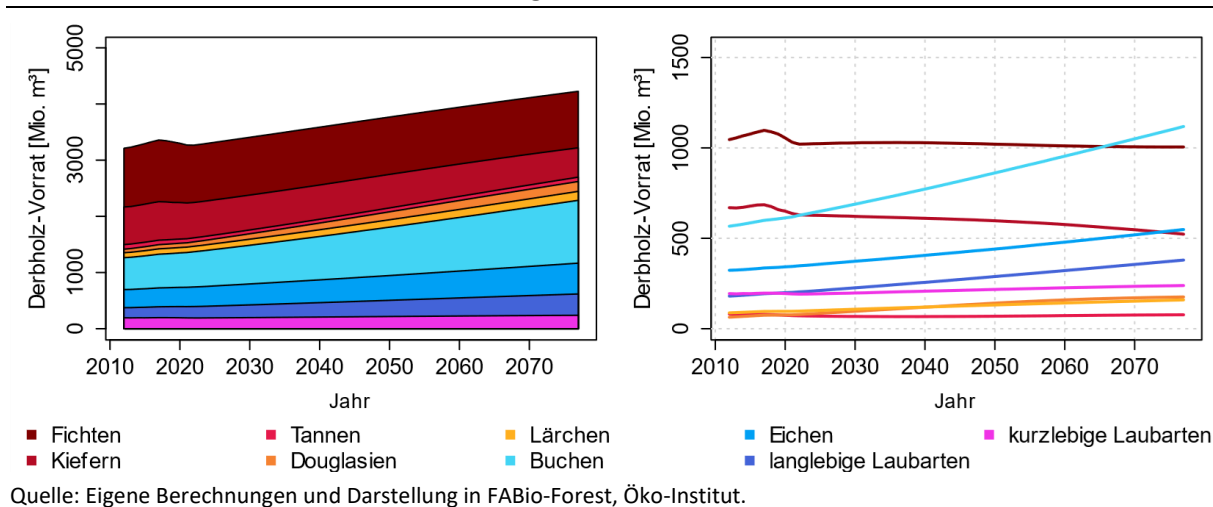


Abbildung 12: Derbholzvorrat (ohne Rinde) in lebender Biomasse nach Baumartengruppen, Sensitivität hohe Störungen

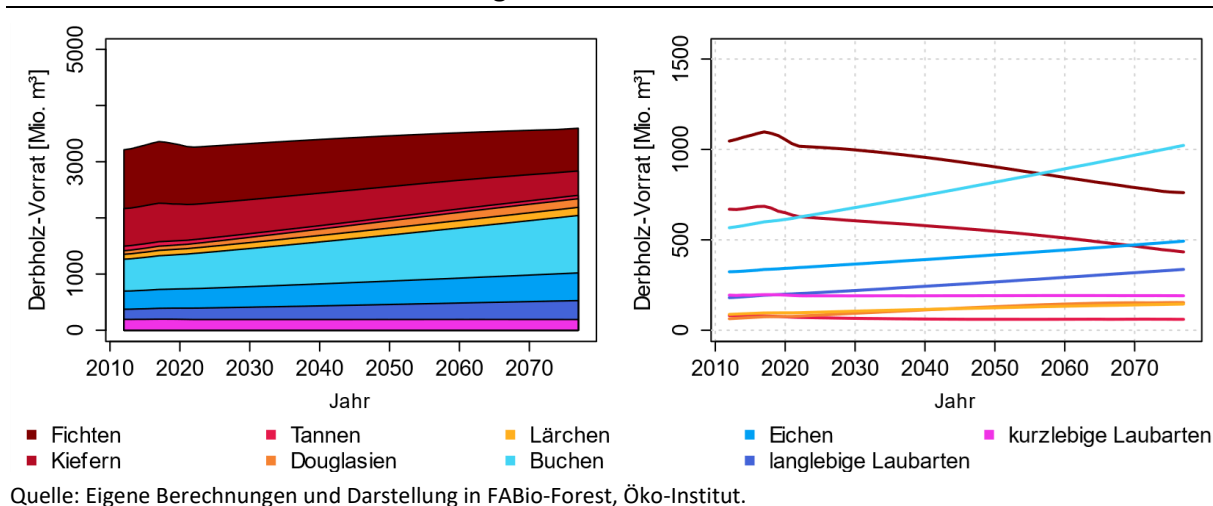
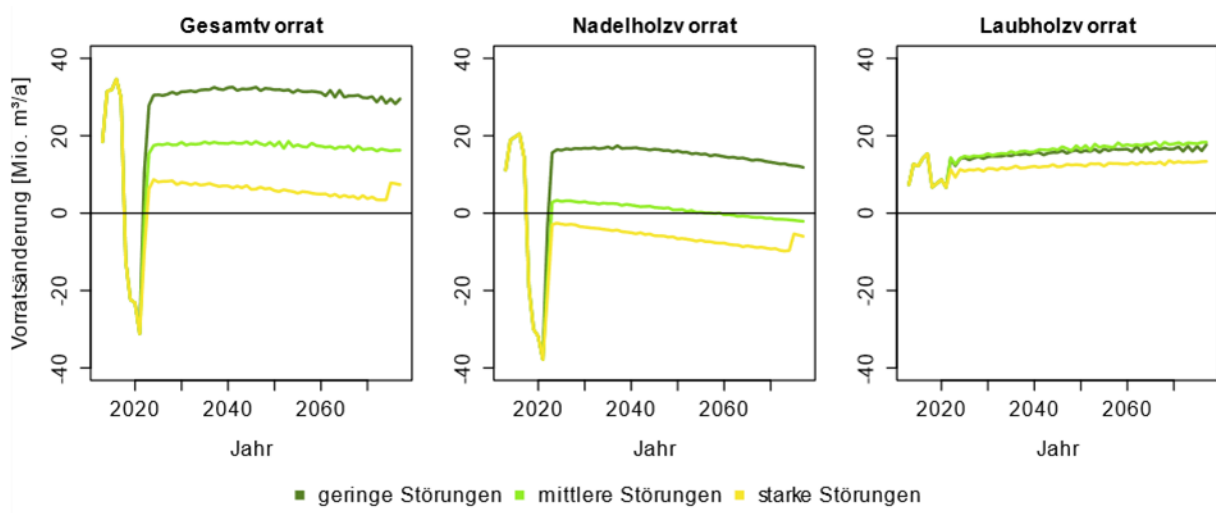


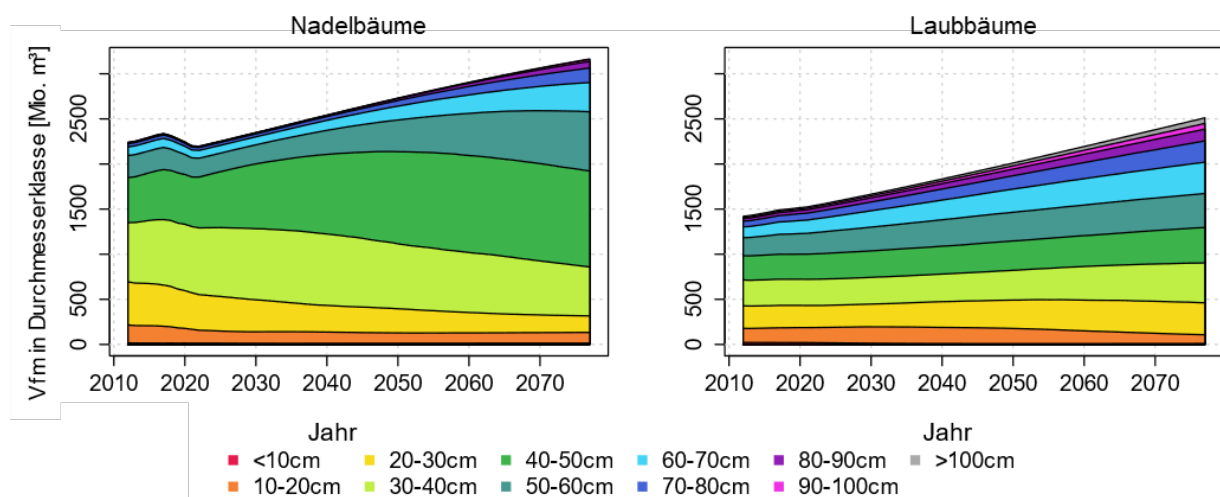
Abbildung 13: Veränderung des Derbholzvorrats (ohne Rinde) in lebender Biomasse im Vergleich der Sensitivitäten geringe, mittlere und starke Störungen



Positive Werte = Vorratsaufbau, negative Werte. = Vorratsabbau.

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

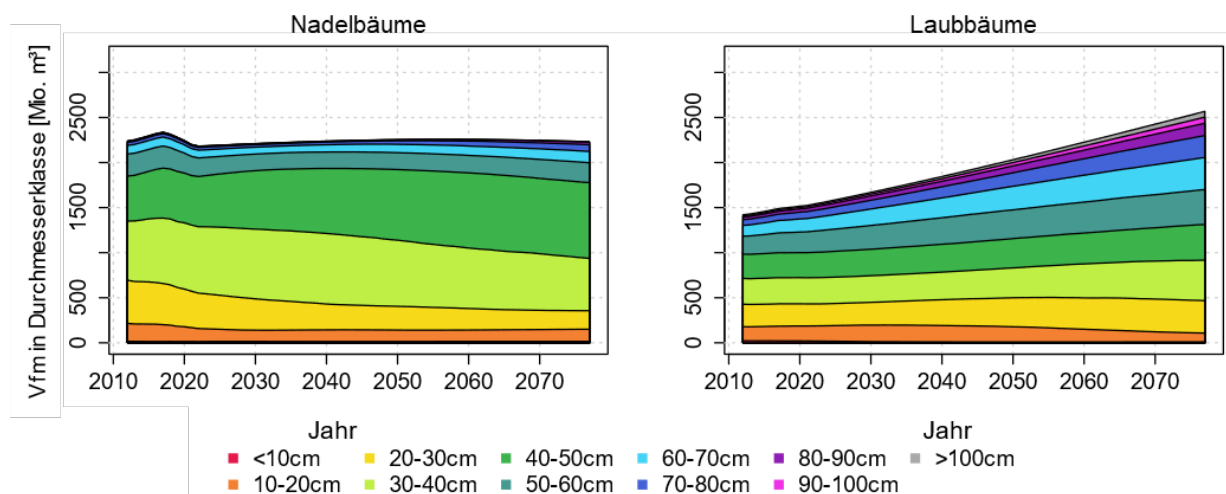
Abbildung 14: Bestandsstruktur als Derbholzvorrat (Vorratsfestmeter, mit Rinde) von Laub- und Nadelbäumen für lebende Bäume nach Durchmesserklassen, Sensitivität geringe Störungen



Vfm = Vorratsfestmeter

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

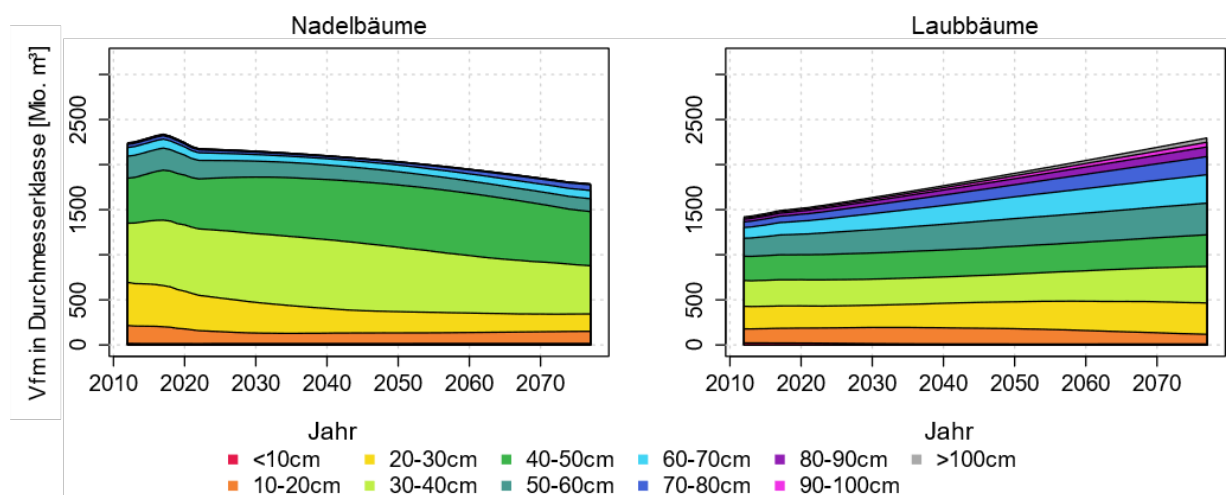
Abbildung 15: Bestandsstruktur als Derbholzvorrat (Vorratsfestmeter, mit Rinde) von Laub- und Nadelbäumen für lebende Bäume nach Durchmesserklassen, Sensitivität mittlere Störungen



Vfm = Vorratsfestmeter

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

Abbildung 16: Bestandsstruktur als Derbholzvorrat (Vorratsfestmeter, mit Rinde) von Laub- und Nadelbäumen für lebende Bäume nach Durchmesserklassen, Sensitivität hohe Störungen



Vfm = Vorratsfestmeter

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