

CLIMATE CHANGE

26/2026

Teilbericht

Klimasensitive Waldmodellierung

Szenarienanalyse zu Klimaschutzpotenzialen im Wald –
Bewertung der Ergebnisse des CARESupreme-Szenarios

von:

Mirjam Pfeiffer, Klaus Hennenberg, Hannes Böttcher
Öko-Institut Consult GmbH, Berlin

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 26/2026

REFOPLAN des Bundesministeriums für Umwelt,
Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 2723 NK 901 0

Teilbericht

Klimasensitive Waldmodellierung

Szenarienanalyse zu Klimaschutzpotenzialen im Wald –
Bewertung der Ergebnisse des CARESupreme-Szenarios

von

Mirjam Pfeiffer, Klaus Hennenberg, Hannes Böttcher
Öko-Institut Consult GmbH, 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 Consult GmbH
Borkumstr. 2
13189 Berlin

Abschlussdatum:

März 2026

Redaktion:

Fachgebiet V 1.2 Strategien und Szenarien zu Klimaschutz und Energie
Judith Voß-Stemping (Kirsten op de Hipt – Layout)

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8407>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, April 2026

© Alle Rechte vorbehalten

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

Kurzbeschreibung: Klimasensitive Waldmodellierung

Der Bericht untersucht, wie unterschiedliche Versionen des Waldwachstumsmodells FABio-Forest die Treibhausgas-(THG-)Bilanz lebender Bäume in deutschen Wäldern unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen abbilden können. Hintergrund ist das Ziel der deutschen Klimapolitik, bis 2045 Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen, wobei der Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung, Forstwirtschaft (LULUCF) konkrete Netto-Senkenziele erreichen soll. Die Studie bewertet insbesondere das im Forschungsprojekt CARE entwickelte Szenario CARESupreme, das auf Effizienz, Suffizienz und reduzierte Holzentnahme setzt, und vergleicht dieses mit dem Ohne-Maßnahmen-Szenario (OMS).

Die Studie zeigt, dass FABio-Forest die historische Waldentwicklung bereits mit der älteren Version 1.7 gut reproduzieren kann, allerdings mit den neuen, klimasensitiven Modellversionen 2.0 und 2.4 wesentlich realistischere Projektionen unter Berücksichtigung jahresscharfer Klimadaten möglich sind. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass die Verwendung gemittelter Klimadaten die Senkenleistung systematisch überschätzt, da extreme Trockenjahre die Waldsenke deutlich schwächen können.

CARESupreme erzielt – unabhängig von den Wuchsbedingungen – eine Verbesserung der THG-Bilanz um mehr als 22 Mio. t CO₂-Äq. im Vergleich zum OMS, vor allem durch reduzierte Holzentnahme und gesteigerte Mortalitätsholznutzung. Die Studie verdeutlicht, dass klimasensitive Modellierung für die Politikberatung unverzichtbar ist und Maßnahmen wie geringere Laubholzentnahme und Flächenstilllegungen einen entscheidenden Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele leisten können.

Abstract: Climate-sensitive forest modelling

The report analyses how different versions of the forest growth model FABio-Forest represent the greenhouse gas (GHG) balance of living trees in German forests under current and future climate conditions. Background of this report is Germany's climate policy target of achieving net GHG neutrality by 2045, with the land use, land use change and forestry (LULUCF) sector required to meet specific net sink goals. The study focuses particularly on the CARESupreme scenario, developed within the CARE research project, which emphasises efficiency, sufficiency and reduced timber extraction, and compares it with the no-measures scenario (OMS).

The results show that FABio-Forest can already reproduce historical forest development adequately using the older version 1.7. However, the newer and climate-sensitive model versions 2.0 and 2.4 allow considerably more realistic projections by incorporating annual climate data. The findings also indicate that the use of averaged climate data systematically overestimates the forest carbon sink, as extreme drought years can significantly weaken sink performance.

Across all growth conditions, CARESupreme improves the GHG balance by more than 22 Mt CO₂eq compared with OMS, primarily due to reduced timber extraction and increased utilisation of mortality wood. The study underlines that climate-responsive modelling is essential for evidence-based policy advice, and that measures such as reduced hardwood harvesting and set-aside areas can make a decisive contribution to achieving climate protection targets.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis.....	7
Abkürzungsverzeichnis.....	8
Zusammenfassung.....	9
Summary.....	11
1 Einleitung.....	13
2 FABio-Forest.....	16
2.1 Modellstruktur.....	16
2.2 Modellversionen.....	17
2.3 Natürliche Störungen in Modellversion 1.7.....	18
2.4 Klimasensitive Zuwachsmmodellierung in Modellversion 2.0.....	19
2.5 BWI4 als Modellversion 2.4.....	20
3 Szenarien.....	21
4 Ergebnisse.....	26
4.1 Wie gut kann FABio-Forest die historisch berichtete THG-Bilanz der lebenden Bäume im Wald abbilden?.....	26
4.2 Wie verändert sich die THG-Bilanz der lebenden Bäume, wenn jährliche Klimadaten anstelle von Mittelwerten als Treiber verwendet werden?.....	28
4.3 Wie unterscheiden sich die THG-Bilanzen der lebenden Bäume im CARESupreme-Szenario zwischen unterschiedlichen FABio-Forest-Versionen?.....	30
4.4 Wie sind die Modellierungsergebnisse zu THG-Bilanzen der lebenden Bäume im Vergleich zu den Ergebnissen des Projektionsberichts einzuordnen, und welche Rolle spielen die im CARESupreme-Szenario umgesetzten Waldmaßnahmen?.....	32
5 Diskussion und Schlussfolgerungen.....	37
6 Quellenverzeichnis.....	41

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Sensitivitätsanalyse zur Treibhausgasbilanz der Waldfläche für geringe, mittlere und starke natürliche Störungen, CARESupreme, 1990 bis 2045	14
Abbildung 2:	Prozessablauf und Informationsfluss im Waldmodell FABio-Forest.....	16
Abbildung 3:	Holznachfrage für Laub- und Nadelholz in den Szenarien CARESupreme und OMS.....	23
Abbildung 4:	Vergleich THG-Bilanz der lebenden Bäume auf Basis der Ergebnisse der BWI4, NIR 2024 und der Modellierung in FABio-Forest 1.7.....	26
Abbildung 5:	Nachstellen der Treibhausgasbilanz der lebenden Bäume im Nationalen Treibhausgasinventar	28
Abbildung 6:	Auswirkungen der Verwendung von Klimadaten als jährliche Werte oder Mittelwerte auf die THG-Bilanz der lebenden Bäume.....	29
Abbildung 7:	Vergleich der Ergebnisse zur Waldmodellierung mit FABio-Forest 1.7, 2.0 und 2.4 für das Szenario CARESupreme	32
Abbildung 8:	Einordnung der Ergebnisse der THG-Bilanz lebender Bäume im Wald aus CARESupreme gegenüber OMS unter Annahme günstiger und ungünstiger Wuchsbedingungen	34
Abbildung 9:	Jahresscharfe Ergebnisse aus CARESupreme und OMS unter Annahme günstiger Wuchsbedingungen	35
Abbildung 10:	Jahresscharfe Ergebnisse aus CARESupreme und OMS unter Annahme ungünstiger Wuchsbedingungen	36
Abbildung 11:	Aktualisierte Nachstellung des Nationalen Treibhausgasinventars und Fortschreibung der Treibhausgasbilanz lebender Bäume bis zum Jahr 2025.....	38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vergleich der Modellversionen FABio-Forest 1.7, 2.0 und 2.4.	17
Tabelle 2:	Annahmen in den Szenarien CARESupreme und OMS in FABio-Forest.....	22
Tabelle 3:	Abbildung der Zuwachsminderung und der Mortalitätsrate ...	24
Tabelle 4:	Benennung der betrachteten Szenarien und Sensitivitäten	24

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
BAU	Business as Usual
BHD	Brusthöhendurchmesser
BMFTR	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
BWI	Bundeswaldinventur
CARE	Projekt „Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland“
CI	Kohlenstoffinventur
CO₂-Äq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
CS	CARESupreme, ambitioniertes Szenario im CARE-Projekt
DWD	Deutscher Wetterdienst
Efm	Erntefestmeter
FABio	Forest and Agriculture Biomass Model
gdd5	Wachstumsgradtage über 5 °C
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
MAR	mittlere Jahresstrahlung
Mio.	Millionen
nFK	nutzbare Feldkapazität
OMS	Ohne-Maßnahmen-Szenario
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
THG	Treibhausgas
UBA	Umweltbundesamt
vegKWB	klimatische Wasserbilanz der Vegetationsperiode
WEHAM	Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung
WZE	Waldzustandserhebung

Zusammenfassung

Der Bericht analysiert, wie sich die zukünftige Treibhausgasbilanz der lebenden Wälder in Deutschland entwickeln könnte und wie verschiedene Versionen des Waldentwicklungsmodells FABio-Forest diese Entwicklung abbilden können. Hintergrund ist das gesetzlich verankerte Ziel Deutschlands, bis 2045 Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen. Der Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) soll hierzu einen wesentlichen Beitrag in Form einer Netto-Senke von 40 Mio. t CO₂-Äq. leisten. Die vierte Bundeswaldinventur (BWI4) hat allerdings einen historischen Rückgang der Holzvorräte infolge von Dürreperioden, Kalamitäten und insbesondere dem massiven Absterben von Fichtenbeständen dokumentiert. Damit wird deutlich, dass die Waldsenkenleistung in den vergangenen Jahren erheblich beeinträchtigt war.

Der Bericht untersucht konkret das Szenario CARESupreme, das im Rahmen des CARE-Projekts entwickelt wurde und ein ambitioniertes Transformationsnarrativ verfolgt, in dem Effizienz, Suffizienz und veränderte Holznutzungsmuster die Grundlage für eine deutlich gesteigerte Senkenleistung bilden (Harthan et al., 2025). Die Ergebnisse werden dem Ohne-Maßnahmen-Szenario (OMS) gegenübergestellt, das weitgehend die Bedingungen der Jahre 2013 bis 2022 fortschreibt.

FABio-Forest ist ein empirisches Waldwachstumsmodell, das auf den umfangreichen Daten der Bundeswaldinventuren basiert. Es simuliert die Entwicklung einzelner Bäume hinsichtlich Wachstum, Mortalität, Konkurrenz und Bewirtschaftung sowie Holzentnahme, Totholzbildung und Kohlenstoffdynamiken im Boden. Die ältere Modellversion (1.7) kann historische Entwicklungen bereits gut abbilden, ist aber nicht klimasensitiv und basierte auf Expertenschätzungen zu Zuwachseinbrüchen in Extremjahren. Die Modellversionen 2.0 und 2.4 stellen eine grundlegende methodische Weiterentwicklung dar. Sie integrieren erstmals klimasensitive Zuwachsfunktionen, die aus dem prozessbasierten Modell 4C abgeleitet wurden, und beziehen jährliche Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes ein. Während Version 2.0 weiterhin auf Bestandsdaten der BWI3 (2012) initialisiert wurde, nutzt Version 2.4 Daten zum Zustand der Waldbestände der BWI4 aus dem Jahr 2022.

CARESupreme basiert auf dem Ziel, Ressourcennutzung und Holzeinschlag deutlich zu reduzieren, die Nutzung von Mortalitätsholz zu intensivieren und zusätzlich Flächen aus der Bewirtschaftung zu nehmen. Die Laubholzentnahme soll bis 2050 um insgesamt 5 Mio. m³ sinken, während die Entnahme von abgestorbenem Holz deutlich erhöht wird. Ergänzend sieht das Szenario eine sukzessive Ausweitung ungenutzter Waldflächen vor, wodurch der Kohlenstoffspeicher im Wald langfristig steigt. Dieses Szenario steht im Gegensatz zum OMS, das von einer konstant hohen oder sogar steigenden Holznachfrage ausgeht und keine zusätzlichen Stilllegungen vorsieht.

Ein zentrales Ergebnis der Studie ist die Erkenntnis, dass FABio-Forest bereits in der älteren Version 1.7 die historische THG-Bilanz der lebenden Bäume gut reproduzieren kann. Durch die neuen klimasensitiven Versionen gelingt es jedoch, die beobachteten Vorrats- und Zuwachsentwicklungen zwischen der dritten und vierten Bundeswaldinventur sehr gut nachzubilden. Die interannuelle Variabilität wird dabei realitätsnah wiedergegeben, insbesondere die deutlichen Zuwachseinbrüche in der Periode 2018 bis 2022. Ein entscheidender Befund betrifft den Einfluss der Klimadaten: Werden in den Modellen gemittelte statt jahresscharfer Klimareihen verwendet, überschätzt das Modell systematisch die Senkenleistung. Der Grund liegt darin, dass extreme Trockenjahre den Wachstumsrückgang erheblich stärker beeinflussen, als günstige Bedingungen ihn zu erhöhen vermögen. Diese Überschätzung beträgt etwa 13 bis 14 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr. Für realistische Projektionen

muss daher zwingend mit jahresscharfen Klimadaten gearbeitet werden, zumal sich die Häufigkeit extremer Jahre in Zukunft weiter erhöhen dürfte.

Im Vergleich der Modellversionen ergeben sich nur geringe Abweichungen. Bereits FABio-Forest 1.7 lieferte robuste Ergebnisse für CARESupreme. Die klimasensitiven Versionen 2.0 und 2.4 bestätigen diese Größenordnung, wobei Version 2.4 aufgrund der BWI4-Initialisierung tendenziell eine leicht höhere Senkenleistung ausweist, wenn günstige Wuchsbedingungen fortgeschrieben werden. Dies zeigt, dass die ursprünglich im CARE-Projekt durchgeführten Modellierungen zuverlässig waren und die neueren Versionen diese bestätigen.

Im Vergleich zum OMS liefert CARESupreme in allen Varianten eine deutlich verbesserte THG-Bilanz der lebenden Waldbäume. Unter günstigen Wuchsbedingungen erreicht CARESupreme eine Senkenleistung von etwa -30 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr, während das OMS lediglich auf Werte im Bereich von -9 Mio. t CO₂-Äq. oder, bei klimasensitiver Modellierung mit ungünstigen Klimareihen, sogar auf positive Emissionen kommt.

Auch unter ungünstigen Wuchsbedingungen bleibt die Wirkung von Maßnahmen bestehen: CARESupreme verbessert die THG-Bilanz unabhängig vom Klima um mehr als 22 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr. Die angenommenen Maßnahmen – reduzierte Laubholzentnahme, Flächenstilllegungen und verstärkte Nutzung von Mortalitätsholz – entfalten damit eine robuste Klimaschutzwirkung, unabhängig von den verwendeten Modellversionen oder den angenommenen Klimaszenarien. Die in CARESupreme quantifizierten Maßnahmen leisten somit einen signifikanten Beitrag zur Zielerreichung im LULUCF-Sektor.

Summary

The report analyses how the future greenhouse gas balance of living forests in Germany may develop and how different versions of the forest growth model FABio-Forest can represent this development. Background for this is Germany's legally anchored objective of achieving net greenhouse gas neutrality by 2045. Within this framework, the Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF) sector is expected to make a key contribution in form of a net sink of 40 Mt of CO₂eq. However, the fourth National Forest Inventory (NFI4) documented a historic decline in growing stocks due to droughts, calamities and the massive dieback of spruce stands, clearly showing that forest sink performance has been significantly impaired in recent years.

The report focuses on the CARESupreme scenario, within the CARE project. The scenario assumes an ambitious transformation pathway based on efficiency, sufficiency and modified wood use patterns to significantly strengthen sink performance (Harthan et al. 2025). Its results are compared with the no-measures scenario (OMS), which largely continues the management conditions of the period 2013 to 2022.

FABio-Forest is an empirical forest growth model that draws on the extensive database of the National Forest Inventories. It simulates the development of individual trees with respect to growth, mortality, competition and management, as well as timber harvesting, deadwood formation and soil carbon dynamics. The older model version (1.7) reproduces historical forest development well but is not climate-sensitive and relied on expert assumptions about growth reductions in extreme years. Model versions 2.0 and 2.4 represent major methodological progress. For the first time, they integrate climate-responsive growth functions derived from the process-based 4C model and incorporate annual climate data from the German National Meteorological Service. While version 2.0 is initialised using inventory data from NFI3 (2012), version 2.4 uses NFI4 stand condition data.

The CARESupreme scenario aims to substantially reduce resource use and timber extraction, increase the utilisation of mortality wood, and withdraw additional forest areas from management. Hardwood harvesting is to be cut by a total of 5 million m³ by 2050, while harvesting of wood from mortality is to be intensified. In addition, a gradual expansion of set-aside forest areas is envisaged, enhancing long-term carbon storage capacity of forests. Contrastingly, the OMS assumes a continuously high or even rising demand for wood and includes no additional set-asides.

A key finding of the study is that FABio-Forest can already reproduce the historical GHG balance of living trees well using version 1.7. However, the new climate-sensitive versions realistically track observed stock and growth developments between the third and fourth NFIs, including interannual variability and the significant growth declines between 2018 and 2020. The results highlight the strong influence of input data: when averaged climate series are used instead of annual data, the model systematically overestimates sink capacity, as extreme drought years reduce growth much more strongly than favourable years can enhance it.

Differences between model versions are small. Version 1.7 already provided robust results for CARESupreme, while the climate-sensitive versions 2.0 and 2.4 confirm the same magnitude of effects - with version 2.4 tending to show slightly higher sink performance due to NFI4 initialisation when favourable growth conditions are continued. This validates the modelling approach originally used in the CARE project.

Compared with OMS, CARESupreme delivers a significantly improved GHG balance for living forest trees across all variants. Under favourable growth conditions, CARESupreme achieves a sink capacity of approx. -30 Mt of CO₂eq per year, while OMS only achieves values in the range of

-9 Mt CO₂eq per year, or, with unfavourable climate series in climate-sensitive modelling, even positive emissions. Even under adverse conditions, the effect of the measures remains robust: CARESupreme improves the GHG balance by more than 22 Mt CO₂eq per year, irrespective of climate assumptions. The scenario's measures—reduced hardwood harvesting, land set-asides, and increased use of mortality wood—thus provide a reliable climate-protection effect and make a significant contribution toward achieving the targets set for the LULUCF sector.

1 Einleitung

Bis zum Jahr 2045 besteht laut Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG 2021) das Ziel, Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen. Da in Sektoren wie Landwirtschaft und Industrie weiterhin von unvermeidbaren Restemissionen auszugehen ist, werden Negativemissionen aus natürlichen oder technischen Senken benötigt. Der Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) soll hierzu im Jahr 2045 einen Beitrag von -40 Mio. t CO₂-Äq. leisten. Voraussetzung dafür ist die Reduktion von Emissionen, etwa aus Moorböden, sowie eine gesteigerte CO₂-Festlegung in Gehölzstrukturen als Agroforstelemente, in Holzprodukten und insbesondere in Wäldern.

Die Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur (BWI4) zeigen jedoch, dass der Holzvorrat in Deutschland im Mittel zwischen 2018 und 2022 zurückgegangen ist (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft [BMEL], 2024). Hauptursachen sind das großflächige Absterben von Fichtenbeständen, verminderter Zuwachs lebender Bäume infolge extremer Dürre in der Periode 2018 bis 2022 sowie Borkenkäferkalamitäten. Diese Entwicklungen führten im Betrachtungszeitraum der BWI4 zu durchschnittlichen Emissionen aus dem Wald von 26,4 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr (Hennenberg et al., 2024a), mit Konsequenzen für die gesamte THG-Bilanz des Sektors in Deutschland. Entsprechend wurden für das Jahr 2022 Netto-Emissionen aus dem LULUCF-Sektor von 75,6 Mio. t CO₂-Äq. festgestellt (Umweltbundesamt [UBA], 2025).

Der Projektionsbericht 2025 der Bundesregierung (Förster et al., 2025) bzw. die dem Bericht zugrundeliegende Waldmodellierung (Rock et al., 2025) berücksichtigt zum ersten Mal die neuen Ergebnisse der BWI4. Für das Jahr 2045 wird in Rock et al. (2025) eine hohe Spannweite künftiger THG-Bilanzen der lebenden Waldbiomasse ausgewiesen – von einer Senke von -31,8 Mio. t CO₂-Äq. bis zu einer Quelle von 10,6 Mio. t CO₂-Äq. Diese Unsicherheit unterstreicht die zentrale Bedeutung der künftigen Kohlenstoffbilanz lebender Bäume für die Zielerreichung im LULUCF-Sektor. Die Waldmodellierung im Projektionsbericht stellt ein Maßnahmenzenario dar, das die aktuellen politischen Rahmenbedingungen abdeckt. Das Ziel ist es, Lücken gegenüber den LULUCF-Zielen im KSG aufzuzeigen.

Im Forschungsprojekt „Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE)“ wurden 2025 instrumentenbasierte Szenarien zur Entwicklung der THG-Emissionen in Deutschland veröffentlicht (Harthan et al., 2025). Betrachtet wurde das Szenario CARESupreme. In diesem Szenario sind Klima- und Ressourcenschutz fest in Wirtschaft und Gesellschaft verankert, und Klimaschutzziele werden in erster Linie durch Effizienzsteigerungen und Verhaltensänderungen (Suffizienz) erreicht.

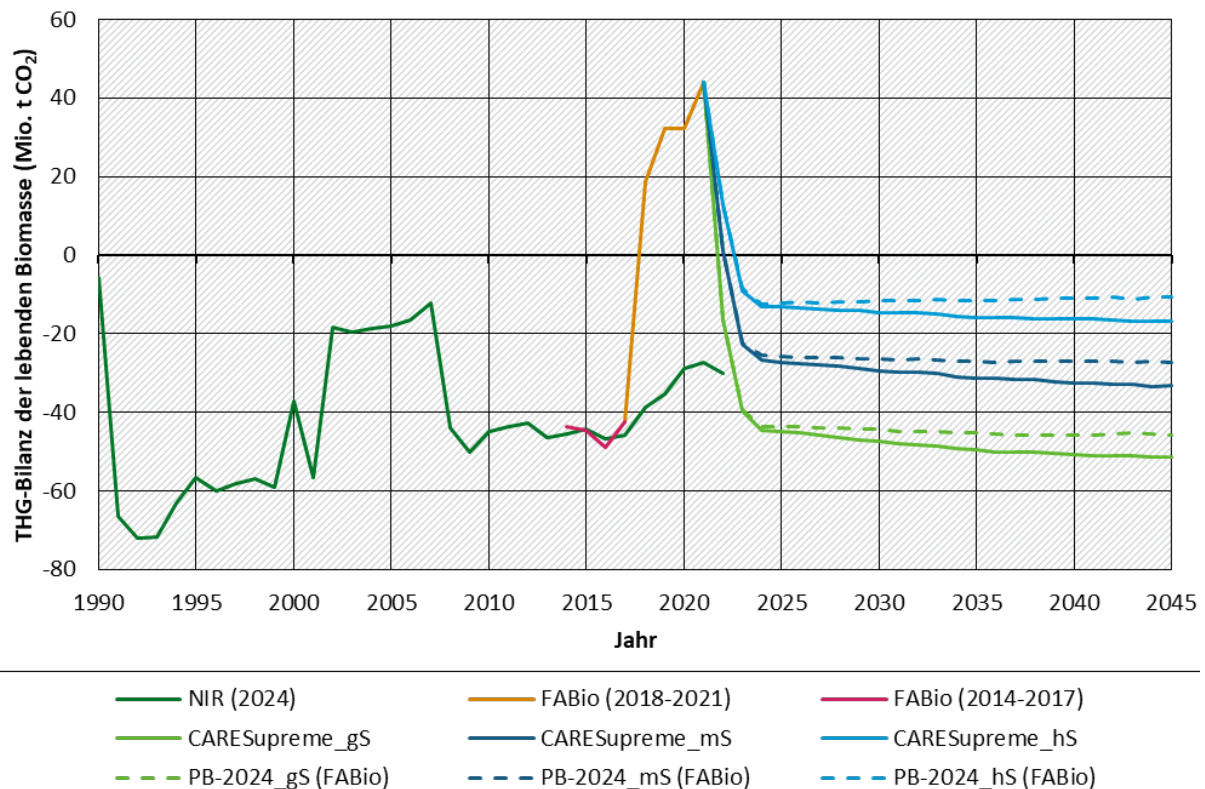
Das CARE-Szenario umfasst Modellierungen der Kohlenstoffsinken und Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) im Sektor LULUCF, einschließlich Holzprodukten. Im Gegensatz zu anderen Sektoren weist der LULUCF-Sektor neben THG-Emissionen auch CO₂-Senken auf. Im Szenario CARESupreme werden daher nicht nur bestehende Emissionsquellen deutlich reduziert, sondern auch Senkenpotenziale umfassend gestärkt. Eine Minderung der THG-Emissionen erfolgt durch die ambitionierte Wiedervernässung trockengelegter Moore, die Einstellung des Torfabbaus, die Optimierung von Wasserständen in Feuchtgebieten sowie den Erhalt von Dauergrünland auf mineralischen Böden. Erhöhte Senkenleistungen ergeben sich durch die Anlage von Gehölzstrukturen als Agroforstelemente. Weitere Minderungsbeiträge entstehen durch eine stärkere stoffliche Nutzung von Waldholz sowie von Rest- und Abfallholz, insbesondere in langlebigen Holzprodukten, statt einer energetischen Verwertung.

Den größten Beitrag zur Erhöhung natürlicher Senken leisten jedoch Maßnahmen auf Waldflächen. Dazu gehören ein reduzierter Holzeinschlag bzw. die Nutzungsaufgabe –

insbesondere in Laubholzbeständen – sowie eine verstärkte Entnahme von Mortalitätsholz, um die Nutzung vitaler Bestände zu vermindern. Diese Maßnahmen führen insgesamt zu höheren Holzvorräten und damit zu einer stärkeren Kohlenstoffbindung in Wäldern. Mit den Maßnahmen im LULUCF-Sektor – inklusive der genannten Maßnahmen auf der Waldfläche – werden in CARESupreme die LULUCF-Ziele im KSG erfüllt. Da die gesetzlich verankerten LULUCF-Ziele für die politischen Entscheidungsträger bindend sind (OVG BEBB, 2024), besteht ein hoher Bedarf, aus Zielszenarien wie CARESupreme in Rückkopplung mit Maßnahmenzenarien wie im Projektionsbericht mögliche neue Maßnahmen abzuleiten, um Klimaschutzziele zu erreichen. Ziel der vorliegenden Studie ist es, einen Beitrag zum besseren Verständnis der vorliegenden Waldszenarien in CARESupreme zu leisten.

Die Maßnahmen im Szenario CARESupreme tragen zugleich zur Umsetzung der EU-Verordnung zur Wiederherstellung der Natur bei.

Abbildung 1: Sensitivitätsanalyse zur Treibhausgasbilanz der Waldfläche für geringe, mittlere und starke natürliche Störungen, CARESupreme, 1990 bis 2045



NIR = Nationale Treibhausgasberichterstattung aus dem Jahr 2024 (UBA, 2024), FABio = FABio-Forest Version 1.7, PB-2024 = angelehnt an Annahmen im Projektionsbericht der Bundesregierung aus dem Jahr 2024 (Harthan et al., 2024), gS/mS/hs = geringe/mittlere/hohe natürliche Störungen.

Quelle: Harthan et al., 2025

Im Rahmen von CARESupreme wurde zunächst das Waldmodell FABio-Forest in der Version 1.7 eingesetzt. Auf Basis historischer Holzentnahmeraten, dokumentierter historischer Mortalitätswahrscheinlichkeiten und Expertenschätzungen zu Zuwachsänderungen konnte mit dieser Version die historische TGH-Bilanz der Jahre 2014 bis 2021 bereits realitätsnah abgebildet werden (siehe Abbildung 1, Harthan et al., 2025, und Hennenberg et al., 2024a). Für die Waldentwicklung in CARESupreme wurden historische Holzentnahmen fortgeschrieben und zusätzlich eine Abnahme der Laubholzentnahme berücksichtigt. Unter Annahme geringer, mittlerer und hoher natürlicher Störungen – abgeleitet aus Wuchsbedingungen und

Mortalitätsraten unterschiedlicher historischer Referenzzeiträume – wurden Sensitivitäten künftiger Waldentwicklungen simuliert (Abbildung 1). Explizite Klimadaten lagen diesen Simulationen nicht zugrunde, und die Detaildaten der BWI4 standen zum Modellierungszeitpunkt noch nicht zur Verfügung, sondern Daten der BWI3 wurden genutzt.

Die Berücksichtigung von Extremereignissen und weiteren Folgen des Klimawandels auf die Kapazität natürlicher Senken ist für eine wissenschaftsbasierte Politikberatung unerlässlich. In der Waldmodellierung besteht hierbei insbesondere die Herausforderung, empirische und prozessbasierte Ansätze zu kombinieren. Empirische Ansätze nutzen Informationen aus der historischen Waldentwicklung, um Algorithmen zur Reproduktion der Historie sowie ggf. für Projektionen abzuleiten. Dies gewährleistet eine gute Anbindung von Projektionen an berichtete Daten. Prozessbasierte Methoden modellieren physiologische Prozesse der Bäume, wodurch Projektionen zu zukünftigen Entwicklungen möglich sind, die sich jenseits der historisch verfügbaren Datengrundlagen bewegen.

Im Rahmen des DIFENS-Projekts¹ wurde das empirische Waldwachstumsmodell FABio-Forest mithilfe des biophysikalischen Waldwachstumsmodells 4C erweitert, um den Zuwachs lebender Biomasse unter Klimawandelbedingungen besser abbilden zu können (Pfeiffer et al., 2025b). Die Version 2.0 des Modells berechnet den Zuwachs der Bäume klimasensitiv. Die Kalibrierung dieser Modellversion erfolgte anhand der zusammenfassenden Ergebnisse der BWI4 (BMEL, 2024) und der Kohlenstoffzwischeninventur im Jahr 2017 (Johann Heinrich von Thünen-Institut [Thünen-Institut], 2019). Für die Modellinitialisierung basierend auf den Bestandsdaten der Traktecken² standen zunächst aber weiterhin nur die Daten der BWI3 zur Verfügung. In der Modellversion FABio-Forest 2.4 konnten dann erstmalig die Trakteckendaten der BWI4 als Ausgangspunkt für die Modellierungen ab dem Jahr 2022 genutzt werden.

Der vorliegende Bericht diskutiert die Ergebnisse des CARESupreme-Szenarios auf Basis der aktuell verfügbaren Datengrundlagen des THG-Inventars 2025 (UBA, 2025), des Projektionsberichts 2025 (Förster et al., 2025), der Bundeswaldinventur 2022 (BMEL, 2024), den Ergebnissen aus CARESupreme (Harthan et al., 2025, FABio-Forest 1.7) sowie detaillierter neuer Modellläufe mit FABio-Forest 2.0 und 2.4. Folgende Fragestellungen stehen hierbei im Mittelpunkt:

- ▶ Wie gut kann FABio-Forest die **historisch berichtete THG-Bilanz** der lebenden Bäume im Wald abbilden?
- ▶ Wie verändert sich die THG-Bilanz der lebenden Bäume, wenn **jährliche Klimadaten anstelle von Mittelwerten** als Treiber verwendet werden?
- ▶ Wie unterscheiden sich die THG-Bilanzen der lebenden Bäume im CARESupreme-Szenario zwischen **unterschiedlichen FABio-Forest Versionen**?
- ▶ Wie sind die Modellierungsergebnisse zu THG-Bilanzen der lebenden Bäume im Vergleich zu den Ergebnissen des **Projektionsberichts einzuordnen**, und welche Rolle spielen die im CARESupreme-Szenario **umgesetzten Waldmaßnahmen**?

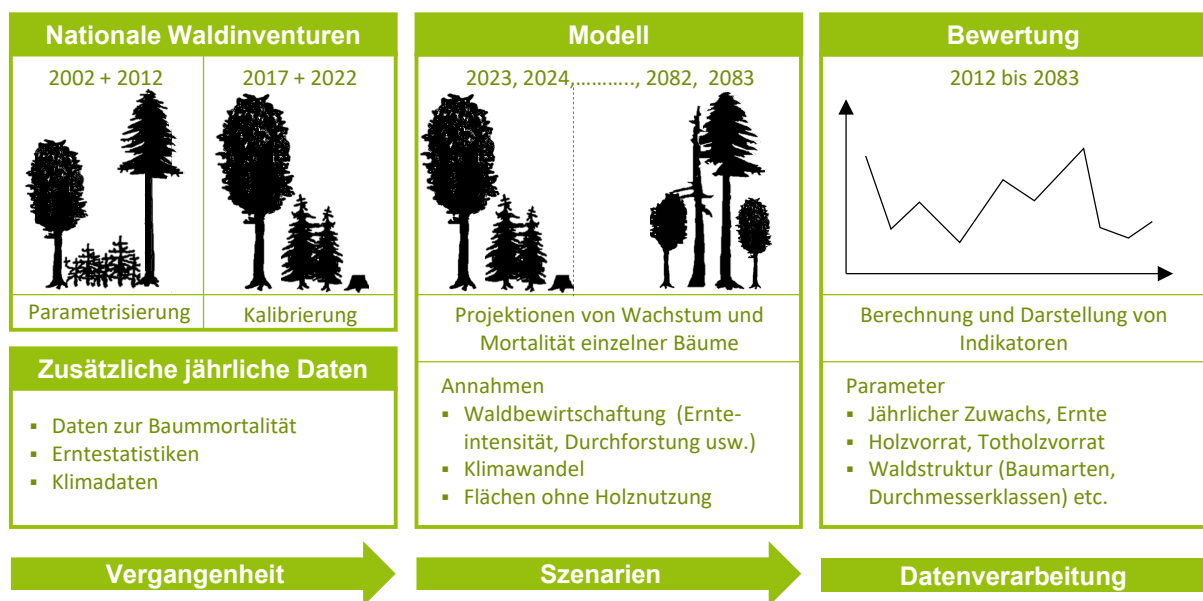
¹ DIFENS-Projekt: „Waldentwicklung als Folge von Veränderung der Holznachfrage, Klimaveränderung, natürlichen Störungen und Politikanforderungen - Eine Analyse der Reaktionsmöglichkeiten von Forst- und Holzwirtschaft“ (Dealing with Impacts on Forests under changing End-use demand, climate change, natural disturbances and policy goals). Teilvorhaben 1: Szenarien der Waldentwicklung unter veränderten Klimabedingungen, FKZ 2220WK32A4.

² Erhebungspunkte der Waldinventuren.

2 FABio-Forest

FABio-Forest ist ein empirisches Waldwachstums- und Waldbewirtschaftungsmodell, das auf Basis der Daten der Bundeswaldinventuren die Entwicklung der Waldbestände in Deutschland simuliert. Abbildung 2 illustriert den Aufbau und die Funktionsweise von FABio-Forest. Es beschreibt das Wachstum und die Dynamik der an den Traktecken erfassten Bestände mithilfe eines distanzunabhängigen Einzelbaumwachstumsmodells. Dabei werden 24 in der BWI erfasste Artengruppen separat berücksichtigt. Für jeden simulierten Einzelbaum werden Eigenschaften wie Baumart, Alter, Brusthöhendurchmesser (BHD) und Höhe modelliert. Diese Attribute werden über artspezifische Wachstumsfunktionen fortgeschrieben. Ausführliche Modellbeschreibungen finden sich in Böttcher et al. (2018a), Pfeiffer et al. (2023) und Pfeiffer et al. (2025a). Im Folgenden werden methodische Aspekte, die für das Verständnis der in dieser Studie dargestellten Ergebnisse hilfreich sind, beschrieben.

Abbildung 2: Prozessablauf und Informationsfluss im Waldmodell FABio-Forest



Quelle: Pfeiffer et al. (2025a)

2.1 Modellstruktur

Das Waldwachstumsmodell ist modular aufgebaut und besteht aus mehreren interagierenden Submodulen. Ein zentrales Modul ist das Zuwachsmodul. Dieses Modul simuliert die jährliche Volumenzunahme einzelner Bäume in Abhängigkeit von Baumart, BHD, Höhe, Konkurrenzsituation im Bestand sowie standörtlichen Bedingungen.

Funktional ähnlich aufgebaut ist das Mortalitätsmodul. Dieses berechnet jährlich die Absterbewahrscheinlichkeit der einzelnen Bäume in Abhängigkeit von Baumart, Durchmesser, Alter, Konkurrenz, Standort und Baumartenvielfalt. Zusätzlich werden in der historischen Periode beobachtete Schwankungen der mittleren Mortalität – differenziert nach Hauptbaumartengruppen – durch eine dynamische Skalierung berücksichtigt. Diese erfolgt über jährlich berichtete Mortalitätsdaten aus der Waldzustandserhebung³, mit denen die artspezifischen Grundfunktionen relativ zur Parametrisierungs- und Referenzperiode 2002-

³ Daten verfügbar unter <https://wo-apps.thuenen.de/apps/wze/>

2012 angepasst werden. Die dynamische Skalierung wird während der Fortschreibung entsprechend den getroffenen Annahmen verwendet.

Seit der Entwicklung der Modellversion 1.7 beinhaltet FABio-Forest ein Holznachfrage-Modul, das die jährliche Holzentnahme durch Ernte auf Basis der Nachfrage nach Stamm- und Industrieholz für Laub- und Nadelbäume simuliert. Die maximal erntbaren Holzmengen werden durch hinterlegte Bewirtschaftungsregeln begrenzt, um eine Übernutzung der Bestände zu verhindern. Liegt die Nachfrage unter dem verfügbaren Aufkommen, wird nur der nachgefragte Anteil entnommen. Übersteigt die Nachfrage das Aufkommen, weist das Modell den Differenzbetrag als Nachfragedefizit aus. Vor der eigentlichen Ernte berechnet das Sub-Modul zunächst die aus Mortalitätsholzentnahme und Pflegemaßnahmen stammenden Holzmengen und prüft, inwieweit diese bereits Teile der Nachfrage decken. Anschließend wird die verbleibende Nachfrage durch gezielte Ernte ergänzt.

Ergänzend enthält das Modell ein Einwuchs-, ein Totholz- und ein Bodenkohlenstoffmodell. Die Bewirtschaftung der simulierten Bestände wird über parametrisierte Bewirtschaftungsregeln gesteuert, die unter anderem Zieldurchmesserbereiche, Entnahmeintensitäten und Durchforstungsstrategien definieren. Diese können nach Bestandstyp, Baumartenzusammensetzung, Besitzstruktur und Bundesland differenziert werden.

2.2 Modellversionen

Alle Waldentwicklungsszenarien für CARESupreme wurden mit FABio-Forest berechnet. Dabei kamen im Zeitverlauf drei unterschiedliche Modellversionen zum Einsatz.

- ▶ **Version 1.7:** Diese Modellversion bildet die Baumzuwächse noch nicht klimasensitiv ab. Klimabedingte Zuwachsänderungen wurden stattdessen für bestimmte Perioden aus Expertenschätzungen abgeleitet. Zwar wurde auch in dieser Version die Mortalität für die historische Periode jahresscharf mithilfe der Daten der Waldzustandserhebung (WZE)³ skaliert; für die Fortschreibung wurde jedoch ein über historische Referenzzeiträume gemittelter Skalierungsfaktor verwendet, um unterschiedlich hohe Störungsintensitäten abzubilden.
- ▶ **Version 2.0 und 2.4:** Die neueren Modellversionen simulieren die Zuwächse jahresscharf und klimasensitiv. Für die Fortschreibung werden Witterungsreihen verschiedener historischer Referenzzeiträume verwendet, um Annahmen zu zukünftigen Klimaentwicklungen abzubilden. Zudem wird die Mortalität jahresscharf mithilfe der WZE-Daten³ skaliert und mit denselben Klima-Inputjahren verknüpft, die auch dem Zuwachsmodell zugrunde liegen.

Tabelle 1 bietet eine Übersicht zu den wesentlichen Unterschieden und Gemeinsamkeiten der drei Modellversionen.

Tabelle 1: Vergleich der Modellversionen FABio-Forest 1.7, 2.0 und 2.4

Modell-Modul	Version 1.7	Version 2.0	Version 2.4
Startdatensatz	BWI3		BWI4
Zuwachsfunktion	Nicht klimasensitiv, Minderung als Expertenschätzung	Klimasensitiv, Fortschreibung von Witterungsannahmen	
Mortalitätsfunktion	Fortschreibung mit mittlerem WZE-Daten-Skalierungsfaktor	Jahresscharfe Skalierung der Grundfunktionswerte mit WZE-Daten	

Modell-Modul	Version 1.7	Version 2.0	Version 2.4
Kalibrierung	Zusammenfassende Ergebnisse CI2017	Zusammenfassende Ergebnisse CI2017 und BWI4	
Mortalitätsholzentnahme	Vorgegebener Anteil vom Stamm- und Industrieholz abgestorbener Bäume		
Totholz-Modul	Ja		
Flächen ohne Nutzung	Ja		
Holzentnahme	Jährliche Annahme		

BWI4 = 4. Bundeswaldinventur, CI2017 = Kohlenstoffinventur aus dem Jahr 2017, WZE = Waldzustandserhebung.
Quelle: Eigene Zusammenstellung, Öko-Institut. Siehe Details im Text.

2.3 Natürliche Störungen in Modellversion 1.7

Da die Modellversion 1.7 noch nicht in der Lage war, Baumzuwächse klimasensitiv abzubilden und zum Zeitpunkt der Modellierung die Daten der vierten Bundeswaldinventur (BWI4) noch nicht vorlagen, stand keine deutschlandweite Datengrundlage zur Parametrisierung der Zuwachseinbrüche in den Extremjahren 2018–2022 zur Verfügung. Zur Abbildung der historischen Periode 2012–2021 und zur Fortschreibung unter unsicher vorhersehbaren Klimabedingungen wurde daher ein alternativer Ansatz verwendet.

Die Grundparametrisierung der artengruppenspezifischen Zuwachsfunktionen in FABio-Forest erfolgte ursprünglich auf Grundlage der Bestandsdaten der BWI2 und BWI3. Mithilfe der Volumenänderungen der zwischen 2002 und 2012 erhobenen Einzelbäume wurde der mittlere jährliche Zuwachs für die Wuchsbedingungen dieser Periode bestimmt und zur Parametrisierung herangezogen (Böttcher et al., 2018a).

Mit der Verfügbarkeit der Zwischeninventurdaten der Kohlenstoffinventur 2017 (CI2017) konnte die Güte dieser Grundzuwachsfunktionen für die Fortschreibung erstmals überprüft werden. Da die Wuchsbedingungen der Periode 2013–2017 nicht vollständig mit denen von 2002–2012 übereinstimmten, wurden die ursprünglichen Zuwachsfunktionen mittels eines deutschlandweit konstanten Skalierungsfaktors kalibriert, um die in der CI2017 berichteten Gesamt- und Artengruppen-Vorräte zu reproduzieren.

Für die Periode 2018–2022 lagen keine vergleichbaren Daten zur Kalibrierung vor. Die Parametrisierung erfolgte daher auf Basis von Expertenschätzungen, die sich u. a. auf in Studien publizierten Einzelmessungen von Bäumen stützten. In FABio-Forest 1.7 wurde infolgedessen für diese Periode ein durchschnittlicher Zuwachseinbruch von 50 % für Nadel- und 25 % für Laubbaumarten angenommen.

Um die Effekte verschiedener Störungsniveaus auf künftige Zuwächse abbilden zu können, erfolgte für die Simulation der Fortschreibungen eine konstante Skalierung der Grundzuwachs- und Mortalitätsfunktionen, gemittelt über unterschiedliche historische Zeiträume:

- ▶ Geringe Störungen: Zuwachsskalierung entsprechend dem Mittel der Periode 2013-2017; Mortalitätsskalierung entsprechend dem Mittel der Periode 2013-2017.
- ▶ Mittlere Störungen: Zuwachsskalierung entsprechend dem Mittel der Periode 2002-2017; Mortalitätsskalierung entsprechend dem Mittel der Periode 2002–2017.

- ▶ Hohe Störungen: Zuwachsskalierung entsprechend dem Mittel der Periode 2002-2017, multipliziert mit Faktor 0,9; Mortalitätsskalierung entsprechend dem Mittel der Periode 2002-2021.

Mit dieser Vorgehensweise konnten verschiedene Intensitäten natürlicher Störungen systematisch variiert und ihre Auswirkungen auf Wachstum, Mortalität und damit die Treibhausgasbilanz der lebenden Waldbäume abgebildet werden. FABio-Forest 1.7 wird in Pfeiffer et al. (2023) ausführlich beschrieben.

2.4 Klimasensitive Zuwachsmmodellierung in Modellversion 2.0

Im Rahmen des Waldklimafondsprojekts DIFENs wurde in Zusammenarbeit mit dem Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) die Entwicklung klimasensitiver Zuwachsfunktionen vorangetrieben, die eine direkte Kopplung des Baumwachstums an jährliche Klimavariablen ermöglichen. Die daraus hervorgegangene Modellversion FABio-Forest 2.0 baut strukturell auf der Vorgängerversion 1.7 auf, unterscheidet sich jedoch grundlegend in der Berücksichtigung von Klima- und Standortfaktoren.

Die Zuwachsfunktion setzt sich aus drei Komponenten zusammen: (1) individuelle Baummerkmale (z. B. BHD, Höhe), (2) Konkurrenz im Bestand und (3) standortspezifische Bedingungen (Bonität abgebildet als „Site Factor“). Die verwendete Bonität als Site Factor in FABio-Forest 1.7 repräsentiert die Wuchsbedingungen in der Referenzperiode 2003-2012 und integriert so die Aspekte wie Bodenbedingungen und Witterung. Um die Zuwachsfunktion klimasensitiv auszugestalten, wurde im Site Factor die Bonität durch die zwei Variablen nutzbare Feldkapazität (nFK) und Simpson-Diversitätsindex ersetzt. Mit diesem veränderten Site Factor wurden die artspezifischen Zuwachsfunktionen auf Grundlage der BWI2 und BWI3 neu parametrisiert. Die Struktur der Teilfunktionen für Baummerkmale und Konkurrenz blieb unverändert. So entstand eine klimaunabhängige Basiszuwachsfunktion.

Mithilfe von Ergebnissen des prozessbasierten Waldwachstumsmodells 4C (Lasch-Born et al., 2020) wurde die Zuwachsfunktion anschließend um explizite Klimaterme erweitert. Hierzu wurden mit 4C für die Hauptbaumartengruppen Fichte, Kiefer, Buche und Eiche an den BWI-Erhebungspunkten standortspezifische Zuwächse unter realen Witterungsbedingungen simuliert, angetrieben durch jährliche Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) der Jahre 1961-2021 als Modell-Input. Die Simulationsergebnisse aus 4C dienten als Grundlage, um neue Parameter für die empirischen Zuwachsfunktionen durch lineare Regression abzuleiten. Die Regressionsmodelle wurden für acht biogeografische Großregionen Deutschlands separat parametrisiert.

Die klimasensitive Erweiterung berücksichtigt drei Klimavariablen, die explizit in die Regressionsgleichungen der neuen Zuwachsfunktion eingingen:

- ▶ die **klimatische Wasserbilanz** der Vegetationsperiode (*vegKWB* – Wassereffekt),
- ▶ die **Wachstumsgradtage über 5 °C** (*gdd5* – kumulative Temperatureffekte) und
- ▶ die **mittlere Jahresstrahlung** (*MAR* – Lichtverfügbarkeit).

Der klimabedingte Einfluss von Wasser-, Temperatur- und Lichtverfügbarkeit wird in FABio-Forest 2.0 dadurch berechnet, dass für jedes simulierte Jahr der Klimaterm aus den drei Variablen bestimmt und in Bezug zu seinem Mittelwert der Referenzperiode 2002–2012 gesetzt wird. Der daraus resultierende standort-, arten- und jahresspezifische Klimafaktor wird anschließend auf die klimaunabhängige Basiszuwachsfunktion angewandt.

Um nichtlineare Effekte starken Wassermangels realistischer abzubilden, wurde zusätzlich ein sigmoidaler Korrekturfaktor implementiert, der den Zuwachs bei negativen vegKWB-Werten stärker reduziert.

Die Kalibrierung der klimasensitiven Zuwachsfunktionen erfolgte für die neun Hauptbaumartengruppen der BWI mithilfe der Zuwachs- und Vorratsdaten aus CI2017 und BWI4 (Stand Herbst 2024). Nach der Kalibrierung konnten die mittleren Zuwächse für die meisten Hauptbaumartengruppen sowohl für das Jahr 2017 als auch das Jahr 2022 nahezu exakt reproduziert werden; die Abweichungen im Gesamtvorrat betragen maximal 1 %.

Potenzial für weitere Verbesserungen besteht insbesondere durch eine räumlich explizite, klimaabhängige Implementierung der Mortalitätsfunktionen. In Version 2.0 werden klimatische Effekte – wie in 1.7 – in der Mortalitätsfunktion weiterhin anhand der räumlich nicht differenzierten, auf den WZE-Daten beruhenden Skalierung berücksichtigt. Für klimasensitive Projektionen wird jeweils der WZE-Skalierungsfaktor des entsprechenden Klimajahres der historischen Reihe herangezogen.

Die Modellversion FABio-Forest 2.0 wird ausführlich in Pfeiffer et al. (2025) beschrieben.

2.5 BWI4 als Modellversion 2.4

Die Modellversion FABio-Forest 2.4 unterscheidet sich funktional nicht von Version 2.0, verwendet jedoch ein aktualisiertes Initialisierungsjahr: anstelle der BWI3-Bestände (Erhebungsjahr 2012) dient nun das Jahr 2022 mit den entsprechenden Bestandsdaten der BWI4 als Ausgangspunkt der Simulation.

Dieser Unterschied kann für Fortschreibungen von Bedeutung sein. Während die in FABio-Forest 2.0 implementierte klimasensitive Modellierung und Rekalibrierung eine sehr gute Übereinstimmung der deutschlandweiten Zuwachs- und Vorratswerte mit den Ergebnissen der CI2017 und BWI4 erzielt, können die lokal simulierten Bestandsbedingungen an den einzelnen Traktecken im Jahr 2022 teils deutlich von der tatsächlichen Situation abweichen.

Gründe hierfür liegen darin, dass im Modell bislang keine Informationen darüber vorliegen, wo und wann Eingriffe und Störungen in welcher Intensität erfolgt sind – etwa Holzentnahmen, Kalamitäten oder die exakten Auswirkungen von Bewirtschaftungsmaßnahmen. Die im Modell hinterlegten Algorithmen und Regeln sind so ausgelegt, dass sie die aggregierten Mittelwerte und gesamtdeutschen Entwicklungen realistisch abbilden, jedoch nicht die räumlich-zeitliche Detailauflösung einzelner Bestände.

Damit stellt FABio-Forest 2.4 eine methodische Weiterentwicklung dar, die durch die Nutzung der BWI4 eine konsistentere Datengrundlage für künftige Projektionen bietet, zugleich aber – wie alle großskaligen Simulationsansätze – auf Ebene der Einzelbestände nur eingeschränkt die reale standortspezifische Dynamik widerspiegeln kann.

3 Szenarien

Zur Beantwortung der in dieser Studie formulierten Fragestellungen wurden Ergebnisse aus insgesamt 12 Modellläufen ausgewertet, die das Szenario CARESupreme und das Ohne-Maßnahmen-Szenario (OMS) abbilden (siehe Übersicht in Tabelle 4).

Das Szenario CARESupreme wurde im Rahmen des UBA-Projekts CARE entwickelt. Es basiert auf dem Narrativ, dass Klima- und Ressourcenschutz fest in Wirtschaft und Gesellschaft verankert sind. Effizienz und Suffizienz prägen das alltägliche Handeln (Harthan et al., 2025). Für die Waldbewirtschaftung wird in Laubholzbeständen die etablierte forstliche Praxis in Deutschland fortgeschrieben, angelehnt an das WEHAM Basisszenario (BMEL, 2016; vgl. Böttcher et al., 2018b). Für Nadelholzbestände wird hingegen eine Intensivierung der Bewirtschaftung angenommen (vgl. Hennenberg et al., 2024b).

Als Ausgangsbasis dienen die mittleren Holzentnahmemengen der Jahre 2013 bis 2017 nach der Einschlagsrückrechnung (Jochem et al., 2025; Jochem et al., 2024). Die Laubholzentnahme wird schrittweise durch Verringerung der Industrieholznachfrage reduziert: bis zum Jahr 2030 um 2 Mio. m³ und bis zum Jahr 2050 um weitere 3 Mio. m³ (Summe: 5 Mio. m³; siehe Abbildung 3). In CARESupreme wird eine hohe Mortalitätsholzentnahme von 90 % für Stammholz, 50 % für Industrieholz und 20 % für Restholz unterstellt. Basierend auf den Einstellungen der BWI3 sind in FABio-Forest 1.7 und FABio-Forest 2.0 4,0 % der Waldfläche im Modell direkt als „ohne Nutzung“ definiert, weitere 2,0 % bleiben de facto ungenutzt, da ihr Bestandstyp keinem der im Bewirtschaftungsdatenblatt definierten Bestandskriterien entspricht.

Um eine sinnvolle Bewirtschaftungsintensität in den Laubholzbeständen aufrecht zu erhalten, wurden parallel zur Reduktion der Holzentnahme sukzessive Laubholzflächen aus der Nutzung genommen, so dass bis 2050 insgesamt 11,3 % der Waldfläche unbewirtschaftet bleiben. Aufgrund veränderter Flächenkulisse (mehr erhobene Traktecken in der BWI4, teils andere Datenpunkte) sind in der Version 2.4 per default 3,5 % der Flächen außer Nutzung gestellt, durch sukzessive Stilllegung von Laubwaldflächen sind im Jahr 2050 9,9 % der Waldfläche außer Nutzung.

Das Ohne-Maßnahmen-Szenario (OMS) wurde von Rock et al. (2025) entwickelt und spiegelt die Veränderungen und Entwicklungen der Periode 2013–2022 wider („mittlere“ Veränderungen, OMS1222). Dieses Szenario wird in FABio-Forest nachgebildet. Der wesentliche Unterschied zu CARESupreme liegt in der angenommenen Holznachfrage (Abbildung 3). Im OMS beträgt die Nachfrage nach Laubholz im Jahr 2030 20,3 Mio. Efm und 22,9 Mio. Efm im Jahr 2050 und für Nadelholz 54,8 Mio. Efm (2023) und 49,6 Mio. Efm (2050). Damit liegen die mittleren nachgefragten Holzmengen deutlich über den in CARESupreme fortgeschriebenen Startwerten aus den Jahren 2013 bis 2017 (19,6 Mio. Efm für Laubholz; 48,6 Mio. Efm für Nadelholz, Abbildung 3).

In CARESupreme reduziert sich die Laubholznachfrage auf 17,8 Mio. Efm im Jahr 2030 und 15,1 Efm im Jahr 2050. Insgesamt ergibt sich damit eine niedrigere Gesamtholznachfrage im Vergleich zum OMS – im Jahr 2030 66,4 Mio. Efm gegenüber 75,2 Mio. Efm und im Jahr 2050 63,7 Mio. Efm gegenüber 72,5 Mio. Efm (vgl. Abbildung 3).

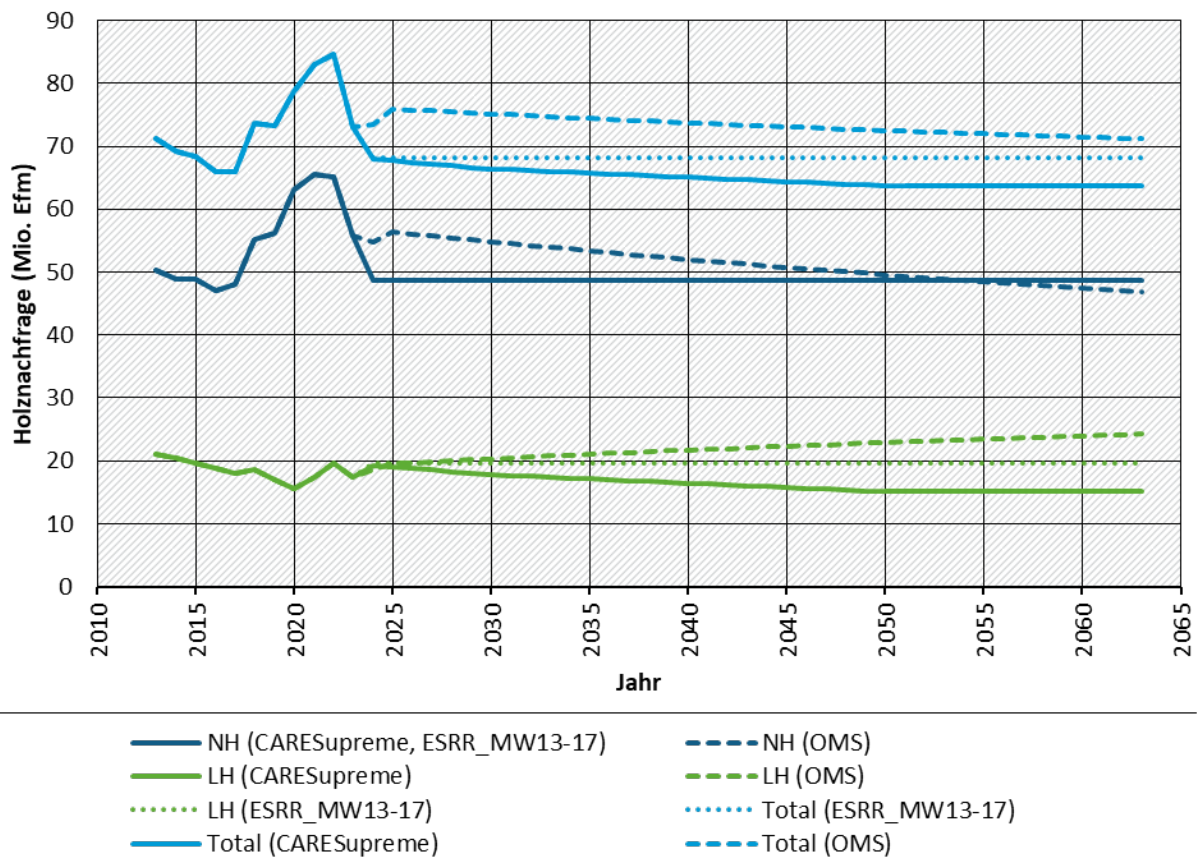
Tabelle 2: Annahmen in den Szenarien CARESupreme und OMS in FABio-Forest

Modellversion	CARESupreme	OMS
Holzentnahme	- Fortschreibung der Holzentnahme der Jahre 2013 bis 2017 - Reduktion der Laubholzentnahme bis 2030 um 2 Mio. m ³ und bis 2050 um 5 Mio. m ³	- Abgeleitet nach Angaben in Rock et al. (2025); siehe Abbildung 3
Mortalitätsholzentnahme	- Stammholz: 90 % - Industrieholz: 50 % - Restholz: 20 %	- Stammholz: 60 % - Industrieholz: 30 % - Restholz: 20 %
Flächen ohne Nutzung	4,0 % Null-Nutzung in Anlehnung an BWI3 und weitere ca. 6,5 % Nullnutzung in alten Laubbaumbeständen bis 2050	4,0 % Null-Nutzung in Anlehnung an BWI3, bzw. 3,5 % bei Initialisierung mit BWI4-Datensatz
Waldbewirtschaftung	- Laubholzbestände: Business as Usual (BAU) ⁴ - Nadelbäume: Intensive Nutzung ⁵	
Klimabedingungen bzw. natürliche Störungen	günstige / ungünstige Wuchsbedingungen (siehe Tabelle 3)	

Quelle: CARESupreme in Harthan et al. (2025) und OMS angelehnt an Rock et al. (2025). Eigene Darstellung, Öko-Institut.

⁴ Laubbäume: Zielstärkennutzung und Nutzungsintensität betragen im Mittel 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 von 10 % des Vorrats (weichlaubdominierte Bestände: 5 % des Vorrats).

⁵ Nadelbäume: Ausgehend von BAU wird die Nutzung intensiviert. Der jährliche Zuwachs wird vollständig abgeschöpft, die Durchforstungsintensität wird erhöht, mittlere Zieldurchmesser und Nutzungsintensität von 56 cm und 100 %.

Abbildung 3: Holznachfrage für Laub- und Nadelholz in den Szenarien CARESupreme und OMS

NH = Nadelholz, LH = Laubholz, ESRR = Einschlagsrückrechnung, MW13-17 = Mittelwert der Jahre 2013 bis 2017, OMS = Ohne-Maßnahmen-Szenario, Efm = Erntefestmeter ohne Rinde.

In Rock et al. (2025) wird der Abgang (Summe aus Holzentnahme, Durchforstung, natürliche Mortalität etc.) für OMS1222 (unten und siehe Tabelle 4) ausgewiesen. Anhand der Ergebnisdaten zur BWI4⁶ wurde der Anteil der Nutzung am Abgang je Baumartengruppe bestimmt (z.B. 85,6 % für Buche und 89,1 % für Fichte). Diese Faktoren wurden verwendet, um aus dem modellierten Abgang den Anteil an Nutzung zu ermitteln. Dieses Vorgehen wurde mit dem Thünen-Institut abgestimmt. Die ermittelte Nutzung wird in Efm umgerechnet und in FABio-Forest als Holznachfrage herangezogen.

Quelle: Harthan et al. (2025), Jochem et al. (2025), Rock et al. (2025), eigene Darstellung Öko-Institut.

Im OMS wird zudem eine geringere Mortalitätsholzentnahme angenommen (60 % Stammholz, 30 % Industrieholz, 20 % Restholz), und nur ca. 4 % der Waldfläche sind per Default außer Nutzung gestellt, d. h. es finden keine zusätzlichen Flächenstilllegungen im Zeitverlauf in Laubholzbeständen statt. In CARESupreme liegt der Anteil ungenutzter Flächen im Zeitverlauf durch die sukzessive Nutzungsaufgabe in bestimmten Laubbeständen höher, während die Mortalitätsholzentnahme, wie oben beschrieben, deutlich intensiver ausfällt. Weitere Bewirtschaftungsparameter wie Zielstärken, Ernte- und Durchforstungsintensitäten wurden in beiden Szenarien identisch gesetzt (vgl. Tabelle 2).

Für beide Szenarien wurden zudem identische Annahmen zu günstigen und ungünstigen Wuchsbedingungen berücksichtigt. In FABio-Forest 1.7 entsprechen günstige Bedingungen mittleren natürlichen Störungen, während in den Modellversionen 2.0 und 2.4 eine entsprechende Fortschreibung der Witterungsbedingungen und Mortalitätsraten der Jahre 2002-2022 zugrunde liegt. Ungünstige Wuchsbedingungen werden in FABio-Forest 1.7 als hohe

⁶ Ergebnisse der Bundeswaldinventur sind verfügbar unter <https://bwi.info/>

natürliche Störungen modelliert und in FABio-Forest 2.0 und 2.4 als Fortschreibungen der Witterungsbedingungen und Mortalitätsraten der Jahre 2012 bis 2022 (Tabelle 3).

Tabelle 3: Abbildung der Zuwachsminderung und der Mortalitätsrate

Modellversion	Günstige Wuchsbedingungen	Ungünstige Wuchsbedingungen
FABio-Forest 1.7	Mittlere natürliche Störungen (mS): Mortalität und Zuwachs verhalten sich wie der Mittelwert der Jahre 2002 bis 2017	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
FABio-Forest 2.0 und 2.4	Fortschreibung der Witterung der Jahre 2002 bis 2022 unter Berücksichtigung der für die jeweiligen Jahre berichteten Mortalitätsraten	Fortschreibung der Witterung der Jahre 2012 bis 2022 unter Berücksichtigung der für die jeweiligen Jahre berichteten Mortalitätsraten

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Aus der Kombination der Annahmen zu Wuchsbedingungen, den jeweils verwendeten Ausgangsdaten der Bundeswaldinventuren (Initialisierung mit den Bestandsdaten der BWI3 bzw. BWI4 als Startwert) und den eingesetzten Modellversionen ergeben sich 9 Varianten bzw. Sensitivitäten, die mit FABio-Forest simuliert wurden (7 Modellläufe für CARESupreme und 2 für OMS; Tabelle 4).

Ergänzend wurden für den Szenarienvergleich drei weitere OMS-Sensitivitäten aus Rock et al. (2025) herangezogen. Sie repräsentieren unterschiedliche historische Vergleichszeiträume:

- ▶ OMS1217 – optimistische Bedingungen (2013–2017),
- ▶ OMS1222 – mittlere Bedingungen (2013–2022) und
- ▶ OMS1812 – pessimistische Bedingungen (2018–2022).

Tabelle 4: Benennung der betrachteten Szenarien und Sensitivitäten

Szenario	Wuchsbedingungen	Eingangsdaten	Modellversion	Benennung
CARESupreme	mittlere natürliche Störungen	BWI3	FABio-Forest 1.7	CS (mS, BWI3, F1.7)
CARESupreme	hohe natürliche Störungen	BWI3	FABio-Forest 1.7	CS (hS, BWI3, F1.7)
CARESupreme	Mittelwert 2003-2022	BWI3	FABio-Forest 2.0	CS (03-22(MW), BWI3, F2.0)
CARESupreme	zyklische Wiederholung 2003-2022	BWI3	FABio-Forest 2.0	CS (03-22, BWI3, F2.0)
CARESupreme	zyklische Wiederholung 2013-2022	BWI3	FABio-Forest 2.0	CS (13-22, BWI3, F2.0)
CARESupreme	zyklische Wiederholung 2003-2022	BWI4	FABio-Forest 2.4	CS (03-22, BWI4, F2.4)

Szenario	Wuchsbedingungen	Eingangsdaten	Modellversion	Benennung
CARESupreme	zyklische Wiederholung 2013-2022	BWI4	FABio-Forest 2.4	CS (13-22, BWI4, F2.4)
OMS	zyklische Wiederholung 2003-2022	BWI4	FABio-Forest 2.4	OMS (03-22, BWI3, F2.4)
OMS	zyklische Wiederholung 2013-2022	BWI4	FABio-Forest 2.4	OMS (13-22, BWI4, F2.4)
OMS	„mittlere Veränderung“ wie 2013-2022	BWI4	Matrix-Model, Thünen-Institut	OMS1222
OMS	„optimale Bedingungen“ wie 2013-2017	BWI4	Matrix-Model, Thünen-Institut	OMS1217
OMS	„pessimistische Bedingungen“ wie 2018- 2022	BWI4	Matrix-Model, Thünen-Institut	OMS1722

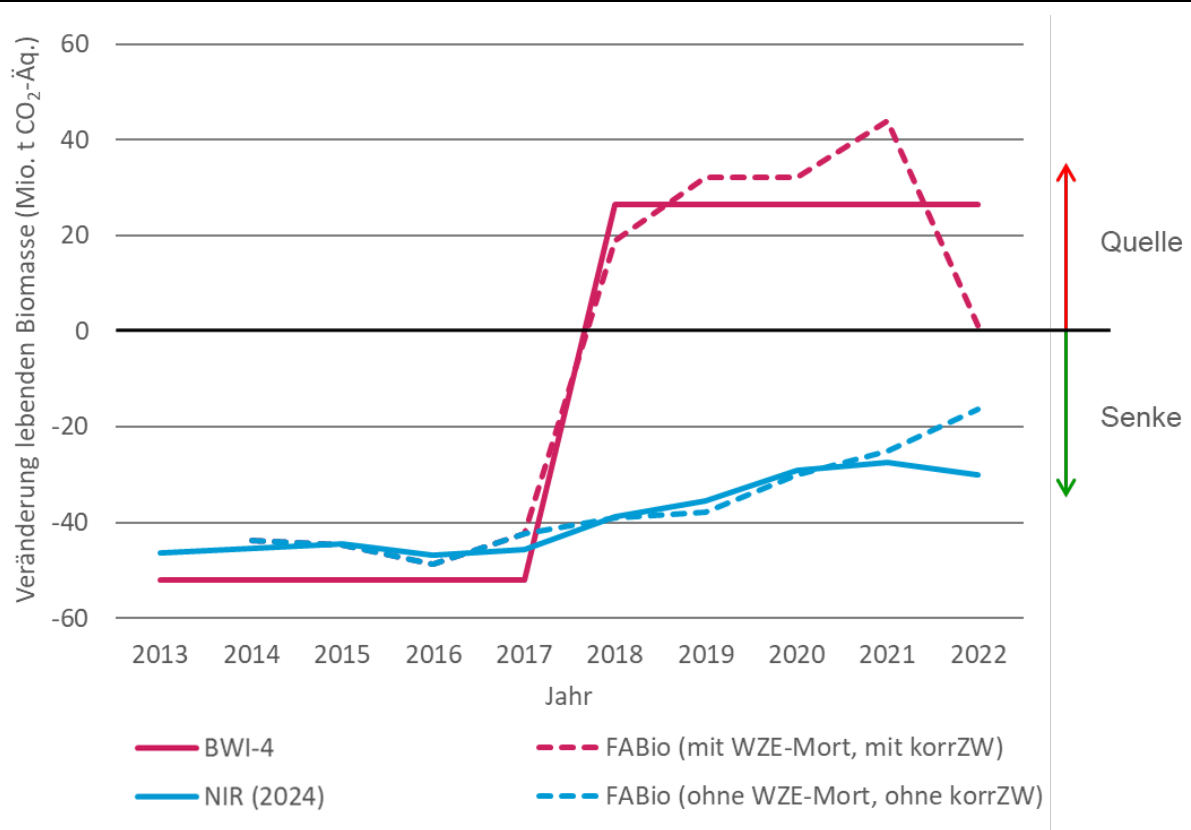
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

4 Ergebnisse

4.1 Wie gut kann FABio-Forest die historisch berichtete THG-Bilanz der lebenden Bäume im Wald abbilden?

In der Modellversion FABio-Forest 1.7 war eine klimasensitive Abbildung des jährlichen Biomassezuwachses noch nicht möglich. Zum Zeitpunkt der Modellierungen mit dieser Modellversion lagen zudem noch keine Ergebnisse der BWI4 zur Kalibrierung vor. Lediglich jährlich berichtete Daten zur Holzentnahme und Mortalität konnten direkt in die Modellierung einfließen. Um dennoch die Auswirkungen der extremen Witterungsbedingungen in der Periode 2018 bis 2022 zu berücksichtigen, wurde angenommen, dass die Zuwächse in diesen Extremjahren gegenüber der Periode 2013-2017 für Nadelbäume um 50 % und für Laubbäume um 25 % zurückgingen.

Abbildung 4: Vergleich THG-Bilanz der lebenden Bäume auf Basis der Ergebnisse der BWI4, NIR 2024 und der Modellierung in FABio-Forest 1.7



NIR = Nationale THG-Berichterstattung, BWI4 = 4. Bundeswaldinventur, FABio = FABio-Forest 1.7, WZE-Mort = Mortalität laut Waldzustandserhebung, korrZW = Zuwachsminderung gegenüber 2013 bis 2017 von 25 % für Laubbäume und von 50 % für Nadelbäume, lebende Biomasse = lebende Bäume der Waldfläche.

Quelle: Darstellung in Hennenberg et al. (2024a) auf Basis von UBA (2024), BMEL (2024) und Hennenberg et al. (2024c)

Nach Veröffentlichung der BWI4 erfolgte durch Hennenberg et al. (2024a) ein Vergleich der mit FABio-Forest 1.7 modellierten Ergebnisse (Hennenberg et al. 2024c) mit den BWI4-Daten und dem Nationalen THG-Inventar 2024 (UBA, 2024). Die wichtigsten Erkenntnisse (vgl. Abbildung 4) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das THG-Inventar 2024 der Bundesregierung stütze sich noch nicht auf die Ergebnisse der BWI4, sondern auf eine Fortschreibung der Kohlenstoffinventur 2017 (CI2017). Mit

vergleichbaren Parametereinstellungen in FABio-Forest 1.7 konnte die berichtete historische THG-Bilanz lebender Waldbäume für 2014-2022 sehr gut reproduziert werden (blaue Linien in Abbildung 4).

- ▶ In den Jahren 2013-2017 lagen die THG-Bilanzwerte der lebenden Bäume aus FABio-Forest 1.7 und aus dem Inventar 2024 leicht über den BWI4-Werten. Diese Abweichung resultiert aus der geringeren Stichprobengröße der CI2017 im Vergleich zur BWI4.
- ▶ Für die Jahre 2018-2022 konnten mit den Annahmen in FABio-Forest 1.7 THG-Bilanzen der lebenden Bäume berechnet werden, die den nach BWI4 berichteten Werten sehr nahekommen (rote Linien in Abbildung 4).

Insgesamt zeigen die Modellierungsergebnisse, dass FABio-Forest 1.7 bereits die historische Entwicklung der THG-Bilanz lebender Waldbäume sowohl für Phasen mit günstigen (2014-2017) als auch mit ungünstigen Wuchsbedingungen (2018-2022) richtungssicher wiedergeben kann. Dieses Ergebnis beruht im Wesentlichen auf drei Eingangsgrößen: (1) jährlich berichtete Holznachfrage-Werte, (2) jährlich berichtete Mortalitätsraten sowie (3) Schätzwerte zu Zuwachsveränderungen. Letztere hatten einen wesentlichen Einfluss auf die modellierte THG-Bilanz der lebenden Bäume, und machten die Ergebnisse stark von der Qualität der Expert*enschätzungen abhängig.

Mit FABio-Forest 2.0 wurde diese Einschränkung durch eine klimasensitive Modellierung der Zuwächse behoben. Zugleich standen für die Kalibrierung erstmals zusammenfassende Ergebnisse aus CI2017 und BWI4 zur Verfügung. Ausgehend von den Detaildaten der BWI3 im Jahr 2012 konnten die Gesamtvorräte nach BWI4 im Jahr 2022 mit einer Abweichung von nur +4,7 Mio. m³ modelliert werden. Dabei wurden die Vorräte der Nadelbäume um ca. 3 % überschätzt und die der Laubbäume um rund 3 % unterschätzt (Details in Pfeiffer et al., 2025b).

Abbildung 5 zeigt die jährliche, klimasensitiv modellierte THG-Bilanz der lebenden Bäume (blaue gestrichelte Linie). Die interannuellen Schwankungen ergeben sich im Wesentlichen aus jährlicher Variabilität in der Witterung, den Mortalitätsraten und der Holznachfrage. Mittelwertbildungen über die Inventurperioden (blaue durchgezogene Linie in Abbildung 5) ergeben modellierte THG-Bilanzen, die im Schnitt rund 6 Mio. t CO₂-Äq. über den mit der BWI4 berichteten Werten liegen. Dieser Unterschied spiegelt vor allem die leichten Vorratsabweichungen zwischen Modell- und Inventurergebnissen wider (Pfeiffer et al., 2025b).⁷

Analog zu Vizzarri et al. (2021) und Grassi und Pilli (2017) wurde diese systematische Abweichung über einen Skalierungsfaktor korrigiert, wodurch eine sehr gute Anschlussfähigkeit der modellierten Ergebnisse an die nationale THG-Berichterstattung erreicht wird (gelbe Linien in Abbildung 5). Der ermittelte Skalierungsfaktor wird anschließend auch auf die Projektionen ab dem Jahr 2023 angewendet (Korrektur erwarteter systematischer Abweichungen).

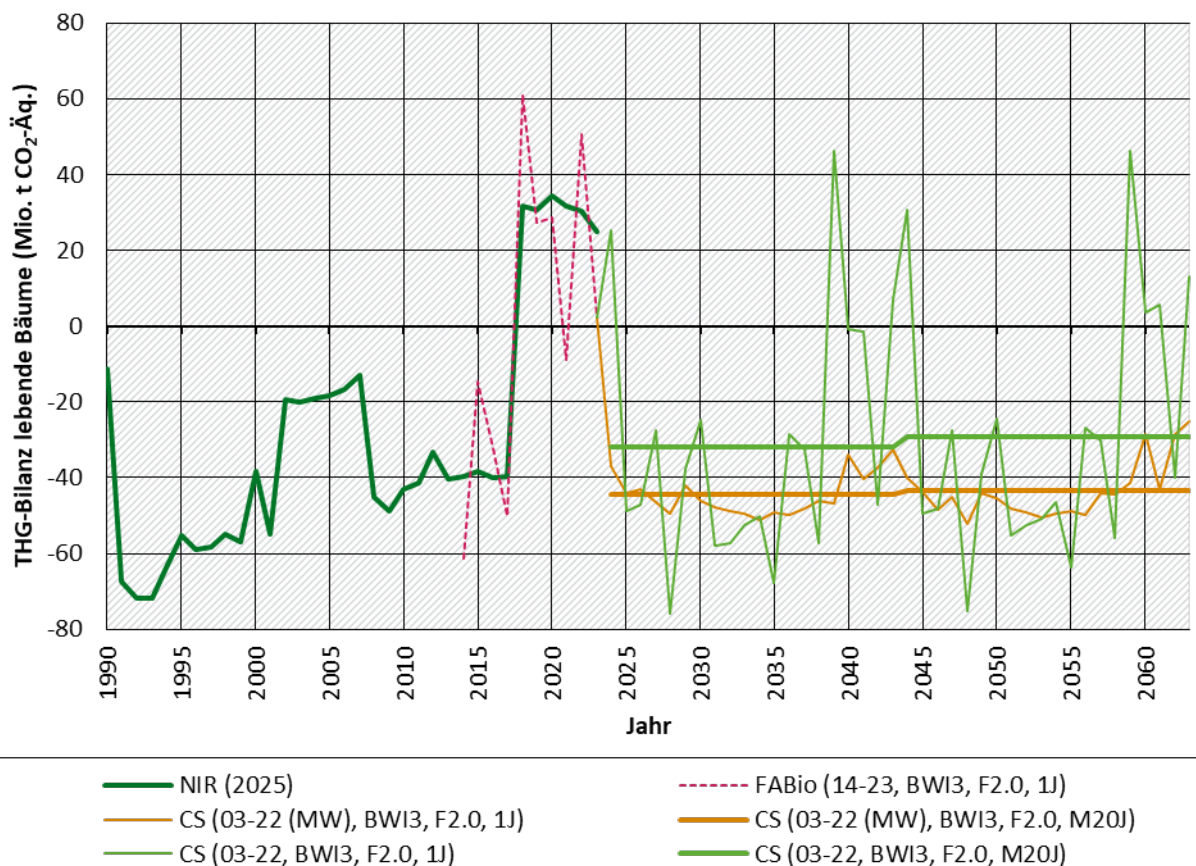
⁷ Im laufenden BMFTR-Projekt ForestOvershoot (FKZ 01LS2505B) wird eine weitere Verbesserung der Zuwachsfunktion auf Basis der seit Sommer 2025 verfügbaren Detaildaten der BWI4 angestrebt. Zudem soll die Mortalitätsfunktion räumlich explizit umgesetzt werden.

Da Zeitpunkt und Häufigkeit ungünstiger Witterungsjahre nicht vorhersehbar sind, bietet sich für eine vergleichende Ergebnisdarstellung die Betrachtung von Mittelwerten über die zyklisch wiederholten Perioden an. Für die Periode 2024-2043 ergibt sich für diese CARESupreme-Sensitivität ein mittlerer Senkenwert von -31,9 Mio. t CO₂-Äq., und für die Periode 2044-2063 ein Wert von -29,3 Mio. t CO₂-Äq.

Werden anstelle der jährlichen Witterungsdaten deren Mittelwerte über die jeweiligen 20-Jahres-Perioden als Treiberdaten in FABio-Forest eingesetzt, fallen die jährlichen Zuwachsschwankungen deutlich geringer aus. Dies beruht vor allem auf der im Modell hinterlegten sigmoidalen Abnahme des Zuwachses bei negativer klimatischer Wasserbilanz. Gleichzeitig werden auch sehr hohe Zuwächse in Jahren mit günstigen Bedingungen gedämpft. Die verbleibenden jährlichen Schwankungen der THG-Bilanz ergeben sich in diesem Fall primär aus den zyklisch wiederholten Modulationen der Mortalitätsraten.

Durch diese Glättungseffekte liegen die Mittelwerte der modellierten THG-Bilanz der lebenden Bäume mit gemittelten Witterungsinputdaten bei -44,5 (2024–2043) und -43,5 Mio. t CO₂-Äq. (2044–2063). Sie sind damit um 12,7 bis 14,2 Mio. t CO₂-Äq. niedriger als die Ergebnisse auf Grundlage jahresscharfer Witterungsdaten (Abbildung 6).

Abbildung 6: Auswirkungen der Verwendung von Klimadaten als jährliche Werte oder Mittelwerte auf die THG-Bilanz der lebenden Bäume



NIR = Nationale THG-Berichterstattung, CS = CARESupreme, 14-23 = Modellierung auf Basis berichteter Parameter der Jahre 2014 bis 2023, 03-22 = Modellierung auf Basis der Fortschreibung jahresscharfer Werte der Periode 2003 bis 2022, 03-22 (MW) = Modellierung auf Basis der Fortschreibung von Mittelwerten der Periode 2003 bis 2022, 1J / M20J = Darstellung der Ergebnisse als jährliche Werte / 20-jähriger Mittelwert, BWI3 = 3. Bundeswaldinventur, F2.0 = FABio-Forest 2.0.

Quelle: Daten zur lebenden Biomasse aus UBA (2025) und Modellergebnisse aus FABio-Forest 2.0, eigene Darstellung Öko-Institut.

Die vergleichende Analyse zeigt, dass die Verwendung gemittelter Witterungsdaten in FABio-Forest 2.0 und 2.4 zu einer Überschätzung der Senkenleistung lebender Waldbäume von etwa 13-14 Mio. t CO₂-Äq. führt. Ursache dafür ist, dass ungünstige Witterungsbedingungen die Zuwächse proportional deutlich stärker reduzieren als günstige Witterungsbedingungen sie erhöhen, womit sich die Senkenleistung der Bäume überproportional verringert. Daher sollte für Simulationen mit FABio-Forest 2.0 und 2.4 bevorzugt mit jahresscharfen Klimadaten gearbeitet werden, um realistischere THG-Bilanzen zu gewährleisten.

4.3 Wie unterscheiden sich die THG-Bilanzen der lebenden Bäume im CARESupreme-Szenario zwischen unterschiedlichen FABio-Forest-Versionen?

Abbildung 7 zeigt die modellierten THG-Bilanzen der lebenden Waldbäume im CARESupreme-Szenario für günstige und ungünstige Wuchsbedingungen unter Verwendung der Modellversionen FABio-Forest 1.7, 2.0 und 2.4.

Die Modellläufe mit FABio-Forest 2.0 und 2.4 unterscheiden sich ausschließlich in ihrer Initialisierung hinsichtlich der Bestandsdaten an den simulierten Traktecken, und damit einhergehend dem zeitlichen Startpunkt der Simulationen. In Fabio-Forest 2.0 wurden die Waldbestände basierend auf den BWI3-Daten aus 2012 initialisiert und die Entwicklung der Waldbestände bis 2022 simuliert. Dadurch treten erhöhte Mortalitätsereignisse räumlich gleichmäßig verteilt über Deutschland auf, da die WZE-Daten aufgrund ihres geringen Stichprobenumfangs keine räumlich differenzierte Mortalitätsparametrisierung zulassen. Auch die räumliche Realisierung der Holzernte basiert auf modellinternen Algorithmen, wodurch die Gesamtmengen, aber nicht die tatsächlichen historischen Entnahmemuster nachgebildet werden können. Dies hat zur Folge, dass sich im Jahr 2022 die räumlichen Muster der simulierten 1-ha-Flächen vom Muster der BWI4-Erhebungsdaten unterscheiden. FABio-Forest 2.4 verzichtet auf die Simulation der historischen Entwicklung zwischen 2012 und 2022, indem es zur Initialisierung der Bestände direkt die in der BWI4 veröffentlichten Bestandsdaten an den Traktecken im Jahr 2022 nutzt und diese als Ausgangsbasis zur Simulation der Waldentwicklung ab diesem Zeitpunkt verwendet.

Trotz der initialisierungsbedingten Unterschiede hinsichtlich Startjahr und Bestandesdaten in FABio-Forest 2.0 und 2.4 zeigen die Ergebnisse beider Modellversionen sehr vergleichbare THG-Bilanzen der lebenden Bäume. Abweichungen liegen lediglich zwischen 1,3 und 2,0 Mio. t CO₂-Äq. (vgl. Abbildung 7).

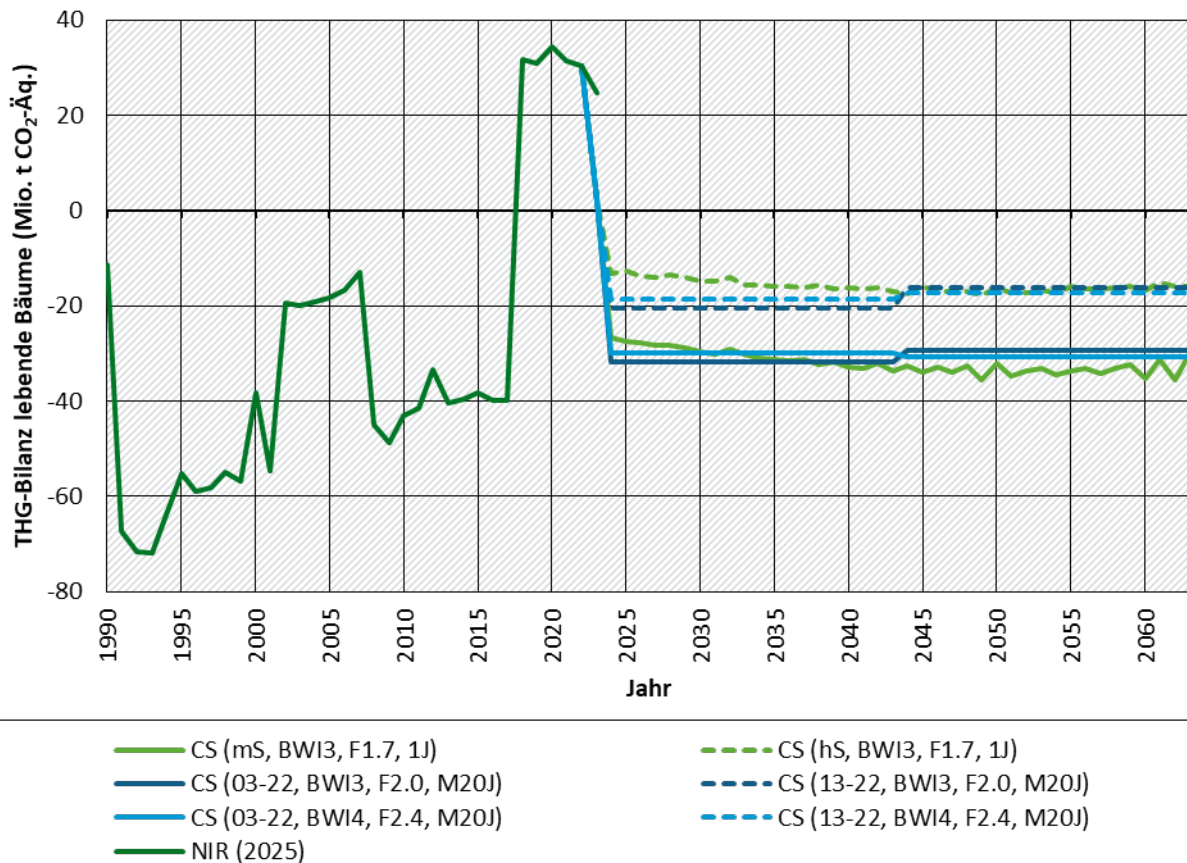
Die in FABio-Forest 1.7 verwendeten Algorithmen unterscheiden sich dagegen deutlich von jenen der neueren Versionen. Der Zuwachs wurde noch nicht klimasensitiv modelliert, sondern annahmenbasiert aus historischen Zeitreihen abgeleitet. Die Mortalitätswahrscheinlichkeiten wurden für die Simulation der Historie von 2012 bis 2022 zwar bereits mithilfe der WZE-Daten jahresscharf moduliert, für die Fortschreibung wurde jedoch passend zum jeweilig gewählten Zuwachsszenario der Mittelwert verschiedener historischer Perioden verwendet. Die Perioden zeichnen sich durch mehr oder weniger häufig und intensiv auftretende Schadjahre aus.

Wie in FABio-Forest 2.0 dienten die detaillierten Bestandsdaten der BWI3 auch in der Version 1.7 als Ausgangsdaten für die Initialisierung der Bestände im Jahr 2012. Die Ergebnisse der FABio-Forest 1.7-Läufe werden in Abbildung 7 als jährliche Werte dargestellt, da die Mittelwertbildung bereits auf Ebene der Annahmen zu Zuwächsen und Mortalität erfolgte. Trotz methodischer Unterschiede liegen die modellierten THG-Bilanzen sowohl für günstige als auch für ungünstige Wuchsbedingungen in einer ähnlichen Größenordnung wie in den Simulationen mit FABio-Forest 2.0 und 2.4. Besonders das Szenario CS (mS, BWI3, F1.7), welches günstige

Wuchsbedingungen und das Hauptszenario in CARESupreme repräsentiert, weist für die Periode 2024 bis 2043 einen Mittelwert von $-30,4$ Mio. t CO₂-Äq. auf und liegt damit zwischen den Werten der Modellläufe mit FABio-Forest 2.0 und 2.4. Dieser Ergebnisvergleich zeigt, dass die ursprünglichen Berechnungen in CARESupreme, obwohl noch auf BWI3-Daten beruhend, bereits als belastbar und richtungssicher gelten können.

In den Simulationen mit FABio-Forest 1.7 wird eine kontinuierliche Verbesserung der Senkenleistung (d. h. eine zunehmend negativere THG-Bilanz) über den Zeitverlauf abgebildet. Dieser Trend resultiert aus der kontinuierlichen Reduktion der Laubholzentnahme. In den Modellversionen FABio-Forest 2.0 und 2.4 wird dieser Effekt in den jahresscharfen Ergebnissen deutlich durch die klimasensitive Abbildung der Zuwächse überlagert (vgl. Abbildung 9 und Abbildung 10). In der Mittelwertdarstellung sowie in der jahresscharfen Darstellung ist der Einfluss der sinkenden Holzentnahme daher nicht mehr erkennbar. Um diesen Effekt in der Ergebnisdarstellung gezielt sichtbar zu machen, wäre beispielsweise ein Variantenvergleich zwischen Modellläufen mit und ohne veränderte Holzentnahme nötig, in denen ansonsten alle weiteren Einstellungen identisch gehalten werden.

Bei den Modellläufen mit FABio-Forest 2.0 zeigt sich im Zeitverlauf sowohl unter günstigen als auch unter ungünstigen Wuchsbedingungen eine Verschlechterung der THG-Bilanz (d. h. eine Abnahme der Senkenleistung) der lebenden Bäume. In FABio-Forest 2.4 tritt dieser Effekt bei ungünstigen Wuchsbedingungen zwar abgeschwächt ebenfalls auf, bei günstigen Wuchsbedingungen hingegen ist eine leichte Zunahme der Senkenleistung zu beobachten. Dies deutet darauf hin, dass die Verwendung der BWI3-Daten als Startdatensatz in FABio-Forest 2.0 eine leichte Unterschätzung der Senkenleistung der Wälder bewirkt.

Abbildung 7: Vergleich der Ergebnisse zur Waldmodellierung mit FABio-Forest 1.7, 2.0 und 2.4 für das Szenario CARESupreme

NIR = Nationale THG-Berichterstattung, CS = CARESupreme, ms / hS = mittlere / hohe natürliche Störungen, BWI3 / BWI4 = dritte / vierte Bundeswaldinventur, 03-22 / 13-22 = Modellierung auf Basis der Fortschreibung jahresscharfer Werte der Periode 2003 bis 2022 / 2013 bis 2022, M20J = Darstellung der Ergebnisse als 20-jähriger Mittelwert, F1.7 / F2.0 / F2.4 = FABio-Forest 1.7 / 2.0 / 2.4.

Quelle: Daten zur lebenden Biomasse aus UBA (2025), Modellergebnisse aus Harthan et al. (2025, FABio-Forest 1.7) und eigene Darstellung (FABio-Forest 2.0 und 2.4).

4.4 Wie sind die Modellierungsergebnisse zu THG-Bilanzen der lebenden Bäume im Vergleich zu den Ergebnissen des Projektionsberichts einzuordnen, und welche Rolle spielen die im CARESupreme-Szenario umgesetzten Waldmaßnahmen?

Im Projektionsbericht 2025 der Bundesregierung (Förster et al., 2025) werden für die THG-Bilanz der lebenden Waldbäume die Ergebnisse aus Rock et al. (2025) herangezogen. Im Szenario OMS1222 sind Veränderungen und Entwicklungen der Wälder analog zur Periode 2013–2022 abgebildet (siehe Abschnitt 3). Unter diesen Annahmen modelliert das am Thünen-Institut entwickelte Matrix-Modell (Rock et al., 2025) eine nahezu konstante Senkenleistung der lebenden Bäume von rund -9 Mio. t CO₂-Äq. (vgl. Abbildung 8). Diese Annahme entspricht einer gleich wahrscheinlichen Verteilung günstiger (wie in den Jahren 2013 bis 2017) und ungünstiger Wuchsbedingungen (wie in der Periode 2018 bis 2022), d. h. im Mittel weist die Hälfte der Jahre ungünstige Wuchsbedingungen auf.

Im Szenario OMS1822 wird die extreme Annahme zugrunde gelegt, dass ungünstige Wuchsbedingungen dauerhaft auftreten. Im Szenario OMS1217 hingegen wird die ebenfalls

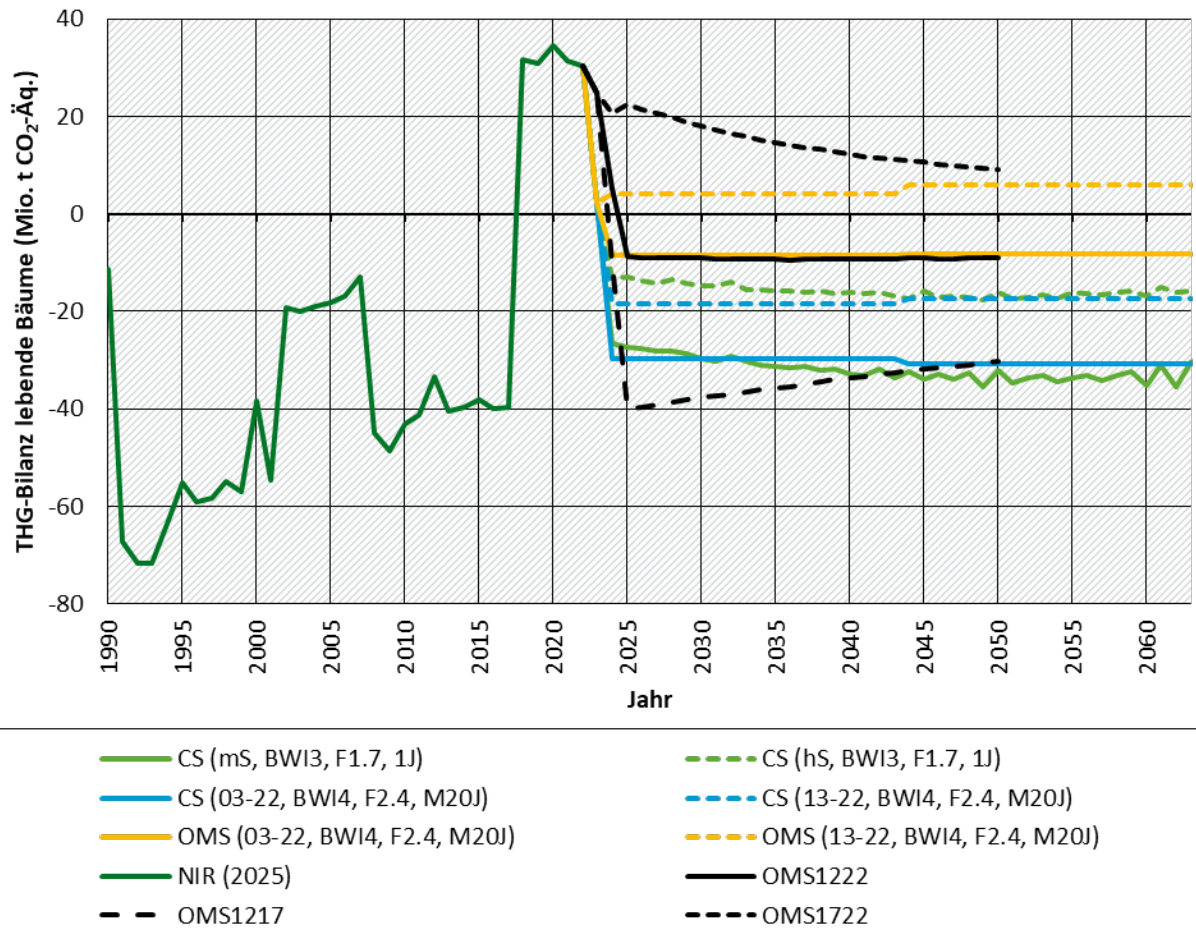
extreme Annahme abgebildet, dass konstant sehr günstige Wuchsbedingungen vorliegen. Diese beiden Extremszenarien spannen einen sehr breiten Korridor möglicher Entwicklungen der THG-Bilanz lebender Waldbäume auf (Abbildung 8).

In FABio-Forest 2.4 wurde das OMS nachgebildet. Grundlage waren die zur OMS1222 passenden Holznachfragewerte (Abbildung 3). Für die Fortschreibung der Witterung wurden die Bedingungen der Periode 2013 bis 2022 als ungünstige Wuchsbedingungen angenommen. Unter diesen Rahmenbedingungen ergibt sich eine modellierte THG-Bilanz der lebenden Bäume als Quelle von 4,1 bis 5,8 Mio. t CO₂-Äq. (OMS (13-22, BWI4, F2.4, M20J) in Abbildung 8). Damit ist die Bilanz um 13,2 bis 14,0 Mio. t schlechter als im OMS1222, obwohl beide Szenarien auf dieselbe Witterungsperiode Bezug nehmen.

Der Unterschied lässt sich durch die unterschiedlichen methodischen Ansätze beider Modelle erklären: FABio-Forest 2.4 nutzt eine jahresscharfe, klimasensitive Zuwachsmmodellierung, während das Matrix-Modell des Thünen-Instituts auf Mittelwertfortschreibungen basiert. Wie bereits durch die Sensitivitätsanalyse gezeigt, führt eine Simulation mit gemittelten Witterungsdaten in FABio-Forest zu einer systematischen Überschätzung der THG-Senkenleistung der lebenden Bäume um etwa 13 Mio. t CO₂-Äq. Die Größenordnung liegt damit sehr genau im Bereich der beobachteten Unterschiede zwischen den Szenarien OMS1222 und OMS (13-22, BWI4, F2.4, M20J). Um die Gründe für diese Unterschiede abschließend zu klären, wäre ein detaillierter Vergleich beider Modelle auf algorithmischer Ebene hilfreich, u. a. hinsichtlich genauer Implementierung von Zuwachs, Mortalität, Holzentnahme und Wechselwirkungen auf raumzeitlichen Skalen.

Werden im OMS in FABio-Forest 2.4 stattdessen günstigere Wuchsbedingungen fortgeschrieben (z. B. 2003–2022), verbessert sich die THG-Bilanz der lebenden Bäume um 12,4 bis 14,1 Mio. t CO₂-Äq. auf –8,4 Mio. t CO₂-Äq. (OMS (03–22, BWI-4, F 2.4, M20J)). Dieser Wert stimmt nahezu mit dem Ergebnis des OMS1222 überein (Abbildung 8). Aufgrund der methodischen Unterschiede zwischen FABio-Forest und dem Thünen-Matrix-Modell erscheint es daher fachlich gerechtfertigt, diese beiden Szenarien als weitgehend vergleichbar einzustufen.

Abbildung 8: Einordnung der Ergebnisse der THG-Bilanz lebender Bäume im Wald aus CARESupreme gegenüber OMS unter Annahme günstiger und ungünstiger Wuchsbedingungen



NIR = Nationale THG-Berichterstattung, OMS = Ohne-Maßnahmen-Szenario, 1222 / 1217 / 1722 = Fortschreibung auf Basis der Ergebnisse aus den Waldinventuren für die Periode 2012 bis 2022 / 2012 bis 2017 / 2017 bis 2022, CS = CARESupreme, ms / hS = mittlere / hohe natürliche Störungen, BWI3 / BWI4 = dritte / vierte Bundeswaldinventur, 03-22 / 13-22 = Modellierung auf Basis der Fortschreibung jahresscharfer Werte der Periode 2003 bis 2022 / 2013 bis 2022, 1J / M20J = Darstellung der Ergebnisse als jährliche Werte / 20-jähriger Mittelwert, F1.7 / F2.4 = FABio-Forest 1.7 / 2.4.
Quelle: Daten zur lebenden Biomasse aus UBA (2025), Modellergebnisse aus Rock et al. (2025, OMS1222/1217/1722), Modellergebnisse aus Harthan et al. (2025, FABio-Forest 1.7) und eigene Darstellung (FABio-Forest 2.4).

In FABio-Forest 2.4 wurde das Szenario CARESupreme analog zum Modelllauf in FABio-Forest 1.7 simuliert. Gegenüber dem OMS unterscheidet sich CARESupreme insbesondere durch die Annahme einer reduzierten Holzentnahme (siehe Abbildung 3), eines höheren Anteils ungenutzter Waldflächen sowie einer intensiven Entnahme von Mortalitätsholz (vgl. Tabelle 2).

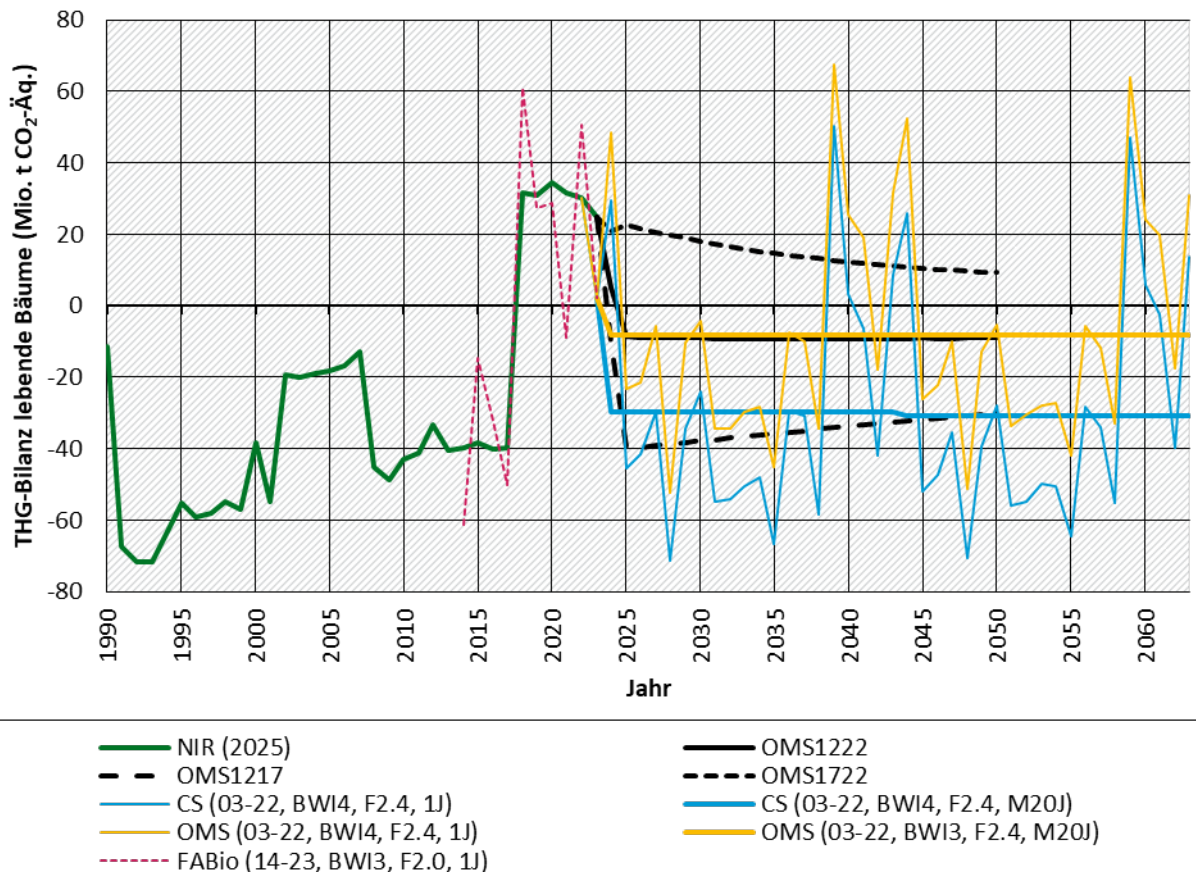
Unter günstigen Wuchsbedingungen verbessert sich in CARESupreme im Vergleich zum OMS die THG-Bilanz der lebenden Waldbäume um 22,4 bis 23,4 Mio.t CO₂-Äq., und es wird eine Senkenleistung von -29,8 bis -30,8 Mio. t CO₂-Äq. erreicht (CS (03-22, BWI4, F2.4, M20J)) in Abbildung 8 und Details zu jahresscharfen Ergebnissen in Abbildung 9).

Bei einer Fortschreibung ungünstiger Witterungsbedingungen zeigt sich in CARESupreme gegenüber dem OMS eine vergleichbare Verbesserung der THG-Bilanz um 22,6 bis 23,2 Mio. t CO₂-Äq. (CS (13-22, BWI4, F2.4, M20J)) gegenüber dem OMS (13-22, BWI4, F2.4, M20J) in Abbildung 8). Damit wird deutlich, dass die in CARESupreme implementierten

Maßnahmen zur veränderten Holzentnahme in CARESupreme unabhängig von den jeweiligen Witterungsbedingungen eine signifikante Klimaschutzwirkung entfalten.

Aufgrund der insgesamt ungünstigen Wuchsbedingungen fällt die absolute Senkenleistung in diesem Modelllauf jedoch geringer aus und liegt bei $-18,6$ bis $-17,4$ Mio. t CO₂-Äq. (Abbildung 8 und Details zu jahresscharfen Ergebnissen in Abbildung 10).

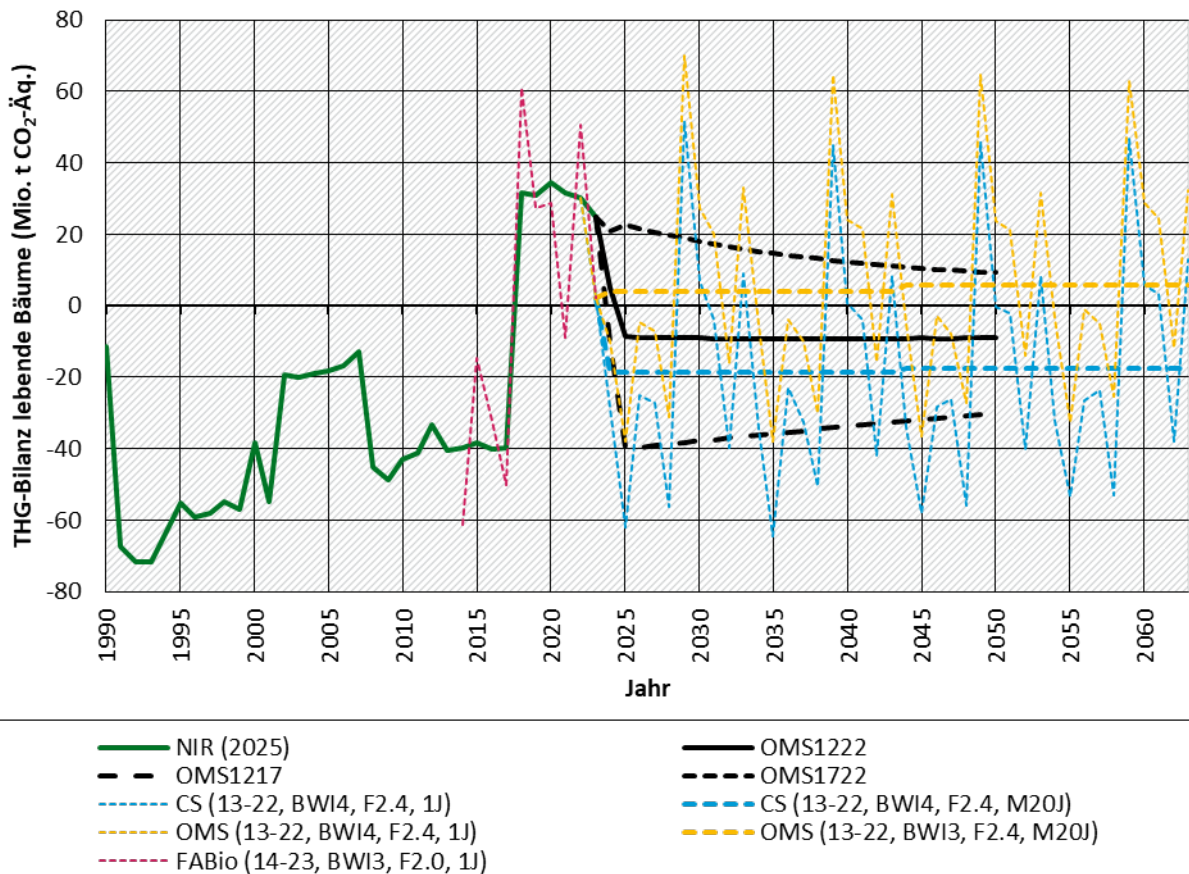
Abbildung 9: Jahresscharfe Ergebnisse aus CARESupreme und OMS unter Annahme günstiger Wuchsbedingungen



NIR = Nationale THG-Berichterstattung, OMS = Ohne-Maßnahmen-Szenario, 1222 / 1217 / 1722 = Fortschreibung auf Basis der Ergebnisse aus den Waldinventuren für die Periode 2012 bis 2022 / 2012 bis 2017 / 2017 bis 2022, CS = CARESupreme, BWI3 / BWI4 = dritte / vierte Bundeswaldinventur, 14-23 = Modellierung auf Basis berichteter Parameter für die Jahre 2014 bis 2023, 03-22 = Modellierung auf Basis der Fortschreibung jahresscharfer Werte der Periode 2003 bis 2022, 1J / M20J = Darstellung der Ergebnisse als jährliche Werte / 20-jähriger Mittelwert, F2.0 / F2.4 = FABio-Forest 2.0 / 2.4.

Quelle: Daten zur lebenden Biomasse aus UBA (2025), Modellergebnisse aus Rock et al. (2025, OMS1222/1217/1722) und eigene Darstellung (FABio-Forest 2.0 / 2.4).

Abbildung 10: Jahresscharfe Ergebnisse aus CARESupreme und OMS unter Annahme ungünstiger Wuchsbedingungen



NIR = Nationale THG-Berichterstattung, OMS = Ohne-Maßnahmen-Szenario, 1222 / 1217 / 1722 = Fortschreibung auf Basis der Ergebnisse aus den Waldinventuren für die Periode 2012 bis 2022 / 2012 bis 2017 / 2017 bis 2022, CS = CARESupreme, BWI3 / BWI4 = dritte / vierte Bundeswaldinventur, 14-23 = Modellierung auf Basis berichteter Parameter für die Jahre 2014 bis 2023, 13-22 = Modellierung auf Basis der Fortschreibung jahresscharfer Werte der Periode 2013 bis 2022, 1J / M20J = Darstellung der Ergebnisse als jährliche Werte / 20-jähriger Mittelwert, F2.0 / F2.4 = FABio-Forest 2.0 / 2.4.
 Quelle: Daten zur lebenden Biomasse aus UBA (2025), Modellergebnisse aus Rock et al. (2025, OMS1222/1217/1722) und eigene Darstellung (FABio-Forest 2.0 / 2.4).

5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Szenarienanalysen auf Basis des CARESupreme-Szenarios, des THG-Inventars 2025, des Projektionsberichts 2025, der Bundeswaldinventur 2022 wurden unter Verwendung dreier Versionen des FABio-Forest-Modells erzeugt und ermöglichen eine fundierte Beantwortung der in der Einleitung aufgeworfenen Fragestellungen.

Wie gut kann FABio-Forest die historisch berichtete THG-Bilanz der lebenden Bäume im Wald abbilden?

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass das Waldwachstumsmodell FABio-Forest die historischen Bedingungen bereits mit der Modellversion 1.7 sehr gut wiedergeben kann. Durch eine klimasensitive Modellierung der Zuwächse und Kalibrierung anhand der Daten der Kohlenstoffinventur 2017 sowie der Daten aus der BWI4 konnte die Reproduktion der historischen Entwicklung mit FABio-Forest 2.0 weiter verbessert werden.

FABio-Forest ist in der Lage, extreme Wachstumsbedingungen im Wald abzubilden: sowohl die sehr günstigen Bedingungen der Jahre 2013 bis 2017 als auch die sehr ungünstigen Verhältnisse der Jahre 2018-2022. Somit kann erwartet werden, dass Projektionen mit FABio-Forest innerhalb des beobachteten Wertebereichs verlässliche und richtungssichere Ergebnisse liefern.

Für die Jahre nach 2022 liegen bislang keine gemessenen Daten für die Waldfläche vor. Diese Lücke kann mithilfe von FABio-Forest fortlaufend verkleinert werden, indem das Modell jährlich mit aktuellen Treiberdaten, d.h. der Holznachfrage aus der Einschlagsrückrechnung des Thünen-Instituts und Klimadaten des DWD zur Fortschreibung genutzt wird (Abbildung 11). Derartige Modellierungen können potenziell dazu beitragen, die jährliche Kontinuität der THG-Berichterstattung zu ergänzen (Böttcher und Hennenberg, 2025) und frühzeitig sich abzeichnende Entwicklungen in den Wäldern abzubilden, noch bevor Daten und Ergebnisse aus den periodischen Waldinventuren vorliegen (Hennenberg et al., 2024a).

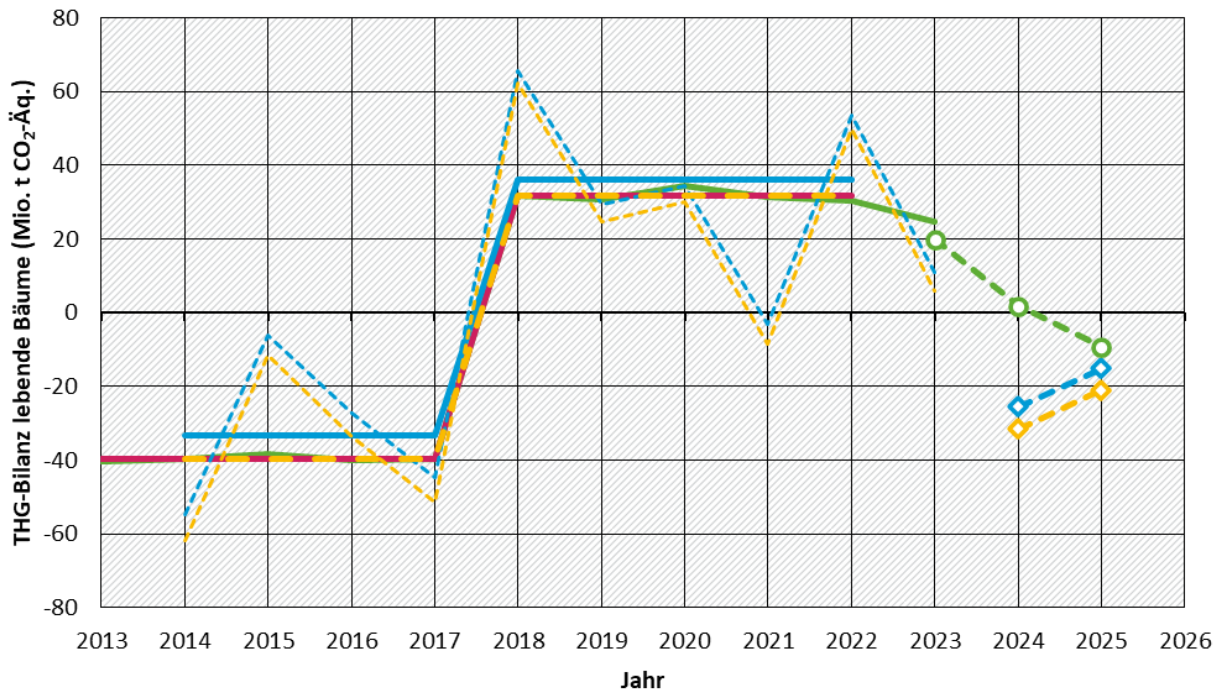
Dabei ist zu berücksichtigen, dass mit der Modellierung Unsicherheiten verbunden sind. Die extreme Trockenheit der Jahre 2018-2020 könnte Bäume langfristig nachwirkend geschädigt haben, so dass sie weniger stark zuwachsen, als dies in der parametrisierten Zuwachsfunktion abgebildet ist. Die Modellierung ermöglicht jedoch Sensitivitätsanalysen, mit denen die Größenordnung dieser Unsicherheiten abgeschätzt werden kann.

Für die Fortschreibung der lebenden Biomasse im Wald wird empfohlen, im THG-Inventar die Ergebnisse verschiedener Waldmodelle – etwa der Modellierung am Thünen-Institut und mit FABio-Forest (Abbildung 11) – zusammenzuführen. Eine Ensemble-Modellierung wird beispielweise derzeit im BMFTR-Projekt ForestOvershoot⁸ anhand von fünf Waldmodellen umgesetzt. Auch die Auswertung von Fernerkundungsdaten kann die Beurteilung der Waldentwicklung ergänzend unterstützen.⁹

⁸ <https://cdrterra.de/consortia/forestovershoot/>

⁹ Siehe z.B. das Projekt FNEWs (Fernerkundungsbasiertes Nationales Erfassungssystem Waldschäden, <https://www.thuenen.de/de/institutsuebergreifende-projekte/fernerkundungsbasiertes-nationales-erfassungssystem-waldschaeden>)

Abbildung 11: Aktualisierte Nachstellung des Nationalen Treibhausgasinventars und Fortschreibung der Treibhausgasbilanz lebender Bäume bis zum Jahr 2025



- NIR (2025)
- FABio (14-23, BWI3, F2.0, 1J, ohne KF)
- FABio (14-23, BWI3, F2.0, 1J)
- ◇— FABio (24-25, BWI4, F2.4, 1J, ohne KF)
- UBA (2026)
- NIR (2025, 13-22, M5J)
- FABio (14-22, BWI3, F2.0, M5J, ohne KF)
- FABio (14-22, BWI3, F2.0, M5J)
- ◇— FABio (24-25, BWI4, F2.4, 1J)

NIR = Nationale THG-Berichterstattung, 14-23 = Modellierung auf Basis berichteter Parameter der Jahre 2014 bis 2023, 1J / M5J = Darstellung der Ergebnisse als jährliche Werte / fünfjähriger Mittelwert (für FABio 2014 bis 2017 Mittelwert über 4 Jahre), BWI3 = 3. Bundeswaldinventur, F2.0 = FABio-Forest 2.0, ohne KF = ohne Korrekturfaktor, FABio (14-23, BWI3, F2.0) und FABio (24-25, BWI4, F2.4) berücksichtigt eine Korrektur ($y=1,0304 \cdot x - 5,3151$), um den Anschluss an die berichteten Werte aus UBA (2025) zu bewerkstelligen. PB = Projektionsbericht der Bundesregierung

Für die Modellierung der Jahre 2014 bis 2023 in FABio-Forest 2.0 wurden gegenüber Abbildung 5 die Daten für die Holzentnahme (Jochem et al., 2025) und die Mortalitätsrate der Bäume (BMLEH, 2025) aktualisiert. Die Klimadaten wurden beibehalten. Die Jahre 2024 und 2025 wurden mit FABio-Forest 2.4 auf Basis der BWI4-Daten modelliert. Holzentnahme und Mortalitätsrate der Bäume stammen für das Jahr 2024 aus den genannten Quellen. Für das Jahr 2025 wurde der Mittelwert der Jahre 2023 und 2024 verwendet. Die Klimadaten für die Jahre 2024 und 2025 wurden aus HYRAS Version 6.1 (Deutscher Wetterdienst, undatiert) bzw. für Strahlung aus ERA5 (Hersbach et al., 2023) für die BWI4-Traktecken extrahiert und aufbereitet.

Quelle: Daten zur lebenden Biomasse nach UBA (2025), UBA et al. (2026) und Modellergebnisse aus FABio-Forest (Version 2.0 und Version 2.4), eigene Darstellung Öko-Institut.

Wie verändert sich die THG-Bilanz der lebenden Bäume, wenn jährliche Klimadaten anstelle von Mittelwerten als Treiber verwendet werden?

Neben unterschiedlichen Modellversionen wurden auch verschiedene zeitliche Auflösungen der für FABio-Forest als Treiber genutzten Klimadaten getestet. Der Vergleich der Modellläufe zeigt deutliche Unterschiede zwischen Simulationen auf Grundlage jahresscharfer Klimadaten und solchen, die über 20 Jahre gemittelte Klimadaten verwenden. Wird im Modell mit gemittelten Klimawerten gearbeitet, ergibt sich eine höhere mittlere Senkenleistung über den Modellierungszeitraum als bei der Nutzung jahresscharfer Daten. Der mittlere Unterschied in

der THG-Bilanz der lebenden Bäume beträgt für den Zeitraum 2024 bis 2043 ca. 13 Mio. t CO₂-Äq.

Ursache dafür ist die unterschiedliche Gewichtung von Extremjahren: Perioden ausgeprägter Trockenheit reduzieren den Zuwachs der Bäume überproportional stark, während Jahre mit günstigen Wachstumsbedingungen die damit verbundenen Verluste nicht vollständig ausgleichen können. Durch die Mittelung der Klimadaten über den Zeitraum von 20 Jahren werden solche Extremjahre geglättet bzw. eliminiert. Dies führt dazu, dass eine Waldmodellierung mit gemittelten Klimadaten zu einer systematischen Überschätzung der Senkenleistung gegenüber einer Modellierung mit jahresscharfen Klimadaten führt.

Um eine realistischere Abbildung der Klimavariabilität zu gewährleisten, sollte die Modellierung der künftigen Entwicklung der THG-Bilanz lebender Bäume in Projektionen daher möglichst auf jahresscharfen Witterungsdaten basieren. So kann die durch Verwendung gemittelter Werte wahrscheinliche Überschätzung des Klimaschutzbeitrags der Wälder vermieden werden.

Wie sich eine noch feinere zeitliche Auflösung der Klimadaten – etwa im prozessbasierten Waldmodell 4C (Lasch-Born et al., 2020) – auf die Modellierung der Zuwächse und die THG-Bilanz der lebenden Bäume auswirkt, lässt sich am zuverlässigsten durch den parallelen Einsatz mehrerer unterschiedlicher Waldwachstumsmodelle untersuchen (sogenannte Ensemble-Modellierung). Ein entsprechender Ansatz unter Verwendung von fünf unterschiedlichen Modellen wird im vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) geförderten Verbundprojekt ForestOvershoot¹⁰ im Rahmen des CDRterra 2 Programms umgesetzt.

Wie unterscheiden sich die THG-Bilanzen der lebenden Bäume im CARESupreme-Szenario zwischen unterschiedlichen FABio-Forest Versionen?

Für den Ergebnisvergleich unterschiedlicher FABio-Forest-Versionen wurden Szenarien herangezogen, die jeweils günstigen bzw. ungünstigen Wuchsbedingungen zugeordnet werden können (Abschnitt 3). In der Modellversion 1.7 repräsentiert das Szenario mS günstige, das Szenario hS ungünstige Wuchsbedingungen. Ergänzend wurden mit dem Szenario gS (geringe natürliche Störungen, Harthan et al., 2025) sehr günstige und mit dem Szenario shS (sehr hohe natürliche Störungen, nicht veröffentlicht¹¹) sehr ungünstige Wuchsbedingungen abgebildet, wie sie beispielsweise in der Periode 2018 bis 2022 vorherrschten.

In der Modellversion 2.0/2.4 erfolgt die Unterscheidung über Bezugsperioden: die Periode 2003-2022 steht für günstige, die Periode 2013 bis 2022 für ungünstige Wuchsbedingungen. Sehr günstige bzw. ungünstige Wuchsbedingungen würden durch die Perioden 2003-2017 bzw. 2018-2022 repräsentiert (nicht dargestellt).

Die ermittelten THG-Bilanzen der lebenden Bäume für günstige und ungünstige Wuchsbedingungen liegen in den verschiedenen FABio-Forest-Versionen in vergleichbarer Größenordnung. Insbesondere das CARESupreme-Hauptszenario mit mittleren natürlichen Störungen (mS, berechnet mit Version 1.7) zeigt in den Jahren 2024 bis 2043 nur geringfügige Abweichungen vom klimasensitiven Szenario, das mit aktualisierten BWI4-Detaildaten und der neueren Modellversion 2.4 berechnet wurde.

¹⁰ Verbundprojekt CDRterra 2: Realisierung von negativen Emissionen durch Waldbewirtschaftung und innovative Holzverwendung im Bauwesen in Deutschland bei zunehmendem Störungsrisiko und Overshooting (ForestOvershoot) - Teilprojekt 2: Analysen mit dem empirischen Waldbewirtschaftungsmodell FABio-Forest. FKZ: 01LS2505B

¹¹ Dieses Szenario wurde bewusst nicht veröffentlicht, da es sehr unwahrscheinlich ist, dass in den nächsten Jahrzehnten konstant Bedingungen wie in der Periode 2018 bis 2022 herrschen.

Zu berücksichtigen ist, dass mit der Version 1.7 zwar eine jahresscharfe Modellierung des Waldwachstums erfolgt, die Annahmen zu Zuwachsreduktion und Mortalität jedoch auf einer Mittelwertfortschreibung beobachteter Werte sowie auf Experten-Schätzungen beruhen. Daher gelten die oben diskutierten Einschränkungen der Mittelwertfortschreibung auch hier. Dennoch ermöglichen die Szenarien mS und hS in Version 1.7 – unter Einbezug historischer Entwicklungen - bereits richtungssichere Aussagen zur THG-Bilanz der lebenden Bäume.

Der Vergleich der Modellversionen zeigt insgesamt, dass die mit FABio-Forest 1.7 erzielten CARESupreme-Ergebnisse als belastbar einzustufen sind. Eine nachträgliche Korrektur der Ergebnisse oder abgeleiteten Aussagen ist daher nicht erforderlich.

Wie sind die Modellierungsergebnisse zur THG-Bilanz der lebenden Bäume im Vergleich zu den Ergebnissen des Projektionsberichts einzuordnen, und welche Rolle spielen die im CARESupreme-Szenario umgesetzten Waldmaßnahmen?

Im Projektionsbericht 2025 der Bundesregierung wird das Szenario OMS1222 als erwartbares Referenzszenario verwendet. Es basiert auf einer Fortschreibung der Bedingungen der Jahre 2013–2022 mit dem Matrix-Modell des Thünen-Instituts (Rock et al. 2025).

Der Vergleich der mit FABio-Forest berechneten Projektionen zeigt, dass die Ergebnisse für das OMS-Szenario hinsichtlich der THG-Bilanz lebender Bäume weitgehend mit jenen des Projektionsberichts 2025 (OMS1222) übereinstimmen, wenn im Modell FABio-Forest zyklisch wiederholte Klimadaten der Jahre 2003 bis 2022 verwendet werden. Werden dagegen ausschließlich die im Mittel klimatisch trockneren Jahre 2013 bis 2022 fortgeschrieben, verschlechtert sich die modellierte jährliche Senkenleistung um etwa 13 Mio. t CO₂-Äq.

Daraus lässt sich schließen, dass die im Projektionsbericht berechnete Senkenleistung der lebenden Bäume für das OMS-Szenario tendenziell überschätzt ist. Ursache dafür ist die Mittelwertfortschreibung von Witterungsbedingungen durch den methodischen Ansatz des Matrix-Modells, durch den die Auswirkungen extremer Trockenjahre nicht ausreichend abgebildet werden.

Die Fortschreibung im für den Projektionsbericht genutzten Matrix-Modell (Rock et al. 2025) erfolgt zudem relativ starr, da die Parametrisierung an feste Inventurzeiträume (2013 bis 2017, 2018 bis 2022 und 2013 bis 2022) gebunden ist. Die Annahme, dass künftig etwa die Hälfte aller Jahre so ungünstige Wuchsbedingungen wie die Jahre der Periode 2018 bis 2022 aufweisen werden, ist ebenso zu hinterfragen wie die Fortschreibung der überdurchschnittlich günstigen Wachstumsbedingungen von 2013 bis 2017. Ein moderaterer Korridor der Wuchsbedingungen im Rahmen des OMS, wie er mit FABio-Forest abbildbar ist, erscheint realitätsnäher.

Die Szenarienvergleiche verdeutlichen außerdem, dass maßnahmenbasierte Veränderungen in der Waldbewirtschaftung, insbesondere eine Reduktion der Laubholzentnahme und eine stärkere Nutzung von Mortalitätsholz, die Senkenleistung lebender Bäume um mehr als 22 Mio. t CO₂-Äq. erhöhen können. Eine wesentliche Erkenntnis ist dabei, dass diese Minderungswirkung weitgehend unabhängig von den unterstellten Wuchsbedingungen bleibt. Somit leisten die untersuchten Maßnahmen einen robusten und wirksamen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele im Landnutzungssektor.

6 Quellenverzeichnis

- Böttcher, H. und Hennenberg, K. (2025). Analyse europäischer Monitoringsysteme für eine zeitgerechte Abbildung der Klimaschutzfunktion des Waldes in Deutschland für die nationale THG-Berichterstattung (Fact Sheet). Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7979>
- Böttcher, H., Hennenberg, K. und Winger, C. (2018a). FABio-Waldmodell: Modellbeschreibung Version 0.54 Stand Nov. 2017. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/FABio-Wald-Modellbeschreibung.pdf> [04.02.2026]
- Böttcher, H., Hennenberg, K. J. und Winger, C. (2018b). Waldvision Deutschland - Beschreibung von Methoden, Annahmen und Ergebnissen. Öko-Institut. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Waldvision-Methoden-und-Ergebnisse.pdf> [04.02.2026]
- Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (Hrsg.) (2025): Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2024. <https://www.bmleh.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/waldzustandserhebung-2024.pdf> [18.07.2025]
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.) (2016). Wald und Rohholzpotenzial der nächsten 40 Jahre - Ausgewählte Ergebnisse der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung 2013 bis 2052. https://www.bundeswaldinventur.de/fileadmin/Projekte/2024/bundeswaldinventur/Downloads/BMEL_WEHA_M2013-2052_Broschuere_RZ03_web.pdf [04.02.2026]
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.) (2024). Der Wald in Deutschland - ausgewählte Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur. <https://www.bmleh.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/vierte-bundeswaldinventur.pdf> [04.02.2026]
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (o.J.): Hydrometeorologische Rasterdatensätze (HYRAS). https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/daily/hyras_de/ [09.03.2026]
- Förster, H., Repenning, J., Borkowski, K., Braungardt, S., Bürger, V., Cook, V., Emele, L., Görz, W. K., Haller, M., Hennenberg, K., Jörß, W., Kasten, P., Koch, M., Ludig, S., Mendelevitch, R., Moosmann, L., Nissen, C., Scheffler, M., Steinbach, I., . . . Vos, C. (2025). Treibhausgas-Projektionen 2025 für Deutschland (Projektionsbericht 2025). Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7906>
- Grassi, G. und Pilli, R. (2017). Projecting the EU forest carbon net emissions in line with the “continuation of forest management”: the JRC method. Joint Research Center (JRC). <https://doi.org/10.2760/844243>
- 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., Ludig, S., Matthes, F. C., Mendelevitch, R., Moosmann, L., Nissen, C., Repenning, J., . . . Vos, C. (2024). Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024) (Treibhausgas-Projektionen für Deutschland). Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7510>
- Harthan, R. O., Repenning, J., Bei der Wieden, M., Bürger, V., Braungardt, S., Cook, V., Emele, L., Hennenberg, K., Jörß, W., Kasten, P., Ludig, S., Mendelevitch, R., Moosmann, L., Pfeiffer, M., Scheffler, M., Steinbach, I., Wiegmann, K., Bussmann, S., Fleiter, T., . . . Yu, S. (2025). Ambitionierte Pfade für Treibhausgasneutralität in Deutschland: CARESupreme und CARETech: Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE). Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7983>
- Hennenberg, K., Böttcher, H., Reise, J. und Pfeiffer, M. (2024a). Entwicklungen der CO₂-Speicherleistung des Waldes frühzeitiger abschätzen – Einordnung der Ergebnisse der Bundeswaldinventur. Öko-Institut. Blog. <https://www.oeko.de/blog/entwicklungen-der-co2-speicherleistung-des-waldes-fruehzeitiger-abschaetzen-einordnung-der-ergebnisse-der-bundeswaldinventur/> [23.06.2025]

Hennenberg, K., Pfeiffer, M., Benndorf, A., Böttcher, H., Reise, J., Mantau, U., Köppen, S., Fehrenbach, H. und Bürck, S. (2024b). Auswirkungen der energetischen Nutzung forstlicher Biomasse in Deutschland auf deutsche und internationale LULUCF-Senken (BioSINK). Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau.

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7476>

Hennenberg, K., Pfeiffer, M., Böttcher, H. und Reise, J. (2024c). Kurzstudie zur Modellierung der THG-Bilanz der lebenden Bäume im Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) des Projektionsberichts. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau.

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7430>

Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P.; Biavati, G.; Horányi, A.; Muñoz Sabater, J. et al. (2023): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/CDS.ADBB2D47

Jochem, D., Seintsch, B. und Weimar, H. (2025). Thünen-Einschlagsrückrechnung stimmt mit BWI 4 überein.

AFZ-DerWald(1/2025), 49–51. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn069326.pdf [04.02.2026]

Jochem, D., Glasenapp, S., Morland, C. und Weimar, H. (2024). Thünen-Einschlagsrückrechnung 2023: Holzeinschlag und Rohholzverwendung. Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut).

<https://doi.org/10.3220/DATA20241206152004-0>

Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut) (2019). Kohlenstoffinventur 2017.

<https://bwi.info/?inv=THG2017> [04.02.2026]

Lasch-Born, P., Suckow, F., Reyer, C. P. O., Gutsch, M., Kollas, C., Badeck, F.-W., Bugmann, H. K. M., Grote, R., Fürstenau, C., Lindner, M. und Schaber, J. (2020). Description and evaluation of the process-based forest model 4C v2.2 at four European forest sites. Geoscientific Model Development, 13(11), 5311–5343.

<https://doi.org/10.5194/gmd-13-5311-2020>

OVG BEBB. (2024). Urteil vom 16.5.2024: Aktenzeichen 11 A 31/22.

<https://gesetze.berlin.de/perma?d=NJRE001587926> [04.02.2026]

Pfeiffer, M., Hennenberg, K., Böttcher, H., Reise, J. und Mantau, U. (2023). Referenzszenario der Holzverwendung und der Waldentwicklung im UBA-Projekt BioSINK: Öko-Institut Working Paper 4/2023.

<https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Referenzszenario-BioSINK.pdf> [24.11.2023]

Pfeiffer, M., Hennenberg, K., Nieberg, M., Benndorf, A., Reise, J. und Böttcher, H. (2025a). Waldmodellierung: Szenarien der Waldentwicklung unter veränderten Klimabedingungen mit dem Modell FABio-Forest im Rahmen des DIFENS-Projekts. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/DIFENS-Waldmodellierung.pdf> [25.06.2025]

Pfeiffer, M., Hennenberg, K., Reise, J., Benndorf, A., Böttcher, H. und Nieberg, M. (2025b). Szenarien der Waldentwicklung unter veränderten Klimabedingungen: Sachbericht zum Teilvorhaben 1 und Teilvorhaben 4 im Verbundvorhaben DIFENS.

https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/DIFENS_Sachbericht_Waldmodellierung.pdf [25.09.2025]

Rock, J., Adam, S., Bender, S., Dunger, K., Rüter, S. und Stümer, W. (2025). Effects of the 2018 - 2020 disturbances on the projected carbon balance of German forests and LULUCF climate protection targets (Thünen Working Paper Nr. 268). <https://doi.org/10.3220/253-2025-33>

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2024). National Inventory Document for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2022: Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change 2024.

<https://unfccc.int/documents/637995> [01.04.2025]

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2025). Submission under the United Nations Framework Convention 2025: National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2023.

https://unfccc.int/sites/default/files/resource/NID_Germany_2025.pdf?download [16.05.2025]

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2026): Treibhausgas-Projektionen 2026 – Ergebnisse kompakt. Treibhausgas-Projektionen für Deutschland. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-8361> [31.03.2026]

Vizzarri, M., Pilli, R., Korosuo, A., Blujdea, V. N. B., Rossi, S., Fiorese, G., Abad Viñas, R., Colditz, R. R. und Grassi, G. (2021). Setting the forest reference levels in the European Union: overview and challenges. *Carbon Balance and Management*, 16(23). <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00185-4>