



Waldmodellierung

Szenarien der Waldentwicklung unter veränderten
Klimabedingungen.
Modell FABio-Forest

Mirjam Pfeiffer, Klaus Hennenberg, Mats Nieberg, Anke Benndorf,
Judith Reise und Hannes Böttcher

INHALT

- 3 Hintergrund und Motivation
- 4 Waldwachstumsmodell
FABio-Forest
- 5 Unser Forschungsansatz
- 6 Innovative Methoden
- 7 Ausgewählte Ergebnisse
- 10 Schlussfolgerungen
- 11 Das Projekt DIFENS





Hintergrund und MOTIVATION

In den letzten Jahren sind ganze Waldbestände durch Extremereignisse wie Dürren, Hitzewellen und Stürme sowie daraus resultierende Borkenkäferschäden abgestorben. Besonders betroffen sind Wälder, die nicht standortangepasst sind, etwa Nadelholzbestände im Flachland. Zugleich steigen die Anforderungen an den Wald: Nationale und internationale Vorgaben fordern zunehmend, dass der Wald als Kohlenstoffspeicher und als wertvoller Lebensraum für zahlreiche Arten erhalten und gestärkt wird. Das bedeutet, dass die Waldbewirtschaftung auch gezielt an diesen Leistungen ausgerichtet werden muss.

Für eine zukunftsfähige Waldbewirtschaftung benötigen Entscheidungsträger verlässliche wissenschaftliche Informationen zur Entwicklung von Waldbeständen und Holzverwendung. Modelle bieten dabei eine wertvolle Unterstützung, indem sie verschiedene Szenarien und Annahmen durchspielen und so die zukünftigen Auswirkungen möglicher Maßnahmen abschätzen.

Das Wachstum von Bäumen wird von vielen Faktoren beeinflusst. Neben der Baumart spielen Klima, Boden und Lichtverhältnisse eine entscheidende Rolle. Empirische Waldmodelle, die auf historischen Daten wie den Ergebnissen der Bundeswaldinventur basieren, stoßen jedoch an ihre Grenzen, wenn sich die Klimabedingungen stark verändern. Deshalb ist es sinnvoll, solche empirischen Modelle mit prozessbasierten Ansätzen zu kombinieren, die auch klimabedingte Veränderungen der Wachstumsbedingungen abbilden können.

Im Projekt DIFENS, Teilvorhaben 2. „Szenarien der Waldentwicklung unter veränderten Klimabedingungen“, wurden diese beiden Modellansätze zusammengeführt. Ziel ist es, zentrale Fragen zur Waldbewirtschaftung im Klimawandel und unter neuen politischen Anforderungen zu beantworten:

- Wie beeinflussen veränderte Klimabedingungen das Waldwachstum und das Absterben von Bäumen – und was bedeutet es, wenn künftig auch Laubbäume stärker betroffen sind?
- Kann der Wald in Deutschland den künftigen Holzbedarf decken, und wieviel lässt sich durch eine ressourceneffizientere Holznutzung erreichen?
- Welche Auswirkungen hätte eine Ausweitung von Schutzgebieten auf die Waldentwicklung und die Holzversorgung?
- Wie kann die Waldbewirtschaftung auf die Veränderungen reagieren, und wie schnell wirken beispielsweise Waldumbaumaßnahmen, die auf mehr Klimastabilität der Wälder abzielen?

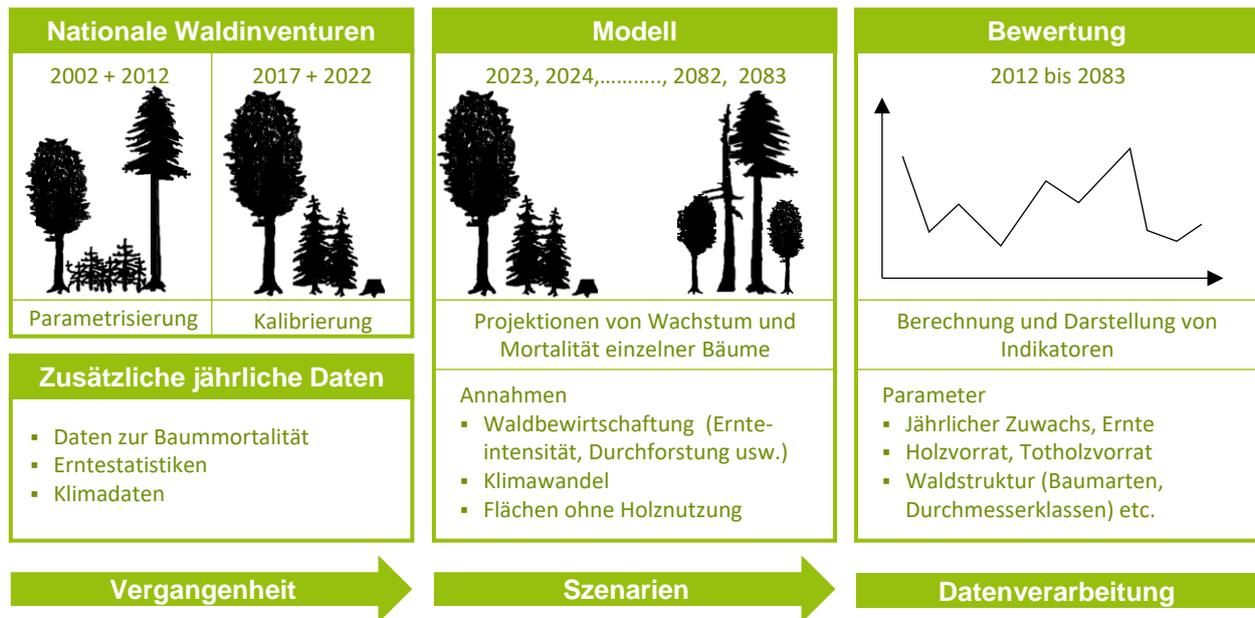


Abb. 1: Prozessablauf und Informationsfluss im Waldmodell FABio-Forest in dieser Fallstudie

Waldwachstumsmodell FABio-Forest

Das Waldwachstumsmodell [FABio-Forest](#) simuliert das Wachstum und die Entwicklung einzelner Bäume für 24 verschiedene Baumartengruppen. Die Grundlagen für die Zuwachs- und Mortalitätsfunktionen wurden empirisch auf Basis der Daten der 2. und 3. Bundeswaldinventur (BWI) abgeleitet. Anschließend erfolgte eine Kalibrierung mit aktuellen Ergebnissen der Kohlenstoffinventur 2017 sowie den zusammengefassten Daten der 4. BWI von 2022.

Um das empirische Modell auf klimatische Veränderungen reagieren zu lassen, wurden die Zuwachsfunktionen mithilfe des prozessbasierten Waldmodells [4C](#) erweitert. Dabei flossen als zentralen Einflussgrößen die jährliche klimatische Wasserbilanz der Vegetationsperiode, die Temperatursumme der Wachstumsgradtage über 5 °C sowie die mittlere Jahresstrahlung ein. Die Mortalitätsraten werden jährlich angepasst, um die

Auswirkungen extremer Witterungsereignisse abzubilden. Dazu werden die Ergebnisse der Waldzustandserhebungen genutzt.

Die Art der Bewirtschaftung hat großen Einfluss auf die Waldentwicklung. Sie wird im Modell durch detaillierte Bewirtschaftungsregeln abgebildet. Diese definieren beispielsweise Durchforstungsintervalle, Eingriffsintensitäten und Zieldurchmesser für die Ernte. Flächen können außerdem vollständig aus der Nutzung genommen werden.

Holz, das bei der Pflege des Waldes anfällt und genutzt werden kann, wird entnommen. Wenn mehr Holz gebraucht wird, wird zusätzlich gezielt geerntet – aber nur, wenn es die Bewirtschaftungsregeln erlauben. Weitere Teile des Modells beschreiben außerdem, wie junge Bäume nachwachsen, wie Totholz entsteht und abgebaut wird, und wie Kohlenstoff im Boden umgesetzt wird.

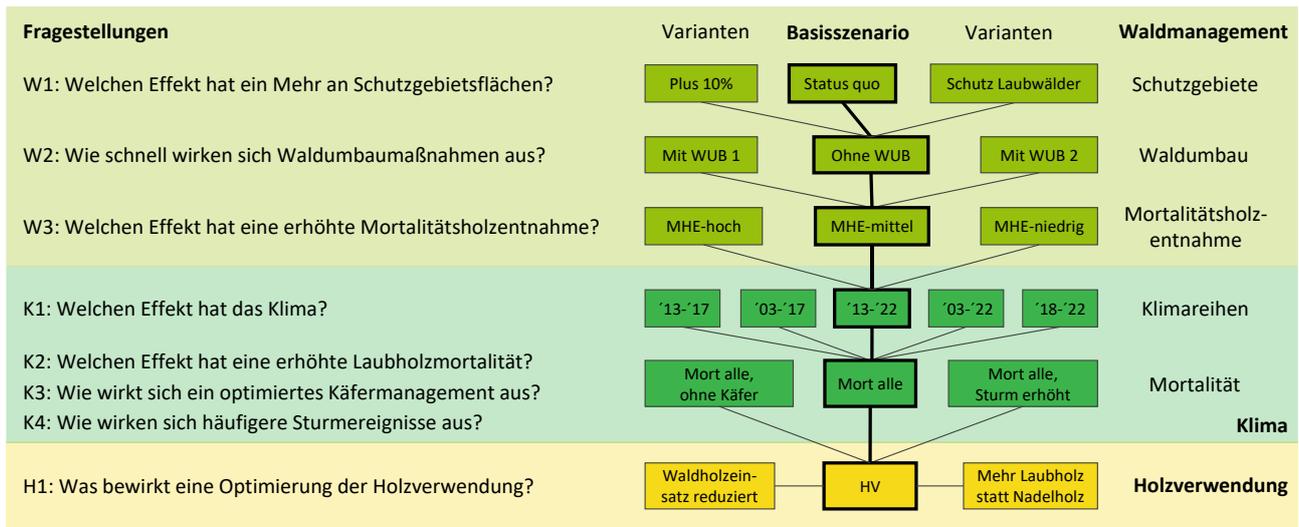


Abb. 2: Fragestellungen und Optionen der Szenarienauswahl im Szenarienbaum. WUB = Waldumbau, MHE = Mortalitätsholzentnahme, Mort alle = alle Mortalitätsursachen der Waldzustandserhebung, HV = Holzverwendung.

Unser FORSCHUNGSANSATZ

Die zukünftige Holznachfrage wurde mithilfe einer detaillierten Modellierung der Holzverwendung abgeschätzt (siehe [Broschüre Holzverwendung](#)). Sie stellt einen zentralen Einflussfaktor dar, der die Waldentwicklung im Modell FABio-Forest mit steuert. Weitere wichtige Einflussgrößen sind Annahmen zum zukünftigen Klima sowie zur Art der Waldbewirtschaftung. Als Grundlage für den Vergleich verschiedener Szenarien wurde zunächst ein **Basisszenario** entwickelt:

- Für die Klimabedingungen wurden die Verhältnisse aus dem Zeitraum 2013 bis 2022 fortgeschrieben. Das bedeutet, dass die extremen Wetterlagen der Jahre 2018 - 2022 künftig im Mittel in etwa der Hälfte aller Jahre auftreten.
- Die jährliche Mortalität der Bäume wurde auf Basis der Waldzustandserhebung an die jeweiligen Witterungsbedingungen angepasst.
- Nutzungsfreie Flächen, die Geschwindigkeit des Waldumbaus sowie weitere Bewirtschaftungsregeln blieben unverändert.

Die Szenarienanalyse ist eine bewährte Methode, um die Auswirkungen unterschiedlicher Annahmen auf die Waldentwicklung abzuschätzen. Dafür wurde, ausgehend vom Basisszenario, ein „Szenarienbaum“ mit verschiedenen Varianten entworfen (Abb. 2). Je nach Forschungsfrage wurden einzelne Annahmen gezielt verändert:

- Im Bereich **Waldmanagement** wurden die Annahmen zu Schutzgebieten, zum Waldumbau und zur Nutzung von abgestorbenen Bäumen variiert.
- Für die Analyse von **Klimaveränderungen** wurden verschiedene historische Wetterverläufe fortgeschrieben und dazu passende unterschiedliche Baumsterberaten durch Sturm oder zunehmende Schäden angenommen.
- Die Auswirkungen der **Holzverwendung** wurden durch verschiedene Annahmen zur Effizienz der Holznutzung untersucht.

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse dieser Analysen vorgestellt.

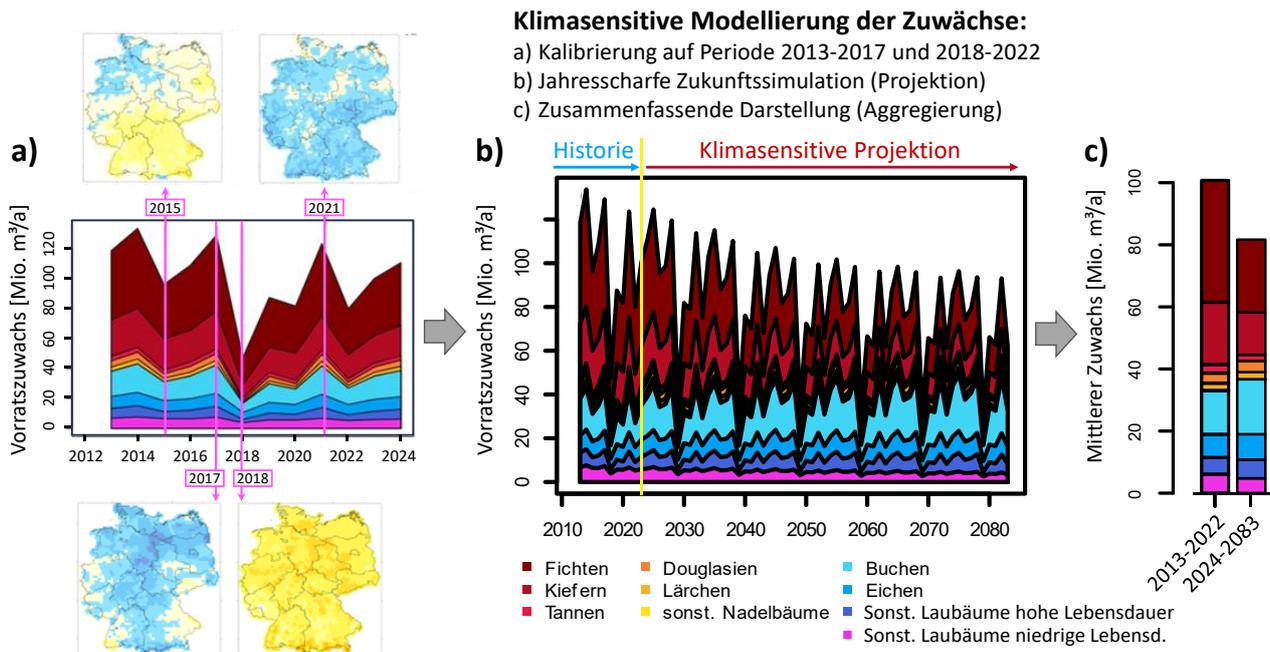


Abb. 3: Klimasensitive Modellierung in FABio-Forest und beispielhafte Ergebnisdarstellung (Karten: Anomalie der Klimatischen Wasserbilanz)

Innovative METHODEN

Im Projekt wurden im Modell FABio-Forest mehrere innovative Erweiterungen umgesetzt, die neue Perspektiven für die Analyse der Waldentwicklung eröffnen.

Holznachfrage als Treiber: Klassische Modellansätze steuern die Waldentwicklung nur nach Bewirtschaftungsregeln und entnehmen das mögliche Holzaufkommen. FABio-Forest nutzt zusätzlich die tatsächliche Holznachfrage als Treiber. So werden nur die nachgefragten Holzarten und -qualitäten als Teil des Holzaufkommens entnommen.

Verknüpfung mit TRAW: Die Nachfrage nach Holzarten und Sortimenten wurde mit dem Holzverwendungsmodell TRAW abgeschätzt. FABio-Forest bedient diese Nachfrage zunächst mit Holz aus Pflegemaßnahmen und Mortalitätsholzentnahme, und ergänzt die danach noch offene Nachfrage durch gezielte Ernte passender Sortimente.

Klimasensitives Baumwachstum durch Einbezug des Modells 4C: FABio-Forest ermittelt das Baumwachstum auf Basis von Stammdurchmesser, Höhe, Nachbarbäumen und Standortfaktoren. Um die Zuwachsfunktionen klimasensitiv zu gestalten, wurde mit dem prozessorientierten Modell 4C ermittelt, wie das Normalwachstum abhängig vom Klima variiert. Diese Abhängigkeiten werden nun als Funktion der jährlichen klimatischen Wasserbilanz der Vegetationsperiode, der Temperatursumme der Wachstumsgradtage über 5 °C sowie der mittleren Jahresstrahlung in FABio berücksichtigt.

Simulation zukünftiger Klimabedingungen: Zukünftige Wetterverhältnisse wurden aus historischen Zeitreihen konstruiert, um verschiedene Wachstumsbedingungen zu simulieren (Abb. 3). Die Ergebnisse wurden abschließend für eine bessere Vergleichbarkeit über den Simulationszeitraum gemittelt.

Ausgewählte ERGEBNISSE

Alle Ergebnisse unter:
<https://fabio-model.de>



Wirkung von Klimaveränderungen

Abb. 4a zeigt, dass mit häufigeren Wetterextremen die **Menge an nutzbarem Holz** zurückgeht und der Anteil an Mortalitätsholz steigt, d.h. Bäume sterben häufiger ab, bevor sie regulär geerntet würden. Das Angebot an nutzbarem Nadelholz verringert sich. Bis zu 25 Mio. m³ könnte diese mittlere jährliche Abweichung vom Nadelholzbedarf ausmachen (4b). Selbst im Fall weniger häufiger Extreme ist über die die Zeit betrachtet im Schnitt mit 12 Mio. m³ weniger Nadelholz zu rechnen.

Eine Ursache für den Rückgang an möglicher Holzernte sind Einbußen im **Zuwachs** (4c). Bei sehr häufigen Extremwetterereignissen könnte dieser um 35% sinken im Vergleich zu weniger häufigeren Dürren und anderen Störungen. Mit Folgen für den **Vorrat**, wie Abb. 4d zeigt. Statt 4 Mrd. m³ würde dieser im Mittel 3,2 Mrd. m³ erreichen, vor allem durch Verluste im Nadelholz. Als Konsequenz wird der Wald bei häufigen Wetterextremen von einer **CO₂-Senke** zu einer **CO₂-Quelle** (4f). Der **Totholzvorrat** hingegen nimmt mit steigende Wetterextremen leicht zu, da mehr Bäume absterben (4e).

Erläuterungen zur Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisse werden hier als Mittelwerte über die Simulationsperiode von 2024-2083 dargestellt. Die Auswirkungen unterschiedlicher Annahmen zum Klima werden in fünf Szenarien untersucht. Diese unterscheiden sich in der Häufigkeit von Wetterextremen, wie sie 2018 - 2022 aufgetreten sind (von wenig bis sehr häufig). Unterschieden werden zudem verschiedene Baumartengruppen.

Baumartengruppen

FI=Fichte, KI=Kiefer, TA=Tanne, DGL=Douglasie, LAE=Lärche, BU=Buche, EI=Eiche, SOLH=sonstige Laubbäume mit hoher Lebensdauer, SOLN=sonstige Laubbäume mit niedriger Lebensdauer, NH=Nadelholz/-bäume, LH=Laubholz/-bäume

Klimaszenarien (K1-K5)

Zyklische Fortschreibung der historischen Witterung. K1=2013-2017, K2=2003-2017, K3=2003-2023, K4=2013-2022, K5=2018-2022

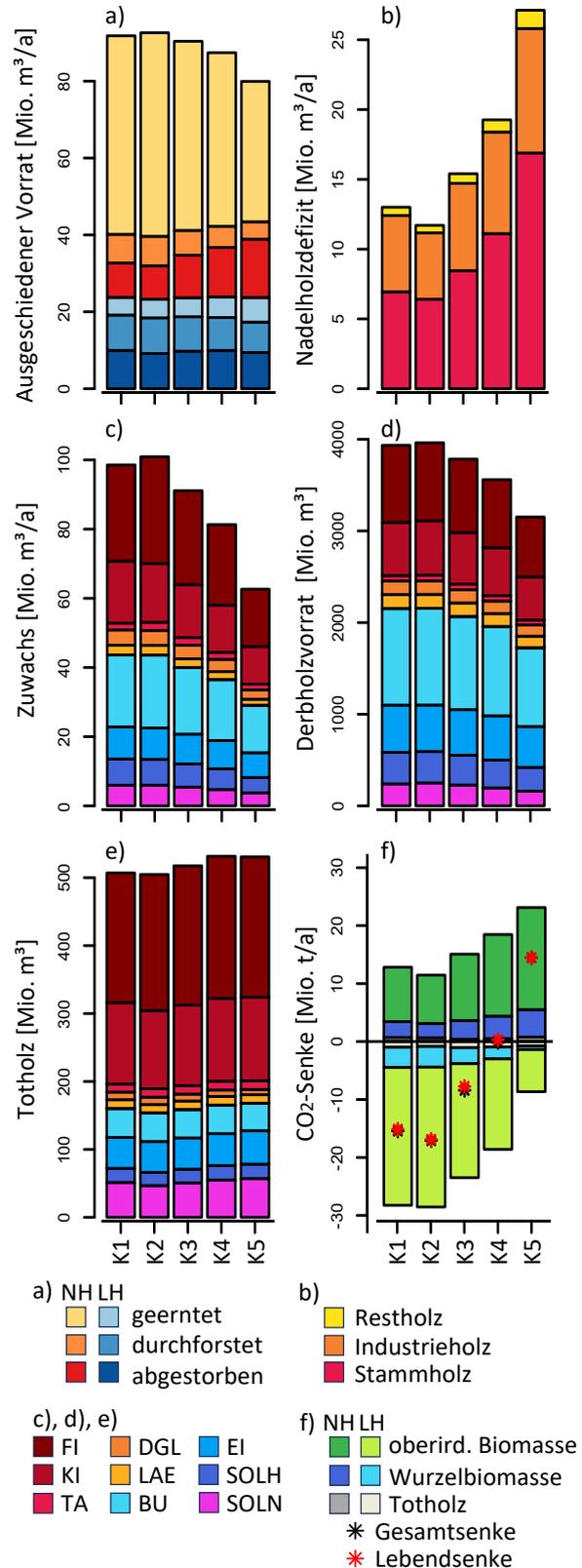
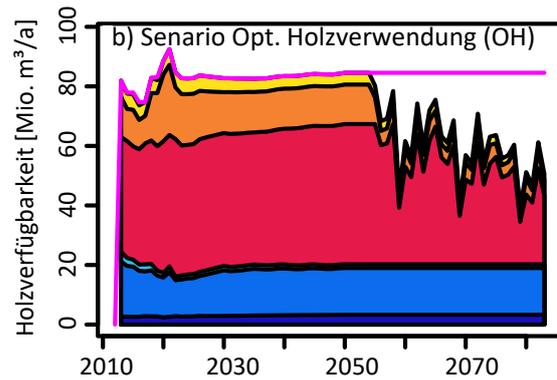
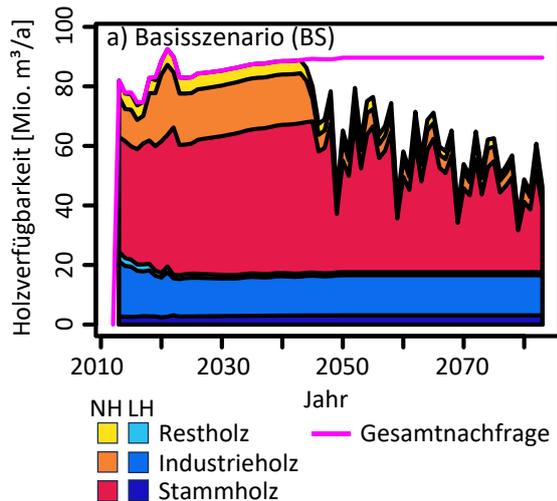
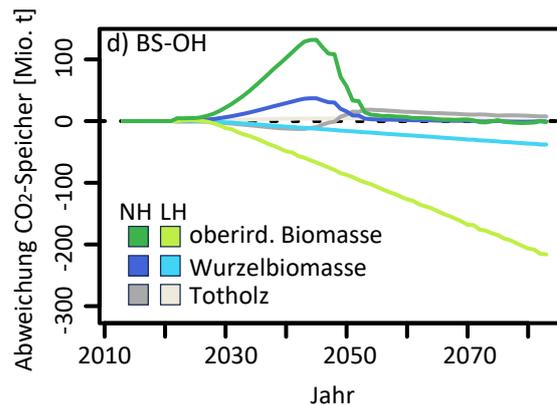
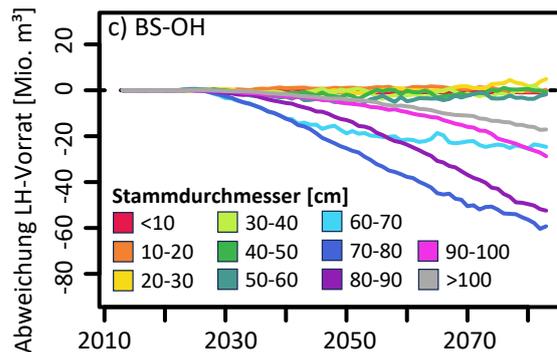


Abb. 4: Effekte unterschiedlicher Klimaszenarien auf Holzverfügbarkeit und Waldentwicklung



Veränderungen in der Holzverwendung

Eine **optimierte Holzverwendung**, bei der weniger Verschnitt produziert, Altholz länger im Kreislauf gehalten und verstärkt Laub statt Nadelholz verwendet wird, **entschärft das verringerte Nadelholzangebot**. Im Vergleich zum Basisszenario (BS, 5a) treten Nachfragedefizite im Nadelholz im Szenario „Optimierte Holzverwendung“ (OH) erst über ein Jahrzehnt später auf (5b). Obwohl der Laubholzbedarf gegenüber dem BS steigt, kann die Nachfrage nach Laubholz auch im Szenario OH bis zum Ende der Simulationsperiode für alle drei Sortimentsklassen vollständig bedient werden (5b).



Der erhöhte Laubholzbedarf macht sich jedoch in den Vorräten der Durchmesserklassen ab 60 cm bemerkbar (5c). Diese nehmen zwar auch in diesem Szenario zu (nicht gezeigt), jedoch fällt bis Simulationsende die Zunahme in den Zielstärkenklassen um bis zu 60 Mio. m³ pro Durchmesserklasse geringer aus als im BS. Da durchmesserstarke Laubbäume naturschutzfachlich als Habitatbäume von Interesse sind, bedeutet das Szenario OH somit zwar eine Verbesserung für den Holzmarkt, jedoch aus Naturschutzsicht etwas schlechtere Bedingungen.

Die CO₂-Speicherung in den Laubholzbeständen fällt im Szenario OH entsprechend ebenfalls geringer aus (5d). Im Jahr 2083 sind in der oberirdischen Biomasse der lebenden Laubholzbestände über 200 Mio. t

Abb. 5: Vergleich des Szenarios „Optimierte Holzverwendung“ (b) mit dem Basisszenario (a) auf Laubholzdurchmesserverteilung (c) und CO₂-Speicher in Biomasse (d).

weniger CO₂ gespeichert. Durch das Schonen der Nadelholzvorräte und dem dadurch auftretenden verzögerten Vorratsabbau im Nadelholz sind im Zeitraum 2030 - 2050 zeitweilig über 100 Mio. t mehr CO₂ in der oberirdischen Biomasse gespeichert, während gleichzeitig im Laubholz ca. 50 Mio. t weniger vorhanden sind. Dieser positive Saldoeffekt verschwindet jedoch ab Mitte der 2040er Jahre durch den fortgesetzten Abbau der Nadelholzvorräte bis zum Eintreten der Nadelholzverringering in den frühen 2050er Jahren.

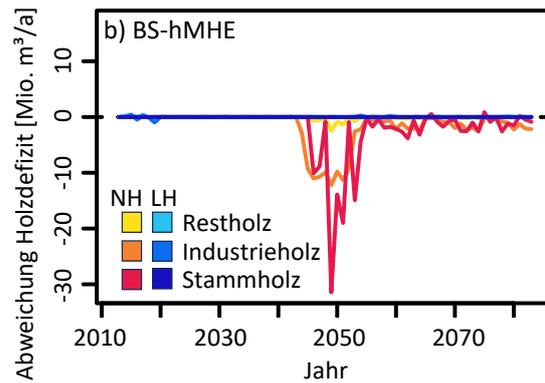
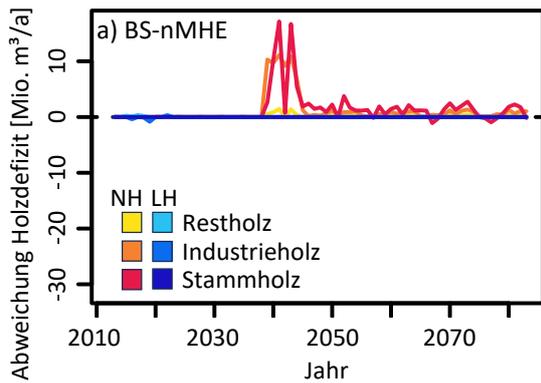


Abb. 6: Defizit des Holzaufkommens im Vergleich zum Basisszenario bei a) niedrige Mortalitätsholzentnahme (nMHE) und b) hohe Mortalitätsholzentnahme (hMHE). Basisszenario (BS) in Abb. 5a und Details im Text.

Änderungen in der Waldbewirtschaftung

Die **Bergung und Nutzung von abgestorbenen Bäumen** beeinflusst sowohl die Holzverfügbarkeit als auch die Vorräte in lebenden Beständen und im Totholz. Wird im Waldmodell davon ausgegangen, dass vom jährlich abgestorbenen Holz statt 60 % Stammholz, 30 % Industrieholz und 20 % Restholz (Basisszenario, siehe 5a) nur jeweils 30 %, 15 % und 5 % geborgen und verwertet werden, tritt das verringerte Nadelholzangebot bereits gegen Ende der 2030er Jahre auf (6a), da Holz aus lebenden Beständen stärker genutzt wird.

Eine Bergungsrate von 90 % Stamm-, 60 % Industrie- und 25 % Restholz reduziert dagegen den Bedarf an Holz aus den Lebendbeständen. Die geringere Nadelholzverfügbarkeit tritt dann erst ab der ersten Hälfte der 2050er Jahren auf (6b). Bis zum Jahr 2050 stehen somit zeitweilig jährlich um bis zu 30 Mio. m³ mehr Nadelstammholz zur Verfügung als im BS.

Eine verstärkte Verwertung von Mortalitätsholz führt jedoch zu geringeren Totholzmenge im Wald (7a) im Vergleich zu Szenarien ohne diese Nutzung. Dafür erhöhen sich Vorräte im Lebendbestand (7b) und moderat erhöhten jährlichen Zuwächsen (7c). Für die Nadelholzbestände nähern sich die Vorräte der Bestände ab Auftreten der Nadelholzlücke denen des Basisszenarios an, da danach jährlich stets in allen drei Szenarien die gesamte in den Zielstärkenbereich einwachsende Vorratsmenge geerntet wird (7b).

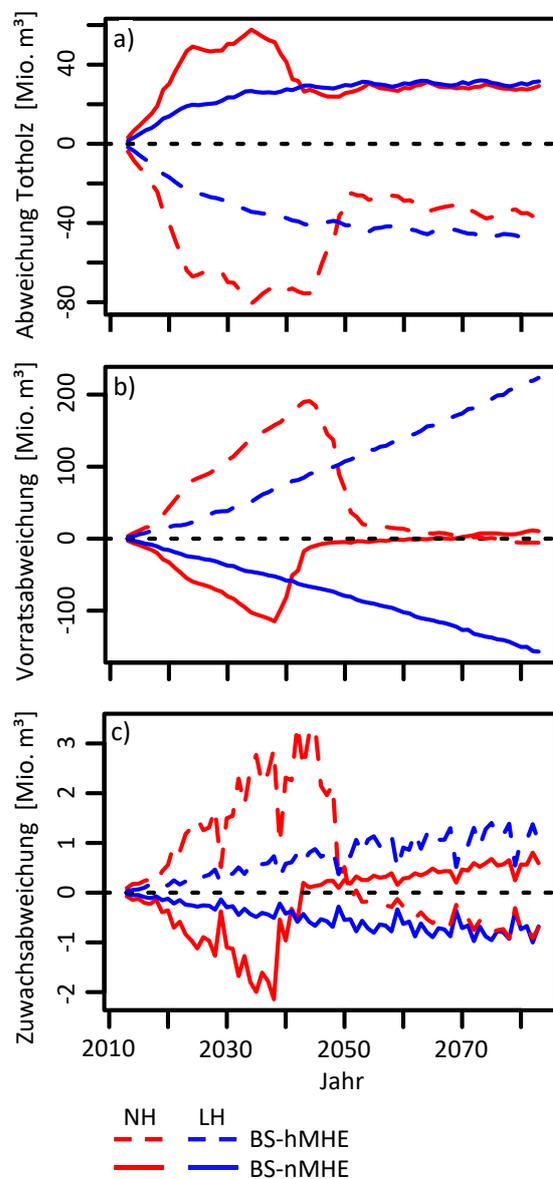


Abb. 7: Auswirkungen erhöhter und verringerter Mortalitätsholzentnahme im Vergleich zum Basisszenario auf a) Totholzvorräte, b) Vorrat des lebenden Bestandes und c) Zuwachs

SCHLUSSFOLGERUNG

Innovative Modellierungsansätze

Durch die Kombination des empirischen Waldwachstumsmodells [FABio-Forest](#) mit dem prozessbasierten Modell [4C](#) konnten klimasensitive Zuwachsfunktionen abgeleitet werden. Damit lassen sich die Auswirkungen von Wetterextremen auf die Waldentwicklung in FABio-Forest realitätsnah abbilden.

Waldentwicklung im Klimawandel

Häufigere Extremereignisse reduzieren Zuwachs und Vorrat vor allem in Nadelholzbeständen bis 2083 erheblich. Über alle Baumarten addiert könnte der mittlere Zuwachs insgesamt um 35 % geringer ausfallen als unter weniger extremen Bedingungen. Als Konsequenz würde der Wald bei sehr häufigen Wetterextremen im Mittel über die Simulationszeit eine CO₂-Quelle darstellen.

Auswirkungen auf die Holzverfügbarkeit

Unter den getroffenen Annahmen kann die Nadelholznachfrage nicht gedeckt werden. Dies kann im ungünstigsten Fall bei starken Störungen bereits ab den frühen 2040er Jahren auftreten und im Mittel bis zu 25 Mio. m³ pro Jahr betragen kann. Auch wenn Extremereignisse seltener auftreten, kann die

Nadelholznachfrage nicht ganz gedeckt werden. Das Defizit tritt lediglich später auf.

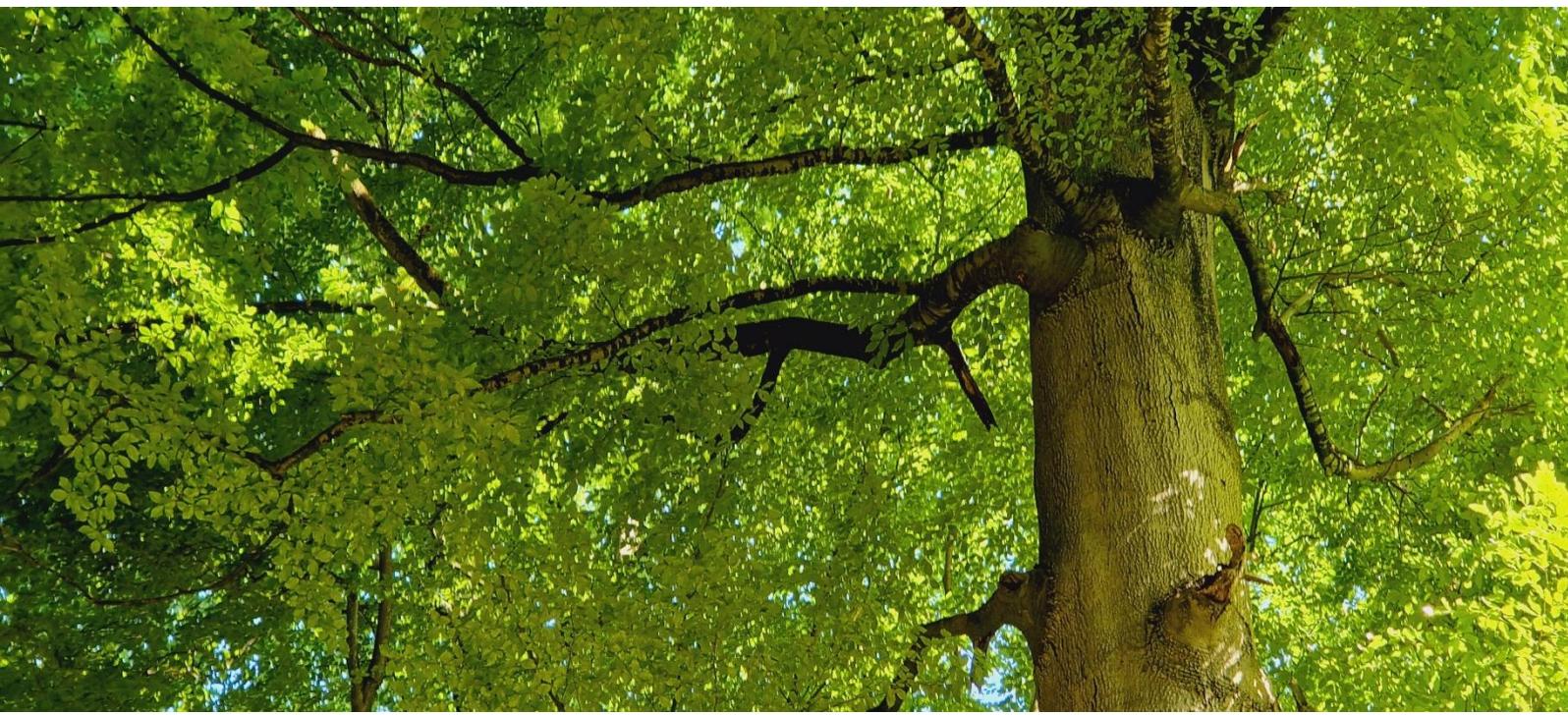
Handlungsmöglichkeiten für die Holzverwendung

Eine optimierte Holzverwendung, bei der weniger Verschnitt produziert, Altholz länger im Kreislauf gehalten und verstärkt Laubholz eingesetzt wird, kann das verringerte Nadelholzangebot abmildern und um etwa zehn Jahre verzögern.

Der erhöhte Laubholzbedarf wirkt sich jedoch negativ auf Vorräte starker Durchmesserklassen im Laubholz aus, die naturschutzfachlich als Habitatbäume von Interesse sind.

Handlungsmöglichkeiten für die Waldbewirtschaftung

Auch die effizientere Nutzung von zusätzlich auftretenden Mortalitätsholz trägt dazu bei, den Nadelholzbedarf zu bedienen. Dies führt zu einer relativen Abnahme von Totholz. Gleichzeitig könnten so stabilere Waldbestände geschont und damit deren Vorrat und Zuwachs erhöht werden.



Das Projekt DIFENS

Extremereignisse wie Dürren und Stürme haben in den vergangenen Jahren erhebliche Schäden in unseren Wäldern verursacht. Besonders betroffen sind Wälder mit geringer Widerstandsfähigkeit, die sich nur schwer an Umweltveränderungen anpassen können.

Gleichzeitig steigen die Anforderungen an den Wald: nationale und internationale Vorgaben setzen auf seine Rolle als Kohlenstoffspeicher und als wertvollen Lebensraum für viele Arten. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, müssen Wälder gezielt für das Erbringen dieser Leistungen bewirtschaftet werden.

Es ist zu erwarten, dass Extremereignisse in Zukunft häufiger auftreten und die Forstwirtschaft immer stärker beeinflussen. Dies stellt auch die Nutzung von Holz vor neue Herausforderungen, da das verfügbare Holzangebot künftig starken Schwankungen unterliegen wird.

Um die vielfältigen Leistungen des Waldes langfristig zu sichern, sind neue Bewirtschaftungsformen und ein gezielter Umbau der Wälder erforderlich. Dies wird auch zu Veränderungen in der Baumartenzusammensetzung führen.

Zahlreiche Studien haben bereits die Entwicklung von Waldbeständen, das Holzaufkommen und die Kohlenstoffspeicherung unter verschiedenen Bewirtschaftungsszenarien untersucht – meist auf Basis der Bundeswaldinventuren. Bisher fehlte jedoch eine integrierte Betrachtung, die Holznachfrage, Klimawandelfolgen und Waldbewirtschaftung gemeinsam in den Blick nimmt.

Das Projekt DIFENS schließt diese Forschungslücke durch die Entwicklung detaillierter Szenarien, die Endwarenspektoren, Halbwaren und Rohstoffe miteinander verknüpfen:

- Mit dem Modell TRAW wird der zukünftige Holzbedarf ermittelt. Dabei werden Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung und technischen Innovationen berücksichtigt. Zusätzlich fließen Einschätzungen von Expertinnen und Experten aus der Forst- und Holzwirtschaft ein, die im Rahmen einer Delphi-Befragung gewonnen wurden.
- Die ermittelte Holznachfrage geht in das Waldentwicklungsmodell FABio-Forest ein, das durch eine Verknüpfung mit dem Waldwachstumsmodell 4C auf klimatische Änderungen reagieren kann.
- Das Modell HoLCA leitet schließlich aus den Ergebnissen der Holzverwendung Treibhausgasemissionen und Ökobilanzierungen entlang der Wertschöpfungskette ab.

DIFENS bietet damit neue Ansätze zur nachhaltigen Anpassung der Forst- und Holzwirtschaft an Klimawandel und Marktveränderungen. Im Mittelpunkt stehen dabei folgende zentrale Fragen:

- Wieviel Holz werden wir in Deutschland zukünftig benötigen?
- Wie entwickeln sich die Wälder in Deutschland im Zuge des Klimawandels?
- Können die Wälder unter den veränderten Bedingungen die zukünftigen Anforderungen erfüllen?
- Welche Folgen hat dies insbesondere für die Bilanzierung von Treibhausgasemissionen und anderen Umweltauswirkungen?



Ergebnisse unter:
<https://fabio-model.de>



Impressum

Version 1.0, Stand 31.05.2025

Zitieren als: Pfeiffer, M.; Hennenberg, K., Nieberg, M., Benndorf, A., Reise, J., Böttcher, H. (2025): Szenarien der Waldentwicklung unter veränderten Klimabedingungen mit dem Modell FABio-Forest. Broschüre erstellt im Rahmen des Projekts DIFENS, Öko-Institut, <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/DIFENS-Waldmodellierung.pdf>

Die Inhalte dieser Broschüre wurden erstellt durch:

Dr. Mirjam Pfeiffer, Dr. Klaus Hennenberg und Dr. Hannes Böttcher

Öko-Institut e.V.
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
www.oeko.de



Die Broschüre ist ein Produkt des Projekts Waldentwicklung als Folge von Veränderung der Holz- nachfrage, Klimaveränderung, natürlichen Störungen und Politikanforderungen - Eine Analyse der Reaktionsmöglichkeiten von Forst- und Holzwirtschaft (DIFENS), Teilvorhaben 1: Szenarien der Waldentwicklung unter veränderten Klimabedingungen, DIFENS wurde gefördert unter dem Förderkennzeichen 2220WK32A4 aus Mitteln des Waldklimafonds im Zeitraum vom 01.12.2021 bis 31.05.2025. Der Projektträger ist die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).

Weitere Broschüren: DIFENS – [Holzverwendung](#) und DIFENS – [Ökobilanzierung](#)

Die Projektpartner sind:



Bildernachweis in der Reihenfolge

www.pixabay.com (1), Judith Reise alle Weiteren

