

# Netto-null in 2045: Ausbau der Senken durch klimaresiliente Wälder und langlebige Holzprodukte

## Ergebnisse sektorenweiter Szenarien zu Kohlenstoffspeichern in Wäldern und Holzprodukten im LULUCF-Sektor

### Einleitung

Für das Erreichen von Treibhausgas-Neutralität (THG-Neutralität) sind Senken für den Ausgleich nicht vermeidbarer und reduzierbarer Restemissionen erforderlich. Sogenannte Residualemissionen liegen Studien zufolge zwischen 36 bis 74 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq in 2045 bzw. 2050 (Purr et al. 2019; Luderer et al. 2021; Öko-Institut 2024). In dem 2024 novellierten Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) hat die Bundesregierung die seit 2021 verbindlichen natürlichen Senkenziele in § 3a in ihrer Bedeutung noch einmal hervorgehoben. Mindestens 30 Mio. t bis 2030, mindestens 35 Mio. t bis 2040 und mindestens 40 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq bis 2045 sollen zur Erreichung von THG-Neutralität in Ökosystemen eingebunden werden.<sup>1</sup> Demnach könnte unter optimistischen und ambitionierten Bedingungen die Kapazität der natürlichen Senken ausreichen, um die Residualemissionen auszugleichen.

Die natürlichen Senken werden im Sektor LULUCF - Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft, engl. *land use, land use change and forestry*, erfasst. Im LULUCF-Sektor werden THG-Emissionen (Quellen) und Kohlenstoffeinbindungen (Senken) miteinander verrechnet. Eine Senke entsteht, wenn durch Prozesse oder Aktivitäten innerhalb eines Jahres mehr Kohlenstoff eingebunden als Treibhausgase emittiert werden. Die mit Abstand größte Senke betrifft die Kohlenstoffeinbindung im Wald. Neben dieser Senkenleistung können Holzprodukte im sogenannten Holzproduktspeicher Kohlenstoff speichern.<sup>2</sup> Die bedeutendsten Quellen im LULUCF-Sektor sind die landwirtschaftlichen Böden, die in ehemals intakten Mooregebieten liegen. Als entwässerte organische Böden werden sie als Grün- und Ackerland bewirtschaftet und setzen dabei große Mengen an Kohlenstoffdioxid und Lachgas frei. Als weitere Quellen sind Feuchtgebiete und Siedlungen zu nennen.

Die THG-Bilanz des LULUCF-Sektors kann über kurze Zeiträume stark schwanken, insbesondere mit Blick auf die THG-Einbindungen der Wälder. Diese Veränderungen können zum einen durch die Bewirtschaftung der jeweiligen Flächen und zum anderen durch Störungen wie Naturkatastrophen und Wetterextreme entstehen. Aus diesem Grund sind Trendbeobachtungen im LULUCF-Sektor über längere Zeiträume aussagekräftiger als die Betrachtung einzelner Jahre. In den letzten 20 Jahren (2003 bis 2022) konnte der LULUCF-Sektor im Mittel lediglich 3,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq pro Jahr einbinden (UBA 2024). Um die LULUCF-Ziele laut KSG einzuhalten, müssen Quellen wie THG-Emissionen aus drainierten Moorböden verringert und die Senkenleistung von Wäldern und die Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten stark ausgebaut werden.

Die Kohlenstoffeinbindung im Wald erfolgt durch das Baumwachstum.<sup>3</sup> Die Einbindung kann aber je nach Witterungsbedingungen höher oder niedriger ausfallen. Ob die Kohlenstoffvorräte in Wäldern zu- oder abnehmen hängt stark von der Art der Waldbewirtschaftung und der Höhe

<sup>1</sup> Die Verbesserung der natürlichen Senkenleistung bezieht sich auf den Mittelwert der jährlichen THG-Bilanzen des jeweiligen Zieljahres (2030, 2040, 2045) und der drei vorherigen Jahre (2027-2029, 2037-2039, 2042-2044) dieses Sektors – s. § 3a KSG.

<sup>2</sup> Forst (bewirtschaftet) und Wald (allgemeiner Begriff unabhängig von einer Bewirtschaftung) werden hier nicht unterschieden.

<sup>3</sup> Neben der lebenden Biomasse (Bäume und Pflanzen) betreffen weitere Kohlenstoffspeicher im Wald Totholz und Streu.

der Waldholzentnahme ab. Jedoch stellt eine Holzentnahme im Wald immer einen Kohlenstoff- und Senkenverlust auf der Waldfläche dar und wird als CO<sub>2</sub>-Emission berichtet. Wird das Holz nicht energetisch, sondern in Produkten und Materialien über einen möglichst langen Zeitraum stofflich genutzt, so bleibt der Kohlenstoff gebunden und der Holzproduktspeicher erhöht sich für diesen Zeitraum (Schütze et al. 2021; Hennenberg et al. 2024). Bei einer energetischen Nutzung von Holz hingegen bleibt es bei der CO<sub>2</sub>-Emission. Im vorliegenden Papier werden die Mechanismen für nachhaltig bewirtschaftete und resiliente Wälder und für einen möglichst großen Holzproduktspeicher für die interessierte Öffentlichkeit aufbereitet und erklärt.

Die Zusammenschau bezieht sich auf die neuesten Ergebnisse von Reise et al. (2024) und weiterer Literatur. In dem Forschungsbericht von Reise et al. (2024) werden Potenziale und Sensitivitäten zu unterschiedlich intensiven Klimaschutzmaßnahmen und Auswirkungen des Klimawandels im LULUCF-Sektor bis 2045 und darüber hinaus untersucht. Der Bericht von Reise et al. (2024) ist Teil eines Projekts im Auftrag des Umweltbundesamts<sup>4</sup>, das vom Öko-Institut, Fraunhofer IEE und Fraunhofer ISI durchgeführt wird. Dabei werden Maßnahmen und Instrumente in sektorübergreifenden Szenarien für das Erreichen von THG-Neutralität in 2045 modelliert.

---

<sup>4</sup> Das UBA-Projekt „Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland“ trägt die Forschungskennzahl 3720 41 506 0.

# 1 Biogene Kohlenstoffvorräte und der Einfluss natürlicher Störungen

Wälder zählen – neben (intakten) Mooren und Grünland<sup>5</sup> - zu den natürlichen Kohlenstoffsinken und können große biogene Kohlenstoffvorräte anreichern. Darüber hinaus können biogene Kohlenstoffvorräte im Holzproduktspeicher akkumuliert werden. Durch Störungen wie Hitze, Trockenheit und Stürme, aber auch durch Insektenkalamitäten und Pilzkrankheiten (*Pathogene*), sind die Kohlenstoffvorräte in der Waldbiomasse und damit die Verfügbarkeit von Waldholz zunehmend bedroht (Seidl et al. 2014; Forzieri et al. 2021; Ahmad et al. 2023).

## Biogene Kohlenstoffvorräte und Ökosystemleistungen des Waldes

Kohlenstoffvorräte werden in Wäldern durch den Prozess der Photosynthese aufgebaut. Dabei entnehmen Bäume Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre, geben den Sauerstoff wieder ab und speichern den Kohlenstoff in ihrer Bestandsbiomasse. Wenn abgestorbenes Holz (Totholz) zersetzt wird, wird ein Großteil des vormals gebundenen Kohlenstoffs wieder als CO<sub>2</sub> frei. Dabei wird aber auch ein Teil des gebundenen Kohlenstoffs über den Humusaufbau in den Boden überführt. Zu einem nahezu vollständigen und unmittelbaren Kohlenstoffverlust kommt es durch Brandrodung oder Waldbrände, die oftmals im direkten oder indirekten Zusammenhang mit menschlichen Eingriffen stehen (Bolte et al. 2021). Zudem führt die Holzentnahme im Rahmen forstwirtschaftlicher Maßnahmen zu einer direkten Verringerung der Kohlenstoffvorräte im Wald.

Laut Kohlenstoffinventur 2017 ist mit etwa 11,5 Mio. ha fast ein Drittel der Fläche Deutschlands bewaldet (Thünen Institut 2017). Der Kohlenstoffvorrat auf dieser Fläche beträgt 2,6 Mrd. t. Davon befinden sich 1,23 Mrd. t Kohlenstoff (ca. 47 %) in der oberirdischen Biomasse und etwa 1,34 Mrd. t Kohlenstoff (ca. 51 %) im Mineralboden und in der unterirdischen Biomasse. Im Totholz sowie im Auflagenumus, dazu zählen abgestorbene Pflanzenreste, tote Blätter und Zweige, lagern 34 Mio. t (ca. 1 %) Kohlenstoff (Luick et al. 2021).

Der geringere Kohlenstoffspeicher von Totholz (und vom Auflagenumus) geht mit der intensiven Waldbewirtschaftung einher. So werden für Urwälder bzw. Naturwälder, das sind seit vielen Jahren naturnahe ehemalige Wirtschaftswälder, deutlich höhere Totholz mengen berichtet (Luick et al. 2021). Dennoch stellt Totholz, gerade weil es knapp ist, einen besonderen Wert für die Biodiversität und Ökosystemleistungen des Waldes dar. So wird geschätzt, dass Buchennaturwälder einen Lebensraum für über 10.000 Organismenarten bieten, beispielsweise für etwa 6.800 Tierarten, 3.350 Pilzarten und 280 Flechten und Moosarten und damit einen wichtigen Beitrag zur Biodiversität leisten (Luick et al. 2021). Ökosystemleistungen in Wäldern basieren mitunter auf intakten Nährstoff-, Wasser- und Energiekreisläufen. Sie sind umso vielfältiger, je struktur- und artenreicher bzw. desto reicher an Lebensraumnischen (Habitaten) diese sind.

Wälder und ihre Ökosystemleistungen haben einen hohen ökonomischen, ökologischen und sozialen Stellenwert. Der wirtschaftliche Aspekt betrifft im Wesentlichen die Holzbereitstellung für die Holzindustrie einschließlich der vor- und nachgelagerten Wirtschaftszweige.<sup>6</sup> Ökologisch geht es unter anderem um die herausragende Bedeutung für den Klimaschutz und die Anpassung an die Folgen des Klimawandels einschließlich der Katastrophenvorsorge. Auch

---

<sup>5</sup> In der Berichterstattung wird lediglich neu angelegtes Grünland als Kohlenstoffsinkende bilanziert. In Deutschland stellt die Kategorie „Grünland“ bereits seit Beginn THG-Bilanzierung im Jahr 1990 eine Emissionsquelle dar. Diese Quelle resultiert aus der trockenen landwirtschaftlichen Nutzung organischer Böden - s. UBA 2024.

<sup>6</sup> 2020 lag der Umsatz des Cluster Forst und Holz bei rund 181 Mio. Euro und die Bruttowertschöpfung bei 58 Mio. Euro, die von etwa 112.000 Unternehmen und 1,03 Mio. Beschäftigten erwirtschaftete wurden. S. Thünen Institut 2023.

werden individuelle Bedürfnisse wie Schutz vor Lärm für Siedlungen und Erholung und Entspannung durch Waldspaziergänge (Waldbaden) tangiert. Zusammenfassend sind als die wichtigsten Ökosystemleistungen zu nennen (Schütze et al. 2021):

- ▶ Die Senkenfunktion durch den Aufbau von Kohlenstoffvorräten in der Biomasse und dadurch die Bereitstellung des vielseitig einsetzbaren Rohstoffes Holz.
- ▶ Die Kohlenstoffspeicherfunktion in Wäldern und, durch die Nutzung der Holzressource, im Holzproduktspeicher.
- ▶ Die Schutzfunktion der Waldvegetation vor Bodenerosion, aber auch vor Steinschlägen und Lawinen.
- ▶ Die Rückhalte- und Filterfunktion von Niederschlagswasser durch Bäume und Waldboden und dadurch die Ausgleichsfunktion in Bezug auf den Landschaftswasserhaushalt sowie die Bereitstellung sauberen Grundwassers.
- ▶ Die Filterfunktion von Staub und Schadstoffen aus der Luft.
- ▶ Die Funktion als Orte für Erholung, Bildung und Naturerlebnisse.

Ergänzend ist die Beeinflussung des groß- und kleinräumigen Klimas in Bezug auf seine Wirkung auf den Wasserkreislauf (z.B. die Kühlung der Umgebungsluft um Hitzeinseln in Städten vorzubeugen), die Strahlung (Albedo) durch seine farbliche Oberfläche, das Windregime (z.B. durch das Abschwächen von hohen Windstärken) und den Kohlenstoffkreislauf (z.B. die Bereitstellung von Sauerstoff) zu nennen (Schütze et al. 2021).

Mit dem im März 2023 beschlossenen Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz der Bundesregierung sollen vermehrt Maßnahmen für den Schutz, die Stärkung und Wiederherstellung von terrestrischen und marinen Ökosystemen und deren Leistungen angereizt werden. Im *Natürlichen Klimaschutz* geht es um Maßnahmen, die an der Schnittstelle zwischen dem Klimaschutz (im Sinne der Steigerung der Kohlenstoffvorräte und Reduktion von THG-Emissionen) und dem Erhalt der biologischen Vielfalt ansetzen. Die Maßnahmen zielen auf synergetische Wirkungen, das heißt, sie kommen dem Klima- und Biodiversitätsschutz zugute. Dabei können in vielen Fällen Co-Benefits, z.B. für die Anpassung an die Klimawandelauswirkungen und für die Katastrophenvorsorge, erreicht werden (BMUV 2023).

### **Verwundbarkeit gegenüber Störungen**

Eine Gefahr für das Ökosystem Wald – einschließlich der Kohlenstoffvorräte und biologischen Vielfalt – sind Störungen, die durch die Auswirkungen des fortschreitenden Klimawandels an Intensität und z. T. in ihrer Frequenz zunehmen (van Rühl et al. 2023; Kahlenborn et al. 2023; Buras et al. 2020; Seidl et al. 2014). Dazu zählen Trockenheit und Hitzeperioden sowie die dadurch höhere Anfälligkeit für Insektenkalamitäten und krankheitserregende Mikroorganismen (*Pathogene*), Pilzkrankheiten ebenso wie Feuer und Windbruch bei Stürmen. Die Auswirkungen sind insbesondere in Waldbeständen mit nicht standortgerechten Nadelholz-Monokulturen sichtbar (UBA 2023c).

Wenig diversifizierte Waldgemeinschaften und -strukturen sind grundsätzlich verwundbarer. So wurde im Rahmen einer Untersuchung 11 in Deutschland verteilte Dauerbeobachtungsflächen in der Größe von 6 bis 12 ha über mehrere Jahrzehnte naturnah bewirtschaftet. Diese Flächen, die eine überdurchschnittliche Baumartenmischung und strukturelle Vielfalt aufwiesen, zeigten eine größere Resilienz und Vitalität gegenüber traditionell bewirtschafteten

Altersklassenwäldern. Beispielsweise kam es kaum zu flächenbedingten Witterungsausfällen und selbst die Trockenjahre 2018 bis 2020 beeinträchtigten diese sogenannten „Dauerwälder“ deutlich weniger (ANW 2022). Darüber hinaus wurden 2009 in einem großangelegten Feldexperiment in den Subtropen Untersuchungen mit 150.000 Bäumen durchgeführt. Dabei wurden die Bäume in Parzellen mit einer Baumart bis hin zu 16 Baumarten gepflanzt, um auf diese Weise die Effekte durch Artenreichtum abzubilden. Für Flächen mit höherer Baumartenzahl zeigten sich stark positive Effekte für den Aufbau von Kohlenstoffvorräten und für die Biodiversität und damit einhergehend eine geringe Verwundbarkeit gegenüber Störungen (Huan et al. 2018).

In den Bundeswaldinventuren in Deutschland wird die Naturnähe eines Bestandes über den Vergleich der aktuellen Bestockung (Baumartenzusammensetzung) mit der einer natürlichen Waldgesellschaft ermittelt (UBA 2023a). Nach den Ergebnissen der Bundeswaldinventur 2012 sind lediglich 36 % der Bestände naturnah oder sehr naturnah, das sind vorwiegend ältere Bestände (ab 120 Jahren). Eine alternative Schätzung des Waldzustands der Naturwald Akademie resümiert, dass im Jahr 2018 über 90 % der Waldflächen keine (volle) Naturnähe mehr aufweisen und damit als besonders sensibel gegenüber Kalamitäten wie Insektenbefällen, Pathogenen, Waldbränden, aber auch für Windwürfe, einzustufen sind (Welle et al. 2023).

Ein bisher unbekanntes Ausmaß zeigten die Auswirkungen der **Hitze- und Dürreperioden** im Zeitraum Januar 2018 bis April 2021. Satellitenaufnahmen zufolge gingen auf etwa 501.000 Hektar – fast 5 % gemessen an der gesamten Waldfläche – des Baumbestandes massiv und oft zu 100 % zurück (PI 2022 DLR).<sup>7</sup> Dabei führten die extremen Temperaturen insbesondere in Verbindung mit fehlendem Wasser zu einem massiven Ausbreiten von wärmeliebenden Schadinsekten wie dem Borkenkäfer, Buchdrucker und Kupferstecher, die sich in einem Jahr bis zu sechsmal vermehren können. In der Folge starben ganze Bestände ab oder mussten gefällt werden, um eine weitere Ausbreitung der Schädlinge einzudämmen (UBA 2023c).

Längere Trockenperioden bedingen Nadel- und Blattverluste, die sich anhand von lichten Baumkronen manifestieren. Laut der Waldzustandserhebung 2023 ist nur noch jeder fünfte Waldbaum (20 %) in Deutschland gesund, alle anderen zeigen Kronenverlichtungen. Das Phänomen der Kronenverlichtungen zählt zu den wesentlichen Indikatoren, um die Vitalität eines Bestandes zu beurteilen. In der Erhebung wurde festgestellt, dass jeweils deutliche Kronenverlichtungen bei 43 % der Fichten, 24 % der Kiefern, 46 % der Buchen und 44 % der Eichen vorliegen (BMEL 2023a). Die verminderte Vitalität führt wiederum zu erhöhter Sensitivität der Bestände gegenüber Kalamitäten.

Trockenheit und Hitze führen darüber hinaus zu einer größeren Gefahr von **Waldbränden**. Die Zahl der Waldbrände ist hierzulande durch verbesserte Prävention und effiziente Brandbekämpfung im langfristigen Trend von 1991 bis 2017 zwar rückläufig, stellt aber weiterhin eine Bedrohung der Waldsenke dar. Insbesondere die Temperaturextreme 2018 und 2019 führten wieder zu größeren Brandereignissen (UBA 2023c). Zu beachten ist, dass nicht nur Kohlenstoffvorräte unkontrolliert und in der Regel großflächig oxidiert werden, sondern zudem die Treibhausgase Methan- und Lachgas aus Böden austreten können (z. B. wenn Wälder sich auf organischen Böden befinden). Zudem werden bei Waldbränden große Mengen an Luftschadstoffen wie Feinstaub und Kohlenmonoxid frei und die Flora und Fauna wird stark geschädigt.

Auch stellen **Sturmereignisse**, die zu großflächigen Windbrüchen führen können, eine Gefahr für die Wälder dar. Bisher können aufgrund der Datenlage keine Entwicklungstrends von Stürmen ausgemacht werden. Betrachtet man die anfallenden Schadholzmengen, wird deutlich,

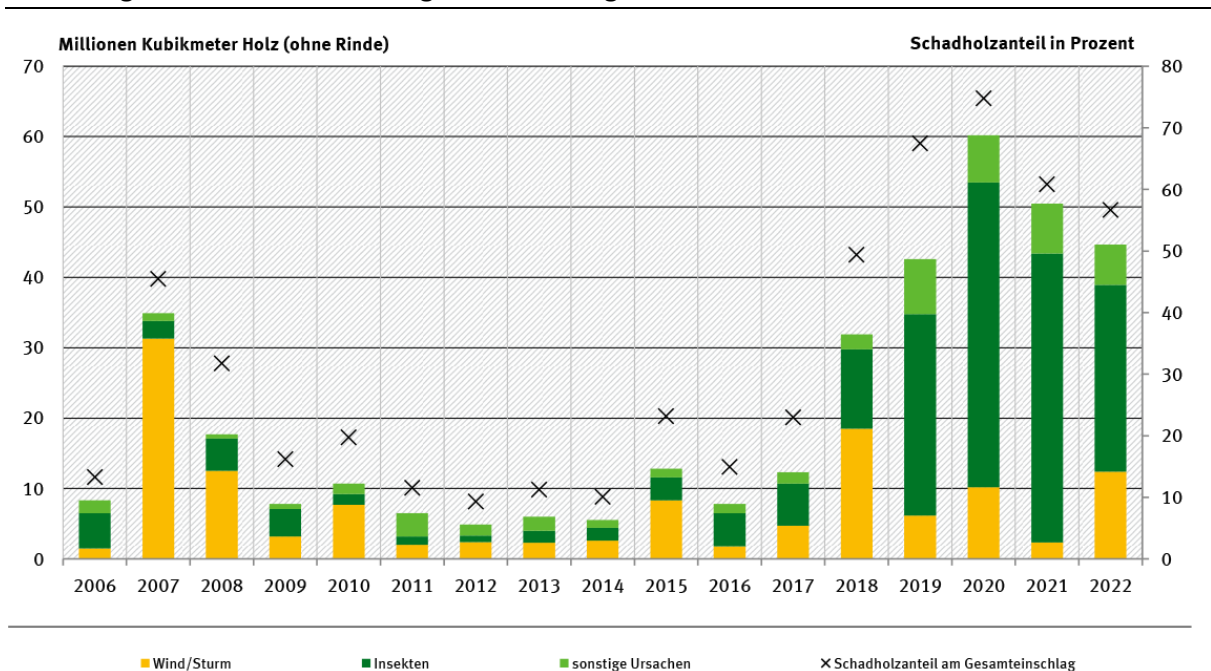
---

<sup>7</sup> Anmerkung: Die Angaben zu Waldverlusten bzw. Wiederaufforstungsflächen schwanken. So schätzt das BMEL 2023 die Größe der Aufforstungsfläche auf 490.000 Hektar aufgrund der Schäden im Zeitraum 2018-2022.

dass bis zum Jahr 2018 Stürme, insbesondere Winterstürme, maßgeblich zu den hohen Schäden beitrugen. So sind beispielsweise die Orkane Kyrill 2007 für 15,7 Mio. m<sup>3</sup>, Niklas 2015 für 8,3 Mio. m<sup>3</sup> und Friederike 2018 für 18,5 Mio. m<sup>3</sup> Schadholz verantwortlich (UBA 2023c; MLV NRW 2010; PI 2022 (Destatis)).

Abbildung 1 zeigt den Schadholzeinschlag nach den Einschlagsursachen Wind/Sturm, Insekten und sonstigen Ursachen in den Jahren 2006 bis 2022. Auf der linken Achse werden die Schadholzmengen in Mio. m<sup>3</sup> und auf der rechten in Prozent am Gesamtholzeinschlag ausgewiesen. Während in den Jahren 2006 bis 2017 die gesamte Schadholzmenge im Durchschnitt bei unter 20 % lag, stieg der Anteil in den Jahren 2018 bis 2022 auf über 60 %. Bezogen auf die Einschlagsursachen wird deutlich, dass Insektenkatastrophen in den letzten vier Jahren (2018 bis 2022) in etwa zwei Dritteln des Schadholzanfalls dominieren. In einem Viertel der Fälle führen Stürme und Windwürfe zur Schadholzentnahme. Bei Betrachtung der durchschnittlichen Schadholzmengen entfielen 10 Mio. t m<sup>3</sup> auf Stürme und Windwürfe und dreimal so viel, rund 31 Mio. t, auf Insektenbefälle. In den Vorjahren 2006 bis 2017 führten Sturmursachen zu knapp 7 Mio. t m<sup>3</sup> und Insektenkatastrophen zu etwas mehr als 3 Mio. t m<sup>3</sup>. Diese massiv gestiegenen Schadholzmengen in den Jahren 2018 bis 2022 gegenüber 2006 bis 2017 (bei den Insektenkatastrophen verzehnfachte sich die Schadholzmenge) können auf die Trocken- und Hitzeperiode in dieser Zeit zurückgeführt werden, die zu einer hohen Verwundbarkeit der Bestände führte.

**Abbildung 1 Schadholzeinschlag nach Einschlagsursachen**



Quelle: Darstellung UBA 2023b; Daten: Destatis 2023. Anmerkung: Die Einschlagsursache Trockenheit wird seit 2020 separat erfasst und in der als Teilmenge der sonstigen Ursachen aufgeführt.

Dabei sind Nadelhölzer, die aufgrund ihres aktuell häufigen Vorkommens in nicht standortgerechten Reinbeständen oder wenig artenreichen Beständen besonders oft von Schadereignissen betroffen. So wird insbesondere die Fichte in ihren aktuellen Anbaugebieten als wenig resilient betrachtet und insbesondere in den Tieflagen voraussichtlich abnehmen (Buras et al. 2020). Auch die Kiefer gilt als wenig resilient, sofern sie dicht an dicht in Reinbeständen kultiviert wird. In den Jahren 2018 bis 2022 lag der Anteil der Nadelhölzer am durchschnittlichen Schadholzaufkommen bei 93 % (43,5 Mio. m<sup>3</sup> Nadelbaum-Schadholz von 46,7 Mio. m<sup>3</sup> gesamter Schadholzmenge), vgl. Abbildung 1 (Destatis 2023).

## Sensitivitätsanalyse: Veränderung der Waldsenke bei geringen, mittleren und starken Störungen

Um Auswirkungen natürlicher Störungen auf die Kohlenstoffvorräte im Wald abschätzen zu können, modellierte das Öko-Institut mithilfe des Simulationsmodells „Fabio-Forest“<sup>8</sup> Sensitivitäten zu geringen, mittleren und starken Störungen und deren Auswirkung auf die THG-Bilanz der lebenden Bäume auf der Waldfläche. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen befinden sich in Reise et al. (2024) und werden in diesem und dem folgenden Unterkapitel zusammengefasst.

Mit Fabio-Forest können Entwicklungen der Waldbestände in Deutschland unter Berücksichtigung von Parametern wie Biomassewachstum, Mortalität, Bodenkohlenstoff und Holzentnahmen modelliert werden. Die Eingangsdaten für Berechnungen stammen aus den Bundeswaldinventuren der Jahre 2002 und 2012. Auch die Zuwachs- und Mortalitätsfunktion wurden auf Basis dieser Daten parametrisiert. Für die Modellierung der Jahre 2012 bis 2021 wurden historische Daten zur Holzentnahme, basierend auf Jochem et al. (2022), als Treiber für die Holzentnahme in Fabio-Forest verwendet. Daten zur Mortalität aus der jährlichen Waldzustandserhebung wurden in die Mortalitätsfunktion integriert. Die Zuwachsentwicklung bis 2017 wurde anhand der THG-Inventur 2017 kalibriert und es wurden Annahmen in Bezug auf den Zuwachs des Baumbestands von 2018 bis 2021 getroffen (siehe Pfeiffer et al. 2023).

Ab dem Jahr 2022 wird der Waldbestand in Deutschland an rund 36.000 Erhebungspunkten der Bundeswaldinventur modelliert. Dabei werden die drei Sensitivitäten in geringe, mittlere und starke Störungen unterschieden, vgl. Tabelle 1. Für die Holzentnahme wird für alle drei Sensitivitäten der mittlere Wert der Jahre 2013 bis 2017 fortgeschrieben.

Zur Abbildung geringer natürlicher Störungen werden für die Mortalität und den Zuwachs Mittelwerte aus den Jahren 2013 bis 2017 verwendet. Diese Periode bezieht sich auf einen Zeitraum mit sehr günstigen Wuchsbedingungen. Für die Sensitivität mittlere Störungen wird der Bezug auf die Jahre 2002 bis 2017 gesetzt. Auf diese Weise werden die heftigen Stürme, z.B. in 2022 durch den Orkan Jeanette und 2007 durch den Orkan Kyrill berücksichtigt. Mit der Sensitivität starke Störungen wird die Bezugsperiode auf die Jahre 2002 bis 2021 erweitert, um Effekte der massiven Trocken- und Dürreperiode von 2018 bis 2021 zu berücksichtigen.

**Tabelle 1** Parametrisierung der Sensitivitäten geringe, mittlere und starke Störung

Parametergruppe	Sensitivität geringe Störungen	Sensitivität mittlere Störungen	Sensitivität starke Störungen
Holzentnahme	Mittlere Holzentnahme wie in den Jahren 2013-2017 (Jochem et al. 2022).		
Natürliche Mortalität	Mittlere Mortalitätsraten wie in den Jahren 2013-2017	Mittlere Mortalitätsraten wie in den Jahren 2002-2017	Mittlere Mortalitätsraten wie in den Jahren 2002-2021
Zuwachs	Mittelwert der Jahre 2013-2017	Mittelwert der Jahre 2002-2017	0,9 * Mittelwert der Jahre 2002-2017

Quelle: Reise et al. 2024. Mortalitätsraten angelehnt an die Ergebnisse der Waldzustandserhebung, siehe auch Pfeiffer et al. 2023.

<sup>8</sup> Fabio-Forest ist ein Teilmodell des Fabio-Modellverbunds, welches 2015 am Öko-Institut entwickelt wurde. Es beschreibt die Produktion und Nutzung von Biomasse in der Forstwirtschaft und die Auswirkungen auf ausgewählte Umweltindikatoren. Es setzt sich aus dem Waldwachstums-, Mortalitäts-, Einwuchs-, Totholz- und dem Bodenkohlenstoff- sowie dem Holzentnahmehmodell zusammen. Siehe Bericht von Reise et al. 2024, Pfeiffer et al. 2023 und Böttcher et al. 2018a.

### **Auswirkungen durch mittlere und starke Störungen**

Die Abbildung 2 zeigt die Veränderung der THG-Bilanz der lebenden Biomasse im Wald unter Annahme der drei Störungsniveaus.<sup>9</sup> Dabei werden Veränderungen durch mittlere und starke Störungen als Differenz zur geringen Störung ausgewiesen. Auf diese Weise werden die Effekte der Annahmen zu den Störungen hervorgehoben. Geringe Störungen entsprechen der Null-Linie. Bereits mittlere Störungen führen gegenüber geringen Störungen zu einem jährlichen Verlust von 17 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (Mittelwert 2022 bis 2054). Bei starken Störungen kommt es zu einer Verringerung der Senkenleistung von jährlich bis zu 32 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (Mittelwert 2022 bis 2043). Dieser hohe Verlust betrifft vor allem die Nadelbaumbestände und in kleinerem Umfang Laubbaumbestände. Bei starken Störungen werden bis zum Jahr 2044 Fichtenaltbestände kontinuierlich abgeschöpft, um die Holznachfrage zu decken. Damit wird der Holzvorrat für die Nadelbäume verringert. Nach dem Jahr 2044 wird nur noch die Menge an Nadelholz geerntet, die in einem Jahr nachwächst. Die THG-Bilanz für Nadelbestände ist dann plus minus null und verbessert sich dadurch. Gleichzeitig kann aber die Nadelholznachfrage nicht mehr bedient werden. Ein ähnliches Muster, aber weniger ausgeprägt, zeigt sich bei mittleren natürlichen Schäden. Wird aufgrund des fehlenden inländischen Nadelholzes entsprechend Nadelholz importiert, so verlagert sich der Senkenverlust ins Ausland (Leakage-Effekt). Es kann damit gerechnet werden, dass die Verbesserung der inländischen THG-Bilanz der Waldbiomasse durch die verringerte Nadelholzentnahme etwa in der gleichen Größenordnung zu einer Verschlechterung der ausländischen THG-Bilanz führt (Soimakallio et al. 2022).

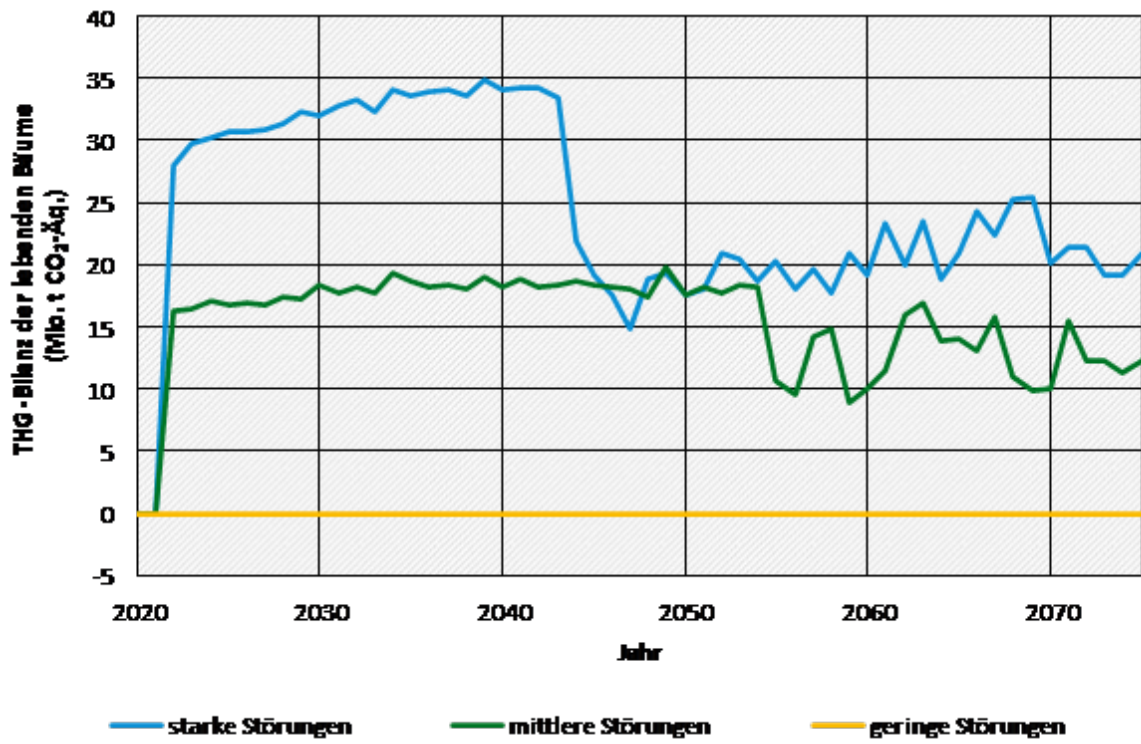
Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass es notwendig ist, labile Waldbestände, insbesondere Nadelbaumbestände auf ungünstigen Standorten durch Waldumbau möglichst zügig zu stabilisieren und möglichst naturnah zu bewirtschaften. In Frage kommen vor allem klimaresiliente Laubmischwälder.<sup>10</sup> Auch zeigt sich, dass bei steigenden Störungen in Zukunft die heutige Nadelholznachfrage nicht aus inländischen Wäldern gedeckt werden kann. Ein verstärkter Waldumbau hin zu Laubmischwäldern kann diese Lücke noch erhöhen. Dieses Risiko sollten holzverarbeitende Sektoren in langfristigen Planungen berücksichtigen.

---

<sup>9</sup> Aufgrund der langen Wirkzeiträume im Zusammenhang mit Wachstum, Anpassung und Erholung von Waldbeständen wurde ein längerer Betrachtungszeitraum über 2045 hinaus bis zum Jahr 2075 gewählt.

<sup>10</sup> Die Anpflanzung nicht-heimischer aber standortgerechter Baumarten ist auf kleinflächigen und begrenzten Flächenanteilen vertretbar sofern deren ökologische und naturschutzfachliche Verträglichkeit geprüft und das genetische Potenzial heimischer Baumarten ausgeschöpft wurden. S. Schütze et al. 2021 und Kapitel 2.1.

Abbildung 2 Entwicklung der THG-Bilanz der lebenden Bäume bei starken und mittleren Störungen als Differenz zu geringen Störungen (Null-Linie)

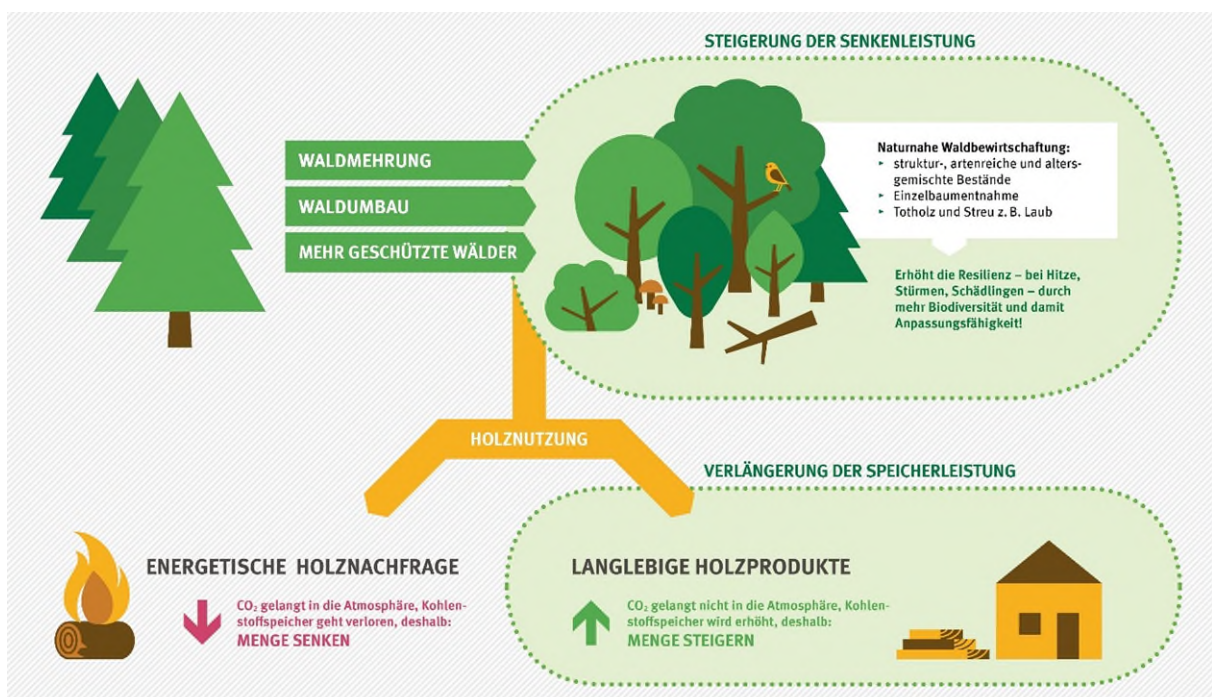


Quelle: Reise et al. 2024 auf Basis von Berechnungen in FABio-Forest.

## 2 Klimaresiliente Wälder und langlebige Holzprodukte: was ist zu tun?

Die Mechanismen für die Steigerung der Senkenleistung durch Waldklimaschutz zeigt Abbildung 3 im oberen Teil. Im unteren Teil der Abbildung 3 geht es um die Mechanismen für die Verlängerung der Speicherleistung von Holzprodukten durch weniger energetische und mehr stoffliche Holznutzung. Um zu erreichen, dass die Kohlenstoffvorräte in Wäldern im Einklang mit dem natürlichen Klimaschutz und in Holzprodukten zunehmen, müssen zwei Hebel betätigt werden:

**Abbildung 3 Steigerung und Verlängerung der Senken- und Speicherleistung: Vitale Wälder und langlebige Holzprodukte**



Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

### 2.1 Hebel 1: vitale Wälder

Für die Stärkung eines stabilen und gegenüber Klimawandelauswirkungen und Störungen resilientem Waldökosystems einschließlich wachsender Kohlenstoffvorräte stehen die Waldmehrung und Vorratsanreicherung, der Waldumbau und der verstärkte Schutz ökologisch wertvoller Waldgebiete im Mittelpunkt, vgl. Abbildung 3.

#### Die Mehrung der Waldfläche und Steigerung der Kohlenstoffvorräte auf bestehenden Waldflächen

Die **Mehrung der Waldfläche** bezieht sich auf eine Erstaufforstung, das heißt die Anlage von Wäldern auf Flächen, die vorher nicht bewaldet waren.<sup>11</sup> In Deutschland findet die Waldmehrung aktuell vor allem auf Grünlandflächen statt. Zwischen 2016 und 2020 wurden rund 13.000 ha ehemaligen Grünlands zu Waldfläche umgewandelt. Dabei geht es zumeist um nicht mehr gemähtes oder beweidetes Grünland, das in Folge der natürlichen Sukzession verbuscht (Reise et al. 2024; UBA 2022). Jedoch hat wenig genutztes, sogenanntes extensiv bewirtschaftetes Grünland einen hohen Wert für die Biodiversität: Mehrere Tausend der heimischen Farn- und Blütenpflanzenarten können in Grünlandbiotopen vorkommen. Zudem

<sup>11</sup> Die Maßnahme der Wiederaufforstung, z.B. im Zuge von Störungen, wird nicht explizit adressiert.

befinden sich über 1.000 Grünlandpflanzenarten vorwiegend oder ausschließlich auf Grünlandflächen. Deshalb empfehlen Reise et al. (2024) für die Waldmehrung wenig ertragsreiches Ackerland stärker in den Blick zu nehmen. Abgeleitet aus den THG-Inventar für 2022 ergibt sich für die Umwandlung von Ackerland auf mineralischen Böden zu Wald über 20 Jahre betrachtet eine durchschnittliche jährliche Speicherleistung von 6,6 t CO<sub>2-Aq</sub> pro ha (zum Stand der Datenlage in 2020) (Reise et al. 2024).<sup>12</sup> Bei der Schätzung zukünftiger Speicherleistungen durch Etablierung neuer Waldfläche müssen Annahmen zur Entwicklung des Waldbestands (z.B. zur Altersstruktur) und zur Bewirtschaftung (z.B. zur Holzentnahme) getroffen werden. Zudem müssen Auswirkungen von Störungen berücksichtigt werden, die eine Quantifizierung unsicher machen.

Neben der Waldmehrung ist **die Steigerung der Kohlenstoffvorräte** bzw. die sogenannte Vorratsanreicherung ein wichtiger Hebel für den Ausbau der Senke. Die Vorratsanreicherung betrifft das Anwachsen der ober- und unterirdischen Biomasse auf bestehenden Waldflächen. Flächen, deren Bestände beispielsweise aufgrund von Brandschäden oder Schadinsekten stark dezimiert wurden, sind dabei eingeschlossen. Während die unterirdische Biomasse nicht direkt zu beeinflussen ist, kann durch forstwirtschaftliche Maßnahmen eine Anreicherung der oberirdischen Biomasse erfolgen. Zu diesen Maßnahmen zählen die gezielte Förderung eines mehrschichtigen Bestandsaufbaus oder die Verlängerung der Umtriebszeit und Erhöhung der Zieldurchmesser. Auch die Nutzung sogenannter Vorwälder kann zur Anreicherung des Kohlenstoffvorrats beitragen. Hier werden z.B. auf Schadflächen Pionierbaumarten gepflanzt (dazu zählen u.a. die Hänge-Birke, Wald-Kiefer, Schwarz-Erle und Eberesche, Zitterpappel, Salweiden), die es erlauben eine schnellere Wiederbewaldung zu erreichen. Nach etwa 5 bis 10 Jahren kann unter dem schützenden Schirm der Pioniere die entsprechende walddtypische Zielbestockung aus Laub- und Laubmischwäldern angelegt werden (Triebel et al. 2022).

Zu berücksichtigen ist, dass junge Bestände unter 20 Jahren weder einen hohen Kohlenstoffvorrat noch eine hohe Kohlenstoffeinbindungsrate aufweisen (S. Bolte 2020; Abbildung Riedel 2019). Die Daten der letzten Bundeswaldinventur zeigen, dass Wälder erst zwischen 21 und 40 Jahren einen doppelt so hohen Zuwachs pro Jahr aufwiesen wie etwa 140 Jahre alte Bestände (Bolte et al. 2021). Jedoch zeichnen sich ältere Bestände durch hohe Kohlenstoffvorräte aus und leisten dadurch ebenfalls einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz.

Darüber hinaus können Emissionen bei der Etablierung von neuen Waldbeständen auftreten, wenn die Aufforstung auf verbuschtem Grünland stattfindet und dadurch die in Sträuchern und Bäumen gebundene Biomasse ganz oder teilweise zunächst entfernt wird (Reise et al. 2024).

### **Der beschleunigte Waldumbau**

Mit dem Ziel Waldbestände resilienter gegenüber den Unwägbarkeiten des Klimawandels und Störungen im Allgemeinen zu machen, bedarf es eines **beschleunigten Waldumbaus**. Der Waldumbau wird bereits seit den 1980ern als Reaktion auf die Umweltauswirkungen, insbesondere das „Waldsterben“ durch „sauren Regen“ in Folge von Luftverschmutzung betrieben (Spathelf 2022). Dass diese Anstrengungen nicht ausreichen, zeigt sich auch an der hohen Verwundbarkeit gegenüber Wetter-, Klima- und Insektenkalamitäten. So litten besonders Fichtenbestände unter Trockenheit und Hitze und waren dadurch anfälliger für Schadinsekten. Deshalb ist eine zentrale Maßnahme wenig diversifizierte und nicht standortgerechte (Rein-) Bestände aus Nadelhölzern in arten- und strukturreiche standortgerechte Laubmischwälder zu überführen.

---

<sup>12</sup> Die Minderung berücksichtigt die Pools der lebenden Biomasse, des mineralischen Bodens, des Totholzes und der Streu.

Wie bei der naturnahen Waldbewirtschaftung soll erreicht werden, dass die Bestände durch gezielte Mischung der Baumarten in Hinblick auf Alter, Kronenhöhe und -form, Licht- und Schattentoleranz sowie darüber hinaus weitere verschiedene Eigenschaften aufweisen. Dabei könnte insbesondere der zielgerichteten Naturverjüngung eine wichtige Rolle zukommen. Im Ergebnis soll eine vielfältigere Struktur und Genetik des Bestandes erreicht werden, die zu einer besseren Anpassungsfähigkeit der Bäume gegenüber Störungen führt (Schütze et al. 2021). So trägt die heterogene Altersstruktur zur Risikostreuung bei Schadereignissen bei. Bei der Anpflanzung von Laubbäumen können weitere Vorteile verbucht werden: Zum einen die verbesserte Wasserversorgung der Wurzeln und die erhöhte Grundwasserneubildung und zum andern die bessere Verwertung von Stickstoffeinträgen und damit die Abnahme der Nitratauswaschung ins Grundwasser (Schütze et al. 2021).

Diese Anforderungen schlagen sich in dem Waldbaukonzept *Dauerwald* nieder.<sup>13</sup> Dabei geht es um ein auch in Deutschland angewendetes Waldbaukonzept (ANW 2022). Dessen Kernelemente sind die bodenschonende Bewirtschaftung, der Vorrang einer natürlichen Verjüngung und die Wertholzerzeugung integriert auf der ganzen Waldfläche bei Einzelbaumnutzung.

Unter dem Gesichtspunkt der Sicherung von Holzträgen in Zeiten des Klimawandels, wird der **Anbau nicht einheimischer Arten** diskutiert. Also Baumarten, die außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebiets entweder über direkte oder indirekte menschliche Einwirkung in ein Gebiet eingebracht werden. Diese Arten können eine größere Toleranz gegenüber Trockenheit, Hitze und Bränden aufweisen. Langjährige Erfahrungen in Deutschland bestehen mit der Douglasie, deren Anteil in den Wäldern bei etwa 2 % liegt (BfN 2023). Weitere Baumarten werden diskutiert, allerdings gibt es bisher wenige Feldversuche wie beispielsweise das Projekt CorCed (Bayerisches Amt für Waldgenetik Teisendof, FKZ 22018917), in dem die Anbaueignung der drei Baumarten Atlaszeder, Libanonzeder und Baumhasel getestet und bewertet wurden. Die vereinfachte Annahme, dass fremdländische Arten aufgrund des sich ändernden Klimas für hiesige Wälder besser geeignet sind, gilt als nicht belastbar (BfN 2020). Expertinnen und Experten des Umweltbundesamts empfehlen in ihrer Studie das genetische Potenzial heimischer Arten auszuschöpfen. Fremdländische Arten sollten standortgerecht sein und ihre ökologische Verträglichkeit (Wasser- und Nährstoffhaushalt) sowie naturschutzfachliche Unbedenklichkeit (eventuelle Invasivität) muss zuerst sichergestellt werden (Schütze et al. 2021). Das Bundesamt für Naturschutz verweist auf eine notwendige umfassende ökologische Bewertung und Einhaltung des Vorsorgeansatzes um Risiken und adverse Auswirkungen nicht-heimischer Baumarten zu minimieren (BfN 2019).

### **Der Schutz von Wäldern**

Die dritte Strategie ist der **Schutz von Wäldern**, um neben dem Senkenausbau besonders die bestehenden Kohlenstoffvorräte zu erhalten und zur biologischen Vielfalt vor allem in alten und ökologisch wertvollen Beständen beizutragen. Ein prominentes Beispiel sind die alten, natürlichen Buchenwälder in Deutschland. Seit 2007 sind ausgewählte Buchenwälder Weltnaturerbe der Organisation der Vereinten Nationen für Bildung, Wissenschaft und Kultur und sind damit streng geschützt. In Deutschland gehören fünf Waldgebiete zum Weltnaturerbe.<sup>14</sup> Diese sind reich an sogenannten Biotopbäumen – alte, natürliche Bäume mit einem besonderen Wert für Flora und Fauna - die einerseits aufgrund ihres hohen

---

<sup>13</sup> Dauerwälder bezeichnen ein waldbauliches System, das dauernd fähig ist Holz zu liefern. Dabei geht es um ein sich selbst regenerierendes Waldökosystem, das als besonders resilient gegenüber natürlichen Störungen gilt. S. Bode et al. 2021.

<sup>14</sup> Zu den als Weltnaturerbe anerkannten Gebieten gehören der Grumsinger Forst (Brandenburg), der Nationalpark Kellerwald-Edersee (Hessen), der Nationalpark Jasmund (Rügen) und der Serrahner Buchenwald im Müritzer Nationalpark (Mecklenburg-Vorpommern) sowie der Nationalpark Hainich (Thüringen). S. UNESCO 2023.

Kohlenstoffvorrats und andererseits in ihrer Funktion als „Hotspot“ für zahlreiche Pflanzen, Tier und Pilzarten besonders schützenswert sind.

Grundsätzlich zu unterscheiden ist der strikte Schutz, das bedeutet, dass auf eine Bewirtschaftung vollständig verzichtet wird und die Bestände ihrer natürlichen Entwicklung überlassen werden, und die naturnahe (oder extensive) Bewirtschaftung. In Deutschland stehen lediglich 3,1 % der Wälder unter striktem Schutz (Stand: 2020) (Steinacker et al. 2023). Das bundesweite Ziel der Strategie zur biologischen Vielfalt (2007) bis 2020 mindestens 5 % der Waldfläche unter Schutz zu stellen, wurde damit verfehlt. Laut EU-Biodiversitätsstrategie sollen bis 2030 mindestens 30 % der Landesfläche der EU unter Schutz gestellt werden, davon 10 % der Flächen unter striktem Schutz (COM(2020) 380 final).

Zu der Frage, ob Wälder strikt geschützt oder möglichst naturnah bewirtschaftet werden sollen, herrschen unterschiedliche Auffassungen. Nach Bolte (2021) und Spathelf et al. (2022) werden beide Formen benötigt. Der Schutz ist aus naturschutzfachlichen und waldökologischen Gründen in Wäldern mit hohen Anteilen an Alt- und Totholz sinnvoll und kommt damit insbesondere der Biodiversität zu Gute. Zudem betont Bolte (2020), dass der Verzicht auf eine waldbauliche Steuerung im Zuge der Anpassungsstrategie an die Klimawandelauswirkungen besonders dann sinnvoll ist, wenn hohe Unsicherheiten bezüglich der an den Klimawandel angepassten Baumartenwahl und deren Mischung bestehen. Für eine naturnahe (extensive) Waldbewirtschaftung, die mit einer reduzierten Holzentnahme einhergeht und Arten- und Strukturreichtum der Bestände fördert, spricht eine stärkere Resilienz gegenüber Störung, die auf diese Weise erreicht werden kann. So kann auch langfristig die Verfügbarkeit von Holzträgen sichergestellt werden. Darüber hinaus kann durch eine fokussierte stoffliche Holznutzung der Holzproduktspeicher erhöht werden.

In der Abwägung der Strategie der Waldmehrung mit der Strategie des Waldschutzes können Vorteile durch Waldschutz allein bei Betrachtung der Netto-Senkenwirkung des Waldes aufgezeigt werden. Basierend aus den THG-Inventardaten 2022 gingen zwischen 2016 und 2020 rund 5000 ha Waldfläche verloren, die zu Emissionen von rund 1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq pro Jahr führten. Im gleichen Zeitraum wurden rund 8.000 ha neue Waldfläche angelegt. Umgewandelt werden Waldflächen beispielsweise für die Erschließung neuer Verkehrs- und Siedlungsinfrastruktur. Aufgrund der noch fehlenden Kohlenstoffeinbindungsleistung der neu gepflanzten (gemehrten) Waldflächen konnten die Verluste durch Abholzung in diesem Zeitraum nicht kompensiert werden.

### **Szenarien zu Waldmehrung, Waldumbau und extensiver, naturnaher Bewirtschaftung**

Berechnungen anhand von Szenarien zeigen, dass die naturnahe oder extensive Waldbewirtschaftung mit einer zusätzlichen signifikanten Senkensteigerung einhergeht. In dem Verbundprojekt „Nachhaltigkeitsbewertung alternativer Waldbehandlungs- und Holzverwendungsszenarien unter besonderer Berücksichtigung von Klima- und Biodiversitätsschutz“ (WEHAM-Szenarien)<sup>15</sup> werden im Naturschutzpräferenzszenario verstärkt Nadelbäume, insbesondere Fichte und Kiefer, für die Holzernte entnommen und Laub- und Laubmischwälder (durch Erhöhung der Umtriebszeit und Zieldurchmesser) gefördert. Dadurch kann von 2012 bis 2032 eine durchschnittliche Senkenleistung von 31 Mio. t CO<sub>2</sub> und von 2012 bis 2052 von 35 Mio. t CO<sub>2</sub> generiert werden. Bis 2052 führt dies zu rund 20 Mio. t CO<sub>2</sub> mehr Kohlenstoffvorräten gegenüber einem Referenzszenarios, in dem das seit 2012 bestehenden Waldmanagement fortgeschrieben wird (Reise et al. 2024; Rüter 2017). In dem Szenario „Waldvision“ von Böttcher et al. (2018b), welches mit dem Fabio-Forest Modell gerechnet wurde, kann unter den Annahmen von Waldumbaumaßnahmen, einer angepassten bestandschonenden Bewirtschaftung und rund 17 % geschützter Waldfläche, eine mittlere

---

<sup>15</sup> Die Eingangsdaten basieren auf der zweiten und dritten Bundeswaldinventur.

Kohlenstoffsенке (nur lebende Biomasse) von 48 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr von 2012 bis 2102 erreicht werden.

Die naturnahe Bewirtschaftung und dadurch die Förderung von Struktur- und Artenreichtum von Flora und Fauna sowie die Erhöhung der Kohlenstoffvorräte können einen Brückenschlag zwischen striktem Schutz und konventioneller Waldbewirtschaftung darstellen. Unter der Annahme, dass die Anteile der stofflichen und energetisch Holznutzung sich nicht ändern, bleibt zu beachten, dass durch eine reduzierte Holzentnahme auch der Holzproduktspeicher abnimmt. Sowohl im Naturschutzpräferenzszenario als auch im Szenario Waldvision entstehen Emissionen, sodass der Holzproduktspeicher als zweite wichtige Senke entfällt und sich in der LULUCF-Sektorbilanz negativ auswirkt. Um der Reduzierung des Holzproduktspeichers entgegenzuwirken, muss Holz klimafreundlich genutzt, das heißt die Nutzung von Energieholz gemindert und die stoffliche Holznutzung gestärkt werden.

## 2.2 Hebel 2: Holzprodukte stärker und länger nutzen – weniger Holz energetisch nutzen

Um den Holzproduktspeicher zu erhöhen, braucht es mehr und insbesondere langlebige Holzprodukte:

Wenn dem Wald Holz entnommen wird, kommt es zu einem Verlust der Waldsenke. Wird das Holz anschließend energetisch genutzt, das heißt in einem Scheitholzofen oder einem Holzkraftwerk verbrannt, entweicht der in der Biomasse gespeicherte Kohlenstoff unmittelbar in die Atmosphäre. Wird das Holz dagegen zur Herstellung holzbasierter Produkte verwendet, also stofflich genutzt, wird der eingespeicherte Kohlenstoff abhängig von der Nutzungsdauer bzw. dem Zersetzungszeitpunkt des Holzes längerfristig gebunden. Die Gesamtmenge der stofflichen Holznutzung wird im Holzproduktspeicher dargestellt. In Abbildung 3 werden diese Zusammenhänge deutlich.

Der Holzproduktspeicher nimmt zu, wenn mehr Kohlenstoff in den Speicher übertragen wird, als aus ihm entweicht. Die beiden Mechanismen lauten:

- ▶ mehr Holz der stofflichen Verwendung zuführen *oder* bzw. *und*<sup>16</sup>
- ▶ die Nutzungsdauer holzbasierter Produkte verlängern bzw. die Nutzungsdauer von Holz als Recyclingmaterial im Holzproduktspeicher halten (Rüter 2016).

Die **Möglichkeiten für mehr stoffliche Holznutzung** sind vielfältig. Holz kann grundsätzlich als Bau- und Werkstoff, als Zellstoff in der Zellstoffindustrie einschließlich spezialisierter und innovativer Anwendungen und als Rohstoff in der Chemieindustrie verwendet werden (Schütze et al. 2021).

Als Bau- und Werkstoff wird Holz im Gebäudeneubau, in der Sanierung und im Tiefbau sowie für Konsum- und Gebrauchtgegenstände wie Möbel und Spielzeug und als Transport- und Verpackungsmaterial verwendet. Die Zellstoffindustrie umfasst die Produkte Papier, Karton und Kartonage, aber auch bestimmte Produkte im medizinischen Bereich (z.B. Hygieneprodukte). Dazu zählt auch der Einsatz in vielen technischen und nicht-technischen Anwendungen, z.B. auch in vielen neuartigen Produkten (FNR 2023b). So stehen Produkte wie z.B. Rucksäcke aus Kraftpapier, Touchpads aus Holzfasern oder Fahrräder aus Holz stellvertretend für wichtige Innovationszweige im Übergang zur Bioökonomie. Auch kann Holz als Grundstoff im Chemikalienbereich für vielfältige Anwendungen genutzt werden. Trotz der wachsenden

---

<sup>16</sup> Da die vielen kurzlebigen Holzprodukte den Holzproduktspeicher temporär nur kurzweilig erhöhen, führen nur beide Mechanismen zu einer nachhaltigen Steigerung des biogenen Produktspeichers.

Bedeutung der Holzverwendung in Sektoren außerhalb der Bauwirtschaft wird im Bausektor weiterhin die größten Holzmenngen genutzt werden (Rüter 2016).

Um die Nutzungsdauer von Holz zu verlängern, muss Holz möglichst nachhaltig genutzt werden. Betrachtet man die drei Produktkategorien Schnittholz, Holzwerkstoffe und Papier, sind es Schnitthölzer und Holzwerkstoffe, die für eine lange Nutzung in Frage kommen. Eingesetzt werden sie vorwiegend im Bausektor oder für langlebige Konsumprodukte wie Möbel. Im Mittelpunkt der möglichst langen und damit nachhaltigen sowie effizienten Holznutzung steht die konsequente Kaskaden- und Mehrfachnutzung.

Die Kaskaden- und Mehrfachnutzung sind zentrale Säulen sowohl in der Nationalen Kreislaufstrategie als auch in der geplanten Nationalen Biomassestrategie der Bundesregierung. Dabei geht es in der Kreislaufstrategie darum, Ziele und Maßnahmen für ressourcenschonendes und zirkuläres Wirtschaften zusammenzuführen, um im Wesentlichen den Bedarf an Primärrohstoffen zu senken. In der geplanten Biomassestrategie geht es ganz konkret um die Sicherstellung einer nachhaltigen, klimaschutzwirksamen und ressourceneffizienten Biomasseerzeugung und -nutzung. Im Einklang mit den Empfehlungen des Umweltbundesamts ist **die stoffliche Nutzung gegenüber der energetischen Nutzung** und unter Beachtung größtmöglicher positiver Effekte für Klima-, Umwelt- und Biodiversitätsschutz zu priorisieren (BMWK, BMEL, BMUV 2022). Im Sinne der Mehrfachnutzung geht es um die Wiederverwendung, das Recycling und die Nutzung von Altholz. Altholz umfasst gemäß Altholzverordnung Hölzer und Holzprodukte, die bereits einem Verwendungszweck zugeführt worden sind und am Ende der Nutzungsphase als Abfall zur Entsorgung bereitstehen. Sofern das Holz nicht bestimmte Verunreinigungen z.B. Schadstoffbelastungen oder Holzmittelbehandlungen aufweist, empfiehlt das Umweltbundesamt eine konsequente stoffliche (Weiter-)Nutzung und Rückführung in die Kreislaufwirtschaft (Schütze et al. 2021). Auch fordert das Umweltbundesamt im Einklang mit einer Verringerung von Primärrohstoffen sowie nachhaltigen Biomassenutzung auf die **energetische Nutzung von Anbaubiomasse, inkl. Waldholz, zu verzichten**.

Damit ein größerer Holzproduktspeicher nicht zu einer stärkeren Belastung der Kohlenstoffvorräte weder in hiesigen noch in ausländischen Wäldern führt, muss die Nutzung energetischer Biomasse zwingend zurückgehen. In Deutschland wird aktuell etwa die Hälfte des Holzaufkommens aus dem Wald und aus Rest- und Abfallstoffen für energetische Zwecke genutzt – rund 60 Mio. m<sup>3</sup> (Hennenberg et al. 2023). Das bedeutet, dass mittel- und langfristig der Einsatz von Holz zu Wärmezwecken im Privaten als auch im Gewerblichen drastisch reduziert werden muss.<sup>17</sup> Das darf allerdings nicht zu einer größeren Nachfrage nach Importholz führen, da in diesem Fall Emissionen, z.B. aus Holzernten lediglich ins Ausland verlagert werden. Es kommt zu einem sogenannten *Carbon Leakage*-Effekt, vgl. Abbildung 3.<sup>18</sup>

#### **Zusätzliche Klimaschutzeffekte durch stoffliche Holznutzung**

Die stoffliche Nutzung kann darüber hinaus Erzeugnisse aus anderen Rohstoffen substituieren und damit einen zusätzlichen Klimaschutzeffekt außerhalb des LULUCF-Sektors generieren. Es werden zwei Arten von Substitutionseffekten unterschieden. Beispielsweise, wenn Holz als Rohstoff alternative Rohstoffe oder Materialien, die mit einem höheren Energieaufwand in ansonsten funktionsgleichen Systemen hergestellt wurden, ersetzt. Hafner et al. (2017) errechneten eine Einsparung von jährlich fast 12 Mio. t CO<sub>2</sub>, wenn die Holzbauweise im Vergleich zu mineralischen Baustoffen im Wohnungsneubau in Deutschland forciert werden

---

<sup>17</sup> Fast die Hälfte der Energieholzverwendung entfällt auf private Haushalte, z.B. als Kaminholz, und die andere Hälfte auf Biomasse-Heizkraftwerken (im Wesentlichen große Kraftwerke über 1 MW).

<sup>18</sup> Grundsätzlich könnte Holz aus Agroforst oder Kurzumtriebsplantagen genutzt werden, um die Waldsenke zu entlasten, allerdings steht Holz aus diesen Quellen nicht im ausreichenden Umfang zur Verfügung um die Entnahmeeffekte kompensieren.

sollte. Diese THG-Minderung basiert auf einem angenommenen Zeitraum von 14 Jahren von 2016 bis 2030 (Hafner et al. 2017).

### Die stoffliche und energetische Nutzung von Nadel- und Laubhölzern

Gemessen am gesamten Rohholzaufkommen aus dem Wald in Deutschland betrug der Anteil des Laubrohholzes lediglich ein Fünftel. Dabei werden 10 % des geernteten Laubholzes stofflich verwendet. Diese Werte beziehen sich auf das Jahr 2020 und reflektieren die Entwicklung des letzten Jahrzehnts (Schmitz et al. 2022). Die Gründe für die geringe Laubholznutzung sind vielschichtig. Betrachtet man den Bausektor, in dem die größten Mengen verwendet werden, so liegen die Gründe zum Teil in den typischen Laubholzeigenschaften wie die Krümmenschaftigkeit und entsprechend begrenzter Länge gerader Bauteile beim Einsatz von Vollhölzern. Bei den Holzbau- und Holzwerkstoffen zählt der größere technische Aufwand und die Kosten, z.B. durch zeit- und kostenintensive Trocknung zu den wesentlichen Hindernissen. Noch fehlen standardisierte Verfahren bei der Verarbeitung sowie entsprechende Vermarktungssegmente (Wolf et al. 2022; FNR 2020).

Mittel- bis langfristig ist mit einem Rückgang an Nadelhölzern zu rechnen. Zum einen aufgrund der Fragilität gegenüber den Klimawandelauswirkungen von Nadelhölzern, insbesondere der Kiefer und Fichte in Reinbeständen oder wenig strukturierten und artenreichen Beständen (in tieferen Lagen). Zum anderen aufgrund des parallel stattfindenden Umbaus der Wälder hin zu Laub- und Laubmischwäldern, der u.a. durch Wiederaufforstungsmaßnahmen der trockenen Sommer von 2018 bis 2020 Förderungen weiter beschleunigt wird. Um eine Nachfrageverlagerung hin zu importiertem Nadelholz entgegenzuwirken, sind Forschungsaktivitäten u.a. für die stärkere Nutzung und Vermarktung von Laubhölzern besonders in langlebigen Materialien und Produkten von großer Bedeutung.

### Sensitivitätsanalyse: Erhöhung des Holzproduktspeichers durch mehr stoffliche Holznutzung

Durch mehr stoffliche Nutzung, insbesondere langlebige Holzprodukte, kann der Holzproduktspeicher erhöht werden. Wie sich eine erhöhte Zufuhr von Holzarten mit langfristigen langen Nutzungsdauern, sogenannten Halbwertszeiten, auf den Holzproduktspeicher auswirkt, haben Reise et al. (2024) untersucht. In einem ersten Schritt wurden zu diesem Zweck die Holzproduktgruppen Schnittholz, Holzwerkstoffe, Papier und Pappe, unterteilt nach inländischem Konsum und Export,<sup>19</sup> mit ihren jeweils durchschnittlichen Zuflüssen im Zeitraum 2011 bis 2020 in Mio. m<sup>3</sup> abgebildet, vgl. Tabelle 2.

**Tabelle 2 Mittlerer Zufluss an Holzprodukten in den Holzproduktspeicher**

Holzproduktgruppe	Mittlerer Zufluss an Holzprodukten (2011-2020) (Mio. m <sup>3</sup> )
Schnittholz (inländischer Konsum)	14,78
Schnittholz (Export)	5,98
Holzwerkstoffe (inländischer Konsum)	7,50
Holzwerkstoffe (Export)	13,72
Papier und Pappe (inländischer Konsum)	8,73
Papier und Pappe (Export)	13,72
<b>Summe</b>	<b>64,43</b>

Quelle: Reise et al. 2024. Die Daten basieren auf der Inventardaten des Umweltbundesamts 2022 (UBA 2022).

<sup>19</sup> Nach den internationalen Bilanzierungsregeln lt. des Zwischenstaatlichen Ausschlusses über Klimaänderungen (engl. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) werden alle inländisch produzierten Holzprodukte im Holzproduktspeicher abgebildet.

Um den Holzproduktspeicher nachhaltig zu erhöhen, werden langlebige Holzprodukttypen, das sind Schnittholz und Holzwerkstoffe, diskutiert.

Tabelle 3 zeigt beispielhaft die Entwicklung einer 50 %igen Steigerung des Holzproduktspeichers durch Schnittholz und Holzwerkstoffen für die Jahre 2025, 2030, 2040 und 2045 basierend auf den mittleren Zufuhren (Tabelle 2) von 2011 bis 2020. Der Bezugswert zur Ableitung der jeweiligen Zuflüsse ist der Mittelwert der vergangenen Jahre 2011 bis 2020. (In der Ergebniszeile ist der kumulierte Mittelwert 20,99 – die Hälfte der Summe des mittleren Zuflusses an Schnittholz und Holzwerkstoffen (41,98) aus Tabelle 2 angegeben.)

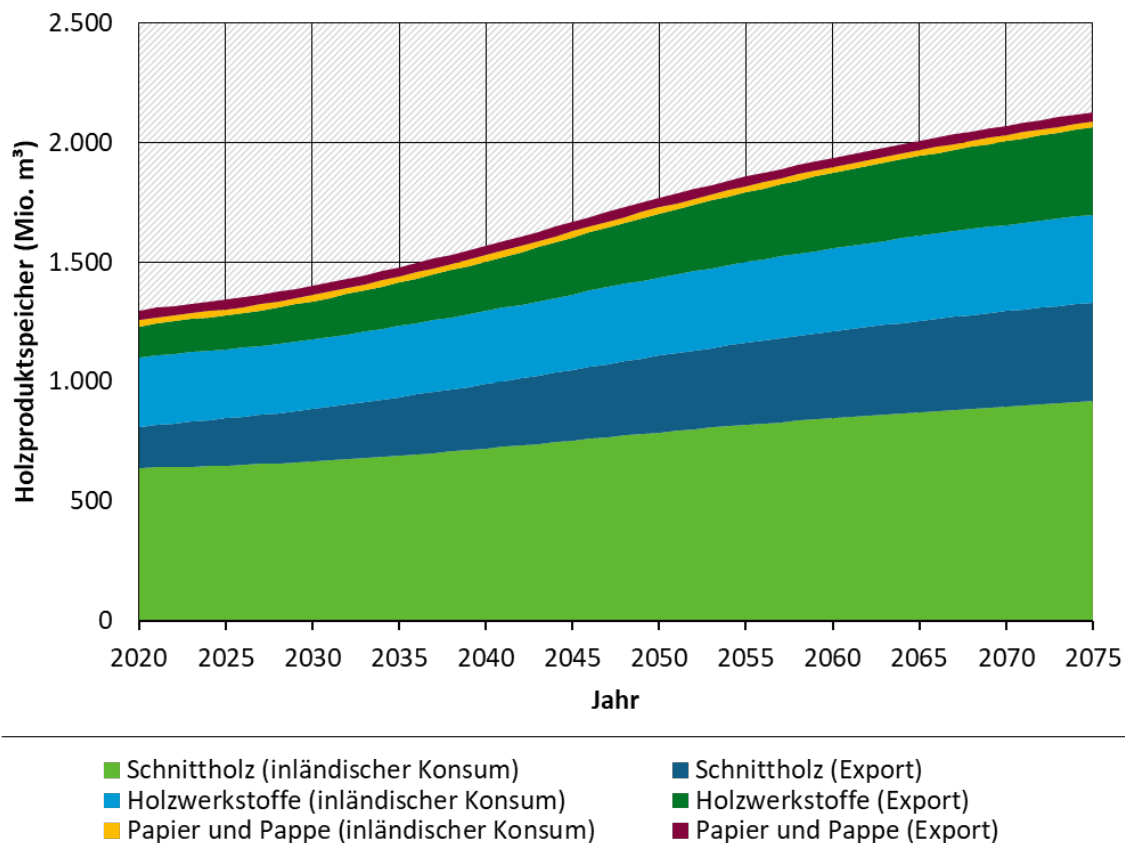
**Tabelle 3      Zusätzlicher angenommener Zufluss an Holzprodukten in den Holzproduktspeicher (kumulativ) für die Sensitivität einer 50 %-igen Steigerung**

Produktgruppe (Mio. m <sup>3</sup> )	2025	2030	2035	2040	2045	2050-2075
Schnittholz (inländischer Konsum)	0,74	2,96	4,43	5,91	7,39	7,39
Schnittholz (Export)	0,30	1,20	1,79	2,39	2,99	2,99
Holzwerkstoffe (inländischer Konsum)	0,38	1,50	2,25	3,00	3,75	3,75
Holzwerkstoffe (Export)	0,69	2,74	4,12	5,49	6,86	6,86
<b>Ergebnis</b>	2,10	8,40	12,59	16,79	20,99	20,99

Quelle: Reise et al. 2024.

Durch die zusätzlichen Zuflüsse langlebiger Holzprodukte nimmt der Holzproduktspeicher zu, siehe Abbildung 4, die diese Entwicklung für die Jahre 2020 bis 2075 in Mio. t abgebildet. Die Berechnung basiert auf der internationalen Berechnungsmethodik nach IPCC und den berichteten Inventar-Daten zum Holzproduktspeicherzufluss (UBA 2022 – vgl. Submission 2022). Im Ergebnis steigt der Vorrat von 1,3 Mrd. m<sup>3</sup> in 2020 auf knapp 1,6 Mrd. m<sup>3</sup> in 2045 und schließlich auf 2,1 Mrd. m<sup>3</sup> im Jahr 2075. Das entspricht einem Wachstum von fast 25 % bis 2045 und fast 40 % bis 2075.

**Abbildung 4 Entwicklung des Holzproduktspeichers durch zusätzlich angenommenen Zufluss (kumulativ) für die Sensitivität einer 50 %-igen Steigerung**



Quelle: Reise et al. 2024 auf Basis von Berechnungen in FABio-Land (vgl. Annahmen in Tabelle 2)

Aufgrund der Langlebigkeit der Produkte und des damit einhergehenden verzögerten Abgangs aus dem Holzproduktspeicher, weichen der Zufluss an langlebigen Holzprodukten und THG-Bilanz des Holzproduktspeichers voneinander ab, vgl. Abbildung 5. Die Abbildung zeigt die THG-Bilanz des Holzproduktspeichers in Mio. CO<sub>2</sub>-Äq von 2021 bis 2075 bei einer 10, 20, 30, 40 und 50 %igen-Steigerung gegenüber eines konstanten Holzzuflusses (0 % Veränderung).

Mit den angenommen kontinuierlich steigenden Zuflüssen an Holzprodukten bis zum Jahr 2045 steigt auch die Senkenleistung stark an. Bei einer 50 %igen Steigerung liegt das Plus des Kohlenstoffspeichers bei 14,5 Mio. t CO<sub>2</sub> in 2045. Der Wert der Zuflüsse ist allerdings niedriger als die Senkenleistung, die bei rund 21 Mio. t CO<sub>2</sub> im Jahr 2075 liegt. Das liegt daran, dass parallel zu den Zuflüssen Holzprodukte am Ende ihres Lebenszyklus den Holzproduktspeicher wieder verlassen. Da die Dynamik dieser Abflüsse zeitverzögert reagiert, findet weiterhin eine zusätzliche Senkenleistung statt, die aber kontinuierlich abnimmt bis ein neuer Gleichgewichtszustand zwischen Abfluss und Zufluss erreicht ist.

Im Ergebnis zeigt sich bei einer Verdoppelung des Zuflusses über die Jahre ein stetiges Wachstum bis hin zu einem zusätzlichen Kohlenstoffspeicher in Höhe von 14,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq in 2045. Das entspricht einer Zunahme um einen Faktor von fast 4 verglichen mit dem Holzproduktspeicher der letzten 10 Jahre (2013 bis 2022), der im Mittel bei 3,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq lag (UBA 2024). Zu beachten ist, dass der Kohlenstoffspeichergewinn von 14,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq niedriger ist, als die CO<sub>2</sub>-Menge, die mit dem Zufluss an Holzprodukten generiert wird. Das liegt darin begründet, dass parallel zur CO<sub>2</sub>-Einspeicherung Holzprodukte aus dem Holzproduktspeicher auch wieder abfließen. Ab dem Jahr 2045 bleibt der Zufluss an Holzprodukten konstant auf dem neuen Niveau. Dabei bleibt die zusätzliche Senkenleistung erhalten, die jedoch im Zeitverlauf aufgrund der zeitverzögerten Dynamik des Holzabflusses

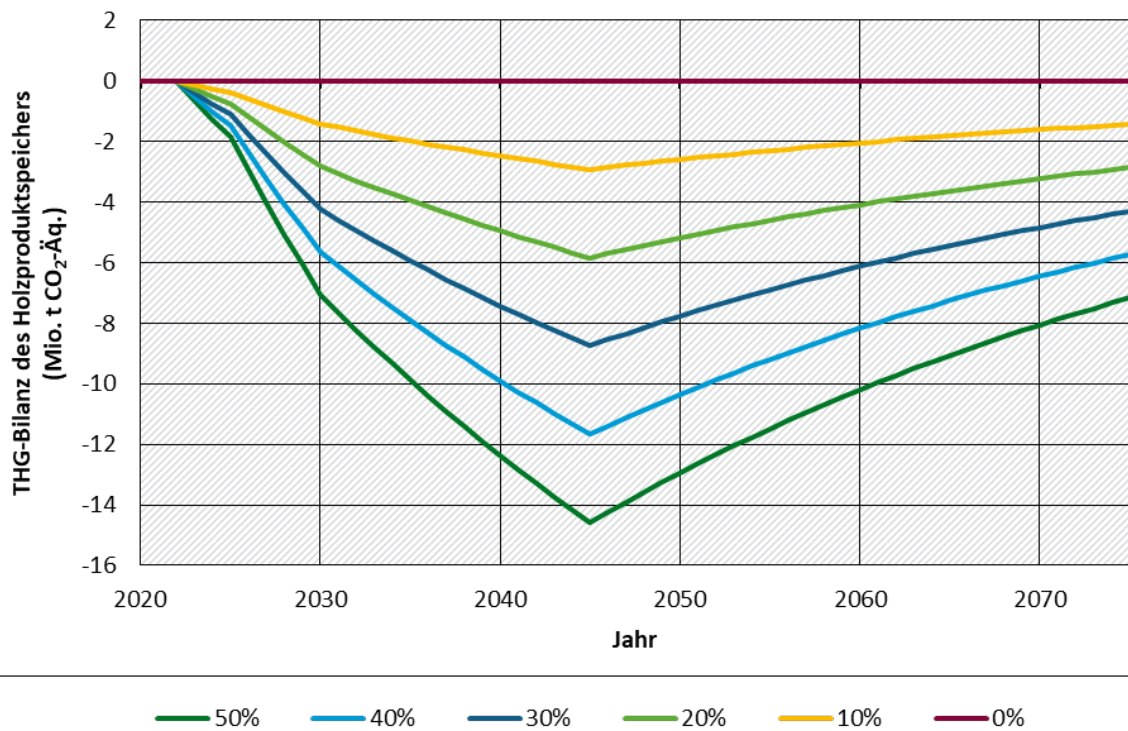
kleiner wird. Sie nimmt bis zu dem Zeitpunkt ab, in dem ein neuer Gleichgewichtszustand bei einem erhöhten Holzproduktspeicher erreicht wird, vgl. Abbildung 5 (Reise et al. 2024).

Bei einer 10 %igen Erhöhung des Zuflusses ergibt sich ein Zugewinn von knapp 3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq in 2045. Auch hier bleibt, ab der angenommenen Sättigung des Marktes ab 2045, der Kohlenstoffspeicher auf konstant hohem Niveau ohne weiter anzuwachsen. Ebenso zeigt sich die verzögerte Reaktion aufgrund der längeren Halbwertszeiten der Holzprodukte in den Folgejahren an dem zunächst noch positiven Wachstum des Produktspeichers, welches aber kontinuierlich abnimmt, vgl. Abbildung 5.

Die Sensitivitätsanalyse von Reise et al. (2024) weist nach, dass langlebige Holzprodukte zu einer signifikanten Senkenzunahme führen können. Dieser Senkengewinn ist aber nur dann mit nachhaltigen positiven Effekten verbunden, wenn gleichzeitig die Nutzung von Produkten mit kurzen Nutzungsdauern (wie Papier und Pappe) und Energieholz zurückgehen, um die Gesamtmenge genutzten Holzes nicht zu erhöhen und bestenfalls zu verringern. Dies bedeutet, dass besonders die Holznachfrage, inländisch wie auch ausländisch, für energetische Zwecke reduziert werden muss. Würde der Verzicht lediglich im Inland stattfinden und durch Importe kompensiert werden, so würde die verbesserte inländische Klimabilanz zu Lasten einer schlechteren Klimabilanz in den Herkunftsländern erfolgen. Eventuell geringere Nachhaltigkeitsanforderungen an die Forstwirtschaft in den Herkunftsländern unterminieren nicht nur Klima-, sondern auch Biodiversitäts- und Umweltschutz.

Reise et al. (2024) weisen darauf hin, dass insbesondere für Energieholz, welches direkt aus dem Wald entnommen wird, eine Umwidmung hin zu langlebigen stofflichen Produkten besonders vorteilhaft ist. Das Holz kann als Kohlenstoffspeicher im Wald und Biodiversitätshort im Waldökosystem verbleiben oder der im Holz gebundene Kohlenstoff kann langfristig in Holzprodukten fixiert werden (Fehrenbach et al. 2022).

**Abbildung 5 Die Sensitivitäten einer 10, 20, 30, 40 und 50 %igen Steigerung bis 2045 des Holzproduktspeicher als Differenz zum Szenario mit einem konstanten Zufluss an Holzprodukten (0 % Steigerung)**



Quelle: Reise et al. 2024 auf Basis von Berechnungen des Modells „FABio-Land“. Prozentwerte: 0 % bis 50 % erhöhter Zufluss an Holzprodukten in den Holzproduktspeicher im Vergleich zum Mittelwert der Jahre 2011 bis 2020 (Tabelle 1). Siehe beispielhafter Pfad für den 50 % erhöhter Zufluss in Tabelle 3 und Abbildung 4.

### 3 Zusammenfassung

Die Steigerung der Senkenleistung der Wälder und die Erhöhung des Holzproduktspeichers sind von herausragender Bedeutung für die Einhaltung des LULUCF-Ziels. So müssen laut KSG mindestens 40 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq pro Jahr im LULUCF-Sektor bis 2045 eingebunden werden. Unter der Maßgabe eines sehr ambitionierten Klimaschutzes und moderaten zukünftigen Klimawandelauswirkungen könnte die LULUCF-Senke sektorübergreifende Residualemissionen ausgleichen.

Zunehmend bedroht werden die natürlichen Kohlenstoffspeicher und deren Ausbau durch Störungen, die bedingt durch den anthropogenen Klimawandel an Intensität und Frequenz weiter zunehmen. In der Konsequenz werden Kohlenstoffvorräte abgebaut und die Resilienz der Wälder gegenüber den Störungen, wie Insekten- und Wetterkalamitäten, nimmt ab. Szenarien des Öko-Instituts zeigen, dass bereits mittlere Störungen zu einem jährlichen Verlust der Senkenleistung in Höhe von 17 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (Mittelwert 2022 bis 2054) gegenüber geringen Störungen führen könnten. Starke Störungen würden jährliche Verluste von bis zu 32 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (Mittelwert 2022 bis 2043) verursachen. Damit sind nicht nur die Kohlenstoffvorräte stark gefährdet. Auch werden die vielfältigen Ökosystemleistungen wie die mittel- und langfristige Waldholzversorgung, die Biodiversität und die Klimawandelanpassung (z.B. bei Hochwasser, Überschwemmung, Hitze) in Mitleidenschaft gezogen.

Um erstens die Waldsenke auszubauen, müssen die folgenden Hebel ambitioniert und im Einklang mit dem natürlichen Klimaschutz umgesetzt werden: **die Steigerung der Kohlenstoffvorräte und die Waldmehrung (1) und der Waldumbau (2)** einschließlich einer möglichst naturnahen Bewirtschaftung. Der Vorratsaufbau und die Anlegung zusätzlicher Waldflächen sowie der Umbau hin zu Laub- und Laubmischwäldern sollten den Vorsätzen eines möglichst hohen Struktur- und Artenreichtums und einer zunehmend konsequenten Einzelbaumbewirtschaftung unterliegen. Auch braucht es **mehr geschützte Waldbestände (3)**. Das bedeutet, dass die Holzernte entweder eingeschränkt wird oder, abhängig vom Schutzgebiet, nicht stattfindet, um Kohlenstoffvorräte und Biodiversität besonders in ökologisch wertvollen und stabilen Wäldern zu erhalten und zu fördern.

Zweitens ist, neben dem Ausbau der Waldsenke, die Steigerung der Kohlenstoffvorräte in Holzprodukten ein zentrales Handlungsfeld im LULUCF-Sektor. Um den Holzproduktspeicher nachhaltig zu erhöhen, müssen sowohl eine **(1) stärkere stoffliche Holznutzung zulasten der ausgeprägten energetischen Nutzung** als auch eine **(2) längere Nutzung holzbasierter Produkte**, basierend auf einer nachhaltigen und effizienten Holznutzung, stattfinden. Zu diesem Zweck muss der Holzrohstoff stärker für langlebige Produkte und Materialien im Übergang zu einer Bioökonomie verwendet werden. Im Mittelpunkt stehen dabei die Kaskaden- und Mehrfachnutzung von Holz, wie die Wiederverwendung und das Recycling von Altholz. Szenarien des Öko-Instituts zeigen, dass mit einer Verdoppelung des mittleren Zuflusses an langlebigen Holzprodukten (bezogen auf den Zeitraum 2012 bis 2017) ein Kohlenstoffspeichergewinn in Höhe von 14,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq in 2045 erzielbar ist. Das entspricht in etwa einer Vervierfachung des Holzproduktspeichers gegenüber der durchschnittlichen Speicherleistung der letzten Dekade (2013 bis 2022).

Eine stärkere stoffliche Holznutzung birgt das Risiko, dass die Holzerntemengen die entsprechend stärkere Nachfrage nicht decken können. Damit in der Folge die Holznachfrage nicht ins Ausland verlagert wird, muss der Anteil energetischer Holznutzung sinken. Dabei stellen die reduzierte Nachfrage nach Energieholz und stärkere stoffliche Holznutzung ein Scharnier zwischen nachhaltiger Waldbewirtschaftung und dem Ausbau des Holzproduktspeichers dar. Zusammen mit dem Erhalt und Ausbau der Waldsenke kann ein entscheidender Beitrag zur Erreichung der LULUCF-Ziele und zur THG-Neutralität in 2045 geleistet werden.

## 4 Quellenverzeichnis

Ahmad, L.; Biswas, A.; Warland, J.; Anjum, I. (2023). Climate change effect on forests. Climate Change and Agrometeorology. S. 195-214. Download unter: [Climate Change Effect on Forests | SpringerLink](#)

ANW - Arbeitsgemeinschaft Naturgemäße Waldwirtschaft Deutschland e.V. (2022): Ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit durch naturgemäße Waldwirtschaft - Anlage von Dauerbeobachtungsflächen und Marteloskopien in Deutschland im Rahmen eines europäischen Netzwerkes. Im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft. Download unter: [Projektverzeichnis - Details \(fnr.de\)](#)

BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.) (2021): Zahlen und Fakten – Zum Waldgipfel am 2. Juni 2021. Download unter: [zahlen-fakten\\_NWG2021.pdf \(waldgipfel.de\)](#)

BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.) (2024): Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2023. Bonn. Download unter: [Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2023 \(bmel.de\)](#)

BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.) (2023): Massive Schäden – Einsatz für Wälder. Bonn. Download unter: [BMEL - Wald in Deutschland - Massive Schäden - Einsatz für die Wälder – Stand: 12.07.2023](#)

BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.) (2018): Waldböden in Deutschland. Bonn. Ausgewählte Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung. Download unter: [Waldböden in Deutschland - Ausgewählte Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung \(bmel.de\)](#)

BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.) (2014): Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Berlin. Download unter: [bundeswaldinventur3.pdf \(bmel.de\)](#)

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020): Für eine naturnahe und klimastabile Waldzukunft. Position des BMU für die Fortführung und Aktualisierung der Waldstrategie 2020. Download unter: [Für eine naturnahe und klimastabile Waldzukunft \(bmuv.de\)](#)

BMUV - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hrsg.) (2023): Natürlicher Klimaschutz. Klimaschutz mit Natur verbinden. Download unter: [BMUV: Natürlicher Klimaschutz – Stand 22.11.2023.](#)

BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz; BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft; BMUV - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hrsg.) (2022): Eckpunkte für eine Nationale Biomassestrategie vom 28. September 2022. Download unter: [Eckpunkte für eine Nationale Biomassestrategie \(NABIS\) \(bmel.de\)](#)

Bode, W.; Kant, R. (2021): Dauerwald – leicht gemacht. Ein Kurzleitfaden für die Praxis. B.A.U.M. e.V. (Hrsg.). 1. Auflage. Natur+Text. Rangsdorf.

Bolte, A. (2020): Wie lassen sich die Wälder in Deutschland als Kohlenstoffsенke erhalten. In: Agrarsoziale Gesellschaft e.V. (Hrsg): Schwerpunkt Wälder im Klimawandel. S. 17-19. Download unter: [LR0220-Schwerpunkt-Wald-im-Klimawandel.pdf \(asg-goe.de\)](#)

Bolte, A.; Ammer, C.; Anninghöfer, P.; Bauhus, J.; Eisenhauer, D.-R.; Geissler, C.; Leder, B.; Petercord, R.; Rock, J.; Seifert, T.; Spathelf, P. (2021): Fakten zum Thema: Wälder und Klimaschutz - Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten (DVFFA) (Hrsg.), S. 12-15. Download unter: [Fakten zum Thema: Wälder und Klimaschutz \(thuener.de\)](#)

Böttcher, H.; Hennenberg, K.; Winger, C. (2018a): FABio-Waldmodell – Modellbeschreibung Version 0.54. Stand Nov. 2017. Öko-Institut e.V.. Berlin. Download unter: [FABio-Waldmodell | oeko.de](#)

Böttcher, H.; Hennenberg, K.; Winger, C. (2018b): Waldvision Deutschland - Beschreibung von Methoden, Annahmen und Ergebnissen. Öko-Institut e.V.. Berlin. Download unter: [WaldvisionDeutschland - Beschreibung von Methoden, Annahmen und Ergebnissen \(oeko.de\)](#)

Buras A.; Meyer, B.; Zang, C.S. (2020): Wie geht es den deutschen Wäldern. ASG 02/2020. S. 14-16. Download unter: [LR0220-Schwerpunkt-Wald-im-Klimawandel.pdf \(asg-goe.de\)](#)

BfN – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.) (2015): Waldformen in Deutschland. Download unter [Waldformen in Deutschland | BfN](#)

BfN – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.) (2020): Wälder im Klimawandel: Steigerung von Anpassungsfähigkeit und Resilienz durch mehr Vielfalt und Heterogenität. Position. Bonn. Download unter: [Wälder im Klimawandel: Steigerung von Anpassungsfähigkeit und Resilienz durch mehr Vielfalt und Heterogenität \(bfn.de\)](#)

BfN – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.) (2023): Gebietsfremde Baumarten/Invasivität. Download unter: [Gebietsfremde Baumarten/Invasivität | BfN](#)

COM(2020) 380 final: Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen vom 20.5.2020 über die EU-Biodiversitätsstrategie – Mehr Raum für die Natur in unserem Leben. Download unter: [resource.html \(europa.eu\)](#)

Destatis – Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (2023): Code - 41261-0001: Schadhholzeinschlag: Deutschland, Jahre, Holzartengruppen und Code - 41261-0003: Schadhholzeinschlag: Deutschland, Jahre, Einschlagsursache, Holzartengruppen, Waldeigentumsarten. Download unter: [Statistisches Bundesamt Deutschland - GENESIS-Online: Statistik: 41261 \(destatis.de\)](#)

Destatis – Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (2019): Forstwirtschaftliche Bodennutzung – Holzeinschlagsstatistik. Fachserie 3 – 3.3.1. Download unter: [Forstwirtschaftliche Bodennutzung - Holzeinschlagsstatistik - Fachserie 3 Reihe 3.3.1 - 2018 \(destatis.de\)](#)

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2015): State of Europe's Forests 2015. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe (Hrsg). Download unter: [soef 21 12 2015.pdf \(foresteurope.org\)](#)

Fehrenbach, H.; Bischoff, M.; Böttcher, H.; Reise, J.; Hennenberg, K. J. (2022): The missing limb: Including impacts of biomass extraction on forest carbon stocks in greenhouse gas balances of wood use. In: Forests 13, S. 1–14. Download unter: [Forests | Free Full-Text | The Missing Limb: Including Impacts of Biomass Extraction on Forest Carbon Stocks in Greenhouse Gas Balances of Wood Use \(mdpi.com\)](#)

FNR – Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.) (2018): Rohstoffmonitoring Holz. Daten und Botschaften. Download unter: [Rohstoffmonitoring Holz: Daten und Botschaften \(fnr.de\)](#)

FNR – Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e.V. (2023b): Holzbasierte Bioökonomie. Download unter: [Holzbasierte Bioökonomie \(fnr.de\)](#)

FNR – Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e.V. (2020): Laubholz-Produktmärkte aus technisch-wirtschaftlicher und marktstrukturierter Sicht. Download unter: [Broschüre Laubholz-Produktmärkte aus technisch-wirtschaftlicher und marktstruktureller Sicht \(fnr.de\)](#)

Forzieri, G.; Girardello, M.; Ceccherini, M.; Spinoni, J.; Feyen, L.; Hartmann, H.; Beck, P. S A, Camps-Valls, G.; Chirici, G.; Mauri, A.; Cescatti, A. (2021): Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests. Nature Communications 12. Artikel 1081 (2021). Download unter: [Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests | Nature Communications](#)

Hafner A.; Rüter S.; Ebert S.; Schäfer S.; König, H.; Cristofaro L.; Diederichs; S.; Kleinhenz, M.; Krechel, M. (2017): Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau). Download unter: [Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren \(THG-Holzbau\) \(thuenen.de\)](#)

Hennenberg, K; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Reise, J.; Köppen, S.; Bischoff, M.; Fehrenbach, H.; Pehnt, M.; Werle, M.; Mantau, U. (2022): Aktuelle Nutzung und Förderung von Holzenergie – Teilbericht zu den Projekten

BioSink und BioWise. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 12/2022. Dessau-Roßlau. Download unter: [Aktuelle Nutzung und Förderung der Holzenergie \(umweltbundesamt.de\)](https://www.umweltbundesamt.de/aktuelle-nutzung-und-forderung-der-holzenergie)

Huan, Y.; Chen, Y.; Castro-Izaguirre, N.; [...] (2018): Impacts of species richness on productivity in a large-scale subtropical forest experiment. In: Science 362. S. 80-83. Download unter: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aat6405>

Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut) (Hrsg.) (2023): Clusterstatistik Forst und Holz – Cluster Forst und Holz: Umsatz, Bruttowertschöpfung, Unternehmensanzahl und Beschäftigte für 2020. Download unter: [Thünen: Clusterstatistik Forst & Holz \(thuenen.de\)](https://www.thuenen.de/thuenen-clusterstatistik-forst-und-holz)

Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut) (Hrsg.) (2017): Treibhausgasinventar (2017). 1.02 Waldfläche [ha] nach Land und Waldspezifikation. Download unter: [BUNDESWALDINVENTUR ERGEBNISDATENBANK \(bwi.info\)](https://www.bun-deswaldinventur.de/ergebnisse) Kahlenborn, W.; Porst, L.; Voß, M.; Fritsch, U.; Renner, K.; Zebisch, M.; Wolf, M.; Schönthaler, K.; Schauser, I. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Dessau-Roßlau. Download unter: [Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland \(umweltbundesamt.de\)](https://www.umweltbundesamt.de/klimawirkungs-und-risikoanalyse-2021-fuer-deutschland)

Knauf, M.; Frühwald, A. (2020): Laubholz-Produktmärkte aus technisch-wirtschaftlicher und marktstruktureller Sicht. FNR – Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.) Neuauflage. 2020. Download unter: [Broschüre Laubholz-Produktmärkte aus technisch-wirtschaftlicher und marktstruktureller Sicht \(fnr.de\)](https://www.fnr.de/broschue-laubholz-produktmaerkte)

KSG – Bundesklimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 15. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 235) geändert worden ist. Download unter: [KSG - Bundes-Klimaschutzgesetz \(gesetze-im-internet.de\)](https://www.gesetze-im-internet.de/ksg)

Luderer, L.; Kost, C; Sörger, D. (Hrsg.) (2021): Deutschland auf dem Pfad zur Klimaneutralität – Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Potsdam. Download unter: [content \(pik-potsdam.de\)](https://www.pik-potsdam.de/content)

Luick, R.; Hennenberg, K.; Leuschner, C.; Grossmann, M.; Jedicke, E.; Schoof, N.; Waldenspuhl, T. (2021): Urwälder, Natur- und Wirtschaftswälder im Kontext von Biodiversitäts- und Klimaschutz Teil 1: Funktionen für die biologische Vielfalt und als Kohlenstoffspeicher. In: Naturschutz und Landschaftsplanung 53 (12). S. 12-25. Download unter: [nul12-21-012-025-luick-nach-druck\\_g4ydemzsha4q.pdf \(nul-online.de\)](https://www.nul-online.de/nul12-21-012-025-luick-nach-druck_g4ydemzsha4q.pdf)

MLV NRW - Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2010): Abschlussbericht der Landesregierung Nordrhein-Westfalen zu den Folgen des Sturmereignisses „Kyrill“ vom 18./19. Januar, Download unter: [Abschlussbericht der Landesregierung von Nordrhein-Westfalen zu ... \(yumpu.com\)](https://www.yumpu.com/nw/document/view/11111111/abschlussbericht-der-landesregierung-von-nordrhein-westfalen-zu-...)

Öko-Institut (2024): „Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland“. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte xx/2024. Dessau-Roßlau. Veröffentlichung auf der Webseite des Umweltbundesamts in Kürze.

PI – Presseinformation 2022-01 DRL – Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum vom 21.2.2022: Satellitendaten machen großflächige Verluste des Baumbestands sichtbar. Sorge um den deutschen Wald. Download unter: [DLR – Der deutsche Wald verändert sich](https://www.dlr.de/der-deutsche-wald-veraendert-sich)

PI – Presseinformation Nr. 120 des Statistischen Bundesamts (Destatis) vom 18. März 2022: Tag des Waldes: Viel Schadholz durch Trockenheit und Insektenbefall 2020. Download unter: [Tag des Waldes: Viel Schadholz durch Trockenheit und Insektenbefall 2020 - Statistisches Bundesamt \(destatis.de\)](https://www.destatis.de/tag-des-waldes-viel-schadholz-durch-trockenheit-und-insektenbefall-2020)

Pfeiffer, M.; Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Reise, J.; Referenzszenario der Holzverwendung und der Waldentwicklung im UBA-Projekt BioSINK. Working Paper. Öko-Institut e.V.. Download unter: <http://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Referenzszenario-BioSINK.pdf>

Purr, K; Günther, J; Lehmann, H; Nuss, P (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. Studie. Dessau-Roßlau. Download unter: [Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE: Langfassung. Download unter: www.umweltbundesamt.de/](https://www.umweltbundesamt.de/wege-in-eine-ressourcenschonende-treibhausgasneutralitaet)

- Reise, J.; Hennenberg, K.; Benndorf, A.; Böttcher, H.: Klimaschutzmaßnahmen im LULUCF-Sektor: Potenziale und Sensitivitäten – Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE)“. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 10/2024. Dessau-Roßlau. Download unter: [Abschlussbericht Klimaschutzmaßnahmen im LULUCF-Sektor: Potenziale und Sensitivitäten \(umweltbundesamt.de\)](#)
- Riedel, T. (2019): Unsere Wälder – (noch) eine CO<sub>2</sub>-Senke. In: Wissenschaft erleben 2019/2: 10–11. (online nicht verfügbar)
- Riedel, T.; Stürmer, W.; Hennig, P.; Dunger, K.; Bolte, A. (2019): Wälder in Deutschland sind eine wichtige Kohlenstoffsенke. AFZ-Der Wald 14/2019. S 14-18. Download unter: [AFZ 14 19 Kohlenstoff Artikel 2 Riedel.pdf \(thuenen.de\)](#)
- Rüter, S. (2016): Der Beitrag der stofflichen Nutzung von Holz zum Klimaschutz – Das Modell WoodCarbonMonitor. Dissertation – Technische Universität München, München. Download unter: [Der Beitrag der stofflichen Nutzung von Holz zum Klimaschutz - Das Modell WoodCarbonMonitor \(thuenen.de\)](#)
- Rüter, S.; Stürmer, W.; Dunger, K. (2017): Treibhausgasbilanzen der WEHAM-Szenarien. In: AFZ DerWald 13/2017, S. 30–31. Download unter: [Treibhausgasbilanzen der WEHAM-Szenarien \(thuenen.de\)](#)
- Seintsch, Björn; o.A. (2017): Das WEHAM-Szenarien-Verbundforschungsprojekt. In: AFZ DerWald 13/2017, S. 10-13. Download unter: [AFZ 13 17 1 Das WEHAM-Szenarien-Verbundforschungsprojekt im Ueberblick.pdf](#)
- Schmitz, N.; Iost, S.; Jochem, D.; Polley, H.; Rüter, S.; Weimar, H.; Maack, C.; Lüdtke, J. (2022): Charta für Holz 2.0 – Kennzahlenbericht 2021 Forst&Holz. FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.). Download unter: [Charta für Holz 2.0 Kennzahlenbericht 2021 Forst & Holz \(charta-fuer-holz.de\)](#)
- Schütze, G.; Günther, J.; Fee, E.; Klatt, A.; Döring, U.; Schmitz, D.; Behnke, A.; Nowack, A.; Brozowski, F.; Fischer, J.; Güth, M.; Schwanemann, T.; Hofmeier, K. (2021): Umweltschutz, Wald und nachhaltige Holznutzung in Deutschland. Hintergrund. Dessau-Roßlau. Download unter: [Umweltschutz, Wald und nachhaltige Holznutzung in Deutschland \(umweltbundesamt.de\)](#)
- Seidl, R.; Schelhaas, M.-J.; Rammer, W.; Verkerk, P. J. (2014): Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. Nature Climate Change 4, 806–810. Download unter: [Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage | Nature Climate Change](#)
- Seidl, R.; Klonner, G.; Rammer, W.; Essl, F.; Moreno, A.; Neumann, M.; Dullinger, S.: Invasive alien pests threaten the carbon stored in Europe’s forests. Nat. Nature Communications 9. 1626 (2018). Download unter: [Invasive alien pests threaten the carbon stored in Europe’s forests | Nature Communications](#).
- Soimakallio, S.; Böttcher, H.; Niemi, J.; Mosley, F.; Turunen, S.; Hennenberg, K.; Reise, J.; Fehrenbach, H. (2022): Closing the open balance: The impact of increased tree harvest on forest carbon. In: GCB Bioenergy, Volume 14, Issue 8. Download unter: [Closing an open balance: The impact of increased tree harvest on forest carbon - Soimakallio - 2022 - GCB Bioenergy - Wiley Online Library](#)
- Spathelf, P. (2022): Waldumbau – Wie der Wald der Zukunft aussehen muss. In: Deutschlandfunk Nova vom 28. November 2022. Download unter: [Waldumbau: Wie der Wald der Zukunft aussehen muss · Dlf Nova \(deutschlandfunknova.de\)](#)
- Steinacker, C.; Engel, F.; Meyer, P. (2023): Natürliche Waldentwicklung in Deutschland: auf dem Weg zum 5 %-Ziel der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt. In: Natur und Landschaft. S. 545-552. Download unter: [Natürliche Waldentwicklung in Deutschland \(natur-und-landschaft.de\)](#)
- Triebel, K.; Huth, F.; Wagner, S.: Samenbäume und Naturverjüngungspotenziale von Pionierbaumarten zur Stärkung der Resilienz von Fichtenwäldern. Download unter: [Samenbäume und Naturverjüngungspotenziale von Pionierbaumarten zur Stärkung der Resilienz von Fichtenwäldern \(waldwissen.net\)](#)
- UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2024): Daten der Treibhausgasemissionen des Jahres 2023 nach KSG vom 15.3.2024. Dessau-Roßlau. Download unter: [Treibhausgas-Emissionen | Umweltbundesamt](#)

UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2023a): Nachhaltige Waldwirtschaft vom 26.4.2023. Dessau-Roßlau. Download unter: [Nachhaltige Waldwirtschaft | Umweltbundesamt](#)

UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2023b): Forstwirtschaft vom 3.8.2023. Dessau-Roßlau. Download unter: [Nachhaltige Waldwirtschaft | Umweltbundesamt](#)

UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2023c): Monitoringbericht 2023 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel – Bericht der interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Dessau-Roßlau. Download unter: [Monitoringbericht 2023 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel \(umweltbundesamt.de\)](#)

UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2022): Nationaler Inventarbericht. Detaillierte Berichtstabellen CRF 2021. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau. Download unter: [DEU\\_2022\\_2020\\_14012022\\_064619\\_started.xlsx \(europa.eu\)](#) – vgl. Tabelle 4 und Tabellenblatt „Table4“.

UNESCO – Deutsche UNESCO-Kommission e. V. (2023): Einzigartiges Waldökosystem von enormer Diversität. Download unter: [UNESCO-Welterbe Alte Buchenwälder und Buchenurwälder der Karpaten und anderer Regionen Europas | Deutsche UNESCO-Kommission](#)

WBGBR – Wissenschaftlicher Beirat für Biodiversität und Genetische Ressourcen beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.) (2013): Biodiversität für Grünland – unverzichtbar für Landwirtschaft und Gesellschaft. Stellungnahme. Download unter: [StellungnahmeBiodivGruenland.pdf \(bmel.de\)](#)

Welle T.; Sturm K.; Bohr Y. (2018): Alternativer Waldzustandsbericht: eine Waldökosystemtypen-basierte Analyse des Waldzustandes in Deutschland anhand naturschutzfachlicher Kriterien. Download unter: [Eine Waldökosystemtypen-basierte Analyse des Waldzustandes in Deutschland anhand naturschutzfachlicher Kriterien \(naturwald-akademie.org\)](#)

Wolf, T.; Untergutsch, A.; Wensing, C.; Mittelbach, H.; Lu-Pagenkoph, F.; Kubowitz, P. (2020): Potenziale von Bauen mit Holz Erweiterung der Datengrundlage zur Verfügbarkeit von Holz als Baustoff zum Einsatz im Holzbau sowie vergleichende Ökobilanzierung von Häusern in Massiv- und Holzbauweise. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 192/2024. Dessau-Roßlau. Download unter: [Potenziale von Bauen mit Holz \(umweltbundesamt.de\)](#)

---

## Impressum

### Herausgeber

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
[buergerservice@uba.de](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)  
[/umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)  
[/umweltbundesamt](http://www.umweltbundesamt.de)

**Stand:** September 2024, 2. Auflage

### Autorenschaft, Institution

Judith Voß-Stemping, Umweltbundesamt

### unter Mitarbeit von

Jens Günther; Jan Seven; Dr. Friederike Erleben; Reinhard, Herbener, Karlotta Schultz, Umweltbundesamt

Dr. Klaus Hennenberg; Judith Reise, Öko-Institut

Rainer Kant, B.A.U.M. e.V.

Dr. Lukas Schulte, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

### Redaktion und Grafiken

Kirsten op de Hipt; Susanne Kambor; Judith Voß-Stemping, Umweltbundesamt