

## 7.3 Waldbewirtschaftung und deren Wirkung auf die THG-Bilanz in Deutschland

KLAUS JOSEF HENNENBERG, JUDITH REISE,  
HANNES BÖTTCHER & ANKE BENNDORF

Natürliche Ökosysteme sind wichtige Kohlenstoffspeicher. In Deutschland wurden im Jahr 2019 61 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. von natürlichen Ökosystemen aufgenommen. Dabei entfiel die CO<sub>2</sub>-Festlegung zu einem Großteil auf die Waldbiomasse, gefolgt von Waldböden und Holzprodukten. Die Veränderung der Senkenleistung der Waldbiomasse ist direkt abhängig vom Holzeinschlag und liegt bei 0,25-1,7 t CO<sub>2</sub>Äq. pro geerntetem Kubikmeter Holz. Wird die Waldbewirtschaftung extensiviert, wodurch der Holzvorrat auf der Waldfläche steigt, erhöht sich auch die Senkenleistung. Um zu vermeiden, dass einfach mehr Holz importiert wird, sollte gleichzeitig die Holznutzung reduziert werden. Bei der Überlegung, in welchen Bereichen Holz aus Klimaschutzgründen eingespart werden sollte, kann eine ganzheitliche Treibhausgas (THG)-Bilanz unterstützen. Diese Bilanz sollte die Prozesskette, die Veränderung der Speicherleistung der Waldfläche und der Holzprodukte sowie Substitutionseffekte durch die Vermeidung nicht-biogener Substitute berücksichtigen. Die Veränderung der Speicherleistung der Waldfläche wird häufig in THG-Bilanzen als Vereinfachung auf null gesetzt. Es zeigt sich aber, dass die THG-Bilanz gerade von diesem Faktor stark beeinflusst wird und nicht vernachlässigt werden darf. Ein Vorratsaufbau sollte vor allem in ökologisch stabilen Laub- und Mischwäldern erfolgen, damit die Dauerhaftigkeit der CO<sub>2</sub>-Speicherung möglichst sicher ist. Die Extensivierung der Waldbewirtschaftung sollte sich auf Holzsortimente fokussieren, die zum überwiegenden Anteil für niederwertige und kurzlebige Holzprodukte wie Papier, Pappe, Verpackungsholz und Energieholz genutzt und explizit für diese Nutzung eingeschlagen werden.

**Forest management and its effect on the GHG balance in Germany:** Natural ecosystems are important carbon reservoirs. In Germany, -61 Mt CO<sub>2</sub>e were taken up by natural ecosystems in 2019. Forest biomass accounted for a large part of this CO<sub>2</sub> sink, followed by forest soils and wood products. The sink capacity of forest biomass is directly dependent on the harvest rate and ranges from 0.25-1.7 t CO<sub>2</sub>e per cubic meter of harvested wood. If wood harvest is reduced, the growing stock in the forest increases and thus also the forest sink. A holistic greenhouse gas (GHG) balance can support the consideration of the areas in which wood should be saved for climate protection reasons. This balance should take into account the process chain, the change in the storage capacity of the forest and wood products, and substitution effects through the avoidance of non-biogenic substitutes. The change in the carbon storage capacity of the forest is often set to zero in GHG balances as a simplification. However, the GHG balance is strongly influenced by this factor and must not be neglected. Building up growing stock in forests should take place primarily in ecologically stable deciduous and mixed stands, so that permanence of CO<sub>2</sub> storage is secured. The intensification of forest management should focus on wood assortments that are predominantly used for low-value and short-lived wood products such as paper, cardboard, packaging wood and energy wood, and which are felled explicitly for this use.

**La gestión forestal y su efecto sobre el equilibrio de GEI en Alemania:** Los ecosistemas naturales son importantes depósitos de carbono. En Alemania, los ecosistemas naturales absorbieron 61 millones de t CO<sub>2</sub>eq. en 2019. La determinación de CO<sub>2</sub> se atribuyó en gran parte a la biomasa forestal, seguida de los suelos forestales y los productos madereros. El cambio en el comportamiento del sumidero de la biomasa forestal depende directamente de la tala y es de 0.25 a 1.7 t CO<sub>2</sub>eq. por metro cúbico de madera cosechada. Si el manejo forestal es extensivo, lo que aumenta el suministro de madera en el área forestal, el rendimiento del sumidero también aumenta. Para evitar simplemente importar más madera, el uso de madera debe reducirse al mismo tiempo. Al considerar las áreas en las que se debe guardar madera por razones de protección del clima, un balance holístico de gases de efecto invernadero (GEI) puede ayudar. Este equilibrio debe tener en cuenta la cadena de proceso, el cambio en la capacidad de almacenamiento del área forestal y los productos de madera, así como los efectos de sustitución debido a la evitación de sustitutos no biogénicos. El cambio en la capacidad de almacenamiento del área forestal y los productos de madera, así como los efectos de sustitución debido a la evitación de sustitutos no biogénicos. El cambio en la capacidad de almacenamiento del área forestal a menudo se establece en cero en los balances de GEI como una simplificación. Sin embargo, se ha demostrado que el balance de GEI está fuertemente influenciado por este factor y no debe descuidarse. Se debe construir un suministro en bosques caducifolios y mixtos ecológicamente estables, de modo que la durabilidad del almacenamiento de CO<sub>2</sub> sea lo más segura posible. La intensificación de la ordenación forestal debería centrarse en los surtidos de madera que se utilizan predominantemente para productos de madera de baja calidad y de vida corta, como papel, cartón, madera para embalajes y leña energética, y que se utilizan explícitamente para este fin.

### Wie trägt der Wald zur THG-Bilanz Deutschlands bei?

Kohlenstoff wird ständig zwischen der Atmosphäre und den Kohlenstoffpools in terrestrischen Systemen ausgetauscht. Diese werden in der Treibhausgas(THG)-Berichterstattung in dem Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (*Land Use, Land Use Change and Forestry*, LULUCF) zusammengefasst. Für Deutschland wurde in Summe für das Jahr 2019 eine Netto-Senkenleistung des LULUCF-Sektors von -16,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. ausgewiesen (UBA 2021). Dabei werden große THG-Mengen z.B. durch die landwirtschaftliche Nutzung von organischen Böden oder die Umwandlung von Grünland oder Wald zu Ackerland oder Siedlung freigesetzt. Diese Quellen beliefen sich im Jahr 2019 auf 44,7 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. Hingegen wurden in CO<sub>2</sub>-Senken im Jahr 2019 -61,2 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. festgelegt, vor allem in der Waldbiomasse und den Waldböden, in Holzprodukten sowie bei der Neuanlage von Grünland (UBA 2021, vgl. Kap. 7.1).

In *Abb. 7.3-1* ist die THG-Bilanz der Waldfläche, der Aufforstungsfläche und der Holzprodukte im Detail dargestellt. Mit Ausnahme des Jahres 1990 (bedingt durch Störungen) liegt die THG-Bilanz dieser Quellgruppen zwischen -45 und -82 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. Insbesondere durch den Vorratsaufbau von Biomasse wurde jährlich eine Menge zwischen -13 bis -69 Mio.t CO<sub>2</sub>Äq. im Wald gespeichert. Der Waldboden nahm in der Vergangenheit zusätzlich gut 13 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. pro Jahr auf. Durch Speicherung in Holzprodukten wurde in den meisten Jahren Kohlenstoff 1-4 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. zusätzlich festgelegt. In den Jahren mit starken natürlichen Störungen (z.B. KYRILL in 2007, s.u.) wurden aufgrund von Schadholz größere Holzmengen entnommen und in den Holzspeicher überführt (*Abb. 7.3-1*).

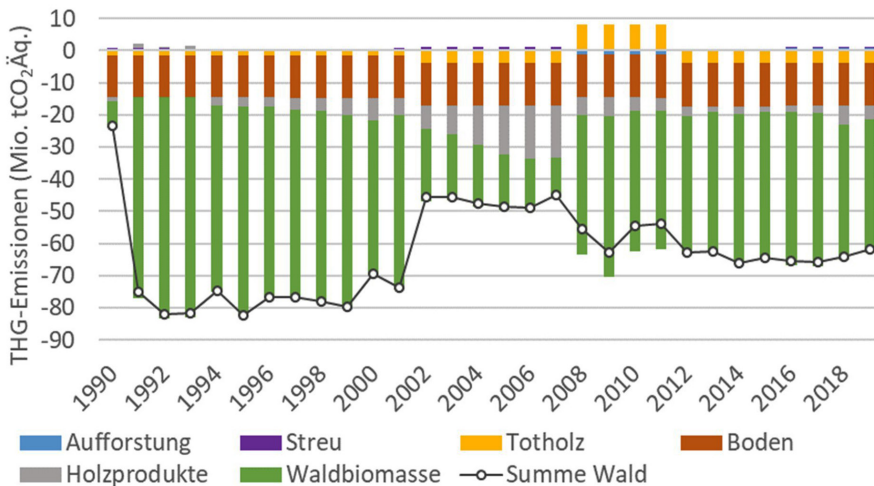
### Wie wirkt sich die Intensität der Holzentnahme auf die THG-Bilanz der Waldbiomasse aus?

Die Einlagerung und Speicherung von Kohlenstoff im Wald wird sehr stark von der Intensität der Holzentnahme beeinflusst (z.B. PILLI et al. 2016). Wenn in einem Jahr lebende Bäume stärker zuwachsen, als Bäume eingeschlagen werden oder aus natürlichen Gründen absterben, dann steigt die Waldbiomasse und damit der Kohlenstoffspeicher im Wald an. Auf Basis der vergangenen Bundeswaldinventuren wurde ein Zuwachs an Holz im Wald in Deutschland im Zeitraum 2002 bis 2017 von 117-121 Mio. m<sup>3</sup> festgestellt. Die Holzentnahme in Deutschland belief sich dagegen auf 65 bis 93 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr (*Abb. 7.3-2*). Dadurch stellte sich der Wald als CO<sub>2</sub>-Senke dar und die Vorräte stiegen von 317 m<sup>3</sup>/ha im Jahr 2002 auf 358 m<sup>3</sup>/ha im Jahr 2017<sup>1</sup>.

Die Intensität der Holzentnahme steht auch in einem engen Zusammenhang mit natürlichen Störungen wie Sturm, Trockenheit und anderen Wetter- und Klimaereignissen, aber auch Insektenfraß, welche dazu führen können, dass die Wuchskraft der Bäume reduziert wird oder Bäume ganz absterben. Zur Eindämmung von Störungen werden häufig kranke Bäume frühzeitig entnommen. Im Zeitraum von 2008 bis 2017, in dem relativ wenige Störungen auftraten, lag die jährliche Holzentnahme bei 65 bis 76 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr. In Zeiträumen mit starken Störungen stieg die Holzentnahme auf hohe Werte: 93 Mio. m<sup>3</sup> im Jahr 2007 (Orkan Kyrill) und 86 Mio. m<sup>3</sup> im Jahr 2020 nach drei Trockenjahren (*Abb. 7.3-2*).

Der Zusammenhang zwischen Holzentnahme und Speicherleistung der Waldbiomasse ist in der deutschen

<sup>1</sup>Informationen der Bundeswaldinventuren 2012 und der Kohlenstoffinventur 2017, verfügbar unter <https://bwi.info/>



**Abb. 7.3-1:** Zeitreihe der THG-Bilanz der Waldfläche (lebende Biomasse, Boden, Totholz und Streu), der Aufforstungsfläche und der Holzprodukte. Negative Werte bedeuten, dass der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entzogen wurde, positive Werte bezeichnen THG-Emissionen.

Quelle: Eigene Darstellung nach Umweltbundesamt (UBA) (2021) und zugehörigen CRF-Tabellen.

THG-Inventur als linearer Zusammenhang abgebildet (UBA und CRF-Tabellen). Generell wird weniger Kohlenstoff in der Waldbiomasse gespeichert, je stärker geerntet wird (Abb. 7.3-3). Dieser Zusammenhang wird sehr deutlich durch natürliche Störungen überlagert: im Zeitraum von 2002 bis 2007 mit starken natürlichen Störungen (2002 Orkan Janette, 2003 Dürre, 2007 Orkan Kyrill) war die Speicherleistung der Waldbiomasse per se niedriger als in dem Zeitraum von 2008 bis 2017 mit nur geringen natürlichen Störungen. Dies liegt daran, dass durch die natürlichen Störungen die Mortalität von Bäumen unabhängig von Durchforstung und Holzeinschlag steigt und der Zuwachs der Bäume sich verringert.

Auch beim Vergleich von Szenarien, die die Waldentwicklung in die Zukunft mit Waldmodellen fortschreiben, findet sich ein Zusammenhang zwischen Holzentnahme und Speicherleistung der Waldbiomasse. Vergleiche von Waldbewirtschaftungsszenarien mit unterschiedlicher Bewirtschaftungsintensität für den Zeitraum 2020 bis 2050 zeigen, dass mit einer Abnahme der Speicherleistung um 0,25 bis 1,7 t CO<sub>2</sub> pro m<sup>3</sup> geerntetem Holz zu rechnen ist (Abb. 7.3-3, HENNENBERG et al. 2019 und <https://co2-speichersaldo.de> für Wälder in Deutschland). Dabei ist in den verwendeten Waldmodellen die zeitliche Dynamik der Waldentwicklung, die Regeneration auf eingeschlagenen Flächen und der Zuwachs auf Nachbarflächen berücksichtigt.

### Welche Maßnahmen können die Kohlenstoffspeicherung in der Waldbiomasse erhöhen?

Die unter- und oberirdische Biomasse im Wald tragen zu einem großen Anteil zur Entlastung der Atmosphäre von CO<sub>2</sub> bei (Abb. 7.3-1, siehe auch Kap.7.1). Diese Klimaschutzleistung kann mit Maßnahmen erhöht werden, die eine Steigerung der Holzvorräte fördern. Mit Hilfe von Waldentwicklungsmodellen kann die Wirkung solcher Maßnahmen über viele Jahrzehnte hinweg berechnet werden. Ein Vergleich von Szenarien mit unterschiedlicher Bewirtschaftungsintensität ermöglicht es, diese Wirkung zu quantifizieren.

Ein Beispiel sind die WEHAM-Szenarien. Auf Grundlage der Daten der dritten Bundeswaldinventur 2012 (BWI 3) wurde das WEHAM-Basiszenario (WEHAM-BS) entwickelt, das die forstwirtschaftliche Praxis der Jahre vor 2012 fortschreibt (BMEL 2016b). In einem alternativen WEHAM-Naturschutzpräferenzszenario (WEHAM-NPS, Oehmichen et al. 2018) wurde dagegen ein stärkerer Waldumbau hin zu Laub- und Laubmischwäldern umgesetzt, um die natürliche Baumartenzusammensetzung und somit auch die Resilienz des gesamten Waldbestandes zu fördern. Im WEHAM-NPS sinkt gegenüber dem WEHAM-BS der Nadelholzanteil um 19% bis 2052, im Vergleich zum Jahr 2012, und der Anteil der Laubbäume steigt um 15% an. Außerdem werden Laubbäume weniger stark eingeschlagen und verbleiben länger im Wald, um deren Vorrat zu erhöhen. Insgesamt kann im WEHAM-NPS der durchschnittliche Holzvor-

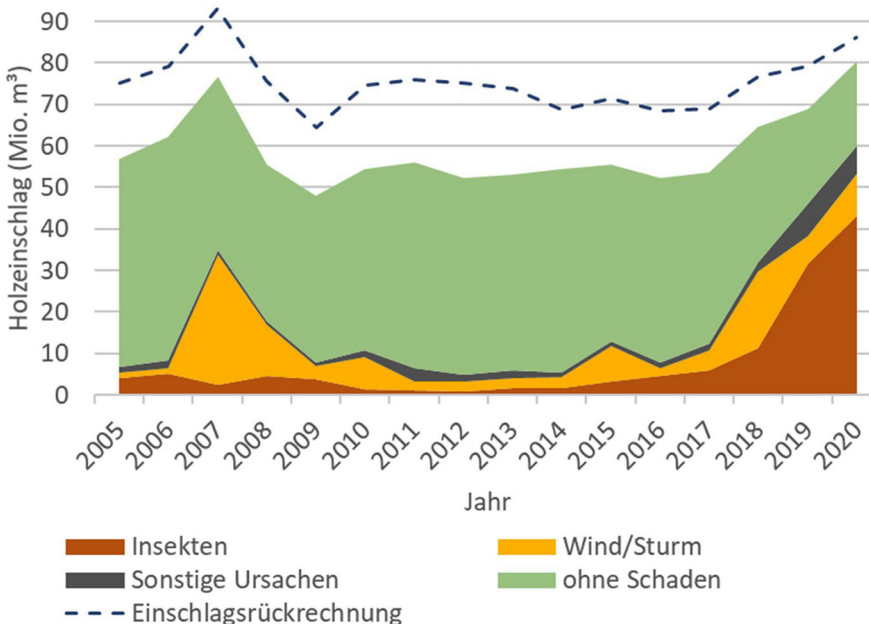
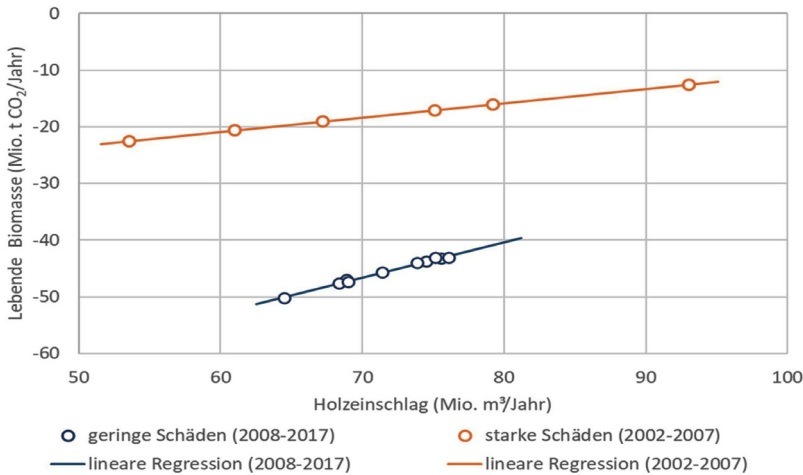


Abb. 7.3-2: Zeitreihe der Holzentnahme in Deutschland und Anteil an Schadholz durch kranke bzw. abgestorbene Bäume, die vorzeitig entnommen wurden.

Quelle: Eigene Darstellung nach Destatis (mehrere Jahrgänge, Daten-Code 41261-0003) und JOCHEM et al. (2020).



**Abb. 7.3-3:** Abhängigkeit der Speicherleistung der Waldbiomasse von der Holzentnahme und natürlichen Schäden.

Quelle: Eigene Darstellung nach Umweltbundesamt (UBA) (2021) und zugehörigen CRF-Tabellen.

rat von 345 m³/ha in 2012 auf 374 m³/ha im Jahr 2052 erhöht werden. Dagegen steigt der Vorrat im WEHAM-Basisszenario nur auf 364 m³/ha. Im WEHAM-NPS wird auch der Totholzvorrat von ca. 20 m³/ha auf 40 m³/ha erhöht, um die an diese Strukturen gebundene Artenvielfalt zu fördern. Zusätzlich wird die Waldfläche mit Nutzungseinschränkungen bzw. ohne Holznutzung geringfügig erhöht, was ebenfalls zum Aufbau von Holzbiomasse beiträgt. Im Hinblick auf den Klimaschutz wird im WEHAM-NPS bis 2050 eine jährliche Senkenleistung erreicht, die um 20 Mio. t CO₂Äq./Jahr höher ist als die im WEHAM-BS (s. Tab. 7.3-1). Da über den betrachteten Zeitraum jedoch weniger Nadelholz für langlebige Holzprodukte zur Verfügung steht, verschlechtert sich der Holzproduktespeicher in WEHAM-NSP im Vergleich zu WEHAM-BS um ca. 4 Mio. t CO₂Äq.

Diese Effekte werden auch durch ein anderes Waldentwicklungsmodell (FABio, BÖTTCHER et al. 2018) bestätigt. In einem Basisszenario (FABio-Basis) wurde in Anlehnung an WEHAM-BS die aktuelle Forstwirtschaft fortgeschrieben. Gegenüber FABio-Basis wird im Szenario Waldvision (FABio-Waldvision) die Holzentnahme um 25%, vor allem im Laubholz, verringert. Die Flächen ohne forstliche Nutzung werden in FABio-Waldvision auch noch einmal deutlich von 4,2% auf 16,6% erhöht. Dadurch erreicht der durchschnittliche Holzvorrat in FABio-Waldvision im Jahr 2052 einen Wert von ca. 500 m³/ha. Die mittlere Senkenleistung des Waldes steigt dabei in FABio-Waldvision gegenüber FABio-Basis um ca. 34 Mio. t CO₂Äq. an. Mit der verringerten Holzentnahme nimmt auch der Holzproduktespeicher in FABio-Waldvision im Vergleich zum FABio-Basis um 9 Mio. t CO₂Äq. ab (Tab. 7.3-1).

Die beiden Beispiele zeigen, dass die Kohlenstoffspeicherung im Wald sehr deutlich über den Aufbau des Holzvorrats der Laubbäume realisiert werden kann.

Das ist deshalb möglich, da selbst die älteren Laubholzbeständen (z.B. Buche > 140 Jahre) noch kontinuierlich wachsen und Kohlenstoff aufnehmen. Auch zeigt sich, dass mit einer Extensivierung der Holznutzung der Holzproduktespeicher weniger stark abnimmt, als die Waldsenke zunimmt, so dass sich in beiden Beispielen mit der Extensivierung in Summe eine höhere Senkenleistung einstellt (Tab. 7.3-1).

Die Nutzung von Holz ist vielfältig und unterschiedliche Holzprodukte speichern Kohlenstoff unterschiedlich lange. Tatsächlich hängt es von der Art der Holznutzung ab, ob diese trotz der Effekte auf die Waldsenke zu einer positiven THG-Bilanz führt. Detaillierte THG-Bilanzen können die Entscheidung unterstützen, welche Holznutzung reduziert werden sollte, um mehr Holz im Wald zu belassen.

### Wann hat Holznutzung einen positiven, wann einen negativen Effekt auf die THG-Bilanz?

Die THG-Bilanz von Holzprodukten ist ein wichtiger Parameter, um einzuschätzen, ob eine Holznutzung positiv oder negativ für den Klimaschutz ist. Umfassende THG-Bilanzen sollten die folgenden vier Aspekte berücksichtigen:

- THG-Emissionen entlang der Prozesskette (P)
- Veränderung der Senkenleistung der Waldfläche (W)
- Veränderung des Holzproduktespeichers (S)
- Vermeidung von Emissionen aus nicht-biogenen Produkten (Substitutionseffekte, S)

Als THG-Bilanz ergibt sich:

$$P + W - H - S \quad (\text{Gl. 1})$$

Beispielsweise werden bei der Wärmenutzung von Holzhackschnitzeln aus Stammholz durch Ernte, Transport und

**Tab. 7.3-1:** Veränderung der jährlichen CO<sub>2</sub>-Speicherleistung des Waldes und von Holzprodukten bei veränderter Nutzungsintensität zweier Waldentwicklungsmodelle.

	Veränderung der Waldsenke in 2052	Veränderung des Holzprodukt- speicher in 2052 (Mio. t CO <sub>2</sub> )	Summe in 2052
WEHAM-NPS versus WEHAM-BS	-20	4	-16
FABio-Waldvision versus FABio-Basis	-34	9	-25

Quelle: WEHAM in RÜTER et al. (2017) und FABio in BÖTTCHER et al. (2018). WEHAM-NPS = WEHAM-Naturschutzpräferenzszenario, WEHAM-BS = WEHAM-Basiszenario.

Verarbeitung 4,8 g CO<sub>2</sub>Äq./MJ entlang der Prozesskette freigesetzt (Erneuerbare Energien Richtlinie RED II, (EU) 2018/2001). Bei Annahme einer Veränderung der Senkenleistung auf der Waldfläche durch die Holzentnahme von 0,2 t CO<sub>2</sub>Äq./m<sup>3</sup> und einem Energiegehalt von Holz von 7.920 MJ/m<sup>3</sup> (abgeleitet nach FNR 2018) bedeutet dies eine Netto-Emission von 31,6 g CO<sub>2</sub>Äq./MJ. Wird von einem höheren Senkenverlust von 1,7 t CO<sub>2</sub>Äq./m<sup>3</sup> ausgegangen, entstünden bei der Holznutzungsart Emissionen von 214,6 g CO<sub>2</sub>Äq./MJ. Da Energieholz direkt verbrannt wird, spielt der Holzproduktspeicher in der THG-Bilanz in diesem Fall keine Rolle. Laut RED II sind für die nicht-biogene Referenz, die durch die Holzenergienutzung ersetzt wird, Emissionen von 80 g CO<sub>2</sub>Äq./MJ anzusetzen. In Summe ergibt sich nach Gleichung 1 für die THG-Bilanz von Hackschnitzeln aus Stammholz eine Spannweite von -43,6 bis 139,4 g CO<sub>2</sub>Äq./MJ. Dies entspricht gegenüber der nicht-biogenen Referenz einer THG-Minderung von 55% bzw. zusätzlichen THG-Emissionen von 174%. Die Zielmarke der RED II, eine THG-Minderung von 70% zu erreichen, wird in jedem Fall verfehlt. Wie das Beispiel der THG-Bilanz zeigt, wird das Ergebnis stark durch die Annahme zur Veränderung der Senkenleistung der Waldfläche beeinflusst.

Auch für andere Holzprodukte, die nur eine kurze Lebensdauer haben und Substitutionseffekte in der Größenordnung der nicht-biogenen Referenz wie bei der Wärmebereitstellung zu erwarten sind, fällt die Gesamt-THG-Bilanz oft nur leicht positiv oder negativ aus. Dies ist z.B. der Fall für Papier, Pappe, Karton und Verpackungsholz (eigene Berechnungen auf Basis von FEHRENBACH et al. 2017). Erst wenn eine deutlich positive Speicherleistung in langlebigen Holzprodukten wie bei Konstruktionsholz oder Holzfasernplatten und/oder hohe Emissionen der nicht-biogenen Referenz wie bei Stahlbeton oder Gipskartonplatten in die THG-Bilanz eingehen, kann verlässlich eine deutlich positive THG-Bilanz erwartet werden (siehe unten).

Das Beispiel der Holzhackschnitzelnutzung vergleicht die Holznutzung mit einer fossilen Referenz.

Diese verändert sich mit der Fortschreitung der Dekarbonisierung des Energiemixes. Je mehr Erneuerbare Energien in Zukunft genutzt werden, umso weniger fossiles CO<sub>2</sub> wird durch die Holzenergienutzung eingespart. Laut Bundes-Klimaschutzgesetz 2021 soll Deutschland im Jahr 2045 Klimaneutralität erreichen. Deshalb ist davon auszugehen, dass THG-Emissionen von nicht-biogenen Produkten in den nächsten Jahren deutlich abnehmen und sich so die THG-Bilanz zu Ungunsten der Holznutzung verschieben.

In Summe ist festzuhalten, dass eine Nutzung von Holzprodukten nicht per se vorteilhaft für den Klimaschutz ist. Erst die Gesamtschau aller Emissionen der Prozesskette und der substituierten nicht-biogenen Referenz sowie die Veränderung der Speicherleistung auf der Waldfläche und in Holzprodukten ermöglichte eine Einschätzung der THG-Minderung durch ein Holzprodukt. In zahlreichen THG-Bilanzen wird aber die Veränderung der Speicherleistung der Waldfläche nicht berücksichtigt. Dies führt bei dem Beispiel der Wärmenutzung von Hackschnitzeln aus Stammholz (s.o.) dazu, dass diese als Beitrag zum Erneuerbaren-Energien-Ziel der EU angerechnet werden darf, obwohl unter Umständen keine THG-Minderung erreicht wird.

### Welche Rolle können langlebige Holzprodukte für eine positive THG-Bilanz spielen?

Wird Holz geerntet, geht der Kohlenstoffspeicher im Wald zurück. Aus Sicht des Waldes stellt die Holzernte also eine Emission dar. Holzprodukte stellen einen wichtigen Zwischenspeicher dar, der dazu führt, dass nach der Holzernte Emissionen des im Holz gebundenen Kohlenstoff zum Teil zurückgehalten werden. Die Emission des Kohlenstoffs findet erst dann statt, wenn das Holz schließlich energetisch genutzt wird oder sich anders zersetzt.

Die Berechnung der Speicherleistung wird durch die Verwendungsdauer von Holzprodukten bestimmt. Diese ist für verschiedene Produkte sehr unterschiedlich. Zudem kann sich die Verweildauer durch Recy-

cling verlängern. Bei einer konstanten Nutzungsdynamik von Holzprodukten stellt sich ein Gleichgewicht zwischen den Zugängen in den Holzspeicher und den Abgängen aus dem Holzspeicher ein. In diesem Gleichgewichtszustand wird der Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten aufrechterhalten, aber kein weiteres CO<sub>2</sub> gespeichert. Um den Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten zu erhöhen, muss mehr Holz in den Speicher überführt werden. Dabei eignen sich vor allem langlebige Holzprodukte wie Konstruktionsholz und Holzwerkstoffe mit einer Halbwertszeit von 35 bzw. 25 Jahren, kurzlebige Holzprodukte wie Papier, Pappe und Verpackungsholz mit einer Halbwertszeit von 2 Jahren hingegen nicht.

In Deutschland nahm in den letzten drei Jahrzehnten der Holzspeicher meist zu (Abb. 7.3-1). Es wurde also mehr Kohlenstoff in neuen Holzprodukten festgelegt, als aus Holzprodukten am Ende der Nutzungskaskade freigesetzt wurde. Für den Erhalt des Produktspeichers waren in der Periode 2009 bis 2018 im Durchschnitt ca. 30 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr an neuen langlebigen Holzprodukten für den Erhalt des Holzproduktspeichers erforderlich. Mit weiteren 4 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr (4,8 Mio. m<sup>3</sup> Rohholz bei Hinzunahme von Verlusten) wurde der Speicher im Durchschnitt um 3 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr in dieser Periode vergrößert. Dies bedeutet bilanziell: werden Bäume für langlebige Holzprodukte geerntet, trägt ein Kubikmeter Holz 0,63 t CO<sub>2</sub> zur Erhöhung des Produktspeichers bei. Wird der Holzproduktspeicher allerdings verringert, so sind je nicht eingesetztem m<sup>3</sup> Holz THG-Emissionen in ähnlicher Größenordnung zu erwarten (LUICK et al. in press). Wie oben dargestellt ist aber mit der Ernte des Holzes eine Abnahme der Speicherleistung auf der Waldfläche verbunden, die in einer ähnlichen Größenordnung wie die Speicherleistung in Holzprodukten liegt. Je nach Struktur des Waldbestands, der Baumartenzusammensetzung, der Ausgestaltung der Produktionskette und der Art des Produkts können die Effekte auf die Speicherleistung auf der Waldfläche und in Holzprodukten variieren, weshalb eine umfassende THG-Bilanz nötig ist.

In der THG-Bilanz nach Gleichung 1 errechnet sich für beispielsweise für Konstruktionsholz eine Klimawirksamkeit von -2,81 kg CO<sub>2</sub>/kg Produkt, wenn die Änderung der Speicherleistung auf der Waldfläche nicht in die THG-Bilanz eingeht (Tab. 7.3-2). Bei Annahme eines mittleren Werts für die Änderung der Speicherleistung auf der Waldfläche verschlechtert sich die THG-Bilanz auf -2,02 kg CO<sub>2</sub>/kg Produkt und bei einem hohen Wert sogar auf -0,56 kg CO<sub>2</sub>/kg Produkt. Für Spanplatten fallen die THG-Bilanzen etwas schlechter aus, so dass bei Annahme eines hohen Werts für die Änderung der Speicherleistung auf der Waldfläche laut THG-Bilanz keine positive Klimawirksamkeit mehr erwartet werden kann (Tab. 7.3-2).

## Welche Risiken bestehen für die Kohlenstoffspeicherung im Wald und in Holzprodukten?

Die oben angeführten Beispiele für die THG-Bilanz von Holzprodukten zeigen, dass es je nach Nutzungspfad aus Klimaschutzsicht vorteilhaft sein kann, die Holzentnahme zu unterlassen und stattdessen den Vorrat auf der Waldfläche aufzubauen. Die Kohlenstoffspeicherung im Wald ist aber selbst nicht permanent (siehe auch Kap. 7.1). Nicht nur durch Holzentnahme, auch insbesondere durch natürliche Störungen kann die Senkenleistung des Waldes herabgesetzt werden und der Kohlenstoffvorrat sich dadurch verringern (siehe Abb. 7.3-3).

Das Risiko für natürliche Störungen ist abhängig vom Zustand des Waldes, aber auch von Faktoren wie Standort und Klimawandel. Da die Einflüsse des Klimawandels auf die Wälder zukünftig wahrscheinlich zunehmen werden (SEIDL et al. 2017; IPCC 2019), sind die aktuellen und zukünftigen Managemententscheidungen von besonderer Wichtigkeit, um die Resilienz des Waldes und damit die Dauerhaftigkeit der Waldsenke zu fördern und langfristig zu erhalten (MAUSOLF et al. 2018).

Aktuell weisen lediglich 26% der Wälder in Deutschland eine sehr naturnahe oder naturnahe Baumartenzusammensetzung gegenüber der potenziell natürlichen Waldgesellschaft auf, denn der überwiegende Teil wird von Fichten und Kiefern dominiert, die oft nicht standortgerecht sind (BMEL 2016a). Das kann sich direkt auf die Resilienz der Wälder gegenüber klimatischen Änderungen und anderen Störungen negativ auswirken (O'HARA & RAMAGE 2013). Die Jahre 2018-2020 haben dies sehr deutlich gezeigt. Sie waren geprägt von Sturmereignissen, langanhaltenden Trockenperioden und anschließendem Borkenkäferbefall vor allem an Fichten. Diese waldschädigenden Faktoren führten letztlich in Kombination zu einem vom BMEL<sup>2</sup> geschätzten Schadholtzanfall von 171 Mio. m<sup>3</sup> auf ca. 277.000 ha Waldfläche, wobei die Fichte überwiegend betroffen war. Dagegen trugen Laubbaumarten nur zu ca. 9% zum aufkommenden Schadholtz bei<sup>3</sup>.

Buchendominierte Laub- und Mischwälder sind die eigentliche Klimaxgesellschaft (hypothetisches Endstadium der Vegetationsentwicklung) in Deutschland. Unter den zu erwartenden Klimaveränderungen wird sich dies wahrscheinlich für viele Regionen nicht wesentlich ändern, auch wenn mit Produktivitätseinbußen der Buche in trockenen Regionen zu rechnen ist (DULAMSUREN et al. 2017). Außerdem könnte sich

<sup>2</sup>BMEL-Mitteilung (Stichtag 31.12.2020), <https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/wald-trockenheit-klimawandel.html#doc14830bodyText3>.

<sup>3</sup><https://www.bmel.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2020/040-waldschaeden.html>.

die Dominanz der Buche in der Baumartenzusammensetzung zu Gunsten von anderen Laubbaumarten, wie Traubeneiche, Hainbuche und Feldahorn, verschieben (WALENTOWSKI et al. 2017). Auch Laubbäume wie die Buche sind durch die Trockenperioden in den Jahren 2018-2020 gezeichnet und haben an Vitalität eingebüßt. Außerdem hat ihre Mortalität zugenommen, jedoch liegt diese noch immer deutlich unter der von anderen Laub- und Nadelbaumarten (BMEL 2021). Ein Vorratsaufbau wie oben beschreiben, ist in Deutschland daher nur in strukturreichen (in Bezug auf heimische Baumarten, natürliche Altersklassenverteilung, Totholzanteile) Laub- und Mischwaldbeständen sinnvoll, die mit zukünftigen Extremereignissen wie Sturm und Dürreperioden sowie Käferkalamitäten vorraussichtlich besser zurecht kommen werden.

Neben dem Aspekt des Klimaschutzes weisen strukturreiche Waldbestände mit entsprechend älteren Baumbeständen und Totholzanteilen große Vorteile für die Biodiversität auf. Außerdem hat die Förderung von mehr Laubbäumen im Wald einen positiven Effekt auf die Grundwassersickerspenden, im Vergleich zu Nadelbaumbeständen (MÜLLER 2019).

Für die Sicherung langlebiger Holzprodukte sind der Umbau zu Mischwäldern und deren Resilienz gegenüber Klimaveränderungen ebenfalls wesentliche Faktoren, um auch zukünftig Nadelholz in Deutschland produzieren zu können. Außerdem besteht aufgrund eines immer höheren Bedarfs an Bioenergie weiterhin eine Konkurrenz zur stofflichen Nutzung, wobei im Fall der direkten energetischen Nutzung meist keine positiven Effekte für den Klimaschutz erzielt werden (siehe Beispiel zu Holzhackschnitzelnutzung oben). Die energetische Nutzung von Holz sollte deshalb am Ende der Nutzungskaskade stehen, um die Verweildauer von Kohlenstoff im Holzproduktespeicher zu erhöhen. Daher sind auch Innovationen in der Laubholznutzung notwendig, um deren stoffliche Nutzung zu fördern.

**Fazit**

In Deutschland trägt der Wald den Hauptanteil der Senkenleistung im LULUCF-Sektor, hingegen sind Ackerland, Grünland, Feuchtgebiet und Siedlungen für THG-Emissionen verantwortlich. Auf der Waldfläche kommt dem Vorratsaufbau eine große Bedeutung zu. Diese Senkenleistung der Waldbiomasse hängt aber stark von der Bewirtschaftungsintensität der Wälder ab: Wird stärker Holz entnommen, so sinkt die Speicherleistung der Waldbiomasse, wird weniger Holz entnommen, so steigt die Senkenleistung der Waldbiomasse an. Holzprodukte halten den Kohlenstoff nach der Ernte zurück, wenn diese langlebig sind.

Durch natürliche Störungen wie Sturm, Trockenheit und Käferkalamitäten besteht das Risiko, dass festgelegtes CO<sub>2</sub> durch Absterbeereignisse wieder freigesetzt wird und/oder Bäume weniger stark zuwachsen. Derartige Störungen können gerade durch den Klimawandel häufiger und stärker werden. Dieses Risiko ist umso größer, je ökologisch labiler Wälder sind. In den Extremjahren in den Jahren 2018 bis 2020 hat sich vor allem gezeigt, dass Nadelbäume an Wuchsstandorten, die am Rand der ökologischen Amplitude der Arten liegen, hohe Absterberaten aufweisen (Fehlbestockung). Stabile, standortgerechte Laub-, Misch- und Nadelwälder wurden in den Jahren deutlich weniger geschädigt. Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, den Holzvorrat in ökologisch stabilen Wäldern weiter zu erhöhen, und zwar durch eine Extensivierung der Nutzung, wodurch die Senkenleistung im Durchschnitt um 0,25 bis 1,7 t CO<sub>2</sub>Äq./m<sup>3</sup> gesteigert werden kann.

Um zu entscheiden, welche Holznutzung aus Klimaschutzsicht sinnvoll ist, ist eine THG-Bilanz der zu erwartenden Holzprodukte sinnvoll. In einer umfassenden THG-Bilanz sollten (1) alle Prozessemissionen, (2) Veränderungen der Speicherleistung auf der Waldfläche sowie (3) in Holzprodukten und (4) erzielbare Substitutionseffekte durch vermiedene nicht-Holzprodukte einfließen. THG-Bilanzen von Holzprodukten

**Tab. 7.3-2:** Treibhausgasbilanz für Konstruktionsholz und Spanplatte unter Annahmen unterschiedlicher Änderungen der Speicherleistung der Waldfläche.

	Änderung der Speicherleistung Waldfläche		Prozesskette	Änderung der Speicherleistung Holzprodukt (kg CO <sub>2</sub> e/kg Produkt)		Substitution	Summe
Konstruktionsholz	keine	0					<b>-2,81</b>
	mittel	0,79	0,18	-0,97	-2,02		<b>-2,02</b>
	hoch	2,25					<b>-0,56</b>
Spanplatte	keine	0					<b>-2,33</b>
	mittel	0,83	0,40	-0,82	-1,87		<b>-1,50</b>
	hoch	2,36					<b>0,03</b>

Quelle: Eigene Berechnungen in Kooperation mit Horst Fehrenbach auf Basis von FEHRENBACH et al. (2017). Annahmen bei der Berechnung der produktspezifischen Änderung der Speicherleistung der Waldbiomasse: keine = 0,0 t CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>; mittel = 0,6 t CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>; hoch = 1,7 t CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.

zeigen, dass die Veränderungen der Speicherleistung auf der Waldfläche einen starken Einfluss auf das Ergebnis der THG-Bilanz hat und nicht vernachlässigt werden darf. Lassen Holzprodukte keine oder eine geringe Speicherleistung und/oder geringe Substitutionseffekte erwarten, ist ihre Nutzung aus Klimaschutzsicht ungünstig. Hierunter fallen z.B. Verpackungsholz, Papier, Pappe und Energieholz aus direktem Einschlag. Diese Holznutzung sollte verringert und stattdessen der Holzvorrat in ökologisch stabilen Wäldern aufgebaut werden. Für diese Klimaschutzmaßnahme sind geringe CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten zu erwarten, da mit den genannten Holzprodukten bzw. Holzsortimenten nur geringe Deckungsbeiträge erzielt werden können. Langlebige Holzprodukte und Holzprodukte, für die das Holz aus Wäldern stammt, die von zu ökologisch labilen zu stabilen Wäldern umgebaut werden, sollten weiterhin genutzt werden, da hier die positiven Effekte für den Klimaschutz überwiegen.

Bei der Bewertung der Waldbewirtschaftung und deren Wirkung auf die THG-Bilanz in Deutschland lassen sich abschließend folgende Punkte festhalten:

- Ökologisch stabile Waldbestände (vor allem Laub- und Mischwälder), für die vor allem eine minderwertige und kurzlebige Holznutzung zu erwarten ist, sollen extensiviert werden, um den Vorrat aufzubauen.
- Ökologisch labile Waldbestände (z.B. fehlbestockter Fichtenforst) sollten weiter genutzt und zu ökologisch stabilen Wäldern umgebaut werden.
- In Wäldern, deren Holzsortimente vorrangig in hochwertige und langlebige Holznutzungen gehen, sollte der Vorratsaufbau nicht der Fokus für die Bewirtschaftung sein.
- Synergien und Trade-offs mit anderen Ökosystemleistungen wie z.B. Biodiversität, Boden und Wasser sollten in die Entscheidung einfließen.

## Literaturverzeichnis

BME (2016a): Der Wald in Deutschland, Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2016.

BME (2016b): Wald und Rohholzpotezial der nächsten 40 Jahre - Ausgewählte Ergebnisse der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung 2013 bis 2052, 2016. [http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Wald-Rohholzpotezial-40Jahre.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Wald-Rohholzpotezial-40Jahre.pdf?__blob=publicationFile).

BME (ed.) (2021): Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2020. Bonn, 2021. [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/ergebnisse-waldzustandserhebung-2020.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/ergebnisse-waldzustandserhebung-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=8), last accessed on 19 Apr 2021.

BÖTTCHER, H., K. HENNENBERG & C. WINGER (2018): FA-Bio-Waldmodell, Modellbeschreibung Version 0.54 Stand Nov. 2017, 2018. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/FA-Bio-Wald-Modellbeschreibung.pdf>.

DULAMSÜREN, C., M. HAUCK, G. KOPP, M. RUFF & C. LEUSCHNER (2017): European beech responds to climate change with growth decline at lower, and growth increase at higher elevations in the center of its distribution range (SW Germany). In: *Trees* 31 (2), pp. 673–686. DOI: 10.1007/s00468-016-1499-x.

FEHRENBACH, H., S. KÖPPEN, B. KAUERTZ & F. WELLENREUTHER (2017): Biomassekaskaden - Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse - von der Theorie zur Praxis - Gesamtsökologische Betrachtung ausgewählter Biomassekaskaden. Umweltbundesamt (ed.). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-06-13\\_texte\\_53-2017\\_biokaskaden\\_anlage.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-06-13_texte_53-2017_biokaskaden_anlage.pdf) (last accessed on 6 Sep 2021).

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe) (2018): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2018. FNR (ed.), Gülzow-Prüzen, 2018.

HENNENBERG, K., H. BÖTTCHER, K. WIEGMANN, J. REISE & H. FEHRENBACH (2019): Kohlenstoffspeicherung in Wald und Holzprodukten. In: *AFZ-DerWald* (17), pp. 36-39. [https://co2-speichersaldo.de/media/Hennenberg\\_Oekobilanz\\_sl.pdf](https://co2-speichersaldo.de/media/Hennenberg_Oekobilanz_sl.pdf) (last accessed on 9 Feb 2021).

IPCC (2019): Climate change and land. Technical summary, An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. IPCC. SHUKLA, P. R., J. SKEA, R. SLADE, R. VAN DIEMEN et al. (eds.). [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/07/03\\_Technical-Summary-TS\\_V2.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/07/03_Technical-Summary-TS_V2.pdf) (last accessed on 2 Jun 2021).

JOCHEM, D., H. WEIMAR & M. DIETER (2020): Holzeinschlag 2019 steigt – Nutzung konstant. In: *Holz-Zentralblatt* (33), pp. 593-594. [https://www.thuenen.de/media/institute/wf/HM\\_div\\_Statistik\\_Dateien/Dateien\\_-\\_Bilanzen\\_-\\_Tabellen/Wald/Einschlagrueckrechnung/dn062585.pdf](https://www.thuenen.de/media/institute/wf/HM_div_Statistik_Dateien/Dateien_-_Bilanzen_-_Tabellen/Wald/Einschlagrueckrechnung/dn062585.pdf).

LUICK, R., K. HENNENBERG, C. LEUSCHNER, M. GROSSMANN & T. WALDENSPUHL (2021): Alternative Fakten: Urwälder, Naturwälder und Wirtschaftswälder im Kontext der Biodiversitätsdebatte und des Klimaschutzes, Naturschutz und Landschaftsplanung, in press.

MAUSOLF, K., W. HÄRDLE, K. JANSEN, M. BENJAMIN et al. (2018): Legacy effects of land-use modulate tree growth responses to climate extremes. In: *Oecologia* 187 (3), pp. 825-837. DOI: 10.1007/s00442-018-4156-9.

MÜLLER, J. (2019): Die forsthydrologische Forschung im Nordostdeutschen Tiefland, Veranlassung, Methoden, Ergebnisse und Perspektiven. (Habilitationsschrift) (SchrR Umweltingenieurwesen 91). Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät Universität Rostock (ed.). Rostock, 2019.

OEHMICHEN, K., S. KLATT, K. GERBER, H. POLLEY et al. (2018): Die alternativen WEHAM-Szenarien: Holzpräferenz, Naturschutzpräferenz und Trendfortschreibung, Szenarientwicklung, Ergebnisse und Analyse (Thünen Report, 59). Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut.

O'HARA, K. L. & B. S. RAMAGE (2013): Silviculture in an uncertain world: utilizing multi-aged management systems to integrate disturbance. In: *Forestry* (Lond) 86 (4), pp. 401-410. DOI: 10.1093/forestry/cpt012.

PILLI, R., G. GRASSI, W. A. KURZ, J. V. MORIS & R. A. VIÑAS (2016): Modelling forest carbon stock changes as affected by harvest and natural disturbances. II. EU-level analysis. In: *Carbon balance and management* 11 (1). DOI: 10.1186/s13021-016-0059-4.

RÜTER, S., W. STÜMER & K. DUNGER (2017): Treibhausgasbilanzen der WEHAM-Szenarien. In: *AFZ DerWald* (13), pp. 30-31.

SEIDL, R., D. THOM, M. KAUTZ, D. MARTIN-BENITO et al. (2017): Forest disturbances under climate change. In: *Nature Climate Change* 7, pp. 395-402. DOI: 10.1038/nclimate3303.

UBA (Umweltbundesamt) (2021): Nationaler Inventarbericht, Detaillierte Berichtstabellen CRF 2021. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, Januar 2021. [https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art07\\_inventory/ghg\\_inventory/envyd8lq/](https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envyd8lq/) (last accessed on 31 Aug 2021).

WALENTOWSKI, H., W. FALK, T. METTE, J. KUNZ et al. (2017): Assessing future suitability of tree species under climate change by multiple methods: a case study in southern Germany. In: *Annals of Forest Research* 60 (1), pp. 101-126. DOI: 10.15287/afr.2016.789.

## Kontakt:

Dr. Klaus Joseph Hennenberg

Judith Reise

Dr. Hannes Böttcher

Anke Benndorf

Öko-Institut e.V. - Berlin

Institut für angewandte Ökologie

K.Hennenberg@oeko.de

HENNENBERG, K. J., J. REISE, H. BÖTTCHER & A. BENNDORF (2021): Waldbewirtschaftung und deren Wirkung auf die THG-Bilanz in Deutschland. In: LOZÁN J. L., S.-W. BRECKLE, H. GRAßL & D. KASANG (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung*. S. 334-341. *Wissenschaftliche Auswertungen in Kooperation mit GEO, Hamburg*. [www.warnsignal-klima.de](http://www.warnsignal-klima.de). DOI: 10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.46