

# Klimarechner zur Quantifizierung der Klimaschutzleistung von Forstbetrieben auf Grundlage von Forsteinrichtungsdaten

Maike Schluhe\*, Hermann Englert\*\*, René Wördehoff\*\*\*, Christian Schulz\*\*\*, Matthias Dieter\*\* und Bernhard Möhring\*

## Zusammenfassung

Klimaschutz ist eine hochaktuelle Thematik, die in Gesellschaft und Politik fortwährend einen hohen Stellenwert einnimmt. Durch die Fähigkeit von Bäumen, der Atmosphäre Kohlenstoffdioxid zu entziehen und in Form von Kohlenstoff in der Biomasse zu binden, können Wälder einen großen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Ein Teil des Kohlenstoffs bleibt auch mit der Verwendung des Holzes in den Holzprodukten gebunden, die darüber hinaus positive Substitutionseffekte bewirken können. Die Klimaschutzleistung von Wäldern und Holznutzung wurde in zahlreichen Studien erforscht. Allerdings fehlt bisher ein robustes und leicht nachvollziehbares Kalkulationstool für den einzelnen Forstbetrieb. Ein solches wird in diesem Artikel vorgestellt.

Das Tool schätzt die Klimaschutzleistungen von Forstbetrieben und der nachgelagerten Holzverwendung. Die Datengrundlage bilden die Hauptergebnisse der Forsteinrichtung (Baumart, Holzbodenfläche, Holzvorräte, Zuwachs und geplante Nutzung), wodurch das Konzept kohärent zur mittelfristigen Planung ist. Die Berechnungen umfassen die Änderung des Waldspeichers und des Holzproduktespeichers sowie die durch Holznutzung resultierende Substitution. Die Ergebnisse können als durchschnittliche, jährliche forstbetriebliche Klimaschutzleistung im Forsteinrichtungszeitraum interpretiert werden. Der Klimarechner ermöglicht es, die Kohlenstoffvorräte in der lebenden oberirdischen Derbholz-Baumbiomasse sowie die Kohlenstoffsenken und -quellen eines Forstbetriebes zu identifizieren, die Effekte der geplanten Bewirtschaftung zu quantifizieren und auf dieser Basis die Klimaschutzleistung vereinfachend zu kommunizieren.

**Schlüsselwörter:** Klimaschutz, Wald, Holznutzung, Kohlenstoffspeicher, Substitution, Forstbetrieb

## Abstract

### Climate calculator for quantifying climate effects of forest enterprises based on data from forest management plans

Climate protection is a highly topical subject, which is of great importance in society and politics. Due to the ability of trees to extract carbon dioxide from the atmosphere and to sequester it as carbon in the biomass, forests can make a major contribution to protect the climate. The carbon remains sequestered after harvest in wood products, which additionally causes positive substitution effects. Climate effects of forests and the use of wood are investigated in numerous studies. Nevertheless, so far, a robust and comprehensible calculation tool for forest enterprises is missing. Such a tool is described in this article.

The tool estimates the climate effect of forest enterprises and the downstream use of wood. The data basis are the main results of the forest management plan (tree species, timberland, standing volume, growth and planned harvest), whereby the concept is coherent to the medium-term planning. The calculations include the carbon storage change of forest and wood products as well as the resulting substitution from the use of wood. The results may be interpreted as average annual climate effect of the period of the forest management plan. The climate calculator enable to identify carbon storages in the living aboveground coarse wood, carbon sinks and carbon sources of the forest enterprise, to quantify the effect of the planned management and to communicate the climate protection.

**Keywords:** climate protection, forest, use of wood, carbon sequestration, substitution, forest enterprise

\* Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Abteilung Forstökonomie, Büsgenweg 3, 37077 Göttingen

\*\* Johann-Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie, Leuschnerstraße 91, 21031 Hamburg

\*\*\* Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Grätzelstr. 2, 37079 Göttingen

**Kontakt:** maike.schluhe@uni-goettingen.de

## 1 Einleitung

Klimaschutz ist nach wie vor ein hochrangiges Ziel sowohl nationaler als auch internationaler Politik. Für Deutschland sind die Klimaschutzziele der Bundesregierung im Klimaschutzplan 2050 (BMUB, 2016) niedergelegt. Damit sollen die Treibhausgasemissionen bis 2050 im Vergleich zu 1990 um 80 % bis 95 % vermindert werden. Für die Erreichung dieses ehrgeizigen Zieles sind Maßnahmen in allen volkswirtschaftlichen Sektoren erforderlich. Auch für die Forstwirtschaft werden Maßnahmen genannt. Sie liegen insbesondere im Bereich der Erhaltung und nachhaltigen Bewirtschaftung der Wälder.

Nach dem Gutachten „Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung“ der beiden wissenschaftlichen Beiräte für Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlicher Verbraucherschutz sowie für Waldpolitik des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) weist die nachhaltige Nutzung des Waldes einschließlich der Erhöhung des Anteils produktiver Nadelbäume in der Verjüngung den höchsten und effizientesten Beitrag zur Klimaschutzleistung des gesamten betrachteten Bereiches aus (Weingarten et al., 2016). Unter anderem gehört auch eine vermehrte stoffliche Nutzung von Holz in langlebigen Produkten zu den effektiven Klimaschutzmaßnahmen.

Die klimapolitischen Vorteile nachhaltiger Waldbewirtschaftung und Holznutzung sind damit belegt und werden zunehmend gesellschaftlich akzeptiert. Für Deutschland insgesamt sind sie auch in deren Wirkung in verschiedenen Studien quantifiziert (Dieter und Elsasser, 2002; Köhl et al., 2010; Oehmichen et al., 2011; Rüter et al., 2011; Weingarten et al., 2016; Bösch et al., 2017; Rüter et al., 2017; Schweinle et al., 2018). Wesentlich lückenhafter ist die Lage jedoch im Bereich der Quantifizierung der Klimaschutzleistung einzelner Forstbetriebe. Die Forstbetriebe als klimaschutzrelevante Akteure kennen vielfach nicht den eigenen Beitrag zum Klimaschutz, da die betrieblichen Informationssysteme in der Regel vorrangig auf die Erfassung und Dokumentation der verkaufsrelevanten Volumeneinheiten [m<sup>3</sup>] ausgerichtet sind. Der im vorliegenden Artikel beschriebene Klimarechner soll diese Lücke verkleinern helfen. Mit ihm wird ein Instrument vorgestellt, das es Forstbetrieben erlaubt, ihre spezifische Klimaschutzleistung in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten abzuschätzen. Der Klimarechner dient damit der Quantifizierung der kurz- bis mittelfristigen Klimaschutzleistung einzelner Forstbetriebe auf der Basis der in Forstbetrieben in der Regel vorhandenen Hauptergebnisse der Forsteinrichtung. Er soll nachvollziehbare Strukturen schaffen und die Kohärenz mit den Ergebnissen zur bundesweiten Treibhausgasberichterstattung sicherstellen. Der Klimarechner dient damit vorrangig der Information der Forstbetriebe selbst, dürfte aber auch ein wichtiges Hilfsmittel für die einzelbetriebliche Kommunikation mit der Öffentlichkeit darstellen. Als Grundlage für eine Entlohnung der forstbetrieblichen Klimaschutzleistung ist das Kalkulationstool allerdings nicht gedacht.

## 2 Stand des Wissens zur Quantifizierung der Klimaschutzleistung von Wäldern in Deutschland

Im Zuge der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (engl. UNFCCC für United Nations Framework Convention on Climate Change) hat sich Deutschland als Vertragsstaat dazu verpflichtet, regelmäßig Inventare zur nationalen Treibhausgasemission aufzustellen. Dieser Bericht wird jedes Jahr in Form der „Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll“ vom Umweltbundesamt veröffentlicht (UBA, 2017). Darin werden neben den Anforderungen der Klimarahmenkonvention im zweiten Teil des Berichts auch die Anforderungen des Kyoto-Protokolls erfüllt. Mit dem nationalen Inventarbericht (engl.: National Inventory Report, kurz NIR) gemäß Klimarahmenkonvention werden Inventartabellen (Berichtstabellen im Common Reporting Format, kurz CRF) publiziert. Der nationale Inventarbericht und die CRF-Tabellen orientieren sich an den UNFCCC Richtlinien zur Berichterstattung über jährliche Inventare, der IPCC Good Practice Guidance und IPCC Good Practice Guidance For Land Use, Land Use Change and Forestry (UBA, 2017).

Nach den Vorgaben des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006) werden bei der Landnutzungskategorie Wald die Kohlenstoffspeicher lebende ober- und unterirdische Baumbiomasse, Totholz, Streu und mineralische und organische Böden berücksichtigt. Zudem wird seit 2016 auch den Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten berichtet. Die aus Holznutzung resultierenden energetischen und stofflichen Substitutionseffekte werden in der Treibhausgasberichterstattung allerdings nicht ausgewiesen und dem Sektor Forst und Holz zugerechnet, sondern aufgrund des implementierten Sektorenansatzes dem Energie- und Industriesektor gutgeschrieben. Kausal werden sie jedoch durch die Verwendung von Holzprodukten verursacht. Bei der Berichterstattung sind nicht die jeweiligen Kohlenstoffvorräte, sondern deren jährliche Veränderungen entscheidend.

Basierend auf den Auswertungen von Wellbrock et al. (2014) waren im Jahr 2012 in den Wäldern Deutschlands etwa 7.403 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente (2.019 Mio. t C) gespeichert, was je Hektar 664 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten entspricht (BMEL, 2016). Rund 57 % entfallen dabei auf die ober- und unterirdische Baumbiomasse, 42 % auf den Boden und die Streu, sowie etwa 1 % auf das Totholz. Seit dem Beginn der Treibhausgasberichterstattung wirkt der deutsche Wald als eine Kohlenstoffsénke: durch den jährlichen Zuwachs wird mehr Kohlenstoff in der Holzmasse gebunden als durch die Holznutzung aus dem System Wald entnommen bzw. anderweitig freigesetzt wird (Wellbrock et al., 2014). Nach Weingarten et al. (2016) (s. a. UBA, 2016) werden basierend auf Daten der Treibhausgasberichterstattung jährlich 58 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente (abzüglich Nutzung bzw. Freisetzung) im Wald eingebunden. Unter Einbezug der nachgelagerten Holzverwendung wird die Gesamtemission Deutschlands um etwa 14 % (bezogen auf das Jahr 2014) vermindert,

wobei die insgesamt 127 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente zu 46 % (58 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente) aus der Erhöhung des Waldspeichers, zu 2 % (3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente) aus der Erhöhung des Holzproduktespeichers sowie zu 24 % (30 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente) aus stofflichen und zu 28 % (36 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente) aus energetischen Substitutionseffekten resultieren (Weingarten et al., 2016).

Seit dem Erscheinen der Arbeit von Burschel et al. im Jahr 1993 wird die Klimaschutzleistung der Forst- und Holzwirtschaft in Deutschland mit unterschiedlicher Intensität diskutiert. Es wurden verschiedenste Studien auf nationaler Ebene (Dieter und Elsasser, 2002; Köhl et al., 2010; Oehmichen et al., 2011; Rüter et al., 2011; Weingarten et al., 2016; Bösch et al., 2017; Rüter et al., 2017; Schweinle et al., 2018), auf Ebene einzelner Bundesländer (Böswald, 1996; Böswald und Wierling, 1997; Pistorius und Zell, 2005; Profft et al., 2009; Klein und Schulz, 2012; Knauf et al., 2013; Knauf, 2015; Wirth et al., 2004; Wördehoff et al., 2017a, 2017b, 2017c), auf regionaler Ebene (Mund et al., 2015) und auf Bestandesebene (Mund et al., 2002; Mund und Schulze, 2006; Fürstenau et al., 2007; Höllerl und Neuner, 2011; Borys et al., 2013; Höllerl und Bork, 2013) mit vielfältigen Fragestellungen durchgeführt.

Beispielsweise für Niedersachsen ermitteln Wördehoff et al. (2017a) einen in CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgerechneten durchschnittlichen Vorrat der lebenden ober- und unterirdischen Baumbiomasse von 352 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten je Hektar. In Schleswig-Holstein bzw. Sachsen-Anhalt belaufen sich die korrespondierenden Werte auf 392 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente bzw. 326 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente je Hektar (Wördehoff et al., 2017b, 2017c). Für Bayern ermitteln Klein und Schulz (2012) wiederum eine in CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgerechnete lebende ober- und unterirdische Baumbiomasse von etwa 491 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente je Hektar. Und für Nordrhein-Westfalen ist der Arbeit von Knauf et al. (2013) ein in CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgerechneter durchschnittlicher Kohlenstoffvorrat der lebenden oberirdischen Baumbiomasse von etwa 469 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente je Hektar zu entnehmen.

Knauf et al. (2016) beschreiben bspw. die Klimaschutzleistung eines 1.570 Hektar großen Forstbetriebes im Zeitraum 2015 bis 2100 in Nordrhein-Westfalen anhand von zwei langfristigen Szenario-Gruppensimulationen (Grund- und Kombinationsszenarien) mit jeweils vier Einzelszenarien. Mithilfe des Softwaretools BEKLIFUH wurden bei den Kombinationsszenarien die durchschnittlichen Werte der Klimaschutzleistung durch Erhöhung des Waldspeichers zwischen 1,44 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente je Hektar und 3,00 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente je Hektar und die durchschnittlichen Werte der Klimaschutzleistung durch Erhöhung des Holzproduktespeichers zwischen 1,64 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente je Hektar und 2,19 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente je Hektar ermittelt. Mund et al. (2015) ermittelte bspw. für drei Modellregionen in Thüringen (u.a. gekennzeichnet durch unterschiedliche Kundenstrukturen) jährliche Speicherraten des Holzproduktespeichers von umgerechnet 0,6 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten je Hektar bzw. 1 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten je Hektar (Bezugszeitraum von 50 Jahren). Für das gleiche Bundesland berechnen Profft et al. (2009) für den thüringischen Landeswald eine jährliche Änderungsrate von 3,9 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten je Hektar.

Grundsätzlich ermitteln die Studien Ergebnisse in ähnlichen Größenordnungen, allerdings sind die Ergebnisse heterogen. Erwartungsgemäß haben die Ausgangssituation wie Standort, Baumartenzusammensetzung, Altersstruktur und Nutzung bzw. natürliche Störung, aber auch die Kundenstrukturen und die regional unterschiedlichen Verwendungen einen entscheidenden Einfluss. Dies zeigen besonders die Veröffentlichungen von Wördehoff et al. (2017a, 2017b, 2017c) sowie die Studie von Mund et al. (2015), die mithilfe gleicher Modelle verschiedene Bundesländer bzw. Modellregionen untersuchen. Ferner ist auch das betrachtete Objekt (oberirdische Baumbiomasse vs. ober- und unterirdische Baumbiomasse) bzw. grundsätzlich das gewählte Modell für die Berechnung der Klimaschutzleistung entscheidend. Auf diese Problematik weisen Neumann et al. (2016) auch bei der Treibhausgasberichterstattung auf europäischer Ebene hin. Danach führen die unterschiedlichen Biomassefunktionen und Definitionen bei den berechneten Kohlenstoffvorräten der Baumbiomasse zu großen Unterschieden. Neben den verschiedenen Methoden zur Ermittlung der Klimaschutzleistung der Forst- und Holzwirtschaft, stellen die zitierten Studien ferner unterschiedlich hohe Ansprüche an die Datenquellen und deren Qualität. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ist aus diesen Gründen nicht bzw. nur eingeschränkt möglich.

Ähnlich zu dem in diesem Beitrag beschriebenen Modell setzt auch BEKLIFUH (Knauf et al., 2017) auf der lokalen bzw. betrieblichen Ebene an. Zur Abgrenzung der beiden Modelle voneinander wird nun in diesem Kapitel zunächst das Tool BEKLIFUH vorgestellt. Die Methodik des in diesem Beitrag beschriebenen Klimarechners wird im Kapitel 3 beschrieben. Um dem Waldbesitzer die Quantifizierung der Klimaschutzleistung für seine lokalen Gegebenheiten mit einem EDV-gestützten Verfahren zu ermöglichen, wurde das Projekt „Bewertung der Klimaschutzleistungen der Forst- und Holzwirtschaft auf lokaler Ebene“, kurz BEKLIFUH, initiiert. BEKLIFUH wurde im Rahmen des Waldklimafonds gefördert und dient der Quantifizierung der Klimaschutzleistung verschiedener Kohlenstoffspeicher und der Simulation unterschiedlicher Waldbewirtschaftungs- und Holzverwendungsoptionen. Mit diesem Modell können die langfristigen Auswirkungen zukünftiger Wirtschaftsweisen auf die Kohlenstoffspeicher abgebildet und beurteilt werden (Knauf et al., 2017). Das Softwaretool ist als Webanwendung konzipiert und besteht aus einem Wachstums- und einem Holzverwendungsmodell. Als Datengrundlage für die Berechnungen dienen zwei Bestandes- oder Stichprobeninventuren, wobei die Inventurverfahren auch kombiniert werden können, und die zwischen diesen Inventuren angefallenen Nutzungsmengen (Schnellbacher, 2017). Dabei müssen die Ausgangsdaten dem vorgegebenen Format entsprechen, wofür gegebenenfalls einzelne Baumarten vordefinierten Baumartengruppen zugewiesen und aus den originären Daten neue Datensätze zusammengestellt werden müssen. Neben der Zustandsdarstellung der Kohlenstoffvorräte der lebenden ober- und unterirdischen Baumbiomasse, dem Totholz und dem Holzproduktespeicher (ohne Kaskadennutzung) wird deren Entwicklung mithilfe von vier Grundscenarien

simuliert. Der Simulationszeitraum beginnt im Jahr nach der letzten verfügbaren Holznutzung und muss mindestens bis 2051 bzw. darf maximal bis 2200 gewählt werden. Diese Einschränkung dient der Vermeidung einer extrem kurzen Simulationsdauer (Verhinderung von Fehlinterpretationen, z. B. bei Baumartenwechsel) bzw. einer zu langen Simulationsdauer (Einhaltung der Rechenkapazität) (Mues et al., 2017). Die Waldentwicklung auf Basis korrigierter Ertragstafelverläufe innerhalb des Simulationszeitraumes wird einerseits durch die Spezifikationen der Behandlungsszenarien (Massen-, Speicher-, Wertoptimierung, Nichtnutzung) bestimmt, wobei die Szenarien auch anteilig kombiniert werden können (Teilflächen werden unterschiedlich bewirtschaftet). Andererseits gehen auch baumartenspezifische Risiken durch Feuer oder Sturmereignisse in die Waldentwicklung ein. Die hinterlegten Grundeinstellungen für die Simulation lassen sich im Expertenmodus an die lokalen Verhältnisse weiter anpassen (zugrundeliegende Ertragstafeln, Maximalvorrat, Risiken, Änderung der Zielstärken und Endnutzungszeiträume, Umtriebszeiten). Das Wachstumsmodell stellt die Ausgangsdaten für das Holzverwendungsmodell zur Verfügung. In diesem wird auf Basis der angenommenen Rohholzverwendung und des Stoffstrommodells für Deutschland der Substitutionseffekt der Holznutzung hergeleitet. Das Holzverwendungsmodell kann ebenfalls in Teilbereichen an die lokalen Verhältnisse angepasst werden. Für weitere Informationen zum Wachstums- und Holzverwendungsmodell sei hier auf Mues et al. (2017) verwiesen. Das Softwaretool BEKLIFUH ermöglicht es, auf lokaler bzw. betrieblicher Ebene und zahlenmäßiger Grundlage über die zukünftige optimale Waldbewirtschaftung, auch unter dem Teilaspekt der Klimaschutzleistungen der Forst- und Holzwirtschaft, zu diskutieren (Knauf et al., 2017). Die Anwendung des komplexen Softwaretools BEKLIFUH erfordert eine intensive Auseinandersetzung mit dem Modell (bspw. im Rahmen einer entsprechenden Anwenderschulung) und setzt, wie oben erwähnt, betriebliche Daten von zwei Inventurzeitpunkten und Aufzeichnungen der Holznutzung im Zeitraum zwischen den Inventuren mit gewissen Strukturen voraus. Diese sind allerdings oftmals nicht oder nicht vollständig vorhanden bzw. bedürfen einer Bearbeitung, für die nicht immer Kapazitäten in den Forstbetrieben verfügbar sind. Auch können Änderungen der Grundeinstellungen im Expertenmodus erhebliche Effekte haben und die Interpretation der Simulationsergebnisse bedarf dann einer kritischen Auseinandersetzung mit den Modelleinstellungen.

Die Analyse der vorhandenen Konzepte zeigt, dass bisher ein auf Betriebsdaten wie denen der Forsteinrichtung aufgebautes, leicht verständliches sowie robustes Berechnungsmodell fehlt, um die Klimaschutzleistung einzelner Forstbetriebe im Rahmen der betrieblichen Planung zu ermitteln.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass auch die Modelle der Treibhausgasberichterstattung nicht eins zu eins übernommen werden können. Dies ist unter anderem bedingt durch die Zielsetzung, die Klimaschutzleistung anhand der Hauptergebnisse der Forsteinrichtung abzuschätzen, weswegen keine Einzelbaumdaten, sondern

aggregierte Bestandesdaten in die Berechnung eingehen. Aber auch die Begrenzung auf das in der Forsteinrichtung abgebildete Derbholz weist Unterschiede zur Treibhausgasberichterstattung auf, welche später im Kapitel 4.2 weiter ausgeführt werden. Ferner wird für die Schätzung des Holzproduktespeichers bei der Treibhausgasberichterstattung auf amtliche Produktionsdaten der FAO-Statistik zurückgegriffen (UBA, 2017). Da diese das tatsächliche Produktionsniveau nicht abbildet, werden stattdessen die Modelle basierend auf der physischen Input-Output-Tabelle für Deutschland abgeleitet, im Rahmen derer qualifizierte Schätzungen unternommen wurden (Kapitel 3.5 und 4.2). Schließlich weist die Treibhausgasberichterstattung die Substitution nicht explizit für die Forstwirtschaft aus, weswegen diese anhand eines eigenen Modells abgeschätzt wird (Kapitel 4.2).

## 3 Methodik

### 3.1 Konzeptionelles Vorgehen

Die Klimaschutzleistung von Wäldern und Forstwirtschaft beruht zum einen auf der Einbindung und Speicherung von Kohlenstoff. Durch das Waldwachstum wird Kohlenstoffdioxid der Atmosphäre entzogen und in der Biomasse gespeichert. Sterben Bäume oder Teile von Bäumen ab, wird der Kohlenstoff im Rahmen der biologischen Zersetzungsprozesse frei und wieder in Form von Kohlenstoffdioxid an die Atmosphäre abgegeben. Wird Holz geerntet, wird der darin gebundene Kohlenstoff zwar ebenfalls dem System Wald entnommen. Bei stofflicher Nutzung erhöhen die aus dem Holz hergestellten Holzprodukte allerdings den Kohlenstoffspeicher der Holzprodukte so lange, bis sie, möglicherweise nach mehreren Nutzungskaskaden, verbrannt oder anderweitig abgebaut werden.

Die Klimaschutzleistung der Forstwirtschaft beruht zum anderen auch auf der Substitution fossiler Brennstoffe. Fossile Brennstoffe können eingespart werden, wenn Holz anstelle fossiler Rohstoffe zur Erzeugung von Wärme und Strom genutzt wird (energetische Substitution). Zudem kann die stoffliche Verwendung neben der verlängerten Kohlenstoffspeicherung im Holz einen weiteren Beitrag zum Klimaschutz leisten, wenn dadurch in der Herstellung energieintensiv herzustellende Materialien wie Zement oder Aluminium ersetzt und somit Treibhausgasemissionen vermieden werden (stoffliche Substitution).

Vor diesem Hintergrund werden mit dem Klimarechner folgende klimaschutzrelevante Kennzahlen berechnet und den Betrieben zur Verfügung gestellt:

Klimaschutzrelevante Kennzahlen des Waldes

- Bestandsgröße Vorrat (in t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten)
- Flussgröße (Netto-) Zuwachs (in t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten)

Klimaschutzleistung durch Forstwirtschaft und Holzverwendung

- Veränderung des Waldspeichers (in t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten)
- Veränderung des Holzproduktespeichers (in t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten)
- stoffliche Substitution (in t CO<sub>2</sub>)
- energetische Substitution (in t CO<sub>2</sub>).

### 3.2 Eingangsdaten

Da Forstbetriebe in der Regel Informationen über ihre Waldbestände nur für das Derbholz besitzen, werden mit dem Klimarechner auch nur die in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten gemessenen Vorräte an Derbholz, und somit nur ein Teil der lebenden Baumbiomasse, abgebildet. Die Änderungen der Kohlenstoffspeicher unterirdische Baumbiomasse, Totholz, Streu und mineralische und organische Böden, die nach IPCC (2006) unterschieden werden, sowie auch der Nicht-Derbholzanteil der oberirdischen Baumbiomasse werden daher nicht berücksichtigt.

Die Eingangsdaten können in der Regel aus den Hauptergebnissen der Forsteinrichtung des Forstbetriebes entnommen werden. Der durchgängige Bezug zu den Daten der Forsteinrichtung hat den Vorteil, dass die Klimaschutzleistung als betrieblich geplanter Mittelwert für den zehnjährigen Forsteinrichtungszeitraum berechnet wird. Dies ist den langen Entwicklungszeiten eines Waldes angemessen, und jährliche Schwankungen innerhalb des Planungszeitraumes z.B. durch Kalamitäten und Einschlagszurückhaltung oder -vorgriffe müssen nicht einzeln bestimmt und ausgeglichen werden. Ein Nachteil des Bezuges zur Forsteinrichtung ist, dass die Ermittlung der Klimaschutzleistung auch nur für maximal den Planungszeitraum, in der Regel 10 Jahre, erfolgen kann. Hinzu kommt, dass insbesondere im Privatwald aus steuerlichen Gründen das nachhaltige Nutzungspotenzial eher unterschätzt wird, was die Klimaschutzleistung potenziell unterschätzt.

Die Daten sind vom Benutzer getrennt nach Baumartengruppen und Altersklassen in das MS Excel-Kalkulationstool einzugeben. Je nach Bundesland variiert die Einteilung der Baumartengruppen in den Richtlinien zur Forsteinrichtung. Die hier verwendete Einteilung in acht Baumartengruppen Buche, Eiche, andere Laubhölzer mit hoher Umtriebszeit (ALh), andere Laubhölzer mit niedriger Umtriebszeit (ALn), Fichte, Douglasie, Kiefer und Lärche findet bspw. Anwendung in der Forsteinrichtung der Niedersächsischen Landesforsten (2012). Die Einteilung wird auch in anderen Bundesländern verwendet, allerdings unterscheidet sich zum Teil die Zuordnung der einzelnen Baumarten zu den Baumartengruppen oder die Baumartengruppen sind weiter untergliedert, können aber zusammengerechnet werden (HessenForst, 2004; Landesforsten Rheinland-Pfalz, 2009). Auch die Einteilung in Altersklassen orientiert sich an dem in Forsteinrichtungen üblichen Zeitraum von 20 Jahren. Sie reichen von Altersklasse I (1 – 20 Jahre) bis zu Altersklasse IX (> 160 Jahre). Schließlich werden für die Kalkulation die folgenden Daten benötigt:

- **Holzboden:** Die Holzbodenfläche geht in Hektar ein und berücksichtigt auch die den jeweiligen Baumartengruppen zugeordneten Blößen.
- **Vorrat Derbholz:** Der Vorrat bezieht sich auf das Derbholzvolumen und geht in Vorratsfestmetern in das Kalkulationstool ein. Eine etwaige Umrechnung von Erntefestmetern kann mit dem Faktor 1,25 (1/0,8) vorgenommen werden.
- **Jährlicher (Netto-) Zuwachs Derbholz:** Der jährliche Zuwachs des Derbholzes in Vorratsfestmetern geht als durchschnittlicher Wert der zehnjährigen Periode für die entsprechende Holzbodenfläche ein.

- **Jährlich geplante Nutzung:** Das geplante Nutzungsvolumen (als Summe von Vor- und Endnutzung) geht als durchschnittlicher, jährlicher Wert in die Berechnungen ein. Die Eingabe erfolgt in Erntefestmetern und kann bei Bedarf mit dem Faktor 0,8 von Vorratsfestmetern in Erntefestmeter umgerechnet werden.
- **Mittlerer BHD:** Die mittleren BHD der Baumartengruppen und Altersklassen sind auf der Basis der Daten der dritten Bundeswaldinventur (kurz BWI 2012) voreingestellt. Sollten betriebsspezifische Durchmesser-Daten bspw. auf Basis einer Betriebsinventur vorliegen, so können auch sie verwendet werden.

### 3.3 Berechnung der CO<sub>2</sub>-Äquivalente

Im ersten Schritt wird das Volumen des Vorrats, des Zuwachses und der geplanten Nutzungen in CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgerechnet. Dazu wird zunächst mithilfe der in der Literatur vorhandenen Raumdichten (Knigge und Schulz, 1966; Pretzsch, 2009) die Masse des Holzes kalkuliert. Die verwendeten Raumdichten für die Baumartengruppen sind in Tabelle 1 abgebildet. Da die Kohlenstoffkonzentration zwischen den Baumarten nur marginal variiert, wird ein durchschnittlicher Kohlenstoffgehalt von 50 % an der jeweiligen Masse angenommen (Burschel et al., 1993; Pretzsch, 2009; Wördehoff, 2016; UBA, 2017). Für die anschließende Umrechnung des Kohlenstoffs in Kohlenstoffdioxid wird der sich aus dem Verhältnis des Mol-Gewichts von Kohlenstoff (12 g/mol) zu Kohlenstoffdioxid (44 g/mol) ergebene Faktor von 3,67 verwendet (vgl. Wördehoff et al., 2011; Wördehoff, 2016).

**Tabelle 1**

Raumdichten nach Knigge und Schulz (1966) und Pretzsch (2009)

| Baumartengruppen          | Raumdichte [t/m <sup>3</sup> ] |
|---------------------------|--------------------------------|
| ALh (Ahorn, Esche, Ulme)  | 0,5473                         |
| ALn (Erle, Pappel, Weide) | 0,4556                         |
| Buche                     | 0,5543                         |
| Douglasie                 | 0,4124                         |
| Eiche                     | 0,5611                         |
| Fichte                    | 0,3771                         |
| Kiefer                    | 0,4307                         |
| Lärche                    | 0,4873                         |

### 3.4 Waldmodell

Der Waldspeicher umfasst die in dem oberirdischen Derbholzvolumen gebundenen CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Entscheidend für die Berechnung der Klimaschutzleistung ist die Änderungen des Waldspeichers. Diese wird gemäß der Flussmethode ermittelt. Aus der Forsteinrichtung werden hierzu der meist aus Ertragstafeln abgeleitete Zuwachs sowie die Höhe der planmäßigen Nutzungen entnommen und voneinander subtrahiert. Liegt der Zuwachs höher als die geplante Nutzung, so ergibt sich eine „jährliche Nettoerhöhung“ und

damit ein Speicheraufbau. Eine negative „Erhöhung“ ist folglich ein Speicherabbau.

### 3.5 Holznutzungs- und Substitutionsmodell

Während Forstbetriebe in der Regel gute Kenntnisse über ihre Waldbestände haben, ist das Wissen über die weitere Verwendung des von ihnen produzierten Holzes naturgemäß eher gering, denn auch die Angaben zur Sortierung lassen häufig nicht auf die tatsächliche Verwendung des Holzes schließen. So weist die amtliche Einschlagsstatistik für das Jahr 2015 (StBA, 2015) für Laubholz einen Stammholzeinschlag in Höhe von 3,4 Mio. m<sup>3</sup> aus. Von der Sägeindustrie, der Furnier- und Sperrholzindustrie sowie den Holzkohleerzeugern wurden jedoch nur 2,8 Mio. m<sup>3</sup> Laubholz eingesetzt (Thünen-Institut, 2018g). Ähnlich sieht es beim Laub-Industrieholz aus. Hier stehen 3,8 Mio. m<sup>3</sup> aus der amtlichen Einschlagsstatistik 2,9 Mio. m<sup>3</sup> auf der Verwendungsseite (Holzwerkstoff- und Zellstoffindustrie, Pellethersteller) gegenüber.

Für die Abschätzung der aus der Holzverwendung resultierenden Veränderung des Holzproduktespeichers sowie der stofflichen und der energetischen Substitution, die mit jedem Holzeinschlag im Forstbetrieb verbunden sind, mussten daher pauschale Ansätze gewählt werden. Sie basieren auf der Grundidee, Verhältnisse von Aufkommen und Verwendung von Holz in Deutschland zu ermitteln und diese auf den Einschlag einzelner Betriebe zu übertragen. Aufkommen und Verwendung werden dabei nach den Kategorien stofflich und nicht-stofflich getrennt. Die Verwendung wird zudem nach den Hauptverwendungskategorien mittel- und langlebiger Produkte aus Holz untergliedert, das sind insbesondere das Bauwesen, die Möbelindustrie und die sonstigen Holzverarbeitenden Industrien. Das im Folgenden

dezidiert beschriebene Vorgehen wird in Abbildung 1 für Laubholz und in Abbildung 2 für Nadelholz vereinfacht dargestellt. Die Flussdiagramme zeigen die im Modell berücksichtigten Stoffflüsse vom Einschlag bis zur Nettoerhöhung des Holzproduktespeichers.

#### Schätzung der stofflichen und nicht-stofflichen Verwendung

Mit dem Einschlag des Holzes verlassen die CO<sub>2</sub>-Äquivalente, die im Holz gespeichert sind, den Waldspeicher und gehen zumindest teilweise in den Holzproduktespeicher über. Üblicherweise werden die Erntemengen aus Sicht der Rohholzvermarktung in drei Sortimente eingeteilt. Nach der Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland (RVR) sind dies Stamm-, Industrie- und Energieholz (DFWR/DHWR, 2015). Aus Vereinfachungsgründen wird hier die stoffliche und nicht-stoffliche Verwendung mit einem pauschalen, auf deutschlandweiten Durchschnittswerten basierenden Modell abgeschätzt. Für Deutschland werden Durchschnittswerte in der Holzmarktbilanz Forst und Holz 2016 (HMI, 2016) und im Holzmarktbericht des BMEL (2017) zusammengefasst dargestellt. Allerdings werden diese Werte nicht nach den Altersklassen oder mittleren Brusthöhendurchmessern (BHD) differenziert. Für die BHD-abhängige Verteilung der Sorten wird in einem ersten Schritt auf die hessischen Bestandessortentafeln von Offer und Staupendahl (2018) zurückgegriffen, die mithilfe des Kalkulationsprogramms HOLZERTE 7.1 erstellt wurden. In diesen Bestandessortentafeln wird das Holzvolumen in Abhängigkeit des mittleren BHD nach forstüblichen Sorten, Stärke- und Güteklassen getrennt ausgewiesen (Offer und Staupendahl, 2009). Aus den Tabellen werden die Stamm-, Industrie- und Energieholzanteile in Abhängigkeit des

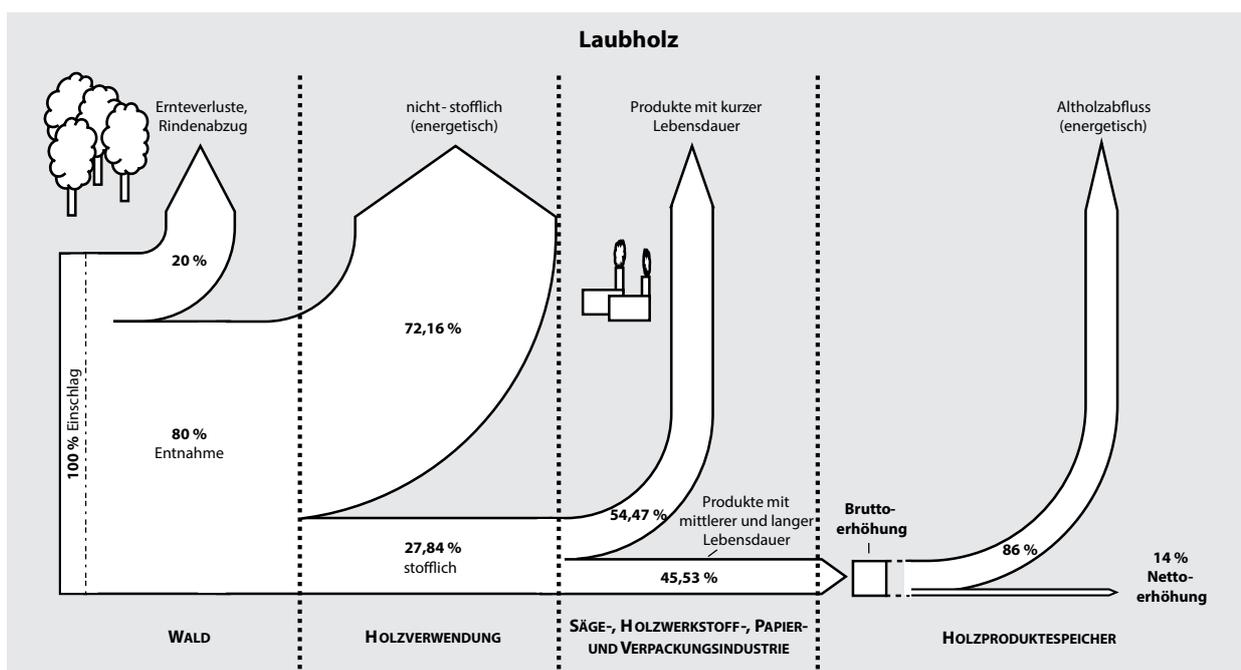


Abbildung 1

Im Modell berücksichtigte Stoffflüsse vom Laubholzeinschlag (100%) bis zur Nettoerhöhung des Holzproduktespeichers

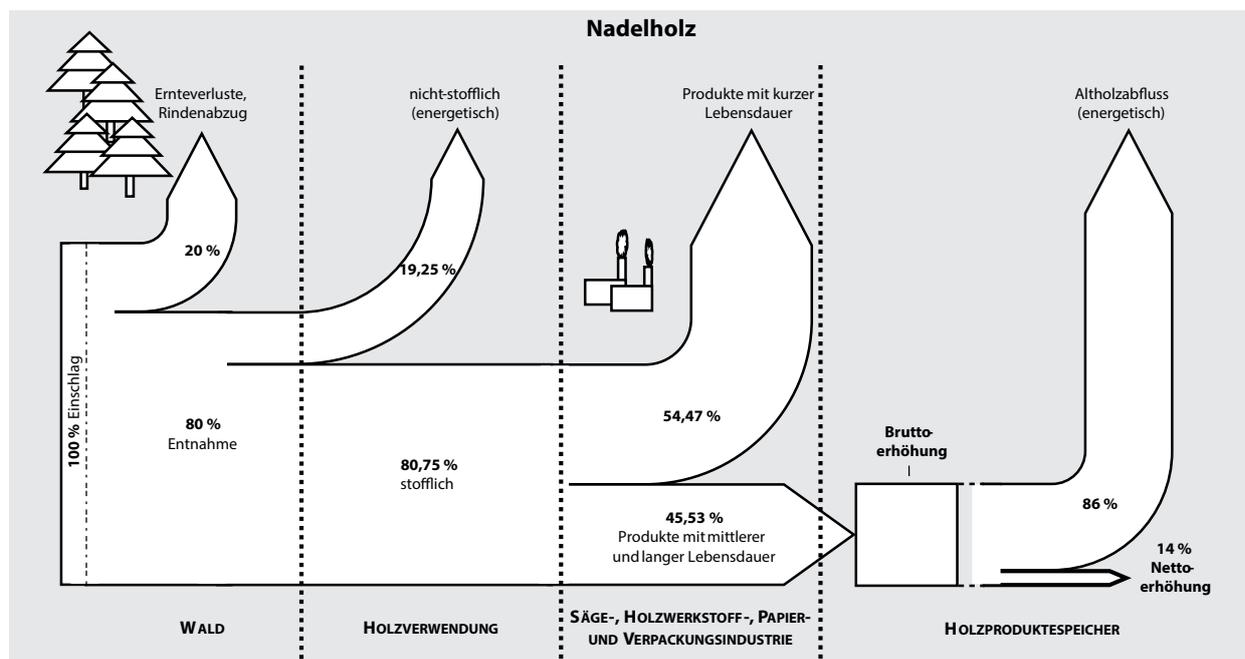


Abbildung 2

Im Modell berücksichtigte Stoffflüsse vom Nadelholzeinschlag (100 %) bis zur Nettoerhöhung des Holzproduktespeichers

mittleren BHD für die Baumartengruppen entnommen. Für die Gruppe ALh werden die Daten für Esche genutzt, für ALn die Daten von Erle und Birke. Es werden vereinfachend die Bestandessortentafeln für Bestände ohne Schälsschaden und Wertklasse 2 ausgewählt. Bei Laubholzarten wird von einer motormanuellen Ernte ausgegangen, bei Nadelholzarten von einer hochmechanisierten. Nicht verkaufte und nicht verwertetes Holz bleibt unberücksichtigt.

Im Vergleich zur tatsächlichen Holzverwendung nach der Einschlagsrückrechnung des Thünen-Institutes (2018g) (ausgewertet nach Jochem et al. (2015)), ist der Energieholzanteil nach der forstüblichen Sortierung entsprechend der Bestandessortentafeln deutlich geringer. Dies ist durch eine unterschiedliche Kategorisierung zu begründen. In der Einschlagsrückrechnung wird das eingeschlagene Holz in die Verwendungsbereiche stoffliche und energetische Verwendung eingeteilt. Das von Offer und Staupendahl (2018) ausgewiesene Industrieholz kann nicht alleine dem stofflich genutzten Verwendungsbereich zugeordnet werden, da Holz später nicht zwingend so verwendet wird, wie es im Forstbetrieb ausgehalten wurde. Industrieholz wird vielfach nur energetisch genutzt und auch Stammholz kann, insbesondere wenn es bspw. durch längere Lagerung entwertet ist, zu gewissen Anteilen als Industrie- oder Energieholz verwendet werden. Hinzu kommt, dass der Holzeinschlag im kleineren Privatwald und bei verstreutem Hiebsanfall vielfach nur als Industrieholz oder energetisch genutzt wird, selbst wenn höherwertige Holzverwendungen möglich wären.

Da sich die im Folgenden hergeleiteten Faktoren der Holznutzungs- und Substitutionsmodelle auf die tatsächliche Holzverwendung beziehen und nicht auf die üblicherweise von Forstbetrieben durchgeführte Sortierung in Stamm-, Industrie- und Energieholz, werden die Daten der

Bestandessortentafeln an die tatsächliche Holzverwendung angepasst. Die Verwendung wird in stofflich und nicht-stofflich eingeteilt. Dafür wurde zunächst die nichtlineare Sigmoidfunktion nach Richards (1959) an die BHD-abhängigen Stammholzanteile der verschiedenen Baumartengruppen gefittet (Fischer und Schönfelder, 2016). Die verwendete Funktion lautet wie folgt:

$$y = A * (1 + B * e^{(-k*x)})^{-\frac{1}{M}}$$

Dabei steht  $y$  für den Stammholzanteil,  $x$  ist der mittlere BHD der Altersklasse und  $A$ ,  $B$ ,  $k$  sowie  $M$  sind Koeffizienten. Der Koeffizient  $A$  kann unmittelbar interpretiert werden, er gibt den Wert an, den die Funktion anstrebt und ist daher als Sättigungsparameter zu deuten.

Berechnet nach den Ergebnissen der Einschlagsrückrechnung des Thünen-Institutes (2018g) wurden zwischen den Jahren 2010 und 2014 im Durchschnitt 27,84 % des eingeschlagenen Laubholzes einer stofflichen Verwendung zugeführt, 72,16 % wurden nicht-stofflich genutzt. Beim Nadelholz wurden 80,75 % stofflich und 19,25 % nicht-stofflich genutzt. Bei der Berechnung der stofflichen Rohholzverwendung werden die Bereiche Sägeindustrie, Holzwerkstoffindustrie, Furnierwerke (inklusive Sperrholzwerke), Holz- und Zellstoffindustrie, Hersteller von Pellets und Briketts, Holzkohle sowie sonstige Verarbeiter von Rohholz einbezogen, bei der energetischen Rohholzverwendung waren dies Privathaushalte und die Biomasseanlagen. Der Außenhandel sowie die Lagerbestandsveränderungen sind in der summarischen Betrachtung marginal und bleiben unberücksichtigt. Da es sich dabei lediglich um ein summarisches Ergebnis handelt und keine dimensionsabhängigen Werte vorhanden sind, werden die Einschlagsdaten der BWI 2012 zur Hilfe

genommen. Die Funktionen werden auf die nach ihrem BHD differenzierten Nutzungsmengen angewendet, die im Zeitraum von 2002 bis 2012 angefallen sind. Getrennt nach Laubholz und Nadelholz wird der Sättigungsparameter  $A$  angepasst, sodass die Summen, die sich aus den Daten der BWI 2012 ergeben, den summarischen Ergebnissen der Einschlagsrückrechnung des Thünen-Institutes (2018g) entsprechen. Bei den Funktionen für die Laubholzarten wurde durch diese rechnerische Anpassung jeweils 0,3254 vom Parameter  $A$  subtrahiert. In den Funktionen für das Nadelholz blieb der Parameter  $A$  nahezu unverändert (+ 0,0064). Der angepasste Parameter wird im Folgenden als  $A^*$  bezeichnet. Durch Anpassung von Parameter  $A$  zu  $A^*$  schätzt die Funktion nun den Anteil an der stofflichen Holzverwendung ab, der nachfolgend als  $y^*$  bezeichnet wird:

$$y^* = A^* * (1 + B * e^{-(k*x)^{\frac{1}{M}}})$$

In Tabelle 2 werden die berechneten Parameter der Funktionen für die Baumartengruppen dargestellt. Mithilfe der angepassten Funktionen wird nun in Abhängigkeit des Durchmessers und somit getrennt für jede Altersklasse der vom Einschlag stofflich verwendete Anteil berechnet. Es wird unterstellt, dass der Rest des Einschlags nicht-stofflich verwendet wird. Der Verlauf der Funktionen in Abhängigkeit zum mittleren BHD ist in Abbildung 3 dargestellt.

### Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten

Nur ein Teil des zur stofflichen Nutzung eingeschlagenen Holzes wird am Ende des Verarbeitungsprozesses den Bestand an Produkten mit mittlerer und langer Lebensdauer (i.e. länger als 3 Jahre) erhöhen. Der Zufluss zu diesem Produktbestand wird im Folgenden als Bruttoerhöhung und der Saldo aus Zu- und Abfluss als Nettoerhöhung bezeichnet. Analog zum Waldspeicher wird auch hier vereinfachend von „Erhöhung“ gesprochen. Deutschland verzeichnet im Rahmen der jährlichen Treibhausgasberichterstattung bisher eine Erhöhung des Holzproduktespeichers. Die Nettoerhöhung entspricht der Veränderung des Holzproduktespeichers als Teil der Klimaschutzleistung von Forst und Holz.

Die Bruttoerhöhung ist die Basis für die Berechnung der stofflichen Substitution.

Bisher gibt es keine empirischen Untersuchungen, die den Holzfluss vom Wald in Deutschland bis in die verschiedenen Endverwendungsbereiche klar nachvollziehbar aufzeigen. Wesentliche Ursache dafür dürften die zahlreichen und unterschiedlichen Holzverwendungen, die starke Einbindung in den internationalen Handel sowie die Verflechtung des gesamten Clusters sein. Insbesondere das Aufkommen und die Verwendung von Altholz sowie Nebenprodukten und Industrierestholz erschweren eine direkte Zuordnung von Holzwerkstoffverwendung zum Waldholzaufkommen ganz erheblich. Es werden daher auf Grundlage summarischer Darstellungen von Aufkommen und Verwendung von Holz die Anteile von Brutto- und Nettoerhöhung des Bestandes an Holzprodukten am stofflich genutzten Einschlag, das heißt Stamm- und Industrieholz, abgeschätzt und damit die benötigten Faktoren abgeleitet.

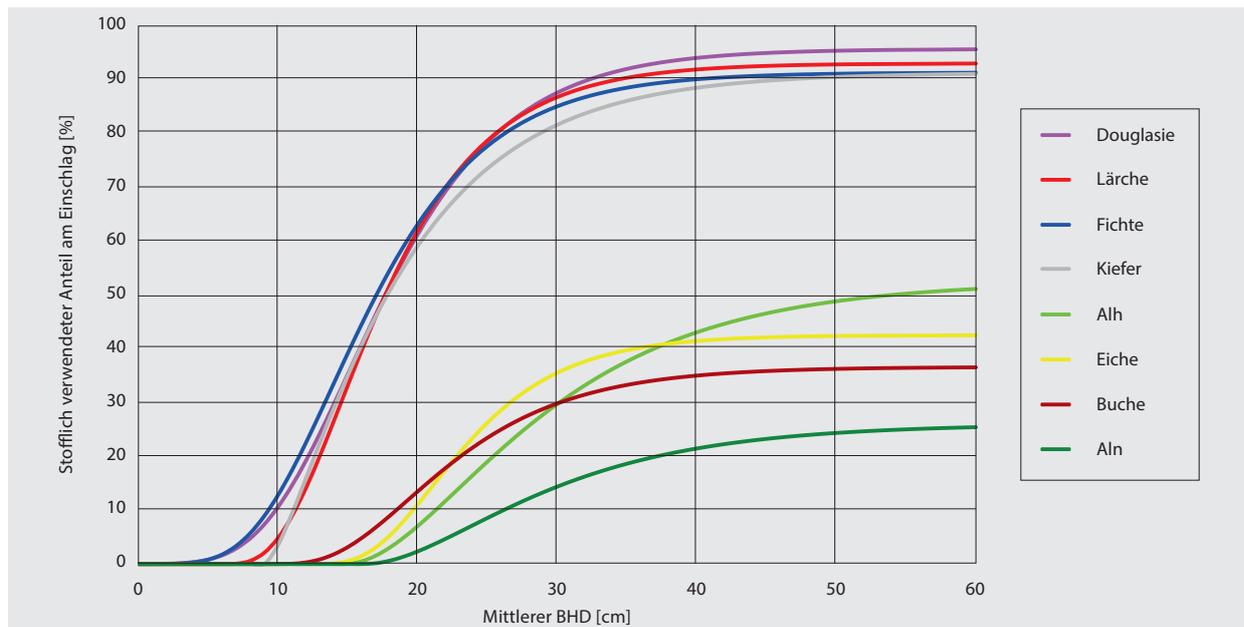
Die zentrale Quelle für diese Abschätzung ist die physische Input-Output-Tabelle von Bösch et al. (2015). Sie bietet eine konsistente Darstellung von Aufkommen und Verwendung von Holz einschließlich der sektoralen Verflechtungen für Deutschland für das Jahr 2010. Nach dieser Darstellung beträgt im Jahr 2010 die inländische Verwendung mittel- und langlebiger Holzprodukte 21,483 Mio. Kubikmeter Faseräquivalent [ $m^3$  (f)]. Sie umfassen Möbel aus Holz (30%), die Produkte des Holzbaus (63%) sowie sonstige Holzprodukte (7%). Für die weitere Berechnung wird auf die Berücksichtigung des Außenhandels verzichtet. Dies begründet sich aus der Notwendigkeit eines summarischen Ansatzes, der eine detaillierte Berücksichtigung der Einfuhren und Ausfuhren auf den unterschiedlichen Verarbeitungsstufen ausschließt. Die Vernachlässigung des Außenhandels erscheint für die vorliegende Abschätzung aber auch sachlich vertretbar, da die Nettoeinfuhr über alle Produkte mit 6,6 Mio.  $m^3$  (f) nur etwa 5% des gesamten inländischen Aufkommens an Holzfasern beträgt. Die Nettoeinfuhr resultiert zudem vor allem aus der Einfuhr von Zellstoff für die Papierherstellung; sie hat somit auch keinen Einfluss auf die hier vorgenommene Untersuchung zur Verwendung von Holz in mittel- und langlebigen Holzprodukten sowie die Substitution.

**Tabelle 2**

Koeffizienten zur Berechnung der stofflichen Verwendung mit der nichtlinearen Sigmoidfunktion nach Richards (1959) (Anpassung der Daten von Offer und Staupendahl (2018) mit den Daten der dritten Bundeswaldinventur an die summarischen Ergebnisse der Einschlagsrückrechnung des Thünen-Institutes (2018g))

| Baumartengruppen | $A^*$            | $B$               | $k$              | $M$               |
|------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Eiche            | 0,42 (+/-0,0002) | -8,42 (+/-0,3106) | 0,19 (+/-0,0007) | -0,15 (+/-0,0079) |
| Buche            | 0,37 (+/-0,0002) | -3,90 (+/-0,0822) | 0,15 (+/-0,0006) | -0,22 (+/-0,0074) |
| ALh              | 0,52 (+/-0,0004) | -4,12 (+/-0,0171) | 0,10 (+/-0,0003) | -0,45 (+/-0,0055) |
| ALn              | 0,26 (+/-0,0016) | -5,28 (+/-0,0986) | 0,10 (+/-0,0018) | -0,45 (+/-0,0257) |
| Fichte           | 0,91 (+/-0,0002) | -0,41 (+/-0,0865) | 0,16 (+/-0,0006) | -0,04 (+/-0,0095) |
| Kiefer           | 0,91 (+/-0,0002) | -3,10 (+/-0,0077) | 0,12 (+/-0,0003) | -0,68 (+/-0,0048) |
| Douglasie        | 0,96 (+/-0,0002) | 0,38 (+/-0,1013)  | 0,16 (+/-0,0005) | 0,03 (+/-0,0084)  |
| Lärche           | 0,93 (+/-0,0002) | -2,63 (+/-0,0485) | 0,17 (+/-0,0005) | -0,21 (+/-0,0060) |

In Klammern ist der Standardfehler der Parameter angegeben.



**Abbildung 3**

Anteil der stofflichen Verwendung in Abhängigkeit des mittleren BHD getrennt nach Baumartengruppen

Unter Vernachlässigung des Außenhandels beruht die inländische Verwendung mittel- und langlebiger Holzprodukte in Höhe von 21,483 Mio. m<sup>3</sup> (f) auf dem Aufkommen von Stamm- und Industrieholz für die Säge- und Holzwerkstoffindustrie sowie dem Aufkommen an Altholz für die stoffliche Nutzung. Ebenfalls nach Bösch et al. (2015) werden 44,917 Mio. m<sup>3</sup> (f) Stamm- und Industrieholz von der Säge- und Holzwerkstoffindustrie eingesetzt. Hinzu kommen noch 2,269 Mio. m<sup>3</sup> (f) an Altholz gemäß Bösch et al. (2015). Zusammen sind dies 47,186 Mio. m<sup>3</sup> (f). Das Aufkommen an stofflich genutztem Stamm- und Industrieholz hat daran einen Anteil von 95,19%. Wird dieser Anteil schlussendlich auf die inländische Verwendung mittel- und langlebiger Holzprodukte in Höhe von 21,483 Mio. m<sup>3</sup> (f) angewendet, ergibt sich rein rechnerisch ein Wert von 20,45 Mio. m<sup>3</sup> (f). Als Anteil der Bruttoerhöhung des Bestandes an Holzprodukten am stofflich genutzten Einschlag errechnet sich damit ein Wert von 45,53%.

Für die Berechnung der Nettoerhöhung des Bestandes an mittel- und langlebigen Holzprodukten ist die Bruttoerhöhung um die Abflüsse aus dem Bestand in Form von Aufkommen an Altholz zu bereinigen. Nach Bösch et al. (2015) betrug im Jahr 2010 das inländische Aufkommen an Altholz 14,503 Mio. m<sup>3</sup> (f). Bereinigt um den stofflich wiederverwerteten Altholzstrom (1 Mio. m<sup>3</sup> (f)) beträgt nach dieser Quelle das Verhältnis von effektivem Abfluss (13,5 Mio. m<sup>3</sup> (f)) zu Zufluss (20,45 Mio. m<sup>3</sup> (f)) 0,66 im Jahr 2010. Das bedeutet, dass der Bestand an Holzprodukten jährlich um rund 34% des Zuflusses wächst.

Dieses Verhältnis erscheint im Vergleich mit den Zahlen im Nationalen Inventarbericht Deutschlands (UBA, 2017) als sehr niedrig. Für das Jahr 2010 errechnet sich dort ein Verhältnis von Abfluss zu Zufluss von 0,86 (Abbildung 5). Im Sinne einer konservativen Schätzung der Erhöhung des

Holzproduktespeichers wird in diesem Fall vom grundsätzlichen Vorgehen der Ableitung der Faktoren aus der Input-Output-Tabelle von Bösch et al. (2015) abgewichen und das Verhältnis von Abfluss zu Zufluss des Holzproduktespeichers aus dem Nationalen Inventarbericht direkt übernommen. Die Bindung des Abflusses an den Zufluss an mittel- und langlebige Holzprodukten kann damit begründet werden, dass ein Großteil der Holzverwendung im Bauwesen in Deutschland derzeit auf Modernisierung entfällt (Jochem et al., 2016). Bei nicht wesentlich veränderten Baustoffpräferenzen der Bauherren dürften bei Modernisierung die Zu- und Abflüsse in der Regel in einem ähnlichen Verhältnis stehen.

### Substitution

Durch die Verwendung von Holz als Bau- und Werkstoff können andere, z.T. energieintensiv herzustellende Materialien substituiert und deren höhere Emissionen damit vermieden werden. Die daraus resultierende Klimaschutzleistung wird stoffliche Substitution genannt. Deren umfassende Bestimmung ist im Allgemeinen nur verhältnismäßig grob möglich, da konkrete Substitutionsfaktoren nur für ausgewählte Produkte, meist auch nur Bauprodukte vorliegen. Die korrekte Bestimmung von Substitutionsfaktoren ist jeweils aufwendig; sie erfordert stets eine umfassende Ökobilanzierung der funktionalen Einheiten aus unterschiedlichen Materialien im Vergleich. Die Substitutionsfaktoren unterliegen außerdem auch einer stetigen Veränderung in dem Maße, wie die technischen Prozesse der Produktion und des Recyclings material- und energiesparender werden. Sie müssen damit laufend überprüft und nachberechnet werden. Für das hier vorgestellte Modell werden die aktuellsten verfügbaren Substitutionsfaktoren verwendet, die für die hier vorliegenden Modellanforderungen ausreichend aggregiert sind. Da deren Anwendungszeitraum im Modell maximal der Länge einer Forsteinrichtungsperiode

entspricht, erscheint die Annahme ihrer Konstanz in Anbetracht ihrer Unsicherheiten insgesamt vertretbar. Für zukünftige Modellanpassungen müssen die Substitutionsfaktoren jedoch den dann herrschenden technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen angepasst werden.

Für die vorliegende Untersuchung wird im Anhalt an Knauf et al. (2013) mit einem stofflichen Substitutionsfaktor von 1,5 tC/tC gerechnet. Im Vergleich zu den Ergebnissen einer älteren Metastudie von Sathre und O'Connor (2010b) – sie kommen auf einen Substitutionsfaktor von 2,1 tC/tC – liegt der hier verwendete stoffliche Substitutionsfaktor damit deutlich niedriger. Verglichen mit einer aktuelleren Studie von Rüter et al. aus dem Jahr 2016, befindet sich der materielle Substitutionsfaktor von Knauf et al. (2013) für den Bereich Rohbau im Mittel der dort berechneten Ergebnisse. Dieser wird auf die Produktion mittel- und langlebiger Holzprodukte angewendet. Bei Vernachlässigung des Außenhandels entspricht die Produktion auch der Verwendung. Im Jahr 2010 waren das 21,483 Mio. m<sup>3</sup> (f) aus dem Aufkommen von Stamm- und Industrieholz sowie dem Aufkommen an Altholz für die stoffliche Nutzung. Zusätzlich werden auch die Holzprodukte des Verpackungswesens mit dem Substitutionsfaktor von 1,5 tC/tC belegt. Das in der Verpackungsindustrie verwendete Rohholzvolumen wird ebenfalls über die physische Input-Output-Tabelle von Bösch et al. (2015) abgeleitet. Es hat ein Verhältnis von 15,3% zum Einschlag von Stamm- und Industrieholz. Aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer werden Verpackungsmittel aus Holz zwar nicht als Zufluss zum Bestand an Holzprodukten gezählt. Mit ihrer Verwendung werden aber trotzdem Emissionen aus der Verarbeitung alternativer Materialien (bspw. Plastikverpackungen) ersetzt.

Wird Holz verbrannt, wird der im Holz gebundene Kohlenstoff zwar wieder freigesetzt und es entstehen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Es werden damit aber ebenfalls Emissionen aus fossilen Quellen ersetzt. Für diese energetische Substitution wird ein Faktor von 0,67 tC/tC verwendet (Sathre und O'Connor, 2010a; Rüter, 2011; Weingarten et al., 2016). Aufgrund der geringeren Energieeffizienz von Kohlenstoff im Holz im Vergleich zu Gas oder Öl ist der Substitutionsfaktor hier kleiner 1.

Der energetische Substitutionsfaktor wird auf alle Holzvolumina angewandt, die im Laufe eines Jahres nicht-stofflich verwendet werden. Das sind das Rundholz aus dem Wald, das unmittelbar als Brennholz eingesetzt wird sowie das anfallende Industrierestholz (Produkte mit kurzer Lebensdauer), welches ebenfalls verbrannt wird und zusätzlich der effektive Abfluss aus dem Holzproduktespeicher (13,5 Mio. m<sup>3</sup> (f) im Jahr 2010), d. h. Altholz, das nicht wieder stofflich verwendet und damit verbrannt wird (energetische Substitution aus Kaskadennutzung).

## 4 Ergebnisse für den „Forstbetrieb Deutschland“

Für den Vergleich des erstellten Modells, aber auch die Darstellung des Aufbaus und der zentralen Ergebnisse des Klimarechners, wird aus der Ergebnisdatenbank der Bundeswaldinventur (Thünen-Institut, 2018a) ein Datenmodell

eines für Deutschland repräsentativen durchschnittlichen Forstbetriebes erstellt. Der im Folgenden als „Forstbetrieb Deutschland“ bezeichnete Modellbetrieb bildet ein Tausendstel der deutschen Waldfläche ab. Aus Gründen der Vereinfachung beschränkt sich das Modell auf die Fläche des begehbaren Waldes und auf den Vorrat des Hauptbestandes (inkl. des Plenterwaldes). Unbestockte Flächen werden den Baumartengruppen entsprechend der jeweiligen Anteile an der bestockten Holzbodenfläche zugeordnet. In das Modell fließen die Holzbodenfläche des begehbaren Waldes inklusive Lücken und Blößen (Thünen-Institut, 2018b), der Holzvorrat auf der Fläche des begehbaren Waldes (Thünen-Institut, 2018c), der Bruttozuwachs auf der Fläche des begehbaren Waldes (Thünen-Institut, 2018f), der Gesamtabgang auf der Fläche des begehbaren Waldes (Thünen-Institut, 2018e) sowie die Nutzung auf der Fläche des begehbaren Waldes (Thünen-Institut, 2018d) ein. Letztgenannte Informationen werden zur Ermittlung der Mortalität benötigt, mithilfe derer der Nettozuwachs bestimmt wird.

### 4.1 Ergebnisse des Klimarechners

Die Hauptergebnisse des Klimarechners werden mit der Eingabe der Betriebsdaten automatisch in einer Tabelle zusammengefasst. Deren Aufbau inklusive der Ergebnisse des „Forstbetriebes Deutschland“ sind Tabelle 3 zu entnehmen. Die Ergebnisse beschreiben drei verschiedene Bereiche, für die die durchschnittlichen Ergebnisse eines Hektars getrennt nach den Baumartengruppen angegeben werden sowie auch die betrieblichen Mittelwerte (gewichtet mit der Holzbodenfläche der Baumartengruppen) und das Gesamtergebnis des Forstbetriebes. Der erste Abschnitt umfasst die naturalen Kennzahlen, die hier im Beispiel von den BWI 2012-Daten abgeleitet wurden und die üblicherweise den Hauptergebnissen der Forsteinrichtung entnommen werden können, wobei die in der Forstplanung üblichen Einheiten beibehalten werden. Zudem sind die Holzbodenfläche sowie die durchschnittlichen Vorräte Derbholz, der jährliche Zuwachs Derbholz und die geplante jährliche Nutzung Derbholz aufgeführt. Im zweiten Abschnitt werden diese Größen in CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgerechnet. Sie bilden die ersten wichtigen klimaschutzrelevanten Kennzahlen: die im Forstbetrieb insgesamt gespeicherten CO<sub>2</sub>-Äquivalente (Vorrat Derbholz) und deren jährliche Erhöhung durch den Holzzuwachs (jährlicher Zuwachs Derbholz) sowie die geplante jährliche Nutzung. Im dritten Abschnitt wird schließlich die Klimaschutzleistung der Forstwirtschaft und Holzverwendung aufgeschlüsselt. Analog zum im Methodenteil beschriebenen Vorgehen werden die jährliche Nettoerhöhung des Waldspeichers und des Holzproduktespeichers angegeben sowie die aus der Nutzung resultierenden Substitutionseffekte, differenziert nach den Entstehungsorten. Die Summe ergibt schließlich die jährliche Klimaschutzleistung Forst und Holz.

Im Anschluss an die Hauptergebnisse sind im Excel-Kalkulationstool in den nachfolgenden Tabellenblättern getrennt nach den Baumartengruppen genaue Angaben für die jeweiligen Altersklassen zu entnehmen. Die Tabellen sind analog aufgebaut, enthalten jedoch weitere Zwischenschritte.

Tabelle 3

Hauptergebnisse des Klimarechners für den „Forstbetrieb Deutschland“

|   |                              | Eiche      | Buche      | ALh        | ALn        | Fichte      | Dou-<br>glasie | Kiefer     | Lärche      | Betriebli-<br>cher Mit-<br>telwert | Gesamt-<br>ergebnisse<br>Forstbetrieb |
|---|------------------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|----------------|------------|-------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Zusammenfassung der Forsteinrichtungsdaten</b>                   |                              |            |            |            |            |             |                |            |             |                                    |                                       |
| <b>Daten der Forsteinrichtung</b>                                   |                              |            |            |            |            |             |                |            |             |                                    |                                       |
| Holzboden   | [ha]                         | 1.157      | 1.721      | 788        | 1.176      | 3.018       | 223            | 2.489      | 315         |                                    | <b>10.888 ha</b>                      |
| Vorrat Derbholz   | [Vfm/ha]                     | 297,4      | 347,1      | 240,5      | 177,6      | 420,9       | 318,8          | 304,3      | 318,2       | 325                                | <b>3.539.015 Vfm</b>                  |
| jährlicher Zuwachs Derbholz   | [Vfm/ha]                     | 7,1        | 9,4        | 7,1        | 4,2        | 14,7        | 16,6           | 8,7        | 9,9         | 9,9                                | <b>107.595 Vfm</b>                    |
| geplante jährliche Nutzung Derbholz                                 | [Efm/ha]                     | 2,9        | 5,7        | 2,3        | 2,2        | 13,3        | 5,5            | 5,6        | 5,6         | 6,8                                | <b>74.381 Efm</b>                     |
| <b>Vorrat, Zuwachs und Nutzung in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten</b>   |                              |            |            |            |            |             |                |            |             |                                    |                                       |
| Vorrat Derbholz   | [t CO <sub>2</sub> /ha]      | 306,2      | 353,0      | 241,5      | 148,5      | 291,2       | 241,3          | 240,5      | 284,6       | 270,8                              | <b>2.948.056 t CO<sub>2</sub></b>     |
| jährlicher Zuwachs Derbholz   | [t CO <sub>2</sub> /ha]      | 7,3        | 9,6        | 7,2        | 3,5        | 10,1        | 12,5           | 6,9        | 8,9         | 8,1                                | <b>87.946 t CO<sub>2</sub></b>        |
| geplante jährliche Nutzung  | [t CO <sub>2</sub> /ha]      | 3,7        | 7,2        | 2,9        | 2,3        | 11,5        | 5,2            | 5,5        | 6,2         | 6,7                                | <b>73.141 t CO<sub>2</sub></b>        |
| <b>Klimaschutzleistung durch Forstwirtschaft und Holzverwendung</b> |                              |            |            |            |            |             |                |            |             |                                    |                                       |
| <b>Waldspeicher</b>   |                              |            |            |            |            |             |                |            |             |                                    |                                       |
| jährliche Nettoerhöhung   | [t CO <sub>2</sub> /ha]      | 3,5        | 2,4        | 4,2        | 1,2        | -1,3        | 7,3            | 1,4        | 2,7         | 1,4                                | <b>14.805 t CO<sub>2</sub></b>        |
| <b>Holzproduktespeicher</b>   |                              |            |            |            |            |             |                |            |             |                                    |                                       |
| jährliche Nettoerhöhung   | [t CO <sub>2</sub> /ha]      | 0,1        | 0,1        | 0,0        | 0,0        | 0,5         | 0,2            | 0,2        | 0,3         | 0,2                                | <b>2.426 t CO<sub>2</sub></b>         |
| <b>Substitution</b>   |                              |            |            |            |            |             |                |            |             |                                    |                                       |
| jährliche Substitution  |                              |            |            |            |            |             |                |            |             |                                    |                                       |
| stofflich lange, mittlere Lebensdauer                               | [t CO <sub>2</sub> /ha]      | 0,7        | 1,2        | 0,3        | 0,1        | 5,2         | 2,3            | 2,2        | 2,9         | 2,4                                | <b>25.994 t CO<sub>2</sub></b>        |
| stofflich Kaskadennutzung   | [t CO <sub>2</sub> /ha]      | 0,0        | 0,1        | 0,0        | 0,0        | 0,3         | 0,1            | 0,1        | 0,1         | 0,1                                | <b>1.313 t CO<sub>2</sub></b>         |
| stofflich kurze Lebensdauer   | [t CO <sub>2</sub> /ha]      | 0,2        | 0,4        | 0,1        | 0,0        | 1,8         | 0,8            | 0,7        | 1,0         | 0,8                                | <b>8.715 t CO<sub>2</sub></b>         |
| energetisch aus Wald  | [t CO <sub>2</sub> /ha]      | 1,3        | 2,7        | 1,2        | 1,1        | 1,0         | 0,5            | 0,8        | 0,5         | 1,3                                | <b>13.702 t CO<sub>2</sub></b>        |
| energetisch kurze Lebensdauer                                       | [t CO <sub>2</sub> /ha]      | 0,4        | 0,6        | 0,2        | 0,1        | 2,8         | 1,2            | 1,2        | 1,5         | 1,3                                | <b>13.891 t CO<sub>2</sub></b>        |
| energetisch Kaskadennutzung   | [t CO <sub>2</sub> /ha]      | 0,3        | 0,5        | 0,1        | 0,0        | 2,0         | 0,9            | 0,8        | 1,1         | 0,9                                | <b>9.985 t CO<sub>2</sub></b>         |
| Summe jährliche Substitution  | [t CO <sub>2</sub> /ha]      | 3,0        | 5,5        | 2,0        | 1,4        | 13,1        | 5,9            | 5,9        | 7,1         | 6,8                                | <b>73.600 t CO<sub>2</sub></b>        |
| <b>Jährliche Klimaschutzleistung Forst und Holz</b>                 | <b>[t CO<sub>2</sub>/ha]</b> | <b>6,6</b> | <b>7,9</b> | <b>6,3</b> | <b>2,6</b> | <b>12,2</b> | <b>13,4</b>    | <b>7,4</b> | <b>10,1</b> | <b>8,3</b>                         | <b>90.831 t CO<sub>2</sub></b>        |

Die Nutzungsmenge ist nach stofflicher und nicht-stofflicher Verwendung ausgewiesen und es wird der Abgang des Holzproduktespeichers quantifiziert, der für die Bestimmung der energetischen Substitutionseffekte durch die Altholzflüsse aus dem Holzproduktespeicher benötigt wird.

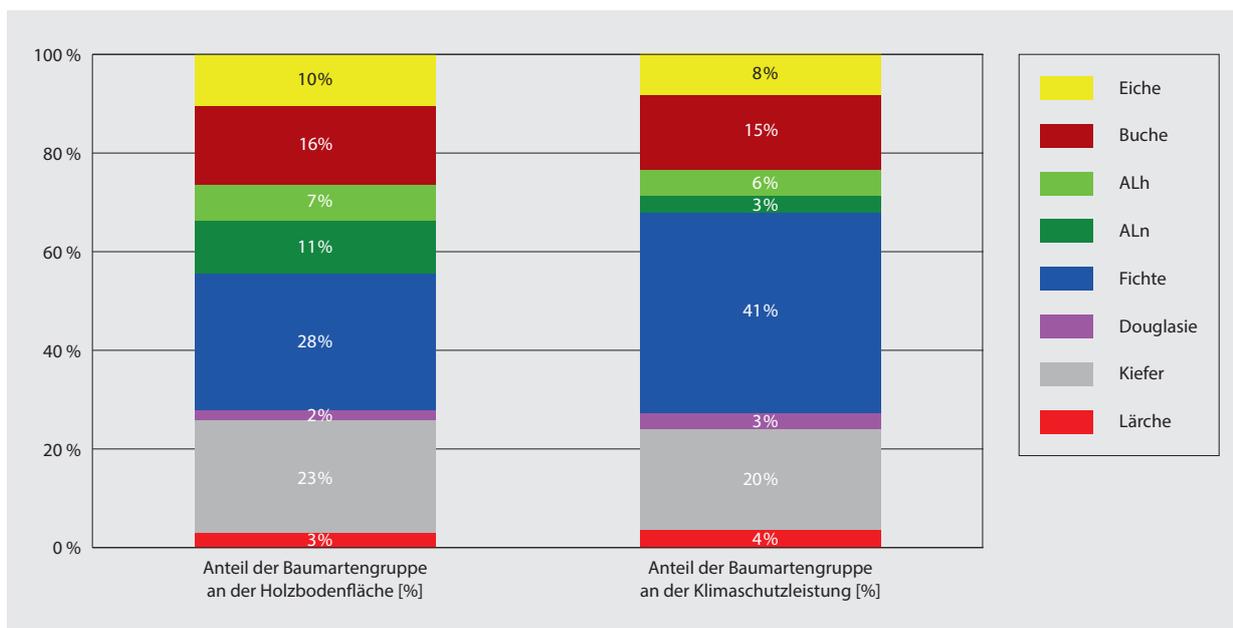
Für den jeweiligen Forstbetrieb werden die zuvor beschriebenen wichtigsten Ergebnisse im sogenannten Waldbesitzerbericht erläutert. Zusätzlich wird die Verteilung der Holzbodenfläche nach Altersklasse und Baumartengruppe visuell dargestellt. Für einen greifbaren Kontext wird die jährliche Klimaschutzleistung des betrachteten Forstbetriebes mit der jährlichen Pro-Kopf-Emission eines durchschnittlichen Einwohners in Deutschland verglichen. Der „Forstbetrieb Deutschland“, der flächenmäßig einem tausendstel der Waldfläche Deutschlands entspricht und damit eine Gesamtfläche von 10.888 Hektar umfasst, hat eine jährliche Klimaschutzleistung von 8,3 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar, und somit in Summe 90.831 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente auf der Gesamtfläche. Nach der Europäischen Umweltagentur betrug die jährliche Pro-Kopf-Emission im Jahr 2015 11,4 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente (EEA, 2017), was bedeutet, dass der „Forstbetrieb Deutschland“ mit 10.888 Hektar durch die Erhöhung des Waldspeichers, des Holzproduktespeichers und durch Substitution die Emission von 7.968 Einwohnern bindet.

Im Anschluss wird die Klimaschutzleistung durch den Wald- und Holzproduktespeicher sowie die Substitutionseffekte mit den Bundesdurchschnittswerten verglichen. Die Ergebnisse des „Forstbetriebes Deutschland“ respektive der Bundesdurchschnitt weisen eine jährliche Klimaschutzleistung von 8,4 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente je Hektar Waldfläche auf. Davon entfallen 17% auf die Erhöhung des Waldspeichers, 2% auf die Erhöhung des Holzproduktespeichers und 81% resultieren aus Substitutionseffekten, was die hohe Klimaschutzleistung der Substitutionseffekte verdeutlicht.

Zum Abschluss wird die Klimaschutzleistung der Baumartengruppen in Relation zum Anteil an der Holzbodenfläche dargestellt (Abbildung 4). Im „Forstbetrieb Deutschland“ zeigt sich eine überproportionale Klimaschutzleistung der Nadelhölzer. Besonders die Klimaschutzleistung der Fichte nimmt einen großen Anteil ein. An der Holzbodenfläche hat die Fichte einen Anteil von 28%, an der Klimaschutzleistung von 41%.

#### 4.2 Vergleich der Ergebnisse mit der Treibhausgasberichterstattung

Für den Vergleich werden die Ergebnisse des „Forstbetriebes Deutschland“ verwendet. Da der „Forstbetrieb Deutschland“ nur einem tausendstel der Waldfläche Deutschlands



**Abbildung 4**

Klimaschutzleistung der Baumartengruppen in Relation zum Anteil an der Holzbodenfläche („Forstbetrieb Deutschland“)

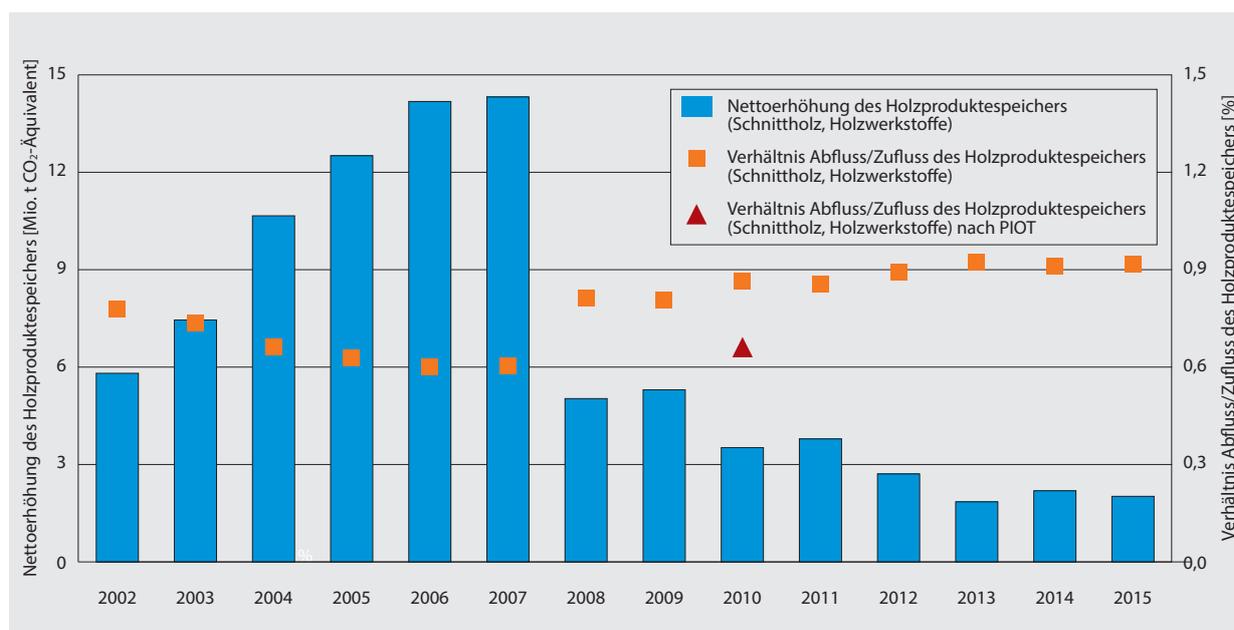
entspricht, werden die entsprechenden Ergebnisse mit dem Faktor 1.000 multipliziert, um die gesamte Waldfläche und damit die gesamte Klimaschutzleistung Deutschlands abzubilden. Die summarischen Ergebnisse des „Forstbetriebes Deutschland“ werden komponentenweise mit den bereits in Kapitel 2 erwähnten CRF-Inventartabellen gemäß Klimarahmenkonvention verglichen. Grundlage für den Vergleich ist die Submission aus dem Jahr 2017.

Der Vergleich erfolgt getrennt für die beiden Komponenten Waldspeicher und Holzproduktespeicher (Tabelle 4). Die sich aus der Substitution von fossilen Rohstoffen ergebende Klimaschutzleistung steht in einem direkten funktionalen Zusammenhang mit der Bruttoerhöhung des Holzproduktespeichers sowie den gewählten Substitutionsfaktoren und wird deshalb nicht verglichen. Ferner stehen in der Treibhausgasberichterstattung keine Daten zur Substitution zur Verfügung, da sich die Substitution in verminderten Emissionen anderer Sektoren niederschlägt und daher nicht separat gemeldet wird (Kapitel 2).

Für den Vergleich des Modells zur Berechnung der Erhöhung des Waldspeichers werden die Ergebnisse des Klimarechners für das gesamte Bundesgebiet mit der Treibhausgasberichterstattung (Submission 2017) für den Zeitraum zwischen 2002 und 2012 (Zeitraum der BWI 2012) verglichen (UNFCCC, 2017a). Über den genannten Zeitraum wird ein mit den jeweiligen Bezugsflächen gewichteter Mittelwert für die Nettoänderung des Bestandes der lebenden Baumbiomasse (stock change in living biomass) der bleibenden Wälder (forest land remaining forest land) gebildet. Der errechnete Mittelwert von 0,70 t C/ha beschreibt den durchschnittlich jährlichen Vorratsaufbau im Zeitraum 2002 bis 2012 in Wäldern Deutschlands in Tonnen Kohlenstoff lebender unter- und oberirdischer Baumbiomasse je Hektar. Da im Klimarechner ausschließlich das Derbholz des Hauptbestandes

betrachtet wird, muss der errechnete Mittelwert mittels Abschlagsfaktoren angepasst werden. Als Umrechnungsfaktoren werden 86,4% für den Anteil der oberirdischen Biomasse an der Gesamtbiomasse (UBA, 2017), 66,7% für den Anteil des Derbholzes an der oberirdischen Baumbiomasse (Pretzsch, 2009) und 96,6% für den Anteil des Hauptbestandes am Gesamtbestand unterstellt (Thünen-Institut, 2018a). Die durchschnittliche, jährliche Netto-Kohlenstoffeinbindung, ausgedrückt durch den Vorratsaufbau, von Derbholz im stehenden Rohholz beträgt demnach 0,39 t C je Hektar bzw. ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten 1,44 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten je Hektar. Im Vergleich dazu schätzt die Auswertung des Klimarechners für Deutschland die jährliche Klimaschutzleistung durch Erhöhung des Waldspeichers auf 1,36 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten je Hektar, d. h. einen um rund 6% niedrigeren Wert. Die unterschiedlichen Werte für die Klimaschutzleistung liegen im Unschärfbereich des Klimarechners.

Da in der Treibhausgasberichterstattung ab dem Jahr 2016 auch über die CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. Einbindungen durch Holzprodukte berichtet wird und die Daten für die vorherigen Jahre rückwirkend bestimmt worden sind, wird im Folgenden das Holznutzungsmodell analog zum Waldmodell validiert. Als Referenz werden die berichteten Werte (UNFCCC, 2017b) für die Verwendungsbereiche „HWP produced and consumed domestically“ und „HWP produced and exported“ verwendet, wobei HWP für „harvested wood products“ steht. Relevant für den Vergleich mit dem Klimarechner sind die beiden Produktkategorien, die zu einer Erhöhung des hier definierten Holzproduktespeichers führen können, Schnittholz und Holzwerkstoffe. Die Produktkategorie Papier und Pappe (Paper and Paperboard) wird aufgrund der geringen Lebensdauer der enthaltenen Produkte entsprechend der Konzeption des Klimarechners nicht in die Bilanzierung des Holzproduktespeichers aufgenommen.



**Abbildung 5**  
 Nettoerhöhung des Holzproduktespeichers für Schnittholz und Holzwerkstoffe nach NIR (linke Achse) sowie Verhältnis Abfluss/Zufluss des Holzproduktespeichers nach NIR und der physischen Input-Output-Tabelle (PIOT) von Bösch et al. (2015) (rechte Achse)

In Abbildung 5 sind die NIR-Meldungen über die Nettoerhöhung des Holzproduktespeichers in einer Zeitreihe dargestellt. Das Säulendiagramm verdeutlicht, dass die jüngeren Werte für die Nettoerhöhung des Holzproduktespeichers deutlich niedriger sind als die der Jahre vor 2008.

Als Maßstab zum Vergleich der Nettoerhöhung des Holzproduktespeichers wird der für das Jahr 2010 in der Treibhausgasberichterstattung angegebene Wert in Höhe von 3,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten herangezogen. Als Referenzjahr wird das Jahr 2010 gewählt, weil auch die dem Klimarechner zugrunde liegende Modellierungsbasis, die physische Input-Output-Tabelle von Bösch et al. (2015), sich auf dieses Jahr bezieht. Es ist zu berücksichtigen, dass in der Vergangenheit liegende Werte der Treibhausgasberichterstattung für den relevanten Produktbereich stark streuen und ab dem Berichtsjahr 2012 zwischen 1,8 und 2,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten liegen, womit sie deutlich niedriger sind als der Referenzwert für das Jahr 2010.

Gegenüber dem in der Treibhausgasberichterstattung für das Jahr 2010 angegebenen Wert schätzt die Auswertung des Klimarechners für die Waldflächen Deutschlands

eine Klimaschutzleistung durch Erhöhung des Holzproduktespeichers von 2,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Sie liegt damit rd. 31 % unter der aus der Referenz abgeleiteten Klimaschutzleistung.

Zwar wird der Holzproduktespeicher unterschätzt, allerdings ist die Abweichung aufgrund der oben beschriebenen starken Abnahme der im Treibhausgasinventar berichteten Nettoerhöhungen des Holzproduktespeichers vertretbar. Zudem ist der Vergleich der Ergebnisse des Klimarechners mit der Treibhausgasberichterstattung nur eingeschränkt möglich. Zum einen arbeitet der Klimarechner mit anderen Eingangsdaten als die Treibhausgasberichterstattung, zum anderen unterscheidet sich aufgrund der unterschiedlichen Fragestellungen, insbesondere die Modellierung der Nettoänderung des Holzproduktespeichers. Beim Klimarechner ergibt sich die Bruttoerhöhung des Holzproduktespeichers aus BWI-Daten über den stofflich genutzten Einschlag in Verbindung mit abgeleiteten Strukturdaten aus der physischen Input-Output-Tabelle von Bösch et al. (2015). Für die Treibhausgasberichterstattung wird hingegen auf amtliche Produktionsdaten aus der FAO-Statistik zurückgegriffen (UBA,

**Tabelle 4**  
 Vergleich der mit dem Klimarechners berechneten Ergebnisse für die Waldflächen Deutschlands mit den Ergebnissen der Treibhausgasberichterstattung (UBA, 2017)

|                                      |                               | Klimarechner | Treibhausgasberichterstattung | Abweichungen |
|--------------------------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------|--------------|
| Nettoerhöhung Waldspeicher je Hektar | [t CO <sub>2</sub> -Äq./ha]   | 1,36         | 1,44                          | -6 %         |
| Nettoerhöhung Holzproduktespeicher   | [Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq.] | 2,40         | 3,50                          | -31 %        |

2017). Diese bilden jedoch das tatsächliche Produktionsniveau nicht vollständig ab (Jochem et al., 2015). In der dem Klimarechner zugrundeliegenden physischen Input-Output-Tabelle sind dagegen qualifizierte Schätzungen unternommen worden, um diese Lücken zu schließen. Ferner wird im Klimarechner aus konzeptionellen Gründen keine explizite Modellierung der tatsächlichen Größe des Holzproduktespeichers vorgenommen. Für die Nettoveränderung des Holzproduktespeichers wird ein funktionaler Zusammenhang mit der Bruttoerhöhung unterstellt. Für die Treibhausgasberichterstattung hingegen wird die quantitative Struktur des Holzproduktespeichers explizit ermittelt und daraus die Abgangsmenge mithilfe von Zerfallsfunktionen entsprechend den IPCC Bilanzierungsrichtlinien berechnet. Die Parameter dieser Zerfallsfunktionen werden allerdings aus Defaultwerten des IPCC abgeleitet und sind für Deutschland nicht speziell kalibriert.

Es kann zusammengefasst werden, dass der Vergleich mit der Treibhausgasberichterstattung zwar Unterschiede aufweist, die allerdings nicht gegen die Verwendung des vorgestellten Modells sprechen. Die Abweichung der Änderungsrate des Waldspeichers ist lediglich marginal und auch die Abweichung der Änderung des Holzproduktespeichers ist vor dem Hintergrund der zeitlichen Entwicklung der Werte in der Treibhausgasberichterstattung zu vernachlässigen.

### 4.3 Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden die Schlüsselparameter des Klimarechners auf ihre Empfindlichkeit geprüft. Entscheidende Parameter sind der tatsächlich stofflich verwendete Anteil am Einschlag, der Anteil der Produkte mit mittlerer und langer Lebensdauer im Bereich der Säge-, Holzwerkstoff-, Papier- und Verpackungsindustrie, der Anteil der Holzprodukte, um den der Holzproduktespeicher jährlich steigt und die Substitutionsfaktoren. Um den Einfluss der Parameter auf die abgeschätzte Klimaschutzleistung zu quantifizieren, werden mithilfe des „Forstbetriebes Deutschland“ verschiedene Szenarien berechnet. Dazu wird der Parameter jeweils um 10 % verringert bzw. um 10 % erhöht.

Die Auswirkungen auf die Klimaschutzleistung durch Änderung der Parameter im Vergleich zu den im Klimarechner verwendeten Modellparametern sind in Tabelle 5 dargestellt. Dabei wird zwischen der jährlichen Klimaschutzleistung des Waldspeichers, des Holzproduktespeichers und aus Substitution sowie dem daraus ermittelten Gesamtergebnis unterschieden. Die Analyse zeigt die linearen Zusammenhänge und die Punktsymmetrie der Ergebnisse. Vor dem Hintergrund der Punktsymmetrie beschränken sich die folgenden Ausführungen auf die Auswirkungen durch Reduktion der Parameter um 10 %. Bei einer Erhöhung des Parameters um denselben Faktor ist ein umgekehrter Effekt zu erwarten.

Eine Reduktion des stofflich verwendeten Anteils am Laubholz-Einschlag wirkt sich auf den Holzproduktespeicher und die Substitution aus. Der Waldspeicher bleibt unberührt. Wie in Tabelle 5 dargestellt, verringert eine Reduktion des Parameters um 10 % die Nettoerhöhung des Holzproduktespeichers um 1,3 % und die Substitution um 0,6 %. Insgesamt

reduziert sich das Gesamtergebnis aufgrund der Änderung des Parameters um 0,5 %.

Eine Abnahme des stofflich verwendeten Anteils am Nadelholz-Einschlag wirkt sich ebenfalls auf den Holzproduktespeicher und die Substitution aus. Eine Verringerung des Parameters um 10 % bewirkt eine Reduktion der Nettoerhöhung des Holzproduktespeichers um 8,7 % und eine Abnahme der Substitutionseffekte um 4,1 %. Der veränderte Parameter führt zu einer Abnahme der Klimaschutzleistung insgesamt um 3,5 %. Hierbei sei angemerkt, dass eine Erhöhung des stofflich verwendeten Anteils am Nadelholz-Einschlag nicht möglich ist, da der im Klimarechner verwendete Modellparameter und damit der stofflich verwendete Anteil am Nadelholz-Einschlag bereits bei knapp 100 % liegt (s. Sättigungsparameter A\* in Tabelle 2).

Eine Abnahme der Produkte mit mittlerer und langer Lebensdauer im Bereich der Säge-, Holzwerkstoff-, Papier- und Verpackungsindustrie wirkt sich direkt auf den Holzproduktespeicher sowie auf die Substitution aus. Die Reduktion des Parameters um 10 % wirkt sich mit einer Abnahme der Brutto- bzw. Nettoerhöhung des Holzproduktespeichers um 10 % direkt aus. Gleichzeitig verringert sich die Substitution um 3,5 %. Insgesamt bewirkt die Reduktion des Parameters eine Abnahme des Gesamtergebnisses um 3,1 %.

Ein reduzierter Bestand an Holzprodukten, um den der Holzproduktespeicher jährlich wächst, wirkt sich ebenfalls direkt auf den Holzproduktespeicher und die Substitution aus. Eine Reduktion bewirkt erwartungsgemäß eine Abnahme der Nettoerhöhung um 10 %. Gleichzeitig erhöht sich die Substitution um 0,2 %. Insgesamt verursacht die Änderung eine Reduktion des Gesamtergebnisses um 0,1 %.

Eine Reduktion der Substitutionsfaktoren wirkt sich ausschließlich auf die Klimaschutzleistung durch Substitutionseffekte aus. Eine Reduktion des energetischen Substitutionsfaktors um 10 % führt zu einer Reduktion der Substitution um 5,1 %. Bei der Klimaschutzleistung insgesamt bewirkt dies eine Abnahme um 4,1 %. Eine Reduktion des stofflichen Substitutionsfaktors um 10 % führt zu einer Abnahme der Substitution um 4,9 %. Für das Gesamtergebnis ergibt sich eine Reduktion von 4 %.

Insgesamt weisen diese Ergebnisse auf eine hohe Modellstabilität hin. Die Änderung jeweils eines Parameters hat nur unterproportionale Auswirkungen auf das Gesamtergebnis.

## 5 Diskussion

Bedingt durch die Datengrundlage und das konzeptionell eher vorsichtige Vorgehen wird bei der Kalkulation der Klimaschutzleistung durch den Klimarechner nur ein Teil der von dem IPCC (2006) für Wald ausgewiesenen Kohlenstoffspeicher berücksichtigt. Die Forsteinrichtung umfasst üblicherweise die wirtschaftlich relevanten Informationen über die Waldbestände, sprich das Derbholz mit Rinde. Dies ist allerdings nur ein Teil der oberirdischen Baumbiomasse. Weitere Kompartimente der lebenden oberirdischen Baumbiomasse sind Äste (1 bis 7 cm) und Reisig. Für die Umrechnung von Derbholz zur oberirdischen Baumbiomasse empfiehlt Pretzsch (2009)

Tabelle 5

Auswirkungen verschiedener Schlüsselparameter auf die Klimaschutzleistung getrennt nach den Bereichen Waldspeicher, Holzproduktespeicher und Substitution sowie für das Gesamtergebnis im Vergleich zu den verwendeten Modellparametern. Im Rahmen von verschiedenen Szenarien werden die Schlüsselparameter um 10% verringert bzw. erhöht

| Änderung des Parameters  | Auswirkung auf die Klimaschutzleistung |   |              | Gesamt |
|--|--|---|--------------|--------|
|  | Nettoerhöhung des Waldspeichers        | Nettoerhöhung des Holzproduktespeichers | Substitution |        |
| <b>Stofflich verwendeter Anteil am Laubholz-Einschlag</b>  |  |   |              |        |
| -10%   | 0%                                     | -1,3%                                   | -0,6%        | -0,5%  |
| +10%   | 0%                                     | 1,3%                                    | 0,6%         | 0,5%   |
| <b>Stofflich verwendeter Anteil am Nadelholz-Einschlag</b>   |  |   |              |        |
| -10%   | 0%                                     | -8,7%                                   | -4,1%        | -3,5%  |
| +10%   | -                                      | -                                       | -            | -      |
| <b>Anteil der Holzprodukte, um den der Holzproduktespeicher jährlich steigt</b>  |  |   |              |        |
| -10%   | 0%                                     | -10%                                    | 0,2%         | -0,1%  |
| +10%   | 0%                                     | 10%                                     | -0,2%        | 0,1%   |
| <b>Anteil der Produkte mit mittlerer und langer Lebensdauer im Bereich der Säge-, Holzwerkstoff-, Papier- und Verpackungsindustrie</b> |  |   |              |        |
| -10%   | 0%                                     | -10%                                    | -3,5%        | -3,1%  |
| +10%   | 0%                                     | 10%                                     | 3,5%         | 3,1%   |
| <b>Energetische Substitution</b>   |  |   |              |        |
| -10%   | 0%                                     | 0%                                      | -5,1%        | -4,1%  |
| +10%   | 0%                                     | 0%                                      | 5,1%         | 4,1%   |
| <b>Stoffliche Substitution</b>   |  |   |              |        |
| -10%   | 0%                                     | 0%                                      | -4,9%        | -4,0%  |
| +10%   | 0%                                     | 0%                                      | 4,9%         | 4,0%   |

einen Umrechnungsfaktor von 1,5, was folglich bedeutet, dass das Derbholz an der oberirdischen Baumbiomasse einen Anteil von 66,7% einnimmt. In den von Pretzsch (2009) betrachteten Studien zeigt sich auch eine Abhängigkeit von Baumart und Alter. Eine genauere Abschätzung wäre über die Einbeziehung von Biomasseschätzfunktionen in das Modell möglich gewesen. Die Entscheidung, das Modell so einfach wie möglich zu halten, sprach allerdings dagegen. Nach den von Rumpf et al. (2011) und Husmann et al. (2018) erstellten Biomasseschätzfunktionen für die Hauptbaumarten im nordwestdeutschen Raum variiert der Anteil des Derbholzes an der oberirdischen Baumbiomasse abhängig von der Baumart und dem BHD zwischen etwa 65% und 90%. Dabei ist der Rindenanteil nahezu unabhängig von der Baumdimension, der Derbholzanteil steigt dagegen überproportional mit dem BHD. Das Gros des Kohlenstoffs ist demnach im Derbholz gespeichert, das gleichzeitig das wichtigste Kompartiment für die Holzverwertung darstellt und somit für die Menge des im Holzproduktespeicher gebundenen Kohlenstoffs entscheidend ist.

Auch die Wurzeln als unterirdische Komponente der Baumbiomasse werden nicht in die Berechnungen des Waldspeichers einbezogen. Für den Wald in Deutschland wurde im Rahmen der Treibhausgasberichterstattung ein Anteil von 14% der unterirdischen Baumbiomasse an der gesamten lebenden Biomasse berechnet (UBA, 2017).

Der zweite nach IPCC (2006) ausgewiesene Kohlenstoffspeicher Totholz bleibt bei der Kalkulation der forstbetrieblichen Klimaschutzleistung mit dem Klimarechner ebenfalls

unberücksichtigt. Im Zuge der Bestandesinventuren der Forsteinrichtung wird Totholz nicht quantifiziert, weswegen üblicherweise für die Forstbetriebe keine Bilanzierung der Totholzmenge vorliegt. Nach den Daten der dritten Bundeswaldinventur werden in Deutschland insgesamt 73,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente (20 Mio. t C) im Totholz gespeichert (BMEL, 2016), was einem Anteil von 1,7% an der ober- und unterirdischen Baumbiomasse entspricht. Im gesamten Bundesgebiet liegt die durchschnittliche Totholzmenge bei 14,6 m<sup>3</sup> je Hektar (liegendes und stehendes Totholz) (Thünen-Institut, 2018a). Je nach Waldzustand und Bewirtschaftungskonzept ist jedoch mit einer erheblichen Schwankung der Totholzmenge in einzelnen Betrieben zu rechnen. Allerdings ist zu erwarten, dass die für die Klimaschutzleistung entscheidende Änderungsrate für den betrachteten Zeitraum von 10 Jahren gering ist. Auf den Holzproduktespeicher und die Substitutionseffekte hat das Totholz keinen Einfluss.

Die Speicher Boden und Streu binden hingegen einen großen Anteil des im Wald gespeicherten Kohlenstoffs (Wördehoff, 2016). Nach dem Thünen-Institut (2018a) werden insgesamt 33% des im Wald gespeicherten Kohlenstoffs in den oberen 30 cm des Mineralbodens gespeichert und 9% in der Streu. Allerdings wird in der Regel davon ausgegangen, dass der Speicher über die Jahre konstant bleibt (Liski et al., 2005; Pistorius et al., 2006; Loft und Lux, 2010; Wördehoff, 2016), da auch extreme waldbauliche Maßnahmen auf lange Sicht den Bodenspeicher kaum verändern, wobei die Humusaufgabe im Bestandesleben starken Schwankungen unterliegen kann. Wellbrock et al. (2016) untersuchten die Veränderung

der organischen Kohlenstoffvorräte zwischen 1990 und 2006 in Deutschland. Die berechneten Änderungsraten lagen im Auflagehumus und im Mineralboden bis 90 cm bei jährlich 2,57 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente (0,75 t C) je Hektar, wobei der gesamte Kohlenstoffvorrat im Boden vor allem von den Standortbedingungen sowie von langfristig wirksamen Steuergrößen, insbesondere klimatischen Veränderungen, abhängig ist. In anderen Untersuchungen wurden Auswirkungen von Veränderungen in der Zusammensetzung der Bestockung (Baumartenwahl) auf den Bodenkohlenstoffvorrat festgestellt (Ladegaard-Pedersen et al., 2005; Prietzel und Bachmann, 2012). Für den im Klimarechner betrachteten Zeitraum einer Forsteinrichtungsperiode sind daher die Möglichkeiten der Steuerung des Bodenkohlenstoffspeichers im Zuge normaler Waldbewirtschaftung als vergleichsweise gering anzusehen, was die modellinterne Annahme der Konstanz des Bodenspeichers rechtfertigt.

Auch der bisher noch nicht erwähnte Speicher Bodenvegetation soll an dieser Stelle genannt werden. Auch er wird in Anlehnung an Wördehoff (2016) als konstant angenommen. Da keine Datengrundlage vorliegt, der Anteil im Vergleich zur oberirdischen Baumbiomasse marginal ist und auch die Lebensspanne der Pflanzen gering ist, wird der Speicher daher vernachlässigt.

Es lässt sich zusammenfassen, dass das dem Klimarechner hinterlegte Modell den Waldspeicher aufgrund der ausschließlichen Betrachtung des im Hauptbestand befindlichen Derbholzes unterschätzt. Der Holzproduktespeicher und die damit einhergehenden Substitutionseffekte sind davon allerdings nicht beeinflusst, da sich diese ausschließlich auf das Derbholz beziehen. Ferner bekräftigen die vorangegangenen Ausführungen die Beschränkung der Betrachtung auf die oberirdische Baumbiomasse, da die Kohlenstoffspeicher Totholz, Streu und Boden als im Betrachtungszeitraum von 10 Jahren konstant angenommen werden können.

Die Anreicherung von Totholz und damit verbunden die Verringerung der Nutzung ist ein gesellschaftlich häufig diskutiertes Thema. Um neben den nachhaltig bewirtschaftenden Forstbetrieben auch Auswirkungen anderer Zielsetzungen mit dem Klimarechner abbilden zu können, ist es angedacht, im Rahmen des Projektes „Gläserner Forstbetrieb“ den Klimarechner um ein Totholzmodell zu erweitern.

### **Interpretation der wichtigsten Ergebnisse**

Die Klimaschutzleistung der Wälder resultiert aus dem Vorrat des aufstockenden Bestandes sowie dem jährlichen Zuwachs (Kapitel 3.1 und Kapitel 4.1). Anhand der vom „Forstbetrieb Deutschland“ (Tabelle 3) abgeleiteten Ergebnisse für die gesamten Waldflächen Deutschlands (analoges Vorgehen wie beim Vergleich mit der Treibhausgasberichterstattung, Multiplikation mit dem Faktor 1.000) ergeben die Abschätzungen des Klimarechners einen Speicher von 2,9 Mrd. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente allein im aufstockenden Bestand (Derbholz). Dazu werden jährlich 87,9 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente aus der Atmosphäre gebunden.

Zur Berechnung der Klimaschutzleistung der Forstwirtschaft ist im Konzept des Klimarechners, wie auch in der

Klimaschutzberichterstattung, nicht der Zustand, sondern die Änderung von Bestandsgrößen entscheidend. Ist bei der forstlichen Nutzung der Zuwachs höher als der Holzeinschlag, so liegt eine Erhöhung des Waldspeichers (Senkenleistung) vor. Insgesamt umfasst die Nettoerhöhung des Waldspeichers nach den Abschätzungen des Klimarechners für die deutschen Waldflächen 14,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr im betrachteten Zeitraum 2002 bis 2012.

Entscheidend für die Klimaschutzleistung von Forstbetrieben ist die Art der Holzverwendung. Insbesondere durch eine stoffliche Holzverwendung wird Kohlenstoff langfristig gebunden und es werden fossile Rohstoffe und energieintensiv herzustellende Materialien substituiert und die Freisetzung zusätzlichen Kohlenstoffdioxids vermieden (BMU, 2018). Bei der Kalkulation der Klimaschutzleistung des Holzproduktespeichers ist allerdings nicht die Nettoerhöhung, sondern die Bruttoerhöhung ausschlaggebend. Für Deutschland liegt sie auf der Basis der hier zugrunde gelegten Modellannahmen bei ca. 17,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Jahr. Zwar wird die Höhe des Holzproduktespeichers im Modell des Klimarechners nicht quantifiziert, jedoch wird der Altholzabfluss berechnet, sodass die Betrachtung bei der Bruttoerhöhung nicht endet. Somit ersetzt ein Anteil der Bruttoerhöhung den Altholzabfluss und der Rest geht mit 14% in die tatsächliche Erhöhung des Holzproduktespeichers ein (Nettoerhöhung). Für das gesamte Holz aus der Waldfläche Deutschlands sind das nach den Abschätzungen des Klimarechners 2,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Wichtiger als die Klimaschutzleistung durch die Erhöhung des Holzproduktespeichers selbst ist allerdings die daraus entstehende Substitution. Sie nimmt den größten Anteil der Klimaschutzleistung durch die Forstwirtschaft und die nachgelagerte Holzverwendung ein und ist ein zusätzlicher Effekt, der unumkehrbar ist. Das bedeutet, dass im Gegensatz zum Waldspeicher und dem Holzproduktespeicher, wo CO<sub>2</sub>-Äquivalente auf lange Sicht wieder freigesetzt werden, bei der Substitution Emissionen vermieden und somit die Substitutionseffekte über die Jahre aufaddiert werden.

Bezüglich des Waldspeichers wird im Klimaschutzbericht 2017 des BMU, dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2018), eine Abnahme der Senkenleistung der deutschen Waldflächen projiziert, was durch die Nutzung der in den Nachkriegsjahren großflächig wiederaufgeforsteten Flächen bedingt ist, die ihre Nutzungsreife erreichen. Selbst wenn Forstbetriebe den Holzvorrat nicht weiter aufbauen oder gar durch Vorratsabbau eine Absenkung des Waldspeichers bewirken, erbringen sie trotzdem eine Klimaschutzleistung aufgrund der mit der Holznutzung verbundenen Ausdehnung des Holzproduktespeichers und der durch Holznutzung resultierenden Substitutionseffekte. Es ist davon auszugehen, dass sich bei Nicht-Nutzung langfristig zwischen Zuwachs und Mortalität ein Gleichgewicht entwickelt, weswegen es keinen zusätzlichen Klimaschutzeffekt gibt. Weitere Konsequenzen sind der Abbau des Holzproduktespeichers und der Wegfall der Substitutionseffekte, die einen großen Anteil an der jährlichen Klimaschutzleistung einnehmen.

### Waldverjüngung und Klimaschutzleistung

Der Klimarechner bildet die Klimaschutzleistung durch die Bewirtschaftung der aktuell vorhandenen Bestockung und die nachgelagerte Holzverwendung ab. Nicht abgebildet ist die Waldverjüngung und damit eine wesentliche Komponente in der langfristigen Waldentwicklung. Zwar sind die Holzvorräte und Zuwächse (Thünen-Institut, 2018a) und damit die kurzfristig erzielbaren Senken- und Speicherleistungen junger Bäume vergleichsweise gering. Die künftige langfristige Klimaschutzleistung wird aber durch die im Zuge der Waldverjüngung etablierten Bestände bestimmt. Der Veränderung der Baumartenzusammensetzung wird das langfristig quantitativ größte Minderungspotenzial in der Forst- und Holzwirtschaft beigemessen (Weingarten et al., 2016). Damit kommt der Baumartenwahl im Rahmen der Waldverjüngung bereits heute eine entscheidende Bedeutung zu. Das Klimaschutzpotenzial einer Baumart wird wesentlich bestimmt durch die Wuchsleistung auf gegebenem Standort. Durch einen höheren Massezuwachs an Biomasse können eine stärkere Erhöhung des Waldspeichers und des Holzproduktespeichers sowie größere Substitutionseffekte erzielt werden. Das Ausmaß des Holzproduktespeichers und der Substitutionseffekte sind zudem abhängig von einer möglichst langfristigen Verwendbarkeit der Holzprodukte sowie der Holzdichte und damit von den Holzeigenschaften einer Baumart. Hinsichtlich des Klimaschutzpotenzials unter Berücksichtigung der Substitutionseffekte wurden deutliche Unterschiede zwischen den Baumarten festgestellt. In der Regel werden auf gegebenem Standort höhere Klimaschutzbeiträge durch den Anbau von produktiven und stabilen Nadelbäumen erreicht (Wördehoff, 2016; Wördehoff et al., 2017a; Schulz et al., 2017). Um die langfristigen Klimaschutzleistungen noch junger Bäume abzubilden, wären langfristige Simulationen notwendig geworden. Dies hätte aber dem Konzept widersprochen, mithilfe des Klimarechners die für die vorhandene Baumarten- und Altersklassenverteilung gegebene aktuelle Klimaschutzleistung abzuschätzen.

### Datengrundlage Forsteinrichtung – Ertragstafeln

Nicht nur die Bezugsgröße des in der Forsteinrichtung üblichen Derbholzes, sondern auch die Generierung der Daten der Forsteinrichtung beeinflusst das Ergebnis des Klimarechners. Im Falle von Bestandesinventuren auf Grundlage von Waldbegängen basieren die Holzzuwächse und die damit verbundenen Nutzungspotenziale in der Regel auf Ertragstafelschätzungen. Die den Ertragstafeln zugrundeliegenden Bestände sind jedoch unter anderen klimatischen Voraussetzungen und Waldbaustrategien erwachsen als heutige Bestände. Unter heutigen Wachstumsbedingungen und Durchforstungskonzepten wurden Steigerungen des Einzelbaumwachstums beobachtet (Utschig et al., 2006), was dazu führt, dass auch die Bestandesmittelwerte der zu betrachtenden Bestände erheblich von den Ertragstafeln abweichen können. Neben einer Steigerung der Bonitäten treten auch höhere Volumenzuwächse bei gegebener Bonität (Anhebung des speziellen Ertragsniveaus) auf (Staupendahl und Schmidt, 2016). Zudem können Mischbestandskonstellationen zusätzliche Volumenzuwächse bewirken, die durch die Ertragstafeln

nicht abgebildet werden (Pretzsch, 2010; Sprauer und Nagel, 2014; Pretzsch, 2016). Verschiedene Durchforstungs- und Nutzungskonzepte führen in der Praxis zu unterschiedlich ausgeprägten Bestandesstrukturen, die Ertragstafeln basieren jedoch auf starren Durchforstungsregimen, wodurch komplexe Bestandesstrukturen nicht angemessen abgebildet werden können (Hansen und Nagel, 2014).

Sowohl veränderte Wuchsbedingungen, als auch Durchforstungs- und Mischbestandseffekte führen demnach strukturell bei den in der Forsteinrichtung üblichen Ertragstafelschätzungen zur Unterschätzung der tatsächlichen Zuwächse und Nutzungspotenziale. Da die Klimaschutzleistung maßgeblich von den Zuwächsen und Nutzungspotenzialen abhängt, resultiert aus der Verwendung der Ertragstafeln auch eine Unterschätzung der Klimaschutzleistung.

Zudem schränkt die Wahl der Forsteinrichtung als Datengrundlage die Ergebnisse in ihrer Gültigkeit auf den Planungszeitraum der Forsteinrichtung von 10 Jahren ein. Bei einem Aufbaubetrieb würde die jährliche Änderungsrate auf lange Sicht überschätzt und bei einem Abbaubetrieb unterschätzt.

### Weitere Modellgrundlagen

Die Verteilung der Nutzung auf die Verwendungsbereiche stofflich bzw. nicht-stofflich ist abhängig von der Baumart und dem mittleren BHD. Letztgenannter Wert ist in Forstbetrieben üblicherweise nicht vorhanden, weswegen dem Klimarechner Durchschnittswerte aus den Daten der BWI 2012 hinterlegt worden sind. Allerdings handelt es sich auch hierbei um den mittleren BHD des aufstockenden Bestandes und nicht des ausscheidenden Bestandes. Je nach Durchforstungsart wird folglich der mittlere BHD unter- bzw. überschätzt. In Abbildung 3 ist zu erkennen, dass die Effekte auf die Sortierung mit zunehmendem BHD abnehmen. Der für die Klimaschutzleistung maßgebliche Anteil der stofflichen Verwendung steigt in den höheren Altersklassen nur noch marginal.

Die Modellierung des Klimarechners basiert auf etablierten Modellen, Erkenntnissen aktueller Studien und pauschal für das deutsche Bundesgebiet abgeleiteten Faktoren. Neben den üblichen Werten für die Umrechnung in CO<sub>2</sub>-Äquivalente (Raumdichte, Kohlenstoffgehalt und das Molverhältnis von Kohlenstoff zu Kohlenstoffdioxid) und die Substitutionsfaktoren, wurden zur Entwicklung der Holzverwendungs- und Substitutionsmodelle Verhältnisse aus der Einschlagsstatistik Deutschlands sowie des Holzaufkommens und der Holzverwendung genutzt. Auch wenn hierdurch betriebsspezifisches Handeln ausgeblendet wird, schafft die dadurch verursachte „Normierung“ doch Vorteile bezüglich der Vergleichbarkeit und auch der Interpretation der Ergebnisse.

## 6 Schlussfolgerungen

Ziel der Entwicklung des Klimarechners ist die Bereitstellung eines robusten, leicht nachvollziehbaren Tools zur Berechnung der Klimaschutzleistung auf Forstbetriebsebene. Der Klimarechner schließt unmittelbar an die mittelfristige forstbetriebliche Planung, die Forsteinrichtung an. Diese unter

Berücksichtigung der Nachhaltigkeit entwickelte Betriebsplanung ist üblicherweise in Forstbetrieben über 50 Hektar verfügbar, weswegen eine zeit- und kostenintensive Datenbeschaffung bzw. -aufbereitung vermieden wird.

Aufbauend auf den Forsteinrichtungsdaten wird betriebsspezifisch die jährliche Klimaschutzleistung des Forstbetriebes unter Berücksichtigung der nachgelagerten Holzverwendung für den 10 Jahre umfassenden Planungszeitraum abgeschätzt. Da das Modell nur den Kohlenstoffspeicher des Derbholzes und damit nicht das Reisholz und auch nicht die unterirdische Baumbiomasse, Totholz, Streu und Boden abbildet, entfällt zwar ein großer Anteil des im Wald gebundenen Kohlenstoffs, allerdings ist die für die Klimaschutzleistung entscheidende jährliche Änderungsrate in den zuletzt genannten Kompartimenten in der Regel sehr gering und kann deshalb für den zehnjährigen Betrachtungszeitraum vernachlässigt werden.

Die erstellten Modelle wurden anhand aktueller Studien hergeleitet. Die Faktoren ergaben sich aus durchschnittlichen Werten und Verhältnissen für Deutschland, wobei durchgehend vorsichtige Schätzungen gewählt wurden. Die Modellierung wurde mithilfe von BWI 2012-Daten summarisch mit den Ergebnissen der Treibhausgasberichterstattung validiert und Abweichungen geklärt. Die Ergebnisse bilden den hohen Stellenwert von Wäldern für den Klimaschutz ab und verdeutlichen die hohe Bedeutung der nachhaltigen Bewirtschaftung für die Aufrechterhaltung des Waldspeichers, die hohe Klimaschutzleistung durch langlebige Produkte und Substitutionseffekte sowie durch den hohen Zuwachs von Nadelholz.

Der Klimarechner bietet Waldbesitzerinnen und Waldbesitzern die Möglichkeit, die Bedeutung der Bewirtschaftung ihrer Wälder bzw. Forstbetriebe für den Klimaschutz zu quantifizieren, Kohlenstoffsinken und -quellen zu lokalisieren sowie ihre Leistungen mithilfe der berechneten Kennzahlen gegenüber Kunden und der Gesellschaft zu kommunizieren. Insofern wird diesem Konzept eine große praktische Bedeutung zugemessen. Es ermöglicht die üblicherweise in forstlichen Volumeneinheiten ausgedrückten Planzahlen in gesellschaftlich relevante CO<sub>2</sub>-Äquivalente zu überführen und damit die forstbetriebliche Klimaschutzleistung zu quantifizieren. Forstbetriebe werden gegenüber der Öffentlichkeit in einem wichtigen gesellschaftlichen Feld „kommunikationsfähig“. Als eine unmittelbare Grundlage für eine gesellschaftspolitisch durchaus wünschenswerte Entlohnung der forstbetrieblichen Klimaschutzleistung ist der Klimarechner allerdings nicht gedacht.

## Danksagung/Acknowledgement

Die Initiative zur Entwicklung des Klimarechners ging vom betriebswirtschaftlichen Ausschuss (AfB) des Deutschen Forstwirtschaftsrates (DFWR) aus. Die Entwicklung und Umsetzung des Konzeptes wurde maßgeblich durch das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt „Gläserner Forstbetrieb“ (Förderkennzeichen 01LC1603B) unterstützt. Darüber hinaus wurde die

einzelbetriebliche Erprobung durch das Waldklimafonds-Projekt „CO-2-OPT“ unterstützt, welches aus Mitteln des Waldklimafonds durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und das Bundesministerium für Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) gefördert wurde. Projektträger ist die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). Die Autoren danken für die Unterstützung. Des Weiteren geht ein Dank an Herrn Dr. Kai Husmann, der sich an der statistischen Datenanalyse beteiligt hat sowie an den DFWR, der das Kalkulationstool über seine Homepage in die forstliche Praxis verbreitet. Schließlich möchten wir uns bei den anonymen GutachterInnen für die konstruktiv kritischen Verbesserungsvorschläge bedanken.

## Literaturverzeichnis

- BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2016) Der Wald in Deutschland : ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Berlin : BMEL, 52 p
- BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2017) Holzmarktbericht 2016 : Abschlussergebnisse für die Forst- und Holzwirtschaft des Wirtschaftsjahres 2016. Bonn : BMEL, 37 p
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2018) Klimaschutzbericht 2017 : Zum Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung [online]. Zu finden in <[https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutzbericht\\_2017\\_aktionsprogramm\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutzbericht_2017_aktionsprogramm_bf.pdf)> [zitiert am 16.01.2019]
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016) Klimaschutzplan 2050 : klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin : Publikationsversand Bundesreg, 91 p
- Borys A, Lasch P, Suckow F, Reyer C (2013) Kohlenstoffspeicherung in Buchenbeständen in Abhängigkeit von Waldpflege und Klimawandel. *Allg Forst Jagdztg* 184(1/2):26–36
- Bösch M, Elsasser P, Rock J, Rüter S, Weimar H, Dieter M (2017) Costs and carbon sequestration potential of alternative forest management measures in Germany. *For Pol Econ* (78):88–97
- Bösch M, Jochem D, Weimar H, Dieter M (2015) Physical input-output accounting of the wood and paper flow in Germany. *Resources Conserv Recycl* (94):99–109
- Böswald K (1996) Zur Bedeutung des Waldes und der Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt : eine Analyse am Beispiel des Bundeslandes Bayern. München : Frank, 147 p, Forstl Forschungsber München 159
- Böswald K, Wierling R (1997) Wald und Forstwirtschaft Niedersachsens im Kohlenstoffhaushalt. *SchR Aus dem Walde* 50:247–333
- Burschel P, Kürsten E, Larson BC (1993) Die Rolle von Wald und Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt : eine Betrachtung für die Bundesrepublik Deutschland. München : Frank, 135 p, Forstl Forschungsber München 126
- Dieter M, Elsasser P (2002) Carbon stocks and carbon stock changes in the tree biomass of Germany's forests. *Forstwiss Centralbl* 121(4):195–210
- DFWR/DHWR – Deutscher Forstwirtschaftsrat/Deutscher Holzwirtschaftsrat e.V. (2015) Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland (RVR) [online]. Zu finden in <[http://www.rvr-deutschland.de/docs/dynamisch/8302/rvr\\_gesamtdokument\\_2.aufgabe\\_stand\\_oktober\\_2015.pdf](http://www.rvr-deutschland.de/docs/dynamisch/8302/rvr_gesamtdokument_2.aufgabe_stand_oktober_2015.pdf)> [zitiert am 15.11.2018]
- EEA – Europäische Umweltagentur (2017) EEA greenhouse gas - data viewer. Zu finden in <<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer/>> [zitiert am 13.11.2018]
- Fischer C, Schönfelder E (2016) A modified growth function with interpretable parameters applied to the age-height relationship of individual trees. *Can J For Res* 47(2):166–173
- Fürstenau C, Badeck FW, Lasch P, Lexer MJ, Lindner M, Mohr P, Suckow F (2007) Multiple-use forest management in consideration of climate change and the interests of stakeholder groups. *Eur J Forest Res* 126(2):225–239

- Hansen J, Nagel J (2014) Waldwachstumskundliche Softwaresysteme auf Basis von TreeGrOSS : Anwendungen und theoretischen Grundlagen. Göttingen : Univ-Verl, 224 p, Beitr Nordwestdtischen Forstl Versuchsanst 11
- HessenForst (2004) Technische Richtlinie Forsteinrichtung 2004 für die Forsteinrichtung in Hessen gemäß der Hessischen Anweisung für Forsteinrichtungsarbeiten. Gießen : HessenForst, 122 p
- HMI – Holzmarktinfo (2016) Forst und Holz 2016. Bonn, 161 p
- Höllerl S, Bork J (2013) Die Kohlenstoffspeicherung von bewirtschafteten und unbewirtschafteten Fichtenbeständen unter Berücksichtigung von Ausfallrisiken – Aussagen nicht nur über Bestände der montanen Zone. Forstarchiv 84(2):52–64
- Höllerl S, Neuner M (2011) Kohlenstoffbilanz des Wald- und Holzsektors bewirtschafteter und unbewirtschafteter Bergmischwälder der Bayerischen Alpen. Forstarchiv 82(4):142–154
- Husmann K, Rumpf S, Nagel J (2018) Biomass functions and nutrient contents of European beech, oak, sycamore maple and ash and their meaning for the biomass supply chain. J Cleaner Prod 172:4044–4056
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2006) Guidelines for national greenhouse gas inventories : vol 4: Agriculture, forestry and other land use [online]. Zu finden in <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>> [zitiert am 15.11.2018]
- Jochem D, Janzen N, Weimar H (2016) Estimation of own and cross price elasticities of demand for wood-based products and associated substitutes in the German construction sector. J Cleaner Prod 137:1216–1227
- Jochem D, Weimar H, Bösch M, Mantau U, Dieter M (2015) Estimation of wood removals and fellings in Germany : a calculation approach based on the amount of used roundwood. Eur J Forest Res 134(5):869–888
- Klein D, Schulz C (2012) Die Kohlenstoffbilanz der Bayerischen Forst- und Holzwirtschaft. Freising : LWF, 178 p
- Knauf M (2015) A multi-tiered approach for assessing the forestry and wood products industries' impact on the carbon balance. Carbon Balance Manag 10(4):1–11
- Knauf M, Frühwald A, Köhl M (2013) Wald und Klimaschutz in NRW : Beitrag des NRW Clusters ForstHolz zum Klimaschutz ; Langfassung der Studie. Münster : Landesbetrieb Wald und Holz NRW, 198 p
- Knauf M, Mues V, Frühwald A, Schnellbächer HJ, Holtkämper V, Krienmeier U, Köhl M (2017) Klimaschutzleistung der Forst- und Holzwirtschaft lokal bewerten. AFZ Wald(14):19–22
- Knauf M, Mues V, Frühwald A, Schnellbächer HJ, Strimbu V, Köhl M, Holtkämper V, Krienmeier U (2016) Analyse der Klimaschutzleistung von Forstbetrieben : Waldklimafondsprojekt >>Beklifuh<< entwickelt Softwaretool zur lokalen Bewertung. Holz-Zentralblatt(47):1160–1162
- Knigge W, Schulz H (1966) Grundriss der Forstbenutzung : Entstehung, Eigenschaften, Verwertung und Verwendung des Holzes und anderer Forstprodukte. Hamburg : Parey, 584 p
- Köhl M, Hildebrandt R, Olschofky K, Köhler R, Rötzer T, Mette T, Pretzsch H, Köthke M, Dieter M, Abiy M, Makeschin F, Kenter B (2010) Combating the effects of climatic change on forests by mitigation strategies. Carbon Balance Manag 5(8):1–9
- Ladegaard-Pedersen P, Elberling B, Vesterdal L (2005) Soil carbon stocks, mineralization rates, and CO<sub>2</sub> effluxes under 10 tree species on contrasting soil types. Can J For Res 35(6):1277–1284
- Landesforsten Rheinland-Pfalz (2009) Technische Erläuterungen zum Verfahren der mittelfristigen Forst- Betriebsplanung (VV-Forst-Betriebsplanung). Zentrale der Forstverwaltung Koblenz: Landesforsten Rheinland-Pfalz, 140 p
- Liski J, Palosuo T, Peltoniemi M, Sievänen R (2005) Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. Ecol Model 189(1-2):168–182
- Loft L, Lux A (2010) Ecosystem services : eine Einführung [online]. Zu finden in <[https://www.researchgate.net/publication/257932350\\_Ecosystem\\_Services\\_-\\_Eine\\_Einfuehrung](https://www.researchgate.net/publication/257932350_Ecosystem_Services_-_Eine_Einfuehrung)> [zitiert am 05.12. 2018]
- Mues V, Knauf M, Köhl M, Frühwald A (2017) Bewertung der Klimaschutzleistung der Forst- und Holzwirtschaft auf lokaler Ebene (BEKLIFUH) : Schlussbericht und Dokumentation. Bielefeld : Knauf Consulting, 73 p
- Mund M, Frischbier N, Profft I, Raacke J, Richter F, Ammer C (2015) Klimaschutzwirkung des Wald- und Holzsektors : Schutz- und Nutzungsszenarien für drei Modellregionen in Thüringen. Bonn-Bad Godesberg : BfN, 168 p
- Mund M, Kummert E, Hein M, Bauer GA, Schulze E-D (2002) Growth and carbon stocks of a spruce forest chronosequence in central Europe. For Ecol Manage 171(3):275–296
- Mund M, Schulze E (2006) Impacts of forest management on the carbon budget of European beech (*Fagus sylvatica*) forests. Allg Forst Jagdztg 177(3):47–63
- Neumann M, Moreno A, Mues V, Härkönen S, Mura M, Bouriaud O, Lang M, Achten WMJ, Thivolle-Cazat A, Bronisz K (2016) Comparison of carbon estimation methods for European forests. For Ecol Manage 361:397–420
- Niedersächsische Landesforsten (2012) Forsteinrichtung in den Niedersächsischen Landesforsten. Wolfenbüttel : Niedersächsische Landesforsten, 46 p
- Oehmichen K, Demant B, Dunger K, Grüneberg E, Henning P, Kroiher F, Neubauer M, Polley H, Riedel T, Rock J, Schwitzgiebel F, Stümer W, Wellbrock N, Ziche D, Bolte A (2011) Inventurstudie 2008 und Treibhausgasinventar Wald. Braunschweig : vTI, 164 p, Landbauforsch SH 343
- Offer A, Staupendahl K (2009) SCHWERPUNKT-Neue Bestandessortentafeln für die Waldbewertung und ihr Einsatz in der Bewertungspraxis. Forst Holz 64(5):16–25
- Offer A, Staupendahl K (2018) Holzwerbungskosten- und Bestandessortentafeln. Kassel : HessenForst
- Pistorius T, Zell J (2005) Die Dynamik der Kohlenstoffvorräte in Baden-Württemberg zwischen 1987 und 2002 : Veränderungen in der Waldbiomasse und Modellierung der Holzproduktspeicher. Allg Forst Jagdztg 176(6/7):111–119
- Pistorius T, Zell J, Hartebrodt C (2006) Untersuchungen zur Rolle des Waldes und der Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt des Landes Baden-Württemberg. Freiburg : Forstl Versuchs Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 210 p, Ber Freiburger Forstl Forsch 73
- Pretzsch H (2009) Forest dynamics, growth and yield : from measurement to model. Berlin : Springer, 664 p
- Pretzsch H (2010) Gesetzmäßigkeiten der Kronenformentwicklung und Wuchsräumbesetzung : Querschnittsanalyse auf der Basis langfristiger Versuchsfelder. Jahrestagung DVFFA-Sektion Ertragskunde 2010:96–108
- Pretzsch H (2016) Ertragstafel-Korrekturfaktoren für Umwelt- und Mischungseffekte. AFZ Wald (14):47–50
- Prietzl J, Bachmann S (2012) Changes in soil organic C and N stocks after forest transformation from Norway spruce and Scots pine into Douglas fir, Douglas fir/spruce, or European beech stands at different sites in Southern Germany. For Ecol Manage 269:134–148
- Profft I, Mund M, Weber G-E, Weller E, Schulze E-D (2009) Forest management and carbon sequestration in wood products. Eur J For Res 128(4):399–413
- Richards FJ (1959) A flexible growth function for empirical use. J Exp Bot 10(2):290–301
- Rumpf S, Nagel J, Schmidt M (2011) Biomasseschätzfunktionen von Fichte (*Picea abies* [L.] Karst), Kiefer (*Pinus sylvestris* [L.] Karst), Buche (*Fagus sylvatica* [L.] Karst), Eiche (*Quercus robur* und *Petraea* [L.] Karst) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [L.] Karst) für Nordwestdeutschland : Möglichkeiten und Grenzen der Vollbaumnutzung ; Ergebnisbericht. Hann Münden : Nordwestdtische Forstl Versuchsanst
- Rüter S (2011) Welchen Beitrag leisten Holzprodukte zur CO<sub>2</sub>-Bilanz? AFZ Wald 66(15):15–18
- Rüter S, Rock J, Köthke M, Dieter M (2011) Wie viel Holznutzung ist gut fürs Klima? Die CO<sub>2</sub>-Bilanzen unterschiedlicher Nutzungsszenarien 2013 - 2020. AFZ Wald 66(15):19–21
- Rüter S, Stümer W, Dunger K (2017) Treibhausgasbilanzierung der WEHAM-Szenarien. AFZ Wald 72(13):30–31
- Rüter S, Werner F, Forsell N, Prins C, Vial E, Levett A-L (2016) ClimWood2030 : climate benefits of material substitution by forest biomass and harvested wood products ; perspective 2030 ; final report. Braunschweig : Johann Heinrich von Thünen-Inst 142 p, Thünen Rep 42
- Sathre R, O'Connor J (2010a) Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. Environ Sci Pol 13(2):104–114
- Sathre R, O'Connor J (2010b) A synthesis of research on wood products and greenhouse gas impacts. Vancouver : FPInnovation, Technical Report TR-19R
- Schnellbächer HJ (2017) Simulation mit dem BEKLIFUH-Softwaretool erstellen. AFZ Wald 72(14):27–29
- Schulz C, Wördehoff R, Nagel J, Spellmann H (2017) Teilergebnisse aus dem Waldklimafonds-Projekt CO-2-OPT. AFZ Wald (21):26–29
- Schweine J, Köthke M, Englert H, Dieter M (2018) Simulation of forest-based carbon balances for Germany : a contribution to the 'carbon debt' debate. WIREs Energy Environ 7(1):1–15

- Sprauer S, Nagel J (2014) Produktivitätsvergleich von Rein- und Mischbeständen von Fichte und Buche mit dem Wachstumssimulationspaket TreeGrOss. Jahrestagung DVFFA-Sektion Ertragskunde 2014
- Staupendahl K, Schmidt M (2016) Kalibrierung der Ertragstafeln für die Hauptbaumarten in Hessen mithilfe der Daten der Bundeswaldinventur. *Allg Forst Jagdztg* 187(9/10):197–216
- StBA – Statistisches Bundesamt (2015) Forstwirtschaftliche Bodennutzung : Holzeinschlagsstatistik [online]. Zu finden in <[https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/WaldundHolz/Holzeinschlag2030331157004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/WaldundHolz/Holzeinschlag2030331157004.pdf?__blob=publicationFile)> [zitiert am 15.11.2018]
- Thünen-Institut (2018a) Dritte Bundeswaldinventur : Ergebnisdatenbank [online]. Zu finden in <<https://bwi.info>> [zitiert am 14.11.2018]
- Thünen-Institut (2018b) Dritte Bundeswaldinventur : Ergebnisdatenbank: Auftragskürzel: 77Z1JI\_L235of\_2012\_bi, Archivierungsdatum: 2014-6-10 16:7:59.927, Überschrift: Waldfläche (gemäß Standflächenanteil) [ha] nach Baumartengruppe und Baumaltersklasse, Filter: Jahr=2012, zu finden in <<https://bwi.info>> [zitiert am 14.11.2018]
- Thünen-Institut (2018c) Dritte Bundeswaldinventur : Ergebnisdatenbank: Auftragskürzel: 77Z1JI\_L634of\_2012\_bi, Archivierungsdatum: 2014-6-5 9:19:26.603, Überschrift: Vorrat [1000 m<sup>3</sup>] nach Baumartengruppe und Baumaltersklasse, Filter: Jahr=2012, zu finden in <<https://bwi.info>> [zitiert am 14.11.2018]
- Thünen-Institut (2018d) Dritte Bundeswaldinventur : Ergebnisdatenbank: Auftragskürzel: 77Z1PA\_L459mf\_0212\_biHb, Archivierungsdatum: 2014-8-19 3:25:35.630, Überschrift: Vorrat des ausgeschiedenen Bestandes [1000 m<sup>3</sup>/a] nach Baumartengruppe und Baumaltersklasse zur Periode Mitte, Filter: Abgangsart=Nutzung; Periode=2002-2012, zu finden in <<https://bwi.info>> [zitiert am 14.11.2018]
- Thünen-Institut (2018e) Dritte Bundeswaldinventur : Ergebnisdatenbank: Auftragskürzel: 77Z1PA\_L459mf\_0212\_biHb, Archivierungsdatum: 2014-8-19 3:25:35.630, Überschrift: Vorrat des ausgeschiedenen Bestandes [1000 m<sup>3</sup>/a] nach Baumartengruppe und Baumaltersklasse zur Periode Mitte, Filter: Periode=2002-2012, zu finden in <<https://bwi.info>> [zitiert am 14.11.2018]
- Thünen-Institut (2018f) Dritte Bundeswaldinventur : Ergebnisdatenbank: Auftragskürzel: 77Z1PB\_L458mf\_0212\_biHb, Archivierungsdatum: 2014-12-22 20:2:36.107, Überschrift: Zuwachs des Vorrates [1000 m<sup>3</sup>/a] nach Baumartengruppe und Baumaltersklasse zur Periode Mitte, Filter: Periode=2002-2012, zu finden in <<https://bwi.info>> [zitiert am 14.11.2018]
- Thünen-Institut (2018g) Holzeinschlag und Rohholzverwendung : Zahlen & Fakten [online]. Zu finden in <<https://www.thuenen.de/de/wf/zahlen-fakten/produktion-und-verwendung/holzeinschlag-und-rohholzverwendung/>> [zitiert am 15.12.2018]
- UBA – Umweltbundesamt (2016) Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 – 2014 : Arbeitsstand: 25.11.2015 [online]. Zu finden in <[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/nationale\\_trendtabellen\\_fuer\\_die\\_deutsche\\_berichterstattung\\_atmosphaerischer\\_emissionen\\_1990-2014.xlsx](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/nationale_trendtabellen_fuer_die_deutsche_berichterstattung_atmosphaerischer_emissionen_1990-2014.xlsx)> [zitiert am 15.11.2018]
- UBA – Umweltbundesamt (2017) Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017 : nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2015. Dessau : UBA, 1090 p
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2017a) Table 4 : a sectoral background data for land use, land-use change and forestry : forest land [online]. Zu finden in <<https://unfccc.int/process/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories/submissions-of-annual-greenhouse-gas-inventories-for-2017>> [zitiert am 15.11.2018]
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2017b) Table 4 : Gs1 sectoral background data for land use, land-use change and forestry : harvested wood products (HWP) [online]. Zu finden in <<https://unfccc.int/process/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories/submissions-of-annual-greenhouse-gas-inventories-for-2017>> [zitiert am 15.11.2018]
- Utschig H, Herling H, Pretzsch H (2006) Veränderte Umweltbedingungen schaffen 13 Prozent mehr Wachstum : Wuchsdynamik auf Versuchsfleichen weicht erheblich von den Ertragstafelwerten ab. *LWF aktuell* (52):44–46
- Weingarten P, Bauhus J, Arens-Azevedo U, Balmann A, Biesalski HK, Birner R, Bitter AW, Bokelmann W, Bolte A, Bösch M (2016) Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung. Berlin : BMEL, 479 p, Ber Landwirtschaft SH 222
- Wellbrock N, Grüneberg E, Stümer W, Rüter S, Ziche D, Dunger K, Bolte A (2014) Wälder in Deutschland speichern Kohlenstoff. *AFZ Wald*(18):38–39
- Wellbrock N, Bolte A, Flessa H (2016) Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland : Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. Braunschweig : Johann Heinrich von Thünen-Inst, 495 p, Thünen-Rep 43
- Wirth C, Schulze ED, Schwalbe G, Tomczyk S, Weber G, Weller E, Böttcher H, Schumacher J, Vetter J (2004) Dynamik der Kohlenstoffvorräte in den Wäldern Thüringens : Abschlussbericht zur 1. Phase des BMBF-Projektes „Modelluntersuchung zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls“. Gotha : Thüringer Landesanst Wald Jagd Fischerei, 308 p, Mitt Thür Landesanst Wald Jagd Fischerei 23
- Wördehoff R (2016) Kohlenstoffspeicherung als Teilziel der strategischen Waldbauplanung : erläutert an Reinbeständen verschiedener Baumarten in Niedersachsen. Göttingen : Univ, 191 p
- Wördehoff R, Fischer C, Spellmann H (2017a) II. Cluster- und Kohlenstoffstudie : Forst und Holz Niedersachsen. Göttingen : Universitätsverl, 39 p
- Wördehoff R, Fischer C, Spellmann H (2017b) II. Cluster- und Kohlenstoffstudie Forst und Holz Sachsen-Anhalt [online]. Zu finden in <[https://www.nw-fva.de/fileadmin/user\\_upload/Verwaltung/Publikationen/2017/Woerdehoff\\_et\\_al\\_2017\\_Cluster-\\_u\\_Kohlenstoffstudie\\_ST\\_NW-FVA.pdf](https://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Verwaltung/Publikationen/2017/Woerdehoff_et_al_2017_Cluster-_u_Kohlenstoffstudie_ST_NW-FVA.pdf)> [zitiert am 15.11.2018]
- Wördehoff R, Fischer C, Spellmann H (2017c) II. Cluster- und Kohlenstoffstudie Forst und Holz Schleswig-Holstein [online]. Zu finden in <[https://www.nw-fva.de/fileadmin/user\\_upload/Verwaltung/Publikationen/2017/Woerdehoff\\_et\\_al\\_2017\\_Cluster-\\_u\\_Kohlenstoffstudie\\_S-H\\_NW-FVA.pdf](https://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Verwaltung/Publikationen/2017/Woerdehoff_et_al_2017_Cluster-_u_Kohlenstoffstudie_S-H_NW-FVA.pdf)> [zitiert am 15.11.2018]
- Wördehoff R, Spellmann H, Evers J, Nagel J (2011) Kohlenstoffstudie Forst und Holz Niedersachsen [online]. Zu finden in <[https://www.nw-fva.de/fileadmin/user\\_upload/Verwaltung/Publikationen/2011/NWFVA6\\_kohlenstoffstudie\\_Fr.pdf](https://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Verwaltung/Publikationen/2011/NWFVA6_kohlenstoffstudie_Fr.pdf)> [zitiert am 15.11.2018]