

Analyse europäischer Monitoringsysteme für eine zeitgerechte Abbildung der Klimaschutzfunktion des Waldes in Deutschland für die nationale THG-Berichterstattung¹

1 Hintergrund

In Deutschland werden für die Erfassung von Emissionen und Kohlenstofffestlegungen in der lebenden Biomasse und im Totholz der Quellgruppe Wald vor allem Daten aus periodischen Waldinventuren genutzt. Diese finden in der Regel alle fünf bis zehn Jahre statt und liefern recht genaue Daten zum Vorrat an lebender und toter Biomasse im Wald. Durch den Vergleich zweier Inventuren lassen sich Rückschlüsse auf die Nettoänderung der Vorräte und damit der Nettoemissionen bzw. Einbindungen ableiten. Hinzugezogen werden aus Erntestatistiken Informationen zur Höhe der Holzentnahme aus dem Wald. Allerdings stellt mit diesem Ansatz die zeitgerechte Abbildung von jährlich aufgetretenen Änderungen eine Herausforderung dar. So wird mit der Zwischeninventur im Jahr 2017 (Kohlenstoffinventur, CI-2017) im üblichen 5-Jahres-Turnus Daten im Wald erhoben. Die vierte Bundeswaldinventur (BWI-4) endete im Jahr 2022. Ausgewertete Ergebnisse liegen seit 2024 vor und fließen in das THG-Inventar im Jahr 2025 ein (siehe vorläufige Ergebnisse von Januar 2025). Für die THG-Inventuren von 2019 bis 2024 wurden die Ergebnisse der CI-2017 unter Berücksichtigung der jährlichen Holzentnahme fortgeschrieben. Danach stellte die lebende Biomasse in den Jahren 2018 bis 2022 eine **Kohlenstoffsenke** in der Größenordnung von jährlich -32 Mio. t CO₂-Äq. dar (Umweltbundesamt 2024b).

Allerdings traten in Deutschland in den Jahren 2018-2020 starke Dürreereignisse und nachfolgende Schädigungen durch Käfer auf. So war das Wachstum vor allem bei Fichten reduziert und die Mortalität stark erhöht. Wie die Auswertung der BWI-4 nun zeigt, war die lebende Biomasse im Wald in den Jahren 2018 bis 2022 eine **Quelle** von ca. +32 Mio. t CO₂-Äq. (Umweltbundesamt 2025). Die Änderung ca. 64 Mio. t CO₂-Äq. wird nun rückwirkend mit einer Zeitverzögerung von 5 bis 7 Jahren vollzogen. Dieses Beispiel zeigt eindrücklich, dass die im THG-Inventar verwendete Fortschreibungsmethode nicht in der Lage ist, verlässliche THG-Bilanzen für die lebende Biomasse im Wald für die Jahre nach der letzten Waldinventur auszuweisen.

Auf dem LULUCF-Expert*innentreffen² im Mai 2024 am Joint Research Center der EU-Kommission, diskutierten Vertreter:innen der Mitgliedsländer verschiedene Aspekte im Zusammenhang mit der zeitgerechten und richtungssicheren Abbildung von Emissionen und Einbindungen von Kohlenstoff in Wäldern in der THG-Berichterstattung.

Zeitnahe und genaue Daten sind für politische Entscheidungsträger:innen wichtig. Damit im Zusammenhang steht auch die Darstellung der Auswirkungen von umgesetzten Klimaschutzmaßnahmen. Allerdings muss bei der Bereitstellung zeitgerechterer Daten auch die Datenqualität im Blick bleiben. Die Workshopeteilnehmenden kamen zu dem Schluss, dass es keine universelle Lösung gibt.

¹ Adhoc-Papier im Rahmen des Vorhabens „Szenarien für den Natürlichen Klimaschutz / LULUCF-Sektor“ - FKZ: 3723 NK 901 0

² Die Präsentationen des Workshops sind auf der [Website des Joint Research Centers der EU-Kommission](#) verfügbar.

Das Problem der verzögerten Darstellung wird von den Ländern mit verschiedenen Methoden der Annualisierung bereits angegangen. Eine Kombination von Methoden, die zusätzliche Daten zu den Informationen aus Waldinventuren bereitstellen, wurde als vielversprechend angesehen. Hilfsdaten wie Erntestatistiken und Fernerkundung können eine wichtige Rolle bei der Berechnung jährlicher Änderungen der lebenden Biomasse im Wald spielen. Die Annualisierung von Emissionen aus anderen Kohlenstoffpools wie Totholz und Böden stellt aufgrund von hoher räumlicher Heterogenität und aufwändiger Erfassungsmethoden eine besondere Herausforderung dar.

Deutschland nutzt für eine Annualisierung der THG-Bilanz der lebenden Biomasse im Wald bisher vor allem Holzerntestatistiken. Die Ereignisse der Jahre 2018 bis 2022 zeigen aber, dass eine Abschätzung der jährlichen Emissionen durch Nutzung für eine verlässliche Annualisierung nicht ausreicht (s.o.). In diesem Kurzpapier werden Methoden aus ausgesuchten Ländern vorgestellt und die Möglichkeit der Übertragung von Methoden auf Deutschland diskutiert.

2 Methodenübersicht für die THG-Berichterstattung in der Landnutzungskategorie Wald

2.1 Anforderungen der IPCC-Methoden

Pflanzenbiomasse stellt in Waldökosystemen einen bedeutenden Kohlenstoffbestand dar. Durch Photosynthese wird Kohlenstoff aus der Luft in holzigen und nicht-holzigen Pflanzenteilen eingelagert. Biomasse, in nicht holzigen Pflanzenteilen ist relativ kurzlebig. Deshalb fokussieren sich Methoden der THG-Berichterstattung vor allem auf die Feststellung von Bestandsänderungen in der holzigen Biomasse, die sich allerdings aufgrund von Bewirtschaftung und Ernte, natürlichen Störungen und Absterbeprozesse durchaus schnell ändern kann.

Für die Schätzung der Veränderungen des Kohlenstoffbestands in der Biomasse stehen laut der Richtlinien des IPCC (2006) zwei Methoden zur Verfügung. Bei der Gewinn-Verlust- bzw. **Gain-Loss-Methode** wird der Kohlenstoffverlust der Biomasse in einem Jahr vom Kohlenstoffgewinn der Biomasse im gleichen Jahr abgezogen. Diese Methode kann von Ländern angewandt werden, die nicht über nationale Waldinventursysteme verfügen.

Die Bestandsdifferenz- bzw. **Stock-Difference-Methode** erfordert die Erfassung des Biomassebestands auf Waldflächen zu zwei Zeitpunkten. Die jährliche Veränderung der Biomasse ist die Differenz zwischen dem Biomassebestand zum Zeitpunkt t2 und zum Zeitpunkt t1, geteilt durch die Anzahl der Jahre zwischen den beiden Inventuren. Oft wird durch Waldinventuren Durchmesser und Höhe der Bäume erhoben und mittels Faktoren in Holzvolumen, Biomasse und Kohlenstoffeinheiten umgerechnet.

Beide Methoden können auf unterschiedlichen Komplexitätsstufen (sogenannten Tier Levels) angewendet werden. **Tier 1** ist vor allem für Gain-Loss-Berechnungen von Relevanz. Hierbei werden Standardwerte für Zuwachs und Verlust von Biomasse eingesetzt, zusammen mit Daten über die Waldfläche, die aus nationalen Statistiken stammen.

Tier 2 beschreibt die Verwendung von länderspezifischen Faktoren, z. B. abgeleitet aus experimentellen Daten und nationalen Inventurinformationen, die nach verschiedenen Waldtypen, Klimazonen, Bewirtschaftungssystemen und Regionen gegliedert sind. Auf dieser Komplexitätsstufe existieren sowohl Gain-Loss- als auch Stock-Difference-Methoden.

Der **Tier 3**-Ansatz lässt eine Vielzahl von Methoden zu, darunter auch prozessbasierte Modelle mit denen sehr detaillierte Gain-Loss-Bestimmungen möglich sind. Modelle verbessern in der Regel die Genauigkeit der Schätzungen, sind jedoch stark von der Qualität der Dateneingabe abhängig. Wird die Stock-Difference-Methode angewendet, können auch detaillierte nationale Waldinventurdaten und die Verwendung landesspezifischer Faktoren diesem Komplexitätslevel entsprechen.

Georeferenzierte Daten aus Fernerkundungsquellen müssen nicht notwendigerweise für das Tier 3-Niveau verwendet werden. Diese spielen vor allem eine Rolle bei der konsistenten Darstellung von Flächen und Flächenänderungen in THG-Inventaren.

Bezüglich der **zeitlichen Auflösung** müssen die angewendeten Methoden **jährliche** Abschätzungen von Kohlenstoffvorratsänderungen ergeben. Waldinventuren liefern allerdings in der Regel Angaben über den Waldbestand und den Nettozuwachs für die von der Inventur abgedeckten Periode. Die Richtlinien erfordern deshalb, dass mit zusätzlichen jährlichen Daten zu Holzentnahmen und Störungen (z.B. aus Statistiken) und Zuwachs und Mortalität (z.B. aus Modellen, die die Walddynamik simulieren können) interpolierte oder extrapolierte jährliche

Werte geschätzt werden, um die Inventurdaten auf das betreffende Jahr zu aktualisieren (IPCC 2006, Seite 4.14).

2.2 Nutzung von Modellen

Waldwachstumsmodelle werden von einer Reihe von EU-Mitgliedsstaaten für die THG-Berichterstattung angewendet. Unterschieden werden können generell **prozessbasierte Modelle**, die biophysikalische Zusammenhänge abbilden (z.B. Biome-BGC, 4C) und **empirische Modelle**, die auf der Basis statistischer Daten die Entwicklung des Waldes simulieren (z.B. FABio-Forest, WEHAM, CBM-CFS). Die meisten in der THG-Berichterstattung zur Anwendung kommenden Modelle sind empirisch.

Modelle können den Einfluss von Bewirtschaftungspraktiken mit einer **dynamischen Darstellung** von Klimabedingungen, jährlichen Biomasseumsätzen und anderen Umweltbedingungen berücksichtigen. Der Vorteil ihres Einsatzes ist die Möglichkeit, jährliche Daten zu erzeugen. Waldinventuren werden in der Regel in Abständen von zehn Jahren durchgeführt und benötigen oft mehr als ein Jahr für ihre Durchführung. Sie erfassen keine Veränderungen während des Zeitraums der Probenahme und es kann sogar schwierig sein den genauen Zeitpunkt zu erfassen für den die Werte gelten. Prozess-basierte wie auch empirische Modelle benötigen wiederum wiederholte Inventuren für Kalibrierung bzw. Parametrisierung der Modellfunktionen und Validierung der Modellergebnisse. Eine höhere Genauigkeit bei Modellen wird nur dann erreicht, wenn diese korrekt kalibriert und angewendet werden und wenn bei der Validierung überprüft wurde, ob die Ergebnisse die gemessenen Parameter korrekt wiedergegeben sind. Mithilfe von Sensitivitätsanalysen können die wichtigsten Parameter für die Kalibrierung ermittelt werden. Die aktualisierten Richtlinien für die THG-Berichterstattung (IPCC 2019) nehmen explizit Bezug auf die Nutzung von Modellen.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass eine Modellschätzung komplexe zeitliche und räumliche Dimensionen integrieren kann. Das kann aber auch ein Hinderungsgrund für ihre Anwendung sein. Denn für diese sind oft detailliertere **Kombinationen von Klima-, Boden-, Topografie- und Managementdaten** erforderlich. Die genauen Anforderungen hängen vom gewählten Waldmodell ab.

Für Deutschland konnte die THG-Bilanz der lebenden Biomasse für die Jahre 2018 bis 2022 mit dem empirischen Waldmodell FABio-Forest richtungssicher abgebildet werden (Hennenberg et al. 2024b; Hennenberg et al. 2024a). Die Parametrisierung der Funktionen für z. B. Zuwachs und Mortalität des distanzunabhängigen Einzelbaummodells basiert auf der BWI-3 (Periode 2002 bis 2012) und die Ergebnisse der Kohlenstoffinventur wurden zur Validierung und Verbesserung der Parametrisierung genutzt. Für die Annualisierung der Modellierung werden die Intensität der Holzentnahme, Daten zur Mortalität aus der Waldzustandserhebung sowie Annahmen zur Zuwachsminderung in Trockenperioden herangezogen (Pfeiffer et al. 2023). In der aktuellen FABio-Forest-Version 2.0 wurden Zusammenhänge für die Zuwachsfunktion aus dem prozessbasierten Waldmodell 4C integriert. Als Treiber für den Zuwachs in FABio-Forest dienen nun die jährlichen Klimaparameter Strahlung, Temperatur und klimatische Wasserbilanz. Die Feinkalibrierung der klimasensitiven Zuwachsfunktion erfolgte anhand der Ergebnisse der BWI-4 (Pfeiffer et al.) und die Ergebnisse der BWI-4 können – inklusive jährlicher Schwankungen – gut reproduziert werden. FABio-Forest ist geeignet, als TIER-3 Ansatz die Ergebnisse der Waldinventuren in Deutschland zu Annualisieren und insbesondere die Informationslücken zwischen der letzten und der ausstehenden Waldinventur richtungssicher zu schließen.

Die Tschechische Republik, Irland, Rumänien, Polen und Slowenien wenden das ursprünglich für den kanadischen Forstsektor entwickelte empirische Carbon Budget Model (CBM-CFS3) an. Das

CBM ist ein ertragsdatengestütztes Modell, das die Kohlenstoffdynamik von ober- und unterirdischer Biomasse, Totholz, Streu und Mineralboden auf Bestands- und Landschaftsebene simuliert (Kurz et al. 2009). Das Modell wird vom Joint Research Center auch für wissenschaftliche Forschung in der EU verwendet (Grassi und Pilli; Pilli et al. 2017). So wurde es z. B. eingesetzt, um das Waldreferenzniveau (FRL) für einige EU-Mitgliedstaaten nachzuvollziehen bzw. sogar anzupassen (Vizzarri et al. 2021).

Das am häufigsten verwendete Modell zur Beschreibung von Änderungen des **Bodenkohlenstoffvorrats** ist Yasso (Liski et al. 2005), das in Österreich, Finnland, Norwegen und mittlerweile auch Deutschland (Ziche et al. 2019) verwendet wird. Das Modell berechnet die organischen Einträge in die Böden und deren Umwandlung in organischen Bodenkohlenstoff, wobei unterschiedliche Verweilzeiten für verschiedene Pools berücksichtigt werden.

Dänemark wendet ein anderes dynamisches Bodenmodell (C-TOOL) mit drei Pools und entsprechenden Verweilzeiten an (Nielsen et al. 2024). Das Modell wurde wie Yasso anhand von Langzeit-Feldexperimenten parametrisiert und validiert.

2.3 Nutzung von Fernerkundung

Die Datenquellen der Fernerkundung lassen sich in zwei verschiedene Arten von Sensoren unterteilen. **Passive Sensoren** messen die eingestrahlte und reflektierte Energie der Sonne. Ihre Anwendung ist daher von der Sonneneinstrahlung abhängig. **Aktive Sensoren** hingegen messen die Stärke der vom Sensor selbst zurückgestreuten Energie. Dies macht diese Sensoren unabhängig von der Sonneneinstrahlung. Sie können in einem breiten Spektrum von Wellenlängen arbeiten, einschließlich Spektren, die nicht von Wetter- und Wolkenbedingungen beeinflusst werden.³

Aktive Sensoren werden in Lidar- und Radar-Technologien unterteilt. **Lidar**, d. h. Light Detection and Ranging, misst die Entfernung zu Objekten, indem es Laserimpulse aussendet, die von den zu messenden Objekten abprallen. Ihre hohe Auflösung ermöglicht detaillierte 2D- oder 3D-Darstellungen der Objekte. Lidar-Sensoren werden auf Satelliten oder an Flugzeugen angebracht. Der GEDI-Sensor ist zum Beispiel auf der Internationalen Raumstation ISS montiert und liefert Messungen mit einer Auflösung von 1 km.

Im Gegensatz dazu erzeugt **Radar**, d. h. Radio Detection and Ranging, Radiowellen zur Entfernungsmessung. Aufgrund der größeren Wellenlänge erzeugen sie gröbere Bilder von den gemessenen Objekten. Die Wellen durchdringen jedoch Wolken und sind daher unabhängig von Tageszeit und Wetterbedingungen. Im Rahmen des Copernicus-Programms der EU vermisst der Satellit Sentinel-1 die Erdoberfläche inklusive Wälder mit einer Auflösung zwischen 9 und 40 Metern. Der ESA-Satellit BIOMASS wird im April 2025 starten und monitort dann mit einem Radarsensor vor allem tropische Wälder mit einer Auflösung zwischen 50 und 200 Metern.

Jüngste Entwicklungen bei unbemannten Flugsystemen, die auch als Drohnen bekannt sind, ermöglichen eine ortsgenauere und häufigere Bewertung bestimmter Waldgebiete. Drohnen können mit verschiedenen Sensoren ausgestattet werden, um mit diesen Daten detaillierte 2D oder 3D-Karten mit einer Auflösung von wenigen Zentimetern zu erstellen. Drohnengetragene Laserscanner (Airborne Laser Scanning, ALS) erstellen zum Beispiel Baumhöhenprofile mit einer Auflösung von 20 cm, können dagegen aber nur kleinere Flächen abdecken.

Gerade aktive Sensoren, wie z. B. Radar, können eingesetzt werden, um mittels Stock-Difference-Methode Biomassevorräte zu unterschiedlichen Zeitpunkten festzustellen. Allerdings werden dafür flankierend auch terrestrische Inventurdaten benötigt, um die Abschätzungen ausreichend

³ Eine Übersicht zu Fernerkundungsdaten und Anwendungsmöglichkeiten im Wald stellt das [Copernicus Netzwerkbüro Wald des Thünen-Instituts](#) zusammen.

genau vornehmen zu können. Ein Vorteil ist, dass die Frequenz der Erfassungen durch aktive Sensoren höher ist als bei rein feldbasierten Waldinventuren. Zudem können Waldflächen komplett erfasst werden (wall-to-wall) und nicht nur in einem Stichprobenraster.

Aber auch für Gain-Loss-Erhebungen lassen sich Fernerkundungsdaten einsetzen. So können durch die Kombination von aus **optischen Satellitendaten** abgeleiteten Indizes und Waldwachstumsmodellen jährliche Zuwächse an Biomasse ermittelt werden. Verluste lassen sich durch die Erfassung von Lücken in Beständen abschätzen. Allerdings müssen auch diese Methoden mit den sehr viel genaueren terrestrischen Inventurdaten kalibriert werden.

3 Bestandsaufnahme und Analyse von Methoden in EU-Ländern und Kanada

3.1 Deutschland

Die Änderungen der Kohlenstoffvorräte der Waldbiomasse in Deutschland werden mit der Stock-Difference-Methode berechnet und dabei ein Tier-2-Ansatz verfolgt (Umweltbundesamt 2024b). Aus dem Vergleich zweier Waldinventuren wird ein Emissionsfaktor als Mittelwert für fünf Jahre ermittelt. Dieser wird auf der Grundlage der jährlich eingeschlagenen Holzmenge kalibriert. Dadurch ändert sich die jährlich festgestellte Menge an Kohlenstoffvorratsänderung.

Waldinventuren einschließlich Kohlenstoffinventuren fanden in Deutschland bundesweit 2002, 2008, 2012, 2017 und 2022 statt. Die Ergebnisse aus der Inventur von 2022, die 2024 veröffentlicht wurden, werden erst im THG-Bericht für 2025 berücksichtigt.

Jährliche Änderungen der berichteten Kohlenstoffvorräte in der Waldbiomasse sind also allein durch Änderungen der Holzeinschlagsmengen begründet. Die Grundlage dafür sind die nationalen Holzeinschlagsstatistiken, die für fünf Hauptholzartengruppen erhoben wird. Die Statistik unterschätzt allerdings die jährliche Holzproduktion um etwa 30 %. Die Statistik berücksichtigt lediglich Holz, das tatsächlich geerntet und der Holzverarbeitung oder -lagerung zugeführt wurde. Sie beinhaltet aber kein Schadholz, das im Wald verbleibt. Ein wichtiger Grund für die Abweichung ist zudem die private Holznutzung, vor allem für Brennholz, die von der Statistik nicht bzw. unzureichend erfasst wird. Die Abweichung zwischen Einschlagstatistik und tatsächlicher Holzernte wird durch einen Vergleich mit Daten zu jährlichen Rohholzmengen verschiedener Verwendungssektoren (z.B. Sägewerke) korrigiert (die sogenannte Einschlagrückrechnung). Die Ergebnisse der Bundeswaldinventur dient dabei der Validierung dieser Rechnung (Jochem et al. 2025).

Die im THG-Bericht für 2024 beschriebene Entwicklung der Holzernte weist vier Zeitpunkte besonders hoher Holzerntemengen aus: 1990, 2000, 2007 und 2018-2022. Die hohen Erntemengen in diesen Jahren traten infolge von Sturm- und Dürreereignissen auf, die sehr große Schäden verursachten. Für diese Zeitpunkte werden aufgrund der hohen Holzerntemengen folglich sehr niedrige Emissionsfaktoren berechnet.

Im Rahmen des von der FNR geförderten und vom Thünen-Institut für Waldökosysteme durchgeführten Projekts „Fernerkundungsbasiertes Nationales Erfassungssystem Waldschäden“ (FNEWs) wurde die Nutzung von Fernerkundungsdaten für ein Monitoring von Waldschäden erprobt (Oehmichen et al.). Das Projekt analysierte dafür Zeitreihen von Sentinel-2-Daten⁴. In einem jährlichen Zyklus wurden so Schadflächen und die wahrscheinlichste Schadursache ausgewiesen (Untersuchungszeitraum 2018 – 2022, Stichtag jeweils 31. August). Die räumliche Auflösung beträgt 10x10m und die Mindestkartiereinheit 0,1 ha bei einer Genauigkeit von ≥ 95 %. Die Kartierungen fanden in vier Untersuchungsgebieten mit hohen Störungen statt, die 22 % der Waldfläche abdecken (Reinosch et al. 2024). In den Schlussfolgerungen des Projekts, das Ende 2023 ausgelaufen ist, wurde empfohlen die Methode auf der gesamten Waldfläche in Deutschland in einer Implementierungsphase umzusetzen. Wie genau die Integration der Methode in die THG-Berichterstattung geplant ist, ist unklar.

Für die Berichterstattung zu Änderungen in Bodenkohlenstoffvorräten im Wald werden in Deutschland für zwei verschiedene Zeiträume zwei unterschiedliche Methoden verwendet. Für den Zeitraum 1990 – 2008 werden Veränderungen der Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte in Mineralböden mit der Stock-Difference-Methode ermittelt. Für den Zeitraum ab 2008 basieren

⁴ Die Sentinel-2-Satelliten werden im Rahmen des europäischen Erdbeobachtungsprogramms Copernicus betrieben.

die Ergebnisse auf dem Modell Yasso (Version 15). Die Aufteilung in zwei Zeiträume ist dadurch bedingt, dass erst nach 2008 genügend Eingabedatensätze zur Verfügung stehen, um das Modell anzuwenden.

3.2 Finnland

Finnland wendet eine Gain-Loss-Methode auf Tier-3-Niveau für die Berechnung jährlicher Änderungen der Kohlenstoffvorräte in Waldbiomasse an (Statistics Finland 2024). In Finnland werden seit 1971 Waldinventuren in Zyklen von etwa vier bis fünf Jahren durchgeführt. Die letzte Inventur deckt den Zeitraum 2019 bis 2022 ab. Die nationale Waldinventur liefert Daten, um Zuwächse an Holzvolumen abzuleiten. Zudem werden für jede Inventur baumartenspezifische Biomasseexpansionsfaktoren entwickelt, um Volumenzuwächse in Biomassezuwächse umzurechnen.

Die jährlichen Biomassevorräte werden zwischen verschiedenen Waldinventuren linear interpoliert. Ab der Mitte der aktuellen Inventur (Jahr 2020) wurden die Werte als konstant extrapoliert. Eine Extrapolation ist erforderlich, da die erfassten Zuwächse nach der vollständigen Inventur im Durchschnitt 2,5 Jahre alt sind (Statistics Finland 2024).

Wie in Deutschland werden hauptsächlich Daten aus Erntestatistiken verwendet, um Biomasseverluste abzubilden, was zu jährlichen Schwankungen der Vorratsänderungen an Waldbiomasse führt.

3.3 Österreich

Wesentliche Grundlage der Schätzung der Veränderungen von Kohlenstoffvorräten im Wald in Österreich sind gemessene Daten des Stammholzzuwachses und des Abgangs durch die nationale Waldinventur mittels Gain-Loss-Methode (Umweltbundesamt 2024a). Diese wurde in den Zeiträumen seit 1961 zunächst in 10-Jahreszyklen durchgeführt, nach 1981 auch in kürzeren Intervallen. Die letzte Erhebung deckt den Zeitraum 2016 bis 2021 ab. Neben den Daten der Waldinventur werden Erntestatistiken verwendet, die jährlich gemeldeten Holzernteaufzeichnungen, und die österreichische Holzbilanz.

Zwischen den Inventuren werden Veränderungen von Kohlenstoffvorräten im Wald interpoliert. Anstatt jedoch von einer linearen Entwicklung zwischen den Inventurperioden auszugehen, werden relative Indizes (d.h. jährliche relative Abweichungen vom Mittelwert) verwendet, um den Abfluss und Zuwachs realistischer zwischen den Jahren zu verteilen. Die relativen Indizes basieren auf nationalen Erntestatistiken und relativen Zuwachsindizes auf der Grundlage von Baumringanalysen. Für den entsprechenden Zeitraum zwischen den Inventuren werden die jährlichen relativen Indizes aus der proportionalen Abweichung der jährlichen Holzeinschlagwerte von ihrem jeweiligen mittleren jährlichen Holzeinschlag für den Zeitraum zwischen den Inventuren berechnet. Der jährliche Durchschnittsabfluss für den Zeitraum zwischen den Inventuren wird daher durch Multiplikation mit dem jährlichen Ernteindex angepasst. In gleicher Weise werden aus repräsentativen österreichischen Jahrringkernsätzen die relativen Indizes zur Verteilung der durchschnittlichen Zuwächse auf die Jahre der Zeitreihe berechnet (Umweltbundesamt 2024a).

Die relativen Indizes für den Zuwachs sind nur bis zum Jahr 2019 verfügbar. Für die Jahre 2020-2022 wurde für jedes Jahr der durchschnittliche jährliche Zuwachs zwischen der Inventur 2007-2009 und der Inventur NFI 2016-21 ohne weitere Anpassung verwendet (Umweltbundesamt 2024a).

3.4 Schweden

Schweden berichtet Änderungen in Kohlenstoffspeichern in Waldbiomasse hauptsächlich nach der Stock-Difference-Methode auf Tier-3-Niveau. Seit 1983 führt das Land nationale Waldinventuren durch (Swedish Environmental Protection Agency 2024).

Die Waldinventur in Schweden verwendet einen fünfjährigen Zyklus. Dabei wurden zu Beginn der Aufnahmen fünf verschiedene Stichproben nach dem Zufallsprinzip auf die Startjahre 1983, 1984, 1985, 1986 bzw. 1987 verteilt. Jede dieser Stichproben besteht aus etwa 6.000 Stichprobenparzellen. Auch wenn jährlich ein Teil der Waldinventurdaten erhoben werden, werden zur Verringerung möglicher Abweichungen alle fünf Stichproben zusammengelegt. Damit liegen vollständige Stichprobensätze immer nur nach einem 5-Jahreszyklus vor. Dieser lag zuletzt 2018 vor. Daher müssen im aktuellen Bericht aus dem Jahr 2024 die Daten für Änderungen der Biomasse für die letzten vier Jahre extrapoliert werden (Swedish Environmental Protection Agency 2024).

Bisher wurde die Extrapolation in Jahren ohne vollständige Inventur mittels Trendfortschreibung der fünf Vorjahre vorgenommen. Schweden plant das empirische Waldwachstumsmodell Heureka einzusetzen, um in den vier Jahren, in denen noch keine volle Inventur vorliegt, das Wachstum der Bäume an den restlichen 80% der in dem Jahr nicht besuchten Stichprobenpunkte fortzuschreiben. Dazu sollen neben den Inventurdaten jährliche Informationen zur Holzernte aus Satellitendaten (Sentinel-2) einbezogen werden.

Experimentiert wird auch mit Anwendung von Maschinenlernprogrammen, die mit historischen Daten zu Zuwachs und Ernte trainiert werden. Zur Anwendung dieser Methoden gibt es bisher noch keine Ergebnisse.

3.5 Kanada

Kanada verwendet eine Tier-3-Methode zur Schätzung der THG-Emissionen aus bewirtschafteten Wäldern auf der Basis eines Gain-Loss-Ansatzes (Environment and Climate Change Canada 2025). Das nationale Monitoring-, Accounting and Reporting-System beinhaltet einen modellbasierten Ansatz (Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector, CBM-CFS3). Dieses Modell integriert Waldinventurdaten und Ertragskurven mit räumlich referenzierten Aktivitätsdaten zur Waldbewirtschaftung und natürlichen Störungen, um Kohlenstoffvorratsänderungen zu schätzen. Der von Kanada verfolgte Ansatz zielt vor allem auf eine getrennte Betrachtung von anthropogenen und natürlichen Faktoren für THG-Emissionen ab (Environment and Climate Change Canada 2025).

Das Modell liefert jährliche Änderungen von Kohlenstoffvorräten in lebender Biomasse, toter organischer Substanz und im mineralischen Boden und in Holzprodukten. Waldbestände werden durch ein Alter, Fläche, Anfangsvorrat und weiteren Parametern charakterisiert und mit empirischen Ertragskurven verknüpft. Diese Daten werden typischerweise von Waldinventuren erhoben, aber nicht im Modell verwendet. Vergleiche der kanadischen Waldinventur zeigten allerdings eine gute Übereinstimmung mit den unabhängig modellierten Werten. Dass keine Waldinventurdaten in die Erfassung der Änderungen von Kohlenstoffvorräten in der Waldbiomasse eingehen, ist eine Besonderheit des kanadischen THG-Inventars (Environment and Climate Change Canada 2025).

4 Vergleich von Methoden und Übertragbarkeit auf Deutschland

4.1 Vergleich von verwendeten Methoden

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über Daten und Methoden, die in nationalen THG-Berichterstattungen für die Annualisierung von Biomasse- und Bodenkohlenstoffvorräten in den fünf betrachteten Ländern eingesetzt werden. Die Nutzung von Waldinventurdaten ist die gängigste Methode der THG-Berichterstattung im Wald, die eine hohe Genauigkeit hat und in vielen Ländern eine lange Zeitreihe abdeckt. Waldinventurdaten bringen aber das Problem mit sich, dass zwischen den Inventurperioden Berichtswerte interpoliert bzw. in den letzten Berichtsjahren extrapoliert werden müssen.

Alle Länder verfügen über **nationale Waldinventuren**, die in vier Ländern auch direkt für die Ermittlung von Änderungen des Kohlenstoffvorrats in der Biomasse verwendet werden. Die Waldinventuren der Länder unterscheiden sich jedoch in ihrer **Frequenz** und der **Periodizität** der Aufnahmen. Während Finnland und Schweden eine sogenannte rollende Inventur durchführen, in der jährlich Teilaufnahmen an permanenten Probepunkten durchgeführt werden, erfassen Deutschland und Österreich bisher ihren Wald periodisch ca. alle fünf Jahre. Die jährliche Erfassung kann theoretisch den Vorteil bedeuten, dass jährlich schwankende klimatische Bedingungen und größer flächige Störungen zeitnaher erfasst werden als in periodischen Inventuren. Allerdings werden Waldinventurdaten in Ländern mit jährlichen Aufnahmen auch über die vollständigen Inventurzyklen gemittelt und Werte zwischen den Inventurmitteljahren interpoliert. Deshalb ist unklar, ob rollende Inventuren tatsächlich die Darstellung jährlicher Kohlenstoffvorratsänderungen erleichtern.

Um die jährlich sich ändernden **Abgänge durch Holzernte** abzubilden, verwenden alle Länder Holzeinschlagsstatistiken. Diese bilden allerdings nur den Abgang durch die Entnahme von Holz ab, nicht die Verluste durch natürliche Mortalität. Einige Länder können ihre Waldinventurdaten nutzen, um auch den Abgang durch natürliche Mortalität abzuschätzen (Finnland und Schweden). Die vorliegenden Methodenbeschreibungen in den nationalen Inventarberichten erlauben jedoch keine genauere Analyse der Methoden. Hier müssten tiefergehende Analysen und ggf. Interviews mit Inventarexpert*innen der Länder erfolgen.

Zuwächse von Biomasse können durch natürliche Störungen, Klimabedingungen aber auch Bewirtschaftungseffekte ebenfalls jährlich stark schwanken. Die Abschätzung jährlicher Zuwächse wird sehr unterschiedlich von den Ländern gelöst. Deutschland verzichtet auf eine jährliche Differenzierung, Schweden und Finnland leiten diese aus den Waldinventurinformation ab. Österreich experimentiert mit der Einbeziehung von Jahrringdaten.

In Kanada können durch den Einsatz eines **Waldwachstums- und Waldbewirtschaftungsmodells** sowohl Zuwächse als auch Abgänge dynamisch simuliert und deshalb auch jährlich abgebildet werden. Kanada ist das einzige Land, das systematisch Modellergebnisse für die lebende Biomasse im Wald bei der THG-Berichterstattung einsetzt, sogar ohne Berücksichtigung von Daten aus der nationalen Waldinventur (Environment and Climate Change Canada 2025).

Simulationsmodelle kommen auch bei der Darstellung von Änderungen der Kohlenstoffvorräte in mineralischen Böden unter Wald in vier von fünf Ländern zum Einsatz. Das Modell Yasso, das auf der Basis von Streumenge und -qualität Kohlenstoffflüsse berechnet, wird in verschiedenen Versionen in Deutschland, Finnland und Österreich eingesetzt. Kanada nutzt das CBM-CFS3 Modell, das auch Bodenkohlenstoff abbildet.

Tabelle 1: Übersicht über Daten und Methoden der nationalen THG-Berichterstattung für jährliche Änderungen von Biomasse- und Bodenkohlenstoffvorräten

Land	Methode und Tier-Level	Nutzung der nationalen Waldinventur	Abschätzung von Zuwächsen (Gains)	Abschätzung von Abgängen (Losses)	Einsatz von Modellen für Biomasse- und/oder Bodenkohlenstoff	Nutzung von Fernerkundungsdaten für die Abschätzung von Änderungen von Biomassekohlenstoff
Deutschland	Stock-Difference, Tier 2	Basis für THG-Inventar, periodisch, alle 5 Jahre	Keine (nur Nettozuwachs nach Waldinventur)	Erntestatistik, Erprobung von Fernerkundungsmethoden für Waldschäden	Bodenkohlenstoff: Yasso15	Nein
Finnland	Gain-Loss, Tier 3	Basis für THG-Inventar, jährlich, 5-Jahreszyklus	Ableitung aus Waldinventur	Waldinventur + Erntestatistik	Bodenkohlenstoff: Yasso07	Nein
Österreich	Gain-Loss, Tier 2	Basis für THG-Inventar, periodisch unregelmäßig	Waldinventur + Jahrringanalysen	Waldinventur + Erntestatistik	Bodenkohlenstoff: Yasso20	Nein
Schweden	Stock-Difference, Tier 3	Basis für THG-Inventar, jährlich, 5-Jahreszyklus	Ableitung aus Waldinventur	Waldinventur + Erntestatistik, Erprobung von Fernerkundungsmethoden	Bisher keine	Nein
Kanada	Gain-Loss, Tier 3	Nicht für THG-Inventar genutzt	Modell	Erntestatistik + Modell (Mortalität)	Biomasse- und Bodenkohlenstoff: CBM-CFS3	Nein

Quelle: Eigene Darstellung; Öko-Institut

Fernerkundungsdaten werden nach Auskunft der aktuellen THG-Berichte von keinem der Länder verwendet, um Biomassevorräte und deren Änderung abzuschätzen. Potenziell bietet die Kombination solcher Daten mit Waldinventurinformationen den Vorteil, dass eine höhere zeitliche Auflösung der Abschätzung von Zuwächsen und Abgängen erreicht werden kann. Allerdings erfordert das eine umfangreiche Kalibrierung. Zudem sind Fernerkundungsmethoden für die Erfassung von Biomasseänderungen zu ungenau im Vergleich zu terrestrischen Inventuren. Das Beispiel des Projekts „Fernerkundungsbasiertes Nationales Erfassungssystem Waldschäden“ (FNEW) des Thünen-Instituts in Deutschland zeigt aber das Potenzial der Integration auf, die zahlreiche Zusatznutzen für das nationale Waldmonitoring, z. B. in Bezug auf die Erfassung von Störungsflächen und Störungsarten, bietet.

4.2 Diskussion der Übertragbarkeit von Methoden auf Deutschland

Der beispielhafte Blick in Datenquellen und Methoden der Länder, die diese für Annualisierung von Biomasse- und Bodenkohlenstoffvorräten in ihrer nationalen THG-Berichterstattung verwenden zeigt, dass sich unterschiedliche Lösungen anbieten. Diese bilden nicht nur die nationale Datenlage, sondern auch den generellen Ansatz der Berichterstattung ab.

4.2.1 Einsatz von Modellen

Aus dem Vergleich der Ländermethoden sticht Kanada mit der **Anwendung des CBM-CFS3 Modells** heraus, das dem Land ermöglicht, detailliert Zuwächse und Abgänge zu berichten. Die Besonderheit des Landes ist, dass Emissionen und Festlegungen von Kohlenstoff im Wald stark durch natürliche Störungen geprägt sind. Das Modell wurde bereits früh eingesetzt, um Bewirtschaftungseffekte und indirekte Wirkungen auf die THG-Bilanz des Waldes zu differenzieren (Kurz et al. 2013; Metsaranta et al. 2010). Dies war im Rahmen des Kyotoprotokolls von Relevanz, da Waldbewirtschaftung zunächst optional angerechnet werden konnte (Artikel 3.4 Kyoto-Protokoll, UNFCCC 1998). Die Anrechnung erfolgte in der zweiten Verpflichtungsperiode durch den Vergleich zu nationalen Referenzniveaus (Forest Management Reference Levels, FMRL) und der Möglichkeit darüber den Einfluss natürlicher Störungen auf das Accountingergebnis zu begrenzen (Böttcher et al. 2008). Hierbei war die Anwendung von Modellen für Länder mit hohem Aufkommen natürlicher Störungen bereits von Vorteil.

Das Modell CBM-CFS3 ist sehr flexibel, zu einem gewissen Grad frei verfügbar und nutzerfreundlich dokumentiert. Es wird in mehreren EU-Ländern für die THG-Berichterstattung im Wald angewendet (Tschechische Republik, Irland, Rumänien, Polen und Slowenien) und auch außerhalb der EU (Südkorea). Es wird zudem durch das Joint Research Center der EU-Kommission (JRC) für alle Länder der EU (mit Ausnahme Zypern) genutzt, also auch für Deutschland. Dafür werden die öffentlich verfügbaren Daten der Bundeswaldinventur verwendet. Allerdings wurden Ergebnisse für einzelne Länder bisher nicht veröffentlicht, so dass die Güte der Modellergebnisse aus dieser Anwendung nicht eingeschätzt werden kann.

Es werden in Deutschland eine Reihe von Modellen betrieben, die sich grundsätzlich für Projektionen der Entwicklung des Waldes, vor allem der für die Senkenfunktion besonders wichtigen lebenden Biomasse, eignen (siehe Tabelle 2). Neben den **empirischen**, d.h. auf statistischen Daten beruhenden Modellen WEHAM und FABio-Forest existieren **prozessbasierte** Modelle, die auf biophysikalischen Zusammenhängen aufbauen. Diese haben den Vorteil, dass Klimaeffekte auf Waldwachstum und Mortalität direkt abgebildet werden. Sie decken dabei komplementär verschiedene Aspekte von Waldökosystemdynamiken ab. Während 4C stärker die Auswirkungen von Management darstellen kann, berücksichtigt LandscapeDNDC den Stickstoffkreislauf und damit auch Emissionen von Lachgas und Methan. FORMIND kann

dagegen Störungen im Wald explizit simulieren. Aufgrund des komplementären Charakters der Modelle, würde es Sinn machen, diese für den Einsatz in der THG-Berichterstattung zu vergleichen, bzw. zu kombinieren.

Tabelle 2: Beispiele für Modelle zur Projektion von jährlichen Änderungen von Kohlenstoffspeicherung im Wald

Modell-name	Modellart	Berücksichtigung von Klimawirkung	Entwickler/ Betreiberorganisation	Quellen
WEHAM	Empirisches, entfernungs-unabhängiges Einzelbaum-Wachstumsmodell	Nein	Thünen-Institut, Forstliche Versuchsanstalt Baden.-Württemberg (FVA BW)	Oehmichen et al.
FABio-Forest	Empirisches, entfernungs-unabhängiges Einzelbaum-Wachstumsmodell	Ja, abgeleitet aus 4C	Öko-Institut	Böttcher et al. 2018; Hennenberg et al. 2024b
4C	Prozessbasiertes, entfernungs-abhängiges Einzelbaum-Wachstumsmodell	Ja, explizit	Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK)	Gutsch et al. 2018; Gutsch et al. 2011
FORMIND	prozessbasiertes, entfernungs-abhängiges Einzelbaum-Wachstumsmodell	Ja, explizit	Umweltforschungszentrum Leipzig, Julius-Kühn-Institut für Waldschutz (JKI)	Gutiérrez et al. 2009; Bohn und Huth 2017
LPJ-GUESS	Prozessbasiertes, dynamisches, globales Vegetationsmodell	Ja, explizit	TU München	Sitch et al. 2003; Gregor et al. 2024
Landscaped NDC	Prozessbasiertes, dynamisches, globales Vegetationsmodell	Ja, explizit	Karlsruhe Institut für Technologie (KIT)	Haas et al. 2013; Cade et al. 2021

Quelle: Eigene Darstellung; Öko-Institut

Waldmodelle können die THG-Berichterstattung im Wald durch die Bereitstellung aktueller Schätzungen von Änderungen der Kohlenstoffspeicher bzw. Emissionen von THG und Festlegungen von Kohlenstoff unterstützen. Dies kann durch die ausschließliche Nutzung von Modellen geschehen, wie im Fall von Kanada. Modelle können aber auch zur Extrapolation vorhandener Waldinventurdaten dienen. Um Unsicherheiten darzustellen und die komplementäre Abbildung verschiedener Prozesse im Wald zu berücksichtigen, bietet sich ein Modellvergleich, bzw. eine Kombination an.

In Deutschland sind eine Reihe von Waldmodellen im Einsatz, die sich für die Fortschreibung von Waldinventurdaten eignen. Deren Testung, Anpassung und Bereitstellung könnte in ca. 2-3 Jahren durch Forschungsprojekte realisiert werden.

4.2.2 Verwendung von Jahrringanalysen und Dendrometrie

Ein innovativer Ansatz ist die **Verwendung von Jahrringanalyse- bzw. Dendrometriedaten** für die Abschätzung jährlicher Zuwächse, wie in Österreich. Während die Jahrringanalyse mit Hilfe von Bohrkernen des Stamms Holzdichte und Breite der Jahrringe analysiert, messen Dendrometer kontinuierlich das Dickenwachstum an lebenden Bäumen. Die Nutzung solcher Daten ist durchaus auch für Deutschland denkbar. Allerdings zeigt das Beispiel Österreich auch die Einschränkungen der Methode aufgrund von Datenverfügbarkeit. Da aktuellere Daten fehlen, kann die Methode zurzeit nur bis zum Berichtsjahr 2019 angewendet werden.

Die Verfügbarkeit von Daten aus Jahrringanalysen für Deutschland wurde hier nicht abschließend geprüft. Generell lassen sich mit Hilfe von Dendrometriedaten oder Jahrringanalysen Abweichungen im Zuwachsverhalten von einzelnen Baumarten von einem Durchschnittswert ermitteln, mit denen Zuwachsdaten aus der Bundeswaldinventur jährlich korrigiert werden können (Stangler et al. 2022).

Für Deutschland zeigen beispielsweise auch Sanders et al. (2020), dass anhand von Dendrometriedaten und Jahrringanalysen von Intensivbeobachtungsflächen, auf denen u.a. auch die jährliche Waldzustandserhebung durchgeführt wird, Zusammenhänge zwischen Klima und Zuwachs hergeleitet werden können. Damit wären auch klimasensitive Prognosen möglich und Jahrringdaten könnten Informationen liefern, um eine Validierung von Modellschätzungen durchzuführen (Sanders et al. 2020). So können die Daten genutzt werden, um zu prüfen, wie gut die modellierten Schwankungen der Zuwächse mit den gemessenen Schwankungen übereinstimmen. Zum anderen können sie genutzt werden, um klimasensitive Zuwachsfunktionen, insbesondere für empirische Waldmodelle, abzuleiten.

Je nach Baumart und Standort können unterschiedliche Klimaparameter den Zuwachs am besten beschreiben. Es besteht die Herausforderung geeignete Klimaparameter zu identifizieren, die für viele Baumarten über ganz Deutschland zu guten Korrelationen mit dem Zuwachs führen und zudem auch aus Ergebnissen von Klimamodellen abgeleitet werden können. Hierzu wäre eine systematische Analyse bestehender Jahrringchronologien in Kombination mit gezielten, aktuellen Probenahmen sinnvoll. Außerdem ist zu beachten, dass Auswertungsmethoden zu Jahrringchronologien häufig Moving-Window Verfahren nutzen. Dies bedeutet, dass für die Analyse eines Jahres z. B. 3 Jahre davor und 3 Jahre danach einbezogen werden. So können aber Aussagen zu den Randbereichen der Jahrringchronologien – und damit der aktuellen Jahrringe – erschwert sein.

Generell eignen sich Dendrometriedaten und Jahrringanalysen für eine zeitgerechte Abbildung der THG-Emissionen und Kohlenstofffestlegungen im Wald in Deutschland. Ein Forschungsprojekt das konkret die Möglichkeiten und Grenzen der Anwendbarkeit der Dendrochronologie für die THG-Berichterstattung und für Projektionen bzw. die Waldmodellierung bearbeitet wäre hier sinnvoll. Mit einer praktischen Anwendung inklusive Probenahme und Auswertung könnte in 3-5 Jahren gerechnet werden.

Exkurs: Methoden der THG-Bilanzierung für Projekte unter dem EU-Zertifizierungsrahmen für CO₂-Entnahmen (CRCF)

Die 2024 verabschiedete EU-Verordnung zur Schaffung eines Unionsrahmens für die Zertifizierung von dauerhaften CO₂-Entnahmen (Bioenergy, Carbon Capture and Storage (BECCS) und Direct Air Capture and Storage (DACCS)), kohlenstoffspeichernder Landbewirtschaftung und der CO₂-Speicherung in Produkten (Carbon Removals and Carbon Farming, CRCF) stellt einen Rahmen für die freiwillige Vermarktung von natürlichen und technischen Kohlenstoffspeicherungen in der EU dar. Der Rahmen setzt Qualitätskriterien (Quantifizierung, Zusätzlichkeit, langfristige Speicherung und Nachhaltigkeit) sowie Regeln für die Überprüfung und Zertifizierung durch Dritte. Es werden dabei drei verschiedene Formen der CO₂-Entnahme und Speicherung adressiert: temporäre Kohlenstoffspeicherung und Verringerung von Emissionen durch nachhaltige Landnutzung (Carbon Farming), dauerhafte Kohlenstoffspeicherung in geologischen Formationen und Kohlenstoffspeicherung in Produkten.

Zurzeit (April 2025) entwickelt eine Expert*innengruppe detaillierte Zertifizierungsmethoden, um die Qualitätskriterien unter Berücksichtigung der verschiedenen Aktivitäten zu operationalisieren. Der CRCF soll das Erreichen des nationalen Beitrags zu den EU-Klimazielen, einschließlich der Ziele der LULUCF-Verordnung, erleichtern. Zum Beispiel indem die Finanzierung durch die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP), staatliche Beihilfen, aber auch durch freiwillige Kohlenstoffmärkte an den CRCF geknüpft werden. Auf diese Weise könnte der Staat, aber auch Unternehmen mit freiwilligen Klimazielen in zertifizierte Kohlenstoffsinkenprojekte und Kohlenstoffspeicherung durch nachhaltige Landnutzung investieren und so zur nationalen Zielerreichung im LULUCF-Sektor beitragen.

Die Erhebung von Daten zu THG-Bilanzen auf Projektebene kann durchaus auch die Qualität der nationalen Treibhausgasinventare verbessern. So könnten aus den Daten detailliertere Emissionsfaktoren für bestimmte Aktivitäten abgeleitet werden. Andererseits können verbesserte nationale Treibhausgasinventare schließlich den Beitrag der CRCF-Aktivitäten zur Erreichung von Klimaschutzzielen im Landnutzungssektor sichtbar machen und so den Anreiz für die Mitgliedstaaten verstärken, diese Projekte zu finanzieren. Es gibt allerdings erhebliche methodische Unterschiede zwischen den im Rahmen der CRCF zertifizierten Einheiten, die auf Produkte abzielen und deshalb Ökobilanz-Methoden anwenden, und den IPCC-Methoden der Erfassung von Änderungen von Kohlenstoffvorräten auf Ebene von Ländern für nationale THG-Inventare. Wie oben beschrieben, nutzen alle EU-Länder vor allem ihre Waldinventurdaten für die THG-Berichterstattung. Diese eignen sich aufgrund ihrer zeitlichen und räumlichen Auflösung jedoch nicht für die Bilanzierung von Projekten. Im Zuge der Umsetzung von Projekten im CRCF-Rahmen werden deshalb alternative Erfassungsmethoden zum Einsatz kommen müssen. Diese könnten u. a. Fernerkundungsdaten in Kombination mit terrestrischen Inventuren auf Projektebene nutzen, wie sie z. T. auch heute schon in Projekten des freiwilligen Kohlenstoffmarktes genutzt werden. Ein Beispiel für solche Methoden liefern die noch zum Teil in der Entwicklung befindlichen Monitoringmethoden des Wald-Klimastandards (EVA 2024).

Welche Methoden konkret für die Quantifizierung von Projekten im CRCF-Rahmen zum Einsatz kommen werden und wie diese Daten zur Verbesserung des THG-Inventars beitragen können, lässt sich erst nach der Ausarbeitung der CRCF-Methoden einschätzen. Zur Waldbewirtschaftung, die grundsätzlich im CRCF als mögliche Aktivität berücksichtigt werden kann, gibt es bisher nur eine technische Bewertung verschiedener Optionen für Waldaktivitäten unter dem CRCF, sowie einen Entwurf für Projekte zur Wiederbewaldung.

Quellenverzeichnis

Bohn, F. J.; Huth, A. (2017): The importance of forest structure to biodiversity-productivity relationships (4, 160521). The Royal Society Publishing (Hg.). DOI: 10.1098/rsos.160521.

Böttcher, H.; Hennenberg, K.; Winger, C. (2018): FABio-Waldmodell - Modellbeschreibung Version 0.54 Stand Nov. 2017. Öko-Institut (Hg.). Berlin. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/FABio-Wald-Modellbeschreibung.pdf>.

Böttcher, H.; Kurz, W.; Freibauer, A. (2008): Accounting of forest carbon sinks and sources under a future climate protocol-factoring out past disturbance and management effects on age-class structure. In: Environmental Science & Policy 11 (8), S. 669–686. DOI: 10.1016/j.envsci.2008.08.005.

Cade, S. M.; Clemitshaw, K. C.; Molina-Herrera, S.; Grote, R.; Haas, E.; Wilkinson, M.; Morison, J. I. L.; Yamulki, S. (2021): Evaluation of LandscapeDNDC Model Predictions of CO₂ and N₂O Fluxes from an Oak Forest in SE England. In: Forests 12 (11), S. 1517. DOI: 10.3390/f12111517.

Environment and Climate Change Canada (2025): National Inventory Report 1990–2023: Greenhouse Gas Sources and Sinks in Canada. - Canada's submission to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Part 1. Environment and Climate Change Canada (Hg.). <https://unfccc.int/documents/646186>, (01.04.2025).

EU - European Union (2024): 2024 National Inventory Report (NIR). <https://doi.org/10.2909/6331f651-8863-4656-a911-669f2a332a1e>, (10.05.2024).

EVA (2024): Wald-Klimastandard - Version 1.1. <https://eva.eco/standard-waldklima-standard-lokale-waelder-fuer-globalen-klimaschutz-eva-foundation/>.

Grassi, G.; Pilli, R.: Projecting the EU forest carbon net emissions in line with the “continuation of forest management”: the JRC method. Publications Office of the European Union (Hg.). Luxembourg. DOI: 10.2760/844243.

Gregor, K.; Reyer, C. P. O.; Nagel, T. A.; Mäkelä, A.; Krause, A.; Knoke, T.; Rammig, A. (2024): Reconciling the EU forest, biodiversity, and climate strategies. In: Global Change Biology 30 (8), e17431. DOI: 10.1111/gcb.17431.

Gutiérrez, A. G.; Armesto, J. J.; Aravena, J.-C.; Carmona, M.; Carrasco, N. V.; Christie, D. A.; Peña, M.-P.; Pérez, C.; Huth, A. (2009): Structural and environmental characterization of old-growth temperate rainforests of northern Chiloé Island, Chile: Regional and global relevance. In: Forest Ecology and Management 258 (4), S. 376–388. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.03.011.

Gutsch, M.; Lasch, P.; Suckow, F.; Reyer, C. (2011): Waldumbau in Brandenburg: Grundwasserneubildung unter Klimawandel. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. Potsdam. https://www.pik-potsdam.de/4c/web_4c/publications/poster_grossraeschen_2011.pdf.

Gutsch, M.; Lasch-Born, P.; Kollas, C.; Suckow, F.; Reyer, C. P. O. (2018): Balancing trade-offs between ecosystem services in Germany's forests under climate change. In: Environmental Research Letters 13 (4), S. 45012. DOI: 10.1088/1748-9326/aab4e5.

Haas, E.; Klatt, S.; Fröhlich, A.; Kraft, P.; Werner, C.; Kiese, R.; Grote, R.; Breuer, L.; Butterbach-Bahl, K. (2013): LandscapeDNDC: a process model for simulation of biosphere–atmosphere–hydrosphere exchange processes at site and regional scale. In: Landscape Ecol 28 (4), S. 615–636. DOI: 10.1007/s10980-012-9772-x.

Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Reise, J.; Pfeiffer, M. (2024a): Entwicklungen der CO₂-Speicherleistung des Waldes frühzeitiger abschätzen – Einordnung der Ergebnisse der Bundeswaldinventur (Blog). Öko-Institut e. V. <https://www.oeko.de/blog/entwicklungen-der-co2-speicherleistung-des-waldes-fruehzeitiger-abschaetzen-einordnung-der-ergebnisse-der-bundeswaldinventur/>, (23.06.2025).

Hennenberg, K.; Pfeiffer, M.; Böttcher, H.; Reise, J. (2024b): Kurzstudie zur Modellierung der THG-Bilanz der lebenden Bäume im Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) des Projektionsberichts - Treibhausgas-Projektionen für Deutschland. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. DOI: 10.60810/openumwelt-7430.

IPCC (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use - Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hg.). <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>, (22.11.2021).

IPCC (2019): 2019 Refinement to the 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hg.). <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>, (09.03.2022).

Jochem, D.; Seintsch, B.; Weimar, H. (2025): Thünen-Einschlagsrückrechnung stimmt mit BWI 4 überein. In: AFZ DerWald (1/2025), S. 49–51. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn069326.pdf, (04.04.2025).

Kurz, W. A.; Dymond, C. C.; White, T. M.; Stinson, G.; Shaw, C. H.; Rampley, G. J.; Smyth, C.; Simpson, B. N.; Neilson, E. T.; Trofymow, J. A.; Metsaranta, J.; Apps, M. J. (2009): CBM-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. In: Ecological Modelling 220 (4), S. 480–504. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2008.10.018.

Kurz, W. A.; Shaw, C. H.; Boisvenue, C.; Stinson, G.; Metsaranta, J.; Leckie, D.; Dyk, A.; Smyth, C.; Neilson, E. T. (2013): Carbon in Canada's boreal forest — A synthesis. In: Environmental Reviews 21 (4), S. 260–292. DOI: 10.1139/er-2013-0041.

Liski, J.; Palosuo, T.; Peltoniemi, M.; Sievänen, R. (2005): Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. In: Ecological Modelling 189 (1-2), S. 168–182. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.005.

Metsaranta, J. M.; Kurz, W. A.; Neilson, E. T.; Stinson, G. (2010): Implications of future disturbance regimes on the carbon balance of Canada's managed forest (2010–2100). In: Tellus B: Chemical and Physical Meteorology 62 (5), S. 719–728. DOI: 10.1111/j.1600-0889.2010.00487.x.

Nielsen, O.-K.; Plejdrup, M. S.; Winther, M.; Nielsen, M.; Gyldenkerne, S.; Mikkelsen, M. H.; Albrechtsen, R.; Hjelgaard, K.; Fauser, P.; Bruun, H. G.; Levin, L.; Callisen, L. W.; Andersen, T. A.; Johannsen, V. K.; Nord-Larsen, T.; Vesterdal, L.; Stupak, I.; Scott-Bentsen, N.; Rasmussen, E.; Petersen, S. B.; Baunbæk, L.; Hansen, M. (2024): Denmark's National Inventory Document 2024 - Emission Inventories 1990-2022 - Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Paris Agreement. (Scientific Report No. 622). Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy (Hg.). <https://unfccc.int/documents/644919>, (04.04.2025).

Oehmichen, K.; Klatt, S.; Gerber, K.; Polley, H.; Röhling, S.; Dunger, K.: Die alternativen WEHAM-Szenarien: Holzpräferenz, Naturschutzpräferenz und Trendfortschreibung - Szenarienentwicklung, Ergebnisse und Analyse (Thünen Report). Johann Heinrich von Thünen-Institut (Hg.). Braunschweig. DOI: 10.3220/REP1527686002000.

Oehmichen, K.; Langner, N.; Henning, L.; Ackermann, J.; Adler, P.; Backa, J.; Beckschäfer, P.; Dasser, G.; Deutscher, J.; Eisnecker, P.; Fleckenstein, S.; Franz, K.; Ginzler, C.; Hoffmann, K.; Puhm, M.; Reinosch, E.; Riedel, T.; Rüetschi, M.; Schardt, M.; Schicketanz, D.; Seitz, R.; Seintsch, B.; Small, D.; Straub, C.; Uhl, A.; Waser, L. T.; Wieseahn, J.; Wimmer, A.: Fernerkundungsbasiertes Nationales Erfassungssystem Waldschäden (FNEWs). Thünen Institut, Institut für Waldökosysteme (Hg.). Eberswalde. DOI: 10.2314/KXP:1909560146.

Pfeiffer, M.; Hennberger, K.; Nieberg, M.; Benndorf, A.; Reise, J.; Böttcher, H.: Waldmodellierung - Szenarien der Waldentwicklung unter veränderten Klimabedingungen mit dem Modell FABio-Forest im Rahmen des DIFENS-Projekts. Öko-Institut (Hg.). Darmstadt. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/DIFENS-Waldmodellierung.pdf>, (25.06.2025).

- Pfeiffer, M.; Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Reise, J.; Mantau, U. (2023): Referenzszenario der Holzverwendung und der Waldentwicklung im UBA-Projekt BioSINK - Öko-Institut Working Paper 4/2023. Öko-Institut (Hg.). Berlin. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Referenzszenario-BioSINK.pdf>, (24.11.2023).
- Pilli, R.; Grassi, G.; Kurz, W. a.; Fiorese, G.; Cescatti, A. (2017): The European forest sector: Past and future carbon budget and fluxes under different management scenarios. In: *Biogeosciences* 14 (9), S. 2387–2405. DOI: 10.5194/bg-14-2387-2017.
- Reinosch, E.; Backa, J.; Adler, P.; Deutscher, J.; Eisnecker, P.; Hoffmann, K.; Langner, N.; Puhm, M.; Rüetschi, M.; Straub, C.; Waser, L. T.; Wieseahn, J.; Oehmichen, K. (2024): Detailed validation of large-scale Sentinel-2-based forest disturbance maps across Germany. In: *Forestry: An International Journal of Forest Research* 98 (3), S. 437–453. DOI: 10.1093/forestry/cpae038.
- Sanders, T.; Bolte, A.; Ziche, D. (2020): Jahrringanalysen auf dem Telegrafenberg (Potsdam) - Nutzung dendrochronologischer Daten Deutschlands zur modell-basierten Analyse der Wirkung von Klimaänderungen auf Waldökosysteme – (Akronym: DENDROKLIMA). Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hg.). <https://www.fnr.de/fileadmin/projektdatenbank/22WC407703.pdf>, (04.04.2025).
- Sitch, S.; Smith, B.; PRENTICE, I. C.; Arneth, A.; Bondeau, A.; Cramer, W.; Kaplan, J. O.; Levis, S.; Lucht, W.; Sykes, M. T.; Thonicke, K.; Venevsky, S. (2003): Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. In: *Glob Change Biol* 9 (2), S. 161–185. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00569.x.
- Stangler, D. F.; Miller, T. W.; Honer, H.; Larysch, E.; Puhlmann, H.; Seifert, T.; Kahle, H.-P. (2022): Multivariate drought stress response of Norway spruce, silver fir and Douglas fir along elevational gradients in Southwestern Germany. In: *Frontiers in Ecology and Evolution* 10 (907492). DOI: 10.3389/fevo.2022.907492.
- Statistics Finland (2024): Greenhouse Gas Emissions in Finland 1990 to 2022 - National Inventory Document under the UNFCCC and Paris Agreement. Statistics Finland (Hg.). <https://unfccc.int/documents/644961>, (01.04.2025).
- Swedish Environmental Protection Agency (2024): National Inventory Report Sweden 2024 - Greenhouse Gas Emission Inventories 1990-2022. Submitted under the United Nations Framework. Swedish Environmental Protection Agency. <https://unfccc.int/documents/645011>, (01.04.2025).
- Umweltbundesamt (2024a): Austria's National Inventory Document 2024 - Submission under the UNFCCC and under the Paris Agreement. Umweltbundesamt (Hg.). Wien. <https://unfccc.int/documents/645017>, (01.04.2025).
- Umweltbundesamt (2024b): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2024 - Nationales Inventardokument zum deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2022 (38/2024). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. DOI: 10.60810/openumwelt-7442.
- Umweltbundesamt (2025): Submission under the United Nations Framework Convention 2025 - National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2023. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/NID_Germany_2025.pdf?download, (16.05.2025).
- UNFCCC (1998): Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change (Hg.). <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>, (31.08.2021).
- Vizzarri, M.; Pilli, R.; Korosuo, A.; Blujdea, V. N. B.; Rossi, S.; Fiorese, G.; Abad Viñas, R.; Colditz, R. R.; Grassi, G. (2021): Setting the forest reference levels in the European Union: overview and challenges. In: *Carbon Balance Manage* 16 (23). DOI: 10.1186/s13021-021-00185-4.

Ziche, D.; Grüneberg, E.; Hilbrig, L.; Höhle, J.; Kompa, T.; Liski, J.; Repo, A.; Wellbrock, N. (2019): Comparing soil inventory with modelling: Carbon balance in central European forest soils varies among forest types. In: The Science of the total environment 647, S. 1573–1585. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.327.

Anhang

Tabelle 3: Übersicht Methoden der nationalen THG-Berichterstattung für Änderungen von Waldbiomassekohlenstoffvorräten in EU-Ländern

Land	Methode	Land	Methode
Österreich	Gain-Loss	Italien	Gain-Loss
Belgien	Stock-Difference	Lettland	Gain-Loss
Bulgarien	Stock-Difference	Litauen	Stock-Difference
Kroatien	Gain-Loss	Luxemburg	Gain-Loss
Zypern	Gain-Loss	Malta	Gain-Loss
Tschechien	Gain-Loss	Niederlande	Gain-Loss
Dänemark	Stock-Difference	Polen	Stock-Difference
Estland	Gain-Loss	Portugal	Gain-Loss
Finnland	Gain-Loss	Rumänien	Gain-Loss
Frankreich	Gain-Loss	Slowakei	Gain-Loss
Deutschland	Stock-Difference	Slowenien	Stock-Difference
Griechenland	Stock-Difference	Spanien	Stock-Difference
Ungarn	Stock-Difference	Schweden	Stock-Difference
Irland	Gain-Loss		

Quelle: EU 2024

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
 Wörlitzer Platz 1
 06844 Dessau-Roßlau
 Tel: +49 340-2103-0
buergerservice@uba.de
 Internet: www.umweltbundesamt.de
[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)
[t/umweltbundesamt](https://www.twitter.com/umweltbundesamt)

DOI

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7979>

Stand: Juni/2025

Autorenschaft, Institution

Dr. Hannes Böttcher, Dr. Klaus
 Hennenberg; Öko-Institut e.V.

Redaktion

Judith Voß-Stemping; Umweltbundesamt

Die Verantwortung für die Inhalte liegt bei
 den Autorinnen und Autoren.