

DIE CO₂-KOSTEN DER GLOBALEN HOLZERNTE

Deutschsprachige Fachübersetzung der Studie

The Carbon Costs of Global Wood Harvests

Autoren

Liqing Peng
Timothy D. Searchinger
Jessica Zionts
Richard Waite





Vorwort

Die deutsche Übersetzung der Studie „Die CO₂-Kosten der globalen Holzernte“ weist auf einen in zahlreichen Publikationen der wirtschaftlichen Interessenvertreter der Holz- und Forstwirtschaft verbreiteten Ansatz hin, die CO₂-Bindungsverluste der zeitlichen Lücke von oft 50 bis 80 Jahren, die durch das industrielle Abholzen von Wäldern bis zum vergleichbaren Bestand durch Nachwachsen vergehen, nicht zu erfassen und so unter anderem das Bauen mit Holz fälschlicherweise als „klimaneutral“ oder gar „klimapositiv“ zu bewerten.

Die realistische Modellrechnung der Studie kommt zum Ergebnis, dass die industrielle globale Holzernte zwischen 2010 und 2050 voraussichtlich jährliche CO₂-Belastungen von 3,5-4,2 Gt CO₂e/Jahr verursacht, was etwa 10 % der jährlichen globalen Gesamtemissionen an CO₂ bedeutet. Im Vergleich dazu stehen die rund 7 % der jährlichen globalen Gesamtemissionen an CO₂, die die weltweite Zementproduktion als Grundstoff des mineralischen Baustoffs Beton verursacht.

Den Herausgebern geht es dabei ausdrücklich nicht darum, einzelne Bauweisen wie die Holzbauweise zu diskreditieren. Vielmehr soll „Mythen“ mit Fakten begegnet werden, damit realistische Bewertungen statt „Halbwissen“ in der Baustoffdebatte Priorität gewinnen.

Im November 2023

Die Herausgeber der deutschsprachigen Version

Studie „Die CO₂-Kosten der globalen Holzernte“

Nach der Landwirtschaft hat die Holzernte als menschliche Tätigkeit die Speicherung von CO₂ in der Vegetation und in den Böden am stärksten verringert^{1, 2}. Zwar setzt geschlagenes Holz in mehreren Schritten CO₂ in die Atmosphäre frei, doch hat die Tatsache, dass wachsende Bäume CO₂ aufnehmen, zu unterschiedlichen CO₂-Bilanzierungsansätzen für die Holznutzung geführt. Diese kommen zu stark abweichenden Schätzungen der CO₂-Kosten. Viele Methoden erwecken den Eindruck von niedrigen, keinen oder gar negativen Treibhausgasemissionen aus der Holzernte, weil sie auf unterschiedliche Weise die CO₂-Freisetzungen aus neuen Ernten durch die CO₂-Bindung aus dem Wachstum großer Waldbestände kompensieren^{3, 4}. Es ist unangemessen, diese Bindung neuen Ernten zuzuschreiben, da dieses sonstige Waldwachstum unabhängig von neuen Ernten ohnehin stattfinden würde und in der Regel aus der Aufgabe landwirtschaftlich genutzter Flächen, erneutem Waldwachstum nach früheren Ernten und dem Klimawandel selbst resultiert. Dennoch werden in einigen Publikationen Bruttoemissionen pro Jahr erfasst, was der Fähigkeit neu geernteter Wälder, nachzuwachsen und sich den CO₂-Speichermengen nicht geernteter Wälder anzunähern, keinen Wert beimisst. Im vorliegenden Artikel stellen wir die Ergebnisse eines neuen Modells vor, das mittels Abzinsung über die Zeit die gegenwärtigen und zukünftigen CO₂-Kosten der globalen Holzernte für unterschiedliche Szenarien abschätzt. Folglich dürfte die Holzernte zwischen 2010 und 2050 voraussichtlich annualisierte CO₂-Kosten von 3,5-4,2 Gt CO₂e/Jahr verursachen, was den üblichen Schätzungen der jährlichen Emissionen aus Landnutzungsänderungen durch die Ausweitung der Landwirtschaft nahekommt. Unsere Studie zeigt eine unterschätzte Möglichkeit auf, dem Klimawandel durch die Reduzierung dieser Kosten zu begegnen.

Die Treibhausgas(THG)-Auswirkungen der Holzernte werden in verschiedenen Zusammenhängen berücksichtigt, so in Lebenszyklusberechnungen für Holzprodukte, nationalen THG-Berichten von Regierungen und wissenschaftlichen Analysen zur Bewertung von Emissionen aus Landnutzungsänderungen. Zwar unterscheiden sich die Verfahren im Detail, doch haben die gängigsten Ansätze gemein, dass CO₂-Gewinne aus dem Nachwachsen von Bäumen aus der früheren Landbewirtschaftung durch den Menschen – und in manchen Fällen auch aus dem weiteren Wachstum von nicht geernteten Bäumen – die CO₂-Verluste durch neue Ernten kompensieren^{3, 4}. In Ökobilanzierungen von Holzprodukten oder holzbasierter Bioenergie wird beispielsweise die Verwendung von Holz in der Regel als „CO₂-neutral“ betrachtet, sofern die geernteten Wälder „nachhaltig“ bewirtschaftet werden^{3, 5}. CO₂-Neutralität bedeutet, dass das zuvor in der Vegetation gebundene Kohlendioxid (biogenes CO₂), das in verschiedenen Phasen der Holzernte in die Atmosphäre freigesetzt wird, nicht berücksichtigt wird, so bei der Zersetzung von Wurzelwerk und Totholz sowie bei der Verwertung als Brennstoff oder Abfall bzw. am Ende der Nutzung. Obwohl das Kriterium der Nachhaltigkeit oft nicht definiert ist, gehen mehrere Ökobilanzierungsstandards^{3, 5} davon aus, dass die Holzernte dann nachhaltig und CO₂-neutral ist, wenn die gespeicherte CO₂-Menge auch nach der Ernte erhalten bleibt, indem die jährliche Wachstumsrate des „Waldes“ (in manchen Fällen als ganzes Land definiert) nicht überschritten wird. In einigen dieser Studien wird auch die Speicherung selbst eines kleinen Teils dieses CO₂ in langlebigen Holzprodukten als CO₂-Gewinn gewertet³. In manchen Fällen wird für die Holzernte und -nutzung sogar der Durchschnitt des in den Waldbeständen, die das Holz liefern, gespeicherten CO₂ angesetzt⁶. Gemäß den beiden letztgenannten Varianten ist die Holzernte nicht nur CO₂-neutral, sondern trägt zur CO₂-Speicherung bei und hat positive Auswirkungen auf das Klima.

Auf nationaler Ebene erfassen die Länder die Auswirkungen der Forstwirtschaft über Netting-Ansätze, die einen ähnlichen Eindruck von CO₂-Neutralität vermitteln können. Da die Auswirkungen der Bewirtschaftung durch den Menschen von den natürlichen Veränderungen in den Wäldern nur schwer zu trennen sind, erlauben die

Richtlinien des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) den Ländern, alle Veränderungen der in „bewirtschafteten“ Wäldern gespeicherten CO₂-Vorräte als Emissionen oder Entnahmen von CO₂ aus der Atmosphäre zu erfassen⁴. Mit 3 Milliarden Hektar machen die bewirtschafteten Wälder drei Viertel des weltweiten Waldbestands aus, in vielen Ländern sogar nahezu die Gesamtheit⁴. Diese Regeln ermöglichen es den Ländern, sich das Nachwachsen von Wäldern auf aufgegebenen, zuvor landwirtschaftlich genutzten Flächen oder aus früheren Holzernten „gutschreiben“ zu lassen (dies betrifft sogar Ernten vor den internationalen Klimavereinbarungen, in denen 1990 als Basisjahr festgelegt ist)⁷. Damit können sich die Länder auch die starke Beschleunigung des Wachstums ihrer Wälder aufgrund von CO₂-Düngeeffekten, wärmeren Witterungsbedingungen und Stickstoffablagerungen anrechnen lassen⁸. Diesem Ansatz folgend sollte die Holzernte die Größenordnung der auf nationaler Ebene erfassten Kohlenstoffsene verringern. Da aber die Auswirkungen der Ernte nicht gesondert ausgewiesen werden, können die berichteten Zahlen den Eindruck erwecken, dass Holzernten in Ländern mit einem Nettoanstieg des in den Wäldern gebundenen CO₂ keine Emissionen verursachen.

Im Gegensatz zu diesen Länderberichten wird in wissenschaftlichen Publikationen, in denen die Emissionen aus Landnutzungsänderungen abgeschätzt werden, der Versuch unternommen, diese Auswirkungen des Klimawandels auf die CO₂-Bilanz der Wälder als „verbleibende Landkohlenstoffsene“ herauszurechnen, doch kann dennoch ein ähnlicher Eindruck entstehen. Das liegt daran, dass viele Arbeiten nur die Nettoeffekte neuer Holzernten und des Nachwachsens nach früheren Ernten ausweisen und daher die Auswirkungen neuer Holzernten nicht separat betrachten⁹⁻¹¹.

Die genannten Verfahren der Bilanzierung haben jeweils starke regionale Auswirkungen. Die meisten Wälder in den Ländern der gemäßigten Breiten erholen sich^{4, 8, 12, 13} von der umfangreichen Abholzung oder Rodung für die Landwirtschaft in der Vergangenheit, was durch den geringeren Bedarf an Futter für Pferde und andere Zugtiere und die Verlagerung von Ackerland in die Tropen begünstigt wird^{1, 14-16}. In den tropischen Ländern nimmt die landwirtschaftliche Nutzfläche dagegen zu und die Waldnutzung steigt^{14, 17}. Die Aufrechnung kann daher den Eindruck erwecken, dass sich Holzernten in gemäßigten Industrieländern nicht oder gar positiv auf das Klima auswirken, während die Ernten in tropischen Entwicklungsländern hohe CO₂-Kosten verursachen^{9, 18, 19}.

Die genannten Bilanzierungsansätze erfassen die Auswirkungen neuer Holzeinschläge nicht genau – aus dem einfachen Grund, dass die Wälder, die zur Kompensation der Auswirkungen neuer Holzeinschläge herangezogen werden, ohnehin nachwachsen bzw. wiederaufgeforstet werden würden²⁰. Wie Hunderte Wissenschaftler in Briefen und zahlreiche wissenschaftliche Gremien verlauten ließen, kann jegliches Wachstum oder Nachwachsen von Wäldern, das ohnehin stattfinden würde, die Klimafolgen neuer Holzernten logischerweise nicht beeinflussen²¹⁻²⁴.

Andererseits werden in einigen Publikationen die Bruttoemissionen der Holzernte ausgewiesen²⁵⁻²⁷, besonders häufig in Bezug auf tropische Wälder²⁸⁻³¹. Die Bruttoemissionen sind zwar ebenfalls von Bedeutung, aber offenbar keine für die Erfassung der Klimakosten der Holzernte geeignete Messgröße, da sie das potenzielle Nachwachsen der Wälder nach der Ernte nicht berücksichtigen. Nachwachsende Wälder beginnen vermutlich zu einem bestimmten Zeitpunkt nach der Holzernte, das freigesetzte („verlorene“) CO₂ erneut durch Speicherung zu kompensieren, indem sie schneller wachsen als dieselben Wälder in unberührtem Zustand – selbst wenn eine vollständige „Aufholung“ nur selten möglich sein dürfte.

Diese kurz- oder mittelfristigen Verluste kommen zu den langfristigen Verlusten hinzu, untergraben die Ziele des Pariser Klimaabkommens und stehen im Widerspruch zu den gut begründbaren Verpflichtungen, die viele Staaten eingegangen sind, um bis 2050 CO₂-Neutralität zu erreichen und einen gefährlichen Klimawandel zu verhindern³². Angesichts der Bedeutung kurzfristiger Emissionsminderungen haben Regierungen europäischer Staaten und die US-Regierung gefordert, die Klimaauswirkungen direkter oder indirekter Landnutzungsänderungen durch Bioenergie über einen Zeitraum von 20 oder 30 Jahren zu beurteilen³³. Es erscheint sinnvoll, auch bei der Beurteilung der Auswirkungen der Holzernten mehr Wert auf kurzfristige Emissionen und Minderungen zu legen.

■ Berücksichtigung des Zeitfaktors für Abschätzung der THG-Kosten

In der vorliegenden Studie greifen wir auf eine Abzinsung über die Zeit zurück, um den Wert der CO₂-Verluste infolge vergangener und wahrscheinlicher zukünftiger Holzernten von 2010 bis 2050 für unterschiedliche Angebots- und Nachfrageszenarien abzuschätzen. Dabei verwenden wir ein neuartiges globales CO₂-Modell für Wälder, das „Carbon Harvest Model“ (CHARM). Dieses baut auf einem seit Langem etablierten Ansatz³⁴ auf, bei dem die Auswirkungen der Holzernte auf die Veränderungen der atmosphärischen CO₂-Konzentration im Zeitverlauf berechnet werden, während sich das CO₂ zwischen verschiedenen Speicher-„Pools“ bewegt. Diese umfassen lebende Vegetation, Wurzelwerk, Totholz, verschiedene Holzprodukte und Deponien. Der Einfluss auf das atmosphärische CO₂ lässt sich ausdrücken als Differenz zwischen dem infolge der Ernte in allen Pools gespeicherten CO₂ und dem CO₂, das die Wälder speichern würden, wenn sie nicht abgeholzt und weiter wachsen würden. Für das jeweilige Jahr lässt sich die Veränderung dieser Menge gegenüber dem Vorjahr als Differenz zwischen den Emissionen in die und der Entnahme aus der Atmosphäre darstellen.

Um die Kosten pro Tonne emittiertem Treibhausgas zu bewerten, die in ihrem absoluten Wert einer Tonne Minderung entsprechen, folgt unser Hauptansatz der Methode in Ref. 33 und wendet einen Abzinsungssatz von 4 % auf die Emissionen und Entnahmen im Zeitverlauf an, die sich aus der Holzernte eines jeden Jahres ergeben. Gemäß diesem Ansatz hat zum Beispiel eine Tonne CO₂, die im Jahr 1 emittiert wird, einen um 4 % höheren absoluten Wert als eine Tonne CO₂, die im Jahr 2 emittiert oder entnommen wird. Mit diesem Verfahren wird der Wert eines aus einer Holzernte resultierenden Flusses von CO₂-Emissionen und -Entnahmen in künftigen Jahren in „erntejahräquivalente Emissionen“ umgerechnet. Ist der Abzinsungssatz gleich Null, schätzt die Methode die absolute Veränderung der Emissionen in einem bestimmten Jahr nach der Ernte ab.

Bei Ökobilanzierungen von Holzprodukten haben einige frühere Bestandsanalysen den Zeitfaktor berücksichtigt, indem sie für einen bestimmten, in der Zukunft liegenden Zeitpunkt – z. B. nach Ablauf von 100 Jahren – den sich aus einer Holzernte ergebenden kumulierten Strahlungsantrieb unter Einbeziehung der atmosphärischen Zerfallsraten von Treibhausgasen berechneten^{3, 12, 35}. Für Biokraftstoffe wurde in einigen Publikationen ein Abzinsungssatz auf diese Änderungen des Strahlungsantriebs als Messgröße für Klimaschäden angewandt^{36, 37}. Diese Ansätze sind zwar informativ, lassen jedoch aus unserer Sicht eine wichtige Erkenntnis aus der Literatur außer Acht, nämlich die sozialen CO₂-Kosten (SCC), mit denen die sich im Zeitverlauf ändernden realen wirtschaftlichen Kosten der Emissionen abgeschätzt werden. Der Parameter der SCC berücksichtigt zwar in ähnlicher Weise die THG-Zerfallsgeschwindigkeiten, hängt jedoch auch von den Kosten der Minderungsmaßnahmen im Jahr der Emission ab. So kann die Annahme, dass die Kosten der Minderung dank neuer Technologien im Laufe der Zeit sinken werden, auch zu einem sinkenden SCC-Wert führen³⁸. Eingängig ist hier ein Vergleich mit einem Produkt wie einem Mobiltelefon, dessen Kosten im Zeitverlauf sinken, das aber bereits jetzt genutzt wird. Folglich ist eine Einheit dieses Produkts (also des Mobiltelefons) gegenwärtig wertvoller als in der Zukunft. Der Wert eines Angebots über die Zeit – z. B. auch der Emissionsminderung – ist ebenfalls abzuzinsen, um den Zeitwert des Geldes zu berücksichtigen. Aus beiden Gründen sollten die Kosten pro emittierter Tonne und dementsprechend der Wert einer Tonne Emissionsminderung im Zeitverlauf variieren.

Da verschiedene Forscher von im Zeitverlauf alternierend steigenden und sinkenden SCC-Veränderungen ausgehen, ist unser Abzinsungssatz von 4 % mit einer mittleren Schätzung konstanter SCC und einer realen Kapitalrendite von 4 % vereinbar. Die diskontierten CO₂-Kosten lassen sich auch als CO₂-„Mietkosten“ betrachten. Sie stellen auch die Zinsen dar, die ein Unternehmen für Gelder zahlen müsste, die es zum Kauf von Kompensationen für seine Emissionen verwendet, bis es diese Emissionen durch spätere Emissionsminderungen zurückzahlt. Wie in Ref. 33 dargestellt, bietet der Abzinsungssatz von 4 % eine stringente Berücksichtigung des Zeitfaktors, der weitgehend mit realen Richtlinien für die Beurteilung von Emissionen aus Landnutzungsänderungen für Biokraftstoffe übereinstimmt. Unsere Ergebnisse unterliegen im Wesentlichen einer Abzinsung über 40 Jahre, doch führen wir auch Modellrechnungen über 100 Jahre durch und variieren den Satz von 0 bis 6 %.

■ Steigende Holznachfrage

Zunächst prognostizieren wir den zukünftigen Holzverbrauch nach Ländern für vier breit gefasste Holzproduktkategorien: langlebige Produkte (LLP/„long-lived products“), d. h. Schnittholz, Holzpaneele und anderes Industrierundholz, kurzlebige Produkte (SLP/„short-lived products“), d. h. Papier- und Kartonerzeugnisse, sehr kurzlebige Produkte – Holzbrennstoffe (VSLP-WFL/„very short-lived products – wood fuel“), also Holz, das eigens für die energetische Verwertung geerntet wird, sowie sehr kurzlebige Produkte – Industrie (VSLP-IND/„very short-lived products – industrial“), also Abfälle aus der Herstellung anderer Holzprodukte, die zur energetischen Verwertung verbrannt werden. Unser Modell mit festen Effekten schätzt diesen Verbrauch auf der Grundlage historischer Beziehungen zwischen dem Verbrauch der wichtigsten Holzproduktkategorien und der Bevölkerung, dem Land, dem Bruttoinlandsprodukt (BIP) und der Zeit (als Messgröße für den technologischen Wandel). Das von einer Kausalität ausgehende Modell liefert geeignete, jedoch unvollständige Ergebnisse; es sollte als eine angemessene Vergleichsbasis für die künftige Holznachfrage betrachtet werden.

Auf globaler Basis prognostiziert das Modell, dass die Holzernte zwischen 2010 und 2050 um 54 % steigen wird, und zwar von 3,7 Mrd. m³ im Jahr 2010 auf 5,7 Mrd. m³ im Jahr 2050, entsprechend einem Anstieg von 69 % bei LLP, 128 % bei SLP, 22 % bei VSLP-WFL und 91 % bei VSLP-IND (Abb. 1). Die von uns prognostizierten Wachstumsraten liegen innerhalb der Bandbreite anderer Studien, doch liefern diese meist kurzfristige Projektionen. Unseres Erachtens sind die Projektionen für Holzbrennstoffe am unsichersten, da sich Länder mit unterschiedlichen Einkommensniveaus von der traditionellen Bioenergie entfernt haben.

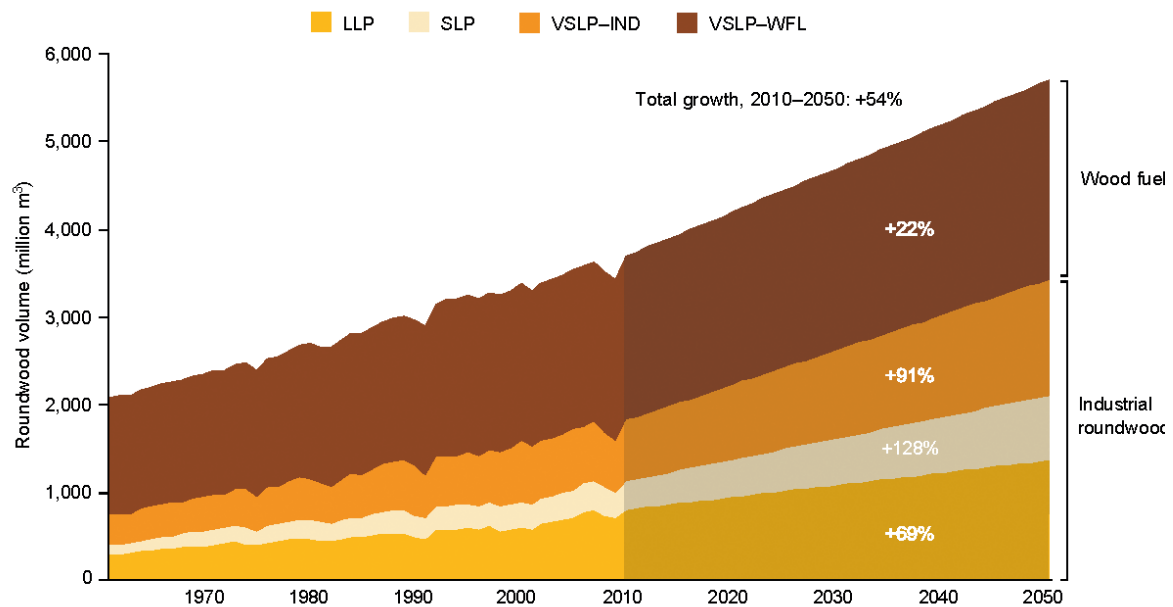
Da für einige Holzprodukte „Abfälle“ anderer Holzprodukte zum Einsatz kommen, verfolgen wir diese verbrauchten Produkte bis zu den erforderlichen Holzeinschlagsmengen zurück. Abb. 2 zeigt unsere Schätzung der jährlichen globalen Holzströme von der Ernte bis zur Endnutzung für 2010.

■ CO₂-Kosten und Landnutzung

Im nächsten Schritt führen wir eine Abschätzung der jährlichen CO₂-Kosten der globalen Holzernte von 2010 bis 2050 für sieben Szenarien des zukünftigen Holzangebots und der Holznachfrage durch (Tabelle 1), wobei wir die Emissionen und Entnahmen für 40 Jahre nach jeder Holzernte mit 4 % abzinsen. Wir schätzen die Kosten auf 3,5–4,2 Gt CO₂e/Jahr (Abb. 3).

Insgesamt entfallen 78 % der CO₂-Kosten zwischen 2010 und 2050 auf die bestehende Holznachfrage, der verbleibende Teil auf die zusätzliche Holznachfrage. Holzernten auf dem Niveau von 2010 führen in Szenario 1 zu Kosten von 3,2 Gt CO₂e/Jahr. Im Durchschnitt machen Industrierundholz und Holzbrennstoffe jeweils etwa die Hälfte der CO₂-Kosten aus (siehe „Erweiterte Daten“, Abb. 1). In den Szenarien mit den niedrigsten CO₂-Kosten besteht eine um 50 % niedrigere Holzbrennstoffnachfrage oder eine gegenüber bestehenden Plantagen um 25 % höhere Wachstumsrate.

Darüber hinaus berechnen wir einen „Substitutionswert“ auf der Grundlage der geschätzten Minderung der „Produktionsemissionen“, beispielsweise der Emissionen fossiler Brennstoffe bei der Verwendung von Holz anstelle von Beton und Stahl im Bauwesen oder für traditionelle Bioenergie. Durch die Substitution werden die Emissionen aus der Holzernte nicht gemindert. Analog zu einem Kleinwagen, der tendenziell weniger emittiert als ein Oberklassefahrzeug, bedeutet Substitution hier, dass die Produktionsemissionen von Holz geringer sein können als die von Ersatzprodukten. Trotz der Variabilität in Entwurf und Bau und der Ungewissheit hinsichtlich der Größenordnung³⁹ verwenden wir einen mittleren Substitutionswert aus einer Vergleichsstudie⁴⁰ für den Substitutionswert für Beton und Stahl.

Abb. 1 | Historischer und prognostizierter Anstieg der weltweiten Holzproduktvolumina (Mio. m³) zwischen 1961 und 2050

Das Diagramm zeigt einen prognostizierten Anstieg der weltweiten Holzernte um 54 % von 2010 bis 2050 auf der Grundlage eines Ländermodells mit festen Effekten und stellt das Wachstum für vier unterschiedliche Holzproduktkategorien dar. Das Modell greift auf die historischen Beziehungen zwischen dem Verbrauch in jeder dieser Holzproduktkategorien und der Bevölkerung, dem Pro-Kopf-BIP und den Zeitvariablen zurück. Dieselbe Beziehung des Holzverbrauchs findet Anwendung auf das geschätzte zukünftige Bevölkerungs- und Pro-Kopf-Einkommenswachstum der einzelnen Länder, geht jedoch von den ursprünglichen für das jeweilige Land in den einzelnen Holzproduktkategorien ermittelten Verbräuchen aus und trägt der Tatsache Rechnung, dass die Länder eine je unterschiedliche Abhängigkeit von Holz entwickelt haben, was zu einem großen Teil auf die voneinander abweichenden nationalen Gegebenheiten zurückzuführen ist. Die Beziehungen werden nach der Aufteilung der Länder in Industrie- und Entwicklungsländer geschätzt, um eine Überschätzung des zukünftigen Holzverbrauchs in Ländern mit hohem Einkommensniveau zu vermeiden. LLP umfasst Schnittholz, Holzpaneele und sonstiges Industrierundholz; SLP umfasst Papier- und Kartonprodukte;

VSLP-IND bezieht sich auf Abfälle anderer Holzprodukte, die zur energetischen Verwertung verbrannt werden; VSLP-WFL bezieht sich auf Holz, das eigens für die Energieerzeugung geerntet wird. Wir betrachten die VSLP-WFL-Projektionen als die unsichersten, da Länder mit unterschiedlichen Einkommensniveaus von traditionellen Holzbrennstoffen zu anderen Energiequellen übergegangen sind. Der Abschnitt „Ergänzende Informationen“ enthält Statistiken zu den Modellierungsergebnissen.

Legende:

Roundwood volume = Rundholzvolumina (Mio. m³)

LLP = long-lived products = langlebige Holzprodukte

SLP = short-lived products = kurzlebige Holzprodukte

VSLP-IND = very short-lived products – industrial = sehr kurzlebige Holzprodukte (Industrie)

VSLP-WFL = very short-lived products – wood fuel = sehr kurzlebige Holzprodukte (Holzbrennstoffe)

Total growth = Gesamtwachstum

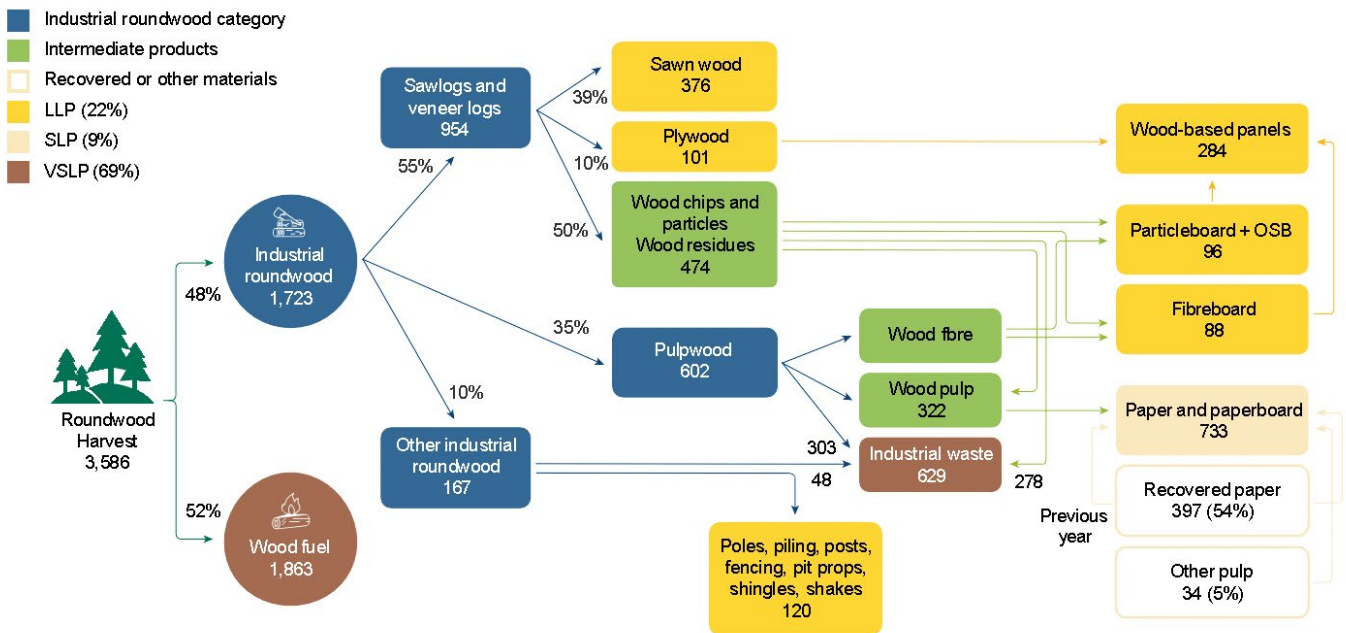
Wood fuel = Holzbrennstoff

Industrial roundwood = Industrierundholz

Gemäß unseren Annahmen reichen die globalen Emissionsminderungen durch Substitution von 0,8 bis 0,9 Gt CO₂e/Jahr. Da bei dieser Schätzung Veränderungen der CO₂-Speicherung im Waldbestand unberücksichtigt bleiben, verursacht der Einsatz von Holz nicht notwendigerweise insgesamt niedrigere Emissionen als die Verwendung von Beton und Stahl oder Propangas zum Kochen. Sollten die Emissionen bei Stahl und Beton im Zeitverlauf gemindert werden können, könnten die Substitutionswerte sinken oder ganz entfallen.

Unserer Schätzung zufolge dürften zudem in den verschiedenen Szenarien ca. 756-855 Mio. Hektar Land beerntet werden, sofern man „Kahlschlagäquivalente“ ansetzt, also die Fläche, die benötigt würde, wenn das gesamte Holz durch Kahlschlag geerntet würde („Erweiterte Daten“, Abb. 2). Wir verwenden diese Messgröße, da die Fläche und die Erntemengen der selektiv bewirtschafteten Flächen größtenteils unbekannt sind. (Wiederholte Ernten eines Hektars Plantage werden nur einmal gezählt.) Im Vergleich zu Szenario 1 würde eine Erhöhung der Plantagenwachstumsrate um 25 % die Erntefläche um 60 Mio. ha verringern, der von uns angesetzte lineare Rückgang des Bedarfs an Holzbrennstoffen um 50 % würde sie um 70 Mio. ha verkleinern.

Abb. 2 | Flussdiagramm für globales Rundholz 2010 (Mio. m³), das die Beziehung zwischen dem Verbrauch verschiedener Holzprodukte und der Holzernte widerspiegelt



Wir rekonstruieren die Beziehungen zwischen der Holzernte und dem Verbrauch verschiedener Holzprodukte auf der Grundlage von Daten der UN-Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation (FAO). Die Schätzungen der Autoren aus allen Quellen werden in den Abschnitten „Methoden“ und „Ergänzende Informationen“ erläutert. Das Flussdiagramm veranschaulicht die Verteilung der Rundholzernte auf verschiedene Holzprodukte auf globaler Basis im Jahr 2010. Die Zahlen unter den Holzprodukten sind als Volumina in Kubikmeter Rundholz-äquivalenten mit der gleichen Dichte der Rohholzernte angegeben (0,48 t Trockenmasse/m³), um eine konsistente Interpretation zu ermöglichen. Nach der Ernte wird das Rundholz entweder direkt als Holzbrennstoff verwendet (52 %) oder als Industrierundholz zu den Verarbeitungsanlagen transportiert (48 %). Sägerundholz wird zu Schnittholz verarbeitet, während für Furnierholz bestimmte Stämme zu Furnierscheiben zugeschnitten und zu Sperrholz weiterverarbeitet werden. Für die Zellstoffproduktion bestimmtes Holz wird zu Zellstoff verarbeitet und trägt mit 40 % zur Papierproduktion bei; die verbleibenden 60 % stammen hier aus Altpapier und sonstigem Zellstoff. Das verbleibende Industrierundholz wird zu einer breiten Palette von Holzprodukten – wie beispielsweise Masten und Pfähle – verarbeitet. Bei diesen Prozessen fallen Hackschnitzel, Späne, Holzreste und Holzfasern als Zwischenprodukte an. Diese werden weiterverarbeitet, um Holzwerkstoffe wie Span-, OSB- und Faserplatten herzustellen, die direkt im Baugewerbe und für Möbel verwendet werden. Außerdem fallen bei der Herstellung der verschiedenen Holzprodukte Abfälle an, die zur Energiegewinnung verbrannt werden. Das CHARM-Modell wendet ähnliche Beziehungen auf die künftige Holznachfrage für Holzprodukte an, um die länderspezifischen Holzerntemengen in den kommenden Jahren abzuschätzen.

Legende:

- Industrial roundwood category = Kategorie Industrierundholz
- Intermediate products = Zwischenprodukte
- Recovered or other materials = Wiedergewonnene oder sonstige Materialien
- LLP = LLP (siehe Erläuterung im Text)
- SLP = SLP
- VSLP = VSLP
- Roundwood harvest = Rundholzernte
- Industrial roundwood = Industrierundholz
- Wood fuel = Holzbrennstoff
- Sawlogs and veneer logs = Sägerundholz und Furnierholz
- Other industrial roundwood = Sonstiges Industrierundholz
- Sawn wood = Schnittholz
- Plywood = Sperrholz
- Wood chips and particles, wood residues = Holz hackschnitzel und -fasern, Holzreste
- Pulpwood = Zellstoffholz
- Wood fibre = Holz faser
- Wood pulp = Holzzellstoff
- Industrial waste = Industrieabfälle
- Poles, piling, posts, fencing, pit props, shingles, shakes = Masten, Pfähle, Pfosten, Zäune, Grubenholz, Schindeln
- Wood-based panels = Holzwerkstoffplatten
- Particleboard + OSB = Span- und OSB-Platten
- Fibreboard = Faserplatten
- Paper and paperboard = Papier und Karton
- Recovered paper = Altpapier (54 %)
- Other pulp = Sonstiger Zellstoff (5 %)
- Previous year = Vorjahr

■ Robustheit der Ergebnisse

Trotz vieler Unsicherheiten stützen Sensitivitätsanalysen einer Reihe von Modellparametern die Robustheit unseres grundlegenden Ergebnisses, wonach Holzentnahmen aus Wäldern zu Emissionen von etwa 3-5 Gt CO₂e/Jahr führen, wenn man sich auf Effekte im dekadischen Zeithorizont fokussiert („Erweiterte Daten“, Abb. 3).

Insgesamt fallen die Ergebnisse wohl konservativ aus, da sie die Auswirkungen von Ernten auf das im Boden gebundene CO₂ aufgrund der unsicheren Freisetzungs- und Bindungsraten nicht berücksichtigen. Ungeachtet dessen zeigte eine Metaanalyse einen durchschnittlichen CO₂-Nachernteverlust von 11 % aus den oberen Bodenschichten und Hinweise auf weitere Verluste in den darunter gelegenen Schichten⁴¹. Eine weitere Studie wies erhebliche Verluste bei der Umwandlung von Naturwäldern in Plantagen nach⁴². Eine besorgniserregende Studie, bei der hochmoderne Messverfahren zum Einsatz kamen, ergab, dass in abgeholzten tropischen Wäldern in Borneo über viele Jahre nach dem Holzeinschlag große jährliche CO₂-Freisetzungen aus dem Boden auftreten (4,2 tC/ha/Jahr)⁴³. Auch die indirekten Auswirkungen der Forstwirtschaft, beispielsweise durch den Straßenbau, die in den Tropen auf ein Vielfaches der direkten Effekte geschätzt wurden, werden bislang nicht berücksichtigt⁴⁴.

Eine gleichermaßen transparente Offenlegung von Eingangsdaten und Quellen durch nachfolgende Forscher dürfte im Laufe der Zeit zu genaueren Schätzungen führen. Auch die näherungsweise Ermittlung der biophysikalischen, nicht THG-bedingten Auswirkungen der Holzgewinnung aus Wäldern könnte zu einer Anpassung der geschätzten Erwärmung führen, doch machen Unsicherheiten zuverlässige Schätzungen nach wie vor unmöglich, was insbesondere für einander widersprechende Schätzungen der Auswirkungen der Wälder auf die Wolkenbildung gilt^{45, 46}.

■ Unempfindlichkeit gegenüber dem Abzinsungssatz

Die Verwendung kleiner oder großer Abzinsungssätze oder die Verlängerung der Amortisationszeiten für den Wald auf 100 Jahre hat überraschend moderate Auswirkungen. Dies wird durch die veränderten Kosten von Sekundärnutzungen in Szenario 1 im Vergleich zu unserem zentralen Ansatz von 4 %/40 Jahren veranschaulicht („Erweiterte Daten“, Abb. 4 und „Erweiterte Daten“, Tabelle 1). Die 100-jährige Amortisation bei 4 % senkt die CO₂-Kosten lediglich um 3 %. Die Variation des Abzinsungssatzes von 2 bis 6 % selbst für 100 Jahre verändert die Kosten nur um -12 % bis + 1 %; selbst 0 % Abzinsung für 40 Jahre reduziert die Kosten nur um 11 %. Große Unterschiede ergeben sich nur bei einer 0%igen Diskontierung über 100 Jahre, die die jährlichen CO₂-Kosten um 40 % reduziert. Diese Effekte fallen nur moderat aus, denn die Nettoemissionen aus der Holzernte verteilen sich in etwa gleichmäßig über die ersten Jahrzehnte, wenn die Abzinsungssätze am stärksten ins Gewicht fallen, und selbst ein niedriger Abzinsungssatz reduziert den Abzinsungsbarwert (PDV) eines Nettozuwachses nach 40 Jahren so stark, dass ein höherer Satz kaum zu anderen Ergebnissen führt. Da sich unsere Ergebnisse auch bei einem niedrigen Abzinsungssatz über 100 Jahre kaum ändern, sind sie robust, wenn in der Gesellschaft auch nur eine geringe Präferenz für kurzfristige gegenüber langfristiger Emissionsminderung besteht.

Tabelle 1 | Analyisierte Szenarien zukünftiger Holzversorgung

Szenario	Annahmen
(1) Sekundärwald-Ernte und -wiederaufwuchs	Das Holz stammt zunächst aus bestehenden Pflanzungen (Stand 2010), das weitere Holz vollständig aus mittelaltem Sekundärwald. Sekundärwälder wachsen nach der Ernte nach.
(2) Sekundärwald-Ernte und -umwandlung	Das Holz stammt zunächst aus bestehenden Pflanzungen (Stand 2010), übriges Holz zunächst aus mittelalten Sekundärwäldern, die in produktive, auch in den Folgejahren Holz liefernde Plantagen umgewandelt werden.
(3) Sekundärwald-Mischernte	Wie Szenario 1, außer dass die Hälfte der geernteten Sekundärwälder reife Wälder sind (40 Jahre älter als mittelalte Wälder)
(4) Neue tropische Plantagen	Wie Szenario 1, außer dass 2010-2050 2 Mio. ha/Jahr tropische Agrarflächen in Plantagen umgewandelt werden; das alternative Nichternteszenario geht davon aus, dass auf den Flächen Sekundärwälder nachwachsen
(5) Hohe Produktivität der Plantagen	Wie Szenario 1, außer dass die Produktivität der bestehenden Plantagen um 25 % steigt
(6) Höhere Ernteeffizienz	Wie Szenario 1, außer dass die Effizienz der Tropenholzernte in Sekundärwäldern steigt (Verringerung des nicht geernteten gefällten Holzes), basierend auf dem geschätzten Szenario mit hoher Effizienz in Ref. 28
(7) Geringerer Bedarf an Holzbrennstoffen	Wie Szenario 1, außer dass der Holzbrennstoffverbrauch von 2010 bis 2050 linear abnimmt und 50 % der Prognose für 2050 erreicht

■ Bedeutung der ökonomischen Effekte

Laut alternativer Annahme unserer Analyse entwickeln sich nicht abgeholzte Wälder ansonsten unabhängig von direkter menschlicher Aktivität: Bäume wachsen, sterben ab und zersetzen sich – und das gleichzeitig.

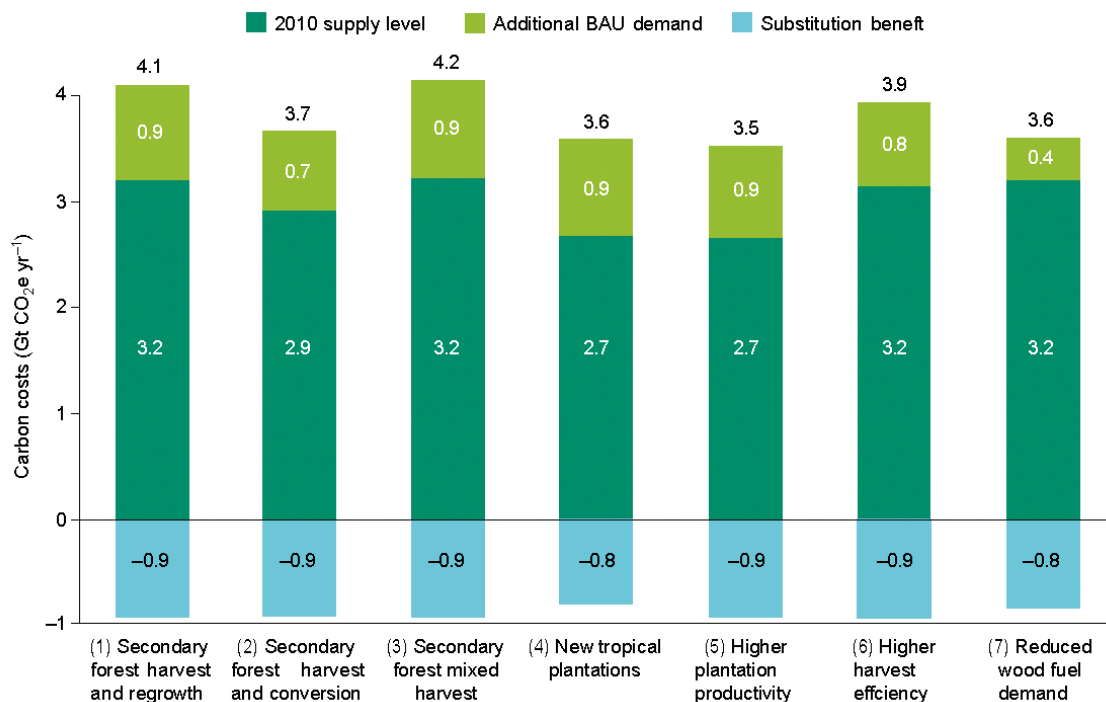
In einigen Beiträgen wird mithilfe ökonomischer Modelle versucht, eine Alternative zu konstruieren, welche die Auswirkungen der Holznachfrage auf die Waldfläche oder die Waldbewirtschaftung berücksichtigt⁴⁷. Glaubwürdige Schätzungen dieser Art erfordern eine große Anzahl unterschiedlicher Angebots- und Nachfragekurven, die sich von Land zu Land unterscheiden dürften und die noch kaum ökonometrischen Abschätzungen unter Anwendung geeigneter Instrumente unterzogen wurden. In globalen Waldmodellen wird auch nicht der Versuch unternommen abzuschätzen, inwieweit die Umwandlung von Ackerland in Wald zur Deckung des Holzbedarfs an einem Ort zu einer kompensatorischen Vergrößerung der Ackerflächen an einem anderen Ort führen würde.

Bis zu einem gewissen Grad ist unsere Analyse jedoch unempfindlich gegenüber diesen Auswirkungen, da unsere Szenarien Grenzen für mögliche künftige Reaktionen auf ökonomische Kräfte aufzeigen. So zeigt Szenario 2, das die Umwandlung aller abgeholzten Sekundärwälder in produktive Plantagen vorsieht, die Auswirkungen einer potenziell extremen Intensivierung. Szenario 4, das mehr tropische Plantagen vorsieht, ist ein ambitioniertes Beispiel für eine verstärkte Waldanpflanzung. Keines der Szenarien senkt die CO₂-Kosten unter 3,5 Gt CO₂e/Jahr.

Unabhängig davon würden Schätzungen unter alternativen Annahmen aufgrund ökonomischer Kräfte – selbst wenn sie belastbar wären – die Schätzungen der absoluten CO₂-Kosten der Holzernte nicht verändern; sie vergleichen bestenfalls die Emissionen der Holzernte mit denen anderer menschlicher Aktivitäten. Geht man bei-

spielsweise in einem Modell davon aus, dass ohne Holzernte mehr Wälder in Ackerland umgewandelt würden, würden in der Analyse die CO₂-Effekte einer menschlichen Aktivität – der Holzernte – mit einer alternativen, emissionsreicheren menschlichen Aktivität – der Landwirtschaft – verglichen. Genauso wie ein Kleinwagen immer noch Emissionen freisetzt – wenn auch in geringerem Maße als ein Oberklassefahrzeug –, würde die Holzernte noch immer CO₂ emittieren, selbst wenn der Vergleich mit anderen menschlichen Aktivitäten entfiel und auch wenn diese Emissionen womöglich niedriger ausfallen als im Ackerbau. Glaubwürdige ökonomische Abschätzungen dieses Vergleichs könnten auf politischer Ebene zielführend sein, doch wäre die Kenntnis der absoluten Emissionen aller Aktivitäten – auch der Holzernte – weiterhin wertvoll. Unter anderem würden die absoluten Schätzungen unter Anwendung dieser Hypothese die CO₂-Minderungen aufzeigen, die sich aus der Verringerung der Ernten bei gleichzeitiger politischer Verhinderung der Ausweitung der Anbauflächen – also einer anderen menschlichen Aktivität – ergeben.

Abb. 3 | Geschätzte durchschnittliche jährliche CO₂-Kosten (Gt CO₂e/Jahr) der zukünftigen globalen Holzernte zwischen 2010 und 2050



Schätzungen der durchschnittlichen, jährlichen, über die Zeit abgezinsten CO₂-Kosten der globalen Holzernte für unterschiedliche Szenarien der zukünftigen Holzversorgung. Alle Szenarien (siehe Tabelle 1) gehen von demselben künftigen Verbrauch aus, mit Ausnahme von Szenario 7, in dem sich der Holzbrennstoffverbrauch im Jahr 2050 gegenüber dem prognostizierten Niveau halbiert. Bei den Schätzungen von 3,6–4,2 Gt CO₂e/Jahr wird ein Abzinsungssatz von 4 % auf Veränderungen der CO₂-Speicherung für 40 Jahre nach dem jeweiligen Holzerntejahr angesetzt. Dabei werden das Nachwachsen der Wälder und andere Veränderungen der CO₂-Speicherpools im Zeitverlauf berücksichtigt, wobei der Wert dieser Veränderungen auf das Erntejahr abgezinst wird. Sie stellen daher die erntejahräquivalenten Emissionen dar, d. h. den Wert der CO₂-Nettoveränderung im jeweiligen Jahr, sofern sämtliche Veränderungen im Erntejahr zum Tragen kämen. (Abb. 4 der erweiterten Daten zeigt die moderaten Auswirkungen unterschiedlicher Abzinsungssätze von 2 bis 6 % bzw. einer Abzinsung über 100 Jahre). Die dunkelgrünen Bereiche der Balken stellen die Emissionen bei einem Holzangebot im Jahr 2010 dar, die hellgrünen Teile die Emissionen zur Deckung der zusätzlichen Nachfrage unter der Annahme „Business as Usual“ (BAU). Die Farbe Blau repräsentiert die geschätzten „Substitutionsvorteile“, also die geschätzte Minderung der Emissionen aus fossilen Brennstoffen und anderen

Produktionsfaktoren, wenn Holz als Ersatz für Beton und Stahl im Bauwesen oder als Holzbrennstoff anstelle von Propangas verwendet wird. Substitutionsvorteile lassen nicht den Schluss zu, dass der Einsatz von Holz insgesamt klimaschonend ist, denn sie berücksichtigen nicht das aus den Speichern freigesetzte CO₂, also die biogenen Emissionen. Genauso wie ein Kleinwagen immer noch Emissionen freisetzt – wenn auch in geringerem Maße als ein Oberklassefahrzeug –, ändern die Substitutionsvorteile nichts an den absoluten Emissionen aus der Holzernte. Quelle: CHARM.

Legende:

- Carbon costs = CO₂-Kosten (Gt CO₂e/Jahr)
- 2010 supply level = Versorgungsniveau 2010
- Additional BAU demand = Zusätzliche BAU-Nachfrage (BAU = Business as Usual)
- Substitution benefit = Substitutionsvorteil
- (1) Sekundärwald-Ernte und -wiederaufwuchs
- (2) Sekundärwald-Ernte und -umwandlung
- (3) Sekundärwald-Mischernte
- (4) Neue tropische Plantagen
- (5) Höhere Plantagenproduktivität
- (6) Höhere Ernteeffizienz
- (7) Geringerer Bedarf an Holzbrennstoffen

■ Eine mögliche Option zur Emissionsminderung

Unsere Schätzungen implizieren nicht, dass die Schätzungen des Anstiegs der atmosphärischen CO₂-Konzentration fehlerbehaftet sind. Vielmehr verursacht der fortlaufende und vermutlich zunehmende Holzeinschlag erhebliche, wenn auch oft vernachlässigte CO₂-Kosten, die der menschlichen Aktivität zugeschrieben werden sollten. Unsere geschätzten Kosten von 3,5-4,2 Gt CO₂e/Jahr bei einer Abzinsung von 4 % entsprechen üblichen Schätzungen für jährliche Emissionen aus Landnutzungsänderungen infolge der Erweiterung von Ackerflächen in Höhe von 3-4 Gt CO₂e/Jahr (Ref. 10, 48).

Diese Erkenntnisse sind in gewisser Weise positiv, denn sie deuten darauf hin, dass das Waldwachstum in höherem Maße zur Senkung der atmosphärischen CO₂-Konzentration beitragen könnte, sofern man die Holzernte reduziert – ein potenzieller Emissionsminderungs-„Hebel“, der in Klimastrategien nur selten berücksichtigt wird. Wie bei anderen Bemühungen zur Eindämmung des Klimawandels sind Reduzierungen nur insoweit sinnvoll, wie sie die Emissionen nicht auf eine andere Quelle verlagern. Sollten im Zeitverlauf mehr Wälder heranwachsen können, würde sich die Größenordnung dieser Nettosenke verringern. Doch könnten wir mit diesen Maßnahmen Zeit gewinnen, um weitere Klimaschutzmaßnahmen wirtschaftlich umsetzen zu können.

■ Online-Inhalte

Methoden, zusätzliche Quellen, Nature-Portfolio-Zusammenfassungen, Quelldaten, erweiterte Daten, ergänzende Informationen, Danksagungen, Peer-Review-Informationen, Einzelheiten zu den Beiträgen und möglichen Interessenkonflikten der Autoren sowie Erläuterungen zur Verfügbarkeit von Daten und Code sind unter <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06187-1> abrufbar.

1. Erb, K.-H. et al. Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nature* 553, 73–76 (2018).
2. Marques, A. et al. Increasing impacts of land use on biodiversity and carbon sequestration driven by population and economic growth. *Nat. Ecol. Evol.* 3, 628–637 (2019).
3. Hoxha, E. et al. Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods. *Build. Cities* 1, 504–524 (2020).
4. Grassi, G. et al. Reconciling global-model estimates and country reporting of anthropogenic forest CO₂ sinks. *Nat. Clim. Change* 8, 914–920 (2018).
5. Newell, J. P. & Vos, R. O. Accounting for forest carbon pool dynamics in product carbon footprints: challenges and opportunities. *Environ. Impact Assess. Rev.* 37, 23–36 (2012).
6. Lippke, B., Wilson, J., Perez-Garcia, J., Bowyer, J. & Meil, J. CORRIM: life-cycle environmental performance of renewable building materials. *For. Prod. J.* 54, 13 (2004).
7. Ciais, P. et al. Carbon accumulation in European forests. *Nat. Geosci.* 1, 425–429 (2008).
8. Fuchs, R., Herold, M., Verburg, P. H., Clevers, J. G. P. W. & Eberle, J. Gross changes in reconstructions of historic land cover/use for Europe between 1900 and 2010. *Glob. Change Biol.* 21, 299–313 (2015).
9. Pan, Y. et al. A large and persistent carbon sink in the World's forests. *Science* 333, 988–993 (2011).
10. Friedlingstein, P. et al. Global carbon budget 2019. *Earth Syst. Sci. Data* 11, 1783–1838 (2019).
11. Hansis, E., Davis, S. J. & Pongratz, J. Relevance of methodological choices for accounting of land use change carbon fluxes. *Glob. Biogeochem. Cycles* 29, 1230–1246 (2015).
12. Wang, J. et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature* 586, 720–723 (2020).
13. Birdsey, R., Pregitzer, K. & Lucier, A. Forest carbon management in the United States: 1600–2100. *J. Environ. Qual.* 35, 1461–1469 (2006).
14. Krausmann, F. et al. Global human appropriation of net primary production doubled in the 20th century. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 110, 10324–10329 (2013).
15. Yang, X. & Tan, M. Attributing global land carbon loss to regional agricultural and forestry commodity consumption. *Environ. Sci. Technol.* 55, 823–831 (2021).
16. Pendrill, F. et al. Agricultural and forestry trade drives large share of tropical deforestation emissions. *Glob. Environ. Change* 56, 1–10 (2019).
17. Curtis, P. G., Slay, C. M., Harris, N. L., Tyukavina, A. & Hansen, M. C. Classifying drivers of global forest loss. *Science* 361, 1108–1111 (2018).
18. Houghton, R. A. & Nassikas, A. A. Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850–2015. *Glob. Biogeochem. Cycles* 31, 456–472 (2017).
19. Richter, D. D. & Houghton, R. A. Gross CO₂ fluxes from land-use change: implications for reducing global emissions and increasing sinks. *Carbon Manag.* 2, 41–47 (2011).
20. Mackey, B., Moomaw, W., Lindenmayer, D. & Keith, H. Net carbon accounting and reporting are a barrier to understanding the mitigation value of forest protection in developed countries. *Environ. Res. Lett.* 17, 054028 (2022).

21. Ter-Mikaelian, M. T., Colombo, S. J. & Chen, J. The burning question: does forest bioenergy reduce carbon emissions? A review of common misconceptions about forest carbon accounting. *J. For.* 113, 57–68 (2015).
22. Haberl, H. et al. Correcting a fundamental error in greenhouse gas accounting related to bioenergy. *Energy Policy* 45, 18–23 (2012).
23. Raven, P. et al. Letter regarding use of forests for bioenergy. <https://www.saveparadiseforests.eu/wp-content/uploads/2021/02/Scientist-Letter-to-Bidenvon-der-Leyen-Michel-Suga-Moon-Re.-Forest-Biomass-February-11-2021.pdf> (2021).
24. European Academies Science Advisory Council. Commentary by the European Academies' Science Advisory Council (EASAC) on forest bioenergy and carbon neutrality. https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Carbon_Neutrality/EASAC_commentary_on_Carbon_Neutrality_15_June_2018.pdf (2018).
25. Harris, N. L. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nat. Clim. Change* 11, 234–240 (2021).
26. Harris, N. L. et al. Attribution of net carbon change by disturbance type across forest lands of the conterminous United States. *Carbon Balance Manag.* 11, 24 (2016).
27. Houghton, R. A. & Nassikas, A. A. Negative emissions from stopping deforestation and forest degradation, globally. *Glob. Change Biol.* 24, 350–359 (2018).
28. Ellis, P. W. et al. Reduced-impact logging for climate change mitigation (RIL-C) can halve selective logging emissions from tropical forests. *For. Ecol. Manag.* 438, 255–266 (2019).
29. Pearson, T. R. H., Brown, S. & Casarim, F. M. Carbon emissions from tropical forest degradation caused by logging. *Environ. Res. Lett.* 9, 034017 (2014).
30. Pearson, T. R. H., Brown, S., Murray, L. & Sidman, G. Greenhouse gas emissions from tropical forest degradation: an underestimated source. *Carbon Balance Manag.* 12, 3 (2017).
31. Bailis, R., Drigo, R., Ghilardi, A. & Masera, O. The carbon footprint of traditional woodfuels. *Nat. Clim. Change* 5, 266–272 (2015).
32. Net Zero Scorecard. Energy & Climate Intelligence Unit <https://eciu.net/netzerotracker> (accessed 23 May 2023).
33. Searchinger, T. D., Wirseniens, S., Beringer, T. & Dumas, P. Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. *Nature* 564, 249–253 (2018).
34. Schlamadinger, B. & Marland, G. in *Forest Ecosystems, Forest Management and the Global Carbon Cycle* (eds. Apps, M. J. & Price, D. T.) 217–229 (Springer, 1996).
35. Cherubini, F., Peters, G. P., Berntsen, T., Strømman, A. H. & Hertwich, E. CO₂ emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming. *Glob. Change Biol. Bioenergy* 3, 413–426 (2011).
36. O'Hare, M. et al. Proper accounting for time increases crop-based biofuels' greenhouse gas deficit versus petroleum. *Environ. Res. Lett.* 4, 024001 (2009).
37. Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M., Deschênes, L. & Samson, R. Considering time in LCA: dynamic LCA and its application to global warming impact assessments. *Environ. Sci. Technol.* 44, 3169–3174 (2010).
38. Daniel, K. D., Litterman, R. B. & Wagner, G. Declining CO₂ price paths. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 116, 20886–20891 (2019).
39. Harmon, M. E. Have product substitution carbon benefits been overestimated? A sensitivity analysis of key assumptions. *Environ. Res. Lett.* 14, 065008 (2019).
40. Leskinen, P. et al. Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation. *Sci. Policy* 7, 28 (2018).
41. James, J. & Harrison, R. The effect of harvest on forest soil carbon: a meta-analysis. *Forests* 7, 308 (2016).
42. Guillaume, T., Muhammad, D. & Kuzyakov, Y. Losses of soil carbon by converting tropical forest to plantations: erosion and decomposition estimated by $\delta^{13}C$. *Glob. Change Biol.* 21, 3548–3560 (2015).
43. Riutta, T. et al. Major and persistent shifts in below-ground carbon dynamics and soil respiration following logging in tropical forests. *Glob. Change Biol.* 27, 2225–2240 (2021).
44. Maxwell, S. L. et al. Degradation and forgone removals increase the carbon impact of intact forest loss by 626%. *Sci. Adv.* 5, eaax2546 (2019).
45. Duveiller, G. et al. Revealing the widespread potential of forests to increase low level cloud cover. *Nat. Commun.* 12, 4337 (2021).
46. Cerasoli, S., Yin, J. & Porporato, A. Cloud cooling effects of afforestation and reforestation at midlatitudes. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 118, e2026241118 (2021).
47. Favero, A., Daigneault, A. & Sohngen, B. Forests: carbon sequestration, biomass energy, or both? *Sci. Adv.* 6, eaay6792 (2020).
48. Searchinger, T., Waite, R., Hanson, C. & Ranganathan, J. *Creating a Sustainable Food Future: A Menu of Solutions to Feed Nearly 10 Billion People by 2050* (World Resources Institute, World Bank, UNDP, UNEP, 2019).

Hinweis des Verlages

Springer Nature nimmt hinsichtlich von Rechtsansprüchen aus veröffentlichtem Kartenmaterial und institutionellen Zugehörigkeiten eine neutrale Position ein.

Open Access

Dieser Artikel unterliegt einer Creative Commons Attribution 4.0 International License, die die Verwendung, Weitergabe, Adaption, Verbreitung und Vervielfältigung in jedwedem Medium oder Format erlaubt, sofern Sie den/die entsprechenden Originalautor(en) und die Quelle nennen, einen Link zur Creative-Commons-Lizenz bereitstellen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Für diesen Artikel von Dritten bereitgestellte Bilder oder sonstige Materialien sind in der Creative-Commons-Lizenz des Artikels enthalten, es sei denn, zu den Materialien erfolgen davon abweichende Quellenangaben. Sollten die Materialien in der Creative-Commons-Lizenz des Artikels nicht enthalten und die von Ihnen beabsichtigte Nutzung im Rahmen gesetzlicher Bestimmungen nicht zulässig sein bzw. über den zulässigen Rahmen hinausgehen, haben Sie die entsprechende Freigabe direkt beim Urheberrechtsinhaber einzuholen. Eine Kopie dieser Lizenz ist unter <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> abrufbar.

© Der/die Autor(en) 2023

Methoden

CHARM-Grundstruktur

CHARM ist ein für den vorliegenden Artikel und ähnliche Forschungsarbeiten entwickeltes biophysikalisches Modell. Es schätzt die Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen und den Landnutzungsbedarf entsprechend dem veranschlagten Holzverbrauch. Die Hauptversion des Modells läuft unter Python unter Verwendung von Excel-Dateien mit Eingangsdaten. CHARM verfügt über Komponenten, die sowohl eine Analyse auf Bestands-ebene als auch eine globale Analyse beinhalten („Erweiterte Daten“, Abb. 5).

Im Gegensatz zu anderen häufig verwendeten CO₂-Bilanzierungsmodellen, die in der Regel von der Gesamtholz-ernte ausgehen und daher nur rückwirkend verwendet werden können, greift CHARM auf Schätzungen der vier wichtigsten Holzproduktkategorien des Verbrauchs pro Land zu, um die Erntemengen abzuschätzen. Diese Holzproduktkategorien umfassen LLP (im Wesentlichen Bau- und Möbelholz), SLP (Papier- und Kartonerzeugnisse) und VSLP, d. h. Holz, das unmittelbar für Bioenergie (VSLP-WFL) verwendet wird, und sehr kurzlebige Produkte – Industrie (VSLP-IND), also Holzabfälle aus der Erzeugung anderer Holzprodukte, die zur energetischen Verwertung verbrannt werden.

Das Modell geht von den vorhandenen Holzquellen und der Nachfrage im Jahr 2010 aus. Die Nachfrage nach verschiedenen Holzprodukten wird zu einer Gesamtnachfrage nach Holz pro Land aggregiert. Bei der Abschätzung der zukünftigen Produktionsmengen geht das Modell von einem konstanten globalen Handelsgeschehen aus. Sollten beispielsweise die holzimportierenden Länder ihre Nachfrage erhöhen, rechnet das Modell mit proportional steigenden Importen und einer proportionalen Erhöhung der Exporte durch die Ausfuhrländer, mit der sie die steigende Nachfrage decken können.

Das Modell unterscheidet zwischen Holz aus bestehenden Plantagenwäldern und Holz aus Sekundärwäldern, jeweils auf der Grundlage ihrer Ernteeffizienz und Wachstumsrate. Plantagenwälder sind Wälder, die nachweislich ausschließlich der Holzproduktion dienen. Sekundärwälder sind per Definition Wälder, die bereits beerntet wurden, und mit Blick auf die Regelungen für das Erntealter von Wäldern mit höherer Wahrscheinlichkeit einen Beitrag zur Holzproduktion leisten. Auf nationaler und globaler Ebene nutzt das Modell Informationen über die Wälder der einzelnen Länder und geht davon aus, dass die Holznachfrage zunächst durch Plantagen gemäß ihrer Verfügbarkeit im Jahr 2010 Maße gedeckt wird und dass für den verbleibenden Teil Sekundärwälder geerntet werden. Das Modell erfasst die Auswirkungen der Ernte dieser Wälder auf den CO₂-Ausstoß gemäß den im Szenario festgelegten Regeln für die Zuteilung und das Management des Wiederaufwuchses.

Der Flächenbedarf ist definiert als die Fläche der Plantagen und der Sekundärwälder, die in einem bestimmten Zeitraum geerntet werden, der in dieser Studie zwischen 2010 und 2050 liegt. In der vorliegenden Version des Modells wird von der optimistischen Annahme ausgegangen, dass das geerntete Holz ausschließlich aus Sekundärwäldern und nicht aus Primärwäldern stammt, die in der Regel eine höhere CO₂-Dichte aufweisen.

Bei der Abschätzung des Landnutzungsbedarfs geht das Modell davon aus, dass die gesamte Bewirtschaftung durch zumindest kleinteilige Kahlschläge erfolgt. (Das Modell lässt auch die Durchforstung von Wäldern zu, die jedoch auf denselben Flächen erfolgt, auf denen letztlich auch geerntet wird, und daher nicht zu einer Vergrößerung der erfassten Erntefläche führt.) Die Annahme des Kahlschlags erhöht die Holzernte pro Hektar und verringert daher die von der Ernte betroffene Fläche. In den Tropen werden zwar die meisten Wälder außerhalb von Plantagen selektiv geerntet, doch bestehen Abgrenzungsprobleme zwischen selektiven Ernten und Kleinstkahlschlägen sowie Unsicherheiten hinsichtlich der durch unterschiedliche Abholzungsverfahren entnommenen Holzmengen, die eine genaue Schätzung der betroffenen Fläche erschweren. Die von CHARM berechnete Landnutzungsfläche sollte daher als Hektar Kahlschlagäquivalent betrachtet werden (d. h. die Flächen, die unter der Annahme, dass alle betroffenen Flächen vollständig gerodet werden, abgeholzt werden müssen). Die geschätzten Ernteeffizienzen – also die Berechnungen der Abfallmengen – basieren jedoch auf regionalen Gegebenheiten und

beinhalten daher geschätzte Verluste aus der selektiven Ernte, sofern diese das vorherrschende Verfahren darstellt, wie z. B. in den Tropen. Die Schätzwerte sind daher Kahlschlagäquivalente unter der Annahme der gegenwärtig gegebenen Ernteeffizienz.

Die beschriebenen Verhältnisse zwischen Verbrauch und Ernte nach Produktkategorien werden nachfolgend mit der Menge des voraussichtlichen Verbrauchs für jedes Jahr von 2010 bis 2050 für das jeweilige Land und die jeweilige Holzproduktkategorie multipliziert, um die Erntemengen pro Land abschätzen zu können (unter Berücksichtigung des Handels). Umgekehrt ordnet das Modell die Holzernte innerhalb eines Landes den verschiedenen Holzprodukten auf der Grundlage von Schätzungen der verschiedenen Produktverbrauchs niveaus zu.

Aufgrund der fragwürdigen Datenqualität der Länder, die nur geringe Mengen an Holz produzieren, haben wir in unserer globalen Analyse die Holzernte in den 30 Ländern geschätzt, die 80 % des weltweiten Holzes produzieren, und diese Menge dann durch 80 % geteilt, um eine globale Schätzung zu erhalten.

CO₂-Kosten und Speicherpools

Zur Abschätzung der THG-Effekte wendet CHARM global einen Ansatz an, der in den 1990er Jahren für die Analyse von Beständen entwickelt wurde³⁴, indem der CO₂-Fluss zwischen verschiedenen CO₂-Pools im Zeitverlauf infolge von Holzernten erfasst wird. Eine Verringerung des in der Gesamtheit aller Pools gespeicherten CO₂ von einem Jahr zum nächsten entspricht einer mengengleichen Emission in die Atmosphäre; eine Zunahme entspricht dagegen einer Entnahme aus der Atmosphäre. Zu den Pools gehören lebendes Holz (einschließlich des nach der Ernte nachwachsenden Waldes), Totholz, Wurzelwerk, Holz in den verschiedenen Produktkategorien und Holz in Deponien. Pro Hektar Wald und pro Jahr ergeben sich die CO₂-Kosten aus der Differenz zwischen (1) der Menge, die ohne zukünftige Ernten gespeichert werden könnte (Nichternteszenario) und (2) der CO₂-Menge, die Wälder und Holzprodukte im Falle zukünftiger Ernten und Anpflanzungen speichern würden (Ernteszenario). Ein positiver Wert entspricht CO₂-Emissionen, ein negativer Wert CO₂-Entnahmen. Bei dieser Berechnung wird also sowohl das weitere Wachstum der Wälder ohne Ernte als auch der Wiederaufwuchs der Wälder nach der Ernte berücksichtigt. Das Modell geht davon aus, dass geerntete Wälder wieder nachwachsen können. Dennoch ist im Modell auch eine Differenzierung zwischen dem Wiederaufwuchs als Sekundärwald oder als Plantage möglich. Mithilfe eines ökonomischen oder verhaltensorientierten Modells könnte man aus unserer Sicht den Versuch unternehmen, die veränderte Wahrscheinlichkeit von Wachstum oder Wiederaufwuchs abzuschätzen. Eine solche Schätzung könnte einen wertvollen Beitrag liefern, sofern sie belastbar ist. Zusätzlich zu den Herausforderungen, die mit solchen Schätzungen (und ihren Auswirkungen anderenorts) verbunden sind, liegt diesem Ansatz jedoch die Annahme zugrunde, dass bei einer Unterbrechung des Wiederaufwuchses durch eine andere menschliche Aktivität die Emissionen in Form der entgangenen CO₂-Speicherung dieser anderen Tätigkeit und nicht der Ernte zugerechnet werden sollten.

Für den Pool der lebenden Vegetation gilt, dass dieser im ersten Jahr der Ernte eliminiert wird, da man von einem Kahlschlagszenario ausgeht. Der Pool wächst jedoch im Laufe der Zeit entsprechend den für den jeweiligen Waldtyp im betreffenden Land definierten Wachstumsraten nach. Der lebende Vegetationspool besteht aus ober- und unterirdischen Biomassepools. Die unterirdische Biomasse wird mithilfe einer gängigen Potenzfunktion für die Ermittlung des Verhältnisses zwischen Wurzel- und Sprossbiomasse geschätzt^{49, 50}. Das Modell berücksichtigt Totholz, das infolge der Ernte im Wald verbleibt – sowohl Schlagabraum als auch Wurzelwerk –, berücksichtigt jedoch keine Veränderungen bei anderem Totholz. Wälder verfügen in der Regel über eine Totholzschicht aus Baumresten, die nicht durch die Holzernte entsteht, sondern sich aus abgestorbenen Bäumen und herabfallenden Ästen entwickelt. Dieser Pool kann zwar im Zeitverlauf Veränderungen unterliegen, doch fehlen Daten – insbesondere ein Vergleich mehrerer Waldtypen – zu den Veränderungen dieses Waldpools infolge der Holzernte. Mit anderen Worten: In der Literatur ist nicht dokumentiert, ob die Holzernte dazu führt, dass bereits gefallenes Totholz schneller entfernt oder abgebaut wird, und wenn ja, wie schnell sich ein solcher CO₂-Pool im Zuge des Wiederaufwuchses erholt. (Bei der Schätzung der Totholzmengen im Wald wird in der Regel nicht unterschieden zwischen solchen,

die durch die Holzernte entstehen – wie im CHARM-Modell erfasst – und solchen, die nicht Ergebnis der Holzernte sind.) CHARM geht daher davon aus, dass diese Totholzquelle durch die Ernte nicht beeinflusst wird, in Szenarien mit und ohne Ernte gleich groß ist und daher für die Ermittlung der Auswirkungen der Holzernte nicht erfasst werden muss.

Das Modell geht davon aus, dass alle VSLP verbrannt und als unmittelbare Emission gezählt werden, alle SLP nach der Nutzung verbrannt werden und dass LLP im Zuge ihrer Zersetzung auf Deponien verbracht werden. Der Deponiepool lässt sich als temporärer CO₂-Speicher auffassen, denn das in Holzprodukten gebundene CO₂ wird.

Daten zu Holzverbrauch, -ernte und -handel

Die Entwicklung des Modells erforderte umfangreiche Anstrengungen, um die Holzerntemengen abschätzen zu können, derer es bedarf, um alle verbrauchten Holzproduktionseinheiten aufgeschlüsselt nach Holzproduktkategorien so abzudecken, dass die Annahmen mit den Verbrauchs-, Produktions- und Handelsdaten der FAO entsprechen. Die Schätzung des Verhältnisses zwischen Produktions- und Verbrauchsdaten stellt eine Herausforderung dar, da FAOSTAT den Verbrauch und die Ernte von Holzprodukten in unterschiedlichen Einheiten erfasst und meldet (z. B. Gewicht gegenüber Volumen und Produkte mit unterschiedlichem, wenn auch nicht angegebenem Wassergehalt und damit Anteil an der Trockenmasse). FAOSTAT erfasst darüber hinaus Holzzwischenprodukte aus den Phasen zwischen der Ernte und dem Endverbrauch, bei deren Herstellung erhebliche Abfälle anfallen, von denen einige nachfolgend für andere Produkte verwendet werden, andere in der Regel hingegen zur Energiegewinnung verbrannt werden. Wir haben auf Informationen aus unterschiedlichen Quellen zurückgegriffen, so Näherungswerte für die Einheitenumrechnung, FAOSTAT-Schätzungen der Standardabfallmengen bei der Zellstoffholzproduktion und Schätzungen der Schnittholzabfälle, die sich aus den Produktionsdaten ergeben und sich daher von Land zu Land unterscheiden. Auch die Handelsdaten waren von uneinheitlicher Qualität und ergaben für einige Länder physikalisch unmögliche oder höchst unwahrscheinliche Verhältnisse zwischen Verbrauch und Produktion. Daher haben wir Regeln entwickelt, um Dateninkonsistenzen zu beseitigen und die Datenqualität zu verbessern. Die verwendeten Schätzmethode werden im Abschnitt „Ergänzende Informationen“ näher erläutert.

Biophysikalische Inputs für Modellierung

Das Modell greift auf eine Reihe biophysikalischer Inputs zurück, so auf die Wachstumsrate des Sekundärwaldes im Laufe der Zeit, die sich sowohl auf den Wald auswirkt, wenn er nicht geerntet wird, als auch auf den Wiederaufwuchs nach der Ernte. Im Hinblick auf die Wachstumsraten und deren Veränderung im Zeitverlauf in großen Waldgebieten gibt es zahlreiche Unsicherheitsfaktoren. Selbst unterschiedliche Waldtypen in ein und demselben zusammenhängenden Gebiet können sehr unterschiedliche Wachstumsraten und -muster aufweisen⁵¹, und auch Versuche, die vorherrschenden Waldtypen räumlich zu erfassen, sind mit hohen Fehlerquoten verbunden⁵². Unser globales Modell leitet die Wachstumsraten für Sekundärwälder von Harris et al.²⁵ ab, die auf unterschiedliche, in deren Fachveröffentlichung und den ergänzenden Informationen dargestellte Quellen zurückgreifen. Wir haben diese Informationen durch weitere Daten zum Zusammenhang zwischen den Wachstumsraten junger und mittelalter Sekundärwälder ergänzt⁴⁹. Ähnlich wie in den Standardrichtlinien des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) für die Treibhausgasbefassung auf Länderebene schätzen Harris et al.²⁵ die Wachstumsraten in breiten Zeitspannen: eine Wachstumsrate für jüngere Wälder unter 20 Jahren und eine weitere für ein Alter über 20 Jahren. Da zeitliche Veränderungen für unser Modell von größerer Bedeutung sind als für die Schätzungen in der genannten Studie, haben wir diese Zeitspannen zur Ableitung kontinuierlicher Wachstumsraten unter Rückgriff auf eine Monod-Funktion verwendet, die sich als angemessener Näherungswert für allgemeine Waldwachstumsraten erwiesen hat^{53, 54}.

Für Plantagen haben wir zunächst die Wachstumsraten von Harris et al.²⁵ auf die in der Spatial Database of Planted Trees (SDPT v.1.0) erfassten Länder angewandt und nachfolgend die borealen Länder (wie Kanada und Russland) und einige EU-Mitgliedstaaten mit durchschnittlichen Wachstumsraten der Sekundärwälder hinzugefügt. Für

wichtige Holzproduzenten wie Brasilien, China, Indonesien und die Vereinigten Staaten haben wir außerdem Daten aus einer Vielzahl von Literaturquellen und Länderberichten zusammengestellt, die im Abschnitt „Ergänzende Informationen“ beschrieben werden.

Weitere Modelleingangsdaten für den jeweiligen Waldtyp umfassen das Wurzel-Spross-Verhältnis, den nach der Ernte verbleibenden Anteil der oberirdischen Biomasse (Schlagabraum), den Anteil der bei der Durchforstung entnommenen oberirdischen Biomasse und die Umtriebszeit. Der dem jeweiligen Produktpool zugewiesene CO₂-Anteil im geernteten Holz ergibt sich aus dem geschätzten Verbrauchsanteil des jeweiligen Produkts in dem betreffenden Land. Das Modell erfordert auch Zerfallsraten für den jeweiligen CO₂-Pool und Eingangsdaten für die Zuordnung dieses CO₂ zu verschiedenen nachfolgenden Pools (z. B. Deponien). Alle Eingabewerte und deren Quellen sowie weitere Einzelheiten zu den Monod-Funktionen sind in den „Ergänzenden Informationen“ in Abschnitt 3 beschrieben. Die ergänzende Tabelle 5 enthält gewichtete durchschnittliche nationale Waldwachstumsparameter für die 30 für die vorliegende Auswertung berücksichtigten Länder. Die ergänzende Tabelle 6 enthält die verwendeten Umtriebszeiten der Plantagen und die Informationsquellen. Die ergänzende Tabelle 7 schlüsselt die Schlagabraumengen für Sekundärwälder und Plantagen nach Ländern auf. Die ergänzende Tabelle 8 beschreibt die Halbwertszeiten, die für den CO₂-„Zerfall“ in unterschiedlichen CO₂-Pools zugrunde gelegt wurden. Die Unsicherheiten der Wachstumsraten der Sekundärwälder und des Wurzel-Spross-Verhältnisses sind in den „Ergänzenden Informationen“ in Abschnitt 5 dargestellt.

Produktionsemissionen und Substitutionswerte

Auch bei der Herstellung von Holzprodukten werden fossile Emissionen und möglicherweise Spurengase bei der Pflanzung, der Ernte und dem Produktionsprozess freigesetzt. Da auf globaler Ebene zahlreiche Datenunsicherheiten dahingehend bestehen, wieviel fossile Energie bei der Holzernte und der Herstellung von Holzprodukten verbraucht wird, bezieht CHARM diese Emissionen derzeit nicht in die Betrachtung ein.

Obwohl sich in Vergleichen der Emissionen aus der Verwendung von Holzprodukten und alternativen Nicht-Holz-Produkten die absoluten Emissionen aus dem Einsatz von Holzprodukten nicht reduzieren, ist von großem Interesse, ob die Verwendung von Holz gegenüber den Alternativen geringere Emissionen verursacht. Eine entsprechende vollständige Berechnung erfordert die Ermittlung sowohl der Auswirkungen auf biogenes CO₂ als auch der Produktionsemissionen. Dennoch – und weil CHARM die biogenen Emissionen separat berechnet – ist CHARM nun so programmiert, dass das Modell die potenziellen „Substitutions“ einsparungen bei den Produktionsemissionen abschätzen kann, wenn Holz als Ersatz für Beton und Stahl im Bauwesen zum Einsatz kommt. Aufgrund der unterschiedlichen Mengen der einzelnen Materialien, die für unterschiedliche Gebäudetypen und Bauweisen benötigt werden, schwanken die Schätzwerte erheblich. In unserer Berechnung verwenden wir einen zentralen Wert aus der Auswertung anderer Studien⁴⁰, und zwar 1,2 t CO₂, die je Tonne CO₂ in Holz, das im Bauwesen als Ersatz für Beton und Stahl verwendet wird, im Produktionsprozess eingespart werden. Der Vorteil hängt auch vom Anteil des im Bauwesen eingesetzten geernteten Holzes ab. Wie in den „Ergänzenden Informationen“ beschrieben, haben wir nach Ländern aufgeschlüsselte Schätzwerte von Zhang et al.⁵⁵ verwendet.

CHARM schätzt darüber hinaus die Substitutionsvorteile durch die Verwendung von traditionellem Brennholz und Holzkohle anstelle von fossilen Brennstoffen. Unter der Annahme, dass als Alternative Propangas eingesetzt würde, setzen wir einen Substitutionsfaktor von 0,175 t CO₂ an, die durch den vermiedenen Einsatz fossiler Brennstoffe pro Tonne CO₂ aus Holz eingespart werden. Dieser Wert basiert auf Schätzungen der relativen Energieausbeute, der Effizienz der Holzkohle- und Brennholzproduktion sowie der Leistung des Ofens und der Nutzungseffizienz laut Hauptautor von Ref. 31.

Berücksichtigung des Zeitfaktors bei der CO₂-Bilanzierung

Neben der Abschätzung der physikalischen Veränderungen der Emissionen und des Abbaus von Treibhausgasen in der Atmosphäre im Zeitverlauf als Ergebnis der jährlichen Holzernte ermittelt das Modell den Schätzwert dieser Veränderungen im Erntejahr unter Verwendung unterschiedlicher Abzinsungssätze. Wird im Modell ein Abzinsungssatz von Null angesetzt, resultiert daraus eine Abschätzung der physikalischen Veränderung des atmosphärischen CO₂ nach dem analysierten Zeitraum, also 40 oder 100 Jahre nach der betreffenden Ernte. Bei einem Abzinsungssatz von Null wird davon ausgegangen, dass die Veränderung des atmosphärischen CO₂ am Ende des Zeitraums den gleichen Wert aufweist wie eine für das Erntejahr angenommene identische CO₂-Veränderung.

Durch die Diskontierung wird früheren Emissionsreduktionen ein höherer Wert zugewiesen. Das Modell drückt die CO₂-Emissionen als Wert aus, jedoch ausgehend von einer Äquivalenz zu den Emissionen, die nur im Jahr der Ernte anfallen („erntejahräquivalente“ Emissionen). Diese Form der Bewertung stellt einen Zusammenhang zwischen dem Wert der Emissionen bzw. der Emissionsminderung in unterschiedlichen Jahren her, muss aber nicht notwendigerweise einen absoluten Geldbetrag pro Tonne CO₂ angeben, der gesondert zu diskutieren und festzulegen wäre.

Die Wahl des Abzinsungssatzes ist eine politische Entscheidung, die zwei Vorteile einer früheren Emissionsminderung widerspiegeln kann: zum einen die wertmäßige Erfassung sofortiger Reduktionen, um sowohl zwischenzeitliche als auch dauerhafte Schäden durch den Temperaturanstieg (z. B. die Auswirkungen des Abschmelzens von Eisschilden oder den Verlust der biologischen Vielfalt) zu begrenzen und den Zeitpunkt des Überschreitens einer Reihe von Klimaschwellenwerten zu verschieben. Eine frühere Eindämmung hält die Schäden sofort in Grenzen und verlängert die Zeit, in der die Menschen Technologien weiterentwickeln und den politischen Willen und die Ressourcen zur Bekämpfung des Klimawandels organisieren können, bevor die Schwellenwerte überschritten werden.

Der andere Vorteil einer früheren Emissionsminderung ergibt sich aus dem Zeitwert des Geldes. Bei Anwendung eines Abzinsungssatzes von 4 % wird dem zusätzlichen CO₂ in der Atmosphäre pro Jahr ein „Mietzins“ von 4 % zugewiesen. Das entspricht dem Preis, der entsteht, wenn man sich zu den allgemein geschätzten langfristigen Kapitalkosten Geld leiht, um eine andere Person dafür zu bezahlen, dass sie die Emissionen zum Ausgleich verringert. Wie in Ref. 33 im Zusammenhang mit der Landnutzungsumwandlung erläutert, führt dieser Abzinsungssatz auch zu Ergebnissen, die mit der in der US-Bioenergiepolitik für die Landumwandlung angesetzten Amortisationszeit vereinbar sind.

Der Wert, der für jedes Jahr nach der Ernte auf das Erntejahr abgezinst wird, entspricht der Veränderung des atmosphärischen CO₂ im betrachteten Jahr, also der Differenz zwischen der Emission (oder Entnahme) in diesem Jahr und der Emission (oder Entnahme) im vorangegangenen Jahr. Für das Jahr der Ernte h (z. B. 2010) lautet diese Formel:

$$PDV_h = \sum_{t=0}^N \frac{\Delta C_{\text{change},t}}{(1+d)^t} \quad (1)$$

wobei t die Anzahl der Jahre seit der Ernte im Jahr h , d der Abzinsungssatz (4 %), N die Anzahl der Jahre für das Wachstum seit der Ernte im Szenario (z. B. 40 oder 100 Jahre) und $C_{\text{change},t}$ die Veränderung der Emissionen (oder Entnahmen) im Jahr t ist. Im Abschnitt „Erweiterte Daten“ zeigt Tabelle 2 die Berechnung der Abzinsung über die Zeit von 4 % über 40 Jahre für ein Szenario der Umwandlung in Plantagen, das in Abb. 6 im Abschnitt „Erweiterte Daten“ dargestellt ist.

Der Abzinsungsbarwert (PDV) wird für jedes auf die Ernte folgende Jahr identisch berechnet. Der kumulierte PDV

der Emissionen zwischen 2010 und 2050 entspricht der Summe dieser CO₂-Kosten über 40 Jahre, und sie stellen daher nicht das CO₂ dar, das der Atmosphäre im Jahr 2050 durch die Holzernte zwischen 2010 und 2050 hinzugefügt wird. Diese alternative CO₂-Menge wäre größer, da sie den Wiederaufwuchs der nach 2010 geernteten Wälder nicht über die gesamten 40 Jahre berücksichtigen würde. Mit dieser Methode wird jedoch ein abgezinster Wert für den prognostizierten Wiederaufwuchs der Wälder zugewiesen, unabhängig davon, in welchem Jahr die Ernte stattfindet – zum Beispiel auch im Jahr 2049.

Für die nationalen und globalen Ergebnisse bestimmen wir nachfolgend die gesamten CO₂-Kosten im Jahr t , indem wir den PDV pro Hektar mit der Anzahl der geernteten Hektar desselben Waldtyps im Erntejahr multiplizieren. Dieser Schritt erfolgt separat für Plantagen und Sekundärwälder und führt zu folgender Formel:

$$\text{PDV}_{\text{total}} = \sum_{h=2010}^K \text{PDV}_{\text{secondary},h} \times a_{\text{secondary},h} + \sum_{h=2010}^K \text{PDV}_{\text{plantation},h} \times a_{\text{plantation},h} \quad (2)$$

wobei h für das Erntejahr beginnend mit 2010, K für die Anzahl der Erntejahre (z. B. 40 Jahre) und a für die neue Fläche eines im Jahr h geernteten Waldtyps steht. Im nächsten Teilabschnitt sind die für die jeweiligen Waldtypen erforderlichen Flächenberechnungen beschrieben.

Berechnung der Landfläche

Da der Umfang und die Menge des bei selektiven Ernten entnommenen Holzes nicht bekannt sind, berechnet CHARM die Landnutzungsfläche als Hektar Kahlschlagäquivalent (d. h. die Flächen, die unter der Annahme geerntet werden müssen, dass alle betreffenden Flächen vollständig gerodet werden). Diese Annahme erhöht die Holzerntemenge pro Hektar im Vergleich zu selektiven Ernten und verringert daher den Schätzwert der von der Ernte betroffenen Fläche. Diese Methode wird angewandt, da nur unzureichende Daten über die Menge des durch Kahlschlag und die Menge des durch selektive Ernte geernteten Holzes verfügbar sind. Diese Berechnung des Flächenbedarfs spiegelt die pro Hektar erzeugte Holzmenge bei den geschätzten Effizienzgraden je Land wider. Die benötigte Holzmenge basiert zudem auf dem Verhältnis zwischen dem Verbrauch in den einzelnen Holzproduktkategorien und den für die Deckung dieses Verbrauchsniveaus erforderlichen Erntemengen, d. h. unter Berücksichtigung der Abfälle. Für den Zeitraum 2010-2050 geht das Modell von einem linearen Wachstum des Verbrauchs für jede Produktkategorie in dieser Periode aus. Die Plantagen werden zuerst beerntet, und aus den Sekundärwäldern wird nachfolgend Holz entnommen, soweit dies für die Abdeckung der verbleibenden Holz-mengen erforderlich ist.

Projektion des Holzbedarfs für 2050

Um die künftige Holznachfrage zu prognostizieren, geht CHARM von den Verbrauchswerten des Jahres 2010 aus (berechnet als Durchschnitt des Verbrauchs von 2006 bis 2014), und zwar für die einzelnen Länder für den Verbrauch und die Produktion verschiedener Holzprodukte sowie für die Ernteerträge, wobei nach einer Reihe von Qualitätssicherungsschritten Daten aus FAOSTAT⁵⁶ verwendet werden (siehe ergänzende Tabelle 1). Pro Land und Jahr haben wir zunächst die Nettoexporte berechnet, indem wir die Importe von den Exporten abgezogen haben. Bei den Prognosen der zukünftigen Entwicklung wird davon ausgegangen, dass der Anteil des Verbrauchs, der durch Nettoimporte gedeckt ist, im jeweiligen Land gegenüber dem Basisjahr konstant bleibt und dass jedes Land denselben Anteil an den globalen Gesamtexporten liefert.

Um die künftige Nachfrage nach Holzprodukten nach Ländern abzuschätzen, verwenden wir ein log-transformiertes

Modell mit festen Effekten⁵⁷ und prognostizieren die Holznachfrage pro Land und Produktkategorie. Das Modell mit festen Effekten wendet dieselbe Beziehung zwischen dem Holzverbrauch und dem Wachstum des Pro-Kopf-Einkommens der einzelnen Länder an, geht aber von den ursprünglichen Holzverbrauchswerten der einzelnen Länder aus. Wir haben die Länder in Industrie- und Entwicklungsländer unterteilt, um eine Überschätzung des zukünftigen Holzverbrauchs in Ländern mit hohem Einkommensniveau zu vermeiden. Für den Verbrauch von Holzprodukten haben wir – auf der Grundlage der verfügbaren Daten – Schnittholz und Holzwerkstoffplatten als repräsentativ für LLP, Papier und Karton als repräsentativ für SLP und Holzbrennstoffe als repräsentativ für VSLP-WFL ausgewählt. Die historischen sozioökonomischen Statistiken umfassen das BIP und die Bevölkerung laut Angaben der Weltbank für den Zeitraum 1961-2020⁵⁸. Für das Pro-Kopf-BIP und die Bevölkerungsentwicklung haben wir prozentuale Wachstumsprognosen für den Zeitraum 2010-2050 verwendet, die auf einer durchschnittlichen BIP-Wachstumsprognose aus drei Quellen beruhen: der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD; „middle of the road“)⁵⁹, dem Szenario SSP2⁶⁰ des International Institute for Applied Systems Analysis und einer linearen Trendkurve, die wir für den Zeitraum 1991-2010 berechnet haben. Zu den prädiktiven (unabhängigen) Variablen des Modells mit festen Effekten gehören die Bevölkerung, das Pro-Kopf-BIP und das Jahr nach 2000, das stellvertretend für die technologischen und politischen Veränderungen seit dem Jahr 2000 steht, als der Internet-Boom begann und sich nachfolgend auf den Papierbedarf auswirkte. Das Modell mit festen Effekten stellt zwölf Beziehungen („Modelle“) her, die auf drei unterschiedlichen Holzproduktkategorien, zwei verschiedenen Trendkurven für strie- und Entwicklungsländer und zwei Regressionsgleichungen basieren (eine unter Einschluss unserer Zeitvariable und eine ohne diese Variable). Alle Modelle weisen hohe R²-Gesamtwerte (über 0,88) und signifikante *p*-Werte (über 0,05) sowie einen Standardfehler der Residuen zwischen 0,32 und 0,84 auf (siehe ergänzende Tabelle 2). Wir wenden die Koeffizienten (ergänzende Tabelle 3) der Prädiktorvariablen auf unabhängig geschätzte Änderungen der zukünftigen Bevölkerung und des BIP nach Ländern an und nutzen die daraus resultierenden geschätzten Verbrauchsniveaus als Ausgangsdaten für das Modell. Der Abschnitt „Ergänzende Informationen“ enthält Statistiken zu den Modellierungsergebnissen sowie weitere Informationen zum Modell mit festen Effekten und zu seiner Anwendung. Tabelle 3 im Abschnitt „Erweiterte Daten“ stellt den Verbrauch verschiedener Holzprodukte nach Ländern im Jahr 2010 und die entsprechenden Projektionen für das Jahr 2050 dar. Die ergänzende Tabelle 4 vergleicht unsere Projektionen mit denen anderer Studien.

Verfügbarkeit von Daten

Die Eingangsdaten für das CHARM-Modell sind zum Großteil im Abschnitt „Ergänzende Informationen“ beschrieben. FAOSTAT-Produktions- und Handelsdaten zu forstwirtschaftlichen Erzeugnissen auf nationaler Ebene sind verfügbar unter <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Historische BIP- und Bevölkerungsdaten auf Länderebene sind abrufbar unter <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD> und <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/CSV/>. Sozioökonomische Zukunftsszenarien finden sich unter <https://tnt-cat.iiasa.ac.at/SspDb> und greifen auf Daten aus <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD> zurück. Alle anderen in dieser Studie verwendeten Daten sind in den Eingabedateien enthalten, die als Teil des Programmcodes für das CHARM-Modell verfügbar sind (siehe unten).

Verfügbarkeit des Programmcodes

Für das CHARM-Modell sind Ein- und Ausgabedaten auf Länderebene, die die Ergebnisse dieser Studie stützen, in Verbindung mit dem Modellcode verfügbar (<https://github.com/wri/charm-global-level>).

49. Mokany, K., Raison, R. J. & Prokushkin, A. S. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Glob. Change Biol.* 12, 84–96 (2006).
50. Bernal, B., Murray, L. T. & Pearson, T. R. H. Global carbon dioxide removal rates from forest landscape restoration activities. *Carbon Balance Manag.* 13, 22 (2018).
51. Tomotsune, M. et al. Comparison of carbon dynamics among three cool-temperate forests (*Quercus serrata*, *Larix kaempferi* and *Pinus densiflora*) under the same climate conditions in Japan. *J. Environ. Prot.* 10, 929–941 (2019).
52. Brus, D. J. et al. Statistical mapping of tree species over Europe. *Eur. J. For. Res.* 131, 145–157 (2012).
53. Poorter, L. et al. Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature* 530, 211–214 (2016).
54. McMahon, S. M., Parker, G. G. & Miller, D. R. Evidence for a recent increase in forest growth. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 107, 3611–3615 (2010).
55. Zhang, X., Chen, J., Dias, A. C. & Yang, H. Improving carbon stock estimates for in-use harvested wood products by linking production and consumption—a global case study. *Environ. Sci. Technol.* 54, 2565–2574 (2020).

56. FAOSTAT Forestry Production and Trade (FAO, accessed 13 September 2021); <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>.
57. Wooldridge, J. M. *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data* (MIT Press, 2010).
58. World Development Indicators (World Bank, accessed 15 September 2021); <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD>.
59. Dellink, R., Chateau, J., Lanzi, E. & Magné, B. Long-term economic growth projections in the Shared Socioeconomic Pathways. *Glob. Environ. Change* 42, 200–214 (2017).
60. Cuaresma, J. C. Income projections for climate change research: a framework based on human capital dynamics. *Glob. Environ. Change* 42, 226–236 (2017).

Danksagung

Das Forschungsvorhaben wurde von der Internationalen Klima- und Waldinitiative Norwegens, der Good Energies Foundation, der David and Lucile Packard Foundation und dem niederländischen Außenministerium finanziert. Wir danken N. Harris (WRI), D. Gibbs (WRI) und R. Birdsey (Woodwell Climate Research Center) für die Bereitstellung von Daten zum CO₂-Gehalt und zur Wachstumsrate von Wäldern, die bei der Modellierung verwendet wurden. Weitere wertvolle Hinweise erhielten wir von S. Berry (Yale University), L. Malaguzzi Valeri (WRI), H. Gu und S. Liang (US-Landwirtschaftsministerium), T. Hudiburg (University of Idaho), G. Busby (Greenwood Resources), R. Bailis (Stockholm Environment Institute) und M. O'Hare (University of California in Berkeley).

Beiträge der Autoren

L.P. leitete die Entwicklung des CHARM-Modells, trug zum Artikel bei und führte Forschungsarbeiten durch. T.D.S. erarbeitete das Forschungskonzept und führte Forschungsarbeiten durch, trug zum CHARM-Modell bei und verfasste den Artikel. J.Z. leistete einen Beitrag zum CHARM-Modell, führte Forschungsarbeiten durch und trug zum Abschnitt zu den Methoden bei. R.W. führte Recherchen durch und trug zum Artikel bei.

Erklärung zu möglichen Interessenkonflikten

Die Autoren erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen.

Weitere Informationen

Die Online-Version enthält zusätzliches Material, das unter <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06187-1> abrufbar ist.

Korrespondenz und Materialanfragen

sind an Timothy D. Searchinger oder Liqing Peng zu richten.

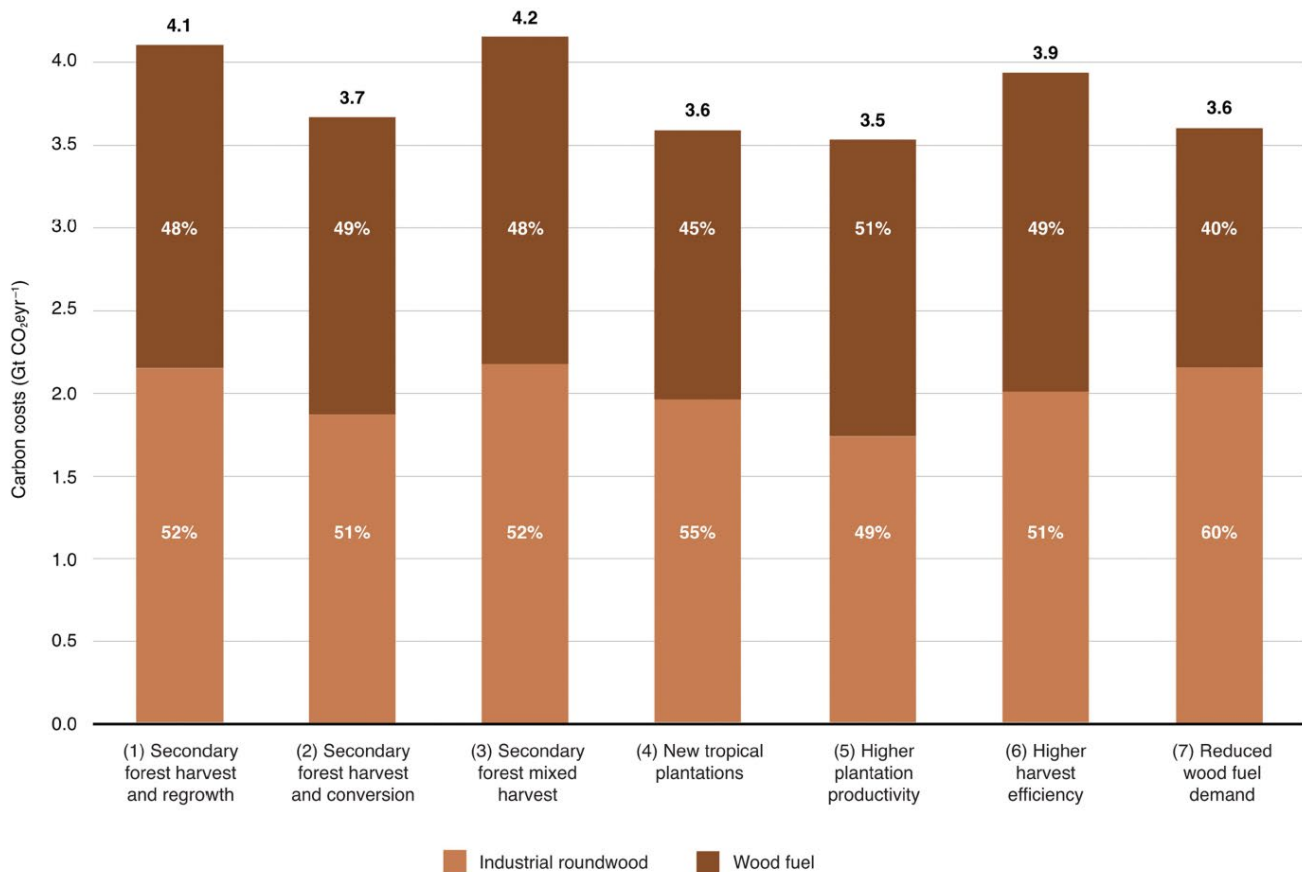
Peer-Review-Angaben

Nature dankt William Moomaw, Wenhua Xiang und dem/den anderen, anonymen Gutachter(n) für ihren Beitrag zur Peer-Review des vorliegenden Artikels.

Informationen zu Nachdrucken und Genehmigungen

<http://www.nature.com/reprints>

Erweiterte Daten Abb. 1 | Anteil der jährlichen, auf Industrierundholz und Holzbrennstoff entfallenden CO₂-Kosten für 2010-2050



Holzbrennstoff ist Holz, das eigens für die energetische Verwertung geerntet wird. Industrierundholz ist für die Erstverwendung für andere Holzprodukte geerntetes Holz, doch werden auch Rundholzabfälle aus der Industrie der energetischen Verwertung zugeführt. Das Diagramm zeigt, dass die Emissionen, die Holzbrennstoffen und Industrierundholz zuzuschreiben sind, in etwa gleich hoch sind, mit Ausnahme von Szenario 7, bei dem die zukünftige Nutzung von Brennholz im Jahr 2050 im Vergleich zu den prognostizierten Werten linear auf 50 % sinkt. Quelle: CHARM.

Legende:

Carbon costs = CO₂-Kosten (Gt CO₂e/Jahr)

Secondary forest harvest and regrowth = Sekundärwald-Ernte und -wiederaufwuchs

Secondary forest harvest and conversion = Sekundärwald-Ernte und -umwandlung

Secondary forest mixed harvest = Sekundärwald-Mischernte

New tropical plantations = Neue tropische Plantagen

Higher plantation productivity = Höhere Plantagenproduktivität

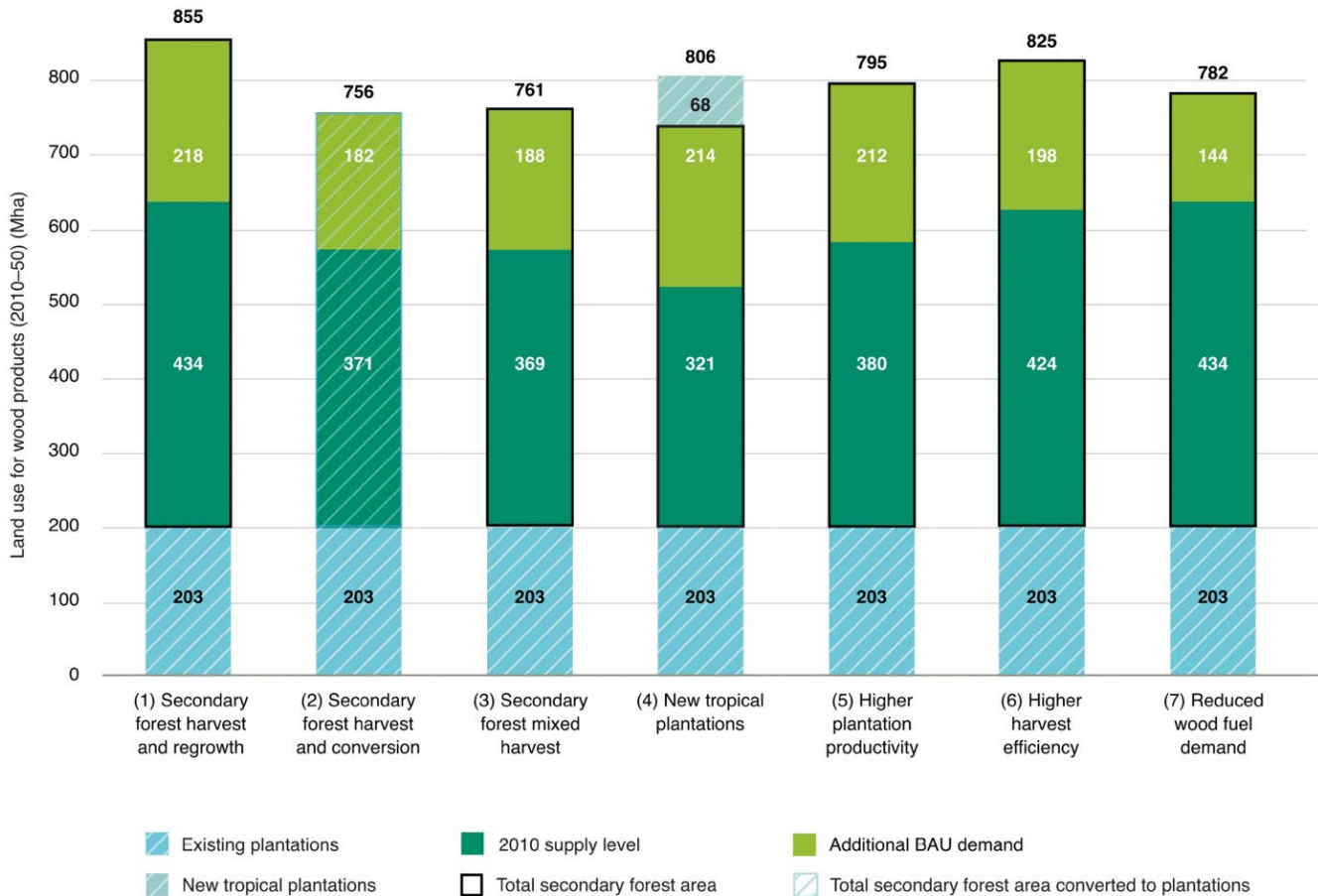
Higher harvest efficiency = Höhere Ernteeffizienz

Reduced wood fuel demand = Geringerer Bedarf an Holzbrennstoffen

Industrial roundwood = Industrierundholz

Wood fuel = Holzbrennstoffe

Erweiterte Daten Abb. 2 | Geerntete Flächen 2010-2050 (Kahlschlagäquivalente, Mio. ha)



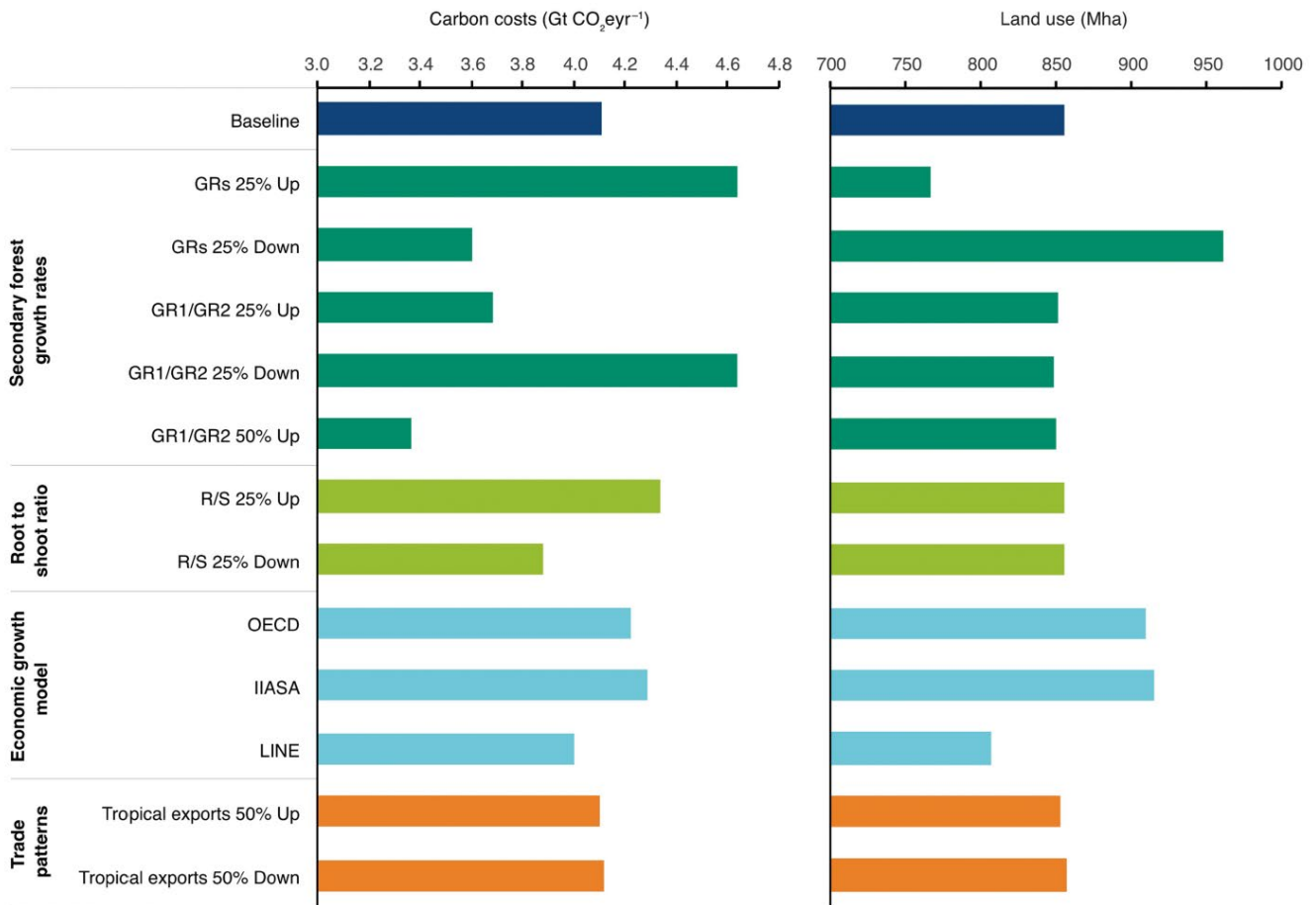
Das Diagramm zeigt, dass je nach Szenario in diesem 40-Jahres-Zeitraum auf 761 bis 855 Mio. Hektar Holz geerntet werden muss. Dabei wird unterschieden zwischen den Ernten, die zur Deckung des Verbrauchs von 2010 erforderlich sind, und denjenigen, die zur Deckung der zusätzlichen BAU-Nachfrage („Business as Usual“) erforderlich sind. Kahlschlagäquivalente sind die Fläche, auf der Wälder durch Kahlschlag geerntet wurden, allerdings mit der nun für die nationale Holzernte insgesamt geschätzten, bei selektiver Ernte oft niedrigeren Effizienz. Mehr als einmal beerntete Plantagenflächen werden nur einmal gezählt. Quelle: CHARM.

Legende:

Land use for wood products (2010-50) (Mha) = Landnutzung für Holzprodukte (2010-50) (Mio. ha)
 Secondary forest harvest and regrowth = Sekundärwald-Ernte und -wiederaufwuchs

Secondary forest harvest and conversion = Sekundärwald-Ernte und -umwandlung
 Secondary forest mixed harvest = Sekundärwald-Mischernte
 New tropical plantations = Neue tropische Plantagen
 Higher plantation productivity = Höhere Plantagenproduktivität
 Higher harvest efficiency = Höhere Ernteeffizienz
 Reduced wood fuel demand = Geringerer Bedarf an Holzbrennstoffen
 Existing plantations = Bestehende Plantagen
 New tropical plantations = Neue tropische Plantagen
 2010 supply level = Versorgungsniveau 2010
 Total secondary forest area = Gesamtfläche Sekundärwald
 Additional BAU demand = Zusätzliche BAU-Nachfrage (BAU = Business as Usual)
 Total secondary forest area converted to plantations = In Plantagen umgewandelte Gesamt-Sekundärwaldfläche

Erweiterte Daten Abb. 3 | Sensitivitätsanalysen der CO₂-Emissionen und Landnutzungsänderungen in Szenario 1 als Reaktion auf Änderungen der Wachstumsraten, der Wurzel-Spross-Verhältnisse, des Pro-Kopf-Wirtschaftswachstums und des Handelsgeschehens

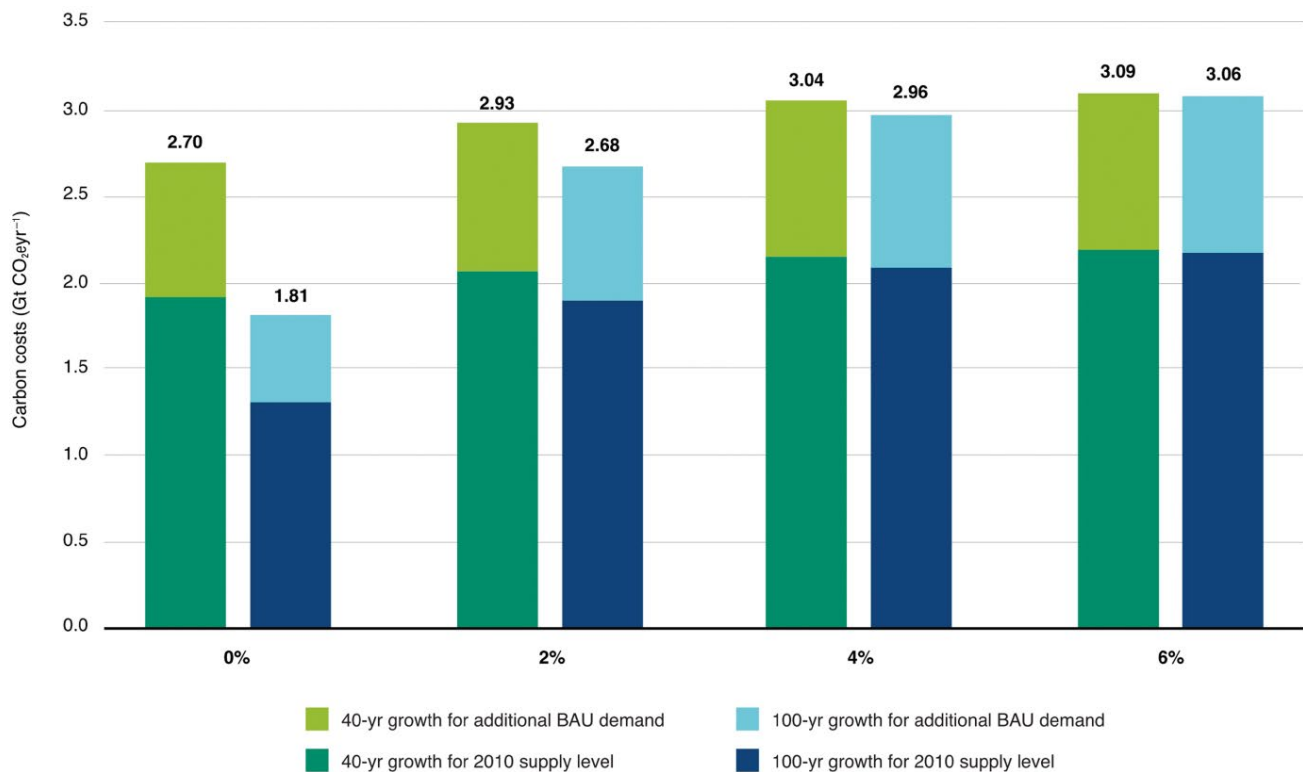


GR = growth rates (Wachstumsraten). GR1 ist die Wachstumsrate im jungen Alter, GR2 diejenige im mittleren Alter; beide werden für die Parametrisierung einer Monod-Funktion verwendet; ein GR1/GR2-Anstieg oder Rückgang (up/down) erhöht oder verringert das Verhältnis Wachstum junges zu Wachstum mittleres Alter um den angegebenen Prozentwert; R/S = root to shoot ratio (Wurzel-Spross-Verhältnis). OECD und IIASA geben unterschiedliche Prognosen für die Entwicklung des Pro-Kopf-BIP in den einzelnen Regionen an, und LINE schätzt das künftige Wachstum auf der Grundlage der Fortschreibung der bisherigen linearen Trendkurven. Das Handelsgeschehen variiert den Anteil der weltweiten Exporte aus tropischen Wäldern (einschließlich Plantagen) im Vergleich zu 2010. Weitere Beschreibungen und tabellarische Daten finden sich im Abschnitt „Ergänzende Informationen“. Quelle: CHARM.

Legende:

Secondary forest growth rates = Wachstumsraten Sekundärwald
 Root to shoot ratio = Wurzel-Spross-Verhältnis
 Economic growth model = Modell für Wirtschaftswachstum
 Trade patterns = Handelsgeschehen
 Baseline = Ausgangswert
 Carbon costs = CO₂-Kosten (Gt CO₂e/Jahr)
 Land use (Mha) = Landnutzung (Mio. ha)
 Tropical exports = Exporte aus tropischen Wäldern

Erweiterte Daten Abb. 4 | Auswirkungen des Abzinsungssatzes und der Wachstumsjahre auf die CO₂-Kosten der Ernte von Sekundärwäldern in Szenario 1

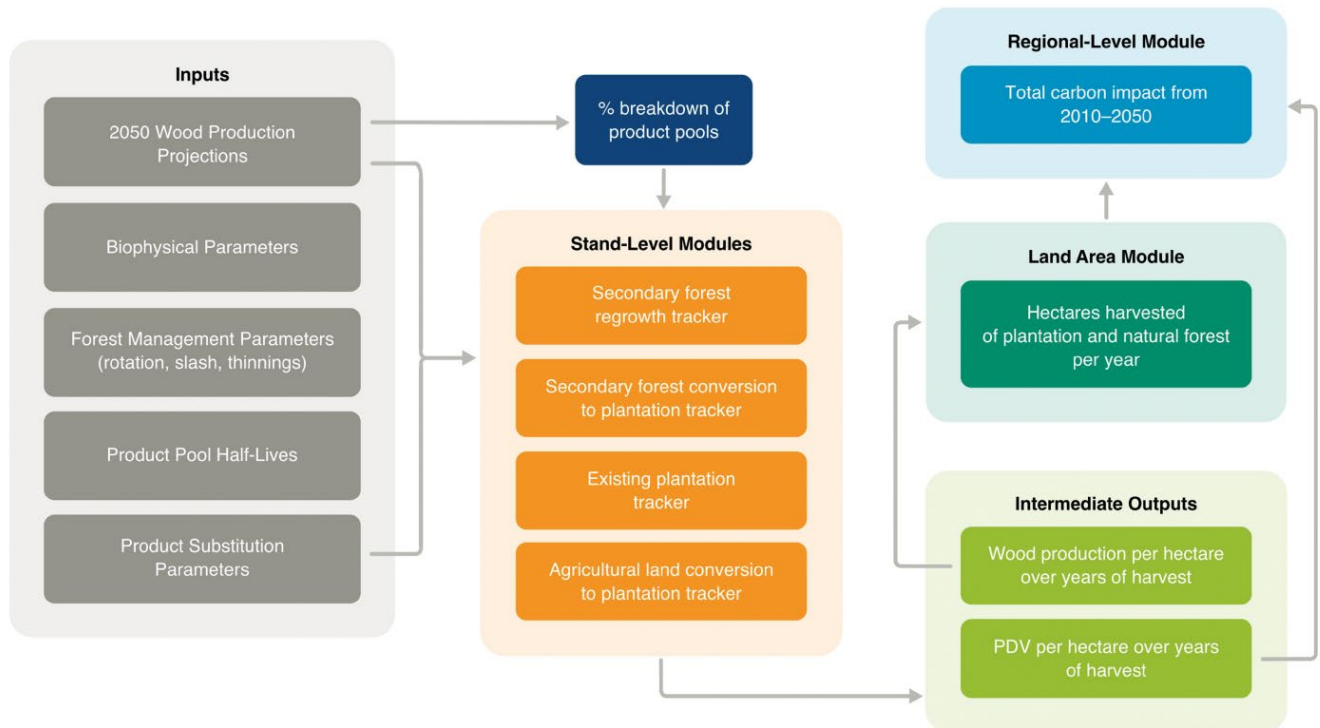


Das Diagramm enthält verschiedene Schätzungen der CO₂-Kosten für die Ernte von Sekundärwäldern (keine Plantagen) in Szenario 1, wobei die Abzinsungssätze von 0 % bis 6 % variieren und die Abzinsung über 40 oder 100 Jahre erfolgt. Die linken Balken zeigen die Abzinsungseffekte der Ernte eines jeden Jahres auf die Veränderungen in den CO₂-Pools über 40 Jahre; die rechten Balken diskontieren diese Auswirkungen auf die Veränderungen über 100 Jahre. Die prozentualen Veränderungen sind relativ moderat, mit Ausnahme der Anwendung eines Abzinsungssatzes von 0 % über 100 Jahre. Dies deutet darauf hin, dass die Kosten der Holzernte ähnlich bewertet werden, solange auch nur eine mäßige gesellschaftliche Präferenz für eine frühere statt einer späteren Emissionsminderung besteht. Quelle: CHARM.

Legende:

Carbon costs = CO₂-Kosten (Gt CO₂e/Jahr)
 40-yr growth for additional BAU demand = 40-Jahres-Wachstum für zusätzliche BAU-Nachfrage (BAU = Business as Usual)
 40-yr growth for 2010 supply level = 40-Jahres-Wachstum für Versorgungsniveau 2010
 100-yr growth for additional BAU demand = 100-Jahres-Wachstum für zusätzliche BAU-Nachfrage
 100-yr growth for 2010 supply level = 100-Jahres-Wachstum für Versorgungsniveau 2010

Erweiterte Daten Abb. 5 | Schematische Darstellung des Carbon Harvest Model (CHARM) von Eingangs- zu Ausgabeparametern



Das CHARM-Modell besteht aus mehreren in der Grafik dargestellten Grundmodulen, die Projektionen für den Verbrauch von unterschiedlichen Kategorien von Holzprodukten pro Jahr in beerntete Landflächen und CO₂-Auswirkungen umrechnen.

Legende:

Inputs = Eingangsparameter

2050 Wood Production Projections = Projektionen Holzproduktion 2050

Biophysical Parameters = Biophysikalische Parameter

Forest Management Parameters (rotation, slash, thinnings) = Parameter der Waldbewirtschaftung (Umtrieb, Schlagabraum, Durchforstung)

Product Pool Half-Lives = Produktpool-Halbwertzeiten

Product Substitution Parameters = Produktsubstitutionsparameter

% breakdown of product pools = % Aufschlüsselung Produktpools

Stand-level modules = Module Erfassung (Wald)bestand

Secondary forest regrowth tracker = Erfassung Wiederaufwuchs Sekundärwald

Secondary forest conversion to plantation tracker = Erfassung Umwandlung Sekundärwald in Plantagen

Existing plantation tracker = Erfassung bestehender Plantagen

Agricultural land conversion to plantation tracker = Erfassung Umwandlung Ackerland in Plantagen

Regional-level Module = Regionalmodul

Total carbon impact from 2010-2050 = CO₂-Auswirkungen gesamt 2010-50

Land-area module = Landflächenmodul

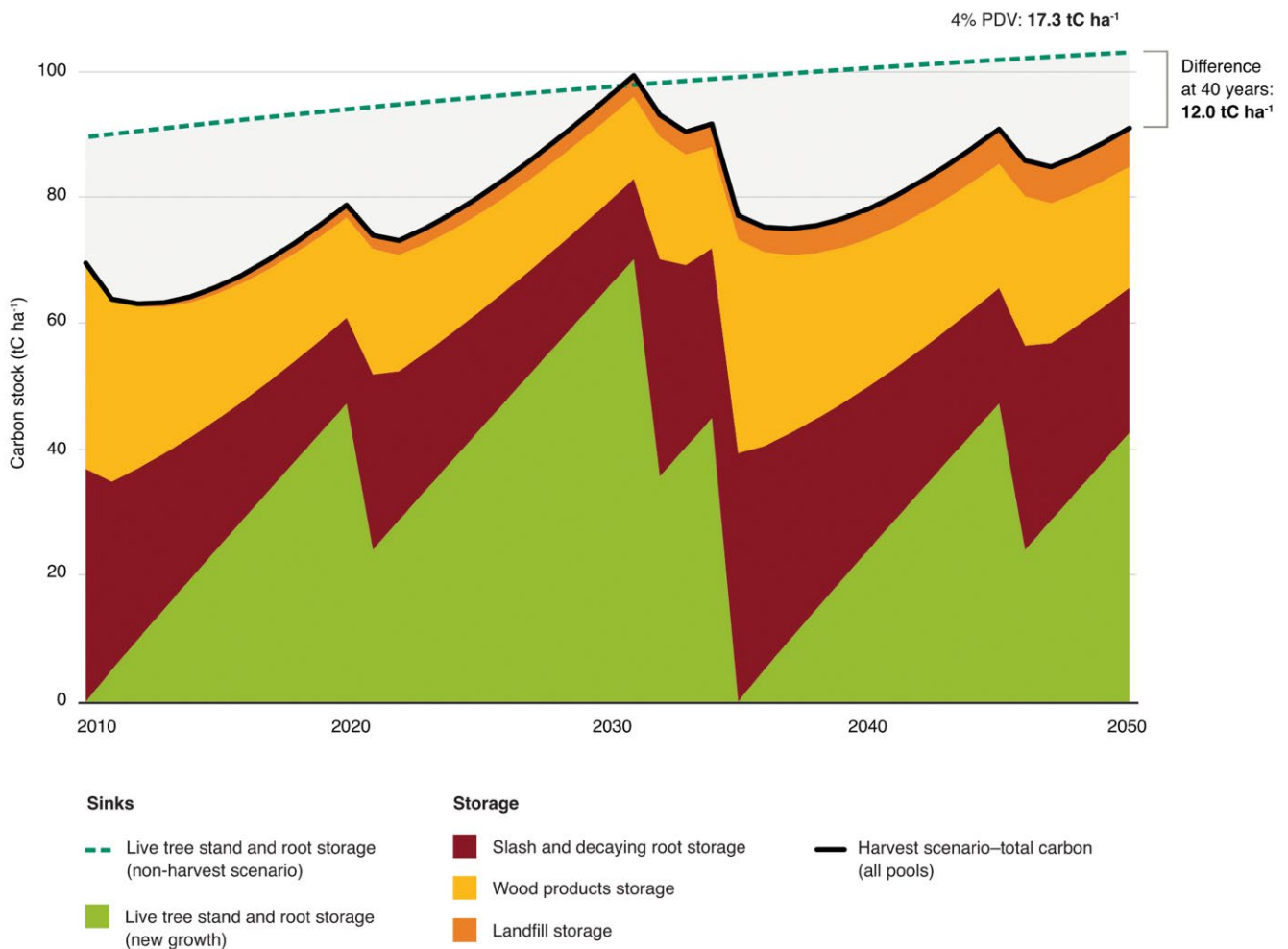
Hectares harvested of plantation and natural forest per year = Beerntete Flächen (ha) Plantagen und Naturwald pro Jahr

Intermediate outputs = Zwischenausgabedaten

Wood production per hectare over years of harvest = Holzproduktion pro Hektar nach Erntejahren

PDV per hectare over years of harvest = PDV (Abzinsungsbarwert) pro Hektar nach Erntejahren

Erweiterte Daten Abb. 6 | Veränderungen der CO₂-Pools über 40 Jahre durch die Umwandlung eines durchschnittlichen Sekundärwaldes im Südosten der USA in eine Weihrauchkiefer-Plantage



Das Diagramm veranschaulicht die im Modell für jede Holzernte geschätzten Veränderungen der CO₂-Pools am Beispiel eines Waldtyps. PDV = Abzinsungsbarwert. Die gestrichelte grüne Linie zeigt die CO₂-Speicherung ohne Holzernte. Die Abweichung nach 40 Jahren entspricht den Auswirkungen auf die CO₂-Speicherung nach 40 Jahren (entsprechend einer Null-Abzinsung). Der PDV zeigt den Wert der CO₂-Veränderungen im Zeitverlauf, der diesen Veränderungen entsprechen würde, sofern sie alle im Jahr der Ernte einträten – basierend auf einer Diskontierung dieser Veränderungen, d. h. sowohl der Emissionen in die Atmosphäre als auch der Entnahmen aus der Atmosphäre, um 4 % pro Jahr. In diesem Beispiel wird der Substitutionswert nicht in den PDV eingerechnet. Quelle: CHARM.

Legende:

Carbon stock = CO₂-Bestand (tC/ha) = gebundenes CO₂

Difference at 40 years = Abweichung nach 40 Jahren

Sinks = Senken

Storage = Speicherung

Live tree stand and root storage (non-harvest scenario) = Speicherung in lebendem Baumbestand und Wurzelwerk (Nichternte-Szenario)

Live tree stand and root storage (new growth) = Speicherung in lebendem Baumbestand und Wurzelwerk (neues Wachstum)

Slash and decaying root storage = Speicherung in Schlagabraum/ Totholz und sich zersetzendem Wurzelwerk

Wood products storage = Speicherung in Holzprodukten

Landfill storage = Speicherung in Deponien

Harvest scenario – total carbon (all pools) = Ernteszenario – CO₂ gesamt (alle Pools)

Erweiterte Daten Tabelle 1 | Sensitivitätsanalyse – Jährliche durchschnittliche, über die Zeit abgezinste CO₂-Kosten (Gt CO₂e/Jahr) der globalen Forstwirtschaft bei unterschiedlichen Abzinsungssätzen über 40 Jahre

	1) Sekundärwald- Ernte und Wiederaufwuchs	2) Sekundärwald-Ernte und Umwandlung	3) Sekundärwald- Mischernte	4) Neue tropische Plantagen	5) Höhere Plantagen- produktivität	6) Höhere Ernteeffizienz	7) Geringerer Bedarf an Holzbrennstoffen
0% (keine Abzinsung)							
Brutto- emissionen	3,9	3,6	3,9	3,5	3,2	3,7	3,4
Netto- emissionen mit Minderung durch Substitution	2,9	2,5	2,9	2,6	2,2	2,7	2,5
2%							
Brutto- emissionen	4,0	3,7	4,1	3,6	3,4	3,8	3,6
Netto- emissionen mit Minderung durch Substitution	3,1	2,7	3,1	2,7	2,5	2,9	2,7
4% (Standard)							
Brutto- emissionen	4,1	3,7	4,2	3,6	3,5	3,9	3,6
Netto- emissionen mit Minderung durch Substitution	3,2	2,7	3,2	2,8	2,6	3,0	2,8
6%							
Brutto- emissionen	4,1	3,7	4,2	3,6	3,6	4,0	3,6
Netto- emissionen mit Minderung durch Substitution	3,2	2,8	3,3	2,8	2,7	3,1	2,8

Die Tabelle zeigt nur moderate Auswirkungen unterschiedlicher Abzinsungssätze von 0 % bis 6 % über 40 Jahre. In Szenario 1 liegt die Bandbreite beispielsweise bei nur 3,9 bis 4,1 Gt CO₂e/Jahr.

Erweiterte Daten Tabelle 2 | Beispiel für die Berechnung der Abzinsung über die Zeit (4 % für 40 Jahre nach der Ernte) für einen Hektar Sekundärwald im Südosten der USA mit Umwandlung in eine Weihrauchkiefer-Plantage

Year	Harvest scenario (tC ha ⁻¹)	Non-harvest scenario (tC ha ⁻¹)	Non-harvest - harvest	Absolute change in emissions (+) or removals (-) (tC ha ⁻¹)	Discount percentage	Value when discounted to year 1 (tC ha ⁻¹)
2010	69.6	89.6	20.0	20.0	100	20.0
2011	63.9	90.1	26.2	6.2	96	6.0
2012	63.2	90.6	27.4	1.2	92	1.1
2013	63.3	91.1	27.7	0.3	89	0.3
2014	64.3	91.5	27.3	-0.5	85	-0.4
2015	65.8	92.0	26.2	-1.1	82	-0.9
2016	67.7	92.4	24.6	-1.5	79	-1.2
2017	70.1	92.8	22.7	-1.9	76	-1.5
2018	72.8	93.2	20.4	-2.3	73	-1.6
2019	75.7	93.6	17.9	-2.5	70	-1.8
2020	78.8	94.0	15.2	-2.7	68	-1.8
2021	74.0	94.4	20.4	5.2	65	3.4
2022	73.2	94.8	21.6	1.2	62	0.7
2023	75.1	95.2	20.1	-1.5	60	-0.9
2024	77.4	95.5	18.2	-1.9	58	-1.1
2025	79.9	95.9	16.0	-2.2	56	-1.2
2026	82.8	96.3	13.5	-2.5	53	-1.3
2027	85.8	96.6	10.8	-2.7	51	-1.4
2028	89.0	96.9	7.9	-2.9	49	-1.4
2029	92.3	97.3	4.9	-3.0	47	-1.4
2030	95.8	97.6	1.8	-3.1	46	-1.4
2031	99.4	97.9	-1.4	-3.2	44	-1.4
2032	93.1	98.2	5.1	6.6	42	2.8
2033	90.4	98.5	8.1	3.0	41	1.2
2034	91.7	98.8	7.2	-1.0	39	-0.4
2035	77.2	99.1	22.0	14.8	38	5.6
2036	75.3	99.4	24.1	2.1	36	0.8
2037	75.1	99.7	24.7	0.5	35	0.2
2038	75.6	100.0	24.5	-0.2	33	-0.1
2039	76.6	100.3	23.6	-0.8	32	-0.3
2040	78.2	100.6	22.3	-1.3	31	-0.4
2041	80.2	100.8	20.6	-1.7	30	-0.5
2042	82.5	101.1	18.6	-2.0	29	-0.6
2043	85.1	101.3	16.3	-2.3	27	-0.6
2044	87.9	101.6	13.7	-2.5	26	-0.7
2045	90.9	101.8	11.0	-2.7	25	-0.7
2046	85.9	102.1	16.2	5.2	24	1.3
2047	84.9	102.3	17.4	1.2	23	0.3
2048	86.6	102.6	16.0	-1.5	23	-0.3
2049	88.7	102.8	14.1	-1.8	22	-0.4
2050	91.0	103.0	12.0	-2.1	21	-0.4
			Difference at 40 years	12.0	4% PDV	17.3

In diesem Beispiel wird das Holz auf der Grundlage der bestehenden Nutzung und ohne Substitutionseffekt den Holzprodukten zugeordnet. Die absolute CO₂-Veränderung liegt 40 Jahre nach der Ernte bei 12,0 tC/ha (Summe der Spalte „Absolute Veränderung“) und der PDV bei 17,3 tC/ha (Summe der Spalte „Wert bei Abzinsung auf Jahr 1“).

Legende:

Year = Jahr

Harvest scenario = Ernteszenario (tC/ha)

Non-harvest scenario = Nichternteszenario (tC/ha)

Non-harvest – harvest = Nichternte – Ernte

Absolute change in emissions (+) or removals (-) (tC/ha) = Absolute

Veränderung der Emissionen (+) oder Entnahmen (-) (tC/ha)

Discount percentage = Abzinsungssatz

Value when discounted to Year 1 = Wert bei Abzinsung auf Jahr 1 (tC/ha)

Difference at 40 years = Abweichung nach 40 Jahren

PDV = present discount value = Abzinsungsbarewert

Erweiterte Daten Tabelle 3 | Gegenwärtige und voraussichtliche zukünftige Herstellung von Holzprodukten (t Trockenmasse) in den 30 im CHARM-Modell erfassten Ländern

Country	Long-Lived Products		Short-Lived products		Very Short-Lived Products	
	2010	2050	2010	2050	2010	2050
Australia	3,348,425	3,026,691	1,202,000	2,350,953	9,443,091	10,322,390
Austria	6,297,818	6,413,641	1,767,103	2,388,190	4,358,894	4,760,656
Bangladesh	221,955	620,767	42,300	345,976	13,143,111	16,010,628
Brazil	16,013,950	27,647,570	12,524,400	39,910,386	89,040,389	115,292,455
Canada	27,351,140	30,638,935	17,476,100	37,688,811	27,321,592	42,429,413
Chile	4,855,491	8,636,112	4,257,680	10,824,952	16,489,202	22,790,012
China	94,953,097	266,518,389	7,320,700	28,696,046	107,945,566	231,270,035
D.R. Congo	1,536,297	1,585,692	-	-	37,531,010	60,120,551
Ethiopia	1,030,999	1,140,436	-	-	49,188,656	62,709,520
Finland	5,660,190	6,155,841	9,850,604	15,672,963	13,456,590	17,232,086
France	7,101,094	4,628,069	1,743,150	2,430,332	14,549,801	13,329,921
Germany	17,232,274	11,651,767	2,472,383	3,009,262	17,250,806	15,018,238
Ghana	587,141	1,427,906	-	-	18,530,474	20,717,232
India	6,101,264	23,064,762	2,243,660	24,738,029	165,288,146	214,985,420
Indonesia	5,904,700	14,382,351	5,149,000	29,251,675	45,906,687	72,280,183
Japan	7,422,143	3,530,843	8,620,100	8,859,180	1,995,128	1,566,822
Kenya	210,245	655,628	25,800	128,011	13,004,327	19,346,484
Mexico	1,714,099	3,573,043	148,200	534,050	19,507,911	25,632,737
Myanmar	1,363,388	3,030,253	1,080	8,957	18,815,475	18,532,956
Nigeria	1,800,106	6,295,925	20,700	198,695	33,143,436	56,713,453
Pakistan	1,127,225	2,961,164	70,300	632,844	14,934,452	23,219,476
Poland	6,533,914	10,105,927	963,966	1,276,761	10,468,303	12,499,352
Russia	24,822,979	35,222,439	6,570,901	11,001,470	44,515,339	53,020,048
South Africa	1,720,081	3,709,416	2,049,671	8,098,416	10,615,478	17,507,469
Sweden	8,766,154	10,121,963	10,755,743	20,229,049	16,974,744	23,909,496
Thailand	5,660,479	8,986,048	914,000	2,950,027	10,579,847	14,216,218
Uganda	788,896	1,347,708	-	-	19,776,620	27,579,924
Tanzania	658,002	756,039	50,400	562,578	11,434,886	20,553,744
United States	55,139,208	40,190,957	46,269,242	72,174,210	83,660,386	91,534,808
Vietnam	3,155,635	10,586,162	372,900	2,469,119	17,316,458	24,637,226

Die Tabelle gibt für alle 30 in CHARM erfassten Länder Schätzungen der zukünftigen Produktion nach Holzproduktkategorien an. Bei den Projektionen für 2050 wird für die jeweiligen Holzproduktkategorien derselbe Anteil am Handel angenommen wie im Jahr 2010.

Legende:

Country = Land

Long-lived products = Langlebige Produkte

Short-lived products = Kurzlebige Produkte

Very short-lived products = Sehr kurzlebige Produkte

Länder: Australien, Österreich, Bangladesch, Brasilien, Kanada, Chile,

China, D. R. Kongo, Äthiopien, Finnland, Frankreich, Deutschland, Ghana, Indien, Indonesien, Japan, Kenia, Mexiko, Myanmar, Nigeria, Pakistan, Polen, Russland, Südafrika, Schweden, Thailand, Uganda, Tansania, USA, Vietnam



Liqing Peng
Timothy D. Searchinger
Jessica Zions
Richard Waite

Englischsprachiger Originalbeitrag
in der Zeitschrift ***Nature***
veröffentlicht am 5. Juli 2023

Link:
<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06187-1>

Deutschsprachige Fachübersetzung durch die Trägerverbände



Fachverband
Beton- und Fertigteilwerke
Baden-Württemberg e.V.



BETONSUISSE

