

Einschlagstopp ist kein Klimaschutz

von Roland Irslinger, Tübingen

Der Koalitionsvertrag der Bundesregierung sieht vor, den Holzeinschlag in alten Buchenwäldern im öffentlichen Besitz zu stoppen [1]. Betroffen wäre eine Fläche von 170.000 ha von Beständen mit einem Buchenanteil von mehr als 75 % bei einem Mindestalter von 140 Jahren und einer Mindestfläche von 1 ha. Diese Buchenwälder sollen als biogene Kohlenstoff-(C-)Speicher vermeidbare fossile Kohlendioxid-(CO₂-)Emissionen kompensieren. Als langfristige C-Speicher scheiden alte Buchenwälder aber aus, denn hochbevorratete Wälder taugen nicht als Lagerstätte für C.

Wachsendes Risiko bei steigendem Holzvorrat

Eine Senkenleistung in hochbevorrateten Wäldern ist riskant, denn in bewirtschafteten wie in unbewirtschafteten Wäldern ist in den letzten Jahren ein zunehmendes Baumsterben zu beobachten [2, 3]. Auch bisher klimaresilient erscheinende Wälder mit hoher ökologischer Stabilität werden häufig keine stabile Bestockung mehr bilden können [4], [1] schätzen diesen Anteil auf mindestens ein Viertel der zum Einschlagstopp vorgesehenen Buchenwälder. Sekundäre Stressoren wie Insekten- oder Pilzbefall treten hinzu [5, 6, 7, 8, 9, 10, 3, 11].

Alter und Holzvorrat spielen dabei eine Schlüsselrolle [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 3], vor allem alte Buchen reagieren auf Trockenheit [19, 20] und die Kronensterblichkeit steigt mit zunehmendem Holzvorrat hochsignifikant [13; 3]. Selbst in den Primärwäldern der Slowakei [21] erreichen nur wenige Bäume ihr biologisches Maximalalter [22, 21].

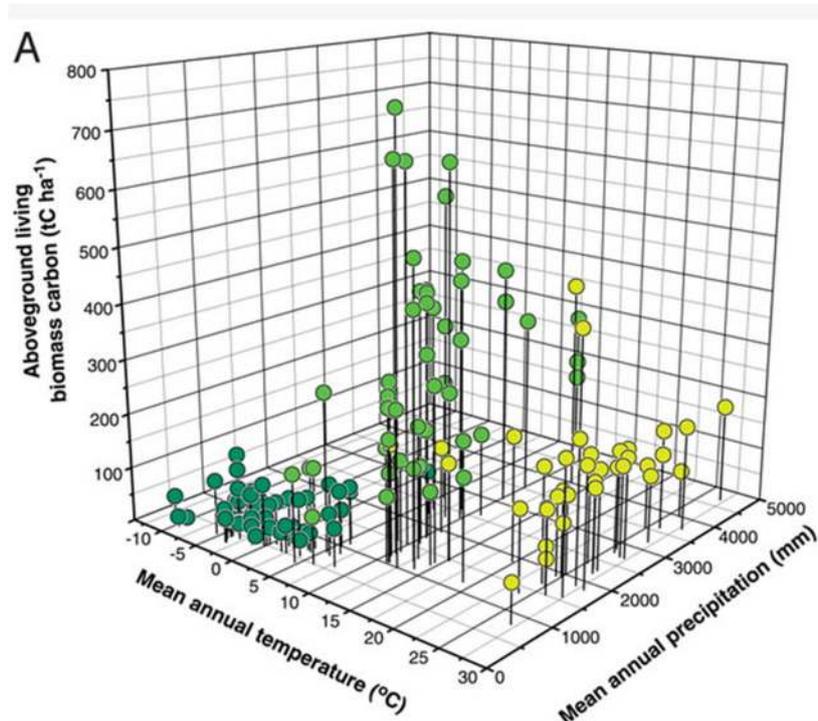


Abb. 1: Oberirdische lebende Biomasse von Primärwäldern in Abhängigkeit von mittlerer Jahrestemperatur und mittlerem Jahresniederschlag [23].

Primärwälder in Regionen mit kühlen Temperaturen und mäßig hohen Niederschlägen haben die höchsten Biomasse-C-Vorräte, mit wärmer und trockener werdendem Klima werden diese geringer (Abb. 2), unabhängig davon, ob Wälder bewirtschaftet werden oder nicht. Denn Wälder sind wegen ihrer Langlebigkeit und Ortsgebundenheit klimasensitiv und deshalb in Zeiten des Klimawandels labile C-Speicher [12, 24, 15, 25, 3, 26, 27]. Die Fragilität von Europas Wäldern wird sich im Klimawandel drastisch zeigen [28, 29, 3]. Die Anreicherung von noch mehr Totholz würde in Dürreperioden das Risiko gewaltiger CO₂-Emissionen durch Brände [29] dramatisch steigen lassen. Demgegenüber stellt die Bindung von C in einem Holzproduktspeicher, z. B. in Holzhäusern, einen stabileren Zustand dar.

Heute noch als alte, naturnahe Buchenwälder ausgewählte Bestände werden sich im Zuge klimawandel-bedingter Sukzessionen zu Waldtypen mit geringerem C-Speicherpotential entwickeln. Nicht nur Buchenwälder wird das treffen, vielmehr wird die C-Tragfähigkeit [23] der Landschaft insgesamt abnehmen und die Wälder werden sich einschließlich ihrer Böden zu C-Quellen entwickeln [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 6, 7, 38, 8, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 10, 47, 48, 49, 50, 51, 52].

Die Verordnung (EU) 2018/841 des Europäischen Parlaments [53] aber verlangt, dass C-Speicher langfristig stabil und anpassungsfähig sein müssen. Aus der Perspektive des Klimaschutzes sind sich selbst überlassene Wälder ein gefährliches Instrument, weil sie ein unkalkulierbares Klimarisiko beinhalten. Rechtzeitiger Waldumbau kann dagegen die Stabilität der Bestände erhöhen [54, 55], auch der Humus im Boden wird durch aktiven Waldumbau stabilisiert [56, 57, 58, 59]. Den Wald wachsen zu lassen, erfüllt deshalb nicht das geforderte Kriterium der Permanenz (ISO 14064-2) [60]. Vorübergehend kann es bilanziell zwar zur C-Akkumulation kommen, bei absehbar klimawandelbedingten Kalamitäten wird CO₂ aber wieder in die Atmosphäre entlassen.

Es besteht in der internationalen Klimaschutzpolitik Konsens dahingehend, dass Vermeidung vor Kompensation kommen muss. Holznutzung vermeidet fossile CO₂-Emissionen ein für alle Mal, Jahr für Jahr, Vermeidung ist real, permanent und kumulativ [28, 38, 61]. Kohlenstoff speichern kann ein Wald dagegen nur einmal und nur vorübergehend bis zu seiner maximalen Kohlenstofftragfähigkeit. Nutzungsverzicht verschärft damit langfristig die Klimakrise.

Grundsätzlich ist die Landschaft die zu betrachtende Ebene, nicht der Einzelbestand, weil auf der Fläche Zeit durch Raum ersetzt wird [62, 63]. Offenkundig ist, dass auch Primärwaldlandschaften einem Fließgleichgewicht zustreben, bei dem der Holzvorrat nicht mehr steigt [32, 64, 65, 66, 67, 68, 69]. Holzvorräte wie im Buchen-Gebiet von Uholka-Shyrokyy Luh in den ukrainischen Karpaten sind im deutschen Durchschnitt utopisch, weil weder Klima noch unsere Waldböden dafür Voraussetzungen bieten [28] und historische agrarische Nutzungen das Mortalitätsrisiko der Wälder zusätzlich erhöhen [3].

Die für einen Einschlagstopp vorgesehenen Buchenwälder haben aktuell im Alter von 140 bis 160 Jahren einen durchschnittlichen Holzvorrat von 425 Vfm/ha, die über 160 Jahre alten einen solchen von 444 Vfm/ha [1]. Nach der Einstellung der Holznutzung könnten diese Wälder ohne Berücksichtigung von Kalamitätsrisiken bis 2050 rein theoretisch Holzvorräte zwischen 575 und 736 Vfm aufbauen, was einer CO₂-Senke von 1,9 Mio. t pro Jahr entspräche, wobei seriöse Prognosen angesichts des Klimawandels nicht möglich sind. Schon ein einfacher Vergleich mit den Buchen-Primärwäldern der Slowakei zeigt, wie unrealistisch das Vorhaben ist, denn die Holzvorräte in der Slowakei liegen zwischen 250 und 800 Vfm/ha [21]. In Zerfallsstadien, die dort auf knapp 50 % der Fläche vorkommen und 50 bis 70 Jahre lang dauern, sinkt der Holzvorrat auf 40 bis 70 % des Maximalvorrates ab [70]. Die Primärwald-Buchen der Slowakei sind im Durchschnitt 90 Jahre alt, Buchen der bewirtschafteten Wälder in Deutschland haben ein Durchschnittsalter von 100 Jahren [71].

In Deutschland ist der Waldspeicher heute ähnlich hoch wie er ohne Bewirtschaftung wäre [72, 25, 63]. Mit einem mittleren Vorrat von 358 Vfm/ha liegt Deutschland an der Spitze der EU. [73] vergleichen auch den maximalen Bestandesvorrat von bewirtschafteten Buchenwäldern zum Zeitpunkt der Ernte mit dem von unbewirtschafteten Wäldern einschließlich Totholz und finden hier ebenfalls keinen signifikanten Unterschied. Zum selben Ergebnis kommen [72] für rumänische Buchenwälder.

Klimaschutz auf Basis von Ökobilanzen

Die Themen CO₂-Neutralität und Kohlenstoffschuld wurden von [63] wissenschaftlich bearbeitet. Danach ist Holz aus nachhaltiger Waldwirtschaft abzüglich der fossilen Gesteungskosten CO₂-neutral, eine Kohlenstoffschuld entsteht nicht. [74] schlagen wie bereits [28] vor, anstatt einer Treibhausgas(THG)bilanz eine Ökobilanz (LCA; [75] zu verwenden, um potenzielle Umweltauswirkungen eines Produktsystems während des gesamten Lebenszyklus der Produkte beurteilen zu können. [74] berichten über einen Ansatz zur Herleitung der THG-Bilanzen von Holzprodukten, bei dem die Nutzung von Holz einer Nicht-Nutzungs-Referenz gegenüber gestellt wird mit dem Ergebnis, dass der weitere Aufbau von Wald-C-Vorräten aus Sicht des Klimaschutzes nach Meinung der Autoren in vielen Fällen die bessere Option sei.

Konkret berechnen die Autoren die THG-Bilanz von Holzprodukten aus der Summe fossiler Emissionen der Produktherstellung(+), der C-Speicherung im Produkt(-), der Veränderung des Waldspeichers durch die Holzernte(+) und der Substitutionseffekte(-). Ein positives Vorzeichen steht für eine C-Quelle, ein negatives für eine C-Senke. Die Holzernte hat in diesem Ansatz grundsätzlich ein positives Vorzeichen, da [74] irrtümlich davon ausgehen, Nutzung wirke sich negativ auf den Waldspeicher aus. Dabei diskutieren sie auch eine Null-Variante, bei der die Holzernte keinen Einfluss auf die weitere Entwicklung des C-Vorrats im Wald hat, z. B. weil die Holzvorräte eine maximal mögliche Höhe bereits erreicht haben.

Fehlerhafter Ansatz

[74] gehen davon aus, dass ein Einschlagstopp den Waldspeicher erhöhen würde. Eine Holzvorratserhöhung um 1 m³ im Wald bindet knapp 1 t CO₂. Werden Wälder bewirtschaftet und das Holz stofflich und energetisch genutzt, werden fossile Emissionen in etwa derselben Größenordnung vermieden [76, 77, 78, 79, 80, 81, 61, 82]. Für den Fall, dass ein Einschlagstopp den Holzvorrat erhöhen würde, muss die durch stoffliche Verlagerungseffekte entfallende Substitution gegengerechnet werden. Klimatische Additionalität [83, 84, 60] ist mangels positiver Auswirkungen auf die THG-Bilanz gegenüber dem Basisszenario nicht gegeben, weil die Speicherung von C im Wald durch Verlagerungsprozesse im Produktsektor netto nicht zu einer geringeren Belastung der Atmosphäre mit CO₂ führt, mit der Folge, dass eine Generierung von Zertifikaten auf der Basis der ISO 14064-2 [84] nicht möglich ist. Zusätzlich wäre keine Permanenz [84] gegeben, weil die C-Tragfähigkeit unserer Landschaften ab- statt zunehmen wird und eine Holzverknappung infolge des Einschlagstopps auch den Produktspeicher, z.B. den Gebäudesektor, zur C-Quelle werden ließe [86].

[72] zeigen am Beispiel rumänischer Buchenwälder, dass die Holzvorräte bewirtschafteter und nicht bewirtschafteter Buchenwälder keine signifikanten Unterschiede zeigen. Jüngere Buchenbestände nehmen jährlich mehr CO₂ aus der Atmosphäre auf als alte, der Wirtschaftswald hat höhere Zuwächse [87, 25, 73]. Dabei ist der jährliche Zuwachs bewirtschafteter Wälder der einzige Input in die Wald-Holz-Produktionskette [88]. Holzernte hat bei nachhaltiger Waldwirtschaft keine negativen Folgen für die Holzvorräte, die entnommene Biomasse wird durch das beschleunigte Wachstum der verbleibenden Bäume mehr als kompensiert [87, 89, 63]. Auch beim Umbau z.B. von Kiefern-Reinbeständen in Mischbestände fallen Sortimenten an, die genutzt werden können, wobei Maßnahmen des Waldumbaus eine Stabilisierung des künftigen Zuwachses zur Folge haben. Beerntete vorratsreiche Wälder können fortlaufend mehr C binden als nicht beerntete. Der Wirtschaftler vor Ort muss auf der Basis der örtlichen Erfahrung entscheiden, in welchem Alter bzw. bei welcher Vorratshöhe das Risiko so hoch wird, dass das Holz geerntet werden muss.

Etwa die Hälfte des geernteten Holzes einschließlich des Scheitholzes stammt aus Jungbestandspflege und Durchforstung, die Erntennutzung erfolgt über einer natürlichen Verjüngung. Energieholz ist fast ausschließlich ein Koppelprodukt im Zuge der stofflichen Verwertung des Holzes, Brennholz fällt in erster Linie bei der Waldpflege an. [74] bestätigen, dass Energieholz in Form von Scheitholz, Hackschnitzeln bzw. Pellets dann CO₂-neutral ist und zu einer Reduktion der Netto-THG-Emissionen führt, wenn dessen Nutzung keine Auswirkungen auf den Holzvorrat hat. Das ist in Deutschland der Fall. Bei stofflicher Verwertung bzw. Kaskadierung ist die Reduktion höher, weshalb die stoffliche Nutzung priorisiert werden sollte [90].



Abb. 2: Brennholz aus einer Durchforstung ist CO₂-neutral, der geerntete Kohlenstoff ist bereits wieder im Bestand gebunden, bevor das Holz verbrannt ist, eine Kohlenstoffschuld existiert nicht. Der Kohlenstoffvorrat im Waldökosystem wird durch die Brennholznutzung nicht geschmälert, das Wachstum des Buchenbestandes wird durch Lichteinfall beschleunigt und auf weniger Bäume konzentriert, dadurch steigen die Chancen einer stofflichen Substitution mit deutlichen Klimavorteilen. Bild: R. Irslinger.

Bei der Herstellung von Schnittholz fallen große Mengen an Industrierestholz an, die stofflich zu Holzwerkstoffen weiterverarbeitet oder energetisch verwertet werden. [74] berücksichtigen nicht, dass etwa ein Drittel des geernteten Holzes kaskadenartig genutzt wird, wobei für diese Schnittmenge zur stofflichen die energetische Substitution hinzu zu rechnen ist.

Unterlassene Durchforstungen führen zu dichtebedingten Zuwachsrückgängen [87, 72] und erhöhter Mortalität [3]. Vornutzungen halten den laufenden Zuwachs aufrecht bzw. steigern die Zuwachleistung des Bestandes [91]. Waldpflege geht nicht zu Lasten einer weiteren Holzvorratszunahme, sondern verlagert den Zuwachs auf weniger Bäume [63, 92]. Sie führt auch deshalb zu einer Vergrößerung der Substitutionseffekte, weil dickeres Holz besserer Qualität höhere Anteile an stofflicher Verwertung, weniger Verschnitt sowie Kaskadennutzung ermöglicht. Im Falle nachhaltiger Waldbewirtschaftung werden die Holzvorräte auf Landschaftsebene nicht angetastet, da einschließlich der Störungen maximal der laufende Zuwachs abgeschöpft wird. Eine verstärkte energetische Nutzung von Waldbiomasse unter großflächiger Absenkung der Holzvorräte besäße allerdings keine Klimavorteile, darauf haben [93] schon früh hingewiesen.

Einschlagstopp verlagert Fußabdruck ins Ausland

Eine Ökobilanz, wie sie [74] vorschlagen, muss einem globalen Ansatz folgen und alle Inputs, Outputs und die potenziellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems einschließlich einer Analyse des Marktes bewerten. Sonst besitzt sie keinerlei Aussagekraft. Dabei muss der Systemraum Wald um die Substitutionseffekte und das Marktgeschehen erweitert werden [94]. Das bedeutet, dass auch C-Flüsse außerhalb des Waldes, die ursächlich mit dem Produktsystem in Verbindung stehen, berücksichtigt werden müssen.

Ein Buchen-Einschlagstopp würde den Nutzungsdruck auf Wälder außerhalb Europas mit geringen Nachhaltigkeitsstandards zweifellos erhöhen [95, 66, 96]. [74] ignorieren dies. Holznutzung in Primärwäldern ist nicht CO₂-neutral, weil meist hohe Verluste beim Boden-C auftreten, Ernteverluste häufig hoch sind und Substitutionseffekte die hohen Verluste nicht kompensieren können [97]. Da die hektarbezogenen Holzvorräte in borealen Wäldern geringer sind als in Deutschland, würde zur Kompensation eines hiesigen Nutzungsverzichtes das Mehrfache der aus der Nutzung genommenen Fläche in Mitleidenschaft gezogen.

Marktinteraktionen würden zu grenzüberschreitenden Auswirkungen eines hiesigen Einschlagstopps führen [98]. Treibhausgasverursachende Emissionen aus kaum zu kontrollierenden Verlagerungseffekten, sog. Leakage, müssen nach [60] von einer etwaigen CO₂-Bindungsleistung abgezogen werden. Einem Einschlagstopp bei uns würden CO₂-Emissionen aus Raubbau andernorts gegenüberstehen, womit sich unser ökologischer Fußabdruck ins Ausland verlagern würde [90], ein typisches Verhalten reicher Nationen [99,100], das wir uns nicht leisten dürfen.

Das künftige Potenzial eines Schwundes biogener Speicher ist mehrfach höher als ihr zusätzliches Senkenpotenzial [101]. Alte Buchenwälder aus Gründen des Klimaschutzes nicht mehr zu nutzen, wäre Greenwashing, weil biogene Senken wie vermiedene Emissionen behandelt werden und die Öffentlichkeit so über die tatsächliche Höhe der fossilen Emissionen getäuscht wird. Da die für einen Einschlagstopp vorgesehenen Buchenwälder bereits zum Zeitpunkt der Unterschutzstellung ein hohes Alter haben, würden sie spätestens in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts auch ohne Klimawandel in die Zerfallsphase eintreten. Würden die für einen Einschlagstopp vorgesehenen Buchenbestände tatsächlich einen Vorrat von etwa 700 Vfm/ha im Durchschnitt aufbauen [1] und in der Zerfallsphase im Anhalt an Korpel [21] davon etwa 50% verlieren, würden 60 Mio. t CO₂ unkontrolliert die Atmosphäre belasten, Verluste an Bodenkohlenstoff nicht eingerechnet. Aller Wahrscheinlichkeit nach würde der Klimawandel dafür sorgen, dass diese Wälder weiteren Kohlenstoff auch aus dem Boden verlieren.

Das politische Versprechen eines weiteren Holzvorratsaufbaus in ohnehin vorratsreichen Wäldern zeugt von mangelnder Verantwortung für künftige Generationen. Angesagt ist eine klimaschutz-orientierte Bestandesbehandlung der Buche z.B. durch Climate Smart Forest Management (CSF), eine Strategie, die fossile CO₂-Emissionen vermeidet, den Kohlenstoffvorrat im System erhält und in die Biodiversitätskriterien integriert sind [102, 103, 80, 104, 105].

Literatur:

- [1] BOLTE, A. et al. (2022): *Einschlagstopp in alten, naturnahen Buchenwäldern im öffentlichen Besitz : Definition, Vorkommen, Inventur-Kennzahlen, Gefährdung und ökonomische Bewertung*. Thünen Working Paper 197:1-48.
- [2] SCHULDT, B. et al. (2020): *A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests*. *Basic and Applied Ecology* 45:86-103.
- [3] SENF, C. et al. (2018): *Canopy mortality has doubled in Europe's temperate forests over the last three decades*. *Nature Communications* 9:4978.
- [4] BRANDL, S., PAUL, C., KNOKE, T., FALK, W., (2020): *The influence of climate and management on survival probability for Germany's most important tree species*. In: *Forest Ecology and Management* 458.
- [5] DESPREZ-LOUSTAU, M.L. et al. (2006): *Interactive effects of drought and pathogens in forest trees*. *Ann. For. Sci.* 63:595-610.
- [6] LONG, J.N., SMITH, F.W. (1988): *Leaf area sapwood-area relations of Lodgepole Pine as influenced by stand density and site index*. *Can.J.For.Res.* 18(2):247-250.
- [7] LONG, J.N., SMITH, F.W. (1990): *Determinants of stemwood production in Pinus contorta var. latifolia forests : the influence of site quality and stand structure*. *J.Appl.Ecol.* 27:847-856.
- [8] MCDOWELL, N.G. et al. (2020): *Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world*. *Science* 368:964.
- [9] ROUAULT, G. et al. (2006): *Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe*. *Ann. For. Sci.* 63:611-622.
- [10] SEIDL, R. et al. (2017): *Forest disturbances under climate change*. *Nature Climate Change* 7:395-402.
- [11] WALTER, H. (1964): *Die Vegetation der Erde*. 2. Aufl. Jena, Fischer.
- [12] BOLTE, A. et al. (2021): *Zukunftsaufgabe Waldanpassung*. *AFZ-DerWald* 4:12-16.
- [13] HÜLSMANN, L. et al. (2018): *How to kill a tree: empirical mortality models for 18 species and their performance in a dynamic forest model*. *Ecol. Appl.* 28, 522–540.
- [14] JALKANEN, A., MATTILA, U. (2000): *Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the National Forest Inventory data*. *Forest Ecology and Management* 135:315-330.
- [15] LIPPKE, B. et al. (2011): *Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation : knowns and unknowns*. *Carbon Management* 2(3):303-333.
- [16] NAGEL, T.A., DIACI, J. (2006): *Intermediate wind disturbance in an old-growth beech-fir forest in southeastern Slovenia*. *Canadian Journal of Forest Research* 36:629-638.
- [17] SCHMIDT, M. et al. (2010): *An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage : experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany*. *Canadian Journal of Forest Research* 40:1636-1652.
- [18] SCHUSTER, W.S.F. et al. (2008): *Changes in composition, structure and aboveground biomass over seventy-six years (1930-2006) in the Black Rock Forest, Hudson Highlands, southeastern New York State*. *Tree Physiology* 28:537-549.
- [19] LANGER, G. (2019): *Komplexe Erkrankungen bei älteren Rotbuchen*. *AFZ-DerWald* 74(24):30-33.

- [20] LANGER, G., BUßKAMP, J., LANGER, E.J. (2020): Absterbeerscheinungen bei Rotbuche durch Trockenheit und Wärme. *AFZ-DerWald* 75(4):24-27.
- [21] KORPEL, S. (1995): *Die Urwälder der Westkarpaten*. Stuttgart, Gustav Fischer.
- [22] COMMARMOT, B., BRANG, P. (2011): Was sind Naturwälder, was Urwälder? In: BRANG, P., HEIRI, C., BUGMANN, H. (Red.): *Waldreservate - 50 Jahre natürliche Waldentwicklung in der Schweiz*. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. Zürich, ETH Zürich. Bern, Stuttgart, Wien, Haupt:12-25.
- [23] KEITH, H. et al. (2009): Re-evaluation of forest biomass carbon stocks and lessons from the world's most carbon-dense forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(28):11635-11640.
- [24] FORZIERI, G. et al. (2021): Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests. *Nature Communications* 12(1):1-12.
- [25] SCHULZE, E.D., STUPAK, I., HESSENMÖLLER, D. (2019): The climate mitigation potential of managed versus unmanaged spruce and beech forests in Central Europe. In: MAGALHÃES PIRES, J.C., DA CUNHA GONÇALVES, A.L. (eds.): *Bioenergy with Carbon Capture and Storage : Using Natural Resources for Sustainable Development*. Academic Press:131-149.
- [26] SIERRA, C.A. et al. (2021): The climate benefit of carbon sequestration. *Biogeosciences* 18:1029-1048.
- [27] WHARTON, S., FALK, M. (2016): Climate indices strongly influence old-growth forest carbon exchange. *Environ. Res. Lett.* 11:044016.
- [28] IRSLINGER, R. 2022: *Waldlandschaften in der Klimakrise : Risikopatient und Problemlöser zugleich*. Artenschutzreport 46:26-52.
- [29] JANDL, R. et al. (2007): How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137:253–268.
- [30] BRÉDA, N. et al. (2006): Temperate forest trees and stands under severe drought : a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann. For. Sci.* 63:625-644.
- [31] CIAIS, P. et al. (2005): Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437:529-533.
- [32] GUNDERSEN, P. et al. (2021): Old-growth forest carbon sinks overestimated. *Nature* 591:E21-E23.
- [33] IRSLINGER, R. (2019): Greenpeace-“Waldvision“ schadet Wald und Klima : Ein Beitrag zur Debatte um das Bundes-Klimaschutzgesetz. *Holz-Zentralblatt* 27:594.
- [34] KIMMINS, J.P. et al. (1990): Modelling the interactions between moisture and nutrients in the control of forest growth. *For Ecol Manage* 30:361-379.
- [35] KINT, V. et al. (2012): Radial growth change of temperate tree species in response to altered regional climate and air quality in the period 1901-2008. *Climatic Change* 115:343-363.
- [36] KRULOV, I. et al. (2018): Future forest landscapes of the Carpathians : vegetation and carbon dynamics under climate change. *Regional Environmental Change* 18:1555-1567.
- [37] LE PAGE, Y. et al. (2013): Sensitivity of climate mitigation strategies to natural disturbances. *Environmental Research Letters* 8(1).
- [38] MALMSHEIMER, R.W. et al. (2011): *Managing Forests because Carbon Matters : Integrating Energy, Products, and Land Management Policy*. *Journal of Forestry* (Special Issue) 109:45 pp.

- [39] MEYER, P., NAGEL, R., FELDMANN, E. (2021): Limited sink but large storage: Biomass dynamics in naturally developing beech (*Fagus sylvatica*) and oak (*Quercus robur*, *Quercus petraea*) forests of north-western Germany. In: *Journal of Ecology* 00:1-15.
- [40] NABUURS, G.J. et al. (2013): First signs of carbon sink saturation in European forest biomass. *Nature Climate Change* 3: 1-5. [<https://doi.org/10.1038/nclimate1853>; zuletzt aufgerufen am 7.12.2022].
- [41] PIAO, S. et al. (2011): Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Glob. Change Biol.* 17:3228-3239.
- [42] PIOVESAN, G. et al. (2008): Drought-driven growth reduction in old beech (*Fagus sylvatica* L.) forests of the central Apennines, Italy. *Glob. Change Biol.* 14:1-17.
- [43] REICHSTEIN, M. et al. (2013): Climate extremes and the carbon cycle. *Nature* 500(36):287-295.
- [44] SCHELHAAS, M.J., NABUURS, G.J., SCHUCK, A. (2013): Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology* 9:1620-1633. [<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x>; zuletzt aufgerufen am 7.12.2022].
- [45] SCHULZE, E.D. et al. (eds.) (2009): *CarboEurope-IP : An Assessment of the European Terrestrial Carbon Balance*. Jena.
- [46] SEIDL, R. et al. (2014): Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change* 4:806-810.
- [47] THIES, C, ARNOLD, A.I.M. (2019): Vulnerabilität von Wäldern im Klimawandel - Biotische Störungen und Biogeochemische Konsequenzen. *Geoöko XL*:107-121.
- [48] THOM, D., SEIDL, R. (2016): Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biological Reviews* 91:760-781.
- [49] THOM, D. et al. (2017): The impact of future forest dynamics on climate : interactive effects of changing vegetation and disturbance regimes. *Ecological Monographs*, 87(4):665-684.
- [50] THOM, D. et al. (2018): Legacies of past land use have a stronger effect on forest carbon exchange than future climate change in a temperate forest landscape. *Biogeosciences* 15:5699-5713.
- [51] VON GADOW, K. et al. (2021): Sustaining Forest Ecosystems. *Managing Forest Ecosystems* 37. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58714-7_1; zuletzt aufgerufen am 7.12.2022].
- [52] WENG, E. et al. (2012): Ecosystem carbon storage capacity as affected by disturbance regimes: a general theoretical model. *J. Geophys. Res.* 117, G03014.
- [53] EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION (2018): Verordnung (EU) 2018/841 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 über die Einbeziehunirsg der Emissionen und des Abbaus von Treibhausgasen aus Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft in den Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030 und zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 und des Beschlusses Nr. 529/2013/EU.
- [54] EISENHAUER, D. R. (2022): Waldumbau in Sachsen – Aufgabe für Generationen: Der Weg von Fichten- und Kiefernforsten zu standortgerechten Kulturwäldern. – In: BEMMANN, A., IRSLINGER, R., ANDERS, K. (Hrsg.): Vom

Glück der Ressource: Wald und Forstwirtschaft im 21. Jahrhundert. – München, 39-54.

[55] SCHNABEL, F. et al. (2021): Species richness stabilizes productivity via asynchrony and drought-tolerance diversity in a large-scale tree biodiversity experiment. *Science Advances* 7(51):13 pp.

[<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abk1643>; zuletzt aufgerufen am 7.12.2022].

[56] ACHAT, D.L. et al. (2015): Forest soil carbon is threatened by intensive biomass harvesting. *Scientific Reports* 5, Article number: 15991.

[57] JOHNSON, D.W., CURTIS, P.S. (2001): Effects of forest management on soil C and N storage : meta analysis. In: *Forest Ecology and Management* 140:227–238.

[58] NAVE, L.E. et al. (2010): Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests. *Forest Ecology and Management* 259(5):857.

[59] WOLFF, B., RIEK, W. (1996): *Deutscher Waldbodenbericht 1996 - Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald von 1987-1993 (BZE)*. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Bonn:141 S.

[60] UBA (2010): *Analyse und Bewertung von Waldprojekten und entsprechender Standards zur freiwilligen Kompensation von Treibhausgasemissionen*. Dessau, Umweltbundesamt (Hrsg.).

[61] RÜTER, S. (2017): *Der Beitrag der stofflichen Nutzung von Holz zum Klimaschutz - Das Modell WoodCarbonMonitor*. Dissertation, Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt:270

[62] EHBRECHT, M. et al. (2021) Globale Muster und klimatische Kontrolle der strukturellen Komplexität von Wäldern. *Nat Commun* 12:519.

[63] SCHULZE, E.D. et al. (2022): The role of wood-harvest from sustainably managed forests in the carbon cycle. In: *Annals of Forest Science* 79(17):13 pp.

[64] KÖRNER, C. (2003): Slow in, rapid out - carbon flux studies and Kyoto targets. *Science* 300:1242-1243.

[65] KÖRNER, C. (2017): Carbon sequestration : a matter of tree longevity. *Science* 355:130-131.

[66] KÖRNER, C. (2020): Biodiversität, Kohlenstoffkreislauf und Klimawirkungen sind im Wald eng verknüpft. *Forum für Wissen*: 65-70.

[67] PAUL, T. et al. (2021): Natural forests in New Zealand: a large terrestrial carbon pool in a national state of Equilibrium. – *Forest Ecosystems* 8, 34.

[68] PUGH, T.A.M. et al. (2019): Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116 (10):4382-4387.

[69] STILLHARD, J. et al. (2022): Structural changes in a primeval beech forest at the landscape scale. *Forest Ecology and Management* 504:512-522.

[70] DROEßLER, L., MEYER, P. (2006): Waldentwicklungsphasen in zwei Buchen-Urwaldreservaten in der Slowakei. *Forstarchiv* 77:155-162.

[71] BWI (2012): *Dritte Bundeswaldinventur (2012): mehr älterer Wald*.

[<https://www.bundeswaldinventur.de/dritte-bundeswaldinventur-2012/lebensraum-wald-mehr-biologische-vielfalt-im-wald/mehr-aelterer-wald/>; zuletzt aufgerufen am 7.12.2022].

[72] BOURIAUD, O. et al. (2019): Effects of forest management on biomass stocks in Romanian beech forests. – *Forest Ecosystems* 6(1), 19.

- [73] SCHULZE, E.D. et al. (2021): Klimaschutz mit Wald : Speicherung von Kohlenstoff im Ökosystem und Substitution fossiler Brennstoffe. – *Biol Unserer Zeit* 51(1), 46-54.
- [74] FEHRENBACH, H. et al. (2022): The Missing Limb: Including Impacts of Biomass Extraction on Forest Carbon Stocks in Greenhouse Gas Balances of Wood Use. *Forests* 13: 365-378.
- [75] KLÖPFER, W., GRAHL, B. (2009): *Ökobilanz (LCA) : Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Wiley-VCH, Weinheim.
- [76] BMUB (2015): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau- und Reaktorsicherheit : *Ökobaudat. Informationsportal Nachhaltiges Bauen : Datenbank ökobaudat* [<http://www.oekobaudat.de/datenbank/browser-oekobaudat.html>]; zuletzt aufgerufen am 7.12.2022].
- [77] CHEN, J. et al. (2017): Assessing the greenhouse gas effects of harvested wood products manufactured from managed forests in Canada. *Forestry* 91:193-205.
- [78] IRSLINGER, R. 2022: Waldlandschaften für Klimaschutz : Fossile Emissionen vermeiden, anstatt sie in Wäldern zu speichern. In: BEMMANN, A., IRSLINGER, R., ANDERS, K. (Hrsg.): *Vom Glück der Ressource : Wald und Forstwirtschaft im 21. Jahrhundert*. München, oekom Verlag. S. 174-191.
- [79] KNAUF, M., FRÜHWALD, A. (2013): Beitrag des NRW Clusters ForstHolz zum Klimaschutz. Studie von Knauf Consulting und Prof. Dr. Arno Frühwald (Zentrum Holzwirtschaft der Universität Hamburg) in Kooperation mit Prof. Dr. Michael Köhl (Zentrum Holzwirtschaft der Universität Hamburg) im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen und des Landesbetriebs Wald und Holz Nordrhein-Westfalen, Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), Münster.
- [80] NABUURS, G.J. et al. (2015): A new role for forests and the forest sector in the EU post-2020 climate targets. *From Science to Policy 2*. European Forest Institute.
- [81] LESKINEN, P. et al. (2018): Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation. In: *From Science to Policy 7*. European Forest Institute:27 pp.
- [82] SATHRE, R., GUSTAVSSON, L. (2009): *A state-of-the-art review of energy and climate effects of wood product substitution*. Ecotechnology, Ötersund, Mid Sweden University.
- [83] EU-Kommission (2022): *Umsetzung des Europäischen Grünen Deals : Erstmalige EU-Zertifizierung der CO₂-Entnahmeremovals*. Europäische Kommission.
- [84] EUROPÄISCHER GRÜNER DEAL 2022: Kommission schlägt Zertifizierung der CO₂-Entnahme vor, um zu Klimaneutralität beizutragen. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_22_7156]; zuletzt aufgerufen am 06.12.2022].
- [85] ISO (International Organization for Standardization)(2019): *Greenhouse gases - Part 2: Spezifikation with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reduction or removal enhancements (ISO 14064-2)*. Second edition 2019-04.
- [86] RÜTER, S. et al. (2011): *Wieviel Holznutzung ist gut für's Klima? CO₂-Bilanzen unterschiedlicher Nutzungsszenarien 2013 bis 2020*. *AFZ-DerWald* 66(15):19-21.
- [87] BOURIAUD, O. et al. (2016) *Romanian legal management rules limit wood production in Norway spruce and beech forests*. *Forst Ecosystems* 3:20.

- [88] SCHULZE, E.D. et al. (2020): The climate change mitigation effect of bioenergy from sustainably managed forests in Central Europe. *Glob. Change Biol. Bioenergy* 12(3):1-12. [<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.12672?af=R>; zuletzt aufgerufen am 06.12.2022].
- [89] PRETZSCH, H. (2005): Stand density and growth of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) : evidence from long-term experimental plots. *Eur J Forest Res* 124:193–205- DOI 10.1007/s10342-005-0068-4.
- [90] NABIS (2022): Eckpunkte für eine nationale Biomassestrategie (NABIS). Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz.
- [91] PRETZSCH, H. (2022) Sie wächst und wächst und wächst. Fakten zum Wachstum der Buche. LWF-Wissen. Beiträge zur Rotbuche. Berichte der bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Pp 25-35.
- [92] UTSCHIG, H. (2000): Wachstum vorherrschender Buchen in Abhängigkeit von Standort und Behandlung. In: *Forst und Holz* 55(2): 44-50.
- [93] SCHULZE, E.D. et al. (2012): Large-scale bioenergy from additional harvest of forest biomass is neither sustainable nor greenhouse gas neutral. *Glob. Change Biol.* 4:611-616.
- [94] COWIE, A.L et al. (2021): Applying a science-based systems perspective to dispel misconceptions about climate effects of forest bioenergy. In: *Global Change Biology Bioenergy*. 13:1210–1231. [<https://doi.org/10.1111/gcbb.12844>; zuletzt aufgerufen am 7.12.2022].
- [95] HENNIG, P., SCHNELL, S., RIEDEL, T (2019): Rohstoffquelle Wald - Holzvorrat auf neuem Rekord. *AFZ-DerWald* 14:24-27.
- [96] SCHMITZ, F. (2019): Herausragendes aus der Kohlenstoffinventur 2017. *AFZ-DerWald* 14:34-36.
- [97] KÖHL, M. et al. (2020): A viable indicator approach for assessing sustainable forest management in terms of carbon emissions and removals. *Ecol. Indic.* 111:106057.
- [98] GAN, J., MCCARL, B.A. (2007) Measuring transnational leakage of forest conservation. *Ecol Econ* 64:423–432.
- [99] JORGENSON, A.K., RICE, J. (2005): Structural dynamics of international trade and material consumption : a cross-national study of the ecological footprints of less-developed countries. *Journal of World-Systems Research* 11(1):57-77.
- [100] LESSENICH, S. (2018): Neben uns die Sintflut : Wie wir auf Kosten anderer leben. München, Piper.
- [101] LUHMANN, H.J. (2006): Kohlenstoffsinken : Alibi oder realer Beitrag zum Klimaschutz? Vortrag, Michael Otto Stiftung. Hamburger Gespräche für Naturschutz.
- [102] BOWDITCH, E. et al. (2020): What is Climate-Smart Forestry? A definition from a multinational collaborative process focused on mountain regions of Europe. *Ecosystem Services* 43:101113.
- [103] IPCC (2007): Climate change 2007: Mitigation of climate change. METZ, B., O.R. DAVIDSON, P.R. BOSCH, R. DAVE, & L.A. MEYER (eds.): Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the IPCC, Cambridge UK, and New York, University Press:543.

[104] NABUURS, G.J. et al. (2017): *By 2050 the Mitigation Effects of EU Forests Could Nearly Double through Climate Smart Forestry*. *Forests* 8:484-498.

[105] NABUURS, G.J. et al. (2018): *Climate-Smart Forestry : quantification of mitigation impacts in three case regions in Europe Outline - Concept of Climate-Smart Forestry - Three cases regions in Europe. From Science to Policy 6*. European Forest Institute.