

Hubert Hasenauer Kohlenstoffkreisläufe in Waldökosystemen

erschienen 06/2014 in der Broschüre „Nachhaltiger Klimaschutz“ des ÖBMV



Seit Beginn der Industrialisierung hat der Ausstoß von Treibhausgasen, insbesondere Kohlendioxid (CO₂), stetig zugenommen. Im Jahr 2008 wurde die bislang höchste bekannte Menge mit 7,7 PgC (10¹⁵ g Kohlenstoff), verursacht durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, erreicht [2]. Zusätzlich wurden 1,2 Pg Kohlenstoff durch die Umwandlung von Wald für landwirtschaftliche Flächen und Siedlungen emittiert. Insgesamt hat sich der CO₂-Anteil in der Atmosphäre von 218 ppm im Jahre 1960 auf derzeit 385 ppm erhöht. Mit der Zunahme des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre kommt es zu einem Anstieg der Temperatur, wobei zu betonen ist, dass ohne CO₂, die durchschnittliche Temperatur auf der Erde -16 °Celsius und nicht wie derzeit etwa +15 °Celsius betragen würde. Im Vergleich dazu wird beim jährlichen Niederschlag eine eher geringe Veränderung erwartet. Für Österreich lässt sich seit 1960 ein Temperaturanstieg von etwa 1,5 °Celsius ermitteln während, die jährlichen Niederschläge sich nicht verändert haben [3].

Die Rolle des Waldes im Klimawandel

Wälder speichern große Mengen an Kohlenstoff und sind daher wichtig für den globalen Kohlenstoffkreislauf [9]. Ohne Wald hätten wir eine um 30% höhere atmosphärische CO₂-Konzentration, womit die Bedeutung des Waldes für die Pufferung des globalen Temperaturanstieges deutlich wird. Diese Tatsache wird in der derzeitigen REDD-Debatte aufgegriffen und hat zum Ziel, Wald zu erhalten und vor allem auch als erneuerbare Ressource nachhaltig zu bewirtschaften. Nachhaltige multifunktionale Waldwirtschaft soll sowohl die Holzproduktion als auch die ökologische Rolle des Waldes berücksichtigen, damit es zu keiner Degradierung von Waldböden sowie negativen Einflüssen auf die Biodiversität kommt. Im Vergleich zu fossilen Produkten ist Holz bzw. Biomasse aus nachhaltiger Waldwirtschaft, CO₂-neutral, weil der freigesetzte Kohlenstoff im Zuge der Photosynthese und des damit verbundenen Waldwachstums wieder gebunden wird.



Abb. 1: Stadien der Waldentwicklung im Urwald und ihre Wirkung auf den Kohlenstoffkreislauf

Warum Holz als CO₂-neutral gilt

Waldökosysteme binden Kohlenstoff. Mit der Kompostierung von abgestorbener Biomasse setzen Wälder aber auch Kohlenstoff an die Atmosphäre frei. Großflächige, vom Menschen unbeeinflusste Waldökosysteme befinden sich im Durchschnitt in einem Gleichgewichtszustand, in dem etwa jene Menge an Kohlenstoff gespeichert wird, welche gleichzeitig durch Abbauprozesse an die Atmosphäre freigesetzt wird. Abb. 1 mit Bildern vom Urwald Rothwald in Niederösterreich zeigt die drei Phasen eines Urwaldes im Kohlenstoffkreislauf [10].

- I. Optimalphase (C-Senke) – der Wald speichert große Mengen an Kohlenstoff (großer Holzvorrat), der Wald ist eine Senke;
- II. Zerfallsphase (C-Quelle) – große umgestürzte Bäume verfaulen und geben Kohlenstoff an die Atmosphäre ab, der Wald ist eine Kohlenstoffquelle;
- III. Verjüngungsphase (C-neutral) – Verjüngungsphase des Waldes bei gleichzeitigem Ende der Zerfallsphase, der Waldbestand ist Kohlenstoff-neutral.

Was bewirkt Waldwirtschaft?

Waldwirtschaft nutzt Holz am Ende der Optimalphase und führt dies idealerweise im Sinne einer kaskadischen Verwendung der gesellschaftlichen Nutzung zu. Am Ende des Prozesses verrottet dann Holz wieder bzw. wird für die Energieerzeugung verwendet. Damit werden fossile Stoffe (Erdöl, Erdgas) substituier und durch die erneuerbare Ressource Holz aus nachhaltiger Waldwirtschaft ersetzt. In Abb. 2 und Abb. 3 wird die Wirkung samt Effekten im Vergleich von Urwald zu Wirtschaftswald schematisch dargestellt.

Das Kyoto-Protokoll

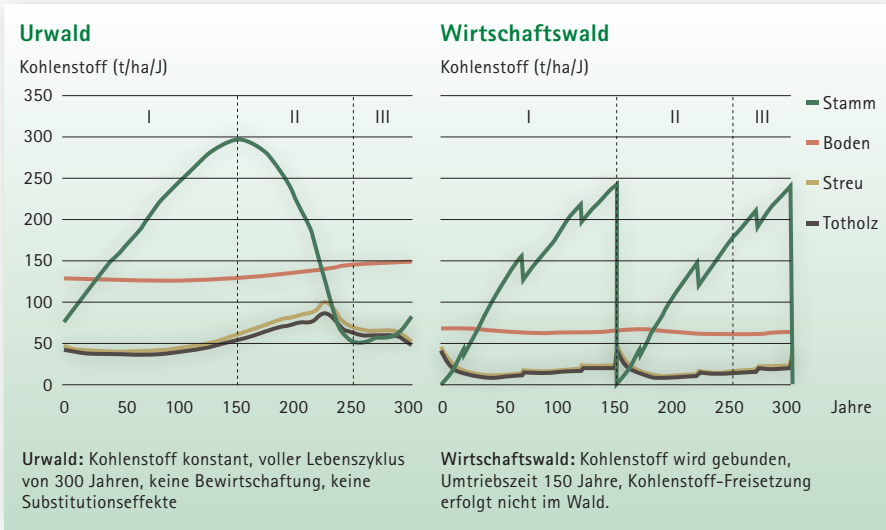
Um gegen die zu erwartende Erderwärmung vorgehen zu können, wurde eine Reihe von Initiativen gestartet, die im Wesentlichen eine Reduktion des Einsatzes fossiler Ener-

gie-träger und damit des CO₂-Ausstoßes an die Atmosphäre zum Ziel haben. Solche Strategien sind etwa die Vorgaben der EU und für Österreich das Ökostromgesetz 2002, der Aktionsplan Energieholz, das Regierungsprogramm zur Förderung der erneuerbaren Energien und vieles mehr.

Die international wichtigste Vereinbarung ist aber das Kyoto-Protokoll. Österreich hat sich bei der Klimakonferenz im japanischen Kyoto zu einer Reduktion des CO₂-Ausstoßes bis 2012 um 13% bezogen auf das Niveau von 1990 verpflichtet [16]. Diese Vereinbarung gilt seit 16. Februar 2005. Parallel dazu hat das Kyoto-Protokoll den Grundstein für einen Handel mit Emissionszertifikaten gelegt. Die Idee dabei ist, dass bei einem Überschreiten der festgesetzten CO₂-Limits Zertifikate zugekauft werden müssen. Da diese Geld kosten, soll auch ein starkes wirtschaftliches Interesse an der Erfüllung der Kyoto-Ziele entstehen. Darüber hinaus enthält das Kyoto-Protokoll Regelungen, wonach auch die Kohlenstoffvorräte in den Wäldern künftig bilanziert werden müssen. Dies ist insbesondere für Staaten wichtig (z. B. tropische Wälder), die großflächig Wald in andere Landnutzungsformen umwandeln und damit große Mengen an im Holz gebundenen Kohlenstoff freisetzen [12]. Für Länder mit nachhaltiger Waldbewirtschaftung gilt es hingegen die Optionen für die Holzernte als erneuerbare Ressource richtig zu nutzen. In Österreich nimmt die Waldfläche derzeit kontinuierlich um etwa 7.000 Hektar jährlich zu, und die jährlichen Holzzuwächse werden im Durchschnitt nur zu rund 75% genutzt. Damit ist der stoffliche und energetische Einsatz von Waldbiomasse – neben den dringend gebotenen Energieeinsparungen – eine der effizientesten Maßnahmen für den Klimaschutz.

Bis zur UN-Klimakonferenz 2009 in Kopenhagen gab es die Bewertung von Waldsenken, und ab 2013 galt die Netto-

Quelle: Boku



Quelle: Boku

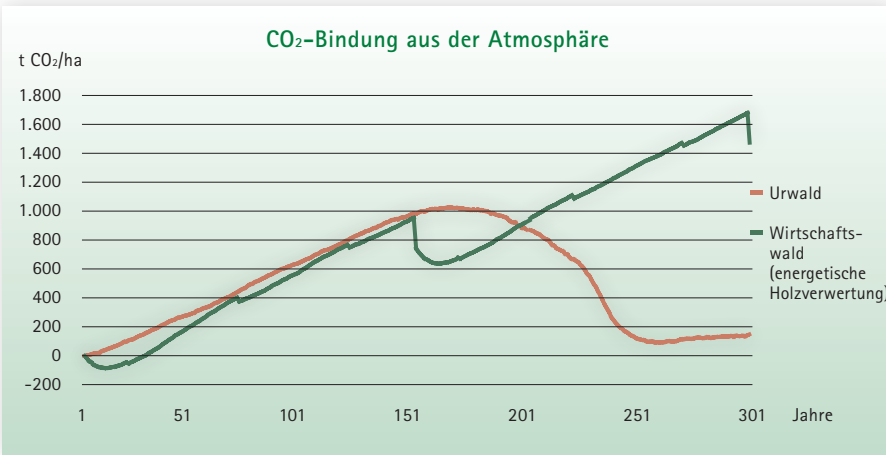


Abb. 2 und 3: Effekte auf den Kohlenstoffkreislauf im Vergleich von Urwald zu Wirtschaftswald. Annahmen: 300 ha Urwald mit idealer Altersklassenverteilung (1 ha = 1 Jahr etc.), in Summe über alle Bestände keine Auswirkungen auf die CO₂-Menge in der Atmosphäre (CO₂-neutral) und somit auch keine Senkenleistung (C-Abgabe und C-Aufnahme ±0).

Im Gegensatz dazu 300 ha Wirtschaftswald mit idealer Altersklassenverteilung (1/2 Umtriebszeit bedeutet 2 ha je Altersklasse) hat aufgrund von Substitutionseffekten (nur energetische ohne stoffliche Verwertung – Ersatz von fossilem Kohlenstoff, 1 t Wald-Kohlenstoff ersetzt 2,7 t fossiles CO₂) einen positiven Effekt. Die dargestellte Senkenleistung (CO₂-Äquivalent grüne Linie) beträgt in Summe etwa 1.603 t CO₂ = 5,34 t CO₂/ha/J. Im Gegensatz zum Urwald wird C bzw. CO₂ nicht durch Zersetzungsprozesse freigesetzt (rote Linie), sondern geerntet und im Zuge der energetischen Nutzung an die Atmosphäre abgegeben.

Atmosphäre: Hier wird die Bindung von CO₂ durch den Wald dargestellt und nicht der Kohlenstoff, weil die Abgabe in Form von CO₂ bei der Verbrennung angenommen wird und hier in der Grafik nicht enthalten ist. Substitutionseffekte bei Ersatz von Heizöl durch Buchenbrennholz mit eingerechnet, Substitutionseffekte durch die stoffliche Nutzung von Holz und Zwischenspeichereffekte von Kohlenstoff in Holzprodukten sind nicht dargestellt. Umrechnung von C auf CO₂ erfolgt auf Basis des Atomgewichtes im Verhältnis 12 : 44 – C : CO₂.

speicherungsrate des Jahres 1990 als Diskussionsgrundlage. Diese Bezugsbasis hätte für Österreich bedeutet, dass trotz der günstigen Rahmenbedingungen die Holzmobilisierung zu drosseln gewesen wäre. Die österreichischen Vertreter haben daher vorgeschlagen, dass eine jährliche Netto-speicherung (für 2013 bis 2020) von rund 2,1 Mio. Tonnen CO₂ im Wald und von rund 4,4 Mio. Tonnen CO₂ in Holzprodukten erfolgen soll. (Zur Orientierung: 1 Mio. Festmeter (fm) Holz entspricht rund 1,1 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten).

Für Österreich als einem der Signatarstaaten stellt sich die Kohlenstoffbilanz derzeit wie folgt dar: Ab 2012 wäre nur mehr ein jährlicher Ausstoß von 68,87 Mio. Tonnen CO₂ erlaubt. Als Basis dafür gilt der Ausstoß aus dem Jahr 1990 mit circa 79 Mio. Tonnen CO₂. Mit Jahresende 2003 betrug der Ausstoß 91,6 Mio. Tonnen, im Jahr 2004 ist dieser etwas gesunken, um 2005 auf die bisherige Höchstmarke von 93,2 Mio. Tonnen CO₂ anzusteigen. 2011 wurden 82,8 Mio. Tonnen gemessen. Hauptverursacher sind die Industrie mit 30% und der Verkehr mit rund 26% der Emissionen. Interessant ist der große Anteil, der durch den Tanktourismus (geschätzte 8 Mio. Tonnen CO₂, s. Kischko 2007) erzeugt wird. Somit ergibt sich derzeit ein Fehlbetrag im Erreichen des Kyoto-Zieles von etwa 24,4 Mio. Tonnen CO₂. Nimmt man an, dass die Emissionszertifikate für eine Tonne CO₂ am internationalen Markt für mindestens 10 Euro/Tonne CO₂ gehandelt werden könnten, so ergäbe sich ein Finanzierungsbedarf von circa 250 Mio. Euro, die Österreich für den Zukauf von Zertifikaten aufzuwenden hätte.

Folgen von Intensivierung der Waldwirtschaft für Kohlenstoffkreislauf

Intensiviert man die Waldwirtschaft, kommt es zu Veränderungen der Waldstruktur. Aus Abb. 2 und Abb. 3 geht hervor, dass ein Urwald bei genügend großer Fläche im

Tab. 1: Kohlenstoffvorräte in europäischen Wäldern und gespeicherter Kohlenstoffgehalt in einem 800 fm-Buchenwald bzw. 800 fm-Fichtenwald (in Tonnen C)

C-Vorräte der Wälder Europas	
Bäume und Boden	12.052 Mio.
davon Baum-Biomasse	7.927 Mio.
Jährliche C-Anreicherung der Wälder Europas	
in Bäumen	101 Mio.
im Boden	28 Mio.
C-Vorrat eines Buchenwaldes (800 fm/ha)	
Derbholz	640
Reisig und Blätter	191
C-Vorrat eines Fichtenwaldes (800 fm/ha)	
Derbholz	528
Reisig und Blätter	205

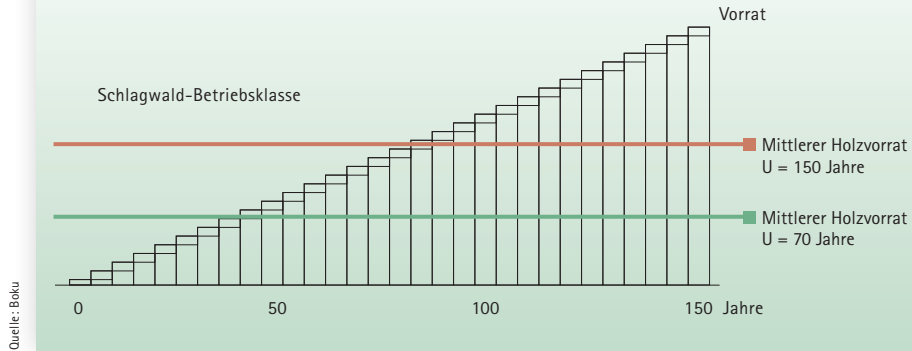
Quelle: Boku

Gleichgewicht ist und im Durchschnitt über alle Altersphasen den größten verteilten mittleren Vorrat aufweist. Dies ist insofern wichtig, weil die Waldbewirtschaftung im Vergleich zu einem Urwald (auf gleicher Fläche) grundsätzlich nicht zu einer Erhöhung des mittleren Vorrates führen kann. Einzige Ausnahmen wären eine Änderung der Baumarten und das Ausbringen genetisch verbesserten Pflanzmaterials.

Würde man den in Abb. 2 dargestellten, in einem ausgeglichen Altersklassenverhältnis befindlichen Wirtschaftswald intensiver nutzen, indem etwa die Umtriebszeit von 150 Jahre auf 70 Jahre verkürzt wird, hätte dies folgende Effekte auf den Kohlenstoffhaushalt (s. Abb. 4 und Abb. 5, Beispiel Ertragstafel Fichte Hochgebirge, mittlere Bonität, Annahme Normalwaldmodell):

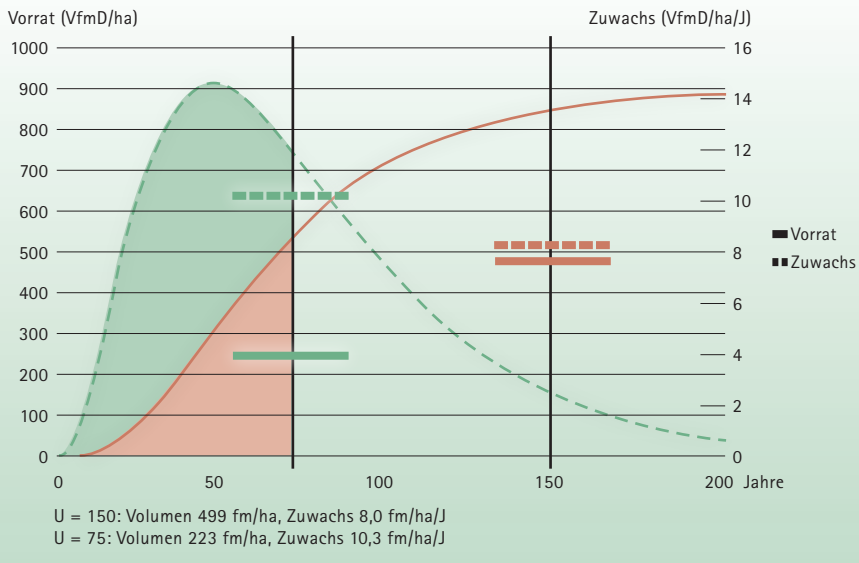
1. Der mittlere Holzvorrat sinkt von 499 fm/ha auf 223 fm/ha.
2. Das bedeutet, dass in kurzer Zeit sehr große Mengen an gespeichertem Kohlenstoff bzw. Holzvolumen dem Wald

**Umtriebszeit wird von 150 Jahre auf 70 Jahre reduziert:
Annahmen ausgeglichenes Altersklassenverhältnis – Normalwaldmodell**



Quelle: Boku

Verkürzung der Umtriebszeit von 150 auf 70 Jahre



Quelle: Boku

Abb. 4 und 5 : Beispiel für die Verkürzung der Umtriebszeit in einem Fichtenreinbestand unter der Annahme eines ausgeglichenen Altersklassenverhältnis (siehe Normalwaldmodell) mit nachhaltiger Nutzung. Die rote waagerechte Linie zeigt in beiden Abbildungen den mittleren Holzvorrat von 499 fm/ha bei einer Umtriebszeit von U=150 Jahren an, die grüne Linie zeigt das sich einstellende Gleichgewicht bei einer Halbierung der Umtriebszeit auf U=70 Jahre mit einem mittleren Volumen von 223 fm/ha.

Die gestrichelten Linien (rot und grün) zeigen die Veränderung des mittleren Volumenzuwachses je Hektar. Es wird deutlich, dass durch die Umtriebszeitverkürzung, die stockenden Vorräte sinken, der Wald im Durchschnitt jünger wird und damit die mittleren Zuwächse je Hektar von 8,0 fm auf 10,3 fm ansteigen (jüngere Bäume haben im Vergleich zu älteren einen höheren Volumenzuwachs). Das Beispiel wurde mit der Ertragstafel Fichte Hochgebirge mittlerer Bonität gerechnet. Ein Übergangszeitraum ist hier nicht berücksichtigt.

entzogen werden. Würde dieser Kohlenstoff-Anteil sofort verbrannt, käme es zu einer zusätzlichen Freisetzung von CO₂ in die Atmosphäre durch erhöhte Waldnutzung, außer der Anteil substituiert fossile Energieträger, wie Kohle, Gas und Erdöl. In diesem Fall würde man zwar mehr Kohlenstoff aus dem Wald entnehmen, aber die Substitutionseffekte und damit die Klimaschutzeffekte sind positiv zu sehen.

3. Durch die Intensivierung (Umtriebszeitverkürzung) werden die Wälder im Mittel jünger. Dies führt zu einem höheren jährlichen Zuwachs, was wiederum kompensatorische Effekte zur Folge hat, weil aufgrund des erhöhten Zuwachses pro Jahr und Fläche mehr CO₂ im Holz gespeichert wird.

Diese mögliche Erhöhung der CO₂-Freisetzung aufgrund von Veränderungen in der mittleren Altersklassenstruktur wird oft als „Carbon debt“ [1] bezeichnet. Damit soll ausgedrückt werden, dass – wenn man einen im Gleichgewicht befindlichen Wald durch Intensivierung der Waldwirtschaft im Mittel verjüngt – sich erst wieder ein neues Gleichgewicht ergeben muss. Bis zur Einstellung des neuen Gleichgewichtes stellt der Wald eine CO₂-Quelle dar.

Genau das Gegenteil – eine Senke – ist der Wald, wenn die Umtriebszeit erhöht wird, Wälder aus der Nutzung gestellt werden oder der Zuwachs nicht genutzt wird. In derartigen Fällen kommt es zu einer Akkumulation der Biomasse, weil die mittleren Volumenvorräte je Hektar steigen bzw. die Wälder im Durchschnitt älter werden. Diese Steigerung der mittleren Hektarvorräte kann theoretisch so lange erfolgen, bis man das Gleichgewicht eines Urwaldes erreicht hat, womit die Bäume aufgrund der physiologischen Altersgrenze absterben und damit CO₂ freisetzen. Bei all diesen Überlegungen sind aber die kompensatorischen Effekte – also die Substitution fossiler

Energieträger – zu beachten. CO₂, das einmal aus fossilen Energieträgern freigesetzt wird, kann zumindest nach unseren Vorstellungen nicht mehr in einem realistischen Zeitrahmen in der Lithosphäre gebunden werden und bleibt damit im CO₂-Kreislauf der Erde. Dies gilt es insofern zu betonen, weil Studien zum Thema „Carbon debt“ [1] im Übergangszeitraum negative Effekte auf den CO₂-Haushalt darstellen (Wald wird zur CO₂-Quelle), ohne auf die positiven Substitutionseffekte einzugehen [7].

Ein wesentlicher Mangel dieser Studien ist, dass der Faktor Zeit bei der Bewertung der fossilen Energieträger nicht in Betracht gezogen wird, bei Wald jedoch schon in die Überlegungen mit eingeht. Die Anlagerung fossiler Energieträger hat Hunderte Millionen von Jahren gedauert, während die Wechselwirkungen zwischen Wald und Atmosphäre wesentlich kürzer (siehe Umtriebszeiten unsere Wälder) anzusehen ist. Nachdem man sich Kreisläufe in erdgeschichtlichen Zeiträumen nicht vorstellen kann bzw. jede Berechnung eines „Carbon debt“ für aus der Lithosphäre gewonnen Energieträger unrealistisch ist, wäre anzumerken, dass hier ein statisches System (fossile Energieträger) mit einem dynamischen System (Wald) verglichen wird, was grundsätzlich als falsch bzw. als Benachteiligung des CO₂-Kreislaufes im Wald anzusehen ist.

Woher kommen Kohlenstoffdaten?

Wald wird seit Jahrhunderten bewirtschaftet. Ein begleitendes Monitoring ist unerlässlich, um eine geregelte Nutzung bzw. Nachhaltigkeit zu gewährleisten. Zu diesem Zweck wurden Waldinventuren mit dem Ziel etabliert, den Volumenzuwachs zu schätzen. Das berechnete Volumen bzw. der Volumenzuwachs kann dann mithilfe von Biomasseexpansions-Faktoren oder mittels Biomassefunktionen (wenn die Einzelbaumwerte Brusthöhendurchmesser und



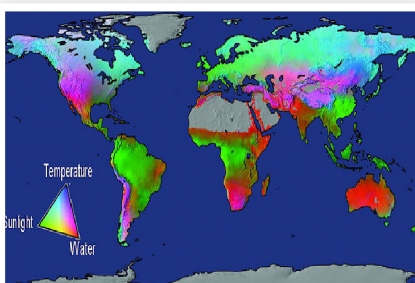
© Boku

Die drei weltweit derzeit verfügbaren Kohlenstoff-Monitoringsysteme sind Waldinventuren zur Ermittlung des Volumens, ...



© Boku

... Flux Tower zur Erfassung der Nettoprimärproduktion über Messungen der Stoffflüsse ...



© Boku

... sowie das auf Satellitendaten basierende Erdbeobachtungssystem MODIS (ebenfalls zur Ermittlung der NPP).

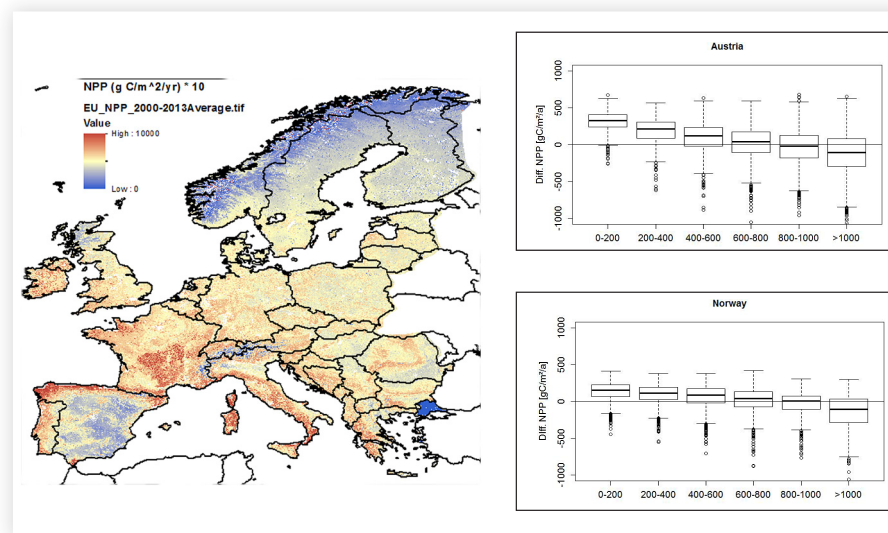
Höhe verfügbar sind) in Kohlenstoff bzw. in NPP (Nettoprimärproduktion) umgerechnet werden (Angaben dazu [14]).

Neben dieser klassisch forstlichen Methode haben sich andere Monitoringsysteme etabliert, die die Ökosystemproduktivität bzw. NPP von Wald abschätzen können. Die Nettoprimärproduktion beschreibt die Menge an Kohlenstoff, die ein Ökosystem im Zuge der Photosynthese aufnimmt, abzüglich der Atmung, die für den Photosyntheseprozess selbst notwendig ist. Monitoringsysteme, die dafür aufgebaut wurden, sind die sogenannte Flux Tower-Messungen sowie NPP-Schätzungen, die aus Satellitendaten (MODIS-NPP) ableitbar sind.

Flux Tower messen Stoffflüsse, genauer gesagt den vertikalen Energie- und Gasaustausch zwischen Ökosystem und Atmosphäre. Aus diesen Messungen ist es möglich, die Netto-NPP zu berechnen. Derzeit gibt es mehr als 500 Flux Tower weltweit (Stand 07.03.2011), die in lokalen Netzwerken und dem globalen FLUXNET-Netzwerk der NASA organisiert sind.

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) ist ein auf Satelliten basiertes Erdbeobachtungssystem der NASA. Anhand der Oberflächenreflexion von rotem und beinahe infrarotem Licht, welches von den Satellitensensoren gemessen wird, kann durch komplexe Algorithmen die NPP berechnet werden [11, 17]. Vorteil dieser Methode ist, dass eine kontinuierlich Schätzung in Abhängigkeit von Vegetationstyp (Gras, Nadelwald, Laubwald oder Mischwald) möglich ist.

Waldinventuren beschreiben sowohl auf betrieblicher als auch auf nationaler Ebene, den Wald anhand von terrestrischen Messungen. In Österreich besteht die Nationale Waldinventur ÖWI aus permanenten Stichprobepunkten. Diese Punkte sind im Abstand von 3,89 km über das gesamte



Quelle: Boku

Abb. 6: Beispiel einer Nettoprimärproduktionsschätzung (NPP) aus MODIS-Satellitendaten für Europa. Die Angaben können als Potenziale der Kohlenstoffbindung in Gramm je m² für ein Jahr verstanden werden (gC/m²/yr). Rechts ist ein Vergleich der Unterschiede in der NPP berechnet aus MODIS-Satellitendaten und Waldinventurdaten (Diff. NPP) in Abhängigkeit von der Bestandesdichtegruppen ausgedrückt als Kronenkonkurrenz-Faktor (Crown Competition Factor – CCF) nach [6] dargestellt. Es zeigt sich ein klarer Trend der Fehlschätzungen in Abhängigkeit von der Dichte, der somit leicht zu korrigieren ist.

Bundesgebiet verteilt. Anhand dieser Daten kann man sowohl die vorhandene Biomasse als auch die NPP berechnen.

Alle drei Methoden eignen sich in unterschiedlicher Weise dafür, die Produktivität von Wäldern zu schätzen. Auffallend ist, dass nur Waldinventuren die tatsächliche akkumulierte Biomasse am Ort ermitteln, da bei den beiden anderen Methoden zwar NPP-Schätzungen – also die Erfassung der Gesamtproduktivität oder Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre – nicht aber Angaben über Verteilung des Kohlenstoffs auf die Kompartimente Blatt, Ast, Wurzel und Stamm möglich sind. Somit lässt sich derzeit auch nicht aus Flux Tower oder MODIS-Satellitendaten die akkumulierte Biomasse am Waldstandort ableiten. Dies ist nur mithilfe terrestrischer Walddaten oder entsprechender Modellierungstheorien möglich [4].

Wie kommt man zu nationalen bzw. europäischen Kohlenstoffdaten?

In vielen Staaten Europas [15] gibt es nationale Waldinventuren, die den Waldzustand erfassen. Solche terrestrische Messdaten erlauben Schätzwerte für Bestandesvorrat, Waldbiomasse, Baumarten-Zusammensetzung oder Bestandesdichte, bei Wiederholungsaufnahmen auch für Bestandeszuwachs. Wenn in einem Untersuchungsgebiet diese Stichproben aus einem systematischen regelmäßigen Raster stammen, sind die Schätzwerte repräsentativ, und für das untersuchte Gebiet kann die Entwicklung des Waldes beurteilt werden. Dieses Prinzip wird von zahlreichen Waldinventursystemen weltweit, wie etwa der Österreichischen Waldinventur, angewandt.

Aus Waldinventurdaten lässt sich die NPP durch Addieren von Kohlenstoffzuwachs des Bestandes und Kohlenstoff im Streufall

berechnen [5]. Kohlenstoffzuwachs wird, ähnlich wie Volumenzuwachs, aus wiederholten Messdaten von Bäumen und Modellen berechnet. Kohlenstoff im Streufall wird mit einem klimasensitiven Modell geschätzt. Die Dichte eines Bestandes ist eine wichtige Variable zur Beurteilung des Bestockungsgrades und der Konkurrenz zwischen Bäumen eines Bestandes.

Eine ganz andere Möglichkeit der NPP-Schätzung ergibt sich aus MODIS-Satellitendaten, die eine flächendeckende 1 x 1 km Schätzung in Abhängigkeit vom Vegetationstyp und täglichen Wetterdaten für die gesamte Welt ermöglichen. Eine der interessanten Fragen ist derzeit, wie derartige unterschiedliche Systeme zusammenpassen. Ergebnisse für Österreich zeigten, dass bei hoher Bestandesdichte die aus terrestrischen Messdaten errechneten NPP-Schätzwerte sehr gut mit den NPP-Schätzungen von MODIS zusammenpassen. Nimmt die Bestandesdichte ab, muss sie berücksichtigt werden, um konsistente und vergleichbare Kohlenstoffschätzwerte zu haben [5, 8] (s. Abb. 6).

Dieses Konzept wird im Moment im Rahmen des EU-Projektes FORMIT für Europa getestet und angewandt, indem Waldinventurdaten für 13 Länder verteilt über Europa harmonisiert werden und mit MODIS Satellitendatenschätzungen verglichen werden. Es zeigt sich ein ähnliches Ergebnis: Wird die aufgrund von Bewirtschaftung beeinflusste Bestandesdichte mithilfe von Konkurrenzfaktoren korrigiert, ergibt sich ein konsistentes Bild zwischen den satellitengestützten und den terrestrischen NPP-Schätzungen.

Wie erwähnt können NPP-Schätzungen aus Satellitendaten keine Waldstrukturen abbilden. Ökosystemmodelle können als Schnittstelle zwischen den Waldinventurdaten und den NPP-Schätzungen fungieren. Am Institut für Waldbau der Universität für Boden-

kultur Wien wird an derartigen Verfahren gearbeitet, damit die Waldbewirtschaftung mittels terrestrischer Daten nachgebildet werden kann. Diese Erntemodelle können in Ökosystemmodelle eingebaut werden und sollten damit eine Verknüpfung der unterschiedlichen Methoden der Produktionsschätzung von Waldgebieten ermöglichen. Unerlässlicher Bestandteil dafür sind allerdings flächendeckende Waldinventurdaten.

Weiters zeigen die Analysen, dass dieses Ergebnis unabhängig von anderen Variablen, wie Baumart, Bonität, Seehöhe oder Waldfragmentierung, ist. Aus diesen Erkenntnissen lässt sich ein Ansatz für ein europaweites Kohlenstoffschätzmodell ableiten. Die aus MODIS-Satellitendaten errechnete NPP gibt ein Potenzial, das im Mittel von den Ergebnissen der Waldinventurdaten nicht erreicht wird, sondern diese überschätzt. Ist die Bestandesdichte bekannt, können diese Ergebnisse reduziert werden und so einen realistischen Schätzwert für die NPP zu erhalten. Die Bestandesdichte lässt sich über terrestrische Daten ermitteln oder über großräumige biogeochemische Modellierung in Kombination mit Management-Routinen abschätzen [14].

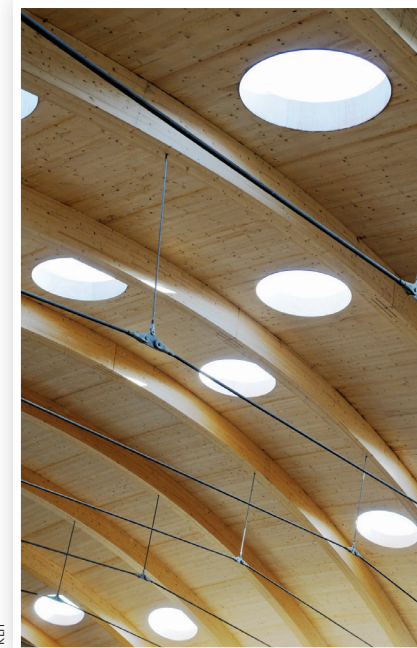
Zusammenfassung und Ausblick

Österreich muss seinen CO₂-Ausstoß senken, um die Klimaziele zu erreichen. Die Förderung erneuerbarer Energien ist notwendig, und so kommt auch der Biomassenutzung aus dem Wald bzw. von landwirtschaftlichen Grenzertragsflächen mehr und mehr Bedeutung zu und führt zu einem verstärkten Interesse an der Bereitstellung von Holz. Dabei ist darauf zu achten, dass die Biomassenutzung nicht zu Degradierungen führt. Äste, Reisig und Blätter, als die Hauptnährstoffträger der Bäume, müssen im Wald verbleiben, damit die Nachhaltigkeit der Standorte gewährleistet bleibt. Holz, das aufgrund seiner Verwendung in Gebäuden, Möbeln etc. vorerst nicht ver-

rottet, dient als „Zwischenlager“ für Kohlenstoff. Diese „Zwischenlagerung“ bzw. kaskadische Verwendung von Holzprodukten verringert zumindest mittelfristig den natürlichen Beitrag zum CO₂-Gehalt in der Atmosphäre. Zu bedenken ist allerdings, dass dieser in den Holzprodukten zwischengelagerte Kohlenstoff nach dem Erreichen der Nutzungsgrenze sowie einer darauf folgenden energetischen Nutzung freigesetzt wird und damit einen Beitrag zur Erhöhung des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre leistet.

Literatur

- [1] Agustini, A., J.J. Giuntoli, A. Boulamanti. 2013. Carbon accounting of forest bioenergy. JRC. Technical Report. 88p.
- [2] Candell, J.G., C. LeQere, M.R. Raupach, Ch.B. Field, E.T. Bultenhuys, P. Clais, T.J. Conway, N.P. Gillett, R.A. Houghton, G. Marland. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. PNAS. 104: 18866-18870.
- [3] Eastaugh, C.S., E. Pötzelsberger, H. Hasenauer. 2011. Assessing the impacts of climate change and nitrogen deposition on Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Austria with BIME-BGC. Tree Physiology 31: 262-274.
- [4] Hasenauer, H., M. Burgmann, M.J. Lexer. 2000. Konzepte der Waldökosystemmodellierung. Austrian Journal of Forest Science. 117: 137-164.
- [5] Hasenauer, H., R. Petritsch, M. Zhao, C. Boisvenue, S.W. Running. 2012. Reconciling satellite with ground data to estimate forest productivity at national scales. Forest Ecology and Management, 276: 196-208.
- [6] Krajicek, J.E., K.A. Brinkman, S.F. Gingrich. 1961. Crown competition - a measure of density. Forest Sci. 1: 35-42.
- [7] Lundmark, T. J. Bergh, P. Hofer, A. Lundström, A. Nordin, B.C. Poudel, R. Sathre, R. Taverna, F. Werner. 2014. Potential Roles of Swedish Forestry in the Context of Climate Change Mitigation. Forests 5: 557-578.
- [8] Neumann, M., M. Zhao, G. Kindermann, H. Hasenauer. 2014. Comparing MODIS Satellite with terrestrial Inventory Data to estimate the NPP of Austrian Forests. Ecological modelling (submitted).
- [9] Pan, Y., R.A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P.E. Kauppi, W.A.Kurz, O.I.O. Phillips, A. Shvidenko, S.L. Lewis, J.G.I Canadell, P. Clais, R.B. Jackson, S.W. Parala, A.D. McGuire, S. Piao, A. Rautianinen, S. Sitch, D. Hayes. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. Science. 333: 988-993.
- [10] Pietsch, S., Hasenauer, H., 2006. Evaluating the self-initialization procedure of large scale ecosystem models. Global Change Biology 12: 1658-1669.
- [11] Running, S., R. Nemani, F. Heinsch, M. Zhao, M. Reeves, H. Hashimoto. 2004. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. BioScience 54: 547-560.



© KIH
Holzbauten sind Zwischenlager für Kohlenstoff und verringern somit den CO₂-Ausstoß in die Atmosphäre.

- [12] Schulze, E.D, C. Wirth, M. Heimann, 2000. Managing forests after Kyoto. Science 289: 2058-2059.
- [13] Thurnher, C., T. Gerritzen, T. Maroschek, M.J. Lexer, H. Hasenauer. 2013. Analysing different carbon estimation methods for Austrian forests. Austrian Journal of Forest Science. 130: 141-165.
- [14] Thurnher, C., C.S. Eastaugh, H. Hasenauer. 2014. A thinning routine for large-scale biogeochemical mechanistic ecosystem models. Forest Ecology and Management. 320: 56-69.
- [15] Tomppo, E., T. Gschwantner, M. Lawrence, R.E. McRoberts. 2010. National Forest Inventories: Pathways for common reporting. Springer, Berlin. 610S
- [16] Weiss, P., K. Schieler, K. Schadauer, K. Radunsky, M. Englisch 2000. Die Kohlenstoffbilanz des österreichischen Waldes und Betrachtungen zum Kyoto-Protokoll. Monographien 106, FBVA UBA.
- [17] Zhao M., S.W. Running. 2010 Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. Science 329: 940-943.

Univ.-Prof. Dr. Hubert Hasenauer
Institut für Waldbau, Department für
Wald- und Bodenwissenschaften,
Universität für Bodenkultur Wien,
hubert.hasenauer@boku.ac.at