3.1.4 Kohlenstoffspeicherung

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und den Berichterstattungspflichten im Rahmen internationaler Klimaschutzabkommen ist die Erhaltung und Verbesserung der CO_2-Speicherkapazität von Wäldern ein **explizites forstpolitisches Ziel** auf internationaler und nationaler Ebene (z.B. MCPFE-Kriterien, EU-Grünbuch zum Waldschutz, Waldprogramme, Zertifizierungssysteme). Unabhängig von der Waldeigentumsart ist daher damit zu rechnen, dass die Ausschöpfung des Kohlenstoff (C)-Speicherpotentials von Wäldern zukünftig eine waldbauliche Zielstellung sein wird.

Jegliche Betrachtung des Wald-C-Kreislaufs erfordert eine Festlegung von **Systemgrenzen**, sowohl in räumlicher als auch in zeitlicher Dimension. Die folgenden Ausführungen beziehen sich daher explizit nur auf die Waldökosysteme selbst und lassen eng mit der Waldbewirtschaftung verbundene Aspekte wie Holznutzung, Substitution und Kaskadennutzung außer Acht.

Als Teilsystems des globalen C-Kreislaufs besteht der Wald-C-Kreislauf wie jeder andere Stoffkreislauf aus **Speichern (*pools*) und Flüssen (*fluxes*)**; Fig. 1). Die größten C-Speicher in Waldökosystemen sind i) die lebende Biomasse (Bäume und Bodenvegetation) und ii) der Boden (Organische Auflage & Mineralboden). Während das Verhältnis zwischen Vegetations-C und Boden-C ist in tropischen Wäldern nahezu ausgeglichen ist, nimmt der Anteil des Boden-C am Gesamt-C-Vorrat mit zunehmendem Breitengrad zu (Tab. 1). In borealen Wäldern übersteigen die Boden-C-Vorräte die Biomasse-C-Vorräte z.T. um das 4fache. Temperate Wälder weisen im Schnitt die geringste C-Dichte je Fläche (tC/ha) auf.

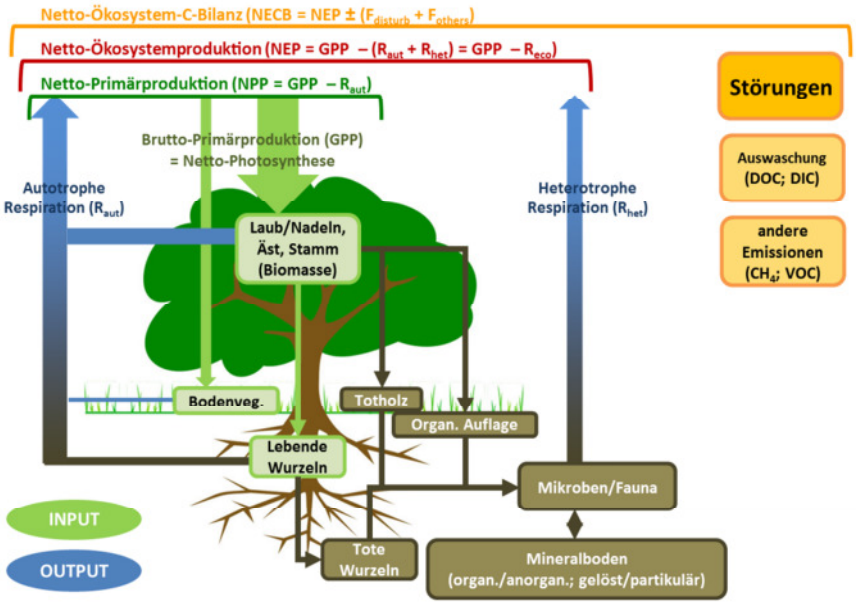


Fig. 1: Der Wald-C-Kreislauf mit seinen wesentlichen Speichern und Flüssen.

Biome	Area (Mha)	Terrestrial carbon stock (Pg)			Carbon density (Mg C/ha)	
		Plants	Soil	Total	Plants	Soil
Tropical forests	1.76	340	213	553	157	122
Temperate forests	1.04	139	153	292	96	122
Boreal forests	1.37	57	338	395	53	296
Total	4.17	536	704	1240	–	–

Tab. 1:
C-Vorräte in verschiedenen Wald-Biomen der Erde und Aufteilung dieses Beitrages auf Vegetation und Böden (*Lal 2005 For Ecol Manage*)

Unabhängig von der Größe des C-Speichers, d.h. der C-Vorräte in einem Waldökosystem, wird dessen **Funktion als Quelle oder Senke** für CO_2 vom Verhältnis zwischen allen C-Flüssen in das System (C-Input; z.B. Photosynthese, lateraler Eintrag) und allen C-Flüssen aus dem System (C-Export; z.B. Atmungsprozesse, Emissionen, Auswaschung) bestimmt. Die Transferprozesse innerhalb des Systems sind für die Quellen- oder Senkenfunktion nicht direkt relevant, können jedoch z.B. durch die Transformation von organischer Substanz Atmungsprozesse beeinflussen. Bei Ausschluss von Störungen sind Waldökosysteme im allgemeinen CO_2-Senken, was sich bezogen auf das Ökosystem an einer positiven Netto-Ökosystemproduktion (NEP>0) ausdrückt. Häufig wird jedoch auch als Bezugsgröße die Atmosphäre gewählt, so dass ein negativer NEP-Wert einer Senkenfunktion (= CO_2-Entzug aus der Atmosphäre) entspricht. Es sollte daher vor der Interpretation einer Studie immer die **Bezugsgröße** geprüft werden.

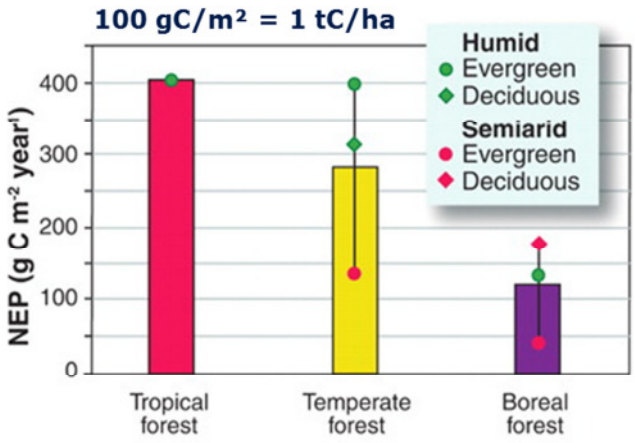


Fig. 2: Mittlere Netto-Ökosystemproduktion in verschiedenen Wald-Biomen der Erde.

http://www.sciencemag.org/content/320/5882/1444/F1.expansion.html

Da Waldökosysteme im Vergleich zu den meisten anderen Ökosystemen, insbesondere aber zu ackerbaulich genutzten Flächen, höhere C-Dichten je ha aufweisen, führt die Umwandlung von Wald i.d.R. zu C-Verlusten. Die **Vermeidung von Entwaldung** ist daher für die Erhaltung der globalen Wald-C-Vorräte von immenser Bedeutung. Dies klingt trivial – aber der Verlust von Waldfläche durch Landnutzungsänderungen ist noch immer ein großes Problem insbesondere in Asien, Südamerika und Afrika.

Im Umkehrschluss ist die **Waldmehrung** durch Aufforstung i.d.R. ein wirksames Mittel zur Erhöhung der Ökosystem-C-Vorräte. Allerdings ist der Netto-Effekt von Aufforstung abhängig vom Ausgangszustand des Systems (Landnutzungstyp und C-Dichte/ha vor Aufforstung), vom betrachteten Kompartiment (Biomasse, Boden, …) und von der Klimazone (Fig. 3). Meistens manifestieren sich die (positiven) Auswirkungen von Aufforstung auf den C-Haushalt nur langfristig, d.h. nach mehreren Dekaden, so dass Waldmehrung eher Teil langfristiges Strategie ist.

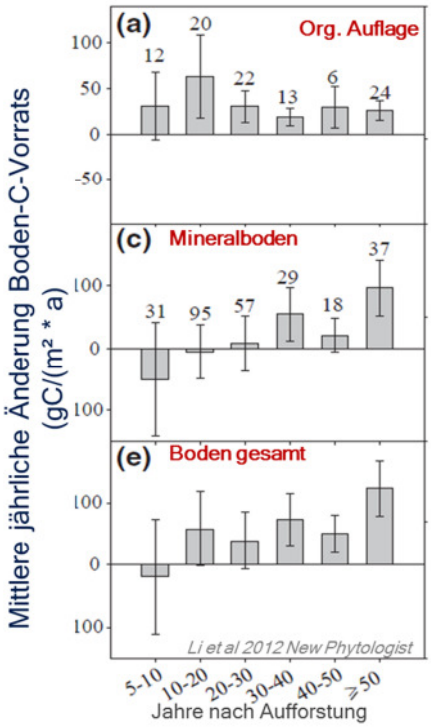


Fig. 3: Mittlere Änderung der Boden-C-Vorräte in der organischen Auflage und im Mineralboden nach Aufforstung über die Zeit. (Meta-Analyse; *Li et al. 2012 New Phytologist*)

Großflächige Störungsereignisse führen i.d.R. zu ähnlichen Effekten wie Entwaldung, allerdings ohne eine nachfolgende Überführung in andere Landnutzungsformen. Abgesehen von möglichen direkten durch das Störungsereignis bedingten C-Verlusten (z.B. CO_2-Emissionen bei Waldbrand) kommt es zu indirekten C-Verlusten aus dem System. Dies ist i.d.R. die Folge aus einer verringerten CO_2-Bindung (Photosynthese) aufgrund des Verlusts an lebender Biomasse und einem verstärkten mikrobiellen Abbau von organischem Material (Fig. 4). Je nach Störungstyp ist unterschiedlich viel totes organisches Material vorhanden, welches in den folgenden Dekaden in Abhängigkeit von Klimazone und Umweltbedingungen (Temperatur, Feuchte, etc.) zersetzt wird. Der Zeitraum, in dem das Waldökosystem nach der Störung eine C-Quelle ist, hängt dabei von der Dynamik der Zuwachs- und Abbauprozesse und deren Verhältnis zueinander ab.

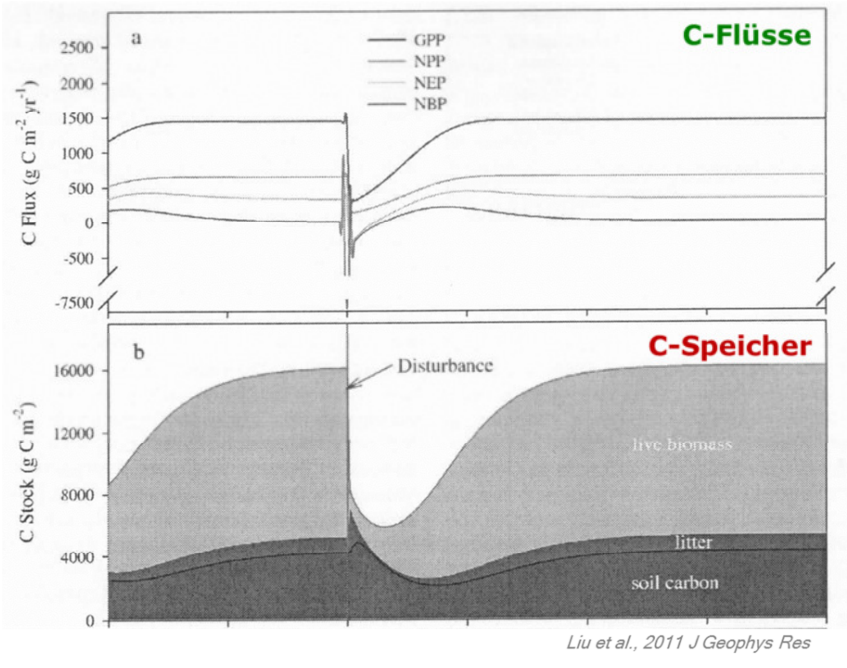
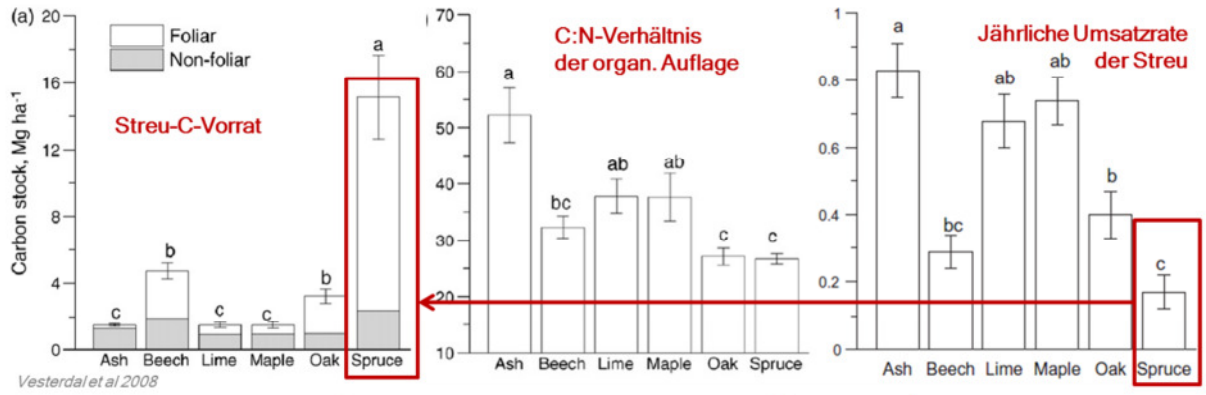


Fig. 4: Dynamik der C-Speicher und C-Flüsse nach einem idealisierten Störungsereignis über die Zeit. (*Liu et al. 2011 J Geophys Res)*

Aus der konzeptionellen Betrachtung von C-Speichern und C-Flüssen lassen sich mögliche **Ansatzpunkte für waldbauliche Strategien** zur Beeinflussung des Wald-C-Kreislaufs ableiten. So kann z.B. entweder auf der Input-Seite der Zuwachs erhöht werden (mehr CO_2-Bindung) oder auf der Export-Seite können C-Verluste verringert werden (reduzierte CO_2-Freisetzung). **Eine Maximierung des C-Speichers (d.h. des C-Vorrats) ist dabei nicht identisch mit einer Maximierung der CO_2-Bindung!**

Als eines der wesentlichen waldbaulichen Werkzeuge hat die **Baumartenwahl** auf verschiedenen Wegen ebenfalls einen Einfluss auf den Wald-C-Kreislauf. Baumartenspezifische Unterschiede hinsichtlich Holzdichte, Stammzahl und Holzzuwachs (vgl. Buche und Fichte) können sich dabei u.U. aufheben, so dass grundsätzlich möglichst viele Aspekte der Baumarten bei Entscheidungsprozessen berücksichtigt werden sollten. In Abhängigkeit von der Qualität der Streu und deren Zersetzungsraten beeinflussen Baumarten die in der organischen Auflage vorhandenen C-Vorräte hinsichtlich Menge und Zersetzbarkeit (Fig. 6). Unterschiedliche Durchwurzelungstiefen und -muster können zu Unterschieden hinsichtlich des Eintrags von gelöstem organischen C durch Rhizodeposition und entsprechend zu unterschiedlichen C-Vorräten im Mineralboden führen. In Mischbeständen kommt es im Vergleich zu Reinbeständen in günstigen Situationen zu einer Erhöhung der Biomasseproduktion und entsprechend zu höheren Biomasse-C-Vorräten, z.T. auch zu höheren Boden-C-Vorräten. Allerdings überwiegen die Unterschiede zwischen einzelnen Baumarten oft mögliche Mischungseffekte hinsichtlich des C-Kreislaufs. Angesichts der Vermeidung von Störungen (C-Verluste!) ist die im Regelfall größere Stabilität von Mischbeständen jedoch ein gutes Argument für Mischbestände selbst wenn keine positiven Effekte auf den C-Haushalt nachzuweisen sind.



Streu C:N	Ash	Beech	Lime	Maple	Oak	Spruce
Foliar	25.1 (2.3)d	37.3 (2.8)a	28.0 (1.5)cd	27.1 (1.1)cd	31.4 (1.3)bc	36.5 (3.1)ab

Fig. 6: Einfluss der Baumart auf die C-Vorräte und das C:N-Verhältnis in der organischen Auflage, die jährliche Umsatzrate der Streu und die C:N-Verhältnisse der Streu. (*Vesterdal et al. 2008, 2012 For Ecol Manage)*

Forstliche Bewirtschaftungsmaßnahmen stellen weitere wesentliche Ansatzpunkte zur Beeinflussung des Wald-C-Kreislaufs dar. Extreme Eingriffe wie Kahlschläge ähneln in ihren Folgen natürlichen großflächigen Störungsereignissen und führen im Regelfall dazu, dass das Ökosystem über lange Zeit eine C-Quelle ist. Dabei spielen insbesondere teilweise erhebliche C-Verluste aus dem Boden (organische Auflage und Mineralboden) durch Bodenverwundung und verstärkten Abbau aufgrund eines veränderten Strahlungs- und Feuchteregimes eine große Rolle, da diese je nach Standort z.T. erst nach 100 Jahren wieder ausgeglichen sind (Fig. 7). Bodenverwundungen im Zuge von regulären Durchforstungen können ähnliche Auswirkungen auf die Boden-C-Vorräte haben, insbesondere in den Tropen und den gemäßigten Breiten. Ein **Kahlschlagsverzicht** und ein **umfassender Bodenschutz** sind somit essentiell für eine C-optimierte Waldbewirtschaftung.

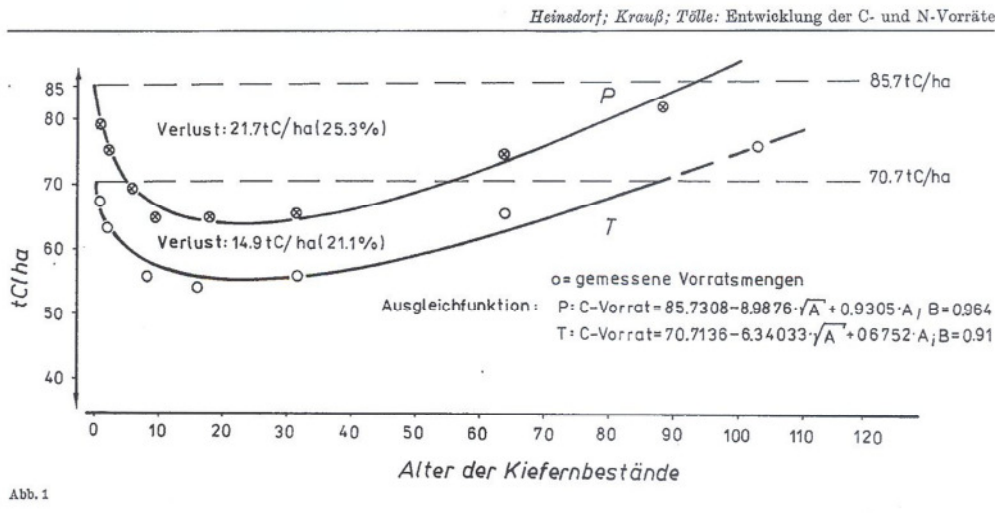


Fig. 7: Nach Kahlschlag in Kiefernreinbeständen auf etwas besseren („P“) und schwächeren („T“) Standorten kommt es über Jahrzehnte zu massiven Kohlenstoffverlusten. Aus Heinsdorf et al., 1988

Bei Verzicht auf Bodenverwundung und -bearbeitung führen flächige **Durchforstungen** jedoch nur kurzfristig zu einer Abschwächung der CO_2-Bindung, die durch die verbesserte Entwicklung des verbleibenden Bestands und die dementsprechende Zuwachssteigerung je nach Entnahmeprozent zügig wieder ausgeglichen wird.

Da mit zunehmendem **Bestandesalter** sowohl die Biomasse- als auch die Boden-C-Vorräte unbewirtschafteter Wälder ansteigen, zeichnen sich auch Wälder mit einzelbaumweiser Bewirtschaftung und Wälder, die aus der Bewirtschaftung entlassen wurden, i.d.R. durch höhere C-Vorräte aus. Dabei gibt es jedoch deutliche Unterschiede zwischen Baumarten und Klimazonen, insbesondere hinsichtlich der Größenordnung der maximalen C-Vorräte einzelner Ökosystemkompartimente. Auch bei bewirtschafteten Wäldern ist dieser Trend zu finden – hier führt eine Erhöhung der **Umtriebszeit** zu einer Erhöhung der C-Vorräte (Fig. 8).

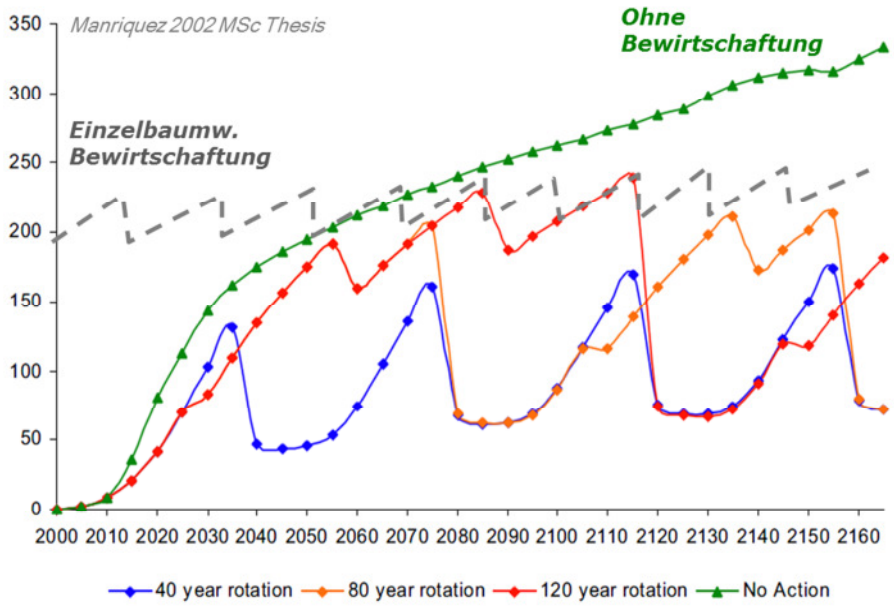


Fig. 8: Einfluss er Umtriebszeit bzw. des Bewirtschaftungsverfahrens auf die Ökosystem-C-Vorräte. Boden-C-Vorräte sind nicht berücksichtigt. (*Manriquez 2002, MSc. Thesis*)

Weitere Maßnahmen, die (mittel- langfristig) zu einer Erhöhung des Wald-C-Vorrats führen können, sind die **Wiedervernässung von Waldmooren** (Verzicht auf Drainage) sowie der **Verzicht auf Kalkung und Düngung**.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass neben **Walderhaltung und Waldmehrung** insbesondere der **Erhalt stabiler Waldbestände** wichtig für einen optimalen Beitrag des Waldbaus zum Klimaschutz ist. Kurzfristig ist hierbei die **Minimierung der C-Verluste** durch die Reduzierung von Großschadereignissen und den Verzicht auf Kahlschlag, Bodenbearbeitung, Drainage und Kalkung von entscheidender Bedeutung. Eine strategische Entscheidung für

a) die **Maximierung des Wald-C-Speichers** durch eine Extensivierung der Nutzung und einer Ausschöpfung des Boden-C-Speicherpotentials oder
b) für die **Maximierung der CO_2-Bindung** durch Zuwachsoptimierung (bei gleichzeitiger Stabilisierung des Boden-C-Vorrats!) und nachfolgende Holznutzung (Substitutionseffekte)

liegt letztendlich im Ermessen des Waldeigentümers. Im Zuge der Entscheidungsfindung sollten jedoch unbedingt mögliche **Auswirkungen auf und Interaktionen mit anderen Waldfunktionen** (Wasserhaushalt, Biodiversität, usw.) berücksichtigt werden!