

Waldbewirtschaftung zur Senkenerhöhung? Mögliche Konfliktfelder und Synergien

Esther Thürig
Edgar Kaufmann

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL (CH)*
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL

Increasing carbon sinks by forest management? Conflicts and synergies

A new function of forests was brought into focus by the Kyoto Protocol: forests as carbon sinks. Switzerland decided to have forest management taken into account under the Kyoto Protocol (Art. 3.4). This new forest function brings about new conflicts. The Swiss Forestry statistics and the Swiss National Forest Inventory show harvesting amounts are increasing and the trend seems set to continue. In a study by the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL) different forest management scenarios were analyzed as was their influence both on the amount harvested in the long term and the forest sink effect. The study focussed on the following question: How can increased forest management be combined with forest carbon sinks and where are the limits? The scenarios range from reduced forest management and corresponding forest carbon sinks to a reduction of growing stock with corresponding carbon sources. Results show that for a limited time span both aspects can be considered on a national scale. Further studies should focus on interactions with other forest functions such as preservation of biodiversity, damage to forests and the effect of climate change.

Keywords: forest carbon sinks, forest management, CO₂, Kyoto Protocol
doi: 10.3188/szf.2008.0281

* Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf, E-Mail esther.thuerig@wsl.ch

Die Wälder in der Schweiz erfüllen viele verschiedene Ansprüche. Nebst den Nutz-, Schutz- und Wohlfahrtsfunktionen ist mit dem Kyoto-Protokoll eine weitere Waldleistung ins Zentrum gerückt: der Wald als Kohlenstoffspeicher. Internationale Studien zeigen, dass die Wälder Europas zurzeit grösstenteils Kohlenstoffsinken darstellen (Goodale et al 2002), weil die Nutzung und die Mortalität in den meisten Gebieten kleiner sind als der Brutto-Zuwachs. Dies ist auch in der Schweiz der Fall. Laut dem Schweizer Treibhausgasinventar waren die Wälder in den letzten 16 Jahren eine Kohlenstoffsink von durchschnittlich drei Mio. t CO₂/Jahr (FOEN 2008, Thürig & Schmid 2008). Der Bundesrat und die eidgenössischen Räte haben entschieden, in der Schweiz die Kohlenstoffsinken, die durch die Waldbewirtschaftung entstehen, im Rahmen des Kyoto-Protokolls (Artikel 3.4) anrechnen zu lassen. Während der ersten Verpflichtungsperiode (2008 bis 2012) sind dies maximal 1.83 Mio. t CO₂/Jahr.

Ausgelöst durch steigende Energiepreise, die prognostizierte Energielücke und die steigende Nachfrage nach Rundholz wird in der Schweiz mehr Holz eingeschlagen. So weist die Forststatistik¹ für das Jahr 2006 eine Nutzung von 5.7 Mio. m³ Derbholz aus, rund 10% mehr als in den vorhergehenden Jah-

ren. Der aktuelle und vermutlich anhaltende Holzboom scheint mit einer Senkenwirkung in Konflikt zu stehen.

Taverna et al (2007) zeigten in einer Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (Bafu), dass die Wald- und Holzwirtschaft einen beachtlichen und nachhaltigen Beitrag zur Minderung des Treibhausgaseffektes leisten kann. Sie empfehlen, 1) einen nachhaltigen, grossen Holzzuwachs zu generieren, 2) diesen Zuwachs nachhaltig zu nutzen, 3) das Holz kaskadenartig stofflich zu verwenden und 4) die nicht mehr weiterverwendbaren Materialien zuletzt noch energetisch zu verwerten (siehe auch Hofer et al 2008, in diesem Heft).

In der vorliegenden Arbeit werden anhand von Resultaten aus der Untersuchung von Taverna et al (2007) sowie weiteren Modellszenarien Konflikte und mögliche Synergien zwischen Holznutzung und Senkenbildung im Wald aufgezeigt. Die Modellrechnungen simulieren die Auswirkungen von Waldbewirtschaftungsszenarien für die nächsten 90 Jahre, was einem Zeitraum von rund einer Umtriebszeit entspricht. Für die Planung der Investitionen in der

¹ www.agr.bfs.admin.ch/ReportFolders/ReportFolders.aspx
(16.06.2008).

Holzwirtschaft ist jedoch das Holzaufkommen in den nächsten 15 bis 20 Jahren entscheidend. Aus diesem Grund werden verschiedene Simulationszeiträume miteinander verglichen. Die Resultate der Szenarien werden bezüglich 1) Kohlenstoffsenken im Wald, 2) Holznutzungsmengen und 3) Verlauf der Zuwachsleistungen analysiert, bewertet und diskutiert.

Modelle und Szenarien

Die Modellierung beruht auf dem Waldentwicklungs- und Waldbewirtschaftungsmodell «Massimo» (Kaufmann 2001B) und dem Bodenmodell «Yasso» (Liski et al 2005).

Modellierung der Waldentwicklung und -bewirtschaftung

Im Modell «Massimo» (Management scenario simulation model) wird jeder einzelne Baum anhand seines Brusthöhendurchmessers (BHD) modelliert. Es besteht aus den vier Teilmodellen Wachstum, Bewirtschaftungsszenarien, Mortalität und Verjüngung. Die Teilmodelle beruhen auf Daten des ersten und zweiten Landesforstinventars (LFI; Mahrer et al 1988, Brassel & Brändli 1999).

Die Wachstumsfunktionen wurden mit statistischen Methoden aus dem LFI1 und dem LFI2 hergeleitet und in Thürig et al (2005A) validiert. Sie berechnen in Zehnjahresschritten distanzunabhängig den Durchmesser- resp. Grundflächenzuwachs der einzelnen Bäume als Funktion von Standortbedingungen, Waldstruktur und Konkurrenzbedingungen.

Die Bewirtschaftung ist im Modell definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass ein Einzelbaum zu einem bestimmten Zeitpunkt geerntet wird. Es wird zwischen der Art des Eingriffes (Räumung oder Durchforstung von gleichförmigem Hochwald) und der Stärke des Eingriffes unterschieden. Das Basiszenario führt die Waldbewirtschaftung der Jahre 1986 bis 1995, wie sie im Landesforstinventar ermittelt wurde, weiter. Die auf logistischen Modellen beruhenden Eingriffswahrscheinlichkeiten sind also empirisch aus den Daten des LFI1 und des LFI2 hergeleitet. Allerdings wird dieses Szenario im vorliegenden Artikel nicht dargestellt, da es von der Wirklichkeit (gestiegene Nutzung zwischen LFI2 und LFI3) buchstäblich überholt worden ist. Für die übrigen Bewirtschaftungsszenarien werden die für das Basiszenario hergeleiteten Eingriffswahrscheinlichkeiten verändert. Das heisst, die Wahrscheinlichkeit jedes Einzelbaumes, bei einer Durchforstung oder einer Verjüngung genutzt zu werden, wird entsprechend herabgesetzt (geringere Nutzung) oder erhöht (höhere Nutzung).

Auch die natürliche Mortalität wurde aus den Werten des LFI1 und des LFI2 abgeleitet. Aller-

dings können sich im Rahmen einer 90-jährigen Simulation die Bestandesstrukturen erheblich verändern. Werden zum Beispiel in der Modellrechnung die Erntemengen reduziert, so werden die Bestände dichter, und die Mortalität nimmt wegen der gegenseitigen Konkurrenz zu. Dies wurde im Modell berücksichtigt, indem aus ertragskundlichen Langzeituntersuchungen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), ausgewählten LFI-Stichproben mit hohen Holzvorräten und Expertenwissen obere Grenzen von Bestandesdichten für verschiedene Wuchsregionen definiert wurden. Aus diesen Grenzen wurden Regeln abgeleitet: Erreicht ein Bestand eine bestimmte Bestandesdichte (Basalfläche zwischen 50 und 75 m²/ha je nach Wuchsregion), steigt die Mortalität exponentiell an. Zusätzlich nimmt die Mortalität auch in sehr alten Beständen exponentiell zu, d.h. ab einem Alter von 150 Jahren im Mittelland und ab 250 Jahren in den Alpen (Schmid et al 2006).

Auch die Verjüngung ist empirisch definiert. Nach einem Verjüngungsschlag wird der Bestand durch einen zufällig ausgewählten, tatsächlich existierenden LFI-Jungwald aus der gleichen Wuchsregion ersetzt.

Die Biomasse eines Baumes wird in «Massimo» mit Hilfe allometrischer Funktionen für Schaftholz in Rinde und Stock (Kaufmann 2001A), Wurzel- und Nadelmasse und Volumen von Astderbholz und Reisig geschätzt (Perruchoud et al 1999).

Modellierung des Bodenkohlenstoffs

Die Veränderungen des im Boden gelagerten Kohlenstoffs wurden mithilfe des Bodenmodells «Yasso» abgeschätzt (Liski et al 2005). Das Modell simuliert den Abbau von Streu und Totholz zu Humus und benötigt nur wenige Eingangsgrößen: jährliche Streumenge, deren chemische Zusammensetzung und einfache Klimagrößen. Zur Bodenstruktur werden keine Angaben benötigt. Die Abbauraten auf unterschiedlichen Standorten unterscheiden sich folglich nur durch die Streuqualität und die verwendeten Klimawerte. Dieses finnisch-schwedische Modell wurde von Thürig et al (2005B) für die Schweiz parametrisiert und validiert und zeigt mit Ausnahme des Tessins eine gute Übereinstimmung mit gemessenen Bodenwerten.

Bewirtschaftungsszenarien

Es werden vier verschiedene Bewirtschaftungsszenarien untersucht: 1) Reduzierte Waldpflege, 2) Kyoto optimiert, 3) Zuwachs optimiert und 4) Vorratsabbau.

1) Reduzierte Waldpflege: Ziel dieses Szenarios ist es, den Effekt der Wälder als Kohlenstoffsenken zu maximieren. Damit soll der aktuelle Beitrag der Wälder zur Eindämmung des Kohlendioxidanstiegs in der

Atmosphäre vergrößert werden. Dazu wird die Bewirtschaftung auf eine minimale Waldpflege zur Erhaltung der Schutztauglichkeit in Gebirgswäldern beschränkt.

2) Kyoto optimiert: Mit diesem Szenario sollen die beiden Waldfunktionen Holzproduktion und Kohlenstoffsenken in Einklang gebracht werden: Nebst einem grossen Massenzuwachs soll der Vorrat in den Wäldern pro Jahr um die im Kyoto-Protokoll anrechenbare Menge von 1.83 Mio. t CO₂ erhöht werden. Dies wird mit einer gesamtschweizerischen Vorraterhöhung von 1.5 m³/ha/Jahr Schaftholz in Rinde und Stock auf einer Waldfläche von mindestens 1.065 Mio. ha erreicht. Die angestrebte Vorratszunahme wird durch eine allmähliche Verminderung der Durchforstungseingriffe erreicht.

3) Zuwachs optimiert: Das Szenario bezweckt, die Zuwachsleistung des aktuell bestehenden Waldes durch eine geeignete Bewirtschaftung langfristig zu sichern. Dies wird im Modell erreicht durch die Wahl geeigneter Umtriebszeiten, Durchforstungseingriffe und eine konsequente Verjüngung (Taverna et al 2007).

4) Vorratsabbau: In diesem Szenario wird die Holznutzung in den ersten 20 Jahren – dem Planungs- und Investitionszeitraum der Holzwirtschaft – stark und anschliessend geringfügig erhöht. Mittels häufigeren Durchforstungen und stärkeren Eingriffen im Starkholz wird der Vorrat bis 2096 von heute 365 m³/ha auf 300 m³/ha gesenkt.

Im gleichförmigen Hochwald lässt sich die grösste, langfristig nachhaltige Zuwachsleistung durch eine ausgeglichene Altersklassenverteilung erzielen. In den Szenarien 2, 3 und 4 wurde deshalb der gleichförmige Hochwald nach Produktionsregionen und Standortgüteklassen stratifiziert und für jedes Stratum eine passende Umtriebszeit definiert. Die jährliche Verjüngungsfläche wurde so bemessen, dass in jedem Stratum nach einer Umtriebszeit eine gleichmässige Altersklassenverteilung vorliegt. Rund 6% des produktiven Waldes wurden als Reserverate und Altholzinseln ausgeschieden. Diese drei Szenarien unterscheiden sich damit nur durch die Häufigkeit und Stärke der Durchforstungseingriffe. Im Gegensatz dazu wird im Szenario 1 die Bewirtschaftung auf eine minimale Waldpflege in Gebirgswäldern reduziert.

Für alle Simulationen wurde eine konstante Waldfläche von 1.065 Mio. ha angenommen. Dies entspricht jener Waldfläche, welche sowohl im LFI1 als auch im LFI2 auf dem gemeinsamen Stichprobennetz erhoben wurde und für welche das Modell «Massimo» kalibriert wurde.

Die Szenarien werden bezüglich des Kohlenstoffgehalts in der Biomasse und im Boden über 90 Jahre verglichen. Um Konflikte und Synergien aufzuzeigen, werden zudem die Szenarien «Kyoto optimiert» und «Vorratsabbau» bezüglich der Entwicklung von Vorrat, Zuwachs und Abgang aus Nutzung und Mortalität näher untersucht.

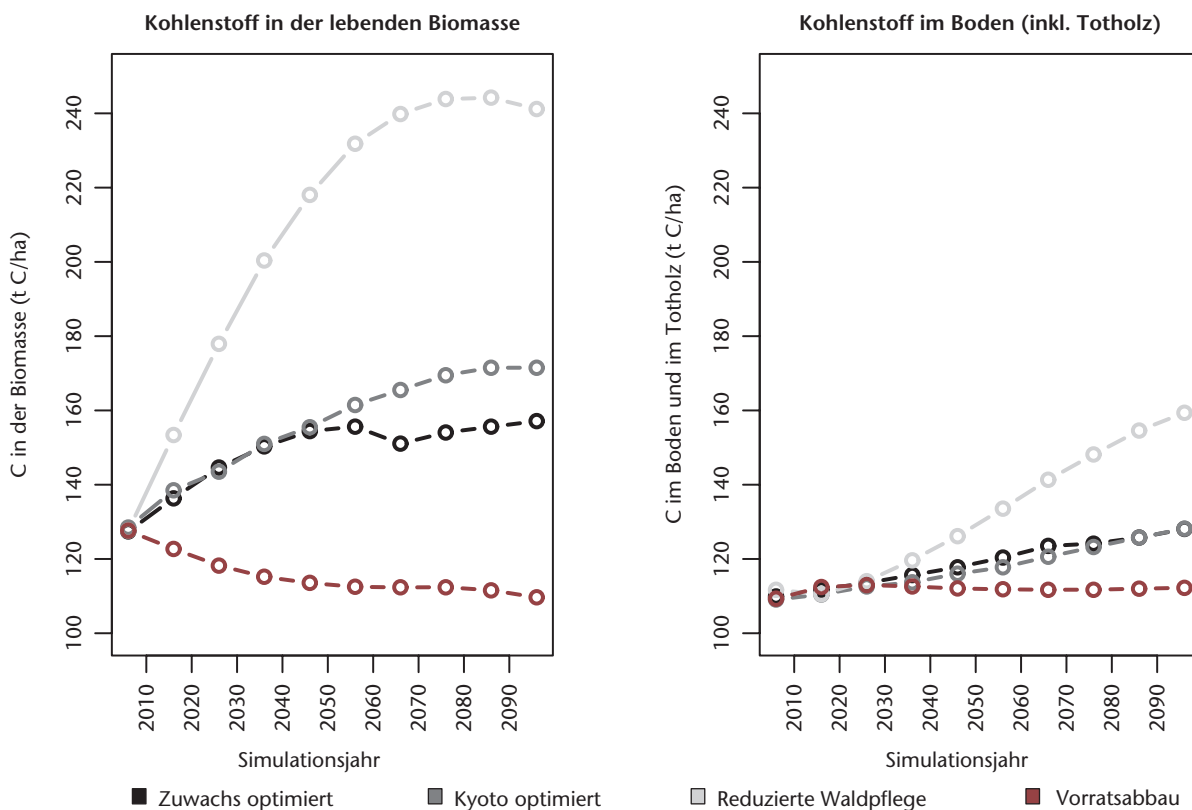


Abb 1 Entwicklung des Kohlenstoffvorrates in der lebenden Waldbiomasse und im Boden (inkl. Totholz) der vier Bewirtschaftungsszenarien. Umrechnung: C × 3.667 = CO₂.

Simulationszeit	Szenario «Vorratsabbau»			Szenario «Kyoto optimiert»		
	Vorrat (m ³ /ha)	Zuwachs (m ³ /ha/J)	Abgang (m ³ /ha/J)	Vorrat (m ³ /ha)	Zuwachs (m ³ /ha/J)	Abgang (m ³ /ha/J)
2016	346	8.8	10.6	390	9.5	7.3
2026	331	8.3	9.7	402	9.3	8.1
2096	300	8.1	8.7	465	9.9	10.0
Durchschnitt 2007–2026		8.5	10.2		9.4	7.7
Durchschnitt 2007–2096		8.2	8.9		9.6	8.5

Tab 1 Simulation von Vorrat, Zuwachs sowie Abgang aus Nutzung und Mortalität anhand der Szenarien «Vorratsabbau» und «Kyoto optimiert». Bei allen Resultaten wird von einer Waldfläche von 1.065 Mio. ha ausgegangen. Angaben in Schaftholz in Rinde und Stock.

Resultate

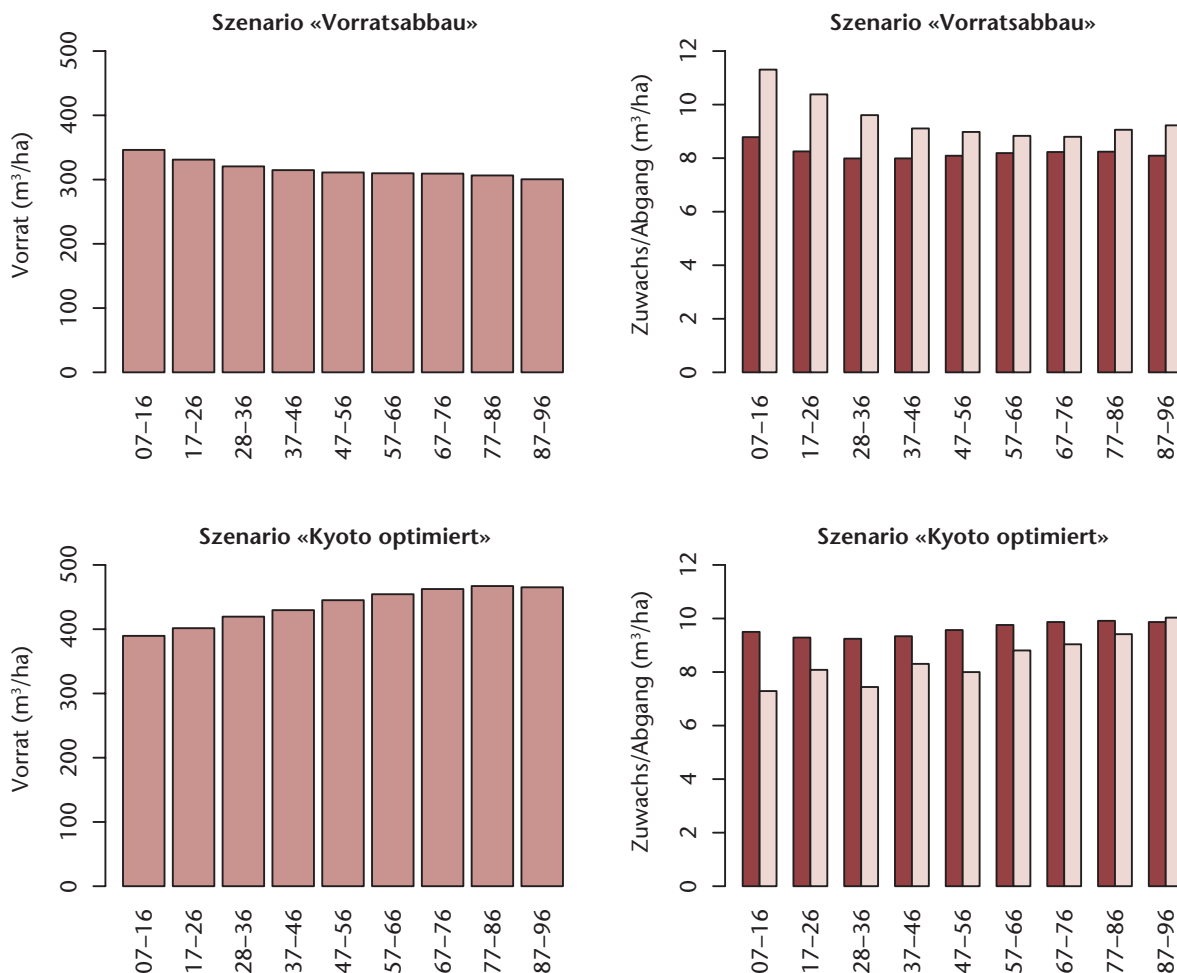
In den nächsten 50 Jahren bewirkt das Szenario «Reduzierte Waldpflege» bei einer Waldfläche von 1.065 Mio. ha eine Kohlenstoffsенке in der lebenden Waldbiomasse von 1.3 bis 2.5 Mio. t C/Jahr (Abbildung 1). Umgerechnet in die internationale Emissions- und Handelseinheit CO₂ (C × 3.667 = CO₂) entspricht dies 5 bis 9 Mio. t CO₂/Jahr. Diese grosse Senke erklärt sich durch den hohen Zuwachs und den geringen Abgang aus Nutzung und Mortalität.

lität. Durch die Zunahme der dichteabhängigen Mortalität wird diese Senkenwirkung allmählich gebremst und schwächt sich auf rund 1 Mio. t CO₂/Jahr ab. Aufgrund der grossen Totholz mengen, welche durch Pilze und Mikroorganismen zersetzt werden und damit Kohlendioxid an die Atmosphäre abgeben, wird der Wald etwa ab dem Jahr 2080 sogar zur Kohlenstoffquelle. Im Boden bewirkt das Szenario «Reduzierte Waldpflege» in den ersten zehn Jahren eine Kohlenstoffquelle von rund 0.5 Mio. t CO₂/Jahr, weil die Reduktion der Bewirtschaftung auch den jährlichen Eintrag an Abraum verkleinert. Mit zunehmendem Vorrat steigt in der Folge jedoch der jährliche Eintrag an Nadeln, Feinwurzeln und Ästen an. Damit wird der Boden wieder zu einer Kohlenstoffsенке von etwa 2 Mio. t CO₂/Jahr. Da parallel zum Vorrat auch der Anteil dichteabhängiger Mortalität und damit der Eintrag an Streu aus toten Bäumen zunimmt, bleibt diese Senkenwirkung bis zum Ende der Beobachtungsperiode relativ konstant.

Die Szenarien «Kyoto optimiert» und «Zuwachs optimiert» haben in den nächsten 20 Jahren ähnliche Verläufe: Sie bewirken je eine Kohlenstoffsенке von 2 bis 3 Mio. t CO₂ in der Waldbiomasse und 0.5 bis 1 Mio. t CO₂ im Boden (Abbildung 1). Beim Szenario «Kyoto optimiert» setzt sich diese Senkenwirkung bis etwa ins Jahr 2070 fort.

Abb 2 Vorrat, Zuwachs und Abgang aus Nutzung und Mortalität der Szenarien «Vorratsabbau» und «Kyoto optimiert». Angaben in Schaftholz in Rinde und Stock.

■ Vorrat
■ Zuwachs
□ Abgang (Nutzung, Mortalität)



Beim Szenario «Zuwachs optimiert» schwächt sie sich hingegen ab dem Jahr 2040 ab und wird praktisch null.

Wird entsprechend dem Szenario «Vorratsabbau» mehr Holz genutzt, als zuwächst, und dadurch der Vorrat gesenkt, wird der Wald zur Kohlenstoffquelle. In den nächsten 20 Jahren werden von der Waldbiomasse rund 2 Mio. t CO₂/Jahr abgegeben, vom Boden hingegen rund 0.7 Mio. t CO₂/Jahr aufgenommen (Abbildung 1). Der Senkeneffekt des Waldbodens ergibt sich durch den höheren Anfall von Ernteabfällen, welche auf dem Waldboden belassen werden. Über die nächsten 90 Jahre betrachtet wird der Wald in diesem Szenario zu einer Kohlenstoffquelle von durchschnittlich 0.5 Mio. t CO₂/Jahr.

Nutzungsänderungen im Wald wirken sich nicht nur auf den Vorrat und damit den Kohlenstoffspeicher aus, sondern auch auf den Zuwachs, den eigentlichen Prozess der Kohlenstoffbindung. Die Tabelle 1 und die Abbildung 2 zeigen anhand der Szenarien «Vorratsabbau» und «Kyoto optimiert», wie sich der Zuwachs bei verschiedenen Nutzungs- und Vorratsszenarien verhält. Da das Szenario «Zuwachs optimiert» bis 2040 parallel verläuft zum Szenario «Kyoto optimiert», wird es in dieser Betrachtung weggelassen.

Beim Szenario «Vorratsabbau» werden über die nächsten 20 Jahre durchschnittlich rund 11 Mio. m³ Schaftholz in Rinde und Stock genutzt oder sterben natürlich ab, das entspricht rund 10.2 m³/ha/Jahr. Der Zuwachs beträgt 8.5 m³/ha/Jahr. Damit verringert sich der Vorrat auf 331 m³/ha. Im Vergleich dazu nimmt beim Szenario «Kyoto optimiert» der Zuwachs durchschnittlich auf 9.4 m³/ha/Jahr zu und der Abgang aus Nutzung und Mortalität auf 7.7 m³/ha/Jahr ab. Daraus resultiert ein Vorrat von 402 m³/ha nach 20 Jahren.

Nach 90 Simulationsjahren beläuft sich der Vorrat beim Szenario «Vorratsabbau» noch auf 300 m³/ha. Der Abgang aus Nutzung und Mortalität pendelt sich bei rund 8.7 m³/ha/Jahr, der Zuwachs bei rund 8.1 m³/ha/Jahr ein. Beim Szenario «Kyoto optimiert» sind sowohl der Abgang (10 m³/ha/Jahr) als auch der Zuwachs (9.9 m³/ha/Jahr) höher. Im Durchschnitt über 90 Jahre weist das Szenario «Vorratsabbau» nur eine leicht höhere Abgangsmenge auf als das Szenario «Kyoto optimiert» (8.9 resp. 8.5 m³/ha/Jahr), dafür aber einen markant tieferen Zuwachs (8.2 resp. 9.6 m³/ha/Jahr, Tabelle 1).

Diskussion

Die vorliegende Untersuchung führt zum Ergebnis, dass sich die Senkenleistung des Schweizer Waldes durch eine Reduktion der Waldbewirtschaftung in Zukunft noch vergrössern lässt. Allerdings

ist das Senkenpotenzial des Waldes zeitlich begrenzt. Zudem könnte das Senkenpotenzial des Szenarios «Reduzierte Waldpflege» weit unter dem modellierten Wert liegen, weil nur allfällige Stürme, nicht aber deren Folgeschäden oder künftige Waldbrände im Modell berücksichtigt worden sind. Durch die Zunahme von Klimaextremen ist jedoch mit solchen vermehrt zu rechnen (Schär et al 2004). Wie von Kurz et al (2008) gezeigt, können Kalamitäten das Senkenpotenzial stark verringern. Weiter wurde in der Untersuchung ausschliesslich die Waldseite betrachtet. Hofer et al (2008, in diesem Heft) zeigen auf, dass bei einer ganzheitlichen Betrachtung der CO₂-Effekte von Wald- und Holzwirtschaft das Szenario «Reduzierte Waldpflege» zwar kurzfristig die grösste Wirkung erzielt, aber schon nach 40 Jahren vom Szenario «Kyoto optimiert» überholt wird. Der Klimanutzen des Szenarios «Reduzierte Waldpflege» ist deshalb nur kurzfristig lohnend und mit hohen, schwer abschätzbaren Risiken belastet. Zudem reduziert es die materiell und energetisch nutzbare Menge an Schweizer Holz.

Wie Taverna et al (2007) zeigen, kann der Beitrag der Wälder zur Minderung des Treibhauseffektes maximiert werden durch einen möglichst grossen, nachhaltigen Zuwachs, der laufend genutzt wird. Somit scheinen die Szenarien «Kyoto optimiert» und «Zuwachs optimiert» einen nachhaltigeren Beitrag zum Klimaschutz zu bieten als das Szenario «Reduzierte Waldpflege». Bei beiden Szenarien wird während der nächsten 40 Jahre der Vorrat pro Jahr ungefähr um die im Kyoto-Protokoll maximal anrechenbare Menge von 1.83 Mio. t CO₂ erhöht. Zusätzlich wird zur Erhöhung des langfristigen Zuwachses eine ausgeglichene Altersklassenverteilung angestrebt, welche aber erst am Ende einer Umtriebszeit erreicht werden kann. Die langfristige, jährliche Abgangsmenge aus Nutzung und Mortalität ist im Szenario «Kyoto optimiert» mit rund 9 Mio. m³ Schaftholz in Rinde und Stock wesentlich grösser als der zwischen 1986 und 1995 tatsächlich gemessene Abgang (7.2 Mio. m³/Jahr; Brassel & Brändli 1999). Zudem ist sie immer noch geringfügig höher als die Nutzungen und die Mortalität der letzten zehn Jahre, welche laut den provisorischen Ergebnissen des LFI3 durchschnittlich 8.6 Mio. m³/Jahr betragen.² Diese beiden Szenarien bieten somit eine synergetische, längerfristige Lösung, welche die Anliegen des Kyoto-Protokolls und die Anliegen einer nachhaltigen Waldnutzung in Einklang bringt.

² Bafu & WSL (2007) Waldfläche, Vorrat und Laubholz nehmen zu – grosse regionale Unterschiede. Medienmitteilung Bundesamt Umwelt, Eidgenöss. Forsch.anst Wald Schnee Landschaft vom 09.11.2007. www.bafu.admin.ch/dokumentation/medieninformation/00962/index.html?lang=de&msg-id=15538 (16.06.2008).

Die Reduktionsziele des Kyoto-Protokolls lassen sich jedoch nicht alleine mittels Wald- und Holzwirtschaft erreichen, sondern bedürfen einer allgemeinen Reduktion der Kohlendioxidemissionen.

Vorratsabbau führt zu Kohlenstoffquellen

Da in allen Szenarien ausser «Reduzierte Waldpflege» eine ausgeglichene Altersklassenverteilung nach einer Umtriebszeit angestrebt wird, ist die jährliche Verjüngungsfläche in allen Szenarien gleich gross. Die Vorratsreduktion im Szenario «Vorratsabbau» wird mit einer Intensivierung der Durchforstungstätigkeit erreicht. Da die Zuwachsverlagerung in den durchforsteten Beständen nur langsam und nicht vollständig erfolgt, ergibt sich hier ein Zuwachsrückgang. Die Modellannahmen der Zuwachsverlagerungen beruhen auf Messungen aus dem LFI1 und dem LFI2 sowie auf ertragskundlichen Versuchsflächen und werden durch die neusten Zahlen aus dem LFI3 bestätigt. Zudem wird in den Modellresultaten nie ein einzelner Waldbestand in einer bestimmten Entwicklungsphase betrachtet, sondern immer eine ganze Waldpopulation, welche sich aus einer Vielzahl von Beständen in unterschiedlichen Zuständen zusammensetzt.

Steigt die Nachfrage nach Rundholz und Energieholz weiter an und wird der Vorrat wie im Szenario «Vorratsabbau» reduziert, entstehen im Wald Kohlenstoffquellen. Diese Quellen müssen entweder durch Emissionsreduktionen im Inland oder durch den Kauf von Emissionsrechten im Ausland ausgeglichen werden. Die Kosten für solche Emissionsrechte sind sehr variabel. Wird ein Preis von 10 CHF/t CO₂ angenommen (Volz 2008, in diesem Heft), belaufen sich bei diesem Szenario die jährlichen Kosten für den Kauf von Emissionsrechten auf rund 20 Mio. CHF während der ersten Verpflichtungsperiode.

Grenzen der Untersuchung und Ausblick

In der vorliegenden Untersuchung werden hauptsächlich die Holznutzung und die Senkenbewirtschaftung in Einklang gebracht. Weitere Waldfunktionen wie Biodiversität oder Schutz vor Naturgefahren, aber auch die Waldstabilität sind nicht berücksichtigt. Für eine ganzheitliche Beurteilung der zukünftigen Potenziale und Risiken müssten diese unbedingt mit einbezogen werden. Zudem sollten auch die CO₂-Effekte der Holzwirtschaft in die Überlegungen einfließen, denn nur so werden die klimarelevanten Leistungen des Waldes vollumfänglich berücksichtigt (siehe dazu Hofer et al 2008, in diesem Heft).

Der Boden ist in fast allen hier präsentierten Szenarien eine kleine Kohlenstoffsenke. Andere Modellsimulationen weisen den Schweizer Waldboden ebenfalls als Kohlenstoffsenke aus (Thürig et al 2005B). Allerdings lässt sich die Schweiz diese Senke im Kyoto-Protokoll nicht anrechnen, weil im Mo-

ment noch zu grosse Modellunsicherheiten bestehen. Dies ist international erlaubt, wenn ein Land darlegen kann, dass der Boden mit grosser Wahrscheinlichkeit keine Kohlenstoffquelle ist. Die Schweiz begründet ihren Entscheid damit, dass sich die Waldbewirtschaftung in den letzten Jahren nur unwesentlich verändert und die lebende Biomasse in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich zugenommen hat (FOEN 2008). Wenn sich die Holznutzung in Zukunft weiter intensiviert und zudem vermehrt Ernteabfälle und Reisig zur Energiegewinnung genutzt werden, dürfte der Waldboden zur Kohlenstoffquelle werden. Diese muss dann im Kyoto-Protokoll angerechnet werden. Um auf diese Entwicklungen vorbereitet zu sein, sollte die Schweiz vermehrte Anstrengungen zur Messung und Modellierung der Veränderungen des Bodenkohlenstoffs unternehmen.

Die zwei in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Modelle «Massimo» und «Yasso» lassen sich noch weiter optimieren. Beispielsweise wurden die Umtriebszeiten im Waldmodell durch Expertenwissen bestimmt. Mit einer systematischen Analyse liessen sich die verwendeten Umtriebszeiten aber noch verbessern und verfeinern.

Im Jahr 2007 sind die Aufnahmen zum LFI3 abgeschlossen worden. Anhand dieser Daten kann das Waldmodell «Massimo» erstmals für die gesamte Schweiz validiert und bei Bedarf neu kalibriert werden. Zusätzlich sollten Klimaänderungen und deren Auswirkungen auf Zuwachs, Baumartenverteilung, Mortalität und Nutzungsstrategien genauer untersucht und in die Szenarien integriert werden. ■

Eingereicht: 21. Dezember 2007, akzeptiert (mit Review): 31. Mai 2008

Literatur

- BRASSEL P, BRÄNDLI UB, EDITORS (1999) Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993–1995. Bern: Haupt. 442 p.
- FOEN (2008) Switzerland's greenhouse gas inventory 1990–2006. Submission of 15 April 2008 to the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. www.bafu.admin.ch/climatereporting/00545/06033/index.html?lang=en (16.07.2008).
- GOODALE CL ET AL (2002) Forest carbon sinks in the northern hemisphere. *Ecol Appl* 12: 891–899.
- HOFER P, TAVERNA R, WERNER F (2008) Nutzung des geernteten Holzes – Substitution und Senkenwirkung. *Schweiz Z Forstwes* 159: 288–295. doi: 10.3188/szf.2008.0288
- KAUFMANN E (2001A) Estimation of standing timber, growth and cut. In: Brassel P, Lischke H, editors. *Swiss national forest inventory: Methods and models of the second assessment*. Birmensdorf: Swiss Federal Res Inst WSL. pp. 162–196.
- KAUFMANN E (2001B) Prognosis and management scenarios. In: Brassel P, Lischke H, editors. *Swiss national forest inventory: Methods and models of the second assessment*. Birmensdorf: Swiss Federal Res Inst WSL. pp. 197–206.

- KURZ WA, STINSON G, RAMPLEY GJ, NEILSON ET (2008) Risk of natural disturbances makes future contribution of Canada's forests to the global carbon cycle highly uncertain. *P Natl Acad Sci USA* 105: 1551–1555.
- LISKI J, PALOSUO T, PELTONIEMI M, SIEVÄNEN R (2005) Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecol Model* 189: 168–182.
- MAHRER F ET AL (1988) Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Erstaufnahme 1982–1986. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anst Wald Schnee Landsch, Ber 305. 375 p.
- PERRUCHOUD D, KIENAST F, KAUFMANN E, BRÄKER OU (1999) 20th century carbon budget of forest soils in the Alps. *Ecosystems* 2: 320–337.
- SCHÄR C ET AL (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heat waves. *Nature* 427: 332–336.
- SCHMID S, THÜRIG E, KAUFMANN E, LISCHKE H, BUGMANN H (2006) Effect of forest management on future carbon pools and fluxes: A model comparison. *For Ecol Manage* 237: 65–82.
- TAVERNA R, HOFER P, WERNER F, KAUFMANN E, THÜRIG E (2007) CO₂-Effekte der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft. Bern: Bundesamt Umwelt, Umwelt-Wissen 0739. 102 p.
- THÜRIG E, KAUFMANN E, FRISULLO R, BUGMANN H (2005A) Evaluation of the growth function of an empirical forest scenario model. *For Ecol Manage* 204: 51–66.
- THÜRIG E, PALOSUO T, BUCHER J, KAUFMANN E (2005B) The impact of windthrow on carbon sequestration in Switzerland: a model-based assessment. *For Ecol Manage* 210: 337–350.
- THÜRIG E, SCHMID S (2008) Jährliche CO₂-Flüsse im Wald: Berechnungsmethode für das Treibhausgasinventar. *Schweiz Z Forstwes* 159: 31–38. doi: 10.3188/szf.2008.0031
- VOLZ R (2008) Senkenanrechnung gemäss Kyoto-Protokoll: Perspektiven für die Waldwirtschaft. *Schweiz Z Forstwes* 159: 296–302. doi: 10.3188/szf.2008.0296

Waldbewirtschaftung zur Senken- erhöhung? Mögliche Konfliktfelder und Synergien

Mit dem Kyoto-Protokoll ist eine neue Waldleistung ins Blickfeld gerückt: der Wald als Kohlenstoffspeicher. Die Schweiz entschied sich, im Kyoto-Protokoll Kohlenstoffsinken, die durch die Waldbewirtschaftung entstehen (Artikel 3.4), anrechnen zu lassen. Diese neue Waldfunktion beinhaltet jedoch Konfliktpotenzial. Die Forststatistik und das Landesforstinventar weisen steigende Holznutzungsmengen auf, und dieser Trend scheint anzuhalten. In einer von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL durchgeführten Studie wurde der Einfluss verschiedener Bewirtschaftungsszenarien auf die langfristige Senkenwirkung des Waldes und die Nutzungsmengen untersucht. Im Zentrum stand dabei die Frage, ob im Schweizer Wald eine höhere Holznutzung mit der Kohlenstoff-Senkenbildung zu vereinbaren sei und wo die diesbezüglichen Grenzen liegen. Die Szenarien erstrecken sich von einer reduzierten Waldpflege mit entsprechender Senkenbildung bis hin zu einem Vorratsabbau mit daraus resultierender Quellenwirkung. Die Resultate zeigen, dass auf gesamtschweizerischer Ebene und für eine gewisse Zeit eine leichte Mehrnutzung mit gleichzeitiger Senkenbildung möglich ist. In künftigen Untersuchungen sollten die Wechselwirkungen mit anderen Waldfunktionen wie beispielsweise der Erhaltung der Biodiversität oder aber der Einfluss von Waldschäden und die Auswirkungen der Klimaänderung vermehrt berücksichtigt werden.

Gestion forestière et fixation du carbone en forêt: conflits potentiels et synergies possibles

Le Protocole de Kyoto a mis en lumière une nouvelle fonction de la forêt: celle de réservoir de carbone. Au titre de l'article 3.4, la Suisse a décidé d'inclure la gestion des forêts dans son bilan de carbone afin d'atteindre les objectifs fixés par Kyoto. Cette nouvelle fonction comporte toutefois une potentialité de conflit. En effet, les statistiques forestières et l'Inventaire forestier national indiquent des quantités croissantes de bois exploité, tendance qui semble se confirmer. Une étude menée à l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, le paysage et la neige a examiné différents scénarios de gestion des forêts et leur influence sur les volumes à long terme de bois exploité, ainsi que sur la fixation du carbone en forêt. L'étude s'articule autour des questions suivantes: dans la forêt suisse, peut-on, jusqu'à un certain point, concilier une exploitation accrue de bois d'une part et la création de puits de carbone d'autre part? Si oui, jusqu'à quel point? A quelles limites se heurte-t-on? Les scénarios sont divers, allant d'un entretien moindre de la forêt accompagné de la création de puits de carbone, à une réduction du volume de bois sur pied couplée à du carbone libéré. Les résultats démontrent qu'au niveau suisse, il est possible de prendre les deux aspects en considération pendant un certain temps. Des études ultérieures devraient permettre de prendre davantage en considération les interactions avec d'autres fonctions forestières telle que la préservation de la biodiversité, mais aussi avec les dégâts aux forêts et les répercussions du changement climatique.