Jährliche CO_2-Flüsse im Wald: Berechnungsmethode für das Treibhausgasinventar

Esther Thürig Bundesamt für Umwelt und Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (CH)*
Stéphanie Schmid Waldökologie, Institut für Terrestrische Ökosysteme, ETH Zürich und Forschungsanstalt ART (CH)

Annual CO_2 fluxes in forests: calculation method for the Greenhouse Gas Inventory

Forests can be carbon sinks as well as carbon sources. In the Kyoto Protocol, forests play a special role. According to Art. 3.4 of the Kyoto Protocol, Switzerland has decided to account for forest management. Since 1990, each participating country must submit the Greenhouse Gas Inventory (GHGI) to the climate convention. These inventories build the basis for the annual estimation of carbon sink and sources under the Kyoto Protocol. This article describes the calculation method of the forest carbon budget in the Swiss GHGI, which is obtained by utilizing the database of the Swiss National Forest Inventory (NFI 1 and 2). Annual CO_2-budgets are derived from using the annual wood production, annual climate values, and a climate-sensitive growth model. The large spatial and temporal resolutions of the emission data and factors optimally represent the spatial heterogeneity in Switzerland. The main gaps are in estimating carbon fluxes in dead wood and soil. Moreover, the effect of the annual climate variation on average growth should be investigated in more detail. Once the NFI3 data are available, CO_2-budgets will need to be recalculated going as far back as 1995.

Keywords: GHGI, Kyoto Protocol, Switzerland, Biomass Expansion Factor (BEF), Biome-BGC, NFI
doi: 10.3188/szf.2008.0031

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

Seit Beginn der Industrialisierung wird eine deutliche Zunahme der atmosphärischen Treibhausgase CO_2, Methan und Lachgas verzeichnet. Der Anstieg dieser Treibhausgase ist grösstenteils auf menschliche Tätigkeiten zurückzuführen. Dies sind insbesondere die Nutzung fossiler Energieträger (Kohle, Erdgas, Erdöl), die grossflächige Rodung von Wäldern, die Intensivierung der Landwirtschaft und der Einsatz technischer Gase in der Industrie. Diese Angaben stammen aus dem 4. Wissenschaftsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2007). Der Bericht stellt weiter fest, dass der Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre einen markanten Temperaturanstieg zur Folge hat. Damit sind Erscheinungen wie Gletscherrückgänge, der Anstieg der Schneegrenze und der Anstieg des Meeresspiegels verbunden.

Ein erstes internationales Übereinkommen zum Klimaschutz, die Klimakonvention,[1] wurde 1992 von den Vereinten Nationen verabschiedet. Dieses Übereinkommen beinhaltet noch keine verpflichtenden Reduktionsziele, hat aber trotzdem zum Ziel, eine «Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche Störung des Klimasystems durch den Menschen verhindert wird». Ausserdem werden die beteiligten Staaten verpflichtet, ein Treibhausgasinventar gemäss den Richtlinien des IPCC zu führen. Die Schweiz hat die Klimakonvention 1993 ratifiziert und muss somit ab dem Jahr 1990 über die CO_2-Bilanz des Waldes jährlich Bericht erstatten.

1997 verabschiedeten die Vertragsparteien der Klimakonvention mit dem Kyoto-Protokoll (KP) ein Zusatzabkommen, welches verbindliche Vorgaben zur Reduktion der Treibhausgasemissionen enthält. Das Protokoll schreibt in der ersten Verpflichtungsperiode (2008 bis 2012) für die Industriestaaten gesamthaft eine Verminderung der Emissionen gegenüber dem Stand von 1990 um 5.2% vor. Die Schweiz, welche das KP 2003 ratifizierte, hat sich verpflichtet, ihre Treibhausgas-Emissionen gegenüber dem Stand von 1990 um 8% zu reduzieren. Das Treibhausgasinventar bildet die Grundlage für das Monitoring und die Kontrolle der Reduktionsverpflichtungen. Laut IPCC-Richtlinien sollte wenn immer möglich jährlich über die Emissions- und Senkenwerte berichtet werden.

Der Wald spielt im KP eine besondere Rolle, da laut Artikel 3.3 und 3.4 des Protokolls Kohlenstoffsenken und -quellen der Waldbewirtschaftung in der Emissionsrechnung berücksichtigt werden.

1 United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC.

Von einer Senke spricht man, wenn die Aufnahme eines Treibhausgases dessen Emissionen übersteigt. Eine solche Senke stellt zum Beispiel ein Wald dar, wenn er mehr CO_2 aufnimmt, als er abgibt. Je mehr C in die Biomasse eingebaut und je länger es darin gespeichert wird, desto grösser ist die Entlastung der Atmosphäre. Bei einer Quelle hingegen überwiegen die Emissionen, und die Atmosphäre wird stärker belastet. Die Anrechnung von Rodungen und Aufforstungen (Artikel 3.3) ist obligatorisch, während die Anrechnung der Waldbewirtschaftung (Artikel 3.4) in der ersten Verpflichtungsperiode freiwillig ist.

Die Schweiz hat beschlossen, die Waldbewirtschaftung unter Artikel 3.4 anzurechnen (FOEN 2006). Aufgrund der ausgehandelten Senkenkontingente können Schweizerische Waldflächen, auf denen der Wald bewirtschaftet wurde, bis zu einem Maximalwert von 1.8 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr angerechnet werden. Das entspricht 43% der Reduktionsverpflichtungen. Die Definition der Aktivität «forest management» lässt einen grossen Interpretationsspielraum zu, womit in der Schweiz der gesamte produktive Wald als bewirtschaftet angerechnet werden kann.[2] Eine Übersicht in der aktuellen CO_2-Senken- und -Quellendiskussion geben die Publikationen von Fischlin et al (2006) und Taverna et al (2007). Der vorliegende Artikel erläutert die Berechnungsmethoden der jährlichen CO_2-Bilanz im Wald.

Jährliche CO_2-Bilanz: Berechnungsmethoden

Für das Treibhausgasinventar werden die jährlichen Veränderungen der CO_2-Bilanz benötigt. Diese werden als Bilanz zwischen dem jährlichen Brutto-Zuwachs und den jährlichen Abgängen berechnet. Dabei gilt folgende Beziehung:

$$\text{Vorratsveränderung}_J = \text{Brutto-Zuwachs}_J - \text{Abgänge}_J \qquad (1)$$

wobei J die einzelnen Jahre bezeichnet.

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der benötigten Datengrundlagen und Umrechnungen zur Bestimmung der jährlichen CO_2-Bilanz. Eine exakte Beschreibung der Berechnungen ist im National Inventory Report des Schweizerischen Treibhausgasinventars zu finden (FOEN 2007).

2 «Forest management» is a system of practices for stewardship and use of forest land aimed at fulfilling relevant ecological (including biological diversity), economic and social functions of the forest in a sustainable manner. http://unfccc.int/resource/docs/2005/cmp1/eng/08a03.pdf#page=3 (21.11.2007).

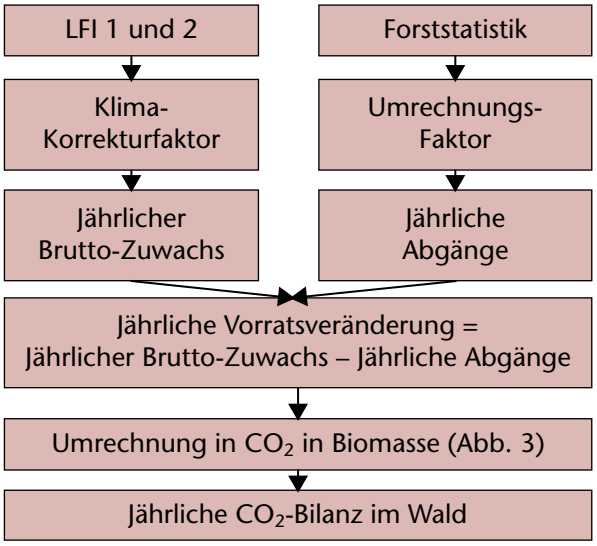

Abb 1 *Flussdiagramm zur Berechnung der jährlichen CO_2-Bilanz im Wald.*

Stratifizierung der Schweiz in 17 Regionen

In der Schweiz bestehen zwischen den Produktionsregionen und Höhenstufen grosse Standortsunterschiede. Deshalb werden die für die Berechnungen relevanten Grössen wie Zuwachs, Abgänge und Umrechnungsfaktoren in Kohlenstoff für 17 unterschiedliche Regionen spezifisch bestimmt. Unterschieden werden die 5 Produktionsregionen entsprechend dem Schweizerischen Landesforstinventar LFI (Jura, Mittelland, Voralpen, Alpen und Alpensüdseite), 3 Höhenstufen (≤ 600 m ü.M., 601–1200 m ü.M., > 1200 m ü.M.) sowie Nadel- und Laubbäume. Um den Einfluss des Klimas auf das Waldwachstum zu berücksichtigen, werden zudem die unteren beiden Höhenstufen der Alpen in West und Ost unterteilt. Alpen West entspricht den Wirtschaftsregionen 9 und 12 des LFI und Alpen Ost den Wirtschaftsregionen 10, 11 und 13.

Zuwachs

Der Brutto-Zuwachs ist der Zuwachs inklusive Abgänge (in der Folge Zuwachs genannt). Basis für die Ermittlung des jährlichen Zuwachses in Gleichung 1 bilden das LFI1 (Mahrer et al 1988) und das LFI2 (Brassel & Brändli 1999). Aus diesen Daten lässt sich ein durchschnittlicher Zuwachs im Zeitraum 1986 bis 1995 für alle 17 Regionen herleiten. Tabelle 1 zeigt den durchschnittlichen jährlichen Brutto-Zuwachs, aufgeteilt nach den verschiedenen Regionen sowie Nadel- und Laubbäumen.

Klimakorrektur

Um den durchschnittlichen jährlichen Zuwachs an den tatsächlichen Zuwachs, welcher im Jahr J geleistet wurde, anzunähern, werden mathematische Regressionsfunktionen verwendet. Mit diesen Funktionen lässt sich anhand von jährlichen Klimawerten die Abweichung des jährlichen Zuwachses

LFI Region	Höhe (m ü.M.)	Brutto-Zuwachs (m^3/ha/J)		Abgänge aus Nutzung & Mortalität (m^3/ha/J)	
		Nadelholz	Laubholz	Nadelholz	Laubholz
Jura	≤ 600	9.70	9.61	6.97	6.12
Jura	601–1200	9.45	8.93	7.36	5.41
Jura	> 1200	5.79	4.81	4.91	1.17
Mittelland	≤ 600	13.99	13.05	12.95	9.61
Mittelland	601–1200	14.11	13.66	12.21	8.52
Mittelland	> 1200	3.23	10.33	2.44	2.04
Voralpen	≤ 600	12.73	11.13	9.53	6.59
Voralpen	601–1200	13.14	11.23	9.79	6.02
Voralpen	> 1200	7.61	7.23	5.96	1.79
Ostalpen	≤ 600	5.34	10.91	4.76	11.86
Westalpen	≤ 600	7.59	7.88	4.49	4.42
Ostalpen	601–1200	8.51	8.39	6.94	3.47
Westalpen	601–1200	7.16	4.68	5.56	2.30
Alpen	> 1200	5.72	8.25	4.80	2.47
Alpensüdseite	≤ 600	1.82	5.26	1.58	2.84
Alpensüdseite	601–1200	4.72	5.04	2.97	2.12
Alpensüdseite	> 1200	4.38	6.16	1.42	1.66

Tab 1 *Durchschnittlicher jährlicher Brutto-Zuwachs und durchschnittliche jährliche Abgänge (Nutzung & Mortalität) in Schaftholz in Rinde und Stock. Hergeleitet aus der gemeinsamen Waldfläche LFI1 und LFI2, gemittelt über die 10 Jahre 1986–1995.*

vom mittleren Zuwachs zwischen LFI1 und LFI2 berechnen. Diese relative Abweichung wird in der Folge als Klimafaktor bezeichnet:

$$Klimafaktor_J = Zuwachs_J \,/\, mittlerer\ Zuwachs_{LFI1-LFI2} \qquad (2)$$

wobei J die einzelnen Jahre indiziert.

Zur Ermittlung und Parametrisierung solcher Regressionsfunktionen benötigt es zwei Schritte. Zuerst wird mit einem klimasensitiven Wachstumsmodell der jährliche Zuwachs abhängig von jährlichen Klimawerten geschätzt. Dann wird mittels multipler Regression die Beziehung zwischen den modellierten jährlichen Zuwächsen, respektive dem jährlichen Klimafaktor und ausgewählten jährlichen Klimawerten gerechnet:

$$\begin{aligned} Klimafaktor_J &= Zuwachs_J \,/\, mittlerer\ Zuwachs_{LFI1-LFI2} \\ &= f(Klimawerte1_J,\ Klimawerte2_J\ ,...) \qquad (3) \end{aligned}$$

So können mithilfe von wenigen Klimawerten die jährlichen Zuwächse, respektive die jährlichen Klimafaktoren, einfach berechnet werden. Für jede der 17 Regionen wird je eine solche Funktion für Laub- und Nadelbäume hergeleitet und parametrisiert.

Klimasensitives Zuwachsmodell

Für die Modellierung des jährlichen Zuwachses wird das klimasensitive Waldwachstumsmodell Biome-BGC (Thornton 1998) verwendet. Dieses wurde in den USA entwickelt. Die Anwendbarkeit des Modells in der Schweiz wurde von Schmid et al (2006) geprüft. Das Modell betrachtet den gesamten Wald inklusive organischem Boden als eine Ansammlung von Kohlenstoff-, Stickstoff- und Wasserspeichern. Alle Bäume eines Bestandes werden in mehrere Kohlenstoff- und Stickstoffspeicher zusammengefasst, beispielsweise Kohlenstoff in den Feinwurzeln, Stickstoff im Stamm und Stickstoff in den Blättern. Zwischen diesen Speichern findet ein stetiger Austausch statt (1-Tages-Schritte), welcher die biologischen und ökologischen Prozesse von Wachstum über Mortalität bis Verjüngung darstellt. Während des Wachstums findet zum Beispiel eine Verschiebung von Stickstoff von den Boden- in die Wurzelspeicher und von da über den Stamm- in den Blattspeicher statt.

Sowohl der jährliche als auch der mittlere Zuwachs jeder Region in Funktion (2) wird mit Hilfe dieses Modells berechnet. Dafür wird das Modell für jede Region parametrisiert. Die regionsspezifischen Klima- und Boden-Daten sowie die Stickstoff-Depositionswerte werden in das Modell eingegeben. Die Bodendaten (Bodentiefe und Bodentextur) pro Region stammen aus der Bodeneignungskarte der Schweiz (EJPD 1980). Für den Boden-Teil des Modells Biome-BGC werden in der Schweiz gemessene Boden- und Streu-Kohlenstoffmengen verwendet (Lüscher et al 1994, Paulsen 1994). Die Stickstoff-Depositionswerte für jede Region werden der Stickstoff-Depositionskarte der Schweiz entnommen (Buwal 1996). Die jährlichen Klimadaten (Temperatur und Niederschlag) für die verschiedenen Regionen stammen von Messstationen der Meteo Schweiz. Je mehr Klimajahre zur Verfügung stehen, desto mehr Jahreszuwächse stehen für die anschliessende Regressionsanalyse zur Verfügung, was die Aussagekraft der Regressionsfunktionen erhöht. Unterschiedliche Messstationen weisen jedoch unterschiedlich lange Messreihen auf. Falls innerhalb einer Region keine Messstation mit ausreichend langer Messreihe vorhanden ist (z.B. keine Messstation mit genügend langer Messreihe), werden die Klimawerte einer nahe gelegenen Messstation mit Hilfe des Wettergenerators MTCLIM (Thornton et al 2000) für die entsprechende Region angepasst. Die kürzeste verwendete Klima-Messreihe umfasst somit 27 Jahre. Das letzte verwendete Klimajahr ist 2004.

Multiple Regressionsanalyse

Für die Parametrisierung der multiplen Regressionsfunktionen werden die gleichen Temperatur- und Niederschlagswerte verwendet wie schon für die Modellsimulationen mit Biome-BGC. Die mittels Biome-BGC modellierten jährlichen Zuwächse werden durch den mittleren Zuwachs zwischen LFI1 und LFI2 geteilt (= Klimafaktor, Gleichung 2) und bilden die Zielgrösse der multiplen Regressions-

Tab 2 Klimawerte, welche in die Berechnung des Klimafaktors einfliessen.

Klimawerte	Einheit
Jährliche Mitteltemperatur	°C
Mitteltemperatur während der Vegetationsperiode (April–September)	°C
Jährliche Niederschlagssumme	cm
Niederschlagssumme während der Vegetationsperiode (April–September)	cm
Summe der Tage mit Mitteltemperatur > 5°C	Zahl
Jährlicher Wasserhaushalts-Index gemäss Bugmann und Cramer (1998)	Zahl
Wasserhaushalts-Index während der Vegetationsperiode (April–September) gemäss Bugmann und Cramer (1998)	Zahl
Ariditätsindex gemäss Bugmann und Cramer (1998)	Zahl

LFI Region	Baumart	Umrechnungsfaktor
Jura	Nadelholz	1.177
Jura	Laubholz	1.315
Mittelland	Nadelholz	1.331
Mittelland	Laubholz	1.535
Voralpen	Nadelholz	1.543
Voralpen	Laubholz	1.920
Alpen	Nadelholz	1.941
Alpen	Laubholz	2.380
Alpensüdseite	Nadelholz	2.262
Alpensüdseite	Laubholz	5.737

Tab 3 Faktor zur Umrechnung der jährlichen Holznutzung nach Forststatistik (Derbholz) in die durchschnittlichen jährlichen Abgänge nach LFI (Schaftholz in Rinde und Stock).

analyse. Als erklärende Variabeln werden acht Klimawerte verwendet, welche in Tabelle 2 zusammengefasst sind.

Um den Einfluss des Klimafaktors auf den jährlichen Zuwachs zu verdeutlichen, werden mit Hilfe der hergeleiteten Regressionsfunktionen für alle 17 Regionen sowie Nadel- und Laubbäume die Klimafaktoren der letzten Jahrzehnte berechnet. Es zeigt sich, dass sich die Mehrzahl dieser Werte zwischen 0.8 und 1.2 befinden. Das bedeutet, dass der jährliche Zuwachs mehrheitlich um maximal ±20% vom mittleren Zuwachs zwischen LFI1 und LFI2 abweicht. Das Klima scheint bei den Nadelwäldern einen grösseren Einfluss auf den jährlichen Zuwachs zu haben als bei Laubwäldern. Abbildung 2 zeigt den Verlauf des jährlichen Klimafaktors von 1986 bis 1995 für die Produktionsregion Voralpen. Daraus ist ersichtlich, dass der Zuwachs der Jahre 1989 und 1991 klimatisch bedingt unter dem mittleren Zuwachs liegt (Klimafaktor < 1), während das Jahr 1993 einen überdurchschnittlich hohen Zuwachs auf aufweist.

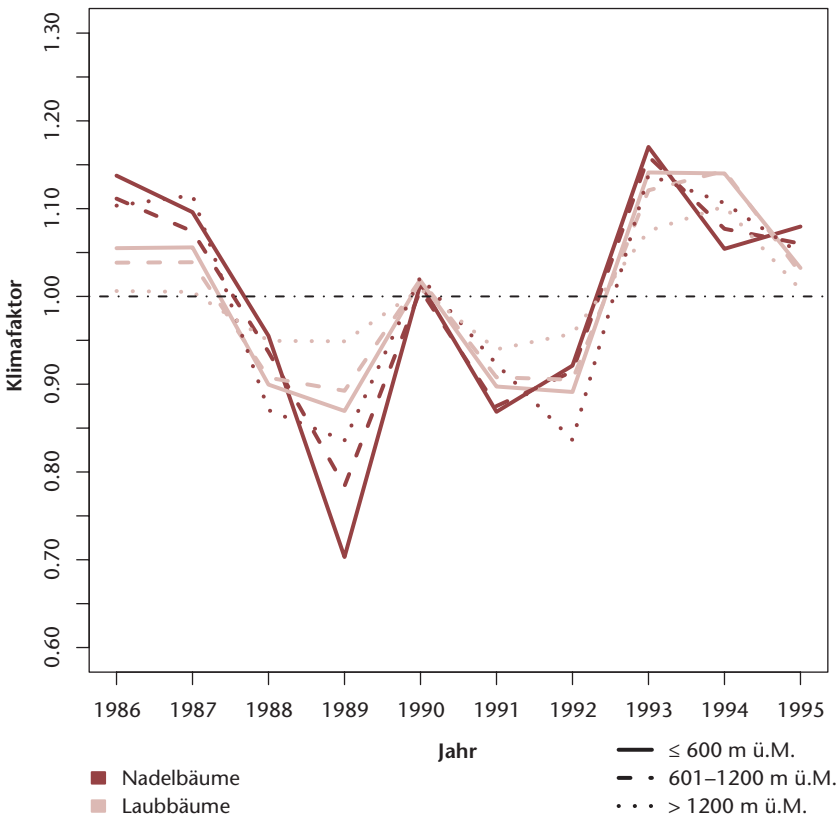

Abb 2 Jährliche Klimafaktoren der Produktionsregion Voralpen (drei Höhenstufen, Nadelwälder und Laubwälder), berechnet für die Jahre 1986–1995 mit Hilfe der hergeleiteten Funktionen.

Abgänge durch Nutzung und Mortalität

Basis für die Ermittlung der jährlichen Abgänge in Gleichung 1 bildet die jährliche Holznutzung nach Forststatistik (Buwal 2005). Mit der Forststatistik werden jedoch nur die registrierten Nutzungen erfasst. Für das Treibhausgasinventar müssen aber die totalen Abgänge ermittelt werden, das sind die gesamten Nutzungen (erfasste und nicht erfasste), die Ernteverluste sowie die natürlichen Abgänge infolge Mortalität. Aus den Werten von LFI1 und LFI2 wird ein Faktor hergeleitet, mit welchem die Nutzungsmengen der Forststatistik auf die Gesamtmenge der Abgänge umgerechnet werden können. Der Umrechnungsfaktor wird folgendermassen berechnet:

$$\text{Umrechnungsfaktor} = \sum \text{Totale Abgänge}_{LFI1-LFI2} \,/\, \sum \text{Forststatistik}_{1986-1995} \qquad (4)$$

Die durchschnittlichen jährlichen Abgänge (Nutzung und Mortalität) laut LFI1 und LFI2 sind in der Tabelle 1 zusammengestellt. Die Daten der Forststatistik können übers Internet bezogen werden.[3] Der Umrechnungsfaktor aus Gleichung 4 kombiniert zwei verschiedene Faktoren. (1) Die jährliche Forststatistik wird um Mortalität, Ernteverluste und nicht

3 www.agr.bfs.admin.ch (16.11.2007).

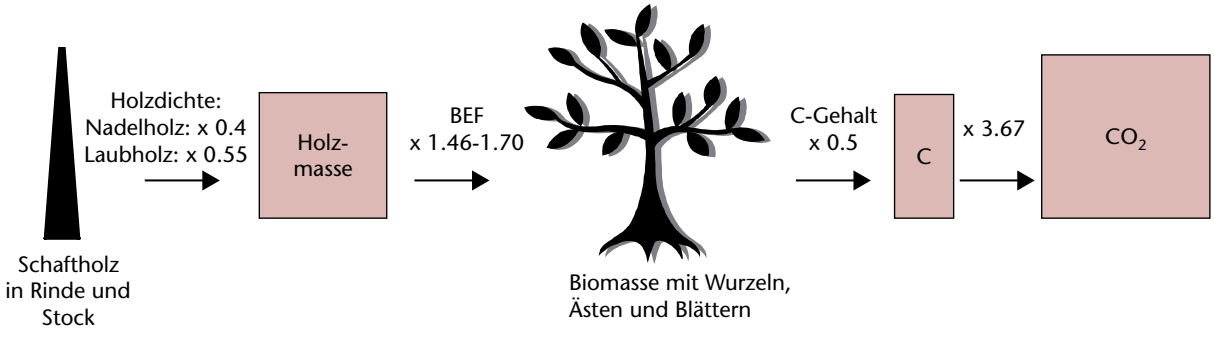

Abb 3 *Umrechnung von Schaftholz in Rinde und Stock in CO_2 der gesamten Biomasse. Die Holzdichte wird bezüglich Nadel- und Laubbäumen unterschieden. BEF: Biomasse-Expansionsfaktor (Werte siehe Tabelle 4), C: Kohlenstoff.*

gemeldete Nutzungen ergänzt. (2) Der Faktor rechnet das in der Forststatistik gebräuchliche Derbholz in Schaftholz in Rinde und Stock um. Laut Brassel & Brändli (1999) beträgt die Derbholzmenge im Durchschnitt rund 88% vom Schaftholz in Rinde und Stock. Um den Effekt von Extremereignissen wie Stürmen zu glätten, werden die Nutzungszahlen der Forststatistik über 3 Jahre gemittelt. Um die regionalen Unterschiede bezüglich Nutzung und Mortalität zu berücksichtigen, werden für die einzelnen LFI-Produktionsregionen und Nadel-/Laubbäume spezifische Umrechnungsfaktoren hergeleitet (Tabelle 3). Auf eine Stratifizierung der Höhenstufen wird hier verzichtet, weil sonst die Datengrundlage zur Berechnung der einzelnen Faktoren zu klein geworden wäre.

Tab 4 *Biomasse-Expansionsfaktoren (BEF) zur Umrechnung von Schaftholz in Rinde und Stock in totale Biomasse (Tonnen C/ha).*

LFI Region	Höhe (m ü.M.)	Biomasseexpansionsfaktor	
		Nadelbäume	Laubbäume
Jura	≤ 600	1.47	1.50
Jura	601–1200	1.50	1.50
Jura	> 1200	1.60	1.55
Mittelland	≤ 600	1.46	1.54
Mittelland	601–1200	1.47	1.55
Mittelland	> 1200	1.65	
Voralpen	≤ 600	1.48	1.49
Voralpen	601–1200	1.48	1.49
Voralpen	> 1200	1.59	1.56
Ostalpen	≤ 600	1.43	1.52
Westalpen	≤ 600	1.44	1.57
Ostalpen	601–1200	1.49	1.56
Westalpen	601–1200	1.48	1.57
Alpen	> 1200	1.57	1.62
Alpensüdseite	≤ 600	1.54	1.64
Alpensüdseite	601–1200		1.67
Alpensüdseite	> 1200	1.61	1.70

Höhe (m ü.M.)	Jura	Mittelland	Voralpen	Alpen	Südalpen	Schweiz
≤ 600	– 350	143	– 2	– 21	– 38	– 268
601–1200	– 354	15	– 121	– 391	– 186	– 1037
> 1200	– 51	– 2	– 23	– 533	– 51	– 660
Total	– 755	155	– 146	– 945	– 274	– 1965

Tab 5 *Netto-Senkeneffekt im Wald in 1000 Tonnen CO_2, 2005.*

Umrechnung in CO2

Die oben berechneten Werte verstehen sich als m^3 Holz (Schaftholz in Rinde und Stock) und müssen nun in die Menge CO_2 in der gesamten Biomasse umgerechnet werden (Abbildung 3).

Die benötigten Biomasse-Expansionsfaktoren (BEF) wurden aus Perruchoud et al (1999) hergeleitet. Sie sind spezifisch für die Baumarten und die 17 Regionen (FOEN 2007, Thürig et al 2005, Tabelle 4).

Jährliche CO_2-Bilanz

Die hier präsentierten Resultate sind Teil des jährlichen Treibhausgasinventars. Negative Zahlen indizieren eine CO_2-Senke, positive Zahlen eine CO_2-Quelle. Die Werte beziehen sich nur auf die bestehende Waldfläche gemäss Arealstatistik,[4] nicht aber auf Rodungen und Aufforstungen. Auf Grund verbesserter Flächendaten stimmen die hier abgebildeten Werte nicht ganz mit dem aktuellen Treibhausgasinventar überein (FOEN 2007).

Tabelle 5 zeigt die CO_2-Bilanz für das Jahr 2005. Die meisten Regionen bildeten in diesem Jahr eine CO_2-Senke (= negative Werte). Die unteren beiden Höhenstufen im Mittelland waren 2005 jedoch eine CO_2-Quelle. Insgesamt war der Schweizer Wald 2005 eine CO_2-Senke von knapp 2 Mio. Tonnen.

In den Jahren 1990 bis 2005 war der Schweizer Wald fast immer eine CO_2-Senke (Abbildungen 4 und 5). Auffällig ist, dass sich die Senke im Laufe der Jahre verkleinert und der Wald 2003 sogar zu einer schwachen Quelle wurde. Die Erklärung hierfür liegt bei den leicht sinkenden Brutto-Zuwächsen und den steigenden Abgängen. Die Schwankungen im Zuwachs werden im Wesentlichen durch die unterschiedlichen klimatischen Bedingungen verursacht. In den letzten Jahren war der Zuwachs und damit auch die CO_2-Aufnahme reduziert, am stärksten war die Reduktion im Hitzesommer 2003. Gleichzeitig

4 www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/infothek/erhebungen__quellen/blank/blank/arealstatistik/01.html (31.11.2007).

nahmen die Abgänge aus Nutzung und Mortalität zu. Ursachen dafür sind sowohl die Stürme Vivian und Lothar als auch die ansteigende Holznutzung ab dem Jahr 2003.

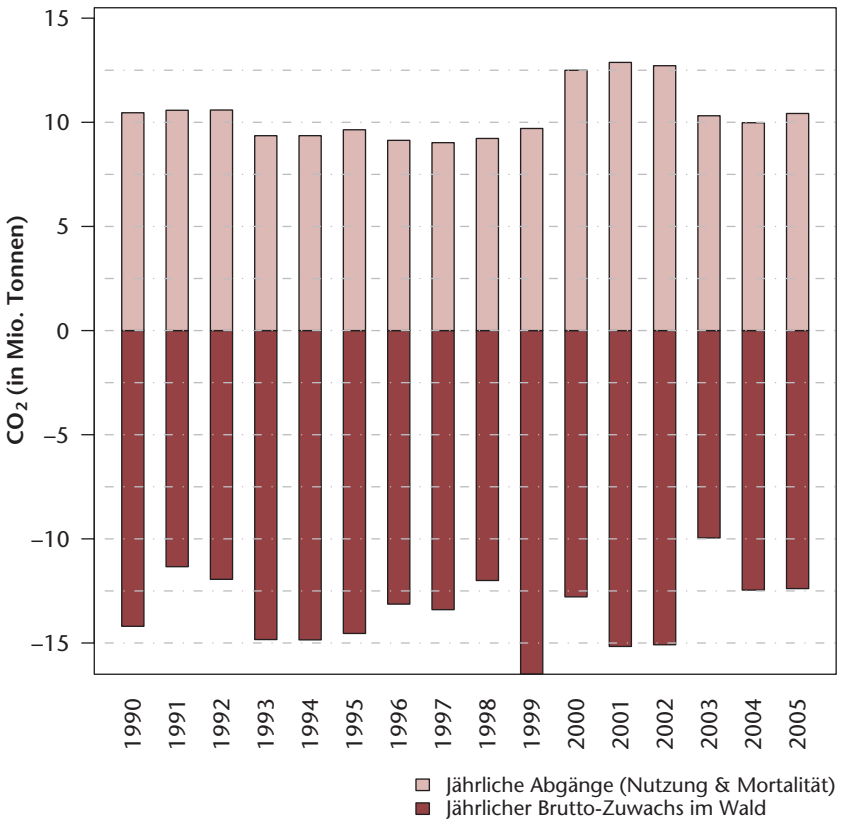

Abb 4 *Jährlicher Brutto-Zuwachs und jährliche Abgänge (Nutzung & Mortalität) von CO_2 in Biomasse im Wald, 1990–2005 (Werte in Mio. Tonnen).*

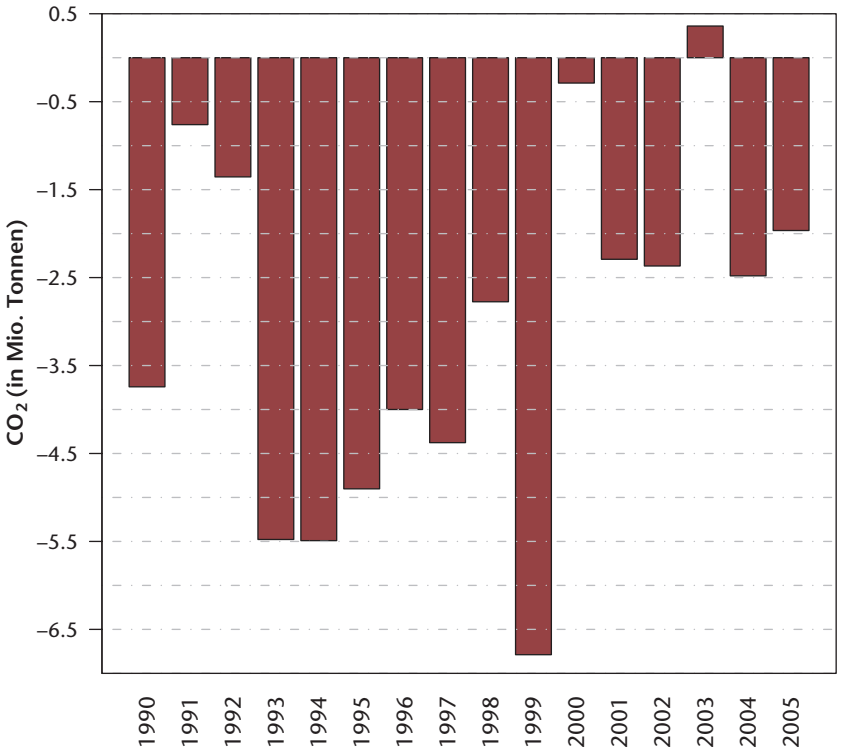

Abb 5 *Jährliche CO_2-Bilanz im Wald, 1990–2005 (Werte in Mio. Tonnen).*

Diskussion

Wo sind noch Lücken?

Falls während der ersten Verpflichtungsperiode (2008–2012) ein Orkan wie Vivian oder Lothar über die Schweiz hinwegfegt, kann unser Wald leicht von der vermeintlichen Senke zu einer Quelle werden. Sind wir aber in der Lage, die Veränderungen von im Wald liegengebliebenem Totholz abzuschätzen, so wird durch den verzögerten Abbau der Effekt des Sturmes über mehrere Jahre verteilt und muss nicht im Sturmjahr und den zwei Folgejahren als volle Quelle angerechnet werden. Mittels Auswertung der Daten des dritten LFI (Aufnahme 2004–2006) kann diese Lücke demnächst teilweise geschlossen werden.

Ein Punkt, der bis anhin vernachlässigt wurde, ist der Kohlenstoffhaushalt des Bodens. Laut Kyoto-Richtlinien muss der Boden dann nicht in die Emissionsberechnungen einbezogen werden, wenn nachgewiesen werden kann, dass er keine Kohlenstoffquelle ist. Bislang hat die Schweiz folgendermassen argumentiert: (1) Die Waldbewirtschaftung hat sich in den letzen Jahrzehnten nicht drastisch verändert, weil die Gesetzgebung sehr restriktiv ist. (2) Die Zunahme des Holzvorrates in den letzten Jahrzehnten und die dadurch bedingte Zunahme der Streuproduktion wirkt sich positiv auf den C-Gehalt des Bodens aus. (3) Düngen von Waldböden ist in der Schweiz verboten, Entwässern ist eine im Wald selten angewandte Praxis. (4) Modellanalysen zeigen eine Zunahme von Bodenkohlenstoff dank der erhöhten Streuproduktion (Thürig et al 2005). Aus diesen Gründen war bisher eine Quelle im Waldboden eher unwahrscheinlich. Weil aber sowohl die Waldbewirtschaftung, die Erntesortimente (Ernteabfälle als Brennholz), wie auch das Klima (mehr Stürme, höhere Temperaturen) in Änderung begriffen sind, müssen diese Argumente neu durchdacht werden.

Jährlicher Klimaeinfluss auf den Zuwachs: wie robust ist die Methode?

Für die Berechnung des Klimafaktors mit dem Modell Biome-BGC wird eine grosse Menge detaillierter Eingabedaten benötigt. Mit den hergeleiteten Funktionen lässt sich der Klimafaktor jedoch anhand von nur acht Klimawerten berechnen. Da die Funktionen für die 17 Regionen sowie Nadel- und Laubbäume eine starke Vereinfachung des komplexen Modells Biome-BGC darstellen, ist es wichtig zu wissen, wie viel Qualität dadurch verloren geht. Aufgrund der folgenden Tests und Überlegungen erachten wir die hergeleiteten Funktionen als ausreichend gut für die Berechnung der klimakorrigierten jährlichen Zuwächse:

- Die Berechnung des Bestimmtheitsmasses R^2 ergibt für 88% der Regionen einen Wert über 0.50, und für 26% der Regionen einen Wert über 0.70. Das

bedeutet, dass die gewählten Klimawerte in der Regel über 50%, häufig sogar über 70% der jährlichen Schwankungen des Klimafaktors erklären können. In Anbetracht der Komplexität von Biome-BGC und der Einfachheit der hergeleiteten Funktionen (multiple lineare Regression) sind diese Werte sehr hoch.

- Um die Qualität der Funktionen zu testen, wurden ausserdem für jede der 17 Regionen sowie Nadel- und Laubbäume mit Hilfe der Funktionen die Klimafaktoren der Jahre 1986–1995 (LFI1–LFI2) berechnet und gemittelt. Da für das Treibhausgasinventar der Klimafaktor dazu benutzt wird, die relative Abweichung des jährlichen Zuwachses vom mittleren Zuwachs der Jahre 1986–1995 abzuschätzen, müsste er gemittelt über die Jahre 1986–1995 ungefähr den Wert 1 aufweisen. In der Tat zeigen die pro Region gemittelten Klimafaktoren nur relativ kleine Abweichungen von 1. Im Mittel beträgt die Abweichung 2.4 ± 2%, wobei die höchste Abweichung bei 7.4% liegt (Region 14, Nadelwald). Die Ergebnisse zeigen, dass die Funktionen in den meisten Regionen zu keinen nennenswerten systematischen Abweichungen gegenüber dem durchschnittlichen jährlichen Zuwachs führen.
- Die Qualität der hergeleiteten Funktionen hängt aber auch massgeblich von der Güte des zugrunde liegenden Modells Biome-BGC und von der Repräsentativität der verwendeten Klima-Messstationen für die jeweilige Region ab. Die Anwendbarkeit des Modells Biome-BGC in der Schweiz wurde von Schmid et al (2006) getestet. Ihre Analysen ergaben, dass das Modell den (Biomasse-)Zuwachs unter den verschiedenen klimatischen Bedingungen der unterschiedlichen Regionen der Schweiz gut simuliert. Bei den gewählten Klimastationen und den Klimaextrapolationen wird davon ausgegangen, dass sie – im Rahmen der relativ geringen Auswahlmöglichkeiten an geeigneten Klimastationen – repräsentativ sind für die jeweilige Region. Klimastationen an Extremlagen (z.B. bei Berggipfeln) wurden vermieden. Durch Verwendung möglichst langer Klima-Messreihen wurde versucht, ein breites Spektrum an jährlichen Klimamustern abzudecken, um so den beschränkten geographischen Geltungsbereich einer einzigen Messstation etwas zu kompensieren.

Die verwendeten Funktionen fassen das Klima pro Region und Baumart zusammen. In Extremjahren wird diese Einteilung den tatsächlichen Verhältnissen nicht gerecht. So zeigte sich, dass die Reduktion des Zuwachses im trockenen Sommer 2003 in den Voralpen weit weniger stark war, als mit den hier verwendeten Funktionen geschätzt wurde (Dobbertin & Giuggiola 2006). Aus diesen Gründen werden sie nur so lange Verwendung finden, bis die Zahlen des LFI3 vorliegen. Danach müssen neue Funktionen und allenfalls auch neue Methoden zur Bestimmung der jährlichen CO_2-Bilanz von Wäldern entwickelt werden. Da die hier beschriebenen Funktionen nur für einen räumlich und zeitlich begrenzten Zeit- und Klimabereich gültig sein müssen, werden für deren Herleitung relativ einfache statistische Verfahren verwendet: eine einfache Regressionsanalyse (multiple lineare Regression) zwischen dem jährlichen Klimafaktor und den verschiedenen dazugehörigen jährlichen Klimawerten, ergänzt durch eine Residuenanalyse (Tukey-Anscombe Plot und Normal Q-Q Plot) und einer Analyse der Korrelation zwischen den Klimawerten (Bestimmung des Varianzinflationsfaktors).

Die hier präsentierte Methode zur Abschätzung des Klimaeinflusses auf den jährlichen Zuwachs stellt eine erste Vorgehensweise dar. Sie muss in nächster Zeit weiter verfeinert und getestet werden. Im Zuge der Neugestaltung des LFI (Übergang von periodischer zu kontinuierlicher Inventur) besteht nun die Möglichkeit, wenige zentrale Merkmale wie zum Beispiel den Baumdurchmesser jährlich zu erheben. Dies würde es ermöglichen, den Zuwachs jährlich auf wenigen Stichproben zu erfassen, um so die Modellschätzungen erheblich zu verbessern.

Reporting für das Kyoto-Protokoll

Die Schweiz hat beschlossen, die CO_2-Bilanzen des Waldes in der ersten Verpflichtungsperiode (2008–2012) im KP anzurechnen. Die Schweizer Waldsenke kann nicht beliebig angerechnet werden, sondern nur zu maximal 1.8 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr. Weil Senken und Quellen aus Aufforstungen und Rodungen in dieser Bilanzierung fehlen, werden sich die hier präsentierten Werte im Reporting für das Kyoto-Protokoll noch ändern. Die erwarteten Änderungen sind jedoch klein. Grössere Änderungen sind hingegen von den Ergebnissen des LFI3 zu erwarten. Sobald diese Daten verfügbar sind, müssen der Zuwachs und die Abgänge samt den Korrektur- und Umrechnungsfaktoren ab dem Jahr 1995 neu berechnet werden. Die neue Berechnungsmethode wird erstmals für das Reporting 2007 verwendet, welches im Frühjahr 2009 abgegeben wird. Erste Resultate aus dem LFI3 zeigen aber, dass die Abgänge durch Nutzung und Mortalität weiter zugenommen haben. Eine ungefähre Hochrechnung der ersten LFI3-Resultate ergibt eine durchschnittliche jährliche Senkenleistung des Schweizer Waldes von knapp 1 Mio. Tonnen CO_2, also nur gut der Hälfte der maximal anrechenbaren Senkenleistung. Die tatsächliche Senkenleistung während der ersten Verpflichtungsperiode (2008–2012) ist abhängig von der Holznutzung und allfälligen Waldschäden in dieser Periode.

Literatur

BUWAL (1996) Critical loads of nitrogen and their exceedances. Eutrophying atmospheric deposition. Report on mapping critical loads of nitrogen for Switzerland. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Schriftenreihe Umwelt 275. 74 p.

BUWAL (2005) Wald und Holz. Jahrbuch 2005. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Schriftenreihe Umwelt 386. 164 p.

BRASSEL P, BRÄNDLI UB, EDITORS (1999) Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993–1995. Bern: Haupt. 442 p.

BUGMANN H, CRAMER W (1998) Improving the behaviour of forest gap models along drought gradients. For Ecol Manage 103: 247–263.

DOBBERTIN M, GIUGGIOLA A (2006) Baumwachstum und erhöhte Temperaturen. In: Wohlgemuth T, editor. Wald und Klimawandel. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anst Wald Schnee Landsch, Forum für Wissen. pp. 35–45.

EJPD (1980) Bodeneignungskarte der Schweiz (Massstab 1:200 000). Bern: Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale. 145 p.

FISCHLIN A, BUCHTER B, MATILE L, HOFER P, TAVERNA R (2006) CO_2-Senken und -Quellen in der Waldwirtschaft. Anrechnung im Rahmen des Kyoto-Protokolls. Bern: Bundesamt Umwelt, Umwelt-Wissen 0602. 45 p.

FOEN (2006) Switzerland's initial report under article 7, paragraph 4 of the Kyoto Protocol. www.bafu.admin.ch/climatereporting/03211/index.html?lang=en (21.11.2007).

FOEN (2007) Switzerland's greenhouse gas inventory 1990–2005. Submission of 13 April 2007 to the United Nations Framework Convention on Climate Change. http://www.bafu.admin.ch/climatereporting/00545/04333/index.html?lang=en (20.11.2007).

IPCC (2007) Climate Change 2007. IPCC Fourth Assessment Report. The Synthesis Report. http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-syr.htm (15.12.2007).

LÜSCHER P, RIGLING A, WALTHERT L, ZIMMERMANN S (1994) Waldzustandsinventur 1993. Bodenkundliche Erhebungen. Bull Bodenkd Ges Schweiz 18: 69–76.

MAHRER F ET AL (1988) Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Erstaufnahme 1982–1986. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anst Wald Schnee Landsch, Ber 305. 375 p.

PAULSEN J (1994) Der biologische Kohlenstoffvorrat der Schweiz und eine spezielle Analyse der Streuvorräte im Schweizer Wald. Basel: Univ Basel, Ph.D. thesis. 240 p.

PERRUCHOUD D, KIENAST F, KAUFMANN E, BRÄKER OU (1999) 20th century carbon budget of forest soils in the Alps. Ecosystems 2: 320–337.

SCHMID S, ZIERL B, BUGMANN H (2006) Analyzing the carbon dynamics of central European forests: comparison of Biome-BGC simulations with measurements. Reg Environ Change 6 (4): 167–180.

TAVERNA R, HOFER P, WERNER F, KAUFMANN E, THÜRIG E (2007) CO_2-Effekte der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft. Szenarien zukünftiger Beiträge zum Klimaschutz. Bern: Bundesamt für Umwelt, Umwelt-Wissen 0739. 102 p.

THORNTON PE (1998) Regional ecosystem simulation: combining surface- and satellite-based observations to study linkages between terrestrial energy and mass budgets. Missoula: Univ Montana. Ph.D. thesis. 280 p.

THORNTON PE, HASENAUER H, WHITE EW (2000) Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: an application over complex terrain in Austria. Agric For Meteorol 104: 255–271.

THÜRIG E, PALOSUO T, BUCHER J, KAUFMANN E (2005) The impact of windthrow on carbon sequestration in Switzerland: a model-based assessment. For Ecol Manage 210: 337–350.

Jährliche CO_2-Flüsse im Wald: Berechnungsmethode für das Treibhausgasinventar

Der Wald, welcher sowohl eine CO_2-Senke als auch eine CO_2-Quelle sein kann, spielt im Kyoto-Protokoll eine spezielle Rolle. Die Schweiz hat beschlossen, die Waldbewirtschaftung unter Art. 3.4 des Kyoto-Protokolls anzurechnen. Basis der jährlichen Senken- und Quellenberechnungen im Wald bildet das Treibhausgasinventar, welches zuhanden der Klimakonvention seit 1990 erstellt werden muss. Der vorliegende Artikel erläutert die im Treibhausgasinventar verwendeten Berechnungsmethoden der CO_2-Bilanz im Wald. Berechnungsgrundlage bilden die Ergebnisse des ersten und zweiten Landesforstinventars. Die jährlichen CO_2-Bilanzen werden mit Hilfe der Schweizerischen Forststatistik, jährlichen Klimawerten und einem klimasensitiven Zuwachsmodell hergeleitet. Die hohe räumliche und zeitliche Auflösung der Daten bildet die Heterogenität der Schweiz gut ab. Lücken bestehen in der Abschätzung der CO_2-Bilanzen des Totholzes und des Bodens. Der Effekt jährlicher Klimaschwankungen auf den durchschnittlichen Zuwachs sollte vertieft untersucht werden. Zudem müssen, sobald die Daten aus dem dritten Landesforstinventar verfügbar sind, die CO_2-Bilanzen ab 1995 neu berechnet werden.

Flux annuels de CO_2 en forêt: Méthode de calcul pour l'inventaire des gaz à effet de serre

La forêt, qui peut être aussi bien un puit qu'une source de CO_2 , joue un rôle particulier dans le Protocole de Kyoto. La Suisse a décidé de prendre en compte la gestion des forêts selon l'art. 3.4 du Protocole de Kyoto. L'Inventaire des gaz à effet de serre, qui doit être dressé à l'intention de la Convention climatique depuis 1990, constitue la base des calculs annuels de puits et de sources. Le présent article explique les méthodes de calcul utilisées pour le bilan du CO_2 dans le cadre de l'Inventaire des gaz à effet de serre. Les résultats de l'Inventaire forestier national (IFN 1 et 2) constituent la base des calculs. Les bilans annuels du CO_2 sont déterminés à l'aide de la Statistique forestière suisse, des données climatiques annuelles et d'un modèle d'accroissement intégrant le climat. La grande dispersion spatiale et temporelle des données reflète bien l'hétérogénéité de la Suisse. Il subsiste des lacunes dans l'estimation des bilans CO_2 du bois mort et du sol. L'effet des variations annuelles du climat sur l'accroissement moyen devrait être étudié de manière approfondie. En outre, dès que les données du 3e Inventaire forestier national seront disponibles, les bilans CO_2 devront être recalculés à partir de 1995.