

Können forstliche Massnahmen einen Beitrag zur Verminderung der schweizerischen CO₂-Emissionen leisten?¹

Ökologische Grundlagen und erste Abschätzungen

Von *Andreas Fischlin* und *Harald Bugmann*

FDK 161: 537: 425: 907

1. Einleitung

Seit der industriellen Revolution im letzten Jahrhundert ist die Konzentration von Treibhausgasen in der Erdatmosphäre ständig angestiegen. Weil kein Ende dieses durch den Menschen verursachten Anstiegs absehbar ist und die Treibhausgase das Klima auf der Erde wesentlich beeinflussen, wurde die Gefahr einer globalen Klimaänderung in Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit in den letzten Jahren eingehend in Erwägung gezogen und diskutiert (*Schneider, 1989; Houghton et al., 1990*). Wegen der Absorptionseigenschaften dieser Gase sind eine Erwärmung der Erdatmosphäre (*Siegenthaler, Oeschger, 1978; Houghton et al., 1990*) und ein globaler Anstieg der Niederschläge zu erwarten (*Houghton et al., 1990*). In der Wissenschaft wurde dank der Anstrengungen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ein breiter Konsens bezüglich der verstärkten Erwärmung der Atmosphäre erreicht, hauptsächlich gestützt auf die Resultate von atmosphärischen allgemeinen Zirkulationsmodellen (GCMs) und paläoklimatische Daten, die einen Zusammenhang zwischen den globalen Mitteltemperaturen und dem CO₂-Gehalt der Atmosphäre aufzeigen (*Neftel et al., 1982; Siegenthaler, 1988; Wanner, Siegenthaler, 1988; Siegenthaler et al., 1988; Schneider, 1989; Houghton et al., 1990*). Die Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation weisen das Potential auf, das Klima auf dem ganzen Globus nicht nur in bezug auf die Temperatur, sondern in vielen anderen Grössen wie Niederschlagshäufigkeiten, Bewölkungsgrad, Globalstrahlung, Windrichtungshäufigkeiten und -geschwindigkeiten bis hin zu den Meeresströmungen entscheidend und

¹ Dieser Arbeit liegt ein Beitrag einer Gruppe von Studenten und Angehörigen der ETH Zürich zum Umweltag 1990 an der ETH zugrunde. Die Autoren danken M. Brunner, O. Bürgi, T. Etter, S. Guidese und Prof. P. Bachmann für die Hilfe bei der Aufarbeitung der Daten. Insbesondere danken wir Prof. P. Bachmann für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

auf viele Jahrhunderte, wenn nicht gar Jahrtausende hinaus langfristig zu verändern.

Aufgrund dieser Erkenntnisse erscheint es unumgänglich, die Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre, das zu rund 50 % am verstärkten Treibhauseffekt beteiligt ist (Schneider, 1989), raschmöglichst zu stabilisieren. Es ist darum nötig, auf den verschiedensten Ebenen Massnahmen zu treffen, um die CO₂-Emissionen zu vermindern.

Gemäss dem Motto «Global denken – lokal handeln» versuchten wir in dieser Arbeit, die Bedeutung und Rolle eines kleinen Landes wie der Schweiz im globalen Kohlenstoffkreislauf aufzuzeigen. Die 6,62 Millionen Einwohner der Schweiz (Anonym, 1990) entsprechen ungefähr 1 ‰ der Weltbevölkerung. Die schweizerischen CO₂-Emissionen allerdings machen gegenwärtig 6 ‰ der globalen Emissionen aus (Anonym, 1990; Houghton *et al.*, 1990). Absolut betrachtet, mögen die schweizerischen Emissionen global vernachlässigbar klein sein, relativ zur Bevölkerung liegen sie jedoch um 500 % über dem weltweiten Durchschnitt. Nicht zuletzt aus diesem Grund ist die Schweiz ein repräsentatives Fallbeispiel eines hochindustrialisierten Landes. Sie scheint uns deshalb gut geeignet, um Möglichkeiten zur CO₂-Fixierung aufzuzeigen, denn unsere Methodik zur Abschätzung des Potentials einzelner Massnahmen zur Emissionsreduktion ist im wesentlichen auch auf andere industrialisierte Länder der gemässigten oder gar der borealen Zone übertragbar.

Verschiedene Studien haben sich bereits mit dem Problem einer Reduktion der globalen CO₂-Emissionen durch forstliche Massnahmen beschäftigt. Die meisten Untersuchungen haben errechnet, welche Flächen aufgeforstet werden müssten, damit deren photosynthetische CO₂-Aufnahme in der Wachstumsphase den globalen CO₂-Emissionen entsprechen würde. Dyson (1977) schätzte die hierzu benötigte Fläche auf 700 Millionen Hektaren, während Marland (1989) und Sedjo (1989) 500 bis 700 Millionen Hektaren errechneten. Schroeder, Ladd (1991) schätzten ab, dass mindestens 192 Millionen Hektaren mit Bäumen bepflanzt werden müssten, um alleine die CO₂-Emissionen der USA zu kompensieren. Uns ist aber keine Studie bekannt, die untersuchte, bis zu welchem Anteil die Emissionen eines einzelnen Landes im Rahmen der aktuellen ökonomischen, waldbaulichen und ökologischen Bedingungen und im Zeithorizont von einem bis zwei Jahrhunderten durch gezielte, konsequente Massnahmen ausgeglichen werden könnten.

Harmon *et al.* (1990) haben die Umwandlung extensiv bewirtschafteter Wälder mit hohem Holzvorrat und kleinem Zuwachs in Forste mit kleinem Vorrat und hohem Zuwachs untersucht. Selbst wenn das Nutzholz aus den stark bewirtschafteten Wäldern in dauerhaften Produkten – zum Beispiel als Bauholz – fixiert wird, ist nach den Berechnungen dieser Autoren ein Nettoverlust von CO₂ an die Atmosphäre zu erwarten.

Im Sinne einer Fallstudie beschränkte sich diese Arbeit auf die Untersuchung des möglichen Beitrags forstlicher Massnahmen zur Reduktion der

schweizerischen CO₂-Emissionen im Verlaufe der nächsten 200 Jahre. Hierzu waren auch Massnahmen in Erwägung zu ziehen, die das gesetzte Ziel nur zu erreichen vermögen, falls sie nicht auf den Sektor Wald- und Holzwirtschaft beschränkt bleiben, sondern beispielsweise auch die Energie- und Abfallwirtschaft berühren. Aufbauend auf den ökologischen Grundlagen bemühten wir uns, einen kleinen Katalog möglicher Massnahmen zusammenzustellen, die ein gemeinsames, übergeordnetes Ziel teilen. Dieses besteht darin, atmosphärischen Kohlenstoff in Biomasse oder Holzprodukten zu fixieren und dessen Entweichen in die Atmosphäre möglichst lange hinauszuzögern.

Der Katalog setzt sich aus den folgenden Massnahmen zusammen:

- I Aufforstung brachliegender Flächen.
- II Erhöhung des Holzvorrates in schon vorhandenen Waldflächen.
- III Maximierung des Holzertrags zwecks Kohlenstoffbindung in langlebigen Holzprodukten.
- IV Nachhaltig nutzbares Holz wird als Energieholz verwendet, um fossile Brennstoffe zu substituieren.

Die Massnahme I liegt nahe, weil durch die Abwanderung von Erwerbstätigen aus der Landwirtschaft vor allem im Berggebiet immer mehr Flächen verbrachen (*Surber et al.*, 1973). Unter natürlichen Verhältnissen würden die meisten dieser Flächen im Rahmen einer Sekundärsukzession wieder von Wald bedeckt. Alleine der Natur überlassen, dauert dieser Prozess allerdings Jahrhunderte; unter den schweizerischen Klima- und Bodenbedingungen könnten aktive Eingriffe wie Aufforstungen oder andere wachstumsfördernde Massnahmen deshalb zur Beschleunigung der Wiederbewaldung beitragen.

Bei der Massnahme II geht es um ein ähnliches Ziel wie bei der Massnahme I, nämlich um die Erhöhung des gesamtschweizerischen Holzvorrates, allerdings durch eine geeignete Bewirtschaftung schon bestockter Flächen.

Die Massnahme III gestattet es, den im Nutzholz gebundenen Kohlenstoff vorübergehend dem Kohlenstoffkreislauf zu entziehen und dadurch der Atmosphäre möglichst lange vorzuenthalten.

Bei der Massnahme IV wird genau gleich wie beim Verbrennen fossiler Energieträger CO₂ freigesetzt, jedoch liegt die für die Kohlenstoffbindung verantwortliche Photosynthese nicht Jahrtausende zurück, sondern hat vor kurzem stattgefunden. Zudem kann bei entsprechender Nachhaltigkeit dieser Nutzungsart die gleiche Menge an CO₂ gleich anschliessend an das Verbrennen wiederum photosynthetisch eingebunden werden. Energieholz kann deshalb als neutral bezüglich der CO₂-Bilanz betrachtet werden.

Schliesslich ist eine erste quantitative Abschätzung der Wirksamkeit der einzelnen Massnahmen, insbesondere im Hinblick auf deren Gesamtpotential, vorzunehmen. Hierzu braucht es Modelle, welche die Biomassenentwicklung der Wälder unter verschiedenen Bewirtschaftungsstrategien wiederzugeben vermögen (*Fischlin, Bugmann*, 1993).

Obwohl eine Kombination möglichst vieler Massnahmen gesamthaft am wirkungsvollsten ausfallen dürfte, erschien es uns sinnvoll, zuerst die Wirksamkeit jeder einzelnen Massnahme unabhängig von allen anderen abzuschätzen. Erst zum Schluss wird dann die Wirksamkeit einer Kombination der vorgängig einzeln untersuchten Massnahmen abgeschätzt und beurteilt. Für dieses Paket werden vorzugsweise diejenigen Massnahmen zu berücksichtigen sein, welche sich gegenseitig nicht behindern und welche die CO₂-Bilanz der Schweiz nachhaltig und nicht nur während befristeter Zeit zu senken vermögen.

Unsere ersten Abschätzungen zeigten, dass das schweizerische Forstwesen das Potential hat, vorübergehend aktiv zur Drosselung der CO₂-Emissionen beizutragen. Allerdings sollte sorgfältig darauf geachtet werden, die Bedeutung forstlicher Massnahmen im langfristigen Gesamtkontext des Treibhaus-effekts weder zu überschätzen noch zu unterschätzen, indem insbesondere die zeitliche Dynamik der zugrundeliegenden Prozesse gebührend berücksichtigt wird.

2. Material und Methoden

Die schweizerischen CO₂-Emissionen betragen im Jahr 1988 42,23 Mt CO₂, was 11,51 Mt Kohlenstoff oder in Energieeinheiten 577,01 PJ entspricht (Anonym, 1990). Der Anteil der fossilen Brennstoffe (Öl, Gas, Kohle) am Gesamtenergieverbrauch war 75,3 %.

Für unsere Studie nahmen wir eine grobe Unterteilung der schweizerischen Waldflächen von total 11 863 km² (≈28,7 % der Landesfläche) in drei Typen vor (*Tabelle 1*, für Einzelheiten auch *Tabelle 3*). Der Waldtyp A entspricht den gemässigten Laubmischwäldern des Mittellandes, in welchen die Rotbuche dominiert; der Typ B charakterisiert die eher heterogenen Gesellschaften der oberen montanen Stufe (Buchen-Tannenwälder, Tannen-Fichtenwälder); der Typ C umfasst die subalpinen Wälder, in denen die Fichte dominiert (*Ellenberg, Klötzli, 1972*).

Alle Biomassenschätzungen werden in Tonnen Trockengewicht angegeben. Für die Umrechnungen nahmen wir an, dass 1 m³ Holz 0,5 t Trockengewicht entspricht, und dass 1 t Trockengewicht 0,45 t Kohlenstoff enthält. Total speichert allein der Holzvorrat der Schweizer Wälder gegenwärtig mindestens 68 Mt Kohlenstoff (*Tabellen 1, 3*).

Tabelle 1. Klassifikation und quantitative Eigenschaften der verwendeten Waldtypen. Die Nomenklatur der phytosoziologischen Einheiten folgt *Ellenberg, Klötzli (1972)*. Bonitäten nach *Badoux (1967)*. Für weitere Parameter vgl. *Tabelle 3*.

Waldtyp	Fläche [km ²], %	Dominierende Pflanzengemeinschaften	Dominierende Arten	Bonität [m]
A – gemässigte Laubmisch- wälder	4230 (35,7 %)	Verbände <i>Luzulo-Fagion</i> , <i>Eu-Fagion</i> und <i>Cephalan- thero-Fagion</i>	Rotbuche (<i>Fagus silvatica</i> L.)	18–20
B – montane Tannen- Fichtenwälder	3815 (32,2 %)	Verbände <i>Abieti-Fagion</i> und <i>Piceo Abietion</i>	Weisstanne (<i>Abies alba</i> Mill.), Fichte (<i>Picea abies</i> L.)	16–18
C – subalpine Koniferenwälder	3816 (32,2 %)	Klasse <i>Vaccinio-Piceetea</i>	Fichte (<i>Picea abies</i> L.)	14

Tabelle 2. Modellparameter für die Simulation der Biomassenentwicklung in den drei Waldtypen A, B und C.

Parameter	Einheit	A – Buchenwald	B – Tannen- Fichtenwald	C – Fichtenwald
r	Jahr ⁻¹	0,04	0,05	0,05
K	t Trockengewicht/ha	550	600	450
d	Jahr ⁻¹	0,025	0,037	0,037
ε	t Trockengewicht/ha	40	80	25

Tabelle 3. Daten für die Berechnung des Holzvorrats unter verschiedenen Bewirtschaftungsmassnahmen, aufgegliedert nach Waldtypen (vgl. *Tabelle 1*), deren geographischer Lage und den dominierenden Baumarten. Die Spalten für die Zukunft berücksichtigen nur die Erhöhung der Umtriebszeit; die wirksamste Massnahme umfasst auch Verjüngung unter Schirm und Aufgabe der Bewirtschaftung ab Bestandesalter 100 (vgl. Text). Bonitäten nach *Badoux (1967)*; die Einheiten für den Holzvorrat beziehen sich auf Trockengewicht (Daten und Berechnungen nach *Bachmann*, mündliche Mitteilung).

Waldtyp, Region	Baumart, Bonität [m]	Fläche [km ²]	Gegenwart		Zukunft	
			Umtriebs- zeit [Jahre]	Holz- vorrat [t/ha]	Umtriebs- zeit [Jahre]	Holz- vorrat [t/ha]
A – Jura	Buche 18	1365	150	114,5	180	135,0
	Tanne 14	585	150	162,5	180	190,0
A – Mittelland	Buche 18	1141	150	114,5	180	135,0
	Fichte 22	228	120	172,0	160	210,0
	Tanne 16	913	130	166,5	160	200,0
B – Nordalpen	Fichte 18	1302	130	133,0	180	170,0
	Tanne 12	868	160	146,0	180	162,5
C – Alpen	Fichte 16	3816	140	118,5	200	155,0
B – Südalpen	Buche 16	823	160	96,5	180	107,5
	Fichte 18	823	130	133,0	180	170,0

2.1 Massnahme I – Aufforstung brachliegender Flächen

Das Pflanzen von Fichten (*Picea abies* L.) ist in der Schweiz aus standörtlichen und ökonomischen Gründen noch weit verbreitet. Weil zudem die Trockensubstanz-Produktion eines Waldstandortes näherungsweise unabhängig von der Baumart ist (Keller, 1978), legten wir dem Modell für die Aufforstung der Brachflächen den Wachstumsverlauf der Fichte zugrunde.

Wir unterteilten die Aufforstung in zwei getrennt zu modellierende zeitliche Abschnitte: (1) Für die Wachstumsphase betrachteten wir den gesamten Kohlenstoff-Fluss ins Ökosystem. In dieser Phase wird der assimilierte Kohlenstoff auf verschiedene Kompartimente, zum Beispiel Nutzholz, anderes oberirdisches Holz, Blätter, Wurzeln und totes organisches Material im Boden verteilt. (2) Wir gingen davon aus, dass der Zuwachs sich im wesentlichen auf die ersten 60 Jahre beschränkt und sich der Kohlenstoffhaushalt der Brachflächen danach im Gleichgewicht befindet. Natürlich wächst auch nach dem Bestandesalter 60 noch Holz zu, doch geht die entscheidende Netto-Ökosystemproduktion stark zurück und sinkt bei ungefähr 150jährigen Beständen auf Null ab. Um abschätzen zu können, wieviel Holz in der Gleichgewichtsphase nachhaltig nutzbar ist (Massnahme IV), wurde der zu erwartende Holzvorrat aus Ertragstafeln berechnet (Badoux, 1967b). Hierbei wurde für jeden Waldtyp (Tabelle 1) eine mittlere Bonität angenommen.

2.2 Massnahme II – Vorratserhöhung

Der momentane Holzvorrat der Schweizer Wälder wurde mit Hilfe eines Modells von Bachmann (1968) berechnet. Für den Zuwachs in jedem der drei Waldtypen wurden Ertragstafeln der dominierenden Arten beigezogen. Die folgenden Bewirtschaftungsmassnahmen wurden untersucht: 1) verlängerte Umtriebszeit, 2) Verjüngung unter Schirm, 3) keine Durchforstungen ab Bestandesalter 100 Jahre.

2.3 Massnahme III – Ertragsmaximierung zwecks Kohlenstoffbindung in langlebigen Holzprodukten

Dank der Tatsache, dass die oberirdische Biomasse eines Waldes zur Hauptsache aus Holz besteht, haben wir den Zuwachs und die Nutzung dieser Biomasse auf einfachste Weise modellieren können. Das Modell dient dazu, die Möglichkeiten der Ertragsmaximierung und der Bindung des Kohlenstoffs in langlebigen Holzprodukten quantitativ und im Verlaufe der Zeit abzuschätzen. Hierbei stützten wir uns im wesentlichen auf die folgenden Annahmen: Je nach Bonität stösst der Holzvorrat nach einigen Jahrzehnten an eine

obere, konstante Grenze K , die Tragekapazität des Waldtyps. Je kleiner die momentane Biomasse Q , desto stärker ist der Zuwachs Z direkt proportional zu Q . Diese Modellannahmen erlaubten es uns, die Dynamik der Biomasse Q näherungsweise mit einer logistischen Gleichung (Gl. 1) zu beschreiben (Pearl, 1927):

$$\frac{dQ_j}{dt} = Z(Q_j) = \frac{r_j \cdot (K_j - Q_j)}{K_j} \cdot Q_j \quad (1)$$

mit

j	Waldtyp (A, B, C)	
$Z(Q_j)$	Zuwachs in Funktion der vorhandenen Biomasse	[t TG/ha·a]
Q_j	oberirdische Biomasse inklusive Holz	[t TG/ha]
r_j	maximale Wachstumsleistung (= relative Wachstumsrate) von Q	[/a]
K_j	maximale Biomasse (Tragekapazität)	[t TG/ha]

Je nach Waldtyp j werden für die Modellparameter r_j und K_j andere Werte verwendet (Tabelle 2). Für alle Waldtypen verwendeten wir einen Anfangswert $Q_j(0) = 5$ t/ha.

Eine konventionelle Waldnutzung, das heisst Schirm-, Femel- oder Saumschlag, kann annäherungsweise durch das folgende Modell simuliert werden: Sobald die Biomasse 90 % der Tragekapazität K_j erreicht hat, setzen die Verjüngungshiebe ein (vereinfachend wurde ein Verzicht auf Durchforstungen angenommen). Im Abstand von acht Jahren werden Bäume geschlagen, wobei jeweils 30, 50 und 70 % der momentan vorhandenen Biomasse geerntet werden (Gl. 2–5; Abbildung 1 links).

$$E_j(t^-) = \begin{cases} e_i \cdot Q_j(t^-) & t^- = t_e + i \cdot 8 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{mit } i = 0, 1, 2 \quad (2)$$

$$Q_j(t) = Q_j(t^-) - E_j(t^-) \quad (3)$$

$$P_j(t) = P_j(t^-) + 0,4 \cdot E_j(t^-) \quad (4)$$

$$t_e = t \mid Q_j = 0,9 \cdot K_j \quad e_0 = 0,3 \quad e_1 = 0,5 \quad e_2 = 0,7 \quad (5)$$

mit

E_j	Ernte in Funktion der vorhandenen Biomasse und der Zeit t	[t TG/ha·a]
P_j	Biomasse in langlebigen Holzprodukten	[t TG/ha]
e_i	Anteil der geernteten Biomasse bei der Nutzung i (30, 50, 70 %)	
t_e	Zeitpunkt der ersten Nutzung (Zustandsereignis)	
t^-	Zeit bis unmittelbar vor der Ernte (linksseitiger Wert der Unstetigkeit)	

Die maximale nachhaltige Nutzung («maximum sustainable yield») kann erreicht werden, wenn die Ernte bei einer Biomasse Q_j^* stattfindet, welche das Kriterium $dZ(Q_j)/dQ_j = 0$ erfüllt, das heisst, wenn der Zuwachs maximal ist. Der Wert von Q_j^* entspricht dabei gerade der halben Tragekapazität K_j . Eine maximale nachhaltige Nutzung sollte deshalb möglichst kontinuierlich bei der Biomasse Q_j^* erfolgen. Da eine wirklich kontinuierliche Nutzung sich aus infrastrukturellen und ökonomischen Gründen in der Praxis aber kaum verwirklichen lässt, nahmen wir an, dass die Ernte dann stattfindet, wenn die Biomasse Q_j um einen bestimmten Betrag ε_j grösser wird als die halbe Tragekapazität, und dass jeweils eine Biomasse von $2 \cdot \varepsilon_j$ geerntet wird (Gl. 2', 3, 4, 5'; *Abbildung 1 rechts; Tabelle 2*).

$$E_j(t^-) = \begin{cases} 2 \cdot \varepsilon_j & t^- = t_e \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2')$$

$$t_e = t \mid Q_j = 0,5 \cdot K_j + \varepsilon_j \quad (5')$$

Wir nahmen an, dass 40 % der geernteten Biomasse in dauerhafte Holzprodukte umgewandelt werden können (Harmon *et al.*, 1990). Diese Holzprodukte haben nur eine beschränkte Lebensdauer; die Abnahme des in Holzprodukten gebundenen Kohlenstoffs kann deshalb mit einer exponentiellen Zerfallsgleichung approximativ modelliert werden (Gl. 6). Zur Schätzung des Zerfallsparameters d nahmen wir an, dass nach 120 Jahren 95 % der Produkte aus Laubhölzern und nach 80 Jahren 95 % jener aus Nadelhölzern ersetzt werden müssen (*Tabelle 2*).

$$\frac{dP_j}{dt} = -d_j \cdot P_j \quad (6)$$

mit

d_j relative Zerfallsrate [1/a]

2.4 Massnahme IV – Substitution fossiler Energieträger durch Energieholz

Wir nahmen an, dass der gesamte nachhaltig nutzbare Zuwachs zur Gewinnung von Energieholz verwendet wird. Zur Berechnung des Effekts dieser Massnahme gingen wir davon aus, dass der Brennwert von Holz $1,5 \cdot 10^7$ J/kg beträgt, derjenige von Heizöl aber $4,2 \cdot 10^7$ J/kg (*Anonym*, 1977). Für Heizöl nahmen wir die chemische Summenformel $(CH_2)_n$ an. Dies bedeutet, dass die Substitution von 1 kg Heizöl durch Holz zu einer Verminderung der Emissionen um 0,85 kg Kohlenstoff führt.

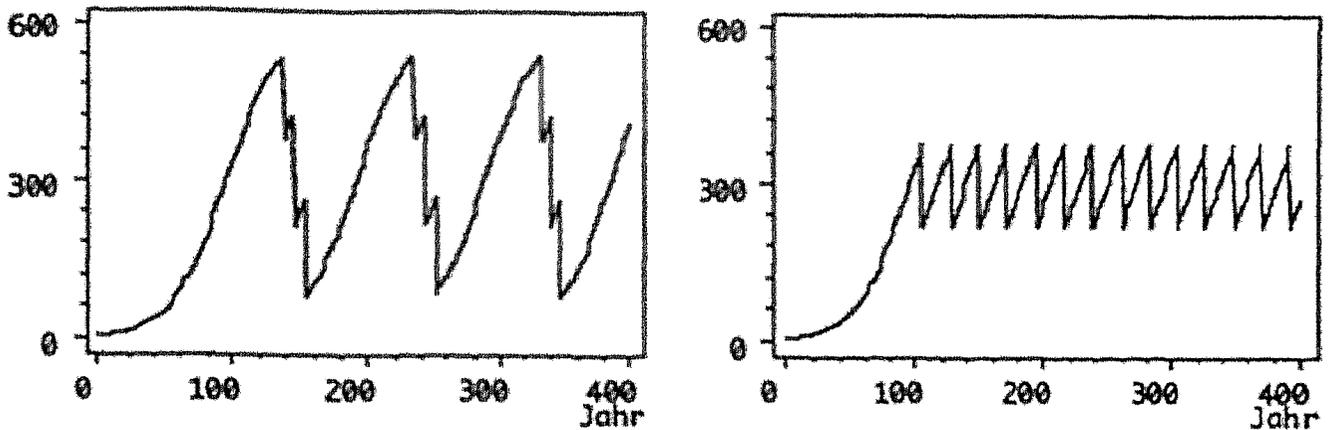


Abbildung 1. Entwicklung der oberirdischen Biomasse eines Waldes (t Trockengewicht/ha) bei verschiedenen Bewirtschaftungsformen: Links: Konventionelle Waldbewirtschaftung mit einer Umtriebszeit von ungefähr 90 Jahren. Rechts: Strategie zur Gewinnung des maximal nachhaltig nutzbaren Ertrags (=maximum sustainable yield) mit einer viel häufigeren Bewirtschaftung um $Q_1^* = K_f/2$ herum (siehe auch Text).

3. Resultate und Diskussion

3.1 Massnahme I – Aufforstung brachliegender Flächen

Im Jahr 1973 lagen in der Schweiz ungefähr 800 km^2 brach (Surber *et al.*, 1973); diese Fläche könnte bis ins Jahr 2000 auf 2600 km^2 (6 % der Landesfläche) ansteigen (Surber *et al.*, 1973).

Wachstumsphase

Unter der Annahme, dass tatsächlich 2600 km^2 aufgeforstet werden könnten und diese Flächen einen mittleren jährlichen Zuwachs von 5 t C/ha während etwa 60 Jahren aufweisen (Woodwell, 1970; Lieth, Whittaker, 1975; MacLaren *et al.*, 1993), wäre in den Brachflächen eine mittlere Fixierung von netto $1,3 \cdot 10^6 \text{ t C/Jahr}$ zu erwarten. Dies entspricht rund 11 % der jährlichen anthropogenen CO_2 -Emissionen der Schweiz im Jahre 1988 (Anonym, 1990) und führt zu einem totalen Ökosystem-Kohlenstoffgehalt von 78 Mt C in den Aufforstungsflächen. Weil die Zunahme der Biomasse nicht linear zur Zeit verläuft, überschätzen diese Berechnungen die CO_2 -Fixierung am Anfang und gegen das Ende der Wachstumsperiode (Schroeder, Ladd 1991).

Die Annahme, dass gleichzeitig alle Brachflächen aufgeforstet werden, ist natürlich eine sehr grobe Vereinfachung. Man bedenke aber: Wenn die gesamte Fläche in absehbarer Zeit tatsächlich aufgeforstet werden könnte, wirken sich die Fehler dieser Approximation nur noch auf den Zeitpunkt, wann eine bestimmte Bilanzsumme erreicht wird, und weniger auf die total speicherbare Menge Kohlenstoff aus. Diese simplen Annahmen erscheinen uns deshalb für eine erste Abschätzung der maximalen Wirksamkeit, welche mit der Massnahme I erzielbar wäre, gerechtfertigt.

Gleichgewichtsphase

Die Gesamtwuchsleistung der Brachflächen (Badoux, 1967b; Mahrer, 1988) beträgt 77,6 Millionen m³; demnach speichert der Holzvorrat dieser Flächen nach 60 Jahren mindestens 17,5 Mt Kohlenstoff. Zudem können diese Aufforstungsflächen noch nachhaltig zur Gewinnung von Energieholz genutzt werden (siehe auch Massnahme IV).

Allerdings bleiben die Fragen, wie im einzelnen diese Aufforstungen durchzuführen wären, und ob derartige Massnahmen im Rahmen der vorhandenen Infrastruktur innerhalb nützlicher Frist überhaupt durchführbar und finanzierbar wären, immer noch offen; zumindest steht fest, dass die Massnahme I einen bedeutenden Beitrag zur Reduktion der schweizerischen CO₂-Emissionen während des nächsten Jahrhunderts leisten könnte.

3.2 Massnahme II – Vorratserhöhung

Tabelle 3 enthält die Resultate der Berechnungen nach Bachmann, welche mit Hilfe eines Modells von Bachmann (1968, mündliche Mitteilung) erzielt wurden. Nach diesem Modell hätte der schweizerische Wald eine oberirdische Biomasse von 151 Mt. Im Rahmen des Landesforstinventars (LFI; Mahrer, 1988) wurde diese etwas höher, nämlich auf 183 Mt geschätzt. Die Differenz von rund 20 % zwischen den beiden Berechnungsarten dürfte hauptsächlich auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass im Modell ein nachhaltiger Waldaufbau und eine regelmässige Waldbewirtschaftung auf der ganzen Fläche angenommen wurden; tatsächlich ist in den letzten Jahren aber nur etwa die Hälfte des jährlichen Zuwachses an Biomasse geerntet worden (Volz, 1990).

Wenn die Umtriebszeit im Modell um 30 bis 50 Jahre verlängert wird (*Tabelle 3*), so erhöht sich die Biomasse auf 187 Mt. Dies entspricht zwar einer Differenz von 36 Mt im Vergleich zum Modellresultat für heutige Verhältnisse, aber nur von 4 Mt im Vergleich zum Landesforstinventar. Man darf davon ausgehen, dass im Schweizer Wald ein Teil der angestrebten Vorratserhöhung bereits erreicht worden ist; neben einer Verlängerung der Umtriebszeit hat auch der teilweise Verzicht auf Durchforstungen dazu beigetragen.

Wird im Modell neben einer Erhöhung der Umtriebszeit zusätzlich eine langsame Verjüngung unter Schirm und ein Verzicht auf Durchforstungen ab dem Bestandesalter 100 angenommen, so steigt der totale Holzvorrat um 53 auf 240 Mt. Bezogen auf die Ergebnisse des Landesforstinventars ermöglicht dies eine Erhöhung des Vorrats um 57 Mt.

Wenn man annimmt, dass diese Vorratserhöhung mit der momentanen Zuwachsrate erfolgt (Volz, 1990), so sind rund 40 Jahre nötig, bis der neue Vorrat 240 Mt erreichte. Die effektiv benötigte Zeitdauer ist allerdings länger, denn der tatsächliche Zuwachs nimmt ab, je näher der Vorrat an diese 240 Mt

herankommt. Spätestens nach der doppelten Zeitspanne (80 Jahre) müsste die Vorratserhöhung aber beendet sein. Wenn wir annehmen, dass die Vorratserhöhung rund 60 Jahre dauern würde, so liessen sich damit etwa 3,7 % der heutigen jährlichen CO₂-Emissionen fixieren. Dies zeigt, dass diese Massnahme wesentlich weniger zur Reduktion der CO₂-Emissionen beizutragen vermag als die Massnahme I (Aufforstung von Brachflächen).

3.3 Massnahme III – Ertragsmaximierung zwecks Kohlenstoffbindung in langlebigen Holzprodukten

Die Simulationen mit dem Modell zeigten, dass bei dieser Massnahme die Summe des biologisch gebundenen Kohlenstoffs in der oberirdischen Biomasse und in den angestrebten langlebigen Holzprodukten bei Fichtenwäldern um 2,8 und bei Fichten-Tannenwäldern sogar um 3,4 t C/ha abnehmen würde. Für dieses Ergebnis sind hauptsächlich zwei Gründe verantwortlich: Wir nahmen an, dass nur 40 % des genutzten Holzes in langlebige Holzprodukte umgewandelt werden können (Harmon *et al.*, 1990) und dass Produkte aus Nadelholz eine geringere Halbwertszeit als jene aus Buchenholz haben (Parameter d, *Tabelle 2*). Ein emissionsverringender Gesamteffekt dieser Massnahme könnte demnach nur durch eine Steigerung der Nutzungseffizienz bei Holzernte und Produktherstellung (das heisst durch eine Erhöhung jenes Anteils an der Biomasse, der in langlebige Holzprodukte umgesetzt werden kann) oder eine noch längere Bindungszeit des Kohlenstoffs in hochwertigen Holzprodukten bewerkstelligt werden. Unsere diesbezüglichen Annahmen sind aber ohnehin schon optimistisch, so dass die Massnahme III in Wirklichkeit kaum einen positiven Gesamteffekt haben dürfte.

Einzig in Buchenwäldern hätte diese Massnahme eine positive Wirkung und würde die Kohlenstoffbindung um 2,9 t C/ha vergrössern. Würde man diese Massnahme in allen Buchenwäldern anwenden, das heisst in 35,7 % der schweizerischen Waldfläche, so könnte die totale Kohlenstoffspeicherung um 1,2 Mt erhöht werden. Wenn wir weiter annehmen, dass es ungefähr 50 Jahre dauert, bis diese Massnahme überall eingeführt und das neue Gleichgewicht erreicht wäre, so ergibt sich während dieser Zeitspanne eine Reduktion der jährlichen CO₂-Emissionen von bloss 0,2 %.

Die Einführung der Massnahme III wäre mit erheblichen Kosten sowie Zusatzinvestitionen verbunden und würde die Forstwirtschaft sehr stark beanspruchen, nicht zuletzt wegen der teilweise grossen Rückedistanzen (Hurst, 1991; Volz, 1992); auf der gesamten Fläche wäre heute die Massnahme III deshalb gar nicht durchführbar. Infolge des schlechten Verhältnisses zwischen Aufwand und Nutzen muss die Massnahme III allerdings auch in Zukunft als unbedeutend eingestuft werden.

3.4 Massnahme IV – Substitution fossiler Energieträger durch Energieholz

Forstet man alle Brachflächen konsequent auf (Massnahme I) und versucht, in den schon vorhandenen Wäldern den Vorrat zu erhöhen (Massnahme II), so kann einerseits die biologische Fixierung von CO_2 stark erhöht werden, andererseits ist es auch möglich, diese Wälder gemäss Massnahme IV nachhaltig zu nutzen. Mit dem so gewonnenen Energieholz könnten beispielsweise fossile Energieträger substituiert werden. Kurzfristig sollte sich dadurch die Netto-Kohlenstoffbilanz nicht verschlechtern, da ein Teil der Nettoprimärproduktion im natürlichen Kreislauf ohnehin vermodert und der Kohlenstoff dabei ähnlich rasch freigesetzt wird wie bei der Verbrennung von Holz. Über mehrere Jahrhunderte hinweg besteht allerdings die Gefahr, dass diese Nutzung negative Auswirkungen auf die Humusdynamik haben und der Gehalt an organischem Kohlenstoff in den Böden schwinden könnte.

Heute beträgt der nachhaltig nutzbare Holzzuwachs in der Schweiz etwa 4 Mt Trockensubstanz pro Jahr, wovon allerdings nur gut 50 % (2,25 Mt) tatsächlich genutzt werden (Volz, 1990). Wenn die übrigen 1,75 Mt ebenfalls geerntet würden, so könnten damit 0,625 Mt Heizöl substituiert werden. Dies entspricht 1,97 Mt CO_2 , das heisst 4,7 % der CO_2 -Emissionen des Jahres 1988.

Bei einer Vorratserhöhung (Massnahme II) geht der nachhaltig nutzbare Zuwachs im Vergleich zu heute zurück. Wir haben angenommen, dass dieser noch etwa 2,5 Mt beträgt, wenn der gesamte Vorrat gemäss Massnahme II auf 240 Mt angestiegen ist. Mit der vollständigen Nutzung dieses Zuwachses zur Gewinnung von Energieholz könnten somit 0,893 Mt Heizöl (2,25 Mt CO_2) oder 5,3 % der CO_2 -Emissionen des Jahres 1988 ausgeglichen werden.

Relativ zum heutigen Stand liessen sich demnach durch die Massnahme IV langfristig und nachhaltig die schweizerischen CO_2 -Bruttoemissionen um rund 5 % reduzieren.

3.5 Kombination von Massnahmen und Projektionen für die Zukunft

Um abzuschätzen, mit welcher Kombination der angeführten Massnahmen im Verlauf der nächsten zwei Jahrhunderte der grösstmögliche Effekt erzielt werden könnte, ist es unumgänglich, den Berechnungen bestimmte Szenarien für die schweizerischen Brutto-Emissionen an CO_2 zugrunde zu legen. Von dieser Emissionskurve können dann jeweils diejenigen CO_2 -Mengen abgezogen werden, welche zu einem bestimmten Zeitpunkt durch die oben genannten Massnahmen der Atmosphäre biologisch entzogen oder sonstwie vorenthalten werden.

Für eine erste grobe Abschätzung wurden zwei Grundannahmen getroffen: Unser Szenario 1 geht vom «Business As Usual»-IPCC-Szenario für entwickelte Länder aus (Houghton *et al.*, 1990). Gemäss diesem Szenario

wachsen die Brutto-Emissionen der industrialisierten Länder jährlich um 1 % an (*Abbildung 2 links*). Das Szenario 2 geht von der optimistischen Annahme aus, dass die CO₂-Emissionen der Schweiz aus dem nicht-forstlichen Sektor bis zum Jahr 2150 bei 50 Mt pro Jahr stabilisiert werden können (*Abbildung 2 rechts*).

Die Massnahme III (Ertragsmaximierung zwecks Kohlenstoffbindung in langlebigen Holzprodukten) bringt nur für Laubmischwälder Emissionsverminderungen. Zudem bewirkt sie, dass die totale Biomasse unter das heutige Niveau fiele, was grundsätzlich der Massnahme II (Vorratserhöhung) widerspricht. Wegen dieses grundsätzlichen Zielkonfliktes und wegen der bereits erwähnten übrigen Nachteile verzichteten wir im weiteren darauf, die Massnahme III bei der Abschätzung der kombinierten Wirkung mehrerer Einzelmassnahmen zu berücksichtigen.

Eine integrierte, langfristige und ab heute konsequent vollzogene Strategie, welche die Massnahmen I (Aufforstung brachliegender Flächen), II (Vorratserhöhung) und IV (Substitution fossiler Energieträger durch Energieholz) umfasst, könnte die jährlichen schweizerischen Brutto-Kohlendioxidemissionen gemäss dem Szenario 2 während rund 100 Jahren um 20 % und darüber hinaus nachhaltig um etwa 5 % reduzieren (*Abbildung 2 rechts*).

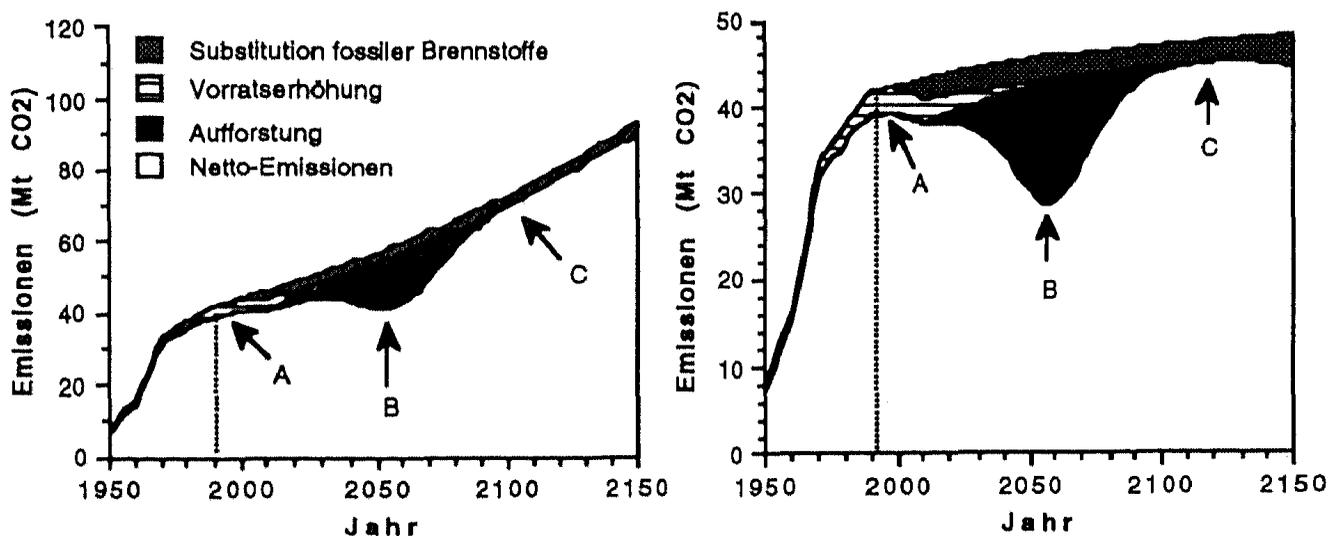


Abbildung 2. Szenarien für die Netto-CO₂-Emissionen der Schweiz bis ins Jahr 2150 unter Berücksichtigung einer Politik, welche gesamtschweizerisch verschiedene forstliche Massnahmen zur Reduktion der Emissionen kombiniert. *Links:* Szenario 1 – jährliche Zunahme der totalen CO₂-Emissionen nach 1990 um 1 %. *Rechts:* Szenario 2 – Stabilisierung der jährlichen Emissionen bei 50 Mt CO₂ bis ins Jahr 2150. *A:* Beginn der Massnahmen: I) Aufforstung brachliegender Flächen, II) Vorratserhöhung, IV) Substitution fossiler Brennstoffe durch Energieholz. *B:* Maximaler Zuwachs in den Aufforstungsflächen, das heisst maximaler Gesamteffekt der Massnahmen. *C:* Die Wälder sind im Gleichgewicht, die Nettoprimärproduktion ist gleich gross wie die Summe von Respiration und Holznutzung.

4. Schlussfolgerungen

Gemäss unseren Resultaten vermöchte die Massnahme I (Aufforstung brachliegender Flächen) im Vergleich zu allen übrigen Massnahmen die grössten Beiträge zur Reduktion der schweizerischen Bruttoemissionen an CO₂ durch Verbrennung fossiler Energieträger zu leisten. Diese Abschätzung eines zumindest vorübergehend substantiellen Beitrags durch Aufforstungen ist plausibel, da ja Wälder um eine Grössenordnung mehr Kohlenstoff speichern können als landwirtschaftlich genutztes Land. Forstwirtschaftliche Massnahmen in bestehenden Wäldern dagegen verändern den Kohlenstoffgehalt nur um vergleichsweise geringe Beträge. Dies führt dazu, dass zum Beispiel die Erhöhung der Umtriebszeit nur marginale Bedeutung hätte (*Abbildung 2*).

Jedoch ist es wichtig zu berücksichtigen, dass Aufforstungen nur eine vorübergehende Kohlenstoffsенке darstellen und langfristig netto keine weitere Kohlenstoffbindung mehr zu erwarten ist. Darum ändert sich der Beitrag der einzelnen Massnahmen zur totalen Emissionsreduktion mit der Zeit sehr stark. Vor diesem Hintergrund müssen pauschale Aussagen über die Wirksamkeit einzelner Massnahmen, welche den zeitlichen Bezugspunkt nicht explizite beachten, mit grosser Vorsicht beurteilt werden (*Abbildung 2*).

Durch eine kombinierte Umsetzung der Massnahmen I, II und IV liesse sich bei beiden Szenarien um das Jahr 2050 eine absolute Reduktion der CO₂-Bruttoemissionen erzielen (*Abbildung 2, Punkt B*). Beim Szenario 2 erreicht diese Reduktion gar den erstaunlichen Spitzenwert von 37%. Wir möchten allerdings, wie das auch schon von anderen Autoren betont worden ist (Volz, 1992; *Tranquet et al.*, 1993), davor warnen, aus diesen Projektionen in die Zukunft voreilige Schlussfolgerungen zu ziehen. Insbesondere sind die folgenden Aspekte und Zusammenhänge gebührend zu berücksichtigen:

Die maximale Senke um das Jahr 2050 kommt nur durch die Aufforstung zustande und hängt somit ebenfalls von der Annahme ab, dass alle gepflanzten Bäume zu diesem Zeitpunkt immer noch völlig gesund sind und normales Wachstum zeigen. Dadurch werden jegliche Folgen von Umweltverschmutzungen und Klimaänderungen völlig vernachlässigt. Gemäss heutigem Wissensstand ist aber die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass bis Mitte des nächsten Jahrhunderts zumindest die Folgen des verstärkten Treibhauseffekts signifikant spürbar sein werden (Houghton *et al.*, 1990). Darum ist die Übertragung der heutigen Wuchsleistungen auf das nächste Jahrhundert fragwürdig. Eine derartige Klimaänderung hat das Potential, Verbreitungsgrenzen und Gedeihen der Baumarten stark zu beeinflussen (*Bolin et al.*, 1986; *Fischlin et al.*, 1993). In diesem Fall könnten die Aufforstungsflächen grossflächig zusammenbrechen, was die CO₂-Bilanz der Wälder ganz wesentlich verändern würde (*Abbildung 2*). Generell könnte sich ein grossflächiges Absterben von heute waldbildenden Baumarten stark auf den CO₂-Haushalt auswirken, denn der Schweizer Wald speichert zurzeit alleine im Holz mindestens 68 Mt C, was

rund dem Sechsfachen der jährlichen schweizerischen CO₂-Emissionen von 11,51 Mt C pro Jahr aus der Verbrennung fossiler Energieträger entspricht.

Aber selbst wenn man annimmt, dass die gepflanzten Bäume in den nächsten 200 Jahren wirklich kräftig bleiben und immer günstige Wuchsbedingungen vorfinden werden, besteht die Möglichkeit gefährlicher Entwicklungen: Aufgrund der anfänglich hohen biologischen Fixierung von CO₂ wird der zugrundeliegende steigende Trend der Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe kaschiert, und es entsteht sogar der Eindruck, dass eine Trendwende hin zu sinkenden CO₂-Emissionen in Gang gekommen sei (*Abbildung 2 rechts*). Weil jedoch der anfänglich hohe Zuwachs in den Aufforstungsflächen mit der Zeit abklingt, folgen unmittelbar auf die Jahre mit dem grössten Rückgang Jahre mit einem sehr steilen Anstieg der Nettoemissionen. Wir fürchten, dass – je nach der Wertung dieser Tatsachen in Politik und Öffentlichkeit – just zu dem Zeitpunkt die Bereitschaft zur Reduktion der anthropogenen CO₂-Emissionen auf minimale Werte absinkt, wenn sie am nötigsten wäre. In dieser Situation wäre es für die Entscheidungsträger, beispielsweise aus Bundesrat und Parlament, vermutlich schwierig, in der Bevölkerung eine genügend breite Unterstützung für die Ein- oder Weiterführung fiskalischer oder politischer Massnahmen wie CO₂-Steuer, Ökobonus oder anderer Lenkungsabgaben zu finden.

Die Wälder der industrialisierten Länder der nördlichen Hemisphäre emittieren im Gegensatz zu denjenigen der Tropen heute netto kein CO₂ mehr; im Gegenteil deuten neueste Ergebnisse (*Tans et al.*, 1990; *Post et al.*, 1990) sogar darauf hin, dass die Wälder Eurasiens und Nordamerikas mindestens in den letzten Jahrzehnten eine global gewichtige Senke für das atmosphärische CO₂ waren. Rechnen wir den Flächenbeitrag der schweizerischen Wälder an eine derartige Senke gemäss unseren Modellabschätzungen auf den globalen Massstab um, so gelangt man in den von *Tans et al.* (1990) bezifferten Bereich von 2 bis 3,4 Gt C/Jahr. All dies bedeutet, dass die Wälder der hochindustrialisierten Länder vermutlich ohnehin schon zur Senkung der CO₂-Bruttoemissionen beitragen. Zusätzliche Anstrengungen der Forstwirtschaft hiessen dann, dass diese zurzeit global wirkende Funktion der Wälder unserer Breitengrade vorübergehend lediglich noch verstärkt würden. Ausserdem ist zu berücksichtigen, dass diese Funktion zeitlich beschränkt ist und unabwendbar mit dem Erreichen der maximalen Speicherkapazität abklingt.

Voraussetzungen für die Übertragbarkeit unserer Resultate auf andere Länder sind erstens eine ähnliche Nutzungsgeschichte und zweitens das Vorhandensein genügender Brachflächen mit geringem Nutzungsanspruch. Die starke Nutzung der mitteleuropäischen Wälder im letzten Jahrhundert zusammen mit der anschliessend durch die Kohle ermöglichten Extensivierung sowie der Einführung nachhaltigerer Nutzungsformen (zum Beispiel die neue Forderung der Nachhaltigkeit im öffentlichen Wald im Eidgenössischen Forstgesetz von 1902) stellen wesentliche Vorbedingungen für die vermutete

globale und regional verstärkbare Senkenfunktion dar. Brachflächen, welche potentiell aufgeforstet werden könnten, stehen ja nur dann in genügendem Masse zur Verfügung, wenn ähnliche demographische und agrarwirtschaftliche Umstände es erlauben, darauf zu verzichten, die Agrarfläche auszudehnen oder sogar bewaldete Flächen zu roden.

Langfristig betrachtet, könnte die dargelegte Kombination von Massnahmen zwar die Zunahme der CO₂-Emissionen der Schweiz verzögern, doch stellt sie weder ein Heilmittel gegen noch eine Rechtfertigung für einen verschwenderischen Umgang mit fossilen Brennstoffen dar. Im Gegenteil bleibt die Netto-Kohlenstoffbilanz der Schweiz auch bei einer kurzfristigen Abnahme der Emissionen positiv, und die Schweiz trägt in jedem Fall kontinuierlich und anteilmässig überproportional zur weltweiten Verstärkung des Treibhauseffektes bei. Zudem ist CO₂ nur etwa hälftig an der menschgemachten Verstärkung des Treibhauseffektes beteiligt. Eine Reduktion der CO₂-Emissionen über forstliche Massnahmen ist somit in einem Land wie dem unsrigen eher eine Bekämpfung der Symptome, statt ein wirksames Packen der Hauptursachen der globalen Klimaänderung an der Wurzel. Unsere Untersuchung bestätigt demnach die hinlänglich bekannte Aussage, dass die wirksamste Massnahme gegen den verstärkten Treibhauseffekt in der substantiellen und dauerhaften Reduktion der Verwendung fossiler Brennstoffe liegt, und diese Folgerung gilt mit Bestimmtheit nicht nur für die Schweiz.

Résumé

Est-il possible d'abaisser les émissions suisses de CO₂ par des mesures forestières?

Bases écologiques et premières estimations

Les 28,7 % de la surface boisée suisse (11 849 km²) renferment au moins 68 Mt C. Les émissions annuelles suisses de CO₂ s'élevaient à 42,23 Mt CO₂ ou 11,51 Mt C en 1988. Ceci correspond à 6 ‰ des émissions mondiales, alors que la population suisse ne représente que le 1 ‰ de la population mondiale. Malgré ces petites émissions, nous avons analysé les mesures suivantes de fixation du carbone, en choisissant la Suisse comme exemple de pays hautement industrialisé: I) Reboisement de terres incultes; II) Elévation de la biomasse totale par une exploitation forestière optimisant le volume du bois; III) Maximalisation de la production de bois pour la construction et l'industrie; IV) Substitution de combustibles fossiles par du bois d'énergie. Chaque mesure est d'abord analysée séparément et sa contribution à réduire les émissions de CO₂ annuelles est mesurée à l'aide de différents modèles mathématiques simples. Les réductions possibles exprimées en % des émissions de CO₂ en 1988 sont de 11 % pour la mesure I, 3,9 % pour la II, 0,2 % pour la III et environ 5 % pour la IV. Les mesures

compatibles (I, II, IV) ont été combinées afin d'évaluer la réduction maximale des émissions de CO₂ jusqu'en l'an 2150; pendant 100 ans, on atteint une réduction de 20 % en moyenne, de 5 % environ par la suite. L'application conséquente de ces mesures pourrait même abaisser les émissions totales en-dessous du niveau de 1988 vers l'an 2050. Cet effet reste cependant hypothétique, car il fait abstraction d'une augmentation de la pollution ou de changements climatiques. De plus, il n'est sans doute pas durable et peut cacher une tendance croissante des émissions due à l'utilisation de combustibles fossiles. Donc cet effet pourrait même mettre en péril l'application d'une politique suisse visant à réduire les émissions nocives.

Traduction: *Karin Huser*

Literatur

- Anonym* (1977): Formeln und Tafeln. DMK/DPK, Orell Füssli, Zürich, 232 pp.
- Anonym* (1980): Jahrbuch der schweizerischen Wald- und Holzwirtschaft. Bundesamt für Statistik, Bern.
- Anonym* (1990): Statistisches Jahrbuch der Schweiz. Bundesamt für Statistik, Bern, Hg.: Verlag NZZ, Zürich, 371 pp.
- Bachmann, P.* (1968): Untersuchungen zur Wahl des Verjüngungszeitpunktes im Waldbau. Beih. Z. Schweiz. Forstver., 42: 112 pp.
- Badoux* (1967a, b, c): Ertragstafel Buche, Fichte, Tanne. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), 8903 Birmensdorf.
- Beer, J., Siegenthaler, U., Blinov, A.* (1988): Temporal ¹⁰Be variations in ice: information on solar activity and geomagnetic field intensity. In: Stephenson, F. R., Wolfendale, A. W. (eds.), Secular solar and geomagnetic variations in the last 10 000 years. Kluwer Academic Publishers, 297–313.
- Bolin, B., Döös, B. R., Jäger, J., Warrick, R. A.* (1986): The greenhouse effect, climatic change and ecosystems. Wiley, Chichester a.o. (SCOPE Vol. 29), 541 pp.
- Dyson, F. J.* (1977): Can we control the carbon dioxide in the atmosphere? *Energy*, 2: 287–291.
- Ellenberg, H., Klötzli, F.* (1972): Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. Eidg. Anst. Forstl. Versuchswes., Mitt., 48: 587–930.
- Fischlin, A., Bugmann, H., Gyalistras, D.* (1993): Sensitivity of a forest ecosystem model to climate parametrization schemes. In: Proc. of the International Symposium «Impact of Global Change on Terrestrial Ecosystems», June 1992, Bad Dürkheim, D. Sondernummer von «Environmental Pollution» (im Druck).
- Fischlin, A., Bugmann, H.* (1993): Think globally, act locally! A small country case study in reducing net CO₂ emissions by carbon fixation policies. In: Kanninen, M. (ed.), Carbon balance of the world's forested ecosystems: Towards a global assessment. Publications of the Academy of Finland, VAPK Publishing, Helsinki, im Druck.
- Harmon, M. E., Ferrell, W. K., Franklin, J. F.* (1990): Effects on carbon storage of conversion of old-growth forests to young forests. *Science*, 247: 699–702.
- Houghton, J. T., Jenkins, G. J., Ephraums, J. J.* (eds.) (1990): Climate change – the IPCC scientific assessment. Report prepared for IPCC by Working Group 1. Cambridge Univ. Press, Cambridge a.o., 365 pp.
- Hurst, A.* (1991): Das Nationale Forschungsprogramm 12 «Holz, erneuerbare Rohstoff- und Energiequelle». SAH Bulletin, 19 (1).
- Keller, W.* (1978): Einfacher ertragskundlicher Bonitätsschlüssel für Waldbestände in der Schweiz. Eidg. Anst. Forstl. Versuchswes., Mitt., 54: 98 pp.
- Lieth, H., Whittaker, R. H.* (eds.) (1975): Primary productivity of the biosphere. Ecological Studies, Springer, Berlin a.o., 14: 339 pp.

- Maclaren, J. P., Hollinger, D. Y., Beets, P. N., Turland, J.* (1993): Carbon sequestration by New Zealand's plantation forests. In: *Kanninen, M.* (ed.), Carbon balance of the world's forested ecosystems: Towards a global assessment. Publications of the Academy of Finland, VAPK Publishing, Helsinki, im Druck.
- Mahrer, F.* (ed.) (1988): Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Erstaufnahme 1982–1986. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Ber., 305: 375 pp.
- Marland, G.* (1989): The role of forests in addressing the CO₂ greenhouse. In: *White, J. C.* (ed.), Global climate change linkages: Acid rain, air quality and stratospheric ozone. Elsevier, New York.
- Neftel, A., Oeschger, H., Schwander, J., Stauffer, B., Zimbrunn, R.* (1982): Ice core sample measurements give atmospheric CO₂ content during the past 40000 yr. *Nature*, 295: 220–223.
- Pearl, R.* (1927): The growth of populations. *Q. Rev. Biol.*, 2: 532–548.
- Post, W. M., Peng, T.-H., Emanuel, W. R., King, A. W., Dale, V. H., DeAngelis, D. L.* (1990): The global carbon cycle. *Amer. Sci.*, 78: 310–326.
- Schneider, S. H.* (1989): The greenhouse effect: science and policy. *Science*, 243: 771–781.
- Schroeder, P., Ladd, L.* (1991): Slowing the increase of atmospheric carbon dioxide: A biological approach. *Climatic change*, 19: 283–290.
- Sedjo, R.* (1989): Forests to offset the greenhouse effect. *J. For.*, 87: 12–15.
- Siegenthaler, U., Oeschger, H.* (1978): Predicting future atmospheric CO₂ levels. *Science*, 199: 388–395.
- Siegenthaler, U., Oeschger, H.* (1987): Biospheric CO₂ emissions during the past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data. *Tellus*, 39B: 140–154.
- Siegenthaler, U.* (1988): Causes and effects of natural CO₂ variations during the glacial-interglacial cycles. In: *Wanner, H., Siegenthaler, U.* (eds.), Long and short term variability of climate. Springer lecture notes in earth sciences, 16: 153–171.
- Siegenthaler, U., Friedli, H., Loetscher, H., Moor, E., Neftel, A., Oeschger, H., Stauffer, B.* (1988): Stable-isotope ratios and concentration of CO₂ in air from polar ice cores. *Ann. Glaciol.*, 10: 1–6.
- Surber, E., Amiet, R., Kobert, H.* (1973): Das Brachlandproblem in der Schweiz. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Ber., 112: 140 pp.
- Tans, P. P., Fung, I. Y., Takahashi, T.* (1990): Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, 247: 1431–1438.
- Tranquet, C., Fürst, E., Stadler, B., Volz, R.* (1993): Klimaänderung: Herausforderung zur Walderhaltung. Ein forstpolitischer Diskussionsbeitrag. *Schweiz. Z. Forstwes.*, 144 (1): 5–22.
- Volz, R.* (1990): Zur CO₂-Bilanz des Schweizer Waldes und seiner Nutzung. *BUWAL-Bulletin*, Bern, 1/1990, pp. 15–18.
- Volz, R.* (1992): Welche Beiträge kann die Schweizer Wald- und Holzwirtschaft zur Bewältigung des CO₂-Problems leisten? *BUWAL-Bulletin* 3/92, 40–48.
- Wanner, H., Siegenthaler, U.* (eds.) (1988): Long and short term variability of climate. Springer, Lecture Notes in Earth Sciences, 16.
- Woodwell, G. M.* (1970): The energy cycle of the biosphere. In: *The biosphere*, A Scientific American Book of articles published in the September 1970 issue of *Scientific American*, 25–36.
- Zingg, A., Bachofen, H.* (1988): Schweizerisches Landesforstinventar: Anleitung für die Erstaufnahme 1982–1986. Eidg. Anst. Forstl. Versuchswes., Ber., 304: 134 pp.

Verfasser: Dr. Andreas Fischlin und Harald Bugmann, Systemökologie, Institut für terrestrische Ökologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Grabenstrasse 3, CH-8952 Schlieren.