

Mögliche Auswirkungen einer Klimaveränderung auf die Wälder in Mitteleuropa

Von H. THOMASIU¹

1 Einleitung

Unter den vielfältigen Umweltproblemen, die heute die Menschheit beschäftigen und mit Sorge erfüllen, stehen wohl der Treibhauseffekt und eine sich wahrscheinlich daraus ergebende Klimaveränderung im Vordergrund des Interesses. Diese Aufmerksamkeit und Sensibilisierung sind durchaus berechtigt, da Klimaschwankungen, wie die Geschichte zeigt, erheblichen Einfluß auf die menschliche Zivilisation ausüben können (LAMB 1989; FLOHN 1988). So gestattete die frühmittelalterliche Warmzeit bei Sommertemperaturen, die etwa 1°C über denen zur Jahrhundertwende lagen, den Getreideanbau in Norwegen bis über den Polarkreis hinaus und den Weinbau bis nach Pommern und Südschottland. In Kanada lag die Waldgrenze damals mindestens 100 km weiter nördlich als heute und in den europäischen Gebirgen stiegen die Wälder etwa 100 bis 150 m höher empor. Diese „Warmzeit“ war für viele Gebiete, sowohl in bodenwirtschaftlichem als auch geistig-kulturellem Sinne, eine Epoche der Hochkultur. Einen Kontrast dazu bildete die „kleine Eiszeit“ (~ 1550 bis 1700 n. Zw.), die mit Temperaturen von etwa 1°C unter denen zur Jahrhundertwende zu Mißernten, Hungersnöten und Epidemien führte sowie soziale und politische Unruhen, Auswanderungsbewegungen etc. förderte (LAMB 1989; FLOHN 1988). Wir befinden uns heute wieder in einer Epoche, die eine Klimawandlung wahrscheinlich erscheinen läßt.

Trotz mancher Gemeinsamkeit zu paläoklimatologischen Ereignissen bestehen aber heute zwei wesentliche Unterschiede:

- Während sich frühere Klimaänderungen aus natürlichen geophysikalischen Vorgängen und Gesetzmäßigkeiten ergeben haben, handelt es sich gegenwärtig um Prozesse, die vom Menschen selbst ausgelöst worden sind und für die er auch verantwortlich ist.
- Es ist zu befürchten, daß sich die vorausgesagte, in erster Linie auf Treibhausgase zurückzuführende Klimawandlung in einer historisch beispiellosen Geschwindigkeit vollzieht, der die Adaptation von Pflanzen, Tieren und Ökosystemen nicht zu folgen vermag.

Hierin liegen auch die großen Probleme der Waldökologie und der Forstwirtschaft.

2 Gaia-Hypothese und Evolutionstheorie

Betrachtet man die Erde als System, so kann man sehr wohl die Wirkung ordnender Kräfte erkennen. Zum Verständnis solcher Gesetzmäßigkeiten vermögen die Gaia-Hypothese von LOVELOCK (1979) und die Evolutionstheorie von DARWIN (1859) beizutragen.

Mit der Gaia-Hypothese wird unterstellt, daß das Leben auf der Erde zu einer homöostatischen Regulation auf globaler Ebene beiträgt, indem die atmosphärischen Bedingungen von der Biosphäre so gesteuert werden, daß sie einem ökologischen Optimum zustreben. Die Tatsache, daß die Erde bereits seit 3,6 ★ 10⁹ Jahren für lebende

¹ Überarbeitete Fassung eines am 23.2.1991 in der Evangelischen Akademie Tutzing gehaltenen Vortrages.

Organismen bewohnbar ist, kann nach Auffassung von LOVELOCK nur mit biogenen Rückkopplungsmechanismen erklärt werden. Als Beleg dafür nennt HOLLING (1986) den rezenten Sauerstoffgehalt der Atmosphäre, der einerseits das bestmögliche Niveau für aerobe Metabolismen, andererseits aber auch einen Grenzwert hinsichtlich Entflammbarkeit der Vegetation unter gegenwärtigen Temperaturverhältnissen darstellt. Weitere biogene Rückkopplungen bestehen hinsichtlich der Sauerstofffreisetzung durch aerobe Organismen einerseits und der Methanbildung durch anaerobe Organismen andererseits. Es ist bekannt, daß Methan wichtig für die negative Rückkopplung im System der Sauerstoffkontrolle ist.

Eine Rückkopplung, die in Verbindung mit der Klimaveränderung besonders bedeutungsvoll ist, stellt der Kohlenstoffkreislauf dar (Abb. 1). Ohne Zutun des Menschen wäre er heute wohl weitgehend balanciert. Störungen, die einen bestimmten Bereich nicht überschreiten, würden durch die Puffer Lithosphäre und Hydrosphäre kompensiert.

Dieser globale Kohlenstoffkreislauf ist wegen des Treibhauseffektes des CO_2 mit dem Wärmehaushalt der Erde gekoppelt, der wiederum die Triebkraft des Wasserkreislaufes darstellt.

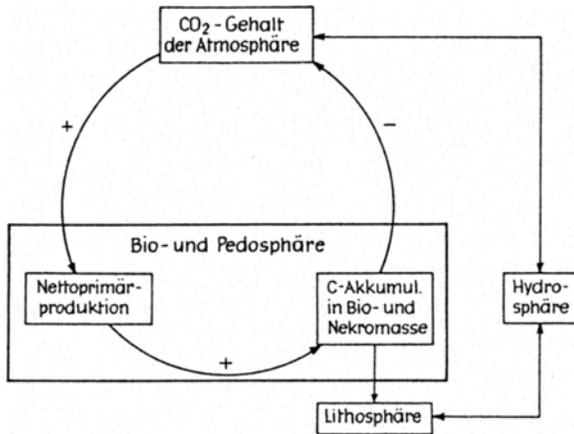


Abb. 1. Selbstregulation des Kohlenstoffkreislaufs durch negative Rückkopplung sowie Hydro- und Lithosphäre als Puffersysteme

Fig. 1. Self-regulation of the carbon cycle through negative feedback, and through the hydro- and lithosphere acting as buffering systems

Innerhalb dieser stark vernetzten Prozesse nimmt das Leben, wie LOVELOCK betont, eine zentrale Stellung ein und jede größere Veränderung in der Biosphäre hat bestimmte Aktionen, Reaktionen sowie Interaktionen bei den betroffenen Systemelementen zur Folge, die sich im Kopplungsnetz fortpflanzen und, je nach Art der Rückkopplung, gedämpft oder verstärkt werden und so das Verhalten des Gesamtsystems mit beeinflussen.

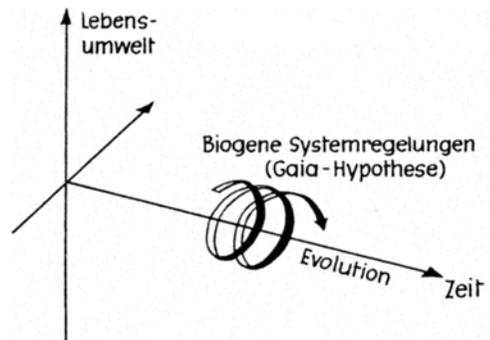
Das gegenwärtige Geoökosystem ist das Produkt einer etwa $3,6 \star 10^9$ jährigen Evolution. Während dieser Zeitspanne hat sich das Leben von niedrigen Eukaryonten zu hoch entwickelten Säugern und von primitiven aquatischen Biozönen zu komplizierten terrestrischen Ökosystemen entwickelt. Diese Evolution war ebenfalls von der jeweiligen Umwelt abhängig und wirkte auf sie zurück. So wurde der CO_2 -Gehalt der Uratmosphäre im Laufe der geologischen Entwicklung von etwa 10 bis 20% im Präkambrium auf etwa 0,02 bis 0,03% im Holozän, d. h. um rund 3 Zehnerpotenzen, reduziert. Das erfolgte nicht gleichmäßig, sondern in mehreren, durch unterschiedliche Reduktionsgeschwindigkeit charakterisierten Epochen. Dabei ist auffällig, daß den durch starke Kohlenstoffbindung und -sequestration (Bildung von Kohlenstofflagerstätten) gekennzeichneten geologischen Formationen (Kambrium, Karbon, Tertiär) solche mit niedrigen Temperaturen (Ordoviciem, Perm, Pleistozän) folgten. Wenn dafür auch verschiedene geophysikalische (Form der Erdbahn, Ekliptik, Sonnenabstand zur Sommerzeit [MILANKOVITSCH], Vulkanismus) maßgeblich sein mögen, so kann die Koinzidenz von CO_2 -Abfall und Abküh-

lung, auf die schon *ARRHENIUS* hingewiesen hatte, auch als Rückkoppelungseffekt im Sinne der Gaia-Hypothese gedeutet werden. Mit *KLOPRIES* und *BECKMANN* (1989) kann man annehmen, daß die geologische Entwicklung der Erde durch Abnahme von CO_2 und Zunahme von O_2 in der Atmosphäre gekennzeichnet ist. Die Lebewesen, die diese Entwicklung verursacht und ermöglicht haben, paßten sich im Laufe der geologischen Entwicklung an dieses gegen ein ökologisches Optimum konvergierende CO_2/O_2 -Verhältnis an. Im Verlaufe dieses Prozesses wurden Arten, die ohne O_2 (Anaerobe) bzw. mit wenig O_2 auskommen, von solchen mit höherem O_2 -Bedarf zurückgedrängt. Das Verhältnis von CO_2 und O_2 wird darum von *KLOPRIES* und *BECKMANN* (1989) als eine wichtige Triebkraft der Evolution aufgefaßt.

Nach diesen Darlegungen sei zusammenfassend festgestellt, daß die Erde ein sehr komplexes System darstellt, in dem Lebewesen, die selbst von ihrer Umwelt abhängig sind und einer gerichteten Evolution unterliegen, wichtige homöostatische Regulationsfunktionen ausüben. Diese Auffassung stellt eine Kombination von Evolutionstheorie und Gaia-Hypothese dar (Abb. 2).

Abb. 2. Kombination von Evolution und Regulation als Denkmodell zum Verständnis globaler ökologischer Zusammenhänge.

Fig. 2. Combination of evolution and regulation as a model of thought for the perception of global ecological interrelationships



In diesen stark vernetzten Prozeß hat der Mensch im Laufe der Geschichte immer stärker eingegriffen. Das geschah und geschieht vor allem durch Beeinflussung des Kohlenstoffkreislaufes, indem die Biosphäre verändert und der im Verlaufe einer langen geologischen Entwicklung in der Lithosphäre fixierte Kohlenstoff wieder freigesetzt wird. Bis zum Beginn des Industriezeitalters waren diese Eingriffe noch bescheiden. Sie wurden durch systeminterne Puffer (Biosphäre und Hydrosphäre) mehr oder weniger kompensiert. Diese Situation hat sich im letzten Jahrhundert grundlegend verändert. Wir stehen heute vor der Frage, wie sich die zunehmende Imbalance des Kohlenstoffkreislaufes auf das Verhalten des Ökosystems Erde auswirken wird und wie die schon jetzt in Mitleidenschaft gezogene Biosphäre ihre homöostatischen Regulationsfunktionen noch zu erfüllen vermag. Auf einige der damit im Zusammenhang stehenden Fragen soll nachstehend eingegangen werden. Dabei interessieren besonders:

1. Wie groß ist der Anteil von Waldreduktionen und Waldveränderungen an der Kohlenstoffimbalance?
2. Mit welchen spurengasinduzierten Klimaveränderungen muß gerechnet werden?
3. Wie können sich die von Treibhausgasen induzierten Klimaänderungen auf die Wälder auswirken?
4. Wie kann die Forstwirtschaft zur Minderung spurengasinduzierter Klimaänderungen beitragen?

3 Beeinflussung des Kohlenstoffkreislaufes durch Waldreduktion und Waldveränderung

Der Kohlenstoffgehalt der Erdatmosphäre beträgt gegenwärtig bei 350 ppm CO_2 -Anteil etwa $720 \star 10^9$ t. Im Falle eines Fließgleichgewichtes wäre mit einem jährlichen Durchfluß

von etwa $120 \star 10^9$ t/a zu rechnen. Dabei ergibt sich der Zugang zu etwa 50 % aus photosyntheseabhängiger und zu rund 50 % aus photosyntheseunabhängiger (Konsumenten und Destruenten) Respiration; die gleiche Menge Kohlenstoff würde durch Photosynthese entzogen.

Diese theoretisch einen Gleichgewichtszustand kennzeichnende Nullbilanz wird in zunehmendem Maße vom Menschen gestört. Das geschieht vor allem durch die Verbrennung fossiler Kohlenstoffträger, d.h. Freisetzung von Kohlenstoff aus der Lithosphäre (Kohle, Erdöl, Erdgas) sowie Waldzerstörungen, Waldveränderungen (Vorratsenkung) und Bodendegradationen (Humusabbau), d.h. Freisetzung von Kohlenstoff aus der Biosphäre. Diese vom Menschen verursachte Imbalance war in der vorindustriellen Epoche noch verhältnismäßig gering und wurde weitgehend durch den Puffer Hydrosphäre, der bisher in der Lage war, etwa 50 % des überschüssigen Kohlenstoffes aufzunehmen, gedämpft und verzögert. Die Vegetation konnte sich darum sukzessive an die sich nur langsam verändernden Umweltbedingungen adaptieren.

Seit Beginn des Industriezeitalters hat sich das Mehraufkommen des anthropogenen Kohlendioxids stürmisch vergrößert. Sobald das Tempo der sich daraus ergebenden Umweltveränderungen größer als das der Vegetationsadaptation wird, muß man bedenkliche Folgen für die Biosphäre und die menschliche Zivilisation befürchten.

In diesem Zusammenhang tritt die Frage auf, wie hoch die Auswirkungen von Waldvernichtungen und Bodendegradationen bei diesen Prozessen zu veranschlagen sind. Bei einer solchen Kalkulation kann man vom gegenwärtigen Kohlenstoffgehalt in der Atmosphäre ($\sim 720 \star 10^9$ t) und in den Wäldern (~ 400 bis $500 \star 10^9$ t) ausgehen (Tab. 1). Die Angaben dazu sind der Literatur zu entnehmen (HOLDRIDGE 1947, 1964; OLSON et al. 1983; Fonds der chemischen Industrie 1987; WOODWELL 1987, Enquete-Kommission 1988; SEDJO u. SOLOMON 1988; HOUGHTON u. WOODWELL 1989; BRUENIG 1990; Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 1990; BURSCHEL 1990; BURSCHEL u. WEBER 1988, u.a.). Um 1860 lag der Kohlenstoffgehalt in der Atmosphäre mit 280 ppm bei $585 \star 10^9$ t. Die Differenz von rund $135 \star 10^9$ t C ergibt sich aus folgenden Quellen:

- $170 \star 10^9$ t Kohlenstoff durch Verbrennung fossiler Energieträger (ROTTY u. MASTERS 1985)
- 60 bis $80 \star 10^9$ t Waldrodungen und Bodendegradationen (WOODWELL 1987, HOUGHTON u. WOODWELL 1989 u.a.)
- 10 bis $20 \star 10^9$ t vermutlich vulkanische Emissionen und Oxidation verschiedener Kohlenstoffverbindungen (Methan, CaCO_3 , etc.).

In dieser historisch relativ kurzen Zeit ist die Waldfläche um etwa $0,6$ bis $0,7 \star 10^9$ ha zurückgegangen. Davon entfällt der größte Anteil auf die letzten drei Jahrzehnte.

Unter Berücksichtigung dieser Zwischenwerte, der potentiellen Waldfläche (HOLDRIDGE 1947, 1964; Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft 1975; SEDJO u. SOLOMON 1988, u.a.) sowie des Biomasse-Akkumulationspotentials der verschiedenen Pflanzenformationen kann man in grober Näherung auf den Kohlenstoffgehalt in der Biosphäre und Atmosphäre zu prähistorischer Zeit schließen. Die so geschätzten Werte decken sich recht gut mit den auf geophysikalischem Wege gewonnenen.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, wieviel Kohlenstoff schon vor Beginn des Industriezeitalters durch Waldrodungen in die Erdatmosphäre gelangt ist (Tab. 1). Das Wissen um diese Größenordnung ist bedeutungsvoll, weil bei der heutigen Tropenwald-diskussion häufig nicht beachtet wird, daß durch die großen Waldrodungen in früheren historischen Epochen (China, vorderer Orient, Mittelmeerraum in der Antike, Mitteleuropa seit der Carolinger Zeit) bereits große Kohlenstoffmengen in die Atmosphäre gelangt sind, die gleichermaßen wie die von heutigen Tropenwaldrodungen stammenden zum Treibhauseffekt mit beitragen (Abb. 3). Aus diesen Darstellungen folgt:

Tabelle 1. Kohlenstoffmengen in Wäldern und in der Atmosphäre zu verschiedenen Zeitpunkten. Die Kalkulationen erfolgten unter Berücksichtigung der Daten von HOLDRIIDGE 1947, 1964, OLSEN et al. 1983, RÖTTY u. MASTERS 1985, WOODWELL 1987, Enquete-Kommission 1988, Fonds der chemischen Industrie 1988, SEDJO u. SOLOMON 1988, HOUGHTON u. WOODWELL 1989, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft u. Forsten 1990, BURSCHHEL u. WEBER 1990, THOMASJUS 1990a, BRUENIG (im Druck)

Table 1. Amounts of carbon in forests and in the atmosphere at different times

Zeitpunkt	Waldfläche Absolut 10^9 ha	Anteil am Festland %	In Wäldern akkumul. Bio- und Nekromasse 10^9 t C	In Wäldern akkumul. Kohlenstoff 10^9 t	Durch Waldvernichtung und Bodendegradation freigesetzter Kohlenstoff Δ C 10^9 t	1985 Σ C 10^9 t	Durch Verbrennung fossiler Kohlenstoffträger freigesetzter Kohlenstoff Σ C 10^9 t	1985 Σ C 10^9 t	als C 10^9 t	als CO_2 10^9 t	Kohlenstoff in der Atmosphäre relativ ppm
Vor Beginn relevanter Wald- rodungen	6,0-6,5	45-50	1350-1800	600-800	-	-	-	-	465-525	1700-1900	220-240
~ 1860	4,0-4,5	30-34	1000-1250	480-560	120-240 ¹⁾	120-240	vulkan. Emissionen u. div. C-Oxidat.?	60-120 ²⁾	585	2150	280
1985	3,4-3,8	26-29	900-1100	400-500	60-80	180-230	vulkan. Emissionen u. div. C-Oxidat.?	170	720	2650	350

¹⁾ Die Kohlenstoffbindung durch Pflanzenbestände, die an die Stelle früherer Wälder getreten sind, wurde vernachlässigt.
²⁾ ~ 50 % des freigesetzten Kohlenstoffes verbleiben in der Atmosphäre und ~ 50 % gelangen in die Hydrosphäre.

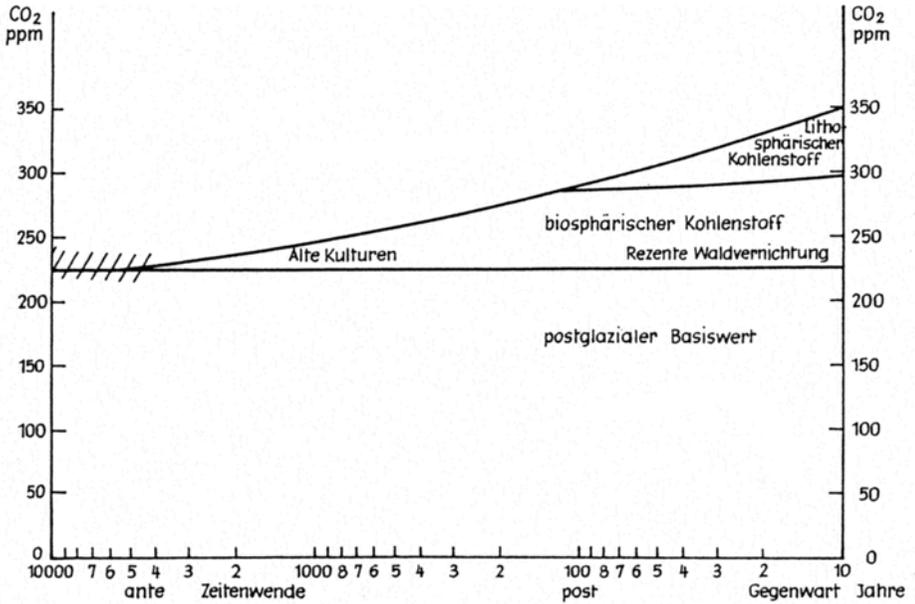


Abb. 3. Menge und Herkunft des atmosphärischen Kohlenstoffs

Fig. 3. Amount and origin of atmospheric carbon

- Seit Beginn der menschlichen Rodungsfähigkeit wurden rund 200 bis 300 $\star 10^9$ t Kohlenstoff durch Waldvernichtung und Bodendegradation freigesetzt. Das sind rund 55 bis 65 % des vom Menschen verursachten Kohlenstoffeintrages in die Atmosphäre. Hiervon entfallen $\frac{2}{3}$ bis $\frac{3}{4}$ auf die vorindustrielle Zeit (5000 bis 6000 Jahre) und $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ auf das Industriezeitalter.
- Durch Verbrennung fossiler Kohlenstoffträger wurden rund 35 bis 45 % des anthropogenen Kohlenstoffinputs verursacht. Diese Menge wurde in der historisch kurzen Zeit von rund 150 Jahren in die Atmosphäre eingespeist.
- Durch Waldvernichtung und Bodendegradation allein wäre der Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre von ursprünglich 220 bis 240 ppm auf etwa 300 ppm angestiegen. Die Differenz zu gegenwärtig 350 ppm ist das Resultat der Verbrennung fossiler Kohlenstoffträger.

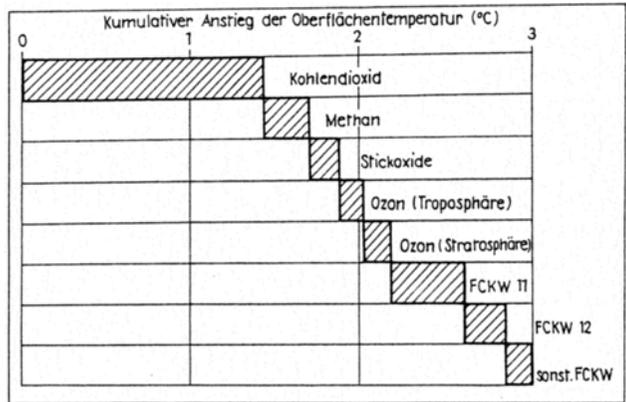
Die Zurückdrängung bzw. Vernichtung von Wäldern ist selbstverständlich nicht nur ein Kohlendioxidproblem. Mit der Verbrennung von Biomasse (Waldrodung, Brandrodungsbau) werden neben CO_2 auch CH_4 , N_2O und O_3 gebildet. Obwohl es sich dabei um weitaus geringere Mengen als beim CO_2 handelt, dürfen diese Gase wegen ihres weitaus größeren Treibhauspotentials nicht vernachlässigt werden (Abb. 4). Zu diesen luftchemischen Wirkungen der Wälder kommen noch zahlreiche weitere Effekte, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

4 Wahrscheinliche Klimaänderung im Laufe des kommenden Jahrhunderts

Nach Angaben zahlreicher Meteorologen muß mit großer Wahrscheinlichkeit damit gerechnet werden, daß der zunehmende Treibgasgehalt der Atmosphäre zu einem klimarelevanten Temperaturanstieg führt (siehe dazu die einschlägige Literatur). So muß nach

Abb. 4. Vorausgesagter Temperaturanstieg durch zunehmende Konzentration von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen bis zum Jahr 2030. Der vorausgesagte Anstieg beträgt etwa 3°C. (nach UNEP/GEMS Environment Library Nr. 2, 1987)

Fig. 4. Predicted temperature rise through increased concentration of carbon dioxide and other greenhouse gasses until the year 2030. The predicted rise amounts to approximately 3°C. (From: UNEP/GEMS Environment Library Nr. 2, 1987)



CHARNEY (1979) bei Verdoppelung der CO₂-Konzentration (Basiswert 300 ppm) mit einem Anstieg der mittleren Troposphärentemperatur von $3 \pm 1,5^\circ\text{C}$ gerechnet werden. Berücksichtigt man noch die Wirkung der übrigen Treibhausgase, dann ist eine noch weitaus größere Temperaturerhöhung zu befürchten. Solche Temperaturveränderungen würden weit über den von SCHÖNWIESE und DIEKMANN (1987) sowie SCHÖNWIESE (1988) mit 1,5 bis 2,0°K angegebenen natürlichen Schwankungen während der Nacheiszeit liegen.

Über den Anteil der am Treibhauseffekt beteiligten Spurengase informiert eine von UNEP und GEMS (1987) angefertigte Studie, wonach etwa 50 % der Treibhauswirkung auf CO₂ und 50 % auf die übrigen Spurengase entfallen (Abb. 4). Letztere sind zwar nur mit einem sehr geringen Mengenanteil in der Atmosphäre enthalten, sie besitzen jedoch eine außerordentlich große Treibhauswirksamkeit. In diesem Zusammenhang sei noch bemerkt, daß sich der Anteil der sonstigen Spurengase weitaus rascher als der von CO₂ erhöht.

Der oben genannte Temperaturanstieg ist nur ein globaler Mittelwert, der regional zu differenzieren ist. Verschiedene Modellrechnungen haben eine mit der geographischen Breite steigende Temperaturzunahme ergeben (GRASSL 1987). Das würde zu einer Minderung der Temperaturunterschiede zwischen dem Äquator und den beiden Polen führen, die Veränderungen der Luftzirkulation und Meeresströmungen zur Folge haben können.

Die mit einer Erwärmung verbundenen Klimaveränderungen lassen sich wegen der Komplexität des Wettergeschehens nicht eindeutig voraussagen. So kann z. B. die Erwärmung – vor allem in den borealen Gebieten – zum stärkeren Abbau der akkumulierten Nekromasse ($1 \star 10^9$ bis $2 \star 10^9$ t) und damit zur weiteren CO₂-Freisetzung beitragen. Außerdem können das Auftauen von Permafrostböden und damit verbundene Versumpfung zu verstärkter Methanausbildung führen. Eine größere Verdunstung von wärmeren Wasseroberflächen kann außerdem eine Wasserdampfanreicherung in der Atmosphäre bewirken.

Methan und Wasserdampf sind wiederum überaus wirksame Treibhausgase. Diesen verstärkenden Feedbacks steht als dämpfende Rückkopplung eine größere Photosyntheseleistung der Pflanzen bei höherem CO₂-Angebot gegenüber (siehe unten).

Neben weiteren, an dieser Stelle nicht zu erörternden Einflußfaktoren (z. B. El-Niño-Phänomen, Meeresströmungen, Eis-Albedo) sei nur noch auf die Ausdehnung der Weltmeere durch Abschmelzen von Gletschern und Wärmeausdehnung des Wassers hingewiesen. Ozeanologen rechnen in den nächsten 100 Jahren mit einem Meeresspiegelanstieg um 1,5 m als Erwärmungseffekt. Für längere Zeiträume werden noch weitaus größere Werte

genannt. Auch dafür gibt es Hinweise in langfristigen Statistiken zum Tidenhub (BACH 1987). Auf Grund dieser vielfältigen Indizes wird von den Vertretern der einschlägigen Fachdisziplinen angenommen, daß das Klima der Erde wärmer wird und einem Zustand entgegendriftet, wie er vor etwa 4 bis 5 Millionen Jahren im Pliozän geherrscht hat.

Noch schwieriger als solche globale Voraussagen sind regionale und lokale Prognosen. Trotz vieler Unsicherheiten wird angenommen, daß sich die subtropischen Wüsten und die bisher in den mittleren Breiten liegenden Westwindgebiete weiter nach Norden verlagern. In den feuchten Tropen wird mit geringen Temperaturerhöhungen und noch größeren Niederschlägen (5 bis 20 %) und in den kontinental gemäßigten Gebieten mit noch stärker ausgeprägter Sommertrockenheit sowie Häufung extremer Klimaereignisse (Dürre- und Hitzeperioden) gerechnet. Außerdem werden größere und häufiger auftretende Sturmfluten sowie tropische Wirbelstürme befürchtet (PARRY 1988; BRUENIG 1990).

Über speziell in Europa zu erwartende Temperatur- und Niederschlagsveränderungen informieren BROUWER und FALKENBERG (1989) sowie BRUENIG (1990). Ersterer rechnet mit größerer Variabilität, die sich in Witterungsextremen, Orkanen, Überschwemmungen, Hitze- und Dürreperioden ausdrücken soll.

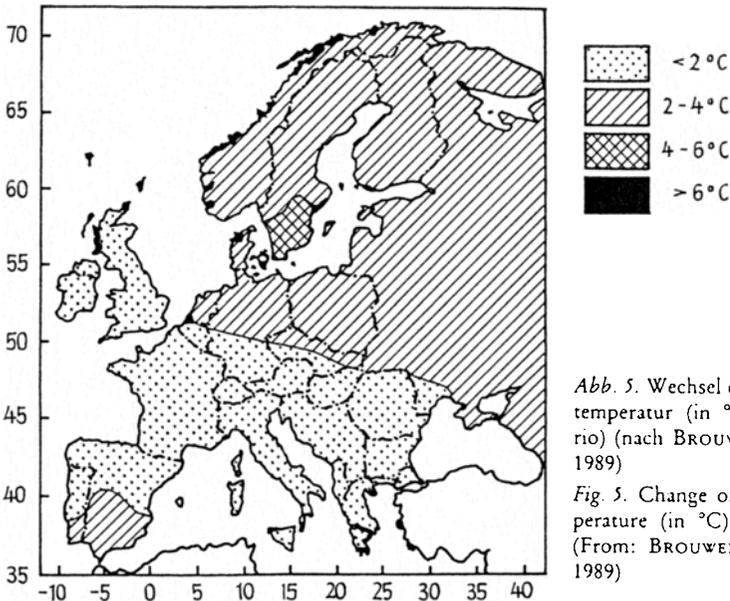


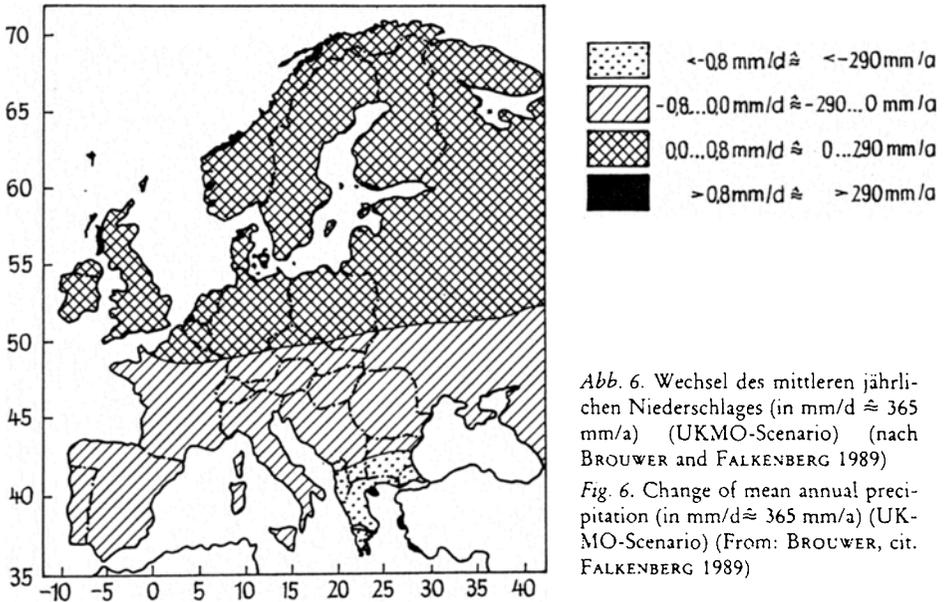
Abb. 5. Wechsel der mittleren Jahrestemperatur (in $^{\circ}\text{C}$) (UKMO-Szenario) (nach BROUWER u. FALKENBERG 1989)

Fig. 5. Change of mean annual temperature (in $^{\circ}\text{C}$) (UKMO-Scenario) (From: BROUWER, cit. FALKENBERG 1989)

Nach der auf Abbildung 5 dargestellten Karte von BROUWER und FALKENBERG (1989) ist in den nächsten 30 bis 40 Jahren in großen Teilen Europas mit einer Zunahme der Jahresmitteltemperatur zu rechnen. Der stärkste Temperaturanstieg soll mit 4 bis 6°C in Südschweden zu erwarten sein. Für Norddeutschland geben BROUWER und FALKENBERG 2 bis 4°C Temperaturanstieg an.

Wesentlich schwieriger sind Niederschlagsänderungen vorauszusagen, weil sich diese in der Kausalkette aus den Temperatureffekten ergeben. Nach BROUWER und FALKENBERG (1989) ist in Europa mit Niederschlagsänderungen bis zu $\pm 300\text{ mm/a}$ zu rechnen. Die größten Niederschlagsverluste sind in Südosteuropa (Griechenland), die stärksten -gewinne in Nordwesteuropa zu erwarten.

Nach der auf Abbildung 6 dargestellten Karte kann man in Süddeutschland mit abnehmenden, in Mitteldeutschland mit etwa gleichbleibenden und in Norddeutschland mit zunehmenden Niederschlägen rechnen. Aus dem Wechselverhältnis von Temperatur



und Niederschlag, das sich vor allem auf die Verdunstung auswirkt, kann man mit aller gebotenen Vorsicht auf das Feuchtigkeitsregime schließen. Danach ist in Norddeutschland ein geringfügiger Rückgang der Humidität zu erwarten. Demgegenüber muß in Süddeutschland wegen Temperaturzunahme *und* Niederschlagsrückgang ein nennenswerter Humiditätsverlust befürchtet werden. Vor allem in den Sommermonaten ist mit Dürreperioden zu rechnen (Abb. 7).

Trotz aller Unsicherheiten, die mit diesen Aussagen verbunden sind, sollten sie bei langfristig wirksamen forstwirtschaftlichen Entscheidungen nicht ignoriert werden.

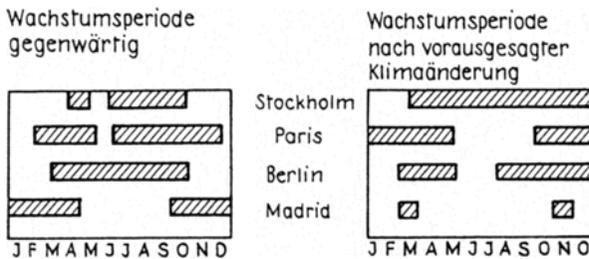


Abb. 7. Wachstumsperiode (in Monaten) unter gegenwärtigen (links) und für das Jahr 2030 vorausgesagten Klimabedingungen (nach BROUWER u. FALKENBERG 1989)

Fig. 7. Growing season (in months) under present climatological conditions (left) and under those predicted for the year 2030 (From: BROUWER, cit. FALKENBERG 1989)

5 Auswirkungen der zu befürchtenden Klimaveränderungen auf den Wald

5.1 Allgemeines

Bei langfristig stabilen Umweltbedingungen stellt sich zwischen diesen und der natürlichen Vegetation ein dynamischer Gleichgewichtszustand ein. Der Weg dahin führt über entsprechende Sukzessionen (THOMASUS 1988, 1990b, 1990c). Diese Dynamik äußert sich in

einer für Standort und Entwicklungsstadium charakteristischen Arten-, Alters- und Raumstruktur. Ändert sich die Temperatur und mit ihr eine Anzahl weiterer ökologischer Faktoren, so wird zwangsläufig auch eine Wandlung der natürlichen Vegetation sowie des Wachstums und des Gesundheitszustandes künstlicher Pflanzenbestände ausgelöst (Abb. 8).

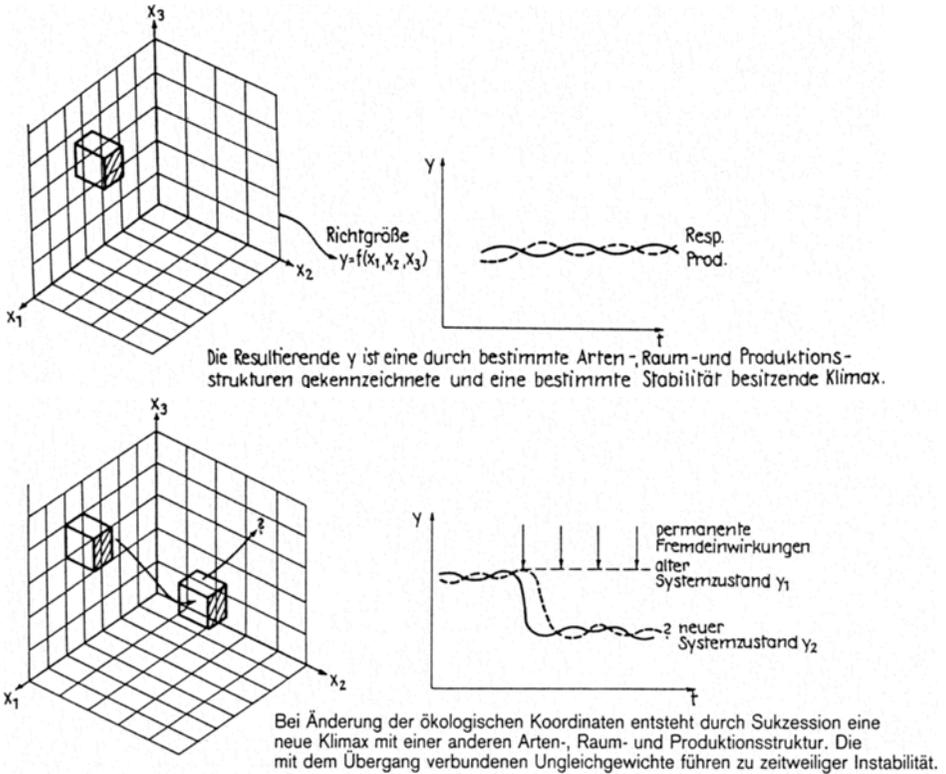


Abb. 8. Ökologische Koordinaten eines topographischen Ortes (links oben) sowie deren Änderung (links unten) mit den sich daraus ergebenden Konsequenzen für den durch Produktivität und Respiration charakterisierten Systemzustand (rechts)

Fig. 8. Ecological coordinates of a topographic location (upper left) and their change (lower left) together with the resulting consequences for the situation of the system, characterized by productivity and respiration (right)

Bei den nachfolgenden Darlegungen zum Einfluß von Klimaänderungen auf die Vegetation muß zwischen autökologischen und synökologischen Aspekten unterschieden werden.

5.2 Autökologische Aspekte bei Klimaveränderungen

Das Verhalten einer Spezies gegenüber Umweltveränderungen ist von folgenden Einflußgrößen abhängig:

- von ihren ökologischen Koordinaten U_1, U_2, \dots, U_i , ihrer ökologischen Amplitude $\Delta U_1, \Delta U_2, \dots, \Delta U_i$ und ihrer genetischen Mannigfaltigkeit
- von ihrer natürlichen oder vom Menschen vorgesehenen Lebensdauer
- von der Art, vom Ausmaß und von der Geschwindigkeit der Umweltveränderung $\Delta U / \Delta t$.

Das wird auf Abbildung 9 veranschaulicht. Auf dieser Darstellung kennzeichnet ΔU die

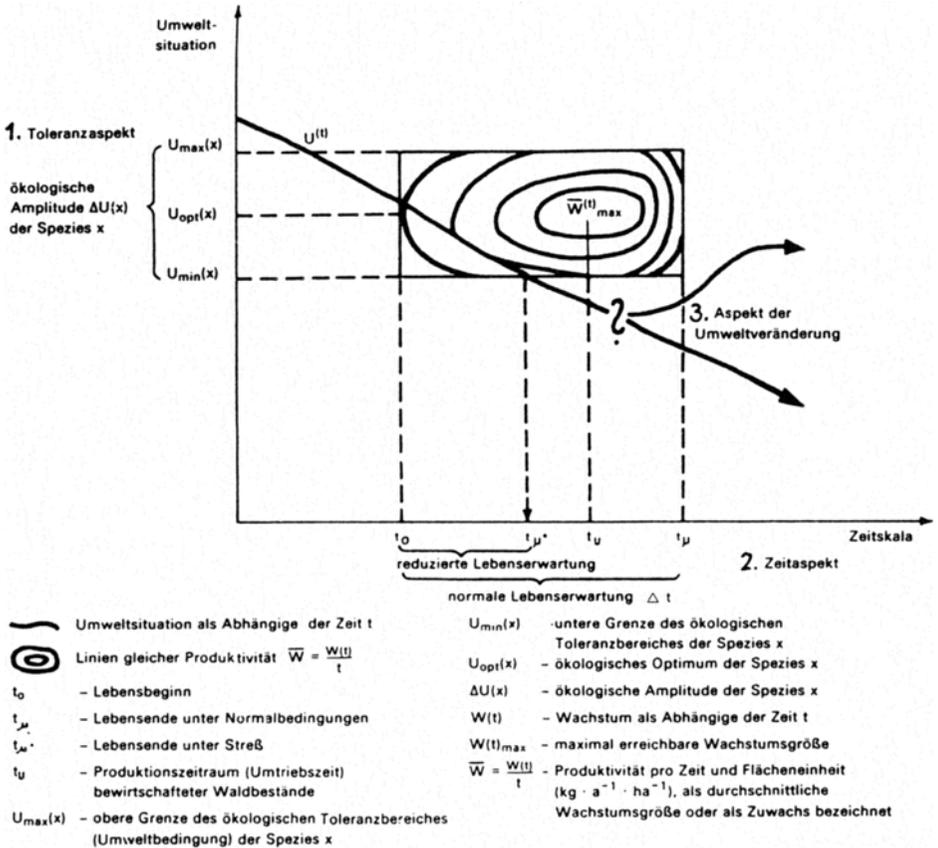


Abb. 9. Ökologische Amplitude $\Delta U(x)$ einer Spezies x, deren normale (t_{μ}) und infolge Umweltveränderung reduzierte (t_{μ^*}) Lebensdauer sowie die sich in Abhängigkeit von der Zeit t und der Umweltsituation $U(t)$ ergebende Produktivität $W(t)$

Fig. 9. Ecological amplitude $\Delta U(x)$ of a species x, its normal (t_{μ}) and because of changes in the environment reduced (t_{μ^*}) longevity, and productivity $W(t)$ as affected by time (t) and environmental situation $U(t)$

Umweltamplitude und Δt die Lebensdauer der betreffenden Art. Beide sind genetisch geprägt. Innerhalb des durch die Größen ΔU und Δt begrenzten Rechteckes wird die Reaktionsintensität $RJ = f(t, U)$, z. B. die Produktivität pro Zeit- und Flächeneinheit, durch Isolinien dargestellt. Ist die Umwelt nicht veränderlich, so durchläuft $RJ = f(t)$ bei $U = \text{const}$ den altersabhängigen Reaktionsprozeß. Ändert sich die Umwelt $U = f(t)$, so ändert sich innerhalb des ökologischen Toleranzbereiches ΔU auch die Reaktionsintensität, bis an der Toleranzgrenze $U = U_{\min}$ bzw. U_{\max} die Mortalität einsetzt. Das ist um so früher der Fall, um so größer die Änderungsgeschwindigkeit $\frac{\Delta U}{\Delta t}$ und um so schmäler die ökologische Amplitude $\Delta U(x)$ der betreffenden Spezies, Rasse oder Sorte ist. Aus dieser Darstellung ergeben sich 3 Aspekte:

1. Der Toleranzaspekt

Die ökologische Toleranz der verschiedenen Baumarten, Rassen und Sorten ist von eminenter Bedeutung für ihr Verhalten gegenüber Umweltmodifikationen. Taxa, die sich

durch eine große ökologische Amplitude auszeichnen, z. B. die eurypotenten Pionierbaumarten, sind darum in der Regel durch größere Anpassungsfähigkeit an Umweltveränderungen als die meist stenopotenten Klimaxbaumarten gekennzeichnet. Da ökologische Toleranz meist mit genetischer Mannigfaltigkeit gekoppelt ist, wird mit deren Einengung, z. B. durch Züchtung, häufig auch das Risiko verstärkt. Neben der ökologischen Amplitude ist natürlich auch die Koinzidenz von Standortsbeschaffenheit und Speziesökologie bedeutungsvoll. Spezies, die sich schon im ökologischen Grenzbereich befinden, sind durch Umweltveränderungen stärker als solche, die im Optimalbereich vorkommen, gefährdet. Dies sei am Beispiel der auf Abbildung 10 dargestellten Ökogramme dargestellt. Man erkennt darauf die ökologische Amplitude bezüglich Temperatur und Feuchtigkeit bei Fichte, Kiefer, Eiche und Buche.

Die Gefahr für eine Baumart, Klimaveränderungen zum Opfer zu fallen, ist von ihrer ökologischen Amplitude und den ökologischen Koordinaten des Anbauortes abhängig. So sind z. B. Fichtenbestände bei einem Temperaturanstieg von 2°C gefährdet, wenn der Anbauort schon heute eine Mitteltemperatur von >7°C aufweist.

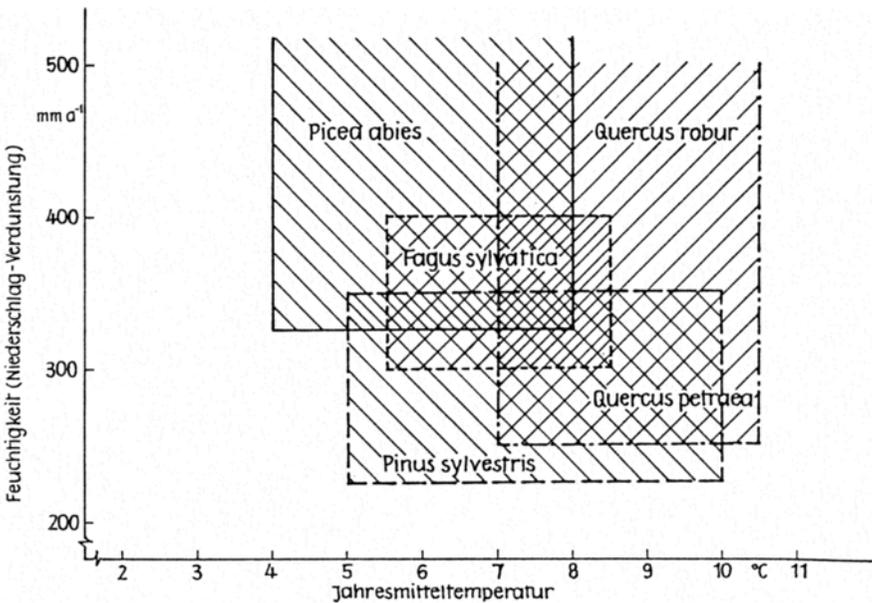


Abb. 10. Ökogramme forstwirtschaftlich bedeutungsvoller Baumarten für Mitteleuropa
Fig. 10. Ecograms of tree species that are important for forestry in Central Europe

Wir ziehen daraus den Schluß, daß in Zukunft vor allem den Grenzbereichen größere Bedeutung geschenkt werden muß.

2. Der Zeitaspekt

Langlebige Organismen bzw. langfristig bewirtschaftete Pflanzenbestände sind stärker als kurzlebige durch Umweltveränderungen gefährdet,

- weil relevante Umweltveränderungen in einem längeren Zeitraum wahrscheinlicher als in einem kurzen sind
- weil Langlebigkeit in der Regel mit einer geringeren Generationsfolge und damit auch mit einer schlechteren Adaptationsfähigkeit an Umweltveränderungen verbunden ist.

Aus dieser Feststellung folgt allgemein, daß Waldökosysteme stärker als Nichtwaldökosy-

steme durch Klimaveränderungen gefährdet sind. In diesem Zusammenhang sei noch darauf hingewiesen, daß sich aus der raschen Generationsfolge kurzlebiger Organismen ein großer Adaptationsvorteil gegenüber langlebigen ergibt. Das kann zu einem Chancenvorteil adaptionschneller pathogener Mikroorganismen gegenüber adaptionsträgen Makroorganismen führen. Klimaänderungen können darum zu erhöhter Pathogenität bei Waldbäumen führen (SMITH 1987; CHEN u. PARRY 1988 sowie KLOPRIES u. BECKMANN 1989).

3. Der Aspekt der Geschwindigkeit von Umweltveränderungen

Für die Adaptation von Individuen und Populationen sowie Ökosystemen ist die Geschwindigkeit der Umweltveränderungen sehr bedeutungsvoll. Dabei ist zwischen physiologischer Akklimatisation einzelner Organismen, auf Selektion und Rekombination beruhenden Anpassungen von Populationen und dem sich infolge neuer Wettbewerbsbedingungen vollziehenden Artenwechsel in Ökosystemen zu unterscheiden. Letzterer leitet bereits zur Synökologie über.

In diesem sehr vielschichtigen Prozeß ist es wesentlich, ob die Geschwindigkeit der durch Umweltveränderungen hervorgerufenen Vitalitätsverluste sowie Mortalität strukturbestimmender Spezies der alten Vegetation schneller verläuft als die Immigration neuer, den veränderten Umweltbedingungen adäquater Spezies der künftigen Vegetation. Je nachdem, ob das der Fall ist oder nicht, wird es zur Destruktion des alten Systems oder zu einer allogenen Sukzession aus dem alten in ein neues System kommen.

Bei den oben genannten Klimaänderungen muß man mit einer Nordverschiebung der Isothermen um 400 bis 600 km in 100 Jahren rechnen (SEDJO u. SOLOMON 1988; BRUENIG 1990; Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 1990). Demgegenüber beträgt die Migrationsgeschwindigkeit anemochorer Baumarten für flächendeckende Besiedelungen kaum 50 km in 100 Jahren. Bei schwersamigen Spezies ist sie noch weitaus geringer (THOMASIU 1990d). Daraus folgt, daß unter den genannten Bedingungen vor allem dort mit Destruktionen in Naturwäldern gerechnet werden muß, wo sich strukturbestimmende Baumarten schon jetzt im ökologischen Grenzbereich befinden.

5.3 Synökologische Aspekte bei Klimaänderungen

Die Frage nach umweltbedingten Wandlungen der Vegetation kann auf zweierlei Weise untersucht werden:

1. Die verschiedenen natürlichen Vegetationstypen werden in einem Koordinatensystem mit den ökologischen Faktoren U_1, U_2, \dots, U_i (Abb. 8) nischengerecht eingetragen. Ein Beispiel dafür ist die bekannte Lebenszonenklassifikation nach HOLDRIDGE (1947). Bei relevanten Umweltveränderungen kann man mit Hilfe dieses Systems feststellen, in welcher Richtung die allogene Sukzession verlaufen und welcher Vegetationstyp den neuen Umweltbedingungen adäquat sein wird.
2. Es werden Modelle ausgearbeitet, in denen die Kompartimente des abzubildenden Systems erkenntnisgemäß angeordnet und die zwischen ihnen bestehenden Ursache-Wirkung-Beziehungen wissenschaftsgemäß beschrieben werden. Mit Hilfe solcher Modelle kann dann das Systemverhalten bei Variation der verschiedenen Triebkräfte (Scenarios) simuliert werden.

Zum ersten Weg werden nachfolgend zwei Beispiele gegeben. Auf den folgenden Abbildungen werden zwei Karten von Nordamerika mit Lebenszonen nach HOLDRIDGE (1947, 1964) dargestellt, und zwar

Abbildung 11 unter gegenwärtigen Umweltbedingungen (1947) und
Abbildung 12 unter Umweltbedingungen, wie sie nach Verdoppelung des CO_2 -Gehaltes der Atmosphäre (bei unveränderten Niederschlägen) zu erwarten sind.

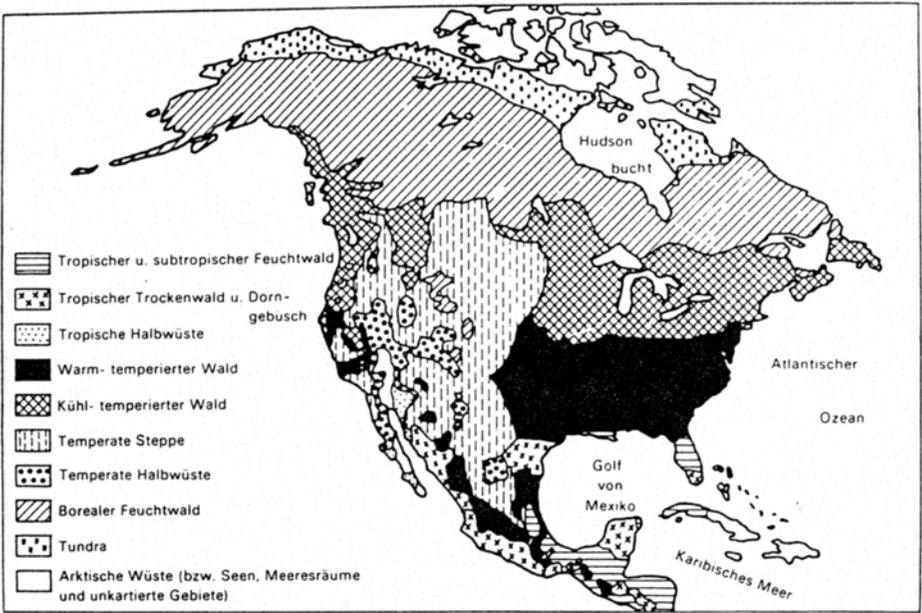


Abb. 11. Lebenszonen-Klassifikation nach HOLDRIDGE (1947) für die gegenwärtigen Bedingungen der mittleren Bodentemperatur und Niederschläge im Gebiet von Nord- und Mittelamerika

Fig. 11. Life-zone classification according to HOLDRIDGE (1947) for the present conditions of mean soil temperature and precipitation in North and Central America

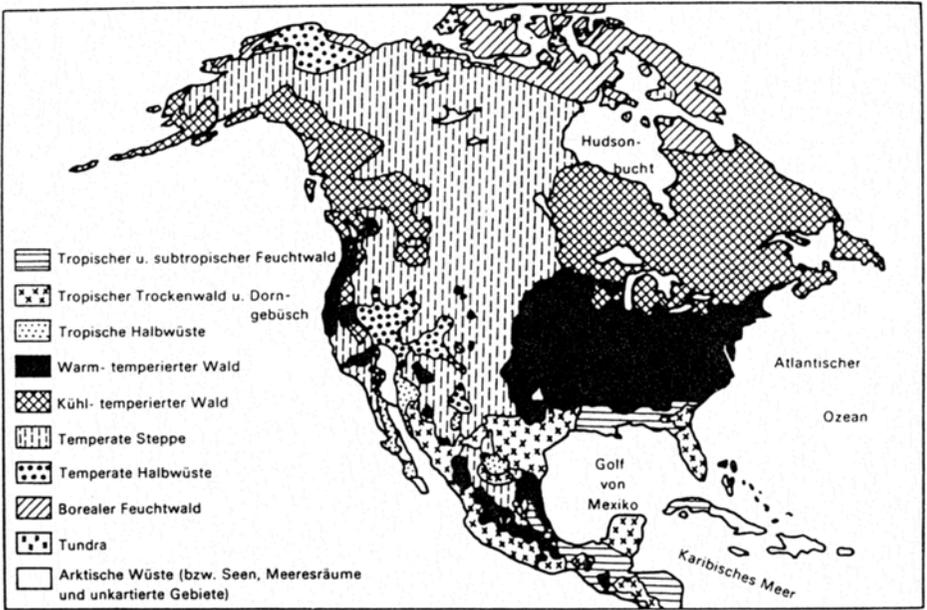


Abb. 12. Lebenszonen-Klassifikation nach HOLDRIDGE (1947) für die Bedingungen einer Verdoppelung des CO_2 -Gehaltes der Atmosphäre mit dem sich daraus ergebenden Temperaturanstieg (bei Annahme gleichbleibender Niederschläge) für das Gebiet von Nord- und Mittelamerika (nach EMANUEL u. SHUGART 1984)

Fig. 12. Life-zone classification according to HOLDRIDGE (1947) for conditions arising from doubling the atmosphere's CO_2 -content together with the resulting temperature rise (under the assumption that no change in amounts of precipitation takes place) for North and Central America (From: EMANUEL and SHUGART 1984)

Beim Vergleich dieser beiden Karten gelangt man zu dem Schluß, daß in Nordamerika mit Desertifikation in den Südstaaten, mit Nordexpansion der nemoralen und Reduktion der borealen Wälder sowie Tundren zu rechnen ist. Ähnliche Resultate wurden inzwischen bei analogem Vorgehen auch in Eurasien erzielt. Bei der mit diesem Verfahren prognostizierten Verschiebung der Vegetationsgürtel kommt es nach SEDJO und SOLOMON (1988) zu einer Reduktion der potentiellen Waldfläche um etwa 5 % und zu einer Senkung des in den Wäldern gebundenen Kohlenstoffs um 4 %. Demgegenüber soll sich der Anteil wärmerer Nichtwaldgebiete (Steppen, Savannen, Halbwüsten und Wüsten) entsprechend erhöhen.

In einer Arbeit von MATEJKA (1976) aus der ČSFR wird die Abhängigkeit der wichtigsten Waldgesellschaften Böhmens von Temperatursumme und Niederschlag beschrieben und graphisch dargestellt (Abb. 13). Mit Hilfe dieser sehr anschaulichen Abbildung läßt sich bei Änderung dieser beiden Faktoren die Tendenz der allogenen Sukzession und die Wandlung der potentiellen Waldgesellschaft ableiten. Im konkreten Fall läßt die prognostizierte Erwärmung und Ariditätszunahme einen Rückgang der potentiellen Fichtenwälder und eine Zunahme der verschiedenen potentiellen Eichenmischwaldgesellschaften erwarten. In Verbindung damit dürften auch Ahorn, Kirsche und Esche Wettbewerbsvorteile erhalten. Die künftige Wettbewerbsfähigkeit der temperaturobigen Rot-Buche einerseits und der kontinental-borealen Kiefer andererseits wird wesentlich von der Humiditätsdynamik abhängig sein.

Mit Modellierungen der Ökosystemdynamik als Folge von Klimawandlungen haben sich BOTKIN et al. (1970, 1972, 1973), SHUGART und WEST (1977, 1980, 1981), SOLOMON, THARP, WEST, TAYLOR, WEBB und TRIMBLE (1984), SOLOMON und WEST (1985), SOLOMON und WEST (1986), SOLOMON und WEST (1987), SOLOMON (1988), u. a. beschäftigt. Ein Beispiel dafür wird auf Abbildung 14 gegeben. Hier handelt es sich um einen Standort

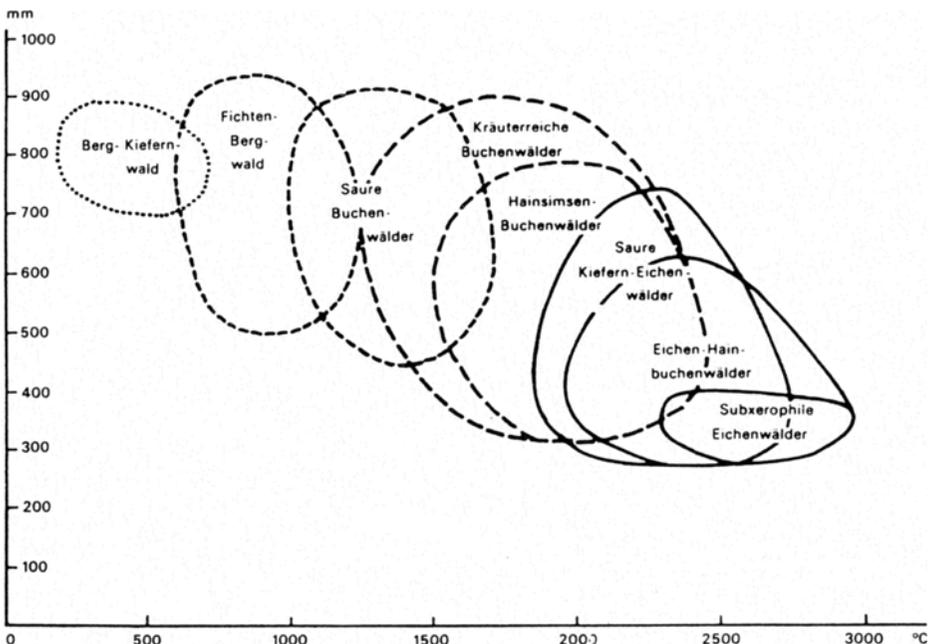


Abb. 13. Die Abhängigkeit des Vorkommens natürlicher Waldgesellschaften in der ČSFR von der Temperatursumme und vom Niederschlag (nach MATEJKA 1976)

Fig. 13. The dependency of the occurrence of natural forest plant communities in the ČSFR on temperature sum and precipitation (From: MATEJKA 1976)

im Nordwesten des Staates Michigan mit einem Laub-Nadel-Mischwald, dessen Dynamik wie folgt simuliert wurde:

- 0–400 Jahre Entwicklung unter herkömmlichen Normalbedingungen,
- 400–500 Jahre doppelter CO_2 -Gehalt und Temperaturanstieg um $2,5^\circ\text{C}$,
- > 500 Jahre vierfacher CO_2 -Gehalt und Temperaturanstieg um $3,5^\circ\text{C}$.

Auf Abbildung 14 ist erkennbar, wie sich Baumanzahl und Biomasse pro Flächeneinheit sowie die mittlere Baummasse verändern. Außerdem wird deutlich, wie sich verschiedene Waldtypen durch Zunahme südlicher Spezies verändern und so von anderen abgelöst werden.

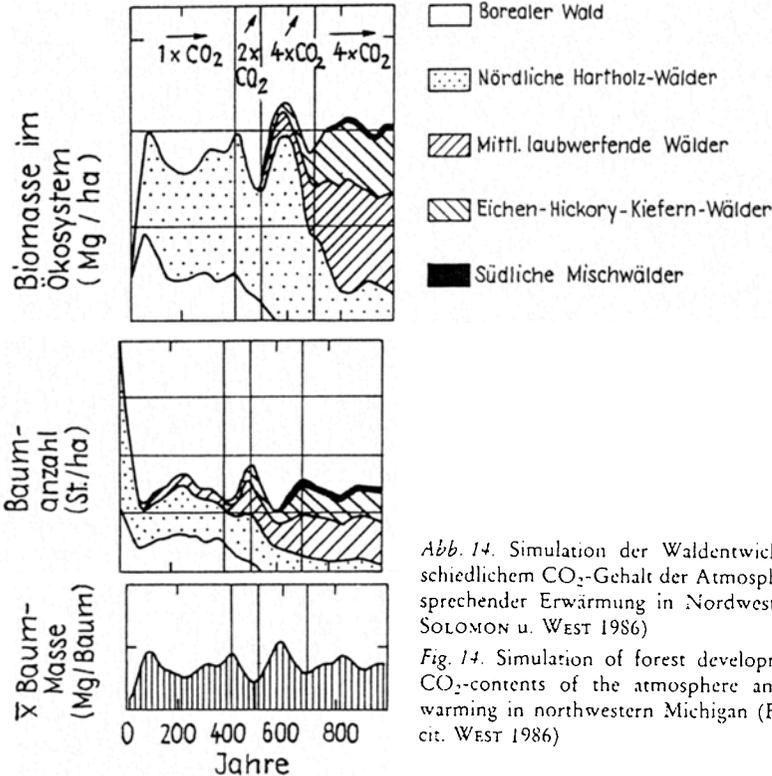


Abb. 14. Simulation der Waldentwicklung bei unterschiedlichem CO_2 -Gehalt der Atmosphäre und dementsprechender Erwärmung in Nordwest-Michigan (nach SOLOMON u. WEST 1986)

Fig. 14. Simulation of forest development at different CO_2 -contents of the atmosphere and corresponding warming in northwestern Michigan (From: SOLOMON, cit. WEST 1986)

5.4 Klimabedingte Wandlung der Produktivität von Waldökosystemen

CO_2 -Anstieg und Erwärmung haben positive produktionsbiologische Effekte, wenn der Komplex der Umweltfaktoren bei den betreffenden Spezies zum ökologischen Optimum hin verändert wird. Das ist z. B. der Fall, wenn das Wachstum bisher durch Wärmemangel begrenzt wurde und die übrigen ökologischen Faktoren, z. B. Feuchtigkeit und Nährstoffe, auch unter den neuen Bedingungen nicht ins Minimum gelangen. Eine solche Situation ist bei den vorausgesagten Klimaänderungen in großen Teilen der borealen Nadelwaldzone Eurasiens und Nordamerikas zu erwarten (LA MARCHE et al. 1984; BINKLEY u. LARSON 1987; KAUPPI u. POSCH 1987; SOLOMON u. WEST 1987; HOUGHTON u. WOODWELL 1989). Umgekehrt muß in den südlich-kontinentalen Grenzregionen der Wälder bei Feuchtigkeitsmangel eine Wachstumsdepression und ein Wandel zu Steppentformationen befürchtet werden. Diese generelle Tendenz kann durch eine speziesdifferen-

zierte Lage der temperaturabhängigen Minima der Enzymaktivität (STEPONKUS 1981) sowie Optima der Nettoprimärproduktion (KAPPEN 1981) modifiziert werden.

Eine positive Wirkung kann auch durch „Düngereffekte“ als Folge des größeren CO₂-Angebotes hervorgerufen werden. Obwohl diese CO₂-Wirkung unter Laborbedingungen experimentell nachgewiesen worden ist (LARCHER 1980; KRAMER 1981; LEMON 1983; OECHEL u. STRAIN 1985; DOYLE 1987; ESSER 1987; TELEWSKI u. STRAIN 1987 u. a.), muß vor zu großem Optimismus in dieser Richtung gewarnt werden, weil es sich bei den meisten Untersuchungen um Kurzzeitmessungen an jungen Pflanzenteilen und Einzelpflanzen handelte, deren Resultate nur mit Vorbehalt auf ältere Bäume und Waldökosysteme mit limitierter Biomassedichte übertragbar sind (JOHNSON 1983; HARI et al. 1984; KRAMER u. SIONIT 1985; STRAIN u. CURE 1985; TRABALKA 1985; GRAYBILL 1987; PARKER 1987; BURSCHEL u. WEBER 1988). So stellen z. B. KRAMER und SIONIT (1985) sowie OECHEL und STRAIN (1985) fest, daß ein höherer CO₂-Gehalt der Luft bei älteren Bäumen zu Zuwachsverlusten führt. Diese Reduktion der Nettoassimilation kann zu größerer Mortalität, damit aber auch zu einer rascheren Verjüngung (kreative Destruktion nach HOLLING 1986) führen. Außerdem ist zu erwarten, daß der CO₂-Düngungseffekt mit zunehmendem CO₂-Gehalt der Atmosphäre entsprechend des MITSCHERLICH-Gesetzes abnimmt (REGEHR et al. 1975) und daß die verschiedenen Spezies (z. B. C₃- und C₄-Pflanzen) unterschiedlich auf CO₂-Anstieg reagieren (KELLOMÄKI et al. 1988).

Insgesamt muß man feststellen, daß im Zusammenhang mit dem CO₂- und Temperaturanstieg noch viele pflanzenphysiologische und ökologische Fragen offen sind, z. B.

- wie sind bei höheren Temperaturen die Relationen zwischen Assimilation und Respiration?
- wie wirkt sich ein veränderter Tages- und Jahresgang der Temperatur auf thermisch gesteuerte physiologische Prozesse (Frosthärtung, Winterruhe, Keimung) sowie die Ontogenese der Pflanzen (Maturität, Fruktifikation, Seneszens und Mortalität) aus?
- wie werden der Stomatomechanismus und die Wasserökonomie der Pflanzen durch höheren CO₂-Gehalt beeinflusst (ESSER 1987)?
- wie wirkt sich eine größere Stoffproduktion auf die Anatomie (Früh- und Spätholzbildung) sowie Morphologie und damit auch auf die mechanische Belastbarkeit aus (PANSIN u. DE ZEEUW 1964; FRITTS 1976; CANNELL u. SMITH 1986; CONKEY 1986; CANNELL 1989; KIMMINS u. LAVENDER 1989; LAVENDER 1989).

Trotz dieser offenen Fragen liegt es nahe, daß der schon seit zwei bis drei Jahrzehnten in gesunden Waldbeständen Mitteleuropas von zahlreichen Forschern nachgewiesene Mehrzuwachs neben Nährstoffeinträgen aus der Umgebung und Regeneration früherer Boden-degradationen (z. B. Streunutzung) mit auf den gestiegenen CO₂-Gehalt der Atmosphäre zurückzuführen ist (GOUDRIAAN 1986; BINKLEY u. LARSON 1987; KAUPPI u. POSCH 1987; SOLOMON u. WEST 1987; KELLOMÄKI et al. 1988; HOUGHTON u. WOODWELL 1989).

6 Forstwirtschaftliche Konsequenzen

6.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt soll versucht werden, die Frage zu beantworten, wie die Wälder von heute vor dem Hintergrund eines sich verändernden Klimas zu bewirtschaften sind. Diese Antwort ist schwierig und mit vielen Unsicherheiten belastet, weil Art und Ausmaß einer solchen Klimaänderung für den genannten Zweck nicht hinreichend genau vorausgesagt werden können. Das gilt schon im globalen und noch weitaus mehr im regionalen Rahmen. Aus diesem Grunde muß sich die Forstwirtschaft einerseits auf die vorausgesagte Klimaänderung einstellen, andererseits darf sie aber auch keine weittragenden Entscheidungen treffen, die im Falle des Nichteintreffens der Klimaveränderung erhebliche Nachteile zur Folge hätten. Hinzu kommen politische, ökonomische und soziale Unsicherhei-

ten, die von dem genannten geophysikalischen Ereignis abhängig oder auch unabhängig sein können.

Bei der Suche nach einem Weg, der mit großer Wahrscheinlichkeit richtig und mit geringer falsch ist, wird von folgenden Prämissen ausgegangen:

- Gewährleistung einer möglichst großen Flexibilität der Waldökosysteme und der Forstwirtschaft gegenüber Veränderungen der Umwelt sowie der gesellschaftlichen Anforderungen an den Wald,

- Minimierung des ökologischen und ökonomischen Risikos,

- Begrenzung des Aufwandes durch ökogerechte Waldbewirtschaftung.

Diese drei Grundforderungen lassen sich am ehesten erfüllen, wenn die im Walde wirkenden ökologischen Gesetzmäßigkeiten bestmöglich berücksichtigt werden, da

- Vernachlässigung bzw. Verletzung ökologischer Gesetzmäßigkeiten auf lange Sicht stets unökonomisch ist. In solchen Fällen wird statt der Nutzung natürlicher Triebkräfte ein hoher Aufwand für die Reparatur ökologischer Schäden erforderlich.

- Imbalance im Stoffhaushalt und Paralyse von Selbstregulationsmechanismen Instabilität der Waldökosysteme zur Folge haben.

- Einseitigkeit der Waldbewirtschaftung (Monokulturen, Gleichaltrigkeit, schematische Raum- und Zeitstrukturen) die Anpassungsfähigkeit an sich verändernde Bedingungen mindern.

Die generelle Forderung nach einer ökogerechten (d. h. ökologisch *und* ökonomisch orientierten) Waldbewirtschaftung gilt unter dem Eindruck sich wandelnder Umweltbedingungen in besonderem Maße. Das schließt ein

- Erhaltung, möglichst Mehrung der Waldfläche (Kohlenstoffbindung),

- Herbeiführung einer durch ökologisch günstige Verteilungsmuster charakterisierten Raumordnung,

- Wahrung der Nachhaltigkeit auf einem möglichst hohen Niveau der Biomasseakkumulation und einer möglichst niedrigen Nachhaltsebene (Bestand, Betriebsklasse),

- Förderung einer vielgestaltigen Arten-, Alters- und Raumstruktur in den jeweiligen Hierarchieebenen (Bestand, Revier, Forstamt, Land).

6.2 Baumartenwahl

Die Auswirkungen von Klimaänderungen sind besonders bei der Baumartenwahl zu beachten. Hierbei tritt das Problem auf, daß Bäume, die heute standortgemäß sind und angebaut werden, trotz sich ändernder Umweltbedingungen bis zu ihrem Lebensende auch standortgemäß bleiben müssen. Die Standortamplitude der anzubauenden Baumarten muß darum bezüglich der variablen Ökofaktoren so breit sein, daß die gegenwärtigen und künftigen Umwelt-Koordinaten davon eingeschlossen werden. Diese Forderung ist offensichtlich bei eurypotenten Pionierbaumarten und wärmeliebenden sowie dürreresistenten Spezies mit kontinentalem Verbreitungsschwerpunkt leichter als bei stenopotenten Klimaxbaumarten mit atlantischem Verbreitungsschwerpunkt zu erfüllen. Es wird darum auch in Zukunft mit den Pionierbaumarten Birke, Aspe und Erle sowie Kiefer und Schwarzkiefer weniger Probleme geben. Auch die Europäische Lärche erscheint als Baum des kontinentalen Klimas weniger problematisch. Zu den wärmeliebenden Arten zählen Eichen, Hainbuche und Winter-Linde sowie die Exoten Robinie, Roteiche und Juglans-Arten. Auch die Ahornarten und Eichen dürften bei 1 bis 2 °C Temperaturanstieg noch keine Probleme bereiten.

Eine Problembaumart ist die Fichte. Dort, wo die Jahresmitteltemperaturen schon heute über 7 °C und die Niederschläge unter 800 mm liegen, erscheint ihr Anbau aus Sicht der zu erwartenden Klimaänderung problematisch. Hinzu kommt die große Sturmgefährdung dieser Baumart, die angesichts des zu befürchtenden Anstiegs von Sturmhäufigkeit und -stärke mit zu berücksichtigen ist.

Auch der Anbau der maritim geprägten Rot-Buche ist bei Jahresmitteltemperaturen von gegenwärtig mehr als 7,5 bis 8°C und Niederschlägen von weniger als 600 mm mit Skepsis zu betrachten. Bei dieser Baumart spielt zudem die Länge der Umtriebszeit und damit die große Wahrscheinlichkeit, in Zeiten erheblicher Klimawandlungen hineinzuwachsen, eine besondere Rolle.

Weitaus weniger problematisch erscheint Douglasie, besonders dann, wenn es sich um Herkünfte aus südlicheren, sommertrockenen Gebieten ihres Areals (Oregon) handelt.

Unter Berücksichtigung der gegenwärtigen und der künftig zu erwartenden Standortbedingungen sollten Mischbestände soziologisch vertretbarer Baumartenkombinationen angestrebt werden, weil hier – schon allein durch das Vorhandensein mehrerer Baumarten – das Risiko verteilt und die Resilienz der Bestände größer ist.

Risikoverteilung durch Anbau verschiedener Baumarten sollte auch in höheren Hierarchieebenen (Revier, Forstamt, Landschaft) angestrebt werden.

6.3 Waldbausysteme

Aus der schon begründeten Strategie eines ökogerechten Waldbaus folgt, daß sich der Verfasser für Waldbausysteme ausspricht, die durch folgende Merkmale gekennzeichnet sind:

- Gewährleistung der ökologischen Nachhaltigkeit durch Minimierung der Ungleichgewichte zwischen Stoffaufbau- und Stoffabbauprozessen während des gesamten Produktionsablaufes,
- bestmögliche Nutzung natürlicher Triebkräfte bei der Regeneration, Selbstorganisation und Stabilisation von Waldökosystemen; damit zugleich Minimierung der mit dem Management verbundenen Zusatzaufwendungen,
- Erhaltung der genetischen Vielfalt als Voraussetzung hinreichender Adaptationsfähigkeit und Adaptation bei Umweltveränderungen,
- Verwendung standortsgemäßer Baumarten und soziologisch vertretbarer Baumartenmischungen.

Aus der Sicht der Kohlenstoffproblematik sind besonders solche Waldbausysteme vorzuziehen, die mit einem hohen Akkumulationsniveau an Biomasse und Kohlenstoff arbeiten. Das ist besonders in Plenterwäldern, mehrschichtigen und mehrhiebigen Wäldern sowie bei langen Umtriebszeiten der Fall. Demgegenüber ist das Biomasse-Akkumulationsniveau in schlagweise bewirtschafteten Wäldern, besonders im kurzumtriebigen Betrieb, wesentlich kleiner. Hinzu kommen große Stoffverluste im Kahlschlagsystem infolge des stürmischen Nekromasseabbaus auf Schlagflächen.

Selbstverständlich kann auch die Situation eintreten, daß Waldbestände, die als Folge von Klimaänderungen zur Existenzgrenze driften (Abb. 9 u. 10) in verhältnismäßig kurzer Zeit zu rekonstruieren sind. Das sollte nach Möglichkeit unter dem Schutz des Vorbestandes erfolgen. Bei galoppierendem Schadfortgang kann auch die Situation eintreten, daß Kahlschläge unumgänglich sind.

6.4 Walderneuerung

Ohne Zutun des Menschen würde die durch Klimaveränderungen gesteuerte allogene Sukzession viele Jahrzehnte, wenn nicht Jahrhunderte erfordern. Aus diesem Grunde wird vielerorts nicht auf Kunstverjüngung verzichtet werden können. Das gilt vor allem dann, wenn die dem neuen Standort entsprechenden Spezies an Ort und Stelle nicht vorhanden sind. Unter den veränderten Klimabedingungen wird die Walderneuerung voraussichtlich mancherlei Erschwernissen unterliegen:

- Der Destruktion von Waldbeständen geht in der Regel eine Verlichtung und Bodenverwilderung voraus. Letztere kann durch Fremdstoffeinträge (z. B. Stickstoff) und Kontinentalität des Klimas verstärkt werden. Unter den Kahlschlagpflanzen befinden sich

einige Spezies mit kontinentalem Verbreitungsschwerpunkt (z. B. *Calamagrostis epigejos*), die einen Wettbewerbsvorteil erlangen können oder schon besitzen. Einer Bekämpfung dieser Spezies stehen verstärkter Humusabbau bei Bodenbearbeitung und größere Umweltbedenklichkeit bei Herbizideinsatz entgegen.

- Der auf den Walderneuerungsflächen verbliebene Schlagabraum (Reisig, Baumwipfel, Holzreste) wurde bisher häufig im Interesse einer Erleichterung der Kulturarbeiten verbrannt. Aus ökologischer Sicht ist dieses Verfahren zu verurteilen, weil dadurch Destruentennahrung vernichtet, biogeochemische Stoffkreisläufe gestört und zusätzlich CO₂ freigesetzt werden. Einen Kompromiß zwischen Arbeitserleichterung einerseits und Nekromasseerhaltung andererseits stellt die mechanische Zerkleinerung der Schlagabfälle auf der Fläche dar.
- Bei Zunahme von Häufigkeit und Stärke sommerlicher Dürreperioden muß mit größeren Pflanzenausfällen bei den Forstkulturen gerechnet werden (Abb. 7). Durch Einsatz von Containerpflanzen ist es möglich, diese Gefahr bis zu einem gewissen Grade zu reduzieren.
- Durch die genannten Aufforstungsprobleme, besonders Vergrasung und Trockenheit, können Dispositionen für ein verstärktes Auftreten von Kulturschädlingen entstehen. Dabei ist vor allem an *Hylobius abietis* (L.), der von der zweijährigen zur einjährigen Entwicklung übergehen kann, und an *Hylastes cunicularius* (Er.) zu denken (mündl. Mitt. РОHRIS). Dem ist durch entsprechende Präventivmaßnahmen zu begegnen.

6.5 Bestandesbehandlung

Im Verlaufe der Bestandesentwicklung wird bei der Mischungsregulierung stärker auf die standörtliche Eignung der vorkommenden Baumarten im Hinblick auf die sich verändernden Umweltbedingungen zu achten sein (s. Kap. 6.2). Auf Standorten mit zunehmendem Feuchtigkeitsmangel muß damit gerechnet werden, daß sich auch das Dichtepotential der Bestände vermindert. Dem wäre durch entsprechende Bestandesbehandlung (geringere Bestandesdichte mit entsprechend niedrigeren Baumzahlen, Grundflächen und Vorräten) Rechnung zu tragen.

Angesichts zunehmender Sturmbelastungen muß der Stabilisierung von Waldbeständen mit den bekannten Verfahren (THOMASIUS, BUTTER u. MARSCH 1987; MARSCH 1989) größere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Veränderte Wachstumsabläufe können zur Modifikation der Eingriffsintervalle Anlaß geben. Im ganzen wird durch Maßnahmen der Bestandesbehandlung eine dem sich wandelnden Standort angepaßte Baumarten- Alters- und Raumstruktur anzustreben sein.

6.6 Forstschutzmaßnahmen

Gravierende Umweltveränderungen haben fast immer eine zeitweilige Destabilisierung der existierenden Ökosysteme zur Folge, da die Adaptation an neue Bedingungen mit Schwächung und erhöhter Mortalität bei den ins Pessimum gedrängten Arten und mit Wettbewerbsvorteilen der zum Optimum driftenden Spezies verbunden ist.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß vor allem kurzlebige Organismen mit rascher Generationsfolge gegenüber langlebigen mit langsamer Generationsfolge einen erheblichen Wettbewerbsvorteil besitzen. Aus diesem Grunde ist in Zukunft mit größeren Forstschutzproblemen durch Pilze und Insekten zu rechnen. Das gilt vor allem für solche Arten, die durch milde Winter begünstigt werden.

Stark gefährdet sind Baumarten, die sich bei zunehmender Klimaänderung zur Grenze ihres ökologischen Toleranzbereiches hin bewegen (s. Abschn. 6.2). Der phytosanitären Überwachung solcher Bereiche wird darum in Zukunft besondere Beachtung zu schenken

sein. Größere Aufmerksamkeit wird künftig auch dem Waldbrandschutz gelten müssen, wenn Erwärmung und Trockenheit zunehmen sollten.

7 Maßnahmen zur Drosselung weiterer CO₂-Emissionen und zum Entzug von Kohlenstoff aus der Atmosphäre

Ein weiterer Anstieg des Kohlenstoffes in der Atmosphäre kann nur durch Minderung des Zustroms und verstärkte Abschöpfung aus der Atmosphäre verhindert werden. Ersteres erfordert eine drastische Reduktion der Verbrennung fossiler Kohlenstoffträger sowie Stopp der Waldvernichtungen, letzteres eine Erhöhung der Biomasseproduktion und besonders der Biomasseakkumulation in der Biosphäre. In beiden Fällen nimmt die Forstwirtschaft einen wichtigen Platz ein, wenn auch die Auffassungen über die Möglichkeiten und Grenzen forstwirtschaftlicher Einflußnahme weit auseinandergehen.

Zur Drosselung der Verbrennung fossiler Energieträger kann der Wald als Lieferant des Substitutes Holz beitragen. Außerdem muß sich die Forstwirtschaft als Anwalt der Walderhaltung betrachten.

Für die Abschöpfung des Kohlenstoffes ist die forstwirtschaftliche Bodennutzung besonders geeignet, weil Wälder mehr als alle anderen Ökosysteme zur Akkumulation von Kohlenstoff befähigt sind. Hinzu kommt, daß Waldwirtschaft auch auf ärmeren, für die landwirtschaftliche Nutzung nicht mehr geeigneten Böden möglich ist. Außerdem kann Holz bei entsprechender Behandlung sehr dauerhaft sein. Daraus ergibt sich die Möglichkeit eines langfristigen Kohlenstoffentzuges aus der Atmosphäre durch Verbauung von Holz in Gebäuden, Möbeln u. a. Gebrauchsgegenständen. SEDJO und SOLOMON (1988) geben dafür $10 \star 10^9 \text{ m}^3$ bzw. $2,6 \star 10^9 \text{ t}$ Kohlenstoff an. Eine größere Kohlenstoffbindung kann durch Aufforstung bewaldungsfähiger Standorte und Vorratsaufstockung in den vorhandenen Wäldern erfolgen. Dabei muß zwischen zwei unterschiedlichen Zielstellungen unterschieden werden:

- Der gegenwärtige Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre wird toleriert; lediglich der vermehrte Zugang durch die Verbrennung fossiler und rezenter Kohlenstoffträger soll kompensiert werden.
- Der Kohlenstoff soll nachhaltig aus der Atmosphäre entzogen und auf diese Weise eine Senkung ihres CO₂-Gehaltes erreicht werden. In diesem Falle muß eine permanente Festlegung des Kohlenstoffes in der Biosphäre, d. h. in Ökosystemen, erfolgen, die als „Nachhalteinheiten“ für Kohlenstoff aufzufassen sind. Die Kohlenstoffbilanz solcher Systeme ist im Idealfall eines dynamischen Gleichgewichtszustandes (Zugang = Abgang) Null. In Näherung trifft das für Urwälder im Klimaxstadium zu.

Im ersten Fall handelt es sich um die Stärke des die Atmosphäre und Biosphäre verbindenden Kohlenstoffstroms, im letzten hingegen um das Niveau des Kohlenstoffvorrates in Atmosphäre und Biosphäre. Obwohl beide Gesichtspunkte eng miteinander verbunden sind, müssen sie bei Kalkulationen sauber voneinander getrennt werden. So kann z. B. mit Kurzumtriebplantagen höherer Produktivität, aber niedrigem Akkumulationsniveau stärker auf den Kohlenstoffstrom, weniger jedoch auf das Kohlenstoffniveau in der Atmosphäre eingewirkt werden. Umgekehrt wird mit Langumtriebbeständen geringerer Produktivität, aber hohem Akkumulationsniveau stärker auf das Kohlenstoffniveau und weniger auf den Kohlenstoffstrom Einfluß genommen. Beide Gesichtspunkte sind bedeutungsvoll und komplementär. Die Frage nach der Beeinflussbarkeit des Kohlenstoffniveaus in der Biosphäre und des Kohlenstoffstroms zwischen Bio- und Atmosphäre durch forstwirtschaftliche Maßnahmen sowie die Kalkulation der dabei möglichen Größenordnungen betrifft eine umfangreiche, vielschichtige und bei weitem nicht nur naturwissenschaftliche Problematik. Auf sie soll im Rahmen dieser Arbeit nicht speziell eingegangen werden, da hierzu bereits zahlreiche, allerdings zum Teil recht widersprüchliche Publika-

tionen vorliegen (LANLEY u. CLEMENT 1979; FAO 1982; NEENAN 1982; COOPER 1983; ZAVITKOVSKI u. ISEBRANDS 1983; WOODWELL 1987; BURSCHER u. WEBER 1988; FRICKE 1988; GRAINGER 1988; MARLAND 1988; SEDJO u. SOLOMON 1988; SOLOMON 1988; KOHLMAIER et al. 1989; NILSSON 1989; SCHEIRING 1989; SEDJO 1989; TREXLER et al. 1989; THOMASIU 1990a; BRUENIG 1990; Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 1990; BURSCHER 1990; SCHROEDER u. WINGJUM 1990; BRUENIG [im Druck]) und eine gründliche Behandlung dieses Gegenstandes mehr Raum erfordern würde.

Abschließend sei dazu lediglich festgestellt, daß die Erhaltung der Wälder, große Kohlenstoffvorräte in den Wäldern, Aufforstungen größeren Ausmaßes sowie langfristige Kohlenstoff-Sequestration durch Verbauung von Holz sehr wohl einen Beitrag zur Verbesserung des Kohlenstoffhaushaltes der Erde leisten können, eine Lösung dieser Grundfrage ist aber nur durch eine erhebliche Reduzierung des durch Verbrennung fossiler Kohlenstoffträger emittierten Kohlendioxids möglich, das gegenwärtig rund 80 % des die Imbalance verursachenden CO₂-Zustromes in die Erdatmosphäre ausmacht.

Zusammenfassung

Klimaänderungen haben einen großen Einfluß auf Bodenwirtschaft und Zivilisation. Im Gegensatz zu früheren Klimawandlungen wird die gegenwärtig sich anbahnende vom Menschen selbst ausgelöst. Die sich dabei andeutende große Wandlungsgeschwindigkeit ist besonders problematisch, weil die Adaptationsgeschwindigkeit der Vegetation damit wahrscheinlich nicht Schritt halten kann. Es ist zu befürchten, daß die homöostatische Regelungsfunktion der Biosphäre (Gaia-Theorie n. LOVELOCK) überfordert wird.

Die sich anbahnenden Prozesse sind in erster Linie auf eine nennenswerte Erhöhung des CO₂-Gehaltes der Erdatmosphäre zurückzuführen. Waldrodungen in der Antike und im frühen Mittelalter, Waldvernichtungen in der Gegenwart und die Verbrennung fossiler Kohlenstoffträger sind die Ursache für diesen Kohlendioxidanstieg.

Die von zahlreichen Klimatologen vorausgesagte Temperaturerhöhung und die sich daraus ergebenden verschiedenartigen meteorologischen Effekte können für verschiedene Pflanzenarten und Pflanzengesellschaften erhebliche Auswirkungen haben. Das gilt vor allem dort, wo sich diese Spezies bzw. Phytozönosen schon heute im ökologischen Grenzbereich befinden und durch die Klimaänderung ins ökologische Aus gedrängt werden.

Die durch Klimaänderungen ausgelöste Wandlung von Verbreitungsgebieten der Baumarten sowie Wettbewerbsverhältnissen zwischen den Baumarten werden in Verbindung mit methodischen Hinweisen anhand einiger Beispiele dargestellt. Verschiedene Fragen, z. B. der Düngeeffekt von CO₂ und die physiologische Reaktion bestimmter Spezies auf Erwärmung, bedürfen noch einer eingehenden Erforschung.

Auf der Basis der von Meteorologen vorausgesagten Klimaänderungen wird versucht, einige erste Schlußfolgerungen für die Waldbewirtschaftung abzuleiten. Sie bestehen zuerst in einer generellen Orientierung auf ökogerechten Waldbau, wobei hier von veränderlichen Standortbedingungen ausgegangen wird. Generelle Empfehlung ist die Gestaltung eines nach Baumarten, Alters- und Raumstruktur mannigfaltigen und dadurch resilienten und stabilen Waldes. Aus dieser Sicht werden Hinweise zur Baumartenwahl, Walderneuerung, Bestandesbehandlung und zum Waldschutz gegeben.

Abschließend wird unter Verweis auf zahlreiche Literaturangaben kurz auf Maßnahmen zur Drosselung weiterer CO₂-Emissionen und zum Entzug von Kohlenstoff aus der Atmosphäre eingegangen. Dabei wird der Schluß gezogen, daß die Erhaltung von Wäldern, eine große Kohlenstoffakkumulation in den Wäldern, Aufforstungen und längerfristige Kohlenstoffbindung durch Verbauung von Holz wertvolle Beiträge zur Verbesserung des Kohlenstoffhaushaltes der Erde sind, eine Lösung dieser Kardinalfrage der Menschheit ist aber nur durch drastische Reduktion der Verbrennung fossiler Kohlenstoffträger möglich!

Summary

Possible effects of a change in climate on the forests of Central Europe

Changes of climate greatly affect soil management and civilisation. The one in the offing, in contrast to those of the past, is set off by man himself. The high speed of change indicated here is especially problematic, because the speed of vegetation adaptation can probably not keep up with it. There is fear that the homeostatic regulatory function of the biosphere (Gaia-theory according to LOVELOCK) will be overburdened.

The processes in the offing can above all be attributed to a considerable CO₂-increase in the earth's atmosphere. Forest clearing in ancient times and during the early Middle Ages, forest destruction at the present time, and burning of fossile carbon are the cause for this carbon dioxide increase.

The temperature rise predicted by numerous climatologists and the different meteorological effects resulting from it may have considerable impact on various plant species and plant communities. This applies especially to species and phytozoenoses which are already today found in ecologically marginal spheres, and which will be pushed into ecological nonexistence by the climate change.

Using several examples, transformations of tree-species ranges and competitive conditions between tree species caused by climate changes are illustrated in connection with some methodological relevancies. Various questions, e.g. the fertilizer effect of CO₂ and the physiological reaction of certain species to warming, still require thorough investigation.

Based on the climate changes predicted by meteorologists the attempt is made to derive some preliminary conclusions for forest management. At first there should be a general orientation towards ecologically sound silviculture, in this case based on variable site conditions. General recommendation is to shape a resilient and stable forest i.e. one which is diverse in regard to tree species, age, and spatial structure. From this viewpoint, suggestions are made on choice of tree species, forest restoration, stand treatment, and forest protection.

Concluding and referring to numerous literature citations, measures to reduce further CO₂-emissions and to withdraw carbon from the atmosphere are briefly discussed. It is concluded that preservation of forests, high carbon accumulation in the forests, afforestations, and long-term bonding of carbon through using wood for construction are valuable contributions towards improving the earth's carbon balance. This cardinal question for mankind, however, can only be resolved through drastic reduction of the burning of fossile fuels!

Literatur

- BACH, W., 1987: Was können wir gegen die Auswirkungen einer zunehmenden Klimabeeinflussung durch Treibhausgase tun? *Forstwiss. Cbl.* 106, 276-288.
- BINKLEY, C. S.; LARSON, B. C., 1987: Simulated Effects of Climate Warming on the Productivity of Managed Northern Hardwood Forests. In: *Forest Decline and Reproduction. Regional and Global Consequences.* Ed. Kairiukstis L., Nilsson, S., Straszak, A. IIASA.
- BOTKIN, D. B., JANAK, J. F.; WALLIS, J. R., 1970: A Simulator for Northeastern Forest Growth. IBM Research Rep. RC 3140 IBM Yorktown Heights New York.
- 1972: Some Ecological Consequences of a Computer Model of Forest Growth. *J. Ecol.* 60, 849-872.
- 1973: Estimation of the Effects of Carbon Fertilisation on Forest Composition by Ecosystem Simulation. In: Woodwell, G. M., a. E. V. Pecan (Edit.) *Carbon and the Biosphere Rept. CONF-720510, At Energy Comm. NTIS Springfield Virginia, 328-344.*
- BROUWER, F.; FALKENBERG, M., 1989: Climate-Induced Water Availability Changes in Europe. Unpubl. rep. IIASA 1989 (zit. v. S. Nilsson: *Climate Change, Greenhouse Effects and European Forests. Inter Action Council Meeting in Cracow, 5-7 June 1989.*)
- BRUENIG, E. F., 1990: Forstwirtschaft und Klimaveränderung. *Allgem. Forstzeitschr.* 45, 258-261.
- Wald, Forstwirtschaft und Klimaveränderung. In: *Deutsche in Übersee (im Druck).*
- BUNDESFORSCHUNGSANSTALT FÜR FORST- UND HOLZWIRTSCHAFT, 1975: *Weltforstatlas.* Hamburg u. Berlin: Verlag Paul Parey.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN, 1990: *Der Treibhauseffekt. Gegenmaßnahmen und Anpassungsstrategien unter besonderer Berücksichtigung der Wälder der gemäßigten Zonen.* Schriften. Angewandte Wissenschaft H. 387.
- BURSCHEL, P., 1990: Das Menetekel Klimaänderung. *Allgem. Forstzeitschr.* 45, 255-257.
- BURSCHEL, P.; WEBER, M., 1988: Der Treibhauseffekt, Bedrohung und Aufgabe für die Forstwirtschaft. *Allgem. Forstzeitschr.* 43, 1010-1013.
- CANNELL, M. G. R., 1989: Climate Warming and Spring Phenology of Trees. In: Lavender, D. P. (ed.): *Woody Plant Growth in a Changing Chemical and Physical Environment.* In: *Proceedings Workshop IUFRO Working Party of Shoot Growth Physiology, July 1989.* For. Sc. Dep. Univ. of B. C. Vancouver, 283-295.
- CANNELL, M. G. R.; SMITH, J. R., 1986: Climate Warming, Spring bud-burst and Frost Damage on Trees. *J. Appl. Ecol.* 23, 177-191.
- CHARNEY, J., 1979: *Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment.* Washington.
- CHEN, R. S., PARRY, M. L., 1988: *Climate Impacts and Public Policy.* UNEP/IIASA Nairobi.
- CONKEY, L. E., 1986: Red Spruce Tree-Ring Widths and Densities in Eastern North America as Indicators of Past Climate. *Quaternary Research* vol. 26, 232-243.
- COOPER, C. F., 1983: Carbon Storage in Managed Forests. *Can. Journ. of Forest Research* vol. 13, 155-165.

- DARWIN, C., 1859: On the Origin of Species by Means of Natural Selection or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life. London.
- DOYLE, T. W., 1987: Seedling Response to CO₂ Enrichment under Stressed and Nonstressed Conditions. In: JACOBY, G. C., a. J. W. HORNBECK (eds): Proceedings of the Internat. Sympos. on Ecological Aspects of Tree-Ring-Analysis. CONF-8608144. Washington D. C. US-Dept. of Energy, 501-510.
- EMANUEL, W. R.; SHUGART, H. H., 1984: The Holdridge Life-Zone Classification: Climatic Change, Special Issue: Measuring Sensitivity of Climatic Change. Zit. bei PERRY and CARTER.
- EMANUEL, W. R.; SHUGART, H. H.; STEVENSON, M., 1985: Climatic Change and the Broad-Scale Distribution of Terrestrial Ecosystem Complexes. *Climatic Change* 7, 29-43.
- 1985: Respond to Comment: Climatic Change and the Broad-Scale Distribution of Terrestrial Ecosystem Complexes. *Climatic Change* 7, 457-460.
- ENQUETE-KOMMISSION, 1988: Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre. Dt. Bundestag Drucksache 11/3246. Bonn.
- ESSER, G., 1987: Sensitivity of Global Carbonpools and Fluxes to Human and Potential Climate Impacts. *Tellus* Bd. 39b, 245-260.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 1982: Conservation and Development of Tropical Forest Resources. Forestry Paper 37. Rome.
- FLOHN, H., 1988: Buchgesellschaft. Darmstadt, 1988: Das Problem der Klimaänderungen in Vergangenheit und Zukunft.
- FONDS DER CHEMISCHEN INDUSTRIE, 1987: Folienserie Umweltbereich Luft. Frankfurt/M.
- FRITKE, J., 1988: Aufforstung contra Treibhauseffekt. *Physik in unserer Zeit* 19, 149.
- FRITTS, H. C., 1976: Tree Rings and Climate. New York, Acad. Press.
- GOUDRIAAN, J., 1986: Simulation of Ecosystem Response to Rising CO₂ with Special Attention to Interfacing with the Atmosphere. In: ROSENZWEIG, C., and DICKINSON, R. (eds.): Climate-Vegetation Interaction Boulder CO: NASA. Office for Interdiscipl. Earth Studies P. O. Box 3000.
- GRAINGER, A., 1988: Estimating Areas of Degraded Tropical Lands Requiring Replenishment of Forest Cover. *Int. Tree Crops Journal* 5, 1/2.
- GRASSL, H., 1987: Klimaänderung durch erhöhte Spurenstoffgehalte in der Atmosphäre. *Forstwiss. Cbl.* 106, 236-248.
- GRAYBILL, D. A., 1987: A Network of High Elevation Conifers in the Western U. S. for Detection of Tree-Ring Growth Response to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide 1987: In: JACOBY, G. C., HORNBECK, J. W. (eds): Proceedings of the Internat. Sympos. on Ecological Aspects of Tree-Ring-Analysis. CONF-8608144. Washington D. C. US-Dept. of Energy, 463-474.
- GRAYSON, A. J., 1989: Carbon Dioxide, Global Warming and Forestry. Forest Commission Research Division Research Inform. Note 146, Farnham U. K.
- HARI, P.; H. AROVAARA, H., RAUNEMAA, T., HAUTOJARVI, A., 1984: Forest Growth and the Effects of Energy, Production. A Method for Detecting Trends in the Growth Potential of Trees. *Canad. Journ. of Forest Research* 14, 437-440.
- HOLDRIDGE, L. R., 1947: Determination of the World Plant Formations from Simple Climatic Data. *Science* 105, 367-368.
- 1964: Life Zone Ecology. Tropical Science Center. San Jose, Costa Rica.
- HOLLING, C. S., 1986: The Resilience of Terrestrial Ecosystems: Local Surprise and Global Change. In: CLARK, W. C., MUNN, R. E. (eds.): Sustainable Development of the Biosphere. Internat. Inst. for Appl. Systems Analysis (IIASA) Laxenburg, 292-317.
- HOUGHTON, R. A.; WOODWELL, C. M., 1989: Global Climatic Change. *Scientific American* Vol. 260, 4.
- JOHNSON, A. H., 1983: Red Spruce Decline in the Northeastern U. S.: Hypotheses Regarding the Role of Acid Rain. *J. Air Pollut. Contr. Ass.* 33, 1049-1054.
- KAPPEN, L., 1981: Ecological Significance of Resistance to High Temperature. In: LANGE, O. L.; NOBEL, P. S.; OSMUND, C. B.; ZIEGLER, H. (eds.): Physiological Plant Ecology. Response to the Physical Environm. New York. 439-474.
- KAUPPI, P.; POSCH, M., 1987: A Case Study of the Effects of CO₂-Induced Climatic Warming on Forest Growth and the Forest Sector. In: The Impact of Climatic Variations on Agriculture. Vol. 1. Assessments in Cool Temperature and Cold Regions. Reidel, Dordrecht, Netherlands.
- KELLOMÄKI, S.; HÄNNINEN, H.; KOLSTRÖM, T., 1988: Model Computation and the Impacts of the Climatic Change on the Productivity and Silvicultural Management of the Forest Ecosystem. *Silva Fennica* 22.
- KIMMINS, J. P.; LAVENDER, D. P., 1989: Implications of Climate Change for the Distribution of Biogeoclimatic Zones in British Columbia and for the Growth of Temperate Forest Species. In: LAVENDER, D. P. (ed.): Woody Plant Growth in a Changing Chemical and Physical Environment. Proceedings Workshop IUFRO-Working Party on Shoot Growth Physiology. July 1989. For. Sci. Dept. Univ. of B. C. Vancouver, 279-303.
- KLOPRIES, B.; BECKMANN, G.; 1989: Der Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in der Troposphärenluft - ein Kardinalproblem der Menschheit. *Forst u. Holz* 44, 191-199.

- KOHLMAIER, G. H.; JANACEK, A.; BENDEROTH, B.; KINDERMANN J.; KLAUDIUS, A.; 1989: Land Biota, Source or Sink of Atmospheric CO₂. Positive and Negative Feedbacks within a Changing Climate and Landuse Development. Conf. Atmosphere, Climate and Man. Milán, Jan. 1989.
- KRAMER, P. J., 1981: Carbon Dioxide Concentration, Photosynthesis and Dry Matter Production. *Bio Science* 31, 29–33.
- KRAMER, P. J.; SIONIT, N., 1985: Rising CO₂. Expected Effect on Tree Development and what Deficiencies in Knowledge we need to Remove. In: SHANDS, W. E. (ed.): Proceedings of the Conference on Rising CO₂ and Changing Climatic Forest Risks and Opportunities. Conserv. Foundation, Washington D. C.
- LAMB, H. H., 1989: Klima und Kulturgeschichte – Der Einfluß des Wetters auf den Gang der Geschichte. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt.
- LA MARCHÉ, V. C.; GRAYBILL, D. A.; FRITTS, H. C.; ROSE, M. R., 1984: Increasing Atmospheric Carbon Dioxide: Tree Ring Evidence for Growth Enhancement in Natural Vegetation. *Science* 225, 1019–1021.
- LANLEY, I. P.; CLEMENT, I., 1979: Present and Future National Forest and Plantation of the Tropics. *Unasylva* 31, 23.
- LARCHER, W. 1980: *Physiological Plant Ecology* 2. Aufl. Berlin: Springer.
- LAVENDER, D. P. (ed.), 1989: Woody Plant Growth in a Changing Chemical and Physical Environment. In: Proceedings Workshop IUFRO Working Party of Shoot Growth Physiology, July 1989. For. Sci. Dep. Univ. of B. C. Vancouver.
- LEMON, E. R., 1983: CO₂ and Plants. The Response of Plants to Rising Levels of Atmospheric Carbon Dioxide. Symposium 84, American Association for Advancement of Science. Westview Press Boulder, Colorado.
- LOVELOCK, J. E., 1979: *Gaia: A New Look at Life on Earth*. Oxford. UK.
- MARLAND, G., 1988: The Prospect of Solving the CO₂ Problem through Global Reforestation. Associated Unvers. Institute for Energy Analysis, TN, and Environmental Science. Div. Oak Ridge Nat. Laboratory.
- MARSCH, M., 1989: Biomechanische Modelle zur Quantifizierung der Tragfähigkeit von Einzelbäumen und Beständen gegenüber Schnee- und Windbelastung sowie darauf aufbauende Bestandesbehandlungsmaßnahmen mit Hilfe eines Simulationsmodells, dargestellt am Beispiel der Baumart Fichte. Diss. A. Techn. Univ. Dresden, Fakultät Bau-, Wasser- und Forstwes. Tharandt, 348.
- MATEJKA, V., 1976: Suma teplot hlavního vegetačního období jako ukazatel klimatu (Wärmesumme der Hauptvegetationsperiode als Maßstab des Klimas). *Lesnictvo* 22, 369–384.
- NEENAN, M., 1982: Short Rotation Forestry as a Source of Energy and Chemical Feedstock. In: *Energy from Biomass*. 2nd E. C. Conference Berlin.
- NILSSON, S., 1989: Climate Change, Greenhouse Effects and European Forests. In: Inter Action Council Meeting in Cracow, 5.–7. June 1989 (paper 26 p, n. publ.).
- OECHEL, W. C., STRAIN, B. R., 1985: Native Species Response to Increased Atmospheric Carbon Dioxide Concentration. In: STRAIN, B. R.; CURE, J. D. (eds): *Direct Effects on Increasing Carbon Dioxide on Vegetation*. Washington. 118–154.
- OLSON, J. S.; WATTS, J. A.; ALLISON, L. J., 1983: Carbon in Live Vegetation of Major World Ecosystems. Rep. ORNL-5862 Oak Ridge Tennessee Oak Ridge Laboratory.
- PARKER, M. L., 1987: Recent Abnormal Increase in Tree-Ring Widths: A Possible Effect of Elevated Atmospheric Carbon Dioxide. In: JACOBY, G. J., HORNBECK, J. W., (eds): *Proceedings of the Internat. Sympos. on Ecological Aspects of Tree-Ring-Analysis*. CONF-8608144. Washington D. C. US-Dept. of Energy 511–521.
- PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C., 1964: *Textbook of Wood Technology*. New York McGraw Hill.
- PARRY, M. L., 1988: Effects of Future Climatic Changes. EK-Drucksache 11/30 Bonn, 67–71.
- REGEHR, D. L.; BAZZAZ, F. A.; BOGGESE, W. R., 1975: Photosynthesis, Transpiration and Leaf Conductance of *Populus deltoides* in Relation to Flooding and Drought. *Photosynthetica* 9 52–61.
- ROTTY, R. M., 1986: Estimates of CO₂ from Wood Fuel Based on Forest Harvest Data. *Climate Change* 9, 311–326.
- ROTTY, R. M.; MASTERS, 1985: Zit. in: BURSCHEL, P.; WEBER, M., (1988): Der Treibhauseffekt – Bedrohung und Aufgabe für die Forstwirtschaft. *Allgem. Forstzeitschr.* 43, 1010–1013.
- SCHERING, H., 1989: Auch der Wald stabilisiert das Weltklima. *Österr. Forstztg.*, 69–70.
- SCHÖNWIESE, C. D., 1988: Der Einfluß des Menschen auf das Klima. *Naturwiss. Rundschau* 41, 387–390.
- SCHÖNWIESE, C. D.; DIEKMANN, B., 1987: *Der Treibhauseffekt – Der Mensch ändert das Klima*. Stuttgart: Dt. Verlagsanst.
- SCHROEDER, P.; WINJUM, J. K., 1990: Can Forestation help to slow the Increase of Atmospheric Carbon Dioxide? XIX. IUFRO World Congr. Aug. 5–11, 1990. Montreal, Canada (Manuskri.).
- SEDJO, R. A., 1989: Forests: A Tool to Moderate Global Warming? *Environment* 31, 14–20.
- SEDJO, R. A., A. A. M. SOLOMON: Climate and Forests. In: ROSENBERG, N. J., W. E. EASTERLING III, P. R. CROSSON a. J. Darmstadter: *Greenhouse Warming: Abatement and Adaptation*. Proceedings of a Workshop. Washington D. C. 1988, 105–119.

- SHUGART, H. H., ANTONOVSKY, M. J., JARVIS, P. G., STANFORD, A. P., 1986: Climatic Change and Forest Ecosystems. In: BOLIN, B., et al. (eds): Climatic Change and Forest Ecosystems. New York: I. Wiley.
- SHUGART, H. H., WEST, D. C.: Development of an Appaladuen Deciduous Forest Succession Model and its Application of the Impact of the Chestnut Blight. *Journ. of Environment Management* 5 (1977) 161-179.
- 1980: Forest Succession Models. *Bio Science* 30, 308-313.
- 1981: Long Term Dynamics of Forest Ecosystems. *American Scientist* 69, 647-652.
- SMITH, U. H., 1987: Changing Forest Conditions: Forest Dynamics in a Dynamik Atmospheric. Proceedings NE Society of American Foresters Conference.
- SOLOMON, A. M., 1988: Ecosystem Theory Required to Identify Future Forest Responses in Changing CO₂ and Climate in Ecodynamics. In: Contribution to Theoretical Ecology. Ed.: W. WOLFF, J. SOEDER, F. R. DREPPER. New York: Springer, Berlin, Heidelberg.
- SOLOMON, A. M., THARP, M. L.; WEST, D. C.; TAYLOR, G. E.; WEBB, J. M.; TRIMBLE, J. C., 1984: Response of Unmanaged Forests to CO₂-Induced Climate Change: Available Information, Initial Tests and Data Requirements (DOE TR 009). U. S. Dept. of Energy, Washington D. C.
- SOLOMON, A. M.; WEST, D. C., 1985: 6. Potential Responses of Forests to CO₂-Induced Climate Change. In: M. R. WHITE (ed.): Characterization of Information Requirements for Studies of CO₂ Effects: Water Resources, Agriculture, Fisheries, Forests and Human Health. United States Dept. of Energy DDE/ER-0236, Dez. 1985, Dist. Cat. UC-11, 145-169.
- 1986: Atmospheric Carbon Dioxide Change: Agent of Future Growth or Decline? In: TITUS, J. G. (ed.): Effects of Changes in Stratospheric Ozone and Global Climate. Vol. 3, Climate Change United Nat. Envir. Progr., 23-38.
- 1987: Simulating Forest Responses to Expected Climate Change in Eastern North America. Applications to Decision Making in the Forest Industry. In: The Greenhouse Effect, Climate Change and U. S. Forests. Eds.: SHANDS, W. E.; HOFFMANN, J. S.: The Conserv. Foundation Washington D. C., 189-207.
- STEPONKUS, P. L., 1981: Responses to Extreme Temperatures: Cellular and Sub-Cellular Bases. In: LANGE, O. L.; NOBEL, P. S., OSMOND, C. B.; ZIEGLER, H. (eds.): *Physiol. Plant Ecology I Response to the Physical. Environments*. New York: Springer.
- STRAIN, B. R.; CURE, J. R. (eds) 1985: Direct Effects of Increasing Carbon Dioxide on Vegetation (DOE/ER-0238). U. S. Dept. of Energy, Washington, D. C. Available from NTIS, Springfield, Virginia.
- TELEWSKI, F. W.; STRAIN, B. R., 1987: Densitometrie and Ring Width Analysis of Three-Year-Old *Pinus taeda* L. and *Liquidambar styraciflua* L. Grown under Three Levels of CO₂ and Two Water Regimes. In: JACOBY, G. C.; HORNBECK, J. W. (eds.): Proceedings of the Internat. Sympos. on Ecological Aspects of Tree-Ring-Analysis. CONF-8608144. Washington D. C. US-Dept. of Energy, 494-500.
- THOMASIU, H., 1988: Sukzession, Produktivität und Stabilität natürlicher und künstlicher Waldökosysteme. *Arch. Naturschutz u. Landschaftsforsch.* 28, 3-21.
- 1990a: Der Treibhauseffekt in seinen Auswirkungen auf die Waldökologie und Forstwirtschaft. *Geogr. Ber.* 35, 105-118.
- 1990b: Dynamik natürlicher Waldgesellschaften im Osterzgebirge, ihre Modifikation durch Umweltveränderungen und deren Bedeutung für Rekonstruktionsmaßnahmen. *Arch. Naturschutz u. Landschaftsforsch.* 30, 161-176.
- 1990c: Sukzessionstypen von Waldökosystemen der gemäßigten und der borealen Zone. XIX. Weltkongreß der IUFRO 5.-11. 8. 1990. Montreal. Bd. 1, 128-148.
- 1990d: Waldbau 1: Allgemeine Grundlagen des Waldbaus. Lehrbrief für das Fernstudium Forstingenieurwesen. Techn. Univ. Dresden.
- THOMASIU, H., BUTTER, D., MARSCH, M., 1987: Maßnahmen zur Stabilisierung von Fichtenforsten gegenüber Schnee- und Sturm Schäden. *Mikrofish in Beitr. Forstwirtschaft.* 21, 4.
- TRABALKA, J. R. (Edit.), 1985: Atmospheric Carbon Dioxide and the Global Carbon Cycle (DOE/ER-0239) U. S. Dept. of Energy, Washington D. C. Available from NTIS Springfield, Virginia.
- TREXLER, M. C.; GAETH, P. E.; KRAMER, J. M., 1989: Forestry as a Response to Global Warming: an Analysis of the Guatemala Agroforestry and Carbon Fixation Project. Edit.: World Resources Institute Washington D. C.
- UNEP/GEMS, 1987: Environment Library No 2, 1987 (zit. v. Nilsson, S., 1989).
- WOODWELL, G. M., 1987: The Warming of the Industrialized Middle Latidus. Paper presented at the Workshop on Developing Policies for Responding to Future Climate Change. Villach, Austria.
- ZAVITKOVSKI, J., ISEBRANDS, G., 1983: Biomass Production and Energy Accumulation in the Worlds Forests. *The Seventh Internat. FPRS Industr. Wood Energy Forum* 83, 1, 12-22. Forest Products Research Society Madison Wisc.

Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. Dr. h. c. HARALD THOMASIU, Technische Universität Dresden, Abt. Forstwirtschaft, Institut für Waldbau und Forstschutz, Piennner Straße 8, O-8223 Tharandt, Bundesrepublik Deutschland