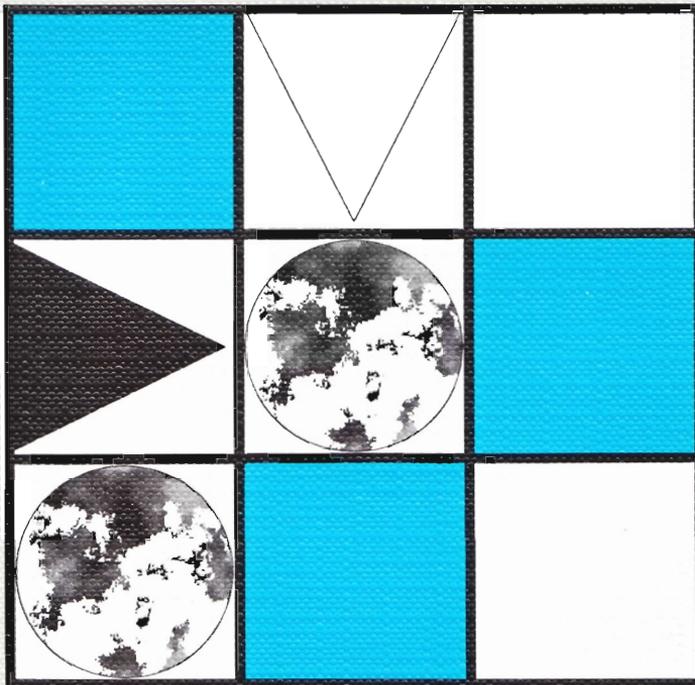


Zukunft für die Erde

Nachhaltige Entwicklung
als Überlebensprogramm

Band 2: Dimensionen der ökologischen Krise



Herrenalber Protokolle 110 

Anselm Kratochwil, Jürgen Rochlitz, Hans Immler
Charlotte Schönbeck, Klaus Nagorni

Zukunft für die Erde
Nachhaltige Entwicklung als Überlebensprogramm

Band 2: Dimensionen der ökologischen Krise

Beiträge von Tagungen der
Evangelischen Akademie Baden
zum Thema Nachhaltigkeit 1994-6

ISBN 3-89674-109-8 (Gesamtausgabe)
ISBN 3-89674-111-X (Band 2)

HerrenalberProtokolle

Schriftenreihe der Evangelischen Akademie Baden
Band 110 (1. Auflage 1996)

© bei den Autoren, soweit nicht anders angegeben
Herausgeber: Evangelische Akademie Baden, Vorholzstr. 5,
D-76137 Karlsruhe [Postfach 2269, D-76010 Karlsruhe]
Redaktion: Klaus Nagorni; Ralf Stieber
Satz: Hannelore Kletti; Petra Bulling
Titelgestaltung: Ralf Stieber
Druck: grube & speck, Karlsruhe

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapieranteilen
ohne optische Aufheller

ISSN 0934-6007

Vorwort

Wovon ist eigentlich die Rede, wenn wir von "ökologischer Krise" reden? Während die einen die ökologische Zukunft unseres Planeten in Schwarztönen zeichnen und apokalyptische Anklänge unüberhörbar werden, meinen andere, daß eher Öko-Optimismus angesagt sei. Vieles sei mittlerweile erreicht, das Umweltthema fest im gesellschaftlichen Bewußtsein verankert, die Industriegesellschaft werde mit ihrem Erfindungsreichtum die ökologischen Probleme, die sie heraufgeführt habe, auch in den Griff bekommen.

Auf der Jahrestagung des Umweltbeirats der Evangelischen Landeskirche in Baden im Januar 1996 hat der Biologe und Ökologe Anselm KRATOCHWIL, Osnabrück, die Auswirkungen der menschengemachten Schädigung unserer Umwelt auf die verschiedenen Umweltmedien in systematischer Weise dargestellt und damit eine präzise Beschreibung dessen gegeben, was mit "ökologischer Krise" gemeint ist. Sein spannender und aufrüttelnder Beitrag macht den umfangreichsten Teil dieses Buches aus, das als Band 2 in der Reihe unserer Veröffentlichung "Zukunft für die Erde" erscheint.¹

Auf eindrucksvolle Weise wird deutlich, daß es – gerade auch in wirtschaftlich schwierigeren Zeiten – für die Umweltpolitik kein Moratorium geben darf. Mag es auch für die Politik als opportun erscheinen, ökologische Notwendigkeiten zu Gunsten ökonomischer Erfordernisse zurückzustellen, für den Naturhaushalt hat dies katastrophale Folgen. Denn die sich aus der Kumulation von Schadstoffen und der Unumkehrbarkeit von Schäden ergebende ökologische Rechnung wächst weiter, und die Frage, wer sie wann bezahlt, bleibt offen.

Daß die ökologische tatsächlich eine ökonomische Krise ist, weil die Krise der Natur wirtschaftlich produziert ist, macht der Volkswirtschaftler Dr. Hans IMMLER, Kassel, klar. Seine Grundthese: Wer die Krise mit der Natur bewältigen will, muß den wirtschaftlichen Umgang mit ihr verändern. Dabei müssen die Energieflüsse und Stoffkreisläufe so organisiert werden, daß sie mit den Stabilitätsbedingungen der Ökosysteme verträglich sind.

¹ Vgl. EVANGELISCHE AKADEMIE BADEN (Hg.), Zukunft für die Erde. Nachhaltige Entwicklung als Überlebensprogramm, Bd. 1: Sustainable Development – was ist das?, Bd. 3: Wieviele Menschen trägt die Erde?, Karlsruhe 1996.

Natur darf dabei nicht ausschließlich als Produktionsfaktor betrachtet werden, sondern ebenso sehr als "produzierte Natur", deren Ziele und Normen gesellschaftlich neu definiert werden müssen.

Die Physik- und Technikhistorikerin Charlotte SCHÖNBECK, Heidelberg, beschäftigt sich in ihrem Beitrag mit der Natur unter dem Zugriff der Technik. Während Technik und naturwissenschaftliche Erkenntnisse einst die einzigen Hilfsmittel waren, mit denen der Mensch eine als übermächtig erlebte Natur beherrschen und ihr ihre Schätze entlocken konnte, erscheinen sie heute als Instrumente, um die noch vorhandenen, einigermaßen intakten Bereiche der Natur zu bewahren. Das Konzept der Nachhaltigkeit vermag dabei eine Brücke zu schlagen zwischen Natur und Technik.

Beide Beiträge wurden gehalten auf der Tagung "Technik und Natur an der Wende zum Dritten Jahrtausend", die in Kooperation mit dem Verein Deutscher Ingenieure (VDI) im Januar 1996 in Bad Herrenalb stattfand. Hinzugekommen ist der Beitrag des Bundestagsmitglieds Jürgen ROCHLITZ, Bonn, zum Thema "Chemiewende und Nachhaltigkeit". Er fordert die Anwendung des Nachhaltigkeitsgrundsatzes auf die Chemiepolitik aus der Perspektive einer Partei, die schon früh die Brisanz der Umweltthematik erkannt hat. In der Verknüpfung mit den grundlegenden Aussagen des Beitrags von KRATOCHWIL soll deutlich werden, in welcher Richtung - nach der diagnostischen Beschreibung der Dimensionen der ökologischen Krise - Ansätze einer Problemlösung zu suchen sind.

Karlsruhe, im Juli 1996

Klaus Nagorni
Dr. Ullrich Lochmann

Inhalt

Vorwort	5
<i>Anselm Kratochwil</i>	
Die Umweltkrise aus ökologischer Sicht Historische Entwicklung und aktuelle Bilanz	7
<i>Hans Immler</i>	
Natur als Produktionsfaktor und als Produkt Gedanken zu einer physisch begründeten Ökonomie	153
<i>Charlotte Schönbeck</i>	
Technik und Natur an der-Wende zum dritten Jahrtausend	171
<i>Jürgen Rochlitz</i>	
Chemiewende und Nachhaltigkeit Ein Plädoyer für eine andere Chemiepolitik	204
<i>Klaus Nagorni</i>	
Wovon lebt der Mensch? Vom Glück und seinen Voraussetzungen	219
Verfasser	224

Die Umweltkrise aus ökologischer Sicht

Historische Entwicklung und aktuelle Bilanz

Anselm Kratochwil

Unter "Umwelt" verstehen wir im folgenden die "ökologische Umwelt" des Menschen als Komplex der direkt und indirekt auf ihn einwirkenden Faktoren der Außenwelt (Ökofaktoren). Sie umfaßt dabei sowohl die unmittelbar für sein Leben notwendigen Faktoren als auch die übrigen auf ihn wirkenden Einflüsse der Umgebung. Die ökologische Umwelt des Menschen beinhaltet somit das gesamte Wirkungsfeld der ihn positiv oder negativ beeinflussenden Umweltbeziehungen in dem von ihm besiedelten Lebensraum.

Der Mensch hat diese Umwelt im Laufe der Geschichte nicht nur regional, sondern inzwischen auch global verändert. So werden von ihm allein über 60.000 chemische Verbindungen, die von industrieller Bedeutung sind, in die globalen Kreisläufe entlassen (VERBEEK 1994) und jährlich produziert er mehr als 250 Millionen Tonnen organische Chemikalien (KORTE 1992). Mehr und mehr können die empirischen Daten zur Umweltsituation nur in der Richtung interpretiert werden, daß die größte Gefahr für die Zukunft des Menschen die durch ihn selbst hervorgerufene Umweltveränderung darstellt (NISBET 1994). Mit unmittelbarem politischen Handeln weltweit und gemeinsam dieser selbstzerstörenden Entwicklung Einhalt zu gebieten, ist die Botschaft der Konferenz der Vereinten Nationen "Umwelt und Entwicklung" (UNCED) im Juni 1992 in Rio de Janeiro. 178 Staaten haben auf den dringenden Handlungsbedarf zur Rettung der Erde hingewiesen. Das Motto "Global denken, regional handeln" müßte für die Umsetzung oberste Handlungsmaxime sein; die Forderung nach einem Welt-Umwelt-Sicherheitsrat ergibt sich daraus und ist dringender denn je.

Aus der wachsenden Sorge um die Bewahrung der natürlichen Lebens- und Entwicklungsgrundlagen, und zwar nicht nur für den Menschen, sondern für das Leben auf dieser Erde allgemein, erwachsen gewichtige Fragen:

- Welches Ausmaß hat die Umweltkrise angenommen?
- Wie sieht eine wünschenswerte Welt von morgen aus?
- Was müssen wir tun, wie müssen wir handeln und welche Handlungen müssen wir unterlassen, um das Ziel zu erreichen, eine Umwelt für alle Völker unserer Erde auf Dauer zu sichern, die weder gefährdend, noch lebensbedrohend oder gar vernichtend sein darf?

Der Lebens- und Wirkungsraum des Menschen hat sich im Laufe seiner kulturellen Entfaltung immer weiter ausgedehnt. Bessere Ausnutzung von Nahrungsquellen und eine zunehmende Emanzipation von den Naturgefahren und Lebensbedrohungen haben zu einer gewaltigen Bevölkerungsexplosion geführt. Folglich wuchs der Einfluß auf die Natursphäre mit ihrem Luft-, Wasser-, Boden- und Gesteinsbereich und auf die Lebewelt. Da menschliche Existenz ohne die Nutzung von Naturressourcen nicht möglich ist, muß jeder Einfluß auf die Natursphäre Rückwirkungen auf die Umwelt des Menschen haben. Mit steigender Intensität haben sich die weltweiten Umweltveränderungen heute zu einer lebensbedrohenden Gefahr für den Menschen entwickelt, so daß wir allgemein von einer "globalen Umweltkrise" sprechen können.¹ Das "kulturell" bedingte "Erbe von Umweltschäden", das sich von Generation zu Generation vergrößert, ist heute bereits zu einer erheblichen Last geworden.

Bei der Analyse der kulturellen Evolution zeigt es sich, daß der Mensch es im Laufe seiner Geschichte immer versucht hat, bis an die Grenze und an die Tragfähigkeit der jeweiligen Nutzungssysteme vorzudringen, zunächst noch im Einklang mit der Natur,² dann aber im Laufe der Zeit mit einem immer stärkeren Einfluß und immer größeren Auswirkungen. Dabei wird deutlich, daß es Umweltkrisen schon mehrfach im Laufe der Menschheitsgeschichte gegeben hat. Durch intelligentes und zielstrebiges Verhalten konnte der Mensch diese Krisen bisher bewältigen, in vielen Fällen waren sie sogar Voraussetzung, um zu wesentlichen Fortschritten in der Bewältigung der Natursphäre zu kommen. Dabei ist es auffällig, daß der Mensch

¹ "Umweltkrise" bedeutet hier eine durch menschliches Fehlverhalten ausgelöste und das menschliche Leben gefährdende Umweltveränderung (Umweltbeeinträchtigung) im Sinne einer nicht-beabsichtigten Folgewirkung menschlichen Handelns. Hierbei ist der Mensch Täter und Opfer zugleich, die Umweltkrise wird damit für den Menschen zur Überlebenskrise.

² Zum naturkonformen Verhalten von Naturvölkern siehe KURT (1982), SCHRÖDER (1988), weitere Beispiele und Gegenbeispiele in HARBORTH (1991).

im Laufe seiner langen Geschichte in der Regel das konsequente Handeln dem prospektiven vorzog. Er erwies sich in der Vergangenheit mehr als "Krisenbewältiger" denn als "Krisenverhinderer".

Zur Bilanzierung der heutigen Situation sollen im folgenden die verschiedenen Sphären mit ihren anthropogen bedingten kritischen Belastungen näher analysiert werden:

- *Atmosphäre* = Luftschicht,
- *Hydrosphäre* = Gewässer (Ozeane, Seen, Flüsse, Grundwasser) und *Kryosphäre* (polare Eisschilde, Meereis, Gebirgsgletscher, Permafrostböden),
- *Lithosphäre* = Erdkruste (einschließlich biogener Ablagerungen: Sedimente, fossile Lagerstätten),
- *Pedosphäre* = Boden (oberste biogen entstandene Verwitterungsschicht der Erdkruste),
- *Biosphäre* = Lebewelt (Vegetation und Tierwelt, einschließlich Pilze und Mikroorganismen).

Die Vielfalt der verschiedenen Umwelteinwirkungen und -veränderungen ist sehr groß, und die kausalen Zusammenhänge und Verknüpfungen sind außerordentlich komplex. Dennoch sei der Versuch unternommen, die heutige "ökologische Situation", unser heutiges "Erbe an Umweltschäden", als wichtige Grundvoraussetzung für zukünftiges verantwortungsbewusstes Handeln zu analysieren. Kenntnisse der Umweltzusammenhänge und -veränderungen allein reichen jedoch nicht aus, um eine Krise zu überwinden. Ein wichtiger dazu parallel laufender Schritt muß in der Ursachenforschung menschlichen Handelns selbst liegen. Es geht dabei u. a. um die "biologischen" Grundlagen des Menschen, seine zum Teil auch angeborenen Verhaltensweisen, die eine Umweltzerstörung erst möglich gemacht haben. Darauf aufbauend müssen Wege aus der Krise gefunden werden, die den Einsatz kultureller "Errungenschaften" und neuer fortschrittlicher Techniken erfordern. Voraussetzung ist jedoch bei allen realistischen Initiativen, daß sowohl die Grenzen menschlicher Möglichkeiten als auch die Grenzen der Umweltbelastungen Berücksichtigung finden. Nur durch große Anstrengungen ist ein weiteres würdiges Leben auf dem Planeten Erde dauerhaft gewährleistet und eine Entwicklung für die Zukunft der Menschheit und nicht gegen sie möglich.

Zur Bevölkerungsentwicklung und zur kulturellen Evolution des Menschen

Ursache der globalen Umweltkrise ist primär die exponentiell angewachsene Bevölkerungszahl (Abb. 1).

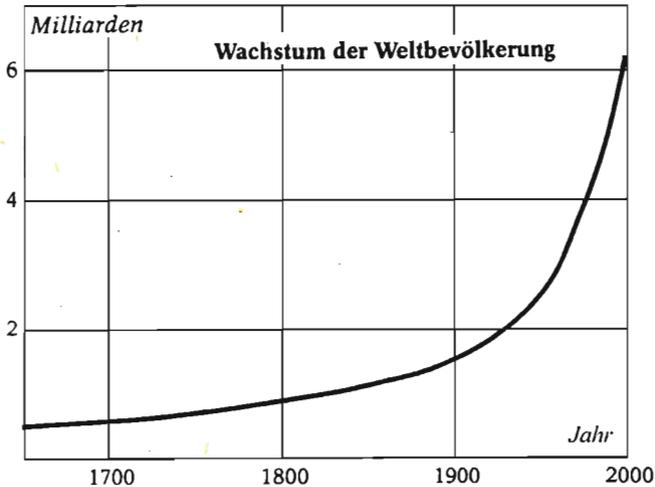


Abb. 1: Exponentielles Wachstum der Menschheit von Beginn der "Industriellen Revolution" an. 1991 betrug die Wachstumsrate 1,7 %, was einer Verdopplungszeit der Menschheit von 40 Jahren entspricht (verändert nach MEADOWS u. a. 1992).

Die Tragfähigkeit unseres Planeten ist dabei lokal schon weit überschritten. Unter Tragfähigkeit³ versteht man diejenige Anzahl von Menschen, die bei den gegebenen Umweltbedingungen auf Dauer unseren Planeten besiedeln kann. Im wesentlichen sind es die Ansprüche der Menschen an Raum, Nahrung und einige weitere Ressourcen, die die erheblichen Veränderungen in der globalen Umweltsituation hervorgerufen haben. Mit der Bevölkerungszahl steigen zwangsläufig und exponentiell als Folge Raumbedarf, Nahrungsbedarf, Ressourcenbedarf (Abb. 2).

³ Zum Begriff "Tragfähigkeit" = "Umweltkapazität" siehe SCHAEFER (1992), KLÖTZLI (1993).

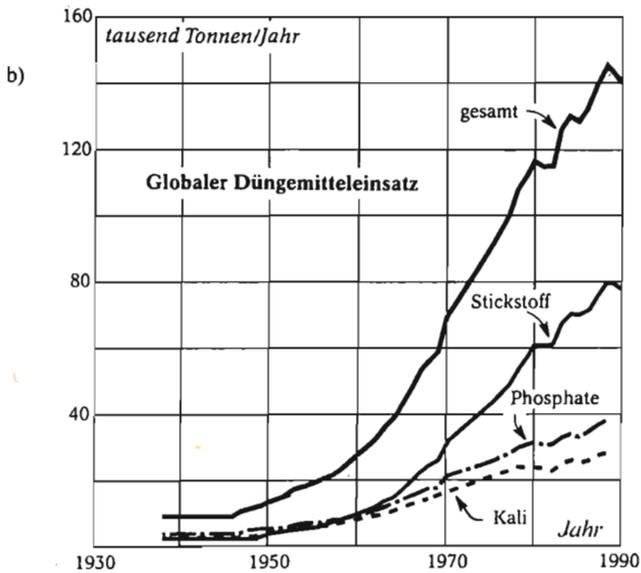
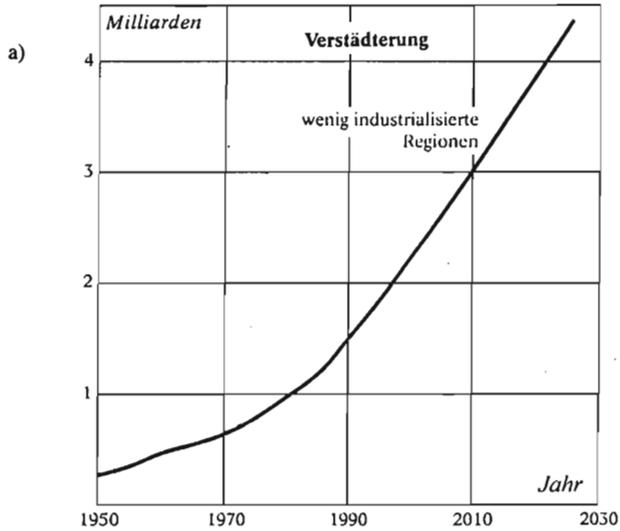
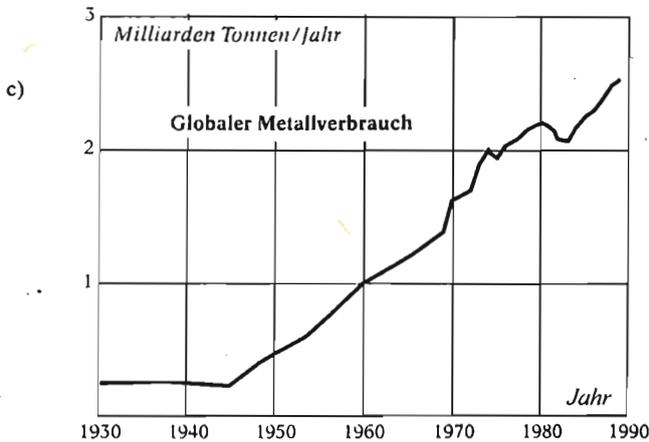


Abb. 2: Exponentielles Wachstum verschiedener anthropogen beanspruchter Größen (verändert nach MEADOWS u. a. 1992).

a) Ressource "Raum". Beispiel: Ausmaß der Verstädterung insbesondere in den weniger industrialisierten Regionen der sogenannten Dritten Welt (Verdopplungszeit etwa 20 Jahre).

b) Ressource "Ernährung". Beispiel: globaler Düngemiteleinatz (Verdopplungszeit etwa 15 Jahre nach 1970).



c) Andere Ressourcen, Beispiel: globaler Metallverbrauch bei einer ebenfalls exponentiell wachsenden industriellen Produktion.

Negative Umweltwirkungen entstehen im wesentlichen immer durch die Abgabe von nicht mehr benötigten Stoffen bzw. Energien. Diese sind im wesentlichen für die Krise verantwortlich; sie wachsen mit zunehmender Bevölkerungszahl und "industrieller" Entwicklungshöhe.

Unser "Erkenntnisapparat" (WUKETTIS 1981) ist nur auf "lineare Strukturen und Phänomene" und damit "lineares Denken" phylogenetisch adaptiert (siehe DÖRNER u. a. 1983). Daher ist es für den Menschen nicht unmittelbar möglich, die Folgen des exponentiellen Wachstums abzuschätzen, es sei denn, er macht sich die einfache Exponentialfunktion $N_t = N_0 \times e^{rt}$ (N_t = Anzahl Elemente zu einem Zeitpunkt t , N_0 = Anzahl Elemente zu einem Zeitpunkt 0, r = Wachstumsrate) intellektuell klar: Nimmt man ein Blatt Papier und faltet es im Gedankenexperiment erst einmal, dann zweimal, und so weiter, dann wächst der Papierstoß. Wie dick ist er nach 40 Faltungen? Der Stoß würde auf keinen Schreibtisch mehr passen; er wäre 350.000 Kilometer hoch und berührte den Mond (MEADOWS u. a. 1992).

Es ist ein Grundgesetz der Populationsbiologie, daß jede Population in einer raum- und ressourcenbegrenzten Umwelt nur so lange exponentiell wachsen kann, bis sie ihre Kapazitätsgrenze erreicht hat (Abb. 3).

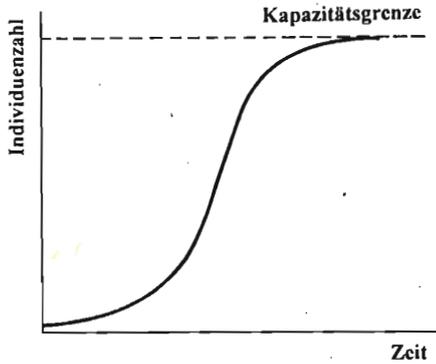


Abb. 3: Logistische sigmoide Wachstumskurve mit einer Stabilisierung der Individuenzahl an der Kapazitätsgrenze (nach MÜLLER 1984).

Diese wird im wesentlichen bestimmt durch das Faktorengefüge Raum und Nahrung. Der Mensch hat es durch seine kulturellen und dabei insbesondere technischen und medizinischen Errungenschaften besonders gut verstanden, diese Kapazitätsgrenze immer weiter heraufzusetzen (Abb. 4).

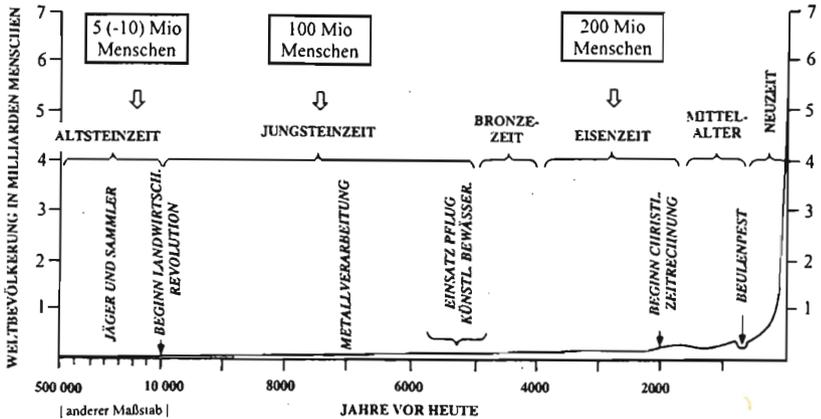


Abb. 4: Entwicklung der Weltbevölkerung vom Paläolithikum bis zur Neuzeit (in Anlehnung an EHRlich u. a. 1977).

Bestimmte kulturelle Errungenschaften führten in der Menschheitsgeschichte zu einer erheblichen Kapazitätssteigerung, so etwa durch Erfindungen und Höherentwicklungen im Bereich der Werkzeuge, im

Wohnungsbau und Kleidung. Gesellschaftlich "durchschlagende" Erfindungen und damit in Zusammenhang stehende kulturelle Höherentwicklungen erfolgten häufig aus Notsituationen und Krisen heraus: unvorhersagbare natürliche Umweltveränderungen (Klimaänderungen) oder Verknappung der Ressourcen (zu jener Zeit Nahrung, Holz). Ein wesentliches Ziel der Menschen lag immer in dem Streben nach Vergrößerung (Maximierung) des jeweils knapp gewordenen Nahrungs- und Raumangebotes. Die Handhabung des Feuers (in Verbindung mit der Erfindung der Keramik) zum Aufschließen neuer Nahrung, aber auch zur Schaffung von Offenland (Waldrodung) für die Jagd (und später für landwirtschaftliche Inkulturnahme) war z. B. ein wichtiger Entwicklungsschritt für höhere Populationszahlen.⁴ Verfeinerte Jagdtechniken setzten die Weiterentwicklung von Kommunikationsmitteln voraus, diese wiederum höhere intellektuelle Fähigkeiten.

Etwa seit 70.000 v. Chr. entwickelten sich die spezialisierten Sammler- und Jägerkulturen (Anfang Jüngere Altsteinzeit). In Folge kam es zu einer Akkumulation, Differenzierung und Spezialisierung von Kulturgütern, zu einer großen Vielfalt der Waffen- und Werkzeugformen. Erst in dieser Zeit sprechen wir vom *Homo sapiens*, wobei der Zeitpunkt des Erwerbs linguistischer und sozialer Fähigkeiten um 35.000 v. Chr. anzusetzen ist (BUTZER 1977). Die Tragfähigkeit pro km² besiedelbarer Fläche betrug in der Sammler- und Jägerzeit im Paläolithikum 0,01 bis einige wenige Einwohner, dies in Abhängigkeit von der jeweiligen Region (Vegetationszone) und dem Bestand an Großtieren. Insgesamt 5 (-10) Millionen Menschen faßte zu dieser Zeit die Erde, vielleicht waren es aber auch nur 3-4 Millionen (nach EHRlich u. a. 1977). Bereits zu jener Zeit war die Kapazitätsgrenze bei damaligem Produktionsniveau vollständig ausgeschöpft (MARKL 1980).

Interessant ist die Tatsache, daß eine Besiedlung auch vegetationsarmer Kältegebiete Ende der letzten Eiszeit (Kältesteppe und karge Tundren) stattfand. Ein wesentlicher Grund waren die großen und ergiebigen Tierherden (Mammut, Rentier). Der Lebensraum des Mammutjägers umfaßte die Kältesteppe und Tundren des nördlichen Eurasiens, die der Rentier- und Pferdejäger die südlicher gelegenen Strauchtundren (z. B. in Südwestdeutschland). Die Entwicklung jägerischer Kulturen läßt sich auch in ein-

⁴ Zur Bedeutung des Feuers für die Entwicklung der Zivilisation siehe GOUDSBLOM (1995).

zelen außereuropäischen Erdteilen belegen: in den Savannengebieten Afrikas, in den Trockenzonen Nord- und Mittelamerikas. Interessant ist in allen Fällen der Zusammenhang zwischen Jägern und Offenlandgebieten.

Die Paläolithiker hatten regional bereits erheblichen Einfluß auf die vorhandenen Tierpopulationen genommen und sich damit wahrscheinlich selbst in eine "Krise gestürzt". Einer der größten Fundorte altsteinzeitlicher Siedlungen (aus der Zeit zwischen 29.000 und 24.000 v. Chr.) liegt bei Predmost in Mähren, wo ein Knochenlager von über 1000 Mammuts gefunden wurde (HOCK 1994). An einer anderen Fundstelle (Solutr  in Burgund), datiert auf 23.000 v. Chr., entdeckte man die Überreste von annähernd 25.000-100.000 Pferden (HOCK 1994, GOUDIE 1994). Wie intensiv bereits zu der Zeit des Jung-Paläolithikum die Mammutsteppen vom Menschen besiedelt waren, zeigt z. B. die Tatsache, daß in der Ukraine bisher über 500 paläolithische Fundstellen entdeckt wurden.

Man nimmt an, daß das Aussterben bestimmter Großsäuger (Mammut, Wollnashorn, Steppenbison und Wildpferd) durch Jagd erfolgte ("Pleistozäner Overkill"); siehe MARTIN (1967, 1974). Wenngleich es auch Alternativ-Hypothesen gibt (REED 1970, GRAYSON 1977, 1984, MARTIN & WRIGHT 1967, MARTIN & KLEIN 1984), ein schneller, tiefgreifender Klimawechsel soll am Ende der letzten Eiszeit den späteiszeitlichen Großsäugern die Nahrungsgrundlagen entzogen haben, ist die Koinzidenz zwischen dem Zeitpunkt des Aussterbens von Großsäugern und dem Höhepunkt der weltweiten altsteinzeitlichen Besiedlungsphase bemerkenswert: in Europa und Nordasien vor etwa 20.000-10.000 Jahren und in Südamerika vor etwa 12.000-10.000 Jahren (MARTIN 1982, 1984). Ähnliche Zusammenhänge lassen sich auch aus anderen Teilen der Erde nachzeichnen. Vor 30.000-35.000 Jahren wanderte der Mensch in Australien ein und die dortige Großtierfauna verschwand (MURRAY 1984). In Amerika handelte es sich immerhin um Arten aus 30 verschiedenen Tiergattungen, die plötzlich ausgelöscht wurden. Aber auch in der folgenden Epoche, der sogenannten "Neolithischen Revolution", ging dieser Prozeß rascher Verluste in der Tierwelt voran, so z. B. mit der Besiedlung Madagaskars, dem Vordringen der Polynesier nach Neuseeland und Hawaii.

Zahlreiche Autoren kommen zu dem Schluß, daß in der Frage des Aussterbens der Megafaunen nach derzeitigem Kenntnisstand der anthropogenen Beeinflussung der Vorrang eingeräumt werden muß (KRANTZ 1970, GOUDIE 1994, KINZELBACH 1994), wenngleich eine mehr oder weniger

starke Kombinationswirkung mit dem Klimawechsel und die damit verbundene Veränderung des Lebensraumes (Rückgang der Kältesteppevegetation) in dieser Zeitspanne sicher ebenfalls eine Rolle spielten (MARSHALL 1984, JOGER 1994, ZOLLER & HAAS 1995). Dieses Aussterben von lokal über 75 % aller Pflanzenfresser muß erhebliche Folgen auf die Vegetationsentwicklung in den betroffenen Gebieten gehabt haben.⁵

Es ist nicht auszuschließen, daß die Überbevölkerung, der Rückgang der Jagdtiere im Zusammenhang mit Klimaveränderungen zu einem Wechsel der Ernährungsform und damit zur Seßhaftigkeit geführt hat (siehe CHILDE 1936).⁶ Hinzu kommt, daß nach 8000 v. Chr. eine Erwärmung des Klimas folgte, die z. B. in Mitteleuropa zu einer allmählichen Wiederbewaldung führte.⁷ Auch auf diese Veränderung mußte sich der Mensch einstellen und seine Lebensgewohnheiten den neuen Umweltbedingungen anpassen.

So ist eine nachfolgende Kulturepoche aus der pessimal gewordenen Situation der vorhergehenden zu verstehen. So paradox es klingt, die Not hat zum Fortschritt geführt, nicht der Wohlstand oder gar prospektives, auf die Zukunft hin orientiertes intelligentes Handeln.

Die Zeit der "Neolithischen Revolution" umfaßte den Übergang zur Seßhaftigkeit, zum Ackerbau, zur Viehzucht und Metallverarbeitung, und zum Handel. Hierdurch wurde eine deutliche Erhöhung der Tragekapazität unseres Planeten möglich. Dieser Wechsel der Wirtschaftsform (landwirtschaftliche Nutzung von Pflanzen, Domestikation von Tieren, Beginn der Bodenbau-Viehzucht-Kulturen) vollzog sich in Vorderasien um 10.000 v. Chr., in Mitteleuropa erst um 5600 v. Chr. Der Ackerbau verzehnfachte die Tragekapazität, die Erfindung des Pflugs (vor etwa 5000 Jahren) und damit in Zusammenhang stehend die Tiernutzung, die in der Produktion gesteigerten Anbau-Methoden und die Pflanzenzüchtungsverfahren verzwanzigfachte sie auf über 100 Millionen Menschen.⁸ Ein weiterer

⁵ Vergleiche mit Australien, siehe GILLESPIE u. a. (1978).

⁶ Eine andere Theorie von JACOBS (1970) sieht eine Seßhaftigkeit des Menschen in primärem Zusammenhang mit dem Handel.

⁷ Zur mitteleuropäischen Grundsukzession der Waldentwicklung siehe LANG (1994).

⁸ Daß das Erschließen einer neuen Nahrungsquelle auch Probleme bereiten kann, liefert das Beispiel der Domestikation milchproduzierender Tierarten, zunächst in Folge der "Neolithischen Revolution" Schaf und Ziege, später das Rind (BECKER 1980). In den meisten menschlichen Populationen der Erde ist Unverträglichkeit von Frischmilch im Erwachsenenalter weit verbreitet. Dies gilt z. B. nicht für die Bevölkerung Nordeuropas, wo über 90 % der Erwachsenen das dominante Gen

wichtiger Fortschritt war die Einführung von Bewässerungsmethoden (ebenfalls vor mindestens 5000 Jahren); siehe GOUDIE (1994). Durch Nutzpflanzenanbau war ein wesentlich geringerer Raumbedarf für jedes Menschen-Individuum nötig, um es zu ernähren (Faktor 500). Landwirtschaft bot folglich mit die Voraussetzung und die Grundlage für die Entstehung von Siedlungen und Städten, aber auch die Erfindung der Keramik spielte eine Schlüsselrolle. Hierdurch erleichterten sich die Lebensbedingungen um ein Vielfaches: Durch Kochen in Gefäßen war ein besserer Aufschluß, dadurch eine qualitative Bereicherung des Nahrungsangebotes, aber auch eine Aufbewahrung der Nahrung möglich. Durch die Erweiterung der Ernährungsbasis und durch die bessere Verwertung der Nahrung konnte eine Erhöhung der Bevölkerungsdichte erreicht werden. So ist die Entfaltung der dörflichen Bauern- und Pflanzwirtschaft mit hoher Wahrscheinlichkeit nur in Verbindung mit der Erfindung früher Keramik möglich gewesen.

Eine hohe Nahrungsproduktion war besonders in den Überflutungsgebieten großer Flußsysteme gegeben; in diesem Zusammenhang ist auch die große Siedlungstätigkeit an Tigris und Euphrat (südöstliches Mesopotamien) zu sehen, wobei die Anschwemmung fruchtbaren Schlamms die Überlebensgrundlage bot. Nach Trockenfallen des Gebietes hingegen setzte eine erfolgreiche Bewirtschaftung Bewässerungstechniken voraus, die jedoch auf Dauer durch die fortschreitende Versalzung des Bodens zu erheblichen Problemen führte (siehe unten). Dem Mangel an Rohstoffen wie Holz folgte der vermehrte Einsatz der Ziegeltechnik beim Bau von Gebäuden.

Im 4.-3. Jahrtausend v. Chr. schuf die größere Produktion an Nahrungsmitteln die Möglichkeit, Arbeitskräfte anders zu verwenden als für die Primärproduktion; nun wurden neue Formen der gesellschaftlichen Organisation (Städte) möglich.

Zu einem Fortschritt kam es in der Bronze- und Eisenzeit, die auf die Jungsteinzeit folgte. Sie setzte im Vorderen Orient wesentlich früher ein, auf Kreta und in Ägypten um 2500 v. Chr., im Abendland etwa um 1800 v. Chr. Die Pflugschar konnte nun mit Eisen verstärkt werden, dadurch war

für Lactase-Bildung besitzen. Diese Mutation ist erst vor etwa 5000 Jahren beim Menschen wahrscheinlich in Anpassung an die schlechtere Vitaminversorgung in den sonnenärmeren nördlichen Breiten herausselektiert worden. Lactose fördert die Calciumabsorption und ersetzt damit das Vitamin D (BECKER 1980).

es möglich, auch wesentlich schwerere Böden umzupflügen. Als die wichtigsten Errungenschaften gelten die Nutzung von Pferden und der Gebrauch des Wagens.

Fest steht, daß ohne Ackerbau oder Viehzucht mit großer Wahrscheinlichkeit nur etwa 30 Millionen Menschen auf der Erde ernährt werden könnten. Wenn ein Mensch Sammler und Jäger ist, wird für ihn eine notwendige Fläche von etwa 20 km² veranschlagt; die gleiche Fläche kann bei landwirtschaftlicher Nutzung heute 6000 Menschen ernähren.

Entscheidend war in der Menschheitsgeschichte der Übergang von einer Konsum- zu einer Produktionswirtschaft und als zwingende Folge davon Handel und Verkehr. Diese Wende ist bereits im Neolithikum anzusetzen. Bereits der Neolithiker und der bronzezeitliche Mensch hatten einen erheblichen Einfluß auf Boden, Vegetation und Tierwelt genommen (DIMBLEBY 1974); die Veränderung der Landschaft war Folge dieses Überganges zu einer Produktionswirtschaft.

Besonders starke Umwelteinflüsse gingen z. B. vom Bergbau aus. Das Schmelzen von Kupferoxid-Erzen fand im Gebiet des heutigen Iran schon vor rund 5700 Jahren statt. Dabei mußten zwangsläufig große Mengen an Holz geschlagen und Wälder vernichtet werden. Im Wadi Nash im westlichen Sinai fand man eine Holzaschen-Schicht (datiert 3. Jahrtausend v. Chr.) von 30 m Länge, 15 m Breite und 1/2 m Dicke (GOUDIE 1994). Vor etwa 1200-900 Jahren wurden die Osterinseln von den dortigen Ureinwohnern völlig entwaldet. Dies muß zu einer einschneidenden ökologischen Katastrophe geführt haben, wodurch neben der Flora und Fauna auch der Untergang der dortigen Megalith-Kultur besiegelt war (FLENLY u. a. 1991, REMMERT 1992).

Ein anderes Beispiel liefert die Maya-Kultur im südöstlichen Teil der Halbinsel Yucatan, eine agrarische Hochkultur im Bereich der Tropen, die nach einer Dauer von etwa 1200 Jahren zwischen 790-890 n. Chr. zusammenbrach. Auch hier war es der steigende Bevölkerungsdruck, der zur Aufgabe der Brandrodung und zu einer Intensivierung der Landwirtschaft mit komplizierten Wasserbau-Techniken für eine Dauerlandwirtschaft führte. Letztlich konnte aber auch das kulturell hochdifferenzierte Herrschaftssystem den Zusammenbruch durch Ressourcenverknappung nicht verhindern (TAINTER 1988, WHITMORE u. a. 1991).

Um Christi Geburt lebten 200 Millionen Menschen auf der Erde. Dabei wiesen einzelne Städte des Altertums bereits beträchtliche Einwohnerzahlen auf: Das antike Ninive in Mesopotamien (700-612 v. Chr.) hatte etwa 700.000, vielleicht sogar 2 Millionen Einwohner, Rom zur Zeit des Augustus um Christi Geburt 1 Million Einwohner, Karthago bei seinen Fall 146 v. Chr. um 700.000 Einwohner (siehe THIRGOOD 1981). Die Auswirkungen auf das Umland müssen bei dieser großen Menschendichte erheblich gewesen sein. Die Entwicklung solcher großer Städte war nur an großen Flüssen und Seen oder an Meeresküsten möglich, wo über einen ausgeprägten Schiffshandel auch die notwendigen Nahrungsgüter herangebracht werden konnten.

Ab 900 n. Chr. änderte sich die mitteleuropäische Landschaft von Grund auf, aus einem Waldland wurde eine mehr oder weniger offene Kulturlandschaft (siehe z. B. POTT & HÜPPE 1991). Bereits um 1200 n. Chr. erreichte der Waldanteil Mitteleuropas den heutigen Wert (etwa 30 % der Gesamtfläche); man nimmt an, daß er zeitweise sogar unter 20 % gelegen haben dürfte. In die Zeit des Mittelalters fielen folgende Ereignisse:

- planmäßige Erschließung der Wäldungen durch Rodung (Bedeutung der Klöster). Hierbei stand weniger die Schaffung großer Weideflächen im Vordergrund als vielmehr die direkte Nutzung des Holzes zur Herstellung von Holzkohle, für Bergwerke, Salinen, Glashütten u. a.,
- Waldweide,
- verstärkte Bodenbearbeitung,
- intensivere Bewässerungen und Entwässerungen,
- gezielter Anbau von Nutzpflanzen,
- Erschließung großflächiger Weidegebiete,
- Errichtung von Siedlungen und Städten.

Die Bedeutung neuer agrartechnischer Methoden spiegelt sich besonders gut in der mittelalterlichen Bevölkerungsentwicklung für Europa wider (GRUPE 1986); siehe *Abbildung 5*.

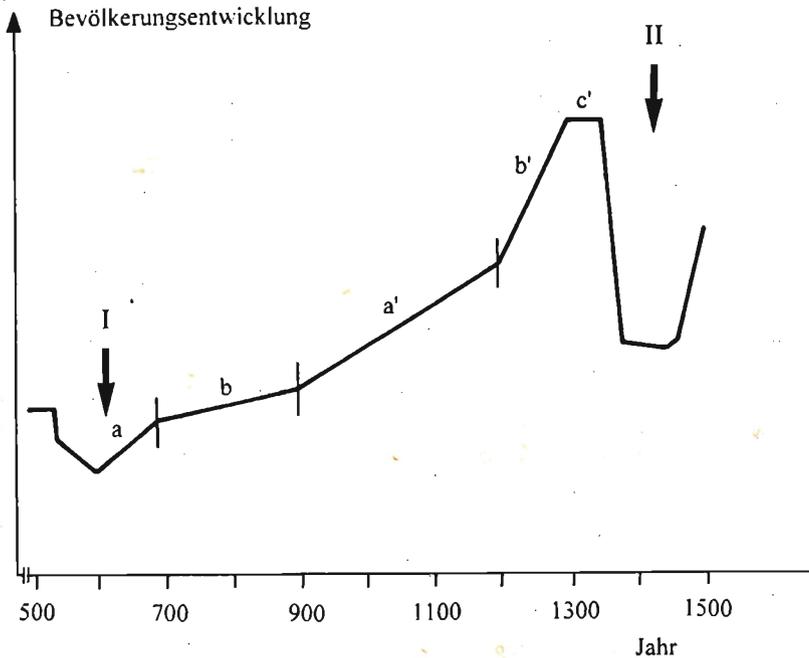


Abb. 5: Modell der Bevölkerungsentwicklung in Europa von 500-1500 (verändert nach GRUPE 1986); weitere Erläuterungen im Text.

Da es keinen allgemeinen Konsens über absolute Zahlen gibt, wurde auf die Angabe einer genauen Bevölkerungszahl verzichtet (zur Methode siehe GRUPE 1986). Deutlich erkennbar ist ein Bevölkerungseinbruch Mitte des 6. Jahrhunderts (*Pfeil I*), der wahrscheinlich auf Pestepidemien beruhte. Danach folgte, wie wir es auch bei populationsökologischen Untersuchungen an verschiedenen Organismen-Arten kennen, aufgrund reichhaltiger Ressourcen ein schnelles exponentielles Wachstum (*Phase a*) mit einer flacher an der Kapazitätsgrenze verlaufenden Populationsgröße (*Phase b*), in diesem Fall bis zum Jahr 900. Die klimatischen Bedingungen in dieser Zeit waren wärmer als heute (750-1150 n. Chr.), eine weitere Steigerung der Bevölkerungszahl jedoch aufgrund begrenzter Ressourcen nicht möglich. Erst im weiteren Verlauf kam es zwischen 900 und 1300 zu einem weiteren expansiven Bevölkerungswachstum (*Phase a', b'*). Es war die Zeit der Städtegründungen und die Erfindung neuer agrartechnischer Methoden, die zu einer Ökonomisierung der Landwirtschaft führten.

(HENNING 1978, BATH 1963). Diese koinzidierten mit einer weiteren steigenden Bevölkerungsentwicklung. Die Zeit vom 10. Jahrhundert bis etwa 1850 war die Epoche der Mechanisierung, wobei durch Nutzung der Wasserkraft im 11.-13. Jahrhundert ein großer Innovationsschub erfolgte. So wurden u. a. Pochwerke, Schmieden, Sägewerke errichtet. Diese Zeitspanne fiel gleichzeitig auch in ein Klimaoptimum und zeichnete sich damit durch günstige "ökologische" Bedingungen aus. Insgesamt führte dieses Faktorengefüge zu einer Verdopplung der Bevölkerung in Mitteleuropa.

Um das Jahr 1300 ist wiederum eine Kapazitätsgrenze erkennbar (*Phase c'*) und durch eine Stagnation des Bevölkerungswachstums belegt. Es folgten rückläufige Entwicklungen, die mit Hungersnöten und überregionalen Teuerungen korreliert werden können. Unter die sich verknappenden Ressourcen gehörten zu dieser Zeit nicht nur die Nahrung, sondern vor allem das Holz als Baustoff und Energiequelle (HILLEBRECHT 1982). Die Epoche der Städtegründungen und technischen Errungenschaften hatte ihren Preis. Der Energieträger "Holz" wurde knapp, aber auch die Nutzung der Wasserkraft war durch Erosions- und Sedimentationsprozesse zum Teil nur zeitlich begrenzt möglich. Hinzu kam eine in diese Zeit hereinschneidende Klimaverschlechterung, am Ende stand die Hungersnot von 1309-1317 (*Pfeil II*). Darauf folgte die mittelalterliche Pestkatastrophe mit einer Reduzierung der Bevölkerung um durchschnittlich 40 %, regional sogar um 70 %. Es gibt Gründe, die Pest auf ökologische Ursachen zurückzuführen: eine knappe und schlechte Nahrungsgrundlage war einer der wesentlichen. Anschließend kam es aufgrund wieder günstig werdender Lebensbedingungen zu einem exponentiellen Wachstum bis zum 30jährigen Krieg, der wiederum eine Bevölkerungsreduktion zur Folge hatte, wobei unter anderem auch die Pest einen starken Bevölkerungsrückgang bewirkte.

Die Beispiele aus der Geschichte belegen, daß mehrfach das menschliche Populationssystem durch Überbevölkerung instabil wurde, seine natürlichen Grenzen deutlich überschritt, letztlich aber wieder der Ausgleich der Populationszahlen an der Kapazitätsgrenze überwog. Eine wesentliche Voraussetzung für eine solche Reaktion liegt in der Fähigkeit eines Systems, die Kapazitätsgrenze mit Verzögerung mitschwingen zu lassen. Die größte Gefahr: eine Grenzüberziehung (Gradation) mit Zusammenbruch des gesamten Menschheitssystems blieb aus (*Abb. 6*).

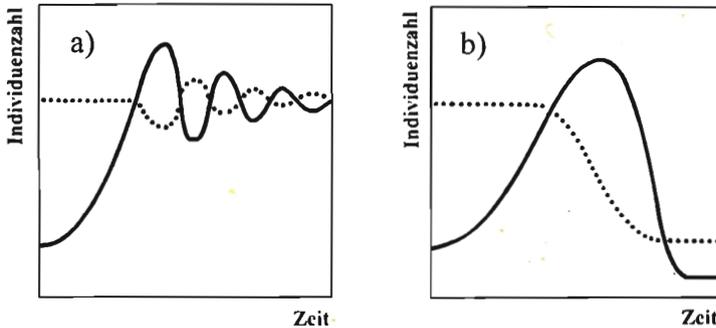


Abb. 6: a) Grenzüberziehung an der Kapazitätsgrenze (punktierte Linie) und Einschwingen der Bevölkerungszahl (ausgezogene Linie) an der mitschwingenden Kapazitätsgrenze.

b) Grenzüberziehung mit anschließender Erniedrigung der Tragekapazität (punktierte Linie) und Zusammenbruch der Bevölkerungszahl (ausgezogene Linie).

Im 15. Jahrhundert kam es zu einer weiteren Innovationswelle; den großen Aufschwung erbrachte in dieser Zeit der Bergbau. Wiederum war es die Wasserkraft, die als Energieträger in Fülle zur Verfügung stand. Schmieden, Mühlen, Sägewerke, Spinnereien, glasproduzierende und -verarbeitende Gewerbe. Die meisten mittleren Fließgewässer waren aufgestaut, Kanäle wurden errichtet und anderes mehr. Neben der Wasserkraft diente der Wald mit seinem Holz als wichtigster Energielieferant. Da in Südeuropa Wälder bereits durch den Raubbau in der Zeit des Römischen Reiches fast völlig fehlten, verlagerte sich die Holzausbeutung, aber auch die Produktion einer Vielzahl von Gütern im 15. Jahrhundert nach Mittel- und Nordwesteuropa. Auch kam es zu einer Ausdehnung der landwirtschaftlichen Nutzfläche zu Lasten des Waldes.

Um 1650 lebten rund 500 Millionen Menschen auf der Erde, 200 Jahre später (um 1850) war es vor dem Zeitpunkt der "Industriellen Revolution" bereits 1 Milliarde. Besonders stark wirkte sich diese "Industrielle Revolution" auf die globalen Bevölkerungszahlen aus. Durch sie war die Epoche der urbanen und industriellen Gesellschaft erreicht. Fortschritte wurden einerseits erzielt durch die Nutzbarmachung neuer Energieträger, andererseits durch die Steigerung der landwirtschaftlichen Produktion und durch die neuen Errungenschaften der Medizin.

Durch die sich immer mehr verringernden Waldreserven mußte Ersatz für das Holz als Brennmaterial (Holzkohle) und Baustoff gefunden werden. Die umfangreiche Förderung von Kohle begann, und es dauerte etwa 100 Jahre, bis es möglich wurde, mit Hilfe von Koks und Erzen Roheisen herzustellen.

Das 19. Jahrhundert brachte noch einen weiteren "Fortschritt": das Transportwesen, das Zeitalter "höherer Mobilität" brach an, eine Epoche, die bis heute andauert. Eisenbahnen und Dampfschiffe ermöglichten es den Menschen, große Strecken zurücklegen zu können. Zwischen dem 18. Jahrhundert und dem Ersten Weltkrieg erlebte Europa allein eine Ver vierfachung der Bevölkerungszahl von 105 Millionen auf 450 Millionen Menschen. Wieder zeigte es sich, daß mit wachsender Bevölkerungszahl zwangsläufig Probleme entstehen: knapper werdende Ressourcen führten zu erheblichen Verschlechterungen der Lebensbedingungen. Um diesem Umweltdruck zu entgehen, wanderten von 1845-1914 allein 50 Millionen Menschen aus Mitteleuropa aus, unter anderem nach Nord- und Südamerika, nach Südafrika, Australien und Neuseeland.

Im 20. Jahrhundert war es die Nutzbarmachung eines weiteren wichtigen Energieträgers, der bis heute noch seine Bedeutung beibehalten hat: das Erdöl, später das Erdgas. Damit war der Aufschwung der chemischen Industrie und der der Automobil-Industrie prädestiniert. Ein solcher technischer Fortschritt ohne die Nutzung von Erdöl wäre nicht denkbar gewesen.

Folgende tiefgreifende Veränderungen haben die Landschaft Mitteleuropas seit 1950 erheblich beeinflußt:

- Erfindung und über lange Zeit zunehmend steigende Verwendung von Kunstdünger,
- Einführung motorgetriebener Landmaschinen in der Landwirtschaft,
- Erschließung der Landschaft durch Straßen,
- Kanalisierung von Fließgewässern,
- Trockenlegungen.

Nach dem Zweiten Weltkrieg war es wieder eine neue Energieform, mit der sich die Menschheit auseinandersetzen mußte und immer noch muß: die Kernenergie.

1930 lebten etwa 2 Milliarden, 1960 etwa 3 Milliarden, 1975 etwa 4 Milliarden, 1987 etwa 5,15 Milliarden und 1992 etwa 5,5 Milliarden

Menschen auf der Erde. Heute sind es bereits an die 6 Milliarden und im Jahr 2000 werden es nach Hochrechnungen 6,35 Milliarden, von 2030-2050 gar 10 Milliarden Menschen sein.

In Zukunft wird 97 % des globalen Bevölkerungswachstums auf Afrika, Lateinamerika und Asien entfallen. Den höchsten Zuwachs der Bevölkerungszahlen werden Südasien, Afrika und Lateinamerika erleben, 83 % des Wachstums wird sich dabei auf städtische Bereiche beschränken. Im Jahr 2000 werden nach Hochrechnungen 400 Städte die Millionen-Marke übersteigen (KAISER 1980). Beispielsweise wird Mexiko City allein 30 Millionen Einwohner haben. Nach Schätzungen der UNO werden um das Jahr 2000 3 Milliarden Menschen in Großstädten leben (OTTERBEIN 1991), 1970 waren es bereits 1,7 Milliarden (GOUDIE 1994); zur Trendsituation der Urbanisierung siehe HOLDGATE u. a. (1982) und BERRY (1991). Im Jahr 2000 werden allein 25 Megastädte (solche mit mehr als 10 Millionen Einwohnern) existieren, 19 davon in Entwicklungsländern.

Die Prognosen, die darüber hinaus bis in das Jahr 2150 von der Weltbank und den Vereinten Nationen gegeben werden, weichen jedoch zum Teil erheblich voneinander ab, die Langzeit-Entwicklung läßt sich kaum vorhersagen (DEUTSCHE GESELLSCHAFT für die Vereinten Nationen 1992, WELTBANK 1992), zu viele Imponderabilien können die weitere Entwicklung beeinflussen. Die meisten von uns erleben mit hoher Wahrscheinlichkeit die Verdopplung der Bevölkerungszahl in den nächsten 35 Jahren, unsere Kinder und Enkel sicher.

Ein Kennzeichen der kulturellen Evolution (Meta-Evolution), wie sie hier skizzenartig nachgezeichnet wurde, ist die wachsende Geschwindigkeit der Prozesse und die immer raschere und bis jetzt noch mögliche Anpassung des Menschen an die sich verändernden Umwelt-Gegebenheiten (BECKER 1980). Jedes System, so auch das globale, hat seine Grenze. Die Frage ist nur, welche Regulationsprozesse eine Grenzüberschreitung verhindern sollen und können: die internen (kulturellen) Regulationsprozesse, und damit der Mensch selbst, in dem er sich Grenzen setzt, "nachhaltig wirtschaftet" und weiteres menschliches Leben in den folgenden Generationen ermöglicht, oder die "neue" Umwelt als externer Regulationsfaktor, von ihm so stark verändert, daß ein menschliches Leben nicht mehr möglich ist, ein neues Gleichgewicht sich einreguliert, aber ohne ihn. Die Weltbevölkerungszahl erweist sich als eine entscheidende Determinante in der Bewältigung der Umweltprobleme.

Auswirkungen der wachsenden Weltbevölkerung

Es ist das Verdienst des "Club of Rome" (MEADOWS u. a. 1972, 1992), erste Prognosen über die Auswirkungen des unkontrollierten Bevölkerungswachstums gegeben zu haben, so über die Folgen bestimmter Wirtschaftsformen, über die Grenzen des Wachstums des Industriekapitals sowie die Grenzen der Nahrungsmittelproduktion, des Rohstoffverbrauchs und der Umweltbelastung. Wir leben von zum Teil nicht erneuerbaren, eng begrenzten, endlichen Reserven. Es ist sicher, für 10 Milliarden Menschen reichen die Ressourcen nicht aus, die Folgen wären Kriege, Krankheiten und Unterernährung in vielen Ländern, so wie es schon mehrfach in der Geschichte der Menschheit geschehen ist, wenn die Kapazitätsgrenze überschritten worden war.⁹ Die Ausmaße (qualitativer und quantitativer Art) werden jedoch beim nächsten Mal andere sein. Sicher jedoch ist auch, daß ohne die großen kulturellen Errungenschaften des Menschen eine Erde im Naturzustand gar nur 1 Milliarde Menschen ernähren könnte.

Mit der wachsenden Bevölkerungszahl gehen zwangsläufig, ebenfalls exponentiell, einher die Auswirkungen der wirtschaftlichen Tätigkeiten des Menschen einschließlich seines ungebremsen Mobilitätsverhaltens. Beides sind die wesentlichen Verursacher der heutigen globalen Emissionsprobleme. Die Umweltbelastungen sind hierbei in den jeweiligen Ländergruppen unterschiedlich, eine Differenzierung in hochentwickelte Länder (im wesentlichen die OECD-Mitglieder), osteuropäische Länder, Schwellenländer, brennstoffexportierende Länder, Entwicklungsländer und andere notwendig.

Die Folgen der Bevölkerungsexplosion, wie sie sich uns heute darstellt, sind bereits beträchtlich. Ein guter Bezugspunkt ist das Jahr 1950, in dem die Welt noch einigermaßen "in Ordnung war", wenn man den Zustand des globalen Klimas als Maßstab nimmt. Dieser Zeitpunkt müßte im übrigen auch den Orientierungsmaßstab für internationale Verhandlungen darstellen. Als Beispiele für anthropogen bedingte Veränderungen auf unserem Planeten, die auf der Bevölkerungsexplosion beruhen, sind unter anderem folgende zu nennen:

⁹ Nach MOHR (1985) ist schon jetzt mit über 4,8 Milliarden Menschen die langfristige Tragkapazität unseres Planeten weit überschritten.

- Zerstörung und nachhaltige Schädigung von Ökosystemen, die über 80 % der Biomasse der Erde produzieren: die Wälder und die Meere,
- Zerstörung von Ökosystemen mit sehr langer Entwicklungszeit (z. B. Tropenwälder, Korallenriffe),
- Starke Flächenreduktion der Wälder, insbesondere im Bereich der Tropen, und damit einhergehende Degradierung der Böden und Bodenerosion,
- Ausbreitung von Savannen und Wüsten, Bildung zum Teil schwerer nutzbarer Sekundärvegetation,
 - Sahelzone,
 - bestimmte Grasländer in Südamerika u. a.,
- Veränderung zahlreicher Fließgewässerökosysteme und ihrer Auen,
 - Kanalisierungen und damit verbunden oft Absenkung des Grundwasserspiegels und Verlust der Retentionsflächen,
 - Nährstoff- und Schadstoffbelastungen,
- Veränderung des Lokalklimas (z. B. durch Verbauung, Abholzung von Wäldern) und des Großklimas (Treibhauseffekt und Ozonloch).

Raum-, Zeit- und Gefahrendimensionen als Folge der Umwelt-Manipulation verändern sich im Laufe der Menschheitsgeschichte in erschreckendem Ausmaß.¹⁰ GOUDIE (1994) stellt folgende bemerkenswerte Trends fest:

- ständig neue und immer gefährlichere Einflüsse (hochwirksame Pestizide erst seit dem Zweiten Weltkrieg, ebenso die Kernenergie),
- Umschwung von lokalen zu globalen Problemen,
- Zunahme von Komplexität, Ausmaß und Häufigkeit von Umweltbeeinträchtigungen.

Diesem Trend entsprechen unterschiedliche "Raumdimensionen" in der Geschichte der Umweltbeeinflussung unseres Planeten (MIECK 1990):

- lokale bis regionale Umweltbeeinflussungen in einer ersten, frühen Phase:
 - mikrobielle/bakterielle Umweltverschmutzung: sich zersetzende faulende Stoffe in Gewässern um Siedlungen,

¹⁰ Siehe auch STEIN (1987), der die Auswirkungen von Erfindungen und wissenschaftlichen Erkenntnissen auf die Umwelt synoptisch darstellt.

- handwerkliche Umweltverschmutzung: in Zusammenhang mit handwerklicher Kleinindustrie, z. B. Gerbereien, Töpfereien, Papiermühlen, Erz- und Kohlewäschereien, Färbereien,
- industrielle Verschmutzung: erst seit dem frühen 20. Jahrhundert (z. B. Ruhrgebiet);
- überregionale bis globale Umweltbeeinflussung in einer zweiten, späten Phase, wobei schwere Umweltveränderungen ganze Regionen betreffen:
 - Verringerung und Verschmutzung des Grundwassers,
 - Ausbringen größerer Kunstdünger-Mengen oder Biozide,
 - Treibhausgase,
 - Entwaldungen,
 - Umweltunfälle: z. B. Tschernobyl im Jahr 1986.

Bei einem Weltwirtschaftswachstum von 5-6 % pro Jahr verdoppelt sich der Einfluß des Menschen auf seine Umwelt in etwa 13 Jahren (PLACHTER 1991). Besonders erschreckend ist eine deutliche Zunahme der Eskalationsfähigkeit. Der Fall von Tschernobyl belegt: offiziell 32 Tote, 150.000 Menschen evakuiert, 119 Dörfer für immer verlassen, wahrscheinlich 7000-25.000 Krebsfälle, in Europa Verstrahlung zahlreicher Nutzpflanzen und -tiere. 1990 befanden sich etwa 3 Millionen Menschen in ärztlicher Überwachung, infolge der Nuklearkatastrophe starben bis dahin täglich zwei Menschen (KING & SCHNEIDER 1992).

Neben der räumlichen Expansion von Umweltbelastungen wächst auch die Geschwindigkeit der Umweltveränderung. Nach KATES u. a. (1991) hat sich etwa bei der Hälfte der folgenden Parameter seit 1950 in einer Generation mehr verändert als in der gesamten Menschheitsgeschichte zuvor:

- Zunahme gerodeter Waldflächen,
- Rückgang der Artenzahl der Landwirbeltiere,
- Zunahme des Wasserverbrauchs,
- Zunahme der menschlichen Bevölkerung,
- Freisetzung von Elementen (Kohlenstoff, Schwefel, Phosphor, Stickstoff, Blei usw.)
- Freisetzung von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW).

Besonders erschreckend ist die Erkenntnis, daß viele Prozesse irreversibel sind. Die Folgen gehören zur "Geschichte des Menschen", so z. B. die

Ausrottung von Arten, die Erosion und verschiedene Bodenveränderungen¹¹.

Es zeigt sich in so gut wie allen Epochen der Menschheit das Problem, daß mit zunehmender nicht-natürlicher, aber notwendigerweise aufrechtzuerhaltender Systemgröße – in diesem Falle die wachsende Menschheit – ein um so größerer "Input" an Energie und Materie zwangsläufig zu einem um so größeren "Output" an Energie- und Materie-"Abfall" führen muß. Es spiegeln sich in diesem Phänomen somit die Hauptsätze der Thermodynamik wider: Auf einen vereinfachten Nenner gebracht: Nichts geht verloren; je höher das Ordnungssystem, um so mehr Energie muß aufgewandt werden, um dieses aufrechtzuerhalten (Erhöhung der Neg-Entropie = Syntropie durch vermehrte Energiezufuhr), aber um so mehr nicht nutzbares Material ("Abfall") fällt an, das in welcher Form auch immer entweder sich anreichert oder um- bzw. abgebaut werden muß.

Die zunehmende Bevölkerungsexplosion stellt die Menschheit vor fast unlösbare Zukunftsprobleme. Von besonderer Bedeutung ist das starke Anwachsen der Bevölkerung in den Entwicklungsländern. Die sich dort zum Teil drastisch ins Pessimum verändernden Lebensmöglichkeiten werden ihre Folgen haben: Gefahr von menschlichen Wanderungsbewegungen und Gefahr der weiteren umweltbelastenden Urbanisierung. Heute schon gibt es Millionen von Umwelt-Flüchtlingen; die Zahlen schwanken aufgrund der unsicheren Datenlage zwischen 16 Millionen (Angaben Vereinte Nationen) und 300 Millionen (Angaben Rotes Kreuz)¹². Einem besonderen Wanderungssog werden die Industriestaaten ausgesetzt sein. Fest steht, daß in Zukunft die Mehrzahl der Wanderbewegungen nicht politische oder religiöse Gründe haben wird, sondern ökologische.

¹¹ Zum Beispiel Podsolierung, siehe Kapitel "Beispiele für Eingriffe in die Pedo- und Lithosphäre", S. 97.

¹² Siehe WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT der Bundesregierung "Globale Umweltveränderungen" (1993).

Kritische Belastungen der "Sphären" (Atmo-, Hydro-, Pedo-, Litho- und Biosphäre)

1. Luftschicht (Atmosphäre)

1.1. Allgemeines

Für das Verständnis der Umweltbelastungen der Luftschicht sind zwei unterschiedliche Atmosphären-Schichten voneinander gesondert zu analysieren: die Troposphäre bis in eine Höhe von maximal 18 km (Schicht der für das Leben relevanten Gase, Wetterschicht) und die darüberliegende Stratosphäre bis in eine Höhe von etwa 50 km (vertikal stabile Schicht mit Ozonschild gegen UV-B-Strahlung). Beide Schichten beeinflussen das Klima auf unserem Planeten, worunter wir den für ein Gebiet charakteristischen, durchschnittlichen, jahreszeitlichen Verlauf der Witterung verstehen.

Menschliche Einflüsse auf das Weltklima sind im wesentlichen:

- Gasemissionen (Kohlendioxid, Methan, Fluorchlorkohlenwasserstoffe, Stickoxide, Wasserdampf, diverse Spurengase),
- Aerosole¹³,
- Abwärme,
- Veränderungen des Rückstrahlvermögens von Körperoberflächen (*Albedo*¹⁴),
- Veränderungen im Wasserhaushalt.

Neben den für Pflanzen, Tiere und den Menschen lebenswichtigen Gasen Kohlendioxid (CO₂) und Sauerstoff (O₂) gibt es eine ganze Reihe klimarelevanter Spurengase, die unter natürlichen Bedingungen eine erhebliche Bedeutung für den Strahlungshaushalt und die Verteilung der Temperatur und der Niederschläge auf der Erde haben: Wasserdampf, Ozon (O₃), Distickstoffoxid (N₂O), Methan (CH₄), Kohlenmonoxid (CO). Eine anthropogen bedingte Freisetzung solcher Gase, etwa des CO₂ bei der Verbrennung fossiler Energien, verändert das Verhältnis der Gase zueinander und damit die Eigenschaften der Atmosphäre. Im Rahmen der Umweltbelastungen ist die sehr unterschiedliche Verweildauer und Aggressivität

¹³ Schwebstoffe mit einem Durchmesser unter 10 µm.

¹⁴ Die *Albedo* ist das Rückstrahlvermögen einer Körperoberfläche, d. h. das Verhältnis der Lichtmenge, die von einer nichtspiegelnden Fläche zurückgeworfen wird, zu der gesamten Lichtmenge (NEEF 1981).

der jeweiligen Moleküle entscheidend. Distickstoffoxid (N_2O) hat eine Verweildauer von über 150 Jahren, Kohlendioxid (CO_2) von mehr als 100 Jahren, Methan (CH_4) über 10 Jahre, Kohlenmonoxid (CO) und Ozon (O_3) hingegen wenige Tage bis Monate, das Stickstoffdioxid (NO_2) gar nur wenige Stunden. Je nach Verweildauer variiert der globale bzw. mehr oder weniger regionale Einfluß. Für langlebige Gase ist immer, unabhängig vom Emissionsort, eine globale Wirkung zu erwarten, kurzlebige Gase hingegen haben nur eine lokale Bedeutung.

Der Mensch hat bezüglich der Atmosphäre vor allem drei globale Umweltprobleme hervorgerufen:

- Veränderung des Treibhauseffektes,
- Veränderung des Ozongehaltes in der Stratosphäre,
- Veränderung des Ozongehaltes in der Troposphäre.

1.2. Treibhauseffekt

1.2.1. Ausgangssituation

Im Falle des Treibhauseffektes müssen voneinander unterschieden werden

- natürliche Gegebenheiten und
- anthropogen bedingte Veränderungen der Atmosphäre.¹⁵

Natürlicher Treibhauseffekt: Die natürlichen Treibhausgase der Erdatmosphäre sorgen dafür, daß die eingestrahlte Sonnenstrahlung nicht sofort wieder die Erdatmosphäre verläßt. Dadurch halten sie eine unseren Lebensbedürfnissen günstige Temperatur aufrecht und bestimmen das Klima unserer Erde. Somit beschreibt der natürliche Treibhauseffekt das Strahlungsgleichgewicht zwischen der Absorption des kurzwelligen Sonnenlichtes und der Emission der langwelligen Wärmestrahlung von Erdoberfläche und Atmosphäre. Im wesentlichen handelt es sich um fünf Gase: Wasserdampf zu 70 %, Kohlendioxid (CO_2) zu 15 %, Ozon (O_3) mit einigen Prozent, Distickstoffoxid = Lachgas (N_2O) und Methan (CH_4) mit wenigen Prozent. Sie sorgen für eine Erwärmung unseres Planeten um etwa 30-33°C, wobei die tatsächliche Durchschnittstemperatur bei etwa

¹⁵ Eine ausführliche Darstellung zum anthropogen bedingten Treibhauseffekt findet sich z. B. bei SCHÖNWIESE & DIEKMANN (1991) und LEGETT (1991).

+15°C liegt. Ohne diese Gase betrüge die mittlere Oberflächentemperatur der Erde nur -15 bis -18°C.

Seit Beginn der Industrialisierung greift der Mensch verstärkt in die Zusammensetzung der Gasatmosphäre ein, er beeinflusst das Klima durch die Erhöhung der Gehalte an CO₂, CH₄, N₂O und durch die Verminderung des Ozons in der Stratosphäre der mittleren und hohen Breiten.

Anthropogen bedingter Treibhauseffekt: Unter dem anthropogen bedingten Treibhauseffekt versteht man die globale Erwärmung der Erde durch die Zunahme der langlebigen Treibhausgase CO₂, CH₄ und N₂O sowie durch neue, nicht in der Natur vorkommende Treibhausgase wie die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW); siehe dazu auch DICKINSON & CICERONE (1986) und RAMANATHAN (1988).

Die Ursache der anthropogenen Quellen der langlebigen Treibhausgase ist allgemein bekannt:

- Nutzung von fossilen Brennstoffen (Erdöl, Kohle, Erdgas): Sie machen 50 % des anthropogen bedingten Treibhauseffektes aus (CO₂, CH₄, begrenzt N₂O, CO),
- Industrie: FCKW zu 20 %,
- landwirtschaftliche Aktivitäten und Deponien: intensive Landwirtschaft (u. a. starke Düngung, Massentierhaltung, Ausdehnung des Reisanbaus) sowie Mülldeponien (u. a. CH₄, N₂O bzw. CO₂) weitere 15 %,
- Zerstörung des "Tropischen Regenwaldes" (CO₂) zu 15 %.

Durch menschliche Aktivitäten werden die Konzentrationen von Kohlendioxid (CO₂), Ozon (O₃), Distickstoffoxid (N₂O), Methan (CH₄) in der Atmosphäre erheblich verändert; die Bedeutung von Wasserdampf ist noch umstritten. Die Erhöhung der Treibhausgas-Gehalte der Atmosphäre zeigt eine deutlich steigende Tendenz (*Tab. 1*); die in die Atmosphäre entlassenen Mengen sind dabei groß. Im Jahr 1987 wurden global etwa 20,5 Milliarden Tonnen Kohlenstoff als Kohlendioxid freigesetzt (ENQUETE-KOMMISSION "Vorsorge zum Schutze der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages 1991), von der Mitte des 19. Jahrhunderts bis 1981 dürften es ungefähr 160 Milliarden Tonnen gewesen sein. Die jährliche Wachstumsrate liegt bei etwa 4,5 % (GOUDIE 1994). Allein Kraftfahrzeuge und Kraftwerke entlassen jährlich 20 Milliarden Tonnen CO₂ in die Atmosphäre.

Tab. 1: Erhöhung der Treibhausgas-Gehalte der Atmosphäre im Vergleich dreier Erd-Epochen; Angaben in ppm pro Volumeneinheit¹⁶ (u. a. nach WIGLEY 1983, KHALIL & RASMUSSEN 1987, STAUFFER u. a. 1988).

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
vor 18 000 Jahren	190	0,35	
jetzige Warmzeit (Holozän)	260	0,65	0,28
seit Beginn der Industrialisierung	357	1,65	0,31

1.2.2. Die verschiedenen Treibhausgase

Kohlendioxid (CO₂) ist nur eines der Treibhausgase, die an der globalen Erwärmung beteiligt sind, wenngleich es allein die Hälfte aller Emissionen ausmacht. Hinzu treten weitere treibhausaktive Gase wie Methan (CH₄), Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Ozon (O₃) in der Troposphäre, Stickoxide (NO_x) und Wasserdampf (H₂O) in der Stratosphäre. Diese übrigen Treibhausgase kommen zwar nicht in den Mengen in der Atmosphäre vor wie das Kohlendioxid, sie bewirken jedoch aufgrund ihres großen Absorptionsvermögens für Infrarot-Strahlen einen wesentlich höheren Treibhauseffekt: Methan hat allein das 21fache, Lachgas das 206fache und die beiden FCKW-Typen (FCKW-11, FCKW-12) das 12.400 bzw. 15.800fache Potential. Im folgenden werden die einzelnen Treibhausgase und ihre Wirkungen besprochen.

a) Kohlendioxid (CO₂)

Die Gesamtmenge des Kohlenstoffs im CO₂ der Luft beträgt derzeit weltweit etwa 740 Milliarden Tonnen. Dabei ist jährlich mit einer Netto-Zunahme von etwa 3 Milliarden Tonnen zu rechnen. Nicht in diesen Wert geht die auf natürlichem Wege stattfindende Fixierung von CO₂ durch biologische Prozesse ein, wobei allein durch die Tropenwälder etwa 1 Milliarde Tonnen pro Jahr aufgenommen wird. Ein Drittel der gesamten biologischen CO₂-Fixierung geschieht durch die Vegetation der gemäßigten Breiten, ein Fünftel in den Tundren.

¹⁶ ppm = parts per million.

Die anthropogen bedingten Zunahmen der CO_2 -Konzentration lassen sich gut belegen. Die *Abbildung 7* zeigt die Monatsmittel der atmosphärischen CO_2 -Konzentration am Mauna Loa (Hawaii). Die dortige Forschungsstation mißt seit 1957 kontinuierlich die Verhältnisse in einer von menschlichen Aktivitäten weitgehend freien Situation. Die Ursache der Schwankungen beruht auf der jahreszeitlich wechselnden Photosynthese- und Atmungsrate der Vegetation. Man erkennt einen steten Anstieg der CO_2 -Konzentration von 315 ppm (1958) bis 355 ppm (1991). In den sechziger Jahren betrug die Zuwachsrate 0,7 ppm pro Jahr, danach 1,5-1,8 ppm.

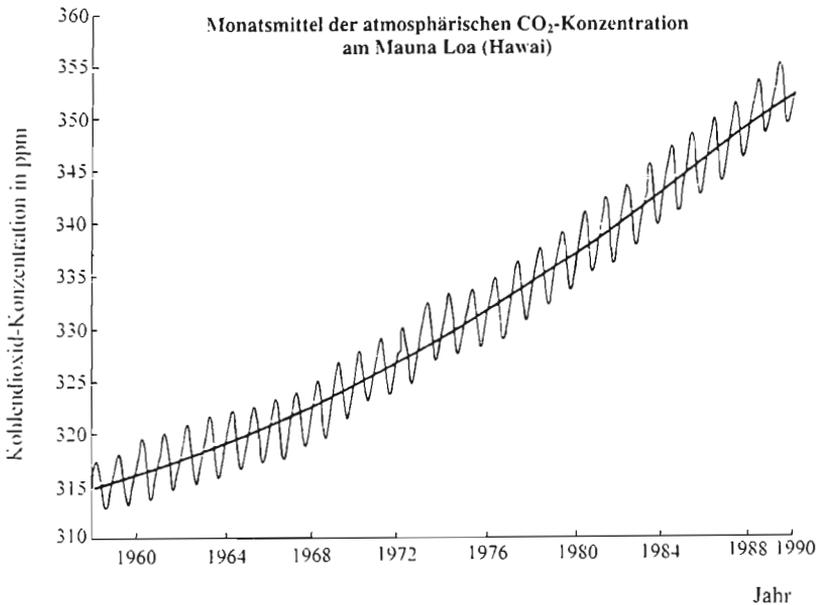


Abb. 7: Meßwerte (Monatsmittel) der atmosphärischen CO_2 -Konzentration am Mauna Loa (Hawaii) innerhalb des Zeitraumes von 1958-1990 (nach GOUDIE 1994).

Auch über noch längere Zeiträume lassen sich Veränderungen der CO_2 -Konzentration nachweisen. Im antarktischen Inlandeis konnten eingeschlossene Luftblasen auf ihren CO_2 -Gehalt überprüft und anhand von Bohrkernen die Veränderung des CO_2 -Gehaltes der Atmosphäre der letzten Jahrhunderte rekonstruiert werden (NEFTEL u. a. 1985, 1988, RAYNAUD u. a. 1993). In der vorindustriellen Zeit vor 1750 lag die CO_2 -Konzentra-

tion im Durchschnitt bei 275 ± 10 ppm. Diese Konzentration läßt sich bis in die Zeit des Römischen Reiches zurückverfolgen. Ab 1750 hingegen – mit dem Beginn der Industrialisierung in Großbritannien sowie der Zeit großer Waldreduktion in Eurasien und Nordamerika – erhöhte sich der CO_2 -Wert stetig (Abb. 8).

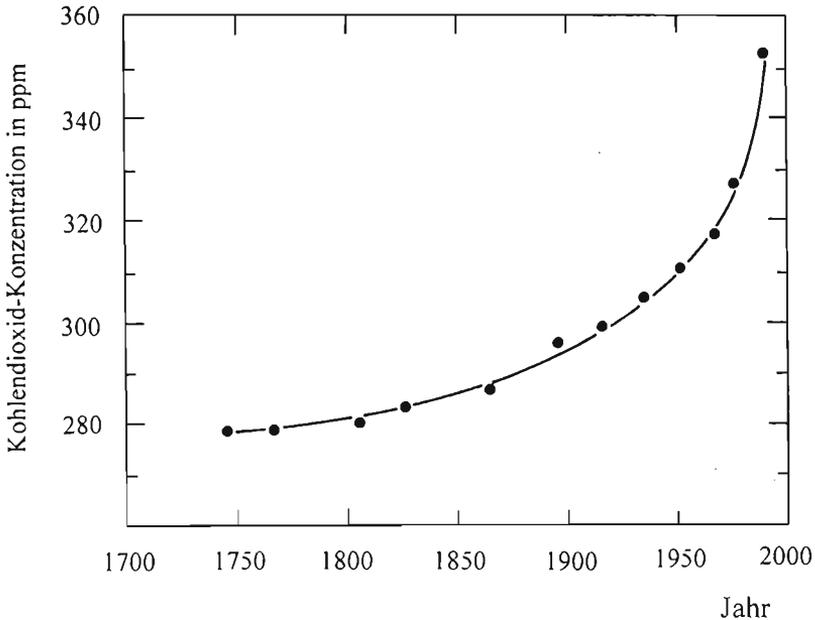


Abb. 8: CO_2 -Gehalt der Luft, gemessen in Gletschereis-Bohrkernen seit 1750 (verändert nach NEFTEL u. a. 1985).

Die zunehmende Nutzung fossiler Energieträger führte zu einer ständig anwachsenden Emission: in den zwanziger Jahren 1 Milliarde Tonnen CO_2 -Kohlenstoff, in den sechziger Jahren 2,5 Milliarden, heute 5 Milliarden (Bruttozunahme). Global betrachtet beruht das technische Energiesystem zu 87 % auf der Nutzung fossiler Brennstoffe (GLATZEL 1995). Neben der Nutzung fossiler Energieträger tragen besonders landwirtschaftliche Maßnahmen und in großem Umfang auch Brandrodungen an der Steigerung der CO_2 -Konzentration der Erdatmosphäre bei (WILSON 1978, WOODWELL 1979, WONG 1978, ENQUETE-KOMMISSION "Vorsorge zum Schutze der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages 1991). Der Betrag, der durch Veränderungen in der Landwirtschaft freigesetzt

wird, beläuft sich nach der ENQUETE-KOMMISSION "Vorsorge zum Schutze der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages (1990b) heute allein auf 1,7 Milliarden Tonnen pro Jahr. Seit 1850 sind durch Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas etwa 200 Milliarden Tonnen CO₂-Kohlenstoff in die Atmosphäre gelangt und weitere 125 Milliarden Tonnen durch Waldvernichtung bzw. durch veränderte landwirtschaftliche Methoden, insgesamt somit 325 Milliarden Tonnen. In diesem Zeitraum stieg die CO₂-Konzentration von 290 ppm auf 350 ppm, dies entspricht einer Steigerungsrate von 40 %.

Der Ausstoß ist in den einzelnen Ländern recht unterschiedlich. Am höchsten war die jährliche Freisetzung von CO₂ für das Jahr 1986¹⁷ in den USA (4.766 Millionen Tonnen), in der EG ohne ehemalige DDR (2.835 Millionen Tonnen), in den sogenannten Schwellenländern z. B. Indonesien (98 Millionen Tonnen), Nigeria (34 Millionen Tonnen). Die Industrieländer, die nur einen Bevölkerungsanteil von etwa 25 % haben, emittieren heute etwa 80 % des CO₂, die Entwicklungsländer einschließlich China mit etwa 75 % der Weltbevölkerung etwa 20 %.¹⁸

In der Bundesrepublik Deutschland gehen etwa 40 % der CO₂-Emissionen zu Lasten der Kohle, etwa 37 % über den Öl-, ungefähr 18 % über den Gasverbrauch, die übrigen 5 % stammen aus anderen Quellen (Daten gültig für das Jahr 1987).¹⁹ In den Entwicklungsländern spielt die Kohle mit über 65 % am gesamten CO₂-Ausstoß die größte Rolle. In China liegt der Wert sogar bei über 80 %. In Westeuropa und Nordamerika ist Erdöl mit etwa 50 % bzw. 45 % die Hauptquelle für die CO₂-Emissionen. Die USA, die Länder der früheren UdSSR und China besitzen etwa 80 % der Kohlevorkommen; sie sind die größten Kohleverbraucher und tragen für über die Hälfte (54 %) des gesamten Ausstoßes die Verantwortung.

Prognosen für die Zukunft sind schwierig; jedoch entsprach der Anstieg der CO₂-Kurve bisher etwa dem jeweiligen Wirtschaftswachstum. In dem

¹⁷ Angaben nach ENQUETE-KOMMISSION "Vorsorge zum Schutze der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages (1991).

¹⁸ Im Jahr 1990 wurde pro Kopf der Bevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland fast vier mal so viel CO₂ emittiert wie in Argentinien, sechs mal so viel wie in China, neun mal so viel wie in Ägypten und fast 23 mal so viel wie auf den Philippinen (DARSKI & BLEISCHWITZ 1993). Allein die CO₂-Emissionen aus dem Kfz-Verkehr der Bundesrepublik übersteigen die CO₂-Gesamtemission der Philippinen um das 5,5fache (DARSKI & BLEISCHWITZ 1983).

¹⁹ Angaben nach ENQUETE-KOMMISSION "Vorsorge zum Schutze der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages (1991).

Zeitraum von 1945-1973 (Jahr der Ölkrise) war der CO₂-Ausstoß durch fossile Energieträger in der Bundesrepublik Deutschland um etwa 4-4,5 % pro Jahr gestiegen, danach nahm er etwa um die Hälfte ab; seit 1989 ist kein größerer Zuwachs mehr festzustellen (GRASSL 1996).²⁰ Im Jahr 1993 sind nach Angaben des Umweltbundesamtes (1994) die Emissionen um 1,6 % zurückgegangen. Global steigen die CO₂-Konzentrationen derzeit um etwa 0,5 % pro Jahr.

Im Fachgebiet "Ökologie" der Universität Osnabrück werden seit über 10 Jahren in einem Meßintervall von 144 Sekunden regelmäßig die CO₂-Gehalte der Außenluft erfaßt und in einer Datenbank gespeichert (Abb. 9). Diese Station ist eine der wenigen, die über einen so langen Zeitraum

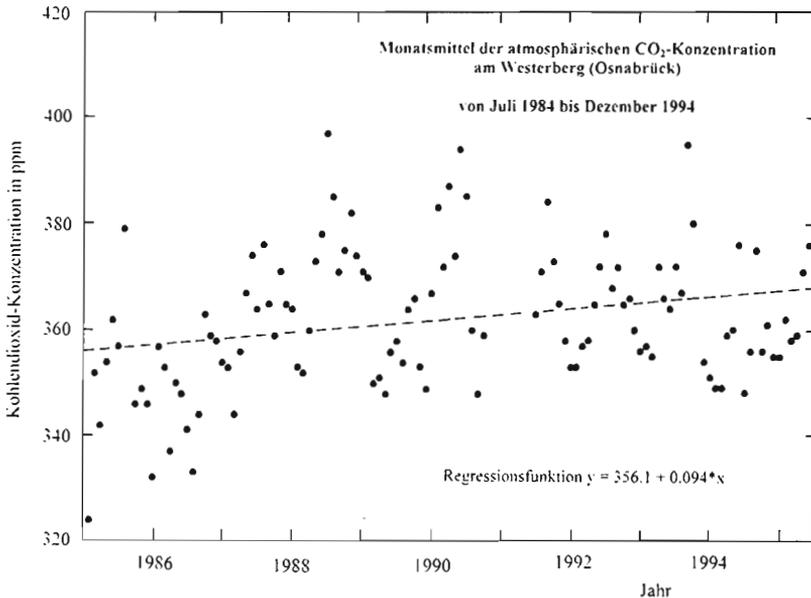


Abb. 9: Meßwerte (Monatsmittel) der atmosphärischen CO₂-Konzentration der Station Osnabrück (Fachgebiet Ökologie der Universität, Meßstation am Westerberg, 90 m über NN, 52° 18' N, 8°, 2' O, in 4 m über der Bodenoberfläche) innerhalb des Zeitraumes von Dezember 1984 bis Dezember 1994; Meßintervall 144 sec.

²⁰ Die CO₂-Emission geht auch im Westen der Bundesrepublik Deutschland derzeit pro Kopf jährlich um 0,5-0,8 % zurück (GRASSL 1996).

genaue Meßdaten für Mitteleuropa vorlegen kann. Von besonderer Bedeutung sind die lokalen Bedingungen dieser Station für Mitteleuropa (durchschnittliche Stadtgröße, durchschnittliche landwirtschaftliche und industrielle Einflußgrößen im Umlandbereich, durchschnittlicher Klimaverlauf und anderes mehr). Von Juli 1984 bis Februar 1989 war eine Erhöhung der Gehalte von 348-366 ppm = 4,5 ppm pro Jahr erkennbar (siehe OVERDIECK 1991, FORSTREUTER u. a. 1994), ein Wert der weit über dem des Mauna Loa auf Hawaii liegt (Zeitraum von 1984-1988: Erhöhung von 344-351 ppm = 1,4 ppm pro Jahr). Seit 1990 stagnieren die CO₂-Werte der Station in Osnabrück (Abb. 10). Im Rahmen eines Forschungsprogrammes am "Institut für Umweltsystemforschung" (IFU) der Universität Osnabrück (Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. M. MATTHIES) werden diese Ergebnisse derzeit analysiert (TILLMANN 1996).

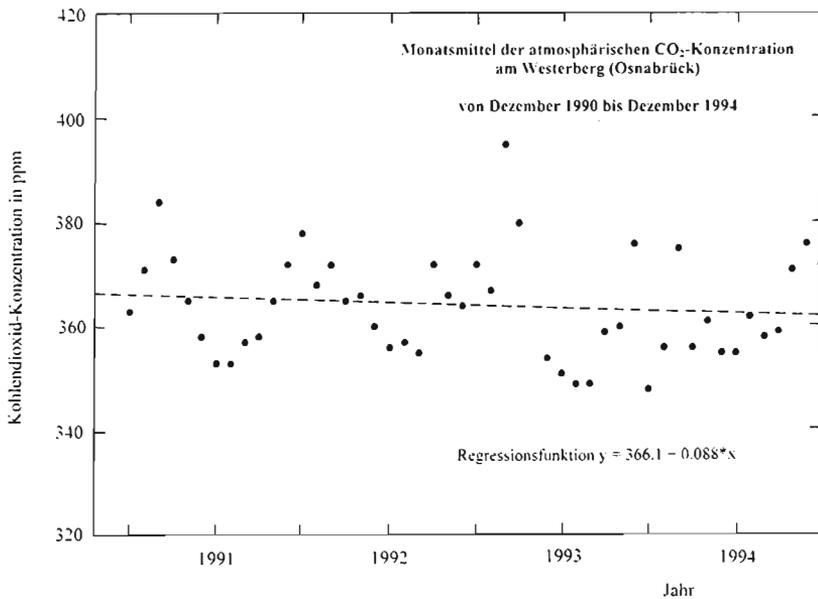


Abb. 10: Meßwerte (Monatsmittel) der atmosphärischen CO₂-Konzentration der Station Osnabrück (Fachgebiet Ökologie der Universität, Meßstation am Westerberg, 90 m über NN, 52° 18' N, 8°, 2' O, in 4 m über der Bodenoberfläche) innerhalb des Zeitraumes von Dezember 1990 bis Dezember 1994; Meßintervall 144 sec.

Die globale Steigerung der CO₂-Emission wird sich in der Zukunft drastisch verstärken. Zu den Ländern mit einem besonders hohen CO₂-Ausstoß gehören Australien, Bangladesh, China, Großbritannien, Indien, Polen, Rußland, Südafrika und die USA; bei diesen Ländern wird derzeit etwa 70 % des Stromes aus fossilen Trägern erzeugt. Geringe Emissionen haben Brasilien, Kanada, Frankreich, Schweden, Schweiz. Bei ihnen führen jedoch andere Energieträger zu Umweltproblemen, so die Wasserkraft und die Kernenergie (siehe unten). Während die Werte in Nordamerika (um 1 % pro Jahr) und Westeuropa (um 1,6 % pro Jahr) deutlich rückläufig sind, nahmen sie z. B. in den Jahren von 1980 und 1985 in China um 5 % pro Jahr zu, in Afrika um 6 %, im Nahen Osten sogar um 8 %, in Lateinamerika hingegen jedoch nur um 0,2 %. In Afrika ist 68 % des CO₂-Anstiegs auf das Bevölkerungswachstum zurückzuführen, in Brasilien sogar 78 %. Die Steigerungsrate der CO₂-Emissionen ist in China durch die dort immens wachsende Kohle-Produktion (das 30fache von 1949) erheblich; im Jahr 2000, so schätzt man, wird China die USA im CO₂-Emissionsausstoß überholt haben, derzeit liegt sie bereits bei 5-10 % pro Jahr.²¹ Gleiches gilt auch für Thailand und Malaysia. Wenn die Kohleproduktion und der Kohleverbrauch in China mit der heutigen Geschwindigkeit steigt, so werden die dortigen Städte absehbar die am stärksten verschmutzten bewohnten Bereiche der Erde sein. Hohe Steigerungsraten zeigen auch Indien und viele osteuropäische Staaten.

Bei einem wachsenden CO₂-Ausstoß um etwa 4-4,5 % pro Jahr würde aller Voraussicht nach die Atmosphäre im Jahr 2050 etwa 900 ppm enthalten. Dies entspräche dem 3fachen des Normalwertes, bei einer Steigerungsrate von 2 % zu einer Verdoppelung. In dem positivsten Fall verlangsamt sich aufgrund der Trägheit des Systems der Anstieg, so daß im Jahr 2050 die CO₂-Konzentration bei einem Wert unter 400 ppm liegen könnte. Bereits jetzt befindet er sich bei etwa 365 ppm. Seit 1989 ist insbesondere durch den Zusammenbruch der sozialistischen Wirtschaftssysteme die Zuwachsrate auf 0 % gesunken. Aber auch ein Nullwachstum bedeutet einen weiteren jährlichen Ausstoß von 20 Milliarden Tonnen CO₂. Die *Abbildung 11* zeigt den wahrscheinlichen Anstieg des CO₂-Gehaltes der Luft in

²¹ Mehr als 70 % des wachsenden Energiebedarfs Chinas wird durch Kohle gedeckt. Nach Angaben des Londoner Royal Institute of International Affairs war China 1988 mit 10 % an der weltweiten CO₂-Emission beteiligt, 1990 rechnet das Institut mit einer Steigerung des chinesischen Energieverbrauchs von 60 % bis zum Jahr 2000 (BLUME & SCHNEIDER 1995).

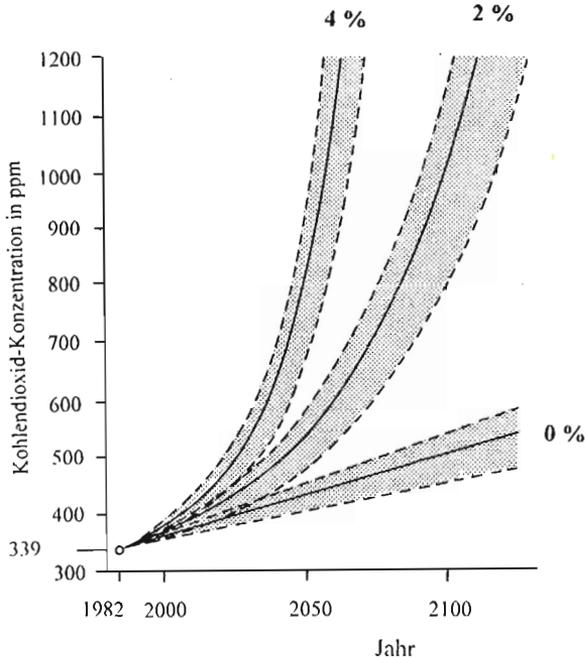


Abb. 11: Voraussichtlicher Anstieg des CO₂-Gehaltes der Luft in den kommenden 150 Jahren bei einer Steigerungsrate des CO₂-Ausstoßes bei 0 %, 2 % und 4 % (verändert nach LISS & CRANE 1983).

den kommenden 150 Jahren (Zunahme der Gesamtemission bei 0 %, 2 % und 4 %) nach einer Datengrundlage von 1982.

Wichtige Senken der CO₂-Konzentration der Atmosphäre sind zum einen das Meer, zum anderen die Wälder, beides Regionen mit einer hohen primären Biomasse-Produktion.

b) Methan (CH₄)

Die wichtigsten Methan-Quellen stellen die Reisfelder, die großen Rinderherden, die Sümpfe sowie Tropenwälder dar (Tab. 2). Global konzentrieren sich die Bereiche zum einen auf den Norden (boreale Wälder Nordamerikas und Eurasiens). Innerhalb der ausgedehnten Feuchtgebiets-Zonen der Erde stellt dabei der boreale Wald durch anaerobe Prozesse mit 20 %

eine erhebliche Methan-Quelle dar (NISBET 1994). Sehr viel Methan ist auch in den Permafrostböden in Hydratform (Methanhydrat) gespeichert. Zum anderen finden sich weitere riesige Methan-Quellen im Bereich der Tropen (z. B. in den großen Überflutungsgebieten des Amazonasbeckens). Ein jahreszeitliches Maximum der Methan-Abgabe ist im Norden in den Jahreszeiten höchster Zersetzungsaktivität zu verzeichnen (Herbst und Winter). Weitere wesentliche Methan-Quellen umfassen die Reisfelder Südostasiens und die Rinder- und Wasserbüffel-Herden. Ein Rind produziert täglich über seine symbiontischen Bakterien durch Gärung beim Verdauungsprozeß im Durchschnitt etwa 100 g Methan. Bei einem weltweiten Rinderbestand von 1,25 Milliarden Tieren entspricht dies im Jahr einer Methan-Menge von allein 45 Millionen Tonnen, die freigesetzt wird. Weitere Methan-Emittenten sind Termiten (PEARMAN & FRAZER 1988).

Tab. 2: Methanquellen (Mengenangaben in Millionen Tonnen, insgesamt 500 Millionen Tonnen); nach NISBET (1994).

Reisfelder	100
Wiederkäuer	80
Sümpfe	80
Verbrennen von Biomasse	55
Mülldeponien	40
Erdgasbohrungen	40
Moore und Tundren	35
Kohlebergbau	35
Termiten	20
Meere	10
Rest	5

Die Steigerung der Methan-Konzentration auf über das Doppelte des natürlichen Ausgangswertes basiert u. a. auf dem zunehmenden Reisanbau, der dem Wert der natürlichen Feuchtgebiete fast gleich kommt, ferner auf der erheblichen Vergrößerung der Rinderherden in vielen Ländern und deren Methan-Abgabe und darüber hinaus über die ebenfalls wachsende Verbrennung von Öl und Erdgas (CRUTZEN u. a. 1986), siehe *Abbildung 12*.

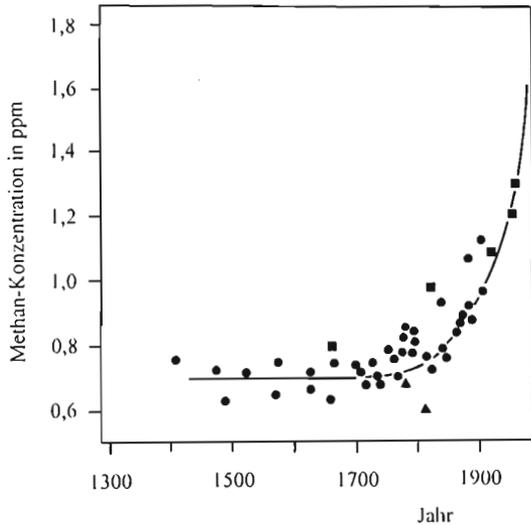


Abb. 12: Anstieg der CH_4 -Konzentration in der Atmosphäre (verändert nach verschiedenen Quellen u. a. ROBBINS u. a. 1973, CRAIG & CHOU 1982, RASMUSSEN & KHALIL 1984, BLAKE & ROWLAND 1988).

Jährlich werden 500 Millionen Tonnen Methan freigesetzt, dabei stammt 1/5 aus fossilen Quellen (Hauptquellen fossilen Methans: Gasfelder, Kohle-Zechen). Besonders starke anthropogen bedingte Emissionen entstehen bei der Kohleverbrennung (besonders in China) und dem Entweichen von Methan aus undichten Erdgasleitungen (insbesondere in der früheren Sowjetunion, wo Erdgasverluste von 10 % gegenüber anderen Ländern mit 3 % auftraten). Diese Quellen führen zu einer jährlichen Emission von 220-460 Millionen Tonnen. 50 Millionen Tonnen Methan stammen aus der Biomasseverbrennung: Brände in den borealen Wäldern Kanadas und Rußlands, ferner in den tropischen Wäldern Brasiliens, Indonesiens, Malaysias sowie in Grasländern der afrikanischen Savannen. Die Methan-Emissionen sind am größten in China, USA, Indien und im Bereich der ehemaligen Sowjetunion. Etwa 50-300 Millionen Tonnen beruhen auf natürlichen Quellen (Feuchtgebiete, stehende Gewässer, Tundren u. a.).

Methan stellt ein sehr wichtiges Treibhausgas dar und besitzt eine Verweildauer in der Atmosphäre von 7-10 Jahren. Der Methan-Gehalt stieg von 1978-1987 um 11 % mit einer jährlichen Zuwachsrate von 0,016 ppm

(BLAKE & ROWLAND 1988), im Augenblick ist der Zuwachs geringer (0,012-0,013 ppm); derzeit beträgt die Methan-Konzentration der Atmosphäre 1,70-1,75 ppm, etwa doppelt so viel wie vor 200 Jahren (LEVIN u. a. 1985). Unter nicht-anthropogener Beeinflussung dürfte der Methan-Gehalt der Luft bei 0,65 ppm als globalem Mittelwert liegen (NISBET 1994). Ergebnisse von STEELE u. a. (1992) zeigen eine Verlangsamung des Methan-Anstiegs Ende der achtziger Jahre; dennoch steigt immer noch der Methan-Gehalt in der Atmosphäre schneller als der des CO₂. 1991 wurde über den kanadischen Wäldern ein Gehalt von 1,83 ppm gemessen. Global konnte 1992 erstmals eine Senkung festgestellt werden, man brachte dies in Zusammenhang mit dem gebremsten Wachstum der russischen Gasindustrie und den dadurch bedingten zurückgehenden Verlusten aus lecken Gas-Pipelines. Methan nimmt derzeit mit einer Rate von etwa 1 % zu.

Der Treibhauseffekt, den ein Methan-Molekül verursacht, ist um etwa 60 mal stärker als der eines CO₂-Moleküls; somit hat jede Tonne Methan, die aus einer Pipeline entweicht, dieselbe Treibhauswirkung wie 60 Tonnen CO₂ aus der Öl- bzw. Kohleverbrennung. Bei einer globalen Erwärmung ist mit einer erhöhten Freisetzung von Methan aus den großflächig verbreiteten Permafrostböden zu rechnen; eine Erwärmung dieser Böden ist gegenwärtig feststellbar. Eine erhöhte Freisetzung von Methan aus einem solchen großen Reservoir, wie es die Permafrostböden darstellen, würde einen Prozeß der positiven Rückkopplung einleiten: steigender Methan-Gehalt der Atmosphäre bedingt steigende globale Erwärmung, diese wiederum weiteres Auftauen der Permafrostböden und weitere erhöhte Methan-Freisetzung. Eine vermehrte Methan-Freigabe ist auch auf den jährlich um 6 % wachsenden Rinderbestand und die Intensivierung des Reisanbaus zurückzuführen. Daß auch bestimmte andere Faktoren eine Rolle spielen können, zeigen die derzeit steigenden Biber-Populationen Kanadas (*Castor canadensis*). In Flüssen und Seen, die von Bibern bewohnt und deren Randbereiche überstaut sind, gibt es pro Streckeneinheit eine um den Faktor 100 höhere Methan-Emission als in vom Biber unbewohnten Bereichen (NISBET 1994).

Eine Veränderung der Methan-Konzentration kann sehr unterschiedliche Auswirkungen haben, je nachdem, welche anderen Gase vorhanden sind, und wo ihre Konzentration liegt. So kann Methan den Ozongehalt erhöhen oder senken, je nach der Konzentration anderer Gase, z. B. von NO_x. Eine hohe NO_x-Belastung führt zu einer Zunahme des Ozons durch Oxidation von CH₄ zu CO₂, eine niedrige NO_x-Belastung hingegen senkt den Ozon-

gehalt. Dieses Beispiel dokumentiert, wie stark die einzelnen Prozesse miteinander vernetzt sind und sowohl antagonistische als auch synergistische Prozesse je nach Ausgangslage bewirkt werden können.²²

c) Kohlenmonoxid (CO)

Kohlenmonoxid absorbiert zwar keine Strahlung, greift aber die Hydroxyl (OH)-Radikale an. Je höher der Kohlenmonoxid-Gehalt, desto niedriger ist auch der OH-Gehalt, je niedriger der OH-Gehalt um so höher wiederum der Methan-Gehalt. Kohlenmonoxid entsteht zu einem großen Prozentsatz aus der unvollständigen Zersetzung von Biomasse, u. a. in den Überschwemmungsgebieten großer Ströme (z. B. Amazonasbecken). Eine weitere Emissionsquelle stellt die Verbrennung fossiler Energieträger dar. Die Lebensdauer eines Kohlenmonoxid-Moleküls beträgt zwei Monate. Auch Kohlenmonoxid hat weltweit mit der Industrialisierung zugenommen (siehe dazu LEVINE u. a. 1985, CICERONE 1988, KHALIL & RASMUSSEN 1984, 1991).

d) Stickoxide (NO_x)

Zu den Oxiden des Stickstoffs gehören das Stickstoffmonoxid (NO), das Stickstoffdioxid (NO₂), das Distickstoffoxid bzw. Lachgas (N₂O) bzw. Gemische von NO und NO₂ (Stickoxide NO_x). Troposphärisches NO_x stammt aus Verbrennungsprozessen sowie von Flugzeugen und Blitzen aus der Stratosphäre. Die Emissionen sind besonders hoch bei der Nutzung von Kraftfahrzeugen, Steinkohle und Erdgas. Quellen sind ferner Böden, Meere, Verbrennung von Biomasse, Nutzung weiterer fossiler Energien. Lachgas (N₂O) entsteht bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen, bei der Freisetzung von ammoniakhaltigen Düngemitteln und bei Waldbränden. In den Wald- und Savannengebieten der Tropen und Subtropen treten insbesondere während der Trockenzeit durch Vegetationsbrände erhöhte Stickoxid-Konzentrationen auf, wobei es unter Sonnenlicht zu Ozonbildung kommen kann. Solche Vegetationsbrände beruhen im wesentlichen auf landwirtschaftlichen Aktivitäten. Dabei werden nach CRUTZEN &

²² LELIEVELD & CRUTZEN (1992) konnten zeigen, daß mögliche chemische Reaktionen des Methans in der Atmosphäre und damit ihre klimatischen Auswirkungen überbewertet wurden.

ANDREAE (1990) der Biosphäre allein 10-20 Millionen Tonnen Stickstoff entzogen und in die Atmosphäre freigesetzt.

Die jährliche N_2O -Zunahme beträgt derzeit 0,25-0,3 %; diese Zunahme hängt im wesentlichen mit der Zerstörung der Tropenwälder zusammen und der Nutzung fossiler Brennstoffe. Die Gase sind in der Troposphäre sehr stabil und werden hauptsächlich erst in der Stratosphäre zerstört. In der Troposphäre bewirken sie den Anstieg des Ozons. Stickoxide gelangen einerseits über den Regen andererseits als trockene Depositionen auf die Erdoberfläche zurück.

e) Fluorchlorkohlenwasserstoffe und andere halogenierte Verbindungen

Besonders treibhauswirksam sind die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW-11, FCKW-12) und andere halogenierte Verbindungen. Alle diese Stoffe sind rein anthropogen bedingt: FCKW-11 dient u. a. zum Aufschäumen von Kunststoffen (Verpackungsmaterial, Detergentien, Baustoffe, Isolierungen usw.) und als Treibmittel, z. B. von Spraydosen. FCKW-12 wird in Klimaanlage von Kraftfahrzeugen u. a. eingesetzt. Besondere Bedeutung haben (hatten) die FCKW in ihrer Nutzung für Kühlgeräte, Klimaanlage und Feuerlöscher.

Die Wirkung der Fluorchlorkohlenwasserstoffe ist in der Troposphäre eine andere als in der Stratosphäre. In der Troposphäre tragen sie besonders effektiv zum Treibhauseffekt bei. Da es sich um sehr stabile Verbindungen handelt, werden sie in der Troposphäre nicht verändert und gelangen nur sehr langsam in die Stratosphäre. FCKW-11 hat eine Lebensdauer von 76,5 Jahren, FCKW-12 gar von 139 Jahren. Der größte Teil aller bisher produzierten FCKW konnte deshalb die Stratosphäre noch gar nicht erreichen, sondern trägt in der Troposphäre zur Verstärkung des Treibhauseffektes bei. In der Stratosphäre zerstören die FCKW die Ozonschicht und wirken damit einem Treibhauseffekt entgegen. Dem Abkühlungseffekt der oberen Atmosphärenschicht durch Ozonabbau steht ein Aufwärmungsprozeß der unteren Atmosphärenschicht – beides durch FCKW bedingt – gegenüber.

Bei den Fluorchlorkohlenwasserstoffen und anderen halogenierten Verbindungen waren Zuwachsraten bis 1974 von 8,5 bis 11 % pro Jahr zu ver-

zeichnen (0,02 ppb²³ Steigerungsrate pro Jahr); siehe *Abbildung 13*. Derzeit sind vom FCKW-11 0,27 ppb und vom FCKW-12 0,45 ppb in der Atmosphäre feststellbar. Die Weltproduktion betrug 1986 1 Million Tonnen. Der Verbrauch in der Europäischen Union war 1993 auf 38 % des Ausgangswertes von 1986 gesunken. Dies beruht im wesentlichen auf dem verringerten Verbrauch im Bereich der Treibgase, Lösungsmittel und Schaumstoffe, in der Kältschrank- und Klimaanlage-Industrie hingegen

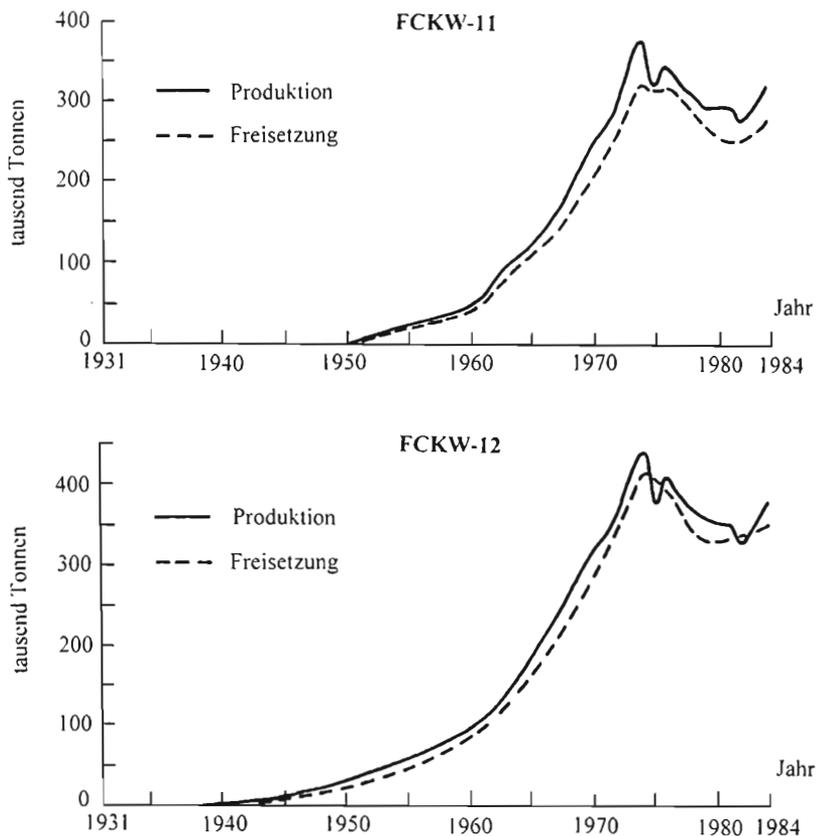


Abb. 13: Steigerung der globalen FCKW-Gehalte der Atmosphäre (FCKW-11, FCKW-12) nach NISBET (1994).

²³ ppb = parts per billion

wurden noch nie so viele FCKW verbraucht wie 1993 (WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT der Bundesregierung "Globale Umweltveränderungen" 1996). Ab 1995 wurde die Produktion von FCKW in der Bundesrepublik Deutschland eingestellt (WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT der Bundesregierung "Globale Umweltveränderungen" 1996).

Sehr wahrscheinlich ist die Treibhauswirkung dieser Gase im Hinblick auf die Auswirkungen auf die Menschheit noch bedenklicher als die durch sie bedingte Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht. Pro Molekül bewirken die FCKW einen 10.000 mal stärkeren Treibhauseffekt als das CO_2 . Eine unveränderte Freisetzung der FCKW bis in die Jahre 2025-2030 entspricht in seiner Wirkung einer Verdopplung des CO_2 -Gehaltes der Luft. Besonders bedauerlich ist in diesem Zusammenhang, daß die FCKW-Produktion im Vergleich zu anderen Industrie-Branchen ein recht unbedeutender Wirtschaftszweig ist. Daß man lange Zeit so wenig Engagement an einer Eindämmung der Emissionen zeigte, liegt vielleicht daran, daß die Stoffe für den Menschen ungiftig sind, somit keine direkte Gefahrenwirkung für den Menschen ausgeht. Eine mögliche Senkung liegt auch im verbesserten Recycling.

f) Wasserdampf

Durch Düsenflugzeuge verursachte Anreicherungen der an Wasserdampf weitgehend armen Stratosphäre führen ebenfalls zu erheblichen Auswirkungen auf die Zusammensetzung der Atmosphäre. Die Mengen freigegebenen Wasserdampfes in der untersten Stratosphärenschicht sind dabei beträchtlich. Es gibt Indizien dafür, daß mit der Zunahme des Düsenflugverkehrs eine steigende Wolkenbildung (Cirrusbewölkung) einhergeht (MATTHEWS u. a. 1971). Leider ist die Rolle der Wolken wissenschaftlich nur ungenügend untersucht; einerseits schreibt man ihnen eine kühlende, andererseits eine heizende Wirkung zu. Als zweite wichtige Wasserdampf-Quelle ist die Oxidation des sich in der Atmosphäre anreichernden Methans anzuführen.

Bei einer allgemeinen globalen Temperaturerhöhung wird sich auch die Konzentration atmosphärischen Wasserdampfes um ein Vielfaches erhöhen. Somit verschärft sich die Situation im Rahmen einer positiven Rückkopplung.

g) Gegenläufige Prozesse

Bei Sonnenschein können lösliche Aerosolteilchen aus Schwefeldioxid, Stickoxiden, Kohlenwasserstoffen und Ammoniak in der unteren Atmosphäre gebildet werden. Da sie eine vermehrte Rückstrahlung der Sonnenstrahlen bewirken und weniger eine Wärmeabstrahlung verhindern, führen sie zu einer Abkühlung der Erde. Anthropogen veränderte Wolken haben einen erheblichen Einfluß auf die Albedo, sie wirken einem Treibhauseffekt entgegen. FCKW, N₂O und CH₄ bewirken direkt einen erhöhten Ozonabbau in der Stratosphäre (siehe unten).

1.2.3. Direkte Auswirkungen

Zu den direkten Auswirkungen, die allgemein prognostiziert werden, gehört der sogenannte "CO₂-Düngungseffekt". Bisher liegen hierüber noch wenige wissenschaftliche Erkenntnisse vor. Man nimmt an, daß sich die erhöhte CO₂-Konzentration der Atmosphäre positiv auf die Primärproduktion auswirkt; über die tatsächliche Menge der Zunahme liegen jedoch keine gesicherten Werte vor. Auf viele Pflanzen hat die zunehmende CO₂-Konzentration eine düngende Wirkung (TANS u. a. 1990), die jedoch zeitlich begrenzt ist. Wieviel Kohlenstoff zusätzlich Ökosysteme akkumulieren können, ist weitgehend unbekannt. Sicher ist, daß Pflanzen nur in der Menge zusätzlich CO₂ aufnehmen können, wie auch andere Nährstoffe in ausreichender Menge vorhanden sind. Zwar ist die Wirkung des CO₂ auf das Pflanzenwachstum in Laborversuchen nachweisbar (Biomassesteigerung), in natürlichen Ökosystemen wird diese jedoch durch die kompensatorische Wirkung anderer Umweltfaktoren weitgehend eingeengt (Temperatur, Nährstoffe, Wasser). Man geht davon aus, daß mit der Erhöhung des CO₂-Gehaltes eine auch unter quantitativen Gesichtspunkten merkliche Erhöhung der Primärproduktion nicht einhergehen wird. Fragen bezüglich möglicher Veränderungen in der Vegetation, Schädlingsbefall, Artenrückgang, Auswirkung auf Nutzpflanzen sind weitgehend unbeantwortet.

1.2.4. Indirekte Auswirkungen

Indirekte Auswirkungen beschränken sich im wesentlichen auf Veränderungen in der Klimasituation. Die auf diesem Gebiet sehr intensiv betriebene Forschung hat bereits vor längerer Zeit eine um 0,3-0,7°C erhöhte

globale Durchschnittstemperatur vom Jahr 1860 bis jetzt ergeben. Die Warnungen, daß durch Nutzung fossiler Energie unser Klima sich weltweit verändern könnte, sind nicht neu, bereits im Jahr 1896 hat der schwedische Naturforscher Svante ARRHENIUS²⁴ auf die Gefahren hingewiesen (ARRHENIUS 1896).

Im Laufe des nächsten Jahrhunderts ist unter weitgehendem Konsens aller Fachwissenschaftler mit einer globalen mittlere Erwärmung um etwa $3\frac{1}{2}^{\circ}\text{C} \pm$ zu rechnen, wenn Gegenmaßnahmen unterbleiben. Nach ihren Prognosen wird mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit in den kommenden 50-100 Jahren das Ausmaß der natürlichen Klimaschwankungen der letzten 10.000 Jahre überschritten werden. Die Veränderung in der Strahlungsbilanz entsprechen dabei quantitativ einem Unterschied zwischen Eiszeit und Warmzeit in geologischen Zeitepochen.

Weltweit gibt es seit etwa 1861 umfangreiche Temperaturoaufzeichnungen (Abb. 14). Die Ergebnisse zeigen, daß sich das gegenwärtige Klima um das

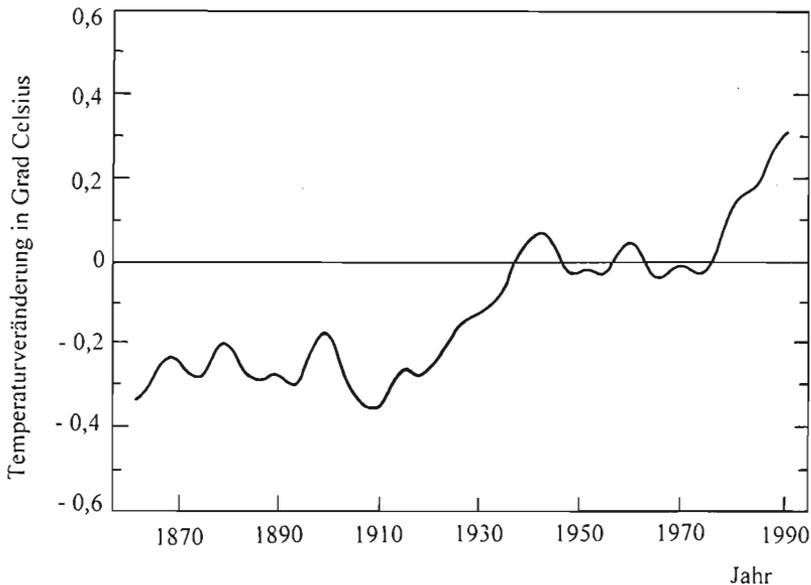


Abb. 14: Veränderungen der Durchschnittstemperatur auf der Erde von 1861-1991 (in Anlehnung an NISBET 1994).

²⁴ Svante ARRHENIUS (1859-1927), schwedischer Physikochemiker und Nobelpreisträger des Jahres 1903.

Doppelte bzw. Dreifache der Standardabweichung vom Normalzustand unterscheidet. Ein besonders starkes Indiz liefern Messungen in den Gesteinen und Permafrostböden der nordamerikanischen und sibirischen Arktis. Bei der Untersuchung des sogenannten "geothermischen Gradienten" scheint im Laufe der letzten 50 Jahre die Arktis um mehrere Grad wärmer geworden zu sein. Bohrkerne aus dem arktischen aber auch antarktischen Eis belegen, daß zumindest in Polnähe der Wärmeeintrag gestiegen ist. Darüber hinaus zeigen die meisten Alpengletscher Anfang dieses Jahrhunderts deutliche Rückzugstendenz (HAEBERLI 1994), seit 1860 um etwa 50 %; auch dies spricht für eine allgemeine Erwärmung unseres Planeten.

Seit der "Industriellen Revolution" hat sich die globale Temperatur insgesamt um etwa $0,6^{\circ}\text{C}$ erhöht. Diese Temperaturerhöhung unterliegt jedoch erheblichen Schwankungen. In den Jahren 1960-1975 erfolgte eine Temperaturremiedrigung, diese beruhte auf natürlich bedingten Klimaschwankungen, die den allgemeinen Trend einer Temperaturerwärmung überlagern können. Solche Phänomene erschweren Interpretationen erheblich und machen Prognosen unsicher. Eine Trennung der natürlichen Schwankungen von den durch den Menschen hervorgerufenen Veränderungen ist derzeit nicht möglich. Vergleicht man jedoch die Werte der letzten 100 Jahre, so kann man feststellen, daß pro Dekade die Erwärmungszunahme bei $0,06^{\circ}\text{C}$ im Durchschnitt lag, die derzeitige Zunahme jedoch $0,1^{\circ}\text{C}$ beträgt.²⁵

HANSEN u. a. (1988) haben eine Zukunftsprognose über die Temperaturentwicklung auf der Erde unter drei verschiedenen Ausgangssituationen gegeben (Abb. 15).

- a) Fortschreibung der Verhältnisse der 70er bzw. 80er Jahre,
- b) Emissionsreduktion entsprechend den Vorgaben der Umweltkonferenzen,
- c) wenn nach dem Jahr 2000 keine FCKW freigesetzt werden und die Nettoemission von CO_2 und anderen Treibhausgasen = 0 ist.

Wahrscheinlich ist der Fall b der realistischste. Dies würde eine Erhöhung der globalen Temperatur um $+1^{\circ}\text{C}$ bis in das Jahr 2010 und $+4^{\circ}\text{C}$ bis in

²⁵ KELLY & WIGLEY (1990) konnten zeigen, daß eine natürlich bedingte Erhöhung der Sonnenstrahlung auszuschließen ist.

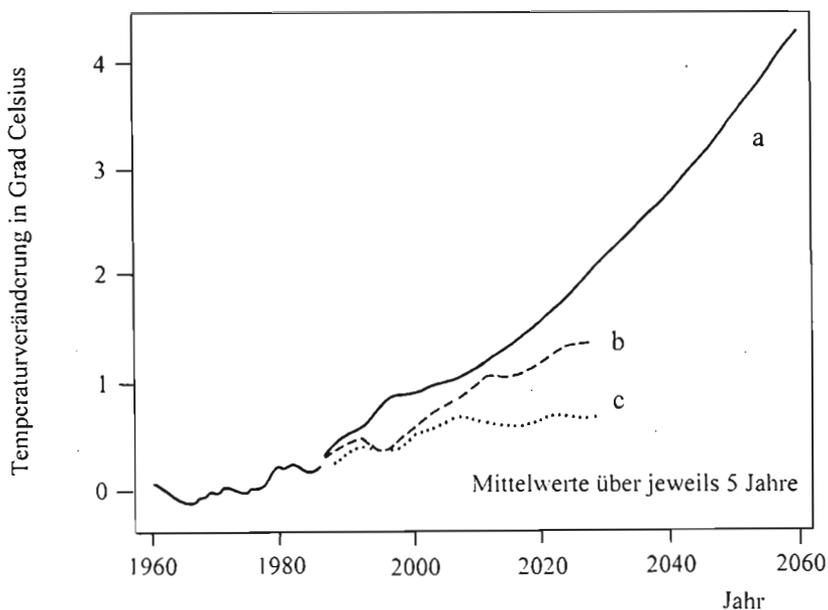


Abb. 15: Zukunftsprognose des Temperaturanstiegs; nach HANSEN u. a. (1988); weitere Erläuterungen siehe Text.

das Jahr 2100 bedeuten, d. h. pro Jahrzehnt eine globale Erhöhung der Temperatur um $+0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die meisten Modellrechnungen gehen von einem Anstieg der globalen Temperatur am Boden bei einer doppelten CO_2 -Konzentration von $+1\frac{1}{2}$ bis $+4\frac{1}{2}\text{ }^{\circ}\text{C}$ aus (HOUGHTON u. a. 1990), jedoch sind diese Veränderungen je nach Breiten- und Längengrad unterschiedlich. Eine besonders hohe Erwärmung ist in den höheren Breitenlagen im Herbst und Winter zu prognostizieren, ebenso in der südpolaren Region, dagegen fällt die Erwärmung in den Tropenbereichen geringer aus. Mit der Temperatur verändern sich in der Regel auch die Niederschlagsverhältnisse, wobei eine deutliche Zunahme in den höheren Breiten und in den Tropen möglich erscheint.

154 Nationen haben in Rio de Janeiro im Juni 1992 die Rahmenkonvention zum Schutz des Klimas unterzeichnet mit dem klaren Ziel der Stabilisierung der Treibhauskonzentrationen. Wie in dem Bericht der ENQUETE-KOMMISSION "Vorsorge zum Schutze der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages (1991) formuliert ist, muß die Emission von Kohlendioxid

durch die Industrie-Nationen bis zum Jahr 2050 um bis zu 80 % reduziert werden. Selbst dann aber ist bis zur zweiten Hälfte des nächsten Jahrhunderts immer noch mit einer globalen Erwärmung um bis zu +2 °C zu rechnen. Wenn der gegenwärtige Trend andauert, ist folgender Temperaturanstieg realistisch:

- etwa +2 °C in den tropischen Breiten,
- +2 bis +5 °C im globalen Mittel,
- +8 bis +10°C in den Polbereichen.

Das Klima in unseren Breiten entspräche unter solchen Bedingungen dem des Pliozän (vor etwa 5-3 Millionen Jahren), dem Spättertiär, als in unseren Breiten die subtropische Flora nach Süden wanderte oder erloschen ist und die Säugetiere sich evolutiv entfalteteten. In Mitteleuropa war es im Sommer um 4 °C wärmer, im Winter um 6 °C.

Ohne Gegenmaßnahmen werden mit hoher Wahrscheinlichkeit folgende globale Veränderungen eintreten:

- Ansteigen des Meeresspiegels,
- Änderung der Vegetationsgebiete,
- Änderungen in der atmosphärischen und ozeanischen Zirkulation,
- Häufung der Extreme.

Vielschichtige Phänomene, z. B. Selbstverstärkungsprozesse, positive Rückkopplungsprozesse, sind möglich bzw. sogar vorauszusehen: Schmelzen von Eis, Reduktion der Reflexion, Erhöhung der Absorption, weiteres Ansteigen der Oberflächentemperaturen usw. oder höheres Wachstum verbunden mit einem größeren Abbau von organischem Material, dadurch höhere Methanabgabe in die Atmosphäre, weitere Erwärmung, Rückgang der Vegetation, dann wieder stärkere Reflexion usw. Überhaupt nicht absehbar sind jedoch Auswirkungen auf das menschliche Gesellschaftgefüge und auf die Zu- und Abwanderungsprozesse von Bevölkerungsgruppen auf globaler Ebene.

a) Ansteigen des Meeresspiegels

Von besonderem Interesse ist die Frage der Veränderung des Meeresspiegels und die Reaktion der arktischen und antarktischen Eismassen auf eine globale Erwärmung. Die Prognosen variieren je nach Autor erheblich hinsichtlich der Geschwindigkeit, wie schnell die Eisdecken auf eine

Temperatur-Erhöhung reagieren könnten. Neben der Wärme sind auch Niederschläge und Bewölkungsgrad wichtige Faktoren. Global scheint es bereits zu einer leichten Erhöhung des Meeresspiegels gekommen zu sein (NISBET 1994). Es gibt Anzeichen für einen fortschreitenden Anstieg des Meeresspiegels, aufgrund meßtechnischer Schwierigkeiten ist diese Tendenz nur schwach belegbar. Immerhin nimmt man eine Erhöhung um +1,25 mm pro Jahr an. Für die Weltmeere ergibt sich ein Wert von etwa +12 cm in den letzten 20 Jahren, in der Nordsee sind es 16 cm (Mittel der Messungen an bis zu 10 Pegelstationen der deutschen Nordseeküste von 1947-1983; siehe BUCHWALD 1995). Derzeit ist mit einer Erhöhung von +25 bis +165 cm bis zum Jahr 2030 zu rechnen. Nach HOUGHTON u. a. (1990) ist ein Anstieg um über einen Meter im Verlauf des nächsten Jahrhunderts sehr unwahrscheinlich. Dennoch sind derzeit +1 bis +2,4 mm pro Jahr zu verzeichnen, dies ist 3-6 mal so viel wie in den letzten 100 Jahren (PELTIER & TUSHINGHAM 1989). Bei einem vollständigen Stop der Treibhaus-Emissionen im Jahr 2030 ist immerhin noch mit einem Meeresspiegelanstieg von 43 cm zu rechnen (Abb. 16).

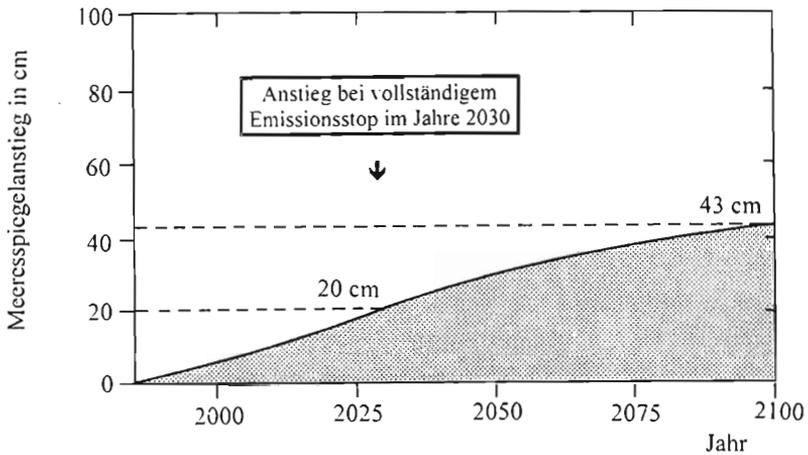


Abb. 16: Meeresspiegelanstieg bei einem vollständigen Stop der Treibhaus-Emissionen im Jahre 2030 (nach WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT der Bundesregierung "Globale Umweltveränderungen" 1993).

Neueste Berechnungen gehen von einem Meeresspiegel-Anstieg um das Jahr 2100 von etwa 48 cm aus (WIGLEY & RAPER 1992), einbezogen ist hierbei auch die Wärmeausdehnung des Ozeanwassers und das Abschmel-

zen der Gebirgsgletscher. Inwieweit aber z. B. auch ein möglicher zunehmender Schneefall im Bereich der Antarktis Meeresspiegelsenkungen herbeiführt, und dabei einen kompensatorischen Einfluß ausübt, ist schwer prognostizierbar (BROMWICH 1990). Mit einem vermehrten Schneefall in der Antarktis ist zu rechnen, da hierfür derzeit die Temperaturen zu tief liegen, bei einer globalen Erwärmung jedoch die Temperaturen eine Schneebildung begünstigen.

Bei einer globalen Erwärmung um +3 bis +4 °C sind katastrophale Überflutungen ganzer Küstenbereiche durch Erhöhung des Meeresspiegels um +50 bis +100 cm zu erwarten:

- In den USA wären 2 % der gesamten Landesfläche überflutet, dabei müßten 6-8 % der Gesamtbevölkerung evakuiert werden.
- In Südost-Asien oder Europa würden noch weitaus größere Flächen unter Wasser stehen, besonders betroffen wären Deltagebiete (z. B. Bangladesch) und allgemein Küstenstaaten wie Holland und Dänemark.

Ein Drittel der Gesamtweltbevölkerung lebt innerhalb eines Küstenstreifens von nur 60 km, eine hochgradig durch einen Meeresspiegel-Anstieg gefährdete Zone. Nach BROADUS u. a. (1986) würde allein ein Meeresspiegelanstieg von einem Meter etwa 12-15 % Verlust der landwirtschaftlichen Fläche Ägyptens zur Folge haben, 10 % der Bevölkerung müßte sogar umgesiedelt werden. Viele der großen Ballungszentren wären ganz überflutet oder erheblich beeinflußt.

Folgende weitere Auswirkungen kommen hinzu:

- verstärkte Küstenerosion,
- Zunahme von Sturmfluten,
- stärkeres Eindringen von Salzwasser ins Binnenland, damit Gefährdung von Trinkwasserreservoirien, eine Reduzierung von landwirtschaftlichen Anbauflächen und anderes mehr.

Inwieweit ganze Meeresströmungen verlagert werden, ist nicht vorhersagbar. Durch schmelzendes Eis aus dem arktischen Bereich und dem dadurch veränderten Süßwassergehalt der dortigen Meere ist es durchaus möglich, daß auch der Golfstrom eine veränderte Fließrichtung bekommt. Sollte er seine wärmende Kraft für den europäischen Kontinent verlieren, hätte dies weitreichende Folgen für die europäische Klimasituation. Die Jahreszeitlichen Temperaturen würden dann mit denen von Neufundland vergleich-

bar sein. Unabhängig von verschiedenen regionalen Auswirkungen würden die Veränderungen in Südostasien am schlimmsten sein, wo die Küstenbereiche in besonders hoher Dichte besiedelt sind.

Kaum abschätzbar wäre es z. B., wenn durch eine globale Erwärmung der westantarktische Eisschild des Schelfeises (ein Bereich von 500.000 km²) in das Meer gleiten würde. Berechnungen ergeben einen vorhersagbaren Meeresspiegelanstieg von 5-6 m. Würde theoretisch gesehen die gesamte Kryosphäre schmelzen, so betrüge der Anstieg 70 m.

b) Die vorhersagbare Änderung der Vegetationsgebiete

Eine besonders große Wirkung würde eine globale Erwärmung auf die Permafrost-Gebiete haben. BARRY (1985) rechnet pro +1 °C mit einer Verlagerung der südlichen Permafrost-Grenze um 150±50 km nach Norden. PETERS (1992) nimmt bei einer 3 °C-Erhöhung eine Verlagerung der Vegetationsgürtel um 500 km an. Die Vegetationsveränderungen wären einschneidend, ebenso die Bodenabsenkungs-Prozesse und der Verlauf ganzer Fließgewässersysteme, Seenbildungen usw. Nicht mit einbezogen sind hierbei Vegetationsveränderungen, die durch sekundäre Faktoren hervorgerufen werden könnten, z. B. durch Extremereignisse wie Brände, Stürme, Flutungen; siehe OVERPECK u. a. (1990). KNOX (1993) bringt die jüngsten besonders außergewöhnlichen Hochwasserereignisse am Mississippi mit Klimaveränderungen in Zusammenhang.

Auf Veränderungen in der Verbreitung ganzer Ökosystemtypen als Folge der Verdopplung des CO₂-Gehaltes (bei einem globalen Temperaturanstieg von 1,2 °C) weisen EMMANUEL u. a. (1985) unter Zugrundelegung des Zirkulationsmodells von MANABE & STOUFFER (1980) hin (Tab. 3).

Tab. 3: Veränderungen der Verbreitung ganzer Ökosystemtypen als Folge der Verdopplung des CO₂-Gehaltes (bei einem globalen Temperaturanstieg von +1,2 °C), nach EMMANUEL u. a. (1985).

Schrumpfung des borealen Waldanteils	von 23 %	auf 15 %
Zunahme Grasländer	17,0	28,9
Zunahme Wüsten	20,6	23,8
Abnahme Wälder	58,4	47,4

Es erscheint realistisch, daß sich die Wüsten und Halbwüsten unter diesen veränderten Bedingungen ausdehnen werden (z. B. in der westafrikanischen Sahelzone, Vordringen der Kalahari und der Karoo im Süden Afrikas nach Osten). Die borealen Wälder würden weiter nach Norden vorrücken, wahrscheinlich käme es zur Bewaldung großer Bereiche der offenen Tundra. In den Präriegebieten entstünden Halbwüsten mit erheblicher Staubbildung, eine Landwirtschaft könnte unter solchen Bedingungen nicht mehr existieren.

Allgemein käme es zu einer Verlagerung der Anbauzonen wichtiger Hauptnahrungspflanzen (z. B. Weizen, Mais) polwärts, im Süden hingegen zu einer weiteren Ausdehnung der Wüsten, Steppen- und Savannengebiete. Hierdurch wären gerade die Länder der sogenannten Dritten Welt am stärksten betroffen. Aber auch eine Verschiebung der Anbauzonen nach Norden hätte regionale Nachteile. Im Falle von Nordamerika müßte ein nordwärts verlagerter Anbau auf die wenig fruchtbaren Podsolböden Kanadas beschränkt werden gegenüber gleichzeitig rückläufigen Erträgen in den bisherigen Anbaugebieten.²⁶

Mit erheblichen Veränderungen muß auch bei der Höhenverlagerung einzelner Vegetationstypen gerechnet werden. Einzelne Pflanzenarten (z. B. die Krummsegge *Carex curvula*) zeigen eine belegbare, mit der globalen Temperaturerhöhung koinzidierende Migration in größere Gebirgshöhen (GRABHERR u. a. 1995).

c) Änderungen der atmosphärischen und ozeanischen Zirkulation

Es ist denkbar, aber bisher sehr spekulativ, daß positive Rückkopplungen einsetzen, durch die der Treibhauseffekt sich eher verstärkt. Inwieweit sich ganze Meeresströmungen verändern, die wiederum einen hohen Einfluß auf das Großklima der Kontinente haben, ist nicht vorhersagbar. Genauso wenig abschätzbar sind die mit globalen Klimaveränderungen einhergehenden hydrologischen Konsequenzen (Veränderungen von Abflußregimen, Mengen und Zeiten). Auch dadurch verursachte Rückkopplungsprozesse wie Sommerdürren sind kaum vorhersagbar (MANABE & WETHERALD 1986). Eine erhebliche Veränderung in der Bodenfeuchte ein-

²⁶ Eine Analyse der Auswirkungen des anthropogen bedingten Treibhauseffektes auf die Landwirtschaft der USA legen ADAMS u. a. (1990) vor.

zelner Kontinente ist unter all diesen Rahmenbedingungen zu erwarten. Das Innere der nördlichen Kontinente dürfte trockener werden, was erhebliche wirtschaftliche Konsequenzen nach sich zöge. Eine durch die Erwärmung der Stratosphäre einhergehende Erhöhung der Ozean-Temperaturen könnte zu einer Zunahme von Wirbelstürmen führen (EMANUEL 1988). Wirbelstürme entstehen immer dann, wenn die Oberflächentemperaturen mehr als $+26,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreichen. Bei einer der CO_2 -Konzentration der Atmosphäre sollte es nach EMANUEL (1987) zu einem 40-50 prozentigen Anstieg des Zerstörungspotentials der Wirbelstürme kommen. Eine Veränderung der Oberflächentemperatur im Bereich der tropischen Meere von nur $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ hat bereits eine Veränderung der Verdunstungsrate um $2,4\%$ zur Folge. Da 70% der Ozeane im Bereich der Tropen liegen, haben solche Änderungen zugleich globale Folgen für den Wasserhaushalt der Erde (KLÖTZLI 1993).

d) Häufung der Extreme

Allgemein vertreten viele Fachwissenschaftler die Auffassung, daß die Extreme zunehmen werden: extremere Wetterschwankungen, heftigere Stürme, stärkere Winde, ausgeprägtere Hochs und Tiefs. Auf regionaler Ebene sichere Prognosen zu geben, ist jedoch nicht möglich, somit sind regionale Folgen kaum prognostizierbar. Durch all die genannten Prozesse besteht jedoch die Gefahr, daß das quasistationäre Gleichgewicht der Atmosphäre aus den Fugen gerät. Je stärker die Extreme, desto weniger wirken Pufferungsvorgänge entgegen. Wie sich höhere Temperaturmaxima und gleichzeitig ihre zunehmende Zahl gegenüber den weniger häufigen Temperaturminima auswirken, bleibt Spekulation.

1.2.5. Synopsis

Alle bisherigen Szenarien sind spekulativ, und aufgrund der Komplexität der Wechselwirkungen lassen sich derzeit kaum gesicherte Vorhersagen auf regionaler Ebene machen. So können nicht prognostizierbare Rückkopplungsprozesse sowohl eine antagonistische als auch eine synergistische Wirkung haben. Ein besonders großer Unsicherheitsfaktor ist das Verhalten der Wolken, sehr schwer abschätzbar ist die thermische Ausdehnung der Ozeane bei einer möglichen Erwärmung.

Sicher ist, daß es lokal zu merklichen Klimaveränderungen kommen wird. Jedoch steht auch fest, daß für viele Prozesse die zu veranschlagenden Zeiträume kaum vorhersagbar sind. So dauert die Umwälzzeit der Weltozeane Jahrhunderte und auch das Abschmelzen von Inlandeisgebieten und insbesondere der Permafrostboden-Gebiete kann lange Zeiträume in Anspruch nehmen. Relativ schnell ist jedoch mit einer verstärkten Westwinddrift, einer erhöhten Zahl von Tiefdruckgebieten und höheren Niederschlagsraten zu rechnen. Alle wissenschaftlich entwickelten globalen Modelle zeigen zweifelsfrei, daß Klimaveränderungen mit regionalen Unterschieden eintreten werden. Auch wird der Norden von den Temperaturveränderungen sicher stärker betroffen sein als der Süden. Sogar solche Modelle, die die Wechselwirkung zwischen Ozeanen und Atmosphäre berücksichtigen, prognostizieren Temperaturerhöhungen (STOUFFER u. a. 1989).

Ein großes Problem besteht darin, daß es nicht möglich ist, die natürlich bedingten Schwankungen von den anthropogen bedingten sicher zu trennen. So traten immer schon im Laufe der Jahrhunderte zum Teil erhebliche Klimaschwankungen auf.²⁷

Die ärmsten Länder werden von den Folgen am stärksten betroffen sein. Das gilt besonders für Nordostbrasilien, Indien und Afrika. Über Afrika, wo jetzt schon viele Katastrophen hereinbrechen, schreibt NISBET (1994): "Der Kontinent wird in Agonie liegen und seine Natur verwüstet sein". Afrika war die Arche der Menschwerdung, von dort aus nahm alles seinen Anfang, dort liegt die Urheimat des Menschengeschlechtes (FACCHINI 1991). Dort wird auch, sollte der Mensch in seiner globalen Verantwortung jetzt nicht mit aller Stärke und Kraftanstrengung einlenken, der Untergang beginnen. Den reichen Ländern drohen große Schwierigkeiten, den armen die MALTHUS'schen Korrekturen: Krieg, Hunger und Seuchen.

Mit steigender Weltbevölkerung (s. Kapitel "Auswirkungen der wachsenden Weltbevölkerung) wächst zwangsläufig die Nahrungsmittelproduktion, dies führt wiederum zu erhöhten Abgaben von Methan und Lachgas. Die exponentiellen Wachstumsprozesse in der Bevölkerungszahl sollten dem-

²⁷ Im Mittelalter gab es z. B. zwischen 800 und 1200 n. Chr. eine warme Periode, in der die Wikinger Grönland und Neufundland besiedelten und die irischen Mönche Weinbau betreiben konnten. Von 1550-1750 folgte eine kleine Eiszeit, in der auch der Bodensee im Winter nachweislich einige Male zugefroren war.

nach ebenfalls steigend wachsende Umweltprobleme nach sich ziehen. Aus diesem Zusammenhang heraus muß die Konsequenz die Reduktion der globalen Bevölkerungszahlen ein vordringliches Ziel für ein Überleben auf dem Planeten Erde sein.

Dringend notwendig ist ein drastischer Rückgang aller Treibhaus-Emissionen (Industrieländer, Ölförderländer, einige Tropenländer). Auf jeden Fall muß schnellstmöglich eine Reduktion auf mindestens die Hälfte der derzeitigen Emission aller treibhausfördernden Emissionen (CO_2 , CH_4 , FCKW und andere Spurengase) angestrebt werden, sonst ist mit einer baldigen Katastrophe zu rechnen. Will man den Status quo erhalten, bedeutet dies eine sofortige Senkung der folgenden Emissionen: CO_2 um 60 %, N_2O um 80 %, CH_4 um 20 %.

Der größte Teil der Staatengemeinschaft hat eine Rahmenkonvention zum Schutz des Erdklimas bei der UNCED-Konferenz im Juni 1992 unterzeichnet. Dabei wurde festgehalten, daß eine stabile Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre auf einem Niveau gehalten werden muß, das gewährleistet, daß eine gefährliche Störung des Klimasystems durch den Menschen unterbleibt (ENQUETE-KOMMISSION "Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages 1992). Da man erkannt hat, daß der vorindustrielle Zustand in kurzer Zeit nicht wiederhergestellt werden kann, wäre man bereits zufrieden, wenn sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den neuen Klimaverhältnissen anpassen könnten und die Nahrungsmittelproduktion nicht bedroht wäre.

Ziel müßte es sein, längerfristig keine fossilen Energieträger mehr zu verwenden. 2050 dürften nur noch 20 % der heutigen Menge fossiler Brennstoffe genutzt werden. Eine wichtige Voraussetzung wäre die 25-30prozentige Reduktion der CO_2 -Emission bis zum Jahre 2005 gegenüber dem Niveau von 1989, entsprechend der Vorgabe des Deutschen Bundestages im November 1990.²⁸

Das große Problem des gesamten Klimasystems liegt in seiner Trägheit. Es gibt Szenarien, die deutlich zeigen, daß trotz drastischer CO_2 -Emissions-Reduktionen, z. B. von 35 % bis 2000 und etwa 70 % bis 2020, der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre noch um 13 % bis zum Jahr 2020 über den Wert

²⁸ Gegenüber 1987 sind bisher die Emissionen um 15 % für Gesamt-Deutschland gesunken (Rückgang in den neuen Bundesländern um 50 %, Anstieg in den alten Bundesländern um 1,7 %); siehe UMWELTBUNDESAMT (1994).

von 1980 ansteigen und dann erst wieder langsam abfallen würde. Die internationale Konferenz "Changing Atmosphere" hat im Juni 1988 in Toronto eine Verlautbarung an alle Menschen der Erde verfaßt; sie beginnt mit den Worten:

"Die Menschheit führt ein ungewolltes, unkontrolliertes und weltumfassendes Experiment (mit der Atmosphäre der Erde) durch, dessen Konsequenzen letztlich mit einem Weltatomkrieg vergleichbar sein könnten."

1.3. Ozonverdünnung in der Stratosphäre

In den polaren Breiten in einer Höhe von etwa 16-18 km und in der äquatorialen Zone in einer Höhe von etwa 25 km sind recht hohe Ozon-Konzentrationen vorhanden, die ihre Entstehung der Photolyse von molekularem Sauerstoff mit molekularem Sauerstoff verdanken. Ihre Bedeutung für das Leben auf unserem Planeten liegt in ihrer hohen Absorptionsleistung gegenüber harten UV-Strahlen und in der Bildung eines Wärmemantels oberhalb der Troposphäre. So kommt es zu einer hohen Temperaturinversion in einer Höhe von 15-50 km. Die Absorptionsleistung liegt in der Stratosphäre bei etwa 12 Watt/m². Eine 50prozentige Abnahme dieser Ozonschicht würde die mittlere Stratosphäre um 20 °C abkühlen. Diesem Prozeß ginge eine Bildung von Eiskristallwolken in der unteren Stratosphären-Schicht einher, welches wiederum eine Rückwirkung auf die weitere Ozonzerstörung hätte. Die Ozonschicht hat somit einen erheblichen Einfluß auf unser Klima.

Es gibt zahlreiche natürliche Ozonveränderungen in der Stratosphäre, die auf der variierenden Sonnenaktivität, auf Vulkanismus oder auf Änderungen der atmosphärischen Zirkulation beruhen. So beförderte der Vulkan Pinatubo auf den Philippinen im Juni 1991 zwischen 15 und 30 Millionen Tonnen SO₂ in die Stratosphäre der Tropen, was eine deutliche Veränderung der Ozonkonzentration bewirkte (SOLOMON u. a. 1993, NISBET 1994). Damit überdeckt die natürliche Variation den anthropogenen Einfluß zum Teil merklich (siehe LABITZKE & VAN LOON 1991). Bestimmte, den Ozon Gehalt beeinflussende Prozesse, sind hingegen rein anthropogen hervorgerufen, insbesondere durch die Freisetzung von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) und Halonen, aber auch durch die von N₂O und CH₄.

Ozon hat in den letzten 20 Jahren in der Stratosphäre deutlich abgenommen (STOLARSKI 1988, STOLARSKI u. a. 1991, 1992, WMO 1992). Die Ursachen für die anthropogen bedingte Ozonverarmung sind sehr vielschichtig: Verbrennungsprodukte hoch fliegender Düsenflugzeuge, Stickoxide, die durch chemische Stickstoff-Düngung freigesetzt werden, spielen eine Rolle. Primärer Auslöser sind jedoch die Fluorchlorkohlenwasserstoffe. Diese recht stabilen Verbindungen gelangen über die Troposphäre durch Diffusion in die Stratosphäre und zerfallen dort unter Sonneneinwirkung. Es entstehen Cl-Atome, die als Katalysatoren das O₃-Molekül zerstören und O₂ abspalten. Die Zuwachsrate der FCKW liegt bei 3,3-3,5 ppb pro Jahr (WMO 1992, ENQUETE-KOMMISSION "Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages 1992). Trotz eines Beschlusses der Klimakonferenz von Kopenhagen ist ein weiterer Anstieg auf 4,1 ppb sicher, ein Absinken der Emissionen wird erst Anfang des nächsten Jahrhunderts zu erwarten sein.²⁹ Ferner bewirken auch direkt N₂O und CH₄ einen erhöhten Ozonabbau in der Stratosphäre. Das fast ausschließlich aus N₂O und zum Teil aus CH₄ gebildete Stickstoffmonoxid (NO) und das Hydroxyl-Radikal (OH) sind dabei die wichtigen Katalysatoren der Ozonzerstörung. N₂O hat derzeit eine Zunahmerate von 0,25 % bei einer Verweildauer eines Moleküls von 150 Jahren.

Das Ausmaß der Abnahme der Ozonschicht ist regional (räumlich und zeitlich) sehr unterschiedlich: In den Tropen und Subtropen, wo O₃ in größeren Mengen gebildet wird, gibt es zur Zeit keine Änderungen. Eine besonders starke Abnahme tritt im Südfrühjahr im Bereich der Antarktis auf, wo auf einer Fläche von 15 Millionen km² der Ozongesamtgehalt auf die Hälfte des Wertes von 1975 gesunken war. Auch in der Arktis ist ein Rückgang festzustellen (PROFFITT u. a. 1990), jedoch trat hier bisher noch keine "Ozonloch-Bildung" auf. Eine solche wird dort auch nicht erwartet (WMO 1992), gleiches gilt für die mittleren Breiten der Südhalbkugel.

Die zukünftige Entwicklung in den mittleren und nördlichen höheren Breiten ist schwer abschätzbar: Es gibt in diesen Regionen Anzeichen für eine Abnahme von 4-5 % in den Winter- und Frühjahrsmonaten in den letzten 10 Jahren, jedoch nur unter speziellen Wetterlagen (nach polarer stratosphärischer Wolkenbildung; siehe HOFMANN u. a. 1989).

²⁹ Nach der Wiener Ozon-Konferenz im Dezember 1995 haben die Industrienationen einen Ausstieg aus der FCKW-Produktion im Jahr 2010 avisiert; die ärmeren Länder können noch bis ins Jahr 2040 produzieren.

Die Ozonsituation wird seit 1956 über der Halley Bay (British Antarctic Survey) beobachtet. Eine erhebliche Veränderung in der Konzentration erfolgte erst in den 70er Jahren, wobei seit 1979 britische Meteorologen ein immer größer werdendes "Fenster" im stratosphärischen Ozon-Schirm beobachten. Es entsteht jedes Jahr im September und Oktober für etwa einen Monat mit einer Abnahme der Ozonkonzentration um etwa 40 %. Eine genaue Überprüfung der Ozonwerte ist durch den Satelliten Nimbus 7, der jeden Tag eine Messung vornimmt, gewährleistet. 1991 und 1992 kam zusätzlich durch den Ausbruch des Vulkans Pinatubo auf den Philippinen und die Eruption des Mount Hudson in Chile eine Verschärfung der Situation hinzu.

Die Auswirkungen der Ozonverdünnung in der Stratosphäre auf die Biosphäre sind nicht mit Sicherheit vorauszusagen; allgemeine Prognosen können derzeit nicht gegeben werden (TEVINI 1992). Aber es besteht kein Zweifel daran, daß die Abnahme des stratosphärischen Ozons die gefährliche UV-B-Strahlung in vielen Regionen der Erde erhöht. Auch auf der Südhemisphäre und in den Gebirgen konnte eine Zunahme der UV-B-Strahlung festgestellt werden, so z. B. in den Alpen (Jungfraujoch, siehe BLUMTHALER & AMBACH 1990). Die Erhöhung der UV-B-Strahlung stellt eine erhebliche Gefahr für die Menschheit, für alle Landlebewesen und das Plankton dar. Beim Menschen werden u. a. angeführt: Sonnenbrand (*Erytheme*), Hornhautentzündung (*Keratitis*), unter langer Latenzzeit verschiedene Formen des Hautkrebses (*Basaliom*, *Plattenepithelkarzinom u. a.*) und Grauer Star (*Katarakt*). Eine Ozonabnahme von 1 % führt zu einer Erhöhung der UV-B-Strahlung um mehrere Prozent und zu einer um 2-5 % höheren Schädigung der Organismen.

Bei der Festland-Vegetation sind tropische Pflanzen besser an höhere UV-Strahlung angepaßt als außertropische; gleiches gilt auch für das tropische Phytoplankton, das gegenüber der UV-B-Strahlung resistenter ist als das antarktische (HELBLING u. a. 1992). Es gibt bereits Belege, daß im Bereich der Antarktis bei einer Ozonloch-Situation die Nettoprimärproduktion des marinen Planktons erheblich zurückgegangen ist. Allgemein rechnet man mit einer reduzierten Biomassebildung bei Algen (SMITH u. a. 1992), aber auch mit deutlichen Ernteeinbußen im Bereich der Agrarwirtschaft. Da sich unter höherer UV-B-Strahlung weniger Biomasse bildet, kommt es folglich auch zu einer geringeren CO₂-Aufnahme durch die Vegetation selbst.

1985 unterzeichneten 21 Staaten das Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht, 1987 wurden im Montrealer Protokoll die Reduzierungspläne konkretisiert, 1989 in Helsinki, 1990 in London, 1991 in Nairobi, 1992 in Kopenhagen, 1993 in Bangkok und 1994 in Nairobi die Bestimmungen verschärft. Auch bei einer strengen Einhaltung der Protokolle ist erst Mitte des nächsten Jahrhunderts mit Ozonwerten zu rechnen, die dem Zustand vor dem Auftreten des "Ozonlochs" entsprechen. Aufgrund der Warnungen vor erheblichen Auswirkungen der FCKW als Ozonzerstörer in der Stratosphäre wurden Maßnahmen einzelner Länder ergriffen und zunächst eine bis 1988 annähernd konstante Produktion von etwa 1 Million Tonnen pro Jahr erreicht. Ein Produktionsrückgang konnte erst nach Inkrafttreten des Montrealer Protokolls am 1. Januar 1989, eine Ausführungsverordnung des Wiener Abkommens zum Schutz der Ozonschicht von 1985, verzeichnet werden. Eine Ächtung von FCKW, aber auch von allen Vorläufergasen ozonabbauender Moleküle, so Lachgas und Methan, bei dessen Oxidation in der Stratosphäre Wasser und OH-Radikale entstehen, ist dringend notwendig. Auch bei einem Einstellen jeglicher weiterer Produktion und Verwendung wird durch die Langlebigkeit der Stoffe und ihr Weiterwandern in die Stratosphäre eine anhaltende Treibhauswirkung und Ozonzerstörung in noch mehreren 100 Jahren stattfinden. Wie zu befürchten, nehmen beide Stoffe, Lachgas und Methan, bei der steigenden Nahrungsmittelproduktion für eine wachsende Bevölkerung zu.

1.4. Veränderung in der Troposphäre

Alle Stoffe, die der Mensch direkt oder indirekt in die Troposphäre entläßt, verändern sich in ihrer chemischen Zusammensetzung und kommen dann früher oder später als trockene oder nasse Depositionen wieder auf die Erde zurück. Wasserdampf und Spurengase machen natürlicherweise nur 0,1 % der Luftmasse aus, der Rest reagiert nicht. Die im Laufe der Zeit gewachsenen Spurenstoff-Emissionen aus menschlicher Produktion, einschließlich Vegetationsbrände in den Tropen und Subtropen, haben zu verschiedenen chemischen und physikalischen Veränderungen in der Qualität der Troposphäre geführt. Zu diesen Stoffen gehören:

- a) Methan und Kohlenmonoxid,
- b) Ozon,
- c) Anorganische Säuren,

- d) Ammoniak,
- e) bestimmte andere Spurenelemente,
- f) Aerosole.

Diese führen zur Entstehung zahlreicher lokaler Phänomene nach Einfluß bestimmter troposphärischer Veränderungen; dazu gehören:

- α) Smog,
- β) Photosmog,
- γ) "Saurer Regen",
- δ) Düngungseffekte aus der Luft,
- ε) "Neuartige Waldschäden".

a) Methan und Kohlenmonoxid

Weltweit ist eine Zunahme der Spurenstoffe Methan (CH_4) und Kohlenmonoxid (CO) seit vorindustrieller Zeit zu verzeichnen. Besonders zugenommen haben sie in den letzten Jahren auf der Nordhalbkugel, wobei ihre Quellen in der landwirtschaftlichen Produktion, in der Erdöl- und Erdgasgewinnung, -verarbeitung und -verteilung liegen, oder ihre Ursache in unvollständigen Verbrennungsprozessen haben. Besonders betroffen sind die industrialisierten Zonen der mittleren Breiten der Nordhemisphäre, aber auch Bereiche der Subtropen und Tropen, wo es zur Trockenzeit zu Wald- und Savannenbränden kommt. Insbesondere auch Maßnahmen der Brandrodung (*shifting cultivation*) führen zu großen Emissionen.

Eine ganz besondere Rolle in der Troposphäre spielt das Hydroxyl-Radikal (OH), das natürliche "Waschmittel" der Troposphäre. Das Hydroxyl-Radikal entsteht durch Lichteinwirkung aus Ozon (O_3), wobei die Höhe der eigentlichen Konzentration des OH -Radikals in der Atmosphäre weitgehend unbekannt ist. Beide, Methan und Kohlenmonoxid, reagieren mit dem Hydroxyl-Radikal und werden chemisch abgebaut. Mit jeder weiteren Kohlenmonoxid- bzw. Methan-Abgabe wird die Selbstreinigungskraft der Troposphäre geschwächt und die Konzentration des Hydroxyl-Radikals reduziert (LEVINE u. a. 1985, LU & KHALIL 1992). Das Hydroxyl-Radikal leitet den oxidativen Abbau fast aller klimarelevanten Spurengase ein und macht sie dadurch unschädlich.

b) Ozon in der Troposphäre

Unter hohen Stickoxid-Konzentrationen kann es zusammen mit Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffverbindungen unter Sonneneinfluß zur Ozonbildung in der Troposphäre kommen. In der Troposphäre reichert sich Ozon insbesondere über Industriegebieten und über Bereichen mit einer hohen Verkehrsdichte an. Zusätzlich entsteht Ozon bei jeglichen Verbrennungsprozessen. Bei den Quellen industrieller Art ist der Verkehr als der wichtigste Faktor zu nennen, für die Brände in den Tropen und Subtropen sind landwirtschaftliche Maßnahmen Ursache. Man nimmt an, daß jährlich 6-7 Milliarden Tonnen Biomasse allein in den Wald- und Savannengebieten der Erde verbrannt werden. Solche Aktivitäten setzen etwa die Hälfte der anthropogenen Emissionen an Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoff und Stickoxiden frei, auf diesem Wege gelangen allein 10-20 Millionen Tonnen Stickstoff in die Atmosphäre. Dieser Betrag entspricht etwa 9-20 % des natürlicherweise in der Biomasse fixierbaren Stickstoffs (LOBERT u. a. 1990).

Es ist nachgewiesen, daß sich die Ozonkonzentration in Europa in den letzten 100 Jahren verdoppelt hat (VOLZ & KLEY 1989, HOUGH & DERWENT 1990). Als Treibhausgas erwärmt Ozon zum einen die Troposphäre, zum anderen kann es auf den Menschen und andere Lebewesen schädigend wirken (Atemwege usw.).

c) Anorganische Säuren

Eine weitere Gefahr stellen die in der Troposphäre vorhandenen anorganischen Säuren dar. Sie haben eine kurze Verweilzeit und eine lokale Reichweite. Über diese Säuren kommt es zu einer Beeinflussung des Säuregehaltes des Niederschlages im weiteren Sinne (Niederschlag, Tau, Nebel), wodurch eine Vielzahl von Phänomenen des sogenannten "Sauren Regens" hervorgerufen werden (siehe unten). Säurebildende Luftverunreinigungen entstehen durch Emissionen aus der Kohleverbrennung, der Metallverhüttung, dem Kfz-Verkehr, aber auch aus Abwässerbelastungen und Düngung in der Landwirtschaft (SO_2 , NO_x , HCL, HF). Saure Niederschläge gibt es auch in den Tropen- und Subtropengebieten infolge von Brandrodungen und Savannenbränden, wobei es sich hier jedoch nicht nur um anorganische, sondern um organische Säuren handelt (GALLOWAY u. a. 1982, ANDREAE u. a. 1988).

Nach der Oxidation von Schwefeldioxid zu Schwefeltrioxid bildet sich mit Wasser Schwefelsäure in der Troposphäre. Oxide des Schwefels, aber auch solche des Stickstoffs reichern sich in der Atmosphäre an. Dort können durch photochemische Oxidation einerseits und durch Reaktion mit Wassertröpfchen andererseits recht starke Säuren entstehen. Darüber hinaus enthält das Regenwasser auch Kohlensäure aus dem natürlichen Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre. So hat auch nicht-anthropogen beeinflusster Regen bereits einen pH-Wert von 5,6.³⁰ Durch die genannten Reaktionen und die zusätzlichen Abgase gelangen über die Niederschläge aus der Atmosphäre in den Boden und in Gewässer weitaus Säure-haltigere Verbindungen mit einem pH-Wert von etwa 4,3. Über Oxidation verringert sich der Anteil vieler Spurengase, die der Mensch in die Atmosphäre entlassen hat, es entstehen Säuren, die die Luftschicht wieder verlassen und das Problem auf die Litho-, Pedo- und Biosphäre zurückverlagern.

d) Ammoniak

Ammoniak entsteht u. a. bei der landwirtschaftlichen Produktion (Gülle-Entsorgung), aber auch bei der Kohleverbrennung und beim Kfz-Verkehr (Auspuffgase). Eine erhebliche Belastung der Böden und der Gewässer (einschließlich Grundwasser) resultiert aus diesen Quellen. Die Niederlande produzieren z. B. jährlich etwa 100 Millionen Tonnen Gülle; das entspricht 7 Tonnen pro Einwohner und Jahr. Ähnliches gilt für andere Intensiv-Landwirtschaftsgebiete (z. B. Bereich um Oldenburg/Ostfriesland). Auf die Felder gebrachte Gülle entweicht als Ammoniak und Methan; ein Teil gelangt in den Boden und trägt zur Belastung des Grundwassers bei. Zuflüsse, z. B. in die Nordsee, führen zu einem erheblichen Algenwachstum, wobei diese Algen wiederum Dimethylsulfid abgeben. Die Nordsee gehört inzwischen zu den Gebieten mit der höchsten Dimethylsulfid-Produktion der Erde. Aus Dimethylsulfid entsteht SO_2 und dies führt wieder zu dem Phänomen des "Sauren Regens" (siehe oben).

³⁰ Regen aus "vorindustrieller" Zeit enthält sechsmal weniger Sulfatschwefel, fünfmal weniger Nitratstickstoff und keinen Ammonium-Stickstoff.

e) Spurenelemente

Durch die Industrie gelangen erhebliche Metallemissionen in die Atmosphäre. Quellen sind die Nichteisen-Metallverhüttung, Eisen- und Stahl-Produktion, Zementindustrie, Müllverbrennungsanlagen, aber auch die Kohlefeuerung. Die Verbrennung von Kohle ist die Hauptquelle für Quecksilber in der Luft sowie für die Anreicherung der Elemente Molybdän, Selen, Arsen, Chrom, Mangan, Antimon und Thallium. Darüber hinaus emittieren Kohlekraftwerke auch Radon. Bei der Ölverbrennung entstehen Vanadium, Nickel, Zinn, die freigesetzt werden, bei der Nichteisenverhüttung sind es Blei, Arsen, Cadmium, Kupfer und Zink, die in die Atmosphäre freigegeben werden.

f) Aerosole

Die natürlich erzeugten Mengen von Aerosolen übersteigen global die anthropogen verursachten. Dennoch kam es mit der "Industriellen Revolution" zu einem lokalen und regionalen, zum Teil aber auch recht weitreichenden Ansteigen des Anteils der Rauch- und Staubteilchen in den Troposphären-Schichten und damit zu einer Zunahme der Lufttrübung.³¹ Welche Folgen solche Erscheinungen haben, Erwärmungs- oder Abkühlungseffekte, ist Gegenstand vielseitiger Untersuchungen (siehe z. B. RASOOL & SCHNEIDER 1971, WEARE u. a. 1974, IDSO & BRAZEL 1978, HANSEN & LACIS 1990). Zu natürlichen Ereignissen zählen Staub-Emissionen bei Vulkan-Ausbrüchen, die zu starken Lufttrübungen führen können. Aber auch durch vom Menschen herbeigeführte Wüstenbildungen können durch Konvektion der Luft Staubpartikel in die Stratosphäre gelangen (PROSPERO & NEES 1977).

Seit 1950 beobachtet man eine zunehmende Verschmutzung der Luft im Winter über der Arktis ("Arktischer Dunst"). Sie beruht auf der Verfrachtung eurasischer Luftmassen nach Norden, die im wesentlichen aus den industriellen Gebieten Europas stammen, und zum Teil erheblich belastet sind (u. a. mit Brom); siehe dazu auch NRIAGU u. a. 1991. Seit dem Zusammenbruch der kommunistischen Regime (Sowjetunion, DDR, Tschechoslowakei und Polen) ist der Grad der Verschmutzung jedoch deutlich zurückgegangen. Neben solchen Dunstschleiern ist der arktische

³¹ Siehe dazu auch SPELSBERG (1988).

Bereich auch durch Staub aus den Steppen und besonders aus Erosionsgebieten der nördlichen Hemisphäre belastet. Hierdurch kann es zu erheblichen Veränderungen z. B. der Albedo kommen.

α) Smog

Schätzungen haben ergeben, daß die durchschnittliche Anzahl von Staubpartikeln über urbanen Gebieten etwa zehnmal so groß ist wie über ländlichen und proportional mit der Größe der Stadt wächst (LANDSBERG 1981). Da solche Staubpartikel stark hygroskopisch sind, ist eine Kondensation an diesen Partikeln und damit eine Nebelbildung leicht möglich.

Smog entsteht bei Anreicherungen verschiedener luftverunreinigender Stoffe, einerseits von Schadgasen, andererseits von Stäuben. Die Verursacher solcher Schadstoffe sind die Heizungen mit einem Anteil von über 20 % (SO₂), die Abgase der Autos 40-60 % (CO weltweit 55 %, NO_x weltweit 2,5 %), Industrieanlagen (25-35 %); Angaben nach KLÖTZLI (1993). Die folgende Zusammenstellung gibt eine grob differenzierte Aufteilung in unterschiedliche Schadstoffe wieder (KLÖTZLI 1993):

a) *Schadgase* aus Verbrennungsanlagen (Motoren und Heizungen)

- Kohlenmonoxid CO: 90 % Kfz,
- Stickoxide NO, NO₂: 75 % Kfz, 25 % Heizungsabgase,
- Schwefeldioxid SO₂: mehr als 90 % aus Feuerungsanlagen.

b) *Schadstäube*

- Bleistaub (bedingt noch aus Treibstoff),
- Asbeststaub aus Kupplungen,
- Zementstaub,
- Ruß,
- Zinn- und Zinkstaub,
- bestimmte mehrringige Kohlenwasserstoffe aus unvollständigen Verbrennungen von Treib- und Brennstoffen (z. B. Benzpyren, das auch bei Waldbränden entsteht).

Solche Schadstoffe können in der Regel durch die Luftzirkulationen abfließen. Bei bestimmten Wind- und Geländebedingungen jedoch bildet sich über einer Kaltluftschicht eine Warmluftlage, so daß ein Abfließen der Schadstoffe nach oben nicht möglich ist. So etwas geschieht in unseren

Breiten bei winterlichen Inversionswetterlagen, wenn eine bestehende Kaltluftschicht in niederen Lagen bei plötzlichen Warmwetterlagen durch Warmluftschichten abgedeckt wird. Die Nebelschicht verhindert einen Luftaustausch, so daß sich giftige Gase, insbesondere im Winter das Schwefeldioxid aus den Heizungen, anreichern. Hinzu kommt der Ruß und das Benzpyren.

Es gibt signifikante Korrelationen zwischen den Rauch- und Schwefeldioxid-Gehalten der Luft und der Anzahl der Todesopfer pro Tag bei katastrophalen Inversionswetterlagen. Dabei gilt als gesichert, daß der Staubgehalt der Luft die jährliche Gesamtsterblichkeit vor allem bei den 50-70jährigen deutlich beeinflusst. Die schwerste bisher eingetretene Smog-Katastrophe brach im Dezember 1952 über die Londoner Bevölkerung herein: mehrere 100 Menschen starben, vor allem Säuglinge und ältere Leute, die bereits an Bronchitis, Asthma oder Lungenfibrose litten. Heute sind die Werte von 1956 durch Luftreinhaltegesetze im Jahre 1970 auf ein Zehntel des Standes von 1956 zurückgegangen. Dennoch ist die Gefahr insbesondere über Großstädten keinesfalls gebannt. In Mexiko City liegt der Umfang der Luftverschmutzung um den Faktor 6 höher als das Maß, das für den Menschen als erträglich angesehen wird (SCHTEINGART 1991).³²

β) Photosmog

Ein weiterer wichtiger, unsere Umwelt belastender Prozeß ist die Stickoxid-Anreicherung der Troposphäre durch Kfz-Verkehr (vorrangig), ferner durch industrielle Emission und Biomasseverbrennung. Sie führt zum Phänomen des photochemischen Smogs. In der Regel handelt es sich hierbei um ein lokales und regionales Problem, der erhöhten Konzentration von Radikalverbindungen, oxidierten und teiloxidierten Kohlenwasserstoffen, Ozon und anderen Photooxidantien. Viele Stoffe davon sind ökotoxikologisch relevant. Im Gegensatz zu dem aus Kohleverbrennungsprozessen entstandenen Smog enthält der Photosmog keine Rußpartikel. Es kommt zur Bildung von Substanzen, die über durch das Sonnenlicht induzierte Reaktionen entstanden sind. Von Bedeutung sind hierbei Kohlenwasser-

³² Jährlich belaufen sich die durch Atemwegserkrankungen anfallenden Kosten in den alten Bundesländern nach Angaben des Bundes-Umweltministeriums auf etwa 2,6 Milliarden Mark (STEBING 1995c).

stoffe, die bei der Verdunstung von Lösungsmitteln und Brennstoffen freigesetzt werden, oder die bei der nicht vollständigen Verbrennung fossiler Brennstoffe entweichen. Zusammen mit Stickoxiden, starker Sonneneinstrahlung und stabilen Wetterlagen entstehen Peroxyacylnitrate (PAN). In der Regel ist photochemischer Smog ein regionales Problem, obwohl jedoch unter den Photooxidantien gerade diese Peroxyacylnitrate sehr weit transportiert werden.

Das Sonnenlicht bewirkt eine Vielzahl von chemischen Reaktionen, wie Zerfall des Stickstoffdioxids (NO_2) in Stickstoffmonoxid (NO) und einzelne Sauerstoff-Atome (O), die wiederum mit molekularem Sauerstoff (O_2) Ozon (O_3) bilden. So kommt es zu einer steigenden troposphärischen Ozonkonzentration (dem photochemischen Smog). Dieser kann zu erheblichen Treibhauseffekten beitragen. Eine durch das "Ozonloch" hervorgerufene stärkere UV-B-Strahlung hätte auch eine erhöhte Photosmog-Bildung, z. B. in Gebieten mit erhöhter Stickoxid-Emission (Industriezonen), zur Folge. Allgemein führt photochemischer Smog zu menschlichen Gesundheitsschäden,³³ zu Vegetationsschäden und damit zu Ernteinbußen. Besonders unter Hochdrucklagen und bei Inversionswetterlagen tritt photochemischer Smog auf.

Die durchschnittliche monatliche Konzentration von Oxidantien ist im Zentrum von Los Angeles von 0,27 ppm im Jahr 1965 auf 0,17 ppm von 1974 gefallen; bei über 0,10 ppm ist die Gesundheit des Menschen gefährdet. Dieser Wert wird an den meisten Tagen zwischen Mai und September im Zentrum von Los Angeles überschritten (ELSOM 1987).

γ) "Saurer Regen"

Das Phänomen des "Sauren Regens" wurde zum ersten Mal bereits vor über einem Jahrhundert in Mittelengland beobachtet (1872 von A. SMITH). Bis etwa in das Jahr 1950 war diese Form der Umweltbelastung ein lokales Phänomen, heute jedoch weist es eine globale Verbreitung auf. Durch Verbrennen fossiler Energieträger entstehen Schwefeloxide (SO_2 , SO_3) und Stickoxide (NO , NO_2). In der Luft oxidiert Schwefeldioxid (SO_2) zu Schwefeltrioxid (SO_3), das sich unter Mitwirkung von Katalysatoren in

³³ Neuerdings besteht der Verdacht auf krebserregende Wirkung (WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT der Bundesregierung "Globale Umweltveränderungen" 1996).

Wasserdampf zu Schwefelsäure (H_2SO_4) entwickelt. Im Falle der Stickoxide bildet sich Salpetersäure (H_2NO_3). Der Niederschlag wird mit einem pH-Wert unter 5,6 definitionsgemäß als "Saurer Regen" bezeichnet (LIKENS & BORMANN 1974). Normalerweise besitzt der Regen unter natürlichen Bedingungen einen pH-Wert von etwa 5,6. Diese leicht saure Reaktion beruht einerseits darauf, daß Regenwasser Kohlensäure aus dem natürlichen Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre enthält, andererseits auf der Abgabe von Dimethylsulfid durch Meeresplankter, das in der Atmosphäre zu Schwefelsäure reagiert (CHARLSON u. a. 1987). In Industriegebieten treten Werte von pH 3,5-4 auf. Lokal sind bereits pH-Werte unter 2,1 bekannt, ein Wert von pH 2,4 entspräche dem Säuregrad von Essig. Im Osten der USA liegt der Durchschnittswert bei pH 4. Der Regen, der z. B. über Polen, Ostdeutschland, Tschechien niederregnet, gehört zu den sauersten der Welt.

An dem "Sauren Regen" sind durchschnittlich zu 60-70 % Schwefeloxid-Emissionen beteiligt. Neben dieser feuchten Deposition kann Säure auch über trockene Teilchen (Trockendeposition) die Erde erreichen.

Die Auswirkungen des "Sauren Regens" sind je nach geologischem Untergrund verschieden, sie sind auf silikatischen Gesteinen erheblicher als auf Kalk (LIKENS u. a. 1979). Daß der "Saure Regen" für eine stärkere Verwitterung sorgt, läßt sich an vielen Kunstwerken, die im Freien stehen, besonders Kalksandstein-Figuren, leicht nachweisen. Im Augenblick haben sie eine 10 bis 100fach erhöhte Verwitterungsgeschwindigkeit.³⁴

Mit der Versauerung gehen Veränderung von Bodenreaktionen, zum Teil höhere Löslichkeit von Nährstoffen und Schwermetall-Ionen und damit ihre Verlagerung u. a. in tiefere Bodenschichten einher.

Süßgewässer sind besonders anfällig gegenüber Säureeintrag (SCHINDLER 1988). Der Rückgang sowie das lokale Aussterben ganzer Fischpopulationen (z. B. in Norwegen und Schweden) haben zu erheblichen wirtschaftlichen Einbußen geführt; betroffen waren besonders die gegenüber niedrigen pH-Werten empfindlich reagierende Forelle und der Lachs (ARNDT & KOHLER 1984). BEAMISH u. a. (1975) konnten an einem kanadischen See

³⁴ In vielen Fällen handelt es sich jedoch auch um eine indirekte Wirkung der Deposition, die die Verwitterung durch Bakterien begünstigt. Durch die anthropogen bedingten Schwefel- und Stickstoff-Depositionen vermehren sich Bakterien stark und geben Schwefel- oder Salpetersäure ab, die die kalkhaltigen Bestandteile an Gebäuden auflöst (STEBING 1995c).

von 1961-1975 eine jährliche Abnahme des pH-Wertes um 0,13 pH-Einheiten feststellen. Ähnliche Ergebnisse liefern Untersuchungen an schwedischen Seen, die ein Absinken des pH-Wertes seit den dreißiger Jahren um pH 1,8 belegen (ALMER u. a. 1974), die Werte liegen heute bei pH 4. Anfang der siebziger Jahre wurde in Schweden festgestellt, daß es zu einer Ansäuerung zahlreicher Seen von pH 7,2 (1965) zu pH 6,8 (1970) gekommen ist (ALMER u. a. 1974, JENSEN & SNEKVIK 1972, WILLEN 1972).

Aufgrund der Lage Schwedens mit vorherrschenden Südwestwinden, sind zahlreiche Immissionen Westeuropas dort deponiert worden. Einher gingen Veränderungen in der Artenzusammensetzung von Plankton und Fischfauna. Mit niederem pH-Wert sank die Artenzahl an Geißelalgen (*Euglenophyceae*), Kieselalgen (*Diatomeae*), Goldalgen (*Chrysophyceae*), Grünalgen (*Chlorophyceae*) und Blaualgen (*Cyanophyceae*) u. a.

Die Analyse von Bohrkernen einzelner Seeböden südwestschwedischer Seen hat ergeben, daß es über einen Zeitraum von etwa 12.500 Jahren im Rahmen des natürlichen Alterungsprozesses zu einer Veränderung des pH-Wertes von pH 7,0 auf pH 6,0 gekommen ist. Seit den fünfziger Jahren beschleunigte sich die Abnahme auf einen pH-Wert von 4,5 (RENBERG & HELLBERG 1982). Die Untersuchungen der letzten Jahre belegen, daß mit der Abnahme der Sulfat-Emissionen die pH-Werte in einzelnen Seen wieder ansteigen (BATTARBEE u. a. 1988).

Die zunehmende Anreicherung von Säuren bewirkt neben den eben genannten Erscheinungen auch eine vermehrte Nährstoffauswaschung in den sandigen Podsolböden Schwedens. Es kommt dadurch zu einer Nährstoffverarmung im durchwurzelten Oberboden. Dies hat u. a. auch Einfluß auf den Waldertrag, der für die Wirtschaft Schwedens von erheblicher Bedeutung ist. Heute können in den O- und A-Horizonten³⁵ der Waldböden Werte von pH 2,8-pH 3,8 gemessen werden; pH-Werte unter 3 stellen bei Mineralböden den Grenzwert für ein Pflanzenwachstum dar. Entscheidend hierbei ist die Zerstörung der Tonminerale, die als Nährstoffspeicher für die Pflanzen eine wichtige Rolle spielen. Werden die Tonminerale zerstört, kommt es infolge einer schnellen Auswaschung der Nährstoffe zu einer wachsenden Bodendegradation. Im Gegensatz zu den

³⁵ O-Horizont: dem Mineralboden aufliegender organischer Horizont, A-Horizont: Mineralhorizont im Oberboden mit akkumuliertem Humus.

in Grenzen reversiblen Prozessen in Gewässern sind die Veränderungen in Böden in der Regel weitgehend irreversibel (HABER 1990).

Ab 1950 wuchsen die Schwefeldioxid-Emissionen, hervorgerufen insbesondere durch Industrie und Gewerbe, exponentiell an. Die Belastung durch Haushalte waren dagegen vergleichsweise nur gering gestiegen, der Gesamtwert dennoch erheblich. Aus den Vergleichen der Jahre 1956, 1959, 1961 und 1966 konnte eine deutliche Zunahme der Azidität und gleichzeitig auch eine Verschiebung der Depositionsgebiete in Europa nach Nordosten festgestellt werden. Die Gebiete Belgiens und der Niederlande hatten Niederschläge mit den niedrigsten pH-Werten, hervorgerufen durch starke Emissionen von SO_2 und NO_x (siehe KLÖTZLI 1993). Das nach Nordosten-Driften der Werte beruht auf der meteorologischen Grundsituation Europas: mit vorherrschend südwest-/nordöstlichen Windrichtungen. Deutlich war in diesem Zeitraum auch die Zunahme der belasteten Flächengrößen zu erkennen. Der allgemeine Rückgang ab 1965 resultierte aus rechtsverbindlich eingeleiteten Maßnahmen zur Reduzierung (Einrichtung von Entschwefelungsanlagen). In Europa entstammte in jüngerer Zeit der Großteil der sauren Emissionen aus den östlichen Industriegebieten, vor allem aus dem Gebiet der früheren DDR, der früheren Tschechoslowakei und Polen.

Sowohl der Ersatz von Kohle durch Erdöl und Erdgas als auch Maßnahmen zur Kontrolle der Luftverschmutzung (Bau hoher Schornsteine, Partikelabscheider) in den letzten Jahrzehnten schaffen neue Probleme. Während es früher bei der Nutzung fossiler Energieträger ein "Rußproblem" mit starken Immissionen in der unmittelbaren Umgebung des Emittenten gab, verlagert sich heute die Situation auf das globale Problem des "Sauren Regens". Die inzwischen gesetzlich verankerte Abgas-Entstäubung wirkte sich zusammen mit den immer höher werdenden Schornsteinen im Sinne einer Fernbelastung auch negativ aus. Während früher bei der Kohleverbrennung die hohen Mengen an Sulfat durch ebenfalls hohe Calciumgehalte neutralisiert wurden, entstehen heute bei der Verbrennung von Erdgas weniger hohe Sulfatmengen, jedoch auch kein neutralisierendes Calcium. Staub kann aufgrund seines hohen Alkaligehaltes (K, Na) in einer Wasserdampf-reichen Atmosphäre basische Reaktionen hervorrufen und die in der Luft durch Wasserdampf gebildeten Säuren (Schwefelsäure und Salpetersäure) neutralisieren. Dadurch kam es früher zu einer Ausflockung der SO_2 - und NO_x -beladenen Aerosol-Partikel, was zweifellos an

Ort und Stelle zu einer erheblichen Immissionsbelastung führte. Verhindert wurde jedoch ein Ferntransport und die heute unter Sonnenlicht ablaufende Ozonbildung. Der Einbau von Abgasreinigungsanlagen zur Entschwefelung und Entstickung, wie er heute erfolgt, hat ferner zur Folge, daß die Energieausbeute geringer wird, folglich bei gleicher Leistung eine höhere CO₂-Belastung einhergeht. Die am häufigsten angewandte Nachrüstungsmethode, die Rauchgasentschwefelung, erbrachte ferner das Problem der Naßschlamm-Entsorgung mit sich (Phänomen der Problemverlagerung). Hohe Schornsteine sorgen für eine viel weitere und flächigere Verteilung der Schadstoffe.

Allgemein ist feststellbar, daß regional Maßnahmen zur Reduktion der Schwefel-Emission getroffen wurden, und es auf dieser Ebene zu deutlichen Verbesserungen der Belastungssituation gekommen ist (z. B. in Mitteleuropa). Die Verbrennung von Kohle ohne Reduktion der SO₂-Emission hat jedoch auch in vielen Gebieten der Erde (z. B. China) quantitativ zugenommen. Heute ist das Phänomen des "Sauren Regens" zu einem globalen Problem geworden.

Während es in vielen Bereichen (so z. B. in Mitteleuropa) zu einer Abnahme der Schwefel-Emissionen bei der Stromerzeugung durch fossile Energieträger gekommen ist, nimmt hier der Anteil des Ausstoßes von Stickoxiden durch den zunehmenden Kfz-Verkehr beträchtlich zu. Verschiedene Aspekte des Themas "Saurer Regen" behandeln u. a. BLANK (1985), HUTCHINSON & HAVAS (1980), PARK (1987), WELLBURN (1988).

δ) Düngungseffekte aus der Luft

Stickstoff kommt unter anderem in zwei sehr reaktionsfähigen Verbindungen in der Luft vor, zum einen als Ammoniak (NH₃), zum anderen als Ammonium-Ion (NH₄⁺). Sehr schnell reagiert das Ammonium-Ion z. B. mit dem aus Verbrennungen entstehenden SO₂ unter Anwesenheit von Wasser zu dem leicht löslichen und besonders düngewirksamen Ammoniumsulfat [(NH₄)₂SO₄]. Eine Deposition von Ammoniak geschieht in der Regel nur wenige hundert Meter bis wenige Kilometer von der Emissionsquelle entfernt, das Ammonium-Ion hingegen wird über weite Strecken transportiert und besitzt somit eine Fern-Immissionswirkung.

Von 1950 bis heute sind besonders die NO_x-Immissionen angestiegen. Vor 1865 bestanden noch die Werte natürlicher Immissionen.

Es liegen aktuelle Messungen von N-Depositionen im Kronenraum von Fichten aus Niedersachsen vor, mit Werten von 70 kg N/ha pro Jahr. In den Niederlanden gibt es große Gebiete mit sogar mehr als 100 kg N/ha pro Jahr als Deposition aus der Luft (ASMAN & DIEDEREN 1987). Für Niedersachsen gilt, daß Stickstoff der einzige Nährstoff ist, dessen Konzentration nach Messungen in Fichtennadeln seit Jahren konstant zunimmt, bei sinkenden Gehalten an Kalium, Magnesium, Calcium und anderen Mineralien. Für das Jahr 1983 lag die mittlere Immissionsdichte für Stickstoff in der Bundesrepublik Deutschland bei 40 kg N/ha pro Jahr (HÄBERLE & HERRMANN 1983). Dieser Betrag entspricht dem, der am Anfang der fünfziger Jahre durchschnittlich pro Hektar als aktive Stickstoffdüngung in der Landwirtschaft eingesetzt wurde. Nach STEUBING (1993) lagen die Werte N-haltiger Immissionen in der Lüneburger Heide 1980 bei 13,7 kg/ha, die nasse Stickstoff-Deposition 1989 bereits bei 22,8 kg/N/ha, die trockene bei 5,6 kg/N/ha.

Die Emissionsdichte ist allgemein positiv korreliert mit dem Industrialisierungsgrad und dem Straßenverkehrsaufkommen. Im Nordwesten Mitteleuropas sind Ausstoß und Niederschlag von NO_x aufgrund der intensiven Tierhaltung besonders hoch. Mehr als 90 % des Ammoniaks im nordwestlichen Mitteleuropa stammen aus der intensiven Viehhaltung und der damit verbundenen Gülle-Wirtschaft.

Das Ausmaß der lokalen Stickstoff-Düngung aus der Luft kann sehr schwanken; folgende Faktoren spielen eine Rolle:

- Niederschlagsmenge,
- Luv-Lee-Effekte,
- Jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge,
- die Form der Niederschläge (Regen, Schnee, Reif, Nebel),
- Windgeschwindigkeit,
- Höhenlage,
- Art der Pflanzendecke.

Vorgänge der Nährstoffanreicherung (Eutrophierung) aus der Luft als Immission und Deposition von Stickstoffverbindungen haben zu weitreichenden Konsequenzen geführt (siehe dazu auch HEIL u. a. 1988). Stickstoffhaltige Immissionen werden zum Teil von der Pflanzendecke aufgenommen. Dies geschieht einerseits gasförmig durch die Stomata der Blätter, andererseits als feuchte Deposition über den Wurzelraum oder als

gelöste Substanz durch Niederschläge, die die trockene Deposition "abwaschen". Ammoniak- und Ammonium-Immissionen tragen maßgeblich zu einem vor allem in Nordwestdeutschland verbreiteten Typ der "Neuartigen Waldschäden" bei der Fichte und bei der Douglasie bei (FORSCHUNGSBEIRAT Waldschäden/Luftverunreinigungen 1986).

Direkt auf Blätter einwirkende Stickoxide schädigen diese erst ab $0,3 \text{ mg/m}^3$, ein Wert der jedoch nur selten erreicht wird. Gravierender ist die Wirkung der mit Wasser gebundenen Stickoxide, die mit Sickerwasser in den Boden gelangen und dort dem Wurzelwerk zusetzen. So wird auch nur ein Teil der mit der Düngung eingetragenen Nährstoffe durch die Ernte wieder entnommen. Als Überschüsse³⁶ gehen sie zum Teil als Nitrat in das Grundwasser, zum Teil werden sie im Humus festgelegt, zu N_2 oder N_2O denitrifiziert oder entweichen bei trocken-warmen Wetter als Ammoniak. Die Stickstoff-Überschüsse pro Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche sind im Norden der Bundesrepublik Deutschland wesentlich größer als im Süden. Große Mengen an Stickstoff werden bei der Verbrennung organischen Materials aller Art als NO_x frei und an die Luft abgegeben.

Eine solche zusätzliche Nährstoffzulieferung führt zu Veränderungen in der Vegetationszusammensetzung und dabei zur Verdrängung vieler Pflanzenarten, der meisten Rote-Liste-Arten und damit zu einer erheblichen Einschränkung der Biodiversität (ELLENBERG jun. 1985, 1989). Auch der Rückgang einer Vielzahl von aus Naturschutzsicht wertvollen Pflanzengesellschaften ist auf das Phänomen der Eutrophierung aus der Luft zurückzuführen (ELLENBERG jun. 1985). Für Kalkmagerrasen in Südeuropa wird als "critical load"³⁷ ein Eintrag von 42-55 kg N/ha und Jahr angegeben (WILSON u. a. 1995).

³⁶ Als Überschuß bezeichnen wir hier die Differenz zwischen aktivem Nährstoffeintrag und Stoffaustrag durch Ernte oder Beweidung in bezug zur Stickstoffmenge.

³⁷ "Critical loads" sind nach "DER RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN (1994)": "naturwissenschaftlich begründete Belastungsgrenzen von Rezeptoren wie von Ökosystemen, Teilökosystemen und Organismen bis hin zu Materialien zu verstehen. Diese Belastungsgrenzen gelten unter festen Rahmenbedingungen, wie Raum, Zeit und ökologisches System, die im einzelnen zu definieren und transparent zu machen sind."

ε) "Neuartige Waldschäden"³⁸

Erste schriftliche Hinweise über Rauchgasschäden an Bäumen findet man bereits bei PLINIUS d. Ä. (23-79 n. Chr.). Er berichtet über "verderblichen Rauch", der in Spanien aus Silber-Schmelzöfen entweiche und der die umliegenden Bäume zum Absterben bringe (WALLETSCHKE & GRAW 1992). Auch die heutigen "Neuartigen Waldschäden", die vermehrt aus den Industrieländern Europas aber auch aus Nordamerika bekannt sind (BLANK u. a. 1988, OLSON u. a. 1992), beruhen nach den bisherigen Forschungsergebnissen auf Umweltverschmutzungen. Die Ursachen sind vielschichtig und lokal differenziert; als Hauptfaktoren werden benannt:

- Säureeintrag in den Boden durch saure Niederschläge, Nährstoffauswaschung, Mobilisierung von Aluminium-Ionen,
- Deposition von Schwefelverbindungen³⁹ und ungesättigten Kohlenwasserstoffen sowie chronische Vorschädigung von Nadeln durch Photooxidantien,
- "Überdüngung": z. B. durch den Einbau von Stickoxiden und Ammoniak mit Störung des Nährstoffgleichgewichtes, Stickstoff-Einträge durch Verkehr und Landwirtschaft zum Teil in Kombination mit Ozon (siehe Kapitel "β Photosmog").

Nach ULRICH (1990) ist ein wichtiger Faktor für die Entstehung der "Neuartigen Waldschäden" Säurestreß im Bereich der Wurzeln, wodurch sich für die Pflanze Schwierigkeiten in der Nährstoff- und Wasseraufnahme ergeben. Die Folgen sind u. a. vorzeitige Blatt- und Nadelverfärbung sowie Veränderungen der Cuticula (siehe auch DÄSSLER 1991). Ferner verändern sich auch die Bodenbedingungen mit zunehmendem Säuregrad. Zwei Prozesse sind hierbei von Bedeutung, einerseits die Freisetzung von Al-Ionen aus verwitternden Tonmineralen, andererseits die stärkere Auswaschung der durch Aluminium an Austauschern freigesetzten Nährstoffe. Eine verstärkende Wirkung haben ungünstige Witterungslagen; hohe Temperaturen beschleunigen die chemischen Reaktionen, geringe

³⁸ Siehe dazu auch die Absätze "β Photosmog", S. 68f., "γ Saurer Regen", S. 69ff., "δ Düngeneffekte aus der Luft", S. 73ff.

³⁹ Das Schwefeldioxid tritt heute in Mitteleuropa in seiner aktuellen Bedeutung als Verursacher der "Neuartigen Waldschäden" in den Hintergrund. Die Schwefeldioxid-Emission hatte sich von 1950-1972 durch den Ausbau der Ölheizungen der Petro-Industrie und der Kraftwerke in Europa verdoppelt. Langzeitmessungen für den Solling bei Göttingen belegen, daß die Schwefeleinträge Anfang der 70er Jahre bis Mitte der 80er Jahre mit 80 kg/ha und Jahr konstant blieben und seit Ende der 80er Jahre um die Hälfte zurückgegangen sind.

Niederschläge führen zu einer Belastung der Nadel- und Blattoberflächen durch Stäube. Aufgrund des fehlenden Reinigungseffektes der Nadel- und Blattoberflächen durch Niederschlag reagieren Photooxidantien, und es bilden sich damit im Zusammenhang Blattnekrosen⁴⁰.

Nährstoffmangel, verstärkt u. a. durch S- und N-Deposition und dadurch bedingte hohe Konzentrationen von Sulfat und Nitrat in der Bodenlösung, konnte für eine spezifische Fichtenerkrankung in den alten Ländern der Bundesrepublik Deutschland verantwortlich gemacht werden. Fichten leiden auf schon von Natur aus nährstoffarmen Böden in montanen Lagen der Silikat-Mittelgebirge unter Magnesium-Mangel; dies verursacht eine charakteristische Vergilbung der Nadeln (REHFUESS 1995). Diese Magnesium-Mangel-Chlorosen lassen sich durch Düngung mit Magnesium-Sulfat und Magnesium-Carbonat mildern; die Anwendung solcher Kalkungen wird kontrovers diskutiert (WENZEL & ULRICH 1989, WIEDEY & ULRICH 1989, REHFUESS 1995).

Stickstoffhaltige Immissionen und Ozon spielen nach Auffassung verschiedener Autoren eine wesentliche Rolle für die "Neuartigen Waldschäden" (GUDERIAN 1985, TAMM 1991, MOHR 1993, STEUBING 1995c). Während unter natürlichen Bedingungen zwischen 3-10 kg/N je ha und Jahr eingetragen werden (unbelastete Waldregionen Nordamerikas), liegt der Eintrag in der Bundesrepublik Deutschland im Durchschnitt bei 29 kg/ha und Jahr, lokal sogar um 50 kg/ha und mehr. Diese Stickstoffbelastung ist in den letzten 10 Jahren auf einem konstanten Niveau geblieben.

Ein Vergleich aktueller Meßdaten mit solchen vor etwa 100 Jahren belegt eine Verdopplung der Ozonkonzentration. Ozon schädigt die Blätter, verringert die Öffnungsweite der Spaltöffnungen, wirkt sich negativ auf die Photosynthese aus und vieles andere mehr.

Die "Neuartigen Waldschäden" sind nur aus dem kumulativen Zusammenwirken und den synergistischen Wirkungen verschiedener Stress-Faktoren zu verstehen, wobei auch natürliche Stressoren (z. B. erhöhte Trockenheit, Fröste u. a.) mitwirken.⁴¹ Kontrovers wird die Frage erörtert, ob die Wald-

⁴⁰ Abgestorbene Gewebe im Blattbereich.

⁴¹ REHFUESS (1983, 1985) nennt als primäre Krankheitsursachen bei der Fichte: Schwermetalle (u. a. Blei, Cadmium), Photooxidantien, SO₂ als trockene Deposition, Mineralsäure-Deposition (HCO₃, H₂SO₄, HNO₃, HCl, HF), als sekundäre Ursachen werden auch das Klima und Schadinsekten angeführt.

schäden mehr durch direkte Einwirkung von Luftschadstoffen auf die Baumkronen bewirkt werden, oder ob sie indirekt über chemische, vom Eintrag von Luftschadstoffen ausgehende Bodenveränderungen bedingt sind (HABER 1990).

Die Ergebnisse der jährlichen Waldzustandsinventuren sind erschreckend (siehe z. B. SCHUTZGEMEINSCHAFT Deutscher Wald 1995, WESSELS 1995, HESSISCHES MINISTERIUM des Innern und für Landwirtschaft, Forsten und Naturschutz 1995). Diesen Inventuren liegen die Blattverluste der Bäume, zum Teil (bei der Buche) auch Verzweigungsanomalien zugrunde. Die Ergebnisse dürfen jedoch nicht großflächig undifferenziert interpretiert werden, da z. B. standortsabhängige Unterschiede der Belaubung nicht eingehen.⁴²

1992 waren nach diesen Erhebungen 68 % des bundesdeutschen Waldes geschädigt, 1995 61 %. Die vorliegenden Waldschadensberichte aus den verschiedenen Bundesländern zeigen deutlich, daß es auch 1995 noch zu keiner positiven Änderung gekommen ist (SCHUTZGEMEINSCHAFT DEUTSCHER WALD 1995). Besonders wird betont, daß die geschädigten Bäume vor allem heiße und trockene Sommer immer schlechter verkraften. In Hessen z. B. (wie auch in den anderen Bundesländern) hält der Trend der Verschlechterung des Gesundheitszustandes des Waldes seit 12 Jahren an (HESSISCHES MINISTERIUM des Innern und für Landwirtschaft, Forsten und Naturschutz 1995), siehe *Abb. 17*.

Folgende Kennzeichen lassen sich allgemein für die "Neuartigen Waldschäden" feststellen (siehe KLÖTZLI 1993):

- keine geschichtlich belegte Parallele,
- keine bekannten Krankheiten und Parasiten als Primärursache,
- keine klimatischen Veränderungen als Primärursache (Jahrringanalyse),
- breit abgestützter Indizienbeweis für einen Zusammenhang mit der Luftbelastung,
- keine Belege für klare Zusammenhänge mit radioaktiven Wellen, Viren u. a.,
- keine Auslösung durch unsachgemäße Waldbewirtschaftung.

⁴² Ernstzunehmende Bedenken gegen die Methoden der Schadenserfassung äußert ELLENBERG sen.(1995a, 1995b); siehe dazu auch KANDLER (1992a, 1992b, 1994), REHFUESS (1995).

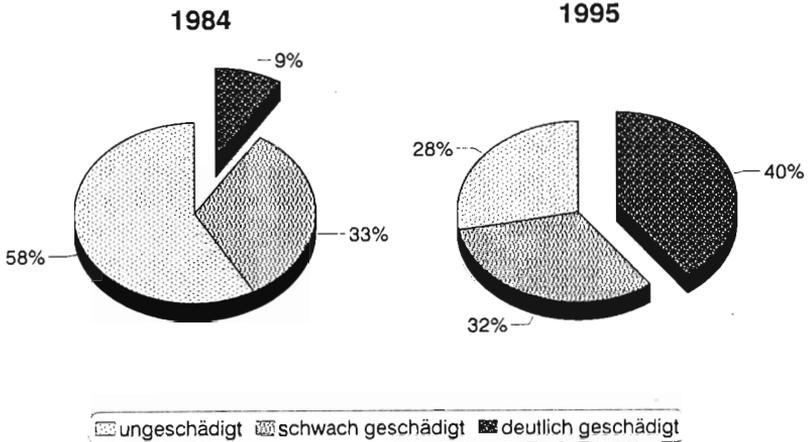


Abb. 17: Schadstufenverteilung aller Baumarten und aller Altersstufen in Hessen: ein Vergleich der Jahre 1984 mit 1995 (aus HESSISCHES MINISTERIUM des Innern und für Landwirtschaft, Forsten und Naturschutz 1995); siehe dazu auch die kritischen Bemerkungen zu Waldschadensinventuren: Fußnote 39.

Der Merkmalskomplex der "Neuartigen Waldschäden" kam nicht plötzlich, sondern es zeichnete sich über Jahre hin eine deutliche physiologische Schwächung einzelner Baumbestände ab, die mit den dargestellten Luftverunreinigungen parallel verliefen. So können sich aufgrund von Jahrringanalysen deutliche Zuwachsverluste in der Mitte der 50er, besonders aber in den 60er und 70er Jahren nachweisen lassen.

Eine zusammenfassende Darstellung der Ursachen findet sich z. B. bei ULRICH (1990) und REHFUESS (1995).

1.5. Ausblick

Bei allen globalen Stoffkreisläufen (Makro- und Mikroelemente) ist unter natürlichen Bedingungen immer nur ein sehr geringer Teil der Stoffe in Umlauf. Der Mensch kann die nicht im Kreislauf befindlichen Reservoir mobilisieren (z. B. die fossilen Energieträger), zeitweise nutzen, muß jedoch dann die nicht mehr gebrauchten Stoffe abführen. Jährlich fallen allein in der Bundesrepublik Deutschland rund 300 Millionen Tonnen Müll

an (WUTTKE 1995).⁴³ Für die globalen Stoffkreisläufe des Schwefels, des Stickstoffs und vieler Spurenelemente überwiegen bereits die anthropogenen Quellen. Gleiches gilt auch für viele Schwermetalle (NRIAGU 1979): das 18fache bei Blei, das 9fache bei Cadmium, das 7fache bei Zink, das 3fache bei Kupfer.

Die Atmosphäre ist durch die Windsysteme und durch die unterschiedlichen thermischen Bedingungen ein vorzügliches Transportmedium, so daß viele der Schadstoffe weit entfernt von ihren Emissionsquellen abgelagert werden können. Ein Beispiel hierfür ist der exponentiell gestiegene Blei- und Sulfatgehalt der Eiskappen von Grönland seit dem Beginn der "Industriellen Revolution" (MUROZUMI u. a. 1969, KOIDE & GOLDBERG 1971).

Auslöser für eine veränderte Konzentration der natürlichen Treibhausgase war in den letzten 160.000 Jahren eine Variation der Intensität der Sonnenstrahlung; dies belegen Untersuchungen an Eisbohrkernen und Sedimentbohrkernen der Tiefsee. Zum derzeitigen Zeitpunkt bleibt die Sonnenstrahlung gleich, doch der Mensch verändert nun die Treibhausgas-Situation.

Es bestehen keine Zweifel mehr, die Folgen des von uns verursachten veränderten Strahlungshaushaltes werden tiefe Spuren hinterlassen (GRASSL 1996). Durch vielfältige Verknüpfungen und synergistische Wirkungen sind jedoch alle miteinander vernetzten Rückkopplungsprozesse außerordentlich schwer durchschaubar, Ausmaß und Eintritt der Ereignisse deshalb derzeit kaum in Modellen berechenbar oder vorhersagbar. Dies liegt einerseits in der Trägheit der einzelnen Systeme begründet, wodurch genaue Zeitangaben über das Eintreffen eines Ereignisses kaum möglich sind, andererseits in der Komplexität der Systeme, wodurch Unsicherheiten der örtlichen Vorhersage entstehen. Hinzu kommt, daß positive und negative Rückkopplungsprozesse miteinander verschachtelt sind. Ein Beispiel mag dies erläutern: Die gegenwärtige Durchschnittstemperatur der inneren Antarktis liegt für eine maximale Schneeakkumulation zu niedrig. Erwär-

⁴³ Nach WUTTKE (1995) existierten Ende der 60er Jahre in der Bundesrepublik Deutschland allein 50.000 Müllkippen/-deponien. Pro Kopf fallen in Mitteleuropa pro Jahr bis 400 kg Müll an (KLÖTZLI 1993). 1987 wurden allein in der Bundesrepublik Deutschland nach offiziellen Angaben 2,2 Millionen Tonnen Sondermüll produziert (DARSKI & BLEISCHWITZ 1993). Pro 1000 Einwohner rechnet man pro Jahr mit rund 40 Tonnen Sondermüll (DARSKI & BLEISCHWITZ 1993).

mung würde höhere Schneedeponition einleiten und einen Meeresspiegel-Anstieg zumindest in einem gewissen Umfang dämpfen. Für das 21. Jahrhundert nimmt ein Modell daher an, daß es bei 6 mm prognostizierbarem Meeresspiegel-Anstieg pro Jahr deshalb eine Dämpfung von 2 mm gibt.

Möchte man zu einer Stabilisierung der derzeitigen Treibhauskonzentrationen kommen, müßte eine sofortige Senkung der globalen Emissionen von mindesten 60 % CO₂, 80 % N₂O und 20 % für CH₄ erfolgen. Dies würde bedeuten: weniger Emissionen und Rohstoffverbrauch pro Kopf und dabei eine möglichst große Annäherung an natürliche Kreisläufe. Längerfristig müßte eine erhebliche Abkoppelung von den fossilen Energieträgern angestrebt werden, d. h. für das Jahr 2050 in einer Welt mit ca. 10 Milliarden Menschen eine Nutzung von nur 20 % der heutigen Menge fossiler Energien. Daß gesetzlich festgelegte und gut kontrollierte Luftreinhalte-Vorschriften zu Erfolgen führen können, belegen lokale und regionale Abnahmen von Blei-, Cadmium- oder Kupfer-Konzentrationen (siehe z. B. BOUTRON u. a. 1991).

Für den Atmosphärenschtutz muß gelten:

- Reduktion aller Treibhausgase, des Säureeintrages und der übermäßigen Düngung,
- Reduktion des troposphärischen Ozons,
- Lösung nur durch internationale Abkommen und strenge Überprüfung der Vereinbarungen,
- finanzielle Besserstellung aller armen Länder.

Das Jahresgutachten 1995 des WISSENSCHAFTLICHEN BEIRATES der Bundesregierung "Globale Umweltveränderungen" (1996) betont, daß ein Umdenken auf individueller und gesellschaftlicher Ebene notwendig ist.

2. Gewässer (Hydrosphäre)

2.1. Allgemeines

Der Wasserkreislauf der Atmo-, Pedito- und Hydrosphäre durchdringen sich, die Austauschprozesse unter ihnen bestimmen dabei in besonderer Weise das Klima. Voneinander abzugrenzen sind einerseits der Meer-

Kreislauf, andererseits der Land-Kreislauf. Ein wesentliches Kennzeichen ist, daß der Wasser-Kreislauf überall kurzgeschlossen ist:

- Meer-Kreislauf: Wasser aus dem Meer verdunstet und trägt zur Wolkenbildung bei; über 3/4 regnet sich wieder über dem Meer ab, nur 1/4 erreicht im Durchschnitt das Festland. Über der Meeresoberfläche bilden sich durch Versprühung von Salzteilchen Kondensationskerne, die die Verdunstungsrate beeinflussen. Riesige Wassermengen verdunsten in den wärmeren Meeresgebieten, hier spielen besonders die äquatornahen Bereiche eine Rolle (z. B. Bereich des malaischen Archipels, aber auch im Westpazifik Zonen zwischen den Philippinen und Japan oder in der Karibik). Dieser Kreislauf vollzieht sich im wesentlichen zwischen Atmosphäre und Meer mit einer Ankoppelung an den Kreislauf zwischen Atmosphäre und Festland über Niederschlag des aus dem Meer verdunsteten und auf dem Festland wieder abgeregneten Wassers.
- Festland-Kreislauf: Wasser aus dem Boden und aus den Organismen (insbesondere solches aus der Transpiration der Pflanzen), aber auch aus den Binnengewässern kann direkt wieder verdunsten, zur Wolkenbildung beitragen und wieder Niederschläge ergeben. Ein Teil des Regenwassers wird sofort aus der obersten Bodenschicht von den Pflanzen aufgenommen. Das meiste Wasser absorbiert der Boden, ein Teil fließt ins Meer, ein anderer bildet das Grundwasserreservoir. Auf dem Festland ist die Verdunstung in den Regenwaldgebieten besonders hoch. Der Kreislauf wird dort mehrfach durchlaufen, zum Teil stammt das Wasser auch aus dem Meer-Kreislauf.
- Ein Teil, etwa 2 %, ist in Eis und Schnee festgelegt.

Folgende lokalen und globalen Veränderungen sind von Relevanz:

- a) das Meerwasser betreffend:
 - Veränderung durch Meeresspiegel-Schwankungen,
 - Verlagerung von Meeresströmungen,
 - Änderungen der Meereisdecke.
- b) das Süßwasser betreffend:
 - Verknappung der Süßwasserreserven,
 - Verschmutzung,
 - ineffiziente, nicht nachhaltige Nutzung.

2.2. Ozeane

71 % der Oberfläche unseres Planeten wird von Ozeanen bedeckt. Für den Menschen haben sie eine große Bedeutung als Nahrungsquelle, wichtiger Verkehrsweg, Senke für viele Abfallstoffe, "Lieferant" von Bodenschätzen, von Rohstoffen (Pharmaindustrie), in Zusammenhang mit Küsten auch als Siedlungs-, Erholungs- und Naturraum. 70 % der Menschheit lebt in weniger als 200 km Entfernung von der Küste, 2/3 aller Metropolen (Städte größer 2,5 Millionen Einwohner; siehe Kapitel 1.2.4.) befinden sich dort. An die 100-200 Millionen Menschen sind in solchen Küstenzonen durch Sturmfluten potentiell gefährdet.

Aufgrund der bereits im vorhergehenden Kapitel benannten atmosphärischen Veränderungen ist auch die Hydrosphäre elementar durch eine Vielzahl zu erwartender Phänomene betroffen:

- Meeresspiegel-Anstieg,
- Verlagerung von Meeresströmungen (z. B. Abschwächung des Golfstromes),
- erhöhte Wassertemperaturen bedingt durch den Treibhauseffekt, Verringerung der Meereisdecke,
- Absterben von Korallenriffen durch Überschwemmung und Süßwassereinfluß, Verlagerung und Zerstörung von Watt-Lebensgemeinschaften,
- möglicher Einfluß auf Anzahl und Stärke von Wirbelstürmen.

Eine der großen Gefahren, die auf den Menschen von der marinen Hydrosphäre zukommt, ist der bereits beschriebene, durch den anthropogen bedingten Treibhauseffekt hervorgerufene Meeresspiegel-Anstieg.⁴⁴ Ebenfalls sicher ist, daß das Meerwasser infolge des Treibhauseffektes wärmer wird und das Meerwasservolumen ebenfalls ansteigt. Diese Veränderungen werden einen erheblichen Einfluß auf alle Küstenökosysteme haben. Mit Meeresspiegel-Anstieg gehen einher eine Zerstörung zahlreicher Küsten-Lebensräume, darunter auch wichtige Agrargebiete, Trinkwasserschutzgebiete, Bedrohung aller an Küsten oder auf Inseln lebender Menschen, Zerstörung der menschlichen Infrastruktur (Städte, Industrien), Zerstörung wichtiger Kulturen und der Heimat vieler Menschen. Außerdem würde es zu einer Verlagerung der Ökosysteme landeinwärts kommen (Mangroven, Seegraswiesen). Dies hätte erhebliche Folgen für die Landeinwärtsverlage-

⁴⁴ Vgl. Kapitel "Indirekte Auswirkungen", S. 47ff.

rung der Salz-/Süßwassergrenze im Grundwasserbereich. Einher ginge eine Gefährdung der Süßwasserlinsen vieler Inseln u. a. Am stärksten bedroht wären Inseln mit geringem Relief, die afrikanischen Mittelmeer- und Atlantikküsten und die Küsten des indischen Subkontinentes, besonders gefährdet u. a. Bereiche der Niederlande, Bangladesh, Städte in den Delta-gebieten des Mississippi und am Nil.⁴⁵

Ozeanische Prozesse sind kaum vom Menschen steuerbar. Sicher ist, daß die Ozeane eine Reaktion auf den Treibhauseffekt und den Ozonabbau der Atmosphäre zeigen werden.⁴⁶ Präzise Vorhersagen sind auch hier kaum möglich, da z. B. Meereszirkulationen stark von Außenfaktoren gesteuert werden, wie etwa von Veränderungen im Süßwassereintrag (siehe Modellrechnungen von STOCKER & WRIGHT 1991). Auswirkungen eines Meeresspiegel-Anstieges sind erst in einigen Jahrzehnten zu erwarten, in bestimmten Flachwasserbereichen jedoch wesentlich früher.

Eine kontroverse Diskussion wird über die Bedeutung des Planktons als CO₂-Senke bzw. das Absinken toter Organismen oder Detritus in die Tiefsee geführt (TANS u. a. 1990). Der Ozean als CO₂-Senke spielt sehr wahrscheinlich nur eine untergeordnete Rolle, da oberhalb eines bestimmten Wertes ein höherer CO₂-Gehalt ein Algenwachstum nicht mehr fördert (RIEBESELL u. a. 1993). Eine Verdopplung des Gehaltes in der Atmosphäre führt nur zu einer 10-prozentigen Erhöhung von gelöstem Kohlenstoff im Oberflächenwasser; eine Durchmischung mit Tiefenwasser dauert mehrere 100 Jahre. Für die Ozeane werden etwa 1,6 Milliarden Tonnen Kohlenstoff pro Jahr Netto-Eintrag veranschlagt, im Vergleich zu 2 Milliarden Tonnen, die jährlich in den Wäldern der Erde deponiert werden (TANS u. a. 1990).

Ferner bedrohen folgende Gefahren, die dem Bereich der marinen Hydrosphäre zuzuordnen sind, den Menschen:

- Zunehmende Meeresverschmutzung (Öl, Müll, Abwässer, Überdüngung, Schwermetalle, Radionukleide); nur 20 % der Verschmutzung der Ozeane durch Öl erfolgt über spektakuläre Tankerunfälle, die größte Belastung geschieht im "Normalbetrieb". Bei der Ölverseuchung spielt das Ablassen von Ballastwasser eine weitaus bedeuten-

⁴⁵ Vgl. Kapitel "Indirekte Auswirkungen", S. 47ff.

⁴⁶ So führen BETHOUX u. a. (1990) eine seit 1959 um 0,12 °C erfolgte Erwärmung des westmediterranen Tiefenwassers auf den anthropogen bedingten Treibhauseffekt zurück. Parallel verläuft hierzu eine Zunahme der Salzkonzentration.

dere Rolle (PITT 1979). Große Altlasten bestehen durch Kriege⁴⁷ und Atommüll. Viele küstennahe Zonen oder Mündungsbereiche sind erheblich durch Müll und Abwasser belastet. Besonders die Küstengewässer sind durch Nährstoffanreicherungen, chlorierte Kohlenwasserstoffe, Öl und andere Stoffe betroffen (BLUMER 1972, HÖPNER 1989). Zunächst lokale Depositionen erfahren dann durch die Meeresströmungen eine recht effektive Ausbreitung. Dies ist jedoch nicht immer der Fall, wie das Beispiel der Nordsee zeigt, wo die Schadstoffe, die über die Flüsse aus einem riesigen Einzugsgebiet stammen, dort irreversibel endgelagert werden. Hierdurch geht eine besonders große Bedrohung nicht nur für das Meer, sondern auch den gesamten Wattenmeer-Bereich aus (BUCHWALD 1995);

- Ausbeutung ozeanischer Ressourcen: Erdöl, Erdgas, Erze, Sand und Korallenkalke;
- unkontrollierter Küstenbau.

2.3. Süßwasser

Der Mensch benötigt physiologisch pro Tag im Durchschnitt mindestens 2 Liter Wasser. Süßwasser macht innerhalb des gesamten Wasservorrates der Erde nur 1 % aus, 97 % entfällt auf Salzwasser, 2 % auf Eis. Somit ist Wasser zu mehr als 99 % für den Menschen nicht verfügbar bzw. zum Gebrauch ungeeignet. Jährlich können etwa 3×10^{12} Tonnen weltweit verbraucht werden, da diese Menge erneuerbar ist. Alles was darüber hinaus den Reservoiren entnommen wird, schafft Umweltprobleme.

Insgesamt sind es drei Problemkreise, die sich derzeit bei der Nutzung von Süßwasser durch den Menschen ergeben:

- a) Verknappung,
- b) Verschmutzung,
- c) ineffektive, nicht nachhaltige Nutzung.

Die Verschmutzung und die ineffektive, nicht nachhaltige Nutzung beschleunigen wiederum die Verknappung.

⁴⁷ In der norwegischen Rinne wurden in Zusammenhang mit dem Zweiten Weltkrieg allein 35 Handelsschiffe mit Kampfstoffladung versenkt (BUCHWALD 1995). Zwischen 42.000 und 54.000 Tonnen der in Deutschland bis 1945 produzierten etwa 300.000 Tonnen Kampfstoffmunition wurden im wesentlichen auf Veranlassung der Alliierten in der Ostsee versenkt (STEBING 1995b).

a) Verknappung

Eine Verknappung der Süßwasser-Ressourcen ist die Folge verschiedener Faktoren, die sich in der Regel gegenseitig beeinflussen. Sie beruht lokal und regional zumeist auf einem hohen Bevölkerungs- und/oder Wirtschaftswachstum im Zusammenhang mit Übernutzung von Wasservorkommen⁴⁸, Verlust der Vegetationsdecke, Oberflächenversiegelung und reduzierter oder ausbleibender Grundwasserneubildung, global im wesentlichen auf einer veränderten Niederschlagsverteilung. Der Pro-Kopf-Verbrauch liegt in der Bundesrepublik Deutschland bei 150 Litern pro Tag, in den USA bei 180 Litern pro Tag gegenüber 15 Litern in den Entwicklungsländern (STEUBING 1995a).

In zahlreichen Gebieten der Erde herrscht makroklimatisch bedingt eine regionale natürliche Wasserknappheit, die durch starke Entnahme und Verschmutzung wesentlich verschärft wird. Insgesamt sind 26 Länder bzw. Regionen⁴⁹ von akuter Wasserknappheit betroffen.

Als Ursachen für eine lokale/regionale bzw. globale Wasser-Verknappung sind zu nennen:

- *Bevölkerungswachstum* und *Zunahme der Urbanisierung*: Beides führt zu einem exponentiellen Anstieg des Wasserverbrauchs. Insbesondere in den letzten Jahrzehnten ist der Wasserbedarf insgesamt deutlich gestiegen: global seit 1950 um etwa das Dreifache. Der jährliche Wasserbedarf für den menschlichen Gebrauch liegt derzeit global bei über 4000 km³, der achtfache jährliche Wassertransport des Mississippi (GOUDIE 1994). Zu Beginn des Jahrhunderts war es nur ein Achtel des heutigen Wertes. Der nicht kompensierbare Wasserverlust hat sich dabei versiebenfacht. Man rechnet um die Jahrhundertwende mit einem Verbrauch/Jahr von 6000 km³, da Landwirtschaft und Industrie zunehmend Wasser benötigen werden. Derzeit

⁴⁸ Zur Herstellung von 1 kg Papier werden 90-120 Liter Wasser benötigt, für 1 kg Stahl 10-20 Liter, für 1 kg Kunststoff 400-1000 Liter. Zur Kühlung eines 1300-Megawatt-Kernkraftwerkes benötigt man etwa 60.000 m³ Wasser pro Tag (KLÖTZLI 1993).

⁴⁹ In Afrika: Ägypten, Algerien, Botswana, Burundi, Djibouti, Kap Verde, Kenia, Libyen, Malawi, Marokko, Mauretanien, Niger, Republik Südafrika, Ruana, Somalia, Sudan, Tunesien; im Nahen Osten: Israel, Jemen, Jordanien, Libanon, Oman, Qatar, Saudi Arabien, Syrien, Vereinigte Arabische Emirate; nach WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT der Bundesregierung (1993).

geht man von einer Verdopplung des Wasserbedarfs in 10 Jahren aus mit den größten Steigerungsraten in den Entwicklungsländern.

Urbanisierung macht es nötig, Wasser über weite Strecken heranzutransportieren (Beispiele in der Bundesrepublik Deutschland: Frankfurt/M., Stuttgart). So tragen viele große Städte durch übermäßigen Wasserentzug dazu bei, daß in ihrer unmittelbaren Umgebung Trinkwasser-Reserven knapp werden oder ganz erlöschen. Von den 10 größten Städten der Welt werden 8 im Jahr 2000 im Bereich der sogenannten Dritten Welt liegen.⁵⁰

- *Industrialisierung*: Durch Ausweitung der Industrie kommt es in solchen Gebieten zu einem exponentiellen Wasserverbrauch.
- *Landwirtschaft*: Der Mensch greift zunehmend in den Wasserhaushalt der Erde ein, dies gilt besonders im Rahmen der Bewässerungen von Kulturland, das heute bereits global über 2,5 Millionen km² Fläche umfaßt. Neue Bewässerungspraktiken sind extrem verdunstungsintensiv und damit wenig effektiv. Besonders große Wassermengen-Zufuhr findet z. B. beim Reisanbau statt, der zu einer sehr hohen Verdunstungsrate führt. Durch alle diese Bewässerungsmaßnahmen erhöht sich die Verdunstungsrate auf den Kontinenten um etwa 2,7 % (KLÖTZLI 1993). Voraussagen - gemessen an der jährlichen Steigerungsrate - lassen einen Wert von 8-10 % pro Jahr erwarten. Ein dadurch bewirkter Einfluß auf die gesamte globale Niederschlagsverteilung ist prognostizierbar (KLÖTZLI 1993). Darüber hinaus greift der Mensch aber auch durch Veränderung der Vegetation, z. B. durch die großflächige Vernichtung von Wäldern, in die Transpirationsrate ein; auch dies hat wiederum einen großen Einfluß auf die kontinentalen Niederschlagsverhältnisse. Ferner bewirkt auch der Bau von Staudämmen eine Erhöhung der Verdunstung. Derzeit gibt es weltweit etwa 36.000 Staudämme, die meisten davon in China.
- *Tourismus*: Ein besonderes Problem bereitet auch der Tourismus auf Inseln und die dadurch bedingte Verknappung der dortigen Grundwasserreserven (z. B. Kanarische Inseln).

⁵⁰ Siehe Kapitel "Auswirkungen der wachsenden Weltbevölkerung", S. 25ff. bzw. auch: EVANGELISCHE AKADEMIE BADEN (1996) Zukunft für die Erde, Bd. 3: Wieviele Menschen trägt die Erde?

b) Verschmutzung

Die Quellen der Süßwasser-Verschmutzung sind vielseitig, die Schadstoffe entstammen im wesentlichen der Landwirtschaft, der Industrie und aus urbanen Bereichen (siehe u. a. SCHÖNBORN 1992). Es handelt sich dabei um:

- Schadstoffe aus der Luft (Saurer Regen, Staub),
- Stoffe aus der Nutzungsproduktion (Industrie, Haushalte, Abwasserentsorgung),
- Stoffe aus Böden (Landwirtschaft, Abfalldeponien),
- Problemstoffe: Schwermetalle, Salze, Säuren, synthetische organische Stoffe,
- Nährstoffe (Gülle, Nitrat), pathogene Keime.

Die Probleme sind in den verschiedenen Gebieten der Erde sehr unterschiedlich. In den ariden und semiariden Gebieten kommt der anthropogen bedingten Versalzung (siehe unten) eine große Bedeutung zu, die durch vermehrte Landbewässerung und bestimmte Techniken (z. B. Grundwasserspiegel-Anstieg) hervorgerufen wird. Das Problem des Eindringens salzhaltigen Küstenwassers bei übermäßiger Förderung aus der Süßwasserlinse und damit abnehmender Grundwasserspiegel tritt z. B. in Israel, Kalifornien und den Arabischen Emiraten auf, gilt aber nicht nur für semiaride bzw. aride Gebiete, sondern auch für England, Niederlande, Deutschland, Japan und USA.

Eine bedrohliche Situation resultiert aus der Zunahme des Einsatzes von Kunstdüngern und der Gülle-Entsorgung (Probleme der "Zivilisations-eutrophierung"; HUTCHINSON 1973). Mit dem nach wie vor hohen Düngerverbrauch gehen die zunehmenden Nitratkonzentrationen in Fluß- und Grundwässern einher. Ein Teil der Eutrophierung wird auch durch Meliorationsmaßnahmen hervorgerufen, wodurch eine Mineralisation sich beschleunigt. Große Probleme entstehen durch die Massentierhaltung und die damit verbundene Gülleproduktion, wobei diese über Jahre auf Äckern und im Grünland "entsorgt" wurde.

PEIERLS u. a. (1991) fanden im Rahmen ihrer Untersuchung von 42 größeren Flüssen eine hochsignifikante Korrelation zwischen der Nitratkonzentration im Jahresmittel und der Bevölkerungsdichte. Nitrate im Überschuß führen zur Gefährdung von Mensch und Tier, so tritt bei Kindern Methämoglobinämie auf. Die Verschmutzung des Trinkwassers vor allem durch

Nitrate bereitet große Probleme, denn der Höchstwert (50 mg/l) ist im Einzelfall bereits weit überschritten (SCHÖNBORN 1995, siehe auch ROHMANN & SONTHEIMER 1985).

Die Überdüngung unserer Gewässer durch vom Menschen in Umlauf gebrachte Nährstoffe ist erheblich: Von 2000-4000 kg Phosphatdünger, den die Landwirtschaft pro Jahr auf 1 km² landwirtschaftliche Fläche bringt (der Stalldünger ist hierbei nicht einbezogen), gelangen 20 kg direkt in die Gewässer, 50 kg werden durch Erosion aus Brachland (insbesondere brachgefallene Äcker) ausgewaschen und gelangen dann in die Gewässer (KLÖTZLI 1993). In den Jahren 1970-1983 wurden von der Landwirtschaft etwa 800.000 Tonnen Rein-Nährstoffe an Phosphat verbraucht, und durchschnittlich 60 kg pro ha landwirtschaftlich genutzte Fläche eingebracht.

Die Eutrophierung zahlreicher Gewässer hängt besonders auch mit der leichten Auswaschbarkeit von Stickstoff-Verbindungen zusammen. Die überdurchschnittliche Sauerstoff-Zehrung in solchen Gewässern führt zu erheblichen Belastungen (siehe z. B. KRAMBECK 1989); ist der Sauerstoff in einem Gewässer vollständig aufgebraucht, kommt es nach einer Phase der anaeroben Umsetzungen zur Saproelbildung und zum "biologischen Tod" des Gewässers. Von den 1500-3500 kg Stickstoff pro Quadratmeter und Jahr belasten 300 kg die Oberflächengewässer, 80 kg davon durch Erosion (KLÖTZLI 1993). Hinzu gerechnet werden müssen noch die durch die Niederschläge zugeführten Nährstoffe.

Neben Nitraten und Phosphaten sind auch weitere zum Teil sehr schädliche Stoffe bekannt, die den Wasserhaushalt allgemein belasten: Schwermetalle (Cadmium, Blei), halogenierte Kohlenwasserstoffe, Salze (Chloride), hinzu kommen Pestizide, von der Anzahl her sehr verschiedene Substanzen unterschiedlicher Toxizität und Verweildauer in der Biosphäre.⁵¹ Nach GOUDIE (1994) fallen in New York täglich 6,8 Milliarden Liter Abwasser an, 16 % davon sind ungeklärt und fließen den Hudson hinab. Sehr beunruhigend sind zahlreiche Störfälle, die durch Industrie-Unternehmen verursacht wurden, und die zu einer vorübergehenden Abschaltung der Trinkwasserversorgung geführt haben: Beispiele (z. B. 1986): Sandoz/Basel (30 t Pestizide), Ciba Geigy/Basel (400 kg Atrazin), BASF/ Lud-

⁵¹ Nach WELTZIEN (1977) erkrankten weltweit nach Umgang mit Pestiziden jährlich 500.000 Menschen, mindestens 5000 sterben.

wigshafen (2000 kg Dichlorphenoxyessigsäure), Hoechst/Frankfurt (6 kg Chlorbenzol), Bayer/Leverkusen (50-100 kg Chlormetakresol).

Ferner führt auch die Ausbringung von Salzen (z. B. auf winterlichen Straßen) zu einer großen Belastung des Grundwassers. Der zulässige Grenzwert (200 mg/l) kann dann lokal überschritten werden (SCHÖNBORN 1995).

c) Ineffiziente, nicht nachhaltige Nutzung

Hervorgerufen wird eine ineffiziente, nicht nachhaltige Nutzung durch eine Vielzahl verschiedener Faktoren: unzureichende Zuweisung von Nutzungsrechten, nicht kostendeckender Preis, viele Leckagen (hohes Alter der Ver- und Entsorgungssysteme) und anderes mehr. Das beste Mittel gegen eine weitere Vergeudung sind gezielte Maßnahmen zum Wasserschutz. Sie betreffen:

- Maßnahmen zu einer *rationelleren Wassernutzung*
Anzuführen ist in diesem Zusammenhang z. B. die Berücksichtigung von Wasserspartechiken durch geschlossene (integrierte) Kreisläufe in der Industrie (z. B. Eisen-, Stahl-, Papierindustrie), die Trennung von Trink- und Nicht-Trinkwasser (doppelte Leitungsnetze im Rahmen eines dualen Systems), die Nutzung von Nicht-Trinkwasser zu Kühlungs- und Reinigungszwecken u. a. Dringend notwendig wäre eine höhere Effizienz bei Bewässerungen in der Landwirtschaft u. a. durch Förderung und Ausweitung ökologischer Landbaumethoden mit besseren Speichermöglichkeiten in den dort gut ausgebildeten Humusschichten. Die Probleme liegen im allgemeinen weniger im Bereich der Privathaushalte, wo im Verhältnis relativ wenig Wasser genutzt wird, als viel mehr in Bereichen der Industrie und der Landwirtschaft.
- Maßnahmen zur *Vergrößerung des Wasserangebotes*
Beispielsweise durch Einführung neuer nicht-konventioneller Methoden (in manchen Gebieten Gewinnung von Wasser aus Nebel usw.), Verringerung der Verluste, die aus den Versorgungssystemen entweichen, Reduzierung der allgemeinen Verdunstung.
- Maßnahmen zu einem *umfassenden Gewässerschutz* (Grund- und Oberflächengewässer) durch Reduktion der Verwendung von Pestizi-

den und mineralischen Düngungsmitteln, großflächiger Einführung ökologischer Landbaumaßnahmen.

- Maßnahmen zu einem *erfolgsversprechenden Katastrophen-Management* in bevorzugten Katastrophengebieten.

Diese Situation betrifft Gebiete, die immer wieder von Überschwemmungen und Dürren heimgesucht werden. Ein erfolgreiches Katastrophen-Management in solchen Ländern reduziert darüber hinaus die Ausweitung des Umwelt-Flüchtling-Problems.

Zahlreiche Maßnahmen in der anthropogenen Beeinflussung der Hydrosphäre haben neben positiven auch einige, zum Teil recht weitreichende negative Folgen: ein Beispiel ist der Bau von Staudämmen (siehe GOUDIE 1994). Als positiv ist der Schutz vor Überschwemmungen und vor Wasserverknappung zu sehen, negative Folgen des Staudamm-Baus sind hingegen:

- Absenkung des Bodens, Anhebung des Flußbettes unterhalb,
- Auslösung von Erdbeben (siehe unten),
- zunehmende Bodenversalzung,
- Veränderung des Grundwasserspiegels,
- Versumpfung,
- Verminderung der Sedimentationsfracht (verminderte Nährstoffzufuhr auf Felder und für Fische, beschleunigte Erosion).

Der Mensch hat durch eine Vielzahl von wasserbaulichen Maßnahmen große Umweltprobleme geschaffen durch:

- *Flußregulation und Kanalisierung*

Durch Flußregulation und Kanalisierung hat sich die Fließgeschwindigkeit der Bäche, Flüsse und Ströme stark verändert, die Gefahr von Spitzenfluten weiter flußabwärts ist dadurch gestiegen. Hinzu kommen die Auswirkungen der Urbanisierung auf die Fließgewässersysteme durch Bildung von Fluten durch Ansammlung und Abführung großer Wassermengen auf versiegeltem Gebiet. Das Risiko von Überschwemmungen wurde durch menschliche Aktivitäten wie Abholzen von Wäldern im Einflußbereich von Fließgewässern vergrößert. Schon allein die Veränderung der Baumarten-Zusammensetzung kann die Abflußmenge beeinflussen, etwa durch Ersatz eines Laubwaldbestandes durch Nadelhölzer und damit einhergehender Veränderung der Interzeption (Auffangen von Regenwasser in den Kronen), siehe

SWANK & DOUGLAS (1974). Hinzu kommt der großflächige Verlust von Retentionsräumen.

- Veränderung der *Wasserstände* von Seen

Ein besonders spektakuläres Beispiel sind die Veränderungen des Wasserspiegels des Aralsees (GUS). Die dort feststellbaren Wasserspiegel-Absenkungen von etwa 3 m sind einerseits auf klimatische Ursachen zurückzuführen (Rückgang der Niederschläge im Wolgabassin seit 1930), andererseits und hauptsächlich jedoch auf menschliche Aktivitäten: Bau von Staubecken, Bewässerungen, Wasserentnahme durch Industrie, Landwirtschaft und Kommunen und Umleitung des Wassers seiner Zuflüsse (HOLLIS 1978). Seit 1960 beträgt der Rückgang der Fläche 40 %, der des Volumens 60 %; dies führte zu einer Reduktion der Flachwasserzonen und damit zu einer Abnahme des Fischbestandes. Mit diesen Veränderungen geht eine zunehmende Versalzung in der gesamten Region einher (um 30 %). Riesige versalzten Oberflächen entstanden, und starke Sandstürme verbliesen das Salz, wodurch die Böden in der nahen und weiten Umgebung erheblich geschädigt wurden. Ähnliche Veränderungen verzeichnet auch das Asowsche Meer. Die Austrocknung des Aralsees stellt wahrscheinlich eine der größten Umweltkatastrophen der GUS dar.

- Veränderung der *Grundwasser-Situation*

Eine zu große Entnahme führt zu einem Absinken des Grundwasserspiegels mit parallel verlaufenden Bodenabsenkungen und im Küstenbereich zu einem Eindringen von Salzwasser mit einhergehender Bodenversalzung. In vielen Gebieten sind große Probleme durch die Absenkung des Grundwasserspiegels um mehrere Zehner von Metern aufgetreten. Die Trinkwasserversorgung geschieht z. B. in der Bundesrepublik Deutschland zu 75 % aus Quell- und Grundwasser, zu 25 % aus Oberflächenwasser (davon 5 % Uferfiltrat).

Es gibt fossile Grundwasservorräte, die einige Jahrtausende alt und nicht mehr erneuerbar sind. Ihre Nutzung sollte in Kenntnis dieses Zusammenhanges besonders verantwortungsvoll und behutsam erfolgen.

- Auswirkung von *Entwaldungen* auf die Gewässerqualität

Nach Kahlschlag von Wäldern kommt es zur Freisetzung von Nährstoffen eines einst weitgehend geschlossenen Kreislaufs und Reservoirs.

Dringend notwendig ist vor allem die globale Sicherung von ausreichenden Trinkwasser-Reserven sowie eine Reduktion aller Wasserverschmutzungen. In allein 24 Ländern der Erde herrscht akuter Wassermangel, über 1,7 Milliarden Menschen auf unserem Planeten verfügen über keine sanitären Einrichtungen.

Neben einer rationellen Nutzung muß besonders die Neubildung des Grundwassers gewährleistet sein; eine Voraussetzung hierfür ist eine intakte Pflanzendecke und gesunde Böden.

3. Boden und Gesteinsschicht (Pedo- und Lithosphäre)

3.1. Allgemeines

Der Boden (*Pedosphäre*) umfaßt die belebte, oberste Verwitterungsschicht der Erdkruste. Die Boden-Lebewelt (*Edaphon*) beeinflusst die Bodenbildung und bewirkt eine spezifische Bodenbeschaffenheit. Darüber hinaus führen physikalisch-mechanische und chemische Prozesse zur Verwitterung des anstehenden Gesteins (*Lithosphäre*). Eine Bodenbildung läuft in der Regel außerordentlich langsam ab (häufig über einen Zeitraum mehrerer Tausend Jahre), in der Regel ist die Bodenbildung auch irreversibel.

Böden haben folgende wichtige Funktionen (verändert nach HABER 1990):

- Regelung der Stoff- und Energieflüsse im Naturhaushalt (*Regelungsfunktion*),
- Bereitstellung von Wasser und Nährelementen; Förderung der Produktion, Retentionsfunktion nach Starkregen (*Speicherungsfunktion*),
- Gewährung von Lebensraum für die Bodenorganismen und Wurzelraum für die Pflanzen (*Lebensraumfunktion*).

Deshalb sind besondere Anstrengungen zu unternehmen, Belastungen zu vermeiden, z. B. durch Überbauung, Erosion, Schwermetall- und Säurekontamination.

Bereits jetzt schon zeigen etwa 15 % der Böden der Welt (= 20 Millionen km²) merkliche durch den Menschen verursachte Degenerationerscheinungen (WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT der Bundesregierung "Globale Umweltveränderungen" 1993). Am stärksten an der Bodendegeneration ist die Wassererosion mit 56 % beteiligt, gefolgt von der Winderosion (28 %), chemischen Degradation (12 %) und physikalischen Degradation (4 %).

Erosion durch Wasser und Wind stellen ein besonders dringliches globales Problem dar. Durch falsche Bodenbewirtschaftung entstehen jährlich nach Angaben der FAO 6-7 Millionen Hektar neue Wüstenfläche. Ursachen der Bodendegradationen sind im wesentlichen Rodungen, Übernutzung, Überweidung, Ackerbau und bestimmte industrielle Maßnahmen. Der Schutz des Bodens ist nachdrücklich in der Welt-Boden-Charta ("13 Thesen") verankert (Empfehlung der 21. FAO-Konferenz der Vereinten Nationen 1981). Es bedarf erheblicher Anstrengungen, Böden für die Nahrungsmittelproduktion auf Dauer zu erhalten (Land- und Forstwirtschaft). Die Existenz des Menschen ist an die Produktivität der Böden im Sinne des Nachhaltigkeits-Konzeptes gekoppelt. Eine Ausdehnung der landwirtschaftlichen Nutzflächen kann nicht in dem Maße und in der Geschwindigkeit erfolgen wie derzeit Produktionsflächen durch falsche Bodenbewirtschaftung verloren gehen (WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT der Bundesregierung "Globale Umweltveränderungen" 1993). Deshalb wird im Jahr 2050 auch etwa 50 % weniger Anbaufläche pro Person zur Verfügung stehen. Die Ausdehnung der Landwirtschaftsfläche hält unter diesen Bedingungen mit dem Bevölkerungswachstum nicht Schritt. Es besteht bereits jetzt schon die Auffassung, daß die Grenzen global nutzbarer Agrarflächen erreicht sind (VITOUSEK 1986).⁵²

Die Veränderungen, die die Pedosphäre, d. h. den Boden im weiteren Sinne betreffen, sind:

- Chemische Veränderungen des Bodens: Versalzung, Nährstoffverarmung, Belastung durch Agrochemikalien (z. B. Pflanzenschutzmittel⁵³, Pflanzenhormone, Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel), Säuren und Säurebildner, Schwermetalle,
- mechanische Veränderungen: Bodenverdichtung (Zerstörung der Bodenstruktur),
- hydrologische Veränderungen (Vernässung, Austrocknung),
- flächenhafte Abtragung von Boden und Lockergesteinen (*Denudation*), Bodenerosion (Verlagerung von Bodenmaterial),

⁵² Gleiches gilt auch für die heute üblichen landwirtschaftlichen Produktionsformen. So wird z. B. heute weltweit das Verhältnis zwischen einer Tonne produzierter Nahrungsmittel und der hierfür aufzuwendenden Menge (Kosten) an Dünger, Energie, Herbizide, Insektizide u. a. immer ungünstiger (KAISER 1981, PLACHTER 1991).

⁵³ Nach KLÖTZLI (1993) werden in Europa jährlich 10.000 Tonnen Pestizide verspritzt; besonders gefährlich für den Menschen sind hierbei die Dioxine, die als Verunreinigungen von Herbiziden in die Umwelt gelangen.

- Wüstenbildung,
- Senkungen der Erdoberfläche.

3.2. Beispiele für Eingriffe in die Pedo- und Lithosphäre

a) Versalzung

Von der Versalzung betroffen sind vor allem semiaride und aride Gebiete, solche, in denen die Evapotranspiration⁵⁴ größer ist als der Niederschlag. Unter diesen Bedingungen kann es zu einer Anreicherung von Salzen im Boden kommen. In Wüsten begünstigt das geschlossene Drainagesystem (endorheische Entwässerung) eine Versalzung. Salze werden jedoch in den Wüstengebieten vorwiegend über die Atmosphäre eingebracht. In Südwestaustralien sind allein 130 kg Chloride über die Atmosphäre nachweislich eingetragen worden, so über Niederschläge, Nebel und Sandstürme. In anderen Gebieten (z. B. Südäthiopien) ist es das vulkanische Ausgangsgestein, das sehr Natriumcarbonat-haltig ist (NISBET 1994).

Die anthropogen bedingte Zunahme von Salz-Konzentrationen im Boden war schon ein Problem der Landwirtschaft Mesopotamiens vor 4000 Jahren (JACOBSON & ADAMS 1958). Das Gebiet war vor 4400 Jahren salzfrei, vor 4100 Jahren bereits sporadisch versalzt. Besonders gut belegt das Verhältnis Weizen/Gerste die Salzgehalte des Bodens; Weizen ist weniger, Gerste stärker salztolerant. Vor 5500 Jahren war das Verhältnis Weizen/Gerste im südlichen Irak ausgewogen, 1000 Jahre später lag der Anteil des Weizens unter 20 %, vor 4100 Jahren unter 2 %, 1700 v. Chr. war kein Weizen mehr im Gebiet nachweisbar. Mit der zunehmenden Versalzung koinzidiert im Gebiet auch eine zunehmende Abnahme der Ernteerträge (vor 4400 Jahren: 2537 l/ha, vor 4100 Jahren: 1460 l/ha, vor 3700 Jahren: 897 l/ha). Diese Zusammenhänge sind besonders wichtig für das Verständnis des Zusammenbruchs der sumerischen Kultur. Wie bereits mehrfach die wachsenden Umweltprobleme in Zusammenhang mit der menschlichen Bevölkerungszahl gebracht werden konnten, so ist dies auch hier der Fall (WHITMORE u. a. 1991); siehe *Abbildung 18*. Im 17.-18. Jahrhundert v. Chr. lebten in dem heutigen Gebiet des Irak etwa 15 Millionen Menschen, im 5. Jahrhundert v. Chr. nur noch 1 Million. Im

⁵⁴ Gesamtmenge der Transpiration (geregelt Wasserabgabe) der Pflanzen und Evaporation (ungeregelte Verdunstung) von Wasser aus dem Boden und über den Flächen von Gewässern (in Anlehnung an SCHAEFER 1992).

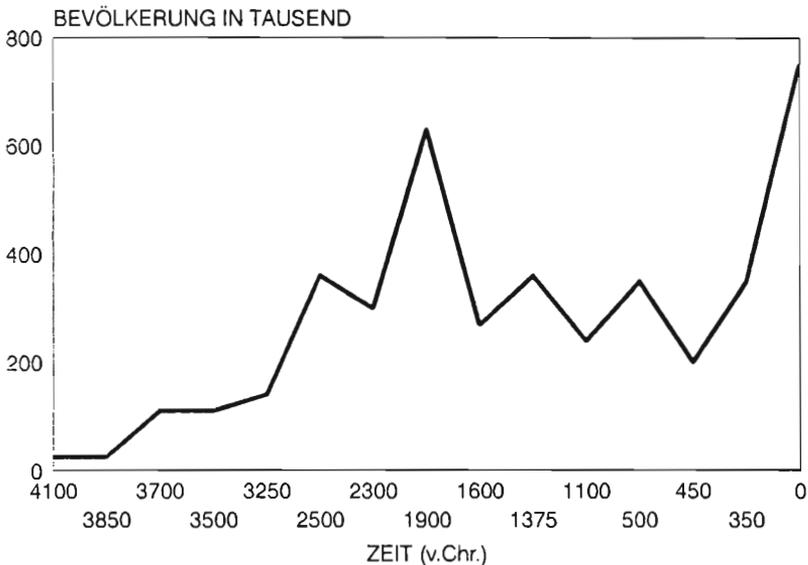


Abb. 18: Rekonstruktion der Bevölkerungszahl im Gebiet von Tigris und Euphrat (in Anlehnung an WHITMORE u. a. 1991).

1. Jahrhundert kam es dann zu einer Verlagerung der kulturellen Entwicklung von Vorderasien in den Mittelmeerraum. Die Nordwestwanderung ganzer Völker war somit u. a. auch durch eine Umweltkrise hervorgerufen.

Eine Ursache der Versalzung ist der Anstieg des Grundwasserspiegels durch den Bau größerer Bewässerungssysteme. Nach ROZANOW u. a. (1991) nahm von 1700-1984 weltweit die Fläche bewässerten Landes von 50.000 km² auf 2,2 Millionen km² zu, während im selben Zeitraum etwa 500.000 km² infolge sekundärer Versalzung von den Menschen dort verlassen wurden.

Der Anteil salzgeschädigter Böden ist in einzelnen Ländern zum Teil beträchtlich: im Irak 50 %, in Pakistan 23 %, im syrischen Teil des Euphrat-Tales 50 %, in Ägypten 30 %, im Iran 15 % (nach WORTHINGTON 1977). Von der Versalzung besonders betroffen sind die Ebenen des Indus/Pakistan. Die Folgen der Versalzung sind zunächst Rückgang der Ernteerträge (CARTER 1975), dann Zerstörung der Vegetation und Erosion durch Wind und Wasser.

b) Lateritische Böden

Laterite (Ferrasols und Acrisols) entstehen durch Anreicherung von Fe- und Al-Ionen in tropischen Gebieten im Verlauf starker Verwitterung. Die Erträge von Kulturpflanzen sinken auf Ferrasolen rasch ab, da die Nährstoffe schnell ausgewaschen werden. Nach Erosion der Ackerkrume kommt es zu irreversiblen Verhärtungen des Bodens (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992).

c) Podsolbildung

Durch landwirtschaftliche Nutzungsformen (z. B. die ehemalige Heidenutzung) kam es in humiden und kühlen Klimaten zur Erniedrigung der pH-Werte des Bodens und zu Auswaschungsprozessen. Auf den entstehenden Podsolböden ist eine geregelte Landwirtschaft nicht mehr möglich, die Böden sind extrem nährstoffarm und zeigen sehr niedrige pH-Werte. Podsolbildung begann in vielen Gebieten (z. B. im norddeutschen Tiefland) mit der Streunutzung in Wäldern und dem stetigen Entzug von Biomasse (siehe POTT & HÜPPE 1991). Die oberste Laubaufgabe und humose Bodenaufgabe wurde als Einstreu in die Ställe gebracht; mit organischem Material versetzt kam sie dann auf die Felder und Wiesen als Dünger. Diese Streunutzung wurde in vielen Gegenden über Jahrhunderte gepflegt und führte zu einer erheblichen Verarmung der Waldböden an Nährstoffen. Die Konsequenzen dieser jahrhundertlang währenden Nutzung sind heute noch zu erkennen. Podsolböden finden sich besonders unter Heide, wo durch "Plaggen" eine Entnahme der Vegetation und oberer Bodenschichten durch den Menschen erfolgte (siehe auch BEHRE 1980). Die dort sich einstellende Vegetation fördert die Rohhumus-Bildung und damit eine Erniedrigung des pH-Wertes, so die Besenheide (*Calluna vulgaris*). Podsole sind nach BRIDGES (1978) vermehrt schon in der Bronzezeit entstanden.

d) Düngung

Bevor eine Synthese von Ammoniak (NH_3) möglich war, gab es neben dem organischen "Recycling" und der Gründüngung, z. B. durch Schmetterlingsblütler (*Leguminosen*), die mit Hilfe von Bakterien Luftstickstoff fixieren können und sehr N-reich sind, nur wenige Möglichkeiten einer zusätzlichen Stickstoff-Zufuhr. N-Vorräte wurden im letzten Jahrhundert

in Form von Chile-Nitrat (zumeist NaNO_3) aber auch als organische Dünger wie Guano oder als Ammoniumsulfat (nach 1820 als Nebenprodukt der Verkokung) genutzt. Erst seit dem 20. Jahrhundert werden Künstdünger eingesetzt (SMIL 1991), ab 1913 im Rahmen der Herstellung durch das Haber-Bosch-Verfahren, dann aber vor allem seit 1950.

Seit dem Zweiten Weltkrieg hat sich die Zufuhr an leicht pflanzenverfügbarem Künstdünger zwischen 1950 und 1980 für die Bundesrepublik Deutschland um etwa das Siebenfache (HERRMANN 1985) erhöht, ähnliches gilt für die Schweiz (KLÖTZLI 1993) und andere Länder. Leider jedoch, und hier liegt das große Problem, kann Künstdünger sehr schnell ausgewaschen werden. Hieraus resultiert einerseits die Notwendigkeit der mehrfachen Düngung an einem Ort und einer Stelle, will man eine Wirkung erzielen, andererseits die Gefahr einer nicht gewünschten Eutrophierung in der Umgebung. Nach ISERMANN (1991) beträgt der Mineraldüngerverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland 126 kg/ha und Jahr. Um 1880 waren es pro landwirtschaftliche Nutzfläche dagegen nicht mehr als 0,7 kg Stickstoff, heute sind es allein schon in emittentenferner Lage in Mitteleuropa durch die Luft mehr als 20 kg Stickstoff pro Jahr und Hektar.⁵⁵

Besonders betroffen durch zunehmende Eutrophierung bzw. Hypertrophierung gelten global alle Ökosysteme, die an geringe Nährstoffgehalte adaptiert sind: hierzu gehören bei uns unter Naturschutz-Gesichtspunkten viele besonders gefährdete Lebensräume mit ihren typischen Tier- und Pflanzenarten (z. B. alle Magerwiesen und Magerrasen, siehe z. B. DIERSSEN 1989, RUTHSATZ 1989, ELLENBERG jun. 1992, WILSON u. a. 1995):

- Weit mehr als die Hälfte der Wild-Pflanzenarten der Bundesrepublik Deutschland ist nur an Standorten mit geringer Stickstoff-Zufuhr überlebensfähig.
- Die meisten der Rote-Liste-Arten kommen nur an Magerstandorten vor.
- Der Anteil der gefährdeten Arten gemessen an der Gesamtzahl der vorhandenen Arten je Stickstoff-Zeigerwertklasse nimmt mit zunehmender Stickstoffversorgung ab.

⁵⁵ Siehe unter Kapitel 8 "Düngungseffekte aus der Luft", S. 73ff. und ULRICH (1982).

Ein Zuviel an Stickstoff wirkt sich nicht nur auf der Organisationsebene "Ökosystem" negativ aus, sondern verursacht auch bei Einzelpflanzen erhebliche Schäden. In der Regel nimmt die Stabilität der Zellwände ab, wie allgemein auch die Gesamtfestigkeit der Pflanze. Dies beruht auf der Verlagerung des Verhältnisses der Kohlenstoff- zu den Stickstoff-Verbindungen zugunsten letzterer. Auch Tiere sind indirekt von der Eutrophierung betroffen (KRATOCHWIL 1989). Besonders Rinder leiden mit ihrer Verdauung und ihrem Stoffwechsel unter der Hypertrophierung, wenn die Nahrung zu proteinreich ist, jedoch zu wenig Rohfaser-Material vorliegt (mindestens 10-12 %). Die landwirtschaftlich-chemische Bundesversuchsanstalt in Linz (Österreich) hat Untersuchungen durchgeführt, mit denen eine persistente Fruchtbarkeitsstörung bei solchen Rindern festgestellt werden konnte, die auf intensiv genutzten Flächen geweidet hatten (SCHILLER u. a. 1975, LENGAUER 1975). Auch ist nachgewiesen, daß bei zu hohen Düngergaben die Resistenz und Widerstandskraft von Pflanzen gegenüber Schädlingen nachläßt.

e) Brandrodung

Durch Wanderfeldbau verbunden mit Brandrodung kommt es zu einem zum Teil irreversiblen Verlust der Nährstoffe durch Auswaschung und Erosion (NYE & GREENLAND 1964).

f) Denudation

Die Boden- und Lockergesteinsabtragung (Denudation) umfaßt im wesentlichen den Verlust der Humusschicht u. a. durch Feuer, Drainage und Entwaldung. Nach PIMENTEL u. a. (1976) gehen 4 Milliarden Tonnen Lockersubstrat pro Jahr mit den Flüssen ab, 1 Milliarde Tonnen mit dem Wind.

Prozesse der Erosion begleiten den Menschen von den Anfängen an seit Beginn der Landwirtschaft vor etwa 12.000 Jahren (MYERS 1988). Seit Mitte des 1. Jahrtausend haben Menschen im Mittelmeerraum zu einer beschleunigten Hangerosion und Akkumulation in den Tälern, so z. B. in

Griechenland, beigetragen (VAN ANDEL u. a. 1990).⁵⁶ Messungen an römischen Bauwerken haben Denudationen in den letzten 2000 Jahren von bis zu 1,3 Metern ergeben (JUDSON 1968).

Seit den Anfängen wurden global durch Abtragung ungefähr 4,3 Millionen km² landwirtschaftliche Nutzfläche vernichtet; diese Fläche ist von ihrer Ausdehnung größer als 1/3 der heute landwirtschaftlich bebauten Fläche der Erde. Pro Jahr ist ein Verlust durch Erosion und anderen Formen der Degradation von etwa 200.000 km² zu verzeichnen. Interessante Ergebnisse legten HUGHES u. a. (1991) vor, die die Sedimentation im Sumpf von Kuk (Neu Guinea) untersuchten. Mit Beginn der ersten Phase der Waldrodung stieg die Sedimentation von 0,15 cm/1000 Jahre auf 1,2 cm, seit etwa 1960 durch Ausdehnung von Grasland, Gärten, Kaffeepflanzungen sogar um 34 cm/1000 Jahre.⁵⁷ Messungen der Sedimentationsrate auf den Kontinentalschelfen belegen auch in vielen anderen Regionen der Welt den zunehmenden Prozess der Abtragung. MILLIMAN u. a. (1987) konnten im Unterlauf des Huang Ho in China nachweisen, daß die Sedimentansammlung auf dem Schelf in den letzten 2300 Jahren 10 mal so hoch war wie im ganzen Holozän (10.000 Jahre). In 5000 Jahren verlor China während seiner Hochkulturphase 2/3 seiner bebaubaren Fläche allein durch Abtragung.

Die Gründe, die zu einer vermehrten Erosion führen, sind u. a. landwirtschaftliche Maßnahmen, Entwaldungen, Urbanisierung, Industrialisierung (insbesondere Tagebau). Bodenerosion durch Entwaldung und Landwirtschaft in den Tropen und semiariden Gebieten sind besonders gravierend. Nach CARTER (1977) wurden in den USA seit Mitte der 30er Jahre allein 15 Milliarden Dollar gegen die wachsende flächenhafte Abtragung von

⁵⁶ Platon schreibt 400 v. Chr. im "Kritias": "Der Boden, von den höher liegenden Ländereien abgebrochen, gleitet unaufhörlich abwärts und verschwindet in der Tiefe. Und, genau wie auf kleinen Inseln, gleichen die Überreste dem Skelett eines Kranken: die gesamte fette, saftige Erde ist verschwunden, und nur das nackte Gerippe des Landes ist übriggeblieben [...] Das Land hatte viele Wälder auf seinen Bergen; bis auf unsere Tage gibt es sichtbare Zeichen dafür: Es gibt bestimmte Berge, die heute nur noch den Bienen Nahrung bieten, doch vor nicht allzu langer Zeit hatten sie noch Bäume. Die Dachbalken, die aus ihren Stämmen geschlagen wurden, sind noch gesund [...] Das Land wurde von Zeus durch jährliche Regen befruchtet, die nicht verloren gingen, wie das heute der Fall ist, wo sie von dem vegetationslosen Land ins Meer fließen. Vielmehr hatte das Land tiefgründigen Boden, in dem es das Wasser auffing und speicherte [...] Noch stehen die Altäre an den Stellen, wo einst die Quellen sprudelten. Beweise dafür, daß unsere vorliegende Beschreibung des Landes richtig ist"; zitiert nach WILMANN (1977).

⁵⁷ Extrapoliert.

Boden und Lockergesteinen, eines der einschneidendsten Umweltprobleme der USA, ausgegeben. Hauptverursacher ist hier einerseits die Forstwirtschaft (Entwaldung), andererseits die Landwirtschaft.

- Denudation durch *landwirtschaftliche Maßnahmen und Entwaldung*
Eine Serie heißer, trockener Jahre, die jahrelange Überbeweidung, unsachgemäße landwirtschaftliche Anbaumethoden und die zu rasche Ausdehnung des Weizenanbaus haben in den Great Plains in den USA zu einem gravierenden Fall von Abtragung durch Wind geführt: in Kansas wurden 1910 2 Millionen Hektar, 1919 sogar 5 Millionen Hektar Land durch Wind wegerodiert. Eine besonders große Katastrophe war der "Dust Bowl" in den dreißiger Jahren (BORCHERT 1971). Sandstürme stellen in den USA auch heute noch ein Problem dar. 1977 wurde in Kalifornien durch Winderosion in einem Gebiet von 2000 km² in 24 Stunden allein 25 Millionen Tonnen Boden und Lockergestein vom Weideland abgeblasen. Die Gründe waren Dürre, starker Wind in Kombination mit Überbeweidung und dem Fehlen windbrechender Strukturen.
- Denudation durch *Übertagebau*
Als ein besonders gravierender, die Landschaft erheblich verwüstender geomorphologischer Eingriff ist der Übertagebau anzusehen. In vielen Ländern, z. B. in den USA (Pennsylvania, Ohio, West-Virginia, Kentucky, Illinois) aber auch in Mitteleuropa, ist diese Form der Umweltzerstörung zu einem außerordentlich großen Problem geworden. In Mitteleuropa liegen große Braunkohle-Abbaugelände in der Niederrheinischen Bucht und in Ostdeutschland, vor allem in der Lausitz, der Leipziger Tieflandsbucht sowie im Thüringer und subherzynischen Becken. Der Flächenverbrauch betrug bis zum Jahr 1988 im Kreis Hoyerswerda 12.000 Hektar, im benachbarten Senftenberg (Lausitz) 16.200 Hektar (JOCHIMSEN u. a. 1995). Insbesondere der Wechsel zum Tieftagebau mit Hilfe von großen Schaufelradbaggern seit 1950 zog weitreichende ökologische Folgen nach sich. Insgesamt bewegt der Mensch heute jährlich sehr große Mengen an Fels- und Erdmaterial. Man muß davon ausgehen, daß die jährlichen anthropogen hervorgerufenen Fels- und Erdbewegungen derzeit 3000 Milliarden Tonnen ausmachen (HOLDGATE u. a. 1982), durch alle Flüsse dieser Erde ins Meer getragenes Sediment macht hingegen "nur" 24 Milliarden Tonnen aus.

g) Wüstenbildung

Fast 8 Millionen km² der Erdoberfläche wird von Wüsten bedeckt. Sehr umstritten ist die Ausdehnung der Wüsten und deren Ausmaß. Die Verschiebung ganzer Vegetationszonen etwa im Sudan und eine damit in Verbindung gebrachte Ausdehnung der Sahara (LAMPREY 1975) ist in Zweifel gezogen worden (HELLDEN 1985), zumal jährliche Schwankungen der Biomasseproduktion in diesen Zonen Prognosen schwer zulassen (DREGNE & TUCKER 1988). Im wesentlichen dürften es, so z. B. in der Sahelzone und im Sudan, die Holzentnahme, die Überbeweidung und landwirtschaftliche Übernutzung und die übermäßige Wasserentnahme aus Brunnen sein, die eine Desertifikation beschleunigen (MENSCHING 1978). Dürrekatastrophen, wie die zwischen 1968 und 1975 in der Sahelzone, verschärfen die Situation und vernichten ehemaliges Weideland vollständig. Überbeweidung und anschließende Desertifikation ist auch aus Mexiko bekannt. So kam es u. a. auch zu einer Ausbreitung des Kreosotbusches (*Larrea tridentata*) infolge Überbeweidung durch Rinder Ende des 19. Jahrhunderts. Nach Angaben der UNO soll sich die Wüstenfläche im Jahr 2000 verdreifacht haben, als Hauptgrund wird die Zunahme der Weideviehbestände⁵⁸ genannt (global von 1955-1976 um 38 %; siehe PLACHTER 1991). Eine vor allem auf Klimaveränderungen zurückzuführende Desertifikation findet von wissenschaftlicher Seite her keine Zustimmung (GOUDIE 1994).

h) Senkungen der Erdoberfläche

Durch intensive Förderung von Kohle, Öl und Gas senkt sich lokal die Erdoberfläche (am Beispiel von Wilmington, USA, wurden 9 m gemessen), ferner durch starke Grundwasserförderung (Central Valley, Kalifornien um 8,5 m, Mexico City um 7,5 m). Auch in den mitteleuropäischen Steinkohle-Bergbaugebieten ist es zu Senkungen von mehreren Metern gekommen. Durch solche Prozesse erhöht sich die Gefahr, daß es zu Überschwemmungen kommt.

Ein sehr ernstes Problem sind durch den Menschen hervorgerufene seismische Ereignisse (RALEIGH u. a. 1976). Solche können absichtlich und

⁵⁸ Die Zunahme beruht u. a. auf Fortschritten in der Tierseuchenbekämpfung und in besseren Haltungsmethoden.

kontrolliert durch veränderte Flüssigkeitsdrücke in einer Erdbeben-Zone hervorgerufen werden. Am häufigsten sind anthropogen bedingte Erdbeben im Zusammenhang mit dem Bau großer Stauseen (GOUDIE 1994). Mit der ständig steigenden Anzahl und zunehmenden Größe der Stauseen vergrößert sich die Wahrscheinlichkeit eines Erdbeben-Ereignisses. GOUDIE (1994) nennt allein 24 Fälle signifikanter Korrelationen. Bisher wurden durch Stausee-Bau sogar Erdbeben > 5 der Richter-Skala hervorgerufen. Der Grund für solche Erdbeben liegt in einer Veränderung des hydrostatischen Druckes und veränderter Drücke auf die Kontaktflächen von Verwerfungen.

Dringend notwendig ist vor allem die globale Sicherung von fruchtbaren Böden sowie eine Reduktion aller Gefahren der Abtragung, der Zerstörung der physikalisch-chemischen Bodenstruktur und der Boden-Lebewelt. Neben einer sinnvollen und rationellen Nutzung muß besonders die Neubildung von Böden durch die Förderung einer standortgemäßen Vegetationsdecke gewährleistet sein. Erforderlich ist die Durchsetzung der Welt-Boden-Charta und der in den AGENDA 21 festgehaltenen Prinzipien über eine nachhaltige Nutzung von Böden.

4. Lebewelt (Biosphäre)

4.1. Verlust der Biodiversität

Auf der Erde sind derzeit etwa 1,5 Millionen Tier- und Pflanzenarten beschrieben (WILSON 1989). Die tatsächlich vorkommende Zahl bewegt sich vielleicht zwischen 5-30 Millionen. MYERS (1985) prognostizierte für das letzte Viertel dieses Jahrhunderts eine Ausrottung von etwa 1 Million Arten. Auch hier ist ein exponentieller Trend feststellbar (*Abb. 19*): von 1600-1900 ist alle 4 Jahre eine Art durch den Menschen verschwunden, nach 1900 eine Art/Jahr, gegenwärtig mehr als eine Art/Tag. WILSON (1989) rechnet pro Stunde mit dem Auslöschen einer Art bzw. heute schon von drei Arten. Nach LUGO (1992) werden Ende dieses Jahrhunderts 20-50 % aller Arten ausgelöscht sein. Unter natürlichen Bedingungen beträgt die Nettowachstumsrate der Artenzahl 0,37 % in 1 Million Jahren, das sind 0,00000037 %; ein außerordentlich geringer Wert. Die natürliche Aussterberate wurde durch den Menschen somit um das 10.000fache gesteigert; damit ist die Abnahme größer (mindestens 100fach höher) als

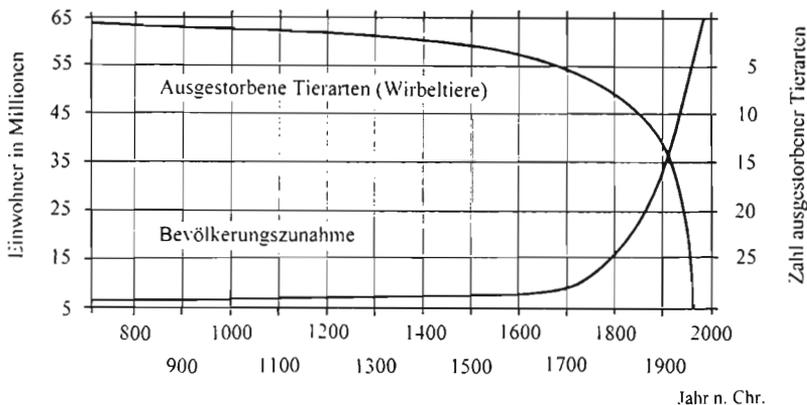


Abb. 19: Exponentielles Wachstum des anthropogen bedingten Aussterbens von Säugetieren und Vögeln in Vergleich mit dem exponentiellen Wachstum der Weltbevölkerung (in Anlehnung an ERZ 1983).

der Artenverlust in den letzten 65 Millionen Jahren (WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT der Bundesregierung "Globale Umweltveränderungen" 1993). Um ein Vielfaches mehr ist die Rate des Verlustes genetischer Diversität auf der Ebene der Populationen.

Diese Entwicklung ist aus ökologischen, ethischen, religiösen, ästhetischen und kulturellen Gründen nicht tragbar, zumal die Zerstörung der Biodiversität irreversibel ist (ARROW & FISHER 1974, BISHOP 1978). Darüber hinaus kommt der Biodiversität ein Eigenwert zu (NAESS 1986).

Der Mensch hat mit derzeit etwa 280 Millionen Tonnen die größte Biomasse, die ein Lebewesen jemals erreichte (GOUDIE 1994). Dies hat auch erhebliche Auswirkungen auf seine Mitwelt-Organismen.

"Wenn sich die gegenwärtigen Trends fortsetzen – was in vielen Gebieten ohne Zweifel der Fall sein wird –, dann kann man davon ausgehen, daß bis zum Jahre 2000 Hunderttausende von Arten ausgestorben sein werden [...] Die für die nächsten Jahrzehnte vorhergesagte Ausrottung ist jedoch weitgehend von Menschen gemacht und vollzieht sich in einer Größenordnung, die das natürliche Aussterben als vernachlässigbare Größe erscheinen läßt. Der Versuch, die menschlichen Grundbedürfnisse zu befriedigen, und steigende Erwartungen dürften zur Ausrottung eines Fünftels bis eines Siebtels aller Arten (von Pflanzen und Tieren) während der nächsten zwei Jahrzehnte führen" (KAISER 1980).

Die Zentren besonders hoher Biodiversität liegen in den Tropen, vor allem dabei in den tropischen Bergländern. Auf wenigen Hektar Wald in Südostasien oder im Amazonasgebiet findet man mehr Baumarten als in ganz Europa. Im "Immergrünen Regenwald" Venezuelas gibt es mindestens 90 Baumarten pro Hektar (WALTER & BRECKLE 1984). Der Verlust von Biodiversität ist in einzelnen Bereichen beträchtlich: man nimmt an, daß allein im westlichen Teil Ecuadors in den letzten 25 Jahren etwa 50.000 Pflanzen- und Tierarten verschwunden sind. Solche Verluste entstehen durch Zerstörung der Wälder und durch veränderte Landnutzungsformen (Landwirtschaft, Urbanisierung, Industrialisierung).

4.2. Pflanzenarten: Ausrottung, Gefährdung, Florenveränderungen

a) Ausrottung und Gefährdung

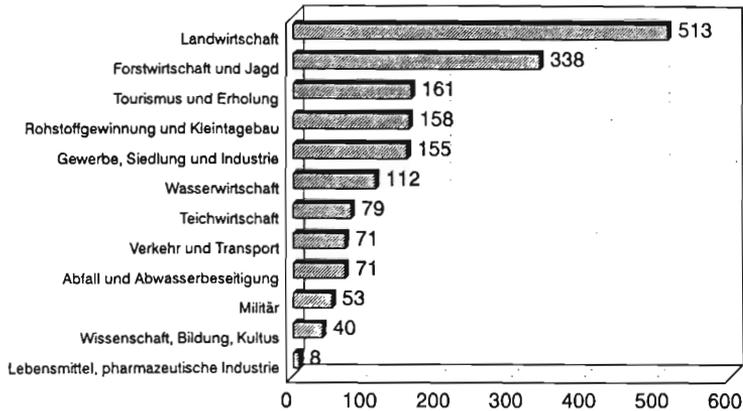
In der Bundesrepublik Deutschland kamen nach derzeitigem Kenntnisstand vor etwa 100 Jahren 3548 Farn- und Blütenpflanzen-Arten (Sippen) vor. Der Anteil der gefährdeten Arten (Sippen) liegt für die BRD (alt) bei 30 %, für die ehemalige DDR bei 33 % (FINK u. a. 1992, siehe auch BLAB u. a. 1984). KORNECK & SUKOPP (1988) kennzeichnen die Verursacher und die Ursachen für den Rückgang der Farn- und Blütenpflanzen der Bundesrepublik Deutschland (siehe *Abb. 20*).

Von den einschließlich der Niederen Pflanzen insgesamt etwa 27.000 in der Bundesrepublik vorkommenden Pflanzenarten sind rund ein Drittel in Roten Listen erfaßt (BUNDESUMWELTMINISTERIUM 1995).

b) Florenveränderungen

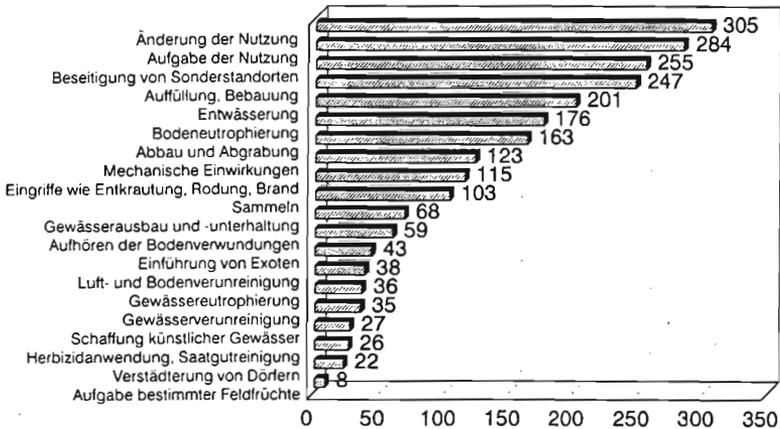
Der Mensch hat u. a. auch durch künstliche (zum Teil absichtliche, zum Teil unabsichtliche) Einbringung nicht einheimischer Pflanzenarten die Zusammensetzung der Vegetation in einzelnen Ländern erheblich verändert. Nach MOORE (1983) kommen auf Neuseeland etwa 1200 einheimische und allein 1700 fremde Pflanzenarten vor. Sieht man von der Einbringung zahlreicher Nutzpflanzen ab, die nachweislich für den Menschen erhebliche Vorteile erbracht haben, gibt es doch auch zahlreiche Beispiele für negative Auswirkungen. Eine ernste ökologische Gefahr stellen unter anderem zahlreiche phytopathogene Arten, z. B. Pilze, dar: Durch Einschleppung des

Verursacher des Rückgangs von Farn- /Blütenpflanzen



geordnet nach Zahl der Arten der Roten Liste (Mehrfachnennungen möglich)

Ursachen des Rückgangs von Farn- /Blütenpflanzen



geordnet nach Zahl der Arten der Roten Liste (Mehrfachnennungen möglich)

Abb. 20: Verursacher und Ursachen für den Artenrückgang von Pflanzenarten der BRD (in Anlehnung an KORNECK & SUKOPP (1988).

Pilzes *Ceratocystis ulmi* starben in vielen Ländern Ulmen ab, die Amerikanische Kastanie (*Castanea dentata*) wurde in ihrem natürlichen Verbreitungsgebiet durch Einschleppung des Kastanien-Mehltaus (*Cryphonectra* = *Endothia parasitica*) innerhalb von 50 Jahren in Amerika fast ausgerottet, die großen Jarrah-Wälder Westaustraliens (*Eucalyptus marginalis*) durch den Wurzelpilz *Phytophthora cinnamoni* befallen und erheblich dezimiert (VON BROEMBSSEN 1989).

Viele nicht einheimische Pflanzen vermehren sich explosionsartig und richten dabei großen Schaden an. Der aus Europa stammende Tüpfel-Hartheu (*Hypericum perforatum*) wurde um 1900 in Nordamerika eingeschleppt und bedeckte bereits 1944 ein Areal von 8000 km². Der ihm eigene Pflanzenstoff Hypericin führte zu Krankheiten des Viehs, so daß erhebliche Anstrengungen unternommen werden mußten, diese Pflanze wieder zu eliminieren. Eine Reduzierung um 95 % gelang erst durch zwei an *Hypericum* fressende Blattkäfer (*Chrysolina quadrigena* und *Ch. hypericaria*). Ein anderes Beispiel ist die Einführung des Feigenkaktus (*Opuntia ficus-indica*) in Australien, der in seiner explosionsartigen Ausbreitung erst durch den aus Argentinien eingebrachten Nachtfalter *Cactoblastis* auf biologische Art aufgehalten und wieder reduziert werden konnte.

Die Einfuhr von Schwimmpflanzen hat zum Teil zu gravierenden Auswirkungen besonders in künstlichen Gewässern (z. B. Stauseen) geführt: Beispiele sind der Kariba-Stausee am Sambesi in Zentralafrika, der Nil und Kongo (Einschleppung des südamerikanischen Schwimmpfarns, *Salvinia molesta*-Gruppe, der Wasserhyazinthe, *Eichhornia crassipes*, und der Muschelblume, *Pistia stratiotes*). In zahlreichen nordamerikanischen Seen kam es zur explosionsartigen Vermehrung des eurasischen Tausendblatts (*Myriophyllum*). Solche Pflanzen ("aquatic weeds") behindern die Schifffahrt sowie die Stromerzeugung (Verstopfung der Turbinen u. a.) und erhöhen die Wasserabgabe durch Transpiration.⁵⁹

⁵⁹ Beispiele für unvorhergesehene Folgen der Einführung von Pflanzen siehe KOWARIK & SUKOPP (1986).

4.3. Tierarten: Ausrottung, Gefährdung, Bejagung, Faunenveränderungen

a) Ausrottung

Mit Ausnahme von Afrika verschwand auf allen anderen Kontinenten mit dem Eintreffen des Menschen die dort heimische Großtierfauna:⁶⁰ im Pleistozän und Postglazial in Eurasien starben u. a. aus: Mammut (*Mammuthus primigenius*), Wollnashorn (*Coelodonta antiquitatis*), Riesenhirsch (*Megaloceros giganteus*), Höhlenbär (*Ursus spelaeus*), in Amerika Riesengürteltier (*Glyptodon spp.*), Riesenfaultier (*Megatherium spp.*), Pferd (*Equus occidentalis*). Es gibt Gründe, das Aussterben dieser Arten auch auf menschliche Einflüsse zurückzuführen (siehe S. 15).

Einige chronologisch aufgelistete Beispiele belegen stellvertretend irreversible Verluste, die auf Ausrottung durch den Menschen beruhen: Bereits um 3000 v. Chr. wurde als erstes afrikanisches Großtier eine Wildeselart aus dem Atlas-Gebirge ausgerottet, später der Nordafrikanische Elefant. Um das Jahr 1000 lebten auf Neuseeland flugunfähige Großvögel, die Moas, mit 13 Arten, auf Madagaskar sogar bis ins 15. Jahrhundert mehrere Rießenstrauß-Arten (*Aepyornis spp.*) und 14 Riesenlemuren-Arten (DEWAR 1984).

Seit 1600 sind nach ZISWILER (1965) und HONEGGER (1980) allein über 200 Vogel- und Säugetier-Taxa sowie mindestens 28 Reptilien- und 2 Amphibien-Taxa ausgerottet worden, darunter folgende besonders bekannte Arten, von denen sogar das genaue Jahr ihres Auslöschens bekannt ist (zur Ausrottungsgeschichte einzelner Arten siehe AKIMUSCHKIN 1969, ferner siehe auch z. B. DIAMOND 1982 und LUTHER 1986):

1627 der Ur (*Bos primigenius*) in Europa,

1681 die flugunfähigen Vogelarten Dodo (*Raphus cucullatus*) auf Mauritius, Einsiedler (*Pezophaps solitaria*) auf Rodriguez und der Solitär (*Raphus solitarius*) auf Réunion,

1768 die Stellers Seekuh (*Rhytina = Hydrodamalis gigas*) im Beringmeer,

1844 der Riesenalk (*Alca impennis*) auf der Insel Eldey (Island),

⁶⁰ Nur Afrika blieb ausgespart, wahrscheinlich war der dortige Parasitenkomplex lange Zeit mächtig genug, den Menschen in seiner Populationsgröße zu begrenzen.

1878 das Quagga (*Equus quagga*) im Kapland,
1910 der Pyrenäen-Steinbock (*Capra pyrenaica pyrenaica*),
1914 die Wandertaube (*Ectopistes migratorius*) in Nordamerika,
1979 der Tarpan (Waldwildpferd) in Südrubland.

Im 19. Jahrhundert wurden u. a. ausgerottet der Atlasbär (*Ursus crowtheri*), der Blaubock (*Hippotrogus heucophaeus*), im 20. Jahrhundert der Beutelwolf (*Thylacinus cynocephalus*), der Japanische Wolf (*Canis hodophilax*). Besonders gefährdet waren und sind bestimmte geographische Rassen einzelner Arten (HEDIGER 1968): unter den Flußpferden (*Hippopotamus amphibius*) sind bereits die Nil-Rasse und die Kap-Rasse ausgerottet, gleiches gilt unter den Löwen für die beiden Rassen Berber-Löwe (ausgestorben in freier Wildbahn in den 20er Jahren) und Kap-Löwe (ausgestorben 1865).

Viele Arten sind durch intensive Bejagung besonders verfolgt worden, ein Beispiel hierfür ist der Nordamerikanische Bison (*Bison bison*). Vor Beginn der europäischen Kolonisation gab es trotz Nutzung der indianischen Bevölkerung etwa 60 Millionen Tiere, 1877 durch massiven Abschluß durch weiße Siedler nur noch 100.000 Tiere; 1889 waren die Südherden ausgerottet, 1899 gab es nur noch 1000 Tiere im Yellowstone-Gebiet; 1890 nur noch wenige Duzend (ZISWILER 1965).

In der Bundesrepublik Deutschland kommen etwa 45.000-50.000 Tierarten vor, allein ein Viertel wird in Roten Listen geführt. Unter den Wirbeltieren ist rund die Hälfte in ihrem Fortbestand hochgradig gefährdet. In manchen Tiergruppen sind bereits bis zu 10 % der bei uns vorkommenden Arten ausgestorben oder verschollen (BUNDESUMWELTMINISTERIUM 1995). Die *Abbildung 21* stellt die Gesamtartenzahl und Anteil der gefährdeten Taxa der Fauna der Bundesrepublik Deutschland (nach BLAB u. a. 1984) dar.

b) Faunenveränderungen

Eine erhebliche Gefahr für die einheimische Fauna der Inseln bestand und besteht immer noch durch die Einfuhr nicht einheimischer Tierarten (Beispiele: Kaninchen auf Hawaii, siehe STODDART 1968, Schweine auf

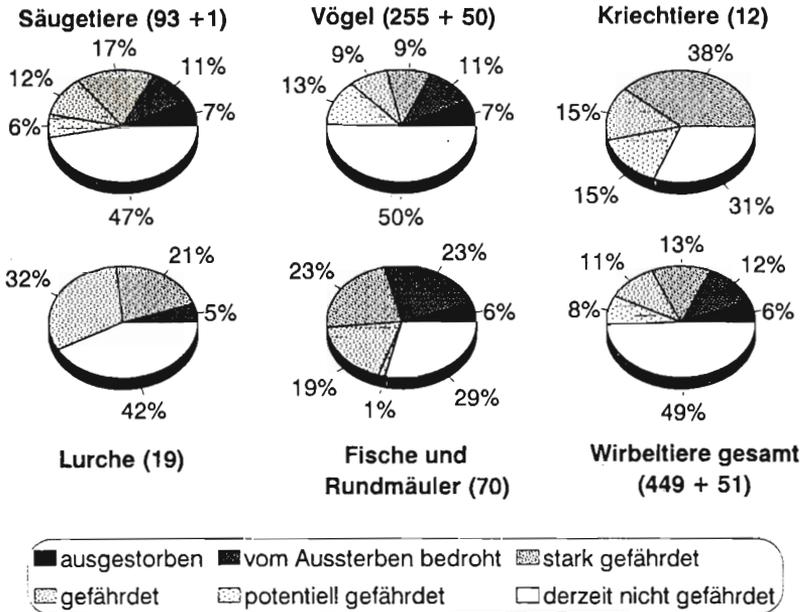


Abb. 21: Gesamtartenzahl und Anteil der gefährdeten Taxa der Fauna der Bundesrepublik Deutschland (nach BLAB u. a. 1984).

vielen pazifischen Inseln). Inselfaunen sind besonders bedroht durch Einschleppung von Ziegen, Ratten und Katzen (STODDARD 1968, SITTEWELL 1983). Besonders folgenschwer war z. B. die Einführung des Mungos (1872) auf Jamaica,⁶¹ der dort nahezu die gesamte einheimische Säugetier-Fauna, aber auch einige Reptilien- und Vogelarten ausrottete (MILNE & MILNE 1965). Dies führte zu einem vermehrten Insekten- und dabei insbesondere Mücken-Aufkommen, wodurch die Malariagefahr sich erheblich vergrößerte.

Aber nicht nur einzelne Inseln, sondern auch ganze Kontinente sind von der Einführung einzelner Arten betroffen (z. B. Kaninchen und Dingo in Australien).

⁶¹ Zweck der Ansiedlung des Mungos war die Bekämpfung der Ratten, die in den Zuckerrohr-Plantagen sehr großen Schaden anrichteten.

Ein Artenrückgang kann auch durch folgende Umstände herbeigeführt werden:

- Öffnung von Kanalverbindungen zwischen verschiedenen Meeren und Änderung der Konkurrenzverhältnisse durch Faunenaustausch (z. B. Suez-Kanal)
- Epidemieartige Ausbreitung der aus Afrika nach Brasilien eingeführten Honigbiene *Apis mellifera adamsonii* (Ausbreitung pro Jahr 300-500 km); bereits jetzt schon hat diese Art Texas erreicht.

c) Ausbeutung der Meere

Jährlich werden 70 Millionen Tonnen Meerestiere weltweit gefangen. Besonders große Fisch- und Walfangflotten besitzen die Europäische Union, Rußland, Taiwan, Japan und die USA. 1989 wurde der Höhepunkt der Fangrate erreicht, in den letzten Jahren sind die Erträge aufgrund der Überfischung stark zurückgegangen, zum Teil trat sogar der Zusammenbruch einzelner Fischbestände ein (Bereiche um Grönland und Neufundland),⁶² siehe dazu BML (1995). Rückläufig sind auch die Fänge von Sardinen und Heringen (PLACHTER 1991).

Nach EHRlich u. a. (1977) kam es bei den Walbeständen im Laufe der letzten 50 Jahre durch unkontrollierte Jagd zu einer Halbierung. Anfang der 60er Jahre lag die jährliche Fangzahl für Wale bei 60.000-70.000 Tieren (PLACHTER 1991). Unter den verschiedenen Walarten ist der Blauwal am stärksten betroffen (Rückgang auf 6 % des natürlichen Bestandes) sowie der Buckelwal (auf 14 %); siehe KAISER (1980).

4.4. Ökosysteme: Zerstörung und Gefährdung

Weltweit besonders gefährdet sind zahlreiche Großlebensräume, darunter vor allem die "Tropischen Regenwälder", bestimmte marine Ökosysteme, Meeresinseln, Hochgebirgsregionen, arktische und subarktische Lebensräume, Savannen, Steppen und Halbwüsten, große Flußsysteme, Mangro-

⁶² Der Zusammenbruch der Kabeljaufischerei führte zu einem Verlust von etwa 20.000 Arbeitsplätzen.

ven und viele Seen (siehe ausführlich bei PLACHTER 1991).⁶³ Von diesen verschiedenen Lebensräumen seien im folgenden nur die Ökosysteme der Wälder angesprochen, da hier die menschlichen Eingriffe besonders gravierend sind.

Rodungen sind nachweislich seit dem Neo- und Mesolithikum bekannt. Die Halbinsel Attika war bereits 500 v. Chr. entwaldet. Die große Rodungsperiode liegt in vielen Gebieten Mittel- und Westeuropas nach DARBY (1956) etwa zwischen 1050-1200. Im 18. Jahrhundert betrug der Waldanteil unter 15 %, heute hat er sich zumeist wieder verdoppelt. England und Irland hatten im 17. Jahrhundert kaum noch Waldreserven. Was in Europa 2000 Jahre dauerte, wurde in Amerika in 200 Jahren erreicht (Reduktion von 170 Millionen Hektar Wald auf 10 Millionen); siehe WILLIAMS (1989). Man nimmt an, daß bereits vor Ankunft der Europäer in Afrika der "Tropische Regenwald" um 20-30 % dezimiert war (WALLETSCHKE & GRAW 1992). Auch die Indianer in Nordamerika hatten zur Waldvernichtung durch Brand beigetragen. Ziel war es, die Prärien zu vergrößern, um dem Bison mehr Weideland zu verschaffen.

Besonders hohe Verluste von Waldgebieten sind in den Bereichen der gemäßigten Breiten zu verzeichnen (32-35 %), gefolgt von den Subtropen (24-25 %); siehe GOUDIE (1994). RICHARDS (1991) schätzt, daß seit 1700 weltweit etwa 19 % der Wälder vernichtet wurden, im gleichen Zeitraum dehnte sich die landwirtschaftliche Nutzfläche um das 4fache aus.

Eines der dringendsten Umweltprobleme ist die Zerstörung des "Tropischen Regenwaldes" (WHITMORE 1993), einem wesentlichen Element der "irdischen Klimaanlage". Bis zum Jahr 1980 war nahezu die Hälfte der Waldbestände des Tropengürtels der Erde bereits vernichtet (siehe auch HARTENSTEIN 1991). Insgesamt dürften noch etwa 18 Millionen km² Wald die Landoberfläche der Erde bedecken. Nach Angaben der FAO lag 1990 der Anteil der globalen Waldvernichtung in 62 Ländern allein bei 16,8 Millionen Hektar, davon entfielen 78 % auf Tropenwaldgebiete (LANLY u. a. 1991). Vor dem menschlichen Einfluß bedeckten die tropischen Wälder etwa 15-16 Millionen km², heute sind es nur noch 8,6 Millionen. Jährlich werden 245.000 km² Tropenwald ausgelöscht (WALLETSCHKE & GRAW 1992).

⁶³ Den Rückgang vieler für Flora und Fauna wichtiger Lebensräume dokumentieren inzwischen auch sogenannte "Rote Listen von Biotopen"; eine solche wurde für die Bundesrepublik Deutschland inzwischen erstellt (RIECKEN, RIESS & SSYMANK 1994).

SCHEK & GRAW 1992), dabei im Bereich geschlossener Primärwälder oder "Quasi-Primärwälder" 142.000 km². Allein in den achtziger Jahren nahm nach MYERS (1992) die Abholzungsrate in den tropischen Ländern um 89 % zu. Pro Minute "frißt sich" nach Angaben der FAO die Fläche von 20 Fußballfeldern in den Regenwald der Tropen (WEGENER 1980).

Die Ursachen der Waldvernichtung werden bei GRAINGER (1993) ausführlich diskutiert. Eindeutig ist der Rückgang von Regenwald zugunsten von Weide- und Ackerland feststellbar. Für Holzexporte werden pro Jahr 10.000-27.000 km² Wald in Südostasien, 8.000-25.000 km² in Lateinamerika und 32.000 km² in Afrika geschlagen. Zur Erzeugung von Weideland werden jährlich in Brasilien 100.000 km² Wald durch Brandrodung vernichtet.

Die Folgen der Vernichtung "Tropischer Regenwälder" sind erheblich (siehe auch REPETTO 1990, AMELUNG & DIERL 1992). Die Zerstörung führt dabei neben dem immensen Verlust an biologischer Vielfalt zu erheblichen lokalen und regionalen (Bodenvernichtung, Veränderung der Abschlußregime, Windfluß auf das Lokalklima) und zunehmend aber auch globalen Phänomenen (Reduktion der Kohlenstoffspeicherung, Zunahme atmosphärischen CO₂, Makroklima-Veränderungen). Am schlimmsten erweisen sich Brandrodung und Wanderfeldbau in den Tropen. Nach SHUKLA u. a. (1990) treten durch die Zerstörung des "Tropischen Regenwaldes" folgende Klimaveränderungen ein:

- Anstieg der Oberflächentemperatur,
- Anstieg der Temperatur tieferer Bodenschichten,
- Abnahme der jährlichen Niederschlagsmenge,
- Abnahme der jährlichen Evapotranspiration (Verdunstung lebender und toter Systeme).

Alle diese Veränderungen sind irreversibel, da sich Primärwälder nicht regenerieren lassen. Unter den Gesichtspunkten Artenschutz, Nährstoffkreislauf, "Bollwerke" vor tropischen Stürmen, haben auch die Mangrove-Wälder der tropisch-subtropischen Küsten eine große Bedeutung (MERCER & HAMILTON 1984).

Viele Wälder wurden im Gebiet des Amazonasbeckens abgeholzt, um für einige wenige Jahre Landwirtschaft betreiben zu können. Grund waren die guten Böden, die für eine Landwirtschaft zumindest für einen bestimmten Zeitraum günstig erschienen. Häufig wurden Waldrodungen auch in Zu-

sammenhang mit der Gewinnung von Bodenschätzen vollzogen (u. a. Abbau von Gold, Zinn, Eisenerz, Öl) und dem Bau von Wasserkraftanlagen. Parallel hierzu erfolgte ein intensiver Ausbau des Straßennetzes, der eine weitere Abholzung von Waldflächen vorantrieb. Hinzu kam die Förderung der Besiedlung dieses Gebietes durch die brasilianische Regierung, zum Teil auch mit Unterstützung durch Entwicklungshilfe-Programme. Nach Satellitenbeobachtungen ist davon auszugehen, daß allein im Jahr 1990 etwa 135.000 km² Wald im Amazonasgebiet gerodet wurden. Insgesamt vernichtete man im Amazonasgebiet in den letzten Jahren etwa 400.000 km² Wald.

Ein besonders starker Rückgang von Regenwäldern ist in Thailand und auf Borneo zu verzeichnen. 1982 und 1983 wurden allein auf Borneo 3,5 Millionen Hektar Landfläche durch Feuer geschädigt. Bei 800.000 Hektar handelte es sich dabei um Tiefland-Regenwälder. Malaysia hat während der 80er Jahre durchschnittlich pro Jahr 255.000 Hektar Waldfläche abgeholzt, das ist 1,2 % seiner gesamten Waldfläche.⁶⁴ In Thailand, Sri Lanka und Nepal waren die Verluste an Primärwald noch erheblicher. Bangladesch ist nur noch zu 6 % bewaldet, Thailand muß heute Holz sogar importieren. Die ehemaligen Waldstandorte sind jetzt mit Kautschuk-, Ölpalmen- und Kakaoplantagen bestockt.

Auf Madagaskar wurde während der letzten Jahrzehnte allein 80 % der gesamten Waldfläche zur Gewinnung von Nutz- und Brennholz, Weide- und Ackerland geopfert; die Flußmündungen sind aufgrund der starken Bodenerosion, die auf die Waldrodung folgte, durch die Sedimente rot gefärbt. An der Elfenbeinküste und in Ghana ist fast der ganze Wald verschwunden (RIETBERGEN 1989).

In Kanada und in den Waldgebieten der heutigen GUS-Länder kam es in der Vergangenheit zu großflächigen Kahlschlägen, eine Wiederaufforstung erfolgte dabei nur in den seltensten Fällen. In Ontario wurden pro Jahr 1900 km² Wald geschlagen, weitere 3000 km² waren durch Feuer oder Insektenbefall geschädigt.

Die globalen Auswirkungen solcher Eingriffe sind beträchtlich, da z. B. die Böden des borealen Nadelwaldes zu einer der wichtigsten Methanquellen

⁶⁴ Malaysia ist mit Abstand der größte Exporteur tropischen Rundholzes auf der Welt. Im Jahr 1989 wurden allein 21,3 Millionen Kubikmeter Holz exportiert; siehe dazu VORHOLZ 1993.

zählen.⁶⁵ Die Methan-Emission wird durch Veränderung des Grundwasserregimes, durch wahlloses Abholzen und Liegenlassen der Pflanzenmasse gesteigert. NISBET (1994) kommt zu dem Schluß, daß sich mit Sicherheit die Entwaldung Kanadas auch auf den Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre und auf die Albedo ausgewirkt hat. Solche Veränderungen, wie sie in Kanada erfolgten, haben nicht mehr nur regionale, sondern globale Auswirkungen. Ähnlich wie in Kanada ist die Situation in den heutigen GUS-Staaten. Durch Einführung der Planwirtschaft der Sowjets im Jahr 1928 kam es zu großflächigen Abholzungen ohne Wiederaufforstungen. Man geht davon aus, daß die Gesamtfläche des gerodeten und nicht (oder nur unzulänglich) wiederaufgeforsteten Waldes für Kanada und die ehemalige Sowjetunion mindestens 160 Millionen Hektar beträgt. Dies entspräche der Hälfte der geschlossenen Waldfläche Brasiliens. Durch die Abholzungen im Bereich des borealen Nadelwaldes kommt es darüber hinaus zu erheblichen standörtlichen Veränderungen, die einer natürlichen Regeneration entgegenwirken (SHUGART & BONAN 1992). Dringend notwendig wäre die Verabschiedung internationaler Konventionen zum Schutz von Wäldern.

Das biologische Erbe des Menschen: ein Hindernis?

1. Der Mensch und seine "genetische Zwangsjacke"

Wenn der Mensch in so vielen Dingen heute gegen die ihn umgebende Natur und damit "unlogisch und unsinnig" handelt, so muß gefragt werden, ob genetische Prädispositionen, d. h. massive biologische Wurzeln, die Ursache hierfür sein können (WALLETSCHKE & GRAWE 1992), dann aber auch, ob es Möglichkeiten gibt, diese Anlagen zu "überwinden". Auch VON DITFURTH (1987) weist darauf hin, daß eine der wichtigsten Voraussetzungen für eine erfolgreiche Erziehung zu einem ökologischen Bewußtsein die Aufklärung über genetisch bedingte Verhaltensdispositionen darstellt. Der Mensch ist, wie jedes Lebewesen, in seinen morphologischen, physiologischen, ethologischen (verhaltensbiologischen) Eigenschaften, mit seinen körperlichen aber insbesondere auch mit seinem gesamten Erkenntnisapparat innerhalb der Stammesgeschichte an eine spezifische

⁶⁵ Vgl. Kapitel "Die verschiedenen Treibhausgase", S. 32ff.

Umwelt adaptiert. Er verfügt über sogenannte "Leistungsadaptationen", die sich in einer spezifischen natürlichen Umwelt bewährt hatten, und die ein Höchstmaß an "Fitness" gewährleisteten. WALLETSCHKE & GRAW (1992) weisen darauf hin, daß die Mehrzahl der praktizierten Verhaltensmuster des Menschen noch sehr altertümliche Züge zeigt. Im Grunde sind es die Anpassungen des Paläolithikers: So hat der Mensch Adaptationen an den Bereich der mittleren Größenordnungen von Raum, Zeit und Geschwindigkeit (VERBEEK 1994). Nach MOHR (1983) können wir uns z. B. die Folgen exponentiellen Wachstums gar nicht vorstellen. Auch MARKL (1980) stellt fest:

"Die Pseudospezies menschlicher Kulturen, ihre Ideologien, ihre Wirtschaftssysteme behandelten sich bis in unsere Tage nicht viel anders als produktionsmaximierende konkurrierende Biospezies."

Liegen also die tieferen Ursachen der Umweltzerstörung im evolutionsbiologisch bedingten Wesen des Menschen selbst?

Nur in der Kenntnis menschlicher Verhaltensdispositionen können wir Gefahren vermeiden und prospektiv sinnvoll handeln. Das Problem der Bewältigung des Gefahrenpotentials liegt in der ungeheuren Modifikabilität menschlichen Handelns. Auch diese "Variationsfähigkeit" hat eine genetische Basis; der Mensch konnte als biologisches Wesen in einer natürlichen Umwelt nur mit hoher Verhaltensplastizität reagieren, hohe Modifikabilität und hohe Intelligenz bedingen sich einander. Gerade heute aber scheint diese allzu große Plastizität einen Selektionsnachteil darzustellen.

Es ist ein Kennzeichen vieler Lebewesen, Fähigkeiten zu entwickeln, wie knappe Umweltgüter (Ressourcen) mit besonders großem Erfolg ausgebeutet werden können (MARKL 1986). Ressourcen-Differenzierung ist ein Prinzip der Evolution, und der Mensch hat dieses Prinzip besonders optimiert. Er wiederholt dabei, was einmal von Vorteil war; man bezeichnet diesen Vorgang in der Ethologie als "operante Konditionierung". Bemerkenswert ist, daß, solange es keine Alternative gibt, der Mensch auch bei geringer Belohnung an dem "bewährten" Prinzip zunächst festhält. Seine Hartnäckigkeit steigt sogar mit dem Rückgang des Erfolges.⁶⁶ Aus diesem

⁶⁶ Hierzu SIEFERLE (1993) über den Untergang der Maya-Kultur: "Es [das System] reagierte auf die sich abzeichnende Krise, indem es sein überkommenes Erfolgsmuster verschärft betrieb. In dem Maße, wie die Ressourcen knapper wurden, wurde der Bau von kultischen Monumenten hektisch gesteigert, vermutlich, weil dies die göttlichen Mächte versöhnen und die Macht der kulturellen Eliten vergrößern sollte. [...] im Jahre 889 wurde das letzte Monument gebaut."

Grund spielen auch Traditionen eine große Rolle, und werden lange beibehalten, auch wenn sie keinen Sinn mehr haben. Prospektives Handeln ist in dem im Menschen natürlich verankerten Verhaltensmuster "unerwünscht".

GEHLEN (1961) geht davon aus, daß es dem Menschen wahrscheinlich angeboren ist, daß er Einfluß auf die Natur ausüben muß, sie lenken möchte zu seinem Vorteil; auch dies ist eine natürliche Überlebensstrategie. In dieser ureigenen Kraft sieht er den Antrieb des Menschen, sich mit Naturwissenschaft und Technik zu beschäftigen. Äußerungen wie "Wissen macht frei", "Wissen ist Macht" drücken diesen Zusammenhang auf eine andere Art und Weise aus.

2. Die Gefahr der Illusion

Der Mensch ist Optimist, Positivist und besonders häufig auch Illusionist; auch hier scheint sich unser Erbe "durchzupausen". Optimistische und positivistische Menschen sind die stabileren, auch wenn sich dahinter Realitätsferne verbirgt. Ethologisch gesehen, erfüllt eine optimistische Einstellung eher die biologischen Erfordernisse: größerer Lebenserfolg, höhere Reproduktionschance, höhere Fitness. Die adaptive Strategie des Menschen ist Optimismus in die Problemlösung und nicht die Einschätzung von Realitäten. Realisten sind eher depressiv (TAYLER & BROWN 1988). Optimisten "stecken an"; sie sind diejenigen, die mehr soziale Kontakte haben, sie sind aktiver, hilfsbereiter. Der Mensch hat immer Hoffnung, denn diese ist Kennzeichen von Überlebenswillen und damit eine "biologisch sinnvolle Adaptation". VERBEEK (1994) spricht von der "genetischen Verankerung der rosigen Zukunftsbrille". Illusion ist nichts anderes als "blinde Hoffnung", die Neigung zur simplifizierenden Wahrnehmung, zur positiven (Selbst-) Überschätzung. Auch heute spielen Illusionen eine große Rolle, der Ruf nach Innovationen, ein Ruf nach einer unbekanntem, dafür aber positiven Perspektive, Innovation als doch noch hoffentlich rechtzeitig zu erfindende "Geheimwaffe".

Der Mensch verfügt häufig über eine große Gelassenheit, wenn es um Schreckensmeldungen geht. So hat er sich z. B. mit der großen Zahl von Verkehrstoten pro Jahr abgefunden (von 1953-1986: eine halbe Million Verkehrstote in der Bundesrepublik Deutschland, 1970 allein 19.183 Tote, 55.100 Verletzte).

3. Zur Verantwortung

Psychologen stellten fest, daß die grundsätzlich im Einzelmenschen allgemein vorhandene Fähigkeit, verantwortlich und verantwortungsbewußt, aber auch mutig und selbstlos zu handeln, von der Zahl der unmittelbar Beteiligten abhängt. Sie nimmt in dem Maße ab, wie die Zahl der "Zeugen" zunimmt; man spricht von einer sogenannten "Verantwortungsdiffusion". Mit zunehmender Gruppengröße handeln immer weniger Menschen in Verantwortung (SCHWARTZ 1988). Eine besondere Eigenschaft des Menschen, aber auch anderer höherer Säugetiere, insbesondere Primaten, ist das Gruppendenken, die Einteilung in Freunde und Feinde (WILSON 1980). Innerhalb einer Gruppe bewährt sich sowohl für das Einzelindividuum als auch für die gesamte Gruppe eher konformistisches Verhalten, auch wenn dieses zunächst unsinnig erscheint. Hierzu gibt es besonders beeindruckende Experimente (MILGRAM 1986), die in der Zwischenzeit auch durch weitere Untersuchungen belegt werden (SHERIF 1953 in LINSENMAIR & MIKULA 1988).

"Eine Versuchsperson sollte dabei unter drei Linien diejenige herausuchen, die mit einer weiteren vorgegebenen die gleiche Länge hatte. Wenn andere – eingeweihte – Personen eine Linie von abweichender Länge als gleichlang diskutierten, schlossen sich die Versuchspersonen entgegen der Realität und gegen jeden Augenschein sehr oft dieser unsinnigen Meinung an und hielten dies übrigens noch ausdrücklich für ihre eigene Entscheidung."

Das Problem der Autoritätshörigkeit und Gefolgschaftstreue trifft auch für Prozesse der Umweltzerstörung zu. Soziales Verhalten, im Sinne von gruppenkonformistischem Verhalten, ist genetisch gesteuert. VERBEEK (1994) verweist auf neuere Befunde, die nahelegen, daß sozial akzeptiertes Verhalten physiologisch durch Endorphinausschüttung belohnt wird. Hierbei handelt es sich um Stoffe, die man auch als "körpereigenes Morphinium" bezeichnen könnte.

Ein weiteres Problem ist das des wahrnehmbaren Reichtums und des nichtwahrnehmbaren Risikos (BECK 1986). Nach VERBEEK (1994) muß es Mechanismen im Steuersystem des Menschen oder im Rahmen seiner kulturellen Entwicklung geben, die ihn daran geradezu hindern, trotz offensichtlich hoher Intelligenz, sein Verhalten zum nachhaltigen Nutzen des Lebens insbesondere auch seiner Art einzusetzen. Er ist nur auf kleine Populationsgrößen und kurze Zeiträume adaptiert und auf ein darauf

bezogenes kollektives Verhalten, das in einer kollektiven Zerstörung münden kann. Der Mensch ist in der Stammesgeschichte nicht auf einen Weltbürger hin selektiert worden, sondern auf eine bestimmte Gruppengröße. Ein Problem liegt auch in seinem Egoismus; Streben und Prestigegewinn scheint angeboren (VERBEEK 1994).

Menschen akzeptieren Risiken, besonders die, die sie selbst freiwillig eingegangen sind (SLOVIC 1987). Damit einher geht ein hohes Maß an Selbstüberschätzung. Mut einzelner Gruppenmitglieder war sicherlich unter natürlichen Bedingungen (ohne das technische Zerstörungspotential) ein für die Einzelgruppe hoher Überlebensvorteil, Mut der in Einzelfällen "altruistischen Prinzipien" folgt. Heute kann dieses mutige Verhalten innerhalb der jetzigen Möglichkeiten menschlichen Handelns hoch gefährlich sein.

Das Streben nach einem anthropozentrischen Weltbild hat die Umweltzerstörung bewirkt, die Probleme wurden durch den Mensch selbst geschaffen. Eine wenig ermutigende Perspektive eröffnet VERBEEK (1994):

"Es wäre in der Tat alles gut, wenn jeder die umweltethischen Forderungen erfüllen würde. Wenn alle anderen auch gut wären, dann wäre das auf die Dauer für uns alle am besten. Da sie es aber nicht sind, geht der Gute bankrott, dem Umweltschädiger geht es gut – eine Zeit lang, aber schließlich geht alles mehr oder weniger zugrunde."

4. Der Mensch als Jäger und Sammler der Neuzeit: Konsumterrorismus

Der Mensch hat auch in der heutigen Zeit seine Jäger- und Sammler-Phase kulturell noch nicht überwunden. So scheint er ein grenzenloses Konsumbedürfnis zu besitzen, ein "Homo consumens" zu sein (SCHMIDBAUER 1972). "Man kauft sich Dinge, die man nicht braucht, mit dem Geld, das man nicht hat, um den Leuten zu imponieren, die man nicht mag" (VERBEEK 1994). Somit wäre eine weitere biologisch angeborene Komponente, das "Imponiergehabe", Auslöser. In welchem Umfang sich die Werbebranche auf das angeborene Verhalten des Menschen und seine Psyche konzentriert, schildert eindrucksvoll PACKARD (1974).

Für das Wirtschaftswachstum ist es positiv, wenn möglichst viel konsumiert wird, denn dann kann auch kräftig produziert werden. Auch dieses Verhalten ist ein "biologisches Erbe des Menschen", denn unter natür-

lichen Bedingungen einer biologischen Evolution werden Grenzen von "außen" (über Selektion) und nicht von "innen" (durch Selbsterkenntnis) gesetzt.

In direktem Zusammenhang stehen Konsumverhalten einerseits, Arbeitsplätze andererseits, denn – so ist die allgemeine Auffassung – nur ein gesteigerter Konsum schafft Arbeitsplätze. In vielen bekannten Fällen wird der Erhaltung von Arbeitsplätzen eine höhere Priorität eingeräumt als der Erhaltung einer zukunftsfähigen Umwelt.

Das "Recht auf Arbeit" ist ein kulturell verbürgtes Grundrecht. Aber die Arbeit an sich darf auch nicht zur selbstzerstörerischen Kraft werden. So ist die Alternative entweder Arbeitsplätze oder Umweltschutz falsch. Menschliche Arbeit ist nötig und muß erhalten bleiben, um die Umwelt zu erhalten (BINSWANGER u. a. 1978). Arbeit, die umweltfeindlich ist, muß konvertiert werden.

5. Die moralische Überforderung des Individuums (GEHLEN 1961)

Viele Umweltveränderungen sind die Folge biologisch sinnvoller, aber unter der kulturellen Evolution nicht mehr angepaßter Verhaltensweisen. Da der Mensch sich aus den biologischen Regulationsmechanismen gelöst hat, können nun nur noch kulturelle Mechanismen greifen. Eine besondere Aufmerksamkeit für das Verständnis der Umweltkrise muß in Zukunft der menschlichen Psyche gewidmet werden (GEBHARD 1995), da der Zustand der äußeren Natur und der Zustand der inneren Natur (auch der menschlichen Gesundheit⁶⁷) miteinander koindizieren (GEBHARD 1995).

Das kulturelle Erbe und der Fortschritt: eine Chance?

1. Reduktion der Bevölkerungszahl, die Lösung des Nord-Süd-Konfliktes?

Eine Lösung vieler Probleme liegt längerfristig in der Reduzierung der globalen Bevölkerungszahl. Mittel zur Lösung des Bevölkerungsproblems über eine Geburtenreduzierung in den sogenannten Ländern der Dritten Welt können nur sein: Umverteilung von Finanzmitteln (Erhöhung der

⁶⁷ Siehe dazu auch THEML (1990) und GLAUBER & KORCZAK (1993).

Entwicklungshilfe), Wissenstransfer und Einsatz neuer umweltadäquater Technologien, gezielte Gesundheitsfürsorge, Schaffung von umfassenden Bildungseinrichtungen, ausreichende Altersversorgung, zukunftsfähige Sozialreformen, Einführung biologisch-ökologischer Landnutzungsformen.

Eine Milliarde Menschen leben in bitterer Armut. Sie müssen von weniger als einem Dollar pro Tag leben; das entspricht einem Lebensstandard, wie er bei uns in Westeuropa für große Teile der Bevölkerung vor 200 Jahren galt (THOMAS 1991). Umweltzerstörung, die ihre Ursache vor allem in der Armut und in der wachsenden Bevölkerung der Entwicklungsländer hat, ist eine zunehmende Gefahr. Es ist eine dringende Aufgabe, durch verstärkte Hilfe, Armut abzubauen; nur dann ist Umweltschutz global durchführbar. Dies würde globale Umschichtungen gewaltigen Ausmaßes bedeuten. Für die Mehrzahl der Menschen, die in den Tropen leben, sind die Möglichkeiten begrenzt; ihr Umweltverhalten wird im wesentlichen von der Armut diktiert.

Abkehr von der Armut führt zur Senkung der Geburtenrate, zu mehr Gesundheit, Bildung und zu einer vermehrten Alterssicherung. Das Recht auf Bildung (z. B. Schulpflicht) ist ein Grundrecht und das beste Mittel gegen die Bevölkerungsexplosion. Das Recht auf eine Altersversorgung (Rentensystem) innerhalb des Generationenvertrages ist ein weiteres Mittel, das Bevölkerungswachstum zu senken. Ein solches System fehlt in großen Teilen Afrikas oder Südamerikas. In einer hohen Nachkommenzahl wird in diesen Gebieten eine Alterssicherung gesehen. Von ganz besonderer Bedeutung ist die Gleichstellung von Mann und Frau.

Leider verwenden viele arme Länder ihr knappes Geld in zu großem Umfang für den Bereich der militärischen Rüstung. Dies ist unmoralisch, denn sie verweigern dadurch ihrer Bevölkerung eine Grundbildung. Ebenso unmoralisch aber auch kurzfristig ist es, wenn die reichen Länder die Bildung in den armen Ländern nicht massiv fördern. Darüber hinaus darf auch die Entwicklungshilfe nicht in die militärische Aufrüstung des jeweiligen Landes fließen, sondern allein in Bildung, Sozialeinrichtungen und Umweltschutz. Je geringer die Not und je höher der Bildungsgrad, desto mehr ist auch ein Einsatz für eine bessere Umwelt zu erwarten.⁶⁸

⁶⁸ Neben dem höheren Bildungsgrad fördert die Möglichkeit der Selbstbestimmung in besonderem Maße die Ausbildung postmaterielle Lebensstile; siehe dazu SCHERHORN (1993).

Die Entwicklung der Länder der sogenannten Dritten Welt geht einher mit der Zerstörung der Umwelt und der Lebensgrundlage der dortigen Bevölkerung. Diese Länder und ihre Bevölkerungen sind einer doppelten Belastung ausgesetzt: Produktionsstätte (häufig ohne adäquate Sicherheitsstandards⁶⁹) oder ausgebeutetes Land auf der einen Seite, Importeur von Abfallstoffen auf der anderen.

Es sollte möglich sein, den Ländern der sogenannten Dritten Welt die Rückzahlung eines Teiles ihrer Kreditschulden dann zu erlassen, wenn sie sich intensiver für Umweltschutzmaßnahmen (aber auch Bildungs- und Sozialeinrichtungen) einsetzen. Dazu brauchen sie aber auch eine finanzielle Unterstützung durch die reichen Nationen. Die Gesamtauslandsschulden der ärmeren Länder beliefen sich im Jahr 1990 auf über eine Billion Dollar, davon fallen auf Afrika 227 Milliarden Dollar, auf Brasilien, Mexiko und Argentinien zusammen etwa 200 Milliarden Dollar (NISBET 1994).⁷⁰ Die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (Brundtland-Kommission) machte zu Recht darauf aufmerksam, daß es durch den Schuldendienst der Entwicklungsländer zu einem beträchtlichen Nettokapitalfluß von den armen in die reichen Länder kommt.

2. Nutzung von Energieträgern

Auch in der Zukunft sind große Energiemengen nötig, um ein Überleben auf unserem Planeten zu gewährleisten. Unter den zur Verfügung stehenden Energieträgern belasten die Umwelt am meisten die Nutzung fossiler Energiequellen, Wasser- und Gezeitenkraft sowie die Biomasseverbrennung. Als zukunftsfähige alternative Energieträger kommen in Frage: Nutzung der solaren Energie und der Windenergie. Auf Grund des Betriebsrisikos und des Anfalls radioaktiven Materials ist die Kernenergie als zukünftiger Energieträger außerordentlich problematisch.

⁶⁹ Die Bhopal-Katastrophe vom 3.12.1984 ist ein typisches Beispiel für den gefährvollen Umgang mit Sicherheitsstandards: Diese Giftkatastrophe, bei der ein Tank mit Methylisocyanat (zur Herstellung von Pflanzenschutzmitteln) explodierte und dadurch Phosgen und Blausäure freigesetzt wurden, forderte 2.500-3.000 Tote. Allein 200.000 Menschen erkrankten. Es handelte sich hierbei um ein Werk der US-amerikanischen Konzerns Union Carbide. Ein weiteres Beispiel sind die erheblichen Belastungen vieler Entwicklungsländer mit Pflanzenschutzmitteln, die bei uns schon längst verboten sind: DDT, Aldrin, Dieldrin, Endrin u. a. (NISBET 1994).

⁷⁰ Siehe dazu auch EKD (1991).

a) Fossile Träger

Die Entstehungszeit der fossilen Energieträger wird mit etwa 350 Millionen Jahren veranschlagt (GLATZEL 1995). Demgegenüber ist der Zeitraum, in denen diese Reserven vom Menschen genutzt und verbraucht wurden, äußerst kurz, im Falle von Öl etwa 130 Jahre. Die Menschheit verbrennt derzeit in einem Jahr etwa so viele fossile Energieträger, wie in einer Million Jahre entstanden sind.

Öl ist die Hauptquelle für viele Schadstoffe (CO_2 , CO , NO_x , troposphärisches Ozon u. a.). Bei dem derzeitigen Verbrauch dürften die Reserven noch etwa 40 Jahre reichen; nimmt man noch unentdeckte Ölfelder hinzu, vielleicht 100 Jahre. Ähnliche Prognosen gelten auch für das Erdgas (siehe dazu ausführlich z. B. GLATZEL 1995). Erdgas und Erdöl reichen somit noch einige Jahrzehnte, Kohle sogar noch mehrere Jahrhunderte.⁷¹

Erdgas ist zwar günstiger, was die Anteile vieler Schadstoff-Emissionen betrifft (CO_2 , SO_2 , Methan, Radon), schafft aber große Probleme durch die Leckagen und die dadurch erfolgende Methan-Freisetzung. Wenn nicht etwas gegen den Methan-Verlust bei der Gewinnung und dem Transport von Erdgas unternommen wird, ist die Erdölnutzung unproblematischer als die Erdgasnutzung.

Eindeutig ist die Sachlage, daß die Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas in den nächsten Jahrzehnten drastisch reduziert werden muß. Der Verbrauch muß sich an der Aufnahmekapazität des CO_2 durch die Vegetation orientieren. Es darf nicht sein, daß die reichen Industrieländer durch ihre Abhängigkeit von fossilen Energieträgern die Atmosphäre der gesamten Erde zu ihrer "Müllkippe" machen. Besonders wichtig ist eine Reduzierung des Straßenverkehrs und neue Technologien, die den Verbrauch der Kraftfahrzeuge drosseln, aber auch gesetzlich verankerte verschärfte Standards. Wieso ist der geregelte 3-Wegekat nicht schon lange Pflicht, wieso werden die Katalysatoren nicht auf ihre gesamte Wirksamkeit überprüft (etwa hinsichtlich des Platin-Ausstoßes)? Ein gut funktionierender KAT reduziert die Stickoxide um 97 %, die Kohlenwasserstoffe um 90 %.

⁷¹ Während man in den siebziger Jahren angenommen hat, daß das global verfügbare begrenzte Angebot an fossilen Energiequellen eine Krise hervorrufen würde, ist man sich jetzt darüber einig, daß es nicht die Verknappung, sondern die von diesen fossilen Energieträgern ausgehenden Umweltschäden sein werden, die für den Menschen zum begrenzenden Faktor werden.

b) Wasser- und Gezeitenkraft

Wasser hat ohne Zweifel einen bedeutenden Anteil an der Stromerzeugung: in den USA 8 %, 60 % in Kanada, 100 % in Sambia, Paraguay und Norwegen. Wasserkraft stellt ein hohes verfügbares Potential dar. Man nimmt z. B. an, daß das ungenutzte Potential in Kanada sich auf etwa 140 Gigawatt beläuft, dies entspräche dem Energiegewinn von 120 Kernkraftwerken. In den USA könnte allein die Hälfte, in den GUS-Staaten der gesamte Energiebedarf durch Wasserkraft gedeckt werden.

Dennoch ist eine Energiegewinnung auf diese Weise mit großen Gefahren verbunden: Neben der Gefahr von Dammbrüchen, sei es natürlich oder bei kriegerischen Auseinandersetzungen, sind es vor allem die Veränderungen des Wasserhaushaltes in der Umgebung der aufgestauten Bereiche, die negative Auswirkungen haben. Eine große Gefahr geht auch durch die erhöhte Methanfreisetzung unter anaeroben Bedingungen aus, wenn größere vegetationsbestandene Gebiete unter Wasser gesetzt werden (Beispiel Quebec/Kanada: Hier wurden etwa 10.000 km² Wald ohne vorhergehende Rodung überflutet). In den Tropen entstehen große Probleme mit dem Pflanzenwuchs in den Stauseen, dadurch erhöht sich die Malaria- und Bilharziose-Gefahr.

Brasiliens Stadtbevölkerung verbraucht große Strommengen: Zu 93 % wird dieser aus Wasserkraft gewonnen. Die Wasserkraftanlagen haben mit zum Teil sehr flachen Stauseen große Bereiche Amazoniens überflutet. Abgesehen von einer Waldzerstörung sind diese Flächen erhebliche Quellen für Emissionen von Methan und CO₂.

Aber auch Gezeitenkraftwerke lösen das Problem nicht. Durch ihren Bau würden wertvolle Küsten-Ökosysteme zerstört, die direkten Folgen sind kaum abschätzbar; zudem sind sie nur lokal bei sehr hohem Tidenhub zu verwirklichen.

c) Biomasse

Biomasseverbrennung sowie Biogas-Erzeugung können bis zu einem bestimmten Prozentsatz zur Primärenergieversorgung herangezogen werden (für die Bundesrepublik Deutschland mit einem Anteil im Jahr 2005 zu 5-10 %) und gleichzeitig die CO₂-Emissionen senken (FLAIG & MOHR 1993). Jedoch muß gewährleistet sein, daß negative Beeinträchtigungen

durch die Freisetzung schädlicher Nebenprodukte nicht entstehen. In Anbetracht des weltweiten Bedarfs an Nahrungspflanzen ist ein Anbau von Pflanzen zur Energie- oder Brennstoffgewinnung nicht in allen Gebieten der Erde zu rechtfertigen. Energiegewinn aus Biomasse kann zum Teil sehr problematisch sein (ebenso aus Methanol), da Formaldehyd entsteht.

d) Sonnenenergie

Eine Nutzung der Sonnenenergie kann über eine solarthermische Stromerzeugung (Thermoöle, Solarteiche) und besonders über Solarzellen (Photovoltaik) erfolgen. Diese Energieform ist die für die Zukunft aussichtsreichste. Ein gezielter Ausbau sollte mit Nachdruck verfolgt werden.

e) Windenergie

Die Nutzung der Windenergie ist nur regional möglich und mit hohen Investitionen verbunden; nachteilig sind häufig landschaftsstörende Begleiterscheinungen. Auch gibt es negative Wirkungen z. B. auf Vogelschwärme. Das nutzbare Potential ist jedoch groß.

f) Geothermische Energie

Hierbei handelt es sich um eine zwar nicht erneuerbare, aber sehr lange nutzbare Energie. Nachteile bestehen durch bestimmte gasförmige und flüssige Emissionen (u. a. auch Radon). Diese Energieform steht nur in Vulkangebieten zur Verfügung (z. B. Kalifornien, Neuseeland, Island, Italien, Nicaragua, El Salvador).

g) Kernenergie

Mit der Kernenergie verbinden sich eine Vielzahl von Risiken, die Lösung des Abfall-Problems ist darüber hinaus offen. Dies demonstrieren besonders die drei größten Unfälle: 1957 Windscale (Sellafield), 1979 Three Mile Island (Harrisburg) und 1986 Tschernobyl (Ukraine). Nach NISBET (1994) wäre der Einstieg in die Kernenergie ein Lösungsweg bei der

Beherrschung der atmosphärischen Treibhausgefahr. Mit 20 Anlagen ließe sich in China die derzeit durch Kohle gewonnene Energie ersetzen. Die Risiken sind jedoch außerordentlich bedenklich.

3. Das Prinzip "Nachhaltigkeit"

3.1. Gerechtere Einkommensverteilung und Aufheben des Nord-Süd-Konfliktes

Eine wesentlich Voraussetzung für die Bewältigung der zukünftigen Probleme ist die Aufhebung des Nord-Süd-Konfliktes. Die Prognosen sehen düster aus, denn allein $\frac{1}{4}$ aller Entwicklungsländer zeigen eine erschreckend rückläufige Wirtschaftsentwicklung. Die Probleme in Lateinamerika und Schwarzafrika sind gewaltig, allein in Schwarzafrika verdoppelt sich derzeit die Bevölkerung alle 23 Jahre.

Abhilfe kann nur durch eine wesentliche Erhöhung der Entwicklungshilfe (mindestens 1 % des Bruttosozialproduktes) geschehen, wobei sich diese an einem gesamten Maßnahmenkatalog spezifischer direkter personeller und materieller Unterstützung orientieren muß, der Umweltschutz-Aufgaben eine Priorität einräumt. Die in der UN-Umweltkonferenz in Stockholm 1972 angestrebten 0,7 % reichen nicht aus, sie wären jedoch eine erhebliche Hilfe, wenn man bedenkt, daß die USA derzeit nur 0,19 %, die Bundesrepublik Deutschland 0,42 % ihres Bruttosozialproduktes für Entwicklungshilfe ausgeben. Dabei müßten jedoch große Teile der Entwicklungshilfe in die Bewahrung einer gesunden dortigen Umwelt investiert werden. Wichtig wären in diesem Zusammenhang vor allem standortsgemäße Wiederaufforstungsprogramme. Für die Entwicklungsländer ist die Erhöhung des dortigen Wohlstandes essentiell, vor allem die Besserstellung der Frau (Recht der Frauen auf Selbstbestimmung), bessere Bildungs- und Gesundheitsversorgung der gesamten Bevölkerung, Recht eines jeden auf die Ausübung eines Berufes und damit finanzielle Unabhängigkeit u. a. Es ist ethisch nicht vertretbar, die hohe Kindersterblichkeit als reduzierenden Wachstumsfaktor anzusehen. Das Gegenteil ist der Fall: Geringere Kindersterblichkeit aufgrund besserer medizinischer Versorgung führt zu höherer familiärer Sicherheit und in Verbindung mit prospektiver Geburtenkontrolle zu einem Rückgang der Kinderzahl pro Familie.

Aus all diesen Gründen muß ein Geldtransfer aus den reichen Kohlenstoff-emittierenden Staaten in die ärmeren vorwiegend im tropischen Bereich liegenden Staaten erfolgen. Derzeit findet ein hoher Geldtransfer in die Ölfördernden Länder statt, die Regenwald-Nationen haben dagegen allein 400 Milliarden Dollar Schulden.

Auf die industrialisierten, insbesondere die hochindustrialisierten Länder kommt in besonderem Umfang die Verantwortung für die Zukunft zu. Für diese Länder ist ein Wertewandel notwendig: Abbau übertriebener Ansprüche, Halten beziehungsweise Reduzieren der Lebensqualität, keine weitere Steigerung des Konsums, keine rücksichtslose und zukunftslose Steigerung des aktuellen Luxus. Dabei muß auch die "Arbeitskraft" als solche neu definiert werden (siehe dazu auch BIERTER & WINTERFELD 1993). So heißt es auch im Brundtland-Bericht:

"Die gegenwärtige Generation soll ihren Bedarf befriedigen, ohne die Fähigkeit künftiger Generationen zur Befriedigung ihres eigenen Bedarfs zu beeinträchtigen".

Eine solche "neue Genügsamkeit" könnte bereits viel bewirken.

Eine verstärkte Ökologie- und Umweltbildung muß natur- und gesellschaftspolitische sowie ethische Fragen miteinander verknüpfen (WEIGMANN, TROMMER & WEIGELT 1995, WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT der Bundesregierung "Globale Umweltveränderungen" 1996). Es ist kaum verständlich, daß in der heutigen Zeit in praktisch allen Schultypen "Umweltbildung" als Fach fehlt.

Umweltwissen verstärkt vorher gebildete Wertstrukturen, bildet sie selbst aber nicht aus (FIETKAU 1984). Deshalb ist der Ruf nach einer neuen "ökologischen Ethik" ("Umweltethik") mehr als berechtigt (ALTNER 1979, 1987, AUER 1984, BIRNBACHER 1979, 1986, HEDEWIG & STICHMANN 1988, IMMLER 1989, KATTMANN 1980, KLEBER 1993, MYNAREK 1986, SCHMACK 1982, STREY 1989, VOGEL 1988, ferner CALLIESS & LOB 1987/88). Wir verstehen unter einer neuen ökologischen Ethik eine Teildisziplin der normativen Ethik, die sich mit den Verhaltensnormen, Werten, Motivationen menschlichen Verhaltens gegenüber der natürlichen Umwelt befaßt. Sie ist nicht allein anthropozentrisch ausgerichtet, denn es gibt auch intrinsische Werte in der Natur (MEYER-ABICH 1984, 1990). Darüber hinaus finden sich auch Ansätze für eine christlich begründete, ökologisch orientierte Theologie (GEMEINSAME ERKLÄRUNG des Rates der

Evangelischen Kirche in Deutschland und der Deutschen Bischofskonferenz 1985, DOBMEIER 1988). Besonders deutlich stellt Albert SCHWEITZER die Ethik in ihrer Aufgabe zur Erhaltung des Lebens dar.⁷²

Der Gefahr eines "moralischen Rigorismus" sowie die der "ökologischen Indoktrinierung" muß jedoch mit Nachdruck entgegengewirkt werden (WEIGMANN, TROMMER & GEBHARD 1995). Wertvorstellungen können nicht verordnet werden, sondern sie müssen über individuelle Erfahrung erwachsen. Ein besonderes Problem liegt in der Trägheit bei der Umorientierung (FIETKAU 1984).

Es steht fest: ein weiteres exponentielles Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum verhindert eine zukunftsfähige und dauerhafte Entwicklung (MEADOWS u. a. 1974, MEADOWS u. a. 1992).

3.2. Gesunde Umwelt

Besonders dringend ist die sofortige Einleitung und kontrollierte Durchführung von greifenden Maßnahmen zur Reduktion der "Treibhaus"-Emissionen. Dabei sind kurzfristige von langfristigen Maßnahmen zu unterscheiden. Ausschlaggebend für Veränderungen ist der politische Wille; die wissenschaftlichen Grunddaten und Beweise liegen vor (FRESE 1994).

Gravierend wären:

- Änderungen der globalen Bewölkungsmuster,
- verstärkte Emission von Methan aus den Permafrostböden,
- Zusammenbruch der Hydroxyl-Konzentration,
- Veränderung der Meeres-Zirkulationen.

Zunächst gäbe es eine Fülle von Sofortmaßnahmen. Besonders die langlebigen Substanzen müssen aus dem Verkehr gezogen werden, so die Fluorchlorkohlenwasserstoffe. Methan ist kurzlebig, hier kann eine Maßnahme sofort greifen, viele andere Stoffe sind jedoch "Zeitbomben". Deshalb ist ein unbedingter und sofortiger Stop der Verwendung von FCKW durchzuführen.

⁷² Zu den Aufgaben einer dem Leben dienenden Ethik: "Also wage sie den Gedanken zu denken, daß die Hingebung nicht nur auf Menschen, sondern auch auf die Kreatur, ja überhaupt auf alles Leben, das in der Welt ist und in den Bereich des Menschen tritt, zu gehen habe. Sie erhebe sich zur Vorstellung, daß das Verhalten des Menschen zu den Menschen nur ein Ausdruck des Verhältnisses ist, in dem er zum Sein und zur Welt überhaupt steht"; SCHWEITZER (1947).

Eine erfolgreiche (nachhaltige) Weltwirtschaft ab 2030-2050 darf nicht mehr auf fossilen Energieträgern beruhen. Deshalb sollte bereits jetzt schon ein weitgehender Verzicht auf fossile Energieträger erfolgen, um eine weitere Steigerung des Gehaltes von CO_2 in der Atmosphäre zu verringern. Frei von "Treibhausgasen" sind nur Sonnenenergie, Wasserkraft und Kernenergie. Es wurde darauf hingewiesen, daß vor allem die Nutzung der Sonnenenergie eine biologisch und ökologisch umweltverträgliche Alternative darstellt. Keine Energiequelle ist nach den Hauptsätzen der Thermodynamik regenerierbar, auch Sonnenlicht nicht. Aber sie ist diejenige, die wahrscheinlich die geringsten Schäden produziert.⁷³ Am saubersten ist der Nichtverbrauch.

Der beste und effektivste Weg zur Senkung des Treibhauseffektes ist das Energiesparen, der schnellste Weg der Stop aller Treibhausgase (insbesondere der FCKW) und die Kontrolle des Methanausstoßes. Ohne die Ausschöpfung der Gesetzgebung, ohne internationale Abkommen und Handelssanktionen gegen Umweltzerstörer wird es nicht gehen. Ein wesentlicher Schritt muß die Verteuerung der Energie in den "Reichen Ländern", in den "Armen Ländern" eine Verbilligung sein.⁷⁴

Nullwachstum ist keine Alternative, denn dies würde bei Beibehaltung der heutigen Techniken bedeuten, daß es mit unverminderter Geschwindigkeit so weitergeht. Auch ein Nullwachstum führt zu einem weiteren jährlichen Ausstoß von 20 Milliarden Tonnen CO_2 , zu einer Steigerung des CO_2 -Gehaltes um 10 ppm alle 5-6 Jahre und zu einer Steigerung des Methan-Gehaltes um 1 % (=12-13 ppb).

Eine Senkung ist bei allen Treibhaus-Emissionen um mindestens die Hälfte notwendig. Dies erfordert drastische Maßnahmen, wobei in den Bereichen Verkehr und Industrie völlig neue Strategien entwickelt werden müssen ("Totalreformationen"), um eine positive Änderung zu bewirken. Konkret bedeutet dies global die Reduktion der Emission aller Treibhausgase bis 2005 um 20 %, im Falle von CO_2 eine jährliche Senkung um mindestens 2 Milliarden Tonnen.

⁷³ Zum Vergleich der Umweltbelastungen, die bei der Gewinnung, Umwandlung und Nutzung verschiedener Energieträger ausgehen, siehe GLATZEL (1995).

⁷⁴ "Ein US-Amerikaner verbraucht durchschnittlich soviel Primärenergie wie zwei Europäer, 20 Brasilianer, 60 Inder oder gar 900 Nepali", zitiert nach JISCHA (1993).

Eine Vermeidung von abwendbaren Belastungen muß nach Prioritäten erfolgen: Allein bei der Übertragung und Verteilung von Erdgas entstehen erhebliche Verluste, das ausfließende Methan steigert dabei den Treibhauseffekt, es ist 2-5 mal stärker als das CO₂, das bei der Verbrennung dieses Gases frei wird. Dringend wird ein weltweites Netz von Methan-Kontrollstationen benötigt. Im Augenblick sinken erstmals nach langer Zeit die Raten, wahrscheinlich aufgrund der Abnahme der GUS-Emissionen. Methan ist besonders gefährlich, da unter seiner Belastung das Hydroxyl-System, die Reinigungskraft unserer Atmosphäre, zusammenbrechen kann. Jede Tonne Methan, die aus einer Pipeline entweicht, hat dieselbe Treibhauswirkung wie 60 Tonnen CO₂ aus der Öl- bzw. Kohleverbrennung. Dringend notwendig ist ein dem Montrealer Protokoll vergleichbares Abkommen über die Emissionen von Methan aus fossilen Lagerstätten. Notwendig wäre eine Reduktion in 5 Jahren auf 10 Millionen Tonnen.

Wenn schon eine Nutzung von fossilen Trägern noch eine geraume Zeit in einer Übergangszeit erfolgen muß, dann ist die von Öl und Gas besser als die von Kohle, da eine Tonne Kohle die doppelte Treibhauswirkung von einer Tonne Öl bzw. Gas hat. Ein Vergleich der CO₂-Emissionen von Braunkohle, Steinkohle, Erdöl, Erdgas steht in einem Emissionsverhältnis zur Umwelt von 121:100:88:58. In den Preis für Kohlestrom muß neben vollständiger Rauchgasreinigung auch die Entfernung von CO₂ eingehen. Die Belastung der Umwelt durch Kohle ist derzeit noch ein eindeutig europäisches Problem, das sich bald nach Asien (China) verlagern wird. China hat 1993 allein 1100 Millionen Tonnen Kohle zum Verbrauch gefördert.

Auf Dauer muß es zu einer Abkehr vom Benzin- und Dieselmotor bzw. zur Begrenzung der Kfz-Dichte (einschließlich Tempolimit) kommen. Der Verkehr ist einer der Hauptverursacher von Umweltbelastungen (Luftschadstoffe, Flächenverbrauch, Biotopzerstörung).⁷⁵ Um die verkehrsbedingten Emissionen in Städten zu reduzieren, müssen Städte über Ab-

⁷⁵ Ein besonders großer Emittent ist der derzeit mit 7 % wachsende Weltflugverkehr. Allein beim Start und bei der Landung eines modernen Großraumflugzeuges werden im bodennahen und bodenferneren Bereich soviel Abgasmengen an Kohlenwasserstoffen, Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid und Stickoxid erzeugt wie bei einem Mittelklassen-Kfz in einem ganzen Jahr (HARBORTH 1991). Nach einer Studie des Heidelberger IFEU-Institutes für Energie- und Umweltforschung werden bei Reisen mit dem Flugzeug im Vergleich zum Auto pro Person und Kilometer 40 % mehr Kohlendioxid und 50 % mehr Stickoxide ausgestoßen. Noch schlechter schneidet das Flugzeug gegenüber Bus- und Bahnverkehr ab. Die Studie geht davon aus, daß die Kohlendioxid-Emissionen durch den Flugverkehr im Jahre 2010 um 50 % über denen des Jahres 1993 liegen.

und Umbaumaßnahmen völlig umgestaltet werden. Sie sind nach Kriterien der Kfz-Mobilität gebaut und werden dies nach wie vor. Energiesparen durch eine sinnvolle Umgestaltung der Städte (unter dem Motto: kleine Wege) wäre eine hervorragende Maßnahme zur Luftverbesserung.

Neben den Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Emissionen müssen die Bindungsmöglichkeiten für CO₂ vergrößert werden, dies kann nur durch die Erhaltung großer Waldgebiete sowie durch standortsgemäße und naturschutzverträgliche Wiederbewaldung erfolgen. Die Waldvernichtung muß gestoppt, die Landwirtschaft reformiert werden.

1995 war ein Jahr der Natur-Katastrophen, es ist zu befürchten, daß einige dieser Katastrophen bereits in Zusammenhang mit dem erfolgten Klimawandel und den immer stärker zunehmenden anthropogenen Umwelteinwirkungen stehen (WIJKMAN & TIMBERLAKE 1986).

Das Washingtoner Worldwatch-Institut hat im Mai 1996 seinen Bericht über den Zustand der Welt vorgelegt. Auch hier wird das Jahr 1995 als das Jahr der Naturkatastrophen bezeichnet. Die Entschädigungen, die Versicherungen infolge von Naturkatastrophen zahlen mußten, lagen bei 48 Milliarden Mark. Sie hatten sich damit im Vergleich zu den achtziger Jahren verdreifacht. Die Weltgetreideernte war seit 1988 die geringste, im Falle eines völligen Ernteausfalles würden die Reserven nur 48 Tage reichen.

3.3. Nachhaltige Entwicklung

Nachhaltige, dauerhafte und zukunftsfähige Entwicklung⁷⁶ kann nur als "ökologischer Imperativ" definiert werden in Anlehnung an KANTS "kategorischen Imperativ".⁷⁷ Dabei sind die Begriffe "nachhaltig, dauerhaft, zukunftsfähig" relative Begriffe (siehe auch RENN 1995). In diesem Sinne ist die Unterscheidung: erschöpfbare Ressource/erneuerbare Res-

⁷⁶ RENN (1994) weist zu Recht darauf hin, daß mit dem Begriff der "nachhaltigen Entwicklung" eine sehr aussagekräftige Wortkombination geglückt ist, da die beiden "Zukunftsaspekte", wirtschaftliche Weiterentwicklung und Vermeidung von Umweltbelastungen, in einem Begriff miteinander vereint sind. Eine Einführung in das Konzept des "Sustainable Development" gibt HARBORTH (1991). Vgl. auch EVANGELISCHE AKADEMIE BADEN (1996), Zukunft für die Erde, Bd. 1: Sustainable Development – was ist das?

⁷⁷ "Sustainable Development is the development which meets the needs of the present without comprising the ability of future generations to meet their own needs" (BRUNDTLAND COMMISSION 1987). World Commission on Environment and Development. Our Common Future, Oxford.

source (WALLETSCHKE & GRAW 1992) nicht absolut, besser wäre eine Unterscheidung in schnell erschöpfbare Ressource und weniger schnell erschöpfbare Ressource.

WICKE & BRUNOWSKY (1990) übersetzen den "kategorischen Imperativ" von KANT umweltethisch folgendermaßen:

"Handle so, daß bei der Herstellung der von Dir produzierten Güter die Umwelt nicht leidet, daß diese von Dir verkauften Güter während ihrer Nutzung der Umwelt nicht schaden und daß sie in ihrer Beseitigungsphase die Umwelt nicht mehr als vermeidbar belasten."

Knappe Ressourcen müssen in Zukunft viel schonender und effizienter eingesetzt werden (siehe LOVINS u. a. 1995). Jeder Abfall ist Vergeudung von Ressource. Während in der "biologischen Evolution" stets jene Innovationen selektiv begünstigt werden, die den Ressourcenbedarf minimieren (MARKL 1980),⁷⁸ hat dieses Prinzip in der "kulturellen Evolution" noch keine Allgemeingültigkeit gefunden. Aufgrund der Grenzen des quantitativ-expansiven Wachstums muß nach dem Vorbild biologisch-ökologischer Systeme ein qualitatives Wachstum im Sinne einer Optimierungsstrategie bzw. Entwicklungsstrategie einsetzen (MOHR 1985). Die Knappheit der natürlichen Ressourcen muß zur Allokation führen, d. h. zur effizienten Zuweisung und Nutzung.

Zu den knappen Ressourcen gehören:

- fossile Energieträger,
- Trinkwasser,
- landwirtschaftliche Nutzfläche.

Umweltgüter wurden in der Vergangenheit und werden auch heute noch als freie Güter behandelt. Sie sind es aber nicht; dies wird mit den Veränderungen und Rückwirkungen der Umwelt auf den Menschen immer deutlicher. Folglich müssen die Kosten dieser öffentlichen Güter (saubere Luft, sauberes Wasser) in die Nutzungskostenrechnung eingehen. Da sie bisher nicht von den Produzenten getragen wurden, haben sie sich den Marktmechanismen entzogen.

Notwendig wäre eine Beseitigung der Diskrepanz zwischen privaten und sozialen Kosten. Negative externe Kosten (Umweltfolge-Kosten) müssen

⁷⁸ Beispiele: Ersatz der chemischen Energiegewinnung durch Photosynthese, Ablösung der Gärung durch die zwanzigmal wirkungsvollere Atmung.

den Verbrauchern angerechnet werden. Die Ressource "Umwelt" ist derzeit einfach zu billig, deshalb kann mit ihr auch so umgegangen werden. Der Erfolg einer Wirtschaft wird derzeit am Bruttosozialprodukt gemessen, als der Summe aller produzierten Güter und Dienstleistungen. Unberücksichtigt dabei bleiben die Qualität von Leben und Umwelt, gerechte Verteilung usw. Allein in den 70er Jahren betrug der volkswirtschaftliche Schaden, der an der Umwelt angerichtet wurde, 3-5 % des Bruttosozialproduktes. Wir müssen in der Zukunft zu einem Konzept des "Gesamtgesellschaftlichen Nettonutzens" kommen.⁷⁹ Umweltschutz darf nicht als einer von vielen Kostenfaktoren angesehen werden. Die Kosten, die der Allgemeinheit entstehen, sind mitzuberechnen. Dies ist leider aber nicht immer möglich. In Einzelfällen muß nach dem Verursacherprinzip gehandelt, in anderen Fällen müssen die Kosten dem Verbraucher angelastet werden. Hierzu wären ausgewogene Konzepte zu entwickeln. Notwendig sind vor allem weltweite Abkommen über die Definition der Gemeingüter und dem Anteil der einzelnen Nationen an der Verantwortung für die Erde insgesamt. Umweltschutz muß als Staatsziel in die Grundgesetze der einzelnen Länder aufgenommen werden.

Die derzeitige Agrarpolitik der Europäischen Union ist nicht umweltverträglich. Subvention und Produktion sollten dringend entkoppelt werden. Man muß die herkömmlichen Subventionen abschaffen und ein produktionsbezogenes Subventionssystem einführen. Der Landwirt könnte mehr als "Umweltmanager" mit einem Grundgehalt ausgestattet werden, wobei umweltgerechtes Wirtschaften und umweltgerechte Produktionsmethoden belohnt werden müßten. Seine Aufgabe läge in der Versorgung mit Nahrung, vermehrt jedoch in der Erhaltung der Natur im Offenlandbereich, einschließlich der Schaffung von Grundwasser-Erneuerungsbereichen. Analog hätte der Forstwirt die Aufgabe der Versorgung mit Holz, der Entsorgung von CO₂ und vermehrt der Erhaltung der Natur im Waldbereich. Notwendig ist eine am Umwelt- und am Naturschutz orientierte Politik, die die Land- und Forstwirte zu gutbezahlten Bewahrern der Umwelt macht, da sie das Gut für kommende Generationen bewirtschaften.

In den GUS-Staaten herrscht eine ungeordnete Situation in der Landwirtschaft. Der Westen subventionierte dies über Agrarexporte jährlich mit 23 Milliarden Dollar. Notwendig wären jedoch Investitionen zur Selbsthilfe. Gleiches gilt für die Forstpolitik der GUS-Staaten.

⁷⁹ Siehe dazu auch STAHRER (1995).

"Langfristig wirkungsvolle internationale Maßnahmen sind aber nicht ohne gut informierte Spitzenpolitiker möglich" (NISBET 1994). Umweltthemen werden in Zukunft zu den wichtigsten Anlässen internationaler Auseinandersetzungen werden. Dafür werden gut ausgebildete naturwissenschaftlich versierte Fachkräfte und Politiker benötigt. Langfristig wird sich die Umwelt nur in einer Gesellschaft schützen und erhalten lassen, die offen und selbstkritisch ist, in der die Bevölkerung gut informiert ist, die Konsequenzen ihres Handelns aber auch Nichthandelns erkennt, die die Grundauffassung trägt, daß die Natur und die Kultur nicht nur für sie selbst, sondern auch für die nächsten Generationen da ist. Der Generationenvertrag ist als Solidarpakt verbindlich.⁸⁰ Wer dagegen verstößt, der verstößt gegen Grundrechte.

Eine nachhaltige Entwicklung hätte den positiven Effekt eines weltweiten Friedens. Dieser verhindert die Umweltzerstörung, wohingegen durch Rüstung und durch Krieg besonders große Umweltzerstörungen erfolgen. Seit dem Zweiten Weltkrieg sind allein weltweit mehr als 150 Kriege geführt worden.

Hauptziel der Weltwirtschaft muß es sein, unsere Erde als Lebensraum zu bewahren. Hierzu ist es jedoch notwendig, das aus den Fugen geratene Gleichgewicht wieder herzustellen. Die Einführung eines Umweltsicherheitsrates ("UN-Umwelt-Treuhandrat" im Sinne von DOLZER 1992, "Globale Umweltbehörde" im Sinne von ESTY 1994) und eines Internationalen Umweltgerichtshofes (im Sinne von REST 1994) ist dringender denn je, die Aufstellung eines "Marshallplanes für die Erde" (GORE 1992) unumgänglich.

Unsere Umwelt ist unteilbar und gehört allen, ob arm oder reich, ob den heutigen oder den zukünftigen Generationen. Der Mensch darf nicht Opfer seines eigenen Handelns werden. In Wirklichkeit ist es keine Krise der Umwelt, sondern eine Krise der Menschheit.

⁸⁰ Dazu heißt es im Brundtland-Bericht: "Mögen die Bilanzen unserer Generation auch noch Gewinne aufweisen – unseren Kindern werden wir die Verluste hinterlassen. Ohne Absicht und Aussicht auf Rückzahlung borgen wir heute von zukünftigen Generationen unser 'Umweltkapital'. Unsere Nachfahren mögen uns ob unseres verschwenderischen Vorgehens verfluchen – unsere Schulden werden sie nicht mehr eintreiben können. Unser Verhalten ist bestimmt von dem Bewußtsein, daß uns keiner zur Rechenschaft ziehen kann. Künftige Generationen haben heute kein Wahlrecht, sie verfügen über keinerlei politische oder finanzielle Macht und sind uns daher ohnmächtig ausgeliefert." (HAUFF 1987).

Literatur

- ADAMS, R. M., ROSENZWEIG, C., PEART, R. M., RITCHIE, J. T., MCCARL, B. A., GLYER, J. D., CURRY, R. B., JONES, J. W., BOOTE, K. J. & ALLEN Jr., L. H. (1990): Global climate change and US agriculture, *Nature* 345, S. 219-224.
- AKIMUSCHKIN, I. (1969): Vom Aussterben bedroht? Tiertragödien, vom Menschen ausgelöst, Leipzig.
- ALMER, B., DICKSON, W., EKSTRÖM, C., HÖRNSTRÖM, E. & MILLER, U. (1974): Effects of acidification on Swedish lakes, *Ambio* 3, S. 30-36.
- ALTNER, G. (1979): Wahrnehmung der Interessen der Natur, in: MEYER-ABICH, K. M. (Hg.), *Frieden mit der Natur*, S. 113-131, Freiburg, Basel, Wien.
- ALTNER, G. (1987): Umweltethik – der Schutz unserer Umwelt als Teil einer globalen Verantwortung, in: CALLIESS, J. & LOB, E. (Hg.), *Praxis der Umwelt- und Friedenszerziehung*, Bd. 1, S. 51-56, Düsseldorf.
- AMELUNG, T. & DIERL, M. (1992): Deforestation of tropical rain forests, Tübingen.
- ANDREAE, M. O., TALBOT, R. W., ANDREAE, T. W. & HARRISS, R. C. (1988): Formic and acetic acid over the central Amazon region, Brazil, *Journ. Geophys. Res.* 93, S. 1616-1624.
- ARNDT, U. & KOHLER, A. (1984): Belastung naturmaher Ökosysteme durch importierte Schadstoffe, *Daten und Dokum. zum Umweltsch.* 36, S. 15-30, Hohenheim.
- ARRHENIUS, S. (1896): On the influence of carbon acid in the air upon the temperature of the ground, *Phil. Mag.*
- ARROW, K. J. & FISHER, A. C. (1974): Environmental preservation, uncertainty and irreversibility, *Quart. Journ. Econom.* 88 (2), S. 312-319.
- ASMAN, W. A. H. & DIEDEREN, H. S. M. A. (Hg.) (1987): Ammonia and acidification, *Proceed. Sympos. Europ. Ass. Sci. Air. Poll. (EURASAP)*, Bilthoven.
- AUER, A. (1984): *Umweltethik. Ein theologischer Beitrag zur ökologischen Diskussion*, Düsseldorf.
- BARRY, R. G. (1985): The cryosphere and climate change, in: MAC-CRACKEN, M. C. & LUTHER, F. M. (Hg.): *Detecting the climatic effects of increasing carbon dioxide*, S. 111-148, Washington DC., US Dept. of Energy, zit. nach GOUDIE (1994).
- BATH, B. H. S. van (1963): Yield Ratios, 810-1820, A. A. G. Bijdragen 10, Wageningen (Afdeling Agrarische Geschiedenis Landbouwhogeschool).
- BATTARBEE, R. W., ANDERSON, N. J., APPLEBY, P. G., FLOWER, R. J., FRITZ, S. C., HAWORTH, E. Y., HIGGITT, S., JONES, V. J., KREISER, A., MUNRO, M. A. R., NATKANSKI, J., OLDFIELD, F., PATRICK, A., RICHARDSON, N. G., RIPPEY, B. & STEVENSON, A. C. (1988): *Lake acidification in the United Kingdom 1800-1986. Evidence from analysis of lake sediments*, London.
- BEAMISH, R. J., LOCKHART, W. L., VAN LOON, J. C. & HARVEY, H. H. (1975): Long-term acidification of a lake and resulting effects on fishes, *Ambio* 4, S. 98-102.
- BECK, U. (1986): *Die Risikogesellschaft. Auf dem Weg in eine andere Moderne*, Frankfurt/M.
- BECKER, P. E. (1980): Biologische und kulturelle Evolution, *Mitt. Anthropol. Ges. Wien* 110, S. 1-11.
- BEHRE, K. E. (1980): Zur mittelalterlichen Plaggenwirtschaft in Norddeutschland und angrenzenden Gebieten nach botanischen Gesichtspunkten, *Abhandl. Akad. d. Wissensch. Göttingen, Phil. Hist. Kl.*, 3. Folge, 116, S. 30-44.

- BERRY, B. J. L. (1991): Urbanization, in: TURNER, B. L., CLARK, W. C., KATES, R. W., RICHARDS, J. F., MATTHEWS, J. T. & MEYER, W. B. (Hg.): *The earth as transformed by human action*, S. 103-119, Cambridge.
- BETHOUX, J. P., GENTILI, B., RAUNET, J. & TAILLIEZ, D. (1990): Warming trend in the western mediterranean deep water, *Nature* 347, S. 660-662.
- BIERTER, W. & WINTERFELD, U. v. (1993): *Jenseits von Arbeit und Konsum?*, Politische Ökologie Special Sept./Okt. 1993, S. 20-23.
- BINSWANGER, H. C., GEISSBERGER, W. & GINSBURG, T. (1978): *Der NAWU-Report: Wege aus der Wohlstandsfalle. Strategien gegen Arbeitslosigkeit und Umweltkrise*, Frankfurt/M.
- BIRNBACHER, D. (1979): Was kann Verantwortung für die Natur heißen, in: MEYER-ABICH, K. M. (Hg.), *Frieden mit der Natur*, S. 91-111, Freiburg, Basel, Wien
- BIRNBACHER, D. (1986) (Hg.): *Ökologie und Ethik*, Stuttgart.
- BISHOP, R. C. (1978): Endangered species and uncertainty: the economics of a safe minimum standard, *Amer. Journ. Agricult. Econom.* 60 (1), S. 10-18.
- BLAB, J., NOWAK, E., TRAUTMANN, W. & SUKOPP, H. (Hg.): *Rote Liste der gefährdeten Pflanzen und Tiere in der Bundesrepublik Deutschland*, 4. Aufl., Greven.
- BLAKE, D. R. & ROWLAND, F. S. (1988): Continuing world-wide increase in tropospheric methane 1978-1987, *Science* 239, S. 1129-1131.
- BLANK, I. W. (1985): A new type of forest decline in Germany, *Nature* 314, S. 311-314.
- BLANK, I. W., ROBERTS, T. M. & SKEFFINGTON, R. A. (1988): New perspectives on forest decline, *Nature* 336, S. 27-30.
- BLUME, G. & SCHNEIDER, M. (1995): Umstrittener Boom. Der dramatisch steigende Energieverbrauch im Fernen Osten beunruhigt die Industrieländer, *DIE ZEIT* Nr. 42, 13.10.1995, S. 43.
- BLUMER, M. (1972): Submarine seeps: are they a major source of open ocean oil pollution?, *Science* 176, S. 1257-1258.
- BLUMTHALER, M. & AMBACH, W. (1990): Indication of increasing solar UV-B radiation flux in alpine regions, *Science* 248, S. 206-208.
- BML (1995): Lage der Weltfischbestände, *Natur und Landschaft* 70 (12), S. 637.
- BORCHERT, J. R. (1971): The Dust Bowl in the 1930's., *Ann. Ass. Am. Geogr.* 61, S. 1-22.
- BOUTRON, C. F., GÖRLACH, U., CANDELONE, J.-P., BOLSHOV, M. A. & DELMAS, R. J. (1991): Decrease in anthropogenic lead, cadmium and zinc in Greenland snows since the late 1960's., *Nature* 353, S. 153-156.
- BRIDGES, E. M. (1978): Interaction of soil and mankind in Britain, *Journ. Soil Science* 29, S. 125-139.
- BROADUS, J., MILLIMAN, J., EDWARDS, S., AUBREY, D. & GABLE, F. (1986): Rising sea level and damming of rivers: possible effects in Egypt and Bangladesh, in: TITUS, J. G. (Hg.): *Effects of changes in stratospheric ozone and global climate*: 165-189; Washington DC (UNEP/USEPA); zit. nach GOUDIE (1994).
- BROEMSEN, S. L. v. (1989): Invasions of natural ecosystems by plant pathogens, in: DRAKE J. A. (Hg.): *Biological invasions: a global perspective*, S. 77-83; Chichester; zit. nach GOUDIE (1994).
- BROMWICH, D. H. (1990): Estimates of Antarctic precipitation, *Nature* 343, S. 627-629.

- BUCHWALD, K. (1995): Marine Ökosysteme. Naturpotential – Belastungen – Sanierung, in: STEUBING, L., BUCHWALD, K. & BRAUN, E. (Hg.): Natur und Umweltschutz – Ökologische Grundlagen, Methoden, Umsetzung, S. 69-92; Jena, Stuttgart.
- BUNDESUMWELTMINISTERIUM (1995): Bericht der Bundesregierung zur Umsetzung des Übereinkommens über die biologische Vielfalt in der Bundesrepublik Deutschland, Bonn.
- BUTZER K. W. (1977): Environment, culture, and human evolution, Amer. Scientist 65, S. 572-584.
- CALLIESS, J. & LOB, E. (Hg.) (1987/88): Praxis der Umwelt- und Friedenserziehung, 3 Bde., Düsseldorf.
- CARTER, D. L. (1975): Problems of salinity in agriculture, *Ecolog. Stud.* 15, S. 25-35.
- CARTER, L. J. (1977): Soil erosion: the problem persists despite the billions spent on it, *Science* 196, S. 409-411.
- CHARLSON, R. J., LOVELOCK, J. E., ANDREAE, M. O. & WARREN, S. G. (1987): Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate, *Nature* 326, S. 655-661.
- CHILDE, V. G. (1936): *Man makes himself*, London.
- CICERONE, R. J. (1988): How has the atmospheric concentration of CO changed?, in: ROWLAND, F. S. & ISAKSEN, I. S. A. (Hg.): *The changing atmosphere*, S. 49-61; Chichester.
- CRAIG, H. & CHOU, C. C. (1992): Methane: the record in polar ice cores, *Journ. Geophys. Res.* 9, S. 1221-1224.
- CRUTZEN, P. J., ASELMANN, I. & SEIPLER, W. (1986): Methane production by domestic animals, wild ruminants, other herbivorous, fauna, and humans, *Tellus* 38 B, S. 271-284.
- CRUTZEN, P. J. & ANDREAE, M. O. (1990): Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles, *Science* 250, S. 1669-1678.
- DARBY, H. C. (1956): The clearing of the woodland in Europe, in: THOMAS, W. L. (Hg.): *Man's role in changing the face of the earth*, S. 183-216; Chicago.
- DARSKI, A. & BLEISCHWITZ, R. (1993): Unser trügerischer Wohlstand, *Politische Ökologie Special* Sept./Okt. 1993, S. 10-13.
- DÄSSLER, H.-G. (1991): Einfluß von Luftverunreinigungen auf die Vegetation, Jena.
- DER RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN (1994): *Umweltgutachten 1994 für eine dauerhaft-umweltgerechte Entwicklung*, Stuttgart.
- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR DIE VEREINTEN NATIONEN (1992): *Weltbevölkerungsbericht 1992. Die Welt im Gleichgewicht*, Bonn.
- DEWAR, R. E. (1984): Extinctions in Madagascar: the loss of the subfossil fauna, in: MARTIN, P. S. & KLEIN, R. G. (Hg.): *Quaternary extinctions. A prehistoric evolution*, S. 574-593; Tucson.
- DIAMOND, J. M. (1982): Man the exterminator, *Nature* 298, S. 787-789.
- DICKINSON, R. E. & CICERONE, R. J. (1986): Future global warming from atmospheric trace gases, *Nature* 319, S. 109-115.
- DIERSSEN, K. (1989): Eutrophierungsbedingte Veränderungen der Vegetationszusammensetzung (Fallstudien aus Schleswig-Holstein), *NNA-Berichte* (Hg. Norddeutsche Naturschutzakademie Hof Möhr) 2/1, S. 27-30, Schneverdingen.

- DIMBLEBY, G. W. (1974): The legacy of prehistoric man, in: WARREN, A. & GOLD-SMITHS, F. B. (Hg.): Conservation in practice, S. 179-189, London.
- DITFURTH, H. v. (1987): Anthropologisch-psychologische Voraussetzungen einer erfolgreichen Umwelt- und Friedenserziehung, in: CALLIESS, J. & LOB, E. (Hg.): Praxis der Umwelt- und Friedenserziehung, Bd. 1, S. 664-674, Düsseldorf.
- DOBMEIER, G. (1988): Naturschutz – ein kirchenpolitischer Auftrag?, Laufener Seminarbeitr. 2/87, S. 56-58.
- DOLZER, R. (1992): Umweltschutz im Völkerrecht und Kollisionsrecht, Heidelberg.
- DÖRNER, D., KREUZIG, H. W., REITHER, F., STÄNDEL, T. & LOHHAUSEN (1983): Vom Umgang mit Unbestimmtheit und Komplexität, Bern.
- DREGNE, H. E. & TUCKER, C. J. (1988): Desert encroachment, Desertific. Contr. Bull. 16, S. 16-19.
- EHRlich, P. R., EHRlich, A. H. & HOLDREN, J. P. (1977): Ecoscience: population resources, environment, 3. Aufl., San Francisco.
- EKD (Evangelische Kirche Deutschland) (Hg.) (1991): Die ökologische Krise als Nord-Süd-Problem: Fallbeispiel Amazonien, Gütersloh.
- ELLENBERG, jun., H. (1985): Veränderungen der Flora Mitteleuropas unter Einfluß von Düngung und Immissionen, Schweiz. Z. f. Forstwiss. 136, S. 19-39.
- ELLENBERG, jun. H. (1989): Eutrophierung – das gravierendste Problem im Naturschutz, NNA-Berichte (Hg. Norddeutsche Naturschutzakademie Hof Möhr) 2/1, S. 4-8, Schneverdingen.
- ELLENBERG, jun. H. (1992): Naturschutz als konstruktiver Beitrag zur zukünftigen Landnutzung in Mitteleuropa, NNA-Berichte (Hg. Norddeutsche Naturschutzakademie Hof Möhr) 5/1, S. 4-8, Schneverdingen.
- ELLENBERG, sen. H. (1995a): Allgemeines Waldsterben – ein Konstrukt? Bedenken eines Ökologen gegen Methoden der Schadenserfassung, Naturw. Rdsch. 48 (3), S. 93-96.
- ELLENBERG, sen. H. (1995b): Neuartige Waldschäden?, Allgem. Forst Zeitschr. 15, S. 1-2.
- ELSOM, D. (1987): Atmospheric pollution (revised reprint), Oxford, Cambridge.
- EMANUEL, K. A. (1987): The dependence of hurricane intensity on climate, Nature 326, S. 483-485.
- EMANUEL, K. A. (1988): The maximum intensity of hurricanes, Journ. Atmosph. Sciences 45, S. 1143-1155.
- EMMANUEL, W. R., SHUGART, H. H. & STEVENSON, M. P. (1985): Climatic change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes, Climatic Change 7, S. 29-43.
- ENQUETE-KOMMISSION "Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages (Hg.) (1992): Klimaänderung gefährdet globale Entwicklung. Zukunft sichern – jetzt handeln, Bonn, Karlsruhe.
- ENQUETE-KOMMISSION "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages (Hg.) (1990a): Schutz der Erdatmosphäre. Eine internationale Herausforderung, Bd. 1., 3. Aufl., Bonn, Karlsruhe.
- ENQUETE-KOMMISSION "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages (Hg.) (1990b): Schutz der Tropenwälder. Eine internationale Schwerpunktaufgabe, Bonn, Karlsruhe.

- ENQUETE-KOMMISSION "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages (Hg.) (1991): Schutz der Erde. Eine Bestandsaufnahme mit Vorschlägen zu einer neuen Energiepolitik, 2 Teilbände, Bonn, Karlsruhe.
- ERZ, W. (1983): Artenschutz im Wandel. Konkrete und quantifizierte Vorstellungen für veränderte Strategien, Umschau 82/23, S. 695-700.
- ESHER, R. J., MARX, D. H., URSIC, S. J., BAKER, R. L., BROWN, L. R. & COLEMAN, D. C. (1992): Simulated acid rain effects on fine roots, ectomycorrhizae, microorganisms, and invertebrates in pine forests of the Southern United States, Water, Air and Soil Pollution 61 (3-4), S. 269-278.
- EVANGELISCHE AKADEMIE BADEN (Hg.) (1996) Zukunft für die Erde. Nachhaltige Entwicklung als Überlebensprogramm, Bd. 1: Sustainable Development – was ist das?, Bd. 2: Dimensionen der ökologischen Krise, Bd. 3: Wieviele Menschen trägt die Erde?, Karlsruhe.
- ESTY, D. C. (1994): GATTING the greens – not just greening the GATT, Foreign Affairs 72 (5), S. 32-36.
- FACCHINI, F. (1991): Der Mensch: Ursprung und Entwicklung, Augsburg.
- FIETKAU, H.-J. (1984): Bedingungen ökologischen Handelns. Gesellschaftliche Aufgaben der Umweltpsychologie, Weinheim, Basel.
- FINK, H. G., VIBRANS, H. & VOLLMER, I. (1992): Synopse der Roten Listen Gefäßpflanzen. Übersicht der Roten Listen und Florenlisten für Farn- und Blütenpflanzen der Bundesländer der Bundesrepublik Deutschland (vor dem 3. Oktober 1990) sowie der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik, Schr. Reihe Vegetationskde 22, 262 S., Bonn Bad-Godesberg.
- FLAIG, H. & MOHR, H. (Hg.) (1993): Energie aus Biomasse – eine Chance für die Landwirtschaft, Berlin.
- FLENLEY, J. R., KING, A. S. M., JACKSON, J., CHEW, C., TELLER, J. & PRENTICE, M. E. (1991): The late quaternary vegetational and climatic history of Easter Island, Journ. Quatern. Science 6, S. 85-115.
- FORSCHUNGSBERICHT WALDSCHÄDEN/LUFTVERUNREINIGUNGEN der Bundesregierung und DER LÄNDER (Red.: LESSMANN, A.) (1986): 2. Bericht, Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- FORSTREITER, M., TSCHUSCHKE, A. & OVERDIEK, D. (1994): Atmospheric CO₂ record from Osnabrück, in: BODEN, T. A., KAISER, D. P., SEPANSKI, R. J. & STOSS, F. W. (Hg.): Trends '93: A compendium of data on global change. ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., USA.
- FRESE, W. (1994): Die Treibhausfenster schließen sich ... und die Ozonschicht versprödet weiter. Ozon- und Klimaforscher haben vergeblich ihre "Bringschuld" geleistet, MPG-Spiegel 2, S. 9-14.
- GALLOWAY, J. N., LIKENS, G. E., KEENE, W. C. & MILLER, J. M. (1982): The composition of precipitation in remote areas of the world, Journ. Geophys. Res. 87 (D), S. 8771-8786.
- GEBHARD, U. (1995): Naturerfahrung und seelische Entwicklung – Anmerkungen zur Umweltbildung aus psychologischer Sicht, in: WEIGMANN, G., TROMMER, G. & WEIGELT, C. (Hg.) (1995): Lernen für die Umwelt – Konzepte und Leitlinien, Beih. 3, Verhandl. Ges. f. Ökol., S. 14-45, Berlin.
- GEHLEN, A. (1961): Anthropologische Forschung, Reinbeck, Hamburg.

- GEMEINSAME ERKLÄRUNG des Rates der Evangelischen Kirche in Deutschland und der Deutschen Bischofskonferenz (1985): Verantwortung wahrnehmen für die Schöpfung, Köln.
- GILLESPIE, R., HORTON, D. R., LADD, P., MACUMBER, P. G., RICH, T. H., THORNE, R. & WRIGHT, R. V. S. (1978): Lancefield swamp and the extinction of the Australian megafauna, *Science* 200, S. 1044-1048.
- GLATZEL, W.-D. (1995): Ökologie der Energiewirtschaft. in: STEUBING, L., BUCHWALD, K. & BRAUN, E. (Hg.): *Natur und Umweltschutz - Ökologische Grundlagen, Methoden, Umsetzung*, S. 261-294, Jena, Stuttgart.
- GLAUBER, H. & KORCZAK, D. (1993): *Toblacher Thesen 1992. Gesundheit und ökologischer Wohlstand. "Langsamer, weniger, besser, schöner"*, *Gaia* 2 (1), S. 33-41.
- GORE, A. (1992): *Wege zum Gleichgewicht. Ein Marshallplan für die Erde*, Gütersloh.
- GOUDIE, A. (1994): *Mensch und Umwelt. Eine Einführung*, Heidelberg, Berlin, Oxford.
- GOUDSBLOM, J. (1995): *Feuer und Zivilisation*, Frankfurt/M.
- GRABHERR, G., GOTTFRIED, M., GRUBER, A. & PAULI, H. (1995): Patterns and current changes in alpine plant diversity, in: CHAPIN & KÖRNER, C. (Hg.): *Arctic and alpine biodiversity*, S. 167-181, Berlin, Heidelberg.
- GRAINGER, A. (1993): *Controlling tropical deforestation*, London.
- GRASSL, H. (1996), in: SCHNABEL, U., SCHUH, H. & VORHOLZ, F.: *Die Erde läuft heiß*, *DIE ZEIT* Nr. 3, 12.1.1996, S. 33.
- GRAYSON, D. K. (1977): Pleistocene avifaunas and the overkill hypothesis, *Science* 195, S. 691-693.
- GRAYSON, D. K. (1984): Explaining pleistocene extinctions: thoughts on the structure of a debate, in: MARTIN, P. S. & KLEIN, R. G. (Hg.): *Quaternary extinctions. A prehistoric evolution*, S. 807-823, Tucson.
- GRUPE, G. (1986): *Umwelt und Bevölkerungsentwicklung im Mittelalter*, in: HERRMANN, B. (Hg.): *Mensch und Umwelt im Mittelalter*, S. 24-34, Stuttgart.
- GUDERIAN, R. (1985): *Air pollution by photochemical oxidants: formation, transport, control and effects on plants*, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- HABER, W. (1990): *Einführung in die Thematik des Kolloquiums: Wirkung von Luftverunreinigungen auf Böden*, *VDI Berichte* 837, S. 15-25.
- HABERLE, M. & HERRMANN, K. (1984): *Entwicklung von Emissionen und Immissionen wichtiger Luftschadstoffe*, *WLB: Wasser, Luft und Betrieb* 7/8, S. 31-36. Ludwigshafen: BASF.
- HAEBERLI, W. (1994): Accelerated glacier and permafrost changes in the Alps, in: BENISTON, M. (Hg.): *Mountain environments in changing climates*, S. 91-107, London, New York.
- HANSEN, J., FURY, I., LACIS, A., RIND, D., LEBEDOFF, S., RUEDY, R., RUSSELL, G. (1988): *Global climate changes as forecast by Goddard Institute for space studies, Threedimensional Model*, *Journ. Geogr. Res.* 93 (D), S. 9341-9367, zit. nach NISBET (1994).
- HANSEN, J. E. & LACIS, A. A. (1990): Sun and dust versus greenhouse gases: an assessment of their relative roles in global climate change, *Nature* 346, S. 713-719.
- HARBORTH, H.-J. (1991): *Dauerhafte Entwicklung statt globaler Selbsterstörung. Eine Einführung in das Konzept des "Sustainable Development"*, Berlin.

- HARTENSTEIN, L. (1991): Internationale Partnerschaft zur Erhaltung der tropischen Regenwälder, in: NIEMITZ, C. (Hg.): Das Regenwaldbuch, S. 185-196, Berlin, Hamburg.
- HAUFF, V. (Hg.): Unsere gemeinsame Zukunft. Der Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (Brundtland-Bericht), Greven.
- HEDEWIG, R. & STICHMANN, W. (Hg.) (1988): Biologieunterricht und Ethik, Köln.
- HEDIGER, H. (1968): Exotische Freunde im Zoo, Freiburg, Basel, Wien.
- HELBLING, E. W., VILLAFANE, V., FERRARIO, M. & HOLM-HANSEN, O. (1992): Impact of natural ultraviolet radiation on rates of photosynthesis and on specific marine phytoplankton species, *Marine Ecol. Progr. Ser.* 80, S. 89-100.
- HEIL, G. W., WERGER, M. J. A., DE MMOL, W., VAN DAM, D. & HEIJNE, B. (1988): Capture of atmospheric Ammonium by grassland canopies, *Science* 239, S. 764-765.
- HELLDÉN, U. (1985): Land degradation and land productivity monitoring – needs for an integrated approach, in: HJÖRT, A. (Hg.): Land management and survival, Uppsala, Scandinavian Institut of African Studies, S. 77-87; zit. nach GOUDIE (1994).
- HENNING, F.-W. (1978): Landwirtschaft und ländliche Gesellschaft in Deutschland, Bd. 1, Paderborn.
- HERRMANN, B. (1985): Mensch und Umwelt im Mittelalter, Göttingen.
- HESSISCHES MINISTERIUM des Innern und für Landwirtschaft, Forsten und Naturschutz (1995): Waldschadensbericht '95, Wiesbaden.
- HILLEBRECHT, M.-L. (1982): Die Relikte der Holzkohlewirtschaft als Indikatoren für Waldnutzung und Waldentwicklung – Untersuchungen an Beispielen aus Südniedersachsen, *Göttinger Geograph. Abhandl.* 79, Göttingen.
- HOCK, H.-P. (1992): Die Welt der Mammutjäger, in: JOGER, U. & KOCH, U. (Hg.): Mammutts aus Sibirien, S. 78-93, Darmstadt.
- HOFMANN, D. J., DESHLER, T. L., AIMEDIEU, P., MATTHEWS, W. A., JOHNSTON, P. V., KONDO, Y., SHELDON, W. R., BURNE, G. J. & BENBROOK, J. R. (1989): Stratospheric clouds and ozone depletion in the Arctic during January 1989, *Nature* 340, S. 117-121.
- HOLDGATE, M. W., KASSAS, M. & WHITE, G. F. (1982): The world environment 1972-1982, Dublin.
- HOLLIS, G. E. (1978): The falling levels of the Caspian and Aral Seas, *Geograph. Journ.* 144, S. 62-80.
- HONEGGER, R. E. (1980): List of amphibians and reptiles either known or thought to have become extinct since 1600, *Biol. Conserv.* 19, S. 141-158.
- HÖPNER, T. (1989): Eutrophierung der Nordsee und des Wattenmeeres, *NNA-Berichte* (Hg. Norddeutsche Naturschutzakademie Hof Möhr) 2/1, S. 14-20, Schneverdingen.
- HOUGH, A. M. & DERWENT, R. G. (1990): Changes in the global concentration of tropospheric ozone due to human activities, *Nature* 344, S. 645-648.
- HOUGHTON, J. T., JENKINS, G. J. & EPHRAUMS, J. J. (1990): Climate change: The IPCC Scientific Assessment, Cambridge.
- HUGHES, R. J., SULLIVAN, M. E. & YOK, D. (1991): Human-induced erosion in a high-land-catchment in Papua New Guinea: the prehistoric and contemporary records, *Zeitschr. Geomorph., Supplementband* 83, S. 227-239.

- HUTCHINSON, G. E. (1973): Eutrophication. The scientific background of a contemporary practical problem, *Amer. Scientist* 61, S. 269-279.
- HUTCHINSON, T. C. & HAVAS, M. (1980): Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems, New York, London.
- IDSO, S. B. & BRAZEL, A. J. (1978): Climatological effects of atmospheric particulate pollution, *Nature* 274, S. 781-782.
- IMMLER, H. (1989): Vom Wert der Natur. Zur ökologischen Reform von Wirtschaft und Gesellschaft, Opladen.
- ISERMANN, K. (1991): Anteil der Landwirtschaft an den Stickstoff- und Phosphoreinträgen in die Oberflächengewässer der Bundesrepublik Deutschland (1986/87) und Lösungsansätze zu ihrer hinreichenden Verminderung, 46. Fachtagung Bayerische Landesanstalt für Wasserforschung "Weitergehende Abwasserreinigung – Zielsetzung, Erfahrungen und Ergebnisse" vom 14. bis 17.10.1991 in München.
- JACOBS, J. (1970): *The economy of cities*, New York.
- JACOBSON, T. & ADAMS, R. M. (1958): Salt and silt in ancient mesopotamian agriculture, *Science* 128, S. 1251-1258.
- JENSEN, K. W. & SNEKVIK, E. (1972): Low pH levels wipe out Salmon and Trout populations in southernmost Norway, *Ambio* 1, S. 223-225.
- JISCHA, M. J. (1993): Technik für eine Welt von morgen, *Mitt.blatt TU Clausthal* 75.
- JOCHIMSEN, M., HARTUNG, J. & FISCHER, I. (1995): Spontane und künstliche Begrünung der Abraumhalden des Stein- und Braunkohlenbergbaus, *Ber. Reinh. Tüxen-Ges.* 7, S. 69-88.
- JOGER, U. (1994): Ausgerottet oder ausgestorben?, in: JOGER, U. & KOCH, U. (Hg.): *Mammuts aus Sibirien*, S. 123-127, Darmstadt.
- JUDSON, S. (1968): Erosion rates near Rome, Italy, *Science* 160, S. 1444-1445.
- KAISER, R. (Hg.) (1981): *Global 2000. Der Bericht an den Präsidenten*, Frankfurt/M.
- KANDLER, O. (1992a): Historical declines and diebacks of Central European forests and present conditions, *Environm. Toxicol. Chem.* 11, S. 1077-1093.
- KANDLER, O. (1992b): The German forest decline situation: a complex disease or a complex of diseases, in: MANION, P. D. & LACHANCE, D. (Hg.): *Forest decline concepts*: 59-84, St. Paul, Minnesota.
- KANDLER, O. (1994): 14 Jahre Waldschadensdiskussion, *Naturw. Rundsch.* 47, S. 419-430.
- KATES, R. W., TURNER, B. L. & CLARK, W. C. (1991): The great transformation, in: TURNER, B. L., CLARK, W. C., KATES, R. W., RICHARDS, J. F., MATTHEWS, J. T. & MEYER, W. B. (Hg.): *The earth as transformed by human action*, S. 1-17, Cambridge.
- KATTMANN, U. (1980): Bezugspunkt Mensch. Grundlegung einer humanzentrierten Strukturierung des Biologieunterrichtes, Köln.
- KELLY, P. M. & WIGLEY, T. M. L. (1990): The influence of solar forcing trends on global mean temperature since 1861, *Nature* 347, S. 460-462.
- KHALIL, M. A. K. & RASMUSSEN, R. A. (1984): Carbon monoxide in the earth's atmosphere: increasing trend, *Science* 224, S. 54-56.
- KHALIL, M. A. K. & RASMUSSEN, R. A. (1987): Atmospheric methane trends over the last 10,000 years, *Atmospheric environment* 21, S. 2445-2452.

- KHALIL, M. A. K. & RASMUSSEN, R. A. (1991): Carbon monoxide in the earth's atmosphere: indications of a global increase, *Nature* 332, S. 242-244.
- KING, A. & SCHNEIDER, B. (1992): Die erste globale Revolution: ein Bericht des Rates des Club of Rome, Frankfurt/M.
- KINZELBACH, R. (1994): Ausgestorben oder ausgerottet?, in: JOGER, U. & KOCH, U. (Hg.); *Mammuts aus Sibirien*, S. 111-122, Darmstadt.
- KLEBER, E. W. (1993): Grundzüge ökologischer Pädagogik: Eine Einführung in ökologisch-pädagogisches Denken, Weinheim, München.
- KLÖTZLI, F. A. (1993): *Ökosysteme*, Stuttgart.
- KNOX, J. C. (1993): Large increase in flood magnitude in response to modest changes in climate, *Nature* 361, S. 430-432.
- KOIDE, M. & GOLDBERG, E. D. (1971): Atmospheric and fossil fuel combustion, *Journ. Geophys. Res.* 76, S. 6589-6596.
- Korneck, D. & SUKOPP, H. (1988): Rote Liste der in der Bundesrepublik Deutschland ausgestorbenen, verschollenen und gefährdeten Farn- und Blütenpflanzen und ihre Auswertung für den Arten- und Biotopschutz, *Schr. R. Vegetationskunde, Bonn-Bad Godesberg* 19, S. 1-210.
- KORTE, F. (1992): *Lehrbuch der Ökologischen Chemie: Grundlagen und Konzepte für die ökologische Beurteilung von Chemikalien*, Stuttgart, New York.
- KOWARIK, I. & SUKOPP, H. (1986): Ökologische Folgen der Einführung neuer Pflanzenarten, *Gentechnologie* 10, S. 111-135.
- KRAMBECK, C. (1989): Wirkung diffuser Stoffe auf limnische Lebensgemeinschaften, *NNA-Berichte* (Hg. Norddeutsche Naturschutzakademie Hof Möhr) 2/1, S. 21-26, Schneverdingen.
- KRANTZ, G. S. (1970): Human activities and megafaunal extinctions. Man's modification of the environment may have caused the demise of some large pleistocene mammals, *Amer. Scientist* 58, S. 164-170.
- KRATOCHWIL, A. (1989): Biozönotische Umschichtungen im Grünland durch Düngung, *NNA-Berichte* (Hg. Norddeutsche Naturschutzakademie Hof Möhr) 2/1, S. 46-58, Schneverdingen.
- KURT, F. (1982): *Naturschutz – Illusion und Wirklichkeit*, Hamburg, Berlin.
- LABITZKE, K. & LOON, H. v. (1991): Some complications in determining trends in the stratosphere, *Advanced Space Res.* 11 (3), S. 21-30.
- LAMPREY, H. (1975): The integrated project on arid lands, *Nature and Resources* 14, S. 2-11.
- LANDSBERG, H. E. (1981): Man-made climatic changes, *Science* 170, S. 1265-1268.
- LANG, G. (1994): *Quartäre Vegetationsgeschichte Europas Methoden und Ergebnisse*, Jena, Stuttgart, New York.
- LANLY, J. P., SINGH, K. D. & JANZ, K. (1991): FAO's 1990 reassessment of tropical forest cover, *Nature and Resources* 27, S. 21-26.
- LEGETT, J. (Hg.) (1991): *Global warming. Die Wärmekatastrophe und wie wir sie verhindern können*, Der Greenpeace Report, München, Zürich.
- LELIEVELD, J. & CRUTZEN, P. J. (1992): Indirect chemical effects of methane on climate warming, *Nature* 355, S. 339-342.
- LENGAUER, E. (1975): Energie- und Rohfasergehalt des Futters und Fruchtbarkeitsstörungen bei Kühen, *Veröff. Landw.-chem. BVA Linz* 10, S. 199-211.

- LEVINE, J. S., RINSLAND, C. P. & TENNILLE, G. M. (1985): The photochemistry of methane and carbon monoxide in the troposphere in 1950 and 1985, *Nature* 318, S. 254-257.
- LIKENS, G. E. & BORMANN, F. H. (1974): Acid rain: a serious regional environmental problem, *Science* 184, S. 1176-1179.
- LIKENS, G. E., WRIGHT, R. F., GALLOWAY, J. N. & BUTLER, T. J. (1979): Saurer Regen, *Spektr. Wissensch.* 12, S. 72-78.
- LINSENMAYER, K. E. & MIKULA, G. (1988): Soziale Einflüsse, in: IMMELMANN K., SCHERRER, K. R., VOGEL, C. & SCHMOOK, P. (Hg.) (1988): *Psychobiologie: Grundlagen des Verhaltens*, S. 455-486, Stuttgart, New York, Weinheim, München.
- LISS, P. S. & CRANE, A. J. (1983): Man-made carbon dioxide and climatic change, Norwich.
- LOBERT, J. M., SCHARFFE, D. H., HAO, W. M. & CRUTZEN, P. (1990): Importance of biomass burning in the atmospheric budgets of nitrogen-containing gases, *Nature* 346, S. 552-554.
- LOVINS, A., LOVINS, H. & VON WEIZSÄCKER, E. U. (1995): *Faktor 4*, Basel, Boston, Berlin.
- LU, Y. & KHALIL, M. A. K. (1992): Model calculations of night-time atmospheric OH, *Tellus* 44 B, S. 106-113.
- LUGO, A. E. (1992): Schätzungen des Rückgangs der Artenvielfalt tropischer Wälder, in: WILSON, E. O. (Hg.): *Ende der biologischen Vielfalt? Der Verlust von Arten, Genen und Lebensräumen und die Chancen für eine Umkehr*, S. 76-89, Heidelberg, Berlin, New York.
- LUTHER, D. (1986): Die ausgestorbenen Vögel der Welt, *Die Neue Brehmbücherei* 424, Wittenberg, Lutherstadt.
- MANABE, S. & STOUFFER, R. J. (1980): Sensivity of a global climate model to an increase of CO₂ concentration in the atmosphere, *Journ. of Atmosph. Science* 37, S. 99-118.
- MANABE, S. & WETHERALD, R. T. (1986): Reduction in summer soil-wetness induced by an increase in atmospheric carbon dioxide, *Science* 232, S. 626-628.
- MARKL, H. (1980): Die kulturelle Evolution – Risiko und Chance, *FAZ* Nr. 303, 31.12.1980, S. I.
- MARKL, H. (1986): *Natur als Kulturaufgabe. Über die Beziehung des Menschen zur lebendigen Natur*, Stuttgart.
- MARSHALL, L. G. (1984): Who killed cock robin? An investigation of the extinction controversy, in: MARTIN, P. S. & KLEIN, R. G. (Hg.): *Quarternary extinctions. A prehistoric evolution*, S. 785-806, Tucson.
- MARTIN, P. S. (1967): Prehistoric overkill, in: Martin, P. S. & WRIGHT, H. E. (Hg.): *Pleistocene extinctions: the search for a cause*, S. 75-120, New Haven.
- MARTIN, P. S. (1974): Paleolithic players on the American stage: man's impact on the late pleistocene megafauna, in: IVES, J. D. & BARRY, R. G. (Hg.): *Arctic and alpine environments*, S. 669-700, London.
- MARTIN, P. S. (1982): The pattern and meaning of holarctic mammoth extinction, in: HOPKINS, D. M., Matthews, J. V., SCHWEGER, C. E. & YOUNG, S. B. (Hg.): *Paleoecology of Beringia*, S. 399-408, New York.
- MARTIN, P. S. (1984): Prehistoric overkill: the global model, in: MARTIN, P. S. & KLEIN, R. G. (Hg.) (1984): *Quarternary extinctions. A prehistoric evolution*, S. 354-403, Tucson.

- MARTIN, P. S. & WRIGHT, H. E. (Hg.) (1967): Pleistocen extinctions: the search for a cause, New Haven.
- MARTIN, P. S. & KLEIN, R. G. (Hg.) (1984): Quarternary extinctions. A prehistoric evolution, Tucson.
- MATTHEWS, W. H., KELLOGG, W. W. & ROBINSON, G. D. (Hg.) (1971): Man's impact on the climate, Cambridge, Mass.
- MEADOWS, D., MEADOWS, D., ZAHN, E. & MILLING, P. (1972): Die Grenzen des Wachstums, Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit, Stuttgart.
- MEADOWS, D., MEADOWS, D. & RANDERS, J. (1992): Die neuen Grenzen des Wachstums, Die Lage der Menschheit: Bedrohung und Zukunftschancen, Stuttgart.
- MENSCHING, H. (1978): Die Wüste schreitet voran, Umschau 78 (4), S. 99-106.
- MERCER, D. E. & HAMILTON, L. S. (1984): Mangrove ecosystems: some economic and natural benefits, *Nature and Resources* 20, S. 14-19.
- MEYER-ABICH, K. M. (1986): Wege zum Frieden mit der Natur. Praktische Naturphilosophie für die Umweltpolitik, Freiburg, München.
- MEYER-ABICH, K. M. (1990): Aufstand für die Natur. Von der Umwelt zur Mitwelt, München, Wien.
- MIECK, I. (1990): Reflections on a typology of historic pollution: complementary conceptions, in: BRIMBLECOMBE, P. & PFISTER, C. (Hg.): *The silent countdown*, S. 73-80; Berlin.
- MILGRAM, S. (1986): Das Milgram-Experiment. Zur Gehorsamsbereitschaft gegenüber Autorität, Reinbeck.
- MILLIMAN, J. D., QIN, Y. S., REN, M. E. & SAITA, Y. (1987): Man's influence on erosion and transport of sediment by Asian rivers: the yellow river (Huanghe) example. *Journ. Geology* 95, S. 751-162.
- MILNE, L. J. & MILNE, M. (1965): Das Gleichgewicht in der Natur, Hamburg, Berlin.
- MOHR, H. (1983): Evolutionäre Erkenntnistheorie, *BIUZ* 13 (1), S. 16-20.
- MOHR, H. (1985): Qualitatives Wachstum in Biologie und Ökonomie, *Naturwiss. Rundsch.* 38 (7), S. 267-274.
- MOHR, H. (1993): Waldschäden in Mitteleuropa – wo liegen die Ursachen?, in: *Horizonte – wie weit reicht unsere Erkenntnis heute?*, *Verh. Ges. Dtsch. Naturforsch. Ärzte* 117, S. 43-59.
- MOORE, D. M. (1983): Human impact on island vegetation, in: HOLZNER, W., WERGER M. J. A. & IKUSIMA, I. (Hg.): *Man's impact on vegetation*, S. 237-246, The Hague.
- MÜLLER, H. J. (1984) (Hg.): *Ökologie*, Stuttgart.
- MUROZUMI, M., CHOW, T. J. & PATERSON, C. (1969): Chemical concentrations of pollutant lead aerosols, terrestrial dusts and sea salt in Greenland and Antarctic snow strata, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 33, S. 1247-94.
- MURRAY, P. (1984): Extinctions downunder: a bestiary of extinct Australian late pleistocene monotremes and marsupials, in: MARTIN, P. S. & KLEIN, R. G. (Hg.) (1984): *Quarternary extinctions. A prehistoric evolution*, S. 600-628, Tucson.
- MYERS, N. (1985): Die sinkende Arche: bedrohte Natur, gefährdete Arten, Braunschweig.

- MYERS, N. (1988): Natural resource systems and human exploitation systems: physiobiotic and ecological linkages, World Bank policy planning and research staff, environment department working paper 12, zit. nach GOUDIE (1994).
- MYERS, N. (1992): Future operational monitoring of tropical forests: an alert strategy, in: MALLINGREAU, J. P., DA CUNHA, R. & JUSTICE, C. (Hg.): Proceedings World Forest Watch Conference, Sa. Jose dos Campos, Brazil, S. 9-14, zit. nach GOUDIE (1994).
- MYNAREK, H. (1986): Ökologische Religion. Ein neues Verständnis der Natur, München.
- NAESS, A. (1986): Intrinsic value, in: SOULE, M. E. (Hg.): Conservation biology: the science of scarcity and diversity, S. 504-515, Sunderland.
- NEEF, E. (1981): Das Gesicht der Erde, Zürich, Frankfurt/M.
- NEFTEL, A., MOOR, E., OESCHGER, H. & STAUFFER, B. (1985): Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO₂ in the past two centuries, Nature 315, S. 45-47.
- NEFTEL, A., OESCHGER, H., STAFFELBACH, T. & STAUFFER, B. (1988): CO₂ record in the Byrd ice core 50.000-5000 Years B. P., Nature 331, S. 609-611.
- NISBET, E. G. (1994): Globale Umweltveränderungen: Ursachen, Folgen, Handlungsmöglichkeiten, Klima, Energie, Politik, Heidelberg/Berlin/Oxford.
- NRIAGU, J. O. (1979): Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals in the atmosphere, Nature 279, S. 409-411.
- NRIAGU, J. O., COKER, R. D. & BARRIE, L. A. (1991): Origin of sulphur in Canadian arctic haze from isotope measurements, Nature 349, S. 142-145.
- NYE, P. H. & GREENLAND, D. J. (1964): Changes in the soil after clearing tropical forest, Plant and Soil 21, S. 101-112.
- OLSON, R. K., BINKLEY, D. & BÖHM, M. (1992): The response of western forest to air pollution, Ecol. Stud. 97; New York, u. a.
- OTTERBEIN, K. (1991): Mega-Städte, Mega-Krisen. Die größten Städte sind in der Dritten Welt. Bald die halbe Menschheit in Städten, Dritte Weltpresse 8 (1), S. 1-2.
- OVERDIECK, D. (1991): Direkte Wirkungen der atmosphärischen CO₂-Anreicherung auf die heimische Vegetation (Pflanzengemeinschaften des Grünlandes und der Wälder), Verhandl. d. Ges. f. Ökol. XIX/III, S. 243-263.
- OVERPECK, J. T., RIND, D. & GOLDBERG, R. (1990): Climatic-induced changes in forest disturbance and vegetation, Nature 343, S. 51-53.
- PACKARD, V. (1974): Die geheimen Verführer. Der Griff nach dem Unbewußten in jedermann, Frankfurt/M.
- PARK, C. C. (1987): Acid rain: rhetoric and reality, London.
- PEARMAN, G. I. & FRASER, P. J. (1988): Sources of increased methane, Nature 332, S. 489-490.
- PEIERLS, B. L., CARACO, N. F., PACE, M. L. & COLE, J. J. (1991): Human influence on river nitrogen, Nature 350, S. 386.
- PELTIER, W. R. & TUSHINGHAM, A. M. (1989): Global sea level rise and the greenhouse effect: might they be connected?, Science 244, S. 806-810.
- PETERS, R. L. (1992): Die Auswirkungen weltweiter Klimaveränderungen auf natürliche Lebensgemeinschaften, in: WILSON, E. O. (Hg.): Ende der biologischen Vielfalt? Der Verlust von Arten, Genen und Lebensräumen und die Chancen für eine Umkehr, S. 481-492, Heidelberg, Berlin, New York.

- PIMENTAL, D., TERHUNE, E. C., DYSON-HUDSON, R., ROCHEREAU, S., SAMIS, R., SMITH, E. A., DENMAN, D., REIFSCHNEIDER, D., SHEPARD, M. (1976): Land degradation: effects on food and energy resources, *Science* 194, S. 149-155.
- PITT, D. (1979): Throwing light on a black secret, *New Scientist* 81, S. 1022-1025.
- PLACHTER, H. (1991): *Naturschutz*, Stuttgart.
- POTT, R. & HÜPPE, J. (1991): Die Hudelandschaften Nordwestdeutschlands, *Abhandl. Westfäl. Mus. Naturkde Münster* 53 (1/2), S. 1-313, Münster.
- PROFFITT, M. H., MARGITAN, J. J., KELLY, K. K., LOEWENSTEIN, M., PODOLSKA, J. R. & CHAN, K. R. (1990): Ozone loss in the Arctic polar vortex inferred from high-altitude aircraft measurements, *Nature* 347, S. 31-33.
- PROSPERO, J. M. & NEES, R. T. (1977): Dust concentration in the atmosphere of the equatorial North Atlantic: possible relationship to Sahelian drought, *Science* 196, S. 1196-1198.
- RALEIGH, C. B., HEALY, J. H. & BREDEHOEFT, J. D. (1976): An experiment in earthquake control at Rangeley, Colorado, *Science* 191, S. 1230-1237.
- RAMANATHAN, V. (1988): The greenhouse theory of climate change: a test by an inadvertent global experiment, *Science* 240, S. 293-299.
- RASMUSSEN, C. A. & KHALIL, M. A. K. (1984): Atmospheric methane in the recent and ancient atmospheres: concentrations, trends and inter-hemispheric gradients, *Journ. Geophys. Res.* 89, S. 11599-11605.
- RASOOL, S. I. & SCHNEIDER, S. H. (1971): Atmospheric carbon dioxide and aerosols: effects of large increase on global climate, *Science* 193, S. 138-141.
- RAYNAUD, D., JOUZEL, J., BARNOLA, J. M., CHAPPELLAZ, J., DELMAS, R. J. & LORIUS, C. (1993): The ice record of greenhouse gases, *Science* 259, S. 926-934.
- REED, C. A. (1970): Extinction of mammalian megafauna in the old world late quaternary, *BioScience* 20 (5), S. 284-288.
- REHFUESS, K.-E. (1983): Walderkrankungen und Immissionen – eine Zwischenbilanz, *Allgem. Forst Zeitschr.* 39, S. 601-610.
- REHFUESS, K.-E. (1985): Walderkrankungen und Immissionen – erläutert am Beispiel der Fichtenerkrankungen, *Düsseldorfer Geobot. Kolloqu.* 2, S. 25-29.
- REHFUESS, K.-E. (1995): Gefährdung der Wälder in Mitteleuropa durch Luftschadstoffe und Möglichkeiten der Revitalisierung durch Düngung, *Ber. Reinh.-Tüxen-Ges.* 7, S. 141-156.
- REMMERT, H. (1992): Natur als Kulturaufgabe, *Naturwiss.* 79, S. 489-491.
- RENBERG, I. & HELLBERG, T. (1982): The pH history of lakes in SW Sweden, as calculated from the subfossil diatom flora of the sediments, *Ambio* 11, S. 30-33.
- RENN, O. (1994): Ein regionales Konzept qualitativen Wachstums, Pilotstudie für das Land Baden-Württemberg, *Akademie für Technikfolgenabschätzung Baden-Württemberg, Arbeitsbericht Nr. 3.*, S. 1-45.
- REPETTO, R. (1990): Die Entwaldung der Tropen: ein ökonomischer Fehlschlag, *Spektr. Wissensch. Juni* 1990, S. 122-129.
- REST, A. (1994): Neue Mechanismen der Zusammenarbeit und Sanktionierung im internationalen Umweltrecht, *Natur und Recht* 6, S. 271-279.
- RICHARDS, J. F. (1991): Land transformation, in: TURNER, B. L., CLARK, W. C., KATES, R. W., RICHARDS, J. F., MATTHEWS, J. T. & MEYER, W. B. (Hg.): *The earth as transformed by human action*, S. 163-178, Cambridge.

- RIEBESELL, U., WOLF-GLADROW, D. & SMETACEK, V. (1993): Carbon dioxide limitation of marine phytoplankton growth rates, *Nature* 361, S. 249-251.
- RIECKEN, U., RIES, U. & SSYMANK, A. (1994): Rote Liste Biotope der gefährdeten Biotypen der Bundesrepublik Deutschland, *Schr.-R. Landschaftspfl. Natursch.* 41, S. 1-184, Bonn-Bad Godesberg.
- RIETBERGEN, S. (1989): Africa, in: POORE, D. (Hg.): No timber without trees, S. 40-73. London.
- ROBBINS, R. C., CAVANAGH, L. A., SALAS, L. J. & ROBINSON, E. (1973): Analysis of ancient atmospheres, *Journ. Geophys., Res.* 78, S. 5341-5344.
- ROHMANN, U. & SONTHEIMER, H. (1985): Nitrat im Grundwasser, Karlsruhe (GVGW-Forschungsstelle).
- ROZANOV, B. G., TARGULIAN, V. & ORLOV, D. S. (1991): Soils, in: TURNER, B. L., CLARK, W. C., KATES, R. W., RICHARDS, J. F. MATTHEWS, J. T. & MEYER, W. B. (Hg.): The earth as transformed by human action, S. 203-214, Cambridge.
- RUTHSATZ, B. (1989): Anthropogen verursachte Eutrophierung bedroht die schutzwürdigen Lebensgemeinschaften und ihre Biotope in der Agrarlandschaft unserer Mittelgebirge, *NNA-Berichte* (Hg. Norddeutsche Naturschutzakademie Hof Möhr) 2/1, S. 30-35, Schneeverdingen.
- SCHAEFER, M. (1992): Ökologie. Wörterbücher der Biologie, Jena.
- SCHAEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1992): Lehrbuch der Bodenkunde, 13. Aufl., Stuttgart.
- SCHERHORN, G. (1993): Die Notwendigkeit der Selbstbestimmung, *Politische Ökologie Special* Sept./Okt. '93, S. 24-29.
- SCHILLER, H., LENGAUER, E. & GUSENLEITNER, J. (1975): Weitere Daten zum Problem Fruchtbarkeitsstörungen bei Rindern, *Veröff. Landw.-chem. BVA Linz* 10, S. 255-299.
- SCHINDLER, D. W. (1988): Effects of acid rain on freshwater ecosystems, *Science* 239, S. 149-157.
- SCHMACK, E. (1982): Chancen der Umwelterziehung. Grundlagen einer Umweltpädagogik und Umweltdidaktik, Düsseldorf.
- SCHMIDBAUER, W. (1972): Homo consumens. Der Kult des Überflusses, Stuttgart.
- SCHÖNBORN, W. (1992): Fließgewässerbiologie, Jena, Stuttgart.
- SCHÖNBORN, W. (1995): Gewässerökologie, in: STEUBING, L., BUCHWALD, K. & BRAUN, E. (Hg.): Natur und Umweltschutz – Ökologische Grundlagen, Methoden, Umsetzung, S. 45-69, Jena.
- SCHÖNWIESE, C.-D. & DIEKMANN, B. (1991): Der Treibhaus-Effekt. Der Mensch ändert das Klima, Reinbeck, Hamburg.
- SCHRÖDER, W. (1988): Über das Verhältnis des Menschen zu Pflanzen und Tieren, *Forstw. Centralbl.* 107, S. 254-262.
- SCHTEINGART, M. (1991): Wassernot und verpestete Luft, *Umweltprobleme in Mexiko City, Dritte Welt* Presse 8 (1), S. 2 und 7.
- SCHUTZGEMEINSCHAFT DEUTSCHER WALD (1995): Buche gefährdet, *LÖBF-Mitt.*, S. 6., Recklinghausen.
- SCHWARTZ, S. (1988): Wie Pawlow auf den Hund kam: Die 15 klassischen Experimente der Psychologie, Weinheim, Basel.
- SCHWEITZER, A. (1947): Kultur und Ethik. Kulturphilosophie II. Teil, 225 S., München.

- SHUGART, H. H. & BONAN, G. B. (Hg.) (1992): A systems analysis of the global boreal forest, Cambridge u. a.
- SHUKLA, J., NOBRE, C., SELLERS, P. (1990): Amazon deforestation and climate change, *Science* 247, S. 1322-1325.
- SIEFERLE, R. P. (1993): Die Grenzen der Umweltgeschichte, *Gaia* 2 (1), S. 8-21.
- SITTWELL, N. (1983): A land fit for tortoises, The native fauna of the Galapagos Islands is threatened by exotic species, The military may now be called in to redress the balance, *New Scientist* Jan/1983, S. 161-163.
- SLOVIC, P. (1987): Perception of risk, *Science* 236, S. 280-285.
- SMIL, V. (1991): Nitrogen and phosphorus, in: TURNER, B. L., CLARK, W. C., KATES, R. W., RICHARDS, J. F., MATTHEWS, J. T. & MEYER, W. B. (Hg.): *The earth as transformed by human action*, S. 423-436, Cambridge.
- SMITH, R. C., PRÉZELIN, B. B., BAKER, K. S., BIDIGARE, R. R., BOUCHER, N. P., COLEY, T., KARENTZ, D., MACINTYRE, S., MATLICK, H. A., MENZIES, D., ONDRUSEK, M., WAN, Z. & WATERS, K. J. (1992): Ozone depletion: ultraviolet radiation and phytoplankton biology in Antarctic waters, *Science* 255, S. 952-959.
- SOLOMON, S., SANDERS, R. W., GARCIA, R. R. & KEYS, J. G. (1993): Increased chlorine dioxide over Antarctica caused by volcanic aerosols from Mount Pinatubo, *Nature* 363, S. 245-248.
- SPELSBERG, G. (1988): Rauchplage. Zur Geschichte der Luftverschmutzung, Aachen.
- STAHMER, C. (1995): Aufstand der Erbsenzähler. Die Statistik sagt nur die halbe Wahrheit – in Zukunft müssen auch Naturverbrauch und Umweltverschmutzung erfaßt werden, *DIE ZEIT* Nr. 43, 20.10.1995, S. 28.
- STAUFFER, B., LOCHBRONNER, E., OESCHGER, H. & SCHWANDER, J. (1988): Methane concentration in the glacial atmosphere was only half that of the preindustrial Holocene, *Nature* 332, S. 812-814.
- STEELE, L. P., DLUGOKENCKY, E. J., LANG, P. M., TANS, P. P., MARTIN, R. C., MASARIE, K. A. (1992): Slowing down of the global accumulation of atmospheric methane during the 1980s, *Nature* 358, S. 313-316.
- STEIN, W. (1987): Der große Kulturfahrplan. Die wichtigsten Daten der Weltgeschichte. Politik, Kunst, Religion, Wirtschaft, Wissenschaft, München, Berlin.
- STEBING, L. (1993): Der Eintrag von Schad- und Nährstoffen und dessen Wirkung auf die Vergrasung der Heide. *Ber. Reinh. Tüxen-Ges.* 5, S. 113-133.
- STEBING, L. (1995a): Einführung in die Ökologie, in: STEUBING, L., BUCHWALD, K. & BRAUN, E. (Hg.): *Natur und Umweltschutz – Ökologische Grundlagen, Methoden, Umsetzung*, S. 17-44, Jena, Stuttgart.
- STEBING, L. (1995b): Die Ostsee, in: STEUBING, L., BUCHWALD, K. & BRAUN, E. (Hg.): *Natur und Umweltschutz – Ökologische Grundlagen, Methoden, Umsetzung*, S. 95-99, Jena, Stuttgart.
- STEBING, L. (1995c): Immissionsökologie, in: STEUBING, L., BUCHWALD, K. & BRAUN, E. (Hg.): *Natur und Umweltschutz – Ökologische Grundlagen, Methoden, Umsetzung*, S. 328-363, Jena, Stuttgart.
- STOCKER, T. R. & WRIGHT, D. G. (1991): Rapid transitions of the ocean's deep circulation induced by changes in surface water fluxes, *Nature* 351, S. 729-732.
- STODDARD, D. R. (1968): Catastrophic human interference with coral atoll ecosystems, *Geography* 53, S. 25-40.
- STOLARSKI, R. S. (1988): Das Ozonloch über der Antarktis, *Spektr. Wissensch.* März 1988, S. 70-77.

- STOLARSKI, R. S., BLOOMFIELD, P., MC PETERS, R. D. & HERMAN, J. R. (1991): Total ozone trends deduced from Nimbus 7 TOMS Data, *Geophys. Res. Letters* 18, S. 1015-1018.
- STOLARSKI, R., BOJKOV, R., BISHOP, L., ZEREFOS, C., STAEHELIN, J. & ZAWODNY, J. (1992): Measured trends in stratospheric ozone, *Science* 256, S. 342-349.
- STOUFFER, R. J., MANABE, S., BRYAN, K. (1989): Interhemispheric asymmetry in climate response to a gradual increase of atmospheric CO₂, *Nature* 342, S. 660-662.
- STREY, G. (1989): *Umweltethik und Evolution. Herkunft und Grenzen moralischen Verhaltens gegenüber der Natur*, Göttingen.
- SWANK, W. T. & DOUGLAS, J. E. (1974): Streamflow greatly reduced by converting deciduous hardwood stands to pine, *Science* 18, S. 857-859.
- TAINTER, J. A. (1988): *The collapse of complex societies*, Cambridge.
- TAMM, C. O. (1991): Nitrogen in terrestrial ecosystems: questions of productivity, vegetational changes, and ecosystem stability, *Ecol. Stud.* 81, Berlin.
- TANS, P. P., FUNG, I. Y. & TAKAHASHI, T. (1990): Observational constraints on the global atmospheric CO₂ Budget, *Science* 247, S. 1431-1438.
- TAYLER, S. E. & BROWN, D. J. (1988): Illusion and well-being: a social psychological perspective on mental health, *Psychol. Bull.* 103 (2), S. 193-210.
- TEVINI, M. (1992): Erhöhte UV-B-Strahlung. Ein Risiko für Pflanzen?, *Global Change Prisma* 3 (4), S. 4-6.
- THEML, H. (1990): Bewältigung und Verdrängung von Krankheiten und Umweltkatastrophen. Analogien in der Wahrnehmung von Körper und Umwelt, in: BASTIAN, T. & BONHOEFFER, K. (Hg.): *Thema: Mobilität. Wege zu einer sozial verpflichteten Medizin*, S. 40-62, (Edition Universitas) Stuttgart.
- THIRGOOD, J. V. (1981): *Man and the mediterranean forest – a history of resource depletion*, London.
- THOMAS, V. (1991): Lehren aus der Wirtschaftsentwicklung – Finanzierung und Entwicklung 28 (3), S. 6-9.
- TILLMANN, P. (1996): Globale und lokale Einflußfaktoren auf die bodennahe CO₂-Konzentration in einem urban geprägten Meßgebiet, Diplomarbeit Universität Osnabrück.
- ULRICH, B. (1982): Gefahren für das Waldökosystem durch saure Niederschläge, *Mitt. Landesanst. Ökol. Nordrhein-Westfalen*, Sonderheft.
- ULRICH, B. (1990): Waldsterben: forest decline in West Germany, *Environmental Science and Technology* 24 (4), S. 436-441.
- UMWELTBUNDESAMT (Hg.) (1994), *Umweltdaten 1994*, Berlin.
- VAN ANDEL, T. H., ZANGGER, E. & DEMITRACK, A. (1990): Land use and soil erosion in prehistoric and historical Greece, *Journ. Field. Archaeol.* 17, S. 379-396.
- VERBEEK, B. (1994): *Die Anthropologie der Umweltzerstörung. Die Evolution und der Schatten der Zukunft*, Darmstadt.
- VITOUSEK, P. M., EHRLICH, P. R. EHRLICH, A. H. & MATSON, P. A. (1986): Human appropriation of the products of photosynthesis, *BioScience* 36 (6), S. 368-373.
- VOGEL, C. (1988): Gibt es eine natürliche Moral? Oder: Wie unnatürlich ist unsere Ethik?, in: MEIER, H. (Hg.): *Die Herausforderung der Evolutionsbiologie*, S. 193-219, München, Zürich.

- VOLZ, A. & KLEY, D. (1989): Evaluation of the montsouris series of ozone measurements made in the nineteenth century, *Nature* 332, S. 240-242.
- VORHOLZ, F. (1993): Langer Abschied vom Frevel, *DIE ZEIT* Nr. 43, 27.10.1993, S. 33-35.
- WALLETSCHKE, H. & GRAW, J. (Hg.) (1992): *Öko-Lexikon, Stichworte und Zusammenhänge*, 250 S., München.
- WALTER, H. & BRECKLE, S. W. (1984): *Ökologie der Erde, Bd. 2, Spezielle Ökologie der Tropischen und Subtropischen Zonen*, 461 S., Stuttgart.
- WEARE, B. C., TEMKIN, R. L., & SNELL, C. M. (1974): Aerosols and climate; some further considerations, *Science* 186, S. 827-828.
- WEGENER, H.-J. (1980): Überlegungen zur Diskussion um Regenwälder und Tropenholz-Boycott, *Natur- und Landschaftskunde* 1, S. 7-10.
- WEIGMANN, G., TROMMER, G. & WEIGELT, C. (Hg.) (1995): *Lernen für die Umwelt – Konzepte und Leitlinien*, Beih. 3, *Verhandl. Ges. f. Ökol.*, 120 S., Berlin.
- WEIGMANN, G., TROMMER, G. & GEBHARD, U. (1995): *Leitlinien zum Ökologie-Unterricht*, in: WEIGMANN, G., TROMMER, G. & WEIGELT, C. (Hg.): *Lernen für die Umwelt – Konzepte und Leitlinien*, Beih. 3, *Verhandl. Ges. f. Ökol.*, S. 3-13, Berlin.
- WELLBURN, A. (1988): *Air pollution and acid rain: the biological impact*, London.
- WELTBANK (1992): *Weltentwicklungsbericht 1992. Entwicklung und Umwelt. Kennzahlen der Weltentwicklung*, Bonn, Frankfurt/M., Wien.
- WELTZIEN, H. C. (1977): *Phytomedizin – ein Beruf ohne Ausbildung*, *Zeitschr. Pflanzenkrankh. Pflanzensch.*, Sonderheft 8, S. 25-30.
- WENZEL, B. & ULRICH, B. (1989): Auswirkungen einer Optimierung des Bodenzustands durch Meliorationskalkung. Verbindung mit Bodenbearbeitung, *Posterbeitrag Intern. Kongreß Waldschadensforschung Friedrichshafen*, zit. nach REHFUESS (1995).
- WESSELS, W. (1995): *Waldzustand bleibt kritisch*, *LÖPF-Mitteilungen* 4, S. 10-13, Recklinghausen.
- WHITMORE, T. C. (1993): *Tropische Regenwälder: eine Einführung*, Heidelberg, Berlin, New York.
- WHITMORE, T. M., TURNER, B. L., JOHNSON, D. L., KATES, R. W. & GOTTSCHANG, T. R. (1991): Long-term population change, in: TURNER, B. L., CLARK, W. C., KATES, R. W., RICHARDS, J. F., MATTHEWS, J. T. & MEYER, W. B. (Hg.): *The earth as transformed by human action*, S. 25-39, Cambridge.
- WICKE, L. & BRUNOWSKY, R. D. (1984): *Der Öko-Plan*, München.
- WIEDEY, K. & ULRICH, B. (1989): Effect of liming and fertilization on a 70-year-old-spruce stand, *Posterbeitrag Intern. Kongreß Waldschadensforschung Friedrichshafen*, zit. nach REHFUESS (1995).
- WIGLEY, T. M. L. & RAPER, S. C. B. (1992): Implications for climate and sea level of revised IPCC emissions scenarios, *Nature* 357, S. 293-300.
- WIGLEY, T. M. L. (1983): The pre-industrial carbon dioxide level, *Climatic Change* 5, S. 315-320.
- WIJKMAN, A. & TIMBERLAKE, L. (1986): *Die Rache der Schöpfung. Naturkatastrophen – Verhängnis oder Menschenwerk?*, München.
- WILLEN, T. (1972): The gradual destruction of Sweden's Lakes, *Ambio* 1, S. 6-14.
- WILLIAMS, M. (1989): *Americans and their forests*, Cambridge.

- WILMANN, O. (1977): Die Bedrohung der Natur und die wissenschaftlichen Aufgaben ihres Schutzes, Universitas 1977, S. 519-536.
- WILSON, A. T. (1978): Pioneer agriculture explosion and CO₂-levels in the atmosphere, Nature 273, S. 40-41.
- WILSON, E. J., WELLS, T. C. E. & SPARKS, T. H. (1995): Are calcareous grasslands in the UK under threat from nitrogen deposition? an experimental determination of critical loads, Journ. Ecol. 83, S. 823-832.
- WILSON, E. O. (1980): Biologie als Schicksal. Die soziobiologischen Grundlagen menschlichen Verhaltens, Berlin, Frankfurt/M.
- WILSON, E. O. (1989): Bedrohung des Artenreichtums, Spektr. Wissensch. 11, S. 88-95.
- WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT der Bundesregierung "Globale Umweltveränderungen" (1993): Grundstruktur globaler Mensch-Umwelt-Beziehungen, Jahresgutachten 1993, Bonn.
- WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT der Bundesregierung "Globale Umweltveränderungen" (1996): Welt im Wandel: Wege zur Lösung globaler Umweltprobleme, Jahresgutachten 1995, Berlin u. a.
- WMO (World Meteorological Organization) (1992): Scientific assessment of ozone depletion 1991 – Global ozone research and monitoring project Report No. 52. Genf, zit. nach WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT der Bundesregierung "Globale Umweltveränderungen" (1993).
- WÖHLCKE, M. (1992): Umweltflüchtlinge. Ursachen und Folgen, München.
- WONG, C. S. (1978): Atmospheric input of carbon dioxide from burning wood, Science 200, S. 197-199.
- WOODWELL, G. M. (1979): Das Kohlendioxid-Problem, Spektr. Wissensch. 1, S. 10-19.
- WORTHINGTON, E. B. (1977): Arid land irrigation in developing countries: environmental problems and effects, Oxford.
- WUKETITS, F. M. (1981): Biologie und Kausalität: biologische Ansätze zur Kausalität, Determination und Freiheit, Berlin, Hamburg.
- WUTTKE, J. (1995) Ökologie der Abfallwirtschaft, in: STEUBING, L., BUCHWALD, K. & BRAUN, E. (Hg.): Natur und Umweltschutz – Ökologische Grundlagen, Methoden, Umsetzung, S. 295-327, Jena, Stuttgart.
- ZISWILER, V. (1965): Bedrohte und ausgerottete Tiere, Berlin, Heidelberg, New York.
- ZOLLER, H. & HAAS, J. N. (1995): War Mitteleuropa ursprünglich von einer halboffenen Weidelandschaft oder von geschlossenen Wäldern bedeckt?, Schweiz. Z. Forstwes. 146 (5), S. 321-354.

Unsere Umwelt ist unteilbar und gehört allen, ob arm oder reich, ob den heutigen oder den zukünftigen Generationen. Der Mensch darf nicht Opfer seines eigenen Handelns werden. In Wirklichkeit ist es keine Krise der Umwelt, sondern eine Krise der Menschheit.

Anselm Kratochwil

ISBN 3-89674-109-1 (Gesamtausgabe)

ISBN 3-89674-111-X (Band 2) 24.00

ISSN 0934-6007