

DIE ROLLE DER KLIMASZENARIENANALYSE IN DER WIRKUNGSFORSCHUNG

Mit 8 Abbildungen und 3 Tabellen

WILFRID BACH

Summary: The role of climate scenario analysis in impact research

Man's activities have reached proportions which can have adverse impacts on climate. These can be assessed indirectly by using warm-world scenarios as analogs of a future warmer world, or more directly by climate model-derived scenarios driven by CO₂ and other forcing functions. In this paper emphasis is placed on developing climate scenarios from general circulation models as a basis for impact research. It is made clear that such climate scenarios should neither be construed as predictions of regional climatic change nor as forecasts of forthcoming climatic events, but rather as a set of self-consistent and plausible patterns of climatic change. Irrespective of the inherent uncertainties it is important to continue with the development of the appropriate methodology so that the scenario-derived climatic input is available for impact analysis when it is needed. The ultimate goal is community preparedness, i. e. to have available an optimal strategy that can respond with flexibility to potential climatic risks.

1. Einleitung

Es besteht wenig Grund daran zu zweifeln, daß durch den weiteren Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre und die zusätzliche Wirkung anderer Einflußfaktoren das globale Klima in zunehmendem Maße beeinflusst wird. Um auf die möglicherweise weitreichenden Folgen einer Klimabeeinflussung und einer daraus resultierenden Klimaänderung für die Gesellschaft vorbereitet zu sein, ist es geboten, sich rechtzeitig von dem potentiellen Ausmaß ein möglichst genaues Bild zu machen. Das ist umso dringlicher, weil bei den langen Umstellungszeiten gesellschaftlicher Systeme (50 bis 100 Jahre) Entscheidungen von heute bereits Festlegungen für die fernere Zukunft bedeuten. Die Klimaszenarienanalyse kann die Grundlagen für eine sachliche Bewertung möglicher Zukunftsrisiken und die Notwendigkeit und Angemessenheit von einzuleitenden Vorsorgemaßnahmen schaffen. Sie ist die Voraussetzung für eine effektive Klimawirkungsforschung.

Im folgenden gehe ich zunächst auf die Aufgabe der Klimawirkungsforschung ein und beschreibe dann anhand von spezifischen Beispielen die Vorgehensweise der Klimaszenarienanalyse. Die wichtigsten Bestandteile einer solchen Szenarienanalyse sind Klimamodellrechnungen und Analogstudien aus der jüngeren und älteren Klimavergangenheit. Im Mittelpunkt dieser Betrachtung stehen die Klimamodellrechnungen, da nur mit ihrer Hilfe der CO₂-Effekt auf das Klima explizit erfaßt werden kann. Analogstudien, die zwar auch den CO₂-Einfluß einschließen können, meist aber auf einer Vielzahl anderer Effekte beruhen, können deshalb zwar eine wichtige Ergänzung, nicht aber einen Ersatz für Klimamodellrechnungen darstellen. Aus den bisherigen Er-

gebnissen präsentiere ich hier eine Auswahl, die am besten die jeweilige Vorgehensweise widerspiegelt.

2. Klimawirkungsforschung: Aufgabe

Der Hauptzweck der Klimawirkungsforschung ist es, die Wechselwirkungen zwischen Klima und Gesellschaft aufzuzeigen. Dabei gilt es, in ausreichendem Detail die Folgen einer Klimaänderung und Klimavariabilität, die durch beabsichtigte oder unbeabsichtigte Handlungen des Menschen ausgelöst werden, auf Gesellschaft und Lebensraum abzuschätzen. Die Ergebnisse einer solchen Systemanalyse können die Entscheidungsträger bei der rationalen Entscheidungsfindung unterstützen. Abb. 1 zeigt die Komplexität eines solchen vernetzten Regelsystems, das speziell für die CO₂-Klimawirkungsforschung entwickelt wurde. Aus der Annahme verschiedener Szenarien für den Verbrauch fossiler Brennstoffe, die Abholzung der Wälder und die Bodenbearbeitung ergeben sich entsprechende CO₂-Zunahmen in der Atmosphäre. Diese CO₂-Anstiege wirken zusammen mit anderen im infraroten Spektralbereich absorbierenden Gasen und Aerosolen auf alle Teilkomponenten des Klimasystems ein und bewirken über komplizierte Rückkopplungsmechanismen in der unteren Atmosphäre eine Erwärmung, in der Stratosphäre aber eine Abkühlung. Aus dieser Beeinflussung von Wetter und Klima ergeben sich regional und jahreszeitlich ganz unterschiedliche Temperatur-, Niederschlags- und Bodenfeuchtigkeitsverteilungen etc. Daraus ergeben sich Auswirkungen auf die unterschiedlichsten sozio-ökonomischen Bereiche, wie z. B. die Energieversorgung, die Nahrungsmittelproduktion, die Wasserversorgung, Fischfang, Landnutzung, Gesundheit und Freizeitgestaltung, etc. Aus den sozio-ökonomischen Auswirkungen ergeben sich schließlich Rückwirkungen auf das gesamte gesellschaftliche System. Das erfordert politische Entscheidungen, um rechtzeitig über Vorsorgemaßnahmen unerwünschte Klimaauswirkungen zu verhindern oder wenigstens zu mildern (BACH 1982/1984).

3. Klimaszenarienanalyse: Vorgehensweise

Die Szenarienanalyse bildet die Grundlage für die Klimawirkungsforschung. Dabei geht es um die Entwicklung von möglichst vollständigen und in sich konsistenten Sub-Szenarien im physiko-chemischen, biologischen und sozialen Bereich. Das erfordert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit über die engen Grenzen der fachlichen Disziplinen

Tabelle 1: Jahres- und jahreszeitliche Mittel der Temperaturunterschiede (K) im europäischen Raum (30°N–70°N und 20°W–20°E) für die Szenarien A und B nach Lough und Wigley (1981)

Annual and seasonal means of the temperature (K) differences in Europe (30°N–70°N and 20°W–20°E) for Scenarios A and B after Lough and Wigley (1981)

Mittel	Szenario A	Szenario B
Jahr	0.4	0.5
Winter	0.4	0.3
Frühjahr	0.4	0.4
Sommer	0.6	0.5
Herbst	0.6	0.7

den, die auf den beobachteten Daten der letzten 100 Jahre beruhen, gehören:

- die Untersuchung aufeinanderfolgender warmer und kalter Jahre in der Arktis (WILLIAMS 1980),
- die Analyse von Gruppen warmer und kalter Jahre in der Arktis (JÄGER a. KELLOGG 1983),
- die Auswertung einzelner warmer und kalter Jahre in der Arktis (WIGLEY et al. 1980) und die Weiterentwicklung dieses Ansatzes durch LOUGH und WIGLEY (1981), LOUGH et al. (1983) und PALUTIKOF et al. (1984), wobei die Jahresmittel für Temperatur, Niederschlag und Druck der fünf wärmsten und fünf kältesten Jahre in der Arktis für die Periode 1925–1978 berechnet und voneinander subtrahiert werden (Szenario A), sowie
- die Auswahl der 20 wärmsten und kältesten aufeinanderfolgenden Jahre auf der Nordhalbkugel zwischen 1901 und 1980 (Szenario B). Durch Szenario A bleiben die kurzzeitigen Klimafluktuationen erhalten, während sie durch Szenario B ausgeschaltet werden.

In Tab. 1 werden die Ergebnisse von Szenario A und Szenario B miteinander verglichen. Die Analyse dieser Temperaturänderungen basiert auf den von JONES et al. (1982) auf 5° Breite und 10° Länge bezogenen Datenzusammenstellungen. Die flächengemittelten Unterschiede (d. h. die Mittel aller Gitterpunkte) zwischen den warmen und kalten Jahren betragen für beide Szenarien zwischen 0.3 und 0.7K, wobei,

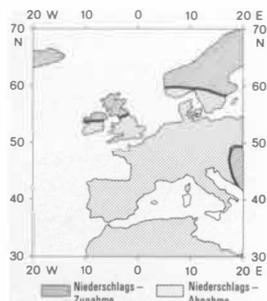


Abb. 2: Änderungen der mittleren Jahresniederschlagsrate für das Szenario A

Nach: WIGLEY et al. (1980)

Changes in the annual mean precipitation rate for Scenario A

abgesehen vom Herbst und dem Jahresmittel, die Temperaturänderungen in Szenario A größer als in Szenario B sind.

Die Unterschiede zwischen warmen und kalten Jahren in den jährlichen mittleren Niederschlagsraten sind in Abb. 2 für das Szenario A dargestellt. Die Niederschlagszunahme über Nordwest- und Nordeuropa spiegelt die in einer wärmeren Welt zu erwartende verstärkte Zyklonenaktivität wider, während die übrigen Regionen mit Niederschlagsabnahme unter den zunehmenden Einfluß von blockierenden Antizyklonen kommen.

3.2. Analogstudien aus der älteren Klimavergangenheit

Dafür eignen sich insbesondere:

- das frühe und mittlere Pliozän (ca. 5–3 MaBP*) mit einer um ungefähr 4 °C höheren mittleren globalen Temperatur als heute (BUDYKO a. YEFIMOVA 1981, BIERLY a. BOLDYREV 1982),
- die Eem-Sangamon-Warmzeit (ca. 125 000 aBP) unmittelbar vor der letzten Eiszeit mit einer um 2–2,5 °C höheren mittleren globalen Temperatur gegenüber heute (FLOHN 1980),
- die Warmzeit Altitherm oder Hypsitherm im Holozän (ca. 5000–8000 aBP), die wärmste Periode seit der letzten Eiszeit mit einer um ungefähr 1,5 °C höheren mittleren globalen Temperatur als heute (KELLOGG a. SCHWARTZ 1981, KELLOGG 1983),

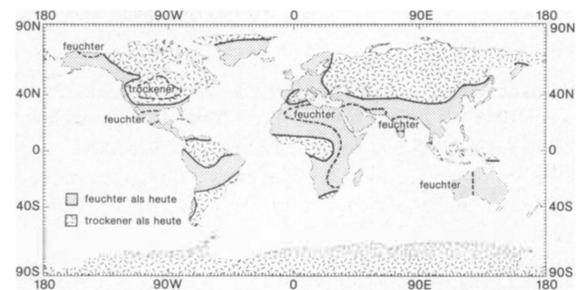


Abb. 3: Szenario für die mögliche Bodenfeuchteverteilung in einer wärmeren Welt. Es basiert auf der Rekonstruktion der Warmzeit im Holozän, dem Vergleich beobachteter warmer und kalter Jahre auf der Nordhalbkugel in den vergangenen hundert Jahren und Berechnungen mit dem NCAR-Klimamodell. Gebiete mit übereinstimmender Tendenz in zwei oder mehr der angewandten Methoden sind gestrichelt und mit „feuchter“ oder „trockener“ gekennzeichnet

Quelle: KELLOGG (1983)

Example of a scenario of possible tendencies of soil moisture on a warming Earth. It is based on paleo-climatic reconstructions of warm periods in the distant past, comparisons between recent warm and cold years or seasons in the Northern Hemisphere, and a climate model experiment (NCAR). Where there seems to be general agreement on the tendency between two or more of these sources the area of agreement is indicated with a dashed line and a label

*1) MaBP = Millionen Jahre vor der Jetztzeit

Tabelle 2: Übersicht über die Charakteristika der mit Hilfe von allgemeinen Zirkulationsmodellen durchgeführten CO₂-Sensitivitäts-Experimente (nach Schlesinger (1983) und auf den neuesten Stand ergänzt)

Overview of the criteria for and characteristics of general circulation models used in CO ₂ -induced climatic change studies							
Forschungsstätte/ Forscher	Geographie	Topographie	Räumliche Auflösung	Jahres- zyklus	Ozean/Meereis	CO ₂ - Simulation	Anstieg der Lufttemp. (K) durch CO ₂ ¹⁾
1. GFDL Manabe, Wetherald (1975)	idealisiert	keine	V: 9 Schichten H: Äq. bis 81.7°, λ = 120° Sektor (ΔΦ = variabel, Δλ = 6°)	nein	als Sumpf (weder Wärmekapazität noch Transport)/ Eisbedeckung vorhergesagt	2×CO ₂	2.9
2. GFDL Manabe, Wetherald (1980)	idealisiert	keine	V: 9 Schichten, H: Äq. zum Pol, λ = 120° Sektor (ΔΦ = 4,5°, Δλ = 5°)	nein	dasselbe wie 1	2×CO ₂	3.0
3. GFDL Manabe, Stouffer (1980); Manabe, Wetherald, Stouffer (1981)	realistisch	realistisch	V: 9 Schichten, H: Pol zu Pol, λ = 360° (spektr.)	ja	als 68 m tiefe Mischungsschicht (kein horizontaler Wärmetransp.)/ Eisbedeckung vorhergesagt	4×CO ₂	4.0
4. OSU Gates, Cook, Schlesinger (1981)	realistisch	realistisch	V: 2 Schichten, H: Pol zu Pol, λ = 360° (ΔΦ = 4°, Δλ = 5°)	ja	als klimatologisch. Ozean mit vorge- schriebenen Ozean- oberflächentemp./ Eisbedeckung vorgeschrieben	2×CO ₂ 4×CO ₂	0.2 0.4
5. OSU Schlesinger (1983)	realistisch	realistisch	dasselbe wie 4.	nein	dasselbe wie 1.	2×CO ₂	2.0
6. NCAR Washington, Meehl (1983)	realistisch	realistisch	V: 9 Schichten, H: Pol zu Pol, λ = 360° (spektr.)	nein	dasselbe wie 1.	2×CO ₂ 2×CO ₂	1.3 ²⁾ 1.4 ³⁾
7. NCAR Washington, Meehl (1984)	realistisch	realistisch	dasselbe wie 6.	ja	als 50 m tiefe Mischungsschicht (kein horizontaler Wärmetransp.)/ Eisbedeckung vor- hergesagt	2×CO ₂	3.5
8. BMO Mitchell (1983)	realistisch realistisch	realistisch realistisch	V: 5 Schichten, H: Pol zu Pol, λ = 360°, 330 km	ja ja	als klimatologi- scher Ozean mit vorgeschriebenen Ozeanoberflächen- temp. + 2K/Eisbe- deckung vorge- schrieben	2×CO ₂ 2×CO ₂	0.2 2.2
9. BMO Mitchell, Lupton (1984)	realistisch	realistisch	dasselbe wie 8.	ja	dasselbe wie 8. aber mit breiten- abhängigen Tem- peraturzugaben/ Eisbedeckung vor- hergesagt	4×CO ₂	4.5
10. GISS Hansen et al. (1984)	realistisch	realistisch	V: 9 Schichten, H: Pol zu Pol, λ = 360° (ΔΦ = 8°, Δλ = 10°)	ja	als 60–70 m tiefe Mischungsschicht mit vorgeschrie- bener jahreszeitl. Tiefe u. horizont. Transport/Eis- dicke vorhergesagt	2×CO ₂	4.2

11. OSU Gates et al. (1984); Schlesinger et al. (1985)	realistisch	realistisch	dasselbe wie 4.	ja	intern berechnet	2×CO ₂	1.5
12. OSU Gates, Potter (1985)	realistisch	realistisch	dasselbe wie 4.	ja	intern berechnet	2×CO ₂	1.5

V: vertikale Auflösung; H: horizontale Auflösung; Φ , λ : Breite, Länge

1) Es ist wahrscheinlich, daß die Integration einiger Modelle noch nicht bis zum Erreichen des Gleichgewichts durchgeführt worden ist;

2) Wolken (vorgeschrieben); 3) Wolken (vorhergesagt)

BMO: British Meteorological Office, Bracknell, UK

GFDL: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, USA

GISS: Goddard Institute for Space Studies, New York, USA

NCAR: National Center for Atmospheric Research, Boulder, USA

OSU: Oregon State University, Corvallis, USA

– die mittelalterliche Warmzeit (ca. 900–1050 AD), die um rd. 1°C wärmer war als heute (FLOHN 1980).

Abb. 3 zeigt als Beispiel die Rekonstruktion der Verteilung von Niederschlag und Bodenfeuchte. Dabei kommt eine Kombination von Vorgehensweisen zur Anwendung, nämlich der Vergleich von Proxi-Daten aus dem Holozän (wie z.B. Pollen und Sporen in Ablagerungen von Seen und Mooren sowie Seespiegel- und Flußvoluminaschwankungen) mit Warmperioden in den meteorologischen Meßreihen sowie mit Klimamodellrechnungen. Gebiete, für die zwei oder mehr der benutzten Quellen eine Übereinstimmung ergaben, sind durch gestrichelte Linien eingegrenzt und mit dem Ausdruck „feuchter als heute“ oder „trockener als heute“ gekennzeichnet. Sähe auch eine CO₂-induzierte wärmere zukünftige Welt so aus, könnte das weitreichende Folgen haben. Sowohl die amerikanischen als auch die russischen Kornkammern würden trockener. Das stimmt auch mit den Modellrechnungen von MANABE et al. (1981) überein. Dagegen könnten einige subtropische Trockengebiete, z.B. in Afrika, im Nahen und Mittleren Osten, in Australien und Mittelamerika, feuchter werden, was sich günstig auf die landwirtschaftlichen Erträge auswirken würde. Ohne Zweifel ist diese Art von synthetischen Szenarienanalysen wichtig und sollte deshalb fortgesetzt werden.

3.3. Klimamodellrechnungen

Ohne eine jahreszeitlich und regional differenzierte quantitative Abschätzung der durch CO₂-Einwirkung veränderten Klimaparameter, kann keine sinnvolle und damit aussagekräftige Wirkungsanalyse durchgeführt werden. Dazu bedarf es dreidimensionaler Zirkulationsmodelle der Atmosphäre (atmospheric general circulation models (AGCM)) und der Kopplung mit einem Ozeanmodell. Denn nur mit Hilfe von Klimamodellen läßt sich der Effekt von CO₂ oder auch anderer Einflußfaktoren auf das Klima explizit erfassen. Simulationsexperimente mit diesen Modellen werden wegen der immens hohen Computerkosten nur an einigen wenigen Forschungszentren durchgeführt.

Der Ozean übt wegen seiner hohen Wärmekapazität einen großen Einfluß auf das Klima aus, und diesen Einfluß

gilt es möglichst realistisch zu simulieren. Der Berechnung der Ozean-Oberflächentemperatur (OOT) gilt dabei ein besonderes Augenmerk, da sie sowohl durch die Ozeanzirkulation als auch durch den Energieaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre bestimmt wird. Da eine explizite Berechnung der OOT wegen der großen Unterschiede in der thermischen Trägheit zwischen Ozean und Atmosphäre sehr viel Rechenzeit erfordert, sind Modelle unterschiedlicher Komplexität zur Modellierung dieses Parameters entwickelt worden. Wie im folgenden gezeigt wird, ist die Art der Modellierung entscheidend für die Sensitivität des Modellklimas gegenüber CO₂-Änderungen. (SCHLESINGER 1983). Bisher unterschieden wir folgende Modellansätze, bei denen das atmosphärische Zirkulationsmodell (AGCM) gekoppelt ist mit

- einem „klimatologischen Ozean“ („climatological ocean model“),
- einem Ozean als „Sumpf“ („swamp model“),
- einem Ozean bestehend aus einer vorgegebenen Mischungsschichttiefe („slab model“),
- einem Ozean bestehend aus einer variablen Mischungsschichttiefe („variable depth mixed layer model“) und
- einer expliziten Modellierung der Ozeanzirkulation („ocean general circulation model“ (OGCM)).

Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale aller bisher für CO₂-Sensitivitätsstudien herangezogenen GCMs sind in Tab. 2 zusammengestellt. Die einzelnen Modelle unterscheiden sich vorwiegend durch die Art und Weise wie der Jahreszyklus, die räumliche Auflösung, Ozean und Meereis, und die Strahlungsprozesse sowie der hydrologische Zyklus in Betracht gezogen werden. Bei Modellen ohne Wärmeaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre (klimatologischer Ozean) ist die Temperaturzunahme bei einer CO₂-Verdopplung in der Regel um eine Größenordnung geringer als bei den realistischen Modellkonzepten.

4. Entwicklung von Klimaszenarien

Die Entwicklung von Klimaszenarien dient in diesem Beitrag der Identifizierung regionaler CO₂-induzierter Klimaänderungen. Zur Absicherung der regionalen Verteilung

lungsmuster der Klimaänderungen ist es angebracht, nicht nur die Simulation von einem Klimamodell, sondern die Ergebnisse aus einer Reihe von Modellexperimenten zu Vergleichszwecken heranzuziehen.

Die Anwendbarkeit der Klimamodelle in der regionalen Szenarienanalyse zur Erfassung von Klimaauswirkungen hängt u. a. davon ab, ob sie

- eine realistische Geographie und Topographie besitzen,
- eine hohe räumliche Auflösung haben,
- eine ausreichende zeitliche Auflösung aufweisen,
- den Atmosphäre-Ozean-Eis-Feedback berücksichtigen,
- die beobachtete Verteilung der Klimaelemente hinreichend genau simulieren,
- schon in CO₂-Sensitivitätsexperimenten angewendet worden sind und ob sie
- neben den einfachen Klimaparametern (wie z. B. Temperatur, Niederschlag, Bodenfeuchte etc.) auch komplexere Parameter (wie z. B. Länge der Frost- und Wachstumsperiode, Anzahl der Tage mit Temperatur- oder Feuchte-streß, Heiz- und Kühlgradtage, Häufigkeit von Extrema, etc.) berechnet haben.

Die folgenden Beispiele entstammen einer ausführlichen Arbeit, die im Auftrag der EG und der DFVLR durchgeführt worden ist (BACH et al. 1985).

4.1. Modellverifizierung

Ehe Klimamodelle für eine regionale Wirkungsanalyse Verwendung finden können, muß das Modellklima zuvor auf dem regionalen Scale verifiziert werden. Auf dieser Scale können die Unterschiede zwischen den Modelldaten und den gemessenen Klimadaten nicht nur auf ungenügender Modelleistung, sondern auch auf der unterschiedlichen Datenverteilung in den Gittersystemen und auf Eigenheiten der Datenerfassung beruhen. So zeigt z. B. der Vergleich der gebräuchlichsten Datenserien (nämlich die Daten von Möller, Jäger und der Akademie der Wissenschaften der UdSSR)

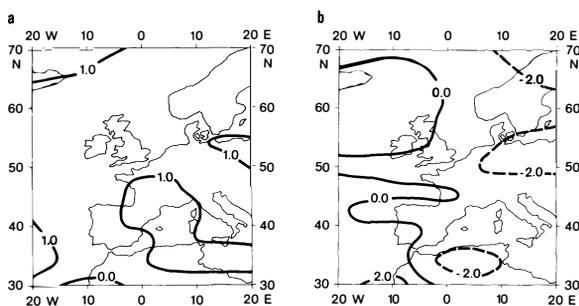


Abb. 4a-b: Modellverifizierung dargestellt als Differenzen zwischen den vom GISS-Modell berechneten und den beobachteten Daten. a: Temperatur (K) (SCHUTZ a. GATES 1971-1974); b: Niederschlag (mm/Tag) (JÄGER 1976)

Model validation in terms of the differences between the model-generated annual climate by the GISS-model and the observed climate; a: temperature (K) (SCHUTZ a. GATES 1971-1974); b: precipitation rate (mm/day) (JÄGER 1976).

für die mittleren jährlichen Niederschlagsraten regionale Abweichungen bis zu 0,5 mm/Tag.

Als Beispiel einer Modellverifizierung zeigt Abb. 4a die Unterschiede zwischen der GISS Modell-Simulation (dem Kontroll-Experiment) und der gemessenen mittleren jährlichen Temperaturverteilung; Abb. 4b stellt die Unterschiede für die Niederschlagsverteilung dar. Über der westlichen Hälfte des Untersuchungsgebiets stimmen gemessene und simulierte Temperaturwerte nahezu überein. In der östlichen Hälfte sind die simulierten Werte um rd. 2K niedriger als die gemessenen. Die simulierten Niederschlagsraten sind fast über dem gesamten Untersuchungsgebiet um 1mm/Tag höher als die gemessenen. Offenbar hat das GISS/Modell einen zu stark ausgeprägten hydrologischen Zyklus.

Diese Ergebnisse müssen mit der gebotenen Vorsicht interpretiert werden, insbesondere deswegen, weil hier globale Klimamodelle auf einen relativ kleinen regionalen Raum angewandt worden sind. Auf der Grundlage dieser Verifizierung durchgeführte CO₂-Sensitivitäts-Experimente mögen aber trotzdem nützlich sein, da sie eine allgemeine Vorstellung von den in einer wärmeren Welt zu erwartenden Änderungen geben können. Dies allein rechtfertigt schon ihre Anwendung auch wenn verlässliche Details in den regionalen Änderungen gegenwärtig von den GCM noch nicht erbracht werden können (WILSON a. MITCHELL 1984, BACH 1984a, b).

4.2. Regionale und jahreszeitliche Verteilungen der Klimaänderungen

Abb. 5a-e zeigt für das GISS-Modell die regionalen Verteilungen der Temperaturänderungen bei einer CO₂-Verdopplung für das Jahresmittel und die vier Jahreszeiten. Die möglichen Temperaturzunahmen liegen zwischen 3 und 6°C. Die größte Erwärmung mit mehr als 5°C ist danach im Winter über Nord- und Nordosteuropa und in allen anderen Jahreszeiten über Nordafrika zu erwarten. Der starke Temperaturanstieg über Nordosteuropa ist im Zusammenhang mit der Abnahme der Schneedecke vom Herbst bis in das Frühjahr hinein und mit einer verstärkten zonalen Zirkulation zu sehen (MITCHELL 1983). Die Temperaturzunahme über Nordafrika ist als Ergebnis der polwärtigen Verlagerung des subtropischen Hochs zu verstehen. Durch verstärkte Absinkprozesse nimmt die Niederschlagsrate ab. Dadurch werden sowohl Bodenfeuchtigkeit als auch Verdunstung geringer, so daß mehr Energie zur Erwärmung der bodennahen Luftschicht zur Verfügung steht. Wie das gepunktete Raster zeigt, sind die Änderungen über dem gesamten Untersuchungsgebiet auf dem 5% Niveau signifikant.

Die regionalen und zeitlichen Änderungen der Niederschlagsverteilung für eine CO₂-Verdopplung sind in Abb. 6a-e dargestellt. Niederschlagsabnahmen haben gestrichelte Isohyethen. Mit Ausnahme des Herbstes sind Niederschlags-einbußen vorwiegend im Südwesten und die größten Niederschlagszunahmen überwiegend in den nördlichen Regionen zu erwarten. Diese Änderungen stimmen zum großen Teil mit den vermuteten Zirkulationsänderungen überein,

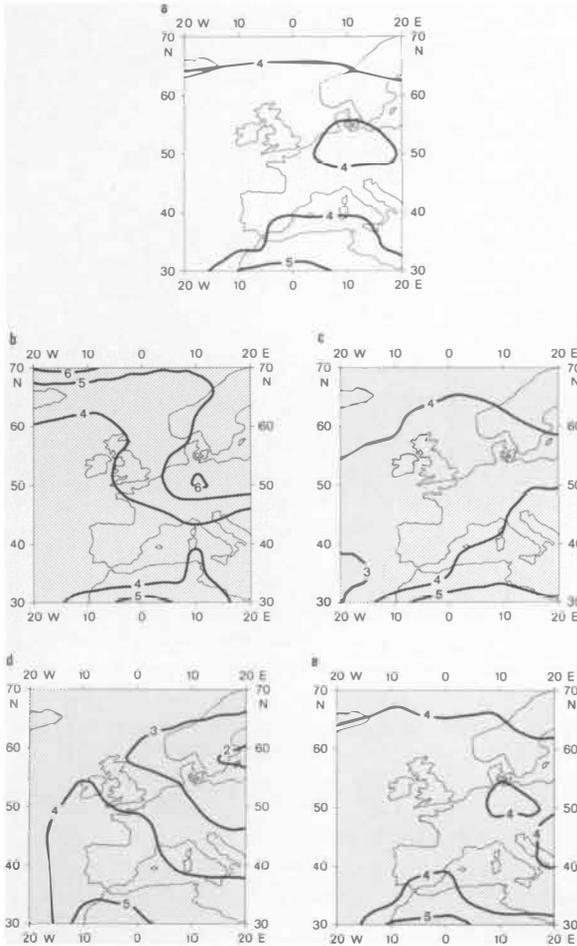


Abb. 5a-e: Regionale und jahreszeitliche Temperaturverteilung (K) in Europa für das 2 × CO₂-GISS-Experiment. a: Jahr; b: Winter; c: Frühjahr; d: Sommer; e: Herbst. Die Punktierung bedeutet Signifikanz auf dem 5% Niveau

Regional and seasonal distribution of the temperature (K) change in Europe for the 2 × CO₂ GISS-experiment; a: annual; b: winter; c: spring; d: summer; e: fall. Stippling indicates significance at the 5% level

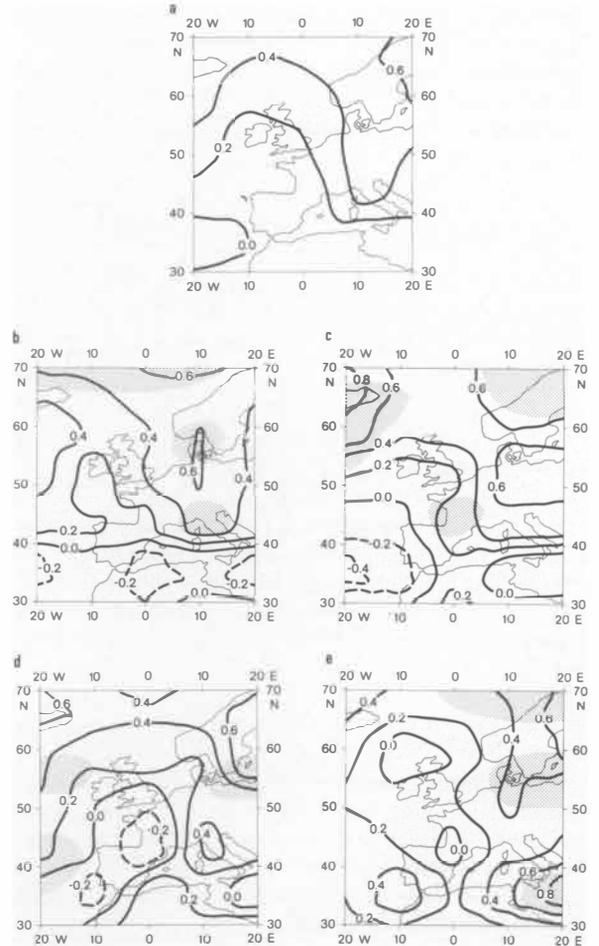


Abb. 6a-e: Regionale und jahreszeitliche Niederschlagsverteilung (mm/Tag) in Europa für das 2 × CO₂-GISS-Experiment. a: Jahr; b: Winter; c: Frühjahr; d: Sommer; e: Herbst. Die Punktierung bedeutet Signifikanz auf dem 5% Niveau

Regional and seasonal distribution of the precipitation rate (mm/day) change in Europe for the 2 × CO₂ GISS-experiment; a: annual; b: winter; c: spring; d: summer; e: fall. Stippling indicates significance at the 5% level

d. h. mit der zunehmenden Advektion feuchter Meeresluft über Nordeuropa und der verstärkten Austrocknung durch Absinkprozesse durch die nördliche Verlagerung der subtropischen Hochdruckgürtel. Wie schon die Modellverifikation für Niederschlag andeutete, sind nur in einigen kleinen Regionen die Änderungen der Niederschlagsraten signifikant auf dem 5% Niveau.

Die Signifikanz der Änderungen von Temperatur und Niederschlag wurde nach der Methode von CHERVIN (1981) aus den Monatsdaten des Kontrolllaufs und des 2 × CO₂-Experiments berechnet. Die Stichprobe kann aus speziellen Monaten oder Jahreszeiten einer längeren Modellintegration über mehrere Jahreszyklen oder aus mehrfachen unab-

hängigen Integrationen für einen speziellen Monat oder eine spezielle Jahreszeit ausgewählt werden. Die Null-Hypothese, daß an allen Gitterpunkten zwischen dem 1 × CO₂ und dem 2 × CO₂-Experiment kein Unterschied besteht, wird getestet durch

$$r = \frac{\langle m_C \rangle - \langle m_E \rangle}{[\sigma_C^2 + \sigma_E^2]^{1/2}}$$

wobei $\langle m_C \rangle$ und $\langle m_E \rangle$ die berechneten Ensemblemittel des Kontrolllaufs (1 × CO₂) und des Experimentes (2 × CO₂) sind. Die Varianz im Nenner setzt sich aus der des Kontrolllaufes und der des Experimentes zusammen. Da aber eine Gleichheit der Varianzen nicht angenommen werden kann, ist von

CHERVIN eine modifizierte t-Statistik zum Testen der Null-Hypothese für die Unterschiede in den Ensemblemitteln vorgeschlagen worden. Diese Modifizierung ist allerdings der t-Verteilung nach Student sehr ähnlich. Der Annahmebereich für die Null-Hypothese ist

$$r_1(\min) < r > r_2(\max)$$

wobei $r_1(\min)$ und $r_2(\max)$ aus der t-Verteilung bestimmt werden.

Ähnliche Untersuchungen haben wir auch für andere Regionen durchgeführt, wie z. B. den Mittelmeerraum (JUNG a. BACH 1985) und Afrika südlich des Äquators (BACH a. JUNG 1985).

4.3. Patternanalyse

Die Simulation aus den verschiedenen Modellrechnungen unterscheiden sich in der räumlichen Auflösung, der Parametrisierung der physikalischen Prozesse und der Darstellung des Ozeans. Zur Erlangung eines verlässlichen Klimaänderungsszenarios ist es angebracht, die Art und den Grad der Übereinstimmung der aus den GCM-Simulationen vorhergesagten Änderungen zu untersuchen. Die Aussagekraft der Änderungen in den verschiedenen Regionen hängt davon ab ob,

- die einzelnen Modelle das beobachtete Klima gut wiedergeben,
- die vorhergesagte Klimaänderung für ein CO_2 -Experiment auch physikalisch erklärt werden kann,
- die simulierten Änderungen der einzelnen Modelle statistisch signifikant sind und ob
- durch Signifikanz-Tests die Übereinstimmungen in den einzelnen Modellen abgesichert werden können.

Die ersten drei Erfordernisse wurden oben schon dargelegt, soweit für die einzelnen Modelle dazu die nötige Information zur Verfügung stand. Für den Nachweis von Übereinstimmungen kann man für jeden Klimaparameter die Abweichungen vom jeweiligen geographischen Mittelwert (M) bestimmen und die aus verschiedenen Modellsimulationen abgeleiteten Verteilungen überlagern. Zur quantitativen Bewertung der Ähnlichkeit der von den GCM simulierten Verteilungen kann man für jeden Klimaparameter folgende Größen bestimmen, nämlich

- die Zahl der Gitterpunkte, an denen die Vorzeichen der Abweichungen von den jeweiligen Flächenmitteln für zwei Verteilungen übereinstimmen (das ist ein Maß für die Überlappungen der zwei Datenserien und zeigt die Werte unterhalb bzw. oberhalb des jeweiligen Flächenmittels) und
- den Korrelationskoeffizienten für die Abweichungen (er gibt die Übereinstimmungen der Amplituden dieser Abweichungen an).

Diese Methode wird hier beispielhaft anhand eines Vergleichs der Temperatur- und Niederschlagsverteilungen zwischen dem GISS- und dem BMO-GCM für Winter und Sommer demonstriert. Im Winter liegen in beiden Modellen

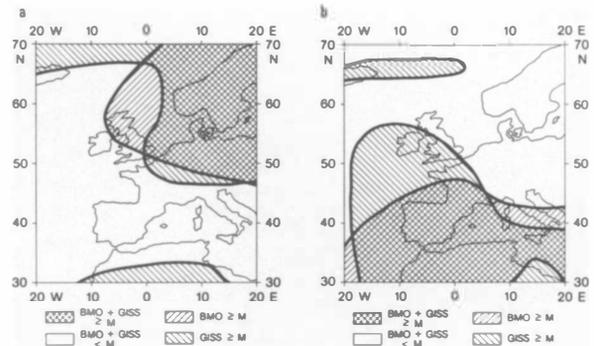


Abb. 7a-b: Regionale und jahreszeitliche Patternanalyse zwischen den GISS- und BMO-Modellen für Temperatur. a: Winter; b: Sommer

Regional and seasonal pattern analysis for the temperature distribution of the GISS and BMO $2 \times \text{CO}_2$ experiments; a: winter; b: summer

große Teile von Zentral- und Nordosteuropa über dem Flächenmittel (Abb. 7a, kreuzschraffiert), während der westliche Mittelmeerraum und das Atlasgebiet darunterliegen (ohne Schraffur). Im Sommer (Abb. 7b) ist die Verteilung der Übereinstimmung umgekehrt. Abgesehen vom Herbst zeigen alle anderen Verteilungen eine signifikante Übereinstimmung auf dem 5% Niveau. (Tab. 3a). Bei der Niederschlagsverteilung liegen sowohl im Winter als auch im Sommer in beiden Modellen große Teile Nordeuropas über dem Flächenmittelwert (Abb. 8a, b). Erwartungsgemäß sind bei dem variableren Klimaelement Niederschlag die Übereinstimmungen zwischen den beiden Modellen etwas geringer (Tab. 3b). Der Vergleich von Ergebnissen aus verschiedenen Modellrechnungen ist wichtig. Modellverifizierung und Patternanalyse können die Glaubwürdigkeit der Modellergebnisse erhöhen.

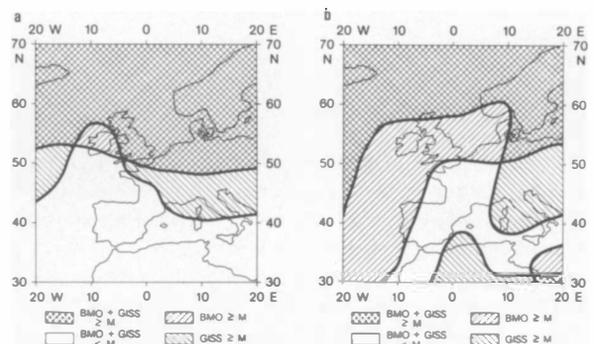


Abb. 8a-b: Regionale und jahreszeitliche Patternanalyse zwischen den GISS- und BMO-Modellen für Niederschlag. a: Winter; b: Sommer

Regional and seasonal pattern analysis for the precipitation rate distribution of the GISS and BMO $2 \times \text{CO}_2$ experiments; a: winter; b: summer

Tabelle 3a–b: Statistischer Patternvergleich zwischen den BMO und GISS 2×CO₂-Experimenten für Temperatur und Niederschlag
Statistical pattern comparison of the BMO and GISS 2×CO₂ experiments for temperature and precipitation rate

a: Temperatur

Jahreszeit	Experimente	Flächen- gemittelte Änderung (K)	Anzahl der Gitterpunkte (%) mit Über- einstimmung des Vorzeichens	Korrelations- koeffizient
Jährlich	BMO	2,7	65*	0,32*
	GISS	4,0		
Winter	BMO	2,8	81*	0,60*
	GISS	4,0		
Frühjahr	BMO	3,0	55	0,43*
	GISS	4,3		
Sommer	BMO	2,3	78*	0,74*
	GISS	3,7		
Herbst	BMO	2,7	64	0,25
	GISS	3,9		

b: Niederschlag

Jahreszeit	Experimente	Flächen- gemittelte Änderung (mm/Tag)	Anzahl der Gitterpunkte (%) mit Über- einstimmung des Vorzeichens	Korrelations- koeffizient
Jährlich	BMO	0,0	81*	0,58*
	GISS	0,3		
Winter	BMO	0,0	87*	0,59*
	GISS	0,3		
Frühjahr	BMO	0,1	62	0,32*
	GISS	0,3		
Sommer	BMO	-0,1	62	0,15
	GISS	0,3		
Herbst	BMO	0,0	50	0,04
	GISS	0,3		

* Signifikant auf dem 5% Niveau

5. Abschließende Bemerkungen

Die Beschäftigung mit Klimawirkungsforschung im allgemeinen und der Entwicklung von CO₂-induzierten Klimaszenarien im besonderen erfordert die Erarbeitung eines methodischen Instrumentariums zur Vorgehensweise. Das geschieht am besten in enger Zusammenarbeit zwischen Modellentwicklern und Modellanwendern, was zum gegenseitigen Verständnis von Modelleistung und Modellanforderung beiträgt. Aus diesem wechselseitigen Dialog sind am ehesten Fortschritte im Hinblick auf die Abschätzung von spezifischen Einflußfaktoren auf das Klima und dessen Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft zu erwarten.

Die Klimaszenarienanalyse bildet die Grundlage für die Untersuchung von Klimawirkungen auf so lebenswichtige

Bereiche wie Nahrungsmittel-, Wasser- und Energieversorgung sowie Lebensraum, Gesundheit und Wohlbefinden. Zur Abschätzung dieser Auswirkungen verwendet man Impactmodelle, wie z. B. Ernteertrags- und Energieversorgungsmodelle, für die die Szenarien den klimatischen Input liefern. Die so gewonnenen Ergebnisse ermöglichen es den Entscheidungsträgern, eine optimale Strategie in einer klimainsicheren Welt zu entwickeln. Das Hauptziel einer solchen Vorsorgepolitik ist es, schädliche Klimaauswirkungen möglichst schon im Vorfeld der Entstehung zu erkennen und sie durch gezielte Maßnahmen gar nicht erst entstehen zu lassen, oder sie zumindest in erträglichen Grenzen zu halten.

Danksagung

Die beobachteten Temperatur- und Niederschlagsdaten wurden von Prof. LAWRENCE GATES, Oregon State University, USA, die Klimamodelldaten von Dr. JAMES HANSEN, Goddard Institute for Space Studies, New York, USA, sowie von Dr. JOHN MITCHELL, British Meteorological Office, Bracknell, England, und die Analogdaten von Dr. TOM WIGLEY, University of East Anglia, England, zur Verfügung gestellt. Dafür sei allen an dieser Stelle gedankt. Für die finanzielle Unterstützung gebührt der Kommission der Europäischen Gemeinschaft (Kontrakt Nr. CLI-063-D) und der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (Kontrakt Nr. 30 501-004/81) Dank. Die Forschungen wurden in Zusammenarbeit mit der Firma Dornier, Friedrichshafen, durchgeführt.

Literatur

- BACH, W.: Gefahr für unser Klima: Wege aus der CO₂-Bedrohung durch sinnvollen Energieeinsatz. Karlsruhe 1982; englische Version: Our Threatened Climate: Ways of averting the CO₂-problem through rational energy use. Dordrecht 1984.
- : Das Experiment mit unserem Klima. Modelle einer Wirkungsforschung. In: Forschung, Mitteilungen der DFG4, 1984 a, 10-12.
 - : CO₂-sensitivity experiments using general circulation models. In: Progr. in Phys. Geogr. 8(4), 1984 b, 583-609.
 - : The use of climate scenarios in impact analysis. In: PARRY, M., and CARTER, T. (Eds.): Assessment of Climate Impacts on Agriculture in High Latitude Regions, vol. 1, Dordrecht 1985 (in press).
- BACH, W. and JUNG, H. J.: Simulation of the effects of CO₂ and other trace gases in the atmosphere on climate and the environment. In: South African Geogr. J. 1985 (in press).
- BACH, W., JUNG, H.J. and KNOTTENBERG, H.: Modeling the influence of carbon dioxide on the global and regional climate. Münsterische Geogr. Arb., H. 21, 1985.
- BIERLY, E. W. and BOLDYREV, V. G. (chairmen): The climatic effects of increased atmospheric carbon dioxide. Report of US/USSR workshop, June 15-20, 1981. Leningrad.
- BUDYKO, M.I. and YEFIMOVA, N. A.: Impact of carbon dioxide on climate. In: Meteor. Gidrol. No. 2, 1981, 5-17 (in russisch).

- CHEVIN, R. M.: On the comparison of observed and GCM simulated climate ensembles. In: *J. Atmos. Sci.* 38, 1981, 885–901.
- FLOHN, H.: Possible climatic consequences of a man-made global warming. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, RR-80-30, 1980.
- GATES, W. L., COOK, K. H. and SCHLESINGER, M. E.: Preliminary analysis of experiments on the climatic effects of increased CO₂ with an atmospheric general circulation model and a climatological ocean. In: *J. Geophys. Res.* 86, 1981, 6385–6393.
- GATES, W. L., HAN, Y. J. and SCHLESINGER, M. E.: The global climate simulated by a coupled atmosphere-ocean general circulation model: Preliminary results. *Climatic Res. Inst. Rpt. No 57. OSU, Corvallis* 1984.
- GATES, W. L. and POTTER, G. L.: The response of a coupled atmospheric GCM and mixed layer ocean model to doubled CO₂. Abstract for Third Conf. on Climate Variations: Symposium on Contemporary Climate 1850–2100, Los Angeles, Jan. 5–11, 1985.
- HANSEN, J., LACIS, A., RIND, D., RUSSELL, G., STONE, P., FUNG, I., RUEDY, R. and LERNER, L.: Climate sensitivity: Analysis of feedback mechanisms. In: HANSEN, J. and TAKAHASHI, T. (Eds.): *Climate Processes and Climate Sensitivity. Geophys. Monogr.* 29, Maurice Ewing, vol. 5, Washington, D. C. 1984, 130–163.
- JAEGER, J. and KELLOGG, W. W.: Anomalies in temperature and rainfall during warm arctic seasons. In: *Climatic Change* 5, 1983, 34–60.
- JÄGER, L.: Monatskarten des Niederschlags für die ganze Erde. *Ber. d. Deut. Wetterd.* 18(139), 1976.
- JONES, P. D., WIGLEY, T. M. L. and KELLY, P. M.: Variations in surface air temperatures: Part 1 Northern Hemisphere, 1881–1980. In: *Mo. Wea. Rev.* 110, 1982, 59–70.
- JUNG, H. J. and BACH, W.: GCM-derived climatic change scenarios due to a CO₂-doubling applied for the Mediterranean area. In: *Arch. Met. Geophys. Biocl., Ser. B.* 35, 1985, 323–339.
- KATES, R. W., AUSUBEL, J. H. and BERBERIAN, M.: *Climate Impact Assessment: Studies of the Interaction of Climate and Society.* New York 1985.
- KELLOGG, W. W.: Impacts of a CO₂-induced climate change. In: BACH, W. et al. (Eds.): *Carbon Dioxide.* Dordrecht 1983, 379–413.
- KELLOGG, W. W. and SCHWARTZ, R.: *Climate change and society.* Boulder, Colorado 1981.
- LOUGH, J. M. and WIGLEY, T. M. L.: The impact of increasing atmospheric carbon dioxide on climate, energy demand and agriculture: Scenarios for Europe. Final report Shell International Petroleum Company Ltd., 1981.
- LOUGH, J. M., WIGLEY, T. M. L. and PALUTIKOF, J. P.: Climate and climate impact scenarios for Europe in a warmer world. In: *J. Clim. Appl. Meteorol.* 22, 1983, 1673–1684.
- MANABE, S. and STOUFFER, R. J.: Sensitivity of a global climate model to an increase of CO₂ concentration in the atmosphere. In: *J. Geophys. Res.* 85 (C 10), 1980, 5529–5554.
- MANABE, S. and WETHERALD, R. T.: The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. In: *J. Atmos. Sci.* 32, 1975, 3–15.
- : On the distribution of climatic change resulting from an increase in CO₂ content of the atmosphere. In: *J. Atmos. Sci.* 37, 1980, 99–118.
- MANABE, W., WETHERALD, R. T. and STOUFFER, R. J.: Summer dryness due to an increase of atmospheric CO₂ concentration. In: *Climatic Change* 3 1981, 347–386.
- MARKLEY, O. W. and CARLSON, R.: Three analytic conclusions having significant implications for the AAAS-DOE Workshop on environmental and societal consequences of a possible CO₂-induced climatic shift. In: *US DOE 009.* Washington, D. C. 1980, 439–441.
- MEINL, H. and BACH, W. et al.: Socio-economic impacts of climatic changes due to a doubling of atmospheric CO₂ content. *Res. Rpt. to CEC/DFVLR, Dornier-System.* Friedrichshafen 1984.
- MITCHELL, J. F. B.: The seasonal response of a general circulation model to changes in CO₂ and sea surface temperature. In: *Q. J. R. Met. Soc.* 109, 1983, 113–152.
- MITCHELL, J. F. B. and LUPTON, G.: A 4 × CO₂ integration with prescribed changes in sea surface temperatures. In: *Progr. in Biomet.* 3, 1984, 353–374.
- PALUTIKOF, J. P., WIGLEY, T. M. L. and LOUGH, J. M.: Seasonal climatic scenarios for Europe and North America in a high CO₂, warmer world, TRO 12, US DOE. Washington, D. C. 1984.
- PARRY, M. L. (Ed.): The sensitivity of natural ecosystems and agriculture to climatic change. *Climatic Change* 7(1), 1985 (special issue).
- PARRY, M. L. and CARTER, T. R. (Eds.): Assessing the impact of climatic change in cold regions. Summary Report SR-84-1. Int. Inst. for Applied Systems Analysis, Laxenburg 1984.
- SCHLESINGER, M. E.: Simulating CO₂-induced climatic change with mathematical climate models: Capabilities, limitations and prospects, III 3-III139, US DOE 021, Washington, D. C. 1983.
- SCHLESINGER, M. E., HAN, Y.-J. and GATES, W. L.: The role of the ocean in CO₂-induced climatic change: A study with the OSU coupled atmosphere-ocean general circulation model. *Climatic Res. Inst. Rpt. No 60.* OSU, Corvallis 1985.
- SCHUTZ, C. and GATES, W. L.: Global climatic data for surface, 800 mb, 400 mb: January. R-915-ARPA, CA: The Rand Corporation. Santa Monica 1971.
- : Supplemental global climatic data: January, R-915/1-ARPA, CA: The Rand Corporation, Santa Monica 1972a.
- : Global climatic data for surface, 800 mb, 400 mb: July. R-1029-ARPA. CA: The Rand Corporation. Santa Monica 1972b.
- : Global climatic data for surface, 800 mb, 400 mb: April. R-1317-ARPA, CA: The Rand Corporation. Santa Monica 1973a.
- : Supplemental global climatic data: January. R-915/2-ARPA, CA: The Rand Corporation. Santa Monica 1973b.
- : Global climatic data for surface, 800 mb, 400 mb, October. R-1425-ARPA, CA: The Rand Corporation. Santa Monica 1974a.
- : Supplemental global climatic data: July. R-1029/1-ARPA. CA: The Rand Corporation. Santa Monica 1974b.
- US NAS: *Carbon dioxide and climate: A second assessment.* Washington, D. C. 1982.
- WASHINGTON, W. M. and MEEHL, G. A.: General circulation model experiments on the climatic effects due to a doubling and quadrupling of carbon dioxide concentration. In: *J. Geophys. Res.* 88 (C 11), 1983, 6600–6610.
- : Seasonal cycle experiments on the climate sensitivity due to a doubling of CO₂ with an atmospheric general circulation model coupled to a simple mixed layer ocean model. In: *J. Geophys. Res.* 89, 1984, 9475–9503.
- WIGLEY, T. M. L., JONES, P. D. and KELLY, P. M.: Scenario for a warm, high CO₂ world. In: *Nature* 283, 1980, 17–21.
- WILLIAMS, J.: Anomalies in temperature and rainfall during warm arctic seasons as a guide to the formulation of climate scenarios. In: *Climatic Change* 2, 1980, 249–266.
- WILSON, C. A. and MITCHELL, J. F. B.: The 5-layer model climate over Western Europe and the frequency of occurrence of extreme values of temperatures, precipitation and wind for selected grid boxes: The changes with 4 × CO₂ and prescribed sea surface temperatures. *MET 020, Techn. Note II/224.* Bracknell, UK 1984.