

Stabilisierungsziele für Treibhausgaskonzentrationen: Eine Abschätzung der Auswirkungen und der Emissionspfade

**Janina Onigkeit
Joseph Alcamo (Projektleiter)**

Im Auftrag des Umweltbundesamtes



**Wissenschaftliches Zentrum
für Umweltsystemforschung**
Universität Gesamthochschule Kassel

Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Schutz der Erdatmosphäre

Abschlußbericht

**Stabilisierungsziele für Treibhausgaskonzentrationen:
Eine Abschätzung der Auswirkungen
und der Emissionspfade**
(Projekt Nr. 296 41 121)

Janina Onigkeit
Joseph Alcamo (Projektleiter)

Unter Mitwirkung von
Frank Kaspar
Thomas Rösch

Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung
(WZ Bericht Nr. P0001)
Universität Gesamthochschule Kassel

Leitung
Prof. Dr. Joseph Alcamo

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

April 2000

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG.....	7
1. EINLEITUNG.....	17
2. DAS IMAGE MODELL	19
2.1 ÜBERBLICK ÜBER DAS IMAGE MODELL.....	19
2.2 REFERENZSZENARIEN.....	20
3. STABILISIERUNG DER ATMOSPHERISCHEN TREIBHAUSGASKONZENTRATIONEN UND GLOBALE EMISSIONEN	22
3.1 CO ₂ KONZENTRATIONSPFADE.....	22
3.2 EMISSIONEN AUS DEM ENERGIE/INDUSTRIE SEKTOR UND DER LANDWIRTSCHAFT	23
3.2.1 CO ₂ Emissionen.....	25
3.2.2 N ₂ O Emissionen.....	27
3.2.3 CH ₄ Emissionen.....	29
3.2.4 SO ₂ Emissionen: Der "Pollutant Burden" Ansatz	30
3.3 CO ₂ ÄQUIVALENTE KONZENTRATIONEN UND EMISSIONEN.....	37
3.4 ZUSAMMENFASSUNG.....	39
4. GLOBALE UND REGIONALE EMISSIONSMINDERUNG.....	42
4.1 GLOBALE EMISSIONSMINDERUNG.....	42
4.2 VON GLOBALER EMISSIONSMINDERUNG ZU REGIONALEN EMISSIONEN: EINE VERTEILUNG DER REDUKTIONSLASTEN BEI GLEICHZEITIGEM SCHUTZ DES KLIMAS	43
4.2.1 Die Regeln zur Verteilung der Reduktionslasten.....	44
4.2.2 Anwendung des Konzeptes	47
4.2.3 Resultierende Pro-Kopf-Emissionen	47
4.2.4 Gesamtemissionen der Annex B und nicht-Annex B Regionen.....	49
4.3 ZUSAMMENFASSUNG.....	50
5. UMWELTAUSWIRKUNGEN DER STABILISIERUNGSZIELE	52
5.1 AUSWAHL VON AUSWIRKUNGSINDIKATOREN FÜR DIE KLIMAPOLITIK	52
5.1.1 Änderung der Temperatur	54
5.1.2 Anstieg des Meeresspiegels	55
5.1.3 Änderung der potentiellen landwirtschaftlichen Produktivität	55
5.1.4 Gefährdung der potentiellen natürlichen Vegetation	56
5.1.5 Wasserverfügbarkeit.....	57
5.2 AUSWIRKUNGEN DER STABILISIERUNGSSZENARIEN	58
5.2.1 Globale Auswirkungen	59
5.2.2 Regionale Auswirkungen.....	69
5.3 ZUSAMMENFASSUNG.....	74
6. LANGFRISTIGER KLIMASCHUTZ UND KURZFRISTIGE EMISSIONSZIELE: DER "SAFE LANDING" ANSATZ	77
6.1 HINTERGRUND DES "SAFE LANDING" ANSATZES.....	77
6.2 EMISSIONSKORRIDORE FÜR DAS AOSIS KLIMAZIEL	79
6.3 EMISSIONSKORRIDORE FÜR DEN KLIMASCHUTZVORSCHLAG DER EUROPÄISCHEN UNION	80
6.4 LANGFRISTIGE KLIMAZIELE UND DAS PROTOKOLL VON KYOTO	81
6.5 UNSICHERHEIT UND SENSITIVITÄT DER EMISSIONSKORRIDORE.....	82
6.6 ZUSAMMENFASSUNG.....	83
7. SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	85
8. LITERATUR	90
ANHANG	95

Tabellen

<i>Table 1:</i> Überblick über globale Emissionen und globale Auswirkungen	16
<i>Table 2:</i> Abschätzung der gegenwärtigen globalen anthropogenen Treibhausgasemissionen in CO ₂ äquivalenten Emissionen.	24
<i>Table 3:</i> Regionale Schwefelemissionen ausgewählter Jahre (in Tg S) für das "PB-5% SO ₂ " und das "PB-95% SO ₂ " Szenario	37
<i>Table 4:</i> Auswirkungskategorien und Indikatoren für die Analyse des 550 ppm und des 450 ppm Stabilisierungsszenarios sowie des Kyoto Szenarios als Referenzszenario.	54
<i>Table 5:</i> Regionale Auswirkungen des Klimawandels auf die potentiellen Erträge von Getreide der gemäßigten Zonen (nicht-tropisches Getreide), tropisches Getreide und Mais	70
<i>Table 6:</i> Regionale Auswirkungen des Klimawandels auf die potentielle natürliche Vegetation (Naturreservate und andere natürliche Vegetation)	72

Abbildungen

<i>Abbildung 1:</i> Schematisches Diagramm des IMAGE 2.1 Modells	20
<i>Abbildung 2:</i> Einteilung der Weltregionen im IMAGE 2.1 Modell.....	21
<i>Abbildung 3:</i> Atmosphärische CO ₂ Konzentrationen von 1990 bis 2100 für das 450 ppm- und das 550 ppm Stabilisierungsszenario und das Kyoto Referenzszenario.....	23
<i>Abbildung 4:</i> Prozentsatz der globalen CO ₂ , CH ₄ und N ₂ O Emissionen in den 1990'ern aus dem industriellen, energieproduzierenden und Landnutzungssektor.	25
<i>Abbildung 5:</i> Globale CO ₂ Emissionen der zwei Stabilisierungsszenarien und des Kyoto Referenz Szenarios.	26
<i>Abbildung 6:</i> Globale anthropogene N ₂ O Emissionen aus dem Energie/Industrie Sektor und der Landnutzung.	28
<i>Abbildung 7:</i> Globale anthropogene CH ₄ Emissionen aus dem Energie-, Industrie- und Landnutzungssektor.....	29
<i>Abbildung 8:</i> Gegenüberstellung der Flächenanteile von Europa, bei denen die kritischen Emissionsflüsse zwischen 0.5 und 2.0 g S/m ² sowie die "critical loads" für die zukünftigen SO ₂ Emissionen in Europa überschritten werden.....	33
<i>Abbildung 9:</i> Globale Schwefelemissionspfade des "Pollutant Burden" Ansatzes.....	35
<i>Abbildung 10:</i> Regionale Schwefel Emissionen für (a) China und das zentralwirtschaftlich geplante Asien und (b) OECD Europa.	36
<i>Abbildung 11:</i> (a) Atmosphärische CO ₂ äquivalente Konzentration des 450 ppm und des 550 ppm CO ₂ Konzentrationsziels sowie des Kyoto Referenzszenarios. (b) Globale CO ₂ äquivalente Emissionspfade resultierend aus dem 450 ppm und 550 ppm CO ₂ Stabilisierungsziel.....	38
<i>Abbildung 12:</i> Änderungsrate (in % pro Jahr) der globalen anthropogenen CO ₂ äquivalenten Emissionen, die notwendig ist, um eine Stabilisierung der CO ₂ Konzentration bei 450 ppm und 550 ppm zu erreichen.....	43
<i>Abbildung 13:</i> Illustration des Konzeptes der Lastenverteilung: Verlauf der Pro-Kopf-Emissionen eines Nicht-Annex B Landes und durchschnittliche Pro-Kopf-Emissionen der Annex B Länder.....	45
<i>Abbildung 14:</i> Auswirkung unterschiedlicher Einstiegsriterien auf die Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B Länder.....	46
<i>Abbildung 15:</i> Anwendung des "Burden Sharing" Konzeptes auf zwei CO ₂ Stabilisierungsziele: (a) 550 ppm und (b) 450 ppm. Dargestellt sind Zeitpfade der durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen (als CO ₂ Äquivalente) der Annex B und Nicht-Annex B Regionen.	48
<i>Abbildung 16:</i> Gesamtemissionen (in CO ₂ Äquivalenten) der Annex B und der nicht-Annex B Gruppe im Vergleich zu den globalen Emissionen des (a) 550 ppm und (b) 450 ppm Stabilisierungszieles.	49
<i>Abbildung 17:</i> Mittlere globale Temperaturänderung zwischen 1990 und 2100.	59
<i>Abbildung 18:</i> Mittlere globale Rate der Temperaturänderung pro Jahrzehnt zwischen 1990 und 2100.	61
<i>Abbildung 19:</i> Mittlerer globaler Anstieg des Meeresspiegels zwischen 1990 und 2100...	62
<i>Abbildung 20:</i> Rate des Meeresspiegelanstiegs 1990 bis 2100.....	62
<i>Abbildung 21:</i> Anstieg des Meeresspiegels zwischen 1990 und 2500.....	64
<i>Abbildung 22:</i> Globaler Anteil der 1990 bebauten Fläche mit zurückgehenden Erträgen für Getreide der gemäßigten Zonen.	65
<i>Abbildung 23:</i> Globaler Anteil der 1990 bebauten Fläche mit zurückgehenden Erträgen für tropisches Getreide.	66
<i>Abbildung 24:</i> Globaler Anteil der 1990 bebauten Fläche mit zurückgehenden Erträgen für Mais.	67

<i>Abbildung 25:</i> Anteil der Fläche auf der die potentielle natürliche Vegetation von 1990 gefährdet ist.	68
<i>Abbildung 26:</i> Anteil der 1990 Fläche von Naturreservaten auf der die potentielle natürliche Vegetation gefährdet ist.	68
<i>Abbildung 27:</i> Mittlerer jährlicher Abfluss zwischen 1990 und 2100 (a) des Zambezi und Senegal in Afrika und des Murray Darling in Australien und (b) des Rheins und des Guadalquivir in West Europa.	73
<i>Abbildung 28:</i> Emissionskorridore, die ein Erreichen des AOSIS Klimaziels ermöglichen. (a) globale Emissionen 1990 bis 2010; (b) Annex B Emissionen 1990 bis 2010.	80
<i>Abbildung 29:</i> Emissionskorridore, um das Klimaziel der EU zu erreichen. (a) Globale Emissionen von 1990 bis 2010; (b) Annex B Emissionen 1990 bis 2010.	81
<i>Abbildung 30:</i> Emissionskorridore zwischen 1990 und 2010 und ihre Fortsetzung von 2010 bis 2030.	82
<i>Abbildung 31:</i> Sensitivität der Weite des Emissionskorridors im Jahr 2010 auf eine Änderung der Begrenzung (a) für den Anstieg des Meeresspiegels, (b) für die Rate der Temperaturänderung pro Dekade und (c) für die Geschwindigkeit der Emissionsreduktion.	84

Abkürzungen

AOSIS	Alliance of Small Island States
EU	Europäische Union
e_{crit}	Kritischer Emissionsfluß für SO ₂ im “Pollutant Burden” Ansatz
FCKW	Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe
FKW	Fluor-Kohlenwasserstoffe
GCM	General Circulation Model
GWP	Global Warming Potential (Globales Erwärmungspotential)
H-FCKW	Teilhalogenierte Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe
H-FKW	Teilhalogenierte Fluor-Kohlenwasserstoffe
IMAGE	<i>Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect</i>
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MPI	Max Planck Institut (für Meteorologie)
PBA	Pollutant Burden Ansatz
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
WaterGAP	<i>Water-Global Assessment and Prognosis</i>

Chemische Symbole

CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CH ₄	Methan
N ₂ O	Distickstoffoxid
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SO ₂	Schwefeldioxid

Zusammenfassung

Hintergrund und Zielsetzung

Die Europäische Union und andere Parteien der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) haben im Laufe der andauernden Klimaschutzverhandlungen eine Reihe langfristiger Klimaschutzziele vorgeschlagen. Ziel dieser Studie ist es, einen Überblick über einige der mit diesen Vorschlägen verbundenen Konsequenzen für die Umwelt zu verschaffen. Bei den vorgeschlagenen Klimaschutzziele handelt es sich z.B. um:

- eine Stabilisierung der atmosphärischen CO₂ Konzentration bei 550 ppm oder weniger,
- eine Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf 2°C im Vergleich zum prä-industriellen Temperaturniveau,
- eine Begrenzung des Meeresspiegelanstiegs auf 20 cm über dem Niveau von 1990.

Eine Anzahl von Modellen und neuer Ansätze wurde genutzt oder entwickelt, um eine eingehende Analyse der Konsequenzen dieser Klimaschutzziele durchzuführen. Diese Analyse deckt die gesamte Ursache-Wirkungskette des Phänomens Klimawandel ab: (1) Globale Emissionspfade für Treibhausgase, die das Erreichen dieser Klimaziele ermöglichen, (2) eine mögliche regionale Verteilung der Reduktionsmaßnahmen auf Staaten oder Staaten-gruppen, die notwendig sein werden, um einem vorgegebenen globalen Emissionspfad zu folgen, (3) eine Abschätzung der Umweltauswirkungen auf globaler Ebene sowie (4) der regionalen Auswirkungen der vorgeschlagenen Klimaziele.

Als Hauptinstrument für diese Untersuchung diente das integrierte Modell IMAGE 2.1, das eine Quantifizierung sowohl globaler als auch regionaler Klimaauswirkungen ermöglicht. Dieses Modell wurde mit dem globalen Wassermmodell WaterGAP gekoppelt, um die Änderung der zukünftigen Wasserverfügbarkeit bei einer Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen auf verschiedenen Niveaus abschätzen zu können. Außerdem liefert das IMAGE Modell die Hintergrunddaten für die „Safe Emission Corridor“ Software zur Berechnung der kurzfristig erlaubten Emissionen, die die oben aufgeführten langfristigen Klimaziele für Temperatur- und Meeresspiegelanstieg erreichbar halten („Safe Landing“ Ansatz).

Ein neuer Ansatz für Schwefelemissionsszenarien

Um Klimaschutzziele und ihre Auswirkungen zu analysieren, war es notwendig, zwei neue Szenarioansätze zu entwickeln. Der erste Ansatz greift das Problem zukünftiger globaler und regionaler Schwefelemissionen auf, die einen nicht zu unterschätzenden Einfluß auf die Stärke der Auswirkungen einer Klimaänderung haben können. Um diese Emissionen zu berücksichtigen, wurden mit Hilfe des sogenannten „Pollutant Burden“ Ansatzes, der im Rahmen des Projektes entwickelt wurde, neue Szenarien für regionale und globale Schwefelemissionen berechnet. Dieser Ansatz erlaubt es, (1) den Zeitpunkt abzuschätzen, an dem die Regionen, die bisher keine Reduktionsmaßnahmen für Schwefelemissionen ergriffen haben, Emissionskontrollen einführen, und (2) den Verlauf dieser Emissionskontrollmaßnahmen abzuschätzen, sobald sie einmal begonnen wurden.

Ein neuer Ansatz für die internationale Verteilung zukünftiger Reduktionslasten ("Burden Sharing")

Im zweiten neuen Szenarioansatz wird die Frage der angestrebten Stabilisierungsziele verknüpft mit der Frage nach der zukünftigen Beteiligung von Nicht-Annex B Staaten an Reduktionsmaßnahmen für Treibhausgasemissionen. Dieser Ansatz wird genutzt, um die Verantwortlichkeiten von Entwicklungsländern (nicht Annex B) und Industrieländern (Annex B) unter verschiedenen "Burden Sharing" Schemata abzuschätzen. Es wurden die Konsequenzen verschiedener Regeln untersucht, die festlegen, ab wann Entwicklungsländer sich an einer Kontrolle der Treibhausgasemissionen beteiligen. Dieser Ansatz ermöglicht eine unkomplizierte Abschätzung der notwendigen Reduktionsmaßnahmen sowohl in Industrieländern als auch in Entwicklungsländern, wenn ein vorgegebenes Stabilisierungsziel erreicht werden soll.

Im Rahmen dieser Studie konzentrieren wir uns auf das Ziel einer langfristigen Stabilisierung der atmosphärischen CO₂ Konzentration bei 550 ppm und 450 ppm. Zusätzlich untersuchen wir die Spanne der kurzfristigen Emissionen, die erlaubt sind, um die bereits beschriebenen Klimaschutzziele für eine Begrenzung des Temperaturanstiegs sowie des Meeresspiegelanstiegs langfristig erreichbar zu halten. Die Resultate sind auf den folgenden Seiten sowie in Tabelle 1 zusammengefasst.

Globale Emissionen bei einer Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre

Um die Umweltauswirkungen unterschiedlicher Stabilisierungsszenarien zu untersuchen, ist es notwendig die globalen Emissions- und Konzentrationspfade aller relevanten Treibhausgase mit einzubeziehen. Bei diesen Treibhausgasen handelt es sich neben CO₂, N₂O und CH₄ um die FCKW's und H-FCKW's, deren Produktion und Gebrauch durch das Montreal Protokoll geregelt werden, sowie die FKW's, H-FKW's und SF₆. Die derzeitigen Emissionen von CO₂, N₂O und CH₄ machen zusammen 90% der Gesamtemissionen aller Treibhausgase aus. Zu diesen Emissionen tragen die CO₂ Emissionen, zumeist aus dem Energie/Industrie Sektor stammend, mit 60% am meisten bei. Der Beitrag der N₂O- und CH₄ Emissionen zusammen liegt gegenwärtig bei 30%. Die restlichen 10% setzen sich zusammen aus den FCKW's und H-FCKW's (ca. 9%) und den FKW's, H-FKW's und SF₆ (zusammen ca. 1%). Aufgrund ihres hohen Gesamtbeitrags werden in dieser Studie die drei Gase CO₂, N₂O und CH₄ aus dem Energie/Industrie Sektor als auch aus dem landwirtschaftlichen Sektor im Detail behandelt.

CO₂ Emissionen

Die globalen anthropogenen CO₂ Emissionen, die ein bestimmtes Stabilisierungsziel erreichbar machen, wurden aus vorgegebenen Konzentrationspfaden zurückgerechnet. Diese Konzentrationspfade stammen aus einem IPCC Modellvergleich, dessen Ergebnisse in Enting *et al.* (1994) beschrieben werden. Um auf diesem Konzentrationspfad eine langfristige

Stabilisierung der CO₂ Konzentration bei 550 ppm zu erreichen, dürfen die globalen Emissionen bis zum Jahr 2030 nicht höher als auf 148% der Emissionen von 1990 ansteigen. Bis zum Jahr 2100 müssen sie wieder auf 107% der 1990 Emissionen abgesenkt werden. Für dieses Szenario ist über das Jahr 2100 hinaus eine weitere Reduktion der Emissionen notwendig, da eine Stabilisierung der CO₂ Konzentration bei 550 ppm erst im Jahr 2150 erreicht wird. Für das 450 ppm Stabilisierungsziel ist von Anfang an eine stärkere Emissionskontrolle notwendig: Die Emissionen dürfen im Jahr 2030 maximal 128% der 1990 Emissionen betragen und müssen langfristig (bis 2100) sogar auf 44% der 1990 Emissionen vermindert werden. Im Gegensatz zum 550 ppm Stabilisierungsziel wird für dieses Szenario eine Stabilisierung der CO₂ Konzentration bei 450 ppm im untersuchten Zeitrahmen (1990-2100) erreicht.

N₂O und CH₄ Emissionen

Für die globalen N₂O und CH₄ Emissionen aus dem Energie/Industrie Sektor wurde angenommen, daß sie proportional zu den CO₂ Emissionen verringert werden. Da bisher sichere Informationen über Reduktionsmaßnahmen bei landwirtschaftlichen Emissionen fehlen, wurde angenommen, daß die N₂O- und CH₄ Emissionen aus Landnutzungsaktivitäten nicht kontrolliert werden. Ihre Emissionen folgen daher dem mittleren Baseline A Referenzszenario des IMAGE Modells. In zukünftigen Studien sollten jedoch die Reduktionspotentiale der globalen Landwirtschaft für N₂O- und CH₄ Emissionen untersucht und berücksichtigt werden. Für die globalen Gesamtemissionen von N₂O und CH₄ wurde berechnet, daß sie um 2030 ein Maximum erreichen und danach sowohl für das 550 ppm als auch das 450 ppm Stabilisierungsszenario leicht zurückgehen. Bei beiden Szenarien bleiben die Emissionen jedoch signifikant über dem Niveau von 1990. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die landwirtschaftlichen N₂O und CH₄ Emissionen (1) über den gesamten Szenariozeitraum signifikant zu den Gesamtemissionen dieser Gase beitragen und (2) für diese Emissionen keine Reduktionsmaßnahmen angenommen wurden. Dies hat zur Folge, daß die Reduktionsmaßnahmen im Energie/Industrie Sektor durch den Anstieg der Emissionen aus dem landwirtschaftlichen Sektor teilweise kompensiert werden. Im Jahr 2100 beträgt der Anteil der landwirtschaftlichen Emissionen dieser Gase 90% der gesamten N₂O und CH₄ Emissionen für das 450 ppm und 80% für das 550 ppm Stabilisierungsszenario. Diese Zahlen machen deutlich, welche Bedeutung den N₂O und CH₄ Emissionen aus der Landwirtschaft bei der Entwicklung zukünftiger Strategien für die Reduktion von Nicht-CO₂-Treibhausgasemissionen zukommen könnte.

CO₂-äquivalente Emissionen

Der Trend der globalen CO₂-äquivalenten Emissionen (für CO₂, N₂O und CH₄), resultierend aus dem vorgegebenen CO₂ Konzentrationspfad und den Annahmen, die wir für die Nicht-CO₂-Treibhausgase gemacht haben, ähnelt dem der globalen CO₂ Emissionen. Diese Emissionen dürfen für beide Stabilisierungsziele bis zum Jahr 2030 ansteigen und müssen danach reduziert werden. Für das 450 ppm Szenario ist eine Reduktion bis auf 66% der 1990 Emissionen bis zum Jahr 2100 notwendig. Für das 550 ppm Szenario dagegen dürfen

die globalen Emissionen oberhalb des Emissionsniveaus von 1990 bleiben (117%). Aber auch hier muß gesagt werden, daß die notwendigen Reduktionsmaßnahmen zum Teil auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden, da eine Stabilisierung der CO₂ Konzentration bei 550 ppm in diesem Szenario erst 2150 erreicht wird.

SO₂ Emissionen

Schwefeldioxidemissionen haben das Potential die Auswirkungen der Treihausgasemissionen auf die Atmosphäre teilweise zu kompensieren. Um diesen Umstand bei der Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels zu berücksichtigen, wurde der sogenannte „Pollutant Burden“ Ansatz (PBA) entwickelt. Mit Hilfe des PBA wurden SO₂ Emissionsszenarien für die 13 Regionen des IMAGE Modells abgeleitet. Die zwei Hauptannahmen dieses Ansatzes sind: (1) In Entwicklungsregionen wird mit einer Reduktion der SO₂ Emissionen begonnen, sobald die Umweltbelastung durch SO₂ Emissionen dasselbe Ausmaß erreicht wie in den Industrienationen zu dem Zeitpunkt als diese mit einer Kontrolle ihrer SO₂ Emissionen begonnen haben. (2) Hat eine Region einmal mit Kontrollmaßnahmen begonnen, so werden diese mit einer Geschwindigkeit fortgesetzt, wie es in den Industrieländern zu beobachten war und für die Zukunft erwartet wird. Die auf diese Weise abgeleiteten SO₂ Emissionen zeigen stark unterschiedliche Trends für die Industrie- und Entwicklungsregionen. Während die SO₂ Emissionen in den meisten Entwicklungsregionen ungefähr bis zum Jahr 2030 stark ansteigen und dann auf diesem Niveau bleiben oder reduziert werden, setzen die Emissionen der Industrieländer ihren abnehmenden Trend fort und sinken bis 2100 auf 4 bis 10% des Niveaus von 1990. Das heißt, die oft als Referenzfall angenommenen konstanten SO₂ Emissionen nach 1990 (z.B. Houghton *et al.*, 1997) unterschätzen die SO₂ Emissionen der Entwicklungsregionen und überschätzen die Emissionen der Industrieregionen. Die regionalisierten Annahmen für SO₂ Emissionen des „Pollutant Burden“ Ansatzes können daher zu einer Verbesserung der Analyse regionaler Auswirkungen des Klimawandels beitragen.

Globale und regionale Emissionsminderung

Minderung der globalen Treibhausgasemissionen

Um eine Stabilisierung der atmosphärischen CO₂ Konzentration auf den vorgegebenen Konzentrationspfaden zu erreichen, ist ein Anstieg der globalen Emissionen bis zum Jahr 2030 zulässig. Trotzdem sind die erlaubten Emissionen niedriger als die Emissionen des Referenzszenarios, d.h. eine Kontrolle der Emissionen ist von Anfang an notwendig. Um die erforderlichen globalen Reduktionsraten langfristig (bis 2100) niedrig zu halten (kleiner als 0.5% pro Jahr), dürfen die mittelfristigen Emissionen (bis 2030) für das 550 ppm Szenario höchstens 1% pro Jahr steigen. Für das 450 ppm Szenario muß der Anstieg der globalen Emissionen bis 2030 deutlich unter 1% pro Jahr bleiben und auch langfristig sind für dieses Szenario globale Reduktionsraten zwischen 1% und 1.5% pro Jahr notwendig.

Minderung der regionalen Treibhausgasemissionen - Ansätze für eine regionale Verteilung der Reduktionslasten ("Burden Sharing")

Vom politischen Standpunkt her ist es interessant zu wissen, wie sich die notwendigen globalen Emissionsreduktionen auf die regionalen Emissionen auswirken können. Um dies zu untersuchen, wurde ein Verfahren entwickelt, um die erlaubten globalen Emissionen zwischen Annex B und Nicht-Annex B Regionen aufzuteilen. Dieses Verfahren basiert auf zwei Prinzipien: (1) Aufgrund ihres historischen Beitrags zur Klimaänderung und ihrer derzeitigen hohen Pro-Kopf-Emissionen müssen die Annex B Länder sofort mit der Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen beginnen. (2) Die Nicht-Annex B Länder stabilisieren ihre Pro-Kopf-Emissionen, wenn sie ein bestimmtes Einkommensniveau erreicht haben und beginnen mit der Reduktion sobald ihre Pro-Kopf-Emissionen mit denen der Annex B Länder konvergieren.

Das Gesamtbild, das wir bei Anwendung dieses Ansatzes erhalten, ist für beide Stabilisierungsszenarien ähnlich: Die Annex B Länder beginnen mit relativ hohen durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen und haben diese Emissionen auf ein Niveau weit unter dem von 1990 zu reduzieren. Die durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B Länder hingegen beginnen auf einem sehr niedrigen Niveau, dürfen mittelfristig ansteigen und müssen dann wieder auf das Niveau von 1990 oder sogar niedriger reduziert werden, um das 450 ppm Stabilisierungsziel zu erreichen. Allerdings führt das angenommene starke Bevölkerungswachstum in diesen Regionen, trotz der auf einem relativ niedrigen Niveau verbleibenden Pro-Kopf-Emissionen, zu hohen Gesamtemissionen. So dürfen sich für das 550 ppm Szenario die Nicht-Annex B Gesamtemissionen innerhalb der nächsten dreißig Jahre (bis ca. 2030) verdoppeln und bis 2100 auf diesem Niveau bleiben. Für das 450 ppm Szenario verdoppeln sich die Gesamtemissionen bis 2030 ebenfalls, müssen danach aber wieder auf die Hälfte reduziert werden, um im Jahr 2100 ein Emissionsniveau geringfügig über dem von 1990 zu erreichen. Die Gesamtemissionen der Annex B Länder müssen, diesem Ansatz zufolge, über den gesamten Zeitraum 1990-2100 reduziert werden. Bis 2030 ist eine Reduktion auf ca. die Hälfte der jetzigen Gesamtemissionen notwendig und bis 2100 eine weitere Reduktion bis auf ca. ein Viertel der jetzigen Emissionen, um langfristig eine gerechte Verteilung der Emissionsrechte, d.h. eine Angleichung der Pro-Kopf-Emissionen von Annex B und Nicht-Annex B Ländern und gleichzeitig eine Stabilisierung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen zu realisieren.

Auswirkungen der untersuchten Stabilisierungsszenarien

Indikatoren

Um ein möglichst umfassendes Bild der möglichen Auswirkungen der Stabilisierungsziele von 550 und 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre, im Vergleich zu einem Referenzszenario, zu erhalten, wurden fünf Auswirkungskategorien untersucht.

1. Die *Änderung der atmosphärischen Temperatur* ist eine direkte Reaktion auf die Akkumulation von Treibhausgasen in der Atmosphäre und wird oft als Indikator für die Formulierung von Klimaschutzzielen verwendet.
2. Der *Anstieg des Meeresspiegels* stellt einen indirekten Indikator für den Anstieg der

Treibhausgaskonzentrationen dar. Er tritt auf als Folge steigender Meerestemperaturen und abschmelzender Inlandgletscher. Insbesondere Länder mit flachen Küstenregionen und kleine Inselstaaten können durch einen Meeresspiegelanstieg irreversibel gefährdet werden.

3. Die *Änderung der potentiellen Ernteerträge* ist ein indirekter Indikator für die möglichen Auswirkungen einer Klimaänderung auf regionale und globale Agrarsysteme.
4. Die *Änderung der potentiellen natürlichen Vegetation* spiegelt die Auswirkungen einer Klimaänderung auf natürliche Ökosysteme wider.
5. Die *Änderung der Wasserverfügbarkeit* könnte insbesondere die Wasserversorgung in der Landwirtschaft aber auch die im industriellen Sektor betreffen.

Änderung der Temperatur

Für das 550 ppm Stabilisierungsszenario wurde eine mittlere globale Temperaturänderung von 1.7°C zwischen 1990 und 2100 berechnet. Dies entspricht einem Temperaturanstieg von ca. 2.2°C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit. Auch ein strengeres Stabilisierungsziel von 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre führt noch zu einem Temperaturanstieg von 1.7°C im Vergleich zu vorindustriellen Zeiten.

Für beide Stabilisierungsszenarien steigt die mittlere globale Temperatur zwischen 1990 und 2030 sehr schnell an. Bis zur Hälfte des 21. Jahrhunderts wird eine Änderungsrate von 0.1°C pro Dekade bei beiden Szenarien überschritten. Diese Rate wird oft als obere Grenze vorgeschlagen, bei der sich natürliche Ökosysteme noch an eine Klimaänderung anpassen können (Rijsberman and Swart, 1990). Dieser Wert wird nur für das 450 ppm Szenario in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts unterschritten.

Anstieg des Meeresspiegels

Zwischen 1990 und 2100 steigt der Meeresspiegel für das 450 ppm Szenario um 29 cm und für das 550 ppm Szenario um 33 cm. Obwohl sich die Temperaturänderung gegen Ende des 21. Jahrhunderts verlangsamt, ist für den Anstieg des Meeresspiegels in diesem Zeitraum eher eine Beschleunigung zu erwarten, da die Ozeane mit zeitlicher Verzögerung auf die Erwärmung der Atmosphäre reagieren. So wurde für den Zeitraum von 2100 bis 2500 ein weiterer Anstieg um den Faktor drei für das 450 ppm Szenario bzw. vier für das 550 ppm Szenario berechnet.

Änderung der potentiellen Ernteerträge

Als Indikator für das Risiko einer Klimaänderung für die regionale und globale Nahrungsmittelversorgung nutzen wir den Prozentsatz der jetzigen Agrarflächen, die von einem Rückgang der potentiellen Ernteerträge betroffen sind. Bei der Berechnung der potentiellen Ernteerträge werden die möglichen Auswirkungen einer erhöhten Temperatur und veränderter Niederschlagsmuster sowie der sogenannte CO₂ Düngeneffekt berücksichtigt. Eine mögliche Anpassung der Agrarsysteme an die Klimaänderung, z.B. durch geändertes Management oder Verlagerung der landwirtschaftlichen Flächen, wird dagegen außer Acht gelassen.

Das Hauptergebnis dieser Analyse ist, daß die Erträge aller untersuchten Getreideklassen (Getreide der gemäßigten Zonen, tropische Getreidesorten und Mais) merklich von einer Klimaänderung betroffen sein werden. Für das 550 ppm Szenario und die Getreidesorten der gemäßigten Zonen könnten im Jahr 2030 15% der jetzigen globalen Anbaufläche von zurückgehenden potentiellen Erträgen betroffen sein. Bis zum Jahr 2100 steigt der Flächenanteil auf 20% an. Für tropisches Getreide und Mais erhalten wir ein ähnliches Muster: Im Jahr 2100 könnten 11% (tropisches Getreide) bzw. 25% (Mais) der jetzigen globalen Fläche zurückgehende potentielle Erträge aufweisen und mehr als die Hälfte dieser Flächen werden schon 2030 betroffen sein. Die Flächenanteile für das 450 ppm Szenario liegen für alle betrachteten Getreideklassen nur geringfügig unter denen des 550 ppm Szenarios.

Auf regionaler Ebene variieren die von zurückgehenden Erträgen betroffenen Flächenanteile sehr stark. Die größten Auswirkungen werden für Kanada, die USA und Indien berechnet, während Osteuropa und die Region der ehemaligen Sowjetunion nur geringe Flächenanteile mit Ertragseinbußen zu erwarten haben. Dies trifft sowohl für beide Stabilisierungsszenarien, als auch für alle drei Getreideklassen zu. Aufgrund der starken regionalen Variabilität der Auswirkungen scheint es wesentlich angemessener zu sein, bei der Analyse unterschiedlicher Stabilisierungsszenarien die regionalen statt der globalen Auswirkungen zu untersuchen. Allerdings sollten dann, hauptsächlich aufgrund der großen Unsicherheiten bei der Berechnung von Niederschlagsänderungen durch Klimawandel, die Resultate mehrerer Klimamodelle herangezogen werden.

Gefährdung der potentiellen natürlichen Vegetation

Auch wenn Klimaschutzmaßnahmen zu einer Stabilisierung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration führen, könnte die potentielle natürliche Vegetation auf großen Teilen der Erdoberfläche durch einen Klimawandel gefährdet sein. Für das 550 ppm Stabilisierungsszenario wurde berechnet, daß bis zum Jahr 2100 das Vorkommen der heutigen potentiellen Vegetation auf 28% der Fläche gefährdet wäre. Eine Stabilisierung der CO₂ Konzentration bei 450 ppm könnte immer noch auf 23% der Fläche zu einem Risiko für die natürliche Vegetation führen. Auch für die jetzigen Naturreservate besteht ein beträchtliches Risiko: Für das 550 ppm Szenario könnte im Jahr 2100 die Vegetation auf 23% der Flächen und für das 450 ppm Szenario immer noch auf 21% der Fläche gefährdet sein.

Wasserverfügbarkeit

Mit dem globalen WassermodeLL WaterGAP wurde eine erste Analyse der Einflüsse einer Klimaänderung auf die Wasserverfügbarkeit in ausgewählten Wassereinzugsgebieten durchgeführt. Die mit den zwei untersuchten Stabilisierungsszenarien einhergehende Änderung des Klimas kann dieser Analyse zufolge sowohl zu einer Erhöhung als auch zu einer Abnahme der Wasserverfügbarkeit führen. In einigen Einzugsgebieten, wie z.B. des Guadalquivir in Spanien wurde ein Rückgang der Wasserverfügbarkeit, d.h. ein zusätzlicher Druck auf die ohnehin knappen Wasserressourcen, berechnet. Für andere Wassereinzugsgebiete wie z.B. den Zambezi in Afrika und den Rhein in Westeuropa wurde dagegen für

beide Stabilisierungsszenarien und auch das Kyoto Referenzszenario eine Zunahme der Wasserverfügbarkeit ermittelt.

Kurzfristige Emissionsminderungen und langfristige Klimaschutzziele

Der sogenannte „Safe Landing“ Ansatz wurde angewendet, um zu untersuchen, welche globalen Emissionen kurzfristig (bis 2010) erlaubt sind, um die langfristigen Klimaschutzziele der AOSIS Staaten und der EU umzusetzen. Für diesen Zweck wird für den Zeitraum 1990-2010 ein Emissionskorridor berechnet, der langfristig gesetzte Klimaziele (bis 2100) erreichbar macht. Anders formuliert: bleiben die globalen Treibhausgasemissionen bis 2010 innerhalb dieses Korridors, so gibt es langfristig (bis 2100) mindestens einen globalen Emissionspfad, der ein Erreichen dieser Klimaschutzziele möglich macht.

Bei diesen Zielvorstellungen für den Klimaschutz (im Folgenden kurz Klimaziele genannt) handelt es sich bei den AOSIS Staaten um eine Begrenzung des Meeresspiegelanstiegs auf maximal 20 cm und einen Temperaturanstieg von 1.5°C, jeweils bezogen auf den Zeitraum ab 1990 (FCCC/AGBM/1997/MISC.1/Add.2, Paper No. 20). Die EU stellt als Klimaschutzziel einen maximalen Temperaturanstieg von 1.5°C ab 1990 zur Diskussion (FCCC/AGBM/1997/MISC.1/Add.2, Paper No. 11). Für die Berechnung der Emissionskorridore wird für das Erreichen der Klimaschutzziele der Zeitraum 1990 bis 2100 zugrunde gelegt. Außerdem muß für die Anwendung des „Safe Landing“ Ansatzes eine Reihe weiterer Beschränkungen festgesetzt werden: die Rate des Temperaturanstiegs wird auf maximal 0.15°C pro Dekade und die Rate der globalen Emissionsminderung auf maximal 2% pro Jahr begrenzt. Für das Klimaziel der EU wurde außerdem eine Begrenzung des Meeresspiegelanstiegs auf 30 cm angenommen.

Das Ergebnis dieser Analyse ist, daß die Klimaziele des AOSIS Vorschlags zu einem sehr niedrigen und engen Emissionskorridor zwischen 1990 und 2010 führen. Um die globalen Emissionen innerhalb dieses Korridors zu halten, müssen die Emissionen der Annex B Staaten, unter der Annahme, daß die Nicht-Annex B Staaten ihre Emissionen bis 2010 unvermindert fortsetzen, sehr stark reduziert werden.

Die Klimaziele der EU erlauben einen weiteren Emissionskorridor als die Ziele der AOSIS Staaten. Trotzdem müssen die Annex B Emissionen, unter der Annahme, daß die Nicht-Annex B Emissionen unvermindert steigen, zwischen 1990 und 2010 stark reduziert werden, damit die globalen Emissionen im Jahr 2010 die Mitte des erlaubten Korridors erreichen und damit noch einen gewissen Spielraum für die globalen Emissionen nach 2010 zulassen. Um gerade noch innerhalb des Korridors zu bleiben dürfen die Annex B Emissionen nur sehr leicht ansteigen.

Die globalen Emissionen, die aus den Reduktionsverpflichtungen für die Annex B Staaten des Kyoto Protokolls folgen, liegen für das Jahr 2010 außerhalb des Emissionskorridors, der ein langfristiges Erreichen der Klimaziele der AOSIS Staaten möglich macht, jedoch innerhalb des Korridors für die Klimaziele der EU. Da sich die Emissionen jedoch im oberen Drittel dieses Korridors befinden, dürfen die globalen Emissionen nach 2010 nicht weiter ansteigen, wenn die Klimaziele der EU langfristig umsetzbar bleiben sollen.

Schlußfolgerungen

Die folgenden allgemeinen Schlußfolgerungen lassen sich aus den durchgeführten Analysen ziehen:

1. Um eine Stabilisierung der atmosphärischen CO₂ Konzentration bei 450 ppm oder auch 550 ppm zu erreichen, ist sowohl regional als auch global eine signifikante Verminderung der Treibhausgasemissionen notwendig.
2. Auch wenn die atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen langfristig stabilisiert werden, kommt es insbesondere in den nächsten Jahrzehnten zu einer signifikanten Zunahme der Konzentrationen, die zu einer Änderung des Klimas sowie einem schnellen Anstieg der negativen Auswirkungen dieser Klimaänderung auf eine Vielzahl ökologischer und sozioökonomischer Systeme führen.
3. Daher erscheint es wichtig, unter den gegebenen Szenarioannahmen nicht nur die Treibhausgasemissionen zu vermindern, sondern ebenso Maßnahmen für die Anpassung an einen globalen und regionalen Klimawandel zu planen.

Stabilisierungsziele für Treibhausgaskonzentrationen

Tabelle 1: Überblick über globale Emissionen und globale Auswirkungen des 450 ppm und 550 ppm Stabilisierungsszenarios und des Kyoto Referenzszenarios.

	Szenario				
	450 ppm (SO ₂ : konst. 1990)	550ppm (SO ₂ : konst. 1990)	550ppm (SO ₂ : PB-95%) ¹	550ppm (SO ₂ : PB-5%) ¹	Kyoto Szenario ² (SO ₂ : konst. 1990)
Emissionen					
CO ₂ im Jahr 2100 [Gt C/Jahr]	3.1	7.6	7.6	7.6	20.2
CO ₂ äquivalent im Jahr 2100 ³ [Gt C/Jahr]	6.5	11.5	11.5	11.5	26.2
Kumulierte CO ₂ Emissionen 1990-2100 [Gt C]	723	975	975	975	1537
Kumulative CO ₂ äquivalente Em. ³ 1990-2100 [Gt C]	1108	1393	1393	1393	2068
Auswirkungen					
Temperaturänderung 1990-2100 [°C]	1.2	1.7	1.4	1.8	2.7
Meeresspiegelanstieg 1990-2100 [cm]	29	33	n.b.	n.b.	41
Meeresspiegelanstieg 1990-2500 [cm]	103	122	n.b.	n.b.	n.b.
Anteil der jetzigen Anbaufläche mit abnehmenden potentiellen Erträgen - "Nicht-tropisches" Getreide, 2100 [%]	18	20	17	21	22
Anteil der jetzigen Anbaufläche mit abnehmenden potentiellen Erträgen - Mais, 2100 [%]	21	25	21	26	31
Anteil der jetzigen Anbaufläche mit abnehmenden pot. Erträgen - Tropi- sches Getreide, 2100 [%]	9	11	9	12	11
Anteil der Fläche mit Gefährdung der jetzigen pot. natürlichen Vegetation, 2100 [%]	22	28	25	29	39
Fläche der Naturreservate mit Gefähr- dung der pot. natürlichen Vegetation, 2100 [%]	21	23	23	28	39

n.b.: nicht bestimmt

¹ "PB-95% SO₂" ist das 95 Perzentil der mit dem "Pollutant Burden" Ansatz berechneten SO₂ Emissionen und "PB-5% SO₂" ist das 5 Perzentil der ebenfalls mit dem PBA berechneten SO₂ Emissionen.

² Für das Kyoto Szenario wird bis zum Jahr 2010 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen der Annex B Länder um 5.2% im Vergleich zu 1990 angenommen. Nach 2010 bleiben die Annex B Emissionen konstant. Die Emissionen der Nicht-Annex B Länder folgen über den gesamten Simulationszeitraum dem mittleren Referenzszenario (Baseline A Szenario) des IMAGE Modells.

³ CO₂ äquivalente Emissionen beinhalten die Treibhausgase CO₂, CH₄ und N₂O aus dem Energie/Industrie Sektor und der Landwirtschaft.

1. Einleitung

Bei der Klimakonferenz in Kyoto im Dezember 1997 lag der Schwerpunkt der Verhandlungen bei der Festlegung kurzfristiger Zeit- und Mengenziele für die Verminderung der Treibhausgasemissionen der Industrieländer, während in Buenos Aires im November 1998 ein Aktionsplan für die Umsetzung des Klimaprotokolls von Kyoto Hauptthema war. Eine wichtige Frage, die jedoch bei beiden Konferenzen offen blieb, ist die nach der eines langfristigen Klimaziels, wie es in Artikel 2 der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC, 1992) formuliert wird: "... die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Ein solches Niveau sollte innerhalb eines Zeitraums erreicht werden, der ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann."

Dieses Ziel der Klimarahmenkonvention wurde bereits 1992 angenommen. Nur zwei Vertragsparteien, nämlich die Europäische Union und die "Alliance of Small Island States" (AOSIS) haben seitdem Vorschläge für die Konkretisierung von Artikel 2 der Klimakonvention unterbreitet. Die EU schlug vor, daß "...die globale Durchschnittstemperatur nicht mehr als 2°C über das vorindustrielle Niveau steigen sollte und daß daher ein Konzentrationsniveau unterhalb von 550 ppm die globalen Limitierungs- und Reduktionsanstrengungen leiten sollte..."(UNFCCC, 1997b). Die AOSIS Staaten formulierten das gleiche Ziel für die Änderung der globalen Durchschnittstemperatur und fügten hinzu, "... daß der globale mittlere Meeresspiegel nicht mehr als 20 cm über das Niveau von 1990 ansteigen sollte" (UNFCCC, 1997a). Diese geringe Anzahl konkreter Vorschläge spiegelt die Schwierigkeit wider, sich für ein langfristiges Klimaziel mit all seinen Konsequenzen zu entscheiden. So werden, je nach Vorstellung über das Ausmaß des Klimaschutzes, mehr oder weniger starke Reduktionsmaßnahmen notwendig. Aber auch wenn Klimaschutzmaßnahmen ergriffen werden, muß mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eine Veränderung oder Beeinträchtigung einiger Systeme in Kauf genommen werden. Ein weiterer Grund für die Schwierigkeit bei der Setzung eines Klimaschutzzieles ist, daß die Auswirkungen eines anthropogen verursachten Klimawandels noch nicht signifikant nachweisbar sind. Auswirkungen sind aber wahrscheinlich, und sie werden eine wichtige neue Belastung für natürliche und sozioökonomische Systeme darstellen, wie es von der Working Group II des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in ihrem zweiten "Assessment Report" formuliert wird (Watson *et al.*, 1996). In dieser Situation können mit Hilfe integrierter globaler Modelle, wie z.B. dem IMAGE Modell, politischen Entscheidungsträgern langfristige Perspektiven zur Verfügung gestellt werden, die hilfreich bei der Entwicklung mittel- und langfristiger Klimaschutzstrategien sind.

Das IMAGE Modell (*Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect*) wurde entwickelt, um die Dynamiken des Systems Gesellschaft-Biosphäre-Klima zu simulieren (Alcamo *et al.*, 1998a). Es bildet die wichtigsten Aspekte der Ursache-Wirkungs-Kette des Themas Klimawandel ab. Simulationen mit IMAGE werden, je nach Art der Berechnun-

gen, auf der Ebene globaler Regionen bis hin zu einer räumlichen Auflösung von 0.5° Längengrad mal 0.5° Breitengrad, durchgeführt. Der Simulationszeitraum reicht von 1970 bis 2100. Das IMAGE Modell kann eingesetzt werden, um Emissions- und Stabilisierungsszenarien zu entwickeln und zu analysieren und einen umfassenden Überblick über die möglichen Konsequenzen langfristiger Klimaschutzziele zu erhalten.

Das Ziel dieser Studie ist es, die in den laufenden Verhandlungen formulierten Klimaschutzziele aufzugreifen und eine umfassende Abschätzung der möglichen Konsequenzen dieser Ziele zu liefern. Umfassend ist hier gemeint im Sinne von: die gesamte Ursache-Wirkungskette von den Treibhausgasemissionen über die Klimaänderung bis hin zu den Auswirkungen der Klimaänderung, erfassend. Es ist jedoch nicht gemeint als eine Analyse aller Auswirkungen, die auftreten könnten.

In diesem Bericht verfolgen wir zwei Strategien, um die Konsequenzen verschiedener Klimaschutzziele abzuschätzen:

1. Ausgehend von zwei CO₂ Stabilisierungszielen (550 ppm und 450 ppm) werden wir die maximal erlaubten globalen Emissionen präsentieren, die es, im Vergleich zu einem Referenzszenario, ermöglichen, die gesetzten Ziele zu erreichen. Da Schwefeldioxidemissionen durch die Bildung von Sulfataerosolen eine die Atmosphäre abkühlende und damit den Klimawandel abschwächende Wirkung aufweisen, wurde zusätzlich ein Szenarioansatz für regionale und globale Schwefelemissionen entwickelt.
2. In einer zweiten Analyse wurde der sogenannte „Safe Landing“ Ansatz genutzt, um eine Spanne erlaubter Emissionen, im Gegensatz zu den einzelnen Emissionspfaden des ersten Ansatzes, zu berechnen. Mit Hilfe dieses Ansatzes werden die globalen Emissionen berechnet, die es ermöglichen, langfristige Klimaschutzziele, wie z.B. das einer maximalen Temperaturerhöhung von 2°C, zu erreichen.

Ausgehend von einer kurzen Beschreibung des IMAGE Modells in Kapitel 2, werden in Kapitel 3 die gewählten Konzentrationspfade sowie die daraus berechneten globalen Emissionspfade beschrieben. In Kapitel 4 folgt eine Beschreibung des Umfangs der notwendigen globalen Reduktionsmaßnahmen sowie eine mögliche regionale Verteilung dieser Maßnahmen. Eine Reihe von Auswirkungsindikatoren sowie das Ausmaß der Auswirkungen der gewählten Stabilisierungsziele werden in Kapitel 5 beschrieben. Die Ergebnisse der Anwendung des „Safe Landing“ Konzeptes auf die langfristigen Klimaschutzvorstellungen der EU und der AOSIS Gruppe werden in Kapitel 6 dargestellt. Der Bericht endet mit einigen kurzen Schlußfolgerungen in Kapitel 7.

2. Das IMAGE Modell

In diesem Kapitel wird eine kurze Einführung in das IMAGE 2.1 Modell gegeben, das als Instrument für einen Großteil der Auswirkungsanalysen innerhalb dieses Projektes genutzt wurde.

2.1 Überblick über das IMAGE Modell

Das IMAGE 2.1 Modell liefert als ein integriertes globales Modell (Alcamo *et al.* 1994a und Alcamo *et al.* 1998a) umfassende, räumlich detaillierte und quantifizierte Informationen über Trends von Treibhausgasemissionen und ihre Auswirkungen auf das Klima, die Biosphäre und die Gesellschaft. Die Haupteingabegrößen für das Modell und die Triebkräfte für die Szenarien, die in dieser Studie vorgestellt werden, sind Veränderungen in der Bevölkerungszahl, der Wirtschaftskraft und der Nutzung von Technologien. Basierend auf Annahmen über diese Triebkräfte berechnet IMAGE 2.1 Änderungen im zukünftigen Energieverbrauch, Nahrungsmittelkonsum und der Holznutzung. Diese Verbräuche führen zu Treibhausgasemissionen aus dem Energie- und Industriesektor, Verschiebungen in der Landnutzung und Landbedeckung sowie Änderungen in den Flüssen von Gasen aus der terrestrischen Umwelt. Die Emissionen und Flüsse von Gasen wiederum, führen zu einer Änderung der atmosphärischen Zusammensetzung der verschiedenen Gase sowie zu einer Änderung des Wärme- und Wassertransportes zwischen terrestrischer, ozeanischer und atmosphärischer Umwelt. Schließlich beeinflussen diese Flüsse das regionale Klima, was wiederum unterschiedliche Veränderungen der terrestrischen und der ozeanischen Umwelt zur Folge hat; beispielsweise, indem sich Getreideerträge ändern und damit der Bedarf an landwirtschaftlicher Fläche.

Das Modell besteht aus 13 unabhängigen globalen Untermodellen, die in drei vollständig gekoppelte Modellsysteme gegliedert sind. Dieses sind das Energie-Industrie-, das Terrestrische- sowie das Atmosphäre-Ozean-System (siehe

Abbildung 1). Die Energie-Industrie Modelle berechnen die Emissionen von Treibhausgasen und anderen Gasen aus fünf Sektoren in 13 Weltregionen, basierend auf Abschätzungen für industrielle Produktion und Energienutzung (siehe Abbildung 2). Die Modelle des terrestrischen Systems simulieren Änderungen in der globalen Landnutzung und Landbedeckung auf 0.5° mal 0.5° Rasterbasis und berücksichtigen den Bedarf und die potentielle landwirtschaftliche Produktivität einer Region. Diese Modelle berechnen auch die aus der Landnutzungsänderung resultierenden Gasflüsse zwischen terrestrischer Umwelt und Atmosphäre. Die Atmosphäre-Ozean Modelle berechnen die Änderung in der atmosphärischen Zusammensetzung der Treibhaus- und anderen Gase, Änderungen in der Wärme- und Wasserbilanz der Erde sowie die daraus resultierenden Verschiebungen von Temperatur- und Niederschlagsmustern. Jedes dieser Untermodelle wurde entweder mit Daten für den Zeitraum 1970 bis 1990, oder, je nach Eignung und Verfügbarkeit von Daten mit einem Langzeitmittelwert validiert. Einen Überblick über die Entwicklung sowie die Validierung des IMAGE Gesamtmodells ist in Alcamo *et al.* (1994b) zu finden. Details

über die Entwicklung und den Test des Energie-Industrie Modellsystems finden sich in de Vries, *et al.* (1994); für das terrestrische Modellsystem in Klein Goldewijk, *et al.* (1994), Kreileman und Bouwman (1994), Leemans und van den Born (1994) und Zuidema *et al.* (1994). Für das Atmosphäre-Ozean Modellsystem findet sich eine Beschreibung in de Haan *et al.* (1994) sowie Krol und van der Woerd (1994).

IMAGE 2
Framework of Models and Linkages

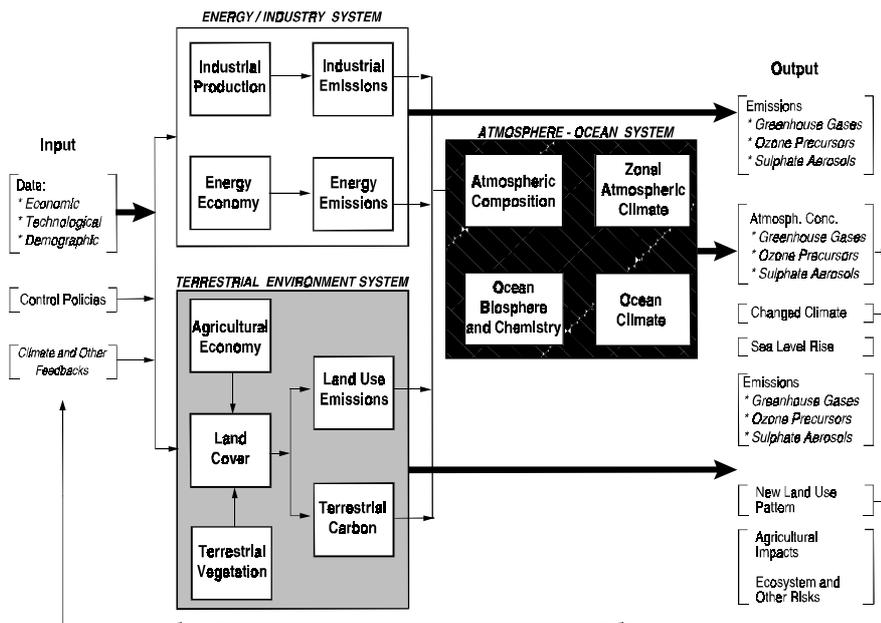


Abbildung 1: Schematisches Diagramm des IMAGE 2.1 Modells.

2.2 Referenzszenarien

Als Ausgangspunkt für die Analyse von Klimaschutzstrategien ist es notwendig, ein Referenzszenario zur Verfügung zu haben, das die Konsequenzen für den Fall aufzeigt, daß keine politischen Maßnahmen zum Schutz des Klimas ergriffen werden. Für diesen Bericht nutzen wir eine modifizierte mittlere Version der drei sogenannten Baseline Szenarien des IMAGE 2 Modells. Das Originalszenario wird Baseline A Szenario genannt; eine detaillierte Beschreibung dieses Szenarios findet sich in Alcamo (1998b). Die Annahmen über die entscheidenden Triebkräfte des Baseline A Szenarios stammen aus dem mittleren, d.h. dem IS92a Szenario des IPCC (Legget *et al.*, 1992). In diesem Szenario wächst die Weltbevölkerung bis zum Jahr 2100 auf 11.5 Mrd. Menschen an. Das Bruttosozialprodukt wächst zwischen 1990 und 2100 weltweit mit einer durchschnittlichen Rate von 2.3% pro Jahr. Diese Annahmen variieren von Region zu Region, aber für die meisten Industrieländer stabilisiert sich die Bevölkerungszahl und das ökonomische Wachstum verlangsamt sich in den kommenden Jahrzehnten. Für die meisten Entwicklungsländer wird dagegen bis zur zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts sowohl für die Bevölkerung als auch für die Wirt-

schaft ein starkes Wachstum angenommen.

Die modifizierte Version dieses Szenarios beinhaltet die Verpflichtungen des Kyoto Protokolls, demzufolge die Annex B Staaten¹ sich darauf einigten, die Emissionen von sechs Treibhausgasen bis zum Verpflichtungszeitraum 2008-2012 im Verhältnis zu ihren 1990 Emissionen um 5.2% zu reduzieren. Für dieses Referenzszenario werden für die Zeit nach 2010 keine weiteren Maßnahmen angenommen. D.h. die Emissionen der Annex B Staaten werden zwischen 2010 und 2100 konstant gehalten, während die Emissionen der Nicht-Annex B Staaten wie im original Baseline A Szenario ansteigen. Dieses neue Referenzszenario wird im Folgenden "Kyoto Szenario" genannt.

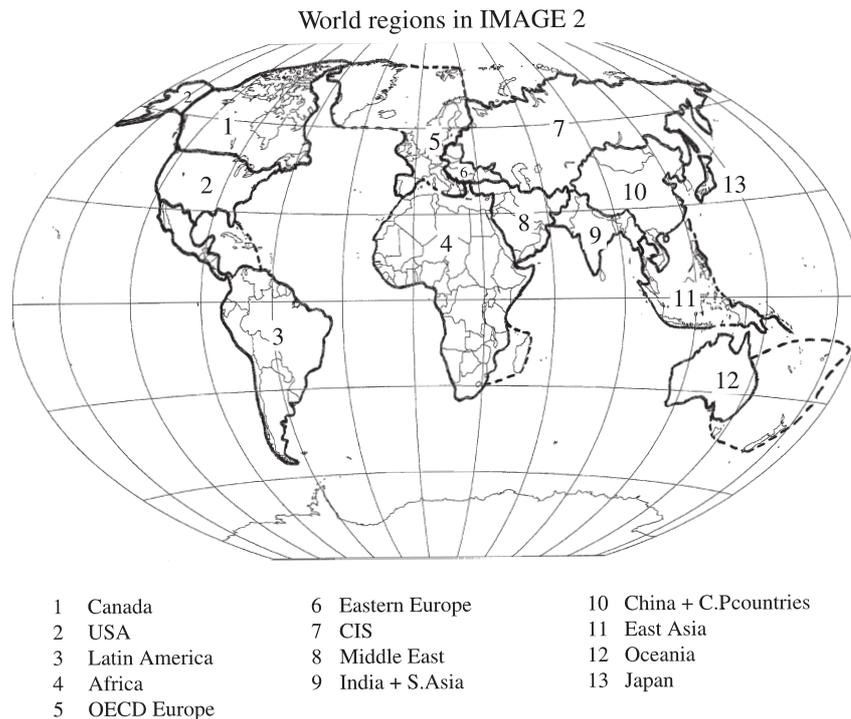


Abbildung 2: Einteilung der Weltregionen im IMAGE 2.1 Modell

¹ Annex B Länder sind die Parteien der Klimarahmenkonvention, die sich im Rahmen des Kyoto Protokolls zu Emissionskontrollen verpflichtet haben und in Anhang B dieses Protokolls aufgeführt sind.

3. Stabilisierung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen und globale Emissionen

Für die Abschätzung der globalen anthropogenen CO₂ Emissionen, die ein vorgegebenes Stabilisierungsziel erreichbar machen, wurde das IMAGE Modell im Inversmodus genutzt. D.h. es wurde ein Konzentrationspfad definiert und die erlaubten CO₂ Emissionen wurden aus diesem Konzentrationspfad zurückberechnet. Für eine Auswirkungsanalyse müssen jedoch zusätzliche Annahmen über die Emissionspfade der Nicht-CO₂ Gase gemacht werden. Diese Annahmen sowie die gewählten CO₂ Konzentrationspfade werden im folgenden Kapitel beschrieben.

3.1 CO₂ Konzentrationspfade

Einem Vorschlag der EU im Rahmen der Klimaverhandlungen zufolge, sollte ein Konzentrationsniveau unterhalb von 550 ppm CO₂ in der Atmosphäre als Richtgröße für die zukünftigen Anstrengungen im Klimaschutz dienen. Um die Konsequenzen dieses Vorschlags zu untersuchen, wurde eine eingehende Analyse dieses Konzentrationszieles sowie eines noch weitergehenden Zieles von 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre durchgeführt. Für diese Analysen muß, neben dem Konzentrationsziel selbst, auch der zeitliche Verlauf der CO₂ Konzentrationen (Zeit- oder Konzentrationspfad) festgelegt werden. Für beide Ziele wurden die Konzentrationspfade verwendet, die im Rahmen der Arbeit des IPCC eingesetzt wurden und die in Enting *et al.* (1994) beschrieben sind. Bei diesen Konzentrationspfaden wurde ein möglichst weicher Übergang zwischen historischen CO₂ Konzentrationen (1750-1990) und dem jeweiligen zukünftigen Konzentrationsziel angestrebt. Diese Zeitpfade wurden für einen IPCC Modellvergleich entwickelt, an dem auch das IMAGE Modell beteiligt war. Den so festgeschriebenen Konzentrationspfaden folgend, wird das Stabilisierungsziel von 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre im Jahr 2100 erreicht, während beim 550 ppm Ziel, wie vom IPCC vorgegeben, erst im Jahr 2150 eine Stabilisierung einsetzt. Die CO₂ Konzentrationspfade bis zum Jahr 2100 sind für beide Ziele sowie für das Referenzszenario in Abbildung 3 dargestellt.

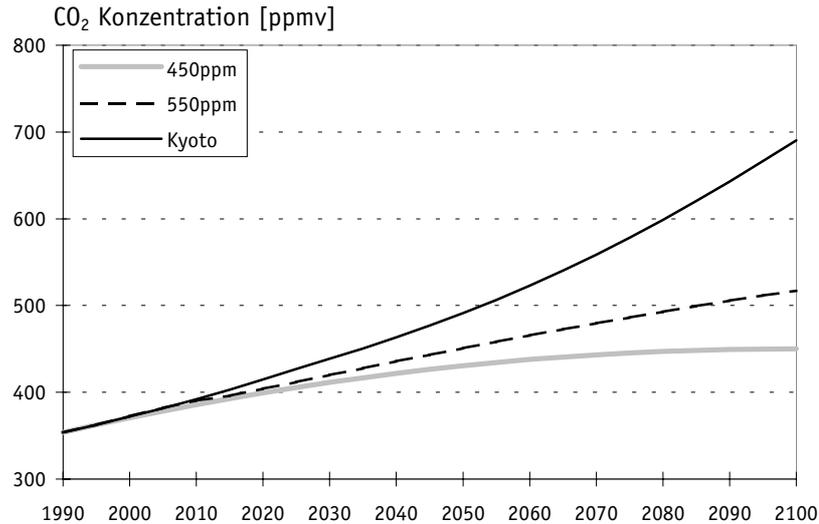


Abbildung 3: Atmosphärische CO₂ Konzentrationen von 1990 bis 2100 für das 450 ppm- und das 550 ppm Stabilisierungsszenario und das Kyoto Referenzszenario.

Der CO₂ Konzentrationspfad des Kyoto Szenarios verdeutlicht den Unterschied zwischen dem, was geschehen würde, wenn keine weiteren Reduktionsmaßnahmen als die des Kyoto Protokolls umgesetzt werden würden und zwei möglichen Stabilisierungszielen. So steigt die atmosphärische CO₂ Konzentration zwischen 2010 und 2020 für das Kyoto Szenario schon um ca. 2.2 ppm Jahr (nach einer Rate von 1.7 ppm pro Jahr 1990 für alle drei Szenarien), während für das 550 ppm Szenario nur noch ein Anstieg um 1.6 ppm pro Jahr und für das 450 ppm Szenario um 1.4 ppm pro Jahr erlaubt ist. Diese Zuwachsraten beschleunigen sich für das Kyoto Szenario, so daß bis zum Jahr 2100 eine CO₂ Konzentration von 690 ppm erreicht wird. Dieser Konzentrationspfad weist 2100 noch eine deutlich steigende Tendenz auf. Im Vergleich dazu erreicht das 550 ppm Szenario im Jahr 2100 517 ppm CO₂ mit noch leicht steigender Tendenz, während sich die CO₂ Konzentration des 450 ppm Szenarios beim Zielwert 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre stabilisiert.

3.2 Emissionen aus dem Energie/Industrie Sektor und der Landwirtschaft

Das Kyoto Protokoll deckt sechs Gase bzw. Gruppen von Gasen ab, die aus sehr unterschiedlichen Quellen und Sektoren stammen, nämlich der Energieproduktion, der industriellen Produktion und der Landwirtschaft. Alle diese Gase müssen bei einer Auswirkungsanalyse berücksichtigt werden. Die Emissionsverläufe der drei wichtigsten von ihnen, nämlich CO₂, CH₄ und N₂O, werden an dieser Stelle im Detail behandelt. Die übrigen Gase bzw. Substanzklassen des Kyoto Protokolls, nämlich die fluorierten- und perfluorierten Kohlenwasserstoffe (H-FKW's und FKW's) werden jedoch bei den Berechnungen der Klimaauswirkungen berücksichtigt. Dies gilt ebenfalls für die halogenierten Kohlenwasserstoffe, deren Auslaufen durch das Montreal Protokoll geregelt wird (FCKW's und H-FCKW's), sowie für den atmosphärischen Ozon- und Wassergehalt.

Gegenwärtig wird die Gesamtheit aller anthropogenen Treibhausgasemissionen auf 11.9 Gt C pro Jahr in CO₂ äquivalenten Emissionen² geschätzt (Tabelle 2). CO₂, CH₄ und N₂O zusammen tragen 90% zu diesen Emissionen bei; die restlichen 10% verteilen sich auf die FCKW's und die übrigen klimawirksamen Gase des Montreal Protokolls (ca. 9%) sowie die Emissionen der fluorierten- und perfluorierten Kohlenwasserstoffe und SF₆ (ca. 1%).

Tabelle 2: Abschätzung der gegenwärtigen globalen anthropogenen Treibhausgasemissionen in CO₂ äquivalenten Emissionen [Gt C pro Jahr] im Zeitraum 1980-1990.

Gase	Gesamtemissionen	Energie/Industrie	Landnutzung
CO ₂ ¹⁾	7.1	5.5	1.6
CH ₄ ¹⁾	2.1	0.54	1.56
N ₂ O ¹⁾	1.51	0.35	1.16
FCKW's ²⁾	1.07 (1.47) ³⁾	1.07 (1.47) ³⁾	0
HFC's, PFC's, SF ₆ ⁴⁾	0.13	0.13	0
Gesamt	11.9 (12.3)³⁾	7.59 (7.99)³⁾	4.32

1) Emissionsdaten des IPCC (Prather *et al.*, 1995).

2) Emissionsdaten von Pepper *et al.* (1992), GWPs von Schimel *et al.* (1996). Die GWPs berücksichtigen auch den kühlenden Effekt der FCKWs.

3) Wie 2), aber die GWPs berücksichtigen nur den direkten Effekt der FCKWs auf den Strahlungsantrieb.

4) Emissionen in CO₂ Äquivalenten von Olivier *et al.* (1996).

Betrachtet man die Emissionen nach Sektoren getrennt, so tragen die CO₂ Emissionen aus dem Energie/Industrie Sektor allein 5.5 Gt C pro Jahr oder 46% zu den Gesamtemissionen bei. Aber auch die Landnutzungsemissionen von CO₂, CH₄ und N₂O haben gegenwärtig mit 4.32 Gt C pro Jahr einen beachtlichen Anteil von ca. 36%. Ihre Abschätzung ist allerdings mit größeren Unsicherheiten behaftet als die der CO₂ Emissionen aus dem Energie/Industrie Sektor.

Ein weiterer bemerkenswerter Punkt ist, daß gegenwärtig 76% der CH₄ und N₂O Emissionen aus dem Landnutzungssektor stammen (siehe Abbildung 4). Alcamo und Swart (1998c) fanden bei der Analyse von 20 Szenarien für Landnutzungsemissionen, daß diese auf globaler Ebene bis Mitte oder sogar Ende des 21. Jahrhunderts für die meisten Szenarien zunehmen. Die einzige Ausnahme bilden CO₂ Emissionen aus Entwaldungsmaßnahmen, die gegen Ende des 21. Jahrhunderts abnehmen. Dies ist zurückzuführen auf eine verlangsamte Ausdehnung von Agrarflächen oder auf das zur Neige gehen von bewaldeten Flächen. Sowohl der relativ hohe jetzige Anteil der Landnutzungsemissionen, wie auch die projizierten Trends machen deutlich, daß Emissionen aus der Landwirtschaft besonders in Zukunft eine wichtige Rolle spielen können.

² Es wurde das globale Erwärmungspotential (GWP) nach Schimel *et al.* (1996) genutzt. GWP N₂O: 310 kg CO₂/kg N₂O und GWP CH₄: 21.0 kg CO₂/kg CH₄.

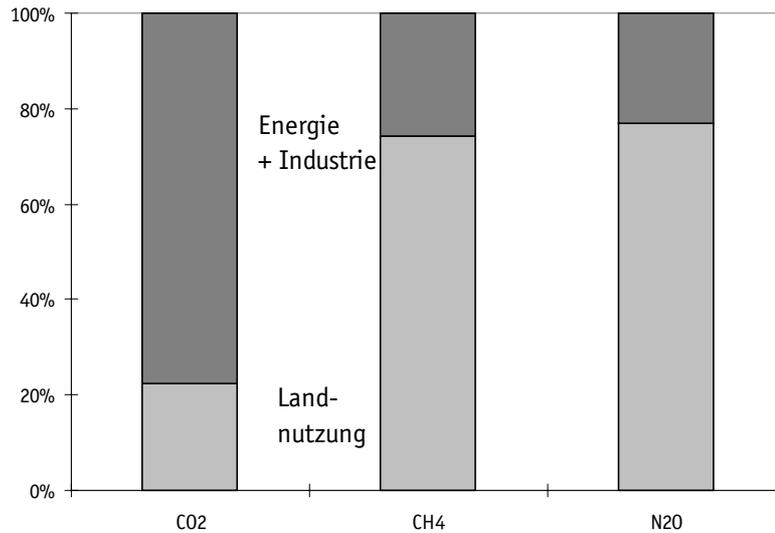


Abbildung 4: Prozentsatz der globalen CO₂, CH₄ und N₂O Emissionen in den 1990'ern aus dem industriellen, energieproduzierenden und Landnutzungssektor. Emissionsdaten des IPCC (Prather *et al.*, 1995).

In den folgenden Kapiteln werden die globalen Emissionsverläufe von CO₂, N₂O und CH₄ zwischen 1990 und 2100 für die zwei Stabilisierungsszenarien sowie das Kyoto Referenzszenario im Detail dargestellt. Es werden sowohl die Emissionen aus dem Energie/Industriesektor als auch aus dem landwirtschaftlichen Sektor behandelt, da die Emissionen aus diesem Sektor mit zunehmendem Bedarf an landwirtschaftlichen Produkten in Zukunft an Bedeutung gewinnen könnten.

3.2.1 CO₂ Emissionen

Um die maximal erlaubten globalen CO₂ Emissionen aus dem Energie/Industrie Sektor zu berechnen, die langfristig zu einer Stabilisierung der CO₂ Konzentration führen, wird das IMAGE Modell im Inversmodus genutzt, d.h. ein CO₂ Konzentrationspfad wird vorgegeben und das Modell berechnet die zulässigen Emissionen unter Berücksichtigung der Biosphäre und der ozeanischen CO₂ Aufnahme aus dem jährlichen Konzentrationsanstieg zurück. Für die CO₂ Emissionen aus der Landnutzung werden keine Reduktionsmaßnahmen angenommen, d.h. sie folgen den Annahmen des Baseline A Referenzszenarios. In diesem Szenario treten CO₂ Emissionen durch die Abholzung der natürlichen Vegetation vor allem in weiten Teilen Afrikas und Asiens auf, da in diesen Regionen der Bedarf an landwirtschaftlich nutzbarer Fläche stark ansteigt. Die CO₂ Landnutzungsemissionen sind in Abbildung 5 zusätzlich dargestellt.

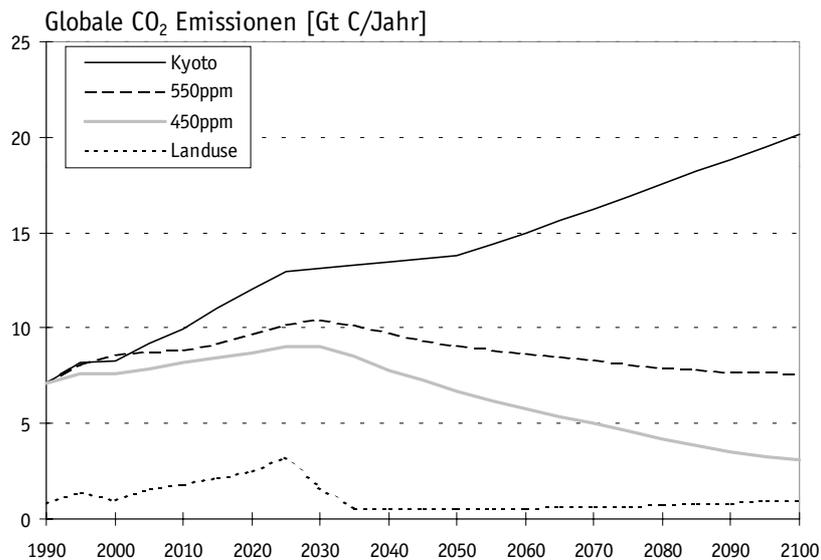


Abbildung 5: Globale CO₂ Emissionen der zwei Stabilisierungsszenarien und des Kyoto Referenz Szenarios. Die oberen Linien beinhalten Emissionen aus dem Energie/Industrie Sektor sowie Emissionen aus der Landnutzung. Die kurz gestrichelte Linie zeigt ausschließlich Emissionen aus der Landnutzung.

Aus den vorgegebenen CO₂ Konzentrationspfaden folgt, daß die globalen anthropogenen CO₂ Emissionen der Stabilisierungsszenarien bis zum Jahr 2030 ansteigen dürfen und danach eine mehr oder minder starke Reduktion der Emissionen notwendig wird. Dieser Verlauf ergibt sich (1) aus dem erlaubten jährlichen CO₂ Konzentrationsanstieg, der zum Ende der Simulationsperiode immer geringer wird und (2) aus der Abholzung bewaldeter Flächen (insbesondere in Afrika), der zu einer verringerten CO₂ Aufnahmekapazität der Biosphäre um das Jahr 2030 herum führt und damit eine zusätzliche Verringerung der anthropogenen Emissionen ab diesem Zeitraum notwendig macht. Da der Konzentrationspfad des 450 ppm Szenarios durchweg niedriger liegt als der des 550 ppm Szenarios (siehe Kapitel 3.1) ist die CO₂ Menge, die unter diesem Szenario jährlich an die Atmosphäre abgegeben werden darf auch entsprechend niedriger als unter dem 550 ppm Szenario. Die allgemeine Form der Emissionskurven ist jedoch unter beiden Stabilisierungsszenarien ähnlich, da beiden Stabilisierungsszenarien die gleiche Änderung der Landnutzungsmuster zugrunde liegen: Bis um das Jahr 2030 herum dürfen die anthropogenen CO₂ Emissionen auf ein Maximum ansteigen und müssen danach reduziert werden, um die niedrigere CO₂ Aufnahme der Biosphäre zu kompensieren und natürlich dem geringer werdenden CO₂ Konzentrationsanstieg gerecht zu werden.

Bei 7.1 Gt C im Jahr 1990 beginnend, steigen die Emissionen aller drei Szenarien bis zum Jahr 2030 an. Unter dem Kyoto Referenzszenario verdoppeln sich die CO₂ Emissionen bis 2030 annähernd auf 13.2 Gt C pro Jahr (186% der 1990 Emissionen) und steigen bis 2100 weiter auf 20 Gt C pro Jahr an. Wird eine Stabilisierung bei 550 ppm CO₂ in der Atmosphäre angestrebt, so dürfen die Emissionen bis 2030 nicht höher als 10.5 Gt C (oder 148% der 1990 Emissionen) ansteigen und müssen dann bis 2100 wieder auf 7.6 Gt C pro

Jahr oder 107% der 1990 Emissionen verringert werden. Für das 550 ppm Ziel dürfen die globalen Emissionen also leicht über dem Niveau von 1990 bleiben. Da eine Stabilisierung der CO₂ Konzentration bei 550 ppm erst im Jahr 2150 eintritt, werden nach 2100 weitere Reduktionsmaßnahmen notwendig sein, d.h. die Reduktionsmaßnahmen sind unter diesem Stabilisierungsszenario über einen längeren Zeitraum gestreckt. Soll ein strikteres Stabilisierungsziel von 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre umgesetzt werden, so dürfen die Emissionen 9.1 Gt C im Jahr 2030 (128% der 1990 Emissionen) nicht übersteigen und müssen bis 2100 auf 3.1 Gt C pro Jahr (oder 44% der 1990 Emissionen) reduziert werden.

Die hauptsächlich aus der Abholzung von Wäldern stammenden CO₂ Landnutzungsemissionen betragen 1990 etwa 1.0 Gt C pro Jahr und steigen bis 2025 auf 3.3 Gt C an. Nach 2030 fallen sie auf 1.0 Gt C pro Jahr und bleiben bis 2100 auf diesem Niveau. Die zunehmende Rodung von Wäldern in den ersten Jahrzehnten des 21. Jahrhunderts spiegelt den wachsenden Bedarf an landwirtschaftlicher Fläche in Regionen wie Afrika und Indien wider. Für die Zeit nach 2030 berechnet IMAGE, daß die bewaldeten Flächen bereits so stark zurückgegangen sind, daß die aus den Landnutzungsänderungen stammenden CO₂ Emissionen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts, im Vergleich zu den Energie/Industrie Emissionen, nur noch eine untergeordnete Rolle spielen.

3.2.2 N₂O Emissionen

Für die Berechnung globaler N₂O Emissionen sind keine festgelegten Konzentrationspfade verfügbar. Daher wurden die N₂O Emissionen des Baseline A Szenarios des IMAGE Modells genutzt und einige Annahmen für die Verminderung der N₂O Emissionen gemacht. Für die N₂O Emissionen aus dem Energie/Industrie Sektor wurde für die Stabilisierungsszenarien angenommen, daß sie proportional zu den CO₂ Emissionen aus diesen Sektoren reduziert werden. Die N₂O Emissionen aus der Landnutzung folgen dem Baseline A Szenario des IMAGE Modells, da für diese Emissionen bisher keine sicheren Informationen über Reduktionsmaßnahmen verfügbar sind. Die Landnutzungsemissionen stammen im IMAGE Modell aus fünf Hauptquellen: Einsatz von Mineral- und Wirtschaftsdünger, Biomasseverbrennung, Verbrennung landwirtschaftlicher Rückstände sowie der verstärkten N₂O Freisetzung aus Böden in Folge der Abholzung von Wäldern. Von diesen Quellen trägt der Einsatz von Stickstoffdüngern, mit weltweit steigender Tendenz, am stärksten bei.

Die aus diesen Annahmen resultierenden anthropogenen N₂O Gesamtemissionen (d.h. Energie/Industrie- plus Landnutzungsemissionen) sowie die Landnutzungsemissionen sind in Abbildung 6 dargestellt.

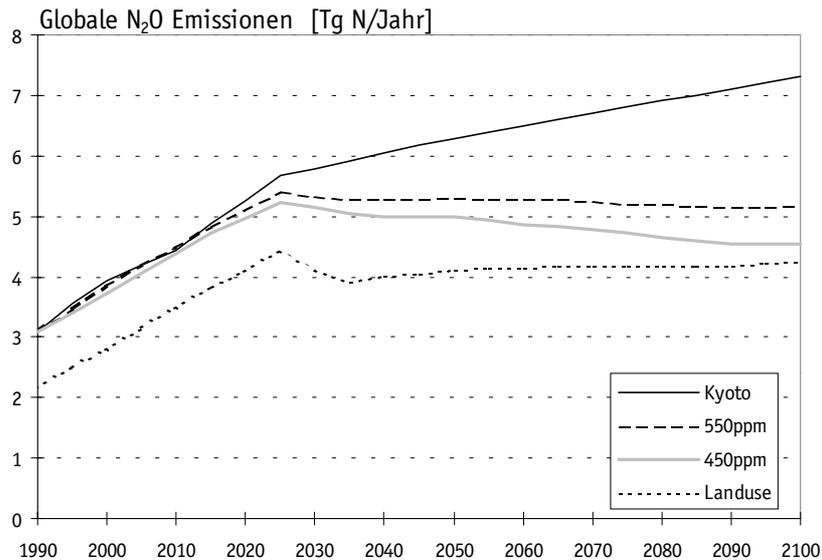


Abbildung 6: Globale anthropogene N₂O Emissionen aus dem Energie/Industrie Sektor und der Landnutzung für zwei Stabilisierungsszenarien sowie das Kyoto Referenzszenario. Die zusätzliche kurz gestrichelte Linie zeigt den Beitrag der Landnutzungsemissionen.

Die globalen N₂O Emissionen steigen von 3.1 Tg N im Jahr 1990 bis auf ein Maximum von 5.2 Tg N im Jahr 2025 für das 450 ppm Szenario und 5.4 Tg N für das 550 ppm Szenario. Dies entspricht 168% und 174% der 1990 Emissionen für das 450 ppm bzw. 550 ppm Szenario. Für das Kyoto Szenario erreichen die Emissionen 5.7 Tg N (oder 184% der 1990 Emissionen) im Jahr 2025 und steigen bis 2100 weiter auf mehr als das Doppelte der 1990 Emissionen an (7.3 Tg N oder 235% der 1990 Emissionen). Im Gegensatz zum Kyoto Szenario nehmen die Emissionen der Stabilisierungsszenarien nach 2025 leicht ab, da die N₂O Emissionen aus dem Energie/Industrie Sektor, aber auch die Emissionen, die durch Rodung von Wäldern verursacht werden, zurückgehen. Im Jahr 2100 betragen die globalen Emissionen noch 4.6 Tg N (oder 148% der 1990 Emissionen) für das 450 ppm Szenario und 5.2 Tg N (168% der 1990 Emissionen) für das 550 ppm Szenario.

Die Landnutzungsemissionen tragen 1990 mit 2.2 Tg N pro Jahr oder 71% zu den N₂O Gesamtemissionen bei. Durch die Annahme, daß für die Landnutzungsemissionen in den Stabilisierungsszenarien keine Minderungsmaßnahmen umgesetzt werden, steigt dieser Anteil bis zum Jahr 2100 deutlich an. Er erreicht 93% und 82% der Gesamtemissionen für das 450 ppm bzw. 550 ppm Szenario. Dieser Beitrag mag unrealistisch hoch erscheinen, da zu erwarten ist, daß auch die Landwirtschaft einen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen leisten wird. Aber auch im Kyoto Szenario, für das wir annehmen, daß die landwirtschaftlichen Emissionen der Industrieländer leicht vermindert werden, beträgt der Anteil im Jahr 2100 immer noch 58% der gesamten N₂O Emissionen.

3.2.3 CH₄ Emissionen

Wie für N₂O, gibt es auch für den atmosphärischen CH₄ Gehalt keinen festgeschriebenen Konzentrationspfad zwischen 1990 und 2100. Daher wurden auch hier die Emissionen des IMAGE Baseline A Szenarios verwendet und angenommen, daß die CH₄ Emissionen aus dem Energie/Industrie Sektor proportional zu den CO₂ Emissionen dieser Sektoren reduziert werden, während die CH₄ Emissionen aus der Landnutzung dem Baseline A Szenario folgen. Die CH₄ Emissionen dieses Szenarios spiegeln einen weltweit zunehmenden Bedarf an Nahrungsmitteln wider. So stammen in IMAGE die landwirtschaftlichen CH₄ Emissionen aus sieben unterschiedlichen Quellen, von denen Reisanbau und enterische Fermentation den größten Anteil einnehmen. Insbesondere die CH₄ Emissionen aus enterischer Fermentation gewinnen langfristig an Bedeutung, da für viele Regionen der Welt ein steigender Fleischkonsum angenommen wird. In Abbildung 7 sind die globalen CH₄ Emissionen aus der Landwirtschaft sowie die CH₄ Gesamtemissionen (Energie/Industrie Sektor plus Landnutzungsemissionen) aufgeführt.

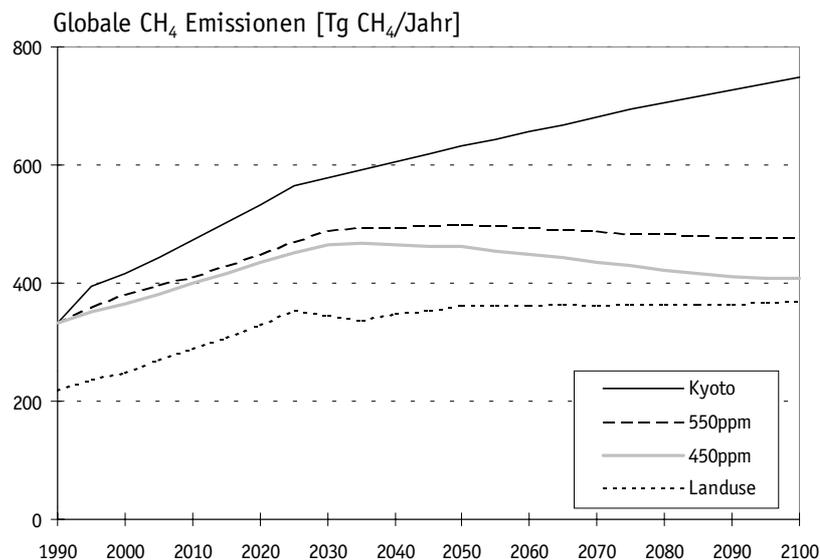


Abbildung 7: Globale anthropogene CH₄ Emissionen aus dem Energie-, Industrie- und Landnutzungssektor. Die kurz gestrichelte Linie zeigt die aus dem Landnutzungssektor stammenden Emissionen.

Die anthropogenen CH₄ Gesamtemissionen steigen von 333 Tg CH₄ im Jahr 1990 auf ein Maximum von 465 Tg CH₄ für das 450 ppm Szenario und 488 Tg CH₄ für das 550 ppm Szenario um das Jahr 2030 herum (siehe Abbildung 7). Dies ist gleichbedeutend mit 140% der 1990 Emissionen für das 450 ppm Szenario und 147% der 1990 Emissionen für das 550 ppm Szenario. Die Emissionen des Kyoto Referenzszenarios verdoppeln sich im gleichen Zeitraum annähernd auf 577 Tg CH₄ oder 173% der 1990 Emissionen. Obwohl die CH₄ Emissionen der Stabilisierungsszenarien nach 2030 leicht abnehmen, bleiben sie 2100 bei 121% der 1990er Emissionen (407 Tg CH₄ pro Jahr) für das 450 ppm Szenario und bei 143% der 1990er Emissionen (477 Tg CH₄ pro Jahr) für das 550 ppm Szenario. Für das

Kyoto Szenario steigen die CH₄ Emissionen bis 2100 weiter auf 750 Tg CH₄ pro Jahr oder 227% der 1990er Emissionen.

Für die CH₄ Landnutzungsemissionen, für die keine Minderungsmaßnahmen angenommen werden, finden wir einen Trend, der vergleichbar ist mit dem der N₂O Emissionen. Schon 1990 tragen die Landnutzungsemissionen mit 65% zu den CH₄ Gesamtemissionen bei. Dieser Anteil erhöht sich bis 2100 auf 77% für das 550 ppm Szenario und auf 90% für das 450 ppm Szenario. Für das Kyoto Szenario, bei dem nur die Landnutzungsemissionen der Industrieländer leicht vermindert werden, findet sich ein Anteil von 49% der CH₄ Gesamtemissionen. D.h. für die CH₄ Emissionen aus dem Landnutzungssektor läßt sich der gleiche Schluß ziehen wie für die N₂O Emissionen aus diesem Sektor: Sie leisten, im Gegensatz zu den CO₂ Emissionen aus den Landnutzungsänderungen, über den gesamten Simulationszeitraum einen signifikanten Beitrag zu den Gesamtemissionen dieser Gase.

3.2.4 Schwefeldioxid Emissionen: Der "Pollutant Burden" Ansatz

Im Zusammenhang mit der Entwicklung neuer Treibhausgasemissionsszenarien wird das IPCC auch neue Schwefelemissionsszenarien berücksichtigen, da die hauptsächlich aus SO₂ Emissionen stammenden Sulfatpartikel in der Atmosphäre einen dem Treibhauseffekt entgegenwirkenden Einfluß haben. Allerdings wird Schwefel relativ schnell aus der Atmosphäre ausgetragen und ist somit in seiner die Atmosphäre abkühlenden Wirkung sowohl räumlich als auch zeitlich begrenzt. Daher ist es naheliegend diese Emissionen nicht nur auf globaler Skala, sondern auch auf der regionalen Skala zu simulieren.

In seinem Überblicksartikel über existierende Schwefelszenarien kam Grübler (1998) zu dem Schluß, daß die zukünftigen Trends für Schwefelemissionen regional sehr heterogen sein werden. Für die OECD Staaten wird in den referierten Szenarien durchgehend eine Abnahme der Emissionen angenommen, während für Asien z.T. ein rapider Anstieg der Emissionen prognostiziert wird. Diese Heterogenität ist ein weiterer Grund dafür, daß SO₂ Emissionen nicht nur auf globaler Skala simuliert werden sollten.

Um regional konsistente SO₂ Emissionsszenarien berechnen zu können, wurde der neue sogenannte "Pollutant Burden" Ansatz (PBA) entwickelt. Dieser Ansatz wurde genutzt, um für die 13 Regionen des IMAGE Modells SO₂ Emissionsszenarien für den Zeitraum von 1990 bis 2100 zu berechnen. Es wird unterschieden zwischen den Regionen, die bereits mit SO₂ Reduktionsmaßnahmen begonnen haben (im Folgenden Industrieregionen genannt) und den Regionen, die noch keine Maßnahmen ergriffen haben (Entwicklungsregionen). Insbesondere für letztere wird, zumindest kurzfristig, ein kräftiger Anstieg der Emissionen erwartet (Grübler, 1998). Eine entscheidende Frage für den Einfluß der SO₂ Emissionen auf die Entwicklung des Klimas ist daher: Wann beginnen die Entwicklungsregionen mit Maßnahmen zur Minderung ihrer SO₂ Emissionen?

Aus dieser Frage leiten sich die drei Hauptannahmen des "Pollutant Burden" Ansatzes ab: (1) *Der Zeitpunkt, zu dem Reduktionsmaßnahmen in den Entwicklungsregionen beginnen*: Die Entwicklungsregionen beginnen ihre SO₂ Emissionen zu kontrollieren, sobald die durch SO₂ verursachte Schadstofflast (pollutant burden) die gleiche Größenordnung er-

reicht, wie in den Industrieregionen zu dem Zeitpunkt als diese begannen ihre Emissionen zu reduzieren. (2) *Die Geschwindigkeit der Emissionsreduktionen in den Entwicklungsregionen*: Sobald die Reduktionsmaßnahmen in den Entwicklungsländern einmal begonnen haben, werden sie mit einer Reduktionsrate weitergeführt, wie sie in den Industrieländern derzeit beobachtet und für die Zukunft erwartet wird. (3) *Die Fortsetzung der SO₂ Reduktionsmaßnahmen in den Industrieregionen*: Die Industrieregionen werden ihre bereits begonnenen SO₂ Reduktionsmaßnahmen in der Zukunft fortsetzen und zum Teil noch verstärken.

SO₂ Emissionsszenarien für die Entwicklungsregionen

Zur Berechnung regionaler Schwefelemissionsszenarien nach dem "Pollutant Burden" Ansatz müssen für die Entwicklungsregionen zunächst vier Fragen beantwortet werden:

1. Was ist eine angemessene Größe, um die Umweltbelastung (Schadstofflast) durch Schwefelemissionen abzuschätzen?
2. Wie hoch ist der Schwellenwert für die Umweltbelastung durch SO₂ Emissionen, der zur Einleitung politischer Maßnahmen führt?
3. Wie groß ist die Verzögerung zwischen dem Ergreifen politischer Maßnahmen und der Umsetzung in Reduktionsmaßnahmen?
4. Wie schnell werden die Emissionen reduziert, nachdem einmal mit Minderungsmaßnahmen begonnen wurde?

1. Indikator für die Umweltbelastung durch Schwefelemissionen

Als Indikator für die SO₂ Schadstofflast wird die jährliche Emissionsrate pro Flächeneinheit verwendet. Ein direkteres Maß, wie z.B. die SO₂ Deposition oder Konzentration, konnte nicht genutzt werden, da Modelle für diese Art von Berechnungen zwar für einige Weltregionen, wie z.B. Europa und Asien, aber nicht für die restlichen Regionen der Welt zur Verfügung stehen. Abschätzungen für den zukünftigen regionalen Trend von SO₂ Emissionen sowie Emissionsdaten auf Rasterbasis für gegenwärtige Emissionen sind jedoch für die ganze Welt zur Verfügung. Aus einer Kombination dieser beiden Datensätze, nämlich den regionalen Szenarien für unverminderte SO₂ Emissionen sowie den gegenwärtigen SO₂ Emissionen auf Rasterbasis, lassen sich die gesuchten Emissionsraten pro Flächeneinheit berechnen, indem die regionalen Emissionen mit Hilfe der Rasterdaten über die Fläche der jeweiligen Region verteilt wird.

Für den "Pollutant Burden" Ansatz werden die regionalen SO₂ Emissionen des IMAGE Modells mit Hilfe des GEIA Datensatzes von Benckowitz *et al.* (1997), der globale SO₂ Emissionsdaten auf einem 1° x 1° Raster für die Zeit um 1985 zur Verfügung stellt, auf das benötigte Raster herunterskaliert. Aus diesem ersten Rechenschritt erhält man für jedes Jahr im Zeitraum 1990 bis 2100 die SO₂ Emissionen pro Flächeneinheit, die als Näherung für das Ausmaß der zukünftigen Umweltbelastung einer Region durch SO₂ angesehen werden.

2. Ableitung eines Grenzwertes für die Umweltbelastung durch SO_2 Emissionen

Für die Entwicklungsregionen wird angenommen, daß politische Umweltschutzmaßnahmen eingeleitet werden sobald auf einem kritischen Flächenanteil dieser Region ein kritischer, d.h. als zu hoch empfundener Emissionsfluß überschritten wird. D.h. es wird angenommen, daß eine hohe Schadstofflast auf einer kleinen Fläche der Region durchaus akzeptiert wird. Sobald die Flächenausdehnung mit dieser hohen Schadstofflast jedoch eine kritische Grenze überschreitet, werden politische Maßnahmen eingeleitet. Der entscheidende Punkt dieser Analyse besteht nun darin, diese beiden kritischen Größen, nämlich (a) den kritischen Emissionsfluß e_{crit} und (b) den kritischen Flächenanteil, abzuleiten.

(a) Um den kritischen Wert des Emissionsflusses (die kritische Schadstofflast e_{crit}) abzuleiten, wurde in drei Schritten vorgegangen: Im ersten Schritt wurde für mehrere kritische Emissionsflüsse e_{crit} berechnet, auf wieviel Prozent der Fläche einer Region diese e_{crit} -Werte für die regionalen Emissionen eines Jahres überschritten werden. Diese Berechnungen wurden für die regionalen Emissionen von Asien und Europa zwischen 1990 und 2100 durchgeführt.

Für den zweiten Schritt wurde das Critical Load Konzept herangezogen, um zu berechnen auf wieviel Prozent der Fläche von Europa und Asien die Critical Loads für dieselben regionalen Emissionen wie in Schritt 1 überschritten werden. Das Critical Load Konzept wurde genutzt, da es ein weithin akzeptiertes Maß für die Belastung von Waldökosystemen durch Schwefeldeposition darstellt. Von Posch *et al.* (1996) stehen die benötigten Überschreitungsflächen zur Verfügung, die mit Hilfe der RAINS Modelle für Europa und Asien (Alcamo *et al.*, 1990 und Foell *et al.*, 1995) berechnet wurden.

Im dritten und letzten Schritt wurden die Flächen bei denen die Critical Loads überschritten wurden, den Flächen gegenübergestellt, bei denen die verschiedenen kritischen Emissionsflüsse e_{crit} überschritten wurden (siehe Abbildung 8). Es wurde der Emissionsfluß als kritischer Fluß ausgewählt, bei dem es die beste Übereinstimmung mit der Fläche gab, bei der die Critical Loads überschritten wurden. Wird z.B. ein e_{crit} -Wert von 1.5 g S/m^2 gewählt, so findet man für Europa daß dieser Emissionsfluß auf 19% der Fläche von Europa überschritten wird und daß die Critical Loads für dieselben regionalen Emissionen auf 21% der Fläche von Europa überschritten werden (Abbildung 8). Insgesamt wurde gefunden, daß sowohl für Europa als auch für Asien kritische Emissionsflüsse zwischen 0.5 und 1.5 g S/m^2 die besten Übereinstimmungen in den Überschreitungsflächen ergaben.

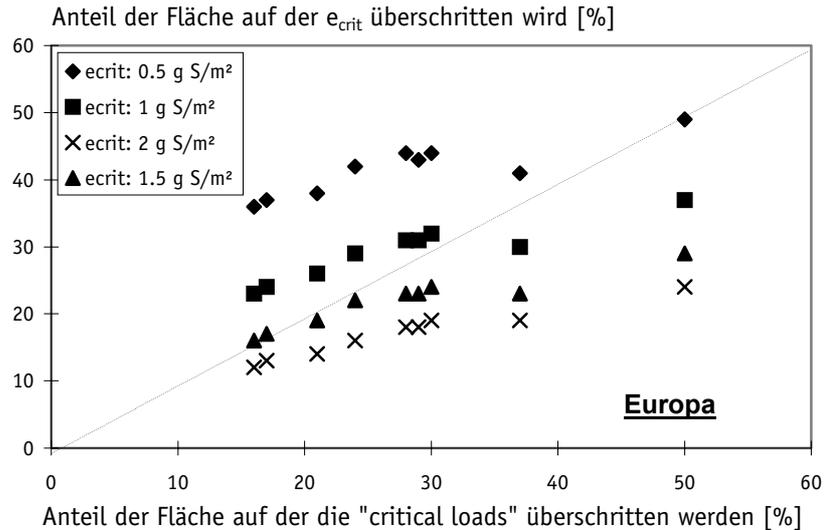


Abbildung 8: Gegenüberstellung der Flächenanteile von Europa, bei denen die kritischen Emissionsflüsse zwischen 0.5 und 2.0 g S/m² sowie die Critical Loads für die zukünftigen SO₂ Emissionen in Europa überschritten werden.

(b) Die kritische Fläche, oder genauer der kritische Flächenanteil einer Region, der zur Einleitung politischer Maßnahmen führt, wurde aus dem Zeitpunkt abgeleitet, zu dem die industrialisierten Regionen sich des Problems der Ökosystemversauerung durch SO₂ Emissionen bewußt wurden. Aus den regionalen Emissionen dieses Jahres und dem bereits abgeleiteten kritischen Emissionsfluß wurde die Fläche berechnet, auf der der kritische Emissionsfluß in den industrialisierten Ländern überschritten wurde. Da bereits eine Reihe von Ländern politische Maßnahmen zur Reduktion von SO₂ Emissionen eingeleitet haben, bekommen wir eine Bandbreite von kritischen Flächen, die als Indikator für den Beginn politischer Maßnahmen in Entwicklungsländern verwendet werden können.

3. Verzögerung zwischen der Einleitung politischer Maßnahmen und dem Beginn von SO₂ Reduktionsmaßnahmen

Zwischen dem Zeitpunkt, zu dem man sich in der Politik des Problems der Umweltprobleme durch SO₂ Emissionen bewußt wird und dem konkreten Einleiten von Reduktionsmaßnahmen vergehen oft mehrere Jahre. Dies konnte u.a. in Europa beobachtet werden: Bei der Stockholmer Umweltkonferenz (1972) wurde zum ersten mal im internationalen Rahmen das Problem der Ökosystemversauerung durch SO₂ Emissionen aufgegriffen. Bis zur Einleitung konkreter Reduktionsmaßnahmen vergingen allerdings weitere 13 Jahre bevor 1985 das erste Schwefelprotokoll mit bindenden Reduktionsvorgaben verabschiedet wurde. Diese in den Industrieländern beobachtete Verzögerung wird im "Pollutant Burden" Ansatz berücksichtigt, indem das Einsetzen von Reduktionsmaßnahmen mit einer zeitlichen Verzögerung nach dem Überschreiten der oben beschriebenen kritischen Fläche einer Region, einsetzt.

4. Geschwindigkeit der Reduktionsmaßnahmen

Sobald die Reduktionsmaßnahmen in einer Region erst einmal begonnen haben, wird angenommen, daß sie langfristig einem logistischen Trend folgen. Die Steigungsrate dieses logistischen Trends wird aus den beobachteten Trends der industrialisierten Regionen abgeschätzt.

SO₂ Emissionsszenarien für die Industrieregionen

Etwas andere Annahmen werden für den Startzeitpunkt sowie die Stärke der Reduktionsmaßnahmen in den industrialisierten Ländern benötigt, da diese bereits mit Maßnahmen begonnen haben. Es wird angenommen, daß sie ihre derzeitige Politik langfristig fortsetzen, indem ihre Reduktionsrate über eine logistische Funktion in die Zukunft extrapoliert wird.

Da die Parameter dieser Analyse (die kritische Schadstofflast, die kritische Fläche, die Verzögerungszeit und die Reduktionsrate) sehr unsicher sind bzw. Spannen für diese Werte abgeleitet wurden, haben wir Häufigkeitsverteilungen für diese Parameter eingesetzt, anstatt ihnen diskrete Werte zuzuordnen. Außerdem wurde die Unsicherheit in der zukünftigen Bevölkerungszahl und wirtschaftlichen Entwicklung einer Region und deren Einfluß auf die zukünftigen unverminderten SO₂ Emissionen berücksichtigt. Diese Eingabeunsicherheiten wurden kombiniert und mit Hilfe des IMAGE Energie-Industrie Systems eine stochastische Simulation durchgeführt. Das Resultat dieser Simulation sind Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die langfristigen Trends der SO₂ Emissionen in den 13 Weltregionen des IMAGE Modells.

In *Tabelle 3* sind die SO₂ Emissionswerte für das 95-Perzentil³ ("PB-95% SO₂") und das 5-Perzentil ("PB-5% SO₂") für die 13 IMAGE Regionen und ausgewählte Jahre aufgeführt. In *Abbildung 9* ist der Mittelwert, das 5-Perzentil und das 95-Perzentil der globalen Schwefelemissionen, im Vergleich zum Standardfall konstanter Schwefelemissionen nach 1990, zu sehen.

³ Unter den gegebenen Annahmen liegen 90% der zukünftigen SO₂ Emissionspfade zwischen dem 5 Perzentil und dem 95 Perzentil. Nur 10% der Emissionen liegen oberhalb bzw. unterhalb dieser Werte.

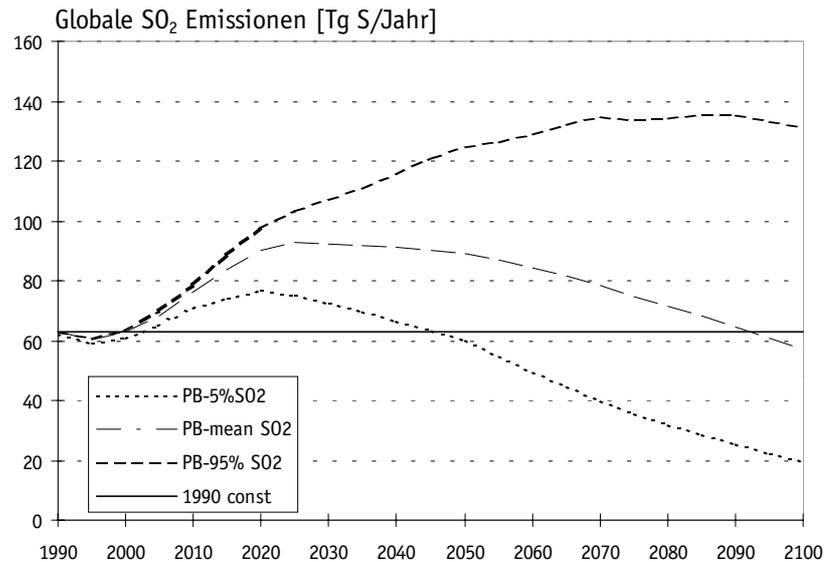


Abbildung 9: Globale Schwefelemissionspfade des "Pollutant Burden" Ansatzes im Vergleich zu der Annahme, daß die Schwefelemissionen nach 1990 konstant bleiben.

Aus Abbildung 9 wird deutlich, daß der globale Emissionstrend durch die oft genutzte Annahme, daß die Schwefelemissionen nach 1990 konstant bleiben, insbesondere in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts, stark unterschätzt wird. Sogar das "PB-5% SO₂" Szenario zeigt einen Anstieg von 62.7 Tg S im Jahr 1990 auf 76.7 Tg S (oder 122% der 1990 Emissionen) im Jahr 2020. In diesem Zeitraum steigen auch die Treibhausgasemissionen der Stabilisierungsszenarien noch an, so daß die steigenden SO₂ Emissionen den Treibhauseffekt in diesem Zeitraum etwas abschwächen könnten. Der starke Anstieg der SO₂ Emissionen setzt sich beim "PB-95% SO₂" Szenario bis auf 131 Tg S im Jahr 2100 fort. Im Gegensatz dazu beginnen die Emissionen des "PB-Mittelwert SO₂"- und des "PB-5% SO₂" Szenarios ab 2020 zu sinken. Sie erreichen im Jahr 2100 19.8 Tg S für das "PB-5% SO₂" Szenario und 57.0 Tg S für das "PB-Mittelwert SO₂" Szenario.

Auf regionaler Ebene führt der "Pollutant Burden" Ansatz zu mittleren Emissionen von 13.8 Tg S im Jahr 2100 für China & CPA (CPA steht für Centrally Planned Asia) (im Vergleich zu 11.6 Tg S im Jahr 1990) mit einem 90% Konfidenzintervall von 3.9 bis 40.4 Tg S pro Jahr (siehe Abbildung 10a). Die mittleren Emissionen steigen bis auf 30.1 Tg S, und beginnen um das Jahr 2030 herum wieder bis auf etwa das Niveau der 1990 Emissionen zu fallen.

Für West Europa liegt die mittlere Schätzung der Emissionen bei 0.4 Tg S im Jahr 2100 (im Vergleich zu 9.0 Tg S im Jahr 1990) (siehe Abbildung 10b). Für diese Region sowie für alle Regionen, die vor 1990 mit SO₂ Reduktionsmaßnahmen begonnen haben, ist das 90% Konfidenzintervall sehr schmal. Dies ist darauf zurückzuführen, daß der mit der größten Unsicherheit behaftete Faktor dieser Analyse, nämlich der Zeitpunkt, zu dem Reduktionsmaßnahmen ergriffen werden, für diese Regionen keine Rolle spielt. Die SO₂ Emissionen aller 13 Regionen des IMAGE Modells sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

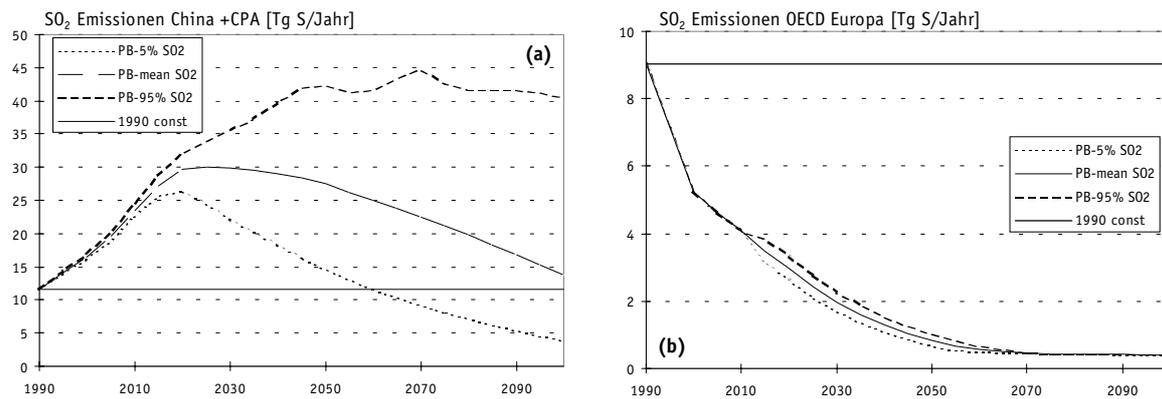


Abbildung 10: Regionale Schwefel Emissionen für (a) China und das zentralwirtschaftlich geplante Asien und (b) OECD Europa.

Der hier präsentierte Ansatz hat den Vorteil, daß er explizit einen Faktor berücksichtigt, der politische Maßnahmen stimuliert (die Umweltbelastung eines Landes) und daß er für die Entwicklungsländer die Änderung dieses Faktors über die Zeit miteinbezieht. Außerdem liefert er Konfidenzintervalle zukünftiger Emissionen, um die Unsicherheiten, die oft mit langfristigen Abschätzungen einhergehen, sichtbar zu machen. Einer der Nachteile dieses Ansatzes ist die Annahme, daß alle Gesellschaften gleich oder ähnlich auf hohe Belastungen durch SO₂ Emissionen reagieren.

Tabelle 3: Regionale Schwefelemissionen ausgewählter Jahre (in Tg S) für das "PB-5% SO₂" und das "PB-95% SO₂" Szenario, resultierend aus dem "Pollutant Burden" Ansatz.

IMAGE Region	PB-5% SO ₂ Szenario				PB-95% SO ₂ Szenario		
	1990	2010	2050	2100	2010	2050	2100
Kanada	1.44	1.26	0.43	0.13	1.26	0.59	0.23
USA	10.88	7.51	1.68	0.56	7.51	2.63	0.58
Latein Amerika	3.50	5.21	12.73	2.75	5.37	14.17	14.43
Afrika	2.38	3.42	9.29	4.94	3.66	16.14	31.52
OECD Europa	9.04	4.07	0.68	0.40	4.07	1.02	0.42
Ost Europa	5.27	3.06	0.68	0.52	3.06	1.03	0.69
CIS	10.60	7.55	4.08	1.38	11.15	12.32	9.58
Mittlerer Osten	2.38	3.79	4.90	1.55	4.23	10.63	10.35
Indien & S. Asien	1.94	5.19	6.12	1.88	5.62	13.06	10.30
China & CP Asien	11.61	22.49	14.60	3.89	24.48	42.34	40.47
Ost Asien	2.33	5.26	4.14	1.62	5.67	9.17	11.16
Ozeanien	1.05	2.12	0.59	0.10	2.32	1.58	1.13
Japan	0.16	0.08	0.09	0.08	0.09	0.12	0.15
Welt	62.58	71.01	60.01	19.80	78.49	124.81	131.00

Für den Hauptzweck dieser Studie, nämlich die Klimaauswirkungen von Stabilisierungsszenarien abzuschätzen, werden wir nur die regionalen Emissionen des "PB-5% SO₂" und des "PB-95% SO₂" Szenarios nutzen. Dabei ist anzumerken, daß der "Pollutant Burden" Ansatz die Auswirkungen einer Verminderung der Treibhausgasemissionen auf die zukünftigen SO₂ Emissionen unberücksichtigt läßt. Dies ist wichtig, da die Stabilisierungsszenarien eine Reduktion der Treibhausgasemissionen vorsehen, die zumindest teilweise durch eine Senkung des Energieverbrauchs sowie eine Änderung des Brennstoffmixes umgesetzt werden wird. Ein positiver Nebeneffekt dieser Maßnahmen wird daher wahrscheinlich auch eine Senkung der SO₂ Emissionen sein. Allerdings sind bis zum jetzigen Zeitpunkt keine quantitativen Informationen darüber verfügbar, wie stark sich dieser Zusammenhang auswirken wird. Die Ergebnisse für die Auswirkungsanalysen mit unterschiedlichen Annahmen für SO₂ Emissionen im Hintergrund sollten daher eher als Sensitivitätsanalyse angesehen werden. Im Zusammenhang mit den Stabilisierungsszenarien scheinen uns aber die niedrigeren SO₂ Emissionen des "PB-5% SO₂" Szenarios wahrscheinlicher zu sein, als die des "PB-95% SO₂" Szenarios. Um die Ergebnisse der Auswirkungsanalyse mit anderen Studien vergleichbar zu machen, nutzen wir die Annahme konstanter SO₂ Emissionen nach 1990 weiterhin als Standardfall.

3.3 CO₂ äquivalente Konzentrationen und Emissionen als Ausgangspunkt für die Analyse von Emissionskontrollen und Auswirkungen des Klimawandels

Aus den vorgegebenen CO₂ Konzentrationspfaden und den Emissionen der Nicht-CO₂ Gase (CH₄ und N₂O) aus dem Energie/Industrie Sektor und der Landnutzung (siehe Kapitel

3.2⁴), ergeben sich die CO₂ äquivalenten Konzentrationspfade für das 450 ppm und das 550 ppm CO₂ Stabilisierungsziel. D.h. aus den Emissionen der Nicht-CO₂ Gase wurde unter Berücksichtigung der atmosphärischen Chemie dieser Gase, wie z.B. der Einfluß der wechselnden Hydroxylkonzentration auf die Lebensdauer von CH₄, die CO₂ äquivalente Konzentration dieser Gase berechnet. Der Konzentrationsverlauf der Stabilisierungsszenarien sowie des Kyoto Referenzszenarios sind in Abbildung 11a zu sehen.

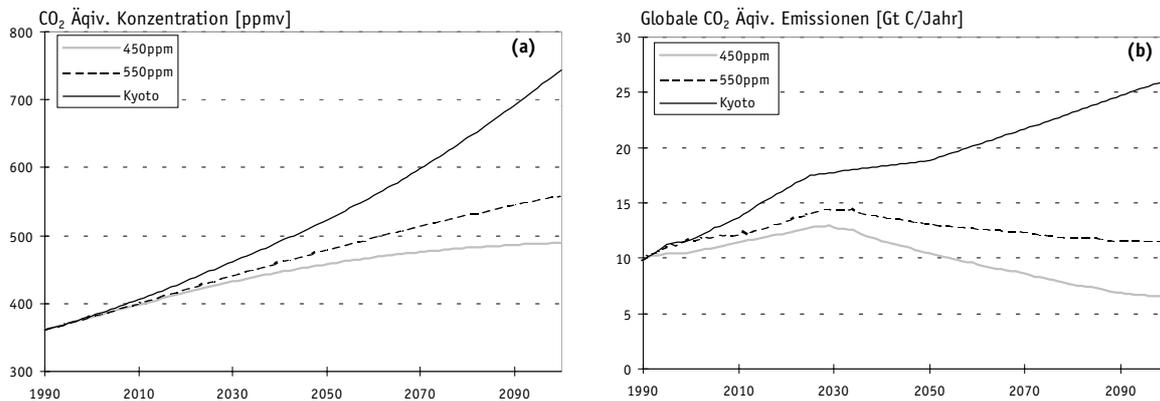


Abbildung 11: (a) Atmosphärische CO₂ äquivalente Konzentration des 450 ppm und des 550 ppm CO₂ Konzentrationsziels sowie des Kyoto Referenzszenarios. (b) Globale CO₂ äquivalente Emissionspfade resultierend aus dem 450 ppm und 550 ppm CO₂ Stabilisierungsziel. Der obere Emissionspfad stellt die CO₂ äquivalenten Emissionen des Kyoto Szenarios dar.

Unter den gegebenen Annahmen für die Nicht-CO₂ Gase führen das 550 ppm und das 450 ppm CO₂ Stabilisierungsziel zu einer CO₂ äquivalenten Konzentration von 560 ppm bzw. 490 ppm im Jahr 2100. Für das Kyoto Szenario steigt die CO₂ äquivalente Konzentration bis 2100 auf 744 ppm an. D.h. die globalen CH₄ und N₂O Emissionen fügen bis 2100 weitere 40 ppm (450 ppm Szenario), 43 ppm (550 ppm Szenario, 517 ppm CO₂ im Jahr 2100) und 54 ppm (Kyoto Szenario) zu den vorgegebenen CO₂ Konzentrationspfaden hinzu. Der allgemeine Trend für die CO₂ äquivalente Konzentration bleibt jedoch der gleiche wie für die CO₂ Konzentrationspfade allein: Beim 450 ppm Szenario tritt bis 2100 eine Stabilisierung der CO₂ äquivalenten Konzentration ein, das 550 ppm Szenario zeigt noch leicht steigende Tendenz und der Konzentrationsanstieg des Kyoto Szenarios ist im Jahr 2100 unvermindert.

Die globalen CO₂ äquivalenten Emissionen steigen für alle drei Szenarien bis 2030 an. Aber während unter dem Kyoto Referenzszenario die CO₂ äquivalenten Emissionen im Jahr 2030 auf 17,8 Gt C ansteigen (siehe Abbildung 11b), dürfen die Emissionen für das 550 ppm Szenario in diesem Jahr nur 14,4 Gt C betragen. Um dem 450 ppm Stabilisie-

⁴ Für die N₂O und CH₄ Emissionen aus dem Energie/Industrie Sektor wurde eine Reduktion proportional zur Reduktion der CO₂ Emissionen aus diesem Sektor angenommen, die notwendig sind, um das gegebene CO₂ Konzentrationsziel zu erreichen. Die Landnutzungsemissionen steigen entsprechend der Annahmen aus dem Baseline A Referenzszenario.

runbspfad zu folgen, müssen die Emissionen im Jahr 2030 sogar unter 13 Gt C pro Jahr bleiben. Das 550 ppm Szenario macht für die Zeit zwischen 2030 und 2100 eine Verminderung der Emissionen bis auf ein Niveau leicht über dem von 1990 notwendig (11.5 Gt C Äquivalente pro Jahr oder 117% der 1990 Emissionen). Das 450 ppm Szenario erfordert langfristig eine weit stärkere Absenkung auf etwas über die Hälfte der 1990 Emissionen (6.5 Gt C Äquivalente oder 66% der 1990 Emissionen). Würden zukünftige Klimaverhandlungen keine Ausweitung der Reduktionsverpflichtungen bringen, als die im Kyoto Protokoll vereinbarten, so könnten die globalen CO₂ äquivalenten Emissionen bis auf 26.2 Gt C Äquivalente im Jahr 2100 ansteigen.

3.4 Zusammenfassung

Um die Auswirkungen unterschiedlicher Stabilisierungsszenarien zu untersuchen, ist es notwendig die globalen Emissions- und Konzentrationspfade aller relevanten Treibhausgase einzubeziehen. Von den sechs Treibhausgasen, die im Kyoto Protokoll berücksichtigt werden, machen die derzeitigen Emissionen von CO₂, N₂O und CH₄ zusammen 90% aus. Zu diesen Emissionen tragen die CO₂ Emissionen, zumeist aus dem Energie/Industrie Sektor stammend, mit 60% am meisten bei. Der Beitrag von N₂O und CH₄ zusammen liegt gegenwärtig bei 30%. Innerhalb dieser Studie werden die Emissionen der drei Gase CO₂, N₂O und CH₄ aus dem Energie/Industrie Sektor als auch aus dem landwirtschaftlichen Sektor behandelt.

CO₂ Emissionen

Die global erlaubten CO₂ Emissionen wurden im Inversmodus aus vorgegebenen Konzentrationspfaden zwischen 1990 und 2100 berechnet. Es wurden die in Enting *et al.* (1994) beschriebenen Konzentrationspfade eines IPCC Modellvergleiches verwendet. Um eine langfristige Stabilisierung der CO₂ Konzentration bei 550 ppm auf dem vorgegebenen Konzentrationspfad zu erreichen, dürfen die globalen Emissionen bis zum Jahr 2030 nicht höher als bis auf 148% der Emissionen von 1990 ansteigen (zum Vergleich: die CO₂ Emissionen des Kyoto Referenzszenarios steigen im gleichen Zeitraum auf 186% der 1990 Emissionen). Bis zum Jahr 2100 müssen die CO₂ Emissionen des 550 ppm Szenarios auf 107% der 1990 Emissionen abgesenkt werden. Für dieses Szenario ist über das Jahr 2100 hinaus eine weitere Reduktion der Emissionen notwendig, da eine Stabilisierung der CO₂ Konzentration nicht vor 2150 erreicht wird. Für das 450 ppm Stabilisierungsziel ist von Anfang an eine stärkere Emissionskontrolle notwendig: Die Emissionen dürfen im Jahr 2030 maximal 128% der 1990 Emissionen betragen und müssen langfristig sogar auf 44% der 1990 Emissionen vermindert werden. Im Gegensatz zum 550 ppm Stabilisierungsziel wird eine Stabilisierung der CO₂ Konzentration bei 450 ppm im Zeitrahmen der untersuchten Szenarien (1990-2100) erreicht.

N₂O und CH₄ Emissionen

Für die globalen N₂O und CH₄ Emissionen aus dem Energie/Industrie Sektor haben wir angenommen, daß sie proportional zu den CO₂ Emissionen verringert werden. Die globalen Emissionen aus der Landwirtschaft hingegen folgen dem mittleren IMAGE Baseline A Szenario. Für die globalen Gesamtemissionen von N₂O und CH₄ (die wichtigsten Treibhausgase nach CO₂, wenn man Wasserdampf und Ozon nicht berücksichtigt) wurde berechnet, daß sie um 2030 ein Maximum erreichen und danach sowohl für das 550 ppm als auch das 450 ppm Stabilisierungsszenario leicht zurückgehen. Für beide Szenarien bleiben die Emissionen jedoch signifikant über dem Niveau von 1990. Die Ursache hierfür ist, daß N₂O und CH₄ Emissionen aus dem landwirtschaftlichen Sektor (1) über den gesamten Szenariozeitraum signifikant zu den Gesamtemissionen beitragen und (2) für diese Emissionen keine Kontrollmaßnahmen angenommen wurden. Dies hat zur Folge, daß die Reduktion der Emissionen aus dem Energie/Industrie Sektor durch den Anstieg der Emissionen aus dem landwirtschaftlichen Sektor kompensiert werden. Im Jahr 2100 beträgt der Anteil der landwirtschaftlichen Emissionen dieser Gase 90% der gesamten N₂O und CH₄ Emissionen für das 450 ppm und 80% für das 550 ppm Stabilisierungsszenario. Diese Zahlen unterstreichen die Bedeutung, die N₂O und CH₄ Emissionen aus der Landwirtschaft bei der Entwicklung langfristiger Reduktionsstrategien zukommen sollte.

CO₂ äquivalente Emissionen

Der Trend für globale CO₂ äquivalente Emissionen (CO₂, N₂O und CH₄) resultierend aus dem vorgegebenen CO₂ Konzentrationspfad und den Annahmen, die wir für die Nicht-CO₂ Treibhausgase gemacht haben, ähnelt dem der globalen CO₂ Emissionen. Die CO₂ äquivalenten Emissionen dürfen für beide Stabilisierungsziele bis zum Jahr 2030 ansteigen (bleiben zu diesem Zeitpunkt aber schon signifikant unter den Emissionen des Referenzszenarios) und müssen danach reduziert werden. Für das 450 ppm Szenario ist bis zum Jahr 2100 eine Reduktion bis auf 66% der 1990 Emissionen notwendig. Für das 550 ppm Szenario dagegen dürfen die globalen Emissionen 2100 oberhalb des 1990er Emissionsniveaus bleiben (107%). Allerdings sind für dieses Szenario nach 2100 weitere Reduktionsmaßnahmen notwendig, da sich die CO₂ Konzentration erst ab 2150 zu stabilisieren beginnt.

SO₂ Emissionen

Schwefeldioxidemissionen haben das Potential die Erwärmung der Atmosphäre durch Treibhausgasemissionen auf regionaler Ebene zumindest teilweise zu kompensieren. Um diesen Umstand bei der Untersuchung der Auswirkungen einer Klimaänderung zu berücksichtigen, wurde der sogenannte „Pollutant Burden“ Ansatz (PBA) entwickelt. Mit Hilfe dieses Ansatzes wurden SO₂ Emissionsszenarien für die 13 Regionen des IMAGE Modells abgeleitet. Die zwei Hauptannahmen dieses Ansatzes sind: (1) In Entwicklungsregionen wird mit einer Reduktion der SO₂ Emissionen begonnen, sobald die Umweltbelastung durch SO₂ Emissionen dasselbe Ausmaß erreicht wie in den Industrienationen zu dem Zeitpunkt als diese mit einer Kontrolle ihrer SO₂ Emissionen begonnen haben. (2) Hat eine Region einmal mit Kontrollmaßnahmen begonnen, so werden diese mit einer Rate fortge-

setzt, wie sie in den Industrieländern zu beobachten ist. Die auf diese Weise abgeleiteten SO₂ Emissionen zeigen einen stark unterschiedlichen Trend für Industrie- und Entwicklungsländer. Während die SO₂ Emissionen in den meisten Entwicklungsländern ungefähr bis zum Jahr 2030 stark ansteigen und dann auf diesem Niveau bleiben oder reduziert werden, setzen die Emissionen der Industrieländer ihren abnehmenden Trend fort und erreichen bis zum Jahr 2100 eine Verminderung bis auf 4% bis 10% ihrer 1990 Emissionen. Das heißt, die oft als Referenzfall angenommenen konstanten SO₂ Emissionen nach 1990 (z.B. Houghton *et al.*, 1997) tendieren zu einer Unterschätzung der SO₂ Emissionen der Entwicklungsregionen und zu einer Überschätzung der SO₂ Emissionen der Industrieregionen. Regional spezifische Annahmen für SO₂ Emissionen können daher die Untersuchung regionaler Auswirkungen des Klimawandels stark verbessern.

4. Globale und regionale Emissionsminderung

Im Kyoto Protokoll wird berücksichtigt, daß nicht nur die Emissionen von CO₂ sondern die Gesamtheit aller anthropogenen Treibhausgase kontrolliert werden müssen. Artikel 3.1 des Protokolls fordert die Reduktion von insgesamt sechs Gasen bzw. Gruppen von Gasen, sagt aber nichts aus über den Umfang der Kontrolle spezifischer Gase aus spezifischen Quellen. Die folgende Analyse der Emissionsminderungen, die notwendig sind, um eine Stabilisierung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration zu erreichen, basieren daher auf den CO₂ äquivalenten Emissionen der Gase CO₂, N₂O und CH₄ aus dem Energie/Industrie Sektor sowie aus der Landnutzung. Wir beginnen mit einer Analyse der Emissionskontrollen, die auf globaler Ebene notwendig sind. Im zweiten Schritt wird ein Ansatz beschrieben, wie die globalen Emissionen den einzelnen Annex B und Nicht-Annex B Regionen zugewiesen werden könnten, unter Berücksichtigung der Prinzipien der Klimarahmenkonvention, wonach das Klimasystem geschützt werden soll "...auf der Basis von Gerechtigkeit und in Übereinstimmung mit ihren gemeinsamen aber unterschiedlichen Verantwortlichkeiten und jeweiligen Fähigkeiten" (UNFCCC, Artikel 3).

4.1 Globale Emissionsminderung

Um eine Stabilisierung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration auf den vorgeschriebenen Konzentrationspfaden zu erreichen, dürfen die globalen Emissionen, wie bereits in Kapitel 3.3 gezeigt, bis zum Jahr 2030 ansteigen. Die aus diesen globalen Emissionen berechneten Änderungsraten (Abbildung 12) machen jedoch deutlich, daß Kontrollmaßnahmen bereits früher ergriffen werden müssen: Die Emissionen der Stabilisierungsszenarien dürfen weit langsamer steigen als die des Kyoto Referenzszenarios. Die Zunahme der Emissionen wird durch eine positive Änderungsrate in Abbildung 12 dargestellt und diese Rate bleibt für die Stabilisierungsszenarien stets kleiner als 1% pro Jahr. Für das Kyoto Szenario beträgt der Anstieg der Emissionen zwischen 1990 und 2030 1.5% pro Jahr und mehr. Nach 2030 nehmen die Emissionen dieses Szenarios noch zu, aber mit einer niedrigeren Rate von ungefähr 0.5% pro Jahr. Im Gegensatz dazu sind für die zwei Stabilisierungsszenarien nach 2030 starke Reduktionsmaßnahmen notwendig. Die globalen Emissionen für das 450 ppm Szenario müssen mit einer Rate von 1 bis 1.5% pro Jahr abnehmen, um dem vorgegebenen Konzentrationspfad zu folgen. Das 550 ppm Szenario erfordert immer noch eine jährliche Abnahme der Emissionen um 0.5%. Diese Maßnahmen müssen für beide Szenarien bis zum Ende des 21. Jahrhunderts fortgesetzt werden. Zusammenfassend läßt sich also sagen, daß die globalen CO₂ äquivalenten Emissionen über den gesamten Simulationszeitraum hinweg kontrolliert werden müssen, um eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration auf den vorgegebenen Konzentrationspfaden zu erreichen.

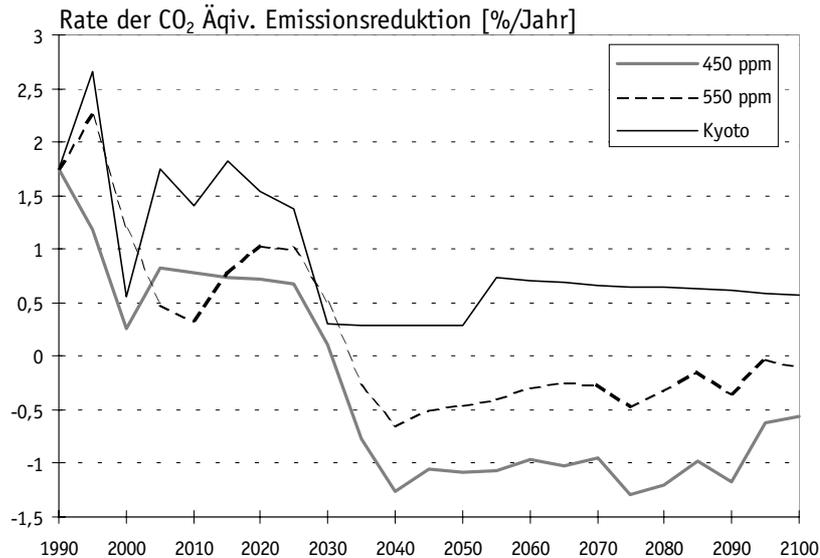


Abbildung 12: Änderungsrate (in % pro Jahr) der globalen anthropogenen CO₂ äquivalenten Emissionen, die notwendig ist, um eine Stabilisierung der CO₂ Konzentration bei 450 ppm und 550 ppm zu erreichen. Als Vergleich ist das Kyoto Szenario abgebildet.

4.2 Von globaler Emissionsminderung zu regionalen Emissionen: Eine Verteilung der Reduktionslasten bei gleichzeitigem Schutz des Klimas

Bei den Vertragsstaatenkonferenzen in Kyoto und Buenos Aires wurden einige erste vorsichtige Schritte in Richtung Klimaschutz gemacht. Ein wichtiges Thema jedoch, das bei beiden Konferenzen offen gelassen wurde, ist die Frage nach der Vorgehensweise, um einen langfristigen Klimaschutz zu erreichen und den Konsequenzen dieser Vorgehensweise für die Reduktionsverpflichtungen der Industrie- als auch der Entwicklungsländer. Dieser Frage wurde beim 6. internationalen Workshop "Using Global Models to Support Climate Negotiations" in Kassel, Deutschland hohe Priorität eingeräumt (Onigkeit *et al.*, 1998). In diesem Kapitel wird ein Ansatz vorgestellt, der die Frage nach zukünftigen Stabilisierungszielen mit der Frage nach der Verteilung globaler Treibhausgasemissionen verbindet. Dieser Ansatz wird genutzt, um die Auswirkungen zweier Stabilisierungsszenarien auf die Zuweisung von Emissionsreduktionsmaßnahmen zu Annex B und Nicht-Annex B Ländern zu untersuchen. Diese Zuweisung basiert auf zwei Indikatoren, die Gerechtigkeitsaspekte und Aspekte der Befähigung zu Reduktionsmaßnahmen („capability“) berücksichtigen. Diese Indikatoren sind (1) das pro Kopf Einkommen, um den Zeitpunkt zu bestimmen, an dem Entwicklungsländer es sich finanziell leisten können, an Klimaschutzmaßnahmen teilzunehmen und (2) die Konvergenz der Pro-Kopf-Emissionen mit dem Ziel, die jetzige Ungleichverteilung zwischen den Pro-Kopf-Emissionen der Industrieländer und der Entwicklungsländer zu überwinden. Warum ist die Verteilung der globalen Emissionen ein Thema für Industrieländer und Entwicklungsländer? Zum Einen, weil es dem Berlin Mandat und dem Kyoto Protokoll zufolge erforderlich ist, daß die Industrieländer mit der Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen beginnen. Dies wird häufig mit den gegenwärtig

sehr hohen Pro-Kopf-Emissionen und dem historischen Beitrag dieser Länder zum Klimawandel gerechtfertigt. Auf der anderen Seite haben die Ergebnisse unserer Analysen der Stabilisierungsszenarien gezeigt, daß viele Klimaziele so starke globale Reduktionsmaßnahmen erfordern (siehe Kapitel 4.1), daß es für die Industrieländer nahezu unmöglich ist, diese Ziele allein umzusetzen. Ein Grund hierfür ist die Erwartung, daß die Treibhausgasemissionen der Entwicklungsländer erheblich zunehmen werden (Alcamo *et al.*, 1995).

Als Reaktion auf diese Situation präsentieren wir hier einen Ansatz, der hilfreich sein kann sowohl bei der Auswahl langfristiger Klimaschutzstrategien, als auch bei der Aufteilung der dabei entstehenden Reduktionslasten zwischen Annex B und Nicht-Annex B Ländern. Dieser Ansatz ist einer der ersten Versuche Klimaschutz und "Burden Sharing" mit Indikatoren für Gerechtigkeit und Befähigung zur Einleitung von Reduktionsmaßnahmen in einer einzigen Analyse zu verbinden. In dieser Studie wird der Ansatz angewendet auf die zwei CO₂ Stabilisierungsziele von 450 ppm und 550 ppm unter Berücksichtigung der CO₂, CH₄ und N₂O Emissionen aus dem Energie/Industrie Sektor als auch aus der Landwirtschaft.

4.2.1 Die Regeln zur Verteilung der Reduktionslasten

Die Hauptidee hinter dem vorgeschlagenen Schema zur Verteilung der Reduktionslasten ist, daß die Emissionen der Nicht-Annex B Staaten solange unkontrolliert ansteigen dürfen bis diese Staaten ein bestimmtes Einkommensniveau erreichen (das sogenannte Einstiegs-kriterium). Wird dieses Einkommensniveau überschritten, so wird erwartet, daß sie an einem internationalen Klimaschutzregime teilnehmen. Im Prinzip wird das Einstiegs-kriterium in Form des Einkommensniveaus hoch genug angesetzt, damit das nationale Einkommen der betreffenden Entwicklungsländer ausreicht, um sich eine Kontrolle ihrer Emissionen leisten zu können. Der erste Schritt der Teilnahme an internationalen Klimaschutzregimes ist eine Stabilisierung ihrer Pro-Kopf-Emissionen und erst der zweite Schritt besteht in einer Reduktion der Pro-Kopf-Emissionen (siehe Abbildung 13).

In den folgenden Abschnitten werden die Regeln dargestellt, nach denen die globalen Emissionen, die erlaubt sind, um ein Stabilisierungsziel zu erreichen, zwischen Annex B und Nicht-Annex B Ländern aufgeteilt werden. Für diese Verteilung werden ein Baseline Emissionspfad sowie ein Szenario für wirtschaftliches Wachstum für jedes der Nicht-Annex B Länder benötigt. Ein Bevölkerungsszenario wird für beide, also sowohl für Annex B als auch Nicht-Annex B Länder gebraucht, da die Verteilung der Emissionen auf einer Pro-Kopf-Basis durchgeführt wird.

Vorgehensweise

1. *Globaler Treibhausgasemissionspfad*: Es wird ein Stabilisierungsziel für die atmosphärische CO₂ Konzentration ausgewählt und dann der globale Emissionspfad berechnet, der dieses Ziel erreichbar macht. Basiert die Analyse auf CO₂ äquivalenten Emissionen müssen zusätzliche Annahmen für Nicht-CO₂ Treibhausgasemissionen gemacht werden.
2. *Nicht-Annex B Emissionen vor und nach dem Erreichen des Einstiegs-kriteriums*: Die Emissionen der Nicht-Annex B Länder folgen solange einem Baseline Emissionspfad,

wie ihr Pro-Kopf-Einkommen unterhalb eines festgelegten Einstiegsriteriums bleibt. Sobald das Einstiegsriterium erreicht ist und überschritten wird, werden die Pro-Kopf-Emissionen konstant gehalten.

3. *Nicht-Annex B Emissionen gleichen den Annex B Emissionen:* Konvergieren die Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B Länder mit den durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen der Annex B Länder, dann folgen sie nach Erreichen des Konvergenzpunktes dem selben Pro-Kopf-Emissionspfad (siehe Abbildung 13). D.h. das betreffende Nicht-Annex B Land tritt einer "erweiterten Annex B" Gruppe bei und muß folglich mit Reduktionsmaßnahmen beginnen.
4. *Annex B Gesamtemissionen:* Die Gesamtemissionen der Annex B Länder ergeben sich aus der Differenz zwischen den globalen Emissionen aus Schritt 1 und den Gesamtemissionen der Nicht-Annex B Länder. Die Gesamtemissionen der Nicht-Annex B Länder bestehen bei diesem Schritt zum Teil aus Baseline Emissionen (für die Länder, die das Einstiegsriterium noch nicht erreicht haben) und zum Teil aus kontrollierten Emissionen.

Diese Berechnungen werden iterativ für die Emissionen jedes Nicht-Annex B Landes und den Durchschnitt der Annex B Länder für jeden Zeitschritt durchgeführt.

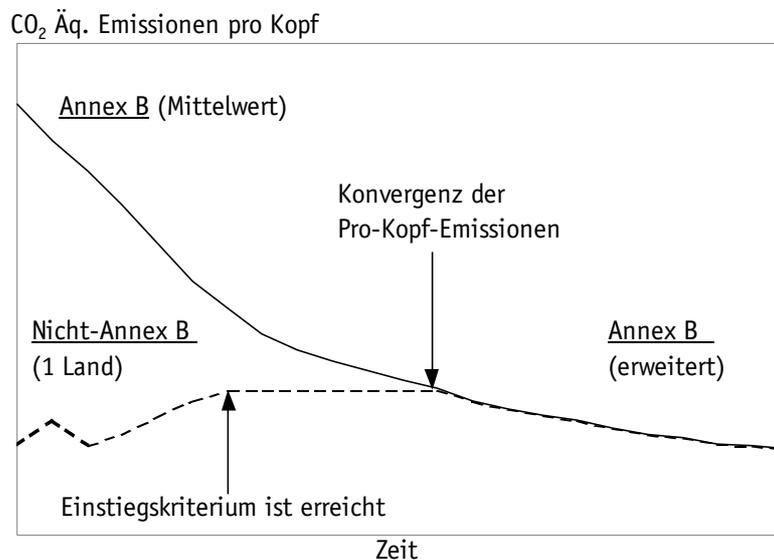


Abbildung 13: Illustration des Konzeptes der Lastenverteilung: Verlauf der Pro-Kopf-Emissionen eines Nicht-Annex B Landes und durchschnittliche Pro-Kopf-Emissionen der Annex B Länder.

Charakteristiken des Ansatzes

1. Die erlaubten Emissionen für die Annex B Länder werden berechnet, indem die Gesamtemissionen der Nicht-Annex B Länder von den global erlaubten Emissionen abgezogen werden. Da die globalen Emissionen durch das Stabilisierungsziel- und den Pfad dorthin festgelegt sind, ist die Höhe der Annex B Emissionen lediglich von den Nicht-

Annex B Emissionen abhängig. D.h. je höher die Nicht-Annex B Emissionen bei einem vorgegebenen Stabilisierungsziel steigen, desto geringer sind die erlaubten Emissionen für die Annex B Länder. Die Emissionen der Nicht-Annex B Länder sind proportional zur Größe ihrer Bevölkerung und da die Verteilung der global erlaubten Emissionen im präsentierten Ansatz auf Pro-Kopf-Emissionen basiert, ist es vorteilhaft für die Annex B Länder, wenn Nicht-Annex B Länder mit einer großen und schnell wachsenden Bevölkerung der erweiterten Annex B Gruppe so früh wie möglich beitreten und zur Reduktion der globalen Emissionen beitragen.

2. Wird angenommen, daß ein Nicht-Annex B Land ein hohes Pro-Kopf-Einkommen (d.h. ein hohes Einstiegs-kriterium) erreichen darf, bevor es Maßnahmen zur Emissionskontrolle ergreifen muß, so kann es länger dem Baseline Emissionspfad folgen, im Vergleich zum Fall eines niedrigeren Einstiegs-kriteriums. Die Folge dieses verzögerten Einstiegs ist, daß nach Erreichen der Konvergenz von Annex B und Nicht-Annex B Pro-Kopf-Emissionen auch die Nicht-Annex B Emissionen stärker reduziert werden müssen (siehe Abbildung 14, dünn gestrichelte Linie). Die Entscheidung für ein niedrigeres Pro-Kopf-Einkommen als Einstiegs-kriterium führt zu einer früheren Beteiligung an Emissionskontrollen, macht dafür aber langfristig niedrigere Reduktionsraten notwendig.
3. Die Festsetzung eines strengeren Stabilisierungszieles für die atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen (z.B. 450 ppm statt 550 ppm CO₂ in der Atmosphäre) führt zu niedrigeren global erlaubten Emissionen. In diesem Fall müssen die Annex B Länder ihre Emissionen stärker reduzieren, da die Baseline Emissionen der Nicht-Annex B Länder gleich bleiben. Die Konsequenz für die Nicht-Annex B Staaten ist, daß ihre Pro-Kopf-Emissionen oft mit denen der Annex B Länder konvergieren, bevor sie das Einstiegs-kriterium erreicht haben. Folglich fällt für sie die "Gnadenfrist" mit konstanten Pro-Kopf-Emissionen weg und sie müssen schon im ersten Maßnahmensschritt mit einer Reduktion ihrer Pro-Kopf-Emissionen beginnen.

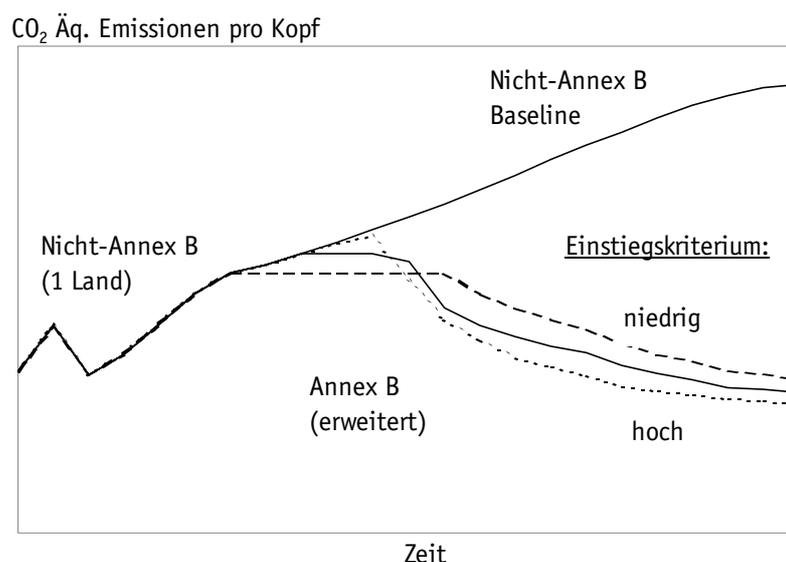


Abbildung 14: Auswirkungen unterschiedlicher Einstiegs-kriterien auf den Verlauf der Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B Länder. Ein hohes Einstiegs-kriterium steht für ein hohes Pro-Kopf-Einkommen der Nicht-Annex B Länder.

4.2.2 Anwendung des Konzeptes

Das vorgestellte "Burden Sharing" Konzept wurde auf zwei Stabilisierungsziele angewendet: (1) Eine Stabilisierung der atmosphärischen CO₂ Konzentration bei 550 ppm, ein Ziel, das von der Europäischen Union zur Diskussion gestellt wurde und (2) ein strengeres Ziel von 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre. Die folgenden Annahmen und Szenarien liegen der Anwendung zugrunde:

1. Die Auswirkungen der "Burden Sharing" Regeln und der zwei Stabilisierungsziele auf die Verteilung der global erlaubten Emissionen zwischen Annex B und Nicht-Annex B Ländern wurde für die sechs Nicht-Annex B Regionen des IMAGE 2.1 Modells untersucht. Die sieben Annex B Regionen des Modells wurden in einer Region zusammen gefasst.
2. Die Bevölkerung der Annex B und Nicht-Annex B Regionen wächst, den Annahmen des mittleren IPCC Szenarios IS92a folgend (Alcamo *et al.*, 1998b).
3. Das ökonomische Wachstum der Nicht-Annex B Regionen basiert auf den Annahmen des IPCC IS92a Szenarios.
4. Die Baseline Treibhausgasemissionen der Nicht-Annex B Regionen stammen aus dem mittleren Baseline A Szenario des IMAGE Modells. Diesem Szenario liegen die IPCC IS92a Annahmen für das zukünftige Bevölkerungswachstum und für die wirtschaftliche Entwicklung zugrunde (Alcamo *et al.*, 1998b). In der Analyse werden CO₂, CH₄ und N₂O Emissionen aus der Energieproduktion, dem Industriesektor sowie aus der Landnutzung in Form von CO₂ äquivalenten Emissionen berücksichtigt.
5. Als Einstiegskriterium wurde ein festgelegter Prozentsatz des durchschnittlichen Pro-Kopf-Einkommens der Annex B Regionen im Jahr 1990 genutzt. Um dieses Jahr herum haben die Annex B Länder ihre Absicht erklärt, im Klimaschutz aktiv werden zu wollen (Weltgipfel in Rio, 1992). Es ist daher angemessen die ökonomische Stärke (in Form des Pro-Kopf-Einkommens) der Annex B Länder in diesem Jahr als Maß für die Fähigkeit der Nicht-Annex B Länder zu nutzen, Emissionskontrollen zu initiieren.

4.2.3 Resultierende Pro-Kopf-Emissionen

Die in Kapitel 3.3 für das Erreichen der Stabilisierungsziele berechneten globalen Emissionen werden Jahr für Jahr unter Befolgung der beschriebenen Regeln auf einer Pro-Kopf-Basis zwischen Annex B und Nicht-Annex B Regionen aufgeteilt (siehe Abbildung 15). Wir präsentieren die Auswirkungen von zwei Einkommensniveaus als Einstiegskriterium für die Nicht-Annex B Regionen. Sie müssen beginnen ihre Pro-Kopf-Emissionen konstant zu halten, sobald sie (1) 10% und (2) 100% des durchschnittlichen Pro-Kopf-Einkommens der Annex B Regionen im Jahr 1990 erreicht haben.

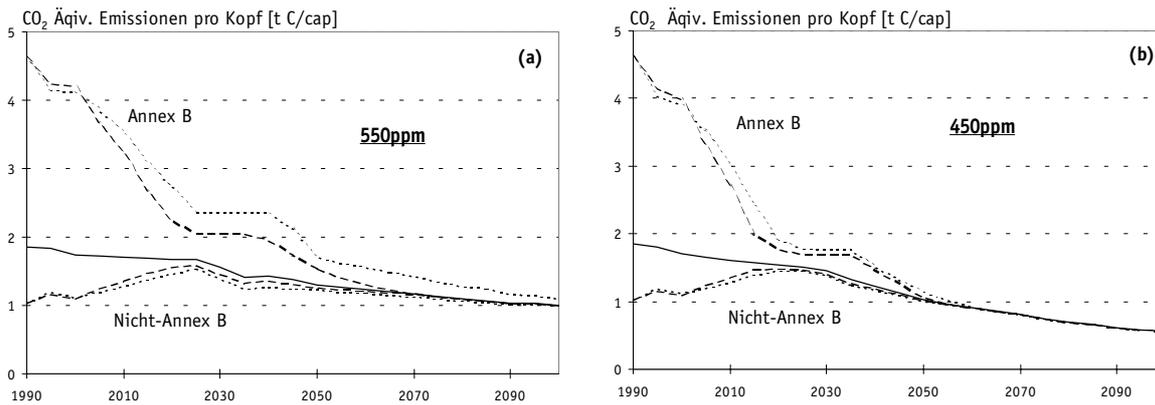


Abbildung 15: Anwendung des "Burden Sharing" Konzeptes auf zwei CO₂ Stabilisierungsziele: (a) 550 ppm und (b) 450 ppm. Dargestellt sind Zeitpfade der durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen (als CO₂ Äquivalente) der Annex B und Nicht-Annex B Regionen. Die kurz gestrichelte Linie zeigt die Ergebnisse für ein Einstiegs-kriterium von 10% des durchschnittlichen Pro-Kopf-Einkommens der Annex B Regionen im Jahr 1990. Die lang gestrichelte Linie zeigt die Ergebnisse für ein höheres Kriterium von 100% des durchschnittlichen Annex B Pro-Kopf-Einkommens. Die durchgezogene Linie gibt die durchschnittlichen globalen Pro-Kopf-Emissionen wieder.

Die durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen der Annex B Regionen beginnen 1990 auf einem Niveau, das mehr als zweimal so hoch ist wie der globale Durchschnitt der Pro-Kopf-Emissionen (siehe Abbildung 15). Als Folge davon, d.h. um langfristig eine Konvergenz der Pro-Kopf-Emissionen zu erreichen, müssen die Pro-Kopf-Emissionen der Annex B Gruppe zwischen 1990 und 2100 um 78% reduziert werden, um ein Stabilisierungsziel von 550 ppm CO₂ in der Atmosphäre zu erreichen. Um eine Stabilisierung bei 450 ppm CO₂ zu erreichen, ist sogar eine Reduktion der Pro-Kopf-Emissionen um 88% erforderlich. Um dieses Reduktionsziel umzusetzen, ist zwischen 1990 und 2030 eine Reduktion der Pro-Kopf-Emissionen um jährlich ca. 2% bzw. 3% für das 550 ppm und das 450 ppm Ziel notwendig. Nach 2030 nehmen die notwendigen Reduktionsraten, nicht zuletzt durch eine zunehmende Beteiligung der Nicht-Annex B Regionen an den Maßnahmen, ab, aber es ist langfristig eine weitere Reduktion der Pro-Kopf-Emissionen um ca. 0.75% (550 ppm Ziel) bis 1% pro Jahr (450 ppm Ziel) notwendig. Die strikten Reduktion, die für die Pro-Kopf-Emissionen der Annex B Regionen erforderlich ist, hat drei Ursachen: (1) das angestrebte Konzentrationsziel, (2) wachsende Bevölkerung und Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B Regionen und (3) die wachsende Bevölkerung der Annex B Regionen.

Die durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B Regionen liegen 1990 bei der Hälfte des globalen Durchschnitts und dürfen daher bis 2030 um ca. 50% steigen (Abbildung 15). Nach 2030 ist für das 550 ppm Stabilisierungsziel ein Absenken der Pro-Kopf-Emissionen auf das Niveau von 1990 notwendig. Für das 450 ppm Szenario müssen die Pro-Kopf-Emissionen bis 2100 sogar wieder auf 54% der Emissionen von 1990 reduziert werden. D.h. obwohl die Annex B Regionen ihre Pro-Kopf-Emissionen sehr stark reduzieren, müssen die durchschnittlichen Nicht-Annex B Emissionen immer unterhalb

der, globalen mittleren Pro-Kopf-Emissionen bleiben, die zwischen 1990 und 2100 etwa halbiert werden müssen. Die Pro-Kopf-Emissionen einzelner Nicht-Annex B Regionen können aber zeitweise durchaus die globalen mittleren Pro-Kopf-Emissionen überschreiten oder befinden sich schon 1990 oberhalb dieses Niveaus.

Eine Variation des Einstiegsriteriums zwischen 10% und 100% des durchschnittlichen Annex B Pro-Kopf-Einkommens im Jahr 1990 hat einen größeren Einfluß auf die Annex B Emissionen des 550 ppm Szenarios als die des 450 ppm Szenarios. Dies ist zurückzuführen auf die langsamere Reduktion der Annex B Emissionen zwischen 1990 und 2020 im 550 ppm Szenario. Im 450 ppm Szenario werden die Annex B Emissionen so stark abgesenkt, daß es für viele der Nicht-Annex B Regionen keinen Unterschied macht, ob das Einstiegsriterium hoch oder niedrig ist. In jedem Fall gleichen ihre Pro-Kopf-Emissionen denen der Annex B Regionen bevor das Einstiegsriterium erreicht ist, d.h. es gibt kein Zwischenstadium mit konstanten Emissionen, sondern die Reduktion der Pro-Kopf-Emissionen stellt ihre erste Maßnahme dar. Es sei an dieser Stelle angemerkt, daß die Emissionen für Einstiegsriterien zwischen 10% und 100% nicht unbedingt zwischen den präsentierten Emissionspfaden liegen. Diese Emissionspfade werden ebenso beeinflusst durch die Wachstumsrate der Pro-Kopf-Einkommen der Nicht-Annex B Regionen; diese Rate bestimmt wann die einzelnen Nicht-Annex B Regionen das Einstiegsriterium erreichen und damit, wann sie beginnen ihre Pro-Kopf-Emissionen konstant zu halten.

4.2.4 Gesamtemissionen der Annex B und Nicht-Annex B Regionen

Die Gesamtemissionen (in CO₂ Äquivalenten), die für die Annex B und die Nicht-Annex B Regionen aus der Anwendung des "Burden Sharing" Konzeptes resultieren, sind in Abbildung 16 dargestellt.

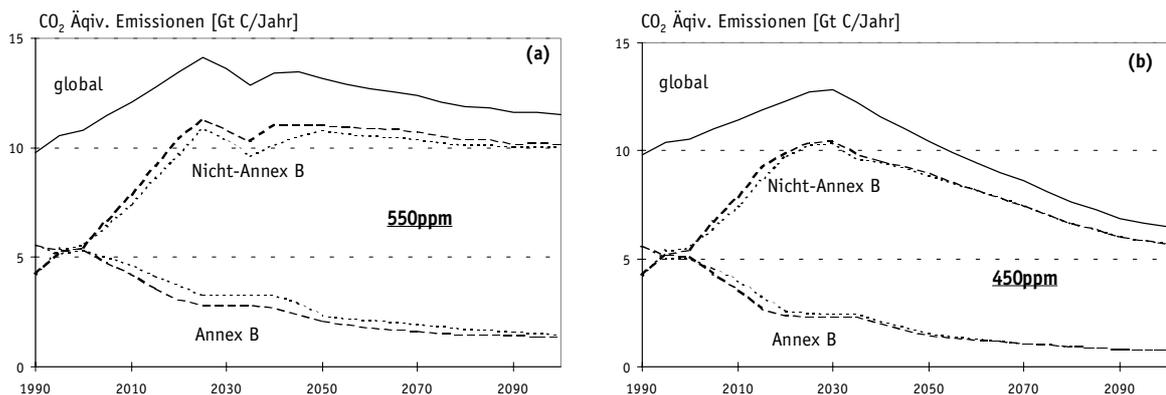


Abbildung 16: Gesamtemissionen (in CO₂ Äquivalenten) der Annex B und der Nicht-Annex B Gruppe im Vergleich zu den globalen Emissionen des (a) 550 ppm und (b) 450 ppm Stabilisierungszieles. Die kurz gestrichelte Linie stellt ein Einstiegsriterium von 10% des durchschnittlichen pro Kopf Einkommens der Annex B Regionen im Jahr 1990 dar, die lang gestrichelte Linie eines von 100%.

Aus den in Kapitel 4.2.3 erhaltenen Pro-Kopf-Emissionen und den Annahmen des IPCC IS92a Bevölkerungsszenarios folgt, daß sich die Gesamtemissionen der Nicht-Annex B Regionen bis zum Jahr 2030 in beiden Stabilisierungsszenarien mehr als verdoppeln dürfen. Zwischen 2030 und 2100 sinken die Emissionen beim 550 ppm Szenario geringfügig auf 234% der 1990 Emissionen ab (Abbildung 16a). Für das 450 ppm Szenario bietet sich nach 2030 ein anderes Bild: Hier müssen die Nicht-Annex B Emissionen bis 2100 wieder stark bis auf 136% der 1990 Emissionen reduziert werden (Abbildung 16b).

Durch den Verlauf der Nicht-Annex B Emissionen ergibt sich, daß die CO₂ äquivalenten Gesamtemissionen der Annex B Regionen bis zum Jahr 2030 etwa auf die Hälfte der Emissionen von 1990 reduziert werden müssen. Dies gilt für beide Stabilisierungsziele. Langfristig (bis 2100) ist für das 550 ppm Szenario eine Reduktion der Emissionen bis auf 25% des Emissionsniveaus von 1990 notwendig (Abbildung 16a). Das 450 ppm Szenario erfordert nach diesem Ansatz sogar eine Reduktion der Annex B Emissionen auf 14% des Emissionsniveaus von 1990 (Abbildung 16b). Diese Reduktionsanforderungen mögen sehr hoch erscheinen, aber sie sind zum Einen über einen Zeitraum von etwa 100 Jahren gestreckt und zum Anderen werden in diesem "Burden Sharing" Ansatz keine Maßnahmen zur kosteneffizienten Reduktion, wie z.B. der „Clean Development Mechanism“, berücksichtigt.

Eine Variation des Einstiegsriteriums zwischen 10% und 100% des Annex B Einkommens im Jahr 1990 macht für die Gesamtemissionen von Annex B und Nicht-Annex B einen Unterschied von maximal 0.1 Gt C pro Jahr für das 450 ppm Szenario und 0.4 Gt C pro Jahr für das 550 ppm Szenario. Der kleine Unterschied von etwa 0.1 Gt C, der von den Nicht-Annex B Regionen bei einem höheren Einstiegsriterium pro Jahr mehr emittiert werden darf, verdeutlicht die verstärkten Anstrengungen, die von beiden, sowohl Annex B als auch Nicht-Annex B Regionen gemacht werden müssen, wenn ein strengeres Stabilisierungsziel von 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre erreicht werden soll.

4.3 Zusammenfassung

Minderung der globalen Treibhausgasemissionen

Um eine Stabilisierung der atmosphärischen CO₂ Konzentration auf den vorgegebenen Konzentrationspfaden zu erreichen, dürfen die globalen Emissionen bis zum Jahr 2030 ansteigen. Eine Kontrolle der Emissionen ist jedoch von Beginn an notwendig. Um die globalen Reduktionsraten langfristig (bis 2100) niedrig zu halten (kleiner als 0.5% pro Jahr), dürfen die mittelfristigen Emissionen (bis 2030) für das 550 ppm Szenario höchstens 1% pro Jahr steigen. Für dieses Szenario sind allerdings nach 2100 weitere Reduktionsanstrengungen notwendig, da eine Stabilisierung bei 550 ppm CO₂ erst 2150 erreicht wird. Für das 450 ppm Szenario muß der Anstieg der globalen Emissionen bis 2030 deutlich unter 1% pro Jahr bleiben und langfristig sind für dieses Szenario globale Reduktionsraten zwischen 1 und 1.5% pro Jahr notwendig.

Minderung der regionalen Treibhausgasemissionen - Mögliche Ansätze für eine regionale Verteilung der Reduktionslasten ("Burden Sharing" Ansatz)

Um abzuschätzen, was für Konsequenzen die auf globaler Ebene erforderlichen Reduktionsraten für die Emissionskontrolle in verschiedenen Regionen der Welt haben könnten, wurde ein Verfahren entwickelt, um die erlaubten globalen Emissionen zwischen Annex B und Nicht-Annex B Regionen aufzuteilen. Dieses Verfahren basiert auf zwei Prinzipien: (1) Aufgrund ihres historischen Beitrags zur Klimaänderung und ihrer hohen Pro-Kopf-Emissionen müssen die Annex B Länder sofort mit der Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen beginnen. (2) Die Nicht-Annex B Länder stabilisieren ihre Pro-Kopf-Emissionen, sobald sie ein bestimmtes Einkommensniveau erreicht haben und beginnen mit der Reduktion sobald ihre Pro-Kopf-Emissionen mit denen der Annex B Länder konvergieren.

Das Gesamtbild, das wir bei Anwendung dieses Ansatzes erhalten, ist für beide Stabilisierungsszenarien ähnlich: Die Annex B Länder beginnen mit hohen durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen und haben diese Emissionen auf ein Niveau weit unter dem von 1990 zu reduzieren. Die durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B Länder hingegen beginnen auf einem niedrigen Niveau, dürfen mittelfristig ansteigen und müssen dann wieder auf das Niveau von 1990 oder sogar niedriger reduziert werden, um das 450 ppm Stabilisierungsziel zu erreichen. Allerdings führt das angenommene starke Bevölkerungswachstum in diesen Regionen, trotz der auf einem relativ niedrigen Niveau verbleibenden Pro-Kopf-Emissionen, zu hohen Gesamtemissionen. Innerhalb der nächsten dreißig Jahre (bis ca. 2030) findet für das 550 ppm Szenario mehr als eine Verdopplung der Gesamtemissionen der Nicht-Annex B Regionen statt. Die Emissionen dürfen nach diesem Ansatz bis zum Jahr 2100 auf diesem Niveau bleiben. Für das 450 ppm Szenario verdoppeln sich die Gesamtemissionen ebenfalls bis 2030, müssen danach aber wieder auf die Hälfte reduziert werden, um im Jahr 2100 ein Emissionsniveau geringfügig über dem von 1990 zu erreichen. Die Gesamtemissionen der Annex B Länder müssen bis 2030, unabhängig vom Stabilisierungsszenario, halbiert werden und bis zum Jahr 2100 auf ein Viertel der jetzigen Emissionen oder weniger reduziert werden, um sowohl eine Konvergenz der pro Kopf Treibhausgasemissionen als auch eine Stabilisierung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration zu realisieren.

5. Umweltauswirkungen der Stabilisierungsziele

Das Hauptziel der globalen Klimapolitik ist eine Minimierung "gefährlicher" Auswirkungen des globalen Klimawandels auf natürliche aber auch sozioökonomische Systeme. Was die Untersuchung der Auswirkungen einer Klimaänderung angeht, wirft dieses Ziel zwei Hauptfragen auf: (1) Was sind angemessene Indikatoren, um abzuschätzen ob ein Klimawandel gefährlich ist oder nicht? Und (2): Was ist ein ungefährlicher Klimawandel, bzw. was sind die maximalen Auswirkungen, die wir noch tolerieren können oder wollen? Artikel 2 der Klimakonvention nennt immerhin zwei Auswirkungskategorien: Natürliche Ökosysteme und die Nahrungsmittelproduktion. Allerdings ist die Formulierung dieses Artikels so allgemein gefaßt, daß eine einfache Auswahl und Quantifizierung von Auswirkungsindikatoren nicht möglich ist.

Im folgenden Kapitel werden wir erst eine Anzahl von Indikatoren diskutieren, um die Formulierung von Artikel 2 der Klimakonvention zu konkretisieren. Im zweiten Schritt werden diese Indikatoren genutzt, um die Stärke der Umweltauswirkungen der zwei Stabilisierungsziele 450 ppm und 550 ppm CO₂ in der Atmosphäre abzuschätzen.

5.1 Auswahl von Auswirkungsindikatoren für die Klimapolitik

Ein Indikator sollte eine umfassende Abschätzung des Zustandes eines Systems oder Prozesses erlauben. Im Idealfall sollten Umweltindikatoren, die entwickelt wurden, um als Basis oder zumindest zur Unterstützung politischer Entscheidungen zu dienen, eine Anzahl von Kriterien erfüllen:

1. sie müssen sensitiv auf den Umweltaspekt reagieren, der untersucht wird und eine Änderung in der Indikatorgröße sollte eindeutig auf den untersuchten Umweltaspekt zurückzuführen sein,
2. die Quantifizierung der Indikatorgröße (Monitoring) sollten reproduzierbar sein und die Ergebnisse von Modellsimulationen sollten robust sein, d.h. Simulationen mit unterschiedlichen Modellen sollten gut übereinstimmende Resultate ergeben, damit Politiker Vertrauen in diese Resultate entwickeln können,
3. sie sollten so einfach und transparent wie möglich sein, aber gleichzeitig die Komplexität des Themas nach dem Stand der Wissenschaft abdecken,
4. sie sollten soweit wie möglich aggregiert sein, um die Anzahl der notwendigen Indikatoren zu begrenzen (Leemans und Hootsmans, 1998).

Dieser Satz von Kriterien wird genutzt, um die Stärken und Schwächen derjenigen Indikatoren zu diskutieren, die für die Untersuchung der Stabilisierungsziele mit Hilfe des IMAGE Modells ausgewählt wurden.

Die Besonderheit des Themas globaler Klimawandel liegt in seiner extremen Komplexität. Ein Aspekt dieser Komplexität ist die große Anzahl von Aspekten des menschlichen Lebens, die wahrscheinlich betroffen sein werden. Die Konsequenz ist, daß die Anzahl der Auswirkungen, die berücksichtigt werden muß, ebenfalls sehr groß sein sollte. Neben der

Gefährdung der Nahrungsmittelversorgung und der Ökosysteme, die in Artikel 2 der Klimarahmenkonvention erwähnt werden, werden auch die Anfälligkeit von Küstensystemen, die menschliche Gesundheit und die Änderung der Wasserressourcen vom IPCC als wichtig angesehen (Watson *et al.*, 1997). Politische Entscheidungsträger nutzen oft die mittlere globale Temperaturänderung als eine Näherung für die Stärke der Klimaänderung, was auch angemessen ist, da die Temperaturänderung (neben der Änderung der Niederschläge) der Hauptgrund für das Auftreten vieler Umweltauswirkungen ist und außerdem die direkte Antwort des Klimasystems auf die Akkumulation von Treibhausgasen in der Atmosphäre darstellt. Was jedoch bisher fehlt ist eine umfassende Information über die Beziehung zwischen einer mittleren globalen Temperaturänderung und einer großen Anzahl sehr unterschiedlicher indirekter Auswirkungsindikatoren wie z.B. die Gefährdung der Nahrungsmittelproduktion oder der Anstieg des Meeresspiegels.

Ein weiterer Aspekt von Komplexität ist die räumliche Heterogenität des Auftretens von Auswirkungen. Wahrscheinlich werden alle Regionen der Welt direkt oder indirekt vom Klimawandel betroffen sein, aber in sehr unterschiedlichem Ausmaß. Einige Regionen werden mit starken negativen Auswirkungen umgehen müssen, andere hingegen werden sogar vom Klimawandel profitieren. Zusätzlich variiert auch die Verwundbarkeit der Regionen gegenüber den Auswirkungen der Klimaänderung. Beide Aspekte von Verwundbarkeit, die Sensitivität eines Systems für Klimaänderung, aber auch die Fähigkeit ein System an den Klimawandel anzupassen (z.B. durch Variation der Getreidesorten in der Landwirtschaft oder durch Küstenschutz) variiert sehr stark. Folglich spielt die räumliche Auflösung von Auswirkungsindikatoren eine entscheidende Rolle in der Diskussion über angemessene Indikatoren. Insbesondere da politische Entscheidungsträger oft die Interessen eines bestimmten Landes zu vertreten haben und infolgedessen besonders an den Klimaauswirkungen auf Länderebene oder sogar auf lokaler Ebene interessiert sind.

Ein weiterer Punkt ist der der zeitlichen Auflösung eines Indikators. Die globale Temperaturänderung zwischen 1990 und 2100, z.B. ist Beides, kurz und einfach zu vermitteln (wenn die Unsicherheiten dieses Wertes nicht berücksichtigt werden). Ein angemessenerer Ansatz wäre jedoch, auch die zeitliche Dynamik des Auftretens von Auswirkungen zu berücksichtigen. Dies ist insbesondere wichtig, da sich natürliche und sozioökonomische Systeme wahrscheinlich an sich verändernde Klimabedingungen anpassen müssen. D.h. es ist wichtig, neben der absoluten Änderung einer Indikatorgröße, auch die Änderungsrate dieses Indikators zu berücksichtigen.

Im Rahmen dieser Studie haben wir die Auswirkungen zweier Stabilisierungsszenarien sowie eines Referenzszenarios auf insgesamt fünf unterschiedliche Kategorien von Klimaauswirkungen untersucht (siehe Tabelle 4). Bei diesen Kategorien handelt es sich um die Temperaturänderung, den Meeresspiegelanstieg, die Änderung der Produktivität einiger Getreideklassen, die Gefährdung der natürlichen Vegetation sowie die Wasserverfügbarkeit in ausgewählten Wassereinzugsgebieten. Die aus diesen Kategorien abgeleiteten Indikatoren werden im folgenden Teil dieses Kapitels diskutiert.

Tabelle 4: Auswirkungskategorien und Indikatoren für die Analyse des 550 ppm und des 450 ppm Stabilisierungsszenarios sowie des Kyoto Szenarios als Referenzszenario. In Klammern ist die räumliche Auflösung angegeben, in der die Indikatorgröße quantifiziert wird.

Auswirkungskategorie	Indikator
Temperaturänderung	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlere jährliche Temperaturänderung zwischen 1990 und 2100 (global) • Rate der Temperaturänderung pro Dekade (global)
Meeresspiegelanstieg	<ul style="list-style-type: none"> • Meeresspiegelanstieg zwischen 1990 und 2100 bzw. 2500 (global) • Rate des Meeresspiegelanstiegs pro Dekade (global)
Getreideproduktivität	<ul style="list-style-type: none"> • Anteil der 1990er Fläche mit abnehmender potentieller Produktivität für nicht-tropisches Getreide (global und regional) • Anteil der 1990er Fläche mit abnehmender potentieller Produktivität für Mais (global und regional) • Anteil der 1990er Fläche mit abnehmender potentieller Produktivität für tropisches Getreide (global und regional)
Gefährdung der natürlichen Vegetation	<ul style="list-style-type: none"> • Anteil der Fläche mit Gefährdung der potentiellen natürlichen Vegetation von 1990 (global und regional) • Anteil der Fläche mit Gefährdung der Vegetation in Naturreservaten von 1990 (global und regional)
Wasserverfügbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Änderung des mittleren jährlichen Abflusses (Wassereinzugsgebiet)

5.1.1 Änderung der Temperatur

Alle Werte für Indikatoren der Temperaturänderung, die in diesem Bericht präsentiert werden, beruhen auf der Klimasensitivität des IMAGE Modells, die bei einer Verdopplung der CO₂ Konzentration zu einer globalen Temperaturänderung von 2.37°C führt. Dieser Wert liegt innerhalb der Spanne der Klimasensitivitäten, die vom IPCC vorgeschlagen werden (1.5°C bis 4.5°C) (Houghton *et al.*, 1996). Bei einer höheren Sensitivität, würden sowohl die globale Temperaturänderung als auch die Klimaauswirkungen höher ausfallen.

Die mittlere globale Temperaturänderung ist eine gute Näherung für das Ausmaß einer Klimaänderung, denn sie ist (neben der Niederschlagsänderung) eine der Hauptursachen für die Gefährdung der natürlichen und sozioökonomischen Systeme, die die Grundlage für die Indikatoren in Tabelle 4 bilden. Als Indikator erfüllt sie die meisten der in Kapitel 5.1 aufgeführten Kriterien. Die mittlere globale Änderung der Temperatur ist (zumindest zu einem sehr großen Teil) direkt auf die Akkumulation von Treibhausgasen in der Atmosphäre zurückzuführen. Die Resultate von Klimasimulationen mit unterschiedlichen General Circulation Models (GCMs) zeigen hinsichtlich der globalen mittleren Temperaturänderung eine recht gute Übereinstimmung (Alcamo *et al.*, 1998a) und sie ist ein einfacher und leicht zu vermittelnder Indikator. Sie deckt jedoch einen Aspekt nicht ab, der ins-

besondere für politische Entscheidungsträger sehr wichtig ist: Die mittlere globale Temperaturänderung sagt nichts aus über die Höhe der lokalen Auswirkungen in den Regionen, die sie in den Klimaverhandlungen repräsentieren.

Die Rate der Temperaturänderung (in °C pro Dekade) betont einen weiteren wichtigen Aspekt des Klimawandels: Sie hängt stark zusammen mit der Fähigkeit von natürlichen und sozioökonomischen Systemen, sich an einen Klimawandel anzupassen. Hohe Raten der Temperaturänderung stellen, insbesondere für natürliche Ökosystemen ein hohes Gefährdungspotential dar. Wenn hohe Raten der Temperaturänderung über einen längeren Zeitraum andauern, können auch irreversible Schäden in Ökosystemen nicht ausgeschlossen werden.

5.1.2 Anstieg des Meeresspiegels

Der Anstieg des Meeresspiegels hat seine Ursache in der thermischen Ausdehnung der Ozeane, dem Abschmelzen von Gletschern und Veränderungen der Eisbedeckung in Grönland und der Antarktis. Ein ansteigender Meeresspiegel erfordert eine Veränderung der Infrastruktur im Küstenschutz, wenn größere Schäden in Küstengebieten verhindert werden sollen. In dieser Hinsicht sind insbesondere kleine Inselstaaten anfällig für einen Anstieg des Meeresspiegels. Da die Anpassung an einen steigenden Meeresspiegel sowohl Zeit als auch Geld kostet, wird nicht nur der absolute Anstieg des Meeresspiegels berechnet, sondern auch die Geschwindigkeit des Anstiegs.

5.1.3 Änderung der potentiellen landwirtschaftlichen Produktivität

Die Gefährdung der Nahrungsmittelversorgung wird in Artikel 2 der Klimakonvention explizit als Indikator aufgeführt. In IMAGE wird die potentielle landwirtschaftliche Produktivität mit einer modifizierten Version des FAO "Crop Suitability" Modells berechnet (Leemans und van den Born, 1994), das die potentielle Produktivität unter Bedingungen des Trockenfeldbaus simuliert. In der IMAGE Version des Modells wird zusätzlich die durch einen Anstieg der atmosphärischen CO₂ Konzentration hervorgerufene Erhöhung der Photosyntheserate berücksichtigt (CO₂ Düngeeffekt).

Neben den Klimaauswirkungen auf die potentielle Produktivität auf globaler Ebene werden für diesen Indikator auch die Auswirkungen auf regionaler Ebene präsentiert. Bei der Einschätzung der regionalen Resultate sollte jedoch berücksichtigt werden, daß sie mit einer größeren Unsicherheit behaftet sind als die globalen Resultate, da insbesondere die Simulation der Niederschlagsverteilung noch mit großen Unsicherheiten behaftet ist. So können die räumlich höher aufgelösten Ergebnisse, je nach benutztem Klimamodell, voneinander abweichen (siehe z.B. Rosenzweig und Parry, 1994). Da es uns aber in erster Linie auf einen Vergleich der Auswirkungen zweier Stabilisierungsszenarien, im Vergleich zu einem Referenzszenario und weniger auf die absoluten Produktivitätsrückgänge ankommt, erscheint es durchaus erlaubt, auch regionale Auswirkungen zu präsentieren. Für die in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse nutzen wir die Temperatur- und Niederschlagsverteilung des IMAGE-AOS Klimamodells in Kombination mit einem GCM Simulationslauf des Max Planck Instituts (MPI) (Cubasch *et al.*, 1992), mit dessen Hilfe die

Ausgabe des IMAGE Klimamodells auf die benötigte 0.5° mal 0.5° Auflösung skaliert wurde.

Die dargestellten Auswirkungen des Klimawandels auf die potentiellen Erträge von tropischem Getreide (Hirse, Sorghum), nicht-tropischem Getreide (Winter- und Sommerweizen) sowie Mais basieren auf den Flächen, auf denen diese Getreidesorten gegenwärtig angebaut werden. Dargestellt wird der Anteil der 1990er Fläche, auf denen der potentielle Ertrag um mehr als 5% unter den potentiellen Ertrag von 1990 absinkt. Der potentielle Ertrag wird berechnet aus den Klimabedingungen und Bodeneigenschaften jeder 0.5° mal 0.5° Zelle. In IMAGE wird in einem nächsten Schritt auch ein aktueller Ertrag berechnet, indem der potentielle Ertrag noch einmal durch Managementmaßnahmen und Düngereinsatz korrigiert wird. Da diese landwirtschaftlichen Maßnahmen aber sowohl regional unterschiedlich als auch szenarioabhängig sind, werden hier nur die Ergebnisse für die potentiellen Erträge präsentiert. So ist der dargestellte Rückgang der potentiellen Erträge ausschließlich auf eine Änderung der klimatischen Bedingungen zurückzuführen (siehe Kriterium 1 für Indikatoren der Klimaänderung in Kapitel 5.1) und erlaubt einen Vergleich der Auswirkungen der Stabilisierungsszenarien auf unterschiedliche Weltregionen. Auch Adaptationsmaßnahmen wie z.B. eine Verlagerung der Anbauggebiete oder eine Änderung der Managementmaßnahmen werden nicht berücksichtigt.

5.1.4 Gefährdung der potentiellen natürlichen Vegetation

In Artikel 2 der Klimarahmenkonvention wird gefordert, daß eine Änderung des Klimas nur in einem Umfang stattfinden sollte, der es natürlichen Ökosystemen erlaubt, sich noch an diesen Klimawandel anzupassen. Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die natürliche Vegetation zu bewerten, wurde berechnet, auf welchem Flächenanteil die heutige potentielle natürliche Vegetation (1990) durch einen Klimawandel gefährdet sein würde, d.h. wo sich die unter gegenwärtigen Klimabedingungen existierende natürliche Vegetation in einen anderen Vegetationstyp umwandeln müsste oder gar nicht an neue klimatische Bedingungen anpassen kann. Die natürliche Vegetation, die potentiell auf einer bestimmten Fläche wachsen kann, wird in IMAGE mit dem BIOME Modell simuliert (Prentice et al., 1992). Der Ausdruck *potentielle* natürliche Vegetation wird hier genutzt in dem Sinne, daß auf einer bestimmten Fläche in Abhängigkeit von Klima- und Bodenfaktoren ein bestimmter Vegetationstyp vorkommen kann. Dies wäre z.B. unter den Klimabedingungen des Jahres 1990 Laubwald in Mitteleuropa, oder tropischer Regenwald in Teilen Südamerikas. Ob dieser Vegetationstyp tatsächlich vorkommt, hängt außer von den Klimabedingungen noch von anderen Faktoren, wie z.B. dem Bedarf an landwirtschaftlicher Fläche oder Holzprodukten, ab. Da dieser Bedarf aber hauptsächlich von Annahmen über zukünftiges Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum bestimmt wird, bleibt er hier unberücksichtigt.

IMAGE berechnet das Vorkommen verschiedener, hoch aggregierter Vegetationsklassen in Abhängigkeit von Klima- und Bodeneigenschaften, indem für jede dieser Vegetationsklassen ein Satz von Umweltbedingungen vorgegeben wird, die erfüllt sein müssen, damit eine Vegetationsform auf einer bestimmten Fläche existieren kann. Zusätzlich wird berücksichtigt, daß eine Erhöhung der atmosphärischen CO_2 Konzentration bei Pflanzen zu

einer steigenden Wassernutzungseffizienz führt, indem die Mindestanforderungen für die Wasserverfügbarkeit herabgesetzt werden, so daß die betreffende Vegetationsform auch in trockeneren Gebieten existieren kann. IMAGE berücksichtigt 13, besonders im Hinblick auf ihren Kohlenstoffumsatz unterschiedliche, natürliche Vegetationsklassen, deren Vorkommen mit einer räumlichen Auflösung von 0.5 Längengrad mal 0.5 Breitengrad berechnet wird. Ändern sich die klimatischen Bedingungen (wie z.B. Wasserverfügbarkeit oder die Länge der Vegetationsperiode) so stark, daß die jetzige potentielle Vegetation einer betrachteten Fläche dort nicht mehr vorkommen kann, sprechen wir von einer Gefährdung der potentiellen natürlichen Vegetation.

Um die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Flächen mit besonders geschützter natürlicher Vegetation zu beleuchten, wird auch die Gefährdung der natürlichen Vegetation in Gebieten, die heute als Naturreservate ausgewiesen sind, berücksichtigt. D.h. wir präsentieren (1) den Flächenanteil der gegenwärtigen potentiellen natürlichen Vegetation, der durch eine Klimaänderung bedroht ist und (2) den Flächenanteil der Naturreservate, der durch eine Klimaänderung gefährdet ist.

Die Ergebnisse für beide Indikatoren werden auf globaler Ebene als auch auf regionaler Skala präsentiert. Da insbesondere die Simulation der Veränderung zukünftiger Niederschlagsmuster noch mit recht großen Unsicherheiten verbunden ist, sind auch die Ergebnisse für die Auswirkungen auf regionaler Ebene mit einer größeren Unsicherheit behaftet als die Ergebnisse auf globaler Ebene. Die Ergebnisse der regionalen Analyse sollten daher eher als ein Vergleich der Auswirkungsniveaus für unterschiedliche Klimaschutzszenarien, im Vergleich zu einem Referenzszenario, interpretiert werden.

5.1.5 Wasserverfügbarkeit

Eine Änderung der Temperatur- und Niederschlagsverteilung wird einen entscheidenden Einfluß auf den globalen Wasserhaushalt haben. Die meisten Klimaszenarien berechnen eine globale mittlere Zunahme des Niederschlags. Aber sie berechnen auch einen signifikanten regionalen Unterschied in der Intensität und Richtung dieser Änderung. Diese prognostizierten Niederschlagsänderungen werden in vielen Wassereinzugsgebieten eine entscheidende Veränderung der Wasserverfügbarkeit zur Folge haben. D.h. sowohl Wasserknappheit als auch Überflutungen, als das entgegengesetzte Extrem, werden in den kommenden Jahrzehnten eine wichtige Rolle bei globalen Umweltveränderungen spielen. Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftige Wasserverfügbarkeit abzuschätzen, wurde das WaterGAP Modell (Döll *et al.*, 1998 und Alcamo *et al.*, 1997a) mit dem Klima- und Vegetationsmodell von IMAGE gekoppelt. Das WaterGAP Modell (*Water-Global Assessment and Prognosis*) berechnet, fast die gesamte Landoberfläche abdeckend, die Wassernutzung und Wasserverfügbarkeit für jedes von 1162 Wassereinzugsgebieten. Obwohl das Modell mit Hilfe existierender Daten kalibriert und getestet wurde, enthält es in seiner Beschreibung der Wasserverfügbarkeit noch eine ganze Reihe von Einschränkungen. Auf der Ebene des Wassereinzugsgebietes ist die Wasserverfügbarkeit definiert als die Summe aus dem jährlichen Abfluss und der Grundwasserneubildung jeder 0.5° mal 0.5° Zelle eines Wassereinzugsgebietes. Dies ist natürlich nur eine grobe Näherung der Wasserverfügbarkeit, da weder die räumliche Variabilität der Wasserverfügbarkeit inner-

halb eines Einzugsgebietes noch die hydrologische Variabilität berücksichtigt wird, die von Monat zu Monat oder von Woche zu Woche auftritt. Auf der anderen Seite haben viele Flüsse Wasserspeicher (Talsperren), die das Wasser von Monat zu Monat speichern, so daß die Berechnung der Wasserverfügbarkeit über ein ganzes Jahr durchaus ein angemessener Indikator für die Wassersituation in einem Einzugsgebiet sein kann. D.h. das Modell ist in dieser Form durchaus geeignet einen Einblick in zukünftige Trends der Wasserverfügbarkeit zu geben (Version 2.0 des WaterGAP Modells, die sowohl die räumliche Variabilität des Abflusses, als auch die tägliche hydrologische Variabilität berücksichtigt, ist inzwischen fertiggestellt).

Im Hinblick auf die Stabilisierungsszenarien werden wir den zeitlichen Verlauf (1995-2100) für den Abfluss einiger ausgewählter Wassereinzugsgebiete unter den Bedingungen eines 10-Perzentil Trockenjahres darstellen. Das 10-Perzentil Trockenjahr bedeutet, daß geringere Niederschläge als in diesem Jahr nur einmal in zehn Jahren vorkommen. Diese Bedingungen wurden ausgewählt, da wir davon ausgehen, daß sich Länder an mittlere Bedingungen für die Wasserverfügbarkeit gut angepasst haben. D.h. Probleme mit der Wasserversorgung treten nur dann auf, wenn die Wasserverfügbarkeit stark vom Mittelwert abweicht.

Nach Watson *et al.* (1997) sind gegenwärtig 19 Länder auf der Welt, als von Wasserstress betroffen eingestuft. Von diesen 19 Ländern liegen in Afrika mehr als in jeder anderen Region der Welt. Aus diesem Grund haben wir zwei Wassereinzugsgebiete ausgewählt, die in unterschiedlichen Teilen von Afrika liegen: Den Senegal und den Zambezi. Außerdem beziehen wir den Murray-Darling in Australien und den Guadalquivir in Spanien in die Untersuchung mit ein, da diese Wassereinzugsgebiete extensiv für Landwirtschaft genutzt werden und bereits Probleme mit der Wasserversorgung haben. Desweiteren wird der Rhein, als wichtiger europäischer Fluß, untersucht.

5.2 Auswirkungen der Stabilisierungsszenarien

Für diesen Bericht wurden die Klimaauswirkungen von zwei CO₂ Stabilisierungsszenarien (450 ppm und 550 ppm) und eines mittleren Referenzszenarios (Kyoto Szenario) untersucht. Für das Kyoto Szenario werden keine weiteren Reduktionsmaßnahmen angenommen, als die, die im Kyoto Protokoll festgelegt wurden (-5.2% für die Annex B Regionen im Jahr 2010¹). Da Schwefelemissionen einen deutlich kompensierenden Effekt auf die globale Erwärmung haben, präsentieren wir auch die Auswirkungen der Schwefelemissionen des "PB-95% SO₂"² und des "PB-5% SO₂" Szenarios auf die Höhe der Auswirkungen des 550 ppm Stabilisierungsszenarios. D.h. die Anzahl der analysierten Szenarien steigt auf fünf:

1. Das Kyoto Referenzszenario mit konstanten SO₂ Emissionen nach 1990,
2. das 450 ppm Szenario mit konstanten SO₂ Emissionen nach 1990,
3. das 550 ppm Szenario mit konstanten SO₂ Emissionen nach 1990,

¹ Für eine detailliertere Beschreibung des Kyoto Szenarios siehe Kapitel 2.

² Das "PB-95% SO₂" und das "PB-5% SO₂" Szenario sind in Kapitel 3.2.4 beschrieben.

4. das 550 ppm Szenario mit den SO₂ Emissionen des "PB-95% SO₂" Szenarios und
5. das 550 ppm Szenario mit den SO₂ Emissionen des "PB-5% SO₂" Szenarios.

Die SO₂ Emissionen der Szenarien (4) und (5) weisen von Region zu Region starke Unterschiede auf und dürften daher auch für die regionalen Auswirkungen des Klimawandels eine wichtige Rolle spielen.

5.2.1 Globale Auswirkungen

Änderung der Temperatur

Die Folge der Akkumulation von CO₂ und anderen Treibhausgasen in der Atmosphäre ist für das Kyoto Referenzszenario eine mittlere globale Temperaturänderung von 2.7°C zwischen 1990 und 2100 (Abbildung 17). Für die Szenarien, in denen die CO₂ Konzentration stabilisiert wird, steigt die Temperatur bis 2100 um 1.2°C für das 450 ppm Szenario und um 1.7°C für ein Stabilisierungsziel von 550 ppm CO₂. Bei diesen beiden Szenarien werden die SO₂ Konzentrationen nach 1990 konstant gehalten. Werden für das 550 ppm Szenario zusätzlich frühe und umfangreiche SO₂ Reduktionsmaßnahmen berücksichtigt, ("PB-5% SO₂" Szenario) so liegt die Temperaturänderung im Jahr 2100 minimal höher, nämlich bei 1.8°C. Die globalen SO₂ Emissionen in diesem Szenario liegen bei einem Drittel der Emissionen des Jahres 1990. Eine Verdopplung der SO₂ Emissionen zwischen 1990 und 2100, wie sie im "PB-95% SO₂" Szenario aufgrund späterer und nicht sehr umfangreicher Reduktionsmaßnahmen auftreten, führt dagegen zu einer weit niedrigeren Temperaturerhöhung von 1.4°C im Jahr 2100. Allerdings werden SO₂ Emissionen in dieser Höhe von negativen Auswirkungen auf Ökosysteme und die menschliche Gesundheit begleitet sein, die in dieser Studie nicht berücksichtigt werden.

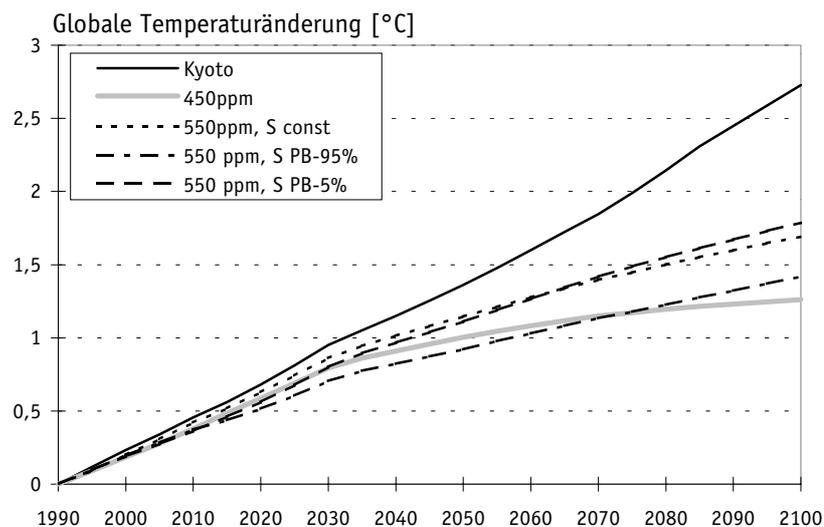


Abbildung 17: Mittlere globale Temperaturänderung zwischen 1990 und 2100.

Für das Kyoto Szenario, aber auch für die beiden Stabilisierungsszenarien steigt die glo-

bale Temperatur im Jahr 2100 noch an, obwohl die Anstiegsrate für das 450 ppm Szenario im Jahr 2100 niedriger ist (0.03°C pro Dekade) als für das 550 ppm Szenario (0.09°C pro Dekade). D.h. auch bei einer Stabilisierung der CO_2 Konzentration, wie im Falle des 450 ppm Szenarios, ist, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, mit einem weiteren Temperaturanstieg über den Zeitpunkt der Stabilisierung hinaus zu rechnen.

Die Rate des Temperaturanstiegs ist ein besonders wichtiger Indikator, der die Anpassungsfähigkeit natürlicher Ökosysteme an die globale Erwärmung widerspiegeln kann. Rijsberman und Swart (1990) schätzen, daß eine Geschwindigkeit der Temperaturänderung von weniger als 0.1°C pro Jahrzehnt es natürlichen Ökosystemen erlauben würde, sich an den Klimawandel anzupassen. Wie jedoch in Abbildung 18 zu sehen ist, wird dieser Wert zwischen 1990 und 2030 für alle Szenarien überschritten. Die Rate der Temperaturänderung liegt oberhalb von 0.15°C pro Dekade, d.h. sogar für das 450 ppm Szenario könnten in den kommenden Jahrzehnten beträchtliche Schäden für natürliche Ökosysteme zu erwarten sein. Die Rate von 0.1°C pro Dekade wird für dieses Szenario erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts unterschritten.

Für das 550 ppm Szenario, kombiniert mit konstanten SO_2 Emissionen nach 1990, wird sich die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs gegen Ende des Jahrhunderts auf 0.1°C pro Dekade verlangsamen. Das 550 ppm Szenarien mit den hohen SO_2 Emissionen des "PB-95% SO_2 " Szenarios im Hintergrund wird diese Rate ca. 50 Jahre früher erreicht sein. Allerdings wird bis Ende des Jahrhunderts unter keinem der beiden Szenarien die Rate unter 0.1°C pro Dekade fallen. Allerdings mildern die hohen SO_2 Emissionen des "PB-95% SO_2 " Szenarios den mittelfristigen Temperaturanstieg ab: Die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs liegt für dieses Szenario zwischen 1990 und 2030 sogar unterhalb der Werte für das 450 ppm Szenario. Dieser Abkühlungseffekt der SO_2 Emissionen ist zum größten Teil auf den extrem starken Anstieg der SO_2 Emissionen in China zurückzuführen, die sich zwischen 1990 und 2030 verdreifachen (siehe Abbildung 10a). Diese hohen SO_2 Emissionen werden allerdings mit entsprechend starken Auswirkungen auf die Umwelt (wie z.B. Ökosystemversauerung) und die menschliche Gesundheit verbunden sein.

Mit den niedrigeren "PB-5% SO_2 " Emissionen im Hintergrund führt das 550 ppm Szenario zu einem schnelleren Anstieg der Temperatur mit einer Rate von mehr als 0.15°C pro Dekade bis weit in das 21. Jahrhundert hinein. Die Rate von 0.1°C pro Dekade wird für dieses Szenario über den ganzen Simulationszeitraum hin überschritten. Dies ist auch der Fall für das Kyoto Referenzszenario, bei dem die Rate sogar um den Faktor zwei und mehr überschritten wird.

Diese hohe Geschwindigkeit der globalen Temperaturänderung bei allen drei Szenarien, insbesondere zwischen 1990 und 2030, macht deutlich, wie wichtig eine möglichst schnelle Verminderung der Treibhausgasemissionen ist.

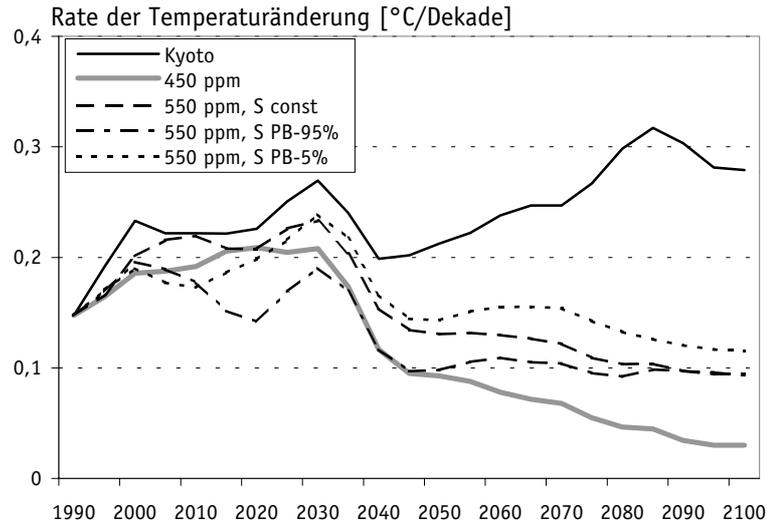


Abbildung 18: Mittlere globale Rate der Temperaturänderung pro Jahrzehnt zwischen 1990 und 2100 (berechnet aus dem globalen mittleren Temperaturanstieg).

Anstieg des Meeresspiegels bis zum Jahr 2100

Eine der Schlüsselauswirkungen des Klimawandels wird der Anstieg des Meeresspiegels sein, der insbesondere in Entwicklungsländern, die sich keinen umfassenden Küstenschutz leisten können, zu einer vermehrten Überflutung der Küstenregionen führen kann. Durch die sehr langsame Durchmischung des Tiefenwassers der Ozeane und die höhere Wärmekapazität des Wassers reagieren die Ozeane sehr viel langsamer als die Atmosphäre auf den Anstieg bzw. die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen. Folglich beträgt der mittlere Anstieg des Meeresspiegels zwischen 1990 und 2100 auch für die Stabilisierungsszenarien noch 29 cm für das 450 ppm Szenario und 33 cm für das 550 ppm Szenario (Abbildung 19). Obwohl sich der Temperaturanstieg im Jahr 2100 für diese beiden Szenarien verlangsamt, zeigt der Meeresspiegel 2100 noch deutlich steigende Tendenz; für das Kyoto Szenario steigt er sogar exponentiell und erreicht 2100 ein Niveau von 41 cm über dem von 1990. Der Unterschied im Anstieg ist zwischen den Szenarien nur relativ gering, wird aber nach 2100 wahrscheinlich zunehmen.

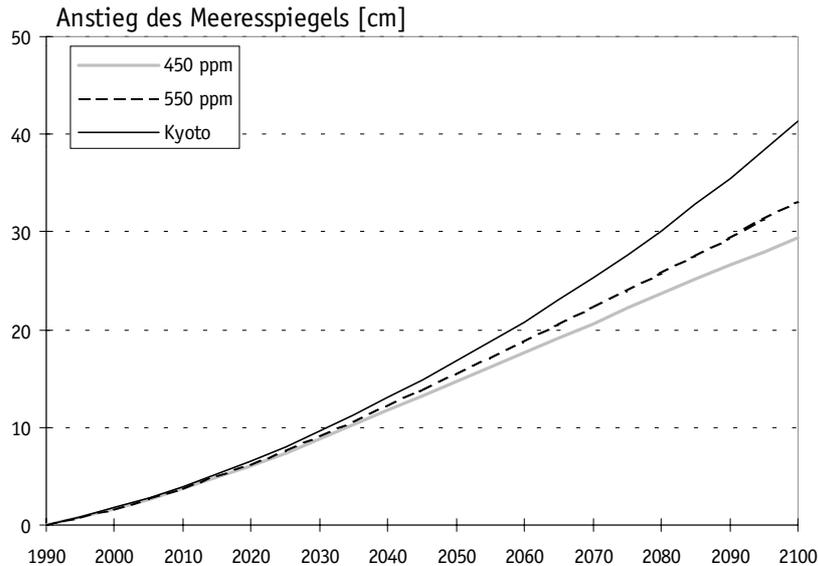


Abbildung 19: Mittlerer globaler Anstieg des Meeresspiegels zwischen 1990 und 2100.

Die Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs zeigt noch klarer als der kumulierte Anstieg, daß das ozeanische System sehr viel reaktionsträger ist als das atmosphärische System (Abbildung 20). Die Rate des Meeresspiegelanstiegs zeigt innerhalb des Simulationszeitraumes einen umgekehrten Trend wie die Rate des Temperaturanstiegs: Die Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs liegt 1990 bei 1.4 cm pro Dekade und verdoppelt sich für alle drei Szenarien bis 2030 auf ca. 3 cm pro Dekade. Nach 2030 wird nur für das 450 ppm Szenario die Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs geringfügig niedriger (nicht die Höhe des Meeresspiegels), während sich der Anstieg des Meeresspiegels für das Kyoto Szenario aber auch für das 550 ppm Stabilisierungsszenario nach 2100 noch beschleunigt.

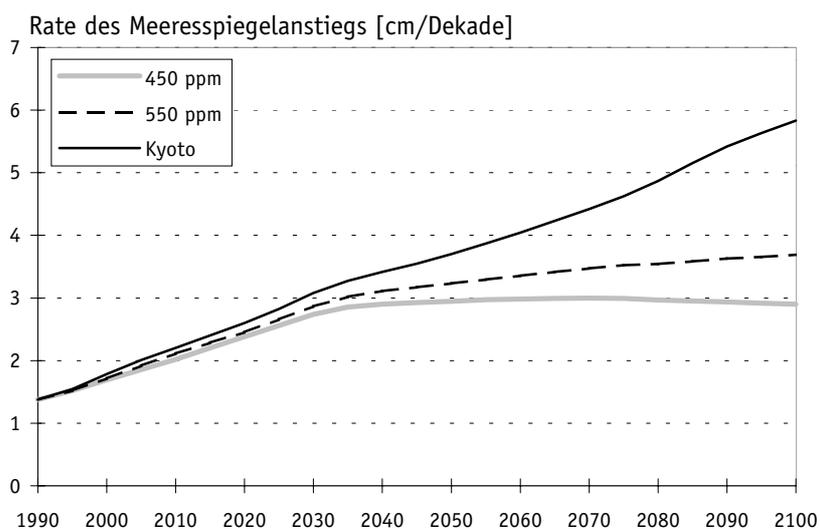


Abbildung 20: Rate des Meeresspiegelanstiegs zwischen 1990 und 2100.

Anstieg des Meeresspiegels nach 2100

Die im Jahr 2100 weiter ansteigende Tendenz des Meeresspiegels für die CO₂ Stabilisierungsszenarien motivierten Alcamo *et al.* (1997b) für eine Anzahl von Stabilisierungsszenarien IMAGE Simulationsläufe bis zum Jahr 2500 durchzuführen, um zu überprüfen ob und wann sich nach 2100 eine Stabilisierung des Meeresspiegelniveaus einstellt. Außerdem wurde der Vorschlag der AOSIS Gruppe, den Anstieg des Meeresspiegels langfristig auf 20 cm zu beschränken (UNFCCC, 1997a), aufgegriffen und berechnet, wie sich der Meeresspiegelanstieg nach 2100 verhält, wenn der Zeithorizont dieses Vorschlags auf 1990 bis 2100 begrenzt wird. Für diesen Zweck wurde ein globaler Emissionspfad entwickelt, der zwischen 1990 und 2100 einen Anstieg des Meeresspiegels um 20 cm zur Folge hat³.

Aus Abbildung 21 ist zu sehen, daß der Meeresspiegel nach 2100 um einen weiteren Faktor drei für das 450 ppm Szenario (d.h. um 103 cm zwischen 1990 und 2500) und einen Faktor vier für das 550 ppm Stabilisierungsszenario (d.h. um 122 cm zwischen 1990 und 2500) ansteigen kann. Sogar für ein Stabilisierungsziel von 350 ppm CO₂ ist bis zum Jahr 2500 noch mit einem Anstieg des Meeresspiegels um 80 cm zu rechnen. Trotz der starken Reduktion der globalen Treibhausgasemissionen, die zu einem Anstieg des Meeresspiegels um 20 cm zwischen 1990 und 2100 führen (AOSIS Klimaschutzvorschlag), könnte nach 2100 ein weiterer Anstieg des Meeresspiegels um 18 cm (im Jahr 2500 38 cm über dem Niveau von 1990) zu erwarten sein.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß trotz einer Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen und der Reduktion der Emissionen, die für das Erreichen dieser Stabilisierung notwendig sind, der Meeresspiegel auch nach der Stabilisierung über das Jahr 2100 hinaus signifikant ansteigen wird.

³ Für diesen Emissionspfad werden die globalen anthropogenen Treibhausgasemissionen bis 2010 auf ihr Niveau von 1990 vermindert. Nach 2010 werden die Emissionen um 2% pro Jahr reduziert und erreichen 2100 einen Wert von 2.0 Gt C pro Jahr. Für dieses Szenario und die Stabilisierungsszenarien finden nach 2100 keine Landnutzungsänderungen statt. Für die SO₂ Emissionen wird angenommen, daß sie nach 1990 konstant bleiben.

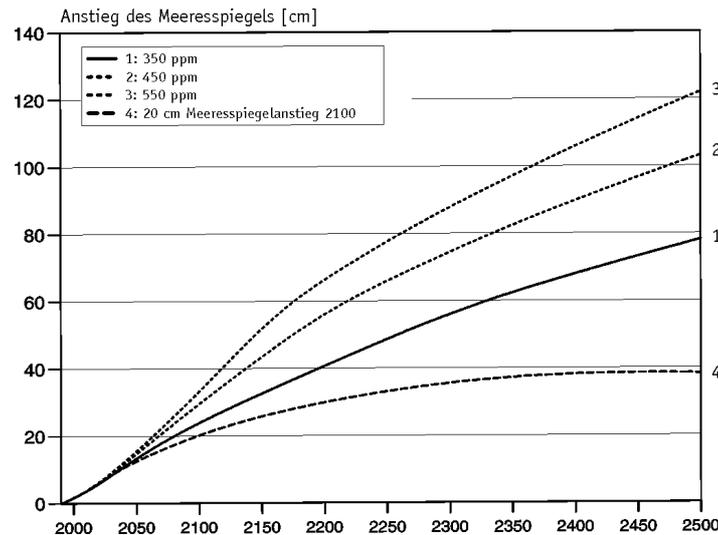


Abbildung 21: Anstieg des Meeresspiegels zwischen 1990 und 2500. Die Linien 2 bis 3 entsprechen den im Text beschriebenen Stabilisierungsszenarien und die Linie 1 einem strengeren CO₂ Stabilisierungsziel von 350 ppm, dem dieselben Annahmen für nicht-CO₂ Gase zugrunde liegen wie den beiden anderen Stabilisierungsszenarien. Linie 4 zeigt einen Anstieg des Meeresspiegels, der das Klimaziel der AOSIS Staaten aufgreift (20 cm Meeresspiegelanstieg nach 1990).

Änderung der landwirtschaftlichen potentiellen Produktivität

Um den Einfluß des Klimawandels auf die Nahrungsmittelproduktion zu untersuchen, wurden drei Getreideklassen ausgewählt, die in den 13 IMAGE Regionen eine wichtige Rolle für die Versorgung mit Grundnahrungsmitteln spielen. Dies sind Getreide der gemäßigten Zonen (im Folgenden kurz nicht-tropisches Getreide genannt), tropische Getreidesorten und Mais. Der prozentuale Anteil der heutigen landwirtschaftlichen Anbauflächen (1990) dieser Getreideklassen, die durch eine Änderung des Klimas von zurückgehenden Erträgen betroffen sein werden, dient als Indikator (für eine Beschreibung und Diskussion dieses Indikators siehe Kapitel 5.1).

Für *nicht-tropisches Getreide* (Winterweizen, Sommerweizen) ist für alle Stabilisierungsszenarien ein schneller Anstieg der Flächen mit zurückgehenden potentiellen Erträgen zu erwarten. Im Jahr 2010 können global bereits 11% der jetzigen Anbauflächen betroffen sein (siehe Abbildung 22). Dieser Flächenanteil steigt bis zum Jahr 2100 auf 18% für das 450 ppm Szenario und auf 20% für das 550 ppm Stabilisierungsszenario. Die Verzögerung des Anstiegs nach 2010 wird dadurch verursacht, daß sich der Temperaturanstieg in diesen Szenarien verlangsamt, aber auch dadurch, daß als Folge steigender CO₂ Konzentrationen ein verstärktes Wachstum der Pflanzen auftritt. Sowohl nicht-tropisches Getreide als auch tropisches Getreide gehören zu den sogenannten C3 Pflanzen, für die der CO₂ Düngeneffekt, d.h. der Anstieg der Biomasseproduktion durch Erhöhung der CO₂ Konzentration, zu einer teilweisen Kompensation der negativen Auswirkungen des Klimawandels (wie z.B. Produktivitätsrückgang durch einen Temperaturanstieg) führen kann. Die Konsequenz des CO₂ Düngeneffektes ist auch, daß die Höhe der Auswirkungen für die unterschiedlichen Stabilisierungsszenarien recht ähnlich sind. So dehnt sich die Fläche mit zurückgehenden potentiellen Erträgen für das 550 ppm Szenario, trotz eines stärkeren An-

stiegs der Temperatur, im Vergleich zum 450 ppm Szenario nur unwesentlich stärker aus. Besonders offensichtlich wird dies für das Kyoto Szenario, bei dem das Auswirkungsniveau nur leicht über dem der Stabilisierungsszenarien liegt: 22% der jetzigen globalen Anbaufläche für nicht-tropisches Getreide können im Jahr 2100 von zurückgehenden potentiellen Erträgen betroffen sein, im Vergleich zu 18% für das 450 ppm Szenario und 20% für das 550 ppm Szenario.

Für das 550 ppm Stabilisierungsszenario wurden, zum Standardfall konstanter SO_2 Emissionen nach 1990, zwei weitere Simulationsläufe mit den SO_2 Emissionen des "PB-5% SO_2 "- und des "PB-95% SO_2 " Szenarios durchgeführt. Die hohen SO_2 Emissionen des "PB-95% SO_2 " Szenarios schwächen die Klimaänderung für das 550 ppm Szenario so weit ab, das der globale Flächenanteil mit zurückgehen potentiellen Erträgen für nicht-tropisches Getreide im Jahr 2100 auf einem vergleichbaren Niveau liegt wie für das 450 ppm Szenario (siehe Abbildung 22). Kurzfristig, d.h. bis 2010 führen unterschiedliche SO_2 Szenarien zu keinem nennenswerten Unterschied im Auswirkungsniveau. Nur eine Verdopplung der globalen SO_2 Emissionen relativ zu 1990, wie sie im "PB-95% SO_2 " Szenario erfolgt, senkt das Auswirkungsniveau mittelfristig (2020-2070) sogar unter das Auswirkungsniveau des 450 ppm Szenarios ab. Aber da die Verdopplung der globalen SO_2 Emissionen auf einen Anstieg der Emissionen in den Entwicklungsländern zurückzuführen ist, ist für diese Regionen mit einer starken Versauerung der Umwelt zu rechnen. Diese negativen Auswirkungen könnten sogar größer sein als der Nutzen für den Klimawandel.

Die niedrigeren SO_2 Emissionen des "PB-5% SO_2 " führen im Jahr 2100 nur zu einer unwesentlichen Erhöhung des Auswirkungsniveaus im Vergleich zum 550 ppm Szenario mit konstanten SO_2 Emissionen.

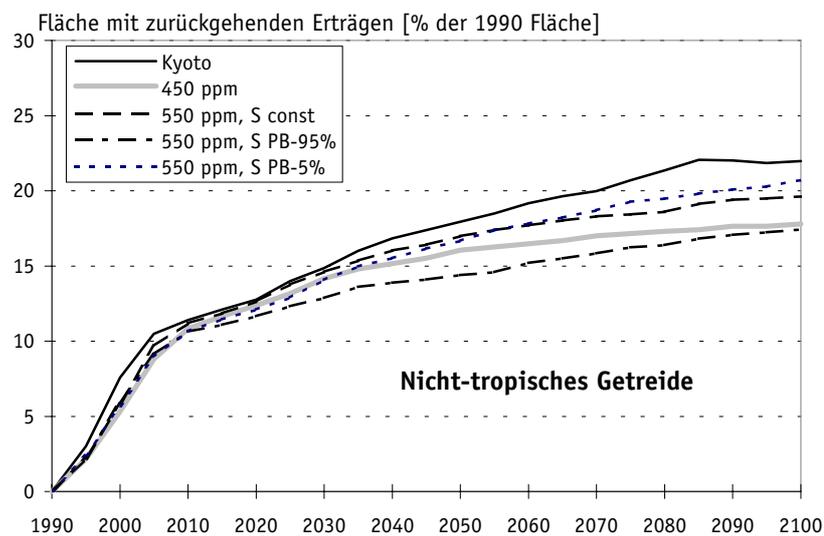


Abbildung 22: Globaler Anteil der 1990 bebauten Fläche mit zurückgehenden Erträgen für Getreide der gemäßigten Zonen (nicht-tropisches Getreide).

Für *tropisches Getreide* (Hirse, Sorghum) ist langfristig ein Auswirkungsniveau zu erwarten, das nur halb so hoch ist, wie das für nicht-tropisches Getreide (Abbildung 23). Außer-

dem wird die von Produktivitätsrückgängen betroffene Fläche nicht so schnell ansteigen, wie dies für nicht-tropisches Getreide der Fall ist. Dies ist darauf zurückzuführen, daß diese Getreidesorten zumeist in den niedrigeren Breitengraden angebaut werden, wo die Pflanzen an wärmere Klimabedingungen angepasst sind und wo der erwartete Temperaturanstieg nicht so stark ausfallen wird, wie in den nördlicheren Regionen, in denen nicht-tropisches Getreide angebaut wird (Krol *et al.*, 1997). Für das 450 ppm Szenario können im Jahr 2100 9% der jetzigen Anbauflächen betroffen sein. Aufgrund der Sensitivität von tropischem Getreide für den CO₂ Düngeeffekt fallen die Auswirkungen für das 550 ppm Szenario und das Kyoto Szenario im Jahr 2100 fast gleich hoch aus: Etwa 11% der jetzigen Anbaufläche können bei beiden Szenarien von zurückgehenden potentiellen Erträgen betroffen sein.

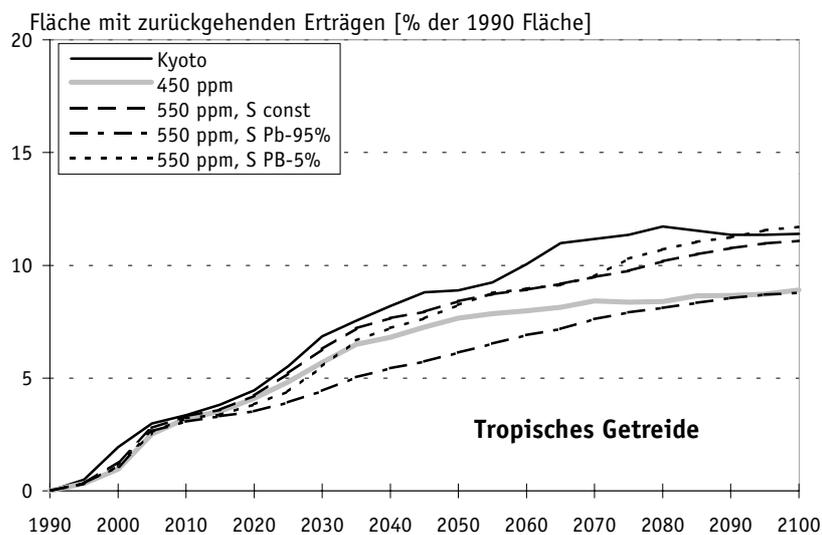


Abbildung 23: Globaler Anteil der 1990 bebauten Fläche mit zurückgehenden Erträgen für tropisches Getreide.

Für *Mais* als C4 Pflanze, die nicht sensitiv auf den CO₂ Düngeeffekt reagiert, ergibt sich ein etwas anderes Bild, als für die bisher beschriebenen Getreideklassen. Die globale Fläche mit zurückgehenden potentiellen Erträgen steigt bis 2100 für alle Szenarien auf mehr als 20% an (Abbildung 24). Außerdem wird die Hälfte dieses Auswirkungsniveaus schon relativ früh, d.h. vor 2020 erreicht sein. Die Resultate für das Kyoto Szenario zeigen einen kontinuierlichen Anstieg bis auf 31% der jetzigen Fläche bis zum Jahr 2100. Die Auswirkungsniveaus des 450 ppm und des 550 ppm Szenarios spiegeln dagegen die Verlangsamung des Klimawandels in diesen Szenarien wider: Nach einer schnellen Ausbreitung der Fläche mit zurückgehenden potentiellen Erträgen bis 2030 verlangsamt sich der Flächenzuwachs und erreicht im Jahr 2100 21% der heutigen Anbaufläche für das 450 ppm Szenario und 25% der Anbaufläche für das 550 ppm Szenario.

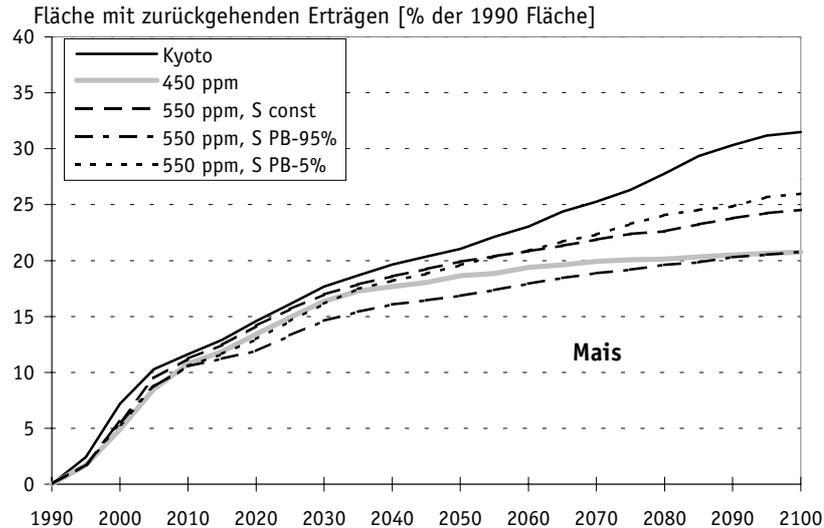


Abbildung 24: Globaler Flächenanteil mit zurückgehenden Erträgen für Mais.

Im Hinblick auf den Indikator dieser Analyse (der Flächenanteil der jetzigen Anbaufläche, der von zurückgehenden potentiellen Erträgen betroffen ist) muß angemerkt werden, daß ein wichtiger Faktor bei den Landnutzungsberechnungen des IMAGE Modells, nämlich die Degradation landwirtschaftlicher Flächen noch nicht berücksichtigt ist. Es ist natürlich sehr wichtig, den Rückgang landwirtschaftlicher Produktivität durch Übernutzung und Mismanagement einzubeziehen. Allerdings wird im Modell schon die jetzige durch Bodendegradation hervorgerufene niedrige Produktivität in einigen Regionen der Welt (wie z.B. der Sahel Zone in Afrika) berücksichtigt. Durch diese Auslassung wird die Fläche mit Produktivitätsverlusten wahrscheinlich unterschätzt.

Gefährdung der potentiellen natürlichen Vegetation

Um die Gefährdung der potentiellen natürlichen Vegetation durch einen Klimawandel abzuschätzen, präsentieren wir die Fläche, auf der das Vorkommen der gegenwärtigen potentiellen Vegetation durch einen Klimawandel gefährdet sein würde. Dabei unterscheiden wir zwischen Auswirkungen auf Naturreservate und Auswirkungen auf sonstige Flächen mit natürlicher Vegetation, um zu berücksichtigen, daß Naturreservate für den expliziten Zweck eingerichtet wurden, die natürliche Vegetation dieser Fläche zu erhalten (Für eine Beschreibung und Diskussion des Indikators siehe Kapitel 5.1).

Wie in Abbildung 25 und Abbildung 26 zu sehen ist, ist der zeitliche Verlauf der Auswirkungen auf beide Arten von Vegetation sehr ähnlich. Neben der Veränderung des Niederschlags hat die hohe Geschwindigkeit der Temperaturzunahme zwischen 1990 und 2030 (größer als 0.15°C pro Dekade) eine schnelle Ausdehnung der Flächen zur Folge, auf denen die jetzige potentielle Vegetation gefährdet ist. Für die zwei Stabilisierungsszenarien verlangsamt sich die Zunahme dieser Fläche nach 2030, ist aber im Jahr 2100 noch nicht zum Stillstand gekommen.

Sogar für das 450 ppm Szenario werden im Jahr 2100 auf 23% der globalen Fläche die jetzige potentielle natürliche Vegetation gefährdet sein. Das 550 ppm Szenario führt zu

einer Gefährdung auf 28% der Fläche und beim Kyoto Szenario besteht sogar auf 39% der Flächen ein Risiko für die heutige potentielle natürliche Vegetation.

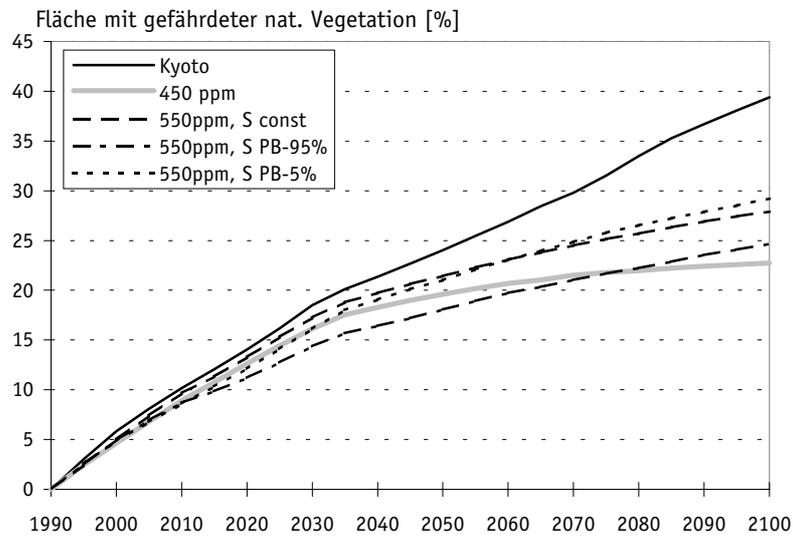


Abbildung 25: Anteil der Fläche auf der die potentielle natürliche Vegetation von 1990 gefährdet ist.

Das globale Bild für die Klimaauswirkungen auf Naturreservate ähnelt dem Bild für den Rest der natürlichen Vegetation: Für das Kyoto Szenario steigt der Anteil der gefährdeten Flächen bis zum Jahr 2100 fast linear auf 39% an (Abbildung 26). Ein kleiner Unterschied besteht nur für die Stabilisierungsszenarien, bei denen einem starken Anstieg der Fläche bis 2030 ein etwas langsamerer Anstieg in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts folgt. Das Auswirkungsniveau bleibt aber nur geringfügig niedriger und erreicht für das 550 ppm Szenario 23% der jetzigen Fläche. Für das 450 ppm Szenario besteht im Jahr 2100 immer noch auf 21% der Fläche der heutigen Naturreservate eine Gefährdung für die Vegetation.

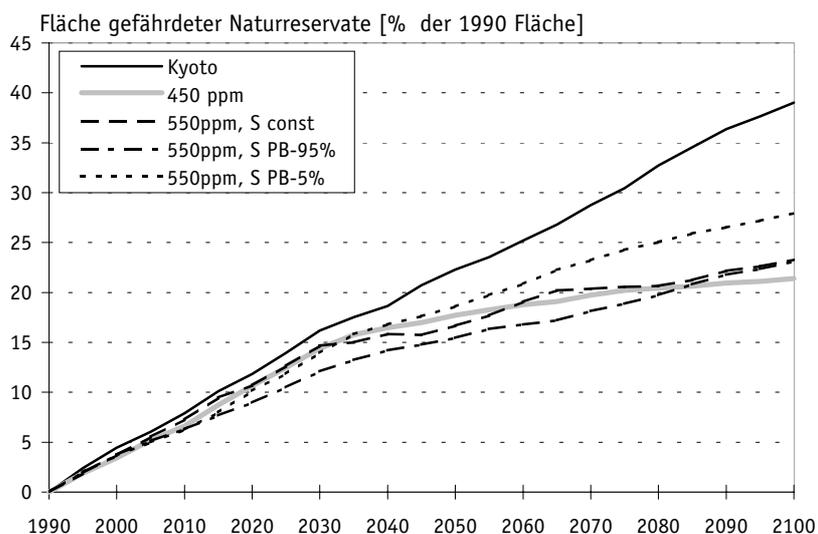


Abbildung 26: Anteil der Fläche von Naturreservaten auf der die potentielle natürliche Vegetation gefährdet ist.

Unsere Annahmen über zukünftige SO₂ Emissionen beeinflussen insbesondere die Flächen der vom Klimawandel betroffenen Naturreservate. Für das 550 ppm Szenario mit dem "PB-5% SO₂" Szenario im Hintergrund steigt die betroffene Fläche auf 28% der jetzigen Fläche, im Vergleich zu 23% der Fläche für das 550 ppm Szenario mit konstanten Emissionen. Die höheren Schwefelemissionen des "PB-95% SO₂" Szenarios reduzieren die Klimaauswirkungen zwischen 2020 und 2080, haben aber im Jahr 2100 keine nennenswerten Auswirkungen mehr. Dieser kompensierende Effekt der SO₂ Emissionen auf Naturreservate ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß die größten Flächen mit Naturreservate in Regionen liegen, die erst spät mit SO₂ Reduktionsmaßnahmen beginnen (wie z.B. Afrika und Latein Amerika), d.h. wo die SO₂ Emissionen etwa bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts ansteigen und damit die Klimaauswirkungen auf Naturreservate abschwächen. Allerdings werden mit hoher Wahrscheinlichkeit die Ökosystembelastungen, die durch hohe SO₂ Emissionen verursacht werden, die klimastabilisierende Wirkung der SO₂ Emissionen kompensieren.

5.2.2 Regionale Auswirkungen

Änderung der landwirtschaftlichen potentiellen Produktivität

Die regionalen Auswirkungen des Klimawandels auf die potentielle landwirtschaftliche Produktivität im Jahr 2100 sind signifikant anders als die Auswirkungen auf globaler Ebene. Nur wenige Regionen zeigen ein Auswirkungsniveau, das vergleichbar mit den globalen Auswirkungen wäre. Im Gegenteil, der Anteil der von einem Rückgang der potentiellen Erträge betroffenen Flächen variiert sehr stark zwischen den einzelnen Regionen (siehe *Tabelle 5*). So werden für nicht-tropisches Getreide beim 550 ppm Szenario in den einzelnen Regionen zwischen 0% und 74%, für tropisches Getreide zwischen 0% und 85% und für Mais sogar zwischen 0% und 99% der jetzigen Anbauflächen im Jahr 2100 von zurückgehenden Erträgen betroffen sein. D.h. es gibt Regionen, deren Agrarflächen nur sehr geringe oder gar keine negativen Auswirkungen vom globalen Klimawandel zu erwarten haben, wie z.B. Osteuropa oder die ehemalige Sowjetunion. Auf der anderen Seite könnten in Regionen wie z.B. Kanada oder den USA auf sehr großen Flächen ein Rückgang der Erträge bei wichtigen Getreideklassen auftreten. Hier können im 550 ppm Szenario bis zum Jahr 2100 auf 74% (Kanada) und 49% (USA) der Fläche klimabedingt zurückgehende potentielle Erträge für nicht-tropisches Getreide zu erwarten sein. Diese Flächenanteile liegen interessanterweise für das Kyoto Szenario niedriger, nämlich bei 60% für Kanada und 45% für die USA. Dieses Resultat ist mit einer Erhöhung der Wassernutzungseffizienz der Pflanzen bei steigender atmosphärischer CO₂ Konzentration zu erklären. Das für diese Analyse zur Skalierung genutzte Klimamodell des MPI berechnet für Teile Nordamerikas, neben einem Anstieg der Temperatur auch einen starken Rückgang der Niederschläge. Beim Kyoto Szenario mit seiner hohen atmosphärischen CO₂ Konzentration wird dieser Rückgang jedoch durch eine erhöhte Wassernutzungseffizienz der Pflanzen wieder kompensiert. Ist in einer Region der Rückgang der Erträge eher auf eine Steigerung der Temperatur zurückzuführen, als auf eine Verringerung der Niederschläge, so kommt dieser Effekt

nicht so sehr zum Tragen und die Auswirkungen beim Kyoto Szenario sind höher als beim 550 ppm Szenario, wie es bei den meisten der beschriebenen Regionen der Fall ist.

Die für diese Analyse ausgewählten drei Getreideklassen werden insgesamt auf mindestens 50% der landwirtschaftlichen Anbauflächen einer Region angebaut. In Tabelle 5 sind die Getreideklassen, die auf mindestens 20% der regionalen Agrarflächen angebaut werden und bei denen das Auswirkungsniveau oberhalb des globalen Durchschnitts liegt, hervorgehoben. So läßt sich feststellen, welche Regionen überdurchschnittlich starke Auswirkungen auf ihre wichtigsten Getreideklassen zu tolerieren haben. Dies sind beim 550 ppm Szenario neben Kanada und den USA die Regionen Indien & Südasien sowie Ozeanien. D.h. nach unseren Berechnungen werden, trotz einer Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen, Industrieregionen und Entwicklungsregionen gleichermaßen von zurückgehenden potentiellen Erträgen in der Landwirtschaft betroffen sein.

Tabelle 5: Regionale Auswirkungen des Klimawandels auf die potentiellen Erträge von Getreide der gemäßigten Zonen (nicht-tropisches Getreide), tropisches Getreide und Mais. Gezeigt wird der Anteil der jetzigen Fläche, die 2100 von sinkenden potentiellen Erträgen betroffen ist. Es werden die Resultate für das Kyoto Szenario sowie das 550 ppm Szenario, jeweils mit konstanten SO₂ Emissionen gezeigt. Fett gedruckte Werte kennzeichnen das Auswirkungsniveau von Getreidesorten, die (1) auf 20% und mehr der Flächen angebaut werden und (2) deren betroffener Flächenanteil über dem globalen Durchschnitt liegen.

IMAGE Region	Kyoto Szenario 2100, % der 1990 Fläche			550 ppm (SO ₂ konst.) 2100, % der 1990 Fläche		
	Nicht-trop. Getreide	Mais	Tropisches Getreide	Nicht-trop. Getreide	Mais	Tropisches Getreide
Kanada	60	85	-	74	99	0
USA	45	75	54	49	57	52
Latein Amerika	17	7	2	10	6	3
Afrika	42	12	10	32	9	8
OECD Europa	22	71	93	14	55	85
Osteuropa	8	1	0	5	1	0
CIS	5	0	0	1	0	0
Mittlerer Osten	3	35	16	0	32	17
Indien & S. Asien	62	2	0	57	2	0
China & CP Asien	3	41	23	1	33	31
Ostasien*	0	2	0	0	2	0
Ozeanien	29	9	17	28	7	14
Japan*	0	100	100	0	17	34
Welt	22	31	11	20	25	11

* Für diese Regionen ist die Summe der Flächen mit den drei ausgewählten Getreideklassen kleiner als 50% der gesamten landwirtschaftlichen Flächen, da Reis nicht mit in die Analyse einbezogen wurde.

Eine Veränderung des Klimas kann, wie gezeigt, auf einigen Flächen zu einem Rückgang der potentiellen Produktivität führen. Auf anderen Flächen kann allerdings durch Verbesserung der Klimabedingungen (z.B. höhere Niederschläge) oder durch den CO₂ Düngeeff-

fekt eine Erhöhung der Produktivität eintreten. Sogar in den USA mit ihren großen Flächen mit zurückgehenden Erträgen für nicht-tropisches Getreide sind im Jahr 2100 Flächen mit Produktivitätszunahmen zu erwarten (siehe Abbildung 1-A im Anhang). Allerdings ereignen sich diese Produktivitätszunahmen mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung. Während sich die Flächen mit abnehmenden Erträgen vor 2030 stark ausbreiten, setzt eine Ausbreitung der Flächen mit zunehmenden Erträgen erst 2010 oder später ein (hier nicht abgebildet). D.h. die Ertragsrückgänge in einem Teil einer Region können nicht unbedingt durch einen Anstieg der Erträge in einem anderen Teil dieser Region kompensiert werden, da diese beiden Ereignisse nicht zeitgleich auftreten.

Gefährdung der potentiellen natürlichen Vegetation

Um die regionalen Auswirkungen des Klimawandels auf die potentielle natürliche Vegetation zu untersuchen, unterscheiden wir, wie auch auf globaler Ebene, zwischen einer Gefährdung der potentiellen Vegetation in Naturreservaten und der potentiellen natürlichen Vegetation auf anderen Flächen. Es werden die Auswirkungen von drei Szenarien untersucht. Dies sind die zwei Stabilisierungsszenarien für 450 ppm und 550 ppm CO₂ in der Atmosphäre sowie das Kyoto Referenzszenario. Wie aus Tabelle 6 deutlich wird, variieren die gefährdeten Flächenanteile von Region zu Region sehr stark. Für das 550 ppm Szenario sind in Ostasien 10% der Flächen mit Naturreservaten gefährdet, wohingegen in Kanada fast die Hälfte der Naturreservate, nämlich 40%, gefährdet sind. Damit ist die regionale Variabilität der Auswirkungen auf die natürliche Vegetation mit der der Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktivität vergleichbar. Aber im Gegensatz zu den Konsequenzen für die landwirtschaftliche potentielle Produktivität ist der Unterschied zwischen den Szenarien sehr viel ausgeprägter. Wie erwartet ist dieser Effekt zwischen dem Kyoto Szenario und den zwei Stabilisierungsszenarien am stärksten ausgeprägt. In China & CPA könnte das Kyoto Szenario zu einer Gefährdung von 58% der Flächen mit Naturreservaten führen. Eine Stabilisierung der CO₂ Konzentration bei 550 ppm führt dazu, daß der betroffene Flächenanteil auf 34% absinkt. Das ist immer noch eine beachtliche Fläche, aber es macht deutlich, das die natürliche Vegetation, sowohl in Naturreservaten als auch auf anderen Flächen, sehr empfindlich auf Klimaänderungen reagiert, die als global gemittelter Wert niedrig erscheinen. Der Unterschied zwischen dem Kyoto Szenario und dem 550 ppm Szenario in der globalen mittleren Temperaturänderung beträgt im Jahr 2100 nur 1°C, aber dieser gering erscheinende Temperaturunterschied kann in einigen Regionen bis hin zu einer Halbierung des Auswirkungsniveaus führen. So werden z.B. für das Kyoto Szenario in Ostasien 22% der jetzigen Fläche mit Naturreservaten durch eine Klimaänderung bedroht sein, während für das 550 ppm Szenario nur 10% der Fläche betroffen sein werden.

Tabelle 6: Regionale Auswirkungen des Klimawandels auf die potentielle natürliche Vegetation (Naturreservate und andere natürliche Vegetation) als Anteil der Fläche, auf der die heutige potentielle natürliche Vegetation gefährdet ist. Es werden die Resultate für das 550 ppm und das 450 ppm Stabilisierungsszenario sowie das Kyoto Referenzszenario mit konstanten SO₂ Emissionen präsentiert. Fett gedruckte Werte zeigen Auswirkungsniveaus über dem globalen Durchschnitt an.

IMAGE Region	Kyoto Szenario		550 ppm		450 ppm	
	Nat. Reserv. 2100, [%]	Nat Veget. 2100, [%]	Nat. Reserv. 2100, [%]	Nat. Veget. 2100, [%]	Nat. Reserv. 2100, [%]	Nat Veget. 2100, [%]
Kanada	48	41	40	33	42	30
USA	54	53	32	35	26	29
Latein Amerika	40	40	30	29	28	23
Afrika	29	24	13	17	13	13
OECD Europa	66	47	42	35	39	29
Osteuropa	58	41	43	32	36	29
CIS	49	41	32	30	27	25
Mittlerer Osten	39	47	27	31	26	24
Indien & S. Asien	48	46	28	28	24	21
China & CPAsien	58	61	34	43	30	36
Ostasien	22	15	10	8	6	4
Ozeanien	34	33	21	22	17	18
Japan	40	30	21	17	20	10
Welt	39	39	23	28	21	23

Wie aus *Tabelle 6* deutlich wird sind die Auswirkungen des Klimawandels auf Naturreservate vergleichbar oder sogar höher als für den Rest der potentiellen natürlichen Vegetation. Das ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß Naturreservate oft auf isolierten kleineren Flächen ausgewiesen sind, die umgeben sind von anders genutzten Gebieten, wie z.B. landwirtschaftlichen Flächen. Dies erhöht die Anfälligkeit von Naturreservaten gegenüber einer Klimaänderung, da die Einwanderung neuer Vegetationsformen und damit die Anpassung an neue Klimabedingungen stark erschwert wird (Leemans und Hootsmans, 1998).

Das IMAGE Modell ist in der Lage die Umwandlung von einem natürlichen Vegetationstyp in einen anderen zu berechnen, indem für jede Rasterzelle eine potentielle Migrationszone in Abhängigkeit von einer vegetationsspezifischen Migrationsentfernung und -geschwindigkeit berücksichtigt wird (Van Minnen *et al.*, 2000). D.h., ob die potentielle natürliche Vegetation einer Fläche sich an einen Klimawandel anpassen kann, oder nicht, hängt in erster Linie davon ab, ob sich die Rasterzelle, in der eine Umwandlung der Vegetation geschehen muß, sich innerhalb der Migrationszone einer neuen Vegetationsklasse befindet, der den nicht an den Klimawandel angepassten Vegetationstyp ersetzen kann. Auf diese Art und Weise wird der wichtige Einfluß von Adaptationsprozessen in natürlichen Ökosystemen auf die globalen Kohlenstoffflüsse berücksichtigt (siehe z.B. Solomon, 1997). Aus Abbildung 2-A (siehe Anhang) wird ersichtlich, daß auch wenn sich die atmosphärische CO₂ Konzentration langfristig bei 550 ppm stabilisiert, viele Flächen mit natür-

licher Vegetation nicht in der Lage sein werden, sich durch Etablierung neuer Vegetationstypen an die veränderten klimatischen Bedingungen anzupassen. Dies ist insbesondere für große Flächen in Nordeuropa und Skandinavien, aber auch für einige Gegenden in der ehemaligen Sowjetunion und China der Fall.

Änderung der Wasserverfügbarkeit

Von der großen Anzahl von Wassereinzugsgebieten, die vom WaterGAP Modell simuliert werden, wurden fünf ausgewählt, um einen ersten Überblick über den Einfluß verschiedener Stabilisierungsziele auf die zukünftige Wasserverfügbarkeit zu geben. Dies sind die Einzugsgebiete des Zambezi und des Senegal in Afrika, des Murray Darling in Australien sowie des Rheins und des Guadalquivir in West Europa. Die Ergebnisse für eine weitere Anzahl von Einzugsgebieten ist in Tabelle 1-A (siehe Anhang) aufgeführt. Wie in Abbildung 27 zu sehen ist, kann der durch die Stabilisierungsszenarien zu erwartende Klimawandel zu einer Erhöhung des jährlichen Abflusses und damit der Wasserverfügbarkeit führen, da für einige Regionen der Welt eine Zunahme des Niederschlags zu erwarten ist. Dieses Ergebnis wurde für den Zambezi gefunden, bei dem der Klimawandel bis zum Jahr 2100 zu einer Erhöhung des Abflusses von 22% für das 450 ppm Szenario und 29% für das 550 ppm Szenario führt. In vielen Regionen der Welt führt die Änderung des Klimas jedoch durch abnehmende Niederschläge zu einem Rückgang des Abflusses. Dies ist z.B. der Fall für den Senegal, bei dem ein Rückgang des Abflusses um 32% für das 450 ppm Szenario und um 37% für das 550 ppm Szenario zu einem zunehmenden Druck auf die Wasserressourcen führen kann, da für dieses Wassereinzugsgebiet der Abfluss im Jahr 1990 schon sehr gering ist. Ist die Klimaänderung stärker ausgeprägt, wie dies beim Kyoto Szenario der Fall ist, so wird die steigende bzw. fallende Tendenz beim Abfluss verstärkt. Für den Guadalquivir wurden für das 450 ppm Stabilisierungsszenario ein Abflussrückgang von 62% berechnet, für das Kyoto Szenario verstärkt sich dieser Rückgang sogar auf 73%.

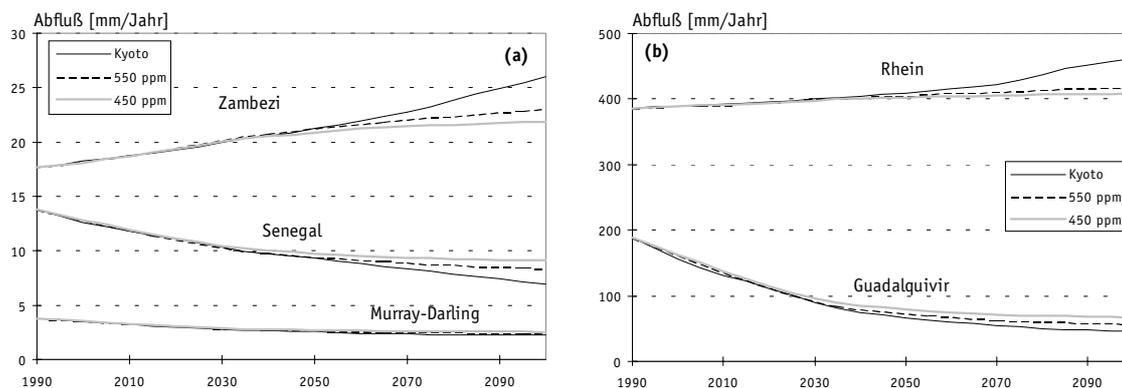


Abbildung 27: Mittlerer jährlicher Abfluss zwischen 1990 und 2100 (a) des Zambezi und Senegal in Afrika und des Murray Darling in Australien und (b) des Rheins und des Guadalquivir in West Europa.

5.3 Zusammenfassung

Indikatoren für Klimaänderung

Um ein möglichst umfassendes Bild der möglichen Auswirkungen der Stabilisierungsziele von 550 und 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre, im Vergleich zu einem Referenzszenario, zu bekommen, wurden fünf Auswirkungskategorien untersucht.

1. Die *Änderung der globalen Mitteltemperatur* ist eine direkte Reaktion auf die Akkumulation von Treibhausgasen in der Atmosphäre und wird oft als Indikator für die Formulierung von Klimaschutzziele verwendet.
2. Der *Anstieg des Meeresspiegels* stellt einen indirekten Indikator für den Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen dar und resultiert aus ansteigenden Meerestemperaturen und dem Abschmelzen von Inlandgletschern. Insbesondere Länder mit flachen Küstenregionen und kleine Inselstaaten können durch einen Meeresspiegelanstieg irreversibel gefährdet werden.
3. Die *Änderung der potentiellen Ernteerträge* ist ein indirekter Indikator für die möglichen Auswirkungen von Klimaänderung auf regionale und globale Agrarsysteme.
4. Die *Änderung der potentiellen natürlichen Vegetation* spiegelt die Auswirkungen einer Klimaänderung auf natürliche Ökosysteme wider.
5. Die *Änderung der Wasserverfügbarkeit* könnte insbesondere die Wasserversorgung in der Landwirtschaft aber auch im industriellen Sektor betreffen.

Änderung der Temperatur

Für das 550 ppm Stabilisierungsszenario wurde eine mittlere globale Temperaturänderung von 1.7°C zwischen 1990 und 2100 berechnet. Dies entspricht einem Temperaturanstieg von ca. 2.2°C im Vergleich zu vorindustriellen Zeiten. Auch ein strengeres Stabilisierungsziel von 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre führt noch zu einem Temperaturanstieg von 1.7°C im Vergleich zu vorindustriellen Zeiten.

Für beide Stabilisierungsszenarien steigt die mittlere globale Temperatur zwischen 1990 und 2030 sehr schnell an. Bis zur Hälfte des 21. Jahrhunderts wird eine Änderungsrate von 0.1°C pro Dekade bei beiden Szenarien überschritten. Diese Rate wird oft als eine obere Grenze vorgeschlagen, bei der sich natürliche Ökosysteme noch an eine Klimaänderung anpassen könnten (Rijsberman and Swart, 1990). Nur für das 450 ppm Szenario wird dieser Wert in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts unterschritten.

Anstieg des Meeresspiegels

Für das 450 ppm und 550 ppm Szenario kann zwischen 1990 und 2100 mit einem Meeresspiegelanstieg von 29 bzw. 33 cm gerechnet werden. Obwohl sich die Temperaturänderung gegen Ende des 21. Jahrhunderts verlangsamt, ist für den Anstieg des Meeresspiegels in diesem Zeitraum eher eine Beschleunigung zu erwarten, da die Ozeane mit einer zeitlichen Verzögerung auf die Erwärmung der Atmosphäre reagieren. So wurde für den Zeitraum zwischen 2100 und 2500 eine weitere Verdreifachung des Meeresspiegelanstiegs für das 450 ppm Szenario bzw. Vervierfachung für das 550 ppm Szenario berechnet.

Änderung der potentiellen landwirtschaftlichen Produktivität

Als Indikator für das Risiko, das eine Klimaänderung für die regionale und globale Nahrungsmittelversorgung darstellen könnte, nutzen wir den Prozentsatz der jetzigen Agrarflächen, die von einem Rückgang der potentiellen Ernteerträge betroffen sind. Bei der Berechnung der potentiellen Ernteerträge werden die Auswirkungen einer veränderten Temperatur und veränderter Niederschläge sowie der sogenannte CO₂ Düngeeffekt berücksichtigt. Eine mögliche Anpassung der Agrarsysteme an die Klimaänderung wird dagegen außer Acht gelassen.

Das Hauptergebnis dieser Analyse ist, daß die Erträge aller untersuchten Getreideklassen (Getreide der gemäßigten Zonen, tropische Getreidesorten und Mais) merklich von einer Klimaänderung betroffen sein werden. Für das 550 ppm Szenario und die Getreidesorten der gemäßigten Zonen werden im Jahr 2030 15% der jetzigen globalen Anbaufläche von zurückgehenden potentiellen Erträgen betroffen sein. Für tropisches Getreide und Mais erhalten wir ein ähnliches Muster: Im Jahr 2100 werden 11% bzw. 25% der jetzigen globalen Fläche zurückgehende potentielle Erträge aufweisen und mehr als die Hälfte dieser im Jahr 2100 betroffenen Flächen werden schon 2030 betroffen sein. Die Flächenanteile des 450 ppm Szenarios liegen nur 2% bis 5% unter denen des 550 ppm Szenarios.

Auf regionale Ebene variieren die von zurückgehenden Erträgen betroffenen Flächenanteile sehr stark. Die größten Auswirkungen werden für Kanada, die USA und Indien berechnet, während Osteuropa und die Region der ehemaligen Sowjetunion nur geringe Flächenanteile mit potentiellen Ertragseinbußen zu erwarten haben. Dies trifft sowohl für beide Stabilisierungsszenarien, als auch für alle drei Getreideklassen zu. Aufgrund der starken regionalen Variabilität der Auswirkungen ist es sehr viel angemessener bei der Analyse unterschiedlicher Stabilisierungsszenarien die regionalen statt der globalen Auswirkungen zu untersuchen. Allerdings sollten dann, aufgrund der großen Unsicherheiten bei der Berechnung von Niederschlagsänderungen durch Klimawandel, die Resultate mehrerer Klimamodelle herangezogen werden.

Gefährdung der potentiellen natürlichen Vegetation

Auch wenn Klimaschutzmaßnahmen langfristig zu einer Stabilisierung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration führen, könnten beträchtliche Flächen mit potentieller natürlicher Vegetation nicht in der Lage sein, sich an den Klimawandel anzupassen. Für das 550 ppm Stabilisierungsszenario wurde berechnet, daß bis zum Jahr 2100 auf 28% der globalen Fläche die jetzige potentielle natürliche Vegetation gefährdet sein könnte. Eine Stabilisierung der CO₂ Konzentration bei 450 ppm könnte immer noch auf 23% der Fläche zu einem Risiko für die natürliche Vegetation führen. Von der jetzigen Fläche der Naturreserve könnten für das 550 ppm Szenario 23% und für das 450 ppm Szenario 21% im Jahr 2100 gefährdet sein.

Wasserverfügbarkeit

Dieser ersten Untersuchung der Einflüsse von Klimawandel auf die Wasserverfügbarkeit zufolge, kann der mit den zwei untersuchten Stabilisierungsszenarien einhergehende Klimawandel sowohl zu einer Erhöhung als auch zu einer Absenkung der Wasserverfügbar-

keit führen. Im Einzugsgebiet des Guadalquivir in Spanien wurde unter einem veränderten Klima ein Rückgang der Wasserverfügbarkeit, d.h. ein zusätzlicher Druck auf die ohnehin knappen Wasserressourcen, berechnet. Für andere Wassereinzugsgebiete wie z.B. den Zambezi in Afrika und den Rhein in Westeuropa wurde dagegen für beide Stabilisierungsszenarien eine Zunahme der Wasserverfügbarkeit ermittelt.

6. Langfristiger Klimaschutz und kurzfristige Emissionsziele: Der "Safe Landing" Ansatz

Der "Safe Landing" Ansatz wurde eingesetzt, um einen der Nachteile des Ansatzes zu überwinden, der in den vorherigen Kapiteln beschrieben wurde: Ein einzelner CO₂ Stabilisierungspfad wurde für jedes Stabilisierungsziel vorgeschrieben und folglich gab es auch nur einen möglichen Emissionspfad, um die notwendigen Reduktionsmaßnahmen zu untersuchen. Die Entwicklung des "Safe Landing" Ansatzes war das direkte Resultat einer Reihe von Science-Policy Workshops, gehalten in Delft (Niederlande) (van Daalen *et al.*, 1998), um politische Entscheidungsträger bei der Vorbereitung auf den Klimagipfel in Kyoto zu unterstützen. Der Hauptzweck dieses Ansatzes ist es, die Kluft zwischen kurzfristigen politischen Entscheidungen auf der einen Seite und dem langfristigen Blick, der für die Entwicklung von Klimaschutzstrategien notwendig ist, zu überbrücken. Dies wird umgesetzt, indem Emissionskorridore für den Zeitraum 1990-2010 berechnet werden, die das Erreichen eines Klimaziels im Jahr 2100 möglich machen.

Nach einer Beschreibung des Ansatzes werden wir ihn auf die langfristigen Vorschläge zum Klimaschutz (im Folgenden kurz Klimaziele genannt), die die AOSIS Staaten und die EU im Rahmen der Klimaverhandlungen zur Diskussion gestellt haben, anwenden. Abschließend folgt eine Untersuchung inwiefern die in Kyoto vereinbarten Reduktionsmaßnahmen mit diesen Klimazielen in Einklang zu bringen sind.

6.1 Hintergrund des "Safe Landing" Ansatzes

Das Konzept der "Safe Emission Corridors" wurde während einer Reihe internationaler Workshops zwischen 1995 und 1997 entwickelt, die darauf abzielten einen Dialog zwischen Modellierungsexperten und politischen Entscheidungsträgern der Klimaverhandlungen zu fördern (Alcamo *et al.*, 1996b und van Daalen *et al.*, 1997). "Safe Emission Corridors" (im Folgenden Emissionskorridore genannt) sind die Spanne der erlaubten Emissionen über die Zeit, die mit kurz- und langfristigen Klimazielen übereinstimmen. Der Term Emissionskorridor stammt aus einer Analogie mit der Luftfahrt: Um ein Flugzeug sicher zu landen muß es sich der Landebahn so nähern, daß es nicht zu früh auftrifft, weil es zu schnell aufsetzt, aber auch nicht verunglückt, weil es zu spät aufsetzt. Um sicher zu landen sollte es innerhalb eines sogenannten Sicherheitskorridors bleiben, der es zur Landebahn geleitet. Im Kontext Klimaschutz sollten zukünftige Emissionspfade so aussehen, daß sie weder eine sozioökonomische Entwicklung unterbrechen, indem Emissionen zu schnell oder zu früh reduziert werden, noch zu ernsthaften Klimaschäden führen, weil Emissionen zu langsam oder zu spät reduziert werden. Als Konsequenz sollten, wie beim Flugzeug, die kurzfristigen Emissionen innerhalb eines Korridors, nämlich des sogenannten "Safe Emission Corridors", bleiben.

Die Berechnung des Emissionskorridors erfordert Resultate eines globalen Klimamodells, mit dem eine große Anzahl von Simulationsläufen durchgeführt werden können. D.h. es ist günstig, ein Modell mit relativ kurzen Rechenzeiten zu verwenden. Die ersten Emissionskorridore wurden mit dem IMAGE 2 Modell berechnet, aber inzwischen werden auch

andere Modelle für diesen Zweck eingesetzt (siehe z.B. Matsuoka *et al.*, 1998). Auch ein erster Modellvergleich hat inzwischen stattgefunden (Alcamo, 1997). Für diesen Bericht wurde das IMAGE Modell genutzt, um die Emissionskorridore zu erzeugen.

Die Ergebnisse des globalen Modells werden so eingesetzt, dass unterschiedliche langfristige Klimaschutzziele ausgewählt werden können und anschließend eine automatische Berechnung der Emissionskorridore erfolgt. Eine Beschreibung dieser Berechnung ist in Anhang 1 zu finden. Weitere Anwendungen des Ansatzes sind in Alcamo und Kreileman (1996a) sowie in Swart *et al.* (1998) beschrieben. Der "Safe Landing" Ansatz wurde in Form einer interaktiven Software automatisiert; für diesen Bericht wurde Version 3 des Programms benutzt (Kreileman und Berk, 1997).

In der jetzigen Version werden die Korridore berechnet, nachdem Beschränkungen für vier unterschiedliche Indikatoren gesetzt wurden:

1. Absolute Änderung der globalen Jahresmitteltemperatur in °C (1990-2100).
2. Rate des globalen Temperaturanstiegs in °C pro Dekade (sowie die Anzahl der Dekaden, die diese Beschränkung überschritten werden darf).
3. Kumulativer Anstieg des Meeresspiegels in cm (1990-2100).
4. Rate der maximalen globalen Emissionsminderung in % pro Jahr.

Diese Indikatoren stehen in enger Beziehung zu den Zielen und Bedingungen, wie sie in der Zielsetzung der Klimarahmenkonvention festgelegt sind. Die schnelle Software ermöglicht es politischen Entscheidungsträgern, interaktiv eigene Klimaziele zu definieren und deren Konsequenzen für die kurzfristig erlaubten Emissionen zu untersuchen.

Für jeden Satz von Indikatorwerten wird ein Emissionskorridor für globale Treibhausgasemissionen in CO₂ äquivalenten Emissionen (CO₂, N₂O und CH₄) für ein gewähltes Zieljahr (z.B. 2010 oder 2020) berechnet. Zwischen dem Zieljahr und dem Jahr 2100 existiert dann mindestens ein Emissionspfad, der mit den gesetzten Klimazielen übereinstimmt. Die obere Begrenzung des Korridors steht für die im Zieljahr maximal erlaubten Emissionen, die die gesetzten Klimaziele gerade noch erreichbar machen. Befindet man sich also im Zieljahr nahe an der Oberkante des Korridors, so existieren langfristig nur noch wenige Emissionspfade, die mit den Klimazielen übereinstimmen. Befindet man sich im Zieljahr tiefer im Emissionskorridor, so sind sehr viel mehr zukünftige Pfade erlaubt, um die Klimaziele noch zu erreichen und es ist sogar noch Raum für ein Umschwenken auf strengere Klimaziele, falls neue wissenschaftliche Erkenntnisse dies nahe legen sollten. Die untere Begrenzung des Emissionskorridors wird durch die Begrenzung der Geschwindigkeit der globalen Emissionsreduktionen festgelegt. Um die aus historischen Emissionen resultierende gegenwärtige Geschwindigkeit des Klimawandels zu berücksichtigen, ist es möglich, für die Zeit nach 2000 eine Anzahl von Jahrzehnten festzulegen, in denen die gewählte Rate des Temperaturanstiegs überschritten werden darf.

6.2 Emissionskorridore für den Klimaschutzvorschlag der AOSIS

Der Klimaschutzvorschlag der "Alliance of Small Island States" (AOSIS) setzt eine Begrenzung für den mittleren globalen Anstieg des Meeresspiegels bei 20 cm und für den globalen Temperaturanstieg bei 2°C im Vergleich zur vorindustriellen Temperatur. Dies ist gleichbedeutend mit einem Temperaturanstieg von ca. 1.5°C im Vergleich zur heutigen Temperatur. Um den Emissionskorridor des AOSIS Vorschlags zu berechnen, müssen einige Annahmen für weitere Begrenzungen gemacht werden. Erstens nehmen wir an, daß das Zieljahr für das Erreichen dieser Klimaziele das Jahr 2100 ist. Wie bereits in Kapitel 5.1.2 gezeigt wurde, hat das Zieljahr für den Anstieg des Meeresspiegels weitreichende Konsequenzen. Wir nehmen außerdem an, daß die Rate des Temperaturanstiegs, mit Ausnahme der ersten zwei Jahrzehnte, maximal 0.15°C pro Dekade betragen darf und daß die maximale Geschwindigkeit der globalen Emissionsreduktion bei 2% pro Jahr liegt. Diese Annahmen werden allgemein als mittlere Werte angesehen, obwohl die gewählte Rate der globalen Emissionsreduktion von einigen Experten als Obergrenze angesehen wird (siehe z.B. Swart *et al.*, 1998). Die globalen Schwefelemissionen, die zu einer Kompensation der Klimaerwärmung führen können, werden für diese Analyse nach 1990 konstant gehalten.

Der für diese Annahmen berechnete Emissionskorridor ist in Abbildung 28 zu sehen. Demnach ist für das Jahr 2010 eine Spanne globaler CO₂ äquivalenter Emissionen (CO₂, N₂O und CH₄) von 7.6 bis 9.5 Gt C pro Jahr erlaubt. Da die globalen CO₂-äquivalenten Emissionen im Jahr 1990 bei 9.8 Gt C pro Jahr lagen (Legget *et al.*, 1992) beträgt die erlaubte Spanne der Emissionen im Jahr 2010 78% bis 97% der 1990 Emissionen (Abbildung 28a). Dies ist die kurzfristige Spanne globaler Emissionen, die mit dem langfristigen Klimaziel der AOSIS übereinstimmt, wie es im ersten Absatz dieses Kapitels definiert wurde.

Um die Emissionen der Annex B Länder abzuleiten, wurden die nicht-Annex B Emissionen von den globalen CO₂ äquivalenten Emissionen des Emissionskorridors im Jahr 2010 abgezogen. Wir nehmen für diese Analyse an, daß die nicht-Annex B Emissionen im Jahr 2010 bei 6.3 Gt C-Äquivalenten pro Jahr liegen (mittleres IPCC Szenario IS92a).

Da schon der globale Emissionskorridor für das AOSIS Klimaziel sehr eng ist, wurde auch für die Annex B Emissionen ein sehr enger Korridor berechnet. Dieser reicht von 1.3 bis 3.2 Gt C im Jahr 2010, was gleichbedeutend ist mit 25% bis 60% der 1990 Emissionen (5.3 Gt C pro Jahr).

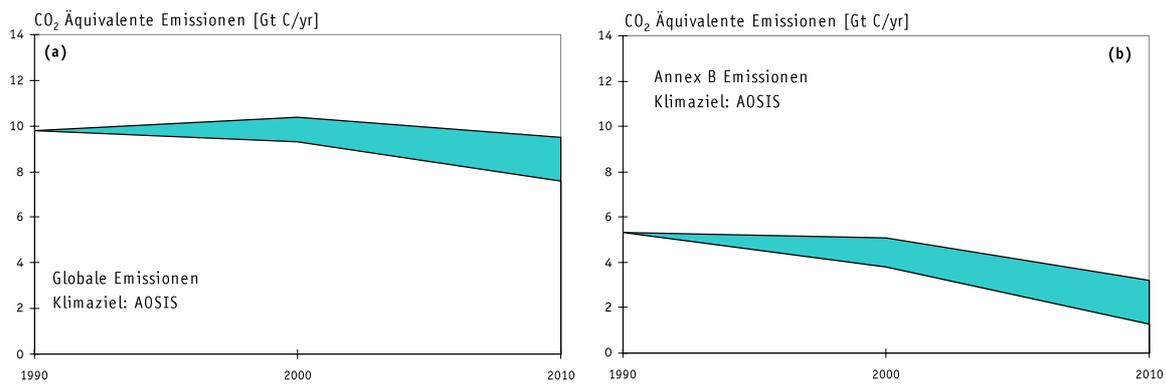


Abbildung 28: Emissionskorridore, die ein Erreichen des AOSIS Klimaziels ermöglichen. (a) globale Emissionen 1990 bis 2010; (b) Annex B Emissionen als Differenz zwischen den globalen Emissionen und unkontrollierten Emissionen von nicht-Annex B (IPCC IS92a Szenario).

6.3 Emissionskorridore für den Klimaschutzvorschlag der EU

Der EU Protokollvorschlag regt an, daß die globale Temperaturänderung langfristig nicht mehr als 2°C über dem vorindustriellen Niveau liegen sollte. Dies entspricht einer Änderung von 1.5°C gegenüber dem jetzigen Temperaturniveau. Um die Emissionskorridore zu berechnen, werden die gleichen Annahmen wie für den AOSIS Vorschlag getroffen: (1) Das Zieljahr für die Klimaänderungen ist 2100, (2) die Geschwindigkeit der Temperaturänderung darf 0.15°C pro Dekade nicht überschreiten und (3) die maximale Geschwindigkeit für globale Emissionsreduktionen ist 2% pro Jahr. Die Begrenzung des Meeresspiegelanstiegs wird im Vergleich zum AOSIS Vorschlag von 20 cm auf 30 cm erhöht. Diese Begrenzung wird angehoben, da die EU nicht explizit eine Begrenzung für den Anstieg des Meeresspiegels benennt und da ein Ziel von 30 cm (unter den sonstigen gegebenen Annahmen) keinen starken Einfluß auf die Weite des Korridors hat. Wie später in der Sensitivitätsanalyse gezeigt wird (siehe Abbildung 31a), läßt nur eine Begrenzung des Meeresspiegelanstiegs auf weniger als 25 cm den Emissionskorridor sehr schmal werden.

Unter den gegebenen Annahmen reicht der globale Korridor für CO₂ äquivalente Emissionen (CO₂, N₂O und CH₄) für das Klimaziel der EU im Jahr 2010 von 7.6 Gt C bis 12.4 Gt C pro Jahr. Dies entspricht 78% bis 127% der 1990 Emissionen (Abbildung 29a). Dies ist eine erheblich weitere Spanne von Emissionen als für den AOSIS Korridor, da für den EU Vorschlag eine höhere Begrenzung für den Anstieg des Meeresspiegels gesetzt wurde (30 cm im Vergleich zu 20 cm für den AOSIS Vorschlag).

Um die Annex B Emissionen zu berechnen, gehen wir auf dieselbe Weise vor wie beim AOSIS Beispiel und nehmen an, daß die nicht-Annex B Emissionen im Jahr 2010 6.3 Gt C-Äquivalente pro Jahr betragen. Der Annex B Emissionskorridor erlaubt dann im Jahr 2010 eine Emissionsspanne von 1.3 Gt C bis 6.1 Gt C pro Jahr oder zwischen 25% und 115% der 1990 Emissionen (5.3 Gt C pro Jahr) mit einem Medianwert bei 3.7 Gt C (70% der 1990 Emissionen) (Abbildung 29b).

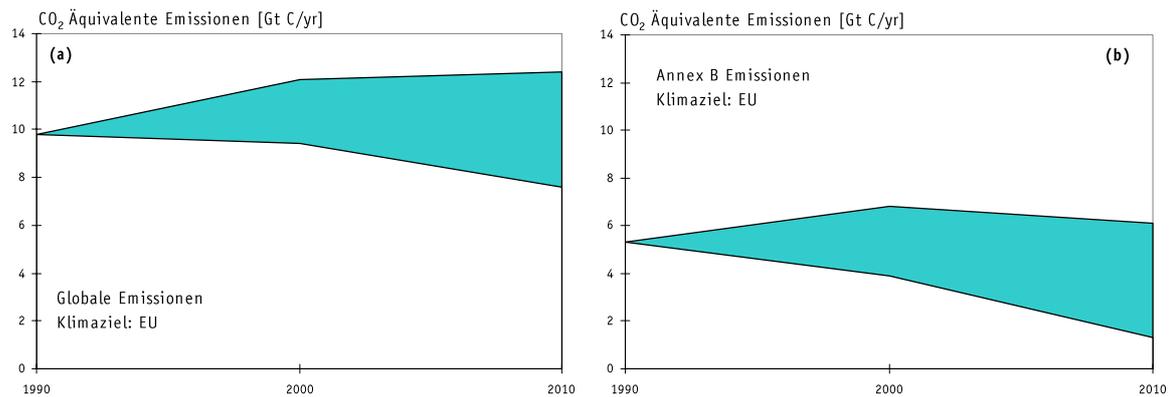


Abbildung 29: Emissionskorridore, um das Klimaziel der EU zu erreichen. (a) Globale Emissionen von 1990 - 2010; (b) Annex B Emissionen berechnet aus der Differenz zwischen den globalen Emissionen aus (a) und den unverminderten Emissionen der nicht-Annex B Staaten (mittleres IPCC Szenario IS92a).

6.4 Langfristige Klimaziele und das Protokoll von Kyoto

Um die Konsequenzen der Reduktionsvereinbarungen des Kyoto Protokolls zu untersuchen, wurde versucht, einen globalen Emissionspfad, der aus dem Kyoto Protokoll resultiert, in die Korridore für die Klimaschutzvorschläge der EU oder der AOSIS Staaten einzupassen. Außerdem wurde die Analyse auf die Zeit nach der ersten Verpflichtungsperiode ausgedehnt und ein Emissionskorridor für die Zeit von 2010 bis 2030 berechnet (rechte Seite Abbildung 30), der durch die gleichen Begrenzungen (Klimaziele) wie der Korridor zwischen 1990 und 2010 definiert wird.

Unter der Annahme, daß die Annex B Staaten ihre CO₂ äquivalenten Emissionen im Vergleich zu 1990 um 5,2% absenken und die Emissionen der nicht-Annex B Staaten gemäß dem mittleren IPCC IS92a Szenario auf 6,3 Gt C-Äquivalente im Jahr 2010 ansteigen, erreichen die globalen Emissionen 2010 einen Wert von 11,3 Gt C pro Jahr (linke Seite Abbildung 30). Dieser Wert liegt oberhalb des Emissionskorridors, der die Klimaziele der AOSIS erreichbar macht (maximal 9,5 Gt C im Jahr 2010), aber noch innerhalb des Korridors für die Klimaziele der EU. D.h. auch der zweite Emissionskorridor (2010 bis 2030) wird durch die Klimaschutzziele der EU definiert. Um innerhalb dieses Korridors zu bleiben, müssen die globalen Treibhausgasemissionen nach 2010 reduziert werden. Der zweite Korridor erlaubt im Jahr 2030 Emissionen zwischen 7,5 und 10,4 Gt C pro Jahr. Dies entspricht 92% der Emissionen von 2010, um die obere Begrenzung des Korridors zu erreichen oder 66% der Emissionen von 2010, um die untere Begrenzung des Korridors zu erreichen und langfristig noch Spielraum für weitere Emissionspfade zu haben und gleichzeitig die Klimaschutzvorstellungen der EU umzusetzen.

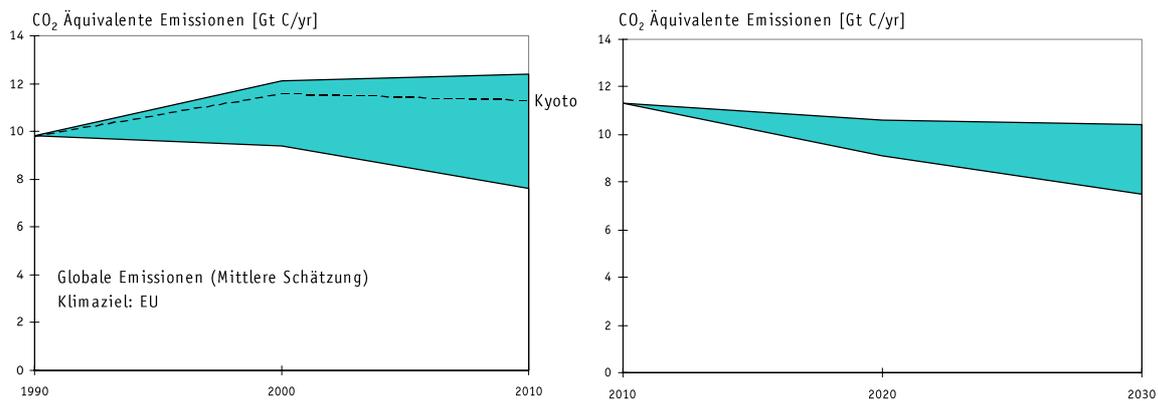


Abbildung 30: Emissionskorridore zwischen 1990 und 2010 und Fortsetzung von 2010 bis 2030. Die linke Seite der Abbildung zeigt den Emissionskorridor für die EU Klimaziele. Darüber gelegt sind die globalen Emissionen, die aus dem Kyoto Protokoll resultieren, wenn für die Nicht-Annex B Länder ein mittleres Emissionsszenario (IPCC IS92a) angenommen wird. Der Emissionskorridor auf der rechten Seite der Abbildung (ebenfalls definiert durch die EU Klimaziele) beginnt an dem Punkt, wo die "Kyoto Emissionen" im Jahr 2010 enden.

6.5 Unsicherheit und Sensitivität der Emissionskorridore

Es ist wichtig, daran zu erinnern, daß die Resultate, die in diesem Kapitel präsentiert wurden eine Reihe von Unsicherheiten beinhalten. Eine wichtige Unsicherheitsquelle für die Berechnungen in diesem Kapitel ist das Modell, das für diese Berechnungen genutzt wurde, nämlich das IMAGE 2 Modell. IMAGE kann, wie alle globalen Modelle, Veränderungen der globalen Umwelt nur abschätzen und niemals präzise vorhersagen. Eine weitere wichtige Quelle für Unsicherheiten ist die Methode, die genutzt wurde, um die Emissionskorridore zu berechnen. Alcamo und Kreileman (1996a) sowie Swart *et al.* (1998) zählen einige dieser Unsicherheitsquellen auf, wie z.B. (1) die statistische Korrelation, die zur Berechnung der Korridore genutzt wurde, (2) die Unsicherheit der Umweltauswirkungen, die mit der Begrenzung der Indikatorgrößen verbunden sind und (3) die Auswirkung von Schwefelemissionen auf die globale Abkühlung der Lufttemperatur und die Folgen dieser Abkühlung für die Berechnung der Emissionskorridore. In Bezug auf diese letzte Unsicherheit werden die Schwefelemissionen auf ihrem 1990 Niveau konstant gehalten, aber Alcamo und Kreileman (1996a) haben darauf hingewiesen, daß die Emissionskorridore bedeutend weiter sein könnten, wenn die Schwefelemissionen in den Entwicklungsländern stark ansteigen. Außerdem ist die Weite der Korridore abhängig von der Klimasensitivität des Modells, das für die Berechnungen genutzt wurde. Das Modell, das für diesen Bericht genutzt wurde, hat eine Klimasensitivität von 2.37, d.h. liegt etwa in der Mitte der vom IPCC vorgeschlagenen Spanne von Sensitivitäten (1.5°C bis 4.5°C, Houghton *et al.*, 1996).

Abschließend sollte noch einmal daran erinnert werden, daß die berechneten Korridore natürlich sehr von der Wahl der Indikatorgrößen abhängen. Es wurde bereits auf die Abhängigkeit der Weite des Emissionskorridors von der Limitierung des Meeresspiegelanstiegs hingewiesen (Abbildung 31a). Abbildung 31b und c zeigen die Abhängigkeit der

Korridorweite im Jahr 2010 von der Limitierung der Rate des Temperaturanstiegs bzw. der Rate der Emissionsreduktion.

6.6 Zusammenfassung

Der sogenannte „Safe Landing“ Ansatz wurde angewendet, um die Emissionskorridore zwischen 1990 und 2010 zu berechnen, die erlaubt sind, um die langfristigen Klimaschutzvorschläge der AOSIS Staaten (maximal 20 cm Meeresspiegelanstieg und ein Temperaturanstieg von 1.5°C von 1990 bis 2100) und der EU (1.5°C Temperaturanstieg von 1990 bis 2100) umzusetzen. Zusätzlich zu diesen Klimaschutzvorschlägen wurde für den Zeitraum von 1990 bis 2100 die Rate des Temperaturanstiegs auf 0.15°C pro Dekade und die maximale Rate der globalen Emissionsminderung auf 2% pro Jahr beschränkt. Für das Klimaziel der EU wurde außerdem eine Begrenzung des Meeresspiegelanstiegs auf 30 cm zwischen 1990 und 2100 eingeführt.

Die Klimaziele des AOSIS Vorschlags führen zu einem sehr niedrigen und engen Emissionskorridor zwischen 1990 und 2010. Um die globalen Emissionen innerhalb dieses Korridors zu halten, müssen die Emissionen der Annex B Staaten, unter der Annahme, daß die nicht-Annex B Staaten ihre Emissionen bis 2010 nicht kontrollieren, sehr stark reduziert werden.

Die Klimaziele der EU erlauben einen weiteren Korridor als die Ziele der AOSIS Staaten. Trotzdem müssen die Annex B Staaten (ebenfalls unter der Annahme, daß die nicht-Annex B Emissionen bis 2010 ansteigen) ihre Emissionen zwischen 1990 und 2010 stark reduzieren, um im Jahr 2010 die Mitte des erlaubten Korridors zu erreichen. Um gerade noch innerhalb des Korridors zu bleiben, dürfen die Annex B Emissionen nur sehr leicht steigen.

Die globalen Emissionen, die aus den Reduktionsverpflichtungen des Kyoto Protokolls folgen, liegen für das Jahr 2010 außerhalb des Emissionskorridors, der ein langfristiges Erreichen der Klimaziele der AOSIS Staaten möglich macht, jedoch innerhalb des Korridors für die Klimaziele der EU. Da sich die Emissionen jedoch im oberen Drittel dieses Korridors befinden, dürfen die globalen Emissionen nach 2010 nicht weiter ansteigen, wenn die Klimaschutzvorstellungen der EU langfristig noch umgesetzt werden sollen.

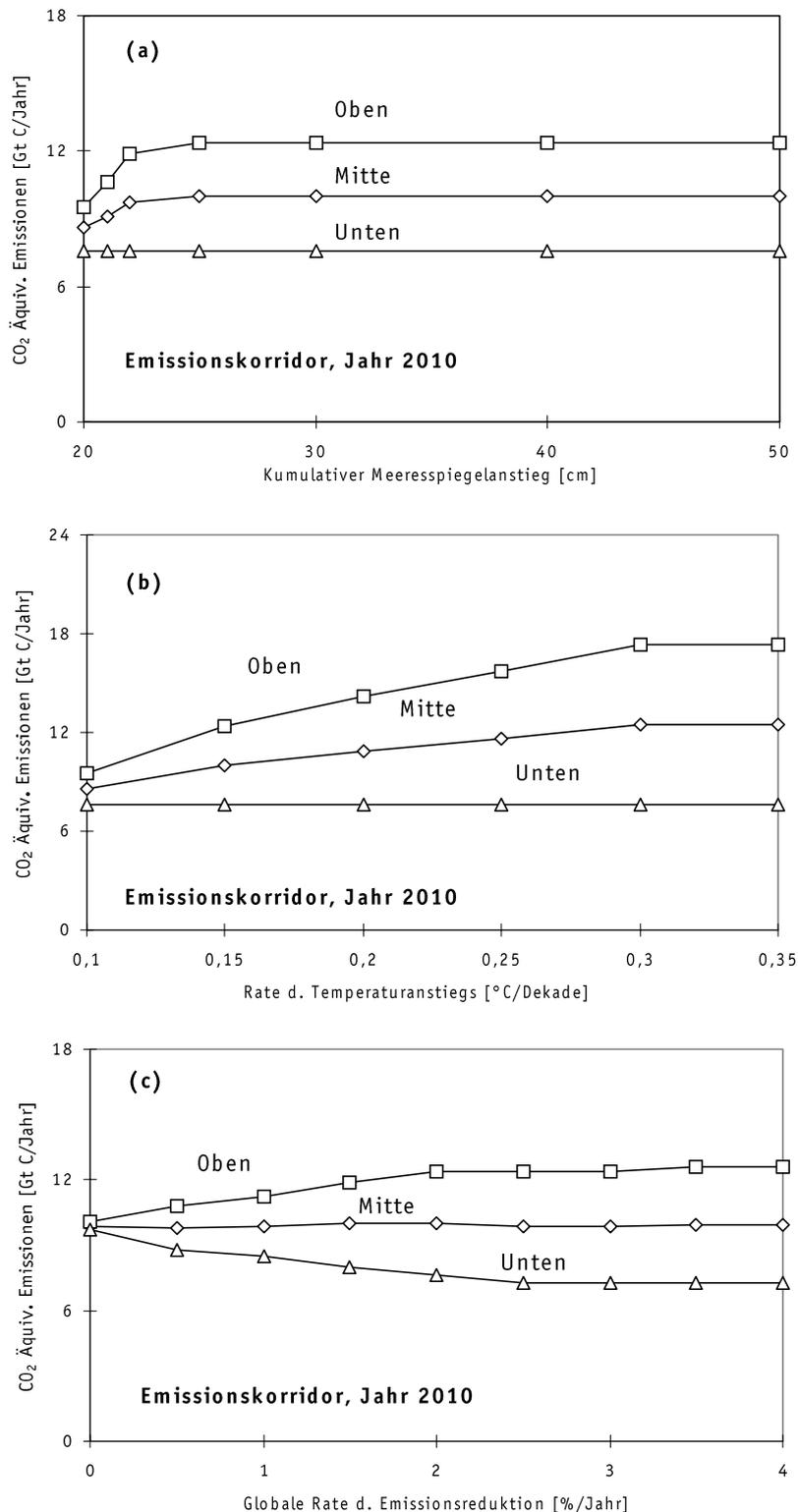


Abbildung 31: Sensitivität der Weite des Emissionskorridors im Jahr 2010 auf eine Änderung der Begrenzung (a) für den Anstieg des Meeresspiegels, (b) für die Rate der Temperaturänderung pro Dekade und (c) für die Geschwindigkeit der Emissionsreduktion. Die Voreinstellung für die Indikatoren ist jeweils für den mittleren Temperaturanstieg relativ zu 1990 = 1.5°C, für die Rate der Temperaturänderung = 0.15°C pro Dekade (dieser Wert darf zwischen 2000 und 2100 zweimal überschritten werden), für den Anstieg des Meeresspiegels relativ zu 1990 = 30 cm und für die maximale globale Emissionsreduktion = 2% pro Jahr.

7. Schlußfolgerungen

Die Festlegung langfristiger Ziele für den Klimaschutz ist ein sehr komplexes Thema, das in der internationalen Klimapolitik bisher eher am Rande diskutiert wurde. Ein Grund dafür ist die Schwierigkeit, ein langfristiges Klimaschutzziel zu definieren, das die Forderungen von Artikel 2 der Klimarahmenkonvention erfüllt: Zum Einen soll die Nahrungsmittelversorgung und die Anpassung natürlicher Ökosysteme an den Klimawandel gewährleistet werden, und zum Anderen eine nachhaltige Entwicklung der Wirtschaft ermöglicht werden. Auch bei einer Stabilisierung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen zum Schutz des Klimas, wie sie ebenfalls in Artikel 2 der Klimarahmenkonvention gefordert wird, ist mit großer Sicherheit davon auszugehen, daß die Beeinträchtigung einiger Systeme in Kauf genommen werden muß. Gleichzeitig sind aber, je nach Höhe des angestrebten Stabilisierungsniveaus, umfangreiche Reduktionsmaßnahmen für Treibhausgasemissionen notwendig, die wahrscheinlich weitgehende und zumindest teilweise auch kostenintensive Umstrukturierungen vor allem in der Energiewirtschaft notwendig machen. D.h., vereinfacht ausgedrückt, die Klimapolitik steht vor der schwierigen Aufgabe entscheiden zu müssen, wieviel an negativen Auswirkungen von Klimaänderung in Kauf genommen wird und gleichzeitig wieviel sie bereit ist, in Klimaschutzmaßnahmen zu investieren, um die Auswirkungen des Klimawandels möglichst gering zu halten.

Mit diesem Bericht liefern wir eine erste quantitative Abschätzung der globalen und regionalen Auswirkungen von zwei langfristigen Stabilisierungszielen bei einer atmosphärischen CO₂ Konzentration von 550 ppm und 450 ppm. Es wurden untersucht: (1) die globalen und regionalen Treibhausgasemissionen, die erlaubt sind, um diese Stabilisierungsziele zu erreichen und (2) die Auswirkungen des mit diesen Stabilisierungszielen einhergehenden Klimawandels auf wichtige natürliche und sozioökonomische Systeme. Alle Berechnungen wurden mit dem integrierten globalen Modell IMAGE 2.1 durchgeführt. Die Ergebnisse der Analyse sind im Folgenden kurz zusammengefasst.

Globale und regionale Treibhausgasemissionen

Eine signifikante Reduktion der Treibhausgasemissionen ist sowohl auf globaler als auch auf regionaler Ebene notwendig, um die angestrebten Stabilisierungsziele für die atmosphärische CO₂ Konzentration umzusetzen. Dies gilt sowohl für das 450 ppm Ziel (hier müssen die globalen Emissionen langfristig auf die Hälfte der Emissionen von 1990 reduziert werden) als auch für das 550 ppm Ziel (hier dürfen die Emissionen langfristig nicht das Niveau der 1990 Emissionen übersteigen). Gesteht man den nicht-Annex B Ländern eine Verzögerung bei der Beteiligung an den notwendigen Reduktionsmaßnahmen zu (ihre gegenwärtigen Emissionen sind, gemessen an der Bevölkerungszahl in der Regel sehr niedrig), so ist mittelfristig eine einschneidende Reduktion der Annex B Emissionen notwendig. Auf lange Sicht ist jedoch auch eine Beteiligung der nicht-Annex B Staaten an Klimaschutzmaßnahmen unumgänglich, wenn eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen erreicht werden soll.

Auswirkungen von Klimaänderung

Auch wenn langfristig eine Stabilisierung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen bei 450 ppm oder 550 ppm CO₂ in der Atmosphäre erreicht wird, ist mit Ertragsrückgängen in der Landwirtschaft und einer Gefährdung vieler natürlicher Ökosysteme durch den Klimawandel zu rechnen. Die CO₂ Konzentrationspfade des 450 ppm und 550 ppm Szenarios erlauben als Folge des historischen Anstiegs der Treibhausgasemissionen kurzfristig noch eine starke Zunahme der CO₂ Konzentrationen. Die Konsequenz ist, daß in den kommenden Jahrzehnten mit einem Klimawandel mit hohen Änderungsraten u.a. für die Temperatur zu rechnen ist. Insbesondere kurz- und mittelfristig (bis 2030) kann mit einem signifikanten Anstieg der Ertragseinbußen in Agrarsysteme und einer Gefährdung großer Flächen mit natürlichen Ökosystemen gerechnet werden. Ab Mitte des Jahrhunderts führt die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen zu einer Verlangsamung des Anstiegs der Auswirkungsniveaus. Eine Ausnahme bildet nur der Anstieg des Meeresspiegels, der sich nach unseren Berechnungen auch gegen Ende dieses Jahrhunderts unvermindert fortsetzt. Die Auswirkungen auf Agrarsysteme sind von Region zu Region stark unterschiedlich. Dies ist auch der Fall für Auswirkungen auf natürliche Ökosysteme. Ein starker Anstieg der Schwefelemissionen kann in einigen Regionen der Welt zu einer Milderung der Effekte des Klimawandels führen, bringt aber andererseits auch umfangreiche und teilweise irreversible Schäden mit sich.

Unsicherheiten der Ergebnisse

Natürlich sind die präsentierten Modellergebnisse mit einer Reihe von Unsicherheiten behaftet. Hier sind (1) die Unsicherheiten bei der Simulation des veränderten Klimas, insbesondere der Niederschlagverteilung, zu nennen, die die räumliche Verteilung der Auswirkungen bestimmt. (2) Es bestehen Unsicherheiten bei der Berechnung der globalen Kohlenstoffsenken und -quellen wie Ozeane und Biosphäre. Über diese werden die globalen anthropogenen CO₂ Emissionen zurückberechnet, die erlaubt sind, um einem Stabilisierungspfad zu folgen. Die Emissionen des IMAGE Modells bewegen sich im mittleren Bereich dessen, was von einer Reihe anderer Modelle bei einem IPCC Modellvergleich simuliert wurde (siehe Enting *et al.*, 1994). (3) Die Quantifizierung der physiologischen Reaktion von Pflanzen auf steigende CO₂ Konzentrationen in Kombination mit veränderten Klimabedingungen ist noch mit Unsicherheiten behaftet. Insbesondere die Rolle der Nährstoffgleichgewichte bei zunehmender Biomasseproduktion der Pflanzen läßt sich noch nicht zweifelsfrei beschreiben (Rosenzweig und Hillel, 1998). (4) Bei den Berechnungen der Auswirkungen des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Produktivität und natürliche Ökosysteme bleiben eine Reihe von Faktoren unberücksichtigt. Eine Veränderung des Klimas kann das Auftreten von Pflanzenkrankheiten und die Verbreitung von Schädlingen verändern und damit zu einer zusätzlichen Bedrohung für Agrar- und natürliche Ökosysteme führen. Außerdem wird hier eine Veränderung der Klimavariabilität, die zu einer veränderten Häufigkeit und Intensität von Dürreperioden oder Überflutungen führen kann, nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse des WaterGAP Modells für die Änderung der Wasserverfügbarkeit unter Klimawandel sind ein erster Schritt in diese Richtung, hier besteht allerdings noch weiterer Forschungsbedarf.

Trotz dieser Unsicherheiten sind die Trends für die zeitliche Entwicklung der Auswirkungen nach dem heutigen Stand des Wissens durchaus plausibel und eindeutig, so daß sich einige allgemeine Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen der Studie ableiten lassen.

Fazit der Studie

Aus den präsentierten Ergebnissen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

1. Es ist eine strikte Kontrolle der globalen Treibhausgasemissionen notwendig, um die angestrebten Stabilisierungsziele von 450 ppm und 550 ppm CO₂ in der Atmosphäre zu erreichen. Reduktionsmaßnahmen werden in erster Linie von den Annex B Ländern direkt durchgeführt oder finanziert werden müssen (z.B. im Rahmen des „Clean Development Mechanism“), wenn Annex B und nicht-Annex B Ländern langfristig das gleiche Recht auf (Pro-Kopf-)Emissionen zugestanden werden soll.
2. Trotz einer Reduktion der globalen Treibhausgasemissionen und einer langfristigen Stabilisierung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen sind durch den Klimawandel bedingte Beeinträchtigungen der untersuchten Systeme zu erwarten. Kurzfristig kann das Ausmaß der negativen Auswirkungen sehr schnell ansteigen, auch wenn eine Stabilisierung auf dem gewählten Konzentrationspfad umgesetzt wird. Eine Verzögerung der Reduktionsmaßnahmen, wie es oft aus ökonomischen Gründen vorgeschlagen wird (siehe z.B. Richels und Edmonds, 1995), hat kurzfristig eine entsprechend schnellere Änderung des Klimas mit all seinen Konsequenzen zur Folge. Es ist also notwendig, sehr sorgfältig zwischen den Kosten einer frühen Emissionsreduktion und der damit verbundenen Verlangsamung des Klimawandels auf der einen Seite und den negativen Auswirkungen des Klimawandels, die weit schwieriger zu monetarisieren sind, auf der anderen Seite, abzuwägen.
3. Da eine baldige und deutliche Veränderung des Klimas mit großer Sicherheit zu erwarten ist (oder sogar schon stattfindet), sollte die Planung von Maßnahmen und die Erhöhung der Fähigkeit zur Anpassung an einen Klimawandel eine ebenso wichtige Rolle spielen wie die Reduktion von Treibhausgasemissionen. Diese Anpassungsmaßnahmen sind z.B. in der Landwirtschaft der industrialisierten Länder relativ kurzfristig umsetzbar. Die Entwicklungsländer, deren Wirtschaftskraft oft auf der Agrarproduktion beruht, sind weit anfälliger auch kleinen Veränderungen in der landwirtschaftlichen Produktivität gegenüber (siehe z.B. Watson *et al.*, 1997). Grundsätzlich schwierig ist jedoch die Anpassung natürlicher Ökosysteme (sowohl in den Industrieländern als auch in den Entwicklungsländern), die daher besonders sensitiv gegenüber einer Klimaänderung sind.

Das Ziel dieser Studie ist es, politischen Entscheidungsträgern Informationen zur Verfügung zu stellen, die hilfreich bei der Entwicklung von langfristigen Perspektiven für den globalen Klimaschutz sein können. Trotz der Unsicherheiten, mit denen die präsentierten Ergebnisse behaftet sind, und aufgrund des in der Klimarahmenkonvention vereinbarten Vorsorgeprinzips (precautionary principle) (UNFCCC 1992, Artikel 3) scheint es angemessen, in den Industrieländern möglichst schnell mit umfassenden Reduktionsmaßnahmen für Treibhausgasemissionen zu beginnen und vor allem sowohl in den Industrie- als

auch in den Entwicklungsländern Anpassungsmaßnahmen für den zu erwartenden Klimawandel zu treffen.

Danksagung

Wir danken Herrn Rolf Sartorius (Umweltbundesamt) für seinen Einsatz und seine Unterstützung bei der Durchführung des Projektes und Frau Petra Mahrenholz (Umweltbundesamt) für die hilfreiche kritische Diskussion dieses Abschlußberichtes. Zum Zustandekommen der Ergebnisse hat auch die jederzeitige Diskussionsbereitschaft der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Wissenschaftlichen Zentrums für Umweltsystemforschung beigetragen. Hier sind besonders Jelle van Minnen, Paul Reuter und Frank Kaspar zu nennen. Dieser Bericht profitiert auch von der guten Zusammenarbeit mit dem IMAGE Team des RIVM in Bilthoven (Niederlande). Hier sei insbesondere Rik Leemans, Marcel Berk, Bert Metz und Eric Kreileman und gedankt.

8. Literatur

- Alcamo, J., Shaw, R. and Hordijk, L. (eds.) (1990): *The RAINS model of Acidification: Science and Strategies in Europe*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, 402 pp.
- Alcamo, J. (ed.) (1994a): *IMAGE 2.0: Integrated Modeling of Global Climate Change*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 318 pp.
- Alcamo, J., Kreileman, G.J.J., Krol, M. and Zuidema, G. (1994b): *Modeling the global society-biosphere-climate system, Part 1: model description and testing*. *Water, Air and Soil Pollution*, 76, pp. 1-36.
- Alcamo, J., Bouwman, A., Edmonds, J. Grüber, A., Morita, T., Sugandhy, A. (1995): *An evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios*. In: Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Bruce, J., Lewe, H., Callander, B.A., Haites, E., Harris, N., Maskell, K. (eds): *Climate change 1994: Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 247-304.
- Alcamo, J. and Kreileman, G.J.J (1996a): *Emission scenarios and global climate protection*. *Global Environmental Change* 6(4): pp. 305-334.
- Alcamo, J., Kreileman, G.J.J., Leemans, R. (1996b): *Global models meet global policy*. *Global Environmental Change*. 6(4), pp. 255-260.
- Alcamo, J., Döll, P., Kaspar, F. and Stefan Siebert (1997a): *Global Change and Global Scenarios of Water Use and Availability: An Application of WaterGAP 1.0*. Report no. A9701, Center for Environmental Systems Research, Kassel, Germany.
- Alcamo, J., Kreileman, G.J.J., and R. Swart (1997b): *The climate negotiations: Climate goals and their emission corridors*. *Proceedings of IPCC Asia-Pacific Workshop on Integrated Assessment Models*. Tokyo, Japan.
- Alcamo, J. (1997). *Preliminary results of an international comparison of computed emission corridors*. Paper presented at the Fifth international workshop on using the IMAGE model to support climate negotiations. Delft, the Netherlands. 5-6 June.
- Alcamo, J., Kreileman, G.J.J., Krol, M., Leemans, R., Bollen, J., Van Minnen, J.G., Schaefer, F., Toet, S. and De Vries, B. (1998a): *Global Modelling of environmental change: An overview of IMAGE 2.1*. In: J. Alcamo, R. Leemans and G.J.J. Kreileman (Eds), *Global change scenarios of the 21st century. Results from the IMAGE 2.1 model*. Pergamon/Elsevier Science, Oxford, UK, pp. 3-94.
- Alcamo, J., Kreileman, G.J.J., Bollen, J., Van den Born, G.J., Gerlagh, R., Krol, M.; Toet, T., and De Vries, B.: *Baseline scenarios of global environmental change*. (1998b). In: Alcamo, J., Leemans, R., Kreileman, G.J.J. (Eds.): *Global change scenarios of the 21st century. Results from the IMAGE 2.1 model*, Pergamon/Elsevier Sci., Oxford, UK, pp. 97-139.
- Alcamo, J. and Swart, R. (1998c): *Future Trends of Land-Use Emissions of Major Greenhouse Gases. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 3, pp. 343-381.
- Benkowitz, C.M., Dignon, J., Pacyna, J., Scholtz, T., Tarrason, L., Voldner, E., Graedel,

- T.E. (1997). *Global gridded inventories of anthropogenic emissions of sulfur and nitrogen*. Journal of Geophysical Research, 101.
- Cubasch, U., Hasselmann, K., Hock, H., Maier-Reimer, E., Mikolajewicz, U., Santer, B.D., and R. Sausen (1992): *Time dependent greenhouse warming computations with a coupled ocean-atmosphere model*. Climate dynamics, 8, pp. 55-69.
- De Haan, B.J., Jonas, M. Klepper, O., Krabec, J., Krol, M.S., and K. Olendrzynski (1994): *A linked dynamics atmosphere-ocean model for assessing climate policies*. Water, Air and Soil Pollution, 76, pp. 283-318.
- De Vries, B., van den Wijngaard, R., Kreileman, G.J.J., Olivier, J.A. and Toet, S. (1994): *A model for calculating regional energy use and emissions for evaluating global climate scenarios*. Water, Air and Soil Pollution, 76, pp. 79-132.
- Döll, P., Kaspar, F., Alcamo, J. (1998): *Modeling of world-wide water availability and water use under the influence of global change*. In: Lemmelä, R. und Helenius, N. (Hrsg.): Proceedings of The Second International Conference on Climate and Water, Espoo, Finland, 17.-20. August 1998, pp. 1345-1354.
- Enting, I.G., Wigley, T.M.L. and Heiman, M. (1994): *Future emissions and concentrations of carbon dioxide*. Research technical paper no. 31, CSIRO Division of Atmospheric Research, Australia.
- Foell, W.K., Amann, M., Carmichael, G., Chadwick, M., Hettelingh, J-P., Hordijk, L. and D. Zhao (eds.) (1995): *RAINS-Asia: An Assessment Model for Air Pollution in Asia*. Final Report to the World Bank, 411 pp.
- Grübler, A. (1998): *A Review of Global and Regional Sulfur emission Scenarios*. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 3, pp. 383-418.
- Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A. and K. Maskell (eds.) (1996): *Climate Change 1995: The science of climate change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Griggs, D.J. and K. Maskell (1997): *Stabilization of Atmospheric Greenhouse Gases: Physical, Biological and Socio-economic Implications*. Technical Paper of IPCC Working Group I. 51 pp
- Krol, M.S., and H. van der Woerd (1994): *Simplified calculation of atmospheric concentration of greenhouse gases and other constituents for evaluation of climate scenarios*. Water, Air and Soil Pollution, 76, pp. 259-281.
- Krol, M.S., Alcamo, J. and R. Leemans (1997): *Global and regional impacts of stabilizing atmospheric CO₂*. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 1, pp. 341-361.
- Klein Goldewijk, K., Van Minnen, J.G., Kreileman, G.J.J., Vloedveld, M. and Leemans, R. (1994): *Simulation the carbon flux between the terrestrial environment and the atmosphere*. Water, Air and Soil Pollution, 76, pp. 199-230.
- Kreileman, G.J.J. and Bouwman, A.F. (1994): *Computing land use emissions of greenhouse gases*. Water, Air and Soil Pollution, 76, pp. 231-258.
- Kreileman, G.J.J., Berk, M, (1997): *The safe landing analysis: users manual*. RIVM Report No. 481508003. National Institute of Public Health and the Environment (RIVM). PO Box 1, 3720 BA Bilthoven, the Netherlands.

- Leemans, R. and van den Born (1994): *Determining the potential global distribution of natural vegetation, crops and agricultural productivity*. Water, Air and Soil Pollution, 76, pp. 133-161.
- Leemans, R. and R. Hootsmans (1998): *Ecosystem Vulnerability and Climate Protection Goals*. Report no. 481508004, RIVM, Bilthoven, The Netherlands.
- Leggett, J., W.J. Pepper and R.J. Swart (1992): *Emission Scenarios for the IPCC: an Update*. In: IPCC, Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge.
- Matsuoka, Y., Morita, T., Kawashima, Y., Takahashi, K., Shimada, K. (1998): *An estimation of negotiable safe emissions corridor based on the AIM model*. In preparation.
- Olivier, J.G.J., Bouwman, A.F., Van der Maas, C.W.M., Berdowski, J.J.M., Veldt, C., Bloos, J.P.J., Visschedijk, A.J.H., Zandveld, P.Y.J., and J.L. Haverlag (1996): *Description of EDGAR 2.0. A set of global emission inventories of greenhouse gases and ozone-depleting substances for all anthropogenic and most natural sources on a per country basis and on 1°x 1° grid*. RIVM/TNO report, December 1996. RIVM Bilthoven, RIVM report no. 771060 002.
- Onigkeit, J., Berk, M., and J. Alcamo, (1998): *Report on the "Sixth International Workshop on Using Global Models to Support Climate Negotiations"*. Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany. The report is available at <http://www.usf.uni-kassel.de/service/bibliothek/kassel-1-report.pdf>.
- Pepper, W., Leggett, J., Swart, R., Wasson, J., Edmonds, J., and I. Mintzer (1992): *Emission Scenarios for the IPCC, An Update, Assumptions, Methodology, and Results*. IPCC, Geneva.
- Posch, M., Hettelingh, J.-P., Alcamo, J., Krol, M. (1996): *Integrated scenarios of acidification and climate change in Asia and Europe*. Global Environmental Change. 6(4), pp. 375-394.
- Prather, M., Derwent, R., Ehhalt, D., Fraser, P., Sanhueza, E., and X. Zhou (1995): *Other Trace Gases and Atmospheric Chemistry*. In Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Bruce, J., Hoesung Lee, Callander, B.A., Haites, E., Harris, N. and K. Maskell (eds): *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Prentice, I.C., Cramer, W., Harrison, S.P., Leemans, R., Monserud, R.A. and A.M. Solomon (1992): *A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate*. Journal of Biogeography, 19, pp. 117-134.
- Richels, R. and J. Edmonds (1995): *The economics of stabilizing atmospheric CO₂*. Energy Policy, 23, pp. 373-378.
- Rijsberman, F.R. and R.J. Swart (ed.) (1990): *Targets and Indicators of Climate Change*. Stockholm Environmental Institute, Stockholm, 166 pp.
- Rosenzweig, C. and M.L. Parry (1994): *Potential impact of climate change on world food supply*. Nature, 367, pp. 133-138.
- Rosenzweig, C. and D. Hillel (1998): *Climate Change and the Global Harvest. Potential Impacts of the Greenhouse Effect on Agriculture*. Oxford University Press, 324 pp.

- Schimel, D., Alves, D., Enting, I., Heimann, M., Joos, F., Raynaud, D., Wigley, T., Prather, M., Derwent, R., Ehhalt, D., Fraser, P., Sanhueza, E., Zhou, X., Jonas, P., Charlson, R., Rodhe, H., Sadisivan, S., Shine, K.P., Fouquart, Y., Ramaswamy, V., Solomon, S., Shrinivasan, J., Albritton, D., Isakson, I., Lal, M., and D. Wuebbles (1996): *Radiative Forcing of Climate Change*. In: Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A. and K. Maskell (eds.): *Climate Change 1995: The science of climate change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Solomon, A.M. (1997): *Natural migration rates of trees: Global terrestrial carbon cycle implications*. In: Huntley, B., Cramer, W., Morgan, A.V., Prentice, H.C., and J.R.M. Allen (Eds.): *Past and future rapid environmental changes: The spatial and evolutionary responses of terrestrial biota*, pp. 455-468.
- Swart, R.S., Berk, M., Janssen, M., Kreileman, G.J.J., and Leemans, R. (1998). *The safe landing approach: risks and trade-offs in climate change*. In: Alcamo, J., Kreileman, G.J.J., Leemans, R. (eds.) *Global Change Scenarios of the 21st Century: Results from the IMAGE 2.1 Model*. Pergamon/Elsevier Sci., Oxford, UK, pp. 193-218.
- UNFCCC (1992): *Convention on Climate Change*, UNEP/WMO Information Unit on Climate Change (IUCC), Geneva, Switzerland.
- UNFCCC (1997a): *Implementation of the Berlin Mandate, Additional proposals from Parties*, Paper No. 20: Trinidad and Tobago (on behalf of the Alliance of Small Island States (AOSIS)). FCCC/AGBM/1997/MISC.1/Add.2, Climate Secretariat: <http://www.unfccc.de>.
- UNFCCC (1997b): *Implementation of the Berlin Mandate, Additional proposals from Parties*, Paper No. 11: Netherlands (on behalf of the European Community and its Member States). FCCC/AGBM/1997/MISC.1/Add.2, Climate Secretariat: <http://www.unfccc.de>.
- UNFCCC (1997c): *Kyoto Protocol to the UNFCCC*, FCCC/CP/1997/7/Add. 1, Climate Secretariat: <http://www.unfccc.de>.
- Van Daalen, E., Thissen, W., Grünefeld, H., Leemans, R. (1997). *The Delft process: creating a dialogue between FCCC delegates and climate assessment scientists*. *Change*. 35, pp. 8-10.
- Van Daalen, C.E., Thissen, W.A.H. and Berk, M.M.(1998): *The Delft Process: experiences with a dialogue between policy makers and global modelers*. In: Alcamo, J., Kreileman, G.J.J., Leemans, R. (eds.) *Global Change Scenarios of the 21st Century: Results from the IMAGE 2.1 Model*. Pergamon/Elsevier Sci., Oxford, UK, pp. 267-285.
- Van Minnen, J.G., Leemans, R. and F. Ihle (2000): *Defining the importance of including transient ecosystem responses to simulate C-cycle dynamics in a global change model*. *Global Change Biology*, in press.
- Watson, R.T., Zinyowera, M.C., Moss, R.H. and D.J. Dokken (eds) (1996): *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change*. Scientific-Technical Analysis. Cambridge University Press, Cambridge.

Watson, R.T., Zinyowera, M.C., Moss, R.H. and D.J. Dokken (eds) (1997): *The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability*. Summary for Policy-makers. A special Report of IPCC Working Group II.

Zuidema, G., van den Born, G.J., Alcamo, J., and G.J.J. Kreileman (1994): Simulating Changes in Global Land Cover as Affected by Economic and Climatic Factors. *Water, Air and Soil Pollution*, 76, pp. 163-198.

Anhang 1: Berechnung der “Safe Emission Corridors”

Bei der Berechnung der Emissionskorridore wurde folgendermaßen vorgegangen:

1. Mit dem IMAGE Modell wurde eine große Anzahl verschiedener Emissionsszenarien zwischen 1990 und 2100 gerechnet, u.a. die, die im vorliegenden Bericht behandelt wurden.
2. Mit Hilfe der Ergebnisse aus Schritt 1 wurden Korrelationsanalysen durchgeführt zwischen den kumulativen CO₂ äquivalenten Emissionen der o.g. Szenarien und den drei Indikatoren für Klimaänderung (Globale Temperaturänderung zwischen 1990 und 2100, Rate der Temperaturänderung pro Dekade und Anstieg des Meeresspiegels nach 1990).
3. Dann wurden die kumulativen Emissionen zwischen 1990 und 2100 von mehreren tausend globalen Emissionsprofilen berechnet, für die eine maximale und eine minimale Begrenzung für die jährliche Änderung der Emissionen festgelegt ist. So dürfen die globalen CO₂ äquivalenten Emissionen dieser Pfade maximal um 3% pro Jahr ansteigen und um maximal 4% pro Jahr absinken. Auch unwahrscheinliche Emissionsverläufe, wie z.B. oszillierende Emissionen wurden ausgeschlossen.
4. Die Weite eines Emissionskorridors ist abhängig von der Begrenzung der drei festgesetzten Klimaindikatoren (z.B. maximaler Temperaturanstieg oder Anstieg des Meeresspiegels zwischen 1990 und 2100). Wird nun ein Satz von Klimazielen festgelegt (z.B. ein maximaler Anstieg des Meeresspiegels von 30 cm zwischen 1990 bis 2100, ein maximaler Temperaturanstieg von 2°C und eine maximale Rate der Temperaturänderung von 0.1°C pro Dekade), so können aus den Korrelationen aus Schritt 2 die maximalen kumulativen CO₂ äquivalenten Emissionen zwischen 1990 und 2100 berechnet werden, die erlaubt sind, um die festgelegten Klimaziele zu erreichen.
5. Nachdem die maximalen kumulativen Emissionen bekannt sind, wird eine maximale Rate für die Reduktion der globalen Emissionen festgelegt und aus den Emissionspfaden von Schritt 3 diejenigen Emissionsprofile ausgewählt, die die maximalen kumulativen Emissionen aus Schritt 4 aufweisen sowie die gewählte maximale Rate für globale Emissionsreduktionen nicht überschreiten.
6. Diese große Anzahl von Emissionspfaden aus Schritt 5 ergibt den Emissionskorridor zwischen 1990 und 2100, der die festgesetzten Klimaziele erreichbar macht, denn jeder der Pfade, der innerhalb dieses Korridors liegt hat einen Verlauf über das Jahr 2010 hinaus bis zum Jahr 2100. Allerdings ist das Erreichen der Klimaziele natürlich auch vom Emissionspfad nach 2010 abhängig, wie im Bericht für die Konsequenzen der globalen Emissionen, die durch die Umsetzung des Kyoto Protokolls erreicht werden können, beschrieben wurde.

Änderung der Produktivität für nicht-tropisches Getreide (2100): 550 ppm Szenario

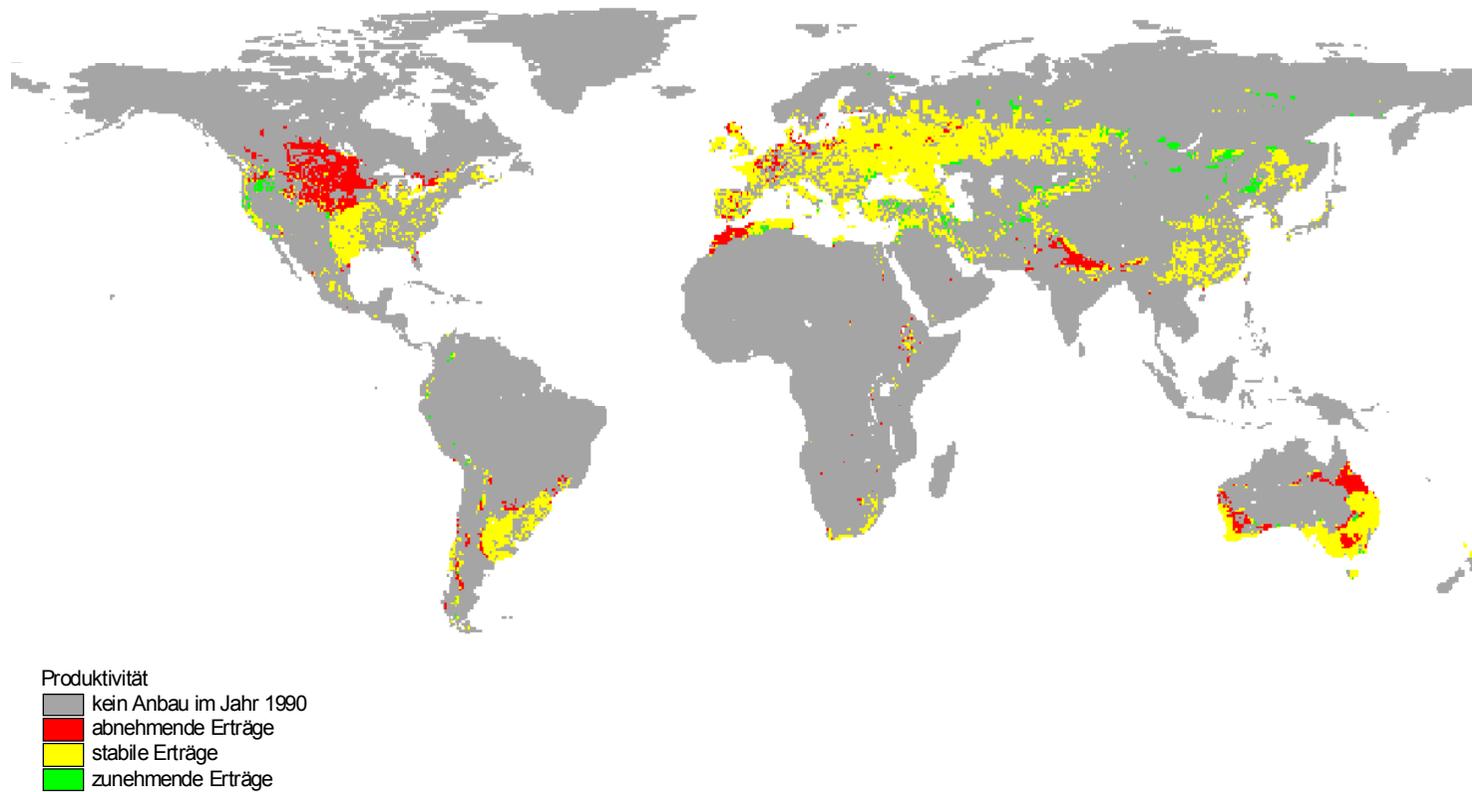
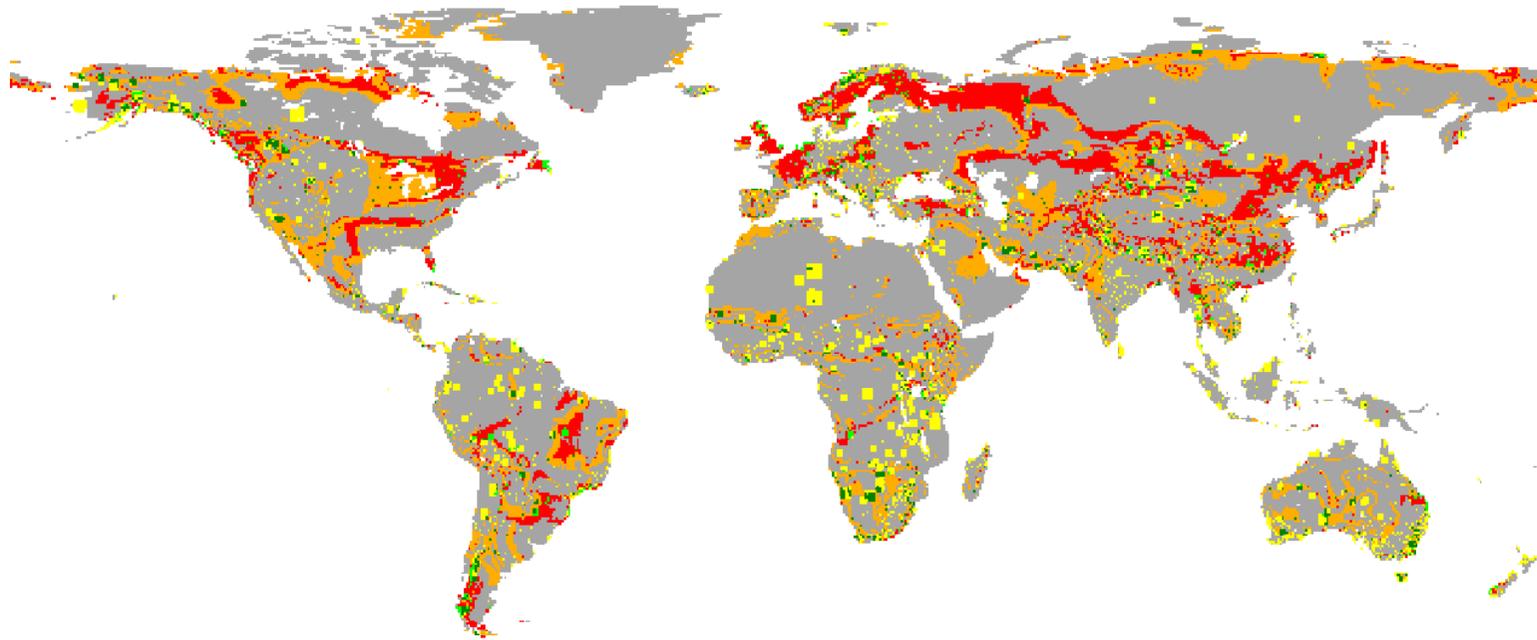


Abbildung 1-A: Änderung der potentiellen Erträge für nicht-tropisches Getreide im Jahr 2100 für das 550 ppm Szenario. Berücksichtigt sind die Flächen auf denen 1990 nicht-tropisches Getreide angebaut wurde.

Risiko für die potentielle natürliche Vegetation (2100): 550 ppm Szenario



- Risiko für die natürliche Vegetation
- Änderung ohne Anpassung, Naturreservate
 - Änderung mit Anpassung, Naturreservate
 - keine Änderung, Naturreservate
 - Änderung ohne Anpassung, Rest nat. Vegetation
 - Änderung mit Anpassung, Rest nat. Vegetation
 - keine Änderung, Rest nat. Vegetation

Abbildung 2-A: Risiko einer Änderung der potentiellen natürlichen Vegetation im Jahr 2100 für das 550 ppm Szenario (bezogen auf die Vegetation von 1990).

Table 1-A: Abflüsse und Abflussänderungen ausgewählter Wassereinzugsgebiete.

		Mittelwert	10-Perzentil Trockenjahr									
		1995	1995	2020			2050			2100		
IMAGE Region	Fluß	[mm/Jahr]	[mm/Jahr]	Kyoto	550ppm	450ppm	Kyoto	550ppm	450ppm	Kyoto	550ppm	450ppm
				[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Ozeanien	Murray	7	4	-18	-17	-16	-31	-29	-27	-37	-36	-31
Afrika	Senegal	41	14	-16	-17	-16	-30	-29	-27	-47	-37	-32
Afrika	Zambezi	79	18	7	9	8	18	19	17	45	29	22
China + CPA	Huanghe	63	20	10	10	10	31	27	22	106	48	31
Ozeanien	Burdekin	75	28	-14	-15	-14	-26	-26	-24	-38	-33	-28
Mittlerer Osten	Al_Furat	88	45	65	67	63	156	143	126	340	215	161
USA	Mississippi	141	78	22	24	22	58	53	46	140	83	60
Afrika	Rufiji	188	88	2	3	3	6	6	5	14	9	7
CIS	Ob	181	106	42	40	38	89	79	70	168	113	87
Osteuropa	Odra	200	114	47	52	51	62	66	65	92	75	69
Indien + S. Asien	Godavari	329	144	29	32	30	68	66	59	154	100	78
OECD Europa	Loire	228	159	3	2	2	7	6	5	26	10	7
CIS	N. Dvina	230	163	-3	-3	-3	-7	-6	-6	1	-8	-7
CIS	Lena	253	173	14	13	12	31	27	24	69	40	29
OECD Europa	Guadalquivir	230	189	-36	-36	-34	-61	-59	-55	-73	-68	-62
Eastern Europe	Danube	326	200	6	6	6	8	8	8	33	11	9
USA	Columbia	267	211	3	3	2	10	8	6	37	15	9
Latein Amerika	Uruguay	459	216	-4	-4	-4	-6	-6	-5	6	-5	-5
Afrika	Zaire	500	296	11	12	12	27	26	23	63	41	31
China + CPA	Changjiang	484	326	4	4	4	11	10	8	37	18	12
Kanada	Fraser	446	355	-3	-3	-3	-3	-4	-4	9	-2	-4
OECD Europa	Rhein	475	386	2	2	2	5	4	4	19	8	5
Latein Amerika	Amazonas	1047	782	13	14	14	28	27	25	55	39	31
Japan	N-Jap.	1028	819	-2	-2	-2	-4	-4	-3	-6	-5	-4
Indien + S. Asien	Brahmaputra	1271	996	8	9	9	20	18	16	47	29	21
Ostasien	Barito	1856	1501	0	0	0	1	1	1	2	1	1

> 10% Zunahme > 10% Abnahme
 > 30% Zunahme > 30% Abnahme