

Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Schutz der Erdatmosphäre

Abschlussbericht

**Szenarien für die langfristige Verteilung regionaler Anrechte
auf Treibhausgasemissionen
und Auswirkungen des Klimawandels**

Förderkennzeichen (UFOPLAN) Nr. 299 41 256

Janina Onigkeit
Joseph Alcamo (Projektleiter)

Unter Mitwirkung von
Andrei Kirilenko
Sara Vassolo

Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung
(WZ-Bericht Nr. P0301)
Universität Kassel

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Juli 2004

Berichtskennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB 299 41 256	2. Abschlussbericht	3.
4. Titel des Berichts Szenarien für die langfristige Verteilung regionaler Anrechte auf Treibhausgasemissionen und Auswirkungen des Klimawandels		
5. AutorInnen, Name(n), Vorname(n) Onigkeit, Janina		8. Abschlussdatum 07.08.2004
		9. Veröffentlichungsdatum
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Universität Kassel, Kurt-Wolters-Str. 3, D 34109 Kassel		10. UFOPLAN – Nr. 299 41 256
		11. Seitenzahl 106
7. Fördernde Institution Umweltbundesamt Bismarckplatz 1 14193 Berlin		12. Literaturangaben 37
		13. Tabellen und Diagramme 13
		14. Abbildungen 21
15. Zusätzliche Angaben		
16. Kurzfassung In der vorliegenden Studie werden zwei aktuelle Themen der Klimaschutzpolitik gemeinsam behandelt: Zum Einen werden auf der Basis von Einkommen und Pro-Kopf-Emissionen langfristige Emissionsanrechte für 17 Weltregionen ermittelt, die zu einer langfristigen Stabilisierung der CO ₂ -Konzentration führen. Außerdem werden die Klimafolgen zweier Emissionsszenarien des IPCC auf die landwirtschaftliche Produktivität und die weltweite Wasserversorgung abgeschätzt. Alle Ergebnisse basieren auf den Berechnungen dreier globaler Modelle: (1) dem IMAGE 2.2 Modell für die sozioökonomische Entwicklung und die Emissionsszenarien für 17 Weltregionen, (2) dem WaterGAP 2.1 Modell für die Folgen des Klimawandels auf die Wasserversorgung und (3) dem GAEZ-Modell (IIASA) für die weltweiten Folgen des Klimawandels für die landwirtschaftliche Produktivität. Die gemeinsame Betrachtung von Emissionsszenarien und Folgen des Klimawandels macht deutlich, dass (1) unter den gegebenen Szenarioannahmen sowohl Annex B- als auch einige Nicht-Annex B-Regionen langfristig einen beträchtlichen Beitrag leisten müssen, wenn eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration erreicht werden soll, dass (2) vor allem Nicht-Annex B-Regionen mit mittlerem Einkommen mittelfristig eine doppelte Bürde zu tragen haben könnten, da sie sowohl relativ früh zu Klimaschutzmaßnahmen verpflichtet werden, als auch umfangreiche Klimafolgen zu tragen haben werden und dass (3) besonders die Nicht-Annex B-Staaten aufgrund des Klimawandels, der wachsenden Bevölkerung und steigendem Konsum zukünftig von Wasserknappheit und unzureichender landwirtschaftlicher Produktivität betroffen sein könnten.		
17. Schlagwörter Klimawandel, Klimavariabilität, Stabilisierungsziel, globale Modellierung, regionale Anrechte auf Treibhausgasemissionen, landwirtschaftliche Produktivität, Wasserstress,		
18. Preis	19.	20.

Inhaltsverzeichnis

SUMMARY.....	1
ZUSAMMENFASSUNG.....	10
1. EINLEITUNG	20
2. DIE NEUEN EMISSIONSSZENARIEN DES IPCC.....	22
2.1 ÜBERBLICK.....	22
2.2 DIE HAUPTTRIEBKÄRFTEN DES A2- UND DES B2-SZENARIOS	25
3. REGIONALE EMISSIONSANRECHTE FÜR LANGFRISTIGE KLIMASCHUTZZIELE.....	29
3.1 INDIKATOREN	31
3.2 VERPFLICHTUNGSSZENARIEN	32
3.2.1 Hintergründe.....	33
3.2.2 Verteilung von Emissionsanrechten in einer A2-Welt	40
3.2.3 Verteilung von Emissionsanrechten in einer B2-Welt	51
3.3 SCHLUSSFOLGERUNGEN	61
4. AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DEN WASSERSEKTOR UND DIE LANDWIRTSCHAFT	63
4.1 DIE ÄNDERUNG DES KLIMAS.....	63
4.1.1 Globale und regionale Klimaänderungen	63
4.1.2 Klimavariabilität.....	67
4.2 AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DIE WASSERSITUATION	68
4.2.1 Vorgehensweise	68
4.2.2 Ergebnisse.....	74
4.2.2.1 Wasserstress	74
4.2.2.2 Häufigkeit von Abflussexremen	80
4.2.3 Zusammenfassung.....	82
4.3 AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DIE LANDWIRTSCHAFTLICHE PRODUKTIVITÄT.....	83
4.3.1 Vorgehensweise	84
4.3.2 Ergebnisse.....	87
4.3.2.1 Änderung der mittleren Produktivität	87
4.3.2.2 Änderung der Produktivität bei Optimierung der Feldfrüchte	91
4.3.2.3 Häufigkeit klimabedingter Missernten	95
4.3.3 Zusammenfassung.....	98
5. SCHLUSSFOLGERUNGEN	100
6. LITERATUR.....	102
ANHANG.....	106

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1	Schematische Übersicht über die Entwicklungsschwerpunkte der Storylines der vier Szenariofamilien des IPCC.....	23
Abbildung 2	Globale CO ₂ -Emissionen aus dem Energie- und dem Industriesektor zum Erreichen einer Stabilisierung der atmosphärischen CO ₂ -Konzentration bei 450 bzw. 550 ppm CO ₂	38
Abbildung 3	Mittlere globale CO ₂ -äquivalente Pro-Kopf-Emissionen aus dem Energie- und Industriesektor.....	39
Abbildung 4	Durchschnittliche Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B- (a) und Annex B-Regionen (b) in einer A2-Welt.	40
Abbildung 5	Verlauf der Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B-Regionen in einer A2-Welt bei unterschiedlichen Annahmen für Klimaschutzziel und Einstiegseinkommen.	45
Abbildung 6	Kumulierte Emissionsanrechte der Nicht-Annex B-Regionen in einer A2-Welt für den Zeitraum 1990 bis 2100 bei unterschiedlichen Eintrittskriterien und Klimaschutzzielen.	51
Abbildung 7	Durchschnittliche Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B-Regionen (a) und Annex B-Regionen (b) in einer B2-Welt.	52
Abbildung 8	Verlauf der Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B-Regionen in einer B2-Welt bei unterschiedlichen Annahmen für Klimaschutzziel und Einstiegseinkommen.	56
Abbildung 9	Kumulierte Emissionsanrechte der Nicht-Annex B-Regionen in einer B2-Welt für den Zeitraum 1990 bis 2100 bei unterschiedlichen Eintrittskriterien und Klimaschutzzielen.....	60
Abbildung 10	Prozentuale Änderung der mittleren jährlichen Niederschläge unter dem A2-Szenario (oben) und dem B2-Szenario (unten) in den 2070er Jahren relativ zur Klimanormalperiode (Klimamodell HadCM3).	66
Abbildung 11	Schematische Darstellung der Komponenten und Zusammenhänge im WaterGAP-Modell.	69
Abbildung 12	Änderung der Wasserverfügbarkeit in den 2070er Jahren relativ zur Klimanormalperiode unter dem A2-Szenario.	75
Abbildung 13	Änderung der Wasserverfügbarkeit in den 2070er Jahren relativ zur Klimanormalperiode unter dem B2-Szenario.....	76
Abbildung 14	Wasserstress als Verhältnis von Wasserentnahme zu Wasserverfügbarkeit im Jahr 1995.	78
Abbildung 15	Änderung des Verhältnisses von Wasserentnahme zu Wasserverfügbarkeit (=Wasserstress) unter dem A2-Szenario in den 2070er Jahren relativ zu 1995.	79
Abbildung 16	Änderung des Verhältnisses von Wasserentnahme zu Wasserverfügbarkeit (=Wasserstress) unter dem B2-Szenario in den 2070er Jahren relativ zu 1995.	80

Abbildung 17	Änderung der Häufigkeit extremer Abflussereignisse unter dem A2-Szenario (2070er Jahre relativ zu 1995).....	81
Abbildung 18	Änderung der Häufigkeit extremer Abflüsse unter dem B2-Szenario (2070er Jahre relativ zu 1995).....	82
Abbildung 19	Häufigkeit extremer Ernteauffälle pro Jahrzehnt während der Klimanormalperiode 1961-90.	96
Abbildung 20	Veränderung der Häufigkeit extremer Ernteauffälle unter dem A2-Szenario (2070er Jahre) relativ zur Klimanormalperiode.	97
Abbildung 21	Veränderung der langfristigen Häufigkeit extremer Ernteauffälle unter dem B2-Szenario im Vergleich zum A2-Szenario.	98

Verzeichnis der Tabellen

Table 1	Regional CO ₂ emissions to achieve a stabilization of the atmospheric CO ₂ concentration at 550 and 450 ppm, respectively, climate-induced change of the potential agricultural productivity and change of water availability under the IPCC SRES scenarios A2 and B2.....	9
Tabelle 2	Regionale Emissionsanrechte für eine Stabilisierung der CO ₂ -Konzentration bei 550 bzw. 450 ppm sowie klimabedingte regionale Veränderung der potentiellen landwirtschaftlichen Produktivität und der Wasserverfügbarkeit unter dem A2- und dem B2-Szenario des IPCC.....	19
Tabelle 3	Charakteristika für die treibenden Kräfte der IPCC Marker-Szenarien.....	24
Tabelle 4	Entwicklung der Bevölkerungszahlen der jetzigen Annex B- und Nicht-Annex B-Regionen unter dem A2- und dem B2-Szenario.....	26
Tabelle 5	Einkommensentwicklung in den jetzigen Annex B- und Nicht-Annex B-Regionen unter dem A2- und dem B2-Szenario.....	27
Tabelle 6	Überblick über die untersuchten Klimaschutzszenarien.....	36
Tabelle 7	Maßnahmenbeginn der Nicht-Annex B-Regionen in einer A2-Welt.....	43
Tabelle 8	Änderung der Gesamtemissionen der Nicht-Annex B-Regionen resultierend aus vier Klimaschutzszenarien, die auf dem Referenzszenario A2 basieren.....	48
Tabelle 9	Kumulierte CO ₂ -äquivalente Emissionen des A2-Szenarios zwischen 1990 und 2100 sowie der auf dem A2-Szenario basierenden Klimaschutzszenarien.....	49
Tabelle 10	Maßnahmenbeginn der Nicht-Annex B-Regionen in einer B2-Welt.....	54
Tabelle 11	Änderung der Gesamtemissionen der Nicht-Annex B-Regionen resultierend aus vier Klimaschutzszenarien, die auf dem Referenzszenario B2 basieren.....	58
Tabelle 12	Kumulierte CO ₂ -äquivalente Emissionen des B2-Szenarios zwischen 1990 und 2100 sowie der auf dem B2-Szenario basierenden Klimaschutzszenarien.....	59
Tabelle 13	Entwicklung der globalen Wasserentnahme unter dem A2- und dem B2-Szenario.....	77
Tabelle 14	Klimabedingte Veränderung der potentiellen landwirtschaftlichen Produktivität der Annex B- und Nicht-Annex B-Regionen unter dem A2- und dem B2-Szenario.....	89
Tabelle 15	Klimabedingte Veränderung der potentiellen landwirtschaftlichen Produktivität mit Optimierung der wichtigsten Feldfrüchte.....	92
Tabelle 16	Die wichtigsten Feldfrüchte der 17 Weltregionen in den 1990er Jahren sowie optimierte Feldfrüchte für die Klimabedingungen der 2070er Jahre des A2- und des B2-Szenarios.....	93

SUMMARY

Global climate change is currently discussed from two main perspectives:

- One being on the extent and costs of mitigation measures (including the question where and how emission cuts can be realized most cost-effectively);
- the other being on the adverse impacts of climate change and how to adapt to these mostly negative effects (including the question how to finance an adaptation to changed climate conditions).

The main objective of this study is to combine these two perspectives so that, hopefully, a mutual understanding of the different views on the problem of climate change and its mitigation might support the process of climate negotiations. The study is, therefore, divided into two parts:

- In the first part, an allocation scheme for future regional emission rights between 1990 and 2100 is presented which has a clear focus on reaching long-term climate targets. An application of this scheme yields the amount of emissions saved that each of 17 world regions contributes to the achievement of a stabilization target.
- In the second part, a model-based assessment of the effects of changing temperature and precipitation on global water availability and agricultural production is presented. This assessment provides the extent of climate change impacts that each of the regions might have to bear in the future under two different emission scenarios.

As a result of this analysis, a possible long-term contribution of a region to achieve a climate target can be seen in relation to the impacts that this region might bear under changing climate conditions.

The new IPCC scenarios

All analyses of this report are based on two scenarios of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), namely the so-called A2 and B2 scenario. The world of the A2 scenario is characterized by a regional heterogeneous development in which economic growth and technological changes are slow and the population is constantly increasing. The world of the B2 scenario aims at sustainable development but with solutions differing from region to region. This results in an intermediate growth of the global economy and a technological change which is faster than in the A2 world. The global population shows an increasing tendency but at a lower rate than under the A2 scenario. These different developments result in a wide range of global greenhouse gas emissions by the end of the century: Under the A2 scenario, emissions are increasing by a factor of four between 1990 and 2100 whereas under the B2 scenario, emissions “only” double between now and 2100 (i.e. they are half of the A2 emissions in 2100).

ALLOCATION OF EMISSION PERMITS

Based on the socio-economic development of the A2 and the B2 scenario as implemented in the IMAGE 2.2 model (Integrated Model to Assess the Global Environment), an alloca-

tion scheme is described for 17 world regions. This scheme emphasizes a long-term perspective as it is necessary to realize a stabilization of the greenhouse gas concentration in the atmosphere. The allocation scheme consists of three simple rules:

Rule No. 1: Per capita emissions of all Non-Annex B regions may follow their reference emissions until an average income level is reached which enables a region to start mitigation measures (graduation income). The first measure is a stabilization of per capita emissions, the second one a decrease of per capita emissions. This decrease starts when per capita emissions of a Non-Annex B region become equal to the average of Annex B per capita emissions.

Rule No. 2: For each year a globally allowable amount of greenhouse gas emissions must be prescribed, e.g. derived from an emission pathway which allows to achieve a stabilization of greenhouse gas concentrations in the long-term.

Rule No. 3: Annex B regions must start emission controls immediately. Their total emissions result from the difference between global emissions from Rule No. 2 and total emissions of all Non-Annex B regions calculated from the results of Rule No. 1.

Starting with the regional reference emissions of the IMAGE A2 and B2 scenarios different pathways for future regional CO₂-equivalent emissions are described which allow to reach a greenhouse gas stabilization at 450 or 550 ppm CO₂ in the atmosphere, respectively.

Per capita emissions and the beginning of mitigation measures

In order to achieve a stabilization at 450 ppm CO₂ in the atmosphere, a global average of per capita emissions is allowed at the end of the century between 20% (basis A2 scenario) and 29% (basis B2 scenario) of current per capita emissions (1.3 t C-equivalents per person). A stabilization target of 550 ppm CO₂ requires a long-term decrease to 45% of current per capita emissions under the A2 scenario and to 64% of current emissions under the B2 scenario. These numbers make clear that, regardless of the stabilization target and the base scenario, the global average of per capita emissions must sink below one ton C-equivalents per person in the long-term.

In order to reach this level of per capita emissions, Annex B regions must, depending on the scenario assumptions and the stabilization target, decrease their emissions to 5-22% of their present emissions until 2100. Another consequence of the different scenario assumptions is that a 50% cut of emissions per inhabitant must be realized between 2025 and 2050 at the latest.

Non-Annex B regions begin to participate in a climate protection regime by first stabilizing and then decreasing their per capita emissions. They will participate earlier (1) the faster their income reaches a prescribed graduation level (which must be negotiated), (2)

the faster their per capita emissions come closer to (decreasing) Annex B per capita emissions and (3) the stricter the climate protection target to be achieved (which must still be negotiated).

The point in time when Non-Annex B regions begin to participate in a climate protection regime will be between “immediately” (1990)¹ and 2080 if the graduation income is low. Low income in this scenario means that it is equal to the income of the poorest Annex B region in 1990. Non-Annex B regions will start with climate protection measures between 2020 and 2100 or even later if a high graduation income is chosen. High income in this context means an income which is equal to the average income of all Annex B regions in 1990. In the case of early measures (or a low graduation income), maximum per capita emissions of nine out of ten Non-Annex B regions may never exceed 1.2 t C-equivalent. Late measures or a high graduation income allow a maximum per capita emission which, depending on the region, lies between 0.4 and 2.5 t C-equivalents per person.

Total emissions

The maximum amount of greenhouse gases that a Non-Annex B region may emit per year depends on its current per capita emissions and its economic strength. As a consequence of the fairness principles of the allocation scheme, the Non-Annex B region with the lowest income and the lowest per capita emissions (East Africa) may increase its current emissions by a factor of 30 if the climate target is 450 ppm CO₂ under the B2 scenario, and by a factor of 47 if the climate target is 550 ppm and the graduation income is high. At the other end of the spectrum, the Non-Annex B region with currently the highest average income (South America) may increase its total emissions by a maximum factor of 2 under a strict climate target of 450 ppm CO₂ combined with a low graduation income, and by a factor of 6 under the 550 ppm target combined with a high graduation income. At the end of the century, however, total emissions of all Non-Annex B regions together may only increase by a factor of 1.6 to 3.3 compared to current emissions. Based on the IPCC scenarios, the population of these regions increases at a similar speed – by a factor of 2.3 to 3.2 between 1990 and 2100.

The total emissions of the Annex B regions decrease under all scenarios. They must cut them down by 50% in 2025 at the latest under the B2 scenario with a stabilization target of 450 ppm CO₂ and late participation of the Non-Annex B regions. The halving of total emissions may be postponed to 2085 if the world develops as described for the B2 scenario, but aims at a stabilization target of 550 ppm CO₂, and Non-Annex B region’s participation in a climate protection regime happens quite early because of a low graduation income. However, until 2100 Annex B emissions must be decreased under all scenarios so that they reach between 10 and 26% of the current emissions.

¹ In this study we have a strict focus on the long-term influence of the allocation scheme on regional emissions. It can therefore happen that the results partly conflict with current climate policy targets such as the Kyoto Protocol. For reasons of transparency we present the results of the approach without corrections which can easily be included in a further step.

Accumulated emissions

The difference between the accumulated reference emissions of a region and the accumulated emissions of a climate protection scenario of that region allows us to make a statement about this region's contribution to achieve a climate protection target.

All Annex B regions together may emit between 32% and 100% of their accumulated reference emissions. The first value is valid in an A2 world which aims at a 450 ppm CO₂ stabilization target and in which Non-Annex B regions begin to participate late because of a high graduation income. If, however, a B2 world aims at a CO₂ stabilization at 550 ppm and Non-Annex B regions start early with climate protection measures, it might happen that Annex B emissions never depart from the reference emissions pathway because they already show a decreasing tendency under the B2 scenario without any climate protection measures.

The contribution of the Non-Annex B regions to achieve a global climate target varies strongly from region to region. Depending on their future reference emissions, the rules of the allocation scheme and the strictness of the climate target, the regions of the Non-Annex B group may emit between 26% and 100% of their accumulated reference emissions between 1990 and 2100. Especially, a low graduation income combined with a strict climate target requires a saving of emissions which is comparable to that of the Annex B regions. Two to three regions out of ten, however, might be freed from any measures because of their very low income and per capita emissions. This is only the case if the climate target is set at 550 ppm CO₂ and the graduation income is high. Otherwise, these regions must also reduce their emissions - but late in the century.

CLIMATE IMPACT ASSESSMENT

In the climate impact assessment, we investigate the changes to two essential resources for human life, namely the global water supply and the agricultural productivity. We use two global models to perform these assessments which represent the state of the art of large scale modelling of global change in the water sector (Water – Global Assessment and Prognosis; WaterGAP 2.1) and the agricultural sector (Global Agro-Ecological Zones model; GAEZ). Again the long-term impacts of the IPCC A2 and B2 scenarios have been evaluated.

Global climate change

For the impact assessment we used temperature change and change of precipitation as input for the two models. Global temperature change between the climate normal period (1961-1990) and the 2070s was obtained from the general circulation model (GCM) HadCM3. Annual climate variability was considered by adding the annual variability of the historical 30-year period 1961-1990 to the mean change of temperature and precipitation of the GCM.

The mean global temperature change in the 2070s period as calculated by the HadCM3-model will be about 2.2°C under the B2 scenario and about 2.8°C under the A2 scenario. The climate sensitivity of the HadCM3 is 3°C for a doubling of the CO₂ concentration. Spatial patterns of precipitation change are very heterogeneous, with a strong increase of precipitation in the northern latitudes and a decrease of precipitation especially in the Mediterranean area.

Change of the global water situation

Both, a change of precipitation and a temperature increase will affect the future availability of water. Whether or not, however the water supply of a country's population will be threatened, also depends on the development of the water demand of this population. We therefore present the future water availability as well as the water demand as calculated by the WaterGAP-model.

Water availability

On the global level, the water availability will rise under changing climate conditions because a temperature increase leads to increasing water evaporation from the oceans. As a consequence, under the A2 scenario with its higher temperature increase, more water is available in the atmosphere than under the B2 scenario. However, the change in availability is distributed regionally very unevenly - comparable to the change in precipitation as the most important factor of a climate-induced change of water availability.

Water use

The future of global water use might differ substantially, depending on underlying scenario assumptions. Under the A2 scenario, water use will increase throughout the century due to increasing population and economic growth. Consequently, in 2075 water use will be 155% of the water use in 1995. Under the B2 scenario, the global population is growing at a lower rate but the per capita income is growing faster than under the A2 scenario. Since the B2 world is a more ecologically oriented world, it is assumed that the water use efficiency is increasing much faster than under the A2 scenario. As a consequence of all these assumptions, water use is continually decreasing under this scenario: water use in 2025 will be at 95% of the 1995 value and in 2075 it will reach 78% of the current value.

Water stress

As an indicator for the criticality of the future water situation, we use the ratio of water withdrawal to water availability (w.t.a.). If more than 40% of the available water is withdrawn from a river, a lake or the groundwater (w.t.a. > 0.4), we define it as a situation of high water stress. According to this definition, there was already high water stress during the 1990s in many countries around the Mediterranean Sea, in the Middle East and in some parts of Northern China. This was also the case for the South of Africa and the West of the North- and South American Continent.

Under the A2 scenario, in some of these region, especially in the North and East of the African continent, water stress will increase. Additionally, in some regions, e.g. in the Northeast of Brazil, regions with water stress will grow due to a combination of decreasing precipitation and increasing water use.

Under the B2 scenario, there will be an improvement in the water situation in some regions compared to the A2 scenario. This is the case for the North and the East of Africa but also for Eastern Europe. But there are also regions where the situation will get worse compared to the A2 scenario, as for example in the South of India. Since under the B2 scenario the change of water use in most regions is negligible, a change of criticality is mostly caused by a changing climate or more precisely, a change in precipitation.

Frequency of extreme runoff events

An extreme runoff event is defined here as the combined change of the coefficient of variation of runoff and the mean change in precipitation. Under the A2 scenario as well as under the B2 scenario, the frequency of extreme runoff events will increase. There are some areas under the B2 scenario which will be affected less by more frequent extremes compared to the A2 scenario. Since there are also areas where the extremes are more frequent under the B2 scenario compared to the A2 scenario, we cannot clearly state whether or not the lower level of greenhouse gas emissions under the B2 scenario will affect the frequency of extreme runoff events.

Change of agricultural productivity

From the global perspective the climate-induced change of the potential agricultural productivity may be very similar under the A2 and the B2 scenario. In the medium-term (2020s), the productivity (in terms of caloric production) decreases by 7% under the A2 scenario and by 6% under the B2 scenario. In the long-term (2070s), the productivity under the B2 scenario decreases by 17% which is still similar to the A2 scenario (-20%) although greenhouse gas emissions are only half that of the A2 scenario at the end of the century. Under both scenarios, half of all countries worldwide will be affected by a decrease in agricultural productivity of 10% or more.

In the medium-term, the Non-Annex B regions might have to bear stronger climate-induced decreases in productivity than the Annex B regions. Although greenhouse gas emissions under both scenarios are similar in the 2020s, the lower SO₂ emissions of the B2 scenario might induce a stronger climate change in the Southern hemisphere at that point in time.

In the long-term, the lower emissions of the B2 scenario are more advantageous for the Annex B regions than for the Non-Annex B regions. Agricultural systems in the Non-Annex B regions are more sensitive to small changes in temperature and precipitation since their current agricultural areas currently can often be found in areas that do not have

optimal growing conditions. For the Non-Annex B regions, long-term changes in productivity are therefore very similar under the A2 and the B2 scenario.

An optimisation of crops (in terms of crop selection) under future climate conditions can theoretically lead to an increase in global productivity by about one third. The potential for an increase in productivity are higher in the Non-Annex B regions – however, problems might remain because the increase in the population in these regions might be higher than the increase in potential productivity by an optimisation of crop types.

The frequency of crop failure is defined here as the number of years per decade when the potential productivity is 50% or lower than the current mean productivity. Under the A2 scenario, the frequency of these events might double or even triple in the countries around the Mediterranean Sea and in the South of the African continent because there might be more dry runoff extremes in the future. Under the B2 scenario, in about half of the countries that will see an increased frequency in crop failure under the A2 scenario, crop failures will be less frequent than under the A2 scenario; in the other 50% of the countries, however, the frequency of crop failures will be comparable to that of the A2 scenario or even higher.

CONCLUSIONS

The following conclusions can be drawn from these analyses:

1. In order to achieve a long-term stabilization of greenhouse gas concentrations, the global average per capita emissions must decrease to a level below one ton C-equivalents per person. If climate policy aims for a convergence of per capita emissions under the given rules mainly the Annex B regions but also many of the Non-Annex B regions will have to avoid a large share of their future emissions and will thus contribute substantially to achieve a stabilization target (see Table 1).
2. A combined analysis of the allocation scenarios and the climate impacts presented in this report indicates that particularly regions having an income around the average income of the Non-Annex B group might be burdened twice. It is expected that they start to participate in a climate protection regime relatively soon. In addition to this restriction of their emission rights, they will have to tolerate considerable consequences of changing climate conditions (see Table 1). As shown in earlier studies, the rise of greenhouse gas emissions in the last 30-40 years will lead to a considerable and unavoidable change in temperature and precipitation in the coming decades. These facts should be considered when the timing and extent of participation of Non-Annex B countries in a climate protection regime are being negotiated.
3. However, if Non-Annex B emissions rise too much, the consequence may be that the rate and extent of emission reductions of the Annex B regions will become simply unrealistic. In this situation, a crucial point in future climate negotiations will probably be (or remain) the future design of the flexibility mechanisms of the Kyoto Protocol. In contrast to the current situation, however, the further development of these mechanisms should predominantly focus on the long-term perspective. An important question here

is, for example, how the linkage between different flexibility mechanisms such as the clean development mechanism and emission trading can be designed in a way that it induces the development and introduction of new more efficient (carbon-free) energy technologies in the industrialized countries in the *short-term* so that these technologies are available in the poorer regions of the world in the *mid- to long term* thus allowing a sustainable energy production without a multiplying of future greenhouse gas emissions in these regions.

Table 1 Regional CO₂ emissions to achieve a stabilization of the atmospheric CO₂ concentration at 550 and 450 ppm, respectively, climate-induced change of the potential agricultural productivity and change of water availability under the IPCC SRES scenarios A2 and B2.

REGION	EMISSION MITIGATION						CLIMATE CHANGE IMPACTS					
	Stab. 550 ppm CO ₂		Stab. 450 ppm CO ₂		Δ Water availability ²⁾		Δ Agricult. produktivity		Range A2 - B2		A2 and B2	
	Start of measures [year]	Δ Cum. emissions [% of reference em.]	Start of measures [year]	Δ Cum. emissions [% of reference em.]	Start of measures [year]	Δ Cum. emissions [% of reference em.]	2020s	2070s	A2 - 2070s	B2 - 2070s	[change relative to 1961 -90]	
	Scenario A2-high	B2-low	Scenario A2-high	B2-low	Scenario A2-high	B2-low	2020s	2070s	A2 - 2070s	B2 - 2070s		
Annex B												
Former USSR	1990	1990	44 ¹⁾	100	1990	1990	32	59	94 - 95	86 - 85	↗	↗
Japan	1990	1990	44	100	1990	1990	32	59	105 - 104	104 - 104	↗	→
Canada	1990	1990	44	100	1990	1990	32	59	105 - 108	96 - 104	↗	↗
OECD Europe	1990	1990	44	100	1990	1990	32	59	95 - 93	77 - 85	↘	→
Eastern Europe	1990	1990	44	100	1990	1990	32	59	95 - 92	73 - 79	→	→
Oceania	1990	1990	44	100	1990	1990	32	59	97 - 89	87 - 88	→	↘
USA	1990	1990	44	100	1990	1990	32	59	85 - 90	71 - 79	↘	→
Non-Annex B												
Central America	2040	2000	57	71	2030	2000	40	58	91 - 93	80 - 78	↘	↘
Middle East	2030	1990	44	57	2020	1990	30	38	100 - 89	87 - 96	→	↘
Northern Africa	2040	2020	60	83	2030	2020	40	61	104 - 97	64 - 66	↘	↘
Eastern Africa	> 2100	2070	100	87	2075	2070	92	87	102 - 100	94 - 97	↗	↗
East Asia	2045	2005	68	69	2035	2005	49	58	89 - 94	80 - 79	↗	→
South America	2035	1990	62	48	2025	1990	43	44	90 - 96	77 - 79	↘	↘
Southern Asia	2060	2030	88	100	2045	2030	63	83	108 - 92	82 - 80	↗	→
Southern Africa	2045	2035	59	84	2035	2035	41	67	90 - 85	77 - 75	↘	↘
Southeast Asia	2060	2010	80	66	2035	2010	58	61	95 - 96	90 - 91	→	→
Western Africa	>2100	2065	100	92	2070	2065	89	92	100 - 101	94 - 97	→	→
World			58	85			42	61	93 - 94	80 - 83	↗	↗

¹⁾ For the distribution of future emission rights the Annex B regions were treated as one group which results in the same percentage of cumulated emission allowances. The change in cumulated CO₂ emissions represents the largest range of cumulated Annex B emissions between 1990 and 2100.

²⁾ The change in water availability was calculated on the basis of watersheds which often belong to more than one region. It was therefore not possible to regionally quantify the changes. Consequently, we analysed the changes visually. → means that in the future there will be no changes of water availability in the watersheds within a region or there will be as much watersheds with increasing water availability as watersheds with decreasing water availability. ↗ means that the water availability in most watersheds within a region will increase. ↘ means that the water availability in most watersheds within a region will decrease.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Diskussion des globalen Klimawandels findet derzeit hauptsächlich aus zwei Perspektiven statt.

- Zum Einen geht es um das Thema Verminderung von Treibhausgasemissionen, d.h. darum, wer zu welchem Zeitpunkt und in welchem Umfang zum Schutz des Klimas beiträgt und wie diese Beiträge am kosteneffizientesten zu realisieren sind.
- Zum Anderen geht es um die Diskussion, welche Regionen der Welt in welchem Ausmaß von den negativen Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein werden, wie Anpassungsmaßnahmen aussehen könnten und wie diese zu finanzieren wären.

Das Hauptziel dieser Studie besteht nun darin, diese beiden Perspektiven, d.h. die Belastung durch Klimaschutzmaßnahmen und die Belastung durch Auswirkungen des Klimawandels gemeinsam in den Blick zu nehmen, damit sie in Zukunft, trotz der beiden Themen eigenen Komplexität, auch in den Klimaverhandlungen gemeinsam Beachtung finden. In der vorliegenden Studie wird im ersten Teil ein (beispielhafter) Verteilungsansatz für zukünftige Emissionsanrechte vorgestellt und seine Auswirkungen auf die Beiträge einzelner Weltregionen zum langfristigen Schutz des Klimas beschrieben. Im zweiten Teil folgt eine modellgestützte Analyse der Auswirkungen zweier Szenarien für Treibhausgasemissionen auf das globale Klima und wichtige Sektoren wie die Landwirtschaft und die globale und regionale Wassersituation.

Basis: IPCC Szenarien für Treibhausgasemissionen

Alle Analysen dieses Berichtes beruhen auf zwei neuen Szenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), die als Referenzszenarien für den Zeitraum 1990-2100 keine gezielten Klimaschutzmaßnahmen berücksichtigen. Die Welt unter dem A2-Szenario ist durch eine regional differenzierte und auf ökonomisches Wachstum ausgerichtete Entwicklung gekennzeichnet. Das B2-Szenario beschreibt eine ebenfalls regional differenzierte Welt, deren Entwicklung in Zukunft aber eher ökologisch ausgerichtet ist. Die unterschiedliche Schwerpunktsetzung in der A2- und der B2-Welt (Fokus ökonomisches Wachstum im Gegensatz zum ökologischem Fortschritt als Grundeinstellung) führt bis zum Ende des Jahrhunderts zu großen Unterschieden bei der globalen Emission von Treibhausgasen. So vervierfachen sich die CO₂-Emissionen unter dem A2-Szenario im Zeitraum 1990 bis 2100. In einer Welt unter dem B2-Szenario steigen die CO₂-Emissionen langfristig etwa um den Faktor zwei und erreichen damit ein Niveau, das nur halb so hoch liegt wie unter dem A2-Szenario.

VERTEILUNG VON EMISSIONSANRECHTEN

Der Verteilungsansatz

Basierend auf der sozioökonomischen Entwicklung des A2- und des B2-Szenarios auf der Ebene der 17 Weltregionen des IMAGE 2.2 Modells (**I**ntegrated **M**odel to **A**ssess the **G**lo-

bal Environment) wird ein möglicher Ansatz für die weltweite Verteilung von Emissionsanrechten vorgestellt. Dieser Ansatz nimmt insbesondere die langfristige Perspektive in den Blick, die für eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre notwendig ist. Die Zuordnung von Emissionsrechten beruht auf drei einfachen Regeln, die auch diejenigen Länder, die bisher noch keine Klimaschutzverpflichtungen eingegangen sind (im folgenden Text Nicht-Annex B-Länder bzw. –Regionen genannt), schrittweise in ein globales Klimaschutzregime einbindet:

Regel 1: Die Pro-Kopf-Emissionen einer Nicht-Annex B-Region dürfen solange den Referenzemissionen folgen, bis diese Region ein Durchschnittseinkommen erreicht, bei dem davon ausgegangen wird, dass es sie befähigt, Klimaschutzmaßnahmen zu ergreifen. Die erste Maßnahme zum Schutz des Klimas besteht in einer Stabilisierung der Pro-Kopf-Emissionen, die zweite in einer Absenkung dieser Emissionen. Die Absenkung beginnt erst dann, wenn sich die Pro-Kopf-Emissionen einer Nicht-Annex B-Region dem Mittel der Pro-Kopf-Emissionen derjenigen Regionen angleichen, die sich bereits zu Klimaschutzmaßnahmen verpflichtet haben (Annex B-Regionen).

Regel 2: Für jedes Jahr wird eine global erlaubte Menge an Treibhausgasemissionen festgelegt, die sich z.B. aus dem weltweiten Emissionsverlauf ergibt, der zu einer langfristigen Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration führt.

Regel 3: Die Annex B-Regionen beginnen sofort mit Emissionskontrollen. Ihre Gesamtemissionsanrechte ergeben sich für jedes Jahr aus der Differenz zwischen den unter Regel 2 festgelegten globalen Emissionen und den aus Regel 1 ermittelten Gesamtemissionen aller Nicht-Annex B-Regionen.

Es werden, ausgehend von den zwei IPCC Referenzszenarien A2 und B2, die regionalen Emissionsanrechte für den Zeitraum 1990-2100 ermittelt, die zwei Klimaziele, nämlich eine Stabilisierung der CO₂-Konzentration bei 450 und 550 ppm CO₂ in der Atmosphäre, erreichbar machen.

Resultierende Pro-Kopf-Emissionen und Beginn von Klimaschutzmaßnahmen

Wird eine Stabilisierung der CO₂-Konzentration bei 450 ppm angestrebt, so bestehen im globalen Mittel langfristig Emissionsanrechte pro Person, die zwischen 20% (Bevölkerung A2-Szenario) und 29% (Bevölkerung B2-Szenario) des heutigen globalen Durchschnittswertes von 1.3 t C-Äquivalente pro Person liegen. Ein Stabilisierungsziel von 550 ppm CO₂ macht eine langfristige Absenkung auf 45% der heutigen Pro-Kopf-Emissionen unter dem A2-Szenario und auf 64% unter dem B2-Szenario notwendig. Unabhängig von Ausgangsszenario und Klimaschutzziel müssen die mittleren jährlichen Emissionen damit auf weniger als eine t C_{äq} pro Person abgesenkt werden.

Um diese Pro-Kopf-Emissionen langfristig zu erreichen, ist es erforderlich, dass die Annex B-Regionen nach dem vorgestellten Verteilungsansatz ihre Emissionen bis zum Jahr 2100,

je nach Szenario, auf 5-22% der jetzigen Emissionen vermindern. Ihre Emissionsanrechte pro Einwohner würden sich zwischen 2025 und 2050 halbieren.

Die einzelnen Nicht-Annex B-Regionen beteiligen sich an einem Klimaschutzregime indem sie ihre Pro-Kopf-Emissionen erst stabilisieren und dann absenken. Dies geschieht umso früher, (1) je schneller ihr durchschnittliches Einkommen eine vorzuziehende, d.h. auszuhandelnde Grenze erreicht, (2) je schneller ihre Pro-Kopf-Emissionen sich denen der Annex B-Regionen annähern und (3) je strikter ein (ebenfalls auszuhandelndes) Klimaschutzziel formuliert ist.

Die aus diesen Regeln resultierenden Startzeitpunkte für Maßnahmen in den Nicht-Annex B-Regionen liegen zwischen „sofort“ (1990)² und 2080, wenn das Eintrittseinkommen niedrig angesetzt wird, d.h. in diesem Szenario, wenn es dem Durchschnittseinkommen der Annex B-Region mit dem geringsten Einkommen im Jahr 1990 entspricht. Die Nicht-Annex B-Regionen beginnen zwischen 2020 und 2100 bzw. noch später mit Klimaschutzmaßnahmen, wenn ein hohes Einkommen angesetzt wird, das dem Durchschnittseinkommen aller Annex B-Regionen im Jahr 1990 entspricht. Im Falle eines frühen Maßnahmenbeginns, d.h., wenn das Schwelleneinkommen niedrig angesetzt wird, dürften die Pro-Kopf-Emissionen bei neun von zehn Regionen einen Wert von 1.2 t C_{äq} pro Person nie überschreiten. Ein später Maßnahmenbeginn, d.h. ein hohes Schwelleneinkommen, erlaubt je nach Region, Maximalemissionen zwischen 0.4 und 2.5 t C_{äq} pro Person.

Gesamtemissionen

Die Gesamtmenge an Treibhausgasen, die die Nicht-Annex B-Regionen unter den gegebenen Regeln pro Jahr maximal emittieren dürfen, variieren, je nach Höhe der aktuellen Pro-Kopf-Emissionen und der Wirtschaftsstärke einer Region. Als Folge der Fairnessprinzipien des Verteilungsschemas darf die Nicht-Annex B-Region mit dem geringsten Einkommen und den niedrigsten Pro-Kopf-Emissionen (Ostafrika) ihre Gesamtemissionen maximal auf das 30-fache der heutigen Emissionen erhöhen, wenn in einer B2-Welt eine CO₂-Stabilisierung bei 450 ppm angestrebt wird. Beträgt das Stabilisierungsziel 550 ppm CO₂ und wird das Einstiegseinkommen für die Nicht-Annex B-Regionen hoch angesetzt, dann dürfen die Gesamtemissionen dieser Region sogar um einen Faktor 47 ansteigen, was gleichbedeutend ist mit dem völligen Fehlen von Klimaschutzmaßnahmen. Am anderen Ende des Spektrums der Nicht-Annex B-Regionen darf die Region mit dem derzeit höchsten Durchschnittseinkommen (Südamerika) ihre Gesamtemissionen maximal um den Faktor zwei erhöhen, wenn ein striktes Klimaziel von 450 ppm angestrebt wird und das Einstiegseinkommen niedrig angesetzt wird. Ein schwächeres Stabilisierungsziel (hier 550 ppm CO₂) und ein hohes Einstiegseinkommen erlaubt dagegen einen maximalen Anstieg auf das sechsfache der 1990er Emissionen. Gegen Ende des Jahrhunderts dürfen die Emis-

² In dieser Studie geht es schwerpunktmäßig um den Einfluss eines Verteilungsschemas auf die langfristigen regionalen Emissionen. Es kann daher vorkommen, dass die Ergebnisse gegenwärtigen Klimaschutzvereinbarungen, wie z.B. dem Kyoto-Protokoll widersprechen. Aus Gründen der Transparenz wird der Ansatz ohne Korrekturkriterien angewendet, die aber leicht nachträglich einzuführen sind.

sionen aller Nicht-Annex B-Regionen zusammen noch maximal das 1.6 bis 3.3-fache der heutigen Emissionen betragen. Die Bevölkerung dieser Regionen erhöht sich vergleichbar – sie wächst zwischen 1990 und 2100 um einen Faktor 2.3 bis 3.2.

Die Emissionsanrechte der Annex B-Regionen nehmen unter allen Szenarien ab. Eine Halbierung der Emissionen ist bereits bis zum Jahr 2025 notwendig, wenn in einer B2-Welt ein Stabilisierungsziel von 450 ppm angestrebt wird und die Nicht-Annex B-Regionen durch ein hohes Einstiegseinkommen erst spät beginnen, sich an einem Klimaschutzregime zu beteiligen. Eine 50%-ige Reduktion kann bis 2085 verschoben werden, wenn sich die Welt wie im B2-Szenario entwickelt, ein moderates Stabilisierungsziel von 550 ppm CO₂ anvisiert wird und die Nicht-Annex B-Regionen durch ein niedriges Einstiegseinkommen früh an einem Klimaschutzregime partizipieren. Allerdings ist langfristig unter allen Szenarien eine Reduktion der Annex B-Gesamtemissionen auf 10 bis 26% der heutigen Emissionen notwendig.

Kumulierte Gesamtemissionen

Die Differenz zwischen den kumulierten Referenzemissionen einer Region und den kumulierten Emissionen derselben Region unter einem Klimaschutzszenario erlaubt eine Aussage darüber, in welchem Ausmaß diese Region im Laufe des Jahrhunderts zum Erreichen eines Klimaschutzzieles beiträgt.

Die Gesamtheit der Annex B-Regionen darf nach dem vorgestellten Verteilungsansatz über das Jahrhundert zwischen 32% und 100% der Emissionen des Referenzszenarios emittieren. Der niedrigere Wert trifft zu, wenn, ausgehend vom A2-Szenario bei später Beteiligung der Nicht-Annex B-Regionen eine Stabilisierung bei 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre angestrebt wird. Wird dagegen in einer B2-Welt bei früher Beteiligung der Nicht-Annex B-Regionen eine Stabilisierung der CO₂-Konzentration bei 550 ppm anvisiert, müssen die Annex B-Gesamtemissionen nicht vom Referenzpfad der Emissionen abweichen – in einer ökologisch orientierten B2-Welt weist der Emissionspfad der Annex B-Regionen auch ohne explizite Klimaschutzmaßnahmen zurückgehende Werte auf.

Bei den Nicht-Annex B-Regionen variiert der Beitrag zum Klimaschutz von Region zu Region. Je nach dem Verlauf ihrer zukünftigen Referenzemissionen, der Wahl des Einstiegskriteriums für das Verteilungsschema und der Strenge des Klimaschutzzieles dürfen die einzelnen Nicht-Annex B-Regionen zwischen 26% und 100% der kumulierten Emissionen des Referenzszenarios emittieren. Insbesondere ein niedriges Einstiegseinkommen in Kombination mit einem strikten Klimaziel macht bei einigen reicheren Nicht-Annex B-Regionen Emissionseinsparungen notwendig, die sich in der gleichen Größenordnung bewegen wie die der Annex B-Regionen. Andererseits kann es, je nach Anwendung der Regeln des Verteilungsschemas auch passieren, dass zwei bis drei Regionen aufgrund ihres sehr niedrigen Einkommens und niedriger Pro-Kopf-Emissionen in diesem Jahrhundert gar keine Klimaschutzmaßnahmen ergreifen müssen. Dies trifft allerdings nur dann zu, wenn ein moderateres Stabilisierungsziel von 550 ppm CO₂ angestrebt wird und das Ein-

stiegseinkommen relativ hoch angesetzt wird. Anderenfalls müssen diese Regionen, wenn auch erst spät im Jahrhundert, ebenfalls mit Klimaschutzmaßnahmen beginnen.

AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS

Die Analyse zu den Folgen des Klimawandels befasst sich mit den Veränderungen zweier sehr wichtiger Ressourcen, nämlich der globalen Wasserversorgung und der landwirtschaftlichen Produktivität. Für diese Analysen werden zwei globale Modelle angewendet, die den „state-of-the-art“ in der Wassermodellierung (Water – Global Assessment and Prognosis; WaterGAP 2.1) und der Modellierung der landwirtschaftlichen Produktivität (Global Agro-Ecological Zones Modell; GAEZ) im globalen Maßstab repräsentieren. Es werden die Klimafolgen des A2- und des B2-Emissionsszenarios untersucht.

Globaler Klimawandel

Für die Auswirkungsanalyse wurden Temperatur- und Niederschlagsänderungen als Eingabegrößen für das Wassermodell und das landwirtschaftliche Produktivitätsmodell benutzt. Die globale Änderung des Klimas zwischen der Klimanormalperiode (1961-90) und der Periode 2070-79 wird von einem „General Circulation Model“ (GCM, HadCM3) bereitgestellt. Bei der Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels wird die jährliche Variabilität des Klimas berücksichtigt. Das veränderte Klima mit jährlicher Variabilität wird durch Überlagerung der mittleren Änderung von Temperatur und Niederschlag der 2070er Jahre mit der jährlichen Variabilität der 30-Jahresperiode 1961-90 erzeugt.

Der mittlere globale Temperaturanstieg der 2070er Periode beträgt relativ zur Klimanormalperiode etwa 2.2°C für das B2-Szenario und 2.8°C für das A2-Szenario. Die Klimasensitivität des HadCM3 liegt bei 3°C für eine Verdopplung der CO₂-Konzentration. Die Niederschlagsänderungen fallen räumlich sehr heterogen aus. Nach den Berechnungen des HadCM3-Modells findet vor allem in den nördlichen Breitengraden eine Erhöhung der Niederschlagsmengen statt, während sich sehr ausgeprägte Niederschlagsrückgänge rund um das Mittelmeer finden.

Veränderung der Wassersituation

Die zukünftige weltweite Wasserversorgung wird sowohl von einer Veränderung des Klimas als auch der Veränderung des menschlichen Wasserbedarfs geprägt sein.

Wasserverfügbarkeit

Global gesehen nimmt die verfügbare Wassermenge bei beiden Szenarien durch die Erhöhung der Temperatur und die damit einhergehende stärkere Wasserverdunstung aus den Ozeanen stetig zu. Dies ist für das A2-Szenario, aufgrund des stärkeren Temperaturanstiegs stärker der Fall als für das B2-Szenario. Allerdings kann die Veränderung der Wasserverfügbarkeit regional sehr stark variieren, da die Veränderung der Niederschlagsmengen regional sehr unterschiedlich ausfallen.

Wassernutzung

Die globale Wassernutzung verläuft, in Abhängigkeit vom Szenario, sehr unterschiedlich. Unter dem A2-Szenario steigt die Wasserentnahme aufgrund von Bevölkerungszuwachs und wirtschaftlichem Wachstum kontinuierlich an und liegt bis zum Jahr 2075 bei 155% der Entnahme des Jahres 1995. Unter dem B2-Szenario wächst die Weltbevölkerung weniger stark, dafür aber die wirtschaftliche Aktivität bzw. das Einkommen, um so stärker. Da dem B2-Szenario eine ökologische Grundhaltung zugrunde liegt, die mit einer stark verbesserten Nutzungseffizienz für die Ressource Wasser einhergeht, nimmt die Wasserentnahme unter diesem Szenario kontinuierlich ab: Sie liegt 2025 bei 95% bzw. 2075 bei 78% der Werte des Jahres 1995.

Wasserstress

Als Indikator für die Kritikalität der zukünftigen Wassersituation wird das Verhältnis von entnommener zu verfügbarer Wassermenge verwendet. Überschreitet dieses Verhältnis den von der Welt-Wasser-Kommission empfohlenen Wert von 0,4, so wird von hohem Wasserstress gesprochen. Ausgehend von diesem Schwellenwert, war schon in den 1990er Jahren die Wassersituation insbesondere in den Anrainerstaaten des Mittelmeers, im Mittleren Osten bis hin zu weiten Teilen Nordchinas als kritisch (=hoher Wasserstress) einzustufen. Auch im Süden Afrikas sowie im Westen des süd- und des nordamerikanischen Kontinents ist die Wassersituation nach unseren Berechnungen schon heute angespannt.

Unter dem A2-Szenario würde sich die langfristige Wassersituation in weiten Teilen der Welt, die schon heute mit kritischen Werten konfrontiert sind, verschärfen. Außerdem kann in einigen Gebieten, die nach unseren Berechnungen heute noch nicht unter Wasserstress zu leiden haben, eine Kombination aus Klimawandel und höherem Wasserverbrauch in Zukunft zu hohem Wasserstress führen.

Die Bedingungen des B2-Szenarios führen, im Vergleich zum A2-Szenario, nur insoweit zu einer Verbesserung der Wassersituation, dass in erster Linie keine Erhöhung und in einigen wenigen Regionen sogar eine Verringerung des Wasserstress auftritt. Da sich unter diesem Szenario (mit Ausnahme einiger Regionen Afrikas) die Wasserentnahme im Verhältnis zu heute nur wenig verändert, spiegeln die Änderungen der Kritikalitätsklasse eher die Änderungen des Klimas, oder genauer der Niederschlagsmengen wider, als dies unter dem A2-Szenario der Fall ist.

Häufigkeit extremer Abflüsse

Sowohl unter dem A2- als auch dem B2-Szenario wird die Häufigkeit extrem hoher und niedriger Abflüsse zunehmen. Zwar gibt es unter dem B2-Szenario Regionen, die weniger von einer Zunahme der Extreme betroffen sind als unter dem A2-Szenario. Allerdings tritt auch der umgekehrte Fall auf. D.h. für Regionen, für die unter dem A2-Szenario keine Zunahme berechnet wurde, könnten die Extreme unter dem B2-Szenario durchaus zunehmen. Es lässt sich daher keine eindeutige Aussage darüber machen, ob der geringer ausfallende

mittlere Klimawandel des B2-Szenarios wirklich zu einer geringeren Zunahme von Extremen bei den zukünftigen Abflüssen führt.

Veränderung der landwirtschaftlichen Produktivität

Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse sind, neben weiteren Standortfaktoren, wie z.B. die Bodenqualität, entscheidende Größen für die Höhe landwirtschaftlicher Ernteerträge. So wurde mit dem GAEZ-Modell auf globaler Ebene bereits für die 2020er Jahre eine klimabedingte Verringerung der landwirtschaftlichen Produktivität berechnet. Für das A2-Szenario wurde ein Rückgang um 7% und für das B2-Szenario ein Rückgang um 6% ermittelt. Langfristig (2070er Jahre) liegt die Verminderung unter dem B2-Szenario, trotz seiner nur halb so hohen Treibhausgasemissionen, noch bei -17%, während für das A2-Szenario eine Verminderung um 20% ermittelt wurde. Damit ist die klimabedingte Veränderung der potentiellen landwirtschaftlichen Produktivität unter dem A2- und dem B2-Szenario aus globaler Perspektive sehr ähnlich. Außerdem kann unter beiden Szenarien langfristig weltweit nahezu die Hälfte aller Länder von einem Rückgang der landwirtschaftlichen Produktivität um mehr als 10% betroffen sein.

In den Annex B-Regionen sind die Auswirkungen unter dem B2-Szenario langfristig geringer als unter dem A2-Szenario. In einigen Regionen, wie z.B. Kanada und Japan sind unter dem B2-Szenario sogar klimabedingte Produktivitätszuwächse möglich. Die landwirtschaftliche Produktivität in den Nicht-Annex B-Regionen reagiert sehr sensitiv auf kleine Veränderungen von Temperatur und Niederschlag, da der Anbau schon heute oft in Gebieten stattfindet, die klimatisch bedingt nur eine marginale Produktivität erlauben. Für die Nicht-Annex B-Regionen finden sich daher bereits für das B2-Szenario Produktivitätsrückgänge, die vergleichbar hoch sind, wie unter dem A2-Szenario.

Mittelfristig werden für die Nicht-Annex B-Regionen unter dem B2-Szenario stärkere klimabedingte Rückgänge der landwirtschaftlichen Produktivität berechnet als unter dem A2-Szenario. Dies ist wahrscheinlich auf den sogenannten Sulphat-Effekt zurückzuführen, bei dem die atmosphärische Erwärmung aufgrund hoher SO₂-Emissionen gedämpft wird. So werden für das B2-Szenario vor allem in der südlichen Hemisphäre geringere SO₂-Emissionen berechnet als für das A2-Szenario. Diese geringeren SO₂-Emissionen könnten im ersten Drittel des Jahrhunderts eine stärkere Ausprägung des Klimawandels und damit einen stärkeren Rückgang der landwirtschaftlichen Produktivität verursachen, als unter dem A2-Szenario.

Die Häufigkeit von Missernten kann sich unter dem A2-Szenario langfristig vor allem bei Ländern im Mittelmeerraum und im Süden des afrikanischen Kontinentes verdoppeln und zum Teil verdreifachen. Sie wird in dieser Studie definiert als die Anzahl von Jahren innerhalb einer Zehnjahresperiode, in der die landwirtschaftliche Produktivität eines Landes um 50% und mehr vom Mittelwert der Klimanormalperiode abweicht. Die geringeren Treibhausgasemissionen des B2-Szenarios führen in etwa der Hälfte der 38 Länder, die unter dem A2-Szenario von einer Erhöhung der Häufigkeit betroffen sind, zu einer gerin-

geren Häufigkeit dieser Phänomens. In der anderen Hälfte der Länder bleibt die Häufigkeit allerdings gleich groß oder steigt sogar an.

Eine mögliche Anpassung der landwirtschaftlichen Produktion an den Klimawandel besteht darin, Feldfrüchte anzubauen, die besser an ein wärmeres und unter Umständen trockeneres Klima angepasst sind. Erste Berechnungen mit dem GAEZ-Modell deuten darauf hin, dass eine Optimierung der Feldfruchtart im Hinblick auf das zukünftige Klima weltweit und langfristig zu einer Steigerung der potentiellen Produktion um rund ein Drittel führen könnte. Die Steigerungspotentiale durch diese Art der Anpassung fallen in den Nicht-Annex B-Regionen höher aus als in den Annex B-Regionen. Allerdings ist der Produktivitätsanstieg nicht ausreichend, um den zunehmenden Nahrungsmittelbedarf durch den Bevölkerungszuwachs in diesen Regionen auszugleichen.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Aus den Ergebnissen der Modellrechnungen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Zum Erreichen einer langfristigen Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen müssen die mittleren globalen Pro-Kopf-Emissionen sowohl unter dem A2- als auch dem B2-Szenario drastisch abgesenkt werden. Wird eine Angleichung der Pro-Kopf-Emissionen unter den hier vorgeschlagenen Regeln angestrebt, müssen vor allem die Annex B-Regionen, aber auch viele der Nicht-Annex B-Regionen auf einen großen Teil ihrer zukünftigen Emissionen verzichten (vgl. Tabelle 2, linke Spalten) und damit zum Erreichen eines Stabilisierungszieles beitragen.
2. Eine gemeinsame Betrachtung der Ergebnisse für die Verteilung von Emissionsanrechten und der Klimafolgenszenarien gibt einen deutlichen Hinweis darauf, dass besonders die Nicht-Annex B-Regionen mit einem, innerhalb ihrer Gruppe, mittleren Einkommen, durch die Verpflichtung zu Klimaschutzmaßnahmen und Klimaauswirkungen mittel- bis langfristig eine doppelte Bürde zu tragen haben könnten (vgl. Tabelle 2). Es wäre wünschenswert, dass sie sich in den kommenden Jahren, spätestens Jahrzehnten, aktiv an Klimaschutzmaßnahmen beteiligen. Gleichzeitig werden sie zunehmend mit den negativen Folgen der veränderten Klimabedingungen umgehen müssen. Wie schon in früheren Studien gezeigt wurde, wird der Anstieg der Treibhausgasemissionen der letzten 30-40 Jahre noch in den kommenden Jahren bis Jahrzehnten zu nicht mehr vermeidbaren Änderungen von Temperatur und Niederschlägen führen. Dies sollte angemessen berücksichtigt werden, wenn Zeitpunkt und Ausmaß der Einbindung von Nicht-Annex B-Staaten in ein Klimaschutzregime ausgehandelt werden.
3. Steigen die Treibhausgasemissionen der Nicht-Annex B-Staaten unkontrolliert an, könnten die Anforderungen an Geschwindigkeit und Umfang der Emissionsminderung in den Annex B-Staaten unrealistisch hoch werden. Soll in dieser Situation trotzdem noch ein ambitioniertes Klimaschutzziel umgesetzt werden, ist absehbar, dass die Kosteneffizienz der Einsparmaßnahmen und damit die Ausgestaltung der Flexibilitätsmechanismen des Kyoto-Protokolls auch weiterhin eine herausragende

Rolle spielen werden. Allerdings wäre bei der Ausgestaltung dieser Mechanismen ein sehr viel stärkerer Fokus auf langfristige Reduktionserfordernisse wünschenswert und notwendig. So ist z.B. eine wichtige Frage in Bezug auf die Ausgestaltung der Flexibilitätsmechanismen, wie das Zusammenwirken von Emissionshandel, „Clean Development Mechanism“ und anderen klima- und energiepolitischen Instrumenten so gestaltet werden kann, dass *kurzfristig* Anreize für die Erforschung und Entwicklung neuer Energietechnologien in den Industrieländern gesetzt werden, so dass diese *mittel- und langfristig* so kostengünstig und soweit erprobt sind, dass auch in den ärmeren Regionen der Welt eine nachhaltige Energieversorgung gewährleistet ist, ohne dass sich dort die Treibhausgasemissionen vervielfachen.

Tabelle 2 Regionale Emissionsanreichte für eine Stabilisierung der CO₂-Konzentration bei 550 bzw. 450 ppm sowie klimabedingte regionale Veränderung der potentiellen landwirtschaftlichen Produktivität und der Wasserverfügbarkeit unter dem A2- und dem B2-Szenario des IPCC.

REGION	EMISSIONSKONTROLLEN				FOLGEN DES KLIMAWANDELS						
	Ziel 550 ppm CO ₂		Ziel 450 ppm CO ₂		Δ Landw. Produktivität		Δ Wasserverfügbarkeit ²⁾				
	Maßnahmenbeginn	Δ Kum. Emissionen	Maßnahmenbeginn	Δ Kum. Emissionen	Spanne A2 - B2	A2 bzw. B2	[Änderung rel. zu 1961-90]				
	[Jahr]	[% d. Referenzem.]	[Jahr]	[% d. Referenzem.]	[% d. Prod. rel. zu 1961-90]	[% d. Prod. rel. zu 1961-90]	2020er	2070er	A2 - 2070er	B2 - 2070er	
	Szenario	A2-high	B2-low	A2-high	B2-low	A2-high	B2-low				
Annex B											
Ehem. UDSSR	1990	1990	44 ¹⁾	100	1990	1990	59	94 - 95	86 - 85	↗	↗
Japan	1990	1990	44	100	1990	1990	59	105 - 104	104 - 104	↗	→
Kanada	1990	1990	44	100	1990	1990	59	105 - 108	96 - 104	↗	↗
OECD Europa	1990	1990	44	100	1990	1990	59	95 - 93	77 - 85	↘	→
Osteuropa	1990	1990	44	100	1990	1990	59	95 - 92	73 - 79	→	→
Ozeanien	1990	1990	44	100	1990	1990	59	97 - 89	87 - 88	→	↘
USA	1990	1990	44	100	1990	1990	59	85 - 90	71 - 79	↘	→
Nicht-Annex B											
Mittelamerika	2040	2000	57	71	2030	2000	58	91 - 93	80 - 78	↘	↘
Mittl. Osten	2030	1990	44	57	2020	1990	38	100 - 89	87 - 96	→	↘
Nordafrika	2040	2020	60	83	2030	2020	61	104 - 97	64 - 66	↘	↘
Ostafrika	>2100	2070	100	87	2075	2070	87	102 - 100	94 - 97	↗	↗
Ostasien	2045	2005	68	69	2035	2005	58	89 - 94	80 - 79	↗	→
Südamerika	2035	1990	62	48	2025	1990	44	90 - 96	77 - 79	↘	↘
Südästen	2060	2030	88	100	2045	2030	83	108 - 92	82 - 80	↗	→
Südl. Afrika	2045	2035	59	84	2035	2035	67	90 - 85	77 - 75	↘	↘
Südostasien	2060	2010	80	66	2035	2010	61	95 - 96	90 - 91	→	→
Westafrika	>2100	2065	100	92	2070	2065	92	100 - 101	94 - 97	→	→
Welt			58	85			61	93 - 94	80 - 83	↗	↗

¹⁾ Die Annex B-Regionen werden für die zukünftige Verteilung der Emissionsanreichte als eine Gruppe behandelt, so dass alle Regionen den gleichen Anteil der kumulierten Referenzemissionen aufweisen. Der regionale Maßnahmenbeginn und die Änderung der kumulierten CO₂-Emissionen repräsentieren im Vergleich aller Szenarien die größte Spannweite der kumulierten Annex B-Emissionen im Zeitraum 1990-2100.

²⁾ Die Veränderung der Wasserverfügbarkeit wird auf der Basis großer Wassereinzugsgebiete berechnet, die z.T. mehreren Weltregionen angehören. Die Veränderungen relativ zur Klimanormalperiode lassen sich daher nur visuell abschätzen. Es bedeuten im Einzelnen: →: Es finden keine Veränderungen der Wasserverfügbarkeit statt oder es finden sich sowohl Einzugsgebiete mit Zunahme als auch Einzugsgebiete mit Abnahme der Wasserverfügbarkeit innerhalb einer Region. ↗: Die Wasserverfügbarkeit nimmt in der Mehrheit der Einzugsgebiete einer Region zu. ↘: Die Wasserverfügbarkeit nimmt in der Mehrzahl der Einzugsgebiete einer Region ab.

1. EINLEITUNG

Das Klimaschutzprotokoll von Kyoto aus dem Jahr 1997 kann in Kraft treten, sobald das russische Parlament den Vertrag ratifiziert hat. Das Protokoll in seiner jetzigen Fassung behandelt schwerpunktmäßig die Regeln, nach denen der Einstieg in einen weltweiten Klimaschutz am effizientesten umgesetzt werden kann. Außerdem wird im Kyoto-Protokoll relativ zu 1990 eine 5.2%-ige Reduktion der Treibhausgasemissionen der Industrieländer und der Länder mit Volkswirtschaften im Umbruch (im Folgenden Annex B-Staaten genannt) bis zum Zeitraum 2008-2012 festgeschrieben. Diese Verpflichtungen sind allerdings erst ein bescheidener erster Schritt in Richtung Klimaschutz. Dies liegt zum Einen an der sehr moderaten Höhe der Reduktionsverpflichtungen. Es liegt außerdem daran, dass die Gruppe der Länder, die sich zu verpflichtenden Maßnahmen bereit erklärt haben, für „nur“ etwa die Hälfte der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich sind. Für die Verpflichtungszeiträume nach 2012 sind weder Beginn, noch Umfang der Reduktionsmaßnahmen, oder die Beteiligungen an einem Klimaschutzregime klar. Ein großer Teil der Verhandlungsarbeit, wie auch der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen ist also noch zu leisten.

Eine schwierige, aber wichtige Frage in den kommenden Verhandlungen wird die nach der Beteiligung derjenigen Staaten an einem Klimaschutzregime sein, die bisher nicht im Annex B des Kyoto Protokolls aufgeführt sind (im Folgenden als „Nicht-Annex B-Staaten“ bezeichnet). Da für viele dieser Staaten langfristig sowohl ein kräftiges Bevölkerungs- als auch Wirtschaftswachstum prognostiziert wird, ist es ohne ein gezieltes Gegenlenken möglich, dass ihre Treibhausgasemissionen in ähnlichem Ausmaß ansteigen wie dies im vergangenen Jahrhundert in den Industrieländern zu beobachten war. Eine Einschränkung der Treibhausgasemissionen stellt aus der Sicht vieler Staaten, sowohl der Annex B- als auch der Nicht-Annex B-Gruppe, eine potentielle Behinderung des wirtschaftlichen Wachstums dar. Es soll aber allen Staaten, wie in Artikel 2 der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) vereinbart, ein nachhaltiges Wirtschaftswachstum ermöglicht werden. Aus diesem Widerspruch heraus ist es notwendig, ein Regelwerk für die Verteilung von Emissionsanrechten zu entwickeln, das (1) zu einem effektiven globalen Klimaschutz führt und (2) eine Verteilung der Lasten der Klimaschutzmaßnahmen gewährleistet, die sowohl für die Annex B- als auch die Nicht-Annex B-Staaten akzeptabel ist.

In der vorliegenden Studie wird ein Verteilungsansatz vorgestellt, der Prinzipien und Variablen berücksichtigt, die in der Literatur als für den Verhandlungsprozess wichtig dargestellt werden. Dieser Verteilungsansatz erlaubt es, den Beginn und Umfang von Emissionskontrollen in einzelnen Regionen der Welt so festzulegen, dass die unterschiedlichen Ausgangsbedingungen der einzelnen Regionen auf transparente Weise berücksichtigt werden. Die Folgen dieser Regeln für regionale Emissionsanrechte werden im folgenden Schritt quantifiziert, indem sie auf zwei neue Emissionsszenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) angewendet werden. Das Ergebnis besteht in einer Spanne regionaler Emissionspfade für Treibhausgase bis zum Jahr 2100.

Da auch der Klimawandel Auswirkungen auf eine nachhaltige Entwicklung haben wird, besteht der zweite Schritt der Analyse in einer Abschätzung der Klimaauswirkungen der zwei IPCC-Emissionsszenarien A2 und B2. Es werden die langfristigen Auswirkungen des Klimawandels und der sozioökonomischen Veränderungen des A2- und B2-Szenarios auf die weltweite Wassersituation quantitativ abgeschätzt. Für diese Analyse wurde das globale Wassermodell WaterGAP 2.1 (Water – Global Assessment and Prognosis) eingesetzt, das am Wissenschaftlichen Zentrum für Umweltsystemforschung der Universität Kassel entwickelt wurde.

Eine weitere Auswirkungsanalyse beschäftigt sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Produktivität. Mithilfe des GAEZ-Modells (Global Agro-Ecological Zones Modell), das am International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) in Österreich entwickelt wurde (Fischer et al., 2002), wird die klimabedingte Veränderung der landwirtschaftlichen Produktivität weltweit abgeschätzt.

Für beide Auswirkungskategorien (Wasser und Landwirtschaft) werden Klimadaten verwendet, die eine jährliche Variabilität von Temperatur und Niederschlag berücksichtigen. Auf diese Weise ist es möglich, erste Aussagen über eine zukünftige Veränderung der Häufigkeit von Extremereignissen im Bereich Wasser und Landwirtschaft zu machen, die in diesem Bericht ebenfalls präsentiert werden.

2. DIE NEUEN EMISSIONSSZENARIEN DES IPCC

2.1 Überblick

Im Jahr 2000 wurden vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) vier neue Gruppen von Szenarien für die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im 21. Jahrhundert veröffentlicht (IPCC, 2000). Diese Szenarien werden nach dem „Special Report on Emission Scenarios“ SRES-Szenarien genannt. Höhe und zeitlicher Verlauf ihrer Emissionen unterscheiden sich zum Teil erheblich von denen der IS92-Szenarien, die bisher als Grundlage vieler Analysen zum Thema Klimaschutz dienten. So wird das zukünftige Bevölkerungswachstum für die SRES-Szenarien generell als langsamer eingeschätzt, als es für die IS92 Szenarien der Fall war. Außerdem werden in den neuen Szenarien, im Gegensatz zu den IS92-Szenarien, Trends gebrochen. So nimmt in zwei von vier der SRES-Szenarien die globale Bevölkerung, als ein wichtiger Einflussfaktor für den Energieverbrauch und damit die Treibhausgasemissionen, zwar mittelfristig zu, erreicht dann aber ein Maximum, um bis zum Jahr 2100 langsam wieder abzunehmen.

Die Szenariogruppe des IPCC hat insgesamt vier globale Handlungsstränge oder Storylines entwickelt, die in narrativer Form mögliche Zukünfte der Welt bis zum Jahr 2100 entwerfen. Diese vier Storylines beschreiben im Wesentlichen Annahmen über die ökonomische, demographische, soziale und technologische Entwicklung der Welt, die als Basis für eine nachfolgende Quantifizierung von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen dienen. Aus diesen Handlungssträngen wurden vier Gruppen von Szenarien abgeleitet, die bezeichnet werden als A1-, A2-, B1- und B2-Szenariofamilie. Zwei wesentliche Unterschiede zwischen ihnen sind in Abbildung 1 angedeutet: So weisen die Storylines der Szenarien A1 und A2 eine relativ stärkere Orientierung auf das ökonomische Wachstum hin auf, als dies bei den Szenarien B1 und B2 der Fall ist, wo der Fokus der Entwicklung eher auf einer ökologisch-nachhaltig handelnden Gesellschaft liegt. Ein weiterer Unterschied besteht in dem Ausmaß, in dem ein soziokultureller und technologischer Austausch zwischen den Regionen stattfindet. In den Storylines für die A1- und B1-Welt wird von einer Globalisierungstendenz der Regionen ausgegangen, so dass sich im Verlauf der Szenarioperiode die technologischen Standards, aber auch die Pro-Kopf-Einkommen der Regionen stärker angleichen als in der A2- und B2-Welt, die eher eine regional differenzierte Entwicklung aufweisen.

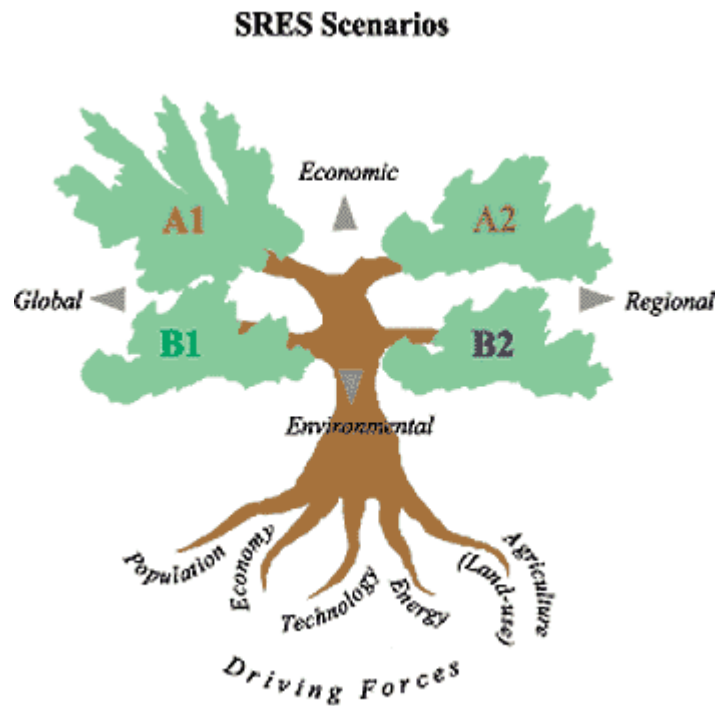


Abbildung 1 Schematische Übersicht über die Entwicklungsschwerpunkte der Storylines der vier Szenariofamilien der IPCC-Szenarien.

Die *A1-Szenariofamilie* beschreibt eine Zukunft mit starkem wirtschaftlichem Wachstum und einer Weltbevölkerung, die gegen Mitte des Jahrhunderts ein Maximum erreicht und danach bis zum Jahr 2100 abnimmt. Ein weiteres Kennzeichen ist die schnelle Einführung neuer und effizienterer Technologien. Eines der Hauptthemen in dieser Welt ist die Annäherung zwischen den Weltregionen durch einen zunehmenden kulturellen und sozialen Austausch, der einhergeht mit einer starken Verminderung der Unterschiede im Pro-Kopf-Einkommen (vgl. Tabelle 3). Für diese Szenariofamilie gibt es drei Untergruppen, die sich in der technologischen Entwicklung ihrer Energiesysteme unterscheiden: A1FI, eine Welt mit ausgeprägter Nutzung fossiler Energieträger; A1T eine technologisch orientierte Welt, in der fossile Energieträger nur eine untergeordnete Rolle spielen, sowie A1B, eine Welt, die durch eine ausgewogene Nutzung fossiler Energieträger und neuer Technologien gekennzeichnet ist.

Die *A2-Szenariofamilie* beschreibt eine sehr heterogene Welt, die durch regionales Selbstvertrauen und den Erhalt lokaler Identitäten gekennzeichnet ist. Die regionalen Unterschiede in der Geschwindigkeit des Bevölkerungswachstums lösen sich nur sehr langsam auf, so dass die Weltbevölkerung bis 2100 kontinuierlich ansteigt. Die wirtschaftliche Entwicklung findet primär innerhalb der Regionen statt und das Wachstum des Pro-Kopf-Einkommens und die technologischen Entwicklungen geschehen mehr fragmentiert und langsamer als in anderen Szenariofamilien.

Tabelle 3 Charakteristika der treibenden Kräfte der IPCC Marker-Szenarien (aus IPCC, 2000).

Szenario	Bevölkerung (2100)	Wirtschafts- Wachstum (1990-2100)	Verhältnis Pro- Kopf Einkommen Annex B/Nicht- Annex B (2100)	Nutzung Primär- energie
A1	Niedrig ~ 7 Mrd.	Sehr hoch 2.9 %/Jahr	1.6	Sehr hoch <i>Energieintensität:</i> Niedrig
A2	Hoch ~ 15 Mrd.	Mittel 2.3 %/Jahr	4.2	Hoch <i>Energieintensität:</i> Hoch
B1	Niedrig ~ 7 Mrd.	Hoch 2.5 %/Jahr	1.8	Niedrig <i>Energieintensität:</i> Sehr niedrig
B2	Mittel ~ 10 Mrd.	Mittel 2.2 %/Jahr	3.0	Mittel <i>Energieintensität:</i> Mittel

Die *B1-Szenariofamilie* ist gekennzeichnet durch die gleiche Bevölkerungsentwicklung wie in den A1 Szenarien, d.h. es gibt einen globalen Anstieg der Bevölkerung bis Mitte des Jahrhunderts, gefolgt von einem leichten Rückgang bis 2100. Die wirtschaftlichen Strukturen verändern sich in dieser Welt sehr schnell in Richtung einer dienstleistungsorientierten und informationstechnologischen Ökonomie mit sinkender Materialintensität. Diese Entwicklung geht einher mit der Einführung sauberer und ressourceneffizienter Technologien. Es werden globale Lösungsansätze für ökonomische, soziale und ökologische Nachhaltigkeit gefunden, die eine zunehmende Fairness einschließen.

Die *B2-Szenariofamilie* beschreibt eine Welt, in der eher lokale Ansätze für das Erreichen einer ökonomisch, sozial und ökologisch nachhaltigen Beziehung zwischen Gesellschaft und Umwelt gesucht werden. In dieser Welt nimmt die Bevölkerung kontinuierlich zu, wenn auch mit einer geringeren Rate als in der A2-Storyline. Es findet ein mittleres wirtschaftliches Wachstum statt, sowie ein langsamerer und regional mehr heterogener technologischer Wandel als in den A1- und B1-Szenariofamilien. Die B2-Szenariofamilie orientiert sich am Schutz der Umwelt und einer sozialen Gerechtigkeit, wenn diese auch mehr von den lokalen und regionalen Gegebenheiten bestimmt werden.

Es ist wichtig zu betonen, dass für keine dieser Szenariofamilien eine höhere Wahrscheinlichkeit des Eintreffens angegeben werden kann, als für den Rest. Außerdem wird für angenommen, dass unter keinem dieser Szenarien explizite Klimaschutzmaßnahmen ergriffen werden, oder dass beispielsweise die Vorgaben des Kyoto-Protokolls umgesetzt werden.

Basierend auf quantitativen Vorgaben für die wichtigsten treibenden Kräfte (Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum) wurden diese Storylines von sechs internationalen Mo-

dellierungsgruppen in insgesamt 40 quantitative Szenarien für Energienutzung und Treibhausgasemissionen umgesetzt.

2.2 Die Haupttriebkraft des A2- und des B2-Szenarios

Die Ergebnisse in dieser Studie basieren im Wesentlichen auf dem A2- und dem B2- Szenario des IPCC, da von diesen beiden Szenarien eine große Spanne an Treibhausgasemissionen abgedeckt wird, ohne dass Klimaschutz im Rahmen einer allgemeinen nachhaltigen Entwicklung stattfindet.

Es werden Versionen des A2- und B2-Szenarios verwendet, wie sie im IMAGE 2.2 Modell realisiert sind (siehe IMAGE team, 2001). Dies beinhaltet sowohl die Treibhausgasemissionen als auch die treibenden Kräfte, die im folgenden Abschnitt detaillierter beschrieben werden, da sie bei der Herleitung von Szenarien für die Entwicklung zukünftiger Emissionsanrechte von Annex B- und Nicht-Annex B-Ländern eine wichtige Rolle spielen. Die Länder der Welt sind im IMAGE-Modell in 17 Regionen zusammengefasst. Für die hier durchgeführten Analysen werden diese Regionen noch einmal danach unterschieden, ob sie im Rahmen des Kyoto-Protokolls Verpflichtungen übernommen haben (Annex B-Regionen) oder noch frei sind von Verpflichtungen (Nicht-Annex B-Regionen) (siehe auch Tabelle 4). Die Länder, die den einzelnen IMAGE-Regionen angehören, sind in Tabelle A1 im Anhang aufgeführt.

Bevölkerungsentwicklung

Eine der wichtigsten treibenden Kräfte für den Ressourcen- und Energieverbrauch ist das zukünftige Wachstum der Weltbevölkerung. Wie aus Tabelle 4 zu ersehen ist, unterscheidet sich das globale Bevölkerungswachstum der Szenarien A2 und B2 stark voneinander. Während für das A2-Szenario zwischen 1990 und 2100 eine Verdreifachung der Weltbevölkerung angenommen wird, erfolgt unter dem B2-Szenario „nur“ eine Verdopplung.

Die Bevölkerung der jetzigen Annex B-Regionen wächst unter dem A2-Szenario zwischen 1990 und 2100 um den Faktor 1.04 (Osteuropa) bis 2.5 (USA und Kanada). Unter dem B2-Szenario stabilisiert sich die Bevölkerung der Regionen OECD Europa, Osteuropa und Ehemalige Sowjetunion, oder nimmt im Falle Japans und Ozeaniens sogar mehr oder weniger stark ab. Eine Ausnahme bilden nur Kanada und die USA, deren Bevölkerungen auch unter dem B2-Szenario jeweils um den Faktor 1.5 wachsen.

Tabelle 4 Entwicklung der Bevölkerungszahlen der jetzigen Annex B- und Nicht-Annex B-Regionen unter dem A2- und dem B2-Szenario.

Region	Bevölkerung [Millionen]						
	A2-Szenario				B2-Szenario		
	1990	2020	2050	2100	2020	2050	2100
Annex B							
Ehem. UDSSR	290	328	394	580	298	292	268
Japan	124	137	139	156	129	119	57
Kanada	28	37	46	69	36	39	40
OECD Europa	377	425	451	529	402	384	390
Osteuropa	122	127	125	127	120	114	111
Ozeanien	26	34	39	46	32	33	22
USA	254	337	417	628	326	351	366
<i>Gesamt</i>	<i>1221</i>	<i>1425</i>	<i>1611</i>	<i>2135</i>	<i>1343</i>	<i>1332</i>	<i>1254</i>
Nicht-Annex B							
Mittelamerika	145	243	360	567	218	269	295
Mittl. Osten	192	393	704	1211	350	477	604
Nordafrika	118	234	421	741	210	287	363
Ostafrika	152	328	512	582	330	528	696
Ostasien	1247	1725	2256	3224	1549	1660	1691
Südamerika	293	485	719	1131	435	536	589
Südasien	1132	1887	2567	2883	1803	2265	2539
Südl. Afrika	118	256	400	455	258	412	544
Südostasien	442	681	921	1204	643	756	725
Westafrika	242	538	839	954	541	865	1142
<i>Gesamt</i>	<i>4081</i>	<i>6770</i>	<i>9699</i>	<i>12952</i>	<i>6337</i>	<i>8055</i>	<i>9188</i>
Welt	5302	8196	11309	15086	7680	9386	10444

Die Bevölkerung der jetzigen Nicht-Annex B-Regionen nimmt unter beiden Szenarien, wenn auch unterschiedlich stark, zu. Während sie unter dem A2-Szenario bis zum Jahr 2100 um einen Faktor 2.6 (Südasien und Ostasien) bis 6.3 in Nordafrika und im Mittleren Osten anwächst, liegt der Zuwachs beim B2-Szenario nur zwischen einem Faktor von 1.4 (Ostasien) und 4.7 (Westafrika). Unter dem A2-Szenario stellen die Regionen Ostasien, Südasien und der Mittlere Osten im Jahr 2100 die drei bevölkerungsreichsten Regionen der Welt, während unter dem B2-Szenario neben Ostasien und Südasien die Region Westafrika die drittgrößte Bevölkerung aufweist.

Wirtschaftliche Entwicklung

Neben der Anzahl an Menschen spielt das Einkommen, das jede Person zur Verfügung hat eine wichtige Rolle für den Ressourcenverbrauch und die Treibhausgasemissionen. Das durchschnittliche Pro-Kopf-Einkommen der Weltbevölkerung wächst unter dem B2-Szenario stärker als unter dem A2-Szenario (vgl. Tabelle 5). Während die Wachstumsrate unter dem A2-Szenario zwischen 0.7 und maximal 1.7% pro Jahr gegen Ende des Jahrhunderts beträgt, erreicht sie unter dem B2-Szenario schon in der ersten Hälfte des Jahrhundert ein Maximum von 2.2% pro Jahr und fällt gegen Ende des Jahrhunderts bis auf 1.4% pro Jahr ab.

Tabelle 5 Einkommensentwicklung in den jetzigen Annex B- und Nicht-Annex B-Regionen unter dem A2- und dem B2-Szenario.

Region	Pro-Kopf-Einkommen [1995 US \$ pro Jahr]						
	A2-Szenario				B2-Szenario		
	1990	2020	2050	2100	2020	2050	2100
Annex B							
Ehem. UDSSR	2964	2657	6442	23920	3306	13318	51292
Japan	38752	47604	57160	77129	50433	66373	125164
Kanada	19047	24959	30500	46613	26436	36766	62006
OECD Europa	20109	30552	37752	53379	32960	46126	68705
Osteuropa	2897	5424	11786	27369	6493	21041	41963
Ozeanien	14033	20094	24587	37560	21556	30593	51709
USA	25001	39780	47766	67536	26436	36766	62006
<i>Mittelwert</i>	<i>17074</i>	<i>25319</i>	<i>31821</i>	<i>49169</i>	<i>23663</i>	<i>35470</i>	<i>62716</i>
Nicht-Annex B							
Mittelamerika	2576	4807	9892	25246	5163	11816	37660
Mittl. Osten	3018	5458	10424	23974	5994	13261	36218
Nordafrika	1206	2335	5497	17218	2564	6993	26011
Ostafrika	227	388	1205	4513	397	1392	6265
Ostasien	925	3057	4891	9951	5766	16546	30396
Südamerika	3733	7267	13615	29929	7806	16263	44645
Südasien	306	683	1631	5333	1316	5166	13548
Südl. Afrika	1293	1644	3694	8386	1683	4267	11643
Südostasien	1127	2235	4433	14024	3835	13121	39412
Westafrika	340	499	1424	4854	511	1645	6739
<i>Mittelwert</i>	<i>1092</i>	<i>2405</i>	<i>4701</i>	<i>12768</i>	<i>3435</i>	<i>9091</i>	<i>21929</i>
Welt	4771	6390	8564	17921	7652	13637	27728

Für die Annex B Regionen wird unter beiden Szenarien ein recht moderates Wachstum des Pro-Kopf-Einkommens angenommen. Es nimmt zwischen 0.5 und 1.0% pro Jahr zu. Eine Ausnahme bilden die Regionen Osteuropa und ehemalige UDSSR, wo die Zuwachsraten eine Höhe von bis zu 5.6% pro Jahr unter dem B2- und bis zu 3.2% pro Jahr unter dem A2-Szenario erreichen. Die Einkommensunterschiede innerhalb der Gruppe der Annex B-Regionen sind bereits jetzt groß und gleichen sich auch in Zukunft nur unwesentlich an: Bis zur Mitte des Jahrhunderts weisen die Einkommen unter dem A2-Szenario eine Spanne vom 0.75- (ehemalige UDSSR) bis zum 6.7-fachen des globalen Durchschnittseinkommens in Japan auf. Unter dem B2-Szenario erreicht das Einkommen der ehemaligen UDSSR das 0.98-fache und das Einkommen Japans das 4.9-fache des globalen Durchschnittseinkommens.

Bei den Nicht-Annex B-Regionen weisen die drei Regionen, die derzeit ein Einkommen von weniger als 10% des globalen Durchschnittseinkommens haben (Westafrika, Ostafrika und Südasien) unter beiden Szenarien die größten Wachstumsraten auf. Sie betragen, je nach Region zwischen 2.2 und 4.4% pro Jahr unter dem A2-Szenario und 2.2 bis 7.3% pro Jahr unter dem B2-Szenario. Für die restlichen Nicht-Annex B-Regionen findet sich eine Wachstumsspanne zwischen 1.3 und 3.9% pro Jahr unter dem A2-Szenario und ein stärker ausgeprägtes Wachstum zwischen 0.9 und 7.1% unter dem B2-Szenario. Ein weiterer Un-

terschied zwischen den beiden Szenarien besteht darin, dass unter dem B2-Szenario in den asiatischen Regionen zwischen 2030 und 2050 ein starker Wachstumsschub stattfindet, während das Wirtschaftswachstum unter dem A2-Szenario gleichmäßiger über das gesamte Jahrhundert verteilt erfolgt.

Die Einkommensspanne innerhalb der Gruppe der Nicht-Annex B-Regionen beträgt 2050 zwischen dem 0.14- (Ostafrika) und 1.6-fachen des globalen Durchschnittseinkommens für Südamerika (A2-Szenario) und zwischen dem 0.1-fachen des globalen Durchschnitts für Ostafrika und dem 1.2-fachen des globalen Durchschnitts für Ostasien und Südamerika (B2-Szenario). D.h. auch die Einkommensspanne innerhalb dieser Gruppe von Regionen ist sehr groß und es gibt unter dem A2-, aber vor allem unter dem B2-Szenario, Regionen, die in der Mitte des Jahrhunderts das Einkommen der ärmeren Annex B-Regionen erreichen, wenn nicht sogar überschreiten.

3. REGIONALE EMISSIONSANRECHTE FÜR LANGFRISTIGE KLIMASCHUTZZIELE

Um den globalen Klimawandel in einem für die Menschheit erträglichen Rahmen zu halten, muss der unkontrollierte Anstieg der globalen Treibhausgasemissionen verhindert werden. Die Art und Weise auszuhandeln, wie Emissionskontrollen unter Beteiligung möglichst vieler Staaten über einen langen Zeitraum umgesetzt werden, ist eine höchst komplexe Angelegenheit. Auch wenn Einigkeit über die Notwendigkeit des Klimaschutzes herrscht, müssen bei der Aushandlung eines Regimes durchaus widersprüchliche Interessenslagen berücksichtigt werden. So ist nach Agarwal (2003) ein langfristiges Klimaschutzregime nur dann möglich, wenn drei zum Teil widersprüchliche Aspekte bei der Ableitung von verbindlichen Klimaschutzmaßnahmen zusammengeführt werden: (1) Maßnahmen müssen zu einer effektiven Stabilisierung des Klimas führen, (2) sie müssen möglichst kosteneffizient durchgeführt werden können und (3) sie müssen von den verhandelnden Parteien als gerecht empfunden werden. Auch in Artikel 2 der Klimarahmenkonvention werden diese Aspekte in einer Reihe von Grundsätzen berücksichtigt, die eine Verteilung der Lasten des Klimaschutzes zwar im Hinblick auf die Verantwortlichkeiten etwas konkretisieren, aber immer noch sehr viele Fragen aufwerfen:

- *Ein effektiver Schutz des Klimasystems* ist auch in der Klimarahmenkonvention Ziel der ergriffenen Maßnahmen. Auf welchem Niveau das Klima stabilisiert werden soll, ist allerdings noch offen, da ein ambitioniertes Klimaschutzziel zwar das Ausmaß der nachteiligen Auswirkungen vermindern mag, aber weltweit auch eine striktere Reduktion der Treibhausgasemissionen notwendig macht. Erschwerend kommt hinzu, dass die Abschätzungen, welche Länder in welchem Ausmaß von einem strengeren Klimaschutzziel profitieren würden und damit einen Anreiz für die Formulierung eines strengeren Zieles hätten, nach wie vor unsicher sind³.
- *Gerechtigkeit und Fairness* sollen als Kriterien für die Verpflichtung zu Klimaschutzmaßnahmen dienen. Dabei wird von einer gemeinsamen, aber unterschiedlichen Verantwortlichkeit für den Schutz des Klimasystems ausgegangen. Im Ausmaß der Verantwortlichkeit wird bisher, d.h. in der Klimarahmenkonvention und im Kyoto Protokoll, zwischen der Gruppe der Industrieländer (=Annex B-Staaten) und der Gruppe der Nicht-Annex B-Staaten unterschieden. Nach welchen Kriterien (von Gerechtigkeit) Länder der Annex-B-Gruppe beitreten oder sich anderweitig verbindlich zum Klimaschutz verpflichten, ist bisher noch nicht festgeschrieben. Höhne et al. (2003), Ringius et al. (2002) und andere kommen zu dem Schluss, dass ein System von Verpflichtungen *mindestens* drei Gerechtigkeitsprinzipien erfüllen muss: „Bedürfnis“ (es gibt ein Recht auf nachhaltige Entwicklung, um zumindest Grundbedürfnisse zu erfüllen), „Verantwortung“ (Derjenige, der den Schaden verursacht, muss handeln; das Verursacherprinzip) und „Leistungs-

³ Eine Ausnahme stellen hier die Länder der Alliance of Small Island States (AOSIS) dar, deren Existenz aufgrund des steigenden Meeresspiegels von einem möglichst ambitionierten Klimaschutzziel abhängt.

fähigkeit“ (Derjenige, der dazu wirtschaftlich in der Lage ist, muss handeln; das Prinzip der Leistungsfähigkeit). Daneben werden weitere Ansätze, wie z.B. eine vergleichbare Verteilung der Reduktionskosten oder das sogenannte „Grandfathering“, bei dem von einem historisch erworbenen Anrecht auf Emissionen ausgegangen wird, diskutiert (siehe Zusammenstellung von Kriterien in Vaillantcourt & Waaub, 2002). Wie diese Prinzipien mit Inhalten gefüllt werden, d.h. welche Indikatoren geeignet sind, die einzelnen Prinzipien zu repräsentieren, ist noch genauso Gegenstand der Diskussion, wie die Frage, ob es konkrete Schwellenwerte geben soll, ab deren Erreichen eine Verpflichtung eingegangen werden muss, oder ob es eine unterschiedliche Gewichtung der Prinzipien für einzelne Länder oder Gruppen von Ländern geben könnte.

- *Die Kosteneffizienz* von Politiken und Maßnahmen zum Schutz des Klimas war und ist immer noch ein herausragender Diskussionspunkt bei der derzeitigen Ausgestaltung und Umsetzung des Kyoto-Protokolls. Allerdings werden die Diskussionen darüber, welche Maßnahmen wo am kosteneffizientesten durchzusetzen sind, oft nur im Hinblick auf die erste Verpflichtungsperiode geführt. Wie sich beispielsweise kurzfristige Maßnahmen der Annex B-Länder im Rahmen des „Clean Development Mechanism“ (CDM) auf den Umfang und die Kosten der mittel- bis langfristigen Durchführung von Klimaschutzmaßnahmen in den jetzigen Nicht-Annex B-Staaten auswirken, wird nur unzureichend diskutiert. So sieht es z.B. Agarwal (2002) als problematisch an, wenn die Annex B-Staaten ihre kurzfristigen Reduktionsverpflichtungen kostenminimiert über effiziente, aber kohlenstoffbasierte Energiesysteme in Nicht-Annex B-Ländern umsetzen. Ein unbegrenztes Ausschöpfen der Möglichkeiten des CDM könnte zur Folge haben dass sich (1) die Nicht-Annex B-Länder langfristig auf einen kohlenstoffhaltigen Energiemix festlegen und dass (2) die Anreize für die dringend notwendige Forschung, Entwicklung und Erprobung im Bereich erneuerbarer Energien, die im Wesentlichen von den Industriestaaten geleistet werden müssten, verloren gehen. Übernehmen dann die Nicht-Annex B-Länder mittel- bis langfristig eigene Klimaschutzverpflichtungen, so ist der Spielraum dafür unter Umständen sehr klein und teuer, wenn der Schritt der Entwicklung neuer Technologien durch die kurzfristige Entscheidung für die kosteneffizientesten Maßnahmen mehr oder weniger ausgelassen wird.

Die bis hier beschriebenen Grundsätze lassen viel Freiraum bei der Ausgestaltung langfristiger Klimaschutzregimes. Sie müssen alle in irgendeiner Weise abgedeckt werden, um eine so große Zahl an Ländern zur Teilnahme an einem Regime zu bewegen, dass die daraus resultierenden Maßnahmen zu einer wirklichen Verlangsamung des Klimawandels führen. Bei der Vielzahl an vorhandenen Optionen besteht allerdings die Gefahr, dass die entwickelten Regeln für die Zuweisung von Emissionsrechten sehr komplex und schwer vermittelbar werden. Eine Möglichkeit, die Transparenz bei der Anwendung der Regeln zu erhöhen, besteht darin, die einzelnen Aspekte „Fähigkeit“, „Kosteneffizienz“ und „Fairness“ getrennt zu betrachten. Im folgenden Kapitel werden daher quantitative Informationen bereitgestellt, mit deren Hilfe Klimaschutzregimes mit unterschiedlichen Optionen für

die Aspekte „Fairness“ und „Fähigkeit“ analysiert werden können. Es werden die Auswirkungen auf (1) den Zeitpunkt und (2) den Umfang von Emissionskontrollmaßnahmen auf der Basis von Regionen untersucht.

3.1 Indikatoren

An dieser Stelle wird eine Liste möglicher Indikatoren zusammengestellt, die geeignet erscheinen, um die Fairness-Prinzipien der Klimarahmenkonvention (vor allem Bedürfnis, Verantwortung und Leistungsfähigkeit; siehe voriger Abschnitt) zu konkretisieren. Die folgende Liste von Indikatoren besteht aus Größen, die sowohl im politischen Rahmen als auch in der wissenschaftlichen Literatur immer wieder genannt werden, was die Interpretation nahe legt, dass zumindest ein gewisses Maß an Akzeptanz für sie vorliegt.

Prinzip Bedürfnis

- *CO₂-äquivalente Emissionen pro Kopf* als indirektes Maß für die Energienutzung und Nahrungsmittelproduktion. Ein Minimum an Emissionen muss jedem Land für die Befriedigung der Grundbedürfnisse seiner Bevölkerung zugestanden werden.
- *Anteil Bevölkerung eines Landes an der Weltbevölkerung* als Maß für den Anteil an den globalen Treibhausgasemissionen, die einem Land zustehen.
- *Energieverbrauch pro Kopf* als direktes Maß für die wirtschaftliche Entwicklung eines Landes. Ein Grundenergiebedarf muss abgedeckt sein. Die zu erbringenden Reduktionsleistungen sind proportional zur Überschreitung dieses Minimumwertes.

Prinzip Verantwortung

- *CO₂ Emissionen pro Kopf* als Maß für den Umfang in dem die Ressource Atmosphäre genutzt wird. Je höher dieser Wert z.B. relativ zu den Pro-Kopf-Emissionen im globalen Durchschnitt, desto stärker der Anteil an Reduktionsanstrengungen, die ein Land erbringen muss.
- *Änderungsrate der CO₂-Intensität* in den letzten zehn Jahren, um bereits erreichte Kontrollanstrengungen zu berücksichtigen. Je höher dieser Wert desto geringer die Reduktionsanforderungen an ein Land.
- *Anteil an erneuerbaren Energien am Gesamtenergieverbrauch* als Maß für bereits erreichte Reduktionsanstrengungen bzw. Ausmaß der Belastung des Klimasystems.
- *Kumulierte Pro-Kopf-Emissionen* als Maß für den historischen Beitrag zum Klimawandel. Je höher dieser Wert, desto höher ist der Anteil, den ein Land zu den globalen Reduktionsanstrengungen beitragen muss.

Prinzip Leistungsfähigkeit

- *CO₂-Emissionen pro Einheit Bruttoinlandsprodukt* (Kohlenstoff- oder CO₂ Intensität) als Maß dafür, was noch relativ kostengünstig an Reduktionsvorgaben umzusetzen ist. Eine hohe CO₂-Intensität eines Landes legt nahe, dass noch große Reduktionspotentiale vorhanden sind.
- *Pro-Kopf-Einkommen* als Maß für die Fähigkeit Reduktionsleistungen zu vollbringen, ohne dass eine nachhaltige Entwicklung gehemmt wird.
- *Bruttoinlandsprodukt eines Landes vermindert um ein Minimal-Pro-Kopf-Einkommen* als Maß für die Fähigkeit Reduktionsleistungen zu vollbringen, wobei aber berücksichtigt wird, dass ein gewisser Lebensstandard gewahrt bleibt.

Andere Prinzipien

- *Gleiche relative Reduktionsverpflichtung für jedes Land* sobald es einmal die Fähigkeit zu Reduktionsmaßnahmen erreicht hat.
- *Vergleichbare Kosten für Klimaschutzverpflichtungen* in allen Ländern.
- „*Willingness to pay*“ als Maß dafür, wie viel ein Land bereit ist, für die Vermeidung von Klimaschäden zu zahlen.

Allgemein ist anzunehmen, dass Indikatoren, die auf unsicheren Daten basieren bei der Aushandlung eines Klimaschutzregimes von Nachteil sind, da sie einzelne Parteien benachteiligen/begünstigen könnten, was wiederum zu Akzeptanzproblemen führen würde (Ridgley, 1996). Dies spricht z.B. gegen eine Einbeziehung historischer Emissionen für lange zurückliegende Zeiträume, aber unter Umständen auch gegen die Berücksichtigung landwirtschaftlicher Emissionen. Hier wäre es wichtig, den relativen Einfluss zu untersuchen, den die unsicheren Größen (Indikatoren) auf das Gesamtergebnis, d.h. Zeitpunkt und Umfang der Reduktionsverpflichtung einzelner Länder haben.

3.2 Verpflichtungsszenarien

Es gibt inzwischen eine große Anzahl von Ideen und Vorschlägen für die Ausgestaltung von Klimaschutzregimes nach der ersten Verpflichtungsperiode 2008-2012, die sowohl während der Klimaverhandlungen präsentiert, als auch in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht wurden. Zum Teil stellen diese Ansätze sehr unterschiedliche Philosophien in den Vordergrund. Da eine umfassende Übersicht und Diskussion existierender Vorschläge zum Thema Verpflichtungen nach 2012 bereits u.a. bei Ringius et al. (1999) und Höhne et al. (2003) zu finden sind, wird hier auf eine erneute Darstellung verzichtet.

Im folgenden Kapitel wird beispielhaft ein Verpflichtungsansatz vorgestellt, mit dessen Hilfe zukünftige Emissionsanrechte von Annex B- und Nicht-Annex B-Ländern mit einer bewusst langfristigen Perspektive untersucht werden. Dieser Ansatz enthält Elemente, die bei der schrittweisen Einbindung der jetzigen Nicht-Annex B-Staaten in zukünftige Klimaschutzverpflichtungen eine Rolle spielen könnten. Ziel dieses Kapitels ist die Darstellung der möglichen langfristigen Konsequenzen bei der unterschiedlicher Ausgestaltung von

Regeln und Indikatoren auf Zeitpunkt und Ausmaß der Verpflichtungen einzelner Regionen.

Der Ansatz lässt sich dadurch charakterisieren, dass zwei der drei oben genannten Kriterien, nämlich die Effizienz von Klimaschutz sowie Fairnessprinzipien bei der Zuteilung von Emissionsrechten, berücksichtigt sind. Außerdem wird versucht, die zwei Phasen von Emissionskontrollen, die die Annex B-Länder seit Unterzeichnung der Klimarahmenkonvention geplant haben, nämlich erst eine Stabilisierung und dann erst eine Reduktion der Treibhausgasemissionen, nachzubilden.

Die Kosteneffizienz bei der Umsetzung von Reduktionsmaßnahmen bleibt erst einmal unberücksichtigt. Die hier präsentierten Ergebnisse können aber als Emissionsanrechte aufgefasst werden, die nicht notwendigerweise in Anspruch genommen werden müssen, sondern z.B. im Rahmen eines Emissionshandelssystems von den entsprechenden Ländern zur Verfügung gestellt werden können.

3.2.1 Hintergründe

Der im Folgenden dargestellte Ansatz hat zum Ziel, die Konsequenzen unterschiedlicher Optionen für Zeitpunkt und Umfang der Einbindung derjenigen Regionen in ein Klimaschutzregime zu untersuchen, die bisher noch keine limitierenden Verpflichtungen eingegangen sind. Es werden zunächst die allgemeinen Merkmale des Ansatzes vorgestellt, bevor in einem der folgenden Abschnitte auf die quantitative Ausgestaltung beispielhafter Szenarien eingegangen wird.

Hintergrund der Regeln dieses Ansatzes ist (1), dass eine möglichst schnelle Verlangsamung des Klimawandels durch das Einschwenken auf einen Emissionspfad erreicht werden soll, der zu einer langfristigen Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen führt, (2) dass die Annex B-Länder aufgrund ihres historischen Beitrags zum Klimawandel und ihrer derzeit noch sehr hohen Pro-Kopf-Emissionen ihre Anstrengungen nach der 1. Verpflichtungsperiode verstärken, (3) dass den Nicht-Annex B-Ländern, je nach Einkommen und derzeitigem Stand der Pro-Kopf-Emissionen eine wirtschaftliche Entwicklung zugestanden wird, die zunächst auch mit einem Anstieg der Emissionen verbunden sein kann und (4), dass aus Akzeptanzgründen die Nicht-Annex B-Regionen die Einstiegsstrategie der Annex B-Regionen in ein Klimaschutzregime nachahmen, indem sie ihre Emissionen erst stabilisieren dürfen, bevor eine Absenkung erfolgt.

In diesem Abschnitt werden die Hauptmerkmale des Ansatzes dargestellt. Der Verteilungsansatz ist außerdem in Onigkeit & Alcamo (2000) beschrieben.

- *Konvergenz der Pro-Kopf-Emissionen*: Langfristig wird eine Konvergenz der Pro-Kopf-Emissionen der einzelnen Nicht-Annex B-Regionen mit den durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen der Gruppe der jetzigen Annex B-Regionen auf einem

Niveau angestrebt, das das Erreichen eines Stabilisierungszieles möglich macht. Die Konvergenz der mittleren Annex B-Emissionen und der Emissionen einzelner Nicht-Annex B-Regionen erfolgt umso früher, (1) je niedriger die global erlaubten Emissionen sind, d.h. je strikter das vorgegebene Stabilisierungsziel ist, (2) je schneller und früher die durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen von Annex B gesenkt werden und (3) je schneller und höher die Pro-Kopf-Emissionen der einzelnen Nicht-Annex B-Regionen ansteigen.

- *Emissionen der Nicht-Annex B-Regionen:* Vor der Beteiligung an einem Klimaschutzregime folgen die Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B-Regionen dem Emissionspfad des Referenzszenarios. Die Übernahme von Verpflichtungen erfolgt, sobald eine Region einen Schwellenwert für das Pro-Kopf-Einkommen erreicht hat (graduation criterion). In diesem Stadium ist noch keine Absenkung der Emissionen erforderlich, sondern es wird, ähnlich wie bei der ersten freiwilligen Stabilisierung der Emissionen der Annex I-Staaten zwischen 1990 und 2000 im Rahmen der Klimarahmenkonvention, eine Stabilisierung der Pro-Kopf-Emissionen angestrebt⁴. Je höher der Schwellenwert für das Einkommen gewählt wird, desto später muss eine Nicht-Annex B-Region mit der Stabilisierung beginnen. Weist ein Nicht-Annex B-Land schon jetzt relativ hohe Pro-Kopf-Emissionen mit steigender Tendenz auf, so ist es allerdings auch möglich, dass seine Emissionen mit den Pro-Kopf-Emissionen der Annex B-Länder konvergieren bevor das Schwelleneinkommen erreicht wird. In diesem Fall ist von Beginn an eine Reduktion der Emissionen notwendig. Im anderen Extrem ist es nach diesem Ansatz möglich, dass Nicht-Annex B-Länder mit sehr geringen Pro-Kopf-Emissionen und sehr geringem Einkommen spät oder gar nicht in ein Regime eingebunden werden, wenn ihre Emissionen und ihr Einkommen über die gesamte Szenarioperiode auf einem niedrigen Niveau bleiben. Auf diese Weise werden die zum Teil sehr großen Unterschiede zwischen den Nicht Annex B-Ländern berücksichtigt.

Die Höhe des Schwellenwertes für das Einkommen ist variierbar, d.h. kann oder muss verhandelt werden. Es ist naheliegend, diesen Wert an der Höhe des Einkommens der Annex B-Länder zu Beginn ihrer Verpflichtungen, zu orientieren. Der Zeitpunkt des Einstiegs der Nicht-Annex B-Länder in ein Klimaschutzregime wird damit nicht vorgegeben, sondern folgt u.a. aus der wirtschaftlichen Dynamik eines Landes. Erst wenn die Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B-Länder mit den Pro-Kopf-Emissionen der Annex B-Länder konvergieren, wird eine Reduktion erforderlich; die Länder werden Teil der Annex B-Gruppe und erhalten die gleichen Reduktionsverpflichtungen (auf einer Pro-Kopf-Basis) wie alle anderen Annex B-Länder auch.

⁴ Die Annex I-Länder erklärten sich zwar zu einer Stabilisierung der Gesamtemissionen und nicht der Pro-Kopf-Emissionen bereit; da aber die Bevölkerung im betrachteten Zeitraum (1990-2000) keine großen Veränderungen aufwies, ist die Stabilisierung der Gesamtemissionen annähernd gleichbedeutend mit einer Stabilisierung der Pro-Kopf-Emissionen.

- *Globale Treibhausgasemissionen:* Es müssen für jeden Rechenschritt globale Emissionen vorgegeben werden, die entweder ein Stabilisierungsziel für Treibhausgaskonzentrationen, oder eine andere Art von Klimaschutzziel erreichbar machen.
- *Emissionen der Annex B-Regionen:* Die Gesamtemissionen der Annex B-Länder ergeben sich aus der Differenz zwischen den global vorgegebenen Emissionen und den Gesamtemissionen der Nicht-Annex B Regionen, die nach den oben beschriebenen Regeln durch Multiplikation mit der Bevölkerungszahl abgeleitet werden. Je niedriger die globalen Emissionen liegen und je stärker der Anstieg der Gesamtemissionen der Nicht-Annex B-Staaten, desto stärker müssen die Annex B-Länder ihre Emissionen reduzieren. Zwischen den einzelnen Regionen der Annex B-Gruppe wird in diesem Schritt nicht weiter differenziert, sie werden als eine Gruppe mit durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen behandelt, die für jeden Zeitschritt um den gleichen Prozentsatz abgesenkt werden. Eine weitere Differenzierung innerhalb der Annex B-Gruppe ist möglich. Hier könnten dann weitere Indikatoren, wie z.B. die Treibhausgasintensität der Wirtschaft, wirksam werden.

Das Prinzip von Fairness wird in diesem Ansatz über die angestrebte Konvergenz der Pro-Kopf-Emissionen berücksichtigt, die dazu führt, dass die Industrienationen am Anfang den Löwenanteil der Klimaschutzmaßnahmen zu tragen haben. Dieser Indikator berührt damit gleichzeitig das Prinzip der gemeinsamen aber unterschiedlichen Verantwortung für den Klimaschutz. Die Fähigkeit zu Klimaschutzmaßnahmen wird über das Einkommen als Einstiegskriterium für die Nicht-Annex B-Regionen berücksichtigt. Das Prinzip der möglichst kosteneffizienten Reduktion der Treibhausgasemissionen wird in dieser Version des Ansatzes noch nicht berücksichtigt. Aber es ist leicht in einem nachfolgenden Schritt zu berücksichtigen. Diese Vorgehensweise, d.h. eine nachgeschaltete Effizienzanalyse hat den Vorteil, dass die langfristige Größenordnung der Emissionsanrechte deutlich wird. Wie Blanchard et al. (2001) anmerken, kann eine frühe Teilnahme am Emissionshandel zur Folge haben, dass die tatsächlichen Emissionen von Annex B- und Nicht Annex B-Staaten nicht konvergieren werden, sondern dass die Emissionen der Nicht-Annex B-Staaten schon sehr früh auf einem niedrigen Niveau bleiben müssen.

Vorgehensweise

Der oben beschriebene Ansatz erlaubt bzw. erfordert die Festlegung von zwei Größen, nämlich die Einkommenshöhe, als Schwellenwert, bei dessen Erreichen eine Nicht-Annex B-Region beginnt ihre Pro-Kopf-Emissionen zu stabilisieren sowie jährliche globale Treibhausgasemissionen, die das Erreichen eines Klimaschutzzieles ermöglichen. Da die Wahl dieser Größen den Zeitpunkt und den Umfang der verbindlichen Klimaschutzmaßnahmen der einzelnen Regionen beeinflussen, werden die Auswirkungen mehrerer Varianten analysiert. Es werden variiert (vgl. auch Tabelle 6):

1. *Das Einstiegseinkommen*, bei dessen Erreichen eine Nicht-Annex B-Region beginnt ihre Pro-Kopf-Emissionen zu stabilisieren; als hohes Einkommen („-GDP-high“-Szenarien) wird das durchschnittliche Einkommen der Gruppe der Annex B-

Regionen im Jahr 1990 eingesetzt. Als niedriges Einkommen („-GDP-low“-Szenarien) wird der 1990er-Wert für die Region mit dem niedrigsten Einkommen, hier die IMAGE-Region Osteuropa, verwendet, der bei 17% des durchschnittlichen Annex B-Wertes im Jahr 1990 liegt.

2. *der Verlauf der globalen Emissionen*, über die ein Klimaschutzziel festgelegt wird; es werden zwei Emissionspfade untersucht, nämlich ein Emissionspfad im Zeitraum 1990-2100, der eine Stabilisierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration bei 450 ppm anvisiert, sowie ein Pfad, der eine Stabilisierung bei 550 ppm CO₂ anstrebt.
3. *der zeitliche Verlauf von Referenzemissionen, Einkommen und Bevölkerung*, indem der Verteilungsansatz auf das A2- und das B2-Szenario des IPCC angewendet wird. Als Referenzemissionen werden die CO₂-, N₂O- und CH₄-Emissionen aus der Energieproduktion und dem industriellen Sektor berücksichtigt. Der landwirtschaftliche Sektor bleibt unberücksichtigt.

Das Resultat dieser Variationen sind die in Tabelle 6 aufgeführten acht regionale Emissionsszenarien.

Tabelle 6 Überblick über die untersuchten Klimaschutzszenarien.

Szenario	Ausgangsszenario	Stabilisierungsziel	Einstiegskriterium
1. A2-550-GDP-high	A2	550 ppm CO ₂	Hoch
2. A2-550-GDP-low			Niedrig
3. A2-450-GDP-high		450 ppm CO ₂	Hoch
4. A2-450-GDP-low			Niedrig
5. B2-550-GDP-high	B2	550 ppm CO ₂	Hoch
6. B2-550-GDP-low			Niedrig
7. B2-450-GDP-high		450 ppm CO ₂	Hoch
8. B2-450-GDP-low			Niedrig

Die Auswertung dieser acht regionalen Szenarien erfolgt im Hinblick auf:

- den Zeitpunkt des Beginns von Klimaschutzmaßnahmen in den Nicht-Annex B-Regionen,
- den Verlauf der Pro-Kopf-Emissionen der Annex B- und der Nicht-Annex B-Regionen im Zeitraum 1990 bis 2100,
- den Verlauf der regionalen Gesamtemissionen zwischen 1990 und 2100 sowie
- die langfristigen regionalen Klimaschutzbeiträge im Zeitraum 1990-2100.

Der Verteilungsansatz wird auf die 17 Regionen des IMAGE 2.2-Modells angewendet, für die die Einkommensentwicklung, Bevölkerungsentwicklung und die Entwicklung der zu-

künftigen Emissionen pro Einwohner einer Region für das A2- und das B2-Szenario zur Verfügung stehen. Die Nicht-Annex B-Länder sind dabei in 10 Regionen unterteilt, während die Annex B-Länder für die Szenarioanalyse in einer Region zusammengefasst werden, da bei ihnen davon ausgegangen wird, dass sie ihre Klimaschutzanstrengungen fortsetzen.

Globale Emissionspfade zum Erreichen einer stabilen CO₂-Konzentration

Eine Stabilisierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration lässt sich über unterschiedliche Emissionsverläufe erreichen. In Abbildung 2 sind eine Reihe von Emissionspfaden aufgeführt, die aus unterschiedlichen Konzentrationsverläufen für CO₂ sowie mit unterschiedlichen Modellen berechnet wurden (siehe Abbildungsunterschrift). Aus diesen Emissionsverläufen wird deutlich, dass es einen gewissen Spielraum bei der Umsetzung eines Stabilisierungszieles gibt. Es wird aber ebenso deutlich, dass die Emissionen (1) bei allen Modellberechnungen bis zum Jahr 2100 auf das Niveau von 1990 oder tiefer zurückgeführt werden müssen und dass sie (2) gegen Ende des Jahrhunderts um so stärker vermindert werden müssen, je höher die Emissionen zu Beginn dieses Jahrhunderts ansteigen.

Unter dem A2-Szenario, wie es im IMAGE-Modell implementiert ist, steigen die globalen CO₂-Emissionen dagegen bis zum Ende des Jahrhunderts auf das 4.4-fache der heutigen Emissionen (siehe Abbildung 2). In einer B2-Welt verdoppeln sie sich bis zum Jahr 2040 und bleiben dann auf diesem Niveau. Eine Stabilisierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration zwischen 450 und 550 ppm im Laufe dieses oder des folgenden Jahrhunderts lässt sich also nur dann erreichen, wenn die globalen Emissionen gegen Ende des Jahrhunderts nur noch zwischen 10% und 25% der A2-Emissionen bzw. zwischen 27% und 57% der B2-Emissionen betragen.

Für die globalen Treibhausgasemissionen der Verpflichtungsszenarien werden die aus dem Energie- und Industriesektor stammenden CO₂-äquivalenten Emissionen des 450 ppm und des 550 ppm Stabilisierungsszenarios in der Version des IMAGE 2.2-Modells verwendet, wie sie in van Vuuren & de Vries (2001) für das 450 ppm-Szenario beschrieben sind bzw. von van Vuuren für das 550 ppm-Szenario zur Verfügung gestellt wurden. In Abbildung 2 ist der CO₂-Anteil dieser Emissionen dargestellt: Um eine Stabilisierung bei 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre zu erreichen, dürfen demnach die globalen CO₂-Emissionen aus dem Energie- und dem Industriesektor zwar bis zum Jahr 2020 auf 8.5 Gt C pro Jahr (=140% relativ zu 1990) ansteigen, müssen dann aber bis 2100 auf ungefähr die Hälfte (57%) der Emissionen des Jahres 1990 reduziert werden (siehe Emissionspfad *IMAGE 2.2-450*).

Für das 550 ppm-Stabilisierungsziel dürfen die CO₂-Emissionen bis 2025 sogar auf 10.0 Gt C oder 165% der 1990er Emissionen ansteigen, um dann bis 2100 wieder auf 7.5 Gt C pro Jahr (oder 123% relativ zu 1990) reduziert zu werden (siehe Emissionspfad *IMAGE 2.2-550*). Allerdings müssen bei beiden Szenarien und insbesondere beim 550 ppm-Szenario die Emissionen nach 2100 weiter abgesenkt werden, um eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration zu erreichen.

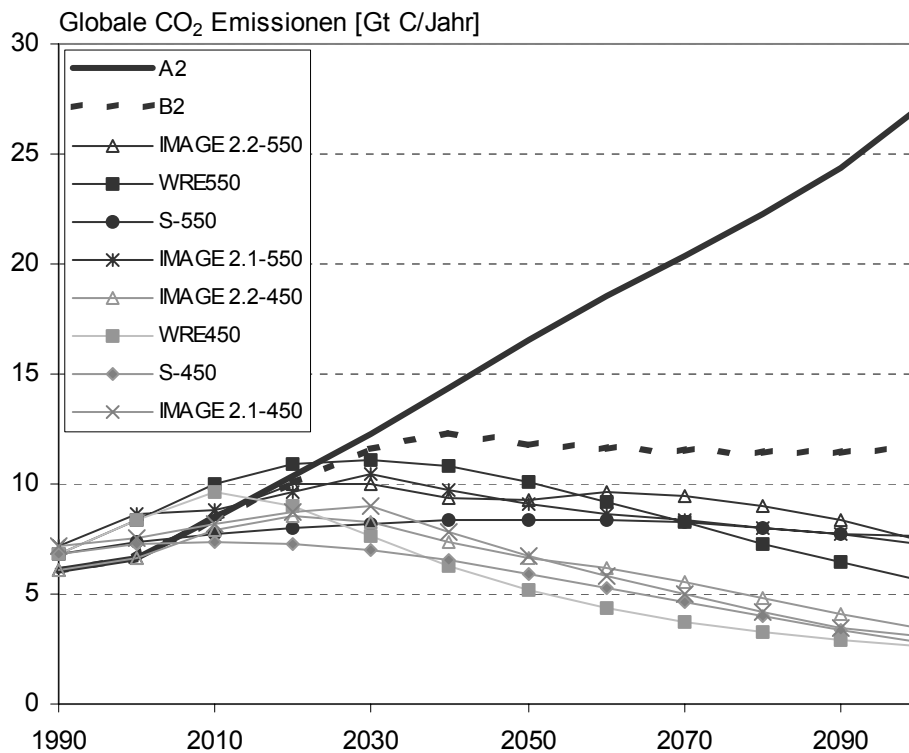


Abbildung 2 Globale CO₂-Emissionen aus dem Energie- und dem Industriesektor zum Erreichen einer Stabilisierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration bei 450 bzw. 550 ppm CO₂ (Daten: Danish Energy Agency, www.dea-ccat.dk, S-Profile nach Konzentrationsprofilen von Enting et al. (1994), die jährlichen Emissionen basieren auf Berechnungen mit dem Bern-Modell, WRE-Profile nach Wigley et al. (1996), IMAGE 2.2-Profile nach van Vuuren & de Vries (2001), IMAGE 2.1-Profile nach Alcamo & Kreileman (1996)).

Globale Pro-Kopf-Emissionen

Das Gerechtigkeitsprinzip des beschriebenen Verteilungsschemas basiert auf einer Annäherung der Pro-Kopf-Emissionen der Annex B- und Nicht-Annex B-Länder. Langfristig sollen also alle Menschen ein Anrecht auf die mittleren globalen Pro-Kopf-Emissionen haben; gleichzeitig müssen die globalen Gesamtemissionen sehr schnell vom Referenzpfad abweichen und langfristig abgesenkt werden. Zu Beginn der Szenarioperiode liegen die globalen CO₂-äquivalenten Emissionen aus dem Energie- und Industriesektor bei etwa 1.3 t pro Person und Jahr (vgl. Abbildung 3). Soll die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre langfristig bei 450 ppm stabilisiert werden, so ist es aufgrund der notwendigen Reduktion der globalen Emissionen in Kombination mit einer steigenden Weltbevölkerung erforderlich, dass die Pro-Kopf-Emissionen unter dem A2-Szenario bis zum Ende des Jahrhunderts auf 20% des heutigen Wertes abgesenkt werden. Auch in einer B2-Welt mit ihrem geringeren Bevölkerungswachstum müssen die Pro-Kopf-Emissionen auf 29% der heutigen Emissionen verringert werden.

Um den Einfluss des Bevölkerungswachstums bei der Ermittlung dieser Werte aufzuzeigen, wurde in einer weiteren Berechnung die Weltbevölkerung auf dem heutigen Niveau (Jahr 2000: 6.1 Mrd. Menschen) konstant gehalten. Wie in Abbildung 3 (Szenario *450-const*) zu sehen ist, dürften die Pro-Kopf-Emissionen in diesem Fall zwar bis 2020 leicht bis auf 1.5 t C/Person, oder 128% der heutigen mittleren Pro-Kopf-Emissionen ansteigen, langfristig macht ein 450 ppm-Ziel aber auch ohne Bevölkerungswachstum ein Absenken des Emissionsniveaus auf 50% des heutigen Wertes notwendig.

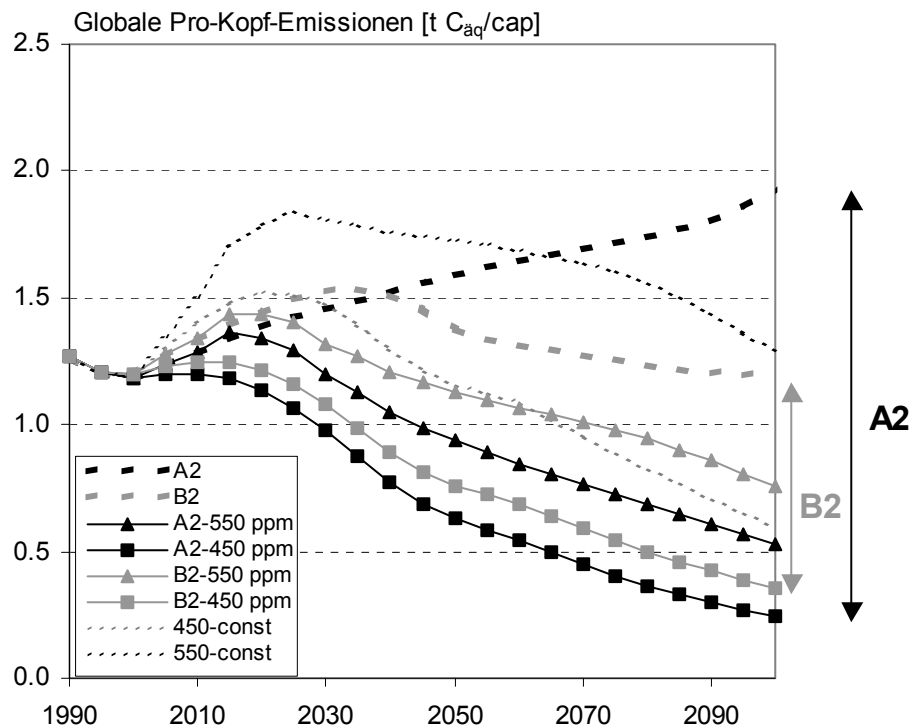


Abbildung 3 Mittlere globale CO₂-äquivalente Pro-Kopf-Emissionen aus dem Energie- und Industriesektor. Dargestellt sind (1) die Emissionspfade des A2- und des B2-Szenarios, (2) Emissionspfade die, basierend auf der Bevölkerungsentwicklung des A2- und des B2-Szenarios zu einer Stabilisierung der CO₂-Konzentration bei 450 bzw. 550 ppm führen und (3) die Emissionspfade, die bei Annahme einer ab 2000 konstanten Weltbevölkerung das 450- bzw. das 550 ppm Stabilisierungsziel erreichbar machen (Szenario *450-const* bzw. *550-const*).

Soll eine Stabilisierung der CO₂-Konzentration bei 550 ppm erreicht werden, dürfen die Emissionen bis 2015 noch leicht, d.h. um etwa 0.2 t pro Person ansteigen, müssen langfristig aber auf 45% der heutigen Emissionen unter dem A2-Szenario und auf 64% unter dem B2-Szenario abgesenkt werden. Die Annahme einer stabilen Bevölkerung erlaubt zwar auch bei einem 550 ppm-Ziel kurzfristig noch einen kräftigen Anstieg der Pro-Kopf-Emissionen, macht aber bis zum Ende des Jahrhunderts eine Rückkehr auf das heutige durchschnittliche Emissionsniveau notwendig (vgl. Abbildung 3, Szenario *550-const*).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Spanne der pro Person weltweit erlaubten Emissionen je nach Stabilisierungsziel und Referenzszenario zwar langfristig um einen Fak-

tor 3 variiert, die Emissionen aber unter allen Szenarien auf weniger als 1 t C_{äq} pro Person und Jahr absinken müssen. Damit liegen die erlaubten Emissionen langfristig in der Größenordnung der heutigen Emissionen der Nicht-Annex B-Länder, während die heutigen mittleren Emissionen der Annex B-Länder um einen Faktor 5-15 höher liegen als der langfristig anzustrebende Mittelwert (siehe Abbildung 4, folgendes Kapitel).

3.2.2 Verteilung von Emissionsanrechten in einer A2-Welt

Der hier vorgestellte Verteilungsansatz basiert auf der Zielvorstellung, dass sich die Emissionsanrechte aller Länder auf einer Pro-Kopf-Basis in Abhängigkeit von ihrer wirtschaftlichen Entwicklung und ihrer unterschiedlichen Verantwortung für den Klimawandel langfristig annähern. Im Folgenden werden

1. der Verlauf der Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B-Regionen und ihr jeweiliger Eintrittszeitpunkt in ein Klimaschutzregime dargestellt;
2. der zeitliche Verlauf der aus den Pro-Kopf-Emissionen resultierenden regionalen Gesamtemissionen sowie
3. die Differenz zwischen den kumulierten Referzemissionen und den kumulierten Gesamtemissionen der Klimaschutzeszenarien der einzelnen Regionen dargestellt.

In diesem Abschnitt wird mit Hilfe von insgesamt vier Szenarien untersucht, wie sich zwei unterschiedliche Klimaschutzziele und zwei unterschiedliche Einstiegskriterien für die jetzigen Nicht-Annex B-Regionen auf ihre langfristigen Emissionsanrechte auswirken.

Wie Abbildung 4a zeigt, steigen die durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B-Regionen unter dem A2-Referenzszenario um den Faktor 2.8 von 0.5 auf 1.4 t C_{äq} pro Person und Jahr. Auch die Pro-Kopf-Emissionen der Annex B-Regionen würden unter dem A2-Szenario steigen, und zwar um einen Faktor 1.3, d.h. von 3.8 t C_{äq} pro Person im Jahr 1990 auf 4.8 t C pro Person im Jahr 2100 (Abbildung 4b).

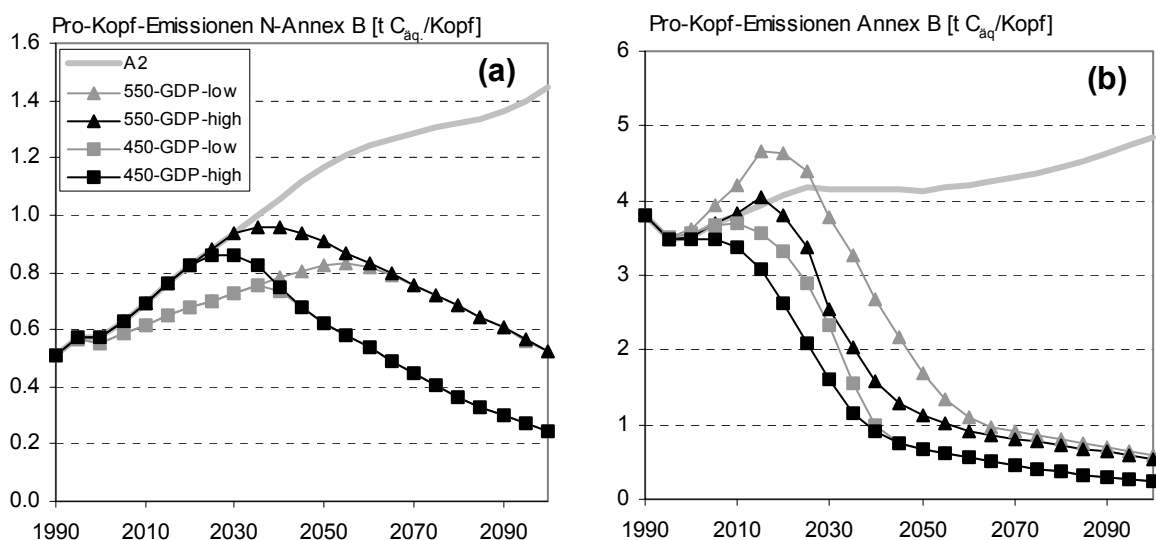


Abbildung 4 Durchschnittliche Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B- (a) und Annex B-Regionen (b) in einer A2-Welt.

Der Zeitpunkt des Eintritts einer Nicht-Annex B-Region in ein Klimaschutzregime (in diesem Ansatz verbunden mit einem Einfrieren der Pro-Kopf-Emissionen), tritt umso früher ein, je niedriger das Schwelleneinkommen für den Eintritt angesetzt wird. Außerdem führt ein Absenken des Eintrittskriteriums dazu, dass sich mehr Regionen am Klimaschutz beteiligen. Setzt man den Schwellenwert des Verteilungsansatzes auf das Einkommen der Region Osteuropa im Jahr 1990 („*GDP-low*“-Szenarien), so hat dies zur Folge, dass einige Regionen bereits zwischen 1990 und 2000 in ein Klimaschutzregime eingebunden werden würden. Die gemittelten Emissionen für die zwei Szenarien mit niedrigem Einstiegseinkommen (Abbildung 4a) weichen daher von Beginn an vom Referenzpfad ab. Die mittleren Emissionen der Nicht-Annex B-Gruppe steigen bei frühem Eintritt unter beiden Klimaschutzziele maximal um einen Faktor 1.6.

Die frühe Teilnahme einiger Nicht-Annex B-Regionen an einem Klimaschutzregime hat sowohl für die Anrechte der verbleibenden Nicht-Annex B-Regionen als auch für die der Annex B-Regionen Vorteile. So haben die Annex B-Regionen umso höhere Emissionsanrechte, je niedriger die Nicht-Annex B-Emissionen sind, da ihre Gesamtemissionen sich aus der Differenz zwischen globalem Emissionspfad und Gesamtemissionen der Nicht-Annex B-Gruppe ergeben. Wie in Abbildung 4b zu sehen ist, lässt der frühe Eintritt einiger Nicht-Annex B-Regionen die Pro-Kopf-Emissionen der Annex B-Gruppe zu Beginn der Szenarioperiode sogar ansteigen. Diese höheren Emissionen der Annex B-Regionen haben für diejenigen Nicht-Annex B-Regionen, die noch nicht an einem Klimaschutzregime beteiligt sind, den Vorteil, dass ihre Pro-Kopf-Emissionen länger ansteigen dürfen bevor sie mit den Pro-Kopf-Emissionen der Annex B-Regionen konvergieren, was gleichbedeutend ist mit einem Reduktionsbeginn.

Ein später Einstieg der Nicht-Annex B-Regionen, d.h. ein hohes Schwelleneinkommen („*GDP-high*“-Szenarien), lässt zwar ein längeres Verweilen ihrer Emissionen auf dem Referenzpfad und mit einem Anstieg um einen Faktor 1.8 bis 2.0, ein höheres Emissionsmaximum zu. Im Vergleich zum frühen Eintritt müssen die Emissionen aber zu einem früheren Zeitpunkt abgesenkt werden (Abbildung 4a, schwarze Linien) und die erforderliche Trendwende in den Pro-Kopf-Emissionen ist sehr viel schärfer ausgeprägt als für den Fall des frühen Eintritts.

Für die Annex B-Regionen hat ein später Eintritt der Nicht-Annex B-Regionen in ein Klimaschutzregime zur Folge, dass eine strikte Absenkung ihrer Pro-Kopf-Emissionen früher erfolgen muss (vgl. Abbildung 4b, schwarze Kurven). Je nach Stabilisierungsziel muss eine Halbierung der Annex B-Emissionen um 10-20 Jahre vorgezogen werden. Während dieses Reduktionsziel bei einem Stabilisierungsziel von 550 ppm CO₂ und frühem Eintritt der Nicht-Annex B-Regionen (Szenario *A2-550-GDP-low*) erst zwischen 2045 und 2050 erreicht werden muss, macht ein späterer Eintritt (Szenario *A2-550-GDP-high*) die 50%-ige Reduktion der mittleren Pro-Kopf-Emissionen schon im Jahr 2035 notwendig.

Ein strengeres Stabilisierungsziel von 450 ppm CO₂ verschiebt den Zeitpunkt für jeden der beiden Fälle noch einmal um etwa 10 Jahre in Richtung Gegenwart. Für den Fall einer späten Beteiligung der Nicht-Annex B-Regionen wird schon um 2025 herum eine Reduktion um 50% notwendig sein, eine frühe Beteiligung der Nicht-Annex B-Gruppe erlaubt eine Verschiebung der 50%-Reduktion um 10 Jahre nach hinten (auf ca. 2035).

Pro-Kopf-Emissionen und Eintrittszeitpunkt in ein Klimaschutzregime

Der Eintrittszeitpunkt in ein Klimaschutzregime hängt im hier vorgestellten Verteilungsansatz sowohl von der Höhe des durchschnittlichen Pro-Kopf-Einkommen einer Region als auch dem zeitlichen Verlauf ihrer pro Einwohner emittierten Treibhausgasemissionen ab. Der Zeitpunkt zu dem die 10 Nicht-Annex B-Regionen des IMAGE-Modells unter dem A2-Szenario in ein Klimaschutzregime eintreten, variiert aufgrund der Heterogenität in dieser Gruppe von Region zu Region. Einige Regionen der Nicht-Annex B-Gruppe weisen schon heute ein durchschnittliches Pro-Kopf-Einkommen auf, das in der Größenordnung der ärmeren Annex B-Länder liegt. So weist beispielsweise Brasilien als bevölkerungsreichstes Land der Nicht-Annex B-Region Südamerika nach Daten des World Resources Institute (WRI, 1998) schon in den 1990ern ein höheres Durchschnittseinkommen auf als beispielsweise Polen, das bevölkerungsreichste Land der Annex B-Region Osteuropa. Nach dem hier vorgestellten Ansatz zur Verteilung von Emissionsanrechten würden die reicheren Nicht-Annex B-Regionen daher schon heute an einem Klimaschutzregime teilnehmen, indem sie beginnen ihre zum Teil noch sehr niedrigen Pro-Kopf-Emissionen zu stabilisieren. Dies ist der Fall für die Regionen Mittlerer Osten und Südamerika, wenn das Schwelleneinkommen in der Höhe des 1990er Einkommens der Region Osteuropa liegt (Szenario *A2-550-GDP-low* und *A2-450-GDP-low*; siehe Tabelle 7 und Abbildung 5b und 5d). Das niedrige Einstiegseinkommen hat außerdem zur Folge, dass, unabhängig vom Klimaschutzziel, die Pro-Kopf-Emissionen aller Nicht-Annex B-Regionen einen Wert von 1.2-1.4 t C/Kopf nicht überschreiten dürfen, bevor ihre Emissionen mit denen der Annex B-Regionen konvergieren. Diese Konvergenz und damit der Beginn einer Reduktion der Emissionen ist abhängig vom Klimaziel: Soll die atmosphärische CO₂-Konzentration auf 550 ppm begrenzt werden, müssen die ersten Nicht-Annex B-Regionen ihre Pro-Kopf-Emissionen ab 2050 absenken, die letzten mit sehr niedrigen Pro-Kopf-Emissionen sogar erst nach 2100. Ein strikteres Ziel von 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre erfordert dagegen schon eine Verminderung der Emissionen zwischen 2035 und 2075.

Die frühe Beteiligung der Nicht-Annex B-Regionen an einem Klimaschutzregime hat sowohl für die Annex B- als auch die Nicht-Annex B-Regionen Vorteile: Für die Nicht-Annex B-Regionen sind bei beiden Klimaschutzzielen schwächere Emissionsminderungen notwendig, d.h. der Emissionspfad auf Pro-Kopf-Ebene macht keine großen Trendwenden in der Energieversorgung oder Änderungen im Konsumverhalten notwendig, wie dies bei den Annex B-Regionen notwendig ist. Deren Emissionen werden zeitweise mit Raten bis zu 4.5% pro Jahr bei einem 550 ppm CO₂-Ziel bis 7.2% pro Jahr für ein 450 ppm-Ziel reduziert. Die maximalen Minderungsraten der Nicht-Annex B-Regionen liegen zwischen

1.6 und 3.5% pro Jahr für ein 550 ppm Ziel bzw. 2.0 bis 6.0% pro Jahr für ein 450 ppm-Ziel.

Tabelle 7 Maßnahmenbeginn der Nicht-Annex B-Regionen in einer A2-Welt.

Region	Maßnahmenbeginn A2-Welt [Jahr]							
	<i>A2-550-GDP-high</i>		<i>A2-550-GDP-low</i>		<i>A2-450-GDP-high</i>		<i>A2-450-GDP-low</i>	
	t-Start ¹	t-E _{max} ²	t-Start	t-E _{max}	t-Start	t-E _{max}	t-Start	t-E _{max}
Mittelamerika	2040	2040	2000	2065	2030	2030	2000	2040
Mittlerer Osten	2030	2030	1990	2050	2020	2025	1990	2035
Nordafrika	2040	2040	2025	2055	2030	2030	2025	2035
Ostafrika	> 2100	2100	2080	2075	2075	2075	2075	2075
Ostasien	2045	2045	2015	2060	2035	2035	2015	2040
Südamerika	2035	2035	1990	2090	2025	2025	1990	2055
Südasien	2060	2060	2065	2065	2045	2045	2045	2045
Südl. Afrika	2045	2045	2040	2055	2035	2035	2035	2035
Südostasien	2060	2060	2030	2085	2035	2045	2030	2050
Westafrika	> 2100	2100	2070	2075	2070	2070	2070	2070

¹ Eintrittszeitpunkt in ein Klimaschutzregime: Beginn der Stabilisierung oder Verminderung der *Pro-Kopf-Emissionen*.

² Zeitpunkt zu dem das Maximum der *Gesamtemissionen* einer Region durchlaufen wird. Nach diesem Jahr werden die Gesamtemissionen vermindert oder zumindest stabilisiert.

Für die Annex B-Regionen bedeutet die frühe Beteiligung der Nicht-Annex B-Regionen, dass sie ihre Emissionen zu Beginn der Szenarioperiode langsamer absenken dürfen. Dieser Fall wurde für die Annex B-Regionen bereits im vorigen Kapitel betrachtet.

Einer frühen Beteiligung der Nicht-Annex B-Regionen steht allerdings ein gravierender Nachteil gegenüber. Ihre Pro-Kopf-Emissionen müssen gerade in den, gemessen an ihrem Durchschnittseinkommen etwas reicheren Regionen, wie z.B. Südamerika, so früh stabilisiert werden, dass ihre Emissionsanrechte auf einem sehr niedrigen Niveau bleiben. Dies ist, zumindest kurzfristig betrachtet, gleichbedeutend mit einem Verzicht auf einen gewissen Energieverbrauch und damit Konsumlevel, da die Technologie für eine weniger CO₂-intensive Energieproduktion derzeit noch nicht so weit entwickelt ist, dass von einer wirkamen Entkopplung von Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch gesprochen werden könnte.

Ein Nachteil für die Annex B-Regionen besteht darin, dass die Emissionsanrechte der Nicht-Annex B-Regionen auf einem so niedrigen Niveau bleiben, dass ein Verkauf von Emissionsanrechten innerhalb der flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls nur sehr eingeschränkt möglich wäre. Ihre trotzdem noch beträchtlichen Reduktionsmaßnahmen müssten diese Länder dann größtenteils im eigenen Land durchführen.

Wird das Einstiegseinkommen höher angesetzt (hier durchschnittliches Annex B-Einkommen im Jahr 1990), wie in den Szenarien *A2-550-GDP-high* und *A2-450-GDP-high*, dürfen die Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B-Länder länger ansteigen. Dies hat zur Folge, dass die Annex B-Emissionen stärker eingeschränkt werden und so schnell absinken müssen, dass die Nicht-Annex B-Regionen wiederum ihre Pro-Kopf-Emissionen reduzieren müssen, bevor sie das (höhere) Schwelleneinkommen erreicht haben. Die fünf Regionen, die in der Nicht-Annex B-Gruppe mittlere Pro-Kopf-Emissionen aufweisen (Südamerika, Mittelamerika, Nordafrika, Südliches Afrika und Ostasien) beginnen, je nach Stabilisierungsziel, zwischen 2025 und 2045 ihre Pro-Kopf-Emissionen abzusenken (vgl. Abbildung 5a und 5c). Die maximalen Minderungsraten betragen für das 550 ppm Stabilisierungsziel zwischen 2.0 und 3.7% pro Jahr. Bei einem strikteren Stabilisierungsziel von 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre werden kurzfristig sogar maximale Minderungsraten zwischen 3.9 und 5.7% notwendig.

Die höchsten Pro-Kopf-Emissionen erreicht die Region Mittlerer Osten mit 2.5 t C_{äq} pro Kopf unter dem Szenario *A2-550-GDP-high*. Alle anderen Regionen bleiben mit ihren Pro-Kopf-Emissionen über die gesamte Szenarioperiode unter einem Wert von 2 t C_{äq} pro Person. Bei hohem Einstiegseinkommen halten die vier Regionen, die derzeit die niedrigsten Pro-Kopf-Emissionen aufweisen (Südostasien, Südasien, Ost- und Westafrika), diese über die gesamte Szenarioperiode bei einem Wert von < 1 t C_{äq} pro Person. Außerdem müssen die beiden Regionen Südostasien und Südasien um die Mitte des Jahrhunderts beginnen ihre Emissionen abzusenken. Lediglich die beiden afrikanischen Regionen (Ost- und Westafrika) weichen nach diesem Ansatz erst weit in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts von ihren Referenzemissionen ab.

Ein hoch angesetztes Einstiegskriterium hat für die Nicht-Annex B-Regionen den Vorteil, dass ihre Emissionen zunächst einmal ohne Kontrolle ansteigen dürfen. Werden diese Emissionsanrechte freiwillig nicht in Anspruch genommen, bleibt eine, auch aus Sicht der Annex B-Regionen vorteilhafte Flexibilität, da ein größerer Spielraum für den Handel mit Emissionsanrechten erhalten bleibt.

Regionale Emissionsanrechte und langfristige Klimaschutzziele

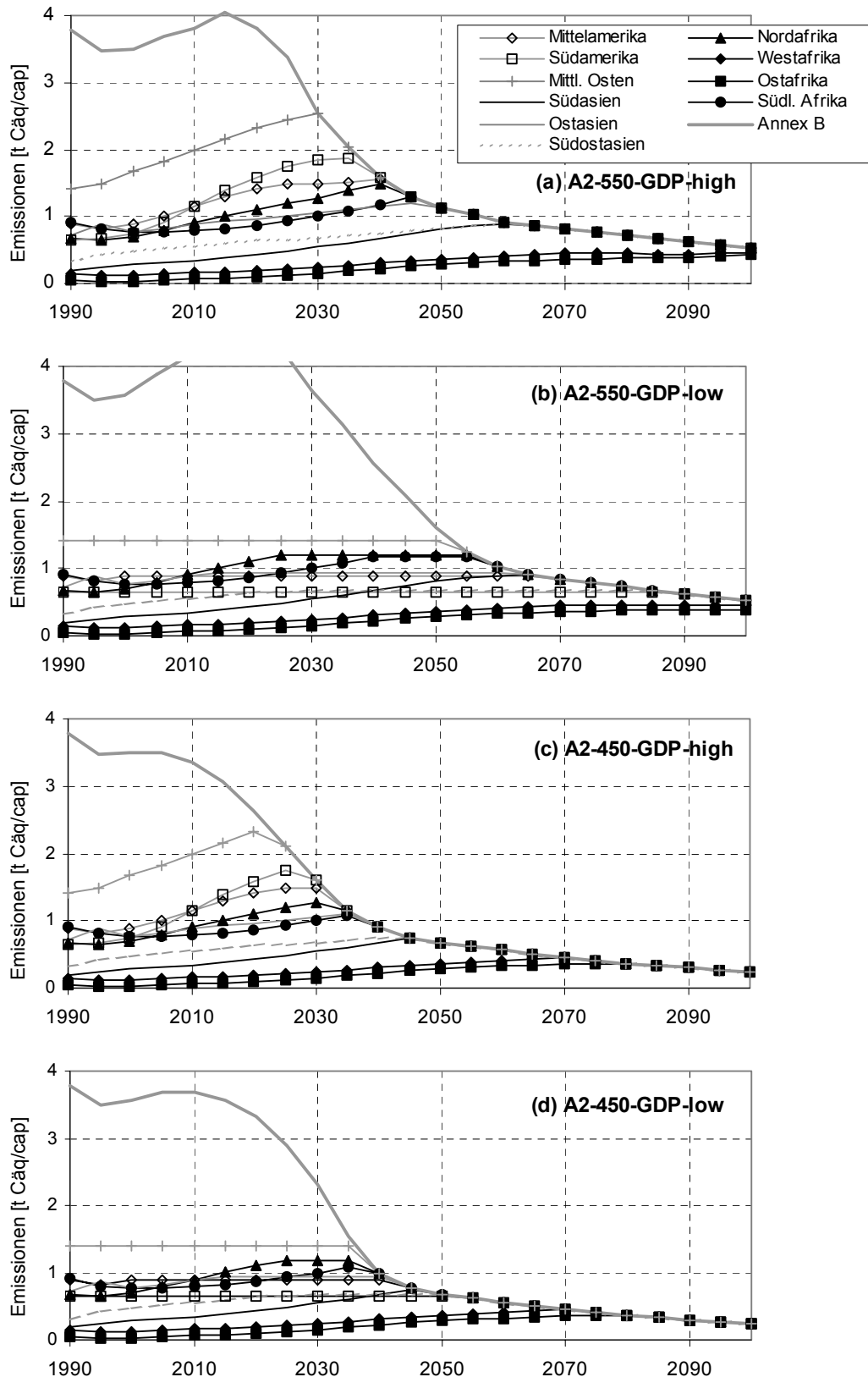


Abbildung 5 Verlauf der Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B-Regionen in einer A2-Welt bei unterschiedlichen Annahmen für Klimaschutzziel und Einstiegseinkommen. Für eine Erklärung der Szenariobezeichnungen sei auf *Tabelle 6* verwiesen.

Der Nachteil, den ein hohes Einstiegskriterium für die Nicht-Annex B-Regionen hat, besteht darin, dass der Übergang vom unkontrollierten Anstieg zu einer teilweise recht strikten Reduktion der Emissionen dadurch, dass das Einstiegskriterium nicht greift, z.T. sehr abrupt geschieht. Wie in Abbildung 5a zu sehen ist, müssen Regionen mit einem kurzfristig kräftigen Emissionsanstieg, wie z.B. der Mittlere Osten, von einem jährlichen Wachstum von 1-2% pro Jahr umstellen auf eine Reduktion der Emissionen um 4% pro Jahr, die über eine Periode von etwa 15 Jahren anhält.

Für die Annex B-Regionen bedeutet ein lange währender unkontrollierter Anstieg der Nicht-Annex B-Emissionen, dass ihre kurzfristigen Emissionsanrechte sehr schnell sinken. D.h. ihre Pro-Kopf-Emissionen müssen entweder direkt innerhalb der Region abgesenkt werden, oder Annex B- und Nicht-Annex B-Regionen müssen ein gut funktionierendes Emissionshandelssystem entwickeln, das größere Emissionsmengen umfasst, als es die derzeitigen Reduktionsvorgaben des Kyoto-Protokolls erfordern.

Gesamtemissionen

Unter dem A2-Szenario fällt der Verlauf der Treibhausgasemissionen der Nicht-Annex B-Regionen sehr unterschiedlich aus. Zwischen 1990 und 2100 nehmen die Emissionen am geringsten in der Region Ostasien zu – und zwar um den Faktor 6.1. Am anderen Ende des Spektrums liegt die Region Ostafrika, für die unter diesem Szenario ein Zuwachs um den Faktor 43 angenommen wird (vgl. Tabelle 8). Allerdings weist Ostafrika mit 0.04 t C_{äq} pro Kopf im Jahr 1990 so niedrige Ausgangsemissionen auf, dass eine Erhöhung der Emissionen um einen Faktor 12.5 notwendig wäre, um nur die heutigen durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B-Regionen zu erreichen. Die Emissionen der gesamten Gruppe der Nicht-Annex B-Staaten würden ohne Verpflichtungen zum Klimaschutz um den Faktor 9.0 ansteigen und wären damit Ende des Jahrhunderts etwa doppelt so hoch wie die Emissionen der Annex B-Gruppe im Jahr 2100 (bei einer Bevölkerung, die zu diesem Zeitpunkt das 6-fache der Annex B-Bevölkerung beträgt).

In Tabelle 8 sind für jedes Szenario und jede Nicht-Annex B-Region zwei Arten von Gesamtemissionen aufgeführt: (1) Die maximalen Emissionen E_{\max} , die die Emissionshöhe markieren, ab der eine Minderung, oder zumindest Stabilisierung der Gesamtemissionen stattfinden muss und (2) die Emissionen E_{2100} , die einer Region am Ende der Szenarioperiode zustehen. Betrachtet man die Gesamtemissionen der Regionen in Tabelle 8, so werden drei Dinge deutlich:

1. der Zeitpunkt, an dem das Maximum der Emissionen durchlaufen wird, ist gleichermaßen von der Höhe des Einstiegseinkommens und vom Stabilisierungsziel abhängig. D.h., je höher das Einstiegseinkommen angesetzt wird und je höher das Stabilisierungsziel angesetzt wird, desto höher ist das Emissionsmaximum, das die Nicht-Annex B-Regionen (mit wenigen Ausnahmen) erreichen dürfen. So hat die Region Südamerika ein Anrecht auf eine Versechsfachung ihrer Gesamtemissionen, wenn das Klimaziel auf moderate 550 ppm CO₂ festgelegt wird und ein später

Eintrittszeitpunkt in ein Klimaschutzregime erlaubt ist (Szenario *A2-550-GDP-high*). Eine schrittweise Verschärfung der Bedingungen durch einen früheren Beteiligungstermin sowie ein strikteres Klimaziel führt dazu, dass das erlaubte Maximum bei dieser Region nur noch beim 2.5-fachen der 1990er Emissionen liegt (Szenario *B2-450-GDP-low*). Der geringste Anstieg der Emissionen ist für die Regionen Mittelamerika und Ostasien mit 219 bzw. 216% der heutigen Emissionen erlaubt (Szenario *B2-450-GDP-low*), der höchste Anstieg mit einer Erhöhung um den Faktor 43 für die Region Ostafrika unter dem Szenario *A2-550-GDP-high*. Das hohe Einstiegseinkommen und die niedrigen Pro-Kopf-Emissionen dieser Region bewirken, dass ihre Emissionen bis zum Ende der Szenarioperiode den Referenzemissionen folgen dürfen;

2. die Höhe der Gesamtemissionen im Jahr 2100 wird fast ausschließlich durch das angestrebte Klimaziel und nur wenig durch die Höhe des Einstiegseinkommens bestimmt, da sich bis zu diesem Zeitpunkt die Pro-Kopf-Emissionen nahezu aller Regionen dem globalen Mittelwert angenähert haben. Die Emissionsanrechte unter dem 450 ppm-Szenario für das hohe und das niedrige Einstiegseinkommen sind identisch. Sie machen auf der einen Seite für die Region Ostasien eine Verminderung der Emissionen auf 86% der 1990er Emissionen notwendig und erlauben andererseits für die Region Ostafrika einen Anstieg der Emissionen auf 2365% des heutigen Wertes. Das weniger strikte Stabilisierungsziel von 550 ppm CO₂ erlaubt einen deutlich höheren Zuwachs der Gesamtemissionen bis zum Jahr 2100: Der niedrigste Anstieg liegt bei 189% der 1990er Emissionen für Ostasien. Der höchste prozentuale Anstieg ist wiederum für die Region Ostafrika erlaubt und liegt, je nach Höhe des Einstiegseinkommens zwischen 3639 und 4283% der 1990er Emissionen;
3. die Annex B-Regionen haben, je nach Stabilisierungsziel, langfristig Anrechte auf ein Viertel der heutigen Emissionen, wenn ein 550 ppm-Stabilisierungsziel angestrebt wird. Dieser Wert halbiert sich noch einmal, wenn das Stabilisierungsziel auf 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre verschärft wird.

Diese Beispiele zeigen, dass der Ansatz sehr gut in der Lage ist, die unterschiedlichen Bedingungen innerhalb der Gruppe der Nicht-Annex B-Regionen zu berücksichtigen.

Tabelle 8 Änderung der Gesamtemissionen der Nicht-Annex B-Regionen resultierend aus vier Klimaschutzenszenarien, die auf dem Referenzszenario A2 basieren. Angegeben sind die maximalen Emissionen (E_{\max}) sowie die Emissionen am Ende der Szenarioperiode 2100 (E_{2100}).

Region	Gesamtemissionen A2-Welt										
	[Gt C _{aq.}]	[% relativ zu 1990]									
		A2		Ziel 550 ppm CO ₂				Ziel 450 ppm CO ₂			
		E_{1990}	E_{\max}^1	E_{2100}	<i>Einstieg hoch</i>		<i>Einstieg niedrig</i>		<i>Einstieg hoch</i>		<i>Einstieg niedrig</i>
			E_{\max}	E_{2100}	E_{\max}	E_{2100}	E_{\max}	E_{2100}	E_{\max}	E_{2100}	E_{2100}
Mittelamerika	0.13	1004	1004	384	233	287	234	321	106	219	106
Mittlerer Osten	0.27	1046	937	458	239	366	241	340	109	279	109
Nordafrika	0.08	1449	1449	658	493	678	497	463	226	475	226
Ostafrika	0.01	4283	4283	4283	4283	3650	3639	3650	2365	3650	2365
Ostasien	0.91	613	613	288	189	254	190	243	86	216	86
Südamerika	0.19	1075	1075	601	322	353	325	487	148	250	148
Südasien	0.22	1323	1323	1109	705	1151	710	839	323	840	323
Südl. Afrika	0.11	832	832	455	227	460	228	335	104	335	104
Südostasien	0.14	1148	1148	616	449	543	452	457	205	433	205
Westafrika	0.04	1236	1236	1236	1236	1228	1199	1200	647	1200	647
Gesamt	2.09	896	896	422	325	415	325	326	151	309	151
Annex B	4.63	224	224	100	25	100	25	100	11	100	11

¹ Das Emissionsmaximum E_{\max} stellt jeweils den höchsten Emissionswert einer Region während der gesamten Szenarioperiode 1990-2100 dar. D.h. die Werte in der Spalte für die maximalen Emissionswerte stammen aus unterschiedlichen Jahren. Bei den Annex B-Regionen ist der Wert für 1990 als Maximalwert gesetzt, da davon ausgegangen wird, dass die Emissionsanrechte dieser Regionen in Zukunft den Wert von 1990 nicht mehr übersteigen werden.

Kumulierte Emissionen

Der langfristige Beitrag einer Region zum Klimaschutz ist proportional zur Abweichung zwischen den Emissionen des Referenzszenarios und denen des jeweiligen regionalen Klimaschutzszenarios. Um abzuschätzen, wie groß der jeweilige Beitrag der einzelnen Regionen ist, werden zwischen 1990 und 2100 die jährlichen Emissionen der einzelnen Klimaschutzszenarien kumuliert und den kumulierten Emissionen des Referenzszenarios gegenübergestellt. Unter dem A2-Szenario werden über das Jahrhundert weltweit 1860 Gt C_{äq} emittiert (vgl. Tabelle 9). Die Nicht-Annex B-Regionen hätten einen Anteil von 60% an diesen Emissionen und die Annex B-Regionen entsprechend von 40%, wenn es keinerlei Klimaschutzmaßnahmen geben würde.

Wird ein Stabilisierungsziel von 550 ppm CO₂ in der Atmosphäre angestrebt, dürften die globalen kumulierten Emissionen nur noch 58% der Emissionen des Referenzszenarios betragen (1078 Gt C_{äq}). Sowohl die Annex B- als auch die Nicht-Annex B-Regionen leisten unter den beschriebenen Verteilungsszenarien ihren Beitrag zum Erreichen dieses Zieles: Beteiligen sich die Nicht-Annex B-Regionen früh an einem Klimaschutzregime (Szenario *A2-550-GDP-low*), so betragen ihre kumulierten Emissionen noch 62% der Emissionen des Referenzszenario - die Gesamtheit der Annex B-Regionen müsste ihre kumulierten Emissionen entsprechend auf 52% der Referenzemissionen vermindern. Ein höheres Einstiegskriterium (Szenario *A2-550-GDP-high*) hat für die Nicht-Annex B-Länder den Vorteil, dass ihre Emissionsrechte etwas höher ausfallen: Sie haben Anrechte auf 67% ihrer Referenzemissionen, während bei den Annex B-Staaten der Klimaschutzbeitrag mit nur noch 44% der Referenzemissionen höher ausfällt.

Tabelle 9 Kumulierte CO₂-äquivalente Emissionen des A2-Szenarios zwischen 1990 und 2100 sowie der auf dem A2-Szenario basierenden Klimaschutzszenarien.

Szenario	Kumulierte Emissionen 1990-2100 [Gt C _{äq}]		
	Welt	Nicht-Annex B	Annex B
<i>A2</i>	1860	1115	745
<i>A2-550-GDP-low</i>	1078	689	389
<i>A2-550-GDP-high</i>	1078	748	330
<i>A2-450-GDP-low</i>	774	507	267
<i>A2-450-GDP-high</i>	774	535	239

Dasselbe gilt im Prinzip, wenn eine Stabilisierung der CO₂-Konzentration bei 450 ppm CO₂ angestrebt wird: Die globalen kumulierten Emissionen dürfen sich in einer A2-Welt nur noch auf 42% der Referenzemissionen belaufen.

Die Nicht-Annex B-Regionen haben entsprechend nur noch Anrechte auf 45% der Referenzemissionen bei frühem Einstieg und auf 48% bei spätem Einstieg in ein Klimaschutzregime. Das heißt, in beiden Fällen sinken die Emissionsanrechte der Nicht-Annex B-Gruppe unter 50% der kumulierten Referenzemissionen.

Für die Annex B-Regionen bedeutet ein strikteres Klimaziel, dass bei frühem Einstieg von Nicht-Annex B noch 36% der Referenzemissionen erlaubt sind; ein später Beginn der Nicht-Annex B-Regionen lässt nur noch Emissionen zu, die bei 32% der Referenzemissionen liegen. Bei der Verteilung von Emissionsanrechten trägt damit die Gruppe der Annex B den größeren Anteil an Minderungsmaßnahmen. Aber auch die Gruppe der Nicht-Annex B-Staaten trägt entscheidend zur Umsetzung der untersuchten Klimaziele bei.

Kumulierte Emissionen – regionale Verteilung

Ein wichtiges Ziel bei der Entwicklung des hier vorgestellten Verteilungsansatzes war es, dass sich die unterschiedlichen Ausgangsbedingungen und Entwicklungen der Regionen, die bisher noch nicht an einem Klimaschutzregime beteiligt sind, bei der Verteilung von Emissionsanrechten widerspiegeln. Als Maß für den Beitrag, den die einzelnen Regionen langfristig zum Erreichen eines Klimaschutzzieles leisten, werden wiederum die kumulierten Emissionen des Referenzszenarios mit denen der einzelnen Klimaschutzszenarien verglichen. In Abbildung 6 ist für jede Nicht-Annex B-Region jeweils der Anteil der Referenzemissionen aufgeführt, der bei Umsetzung der Szenariovorgaben als Emissionsanrecht über das Jahrhundert noch zur Verfügung steht. So ist ein Emissionsanrecht von 100% hier gleichbedeutend mit einem Fehlen regionaler Klimaschutzverpflichtungen.

Wie bereits beschrieben, dürfen die kumulierten Emissionen der Gesamtheit der Nicht-Annex B-Staaten, je nach Szenario, zwischen 45 und 67% der Referenzemissionen betragen. Wie aus Abbildung 6 deutlich wird, versteckt sich hinter diesen Zahlen ein breites Spektrum an Beiträgen zum Klimaschutz. Die Emissionsanrechte variieren, je nach Szenario, zwischen 100%, und damit keinem Klimaschutzbeitrag für die Regionen Ost- und Westafrika und 26% für die Region Mittlerer Osten, die sich damit bei ihren Einsparungen in der Größenordnung der Annex B-Regionen bewegt. Dieser hohe Beitrag zu einem Klimaschutzregime ist damit zu begründen, dass die Pro-Kopf-Emissionen dieser Region schon zu Beginn der Szenarioperiode doppelt so hoch wie der Durchschnittswert für die Nicht-Annex B-Gruppe ist und unter dem A2-Szenario für die Region Mittlerer Osten ein schnelles und kräftiges Emissionswachstum angenommen wird. Die Folge ist, dass diese Region früh mit einer Emissionskontrolle beginnt und damit ein Großteil ihres zukünftigen Emissionsanstiegs verhindert wird: Wie schon aus Tabelle 8 hervorgeht, würden sich die Gesamtemissionen dieser Region unter dem A2-Szenario etwa verzehnfachen. Die Klimaschutzszenarien erlauben jedoch maximal eine Verdrei- bis Verfünffachung.

Für das andere Extrem, d.h. für die Regionen Ost- und Westafrika sind erst bei einem strengeren Stabilisierungsziel von 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre Klimaschutzmaßnahmen notwendig. Die kumulierten Emissionen liegen bei 89% für Westafrika bzw. 92% für Ostafrika im Vergleich zum A2-Referenzszenario. Beide Regionen haben gemeinsam, dass ihre Pro-Kopf-Emissionen über den gesamten Szenariozeitraum so niedrig sind, dass sie erst ab 2070 ein Niveau erreichen, das sich dem globalen Mittelwert annähert, der zu diesem Zeitpunkt schon sehr niedrig liegt. Diese zwei Beispiele (und Abbildung 6) zeigen, dass der Verteilungsansatz in der Lage ist, die unterschiedlichen Ausgangssituationen und

zukünftigen möglichen Entwicklungen bei der Berechnung eines Beitrages zu einem Klimaschutzregime zu berücksichtigen.

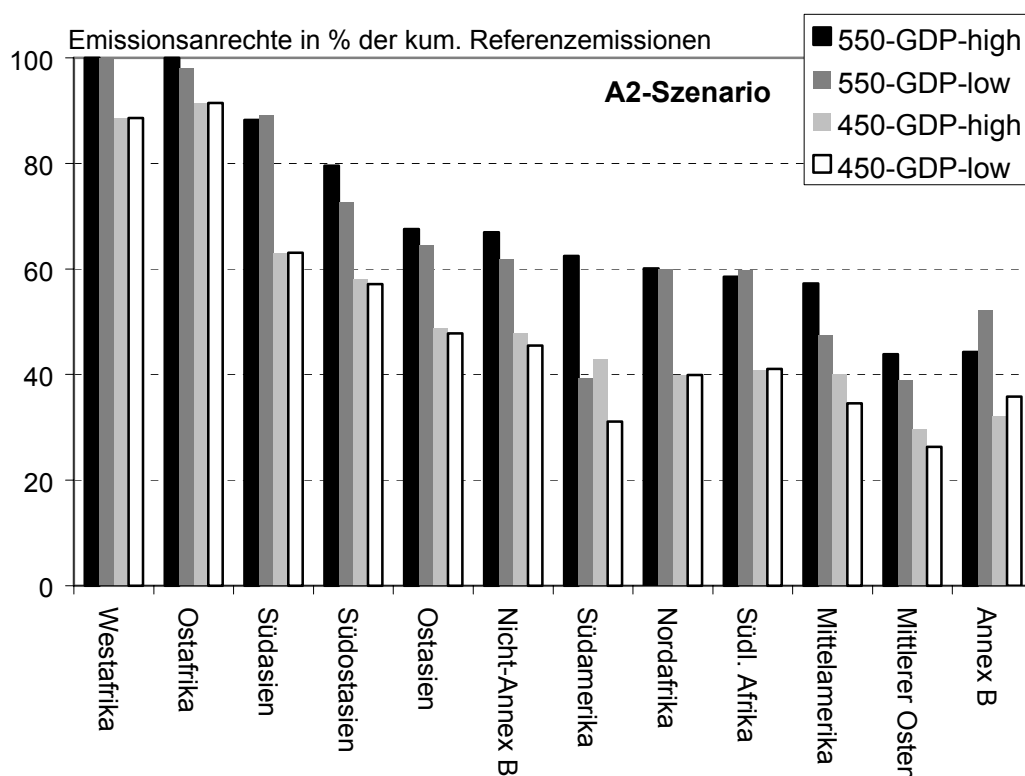


Abbildung 6 Kumulierte Emissionsanrechte der Nicht-Annex B-Regionen in einer A2-Welt für den Zeitraum 1990 bis 2100 bei unterschiedlichen Eintrittskriterien und Klimaschutzzielen, dargestellt als prozentualer Anteil der kumulierten CO₂-äquivalenten Emissionen des Referenzszenarios A2. Außerdem sind die kumulierten Gesamtemissionen der Annex B- und der Nicht-Annex B-Gruppe abgebildet.

Wie Abbildung 6 zeigt, spielt das Klimaschutzziel eindeutig die wichtigste Rolle für den Beitrag, den eine Region zum Erreichen eines Klimaschutzzieles leisten muss. Mit Ausnahme der beiden ärmsten Regionen Ost- und Westafrika, haben die Nicht-Annex B-Regionen unter dem 450 ppm-Stabilisierungsziel lediglich ein Anrecht auf 40-60% ihrer Referenzemissionen. Auch wenn der Beitrag der Annex B-Emissionen mit einer Absenkung auf durchschnittlich 30-35% der Referenzemissionen um Einiges höher liegt, ist der Beitrag, den die Nicht-Annex B-Regionen unter den gegebenen Szenariobedingungen und Regeln zum Klimaschutz leisten, noch durchaus beachtlich.

3.2.3 Verteilung von Emissionsanrechten in einer B2-Welt

Je nachdem, welchen Entwicklungspfad die Welt in Zukunft einschlägt, wird das Erreichen eines Klimaschutzzieles erschwert oder erleichtert. Die bisher gezeigten Anwendungsbeispiele für eine Verteilung von Emissionsanrechten in einer A2-Welt zeigen nur eine Möglichkeit auf. Vom IPCC wurden vier Szenarien entwickelt, die eine Spanne möglicher Zukünfte im Hinblick auf den Klimawandel aufzeigen sollen; keines dieser Szenarien ist als

ein wahrscheinlichstes Szenario gekennzeichnet. Um eine Spanne möglicher Emissionsanrechte aufzeigen zu können, wird der vorgestellte Verteilungsansatz zusätzlich auf das B2-Szenario angewendet und die Ergebnisse mit denen des A2-Szenarios verglichen.

Die B2-Welt unterscheidet sich von der A2-Welt hauptsächlich in den folgenden Punkten:

- Das Einkommen der Nicht-Annex B-Länder wächst stärker. Insbesondere in den Regionen Ostasien und Südasien ist das Durchschnittseinkommen der Bevölkerung bereits im Jahr 2020 nahezu doppelt so hoch wie in der A2-Welt (vgl. Tabelle 5).
- Das Bevölkerungswachstum in den Nicht-Annex B-Ländern ist weniger stark ausgeprägt als in der A2-Welt (Tabelle 4). Während sich die Bevölkerung der Nicht-Annex B-Regionen unter dem A2-Szenario mehr als verdreifacht, wächst sie unter dem B2-Szenario nur um einen Faktor 2.2. Die Bevölkerung der Annex B-Regionen stabilisiert sich auf dem heutigen Niveau.
- Als Folge der beschriebenen Trends für Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum und aufgrund der ökologischen Grundausrichtung des B2-Szenarios durchlaufen die Gesamtemissionen der Nicht-Annex B-Staaten bis zur Mitte des Jahrhunderts ein Maximum und stabilisieren sich danach – auf einem höheren Niveau als heute, aber bei der Hälfte der Emissionen des A2-Szenarios. Für die Annex B-Regionen zeigt das B2-Szenario einen leichten Anstieg auf 112% der heutigen Emissionen im Jahr 2025 mit einem nachfolgenden Rückgang der Emissionen auf 70% der 1990er Werte bis zum Jahr 2100 - im Vergleich zu einer Erhöhung um den Faktor 2.2 unter dem A2-Szenario.
- Die durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen sowohl der Nicht-Annex B- als auch der Annex B-Regionen steigen weniger stark an. So verdoppeln sie sich bei den Nicht-Annex B-Regionen lediglich von 0.5 auf 1.0 t C pro Person, während die der Annex B-Regionen nach einem leichten Anstieg sogar auf 68% der heutigen Emissionen absinken (vgl. Abbildung 7).

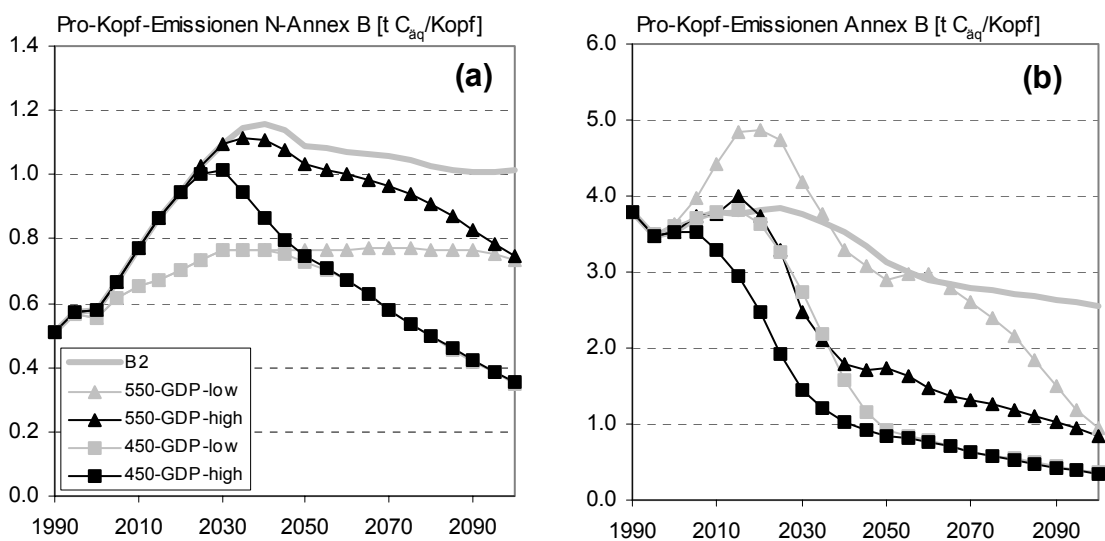


Abbildung 7 Durchschnittliche Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B-Regionen (a) und Annex B-Regionen (b) in einer B2-Welt.

Die oben beschriebenen Unterschiede zwischen der A2- und der B2-Welt haben zur Folge, dass die langfristigen Emissionsanrechte auf Pro-Kopf-Basis unter dem B2-Szenario nahezu doppelt so hoch liegen wie unter dem A2-Szenario. Das Erreichen eines Stabilisierungszieles von 550 ppm CO₂ in der Atmosphäre erlaubt die Emission von 0.8 t C_{äq} pro Person, das Erreichen des 450 ppm-Zieles 0.4 t C_{äq} pro Person (vgl. Abbildung 7). Es bleibt festzuhalten, dass die Emissionen sowohl unter dem A2- als auch dem B2-Szenario langfristig auf unter 1.0 t C_{äq} pro Person abgesenkt werden müssen.

Pro-Kopf-Emissionen und Eintrittszeitpunkt in ein Klimaschutzregime

Ein wichtiges Kriterium bei der Ausgestaltung eines Klimaschutzregimes ist der Beginn der Beteiligung an solch einem Regime, d.h. der Zeitpunkt, an dem eine oder auch mehrere Regionen beginnen, von ihren Referenzemissionen abzuweichen. Je mehr Regionen sich an der Einsparung einer bestimmten Treibhausgasmenge beteiligen, desto geringer ist der Anteil, den die einzelnen Regionen leisten müssen. Da in der B2-Welt das Einkommen der Nicht-Annex B-Regionen schneller wächst als in der A2-Welt, beteiligen sich die Nicht-Annex B-Regionen in einer B2-Welt um 5-30 Jahre früher an einem Klimaschutzregime, wenn das Einstiegseinkommen niedrig angesetzt wird (Szenario *B2-550-GDP-low*). Sieben von zehn Regionen beginnen ihre Pro-Kopf-Emissionen 2030 und früher zu kontrollieren, im Vergleich zu sechs von zehn Regionen unter dem A2-Szenario. Bei den Regionen, die unter dem B2-Szenario früher reagieren als unter dem A2-Szenario, handelt es sich um die Regionen Süd- und Ostasien. Da diese zwei Regionen eine große Bevölkerung aufweisen und für sie unter dem B2-Szenario ein starkes wirtschaftliches Wachstum angenommen wird, hat ihre frühe Einbindung einen deutlichen Einfluss auf den Verlauf der Emissionsanrechte derjenigen Regionen, die sich zum Eintrittszeitpunkt bereits an einem Klimaschutzregime beteiligen. Dies sind vor allem die jetzigen Annex B-Regionen, deren Emissionsreduktion um so mehr verlangsamt und verzögert wird, desto mehr und früher die Nicht-Annex B-Regionen sich direkt am Klimaschutz beteiligen. So müssen die Annex B-Regionen eine 50%ige Reduktion ihrer Pro-Kopf-Emissionen erst 2085 umgesetzt haben (vgl. Abbildung 8b, Szenario *B2-550-GDP-low*), d.h. 35 Jahre später als unter dem vergleichbaren A2-Szenario (Abbildung 5b).

Ein strikteres Klimaziel (Szenario *B2-450-GDP-low*) verwischt die Unterschiede zwischen Klimaschutzmaßnahmen in einer A2- und einer B2-Welt. Wenn überhaupt, liegt der Startzeitpunkt für Maßnahmen der Nicht-Annex B-Regionen nur noch 5-20 Jahre früher als in der A2-Welt. Es müssen auch unter diesem Szenario sieben von zehn Nicht-Annex B-Regionen um 2030 oder früher mit Maßnahmen beginnen. Bei den Annex B-Regionen hat ein strikteres Klimaziel zur Folge, dass nur noch fünf Jahre später als unter dem A2-Szenario eine 50%ige Reduktion ihrer Pro-Kopf-Emissionen erforderlich ist (vgl. Abbildung 8d und Abbildung 5d).

Die Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B-Regionen unterscheiden sich in der B2-Welt nur bei dem Szenario mit moderatem Klimaschutzziel und hohem Einstiegseinkommen

(Szenario *B2-550-GDP-high*) von den Emissionen der A2-Welt. Da das Bevölkerungswachstum in der B2-Welt geringer ausfällt als in der A2-Welt, fallen die Emissionsanrechte pro Person bei gleichem globalem Emissionspfad natürlich höher aus. Dies erlaubt den Nicht-Annex B-Regionen ein langes Verweilen auf dem Referenzpfad, da das hohe Einstiegseinkommen, d.h. hier das durchschnittliche Einkommen der Annex B-Regionen im Jahr 1990, von keiner Region vor 2050 erreicht wird.

Tabelle 10 Maßnahmenbeginn der Nicht-Annex B-Regionen in einer B2-Welt.

Region	Maßnahmenbeginn B2-Welt [Jahr]							
	<i>B2-550-GDP-high</i>		<i>B2-550-GDP-low</i>		<i>B2-450-GDP-high</i>		<i>B2-450-GDP-low</i>	
	t-Start ¹	t-E _{max} ²	t-Start	t-E _{max}	t-Start	t-E _{max}	t-Start	t-E _{max}
Mittelamerika	2060	2070	2000	2100	2030	2030	2000	2050
Mittlerer Osten	2030	2030	1990	2090	2020	2020	1990	2040
Nordafrika	2055	2055	2020	2090	2030	2035	2020	2045
Ostafrika	> 2100	2100	2070	2100	2090	2095	2070	2100
Ostasien	2050	2040	2005	2090	2025	2030	2005	2050
Südamerika	2045	2035	1990	2100	2025	2025	1990	2070
Südasien	> 2100	2045	2030	2100	2045	2040	2030	2055
Südl. Afrika	2080	2080	2035	2100	2045	2045	2035	2055
Südostasien	2055	2040	2010	2070	2035	2035	2010	2065
Westafrika	> 2100	2100	2065	2095	2085	2090	2065	2100

¹ Eintrittszeitpunkt in ein Klimaschutzregime: Beginn der Stabilisierung oder Verminderung der *Pro-Kopf-Emissionen*.

² Zeitpunkt zu dem das Maximum der *Gesamtemissionen* einer Region durchlaufen wird. Nach diesem Jahr werden die Gesamtemissionen vermindert oder zumindest stabilisiert.

Wird ein hohes Einkommen als Einstiegskriterium angesetzt, erfolgt der Eintritt in ein Klimaschutzregime unter dem Szenario *B2-550-GDP-high* zwischen 5 bis 35 Jahre später als im vergleichbaren Klimaschutzszenario der A2-Welt, da die Annex B-Emissionen sehr lange so hoch bleiben, dass sie von den Nicht-Annex B-Emissionen erst spät erreicht werden (vgl. Abbildung 8a). Nur eine Region, der Mittlere Osten, beginnt bereits 2030 mit einer Reduktion der Pro-Kopf-Emissionen. Die Annex B-Regionen müssen bei ihren Pro-Kopf-Emissionen sowohl in der A2- als auch in der B2-Welt zwischen 2035 und 2040 eine 50%ige Reduktion ihrer Emissionen realisiert haben, wenn der Einstieg der Nicht-Annex B-Regionen spät erfolgt.

Ein strikteres Klimaziel in Kombination mit einem hohen Einstiegskriterium (Szenario *B2-450-GDP-high*) führt dazu, dass fünf von zehn Nicht-Annex B-Regionen im Jahr 2030 oder früher mit Maßnahmen beginnen müssen. D.h. nur eine Region mehr, nämlich Ostasien, erreicht aufgrund eines steileren Emissionsanstiegs als im A2-Szenario einen so hohen Wert, dass die Emissionen mit denen der Annex B-Emissionen konvergieren, d.h. mit

Reduktionsmaßnahmen begonnen werden muss (vgl. Abbildung 5c und Abbildung 8c). Für die Annex B-Regionen ändert sich unter diesem Szenario nichts, sowohl in einer A2- als auch in einer B2-Welt müssen ihre Pro-Kopf-Emissionen bis 2025 um 50% reduziert werden. Bei den Nicht-Annex B-Regionen unterscheiden sich die Pro-Kopf-Emissionen in einer A2- und B2-Welt ebenfalls nicht sehr stark. Diese Regionen müssen, mit Ausnahme der ärmsten Regionen, beginnen ihre Pro-Kopf-Emissionen zwischen 2025 und 2035 abzusenken. Ein niedrigeres Einstiegskriterium hat unter dem Szenario *B2-450-GDP-low* zur Folge, dass die Nicht-Annex B-Regionen 10 Jahre später als unter dem A2-Szenario beginnen müssen ihre Pro-Kopf-Emissionen abzusenken.

Regionale Emissionsanrechte und langfristige Klimaschutzziele

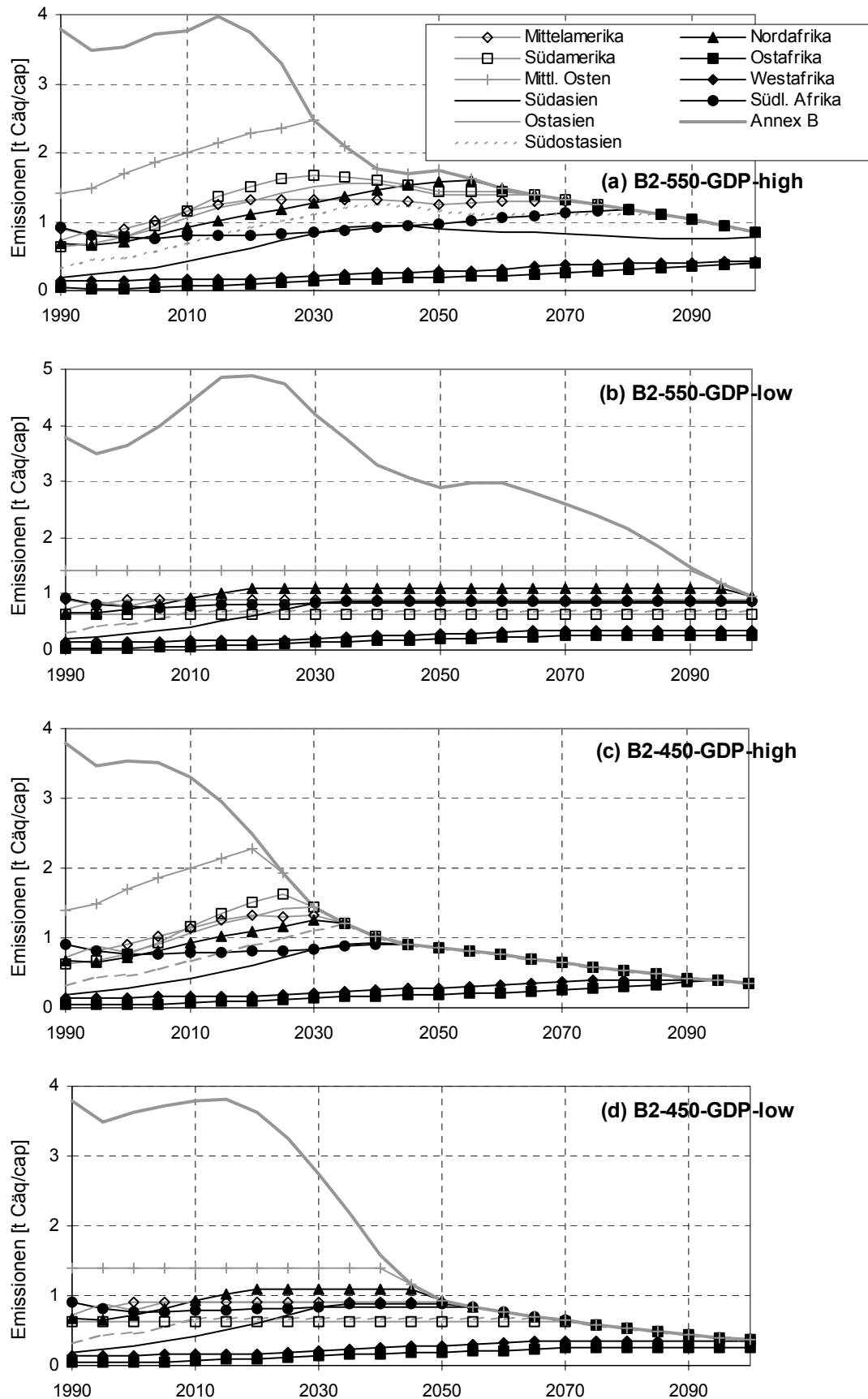


Abbildung 8 Verlauf der Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B-Regionen in einer B2-Welt bei unterschiedlichen Annahmen für Klimaschutzziel und Einstiegseinkommen. Für eine Erklärung der Szenariobezeichnungen sei auf *Tabelle 6* verwiesen.

Gesamtemissionen

Die regionalen Gesamtemissionen der Nicht-Annex B-Regionen ergeben sich aus der Entwicklung der Pro-Kopf-Emissionen und dem Bevölkerungswachstum des jeweiligen Referenzszenarios (hier B2). Wie in Tabelle 11 zu sehen ist, steigen die Gesamtemissionen der Nicht-Annex B-Gruppe unter dem B2-Szenario relativ zu 1990 maximal um den Faktor 4.5, im Vergleich zum Faktor 9.0 unter dem A2-Szenario. Auch unter den Klimaschutzszenarien sind die maximalen Gesamtemissionen (E_{\max}) der Nicht-Annex B-Regionen in der B2-Welt, von wenigen Ausnahmen abgesehen, niedriger als in der A2-Welt, da der Bevölkerungsanstieg unter dem B2-Szenario geringer ausfällt und ein schnellerer technologischer Wandel zu einer geringeren CO_2 -Intensität im Energiesektor führt. Die Gesamtemissionen der Nicht-Annex B-Gruppe steigen denn auch maximal um den Faktor 2.8 bis 4.0 relativ zu 1990 (im Vergleich zu 3.1 bis 9.0 unter dem A2-Szenario).

Die maximalen Emissionen der Nicht-Annex B-Regionen variieren, wie auch unter dem A2-Szenario, sowohl stark von Region zu Region als auch von Szenario zu Szenario. So dürfen die Emissionen in der Region Ostafrika um den Faktor 47 und damit vergleichbar zur A2-Welt ansteigen, wenn ein moderates das Stabilisierungsziel gewählt wird (550 ppm CO_2) und ein hohes Einstiegseinkommen erst späte, oder gar keine Klimaschutzmaßnahmen notwendig macht (Szenario *550-GDP-high*). Der Region Ostasien ist dagegen nur ein Emissionsanstieg um den Faktor 1.6 im Vergleich zu 1990 erlaubt, wenn ein stringenteres Klimaschutzziel von 450 ppm CO_2 in der Atmosphäre angestrebt wird und ein niedriges Einstiegseinkommen einen frühen Maßnahmenbeginn notwendig macht. In einer A2-Welt dürfen die Emissionen dieser Region um einen Faktor 2.2 ansteigen, da das geringere wirtschaftliche Wachstum unter dem Szenario *A2-450-GDP-low* einen späteren Einstieg in ein Klimaschutzregime erlaubt.

Von dem Umstand, dass die maximalen Gesamtemissionen der Nicht-Annex B-Regionen unter dem B2-Szenario in der Regel niedriger sind als unter dem A2-Szenario profitieren vor allem die Annex B-Regionen, deren Emissionen auch hier vermindert werden müssen, aber geringfügig später als in der A2-Welt. Außerdem liegen die maximalen Minderungs-raten in der B2-Welt mit 5.4% pro Jahr (Szenario *B2-450-GDP-low*) niedriger, im Vergleich zu einer maximalen Rate von 7% pro Jahr in der A2-Welt (Szenario *A2-450-GDP-low*). Bei diesen Reduktionsraten wird deutlich, dass die Annex B-Staaten zwar kurzfristig von einem frühen Einstieg der Nicht-Annex B-Regionen profitieren, dass aber aufgrund des Konvergenzkriteriums langfristig umso schneller reduziert werden muss.

Tabelle 11 Änderung der Gesamtemissionen der Nicht-Annex B-Regionen resultierend aus vier Klimaschutzzszenarien, die auf dem Referenzszenario B2 basieren. Angegeben sind die maximalen Emissionen (E_{\max}) sowie die Emissionen am Ende der Szenarioperiode 2100 (E_{2100}).

Region	[Gt C _{äq.}]	Gesamtemissionen B2-Welt										
		[% relativ zu 1990]										
		B2			Ziel 550 ppm CO ₂				Ziel 450 ppm CO ₂			
		E ₁₉₉₀	E _{max}	E ₂₁₀₀	Einstieg hoch		Einstieg niedrig		Einstieg hoch		Einstieg niedrig	
E _{max}	E ₂₁₀₀				E _{max}	E ₂₁₀₀	E _{max}	E ₂₁₀₀	E _{max}	E ₂₁₀₀		
Mittelamerika	0.13	325	325	281	193	204	204	243	80	186	82	
Mittlerer Osten	0.27	546	441	364	191	304	213	295	79	229	81	
Nordafrika	0.08	599	555	591	387	491	431	380	160	379	164	
Ostafrika	0.01	4700	4700	4700	4700	2992	2992	4417	4089	2992	2992	
Ostasien	0.91	280	249	280	158	167	167	258	65	164	67	
Südamerika	0.19	436	409	436	268	201	201	397	111	194	114	
Südasien	0.22	943	912	943	912	967	967	926	410	880	421	
Südl. Afrika	0.11	606	611	564	433	445	445	331	179	338	184	
Südostasien	0.14	632	573	632	432	362	346	596	179	362	183	
Westafrika	0.04	1350	1350	1350	1350	1088	1088	1261	1118	1088	1088	
Gesamt	2.09	446	446	404	328	334	322	341	155	282	155	
Annex B	4.63	112	69	100	23	100	26	100	10	100	10	

Kumulierte Emissionen

Ein Vergleich der über das Jahrhundert kumulierten Emissionen unter den Klimaschutzzszenarien mit den kumulierten Emissionen des Referenzszenarios erlaubt eine Aussage darüber, wie groß in einer B2-Welt der Beitrag einzelner Regionen zum Klimaschutz gesehen ist. In Tabelle 12 sind jeweils die kumulierten Emissionen für die Welt und die Gruppe der Nicht-Annex B- und der Annex B-Regionen aufgeführt.

Aus diesen Zahlen wird zuerst einmal deutlich, dass der Unterschied zwischen den kumulierten Emissionen des Referenzszenarios und der Klimaschutzszenarien in einer B2-Welt sehr viel kleiner ist als in einer A2-Welt: Bei einem Stabilisierungsziel von 550 ppm CO₂ in der Atmosphäre dürfen global noch 85% der Emissionen des B2-Referenzszenarios emittiert werden, während es unter dem A2-Szenario nur 58% sind. Die eher ökologische Orientierung der B2-Welt spiegelt sich sowohl in den Emissionen der Annex B- als auch der Nicht-Annex B-Gruppe wider. Die Nicht-Annex B-Regionen haben als Gruppe ein Anrecht auf 74% ihrer Referenzemissionen, wenn sie sich früh am Klimaschutz beteiligen und auf 92%, wenn sie spät in ein Klimaschutzregime eintreten. Von einem frühen Eintritt würden die Annex B-Regionen klar profitieren: ihre Emissionsanrechte würden theoretisch sogar die der Referenzemissionen übertreffen, und zwar um 3%. Eine späte Beteiligung der Nicht-Annex B-Regionen macht eine Emissionsminderung auf 71% der Referenzemissionen notwendig. Diese Werte liegen um Einiges höher als in einer A2-Welt, in der eine Verminderung der Annex B-Emissionen auf 44 bis 52% der Referenzemissionen notwendig wäre.

Tabelle 12 Kumulierte CO₂-äquivalente Emissionen des B2-Szenarios zwischen 1990 und 2100 sowie der auf dem B2-Szenario basierenden Klimaschutzszenarien.

Szenario	Kumulierte Emissionen 1990-2100 [Gt C _{äq}]		
	Welt	Nicht-Annex B	Annex B
<i>B2</i>	1273	807	466
<i>B2-550-GDP-low</i>	1078	598	479
<i>B2-550-GDP-high</i>	1078	745	332
<i>B2-450-GDP-low</i>	774	495	280
<i>B2-450-GDP-high</i>	774	545	228

Wird eine Stabilisierung bei 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre angestrebt, sind in einer B2-Welt noch 61% der kumulierten Referenzemissionen bzw. Emissionen von 774 Gt C_{äq} erlaubt. Beteiligen sich die Nicht-Annex B-Regionen früh an einer Emissionsminderung, so führt das dazu, dass die Annex B- und die Nicht-Annex B-Gruppe nahezu gleich große Beiträge zu einer Verminderung der Emissionen leisten müssen. Die Nicht-Annex B-Gruppe hat Emissionsanrechte auf 61% ihrer Referenzemissionen und die Annex B-Gruppe auf 60% ihrer kumulierten Referenzemissionen. Etwas anders ist die Situation, wenn die Nicht-Annex B-Regionen dem Klimaschutzregime später beitreten: Ihre Emissionsanrechte steigen dann auf 68% und die der Annex B-Region sinken entsprechend auf 49% der Referenzemissionen. Diese Emissionsanrechte sind relativ zu den Referenzemissionen immer noch höher als in der A2-Welt, in der die Nicht-Annex B-Gruppe ein Anrecht auf 45-48% der Referenzemissionen hat und die Annex B-Gruppe auf 32-36% ihrer Referenzwerte.

Kumulierte Emissionen – regionale Verteilung

Wie schon für die A2-Welt wird im folgenden Abschnitt der Klimaschutzbeitrag einzelner Regionen der Nicht-Annex B-Gruppe näher beleuchtet. Die Gesamtgruppe hat über das Jahrhundert betrachtet, je nach Szenario, ein Anrecht auf 61-92% ihrer Referenzemissionen. Innerhalb der Gruppe variieren die Anteile an den Referenzemissionen zwischen 38% für die Region Mittlerer Osten (vgl. Abbildung 9) und 100%, also keiner Beteiligung an Klimaschutzmaßnahmen, für die drei Regionen Ostafrika, Westafrika und Südasien. Auffällig ist, dass die Emissionsanrechte unter dem 550 ppm-Szenario mit hohem Einstiegseinkommen (Szenario *B2-550-GDP-high*) für alle Regionen, mit Ausnahme des Mittleren Ostens über 90% liegen. Die Ursache hierfür liegt darin, dass die meisten Nicht-Annex B-Regionen im Referenzszenario beginnen ihre Pro-Kopf-Emissionen abzusinken, bevor sie das mittlere Pro-Kopf-Einkommen der Annex B-Regionen im Jahr 1990 erreichen, das in diesem Szenario als Einstiegseinkommen dient. Dies hat zur Folge, dass sie sehr lange den Referenzemissionen folgen und erst sehr spät beginnen müssen, ihre Emissionen unter das Niveau des Referenzszenarios zu reduzieren. Nur die Region Mittlerer Osten hat so hohe Anfangsemissionen und weist unter dem Referenzszenario ein so starkes Wachstum der Pro-Kopf-Emissionen auf, dass ihre Pro-Kopf-Emissionen schon im Jahr 2030 mit denen der Annex B-Gruppe konvergieren und daher reduziert werden müssen (vgl. Abbildung 8a).

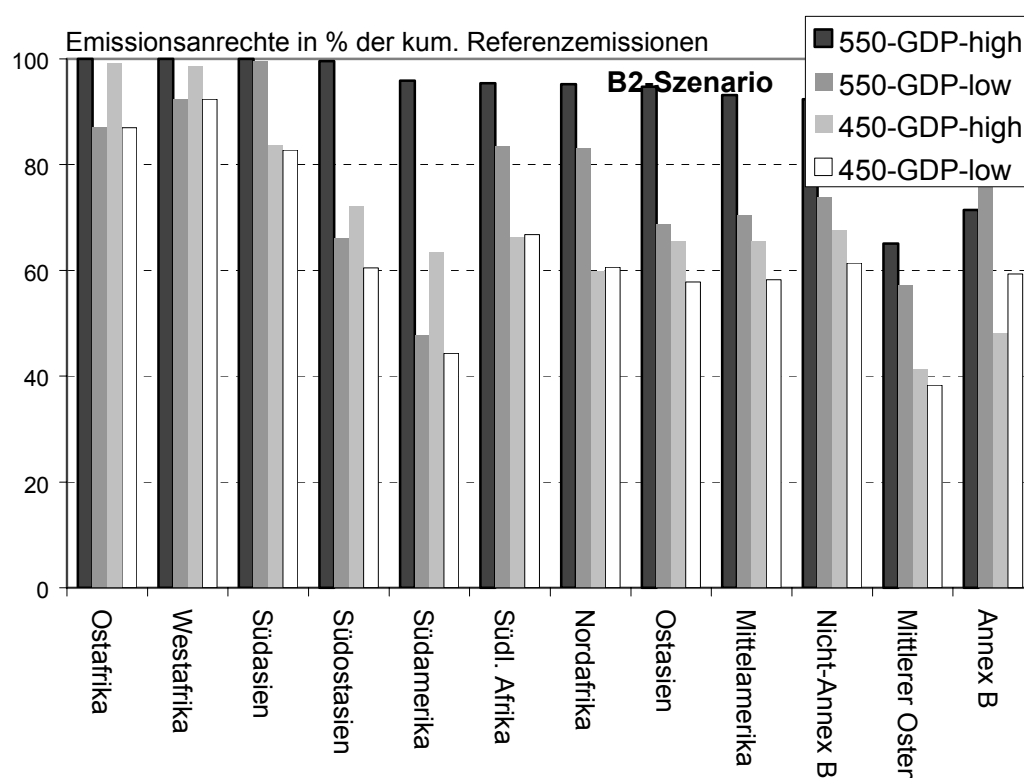


Abbildung 9 Kumulierte Emissionsanrechte der Nicht-Annex B-Regionen in einer B2-Welt für den Zeitraum 1990 bis 2100 bei unterschiedlichen Eintrittskriterien und Klimaschutzzielen, dargestellt als prozentualer Anteil der kumulierten CO₂-äquivalenten Emissionen des Referenzszenarios B2. Außerdem sind die kumulierten Gesamtemissionen der Annex B- und Nicht-Annex B-Gruppe abgebildet.

Sehr viel größer werden die Unterschiede zwischen den Nicht-Annex B-Regionen, wenn ein strikteres Klimaziel angestrebt wird, oder das Einstiegseinkommen vermindert wird, beides Faktoren, die zu einer früheren Beteiligung an einem Klimaschutzregime führen. Regionen, die einen starken Anstieg ihrer Pro-Kopf-Emissionen, oder ihres Einkommens aufweisen, wie z.B. Mittelamerika, Südamerika und Ostasien, müssen über das Jahrhundert gesehen, einen größeren Beitrag leisten als die Regionen, die auch langfristig ein niedriges Einkommen aufweisen (Ostafrika, Westafrika).

Im Vergleich zur A2-Welt liegen die prozentualen Emissionsanrechte der Nicht-Annex B-Regionen bei den Klimaschutzszenarien in der B2-Welt etwas höher. Sowohl in der A2- als auch in der B2-Welt muss die Region Mittlerer Osten auf einen vergleichbaren Emissionsanteil verzichten wie die Annex B-Gruppe. Der Unterschied besteht nur darin, dass die Annex B-Gruppe derzeit relativ hohe Emissionen verringern muss, der Mittlere Osten dagegen einen vergleichbaren prozentualen Anstieg verhindern und gleichzeitig den steigenden Energiebedarf seiner Bevölkerung befriedigen muss.

3.3 Schlussfolgerungen

Das vorgestellte Schema für eine zukünftige Verteilung von Emissionsanrechten stellt einen einfachen und transparenten Ansatz dar, der in dieser Form zwar nicht 1:1 in die Realität umsetzbar ist, der jedoch einige wichtige Prinzipien beinhaltet, die bei der Ausdehnung des jetzigen Klimaschutzregimes auf die Nicht-Annex B-Länder eine Rolle spielen werden. Dies ist zum Einen die langfristige Angleichung der Pro-Kopf-Emissionen von Annex B- und Nicht-Annex B-Staaten, und zum Anderen das durchschnittliche Einkommen einer Region als Maß für die Befähigung Klimaschutzmaßnahmen zu ergreifen. Ob allerdings das Durchschnittseinkommen, wie es hier definiert ist, als alleiniges Kriterium für die Befähigung zu Klimaschutzmaßnahmen ausreicht, ist zu hinterfragen. Wie das Beispiel der Region Südamerika mit ihrem relativ hohen Einkommen, aber niedrigen Pro-Kopf-Emissionen zeigt, kann es leicht zu Bedingungen kommen, die als ungerecht empfunden werden, wenn andere Faktoren, wie z.B. die CO₂-Intensität der Energieproduktion eines Landes, unberücksichtigt bleibt. Ausgehend von den Ergebnissen aus diesem Ansatz ist es aber leicht möglich, diese Aspekte als zusätzliche Korrekturfaktoren einzuführen.

Vorrangiges Ziel bei der Entwicklung und Anwendung des Verteilungsschemas war es, die langfristige Entwicklung von Emissionsanrechten von Annex B- und Nicht-Annex B-Regionen unter Berücksichtigung der Heterogenität innerhalb der Nicht-Annex B-Gruppe abzuschätzen, wenn pro Jahr nur eine begrenzte Menge globaler Emissionen zur Verfügung steht.

Ein Vergleich der langfristigen Zielwerte für die globalen Pro-Kopf-Emissionen von weniger als eine Tonne C-Äquivalente pro Person mit dem Verlauf der Referenzemissionen der Nicht-Annex B-Regionen macht deutlich, dass nicht nur die Annex B-Gruppe, sondern

auch viele der Nicht-Annex B-Regionen auf einen großen Teil ihrer zukünftigen Emissionen verzichten müssen, wenn langfristig eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration angestrebt wird. Sie tragen auch dann substantiell zum Erreichen eines Stabilisierungszieles bei, wenn eine globale Konvergenz der Pro-Kopf-Emissionen unter den hier vorgeschlagenen Regeln angestrebt wird. Selbst wenn die Pro-Kopf-Emissionen der Nicht-Annex B-Regionen kurzfristig noch ansteigen, so dürfen sie bei neun von zehn Regionen nie die Hälfte der heutigen Emissionen der Annex B-Regionen überschreiten. Besonders in einer A2-Welt, in der für das Erreichen eines Stabilisierungszieles besonders große Anstrengungen notwendig sind, haben sechs von zehn Nicht-Annex B-Regionen nur noch Anrechte auf 60% oder weniger ihrer kumulierten Referenzemissionen. Damit in diesen Regionen wirtschaftliches Wachstum stattfinden kann und sie gleichzeitig einen Beitrag zum Klimaschutz leisten können, muss daher eine möglichst schnelle Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Treibhausgasemissionen stattfinden. Ob der frühe Einsatz effizienter, aber immer noch kohlenstoffbasierter Energietechnologien, wie es für den ersten Verpflichtungszeitraum im Rahmen des „Clean Development Mechanism“ diskutiert wird, ausreicht, bleibt fraglich, da der Einsatz dieser Technologien zu einer relativ langfristigen Festlegung auf einen kohlenstoffbasierten Primärenergiemix führen würde. Wünschenswert wäre hier eine möglichst schnelle Einführung kohlenstoffneutraler Energietechnologien, zumal in den südlichen Nicht-Annex B-Ländern erneuerbare Energieträger, wie insbesondere die Sonnenenergie, in ausreichendem Maß zur Verfügung stünden.

Steigen die Treibhausgasemissionen der Nicht-Annex B-Regionen zu stark an und wird gleichzeitig ein striktes globales Klimaschutzziel angestrebt, kann es passieren, dass die Geschwindigkeit der Emissionsminderung in den Annex B-Staaten Raten von 5% pro Jahr überschreiten muss und die Anforderungen damit drohen unrealistisch zu werden. Soll in dieser Situation trotzdem noch ein ambitioniertes Klimaschutzziel erreicht werden, so wird die Ausgestaltung der Flexibilitätsmechanismen auch weiterhin eine herausragende Rolle spielen. Allerdings wäre beim Design dieser Mechanismen ein stärkerer Fokus auf die langfristigen Reduktionserfordernisse wünschenswert und notwendig. Eine wichtige Frage im Zusammenhang mit der Ausgestaltung der Flexibilitätsmechanismen wäre beispielsweise, inwiefern sie den nach wie vor notwendigen Schritt der Entwicklung, Erprobung und Markteinführung kohlenstofffreier Energietechnologien, die in den Industrieländern geleistet werden müsste, eher fördern oder hemmen. Dieser Schritt ist für die langfristige Umsetzung ambitionierter Minderungsziele, wie sie in diesem Bericht beispielhaft präsentiert wurden, unabdingbar und böte gleichzeitig die Chance einer nachhaltigen wirtschaftlichen Entwicklung in den Industrieländern und den ärmeren Regionen der Welt.

4. AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DEN WASSERSEKTOR UND DIE LANDWIRTSCHAFT

Eine Grundversorgung mit Wasser und Nahrungsmitteln ist elementares Menschenrecht (Artikel 25) und essentiell für eine nachhaltige Entwicklung, wie sie in Artikel 2 der Klimarahmenkonvention jedem Land zugestanden wird. Der Klimawandel kann zusammen mit anderen Faktoren die ausreichende Verfügbarkeit dieser Ressourcen beeinträchtigen. Im folgenden Kapitel werden daher mit Hilfe zweier globaler Modelle die Auswirkungen einer zukünftigen Veränderung von Temperatur und Niederschlagsmengen auf die regionale Wasserverfügbarkeit und die landwirtschaftliche Produktivität quantitativ abgeschätzt.

4.1 Die Änderung des Klimas

Sowohl das globale Wassermmodell WaterGAP als auch das GAEZ-Modell für die Berechnung der landwirtschaftlichen Produktivität benötigen Temperatur und Niederschlag als Eingabedaten. Da für die Analysen die jährliche Klimavariabilität berücksichtigt werden soll, werden zwei Arten von Klimadaten kombiniert: Zum Einen werden mittlere Änderungen von Temperatur und Niederschlägen für die Periode der 2020er sowie der 2070er Jahre verwendet, wie sie das Klimamodell des Hadley Centers in England (HadCM3) berechnet (Pope et al., 2000). Die Klimavariabilität wird eingeführt, indem die mittleren Klimaänderungen dieser Zehnjahresperioden mit den jährlichen Abweichungen vom Mittelwert der Klimanormalperiode 1961-90 überlagert werden.

4.1.1 Globale und regionale Klimaänderungen

Änderung der mittleren globalen Oberflächentemperatur

Ein vereinfachendes, aber im politischen Rahmen oft verwendetes Maß für den globalen Klimawandel ist die mittlere globale Temperaturänderung. Nach Berechnungen des HadCM3-Modells beträgt der mittlere globale Temperaturanstieg für das A2 Szenario bis zum Ende des Jahrhunderts 4.2°C relativ zur Klimanormalperiode 1961-90. Unter dem B2-Szenario steigt die globale Mitteltemperatur aufgrund der geringeren Treibhausgasemissionen bis 2100 „nur“ um etwa 2.6°C. Die Klimasensitivität des Modells, d.h. die Temperaturerhöhung, die von einer Verdopplung der CO₂-Konzentration verursacht wird, liegt bei 3°C.

Für die Berechnung der Klimafolgen werden die Mittelwerte zweier 10-Jahresperioden berücksichtigt, nämlich die der 2020er- und der 2070er Jahre dieses Jahrhunderts. In den 2020er Jahren liegt die mittlere globale Temperaturänderung für beide Szenarien bei etwa 0.8°C. Der vom HadCM3-Modell berechnete Temperaturanstieg befindet sich damit im oberen Bereich der Spanne von Modellergebnissen, die vom IPCC für die Temperaturänderung im Jahr 2025 angegeben werden (0.4 bis 1.1°C relativ zu 1990; IPCC, 2001). Der Unterschied zwischen dem A2- und dem B2-Szenario ist zu diesem Zeitpunkt noch relativ

gering, da (1) die Temperaturerhöhung zu einem großen Teil von den Treibhausgasemissionen der vergangenen 30-40 Jahre verursacht wird und (2) der Erwärmungseffekt der höheren Treibhausgasemissionen des A2-Szenarios in den kommenden 20 bis 30 Jahre durch die ebenfalls höheren SO₂-Emissionen dieses Szenarios stärker gedämpft wird als dies gegen Ende des Jahrhunderts der Fall sein wird (Hulme et al., 2002). So fällt schon in den 2070er Jahren der Unterschied in der globalen Temperaturerhöhung zwischen A2- und B2-Szenario höher aus: Für das B2-Szenario wird vom HadCM3-Modell ein mittlerer Temperaturanstieg von 2.2 °C und für das A2-Szenario ein Anstieg von 2.8 °C berechnet. Vergleicht man diese Werte mit dem temperaturbezogenen Klimaschutzziel der Europäischen Union (maximaler Temperaturanstieg von 2.0°C relativ zum vorindustriellen Niveau), so liegt der Temperaturanstieg des B2-Szenarios in den 2020ern mit 1.3°C etwa 0.7°C unter dieser Zielgröße und in den 2070er Jahren mit 2.7°C etwa 0.7°C über diesem Ziel, wenn man einen Temperaturanstieg von 0.5°C zwischen Ende des 19. Jahrhundert bis 1990 berücksichtigt (IPCC, 2001⁵). Somit kann näherungsweise angenommen werden, dass die zu erwartenden Auswirkungen auf die Landwirtschaft und die Wasserverfügbarkeit bei diesem Temperaturziel das für die 2020er Jahre berechnete Niveau übersteigen werden. Das für die 2070er Jahre berechnete Auswirkungsniveau unter dem B2-Szenario würde bei Erreichen des Klimaschutzzieles dagegen unterschritten werden.

Änderung der regionalen Temperatur

A2-Szenario

Die räumliche Verteilung des mittleren jährlichen Temperaturanstiegs ist sehr unterschiedlich, wobei der Anstieg generell nördlich des Äquators höher ist als südlich. Für das A2-Szenario wird ein Maximum von 8.8° C in Sibirien erreicht. Aber auch im Norden Kanadas, im Norden Afrikas (vor allem im Norden von Algerien) und in großen Teilen des Amazonasbeckens in Brasilien kann laut HadCM3 ein Temperaturanstieg von 5°C und mehr zu erwarten sein. Ein Anstieg der Temperatur zwischen 4 und 5°C ist an der Ostküste Kanadas, in weiten Teilen der USA, im Osten und Süden Europas, im Norden und Süden des afrikanischen Kontinents, in weiten Teilen des Mittleren Ostens (Saudi Arabien, Iran, Irak, Türkei) und im Norden und Nordosten Chinas zu erwarten.

B2-Szenario

Für das B2-Szenario ist die räumliche Verteilung ähnlich, die Temperaturwerte liegen aber generell etwas niedriger. Die Regionen der Welt, die in den 2070ern unter dem A2-Szenario von einer Temperaturerhöhung zwischen 4-5°C betroffen sind, müssen sich unter dem B2-Szenario auf eine mittlere Erhöhung der Temperatur zwischen 3-4°C einstellen. Eine besonders starke Erwärmung (>5°C) findet unter diesem Szenario nur in den nördlichsten Regionen Sibiriens und Kanadas sowie im Amazonasbecken in Brasilien statt.

⁵ Der vom IPCC angegebene Temperaturanstieg von $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ bezieht sich auf die Periode spätes 19. Jahrhundert bis zum Jahr 2000, der die sehr warmen Jahre zwischen 1995 bis 2000 berücksichtigt. Hier wird daher der im Second Assessment Report berichtete Wert ($0.3\text{-}0.6^\circ\text{C}$) angenommen.

Änderung der regionalen Niederschlagsmengen

Die Auswirkungen des Klimawandels lassen sich nur in der Verbindung von Temperaturerhöhung und Niederschlagsänderungen abschätzen. Leider sind gerade die zukünftigen Änderungen des Niederschlags noch immer mit großen Unsicherheiten behaftet. Ein oft beschrittener Weg, um diese Unsicherheiten zumindest einschätzen zu können, ist die Verwendung der Klimadaten von zwei unterschiedlichen GCMs. Da die Fragestellung dieses Projektes aber eher auf die Auswirkungsunterschiede zwischen den Szenarien, als auf die absolute Höhe der Auswirkungsniveaus ausgerichtet ist, scheint es vertretbar, die Klima- bzw. Niederschlagsänderungen von nur einem GCM, hier dem HadCM3, zu berücksichtigen.

A2-Szenario

Für das A2-Szenario findet sich in den 2070ern ein besonders starker Rückgang der Niederschläge von mehr als 50% im Nordosten Brasiliens und im Nordwesten Afrikas (Mauritanien, Algerien, Libyen, siehe Abbildung 10 oben). Allerdings ist hier zu berücksichtigen, dass in diesen Regionen die Niederschlagsmengen schon heute sehr gering sind und somit eine Änderung von wenigen mm eine große prozentuale Änderung verursacht. Moderate Niederschlagsrückgänge (-5 bis -25%) sind unter dem A2-Szenario in weiten Teilen der USA, in Mittelamerika, im Norden und Osten Südamerikas, aber auch in Chile zu finden. Im Süden und Südosten Europas (vor allem Spanien, Frankreich, Italien sowie Rumänien, Ungarn und Griechenland) und rund um das Schwarze Meer gehen die Niederschläge um 5 bis 25% zurück. Auf dem afrikanischen Kontinent ist vor allem der Südwesten, also Angola, Botswana und große Teile Südafrikas von zunehmender Trockenheit betroffen. Zunehmende Niederschläge finden sich für die 2070er Jahre in Kanada, Skandinavien, weiten Teilen Russlands, Chinas und in Nordindien.

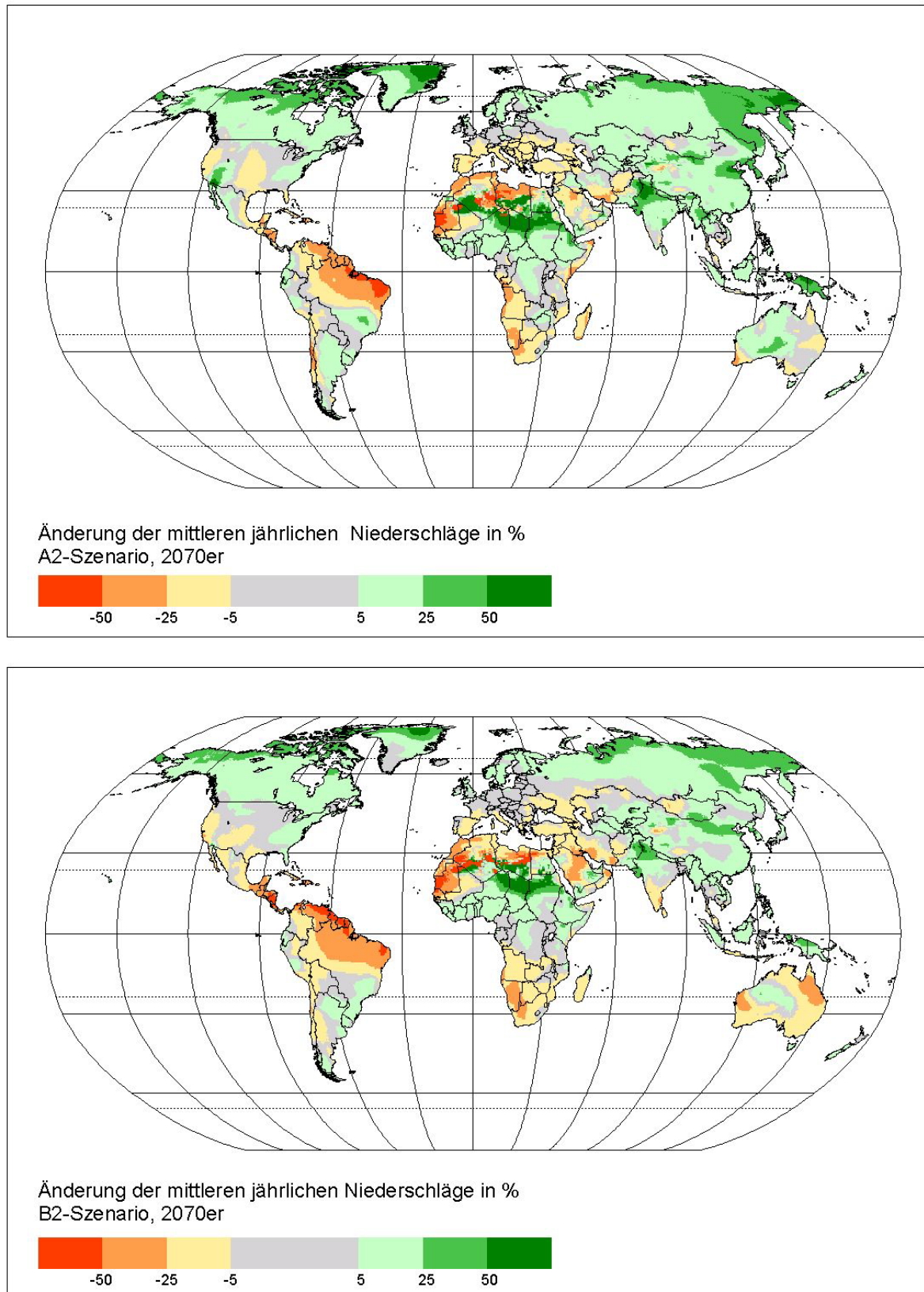


Abbildung 10 Prozentuale Änderung der mittleren jährlichen Niederschläge unter dem A2-Szenario (oben) und dem B2-Szenario (unten) in den 2070er Jahren relativ zur Klimanormalperiode (Klimamodell HadCM3).

B2 Szenario

Da die globale Temperaturerhöhung unter dem B2-Szenario langfristig etwas geringer ausfällt, sollte auch weniger zusätzliches Wasser aus den Ozeanen in die Atmosphäre verdunstet, und damit die Niederschlagsmenge geringer ausfallen als unter dem A2-Szenario. So nehmen die Niederschläge im hohen Norden Kanadas, in Grönland und im Nordwesten Russlands laut Klimamodell unter dem B2-Szenario weniger stark zu. In einigen Regionen, wie dem Westen der USA, dem Nordwesten Afrikas, dem Süden Indiens und dem australischen Kontinent wird es unter dem B2-Szenario zudem trockener als unter dem A2-Szenario (vgl. Abbildung 10, unten). Im Nordwesten Brasiliens, in Chile und in Mitteleuropa kann es dagegen unter dem B2-Szenario im Vergleich zum A2-Szenario weniger trocken werden.

4.1.2 Klimavariabilität

Neben der mittleren Änderung von Temperatur und Niederschlag werden auch die Auswirkungen der interannuellen Klimavariabilität auf den Landwirtschafts- und den Wassersektor untersucht. Für die Klimaeingaben in das WaterGAP-Modell und das GAEZ-Modell wird der Datensatz der Climate Research Unit (CRU) der University of East Anglia (Großbritannien) verwendet (New et al., 2000). Dieser Datensatz liefert, interpoliert auf ein $0.5 \times 0.5^\circ$ Raster, monatliche Messwerte für die Variablen Niederschlag, Temperatur, Anzahl der Regentage pro Monat, Bewölkungsgrad und durchschnittliche Anzahl der Sonnenstunden pro Tag. Bis auf die Sonnenstunden, sind alle Daten für den Zeitraum 1901 bis 1995 verfügbar; für die klimabedingte Änderung der landwirtschaftlichen Produktion und der Wassersituation werden allerdings nur die Daten für den Zeitraum 1961 bis 1990 verwendet, da weiter zurückliegende Daten zunehmend unsicher werden.

Für die Berechnung der zukünftigen Klimaauswirkungen werden zwei Dreißigjahresperioden (2011-2040 und 2061-90) ausgewertet. Allerdings werden nur die monatlichen Temperatur- und Niederschlagswerte variiert, alle anderen Variablen, wie Sonnenstunden pro Tag und Anzahl der Regentage werden aus dem CRU Datensatz übernommen. Die zukünftige Monatsmitteltemperatur ergibt sich aus der Skalierung der gegenwärtigen gemessenen Temperatur mit dem Temperaturanstieg, der durch das HadCM3-Klimamodell für das SRES Szenario A2 und B2 berechnet wird. So wird beispielsweise die mittlere Januar-temperatur für das Jahr 2062 (2. Jahr der zukünftigen 30-Jahresperiode) folgendermaßen berechnet: (1) Es wird die Differenz gebildet aus der mittleren Januar-temperatur der Jahre 2070-79 und der Januar-temperatur, die das Klimamodell für den Zeitraum 1961-90 berechnet, (2) diese Temperaturdifferenz wird zur Januar-temperatur des 2. Jahres der Klimanormalperiode (=1962) addiert (siehe Gleichung 1). Entsprechend wird mit jedem Monat und jedem Jahr der zukünftigen 30-Jahresperiode verfahren. Das Ergebnis ist eine höhere Monatsmitteltemperatur, die überlagert wird von der jährlichen Klimavariabilität der Periode 1961-90. Bei dieser Vorgehensweise wird so zwar eine jährliche Variabilität berücksichtigt, die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die jährliche Variabilität von

Temperatur und Niederschlag bleiben allerdings unberücksichtigt. Mit den zukünftigen monatlichen Niederschlägen wird entsprechend verfahren, mit dem Unterschied, dass mit dem Verhältnis von zukünftigem zu heutigem Niederschlag multipliziert wird (siehe Gleichung 2).

$$T_{\text{Jan, 2062}} = T_{\text{Jan, 1962}}^{\text{CRU}} + (T_{\text{Jan, MW 2070-79}}^{\text{GCM}} - T_{\text{Jan, MW 1961-90}}^{\text{GCM}}) \quad (1)$$

$$P_{\text{Jan, 2062}} = P_{\text{Jan, 1962}}^{\text{CRU}} * (P_{\text{Jan, MW 2070-79}}^{\text{GCM}} / P_{\text{Jan, MW 1961-90}}^{\text{GCM}}) \quad (2)$$

Mit:

$T_{\text{Jan, 2062}}$:	Januartemperatur 2062 berechnet.
$T_{\text{Jan, 1962}}^{\text{CRU}}$:	Januartemperatur 1962 aus CRU Daten.
$T_{\text{Jan, MW 2070-79}}^{\text{GCM}}$:	Mittlere Januartemperatur der Zukunftsperiode 2070-79 aus dem Klimamodell.
$T_{\text{Jan, MW 1961-90}}^{\text{GCM}}$:	Mittlere Januartemperatur der Gegenwartsperiode 1961-90 aus dem Klimamodell.

Entsprechend steht P in Gleichung 2 für den Niederschlag.

Die auf diese Art und Weise berechneten monatlichen Temperatur- und Niederschlagswerte werden als Klimaeingaben für das GAEZ-Modell und das WaterGAP-Modell benutzt.

4.2 Auswirkungen des Klimawandels auf die Wassersituation

Die Wassersituation wird in Zukunft sowohl von einer Veränderung des Klimas als auch einer Veränderung des menschlichen Wasserbedarfs geprägt sein. Das globale Modell WaterGAP 2 ist in der Lage sowohl den Wasserbedarf als auch die Wasserverfügbarkeit weltweit in konsistenter und damit vergleichbarer Weise abzubilden. Das Ziel der folgenden Analyse besteht darin, mit Hilfe des WaterGAP-Modells die kombinierten Auswirkungen des globalen Klimawandels und des sozioökonomischen Wandels, wie er durch das A2- und das B2-Szenario beschrieben wird, auf das Auftreten von Wasserstress und die Häufigkeit extremer Abflüsse, abzuschätzen.

4.2.1 Vorgehensweise

Im folgenden Kapitel wird das Modell WaterGAP, die Szenarioannahmen sowie die Indikatoren beschrieben, mit denen die zukünftige Wassersituation unter dem A2- und dem B2-Szenario abgeschätzt werden.

Das globale Wassermodell WaterGAP

Das WaterGAP-Modell wurde mit dem Ziel entwickelt, Zusammenhänge zwischen dem globalen Wandel und seinen Auswirkungen auf die Ressource Wasser quantitativ abzu-

schätzen. Dabei sollen aktuelle Forschungsfragen, wie z.B. die folgenden, aufgegriffen und ansatzweise beantwortet werden:

- Wie groß ist der Druck, der gegenwärtig und zukünftig durch die Wassernutzung in unterschiedlichen Sektoren auf die Ressource Wasser ausgeübt wird?
- Welche Einzugsgebiete sind dabei besonders hohem Druck ausgesetzt und wie wird sich die Situation bei unterschiedlichen Szenarien der Wassernutzung in der Zukunft verändern?
- Welchen Einfluss wird der Klimawandel auf die Wasserverfügbarkeit in den verschiedenen Regionen der Welt haben?

WaterGAP besteht aus zwei Hauptkomponenten, dem „Global Hydrology Model“ und dem „Global Water Use Model“ (Abbildung 11). Das „Global Hydrology Model“ simuliert das makro-skalige Verhalten des terrestrischen Wasserkreislaufes mit dem Ziel die Größe und Veränderung der verfügbaren Wasserressourcen abzuschätzen, während das „Global Water Use Model“ die Wassernutzungsseite für die vier Sektoren Haushalt, Industrie, Bewässerung und Viehhaltung abbildet. Alle Berechnungen decken die gesamte Erdoberfläche (mit Ausnahme der Antarktis) ab und werden mit einer räumlichen Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ durchgeführt. Im folgenden Abschnitt wird eine Kurzbeschreibung der beiden Modellteile für Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung geliefert, eine detailliertere Beschreibung ist in Alcamo und Henrichs (2002) sowie in Döll et al. (2002) zu finden.

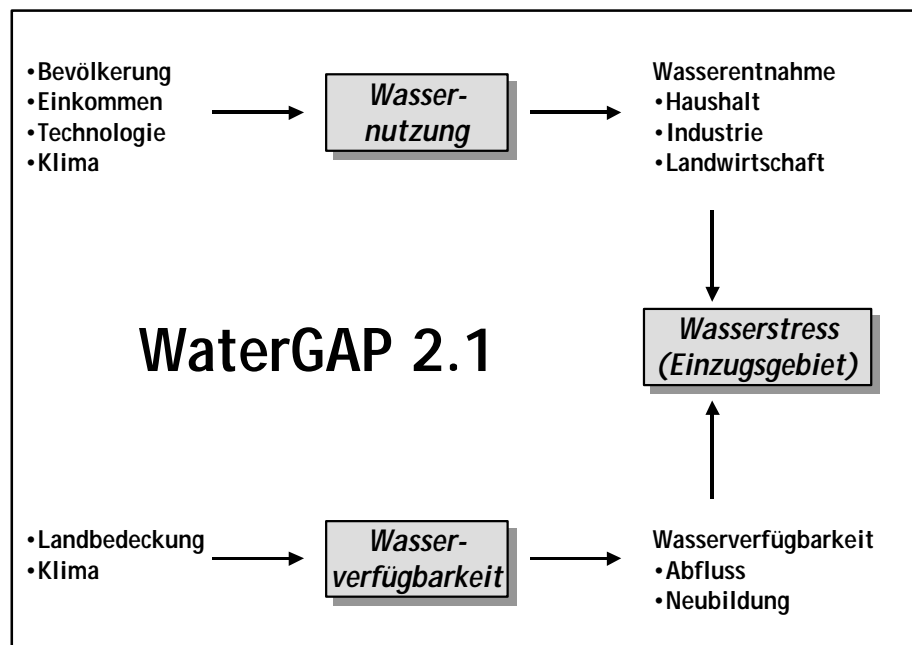


Abbildung 11 Schematische Darstellung der Komponenten und Zusammenhänge im WaterGAP-Modell.

Wasserverfügbarkeit

Das globale hydrologische oder Wasserverfügbarkeitsmodell von WaterGAP berechnet eine tägliche vertikale Wasserbilanz für die Landfläche, aber auch die offenen Wasserflächen jeder 0.5° mal 0.5°-Zelle. Die Wasserbilanz für den Landanteil einer Zelle setzt sich zusammen aus einer Wasserbilanz der Vegetation und einer Wasserbilanz des Bodens, die jeweils in Abhängigkeit von der Landbedeckung, der Wasserkapazität des Bodens und monatlichen Klimavariablen wie Temperatur, Niederschlag und Strahlung berechnet werden. Durch die Wasserbilanz der Vegetation wird abgeschätzt, welcher Anteil des Niederschlags durch die Vegetation aufgehalten wird und direkt verdunstet und welcher Anteil den Boden erreicht. Über die Bodenwasserbilanz wird dieses Wasser anschließend noch einmal aufgeteilt in verdunstendes Wasser und Wasser das entweder in das Grundwasser oder als Oberflächenwasser abfließt. Die Summe der Abflüsse, bestehend aus der Wassermenge, die sich innerhalb einer 0.5°-Zelle ansammelt und dem Wasser, das aus der stromaufwärts liegenden Zelle hinzufließt, wird durch eine Anzahl von Speichern geleitet, die Grundwasser, Seen, Stauseen, Feuchtgebiete und Flüsse repräsentieren. Dieses Wasser steht letztlich für die Nutzung zur Verfügung. Nach der Wasserentnahme wird das in der Zelle verbliebene Wasser in die nächste stromabwärts liegende Zelle weitergeleitet.

Wassernutzung

Das globale Wassernutzungsmodell von WaterGAP berechnet Wasserentnahme und Wasserkonsum für die Hauptsektoren der Wassernutzung, d.h. für Haushalte, Industrie, landwirtschaftliche Bewässerung und Viehhaltung. Unter Wasserentnahme wird die Gesamtmenge an Wasser verstanden, die dem Wasserkreislauf entnommen wird. Die konsumptive Wassernutzung entspricht dann dem Anteil des entnommenen Wassers, der nicht in den Wasserkreislauf zurückkehrt, sondern während der einzelnen Nutzungsprozesse durch Evapotranspiration verloren geht. Die Wassernutzung im Haushalts- und Industriebereich wird auf jährlicher Basis berechnet, der Wasserverbrauch für die landwirtschaftliche Bewässerung auf Tagesbasis.

Der Wasserverbrauch in jedem Sektor wird als eine Funktion aus Wassernutzungsintensität und einer treibenden Kraft berechnet. Als Variablen für die Wassernutzungsintensität dient für den Haushaltssektor der Pro-Kopf-Wasserverbrauch. Als Näherung für die Nutzungsintensität des Industriesektors wird die Wasserentnahme pro Einheit produzierter Elektrizität verwendet. Für die Landwirtschaft werden der Bruttowasserbedarf pro Flächeneinheit bewässerter Fläche sowie der Trinkwasserbedarf pro Tier als Indikatoren für die Wassernutzungsintensität herangezogen.

Es wird davon ausgegangen, dass sich die Wassernutzungsintensitäten der einzelnen Sektoren dadurch verändern, dass sich in einer Gesellschaft mit der Zeit sowohl strukturelle als auch technologische Veränderungen durchsetzen. Strukturelle Veränderungen wurden in das Modell eingeführt, um zu berücksichtigen, dass z.B. der Wasserverbrauch in den Haushalten mit der wirtschaftlichen Entwicklung, aber auch mit Veränderungen des Le-

bensstiles zusammenhängt. Im Bereich industrieller Wassernutzung entspräche der strukturelle Wandel z.B. einem Wechsel von thermischen zu nicht-thermischen Kraftwerken. Technologische Veränderungen geschehen parallel zu den strukturellen Veränderungen und führen in der Regel zu einer effizienteren Wassernutzung, mit der Folge, dass sich die Wassernutzungsintensität verringert.

Für die Sektoren Haushalt und Industrie wurden die strukturellen Veränderungen der Wassernutzungsintensität aus historischen Daten abgeleitet, die von Shiklomanov für 26 Weltregionen veröffentlicht wurden (Shiklomanov, 1997, 2000a, 2000b). Um für diese beiden Sektoren Szenarien für die länderspezifische Wassernutzung in der Zukunft berechnen zu können, wurde die aus den historischen Daten abgeleiteten strukturellen und technologischen Veränderungen auf heutige Länderdaten (1995) für die Wassernutzung in diesen beiden Sektoren übertragen (Shiklomanov 2000b, WRI 2000). Abschließend werden die Werte von Länderebene auf Zellebene herunterskaliert, indem eine Proportionalität zwischen Wassernutzung und Faktoren wie Bevölkerungsdichte, Urbanisierungsgrad und Zugang zu sicherem Trinkwasser angenommen wird.

Für die Abschätzung des Wasserverbrauches durch Bewässerung wird das Bewässerungsmodul von WaterGAP benutzt, das den Bewässerungsbedarf für eine optimale Wasserversorgung der angebauten Pflanzen auf Zellebene berechnet (Döll und Siebert, 2001). Für die Berechnung des Netto-Bewässerungsbedarfes werden in einem ersten Schritt die Art der Bepflanzung (Reis und Nicht-Reis) sowie die optimale Wachstumsperiode für jede Zelle mit bewässerter Fläche ermittelt. Danach wird für jeden Tag der Wachstumsperiode der Netto-Wasserbedarf als Differenz zwischen der pflanzenspezifischen Evapotranspiration und dem pflanzenverfügbaren Niederschlag berechnet. Der Bruttowert für den Bewässerungsbedarf pro Flächeneinheit bewässerten Landes wird abschließend berechnet, indem zusätzlich eine regionen-spezifische Bewässerungseffizienz, d.h. das Verhältnis von entnommener Wassermenge zu der von den Pflanzen verbrauchten Wassermenge, berücksichtigt wird. Für die Bewässerungseffizienz wird angenommen, dass sie einem technologischem Wandel unterliegt und damit die entnommene Wassermenge pro Flächeneinheit variiert wird.

Nachdem die Wassernutzungsintensitäten für jeden Sektor bestimmt sind, erfolgt die Berechnung der Gesamtwasserentnahme durch Multiplikation der Nutzungsintensität mit der entsprechenden „Triebkraft“ des Sektors. Bei diesen „Triebkräften“ handelt es sich um die Entwicklung der Bevölkerungszahlen beim Sektor Haushalt, der Elektrizitätsproduktion beim Sektor Industrie, die bewässerte Fläche beim Sektor Bewässerung und die Entwicklung der Viehzahlen beim Wassernutzungssektor Viehhaltung.

Wassernutzungsszenarien

Um die Auswirkungen der zukünftigen Wassernutzung auf die Wassersituation auf Länderebene abzuschätzen, werden die sozioökonomischen Triebkräfte des A2- und des B2-

Szenarios benutzt. Es werden die Bevölkerungszahlen, die Elektrizitätsproduktion, die bewässerte Fläche und die Entwicklung der Viehzahlen für die Berechnung der Wasserentnahme durch die einzelnen Sektoren, herangezogen. Außerdem spielt die wirtschaftliche Entwicklung der Länder bei der strukturellen Veränderung in allen Wassernutzungssektoren eine wichtige Rolle. Als Eingabedaten werden im Wesentlichen die Ergebnisse des IMAGE 2.2-Modells auf der Basis von 17 Weltregionen verwendet (IMAGE team, 2001).

Für die *Bevölkerungsentwicklung* in der Zukunft (unterschieden zwischen Stadt- und Landbevölkerung) werden UN-Länderdaten mit Hilfe der Regionendaten des IMAGE-Modells skaliert. Im A2-Szenario wächst die Weltbevölkerung danach auf über 8.7 Milliarden bis zum Jahr 2025 und weiter auf über 13 Milliarden Menschen bis zum Jahr 2075. Für das B2-Szenario fällt das Wachstum etwas schwächer aus, die Weltbevölkerung erreicht 2025 eine Größe von etwa 8 Milliarden Menschen, um bis 2075 auf etwa 10 Milliarden Menschen anzuwachsen. Für das Bevölkerungswachstum in den einzelnen Regionen sei auf Tabelle 4 verwiesen.

Für die *Einkommensentwicklung* (als 1995 US\$) werden die Trends der 17 IMAGE-Regionen verwendet, um die wirtschaftliche Entwicklung auf Länderebene in die Zukunft fortzuschreiben. Ausgehend von ihrem 1995er Einkommen wird angenommen, dass die wirtschaftliche Entwicklung aller Länder innerhalb einer IMAGE-Region in der Zukunft demselben Trend folgen. So wächst das durchschnittliche Einkommen unter dem A2-Szenario bis zum Jahr 2025 um den Faktor 1.5 und um den Faktor 3.5 bis 2075. Das Wachstum unter dem B2-Szenario ist etwas höher, bis 2025 ist ein Wachstum um den Faktor 1.7 bzw. 3.7 bis 2075 zu verzeichnen.

Für die *Elektrizitätsproduktion* (in TWh) wird, wie für die Entwicklung der Einkommen, angenommen, dass die Länderwerte dem Trend der IMAGE-Region folgen, zu der sie gehören. Damit steigt die Elektrizitätsproduktion in allen Regionen unter allen Szenarien. Unter dem A2-Szenario wird für alle Regionen, mit der Ausnahme von Asien, ein stärkeres Wachstum als unter dem B2-Szenario erwartet. Global wächst die Elektrizitätsproduktion unter dem A2-Szenario bis 2025 um den Faktor 2.1 und bis 2075 um den Faktor 5.6. Die Annahmen des B2-Szenarios führen bis 2025 ebenfalls zu einem Wachstum der globalen Elektrizitätsproduktion um den Faktor 2.1 und bis 2075 um den Faktor 4.1.

Die *Bewässerungsfläche* wird als einer der kritischsten Faktoren für zukünftigen Wasserstress angesehen und es herrschen gegensätzliche Meinungen, ob die bewässerte Landwirtschaft sich ausdehnen, oder aber auf dem jetzigen Niveau verbleiben wird. Für das A2- und das B2-Szenario wird angenommen, dass die bewässerte Fläche bis zum Ende des betrachteten Zeithorizontes konstant bleiben wird. Auch für die Viehhaltung wird angenommen, dass sie über die gesamte Szenarioperiode unverändert bleibt.

Strukturelle Veränderungen in der Wassernutzungsintensität ergeben sich als Folge von zunehmendem materiellem Wohlstand im Haushaltssektor, Veränderungen in den Anteilen, die verschiedene Arten von Kraftwerken oder Industrien an der Wassernutzung haben (Industriesektor) oder Veränderungen bei den angebauten Feldfrüchten in der Bewässerungslandwirtschaft. Die Annahmen für den strukturellen Wandel basieren auf den Annahmen, die auch für die „World Water Vision“ Szenarien für die World Water Commission getroffen wurden (Alcamo et al., 2000).

- Die Annahmen für den strukturellen Wandel unter dem A2-Szenario spiegeln die ökonomische Ausrichtung dieses Szenarios wider. Sie basieren auf dem „Business as usual“-Szenario der „World Water Vision“. D.h. die Wasserintensität im Haushaltssektor folgt historischen Trends – die Intensität steigt zuerst mit steigendem Einkommen stark an, um sich dann bei höherem Durchschnittseinkommen zu stabilisieren. Im Industriesektor dagegen sinkt die Wassernutzungsintensität mit steigendem Einkommen, um sich dann bei hohem Einkommen auf niedrigem Niveau einzupendeln.
- Der strukturelle Wandel unter dem B2-Szenario spiegelt die Ausrichtung dieses Szenarios auf den Schutz der Umwelt wider. Die Annahmen für den strukturellen Wandel entstammen daher dem „Values and Lifestyle“-Szenario der „World Water Vision“. Sowohl im Haushalts- als auch im Industriesektor liegen die Wasserintensitäten daher um Zweidrittel unterhalb der Werte für das A2-Szenario. Außerdem wird angenommen, dass in den nichtindustrialisierten Ländern jede Person zu einem Minimum von 14.6 m³ Wasser (40 l pro Tag) Zugang hat. Für die Industrieländer beträgt das Minimum 29.2 m³ pro Jahr (80 l pro Tag). Für die Wasserintensität in der Industrie wird angenommen, dass für jede produzierte MWh in einem Jahr mindestens 3.5 m³ Wasser notwendig sind. Im Bewässerungssektor wird die Wassernutzungsintensität nur durch das Klima variiert.

Die *technologischen Veränderungen* ergänzen die strukturellen Veränderungen und führen in der Regel zu einer Verbesserung der Effizienz bei der Wassernutzung und somit zu einer Verringerung der Wassernutzungsintensität. Auch die Annahmen für die technologischen Veränderungen basieren auf den Szenarien der „World Water Vision“.

- Beim A2-Szenario nimmt die Wassernutzungsintensität in Industrie und Haushalten wie beim „Business as Usual“ Szenario der „World Water Vision“ mit der historischen Rate von 2% pro Jahr ab, verlangsamt sich aber mit der Zeit auf 1% pro Jahr. Außerdem wird angenommen, dass die Wassernutzungsintensität für Haushalte in einem Land nie den jetzigen Wert der USA (214 m³ pro Jahr und Person) überschreitet. Im Bewässerungssektor führt die Verbesserung der Bewässerungseffizienz zu einer Verringerung der Nutzungsintensität mit einer Rate von 0.3% pro Jahr, die sich mit der Zeit auf 0.15% pro Jahr verlangsamt.
- Im B2-Szenario nimmt die Wassernutzungsintensität wie beim „Values and Lifestyle“-Szenario der „World Water Vision“ über die gesamte Szenarioperiode um

2% pro Jahr ab. Die Effizienz bei der Bewässerung verbessert sich wie unter dem A2-Szenario.

Indikator für Wasserstress

Ein Ziel der Szenarioanalyse besteht darin, weltweit diejenigen Regionen zu identifizieren, in denen die Ressource Wasser in Zukunft knapp werden wird, so dass die eingeschränkte Wasserverfügbarkeit z.B. zu Konkurrenz zwischen verschiedenen Wassernutzern führt. Als typisches Maß für Wasserstress wird hier das Verhältnis von entnommener zu verfügbarer Wassermenge (=w.t.a, „withdrawal to availability“) verwendet. Es wird angenommen, dass Wassereinzugsgebiete mit einem Verhältnis von Entnahme zu Verfügbarkeit, das den Wert 0.4 übersteigt, unter hohem Wasserstress leiden. Dieser Wert basiert auf einer Empfehlung der Welt-Wasser-Kommission (Cosgrove und Rijsberman, 2000; Raskin et al., 1997) und wird von Experten als ein guter Näherungswert für hohen Wasserstress und potentielle Konkurrenz zwischen Wassernutzern angesehen.

Indikator für die Häufigkeit extremer Abflüsse

Nicht nur die Frage, ob ausreichend Wasser für die Nutzung zur Verfügung steht, spielt eine wichtige Rolle, sondern auch die Häufigkeit von Ereignissen bei denen extrem wenig Wasser zur Verfügung steht oder extrem hohe Abflüsse Schäden an Materialien, oder sogar einen Verlust an Menschenleben verursachen, hat einen Einfluss auf die zukünftige Sicherheit im Umgang mit der Wasserversorgung. Um diese extremen Abflussereignisse zu erfassen wird ein Indikator gewählt, der eine Zunahme des zukünftigen Variationskoeffizienten für die Wasserverfügbarkeit mit Richtung und Heftigkeit von mittleren Niederschlagsänderungen kombiniert. Mehr trockene Extreme treten nach dieser Definition in Zukunft dann auf, wenn sich der zukünftige Variationskoeffizient für die Wasserverfügbarkeit gegenüber heute um 25% erhöht und gleichzeitig die mittleren Niederschläge in der Zukunft um mehr als 25% abnehmen. Die Häufigkeit extrem hoher Abflüsse erhöht sich entsprechend bei einer Kombination der mehr als 25%igen Zunahme des Variationskoeffizienten mit einer Zunahme der mittleren Niederschläge um mehr als 25%.

4.2.2 Ergebnisse

4.2.2.1 Wasserstress

Der Wasserstress wird ermittelt aus der verfügbaren Wassermenge, die im Wesentlichen durch die Höhe der Niederschläge bestimmt wird und der Menge an Wasser, die benötigt wird, um menschliche Bedürfnisse zu befriedigen. Auf der Bedürfnisseite wird nur der Bewässerungswasserbedarf direkt vom Klima beeinflusst. Die zukünftige Entwicklung beider Aspekte, Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung, wird im Folgenden für das A2- sowie das B2-Szenario kurz beleuchtet. Abschließend werden das Ausmaß, in dem heute Regionen der Welt von Wasserstress betroffen sind, sowie zukünftige Veränderungen für Regionen unter Wasserstress präsentiert.

Wasserverfügbarkeit

Global gesehen nimmt die verfügbare Wassermenge bei beiden Szenarien durch die Erhöhung der Temperatur und die damit einhergehende stärkere Wasserverdunstung aus den Ozeanen zu. Dies ist beim A2-Szenario, bei dem weltweit die Wasserverfügbarkeit gegenüber der Klimanormalperiode um 14% ansteigt, aufgrund des stärkeren Temperaturanstiegs noch stärker der Fall als für das B2-Szenario, bei dem der Anstieg gegenüber der mittleren Wasserverfügbarkeit der Klimanormalperiode nur 4% beträgt. Allerdings kann die Veränderung der Verfügbarkeit regional sehr stark variieren, da Niederschlagsänderungen, als Haupteinflussfaktor für die Menge des verfügbaren Wassers, regional sehr unterschiedlich ausfallen.

Unter dem A2-Szenario kann langfristig (2070er Jahre) für große Teile der Welt die Wasserverfügbarkeit um 25% und mehr zunehmen (Abbildung 12). Dies ist vor allem in der nördlichen Hemisphäre, d.h. in Kanada und im Nordosten Russlands der Fall. Aber auch im Norden Indiens und Chinas sowie in Australien nimmt die Wasserverfügbarkeit zu. In den Regionen der Welt, in denen die Niederschläge abnehmen und/oder die Temperaturen stark zunimmt, kann die Wasserverfügbarkeit zurückgehen. Dies ist z.B. der Fall im Norden und Süden Afrikas, aber auch in Mittelamerika und im Norden und Osten Lateinamerikas.

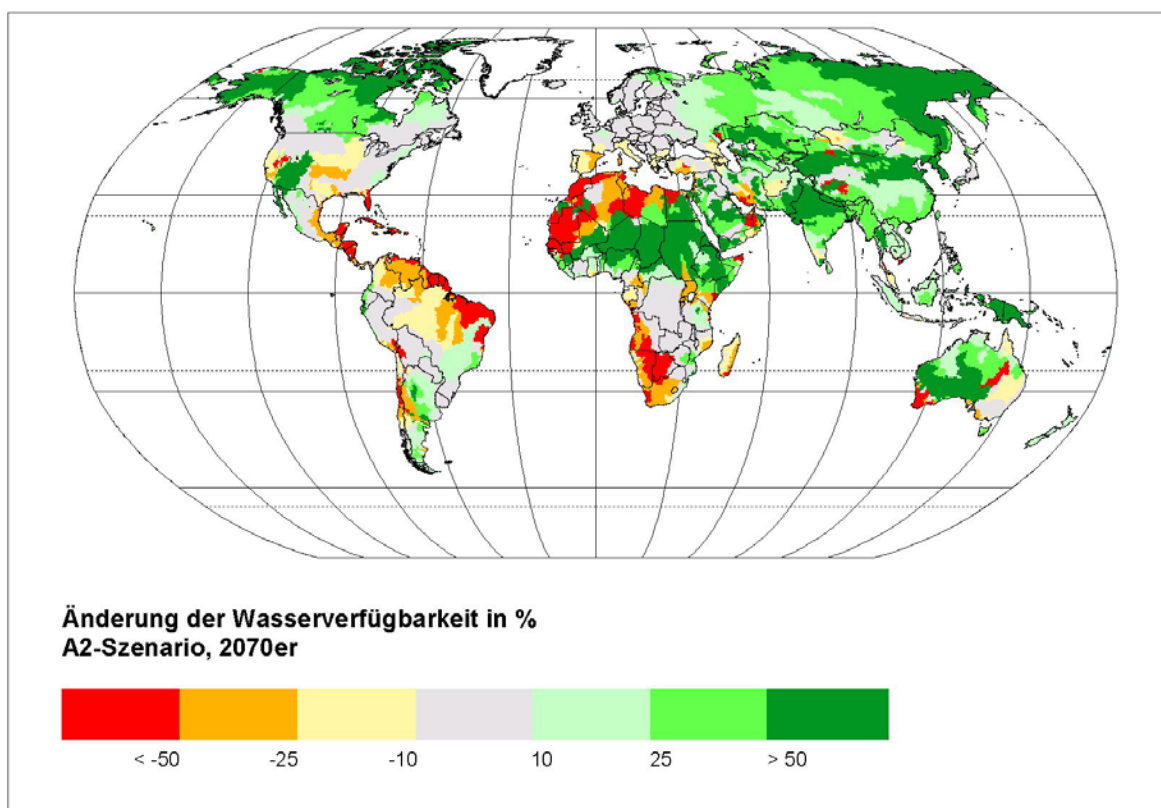


Abbildung 12 Änderung der Wasserverfügbarkeit in den 2070er Jahren relativ zur Klimanormalperiode unter dem A2-Szenario.

Unter dem B2-Szenario macht sich die global geringere Wasserverfügbarkeit in Mittelamerika, dem Nordosten von Lateinamerika und dem Mittleren Osten bemerkbar. Vor allem im Süden Indiens und im Nordosten Australiens ist unter dem B2-Szenario ein stärkerer Rückgang der Wasserverfügbarkeit möglich als unter dem A2-Szenario (Abbildung 13).

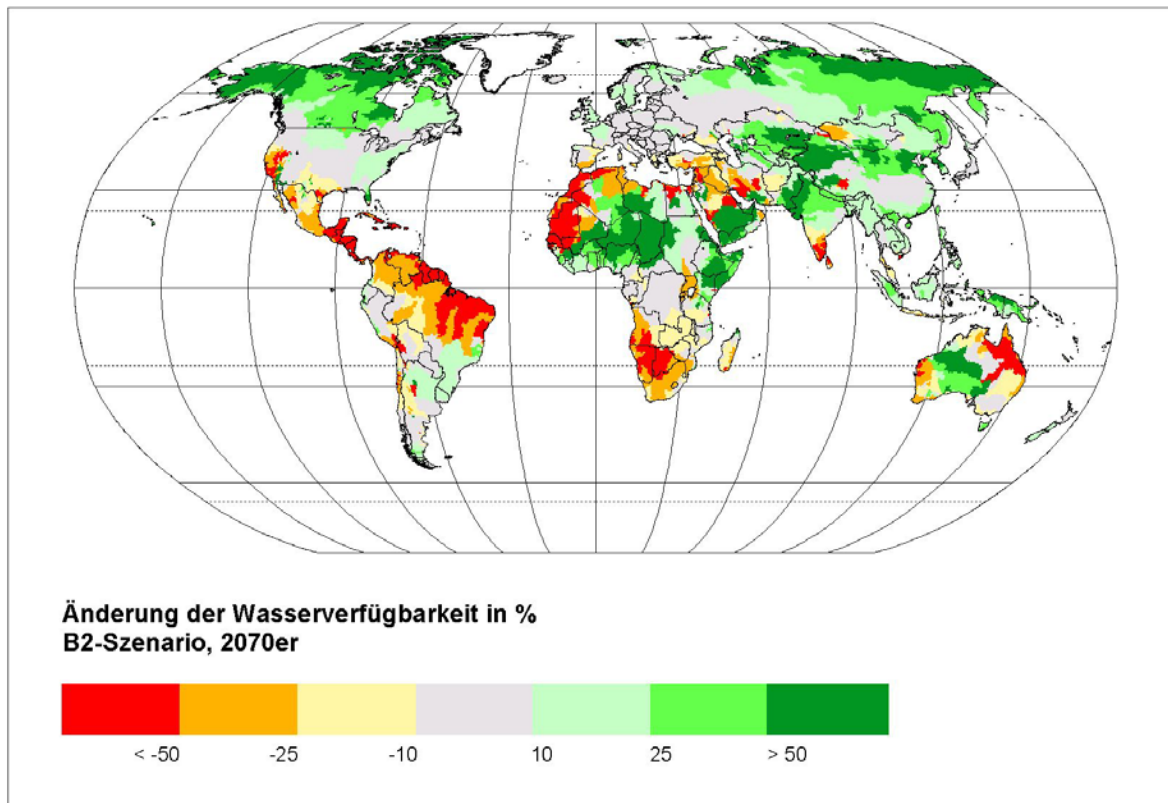


Abbildung 13 Änderung der Wasserverfügbarkeit in den 2070er Jahren relativ zur Klimanormalperiode unter dem B2-Szenario.

Wasserentnahme

Die globale Wassernutzung zeigt unter dem A2- und dem B2-Szenario sehr unterschiedliche Verläufe. Unter dem A2-Szenario steigt die Wasserentnahme aufgrund von Bevölkerungszuwachs und wirtschaftlichem Wachstum kontinuierlich an. Bis zum Jahr 2025 erreicht sie 115% der heutigen Entnahme und liegt 2075 bei 152% der Entnahme des Jahres 1995 (vgl. Tabelle 13). Der stärkste Zuwachs ist unter diesem Szenario beim Haushaltswasserbedarf zu verzeichnen.

Tabelle 13 Entwicklung der globalen Wasserentnahme unter dem A2- und dem B2-Szenario.

Sektor	Globale Wasserentnahme [km ³ /Jahr]				
	A2-Szenario			B2-Szenario	
	1995	2025	2075	2025	2075
Industrie	752	1011	1490	680	187
Haushalte	344	820	1679	309	241
Viehhaltung	16	24	24	24	24
Bewässerung	2482	2291	2267	2345	2285
Gesamt	3594	4147	5461	3359	2737

Unter dem B2-Szenario wächst die Weltbevölkerung weniger stark, die wirtschaftliche Aktivität in Form des Pro-Kopf-Einkommens dagegen um so stärker. Da dem B2-Szenario eine ökologische Grundhaltung zugrunde liegt, die insbesondere im Haushalts- und Industriegesektor mit einer stark verbesserten Nutzungseffizienz für die Ressource Wasser einhergeht, nimmt die Wasserentnahme unter diesem Szenario kontinuierlich ab: Sie liegt 2025 bei 93% bzw. 2075 bei 76% der Werte des Jahres 1995. Der globale Rückgang der Wasserentnahme ist besonders auf die niedrigen Werte für den industriellen Sektor zurückzuführen, die 2075 nur noch bei 25% der Menge von 1995 liegen. Im Bewässerungssektor, der 1995 mit 69% den größten Anteil an der globalen Wasserentnahme hatte und der außerdem den klimasensitivsten Nutzungssektor darstellt, verringert sich die Wasserentnahme in allen Szenarien nur sehr geringfügig. Dies hat zur Folge, dass sich unter dem A2-Szenario der Bewässerungsanteil bis 2075 auf 42% der Gesamtentnahme verringert, während er unter dem B2-Szenario die Gesamtentnahme mit einem Anteil von 83% klar dominiert.

Wasserstress

Als Indikator für die Kritikalität der zukünftigen Wassersituation wird das Verhältnis von entnommener zu verfügbarer Wassermenge verwendet. Überschreitet dieses Verhältnis den Wert 0.4, so wird von hohem Wasserstress gesprochen. Mittlerer Wasserstress liegt bei Indexwerten zwischen 0.2 bis 0.4, und niedriger Stress bei Indexwerten <0.2 vor.

Schon in den 1990er Jahren war die Wassersituation nach Berechnungen des WaterGAP-Modells besonders in den Anrainerstaaten des Mittelmeers, im Mittleren Osten bis hin zu weiten Teilen Nordchinas als kritisch (=hoher Wasserstress) einzustufen. Auch im Süden Afrikas sowie im Westen von Süd- und Nordamerika ist die Wassersituation nach unseren Berechnungen angespannt. Allerdings ist zur kritischen Wassersituation in den Industriestaaten anzumerken, dass hier eher die Qualität des rückgeführten Wassers als die absolute Menge des entnommenen Wassers ein Problem darstellt.

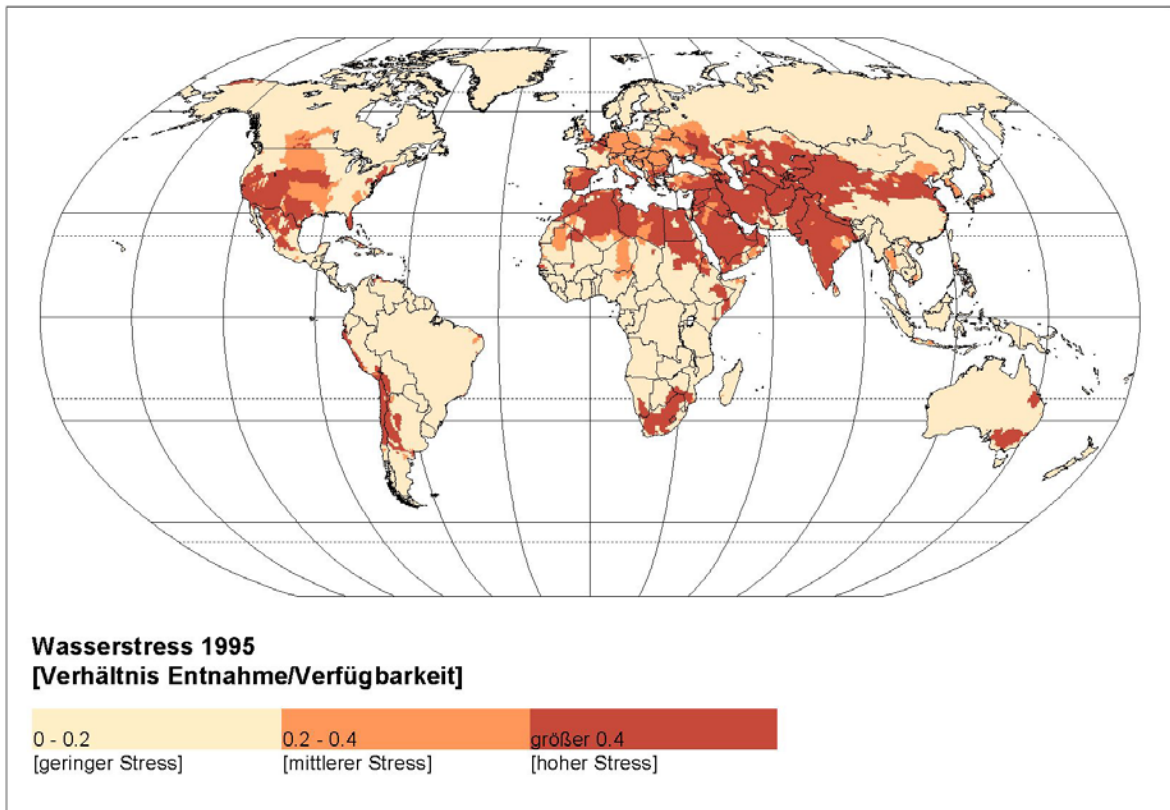


Abbildung 14 Wasserstress als Verhältnis von Wasserentnahme zu Wasserverfügbarkeit im Jahr 1995.

Unter dem A2-Szenario würde sich die langfristige Wassersituation in weiten Teilen der Welt, die schon heute mit kritischen Werten konfrontiert sind, verschärfen. Außerdem kann in einigen Gebieten, die nach den hier verwendeten Kriterien heute noch nicht unter Wasserstress zu leiden haben, eine Kombination aus Klimawandel und höherem Wasserverbrauch in Zukunft zu hohem Wasserstress führen.

Wie aus Abbildung 15 deutlich wird, kann sich die Wassersituation des afrikanischen Kontinents weiter verschärfen, der Kritikalitätsindex im Norden und Osten des Kontinents verdoppelt sich teilweise. Auch im Osten Südamerikas verschlechtert sich die Situation weiter und es kommen im Nordosten Brasiliens neue Gebiete hinzu, die in Zukunft unter hohem Wasserstress leiden könnten. Im Westen Chinas, im Nordwesten Indiens und in Teilen Pakistans kann es zu einer leichten Entspannung der Wassersituation kommen. Da das Verhältnis von Wasserentnahme zu Wasserverfügbarkeit dort aber bereits gegenwärtig sehr hoch ist, reichen die Veränderungen nicht aus, um den kritischen Bereich (Verhältnis Entnahme/Verfügbarkeit > 0.4) zu verlassen. Auch in Indien, wo sich die Wassersituation nicht verändert, bleiben die Verhältnisse trotz zunehmender Niederschläge kritisch, da sich hier die Wasserentnahme durch Industrie und Haushalte langfristig vervielfacht.

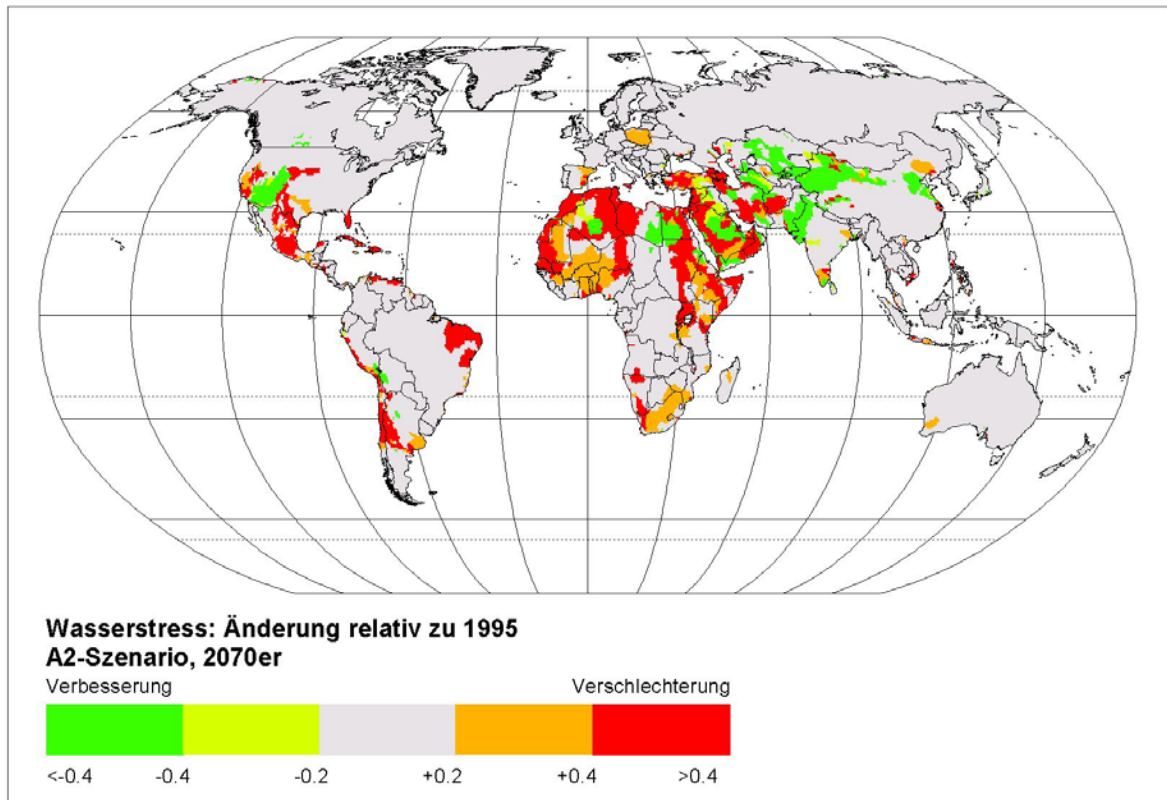


Abbildung 15 Änderung des Verhältnisses von Wasserentnahme zu Wasserverfügbarkeit (=Wasserstress) unter dem A2-Szenario in den 2070er Jahren relativ zu 1995.

Die Bedingungen des B2-Szenarios können langfristig trotz geringerer (globaler) Wasserentnahme, im Vergleich zur Gegenwart sowohl zu regionalen Verschlechterungen als auch zu Verbesserungen der Wassersituation führen (vgl. Abbildung 16). Eine Verschlechterung der Wassersituation wird für den Nordosten Brasiliens, den Nordwesten des afrikanischen Kontinents und den Süden Indiens berechnet. Dabei handelt es sich vor allem um Regionen, für die das WaterGAP-Modell einen zumeist klimabedingten Rückgang der Wasserverfügbarkeit berechnet (vgl. Abbildung 13). Da in Regionen wie Nordafrika und Südasien (Indien) der Bewässerungswasserbedarf die Wassernutzung dominiert und für diesen Sektor unter dem B2-Szenario kaum Veränderungen in der Wasserentnahme stattfinden, werden diese Regionen unter den gegebenen Annahmen extrem vom Klimawandel getroffen.

Aber auch Verbesserungen der Wassersituation gibt es unter diesem Szenario: Dies sind zum Einen diejenigen Regionen der Welt, in denen der industrielle und der Haushaltswasserbedarf die Wassernutzung dominieren und in denen diese aufgrund der technischen Effizienzsteigerungen unter dem B2-Szenario zurückgehen. Als Beispiel sei hier Europa genannt. Zusätzlich gibt es Regionen, in denen der Klimawandel aufgrund zunehmender Niederschläge zu einer regionalen Steigerung der Wasserverfügbarkeit führt. Dies trifft auf den Nordwesten Chinas sowie weite Teile Kasachstans und Kyrgisistans, sowie auf die Einzugsgebiete im Grenzgebiet von Indien und Pakistan zu. Allerdings sind die abgebildeten Änderungen in der Kritikalität nicht ausreichend, um den hohen Wasserstress, der in den 1990er Jahren für diese Regionen berechnet wurde, zu kompensieren.

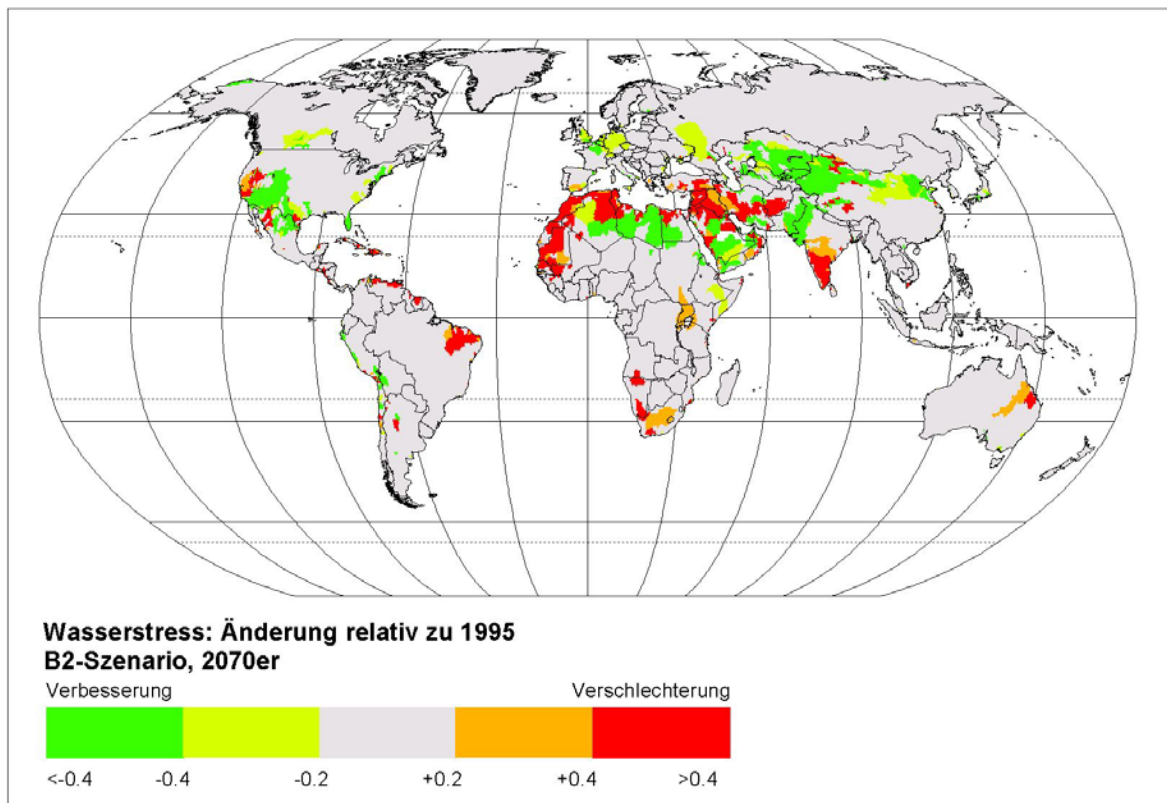


Abbildung 16 Änderung des Verhältnisses von Wasserentnahme zu Wasserverfügbarkeit (=Wasserstress) unter dem B2-Szenario in den 2070er Jahren relativ zu 1995.

Vergleicht man die Situation unter dem B2-Szenario mit dem A2-Szenario, so findet sich auch hier keine einheitliche Tendenz. Wie aus Abbildung 16 deutlich wird, verbessert sich die Wassersituation im Norden Afrikas unter dem B2-Szenario stärker als unter dem A2-Szenario. Dies ist ebenso der Fall im Süden der USA und im Norden Mexikos. Auch in Europa tritt unter dem B2-Szenario, im Gegensatz zum A2-Szenario, wo die Situation im Vergleich zu heute unverändert bleibt, eher eine Verbesserung auf. Da sich unter dem B2-Szenario (mit Ausnahme einiger Regionen Afrikas) die Wasserentnahme im verbrauchsintensivsten Bewässerungssektor im Verhältnis zu heute wenig ändert, spiegeln hier die Änderungen der Kritikalitätsklasse in den meisten Regionen der Welt eher den Einfluss des Klimas wider, während unter dem A2-Szenario die steigende Wasserentnahme aufzeigt, dass sie nicht der ausschließliche Grund, aber dennoch zu einem sehr wichtigen Faktor für die Veränderung der zukünftigen Wassersituation werden könnte.

4.2.2.2 Häufigkeit von Abflussexremen

Nicht nur die zukünftige Wasserverfügbarkeit, auch das Auftreten und die Häufigkeit von Extremereignissen wird von einer Veränderung des Klimas beeinflusst. So macht eine Veränderung der Häufigkeit extrem hoher oder niedriger Abflüsse ganz andere Anpassungsmaßnahmen notwendig, als eine Änderung der mittleren Wasserverfügbarkeit, wie

sie im letzten Kapitel beschrieben wurde. Um Aussagen über eine Änderung der Häufigkeit von Extremereignissen zu gewinnen, werden hier zukünftige Änderungen des Variationskoeffizienten für Abflusswerte in Kombination mit Änderungen der durchschnittlichen Niederschläge für zukünftige Dreißigjahresperioden ausgewertet. Es wird davon ausgegangen, dass eine Zunahme des Variationskoeffizienten um mehr als 25%, die einhergeht mit einer Abnahme der durchschnittlichen Niederschlagsmenge um mehr als 25%, einen Hinweis darauf darstellt, dass extrem niedrige Abflüsse in Zukunft häufiger auftreten werden. Umgekehrt wird eine 25%-ige Zunahme des Variationskoeffizienten, der mit einer Zunahme der durchschnittlichen Niederschlagsmengen verbunden ist, als ein Hinweis für das häufigere Auftreten sehr hoher Abflüsse interpretiert.

A2-Szenario

Wie aus Abbildung 17 hervorgeht, kann sich unter den Klimabedingungen des A2-Szenarios die Häufigkeit extrem hoher Abflüsse in den humiden Regionen im Norden Europas und Russlands, im Norden Chinas, im Westen Indiens und Australiens und in Argentinien langfristig erhöhen. Gleichzeitig können in einigen ariden Regionen vermehrt extrem niedrige Abflüsse auftreten. Dies ist vor allem der Fall im Norden und Nordosten Lateinamerikas und in Mittelamerika. Aber auch im Mittleren Osten, in Teilen Nord- und Südafrikas sowie im Süden und Südosten Europas können langfristig häufiger als während der Klimanormalperiode extrem niedrige Abflüsse auftreten.

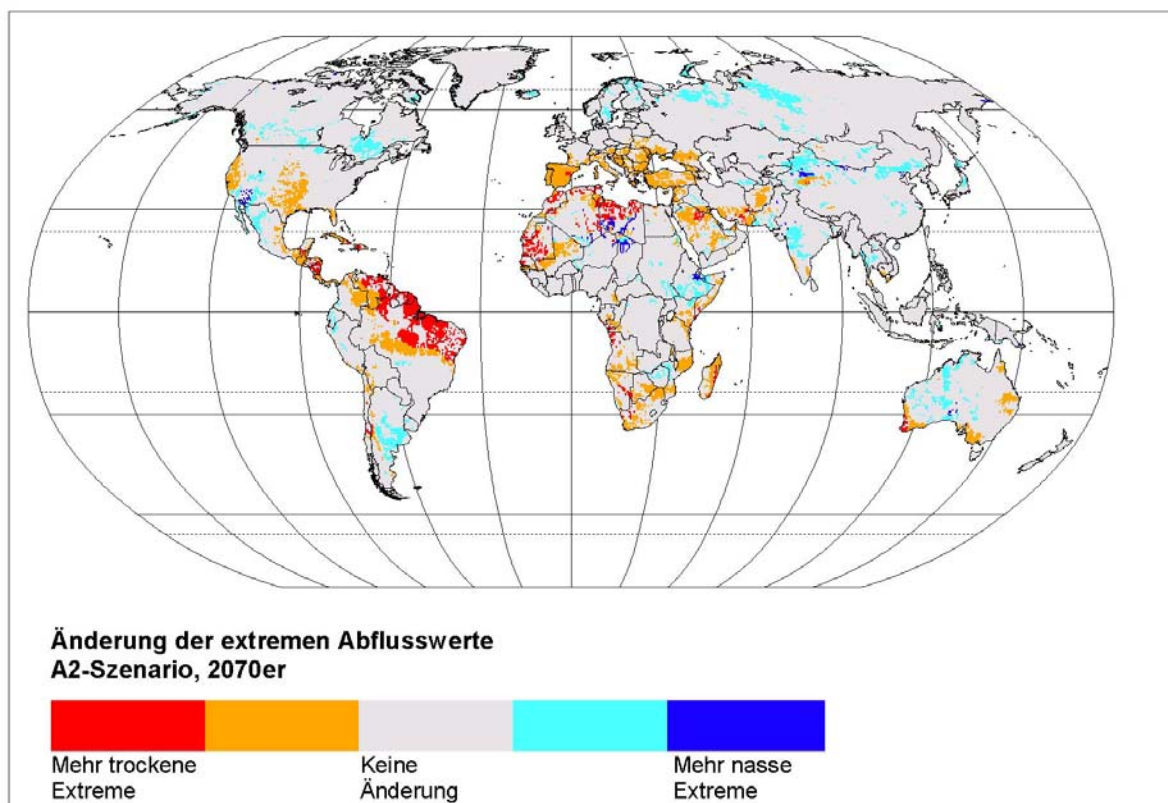


Abbildung 17 Änderung der Häufigkeit extremer Abflussereignisse unter dem A2-Szenario (2070er Jahre relativ zu 1995).

B2-Szenario

Auch unter dem im globalen Durchschnitt geringeren Klimawandel des B2-Szenarios können in Zukunft vermehrt extreme Abflussereignisse auftreten. Allerdings gibt es, jetzt im Vergleich zu den Auswirkungen des A2-Szenarios, sowohl Gewinner als auch Verlierer: So nimmt die Häufigkeit extrem niedriger Abflüsse im Norden und Süden Afrikas, im Süden Indiens und in Australien im Vergleich zum A2-Szenario stärker zu (vgl. Abbildung 18). Etwas weniger ausgeprägt als unter dem A2-Szenario ist dagegen die Zunahme der Häufigkeit von Trockenperioden im Süden und Südosten Europas. Auch die Häufigkeit extrem hoher Abflüsse nimmt unter dem B2-Szenario etwas weniger stark zu. Vor allem Argentinien, der Westen Indiens, aber auch der Norden Europas könnten hier von einem langfristig etwas geringer ausfallenden Klimawandel profitieren.

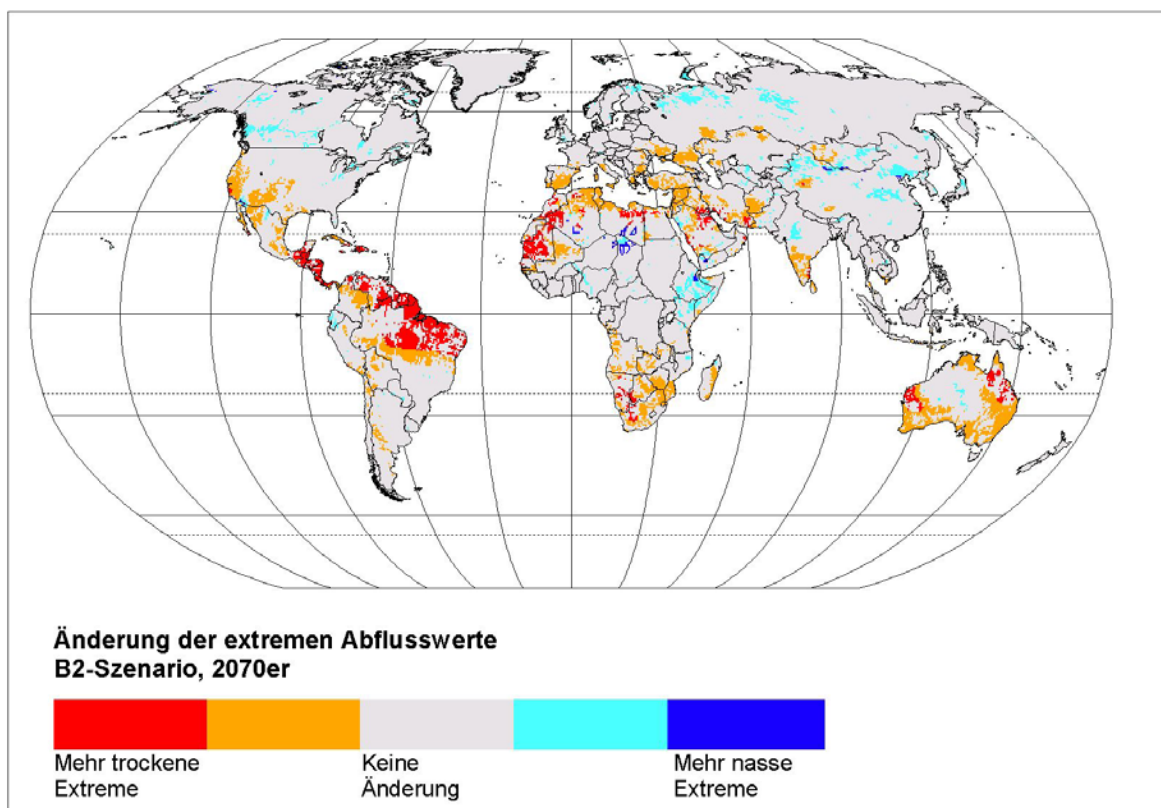


Abbildung 18 Änderung der Häufigkeit extremer Abflüsse unter dem B2-Szenario (2070er Jahre relativ zu 1995).

4.2.3 Zusammenfassung

In Bezug auf die zukünftige Wassersituation lassen sich die Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

1. Global gesehen nimmt die verfügbare Wassermenge bei beiden Szenarien durch die Erhöhung der Temperatur und die damit einhergehende stärkere Wasserverdunstung aus den Ozeanen zu. Dies ist für das A2-Szenario, aufgrund des stärkeren Temperaturanstiegs noch stärker der Fall als für das B2-Szenario. Allerdings kann

die Änderung der Wasserverfügbarkeit regional sehr stark variieren, da Niederschlagsänderungen als Haupteinflussfaktor für die Menge des verfügbaren Wassers, regional ebenfalls sehr unterschiedlich ausfallen.

2. Die globale Wassernutzung verläuft, je nach Szenario, sehr unterschiedlich. Unter dem A2-Szenario steigt die Wasserentnahme aufgrund von Bevölkerungszuwachs und wirtschaftlichem Wachstum kontinuierlich an und liegt bis zum Jahr 2075 bei 155% der Entnahme des Jahres 1995. Unter dem B2-Szenario wächst die Weltbevölkerung weniger stark, die wirtschaftliche Aktivität (in Form des Pro-Kopf-Einkommens) jedoch um so stärker. Da dem B2-Szenario eine ökologische Grundhaltung zugrunde liegt, die mit einer stark verbesserten Nutzungseffizienz für die Ressource Wasser einhergeht, nimmt die Wasserentnahme unter diesem Szenario kontinuierlich ab: Sie liegt 2025 bei 95% bzw. 2075 bei 78% der Werte des Jahres 1995.
3. In Bezug auf Wasserstress, d.h. das Verhältnis von entnommener zu verfügbarer Wassermenge, wird sich die langfristige Situation unter dem A2-Szenario in weiten Teilen der Welt, die schon heute mit kritischen Werten konfrontiert sind, verschärfen. Außerdem kann in einigen Gebieten, die nach unseren Berechnungen heute noch nicht unter Wasserstress zu leiden haben, eine Kombination aus Klimawandel und höherem Wasserverbrauch in Zukunft zu hohem Wasserstress führen. Die Bedingungen des B2-Szenarios führen, im Vergleich zum A2-Szenario, insoweit zu einer Verbesserung der Wassersituation, dass keine Erhöhung und in einigen wenigen Regionen sogar eine Verringerung des heutigen Wasserstress auftritt. Da sich unter dem B2-Szenario (mit Ausnahme einiger Regionen Afrikas) die Wasserentnahme im Verhältnis zu heute nur wenig verändert, spiegeln die Änderungen der Stresssituation hier eher die Änderungen des Klimas wider, während unter dem A2-Szenario die Veränderung der Wasserentnahme der entscheidende Faktor für zukünftigen Wassermangel ist.
4. Sowohl unter dem A2- als auch dem B2-Szenario wird die Häufigkeit extrem hoher und niedriger Abflüsse zunehmen. Zwar gibt es unter dem B2-Szenario Regionen, die weniger von einer Zunahme der Extreme betroffen sind als unter dem A2-Szenario. Allerdings tritt auch der umgekehrte Fall auf. D.h. für Regionen, für die unter dem A2-Szenario keine Zunahme berechnet wurde, könnten die Extreme unter dem B2-Szenario durchaus zunehmen. Es lässt sich daher keine klare Aussage darüber machen, ob der schwächere Klimawandel des B2-Szenarios wirklich zu einer geringeren Zunahme von Extremen bei den zukünftigen Abflüssen führt.

4.3 Auswirkungen des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Produktivität

Die landwirtschaftliche Produktivität eines Landes ist von einer Vielzahl von Einflüssen abhängig. Dabei spielen, neben der technischen Ausstattung, dem Einsatz von Düngemitteln, oder auch den agrarpolitischen Rahmenbedingungen eines Landes, klimatische Fakto-

ren eine entscheidende Rolle. Eine zukünftige oder bereits stattfindende Veränderung des Klimas kann sich als leichter Anstieg der mittleren Temperatur und geringfügige Änderung der Niederschlagsbedingungen manifestieren, sie kann sich aber auch in einer veränderten Häufigkeit von Extremereignissen wie z.B. Dürreperioden zeigen. In jedem Fall wird die Erwärmung der Atmosphäre und die hiermit verbundenen Auswirkungen auf den Wasserkreislauf die landwirtschaftliche Produktivität weltweit verändern. Dabei kann, wie bereits in einer Reihe von Studien gezeigt wurde (z.B. Parry et al., 1999, Adams et al., 1998) die kombinierte Wirkung von Temperaturanstieg und Änderung der Niederschlagsmengen im langjährigen Mittel innerhalb eines Landes sowohl zu Ertragseinbußen, als auch zu steigenden Erträgen führen. Allerdings kann sich hinter einer kleinen Veränderung der mittleren Erträge durchaus eine Zunahme der Häufigkeit von Extremereignissen verstecken, die, vor allem in bereits anfälligen landwirtschaftlichen Systemen andere Anpassungsmaßnahmen erfordern, als wenn sich die jährlichen Erträge um wenige Prozentpunkte verändern.

In diesem Abschnitt werden daher die Ergebnisse von drei Analysen vorgestellt, in denen (1) die mittlere klimabedingte Änderung der landwirtschaftlichen Produktivität, (2) die Auswirkung, die eine Anpassung der Feldfruchtarten an die veränderten Klimabedingungen auf die landwirtschaftliche Produktivität hat und (3) die zukünftige Veränderung der Häufigkeit von Missernten abgeschätzt wird. Mit Hilfe des Globalen Agro-Ecological Zones-Modell (GAEZ, siehe z.B. Fischer et al., 2002) werden die Änderungen in der Produktivität der wichtigsten Feldfrüchte auf Länderebene berechnet. Diese Berechnungen wurden für das Klima durchgeführt, das jeweils aus dem A2- und dem B2-Emissionsszenario resultiert. Als Klimaeingaben werden die monatliche Änderung von Temperatur und Niederschlag benutzt, wie sie vom HadCM3-Modell für die 2020er und die 2070er Jahre berechnet werden. Diese Klimadaten werden jeweils mit der Variabilität der Klimanormalperiode (1961-90) überlagert, um die Klimavariabilität zu berücksichtigen und die Extremereignisse zu erfassen. Ziel der Analyse ist es zum Einen, die Änderung der potentiellen Produktivität unter den Bedingungen des A2- und des B2-Szenarios abzuschätzen, und zum Anderen zu untersuchen, inwiefern die langfristig geringeren Treibhausgasemissionen des B2-Szenarios zu einer Verminderung der Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktivität führen.

4.3.1 Vorgehensweise

Mit dem GAEZ-Modell können in weltweit konsistenter Weise die Erträge von 154 Feldfrüchten, davon 83 Getreidesorten inklusive ihrer Varietäten, für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion berechnet werden. Bei der Berechnung der potentiellen Erträge der einzelnen Feldfrüchte wird in drei Schritten vorgegangen:

1. Für jede $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ -Zelle werden diejenigen Feldfrüchte identifiziert, die aufgrund ihrer Anforderungen an einen Standort einerseits und der agro-klimatischen Bedingungen in dieser Zelle andererseits, angebaut werden können (Land Utilization Types, LUTs). Zu diesen Bedingungen gehören chemisch-physikalische Bodeneigen-

schaften, aber auch Informationen über Höhenlage und Geländeneigung sowie die anderweitige Nutzung einer Zelle. Als klimatische Bedingungen werden pflanzen-spezifische Größen wie Beginn und Länge der Wachstumsperiode (und damit die Anzahl der Anbauzyklen pro Jahr) sowie charakteristische Temperatursummen der jeweiligen Feldfrüchte berücksichtigt. Die entsprechenden Klimawerte werden für jedes Szenario aus dem Klimadatensatz, d.h. den HadCM3-Resultaten kombiniert mit der Klimavariabilität 1961-90, ermittelt.

2. Basierend auf den Temperatur- und Strahlungsbedingungen in einer 0.5°-Zelle, werden potentielle temperatur- und strahlungslimitierte Erträge derjenigen Feldfrüchte berechnet, die laut der Ergebnisse von Schritt 1 in dieser Zelle angebaut werden können.
3. Abschließend werden agro-klimatische Reduktionsfaktoren wirksam, die die im zweiten Schritt berechneten potentiellen Erträge vermindern. So werden an dieser Stelle die Ertragseinbußen berechnet, die durch Wassermangel verursacht werden, der z.B. aufgrund verminderter Niederschläge auftreten kann. Auch andere, vor allem kurzfristig ungünstige Bedingungen, wie z.B. Frostperioden, werden in diesem Rechenschritt berücksichtigt.

Für die Ermittlung der Folgen des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Produktivität werden die potentiellen Erträge von zehn Feldfrüchten berücksichtigt. Die Berechnungen wurden für die Flächen/Rasterzellen durchgeführt, die in den 1990er Jahren weltweit für den Anbau von Nahrungsmitteln genutzt wurden. Die Informationen über den Grad der Nutzung jeder dieser 0.5°-Zellen (in Prozent der Zellfläche) entstammen der Landmaske für permanent genutzte Agrarflächen der University of Wisconsin, USA (Ramankutty & Foley, 1998). Der Flächenanteil, den jede der zwei wichtigsten Feldfrüchte eines Landes innerhalb einer 0.5°-Zelle zugewiesen bekommt, ist proportional zu ihrem durchschnittlichen Ertrag während einer 30-Jahresklimaperiode. D.h. bei gleich hohen Erträgen der zwei wichtigsten Feldfrüchte werden für jeweils 50% der landwirtschaftlichen Fläche einer 0.5°-Zelle der Ertrag der jeweiligen Feldfrucht berechnet.

Es werden die klimabedingten Ertragsänderungen für Weizen, Reis, Mais, Gerste, Sorghum, Hirse, Roggen, Kartoffeln, Maniok und Süßkartoffeln abgeschätzt. Aus dieser Palette von Feldfrüchten wurden weltweit für 174 Länder jeweils diejenigen zwei Feldfrüchte identifiziert, die in den 1990er Jahren auf Basis der pro Einwohner verwerteten Kalorien die wichtigste Rolle spielen. Diese Auswahl spiegelt die Nahrungspräferenzen der Bevölkerung eines Landes wider. Um die Beiträge mehrerer Feldfrüchte zur Nahrungsmittelproduktion eines Landes zusammenfassen zu können, werden die vom GAEZ berechneten potentiellen Erträge (in kg/km²) für jede Feldfrucht über FAO-Angaben (FAOSTAT, 1998) in produzierte Energieeinheiten pro Land (Gcal/Jahr) umgerechnet.

Als Referenzwert für zukünftige Änderungen dient jeweils die landesweite potentielle Produktivität der Klimanormalperiode 1961-90. Für die Berechnung der klimabedingten Produktivitätsänderungen wird das mittlere Klima der 2020er- und der 2070er Jahre für das A2- und das B2-Szenario mit der Variabilität der Klimanormalperiode 1961-90 überlagert (vgl. Kapitel 4.1.2). Die hieraus resultierenden Monatswerte für drei 30-Jahresperioden werden als Klimaeingabe für die Wachstumsfunktionen des GAEZ benutzt. Ausgewertet werden die über die 30-Jahresperioden gemittelten Produktionszahlen sowie die Häufigkeit von Jahren mit extrem niedriger Produktivität.

Folgen des Klimawandels für die mittlere landwirtschaftliche Produktivität

Die Folgen des veränderten Klimas für die landwirtschaftliche Produktivität werden für zwei Fälle untersucht: Im ersten Fall wird davon ausgegangen, dass keine Anpassungsmaßnahmen erfolgen und dass weltweit diejenigen Feldfrüchte auf der heutigen Agrarfläche eines Landes angebaut werden, die schon heute die wichtigste Rolle spielen. Die Änderungen der potentiellen Erträge und damit der landesweiten Produktion sind damit nur auf die kombinierte Änderung von Temperatur und Niederschlägen zurückzuführen. Die Ertragsänderungen in der Zukunft werden jeweils für die zwei laut FAO-Statistik (FAO-STAT, 1998) in den 1990er Jahren wichtigsten Feldfrüchte eines Landes berechnet.

Klimaauswirkungen auf mittlere Produktivität mit Anpassung der Feldfrüchte

In der zweiten Analyse wird weltweit auf die Veränderung der Klimabedingungen reagiert, indem die Art der Feldfrüchte an die neuen Temperatur- und Niederschlagsbedingungen angepasst werden. Das GAEZ-Modell berücksichtigt bei diesem Ansatz nicht mehr die den heutigen Ernährungsgewohnheiten entsprechenden wichtigsten Feldfrüchte eines Landes, sondern berechnet die Produktivität für diejenigen Feldfrüchte, die über die gemittelten Klimabedingungen einer zukünftigen 10-Jahresperiode die höchsten potentiellen Erträge ergeben. Auf der Basis dieser Erträge werden im folgenden Schritt auch die Flächenanteile neu berechnet, die jeder dieser Feldfrüchte in einer 0.5°-Rasterzelle zugeordnet werden. Die Neuberechnungen erfolgen für die 2020er und die 2070er Jahre jeweils unter den mittleren Klimabedingungen des A2- und des B2-Szenarios und der Klimavariabilität der Periode 1961-1990.

Häufigkeiten extrem niedriger Produktivität

In einer dritten Analyse werden die Simulationsergebnisse des GAEZ im Hinblick auf die Häufigkeit von Extremereignissen ausgewertet. Ein Extremereignis bzw. eine Missernte tritt für diese Analyse definitionsgemäß dann auf, wenn die potentielle Produktivität der nach heutigen Maßstäben wichtigsten Getreideart eines Landes nur 50% oder weniger der mittleren Produktivität der Klimanormalperiode erreicht. Ziel dieser Analyse ist es, abzuschätzen, wo und wie stark sich die Häufigkeit dieser Ereignisse in der Zukunft im Vergleich zu heutigen Verhältnissen verändert. Abschließend werden die Ergebnisse der beiden Szenarien gegenübergestellt, um festzustellen, ob und wie sich die niedrigeren Treibhausgasemissionen des B2-Szenarios im Vergleich zum A2-Szenario auswirken.

4.3.2 Ergebnisse

Für die Abschätzung der Klimaauswirkungen auf die landwirtschaftlichen Erträge werden die Ergebnisse für 174 Länder auf die 17 Regionen des IMAGE 2.2 Modells aggregiert. Die Ergebnisse der Analyse werden außerdem, wie für die Emissionsszenarien, getrennt nach Annex B und Nicht-Annex B-Regionen ausgewertet. Trotz der Aggregation in Regionen bleiben Länderinformationen erhalten, da jeweils die zwei Hauptfeldfrüchte jedes Landes innerhalb einer Region in die Berechnungen eingehen. Dies hat zur Folge, dass z.B. für die Region Südamerika die potentiellen Erträge von sechs Feldfrüchten berücksichtigt werden (Weizen, Reis, Mais, Kartoffeln, Maniok, Süßkartoffeln), für die Region OECD Europa jedoch nur drei (Weizen, Roggen, Kartoffeln).

4.3.2.1 *Änderung der mittleren Produktivität*

A2 Szenario

Global gesehen führen die Veränderungen von Temperatur und Niederschlag unter dem A2-Szenario zu einem weltweiten Rückgang der potentiellen Produktivität in der Landwirtschaft. Mittelfristig, d.h. für die 2020er Jahre, kann nach unseren Berechnungen mit einem Produktionsrückgang von 7% relativ zur Klimanormalperiode gerechnet werden (vgl. Tabelle 14). Bis zum Ende des Jahrhunderts sinkt die potentielle Produktivität weiter auf 80% der heutigen Werte.

Wie zu erwarten, fallen die zukünftigen Änderungen von Region zu Region sehr unterschiedlich aus. Dabei sind sowohl Annex B- als auch Nicht-Annex B-Staaten von Rückgängen der potentiellen Produktivität betroffen.

Bei den Annex B-Regionen reicht die Spanne der Produktivitätsänderungen bereits für den Zeitraum der 2020er Jahre von -15% für die USA bis hin zu +5% für Kanada und Japan. Für die USA liefert das Klimamodell HadCM3 mittelfristig einen leichten Temperaturanstieg bei fast gleichbleibenden Niederschlägen für das Hauptanbaugebiet für Weizen. Diese relativ geringen, dafür aber großflächig auftretenden Änderungen im Klima reichen aus, um einen 15%igen Rückgang in der Gesamtproduktivität des Landes herbeizuführen.

Betrachtet man die langfristige Entwicklung der Produktivitätswerte, d.h. die Periode der 2070er Jahre, so findet sich auch hier, im Vergleich zur Klimanormalperiode, eine weite Spanne von Veränderungen. In den USA würde sich der Produktionsrückgang unter dem A2-Klima weiter verschärfen; die potentielle Produktivität erreicht nur noch 71% der Werte der Klimanormalperiode. Am anderen Ende der Spanne liegt Japan, das auch in fernerer Zukunft sein gegenwärtig hohes Produktivitätsniveau auf 104% der heutigen Werte erhöhen könnte, da laut HadCM3-Modell dort ein Anstieg der Temperatur mit einer Erhöhung der Niederschläge einhergeht.

Bei den Nicht-Annex B-Regionen reichen die mittelfristigen Veränderungen (2020er Jahre) der Produktion von -11% für die Region Ostasien bis +8% für die Region Südasien.

Für die Region Südasien, die flächenmäßig von Indien und Pakistan dominiert wird, ergibt sich ein sehr heterogenes Bild: Ertragssteigerungen beim Reisanbau im Norden Indiens stehen Ertragseinbußen im Süden des Landes gegenüber. Die Ertragssteigerungen im Norden, hervorgerufen durch eine Zunahme der Niederschläge bei nur leicht steigenden Temperaturen dominieren zwar die Gesamtzahlen, allerdings kann ein Ausgleich der Produktionsrückgänge im Süden bei der Größe des Landes eine Herausforderung an die Infrastruktur darstellen. Diese Zahlen machen deutlich, dass die Aggregation der Gesamtwerte auf einen Regionenwert zwar eine gute Übersicht und Vergleichbarkeit der Ergebnisse weltweit gewährleisten, dass aber die absoluten Zahlen mit Vorsicht zu interpretieren sind, da sich auch hinter kleinen Änderungen für die Gesamtregion regional und lokal durchaus gegensätzliche Trends verbergen können. Eine höhere räumliche Auflösung der Ergebnisse wäre hier wünschenswert, übersteigt aber den Rahmen einer global vergleichenden Analyse. Im Hinblick auf die praktische Durchführung von z.B. Adaptationsmaßnahmen sind in einem folgenden Analyseschritt allerdings mehr lokal ausgerichtete Studien notwendig und sinnvoll.

Langfristig führt der Klimawandel in allen Nicht-Annex B-Regionen zu Rückgängen der potentiellen Produktivität. Die Änderungen reichen von -36% für die Region Nordafrika bis hin zu -6% für die Regionen Ostafrika und Westafrika als Regionen mit der geringsten Abweichung von der heutigen Produktivität. Für einige Regionen, wie z.B. Nordafrika und Südasien ist damit nach einem mittelfristigen Anstieg der Produktivität langfristig doch noch mit sinkenden Erträgen zu rechnen. Zum Einen verstärkt sich der Temperaturanstieg gegen Ende des Jahrhunderts, aber vor allem ändert sich in einigen Gebieten die Richtung der Niederschlagsänderung. D.h. einer mittelfristigen Zunahme der Niederschlagsmenge folgt, nach Berechnungen des HadCM3-Modells, langfristig ein Rückgang der Niederschlagsmengen. Dies führt dazu, dass in Marokko, in dem neben Algerien das Hauptanbaugebiet für Weizen in der Region Nordafrika liegt, die mittelfristige Weizenproduktion klimabedingt ansteigen kann (+7%), dann aber, hauptsächlich aufgrund von Niederschlagsrückgängen, auf 57% der heutigen potentiellen Produktion abfällt. Hier wird deutlich, dass Niederschlagsänderungen und landwirtschaftliche Produktivität nicht eindeutig mit der globalen Temperatursteigerung und der Zunahme der Treibhausgasemissionen korreliert sind, sondern dass sie durchaus, wie im Falle Nordafrikas, im Trend wechseln können.

Tabelle 14 Klimabedingte Veränderung der potentiellen landwirtschaftlichen Produktivität der Annex B- und Nicht-Annex B-Regionen unter dem A2- und dem B2-Szenario.

Region	Produktion relativ zur Klimanormalperiode [%]				
	A2-Szenario			B2-Szenario	
	1961-90	2020er	2070er	2020er	2070er
Annex B					
Ehem. UDSSR	100	94	86	95 (→)*	85 (→)
Japan	100	105	104	104 (→)	104 (→)
Kanada	100	105	96	108 (→)	104 (↗)
OECD Europa	100	95	77	93 (→)	85 (↗)
Osteuropa	100	95	73	92 (→)	79 (↗)
Ozeanien	100	97	87	89 (↘)*	88 (→)
USA	100	85	71	90 (↗)*	79 (↗)
Nicht-Annex B					
Mittelamerika	100	91	80	93 (→)	78 (→)
Mittl. Osten	100	100	87	89 (↘)	96 (↗)
Nordafrika	100	104	64	97 (↘)	66 (→)
Ostafrika	100	102	94	100 (→)	97 (→)
Ostasien	100	89	80	94 (↗)	79 (→)
Südamerika	100	90	77	96 (↗)	79 (→)
Südasien	100	108	82	92 (↘)	80 (→)
Südl. Afrika	100	90	77	85 (↘)	75 (→)
Südostasien	100	95	90	96 (→)	91 (→)
Westafrika	100	100	94	101 (→)	97 (→)
Welt	100	93	80	94 (→)	83 (→)

* Veränderung relativ zum gleichen Zeitraum unter dem A2-Szenario: (→): Die Differenz zwischen A2- und B2-Szenario beträgt im jeweiligen Zeitraum nicht mehr als ± 3%. (↗): Das Auswirkungsniveau hat sich unter dem B2-Szenario um mehr als 3% verbessert; (↘): Das Auswirkungsniveau hat sich unter dem B2-Szenario um mehr als 3% verschlechtert.

B2 Szenario

Im folgenden Kapitel werden die Änderungen der landwirtschaftlichen Produktivität unter dem B2-Szenario den Resultaten des A2-Szenarios vergleichend gegenübergestellt. Unter dem B2-Szenario betragen die CO₂ Emissionen im Jahr 2020 noch 82% der A2-Emissionen; die kumulierten Emissionen beider Szenarien bewegen sich damit noch in der gleichen Größenordnung. Gegen Ende des Jahrhunderts erreichen die B2-Emissionen dagegen nur noch rund die Hälfte der Emissionen des A2-Szenarios (IPCC, 2000). Wir versuchen daher abzuschätzen, inwiefern die geringeren Treibhausgasemissionen des B2-Szenarios das Ausmaß der Veränderung der landwirtschaftlichen Produktion relativ zum A2-Szenario beeinflussen. In Tabelle 14 wird daher für das B2-Szenario, neben den absoluten Änderungen in der Produktion, zusätzlich eine vergleichende Beurteilung in Bezug auf das A2-Szenario angegeben (siehe Pfeile).

Global gesehen nimmt auch unter dem B2-Szenario die landwirtschaftliche Produktivität ab. Mittelfristig ist bei einem Rückgang von 7% für das A2- bzw. 6% für das B2-Szenario so gut wie kein Unterschied zwischen den beiden Szenarien feststellbar. Langfristig geht die potentielle weltweite Produktion unter dem B2-Szenario immer noch um 17% zurück, was im Vergleich zum A2-Szenario mit –20%, nur einen kleinen Unterschied ausmacht.

Für die Annex B-Regionen finden sich mittelfristig (2020er Jahre) keine großen Unterschiede zwischen den beiden Szenarien (vgl. Tabelle 14). Eine Ausnahme ist die Region Ozeanien, deren potentielle landwirtschaftliche Produktion unter dem B2-Szenario auf 89% der heutigen Produktion zurückgeht und damit weiter abfällt als unter dem A2-Szenario mit 97% der heutigen Produktion. Eine mögliche Begründung hierfür könnte sein, dass diese Region aufgrund ihrer Lage in der südlichen Hemisphäre die Auswirkungen der geringeren SO₂-Emissionen des B2-Szenarios zu spüren bekommt. Im Gegensatz zur Höhe der Treibhausgasemissionen, die beim B2-Szenario nur geringfügig niedriger liegen als unter dem A2-Szenario, ist der Unterschied in den SO₂-Emissionen mittelfristig sehr groß: Im asiatischen Raum werden 2020 unter dem B2-Szenario nur 64% der SO₂-Emissionen des A2-Szenarios emittiert (IPCC, 2000). Ähnlich verhält es sich mit den Emissionen für Lateinamerika und Afrika, wo unter dem B2-Szenario nur 62% der SO₂-Menge des A2-Szenarios emittiert werden. D.h. der Sulphateffekt, der unter dem A2-Szenario besonders in der südlichen Hemisphäre noch für eine Dämpfung des mittelfristigen Klimawandels sorgt, entfällt für das B2-Szenario weitgehend.

Langfristig betrachtet (2070er Jahre) haben die geringeren Treibhausgasemissionen des B2-Szenarios für die Annex B-Regionen durchaus positive Auswirkungen⁶. Für die Regionen OECD Europa, Osteuropa sowie Kanada und die USA liegt die potentielle Produktion unter dem B2-Szenario um 6 bis 8% höher als unter dem A2-Szenario. Für die restlichen drei Regionen bleiben die Produktivitätsunterschiede zwischen A2- und B2-Szenario kleiner als 3%.

Bei den Nicht-Annex B-Regionen werden vier von zehn Regionen bereits mittelfristig (2020er Jahre) mit klimabedingten Produktionsrückgängen zu kämpfen haben, die stärker ausfallen als unter dem A2-Szenario. Hierzu gehören z.B. die Region Südasien, wo einer *Zunahme* der potentiellen Produktion um 8% unter dem A2-Szenario eine *Abnahme* um 8% unter dem B2-Szenario gegenübersteht. Dies kann zum Einen, wie bei der Region Ozeanien daran liegen, dass als Folge niedrigerer SO₂-Emissionen des B2-Szenarios der kühlende Effekt der Sulphat-Aerosole zu einem großen Teil wegfällt. Hinzu kommt, dass Klimaänderungen in Anbaugebieten auftreten können, deren Erträge schon heute klimabedingt am unteren Ende der Ertragsskala liegen. So können insbesondere kleine Änderungen der Niederschlagsmengen in bereits trockenen Agrargebieten große prozentuale Änderungen in der Produktion verursachen. Als Beispiel hierfür sei die Region Nordafrika genannt. In Bezug auf die räumliche Verteilung der Niederschlagsänderungen muss allerdings einschränkend angemerkt werden, dass die Ergebnisse auch so komplexer Klimamodelle wie es das HadCM3-Modell eines ist, an diesem Punkt noch sehr unsicher sind.

Langfristig betrachtet ist bei den Nicht-Annex B-Regionen kaum ein Unterschied zwischen den Auswirkungen des A2- und B2-Szenarios festzustellen. Eine Ausnahme bildet hier der

Mittlere Osten, wo die potentielle Produktion unter dem B2-Szenario um 9% weniger stark zurückgeht als unter dem A2-Szenario. Dieser Trend basiert im Wesentlichen auf einem weniger starken Rückgang der Niederschläge in einem kleinen aber wichtigen Anbaugebiet im Norden der Türkei und ist aufgrund der Unsicherheiten bei der Niederschlagsberechnungen des Klimamodells mit Vorsicht zu interpretieren. Allgemein betrachtet, sind diese Ergebnisse ein deutlicher Hinweis darauf, dass kein linearer Zusammenhang herrscht zwischen dem Ausmaß des globalen Klimawandels (z.B. erfasst als mittlere globale Erhöhung der Temperatur) und dem Ausmaß der Auswirkungen auf die regionale landwirtschaftliche Produktivität.

4.3.2.2 *Änderung der Produktivität bei Optimierung der Feldfrüchte*

Wie die Ergebnisse des letzten Kapitels zeigen, kann eine Veränderung der Klimabedingungen die potentielle landwirtschaftliche Produktivität weltweit, je nach Szenario, um 17-20% verringern. Dies bedeutet, dass sich langfristig für 43-45% aller Länder die Produktivität um 10% oder sogar mehr vermindert. Diese Ergebnisse spiegeln zum Einen eine mögliche Verschärfung der Nahrungsmittelsituation wider, da sich die Weltbevölkerung bis zum Ende des Jahrhunderts verdoppeln (B2-Szenario) bis nahezu verdreifachen könnte (A2-Szenario). Gleichzeitig geben die Ergebnisse Hinweise darauf, in welchen Regionen der Welt der Beginn von Anpassungsmaßnahmen an die sich verändernden Klimabedingungen besonders dringlich ist. Diese Anpassungsmaßnahmen können sehr unterschiedliche Formen annehmen. So kann eine Ausdehnung und Effizienzsteigerung bei der Bewässerungslandwirtschaft oder die Erschließung neuer klimatisch günstigerer Agrarflächen einen Teil der klimabedingten Produktionsrückgänge auffangen. Eine weitere Möglichkeit ist die Überprüfung der angebauten Feldfrüchte hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für ein verändertes Klima. Diese Art der Anpassungsmaßnahme wird in der folgenden Auswirkungsanalyse aufgegriffen. Mit Hilfe des GAEZ-Modells wird abgeschätzt, inwiefern eine Optimierung der Feldfruchtarten für veränderte Klimabedingungen die bisher berechneten Ertragsrückgänge kompensieren und damit zur Entschärfung einer zukünftigen regionalen Nahrungsmittelknappheit beitragen könnte. Alle anderen Optionen für Anpassungsmaßnahmen bleiben dabei unberücksichtigt. Als Referenzwerte (=100%) für die potentielle Produktion dienen auch hier die (nicht ertragsoptimierten) Zahlen für die Periode 1961-90. D.h. für den Referenzwert werden wiederum die zwei Feldfrüchte berücksichtigt, die laut FAO-Statistik in den 1990er Jahren die wichtigsten Feldfrüchte eines Landes darstellen. Die Änderungen der landwirtschaftlichen Produktivität mit angepassten Feldfrüchten wird auf Länderebene berechnet und anschließend zu 17 IMAGE-Regionen aggregiert.

Wie aus Tabelle 15 zu ersehen ist könnte bei globaler Betrachtung eine Optimierung der Feldfrüchte sowohl unter dem A2- als auch dem B2-Szenario zu einem mittelfristigen Produktivitätszuwachs von 49% führen. Auch langfristig unterscheiden sich die Werte mit +34% für das A2-Szenario und +36% für das B2-Szenario nicht sehr stark. Diesem langfristigen Zuwachs von 34-36% steht allerdings rein rechnerisch immer noch eine Verdopp-

⁶ Die Höhe der SO₂-Emissionen von Szenario A2 und B2 nähern sich gegen Ende des Jahrhunderts an.

lung bis Verdreifachung der Weltbevölkerung gegenüber, womit deutlich wird, dass eine Optimierung der Feldfrüchte global gesehen nur eine von mehreren notwendigen Anpassungsmaßnahmen sein kann. Allerdings fallen auch bei dieser Art der Anpassung die Ergebnisse regional sehr unterschiedlich aus.

Tabelle 15 Klimabedingte Veränderung der potentiellen landwirtschaftlichen Produktivität mit Optimierung der wichtigsten Feldfrüchte.

Region	Optimierte Produktivität relativ zur Klimanormalperiode [%]				
		A2-Szenario		B2-Szenario	
	1961-90	2020er	2070er	2020er	2070er
Annex B					
Ehem. UDSSR	100	122	115	124	112
Japan	100	190	193	193	191
Kanada	100	119	105	118	112
OECD Europa	100	(95)*	(77)	(93)	(85)
Osteuropa	100	(95)	(73)	(92)	(79)
Ozeanien	100	111	110	89	111
USA	100	129	108	127	117
Nicht-Annex B					
Mittelamerika	100	140	118	146	111
Mittl. Osten	100	(100)	(87)	(89)	(96)
Nordafrika	100	215	122	192	131
Ostafrika	100	185	179	183	179
Ostasien	100	226	227	242	231
Südamerika	100	230	197	232	201
Südasien	100	577	518	551	508
Südl. Afrika	100	157	143	150	141
Südostasien	100	140	120	141	126
Westafrika	100	181	167	187	171
Welt	100	149	134	149	136

* Bei diesen Regionen ist keine Optimierung der Feldfrüchte möglich. Eine Erklärung ist im Text zu finden.

In den meisten Annex B-Regionen können sowohl unter dem A2-Szenario, als auch unter dem B2-Szenario die klimabedingten Rückgänge der Produktion durch Anpassung der wichtigsten Feldfrüchte erhöht werden (vgl. Tabelle 15). Dies ist für die Annex B-Regionen allerdings in geringerem Ausmaß der Fall als für die Nicht-Annex B-Regionen, da in den Annex B-Regionen das Niveau für die potentielle Produktion durch die meist moderaten Klimaverhältnisse bereits heute sehr hoch ist und die Art der Feldfrüchte bereits nahezu optimal angepasst ist. In diesen Regionen führt die Optimierung trotzdem noch zu einer langfristigen Produktionssteigerung zwischen +8% (USA) und +93% (Japan). In Japan könnte allerdings auch eine Umstellung der Ernährungsgewohnheiten notwendig werden, um diese hohen Zuwächse zu erreichen. Hier würden Mais und Weizen die heutige Kombination von Reis und Weizen als die zwei wichtigsten Feldfrüchte verdrängen (vgl. Tabelle 16). In den USA würden Weizen und Mais als die zwei wichtigsten Feldfrüchte erhalten bleiben, allerdings würde der Maisanteil an der Gesamtproduktion des Landes sowohl mittel- als auch langfristig stark ansteigen.

Tabelle 16 Die wichtigsten Feldfrüchte der 17 Weltregionen in den 1990er Jahren sowie optimierte Feldfrüchte für die Klimabedingungen der 2070er Jahre des A2- und des B2-Szenarios.

Region	Aktuelle wichtigste Feldfrüchte 1990er Jahre	Klimaoptimierte wichtigste Feldfrüchte	
		A2-Szenario 2070er Jahre	B2-Szenario 2070er Jahre
Annex B			
Ehem. UDSSR	Weizen, Mais, Roggen, Kartoffeln	Weizen, Roggen, Kartoffeln	Weizen, Roggen, Kartoffeln
Japan	Weizen, Reis	Weizen, Mais	Weizen, Mais
Kanada	Weizen, Kartoffeln	Weizen, Kartoffeln	Weizen, Kartoffeln
OECD Europa	Weizen, Roggen, Kartoffeln	Weizen, Roggen, Kartoffeln	Weizen, Roggen, Kartoffeln
Osteuropa	Weizen, Mais, Kartoffeln	Weizen, Roggen, Kartoffeln	Weizen, Roggen, Kartoffeln
Ozeanien	Weizen, Reis, Kartoffeln, Süßkartoffel	Weizen, Reis, Kartoffel, Maniok	Weizen, Reis, Kartoffel, Maniok
USA	Weizen, Mais	Weizen, Mais	Weizen, Mais
Nicht-Annex B			
Mittelamerika	Weizen, Reis, Mais, Süßkartoffeln	Reis, Mais, Maniok, Süßkartoffeln	Mais, Maniok, Süßkartoffeln
Mittl. Osten	Weizen, Mais, Sorghum, Kartoffeln	Weizen, Sorghum, Hirse, Kartoffeln	Weizen, Sorghum, Hirse, Roggen, Kartoffeln
Nordafrika	Weizen, Gerste	Weizen, Gerste, Kartoffeln	Weizen, Gerste, Kartoffeln
Ostafrika	Weizen, Reis, Mais, Sorghum, Maniok, Süßkartoffeln	Mais, Sorghum, Maniok, Süßkartoffeln	Mais, Sorghum, Kartoffeln, Maniok, Süßkartoffeln
Ostasien	Weizen, Reis, Mais	Weizen, Mais, Hirse, Kartoffeln	Weizen, Mais, Kartoffeln
Südamerika	Weizen, Reis, Mais, Kartoffeln, Maniok, Süßkartoffeln	Weizen, Reis, Mais, Sorghum, Kartoffeln, Maniok, Süßkartoffeln	Weizen, Reis, Mais, Sorghum, Kartoffeln, Maniok, Süßkartoffeln
Südastien	Weizen, Reis, Mais	Weizen, Mais, Sorghum, Kartoffeln, Maniok, Süßkartoffeln	Weizen, Mais, Sorghum, Kartoffeln, Maniok, Süßkartoffeln
Südl. Afrika	Weizen, Mais, Hirse, Maniok	Mais, Sorghum, Hirse, Kartoffeln, Süßkartoffeln	Mais, Sorghum, Hirse, Kartoffeln, Süßkartoffeln
Südostasien	Weizen, Reis, Mais, Maniok	Reis, Mais, Maniok, Süßkartoffeln	Reis, Mais, Maniok, Süßkartoffeln
Westafrika	Reis, Mais, Sorghum, Hirse, Maniok, Süßkartoffeln	Mais, Sorghum, Hirse, Süßkartoffeln	Mais, Sorghum, Hirse, Süßkartoffeln

In den Regionen OECD Europa und Osteuropa (und Mittlerer Osten) ist die Optimierung auf Ertragsbasis, wie wir sie für diese Analyse vorgenommen haben, nicht möglich. Diese Regionen haben gemeinsam, dass gegenwärtig Weizen die wichtigste Feldfrucht ist und

dass unter zukünftigen Klimabedingungen der Ertrag und damit der Flächenanteil auf dem Kartoffeln (als zweitwichtigste Feldfrucht) angebaut werden, stark ansteigt. Da Kartoffeln unter den neuen Klimabedingungen zwar einen höheren Ertrag liefern, gleichzeitig aber die Energieausbeute von Kartoffelprodukten geringer ist als die von Getreide, sinkt die Gesamtproduktion eines Landes im Vergleich zur nicht-angepassten Produktion mit Weizen als wichtigster Feldfrucht. Für diese drei Regionen werden daher in Tabelle 15 die nicht-optimierten Werte aufgeführt.

In vielen Nicht-Annex B-Regionen wäre durch eine Optimierung der Feldfrüchte, zumindest theoretisch, eine substanzielle Erhöhung der jetzigen potentiellen Produktivität möglich. Die Spanne reicht hier unter dem A2-Szenario von 118% der heutigen Produktivität für Mittelamerika bis 518% für Südasien. Auch unter dem B2-Szenario könnten die Nicht-Annex B-Regionen ihre Produktivität auf 111% der heutigen Werte in Mittelamerika bis 508% in Südasien erhöhen. Allerdings würde es, vielleicht mit Ausnahme der Region Südasien, unter dem A2-Szenario keine der Nicht-Annex B-Regionen schaffen ihre zusätzliche Bevölkerung langfristig mit einer landwirtschaftlichen Optimierung dieser Art aus inländischer Produktion zu versorgen. Zum Vergleich: Die Bevölkerung wächst in diesen Regionen um den Faktor 2.5 für Südasien bis 6.3 für die Regionen Mittlerer Osten und Nordafrika (vgl. Tabelle 5). Unter dem B2-Szenario jedoch, wo die Produktivitätszuwächse ähnlich hoch ausfallen wie unter dem A2-Szenario und das Bevölkerungswachstum in den meisten Regionen weit weniger stark ist, könnten (auch hier theoretisch) die Regionen Ostasien und Südamerika ihren zusätzlichen Nahrungsmittelbedarf durch eine entsprechende Optimierung der landwirtschaftlichen Produktivität ausgleichen.

In der Region Südasien sowie in vier weiteren der 10 Nicht-Annex B-Regionen gehen die Produktionssteigerungen mit einer Aufweitung des Spektrums der wichtigsten Feldfrüchte einher. So stellen beispielsweise in den Ländern der Region Südasien nach FAO-Daten gegenwärtig drei Arten die wichtigsten Feldfrüchte, nämlich Weizen, Reis und Mais. Um langfristig eine Erhöhung der potentiellen Produktivität zu erreichen, erweitert sich das Spektrum auf sechs Feldfrüchte, die je nach Land und Veränderung der klimatischen Bedingungen aufgrund ihrer höheren Erträge die Rolle der wichtigsten Feldfrüchte übernehmen könnten (Weizen, Mais, Sorghum, Kartoffeln, Maniok, Süßkartoffeln). Diese Ergebnisse geben einen deutlichen Hinweis darauf, dass sich die Rolle derjenigen Feldfrüchte, die in den Ländern zwar angebaut werden, die in den 1990er Jahren aber weniger wichtig für die Ernährung waren, durchaus an Bedeutsamkeit gewinnen könnten bzw. sollten, wenn es um die Anpassung der Nahrungsmittelproduktion an veränderte Klimabedingungen geht. Auch aus der Perspektive der Klimapolitik wird es wichtig, das regionale Wissen um Anbau, Erntemethoden und Verarbeitung möglichst vieler unterschiedlicher Feldfrüchte zu erhalten. Mit einer gezielten Strategie dieser Art (Erhaltung und Förderung der landwirtschaftlichen Diversität) würde vor allem in den ärmeren Ländern, die sich neuere, z.B. trockenheitsresistente Züchtungen finanziell nicht leisten können, eine wichtige Option für eine Anpassung an den Klimawandel erhalten bleiben.

4.3.2.3 Häufigkeit klimabedingter Missernten

Ein Absinken der mittleren Produktivität, wie sie bis hierher beschrieben wurde, kann wahrscheinlich durch eine Kombination von Anpassungsmaßnahmen wie Optimierung von Sorten, Ausdehnung von Anbauflächen oder auch Nahrungsmittelimporte ausgeglichen werden. Anders verhält es sich, wenn z.B. durch extreme Witterungsbedingungen wie Dürreperioden große Teile der gewohnten Erntemengen nicht zu Verfügung stehen. Da für einen Schutz gegen extreme Ernteauffälle (Missernten) noch einmal völlig andere Maßnahmen notwendig sind, als bei einem Absinken der mittleren Produktivität, wird im Folgenden abgeschätzt, in welchem Ausmaß sich die Häufigkeit dieser Art von Extremereignis aufgrund einer Veränderung von Temperatur und Niederschlag zukünftig verändern kann.

Heutige Situation

Bereits jetzt gibt es weltweit eine Reihe von Ländern, die immer wieder von so starken klimatischen Extremen, wie z.B. Dürreperioden betroffen sind, dass Einbrüche bei der landwirtschaftlichen Produktion auftreten. Für die Klimanormalperiode 1961-90 errechnet das GAEZ für insgesamt 14 von 174 berücksichtigten Ländern eine Häufigkeit von extremen Produktionsausfällen, die zwischen 1-6 mal pro Jahrzehnt auftreten. Betroffen sind besonders einige Länder in Afrika (Mauretanien, Ägypten und Botswana), wo nach unseren Berechnungen klimabedingte Produktionsrückgänge mit einer Häufigkeit von drei bis vier mal pro Jahrzehnt auftreten können (siehe Abbildung 19). Auch in der ehemaligen Sowjetunion (Turkmenistan, Kasachstan) und im Norden Europas (Finnland, Norwegen) traten, wenn auch seltener (1-3 mal pro Dekade), extreme Produktivitätseinbrüche auf. Allerdings werden diese klimabedingten Rückgänge in der Produktivität, besonders in den letztgenannten Ländern, z.B. durch zusätzliche Bewässerungsmaßnahmen aufgefangen, so dass sich in der Literatur keine Angaben über Missernten finden. Für Länder in Afrika finden sich die niedrigen Produktionszahlen dagegen in den Produktionsstatistiken der FAO wieder: So stimmen z.B. für Botswana die vom GAEZ als extrem niedrig berechneten potentiellen Produktionszahlen in den 1980er Jahren mit einer Dürreperiode Anfang bis Mitte der 1980er Jahre überein (FAOSTAT, 1998; EM-DAT, 2003).

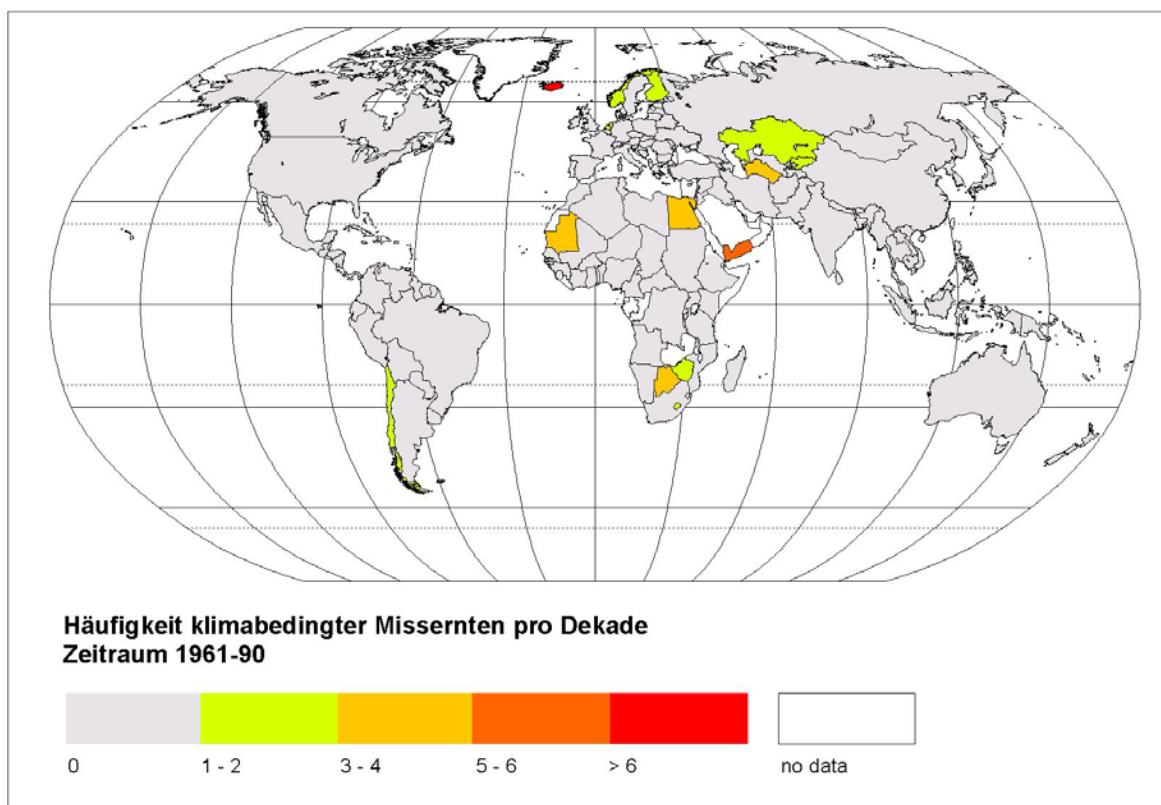


Abbildung 19 Häufigkeit extremer Ernteausfälle pro Jahrzehnt während der Klimanormalperiode 1961-90.

A2-Szenario

Die Klimaänderung unter dem A2-Szenario kombiniert mit der jährlichen Variabilität der Klimanormalperiode führt dazu, dass sich die Häufigkeit von Extremereignissen im Bereich der Landwirtschaft in Zukunft verändern wird. Wie Abbildung 20 zeigt, können die meisten Länder, die bereits heute von Missernten betroffen sind, auch in Zukunft und dann sogar häufiger davon betroffen sein. In den nordafrikanischen Ländern Ägypten und Mauretanien könnte sich, wie es sich bereits bei der Zunahme extremer Trockenperioden angedeutet hatte (vgl. Kapitel 4.2.2.2), die Häufigkeit starker Ernteausfälle im Vergleich zu heute sogar verdoppeln. Im Norden Europas (Finnland, Norwegen, Island) kann die Häufigkeit klimabedingten Ernteausfälle dagegen zurückgehen; das zukünftige Klima bietet in diesen Ländern, auch aufgrund der Erwärmung und damit längerer Vegetationsperioden, freundlichere Bedingungen für die Landwirtschaft.

Die Anzahl der Länder, die in Zukunft von klimabedingten Produktivitätseinbrüchen betroffen sein könnten, erhöht sich unter dem A2-Szenario von 14 für den Zeitraum der Klimanormalperiode auf 38 für die 2070er Jahre. D.h. auch Länder, die bisher eher nicht von Extremereignissen betroffen waren, können langfristig durchaus damit konfrontiert werden. Dies ist für Länder im Norden und Süden Afrikas, aber auch für den gesamten europäischen Raum und für Australien der Fall.

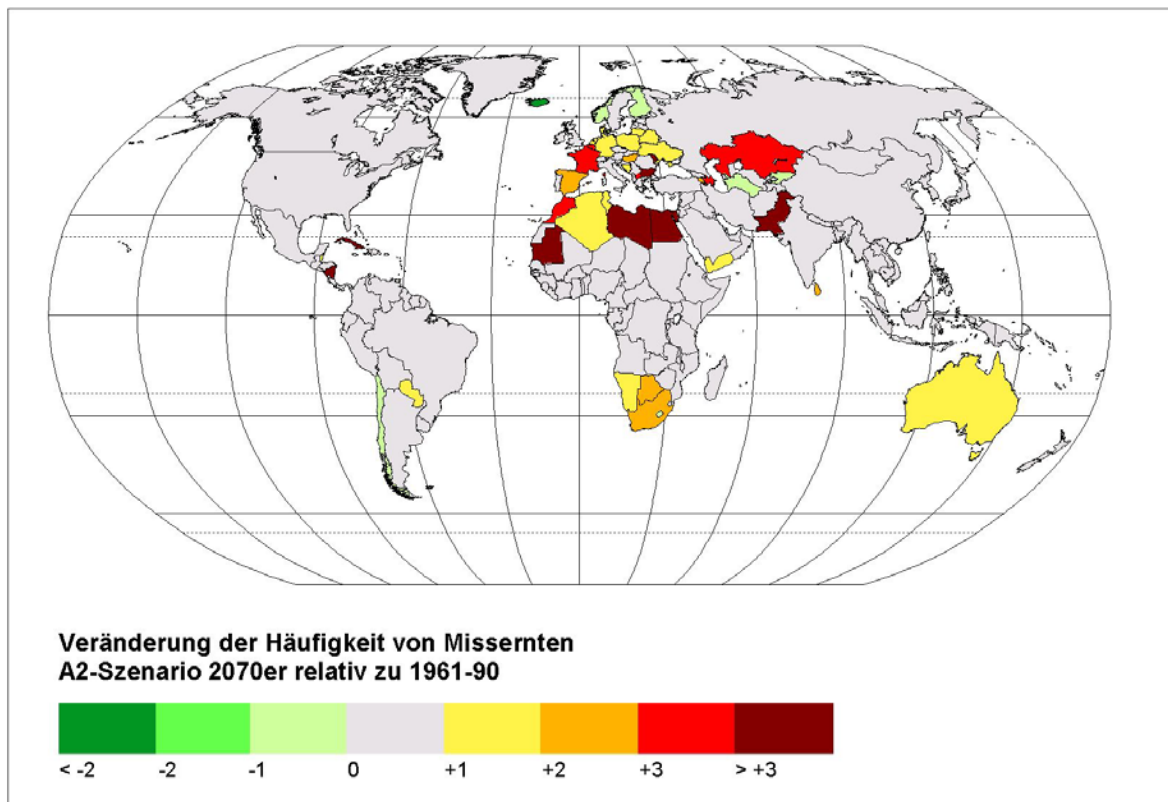


Abbildung 20 Veränderung der Häufigkeit extremer Ernteausfälle unter dem A2-Szenario (2070er Jahre) relativ zur Klimanormalperiode.

B2-Szenario

Die Klimabedingungen des B2-Szenarios führen weltweit in 34 Ländern zu häufigeren Missernten als dies im Zeitraum 1961-90 der Fall war. Dies ist vergleichbar mit der Anzahl der Länder, die auch unter dem A2-Szenario von einer größeren Häufigkeit von Missernten betroffen sind. Die Frage ist nun, ob sich durch die geringeren Treibhausgasemissionen unter dem B2-Szenario trotzdem Unterschiede zum A2-Szenario ergeben.

Für 21 der 38 Länder, die unter dem A2-Szenario von einer Erhöhung der Häufigkeit von Missernten betroffen sind, bleibt die Häufigkeit von extremen Ernteausfällen unter dem B2-Szenario gleich groß oder ist sogar höher als unter dem A2-Szenario. Von einer Verschlechterung sind vor allem Kasachstan, Turkmenistan und Mittelamerika betroffen (vgl. Abbildung 21). Für 17 (=47%) der 38 Länder, die unter dem A2-Szenario von einer Erhöhung der Häufigkeit von extremen Ernteausfällen betroffen sind, findet sich unter dem B2-Szenario eine geringere Häufigkeit der Extrema, d.h. eine Verbesserung im Vergleich zum A2-Szenario. Von den günstigeren Klimabedingungen des B2-Szenarios profitieren besonders die europäischen Länder, aber auch Libyen und Tunesien, wo auch die extremen Trockenperioden unter dem B2-Szenario zurückgehen (siehe Kapitel 4.2.2.2).

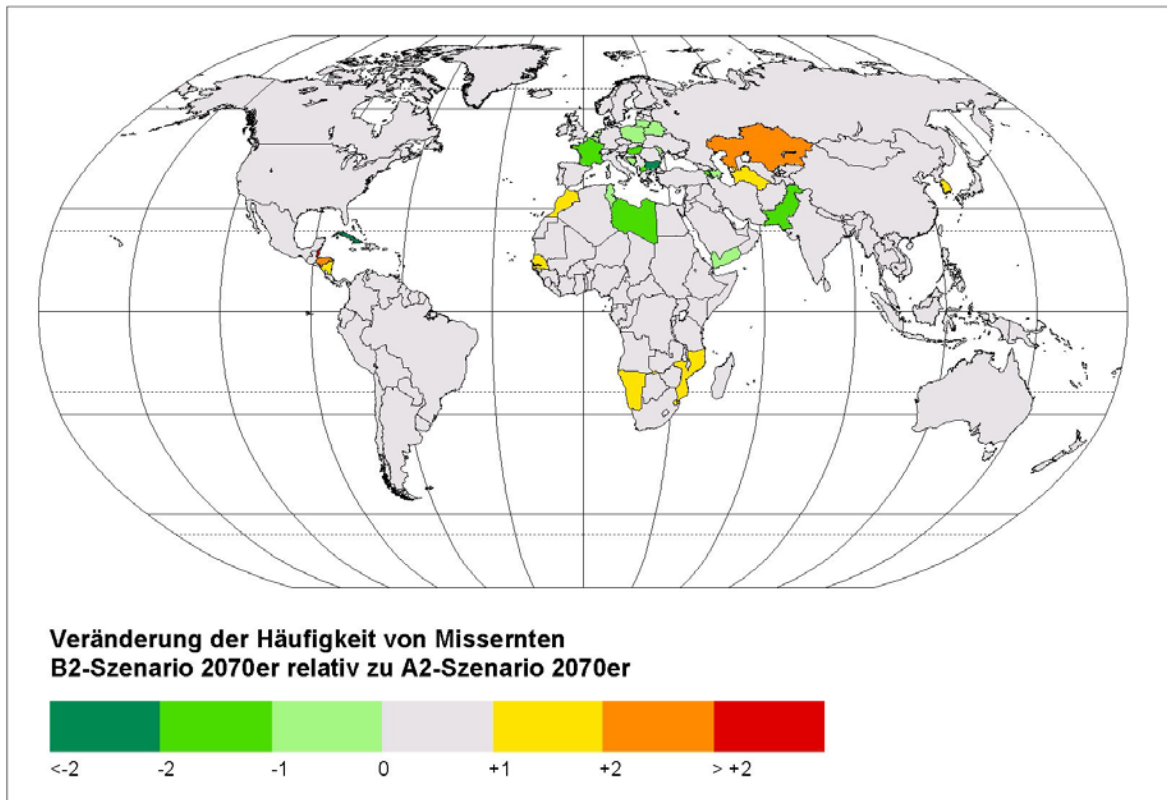


Abbildung 21 Veränderung der langfristigen Häufigkeit extremer Ernteausfälle unter dem B2-Szenario im Vergleich zum A2-Szenario.

4.3.3 Zusammenfassung

Die Ergebnisse dieses Kapitels lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Der globale Rückgang der potentiellen landwirtschaftlichen Produktion ist unter dem A2- und dem B2-Szenario sehr ähnlich. Mittelfristig vermindert sich die Produktivität um 7% unter dem A2- bzw. 6% unter dem B2-Szenario. Auch langfristig liegt die Verminderung unter dem B2-Szenario trotz seiner geringeren Treibhausgasemissionen noch bei -17% (A2-Szenario: -20%)
2. Langfristig sinkt unter dem A2-Szenario in 45% der untersuchten 174 Länder die Produktion um mehr als 10%. Unter dem B2-Szenario könnten langfristig 43% aller Länder von einem Produktionsrückgang von mehr als 10% betroffen sein. Das Auswirkungsniveau ist damit auch auf Länderebene für beide Szenarien sehr ähnlich.
3. Mittelfristig sind in den Nicht-Annex B-Regionen unter dem B2-Szenario stärkere Rückgänge der Produktivität zu erwarten als unter dem A2-Szenario. Durch die geringeren SO₂-Emissionen des B2-Szenarios verursachen die annähernd gleichen Treibhausgasemissionen in der südlichen Hemisphäre einen stärkeren Klimawandel als unter dem A2-Szenario.
4. Langfristig profitieren eher die Annex B-Regionen von den geringeren Treibhausgasemissionen des B2-Szenarios als die Nicht-Annex B-Regionen. Da Agrargebiete

in der nördlichen Hemisphäre häufiger in klimatisch günstigen Gebieten liegen, werden die geringeren klimatischen Veränderungen des B2-Szenarios von den Pflanzen noch ohne große Ertragseinbußen verkraftet. Die Landwirtschaft in den Nicht-Annex B-Regionen reagiert dagegen sehr viel sensitiver auf kleine Veränderungen von Temperatur und Niederschlag, da die Anbaugelände schon heute oft in Gebieten liegen, die klimatisch nicht optimal sind. Die Produktivitätsunterschiede zwischen A2- und B2-Szenario sind daher für die Nicht-Annex B-Regionen eher gering.

5. Eine Anpassung der wichtigsten Feldfrüchte an das zukünftige Klima kann weltweit zu einer Steigerung der potentiellen Produktivität führen. Diese Steigerung fällt in den Nicht-Annex B Ländern stärker aus als in den Annex B Regionen. Allerdings übersteigt der Bevölkerungszuwachs in diesen Regionen immer noch den Produktivitätszuwachs. Ein Erhalt der Vielfalt der angebauten Feldfrüchte bleibt trotzdem eine wichtige Option, damit sich vor allem die Nahrungsproduzenten in den ärmeren Ländern an den Klimawandel anpassen können.
6. Die Häufigkeit von Produktivitätseinbrüchen/Missernten kann sich unter dem A2-Szenario langfristig vor allem bei Ländern im Mittelmeerraum und im Süden des afrikanischen Kontinentes verdoppeln bis verdreifachen. Die geringeren Treibhausgasemissionen des B2-Szenarios führen in etwa der Hälfte der 38 Länder, die unter dem A2-Szenario von einer Erhöhung der Häufigkeit betroffen sind, zu einer geringeren Häufigkeit dieses Phänomens. In der anderen Hälfte der Länder bleibt die Häufigkeit allerdings gleich groß oder steigt sogar an.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

In der vorliegenden Studie werden zwei Aspekte behandelt, die mit fortschreitendem Klimawandel in der Klimapolitik an Wichtigkeit gewinnen werden: Dies ist zum Einen die Frage der Ausgestaltung eines globalen und langfristigen Klimaschutzregimes und zum Anderen das Thema der regionalen Folgen des Klimawandels.

Beide Aspekte, d.h. die Absenkung der Treibhausgasemissionen relativ zu einem Emissionspfad ohne Minderungsmaßnahmen, als auch die Konfrontation mit den Auswirkungen des Klimawandels, können hohe Anforderungen an eine Gesellschaft stellen. Ob diese Anforderungen zu einer Belastung werden, hängt vom Ausmaß der Anforderung auf der einen Seite und von der Anpassungsfähigkeit einer Gesellschaft an eine sich verändernde Situation auf der anderen Seite ab. Diese Studie befasst sich mit der Höhe beider Arten von Anforderung, nämlich sowohl in Bezug auf langfristige Reduktionsmaßnahmen zum Erreichen eines globalen Klimaschutzzieles als auch die Folgen des Klimawandels für Landwirtschaft und Wasserversorgung.

Die gemeinsame Betrachtung von Szenarien für die Verteilung von Emissionsanrechten sowie für die Auswirkungen des Klimawandels gibt einen klaren Hinweis darauf, dass insbesondere Nicht-Annex B-Regionen, die nach dem hier beschriebenen Verteilungsansatz in den kommenden Jahrzehnten Klimaschutzverpflichtungen übernehmen müssten, im Hinblick auf die Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen und zukünftige Klimaauswirkungen eine doppelte Bürde zu tragen haben könnten. Unter den gegebenen Szenarioannahmen wird von ihnen erwartet, dass sie sich sehr bald zu einer Kontrolle ihrer Treibhausgasemissionen verpflichten, da das Durchschnittseinkommen in diesen Ländern eine gewisse Höhe erreicht hat. Betroffen sind vor allem Länder mit einem, innerhalb der Nicht-Annex B-Gruppe, mittel-hohen Einkommen. Zusätzlich zur Einschränkung ihrer Emissionsrechte werden einige dieser Länder unter Umständen schon in den kommenden Dekaden ein beträchtliches Maß an negativen Folgen der veränderten Klimabedingungen zu tragen haben, ohne die Kapazitäten für Anpassungsmaßnahmen zu haben, wie sie den Annex B-Staaten und z.T. auch den reicheren Nicht-Annex B-Staaten zur Verfügung stehen. Wie schon in früheren Studien gezeigt wurde, wird der Anstieg der Treibhausgasemissionen der letzten 30-40 Jahre bereits in den kommenden Jahrzehnten zu erheblichen Änderungen von Temperatur und Niederschlägen führen. Dies sollte berücksichtigt werden, wenn Zeitpunkt und Ausmaß der Einbindung von Nicht-Annex B-Staaten in ein Klimaschutzregime ausgehandelt wird. Da die hier präsentierten Ergebnisse vor allem aufgrund der Unsicherheiten der Klima-, aber auch der anderen Modelle, nur erste Hinweise auf Gefährdungen liefern können, wäre eine weitergehende wichtige Forschungsfrage die nach Art, Umfang und Kosten der notwendigen Anpassungsmaßnahmen an die beschriebenen Klimafolgen und ihre Auswirkungen auf eine nachhaltige Entwicklung in den ärmeren Regionen der Welt.

Allerdings haben die Ergebnisse auch gezeigt, dass ein unkontrollierter Anstieg der Treibhausgasemissionen in den Nicht-Annex B-Regionen dazu führen kann, dass die Anforderungen an Rate und Umfang der Emissionsminderung in den Annex B-Staaten unrealistisch hoch werden, will man sich nicht vom Erreichen einer stabilen Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre verabschieden. Soll in dieser Situation trotzdem noch ein ambitioniertes Klimaschutzziel erreicht werden, so wird die Ausgestaltung der Flexibilitätsmechanismen des Kyoto-Protokolls in Zukunft (bzw. bleibend) eine herausragende Rolle spielen. Allerdings ist bei der Ausgestaltung dieser Mechanismen ein sehr viel stärkerer Fokus auf die mittel- und langfristigen Reduktionserfordernisse wünschenswert und notwendig. Für die langfristige Umsetzung ambitionierter Minderungsziele, wie sie in diesem Bericht beispielhaft präsentiert wurden, ist eine Wende hin zu energieeffizienteren Technologien sowie einer kohlenstoffarmen bzw. -freien Energieproduktion unabdingbar. Die notwendigen Technologien stehen allerdings bisher nur begrenzt und zu relativ hohen Kosten zur Verfügung. Eine (Weiter)entwicklung und Erprobung dieser Technologien muss allerdings in den reichen Industrieländern erfolgen. Erst wenn dies geschehen ist, kann ein Technologietransfer in Richtung Entwicklungsländer erfolgen. Eine entscheidende Frage im Zusammenhang mit der Umsetzung langfristiger Klimaschutzziele und der Ausgestaltung der Flexibilitätsmechanismen ist daher, inwiefern diese Mechanismen in der Lage sind, Anreize zu setzen, für die *kurz- und mittelfristige* Entwicklung sowie *mittel- und langfristige* Verbreitung neuer Technologien.

6. LITERATUR

Adams, R. M., Hurd, B. H., Lenhart, S., Leary, N. (1998): *Effects of global climate change on agriculture: an interpretive review*. Climate Research, 11, 19-30.

Agarwal, A. (2003): *Making the Kyoto Protocol work. Ecological and economic effectiveness, and equity in the climate regime*. Centre for Science and Environment (CSE), New Delhi, India. www.cseindia.org.

Alcamo, J. & Henrichs, T. (2002): *A model-based estimation of world water resources sensitive to global changes*. Aquatic Sciences, 64, 1-11.

Alcamo, J., Henrichs, T., Rösch, T. (2000): *World Water in 2025 – Global modeling and scenario analysis for the World Water Commission on Water for the 21st Century*. Kassel World Water Series 2. Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany. (Als pdf-Datei auch unter www.usf.uni-kassel.de).

Alcamo, J., Kreileman, E. (1996): *Emission scenarios and global climate protection*. Global Environmental Change, 6, 305-334.

Blanchard, O., Criqui, P., Trommetter, M., Viguier, M. (2001): *Equity and efficiency in climate change negotiations: a scenario for world emission entitlements by 2030*. Cahier de recherche N° 26, Institut d'Economie et de Politique de l'Energie, Grenoble, France, www.upmf-grenoble.fr/iepe.

Cosgrove, W. & Rijsberman F. (2000) *World water vision: Making water everybody's business*, Earthscan: London.

Döll, P. Kaspar, F., Lehner, B. (2002): *A global hydrological model for deriving water availability indicators – Journal of Hydrology* (in press).

Döll, P. & Siebert, S. (2001): *Global modeling of irrigation water requirements*. Water Resources Research, 38 (4), 10.1029/2001WR000355.

Elzen, M.G.J. den, M. Berk, Schaeffer, M., Olivier, J., Hendriks, C., Metz, B. (1999). *The Brazilian Proposal and other Options for International Burden Sharing: An Evaluation of Methodological and Policy Aspects using the FAIR Model*. Bilthoven, The Netherlands, RIVM: 1-125.

EM-DAT (2003): The OFDA/CRED International Disaster Database. - www.cred.be/emdat - Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium-

Enting, I. G., Wigley, T. M. L., Heimann, M. (1994): *Future emissions and concentrations of carbon dioxide: Key ocean/atmosphere/land analyses*. CSIRO Division of Atmospheric Research Technical Paper No. 31.

FAOSTAT (1998): FAO Statistical Databases.

Fischer, G., van Velthuisen, H., Shah, M., Nachtergaele, F. (2002): *Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results*. International Institute for Applied Systems Analysis Laxenburg, Austria; Food and Agriculture Organization of the United Nations, Viale delle Terme di Caracalla, Rome, Italy, 1-119.

Höhne, N., Galleguillos, C., Blok, K., Harnisch, J., Phylipsen, D. (2003): *Evolution of commitments under the UNFCCC: Involving newly industrialized economies and developing countries*. Federal Environment Agency, Berlin, Germany, 1-87.

Hulme, M., Jenkins, G.J., Lu, X., Turnpenny, J.R., Mitchell, T.D., Jones, R.G., Lowe, J., Murphy, J.M., Hassell, D., Boorman, P., McDonald, R., Hill, S. (2002): *Climate Change Scenarios for the United Kingdom: The UKCIP02 Scientific Report*. Tyndall Centre for Climate Change Research, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich, UK. 1-120.

IMAGE team (2001): *"The IMAGE 2.2 implementation of the SRES scenarios"*, RIVM CD-ROM Publication 481508018, Bilthoven, The Netherlands, July 2001.

IPCC (2000): *Emission Scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III*. Cambridge University Press.

IPCC (2001): *Climate Change 2001: The Scientific Basis; Technical Summary of the Working Group I Report*. Cambridge University Press.

New, M., Hulme, M., Jones, P.D (2000): *Representing twentieth century space-time climate variability. Part II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate*. J. Climate 13, 2217-2238.

Onigkeit, J. and J. Alcamo (2000). *A different perspective for global climate policy: Combining burden sharing and climate protection*. In: C. Carraro (Ed.): Efficiency and equity of climate change policy. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers: pp. 305-314.

Parry, M., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Fischer, G., Livermore, M.: *Climate change and world food security: a new assessment*. Global Environmental Change, 9, 51-67.

- Pope, V., Gallani, M., Rowntree, P., Stratton, R. (2000): *The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model – HadCM3*. *Climate Dynamics*, 16, 123-146.
- Ramankutty, N. and J.A. Foley (1998): *Characterizing patterns of global land use: an analysis of global croplands data*. *Global Biogeochemical Cycles* 12(4), 667-685
- Raskin, P., Gleick, P., Kirshen, P., Pontius, G. & Strzepek, K. (1997): *Water Futures: Assessment of long-range patterns and problems, Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world*, Stockholm Environment Institute, Box 2142. S-103 14, Stockholm, Sweden.
- Ridgley, M. A. (1996). *Fair sharing of greenhouse gas burdens*. *Energy Policy* 24: 517-529.
- Ringius, L., Torvanger, A., Underdal, A. (2002). *Burden Sharing in International Climate Policy: Principles of Fairness in Theory and Practice*. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics* 2, 1-22.
- Rosa, L. P. & Ribeiro, S. K. (2001). *The present, past, and future contributions to global warming of CO₂ emissions from fuels*. *Climatic Change* 48: 289-308.
- Shiklomanov, I. (2000a): *Appraisal and Assessment of World Water Resources*. *Water International*, 25.1, 11-32.
- Shiklomanov, I. (2000b): *World water resources and water use: Present assessment and outlook for 2025*, in Rijsberman, F.R. (ed.): *World Water Scenarios: Analysing Global Water Resources and Use*, Earth Scan Publications, London.
- Shiklomanov, I. (1997): *Assessment of Water Resources and Water Availability of the World*, Stockholm Environment Institute, Box 2142. S-103 14, Stockholm, Sweden.
- UNFCCC (2002): FCCC/SBSTA/2002/INF.14: Scientific and methodological assessment of contributions to climate change.
- UNFCCC (1997). FCCC/AGBM/1997/Misc.1/Add.3.
- Vaillantcourt, K. & Waub J.-P. (2002): *Equity in international Greenhouse gases abatement scenarios: A multicriterion approach*. 12th MinEuro Conference, Brussels, Belgium, 1-20.

Van Vuuren, D.P. & de Vries, H.J.M. (2001): *Mitigation scenarios in a world oriented at sustainable development: the role of technology, efficiency and timing*. Climate Policy 1, 189-210.

Wigley, T. M. L., Richels, R., Edmonds, J. A. (1996): *Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations*. Nature, 379, 242-245.

WRI (2000) - World Resources Institute: *World Resources 2000-2001: People and Ecosystems*. Elsevier Science, Oxford, UK.

WRI (1998): 1998-99 Database; World Resources Institute, Washington D.C., USA.

Anhang

Tabelle A1 Länder der IMAGE 2.2. Regionen

Region	Länder
Kanada	Kanada
USA	Saint Pierre und Miquelon, USA
Mittelamerika.	Anguilla, Bermuda, El Salvador, Jamaika, Panama, Turks- und Caicosinseln, Antigua und Barbuda, Kaiman Inseln, Grenada, Martinique, Puerto Rico, Virgin-Inseln, British Aruba, Costa Rica, Guadeloupe, Mexiko, Saint Kitts und Nevis, Bahamas, Kuba, Guatemala, Montserrat, St. Lucia, Barbados, Dominica, Haiti, Niederländische Antillen, Saint Vincent und Grenadines, Belize, Dominikanische Republik, Honduras, Nicaragua, Trinidad und Tobago
Südamerika	Argentinien, Brasilien, Ecuador, Guyana, Süd Georgia und Süd Sandwich-Inseln, Venezuela, Bolivien, Chile, Falklandinseln (Malvinas), Paraguay, Surinam, Bouvetinsel, Colombia, Französisch Guyana, Peru, Uruguay
Nordafrika	Algerien, Ägypten, Libyen, Jamahiriya, Marokko, Tunesien, West-Sahara
Westafrika	Benin, Tschad, Gabun, Liberia, Saint Helena, Burkina Faso, Kongo, Gambia, Mali, Sao Tome und Prinzipe, Kamerun, Demokratische Republik Kongo (ehem. Zaire), Ghana, Mauretanien, Senegal, Cape Verde, Elfenbeinküste, Guinea, Niger, Sierra Leone, Zentralafrikanische Republik, Äquatorial Guinea, Guinea-Bissau, Nigeria, Togo
Ostafrika	Burundi, Eritrea, Madagaskar, Reunion, Somalia, Komoren, Äthiopien, Mauritius, Ruanda, Sudan, Djibuti, Kenia, Mayotte, Seychellen, Uganda
Südliches Afrika	Angola, Lesotho, Mocambique, Südafrika, Tansania, Simbabwe, Botswana, Malawi, Namibia, Swaziland, Sambia
OECD Europa	Andorra, Finnland, Vatikan, Luxemburg, Portugal, Schweiz, Österreich, Frankreich, Island, Malta, San Marino, Großbritannien und Nordirland, Belgien, Deutschland, Irland, Monaco, Spanien, Dänemark, Gibraltar, Italien, Niederlande, Svalbard und Jan Mayen, Färöer Inseln, Griechenland, Liechtenstein, Norwegen, Schweden
Osteuropa	Albanien, Bulgarien, Tschechische Republik, Mazedonien, Rumänien, Slowenien, Bosnien und Herzegowina, Kroatien, Ungarn, Polen, Slowakien, Serbien und Montenegro
Ehem. UDSSR	Armenien, Estland, Kirgisistan, Moldawien, Turkmenistan, Aserbaidschan, Georgien, Lettland, Russland, Ukraine, Belarus, Kasachstan, Litauen, Tadschikistan, Usbekistan
Mittlerer Osten	Bahrain, Irak, Kuwait, Katar, Türkei, Zypern, Israel, Libanon, Saudi Arabien, Vereinigte Arabische Emirate, Iran, Jordanien, Oman, Syrien, Jemen
Südasien	Afghanistan, Bhutan, Indien, Nepal, Sri Lanka, Bangladesch, British Indian Ocean Territory, Malediven, Pakistan
Ostasien	China, Südkorea, Macau, Taiwan, Hong Kong, Nordkorea, Mongolei
Südostasien	Brunei, Darussalam, Ost-Timor, Laos, Myanmar, Singapur, Vietnam, Kambodscha, Indonesien, Malaysia, Philippinen, Thailand
Ozeanien	Samoa-Inseln, Fidschi-Inseln, Kiribati, Neuseeland, Papua Neu Guinea, Tonga, Australien, Französisch Polynesien, Marshallinseln, Niue, Pitcairn, Tuvalu, Weihnachts-Insel, French Southern Territories, Mikronesien, Norfolkinseln, Samoa, Vanuatu, Cocos (Keeling)-Inseln, Guam, Nauru, Nord-Marianen-Inseln, Salomoninseln, Wallis und Futuna, Cookinseln, Heardinsel und McDonald-Inseln, Neu Kaledonien, Palau, Tokelau
Japan	Japan