

2.8 Klimawandel und Verschiebung der Vegetationszonen

DIETER GERTEN

Klimawandel und Verschiebung der Vegetationszonen - Simulationen mit dem Biosphärenmodell LPJ zeigen bis zum Ende dieses Jahrhunderts großräumige Veränderungen der Zusammensetzung und räumlichen Verteilung der Landvegetation als Folge des Klimawandel (Modell ECHAM5, Emissionsszenario SRES B1). Während sich gemäß der Simulation die Vegetation der Tundra und die Baumgrenze polwärts verlagern, könnten weiter südlich, im inneren Asien, die vorherrschenden borealen Nadelwälder durch Laubwälder oder gar Grasländer ersetzt werden. Auch für einige subtropische Gegenden wird ein Rückgang von Waldbeständen simuliert, während das Wachstum der Vegetation in Trockengebieten vom direkten CO₂-Effekt profitiert. Einen großräumigen Zusammenbruch immerfeuchter tropischer Regenwälder zeigen die Simulationen indes nicht. Diese makroskopischen Veränderungen (hier nicht gesondert bilanzierte) implizieren verschiedenste Änderungen auf Artenebene. Ferner beeinflussen anthropogene Landnutzungsänderungen die Ökosystemeigenschaften in ähnlichem oder gar stärkerem Ausmaß als die Klimaänderungen.

Climate change and shifts in global vegetation distribution: Major shifts in future global vegetation distribution are simulated by the LPJ ecosphere model forced by the ECHAM5 climate scenario under the SRES B1 emission scenario. While arctic tundra and the boreal tree line will migrate polewards, the southern belt of the boreal conifer forests may see replacements by deciduous forest or grassland. Woody vegetation is simulated to decline in some subtropical regions, while at the same time dryland vegetation appears to benefit from increased water use efficiency due to direct effects of elevated CO₂. No dramatic changes are found for the humid tropics. These macroscopic shifts imply distinct changes at the species level. As human land cover and land use change influences vegetation distribution to a degree at least as strong as does climate change, humanity faces the need to mitigate the joint impacts of these dual pressures on the world's ecosystems in order to secure planetary health.

Vegetation und Klima

Die Pflanzendecke der Erde ist hinsichtlich Zusammensetzung, räumlicher Verbreitung, Wachstum und Struktur abhängig vom Umgebungsklima und den dadurch geprägten Eigenschaften des Bodens. Die bestimmenden Einflussgrößen wie Temperatur, Niederschlag (bzw. Bodenfeuchte) und Strahlungsangebot variieren in Raum und Zeit, so dass sich auch die Vegetation an das vorherrschende Klima anpasst. So wie sich die großräumige Zusammensetzung und Verteilung der Vegetation im Zuge früherer klimatischer Umbrüche immer wieder geändert hat, sind auch unter dem derzeitigen globalen Klimawandel nennenswerte Veränderungen der weltweiten Vegetationsverbreitung und der daran gekoppelten Ökosystemprozesse zu erwarten. Neben den Folgen einer generellen Erwärmung und des Anstiegs der direkt auf die Vegetation wirkenden atmosphärischen CO₂-Konzentration sind regional unterschiedliche Niederschlagsänderungen von besonderer Bedeutung. Dabei werden die verschiedenen Ökosysteme gemäß ihrer jeweiligen Standortansprüche in unterschiedlicher Weise auf die klimatischen Änderungen reagieren.

Im Zuge des globalen Klimawandels sind auf der Ebene der großräumigen Vegetationszonen bzw. Ökozonen oder Biome (ökologisch einheitlichen Regionen mit ähnlicher Flora und Fauna) einschneidende Verän-

derungen denkbar, die ihrerseits auf das globale Klima selbst zurückwirken. Dies macht es erforderlich, Vegetationsänderungen in einem globalen Kontext zu analysieren und zu bewerten, nicht zuletzt wegen des vielfältigen direkten und indirekten Nutzens der Biosphäre bis hin zur ästhetischen Dimension. In diesem Kapitel werden unter einem bestimmten Emissions- und Klimaszenario modellierte Verschiebungen der Vegetation der Erde präsentiert und in Zusammenhang mit den bereits in der Vergangenheit in großem Stil erfolgten menschlichen Landnutzungsänderungen diskutiert.

Simulierte Verschiebungen der Vegetationszonen

Die Gesamtwirkung der sich über die Zeit ändernden Klimabedingungen auf die Vegetation lässt sich mit komplexen Simulationsmodellen, speziell den sogenannten Dynamischen Globalen Vegetationsmodellen (DGVMs) abschätzen (PRENTICE et al. 2006). Ausgehend von prozessbasierten Formulierungen fundamentaler ökologischer, biogeochemischer und hydrologischer Prinzipien modellieren DGVMs unter vorgegebenen Klima-, CO₂- und Bodenverhältnissen das Wachstum und die räumliche Verbreitung verschiedener funktionaler Vegetationstypen (»plant functional types«, PFTs) sowie die mit ihren ökologischen Funktionen verbundenen Kohlenstoff- und Wasserflüsse. Die

PFTs entsprechen im Wesentlichen der für die jeweilige Klimazone typischen Vegetation. Da sie aber in ihrer Dynamik unter Einbezug von Ökosystemeigenschaften und -prozessen modelliert werden, können sie weitergehend als Ökozonen interpretiert werden. Die PFTs repräsentieren die potenziell natürliche Vegetation, also jene Vegetation, die sich unter heutigen – oder sich über die Zeit z.B. durch Klimawandel dauerhaft ändernden – Standortbedingungen ohne menschlichen Einfluss einstellen würde. Das am besten validierte DGVM LPJ (SITCH et al. 2003; GERTEN et al. 2004) berechnet die PFT-Verteilung und die gekoppelten Ökosystemprozesse auf einem globalen 0.5° -Raster, wobei an einem Standort mehrere der neun berücksichtigten PFTs (siehe Tab. 2.8-1) unter Beachtung von Konkurrenzbeziehungen koexistieren können.

Für die vorliegende Studie wurde das LPJ-DGVM mit den sich aus dem IPCC-SRES-Emissionsszenario B1 für den Zeitraum bis 2100 ergebenden klimatischen Rahmenbedingungen des ECHAM5-Klimamodells einschließlich der zugehörigen atmosphärischen CO_2 -Konzentration angetrieben. Dieses Szenario repräsentiert eine Erhöhung des CO_2 -Gehalts von derzeit etwa 400 ppm im Jahr 2014 auf 550 ppm im Jahr 2100 bzw. einen im Vergleich zu anderen Emissionsszenarien moderaten globalen Temperaturanstieg von 2.9 K über Land. Unter anderen, teilweise noch drastischeren Klimaszenarien wurden qualitativ vergleichbare, wenn auch hinsichtlich Intensität und räumlicher Ausbreitung stärkere Änderungen gefunden, die hier nicht näher dis-

kutiert werden (siehe dazu LUCHT et al. 2006; SCHOLZE et al. 2006; OSTBERG et al. 2013).

Abb. 2.8-1 zeigt summarisch die simulierten Veränderungen in der Verbreitung der Vegetationszonen, aggregiert nach den in Tab. 2.8-1 bezeichneten PFTs. In den hohen nördlichen Breiten wandert die boreale Waldgrenze polwärts, hauptsächlich wegen der in diesen Regionen besonders deutlich (um etwa 4–7 Grad bis Ende des Jahrhunderts) ansteigenden Temperaturen und der damit einher gehenden verlängerten Wachstumsperiode, die im Zusammenspiel mit erhöhten Niederschlägen und erhöhter CO_2 -Konzentration zu gesteigerter Biomasseproduktion führen (SCHAPHOFF et al. 2006). In Gebieten jenseits der Waldgrenze, besonders im nördlichen Kanada, breitet sich gemäß der Simulation auch die Tundra in bisher unbesiedelte Gebiete aus. Diese Entwicklungen – die auch für die meisten Hochgebirgslagen projiziert werden – spiegeln den Befund wieder, dass pro Grad Temperaturerhöhung die Ökozonen hypothetisch um nahezu 200 km polwärts bzw. in die Höhe wandern. Im Gegensatz zum zunehmenden Waldanteil am nördlichen Rand der borealen Zone deutet sich für die zentrale und südliche boreale Zone an, dass die derzeit dominanten Nadelwälder streckenweise zugunsten von Laubwald zurückgedrängt werden. Dies lässt sich mit einer unter den höheren Temperaturen und ggf. geringeren Niederschlägen zumindest saisonal zunehmenden Wasserlimitierung begründen, an die die laubabwerfenden Baumarten besser angepasst zu sein scheinen (GERTEN et al. 2005). Daneben wird für

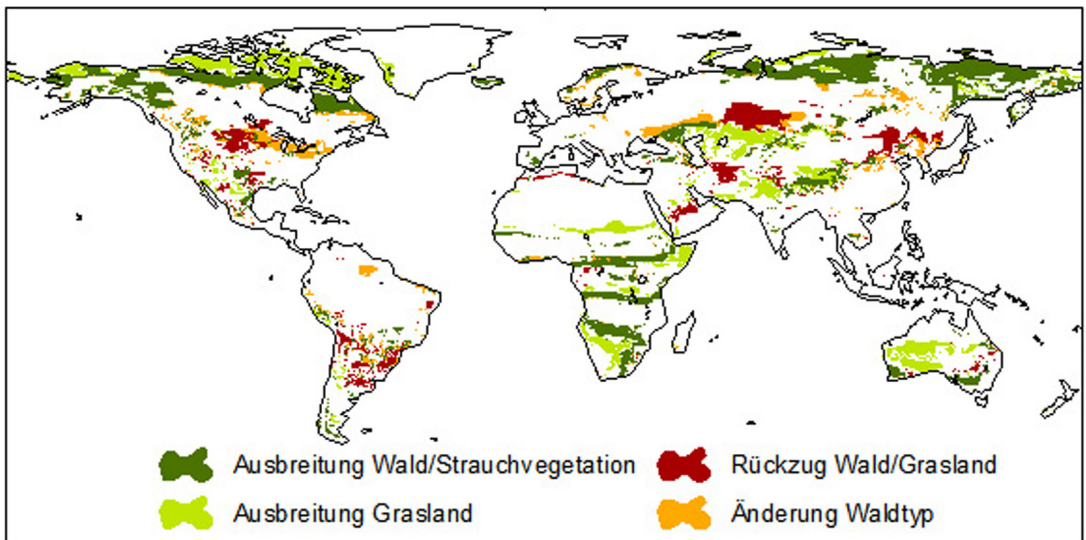


Abb. 2.8-1: LPJ-simulierte Verschiebungen von Vegetationszonen bis 2071–2100 unter dem ECHAM5-B1-Szenario. Gezeigt sind nur Flächenänderungen von mehr als 20% gegenüber dem mittleren Zustand im Zeitraum 1971–2000 (Details in FISCHLIN et al. 2007).

den südlichen Rand der borealen Zone ein Rückgang der Waldbestände bzw. eine Ausbreitung der Steppe simuliert, vor allem aufgrund des höheren Risikos sommerlichen Hitzestresses und der weiterhin sehr kalten Winter, derentwegen sich dort keine für die gemäßigten Breiten typischen Wälder etablieren können (SCHOLZE et al. 2006). In den gemäßigten und subtropischen Breiten zeigt sich ein uneinheitliches Bild der Vegetationsverschiebungen: Auf der Biom-Ebene werden vergleichsweise geringe Änderungen für die nemoralen und kontinentalen Zonen (mit gemäßigtem und arid-gemäßigtem Klima) simuliert, wenngleich auf der Ebene einzelner Arten deutliche Veränderungen wahrscheinlich sind (siehe unten). Für die warm-temperierten und mediterranen Zonen wird hingegen eine gebietsweise Abnahme der vorherrschenden Hartlaubwälder (v.a. in einigen Trockenregionen Nordafrikas und Vorderasiens) aufgrund erhöhter Dürrehäufigkeit projiziert. Insbesondere in den Wüstenrandgebieten des südlichen Afrika, Zentralasiens und Australiens zeigt sich weiterhin das Phänomen sich ausbreitender Gras- und Strauchvegetation, eine Folge der erhöhten CO₂-Konzentration und der damit verbundenen verbesserten Wassernutzungseffizienz der Pflanzen. Für die inneren Tropen werden keine starken PFT-Verschiebungen simuliert, wenn sich auch für das östliche Amazonasgebiet ein leichter Rückgang des vorherrschenden immergrünen Regenwaldes andeutet als Folge verminderter Niederschläge und damit verringerter Vegetationsproduktivität und erhöhter Feueraktivität. Einen Kollaps des immergrünen Regenwaldes, der nach früheren Modellstudien und bei stärker ausgeprägten Klimaänderungen als möglich erscheint (vgl. FISCHLIN et al. 2007), zeigt die aktuelle LPJ-Simulation indes nicht. Ob es zu dessen Ausprägung kommt, hängt nicht nur von der Klimaänderung

an sich, sondern vor allem von der mildernden Wirkung der CO₂-Effekte ab (RAMMIG et al. 2010).

Bereits auf der hier untersuchten Ebene der hoch aggregierten PFTs bzw. Ökozonen sind also auf allen Kontinenten signifikante Veränderungen zu erwarten, je nachdem, in welcher Weise sich das regionale Klima ändert und wie sensibel die Ökosysteme darauf reagieren.

Was implizieren diese Veränderungen noch?

Die großräumigen Vegetationsänderungen bedeuten unzählige subtilere Umbrüche auf kleineren räumlichen Skalen bzw. auf der Ebene einzelner Arten und Assoziationen. Diese werden zwar in den DGVMs durch die Aggregation in PFTs und durch die Darstellung wesentlicher ökosystemischer Zusammenhänge berücksichtigt, können aber nicht im Einzelnen dargestellt werden, obwohl sie sich auch schon bei geringeren Klimaänderungen als den hier zugrunde gelegten einstellen bzw. in vielen Ökosystemen im Zuge der aktuellen globalen Erwärmung bereits eingetreten sind. So bedeuten beispielsweise nicht erst der Kollaps ausgedehnter Ökosysteme wie der Zusammenbruch oder die Ausdehnung ganzer Waldregionen, sondern bereits eine graduelle Änderung des dominanten Waldtyps sowohl eine fundamentale Verschiebung der Artenzusammensetzung des Baumbestandes als auch eine Änderung des gesamten Wirkungsgefüges innerhalb des betroffenen Waldökosystems und auch innerhalb der damit in Wechselwirkung stehenden angrenzenden terrestrischen und aquatischen Ökosysteme. Dies schließt einerseits Änderungen in der Verbreitung, Zusammensetzung und saisonalen Phänologie weiterer Pflanzen- und auch Tierarten ein, deren jeweilige Reaktionen

Tab. 2.8-1: Im LPJ-Modell berücksichtigte Vegetationstypen und deren wichtigste bioklimatische Parameter (*T_{min}* = Mitteltemperatur des kältesten Monats eines Jahres, bei deren Unterschreitung Mortalität eintritt; *T_{max}* = Mitteltemperatur des wärmsten Monats eines Jahres, bei deren Überschreitung der Vegetationstyp sich nicht etablieren kann; *GDD* = minimale Summe aller Tageswerte >5 °C, die zur Etablierung erforderlich ist). Bei allen Parametern werden 20-jährige Mittelwerte verwendet.

Funktionaler Vegetationstyp (PFT)	<i>T_{min}</i>	<i>T_{max}</i>	<i>GDD</i>
Immergrüner tropischer Regenwald	15.5	–	–
Regengrüner tropischer Regenwald	15.5	–	–
Immergrüner Nadelwald der gemäßigten Breiten	-2.0	22.0	900
Immergrüner Laubwald der gemäßigten Breiten	3.0	18.8	1200
Sommergrüner Laubwald der gemäßigten Breiten	-17.0	15.5	1200
Immergrüner borealer Nadelwald	-32.5	-2.0	600
Sommergrüner borealer Laubwald	–	-2.0	350
Grasland der gemäßigten Breiten (C3)	–	15.5	–
Tropisches Grasland (C4)	15.5	–	–

auf die veränderten klimatischen Bedingungen gemäß ihrer spezifischen thermischen und hygri-schen Toleranzbereiche eigenen Regeln folgen, und andererseits Änderungen der vielfältigen Funktionen, die die terrestrischen und aquatischen Ökosysteme im Erdsystem erfüllen: Hier wären vor allem die kulturellen Funktionen von Ökosystemen und ihre für den Menschen nutzbaren Güter (z.B. Nutzholz) zu nennen, aber auch die Regulierung der lokalen und schließlich globalen Kohlenstoff- und Wasserkreisläufe.

Die letzteren, natürlichen Prozesse werden in ihren Zusammenhängen mit der Vegetation in DGVMs wie LPJ simuliert, so dass ihre Veränderungen quantifizierbar sind. So wurde für verschiedene Klimaszenarien gezeigt, dass die beschriebenen Verschiebungen der Vegetationszonen mit zum Teil drastischen Änderungen der Kohlenstoffflüsse und -speicher einhergehen werden (SCHAPHOFF et al. 2006). Dies resultiert darin, dass sich die bisherige Rolle der terrestrischen Biosphäre als CO₂-Senke nach der Jahrhundertmitte insbesondere in der borealen Zone wegen temperaturbedingt verstärkter mikrobieller Aktivität im Boden und damit vermehrter CO₂-Freisetzung zu einer Nettoquelle umkehren dürfte, was den globalen Erwärmungstrend weiter beschleunigen würde. Zu dieser Freisetzung von Bodenkohlenstoff trägt vor allem das Auftauen der Permafrostböden bei; sie wird allenfalls über einen Zeitraum von ein paar Jahrzehnten noch durch die aufgrund der Erwärmung erhöhte Vegetationsproduktivität aufge-wogen wird (SCHAPHOFF et al. 2013). Weitere positive Rückkopplungen zum Klimasystem durch großräumige Vegetationsverschiebungen bzw. die damit verbundenen Änderungen des gekoppelten Kohlenstoff- und Wasserkreislaufs und der Strahlungseigenschaften der Landoberfläche (Albedo) haben sich in verschiedenen Simulationen gezeigt (siehe z.B. BETTS 2007). Dabei erweist sich zunehmend, dass die Verfügbarkeit bzw. Limitierung von Wasser – sei dies direkt durch das Niederschlagsangebot oder indirekt durch Temperatur- oder CO₂-Einflüsse auf den Bodenwasserhaushalt und die Verdunstungsleistung – der wahrscheinlich bedeutendste Faktor (GERTEN et al. 2005).

Mögliche Einschränkungen

Die vorliegenden Simulationsergebnisse sind mit einer gewissen Vorsicht zu interpretieren, da die derzeitige Generation der DGVMs trotz ihrer erreichten Prozessgenauigkeit und ihrer im Wesentlichen erfolgreichen Validierung einige Prozesse und Interaktionen noch unzureichend abbilden. Dies ist dadurch bedingt, dass immer noch schlüssige Theorien darüber fehlen, ob und wie kleinräumige Beobachtungen auf große Gebiete übertragen werden können, und weil einige Dynamiken,

speziell abrupte und/oder irreversible Übergänge in metastabilen Systemen, generell noch wenig verstanden sind. Neben der definitionsgemäßen Beschränkung der DGVMs auf wenige PFTs und der Problematik der für globale Betrachtungen notwendigerweise recht groben räumlichen Auflösung stellt sich die Frage, ob die simulierten Veränderungen regional hinsichtlich ihrer Geschwindigkeit und damit der gegenseitigen Konkurrenz und Sukzessionsfolge der berücksichtigten PFTs überschätzt werden. Mögliche Einschränkungen der Dispersion von Vegetation bzw. der Neubesiedlung von Arealen durch natürliche Barrieren in fragmentierten Landschaften sind bislang ebenso wenig berücksichtigt wie Einflüsse höherer trophischer Ebenen (Fraß durch Tiere einschließlich Befall mit Schadinsekten) und Krankheiten (PRENTICE et al. 2006). So liegt die derzeitige Ausbreitungsgeschwindigkeit der meisten verholzenden Pflanzen bei <100 km pro Jahrhundert. Sie kann also allenfalls artspezifisch Schritt halten mit der zum Ende dieses Jahrhunderts projizierten Verschiebung der Temperaturzonen um einige hundert km. Weiterhin mag das Ausmaß der direkten Effekte des erhöhten atmosphärischen CO₂-Gehalts, insbesondere die gesteigerte Primärproduktion bzw. räumliche Ausdehnung von Vegetation in Trockengebieten, etwas überschätzt werden, unter anderem wegen der in DGVMs bisher oft nicht dezidiert berücksichtigten Stickstofflimitationen. Feuerereignissen wird im LPJ-DGVM Rechnung getragen, aber andere Störungen wie Windwurf – die ebenso wie Feuer weniger durch Veränderungen im mittleren Klima als durch schwer vorhersagbare Veränderungen der Häufigkeit, Intensität und Frequenz von meteorologischen Extremereignissen hervorgerufen werden und die Vegetationszusammensetzung stark beeinflussen – sind noch weitgehend unberücksichtigt.

Trotz solcher noch bestehender Unsicherheiten sind Projektionen mit DGVMs und auch anderen (z.B. statistischen) Ansätzen unter verschiedenen Klimaszenarien angesichts der voraussehbaren, bioklimatischen Prinzipien folgenden, Umbrüche unerlässlich. Ihnen wurde jüngst in einem konzertierten DGVM-Modellvergleich Rechnung getragen (FRIEND et al. 2014, WARSZAWKI et al. 2013).

Die beträchtliche Rolle anthropogener Vegetationsänderungen

Die dargestellten Vegetationsänderungen beziehen sich ausdrücklich auf die potenziell natürliche Vegetation, die jedoch in vielen Regionen der Erde aufgrund der sich seit Jahrhunderten vollziehenden massiven Umstrukturierung der Naturlandschaft durch den Menschen nicht mehr vorherrscht. Global steht derzeit

bereits mehr als ein Drittel der eisfreien Landflächen unter menschlicher Nutzung, etwa in Form von (teilweise bewässertem) Acker- und Weideland, Forsten oder Siedlungen. Für die betroffenen Gebiete – v.a. weite Teile Europas, West- und Südasiens und der USA sowie kleinere Areale in Afrika und Australien – können aber die hier gezeigten klimatisch bedingten Vegetationsänderungen als Indiz dafür gewertet werden, wo die jetzigen Kulturpflanzen an die sich verändernden Klimabedingungen angepasst werden müssen.

Wie mit einem um den landwirtschaftlichen Sektor erweiterten LPJ-Modell gezeigt wurde (BONDEAU et al. 2007, GERTEN et al. 2008), beeinflussen die in ihrem Ausmaß stetig zunehmenden anthropogenen Landnutzungs- und Landbedeckungsänderungen, insbesondere Waldrodungen, selber den natürlichen Kohlenstoff- und Wasserkreislauf. Weiterhin muss man sich vergegenwärtigen, dass die Landnutzung die Ökosysteme in den vergangenen Jahrhunderten zumindest gebietsweise in weitaus stärkerem Maße geformt hat als dies klimatische Änderungen alleine vermocht hätten. Besonders in Afrika, Südamerika und Südostasien werden auch in Zukunft Landnutzungsänderungen die Hauptantriebskraft etwa des zu erwartenden globalen Rückgangs der Biodiversität terrestrischer Ökosysteme sein. Nur in wenig von direktem menschlichem Eingriff betroffenen Gebieten bzw. in Regionen mit besonders ausgeprägten klimatischen Änderungen (etwa in der arktischen Tundra und in einigen Savannengebieten) wird aus jetziger Sicht die erwartete Klimaänderung einen stärkeren Einfluss als Landnutzungsänderungen auf die Biodiversität und andere Ökosystem-Charakteristika haben (FISCHLIN et al. 2007). Oft aber werden Klimawandel, Maßnahmen zu dessen Eindämmung, Landnutzung und weitere Faktoren wie Wasserverfügbarkeit auf komplexe Weise zusammenwirken – ein Beispiel wäre der in einigen Gebieten entstehende zusätzliche Druck auf die für andere Nutzungen beanspruchten Flächen und Wasserressourcen durch im Rahmen von alternativen Energie- und Klimaschutzstrategien gepflanzte Plantagen zur Bioenergieerzeugung.

Auf dem Weg zu einer gesunden Biosphäre

Längerfristige Änderungen in der Struktur und Verbreitung von Ökosystemen werden, wie gezeigt, nicht allein durch natürliche oder anthropogene klimatische Variationen herbeigeführt, sondern auch und vor allem durch das Handeln der Menschheit selbst, die sich ihre natürliche Umgebung durch (oft gegen die natürliche Ökosystemdynamik gerichtete) Umwidmung von Flächen selbst gestaltet. Immer wieder stellen sich dabei Fragen der Art, anhand welcher (nicht nur monetärer)

Kriterien die Veränderungen des Naturraums zu bewerten sind und welchen Gesamteindruck bzw. welche Gesamtfunktion die Kultur- und Naturlandschaften der Erde letztlich haben sollen, d. h., auf welche Weise sie unter Nachhaltigkeitsprinzipien hin zu den Menschen wichtigen Zuständen zu entwickeln sind (vgl. KÜSTER 2005). Dies sind grundsätzliche kulturelle Fragestellungen, die im Zeitalter des »Anthropozän« (CRUTZEN) eine – meines Erachtens noch zu wenig wahrgenommene – globale Dimension erreicht haben vor dem Hintergrund, dass viele (ggf. konfliktreiche) Entscheidungen über regionale Land- und auch Wassernutzungsmuster vor allem über die Handelsströme der geernteten Produkte in einen globalen Wirkungszusammenhang integriert sind, der nicht zuletzt vom Konsumverhalten der menschlichen Gesellschaften gelenkt wird.

Im Sinne einer »planetaren Gesundheit« tragen wir als Menschen eine noch weit über die Vermeidung gefährlichen Klimawandels hinaus reichende langfristige Verantwortung für die gesamte Erde, deren Erfüllung einen reflexiven Gesellschaftsprozess sowie eine Revision unseres Naturverständnisses voraussetzt, welche unserer elementaren Abhängigkeit von der Biosphäre und damit unserer Bestimmung zu deren Bewahrung Rechnung tragen muss.

Literatur

- BETTS, R. (2007): Implications of land ecosystem-atmosphere interactions for strategies for climate change adaptation and mitigation. *Tellus* 59B, 602-615.
- BONDEAU, A., P. SMITH, S. ZAEHLE, S. SCHAPHOFF, W. LUCHT, W. CRAMER, D. GERTEN, H. LOTZE-CAMPEN, C. MÜLLER, M. REICHSTEIN & B. SMITH (2007): Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biol.* 13, 679-706.
- FISCHLIN, A., G. F. MIDDLEY, J. T. PRICE, R. LEEMANS, B. GOPAL, C. TURLEY, M. D. A. ROUNSEVELL, O. P. DUBE, J. TARAZONA & A. A. VELICHKO (2007): Ecosystems, their properties, goods, and services. In: PARRY, M. L., O. F. CANZIANI, J. P. PALUTIKOF, P. J. VAN DER LINDEN & C. E. HANSON (HRSG.). *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, 211-272.
- FRIEND, A. & 22 Koautoren (2014): Carbon residence time dominates uncertainty in terrestrial vegetation responses to future climate and atmospheric CO₂. *PNAS* 111, 3280-3285.
- GERTEN, D., S. SCHAPHOFF, U. HABERLANDT, W. LUCHT & S. SITCH (2004): Terrestrial vegetation and water balance: hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. *J. Hydrol.* 286, 249-270.
- GERTEN, D., W. LUCHT, S. SCHAPHOFF, W. CRAM-

- ER, T. HICKLER & W. WAGNER (2005): Hydrologic resilience of the terrestrial biosphere. *Geophys. Res. Lett.* 32, L21408, doi: 10.1029/2005GL024247.
- GERTEN, D., S. ROST, W. VON BLOH & W. LUCHT (2008): Causes of change in 20th century global river discharge. *Geophysical Research Letters* 35, L20405.
- KÜSTER, H. (2005): *Das ist Ökologie*. C.H. Beck, München. 208 pp.
- LUCHT, W., S. SCHAPHOFF, T. ERBRECHT, U. HEYDER & W. CRAMER (2006): Terrestrial vegetation redistribution and carbon balance under climate change. *Carbon Balance and Management* 1, 6.
- OSTBERG, S., W. LUCHT, S. SCHAPHOFF & D. GERTEN (2013): Critical impacts of global warming on land ecosystems. *Earth System Dynamics* 4, 347–357.
- PRENTICE, I.C., A. BONDEAU, W. CRAMER, S. P. HARRISON, T. HICKLER, W. LUCHT, S. SITCH, B. SMITH & M. T. SYKES (2006): Dynamic global vegetation modeling: Quantifying terrestrial ecosystem responses to large-scale environmental change. In: CANADELL, J. D., E. PATAKI & L. F. PITELKA (Hrsg.). *Terrestrial ecosystems in a changing world*. The IGBP Series, Springer, Berlin, 175-192.
- RAMMIG, A., T.E. JUPP, K. THONICKE, B. TIETJEN, J. HEINKE, S. OSTBERG, W. LUCHT, W. CRAMER & P.M. COX (2010): Estimating the risk of Amazonian forest dieback. *New Phytologist* 187, 694–706
- SCHAPHOFF, S., W. LUCHT, D. GERTEN, S. SITCH, W. CRAMER & I. C. PRENTICE (2006): Terrestrial biosphere carbon storage under alternative climate projections. *Clim. Change* 74, 97-122.
- SCHAPHOFF, S., U. HEYDER, S. OSTBERG, D. GERTEN, J. HEINKE & W. LUCHT (2013): Contribution of permafrost soils to the global carbon budget. *Environmental Research Letters* 8, 014026.
- SCHOLZE, M., W. KNORR, N. W. ARNELL, I. C. PRENTICE (2006): A climate-change risk analysis for world ecosystems. *PNAS* 103, 13116-13120.
- SITCH, S., B. SMITH, I. C. PRENTICE, A. ARNETH, A. BONDEAU, W. CRAMER, J. O. KAPLAN, S. LEVIS, W. LUCHT, M. T. SYKES, K. THONICKE & S. VENEVSKY (2003): Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ Dynamic Global Vegetation Model, *Global Change Biol.* 9, 161-185.
- WARSZAWSKI, L. & 23 Koautoren (2013): A multi-model analysis of risk of ecosystem shifts under climate change. *Environmental Research Letters* 8, 044018.

PD Dr. Dieter Gerten

Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK)

gerten@pik-potsdam.de

Gerten, D. (2014): Klimawandel und Verschiebung der Vegetationszonen. In: Lozán, J. L., Grassl, H., Karbe, L. & G. Jendritzky (Hrsg.). Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. 2. Auflage. Elektron. Veröffentl. (Kap. 2.8) - www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de.