

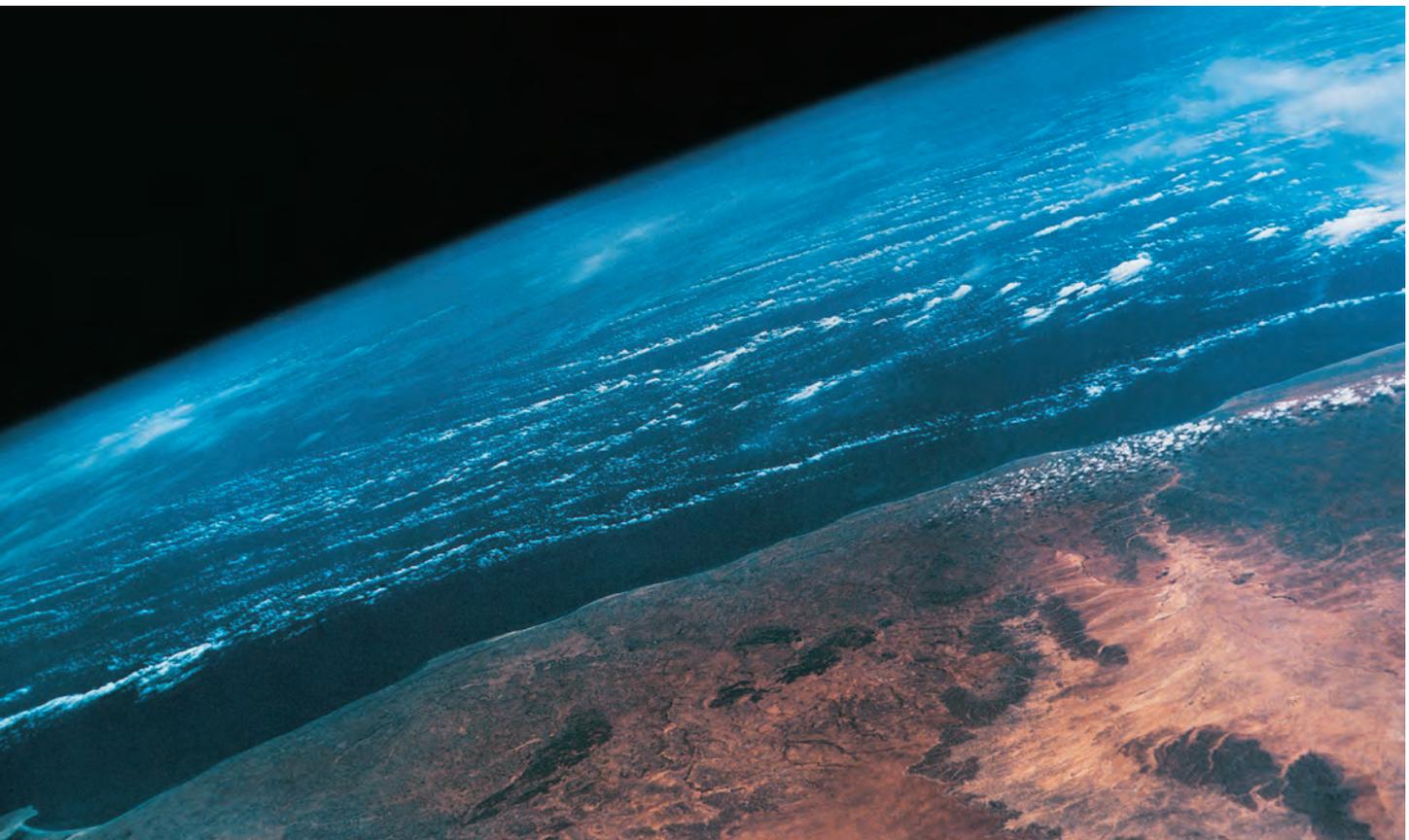
# Klimaänderung im System Erde: Minderung oder Anpassung?

Reinhard F. Hüttl, Oliver Bens, Bernd Uwe Schneider  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Since the onset of rapid modern industrialization some 140 years ago, the mean global temperature has risen by 0.8 °C. This shift to warmer temperatures is not only a result of natural factors but is also caused by anthropogenic influence mainly due to intensified land use and the combustion of fossil fuels leading to higher greenhouse gas emissions. In order to preserve an environment worth living in, both for current and future generations, it is undoubtedly of crucial importance to develop and apply strategies for the reduction of greenhouse gas emissions into the atmosphere. This mitigation concept, as it seems, is a general consensus in the current climate debate.*

*However, viewing climate as a simple system with sharply defined initial and boundary conditions which can be stabilized or even restored to a definite state by merely controlling man-driven factors is not sufficient. This approach has, actually, led to a standstill in the climate negotiations as was demonstrated again at COP17 in Durban at the end of last year.*

*From the geoscientific perspective, climate is not an autonomous system but part of our highly complex Planet Earth with intricate, non-linear interaction of its relevant subsystems atmosphere, hydrosphere, geosphere and biosphere. Related to this constellation, a regulation of the global climate does not seem possible through mitigation strategies alone. Of equal importance are, therefore, the development and application of adaptation strategies for the inevitable consequences of climate change.*



Wir befinden uns in einer Phase der Klimaänderung. Seit dem Einsetzen verstärkter Industrialisierung vor etwa 140 Jahren hat die globale Mitteltemperatur um etwa  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  zugenommen. Außer Zweifel steht, dass neben natürlichen Ursachen erstmalig der Mensch an diesem Prozess beteiligt ist. Anthropogene Faktoren sind die intensivierte Nutzung der Erdoberfläche, beispielsweise für Land- und Forstwirtschaft, insbesondere aber die seit Anfang des letzten Jahrhunderts ständig steigende Nutzung fossiler Rohstoffe und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen. Maßnahmen zur Reduktion dieser vom Menschen verursachten Veränderung der Atmosphäre sind deshalb notwendig. So weit, so gut – könnte man konstatieren.

Die Frage, welche konkreten Maßnahmen angesichts dieses Klimawandels, der im Kontext des Globalen Wandels eine zentrale Rolle spielt, zu ergreifen sind und vor allem mit welcher Priorität sie umgesetzt werden sollen, ist jedoch Gegenstand heftiger Debatten – und zwar nicht nur in der Wissenschaft, sondern auch in Gesellschaft, Wirtschaft und Politik. Hier endet offenbar der Konsens, wie zuletzt die 17. UN-Klimakonferenz in Durban Ende letzten Jahres zeigte. Wenn zudem ein wichtiger Industriestaat wie Kanada sich daraufhin aus dem Kyoto-Protokoll verabschiedet, andere große  $\text{CO}_2$ -Emittenten – wie die USA, China, Indien und Brasilien – weder in der Vergangenheit noch aktuell bereit sind, international verbindliche Reduktionsabsprachen (mit  $\text{CO}_2$  als Leitgas für die Gesamtheit der Treibhausgasemissionen) einzugehen, lässt sich daraus in der Tat eine tiefgreifende Problematik erkennen.

Eine der zentralen Forderungen, auf die sich letztendlich diese international geführte Debatte zuspitzt, ist das sogenannte Zwei-Grad-Ziel. Dieses Ziel beruht auf der Vorstellung, durch eine hinreichende Reduktion der Treibhausgasemissionen den globalen Temperaturanstieg auf eine Zunahme um zwei Grad begrenzen zu können. Bei diesem Ziel handelt es sich um eine politische Festlegung, deren Ableitung grundsätzlich auch wissenschaftlich begründet werden kann, indem man aufgrund von Erfahrungen aus der Klimavergangenheit davon ausgeht, dass die in diesem Rahmen zu erwartenden Veränderungen für den Menschen tolerierbar oder erträglich wären.

Die viel wichtigere Frage aber ist, ob es eine wissenschaftliche Basis für die tatsächliche Erreichbarkeit dieses Ziels gibt. Dies

würde beispielsweise bedeuten, dass wir in der aktuellen Klimadynamik die anthropogenen von den natürlichen Einflussgrößen hinreichend differenzieren können. Dabei müssten auch die Rückkopplungs- und Interaktionseffekte mit berücksichtigt werden. Zumindest hier wird es bereits schwierig, denn diese kennen wir nicht oder können sie nur teilweise und dann häufig auch nur ansatzweise abschätzen. Aber selbst wenn uns dies gelänge, könnten wir doch nur auf die direkten anthropogenen Faktoren einwirken. Dass aber die aktuelle Klimadynamik einzig durch den Menschen verursacht sei und wir neben den direkten anthropogenen Ursachen dann auch die sekundären Rückkopplungseffekte regulieren könnten, dafür gibt es keinen wissenschaftlichen Beleg.

Derartige Ableitungsansätze wären auch nur dann theoretisch möglich, wenn das Klima praktisch als isoliertes System – definiert über das 30-jährige Mittel der atmosphärischen Zustandsgrößen – angesehen werden könnte. Das Klima kann aber nicht als isolierbares Teilsystem aufgefasst werden, denn es ist eben kein abgeschlossener Mechanismus, dessen Ursachen und Wirkungen man problemlos vollständig verstehen könnte. Vielmehr ist es eine Schnittstelle im hochkomplexen, nichtlinearen Wirkungsmechanismus des Systems Erde, auf das die ebenfalls nichtlinearen, rückgekoppelten Prozesse in den Subsystemen Atmosphäre, Hydrosphäre, Geosphäre, Pedosphäre, Biosphäre und Anthroposphäre – um die wichtigsten zu nennen – einwirken.

Die Ergebnisse der Erdsystemforschung erlauben uns ständig neue und immer wieder sehr überraschende Einsichten in diese Prozesse, in diese Wirkungspfade und die verzweigten Interaktionen zwischen diesen Teilsystemen, die sich zudem ständig selbst verändern. Hinzu kommt, dass unser System Erde ein Planet ist, der einen Anfang und ein Ende hat und natürlich auch neben internen Faktoren wie z. B. dem Erdmagnetfeld und -schwerefeld auch extraterrestrischen Einflüssen unterliegt. Hier sind die Wirkungen der Sonne, die kosmische Strahlung und die Parameter der Erdumlaufbahn beispielhaft zu nennen.

Diese Betrachtungsweise bedeutet, dass der Gegenstand – unser Planet Erde – beinahe beliebig komplex ist. Aber genau diese Betrachtungsweise ist realistisch. Sie bedeutet in der Konsequenz, dass das Klima der Erde ganz prinzipiell nicht von uns organisiert werden kann, eben genau wegen der zahlreichen immanenten Nichtlinearitäten, internen wie eben auch externen Wechselwirkungen und Rückkopplungen. Der wirtschaftende Mensch ist inzwischen zwar zu einem Geofaktor geworden und damit in der Lage, Einfluss auf die Klimadynamik zu nehmen. Aber die Klimadynamik aufzuhalten oder gar rückgängig zu machen, erscheint aufgrund der Komplexität des Gesamtsystems Planet Erde nicht nur problematisch, sondern praktisch aussichtslos.



**Kontakt:** R. F. Hüttl  
(huettl@gfz-potsdam.de)



Abb. 1: Weniger als ein Promille der Gletscher weltweit werden kontinuierlich überwacht (hier der Abramov-Gletscher, Kirgisistan). Nur satellitengestützte Schweremessungen erlauben eine globale Dauerüberwachung, deren Dauer und Auflösung aber durch die Flughöhe der Satelliten begrenzt ist.

Fig. 1: Less than one per thousand of all glaciers worldwide are continuously monitored (here the Abramov glacier, Kyrgyzstan). Solely satellite-supported gravity measurements allow for a global permanent monitoring, the duration and resolution, however, being determined by the orbit height of the satellite.

## Adaptation versus Mitigation?

Anthropogenes CO<sub>2</sub> ist einer der Treiber des rezenten Klimawandels. CO<sub>2</sub> ist aber auch natürlicher Bestandteil der Atmosphäre und eine der Grundbedingungen für das Leben auf unserer Erde. Die Emission dieses Treibhausgases in enormen Mengen als Folge menschlicher Tätigkeit bedeutet geologisch gesehen nichts anderes als die Umlagerung von Kohlenstoff aus dem Langzeitspeicher geogener fossiler Brennstoffe sowie aus Böden in den Kurzzeitspeicher der Erdatmosphäre. Die dabei ablaufenden Prozesse und die dadurch verursachten Wirkungspfade sowie die damit wiederum verbundenen Ursache-Wirkung-Wechselbeziehungen sind aber schon prinzipiell nicht vollständig erklärbar. Daraus resultiert, dass zum einen die Reduktion von anthropogenen Treibhausgasemissionen (Mitigation) notwendig ist, dass aber zum anderen aufgrund

des sich bereits vollziehenden Klimawandels eine Anpassung (Adaptation) an die Wirkungen dieses Klimawandels unvermeidlich ist.

Die Frage nach der Priorität der zu ergreifenden Maßnahmen konnte bisher nicht im Konsens beantwortet werden. Ein wesentlicher Grund für dieses Dilemma ist die Frage: Welches ist die Hauptstrategie? Minderung oder Anpassung? Allein schon aus der Tatsache, dass wir das Klima nicht steuern können, erwächst die Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen. Bedeutsam ist auch, dass CO<sub>2</sub>-Reduktionsmaßnahmen nur auf globaler Ebene wirklich erfolgreich sein können. Gelänge es Deutschland, seine Emissionen unverzüglich komplett abzustellen, würde dadurch der Klimawandel nicht wirklich

beeinflusst, denn innerhalb nur kurzer Frist wäre diese Emissionsminderung durch die ständig steigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen in anderen Regionen der Erde kompensiert. Dagegen können Anpassungskonzepte auf nationaler Ebene erfolgreich umgesetzt werden, so dass die Anpassung an die Folgen des Klimawandels verstärkt in den Fokus öffentlichen Handelns rückt. Da die Auswirkungen des Klimawandels regional verschieden sind, stellt sich unmittelbar die Frage: Anpassung woran, an welche Veränderungen? Dadurch sind die Herausforderungen für Anpassungsstrategien vielfältig und komplex, wobei unterschiedliche Regionen auch von gegensätzlichen Folgen des Klimawandels betroffen sein können. Gerade hier kann die Paläoklimaforschung Antworten geben, indem sie Veränderungen aus der Vergangenheit für spezifische Regionen unter jeweils verschiedenen Klimabedingungen offenlegt. Das Motto heißt hier: Aus der Vergangenheit für die Zukunft lernen. Allerdings besteht im Bereich der Paläoklimaforschung sowie bei der regional ausgerichteten Klimamodellierung noch erheblicher Forschungsbedarf.

Um adäquate Anpassungsoptionen zu entwickeln, sind die naturräumlichen und sozialen Rahmenbedingungen von Regionen angemessen zu berücksichtigen, denn die Auswirkungen des Klimawandels orientieren sich nicht an politisch-administrativen Grenzen. Das Aufgabenfeld Anpassung an den Klimawandel wird dabei wesentlich von zwei Faktoren geprägt: durch die für politische und administrative Entscheidungen langfristigen Zeithorizonte sowie durch die den Klimaszenarien inhärente Unsicherheit. Mit dieser strukturellen Unsicherheit sind Grenzen von Anpassungsstrategien gesetzt, denn die Frage, an welche Folgen sich eine Gesellschaft anpassen soll, kann nicht konkret beantwortet werden. Die Szenarienvariabilität stellt für die jeweiligen Anpassungsstrategien eine grundlegende Herausforderung dar.

## Ressourceneffizienz als Schlüssel

Hinzu kommt ein weiterer Aspekt. Die Klimadynamik ist auch ein gutes Beispiel für die Problematik bei der Nutzung von Ressourcen: Wir diskutieren die Effekte der CO<sub>2</sub>-Anreicherung in der Atmosphäre infolge einer Rohstoffnutzung, nämlich der von fossilen Brennstoffen, die zu einem bestimmten Zweck, und zwar vornehmlich zur Energiebereitstellung, in vorgegebenen Strukturen – gesellschaftlich, technologisch und ökonomisch – abläuft. Gekennzeichnet ist diese Prozesskette der Rohstoffnutzung durch enorme Ineffizienz. Selbst im Hochtechnologieland Deutschland wird nur ein Drittel der Primärenergie am Ende als Nutzenergie tatsächlich genutzt. Die Diskussion zwischen den hochindustrialisierten Ländern und den Schwellenländern darüber, wer wie viel Kohlendioxid in die Atmosphäre emittieren darf, kann also als materielle Metapher auch für andere, ebenso gravierende Ressourceneffizienzen aufgefasst werden. Bei einem Anwachsen der Weltbevölke-

rung auf über neun Milliarden Menschen bis zum Jahr 2050 stellt sich ganz besonders die Frage einer nachhaltigen Nutzung von Rohstoffen, die auf unserem Planeten Erde jeweils nur begrenzt zur Verfügung stehen. Gerade für die Hochtechnologienationen, aber natürlich auch für die Schwellenländer, liegt hier das eigentliche Entwicklungspotenzial in der Innovation – sowohl mit Bezug auf die Rohstofftechnologien als auch was den jeweiligen Verbrauch sowie das Recycling anbelangt. Innovation ist der Motor für verbesserte Rohstoffeffizienz. Innovation ist dabei die Prozessfolge, an deren Ende bislang bewährte Produkte, Verfahren und auch Dienstleistungen durch Neuerungen am Markt oder in der Gesellschaft erfolgreich ersetzt sind.

## Wissenschaftliche Forschung ist Skepsis

Klimawandel ist ein globales Phänomen mit regionalspezifischen Auswirkungen, die die Gesellschaft in sehr unterschiedlicher Art und Intensität betreffen. Der Umgang mit dem Klimawandel ist daher eine gesamtgesellschaftliche Herausforderung, woraus starke forschungspolitische Implikationen resultieren, denn unser Wissensstand ist häufig unvollständig. Unvollständiges Wissen darf uns aber nicht am Handeln hindern. Es soll uns aber auch nicht daran hindern, vorhandene Wissenslücken zu benennen. Die dadurch begründete Wissenschaftsarbeit (Forschung) ist ebenso notwendig wie unerlässlich, um zukünftige Entscheidungen mit immer besserem Wissen fällen zu können – sowohl zur Anpassung an den sich vollziehenden Klimawandel als auch zum Ergreifen von Minderungsmaßnahmen.

Auch wenn wir heute mit Bezug auf das Klima und dessen Dynamik so viel wissen wie nie zuvor in der Menschheitsgeschichte, so ist unser Verständnis gleichwohl beschränkt. Eher neu ist unser Wissen um die hochkomplexe Beschaffenheit der Schnittstelle Klima.

Wissenschaften liefern nicht nur Grundlagen für faktenbasierte Handlungsoptionen. Zentrale Aufgabe der Wissenschaft ist neben der Generierung immer neuen Wissens vor allem das Stellen guter – konkret: der richtigen – Fragen, denn grundsätzlich kann nur der die richtigen Antworten erwarten, der auch die richtigen Fragen stellt. Wissenschaftliche Forschung hinterfragt auch immer wieder bislang sicher geglaubtes Wissen, um beispielsweise mit Hilfe neuer Methoden noch sichereres oder eben gänzlich neues Wissen zu schaffen. Falsifizierung oder Verifizierung sind hier die relevanten Zielstellungen. Den Entscheidungsträgern in der Politik, aber auch in anderen Bereichen, obliegt deshalb die schwierige Aufgabe, auch bei unsicherem oder unvollständigem Wissen handeln, d. h. entscheiden zu müssen.



*Abb. 2: Dom im Kratergipfel des Vulkans Merapi, Indonesien. Die Klimaforschung geht üblicherweise davon aus, dass einzelne größere Vulkanausbrüche nur für einige Jahre bis Jahrzehnte einen messbaren Einfluss auf die Atmosphäre ausüben. Anders ist das bei lang anhaltendem starken Vulkanismus oder bei Ausbrüchen von Supervulkanen, wie sie aus der Erdgeschichte bekannt sind. Die Auswirkungen solcher katastrophalen Ereignisse auf das Klima lassen sich kaum berechnen und sind auch noch nicht ausreichend erforscht.*

*Fig. 2: Dome in the crater summit of the volcano Merapi, Indonesia. Climate research usually considers singular major volcanic eruptions to have a measurable impact on the atmosphere for only a few years or decades. It is different with long-lasting strong volcanic activity or in the case of outbreaks of super volcanoes that are known to have occurred in Earth's history. The impact of such catastrophic events on climate can hardly be calculated and are not yet sufficiently explored.*

Die Annahme, die aktuelle Entwicklung des Klimas sei unvermeidbar mit katastrophalen Folgen für den Menschen verbunden, erweist sich in diesem Kontext als Extremwert in einem Spektrum, dem auf der anderen Seite als Extremwert die sogenannte „Klimaskepsis“ gegenüber steht. Beides sind letztlich unwissenschaftliche Sichtweisen: die eine, weil sie die unaufhaltsame Katastrophe bereits als bewiesenes wissenschaftliches Wissen ausgibt; die andere, weil sie die der Wissenschaft als unabdingbare Voraussetzung immanente Skepsis als ein Werkzeug zur Ausblendung unbequemen Wissens missbraucht.

Wir wissen heute so viel vom Klimasystem wie nie zuvor. Aber was wissen wir wirklich? Das wichtigste Werkzeug zur Abschätzung des künftigen Klimawandels sind Modellrechnungen. Daraus werden Szenarien möglicher Klimazukünfte entwickelt. Diese Szenarien können aber nur so aussagekräftig, so verlässlich sein wie die Daten und das Prozesswissen bezogen auf die relevanten Kontexte, die in diese Modelle eingehen.

In den letzten beiden Jahrzehnten hat die Klimaforschung hervorragende Arbeit geleistet. Die daraus entwickelten Zukunftsszenarien sind aber nicht mit Prognosen, also Vorhersagen, zu verwechseln, sondern sie repräsentieren mögliche Zukünfte unter der Annahme ganz bestimmter Rahmenbedingungen. Klimaszenarien bergen in sich – wie grundsätzlich auch alle anderen Szenarien – Unsicherheiten.

Hier gilt es, neu anzusetzen. Dafür gibt es mehrere Gründe, die sich in zwei Zusammenhängen konkretisieren lassen: Erstens wartet die Klimadynamik als Schnittstellenkomplex im System Erde ständig mit neuen Überraschungen auf, neue Erkenntnisse müssen auch bei der Modellierung berücksichtigt werden. Das zu fordern, ist an sich trivial, weil es der normale Gang der Wissenschaft sein sollte. Zweitens scheint – bei aller Anerkennung der bisherigen Modellierungsleistungen – die derzeitige Art der Klimamodellierung an ihre Grenzen zu stoßen. Man muss das Klima als Knotenpunkt des Gesamtsystems Erde und die Erde eben als Planet verstehen und auf dieser Basis

versuchen, ein neues Abbildungs- bzw. Modellkonzept zu entwickeln. Hier besteht in der Tat enormer Forschungsbedarf; denn viele der Fragestellungen, welche die Klimaforschung im engeren Sinn seit nunmehr gut zwei Jahrzehnten bewegen, sind bis heute nicht gelöst und können wohl auch nur zielführend angegangen werden, wenn ein integriert geowissenschaftlicher Ansatz gewählt wird. Schwerkraft, Magnetfeld, Erdbahnparameter, kosmische Strahlung, Plattentektonik, Landhebung und Subsidenz, Orogenese, Verwitterung, Erosion und andere Geoprozesse sowie letztendlich alle Bio-Geo-Mechanismen sind für die Klimadynamik ebenso relevant wie die in der Meteorologie und der Klimatologie betrachteten Mechanismen und Zusammenhänge. Die Geowissenschaften können hier mit ihrem Ansatz einer Erdsystemmodellbildung wichtige Beiträge leisten – es kommt ihnen deshalb auch eine besondere Bringschuld zu.

## Handeln unter den Bedingungen von Unsicherheiten und Nichtwissen

Eine wichtige Aufgabe der Wissenschaften besteht daher darin, diese Unsicherheiten konkret zu benennen. In den Modellen ist beispielsweise der Wasserkreislauf nicht wirklich reproduzierbar, zudem sind die Ozeane in ihrer Klimawirkung wissenschaftlich noch wenig verstanden, das Verhalten der Meereisbedeckung ist weiterhin mit offenen Fragen verbunden, ebenso der Kohlenstoffhaushalt der Böden sowie auch die Wirkung der Solarstrahlung und der Orbitalparameter – kurz: das Klima, vor allem seine Dynamik, insbesondere aufgrund seiner Wechselwirkungen mit den Teilsystemen des Planeten Erde, ist uns eben nicht genau genug bekannt. Daher sind Entscheider mit der Herausforderung konfrontiert, dass Handeln häufig unter Bedingungen des Nichtwissens stattfindet.

## Weiterführende Literatur

- Hüttl, R. F. (Ed.) (2011): Ein Planet voller Überraschungen: neue Einblicke in das System Erde, (Spektrum-Sachbuch), Heidelberg, 316 p.
- Hüttl, R. F., Bens, O. (Eds.) (2012): Geoessource Wasser - Herausforderung Globaler Wandel: Beiträge zu einer integrierten Wasserressourcenbewirtschaftung in Deutschland, (acatech Studie), Berlin, 262 p.
- Hüttl, R. F., Emmermann, R., Germer, S., Naumann, M., Bens, O. (Eds.) (2011): Globaler Wandel und regionale Entwicklung: Anpassungsstrategien an globale Herausforderungen in der Region Berlin-Brandenburg, Berlin [u.a.], 197 p.
- Lal, R., Lorenz, K., Hüttl, R. F., Schneider, B. U., von Braun, J. (Eds.) (2012): Recarbonization of the Biosphere: ecosystems and the global carbon cycle, Dordrecht [u.a.], 615 p.