

Klimawandel – Erkenntnisse, Defizite und Erfordernisse bei Erfassung und Prognose

Die Grundfrage: Wie ändert sich unser Klima?

Das Klima unseres Planeten und sein für die Zukunft prognostizierter, derzeit in Gang befindlicher oder schon vollzogener (?) Wandel in Richtung „Treibhausklima“ sind das derzeit weltweit meistdiskutierte Umweltthema überhaupt. Und dies auf allen Informations- und Kompetenzebenen, von der (Fach-)Wissenschaft über die Politik und die Massenmedien bis hin zum uninformierten Laien. Neben der Grundfrage zum aktuellen Prozess-Status (war, ist oder kommt ein Klimawandel?) interessieren dabei vor allem die Ursachen und Folgen dieses Geschehens, ganz besonders mit Blick auf die Rolle des Menschen, sei es als Verursacher wie als Betroffener.

Wegen der immensen Bedeutung dieses Geschehens für unseren Planeten wie auch für dessen Bewohner, unabhängig von deren Entwicklungs- und Bildungsstand, sollten dabei im Interesse der Be-

teiligten – und dies sind naturgemäß alle Menschen, weil eben alle davon betroffen sind – folgende Fragen für die Erde als Ganzes wie auch für ihre einzelnen Regionen gestellt und baldmöglichst auf gesicherter wissenschaftlicher Grundlage beantwortet werden.

Fragen zum Klimawandel und zu seinen (potentiellen) Folgen

1. Ist die Erwärmung auf der Erde überwiegend oder sogar ausschließlich mit der Zunahme der Spurengase in der Atmosphäre erklärbar, oder gibt es weitere Steuerfaktoren?
2. Welche anderen Faktoren sind dies gegebenenfalls, wie ist ihr Wirkungsmechanismus, welchen Anteil hat daran der Mensch und durch welche Aktivitäten?
3. Gibt es eindeutige quantitative Korrelationen zwischen den Steuerfaktoren (absoluter oder relativer Anteil von CO₂, von Spurengasen insgesamt und/

- oder von weiteren Steuergrößen) und dem Temperaturanstieg?
4. Welche Rolle spielt die Interferenz von Steuerfaktoren untereinander, welches positive oder negative „Feedback“ resultiert daraus?
5. Ist der Klimawandel ausschließlich anthropogen veranlasst, und welchen Anteil haben dabei welche politisch, wirtschaftsräumlich und/oder naturräumlich definierten Raumeinheiten auf der Erde?
6. Wie weit wird die globale Mitteltemperatur unter welchen Voraussetzungen in näherer und fernerer Zukunft insgesamt noch ansteigen?
7. Warum gibt es eine räumliche Abstufung der aktuellen Erwärmung, z.T. sogar mit gegenläufiger Tendenz, und wird sich diese beim Fortgang der Erwärmung noch verstärken oder abschwächen?
8. Welche weiteren Klimatelemente haben sich bisher gravierend verändert, in welchem Ausmaß, mit welcher Tendenz und mit welcher räumlichen Verteilung?
9. Welche negativen Konsequenzen hat dieser Klimawandel allgemein für den Lebens- und Wirtschaftsraum des Menschen, und wie sind bzw. werden diese künftig regional verteilt sein?
10. Gibt es Bereiche der Erde, die vom Klimawandel ganz oder teilweise profitieren, deren Umwelt gegenüber heute positiv verändert wird, welche sind dies, wie und in welchem Umfang gewinnen sie dabei?
11. Können wir wirklich maßgeblich, und gegebenenfalls wie, in den Klimawandelprozess steuernd eingreifen, ihn verlangsamen oder stoppen oder das Klimarad sogar zurückdrehen?
12. Welcher mittlere Klimazustand auf der Erde ist für Mensch und/oder Biosphäre optimal, bzw. gibt es überhaupt ein Klima, sei es für die gesamte Erde, für einzelne Regionen und/oder für homogene menschliche Gruppen, seien diese rassisch, religiös/weltanschaulich oder durch an-

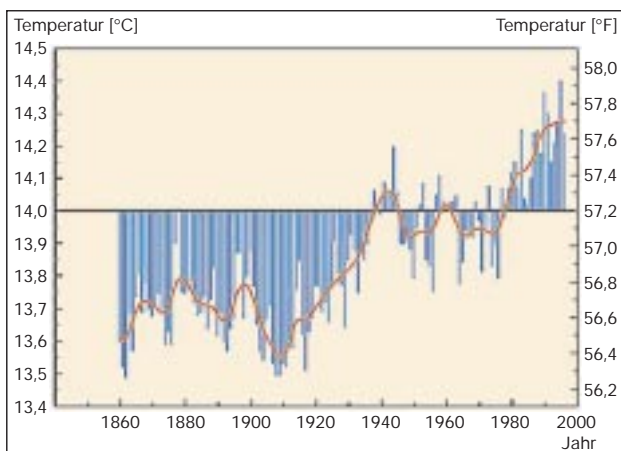


Fig. 1
Gemessener globaler Temperaturanstieg, bezogen auf das globale Temperaturmittel (horizontale Linie) im 130-Jahreszeitraum 1861–1990 (nach HOUGHTON et al. 1996)

dere angeborenen oder erworbenen gemeinsamen Merkmale miteinander verbunden und als solche an bestimmte Klimarahmenbedingungen adaptiert?

Antworten und ihr Aussagewert, Schwerpunkte und Defizite in der Forschung

Leitlinien des politisch/wissenschaftspolitisch sanktionierten Voraussage-Szenarios

Geht man nach den offiziellen politischen Erkenntnissen und Verlautbarungen zum Klimawandelproblem, d. h. nach den Einsichten und Vorgaben, die durch Gremien (z. B. sogenannte Enquete-Kommissionen) erarbeitet wurden, die unsere Regierung selbst eingesetzt hat und an denen sie beteiligt ist, dann sind zumindest einige wichtige Grundfragen, insbesondere die nach den maßgeblichen Ursachen, nach dem Ausmaß (jedenfalls nach dem bisherigen) sowie die nach den Hauptauswirkungen dieses Klimawandels – zumindest im Grundsatz – beantwortet.

So wird der Temperaturanstieg in den letzten Jahrzehnten unseres Jahrhunderts als ein sicher nachweisbarer Vorgang angesehen, der seit dem späten 19. Jh. bis heute ca. 0,3–0,6 K (Fig. 1) erreicht hat und sich in Zukunft fortsetzen wird. Das Ausmaß dieser künftigen Temperaturzunahme ist derzeit freilich noch in der Diskussion. Einigkeit besteht hierbei nur dahingehend, dass dieser gekoppelt ist an die Veränderung (Zunahme) klimawirksamer Spurengase in unserer Atmosphäre, insbesondere wiederum an die weitere Zunahme des CO₂. Szenarien, die den aktuellen Temperaturlevel unter Berücksichtigung von politisch gesetzten Vorgaben (Agenda 21, globale CO₂-Reduktionsstrategien usw.) mit einem der verfügbaren Rechenmodelle unter Berücksichtigung unterschiedlicher Verhaltensweisen (best/worst case usw.) hochrechnen, gehen immerhin noch von einem weiteren Anstieg um etwa 1–5 K in

den nächsten Jahrzehnten aus (Fig. 2a). Der möglicherweise realistischste Wert hierfür steht aktuell bei ca. 1–3,5 K. Schon dies sind allerdings sehr vage Vorhersagen, ebenso wie jene, die deren Auswirkungen auf den Menschen betreffen. Immerhin herrscht dazu wenigstens vom Grundsatz, wenn auch nicht vom Ausmaß und von der zu erwartenden regionalen Differenzierung her Einigkeit. Danach muss insbesondere gerechnet werden mit:

- einem direkten – durch Erwärmung des Salzwassers – und indirekten – durch partielles Abschmelzen von Inlandeisen – Anstieg des Meeresspiegels mit Überflutung küstennaher, dicht besiedelter Deltas und anderer Flachländer,
- massiven allgemeinen und zudem noch regional stark differenzierten Änderungen der Verdunstung und der Niederschläge sowie – als unmittelbare Folge dieser und der Temperaturänderungen – mit
- erheblichen Veränderungen der natürlichen Vegetation, im qualitativen Bereich (floristische Zusammensetzung und Vielfalt) ebenso wie in der räumlichen Verteilung.

Weder das Ausmaß noch die konkrete räumliche Differenzierung dieser Folgewirkungen waren bisher mit der notwendigen Sicherheit kalkulierbar. Die große Spannweite der bis heute vorliegenden Rechen- bzw. Schätzwerte von minimal ca. 15 cm bis maximal ca. 95 cm Meeresspiegelanstieg bis zum Jahre 2100 (HOUGHTON et al. 1996; Fig. 2b) zeigt dies. Sicher erscheint nur, dass sich alle diesbezüglichen heutigen Raummuster im Gefolge der laufenden beziehungsweise zu erwartenden Klimaänderung verändern werden.

Forschungsschwerpunkte

Bisher standen bei der Frage nach den Ursachen und Auswirkungen des Klimawandels jene Sphären im Vordergrund, denen dabei nach

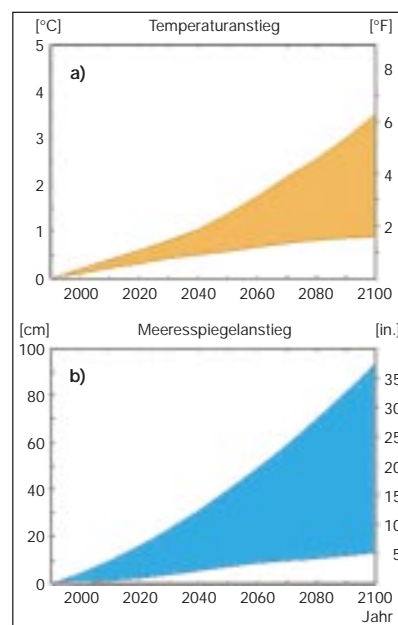


Fig. 2 a) Möglicher Anstieg der Mitteltemperatur der Erdoberfläche für den Zeitraum 1990–2100, b) möglicher Anstieg der mittleren Höhe des Meeresspiegels für den Zeitraum 1990–2100 (aus HOUGHTON et al. 1996)

bisherigen Erkenntnissen eine Führungsrolle zukommt und deren Veränderung für den Menschen zugleich die unmittelbarsten und folgenschwersten Konsequenzen erwarten lässt – auch und gerade deshalb, weil die Reaktionsgeschwindigkeiten innerhalb und zwischen diesen Partialkomplexen in Größenordnungen liegen, die jeder Mensch überschauen, vielfach sogar unmittelbar beobachten oder doch nachvollziehen kann, die er demzufolge „am eigenen Leibe“ verspürt und gegebenenfalls auch erleidet. Und das sind ganz eindeutig Luft, Wasser und Biosphäre.

Forschungsdefizite

Die Rolle von Relief, Böden und Gestein: Die übrigen Kompartimente der Natur, nämlich Relief, Böden und die Gesteinshülle unserer Erde, blieben bei den bisherigen Klimawandeldiskussionen weithin unberücksichtigt. Dabei ist eindeutig, erst recht wenn man die zahlreichen Klimawandlungen der erdgeschichtlichen Vergangenheit und deren heute vielfach bekannte Ur-

sachenspektren mit einbezieht (vgl. HERGET 2000, S. 56 ff., und BOLDT 2000, S. 74 ff. in diesem Heft), dass der Ausstattung und Dynamik einzelner dieser Sphären, erst recht aber ihrem komplexen raumzeitlichen Zusammenspiel eine erhebliche, oft sogar die Vorreiterrolle bei Klimavariationen zukommt. Auf der anderen Seite stehen die enorme raumzeitliche und prozessuale Vielgestalt und Variationsfülle dieser Kompartimente und ihre vergleichsweise langsamen und deshalb nicht unmittelbar mess- und reproduzierbaren Abläufe. Sie lassen die Einflüsse dieser Sphären nur schwer überschauen und noch schwieriger „digitalisieren“, d. h. so aufbereiten, dass sie in moderne Klimarechenmodelle einfließen können. Es kommt hinzu, dass viele klimaabhängige und ihrerseits klimabeeinflussende Teilprozesse daraus bis heute nicht in dem Maße quantifizierbar sind, um sie als gesicherte Inputgrößen in klimatologische Zukunftsmodelle einbinden zu können.

Allein die Frage des Kohlenstoffumsatzes (Bindung versus Freisetzung) im Zuge der Pedogenese (Bodenbildung) und Gesteinsverwitterung bzw. -neubildung und dessen Resultante (In- oder Output und beteiligte Mengen) könnte das gesamte bisherige Klimakalkül ad absurdum führen, denn schon die Böden enthalten wenigstens das Dreifache an Kohlenstoff (1 500 Gt?) im Vergleich zur lebenden festländischen Biomasse und mindestens doppelt so viel, wie davon derzeit in unserer Atmosphäre (750 Gt?) vorhanden ist. Die in Gesteinen (Sedimentgesteinen) anorganisch oder organisch gebundenen Kohlenstoffmassen liegen mit rund 100 Mio. Gt (bei aller Skepsis, die bei solchen Globalschätzungen angebracht ist) gar in Größenordnungen, die um rund 2000% über der Summe aller anderen Kohlenstoffspeicher liegen, die in den Weltmeeren gebundenen Mengen (40 000 Gt?) sowie die Gesamtreserven an fossilen Brennstoffen (5 000 Gt?) mit eingeschlossen. Die tatsächlichen Kohlenstoffumsätze in und zwischen

diesen Speichern sind zwar weder bei den Böden (Humusspeicherung oder -abbau, Kalkabscheidung oder -lösung) noch im Gestein (Kalk- und Dolomitabbau oder -neubildung) und hier wie da weder in ihren anorganischen noch in den organischen Anteilen hinreichend gut bekannt. Andererseits aber ist klar, dass die Prozesse der Morphodynamik (Aufnahme, Transport, Zwischen- und „End“lagerung), die im Wesentlichen den Austausch zwischen Festland und Gewässern vollziehen, schon im Zuge der bisherigen Erderwärmung an Intensität gewonnen haben und mit weiter voranschreitendem Klimawandel exponentiell weiter intensiviert werden. Dies gilt gleichermaßen für die Leistungsfähigkeit der Materialumsätze in den Böden wie auch der chemischen Verwitterungsprozesse im Gestein, und es gilt im Übrigen auch für den biotischen Kohlenstoffumsatz auf dem Festland und in den Weltmeeren. Folge ist in jedem Fall ein erhöhter Transport an gelösten Stoffen sowie an partikulärem organischem und anorganischem Detritus vom Festland zum Meer. Darin werden dann freilich zwei gegenläufige Entwicklungen forciert, einmal wegen der auch dort erhöhten Reaktionsgeschwindigkeit und des verstärkten Nähr- und Kohlenstoffinputs ein Wachstumsschub für Biomasse und zum anderen wegen der erhöhten Wassertemperatur eine Verringerung des Aufnahmevermögens für CO₂. Welcher Vorgang (Festlegung, vorwiegend als Biosediment, oder Emission von CO₂) hierbei mit Blick auf das atmosphärische CO₂ dominiert, ist offen, zugleich aber essentiell für die weitere Klimaentwicklung. Diese Frage muss deshalb beantwortet, das zugrunde liegende Prozessgeschehen quantifiziert werden, will man sich einer realistischen Klimaprognose annähern.

Die Rolle der Albedo: Ein weiteres Element aus dem Bereich dieses geoökologischen Fundaments (Relief/Boden/Gestein) der Erde ist in den bisherigen Modellen sträflich

vernachlässigt worden. Es handelt sich um die Veränderung der Albedo der Erdoberfläche als direkte und indirekte Folge der Umgestaltung oder Neueinrichtung des Inventars, das die Natur und/oder der Mensch auf der Erdoberfläche installiert hat und ständig umgestaltet. Die Rolle dieser Albedo ist vom Prinzip her bekannt und wird in neueren Klimamodellen wenigstens im Bereich der Atmosphäre für spezielle Aerosole auch berücksichtigt. Es fehlt aber die Integration jener Einflüsse, die von veränderten Albedowerten der Erdoberfläche selbst ausgehen. Diese sind fraglos vorhanden, und zwar auf dem eisfreien Festland aller Voraussicht nach solche in Richtung einer Zunahme der Albedo (mehr und stärker rückstrahlende Oberflächen). Sie müsste folglich vorrangig Impulse entgegen der derzeitigen Klimaentwicklung, nämlich in Richtung Abkühlung abgeben. Andererseits haben sich allein durch die Erwärmung die ständig oder zeitweilig schnee- und/oder eisbedeckten Teile der Erdoberfläche reduziert und die vorhandenen zugleich stärker „verschmutzt“, womit sie an Rückstrahlungsleistung (Albedo) verloren haben, also erwärmungsfördernde Impulse senden sollten. Auch hier ist es also im Endeffekt eine Frage der Bilanz, in welche Richtung der Klimazug angeschoben wird. Auch diese Bilanz fehlt bisher, gar als Eingangsgröße für die Rechenmodelle.

Konsequenzen unterschiedlicher Gang- und Anpassungsgeschwindigkeiten der Umweltkompartimente an den aktuellen Klimawandel

Die Erwärmung der Erde in den letzten Jahrzehnten war nach Auskunft der vorliegenden Beobachtungsreihen ein schrittweiser Vorgang mit zeitlichen und räumlichen Diskontinuitäten und – wenn auch untergeordneten – gegenläufigen Tendenzen. Dies wird auch für die darauf wesentlich aufbauenden Folgewirkungen gelten, zuallererst

für die Änderungen des Wasserhaushalts. Diese Prozesse werden im Vergleich zur Temperaturänderung noch sehr viel uneinheitlicher sein, sowohl in der Richtung wie in ihren regionalen Ausmaßen und auch in den Schrittweiten ihres Ablaufs. Erst recht gilt dies für alle anderen Sphären der Erde, angefangen von der Biosphäre über die Pedo- bis zur Morpho- und Lithosphäre.

Indizien für diesen unausgeglichene, hin- und herspringenden Anpassungsprozess des Wasserhaushalts an die veränderten und sich weiter wandelnden Temperaturbedingungen sehen wir in der Häufung von hygrischen Extremen auf der Erde, vor allem im letzten Jahrzehnt des ausklingenden Jahrhunderts. Unter der Vielzahl solcher Ereignisse sollten zumindest jene nach ihrem eventuellen klimageschichtlichen Aussagewert hinterfragt werden, die in Zeitabständen auftreten, die deutlich über den üblichen „Definitionszeiträumen“ von Klimaten (in der Regel 30 Jahre) liegen. Die jüngste hierher gehörende Niederschlagskatastrophe fand im Februar 2000 in Südafrika/Mosambik (siehe S. 72 ff. in diesem Heft) statt. Genau entgegengesetzte Ereignisse, nämlich Dürrekatastrophen extremen Ausmaßes, reihen sich derzeit wie Perlen an einer Schnur von Mallorca über Sardinien bis nach Rajasthan in Nordwestindien und nach China. Beide Kategorien sind – sicher nicht zufällig – im randtropisch/-subtropisch/mediterranen Klimabereich angesiedelt, d. h. in jener Zone, die im Laufe der jüngeren, quartären Klimageschichte immer schon eine Übergangszone mit jahreszeitlich stark wechselnden Zirkulationsgegebenheiten dargestellt hat, wenn auch mit schwankenden Anteilen der darin im Jahresgang jeweils alternierenden Zirkulationsregime. Dass dies merkbare Abweichungen von den Mittelwerten schon ohne einen Klimawandel begünstigt, ist hinreichend bekannt. Die mittlerweile gerade in diesem Übergangsgürtel gehäuft auftretende Verquickung von extremen Einzelereig-

nissen mit stark von der Norm abweichenden Jahresmittelwerten allerdings gibt den aktuellen Temperatur- und Niederschlagsausreißern dort eine stärkere Wertigkeit, die wir jedenfalls als einen sichtbaren Ausdruck des sich wandelnden Klimas ansehen. Diese Auffassung wird noch bestärkt durch die Tatsache, dass in dieser Zone in kürzeren Zeitabständen (u. U. in der gleichen hygrischen Jahreszeit) Extreme sowohl in der einen wie in der anderen Richtung auftreten. Als Beispiel sei die Insel Sardinien angeführt, auf der nach einem im Mittel extrem niederschlagsarmen Winter 1999/2000 Wassernotstand herrscht (die Trinkwasserspeicher dieser Insel sind jetzt – zu Beginn der sommerlichen Trockenzeit – gerade zu 20 % gefüllt), obgleich zu Beginn dieser niederschlagsarmen Regenzeit (im November 1999) lokale Starkregen aufgetreten sind, die örtlich Niederschlagsmengen von fast 600 mm und damit mehr als das normale Jahresmittel gebracht haben.

Wir gehen sicher nicht fehl, wenn wir solche und ähnliche weltweit gehäuft auftretende hygrischen Extreme als Ausdruck einer globalen Klimaumstellung interpretieren, die von einem stabilen Ausgangsklima über ein instabiles Zwischenstadium – das wir derzeit erleben – einem wiederum stabilen neuen Klima zustrebt.

Derart instabile Zwischenstadien mit erheblichen Ausreißern nach allen Seiten müssen erst recht bei den übrigen Sphären erwartet werden, nur eben mit entsprechend stärkerer Zeitverzögerung im Vergleich zur Hydrosphäre. So können wir etwa bei der Vegetation als Folge der Anpassungsnotwendigkeit an beides, die sich ändernden Temperatur- und Feuchtebedingungen, eine mehr oder weniger lange Übergangszeit mit u. U. temperatur- und/oder feuchtebedingt vom Anfangs- wie vom Endzustand stark abweichenden Ausstattungsmerkmalen erwarten. In der Praxis dürfte dies bedeuten, dass die künftige (bzw. die in Gang befindliche? – vgl. BENDIX et al. 2000, S. 20 ff. in

diesem Heft) großräumige Verlagerung der Vegetationszonen mit zwischenzeitlich längerfristig erheblichen Vegetationsdefiziten einhergehen wird, weil im Zeitraum der sich (stetig/unstetig) ändernden klimatischen Steuerfaktoren absterbende „alte“ Spezies nicht schnell genug bzw. nur rudimentär von „neuen“ Spezies ersetzt werden können, insbesondere dort, wo noch zusätzlich Einwanderungshindernisse (Gebirge, trennende Meeresräume usw.) vorhanden sind.

Die Möglichkeit, dass derartige vom Klima bedingte Anpassungsvorgänge und -probleme der Vegetation auch bei den Vorgängen der „neuartigen Waldschäden“ in Mittel- und Südeuropa beteiligt sind, dass deren Ursachen also nicht nur aus den mittlerweile bekannten chemischen und den damit verknüpften biologischen Schadelementen bestehen, sondern darin auch die ersten Zeichen eines durch den in Gang befindlichen Klimawandel ausgelösten Anpassungsprozesses an veränderte Umweltgegebenheiten sichtbar werden, ist nicht von der Hand zu weisen. Auch die spezifische räumliche Differenzierung (frühere und stärkere Schäden in kühleren Gebirgsregionen) und die zeitliche Reihung bei den betroffenen Baumarten (Nadelbäume vor Laubbäumen), stehen mit einer solchen klimabedingten Vegetationsverlagerung in Übereinstimmung.

Dass dies schließlich nicht nur für natürliche Vegetationsformationen gilt, sondern möglicherweise auch für langlebige Kulturpflanzen, zeigen die Korkeichenwälder mediterraner Klimazonen, die sich – wie heute weitestgehend gesichert ist (mündliche Mitteilung von Prof. ANGELO ARU, Cagliari/Sardinien) – im gesamten Klimagebiet der europäisch/nordafrikanischen Mittelmeerraneis nicht mehr verjüngen.

Bei kurzlebigen Kulturpflanzen andererseits löst die Verlängerung der Vegetationszeiten im Verbund mit der Erhöhung des CO₂-Partialdruckes Ertragsänderungen aus, die sowohl in die eine (Abnahme der Produktivität, z. B. bei Reis) wie auch in die andere Richtung (Zu-

nahme der Erträge bei Weizen) gehen. Gerade dies aber macht es für den wirtschaftenden Menschen zu einer vorrangigen Aufgabe, die regionale Differenzierung eines zukünftig veränderten Weltklimas zu erkennen, um dann seine agrarische „Raumplanung“ den veränderten Rahmenbedingungen anpassen zu können.

Die aktuelle Kohlenstoffbilanz

341 Gt CO₂ soll der Mensch seit 1850 in die Atmosphäre emittiert haben, 291 Gt durch die Verbrennung fossiler Biomasse, den Rest durch vielfältige Veränderungen der Landnutzung (Waldrodungen usw.). Von dieser Gesamtmenge sollen heute aber nur noch 42–43% in der Atmosphäre vorhanden sein, der Rest teils in den Weltmeeren (ca. 30%) sowie in der terrestrischen Vegetation (ca. 27–28%). Diese oder ähnliche, heute in der Wissenschaft gehandelte Sätze sind freilich – vor allem mit Bezug auf die Anteile in der Vegetation und in den Ozeanen – eher Glaubenssache, denn wirklich konkret nachgewiesene Werte.

Erfordernisse für eine realitätsnahe Klimaprognose

Es ist keine Frage: Die immer noch vorhandenen erheblichen Defizite in der Kenntnis des Kohlenstoffhaushalts an und nahe der Erdoberfläche sind ein Hauptproblem der Klimavorhersage, denn dafür braucht es nicht nur genauer Informationen über die Anteile aller CO₂-Quellen und -Senken in der Luft, im Wasser und in der Vegetation, sondern auch eines differenzierten quantitativen Einblicks in alle übrigen potentiellen Kohlenstoffsenken, -quellen und -transporteure, von der Lithosphäre über die Pedosphäre bis zur Morphosphäre, und zudem realitätsnaher Vorstellungen darüber, ob und wie sich alle diese Quellen und Senken an sich, vor allem aber bei fortschreitender Erwärmung verän-

dern, ob sich dabei lediglich die quantitativen Relationen verschieben oder Senken gar zu Quellen bzw. Quellen zu Senken werden können. Derartige qualitative Quantensprünge erscheinen durchaus möglich, nicht nur bei den marinen Senken, dort aber in ganz besonderem Maße.

Nur mit solchen raumzeitlich und qualitativ differenzierten dynamischen Daten als Inputgrößen erscheinen realitätsnahe Berechnungen künftiger Klimastrukturen überhaupt möglich und sinnvoll. Dazu gehören in jedem Fall über die Gesamtmengen an Kohlenstoff hinaus Kenntnisse über die raumzeitlichen Differenzierungen aller Kohlenstoffpools in allen Sphären sowie quantitative Daten über den Transfer zwischen ihnen, und zwar für alle daran beteiligten Medien (Luft, Fließwasser, Wind) und für alle wichtigen räumlichen und zeitlichen Dimensionen.

Dasselbe gilt für alle übrigen Spurengase und zugleich für alle weiteren Faktoren, die zum Ersten massiv klimawirksam, zum Zweiten quantitativ und z. T. auch qualitativ hoch variabel, zum Dritten von Natur und Mensch gleichermaßen beeinflusst, insbesondere verändert werden und viertens raumzeitlich zugleich stark differenziert sind. Dies sind in erster Linie der Wasserdampfgehalt in der Lufthülle und die Albedo von Atmosphäre und Erdoberfläche. Auch hierzu bedarf es erheblich besserer und vor allem raumzeitlich aufgelöster Daten, will man wirklich die Rolle dieser Faktoren für den Klimawandel in den Griff bekommen.

Das gilt in ganz besonderem Maße für die anthropogene Veränderung der Albedo der Erdoberfläche wie auch für die quantitative (Menge) und qualitative (Höhenlage, Dicke und Form der Wolken) Variation des Wasserdampfgehaltes der Lufthülle. Beide sind wenig bekannt, die Rolle des Wasserdampfes ist wegen dessen raumzeitlich starker und schneller Variabilität allerdings auch nur sehr schwer zu erfassen und erst recht zu digitalisieren.

Schlechte Tat = gute Tat?

Die Grundeinstellung, dass der Mensch durch seine Aktivitäten die Ressourcen der Erde, vom Klima bis zu den Bodenschätzen, weitestgehend nur übernutzt oder gar zerstört, ist weit verbreitet und im Allgemeinen wohl auch gerechtfertigt. Dies gilt auch für die ökologische Belastung der Weltmeere. So beklagen wir z. B. – mit Recht, wenn wir an die zehntausende verendeter Seevögel im Gefolge von Havarien von Öltankern denken – die Verschmutzung unserer Meere, insbesondere die der küstennahen, besonders belebten Flachmeerebereiche, in die viele tausende von großen und kleinen Flüssen und immer noch auch viele Schiffe weltweit immer größere Frachten an Schadstoffen entleeren. Gewaltige Algenblüten (beispielsweise die Killeralgen in der Adria) haben dieses Problem uns Mitteleuropäern ins Bewusstsein gebrannt. Auf der anderen Seite jedoch bedeutet dieser riesige Schadstoffinput durch seinen extrem hohen Anteil an Nährstoffen (Stickstoff, Phosphor) zugleich eine immense Düngung des Meeres und damit einen enormen zusätzlichen, den natürlichen Zuwachs übersteigenden Wachstumsschub, vor allem für das Phytoplankton und die sonstige aquatische Kleinlebewelt. Diese bindet Kohlenstoff, und zwar in großen Mengen. Ein beachtlicher Teil des so gebundenen CO₂ (ca. 10%) wird in Form von Ablagerungen toter Substanz am Meeresboden fossilisiert, d. h. für längere Zeiträume (ca. 100–1000 Jahre) gebunden und scheidet damit eben auch für diese Zeit aus dem irdischen (insbesondere atmosphärischen) Kreislauf aus. Dies bedeutet, dass der Mensch hier ungewollt eine Senke für Kohlenstoff aufgebaut hat, die möglicherweise diejenige der terrestrischen Vegetation erheblich übertrifft, erst recht mit weiter zunehmender CO₂-Emission und anhaltendem Klimawandel, und die in Zukunft vielleicht so wirksam wird, dass sie den Menschen vor extremen Klimawandlungen schützt.

Auch solche dem Trend entgegenstehenden Phänomene müssen beachtet, untersucht und möglicherweise sogar in Abwehrmaßnahmen des Menschen gegen den Klimawandel integriert werden (d. h. sicher nicht „absichtliche Verschmutzung“ der Meere, aber u. U. Düngemaßnahmen an geeigneten Stellen zu geeigneten Zeiten). Freilich müssen sie zuvor – auch im Hinblick auf eventuelle „Nebenwirkungen“ – so weit abgeklärt sein, dass sowohl ihre längerfristige Tauglichkeit zum atmosphärischen Kohlenstoffentzug wie auch ihre spezifische Leistungsfähigkeit sicher beurteilt werden können, weil nur so eine sinnvolle Planung und Realisierung wirksamer Maßnahmen möglich sein wird.

Schließlich – last but not least – sollte man bei allen Berechnungen und bei der Planung und Installation von Gegenmaßnahmen auch jenen Input an Energien und Stoffen (Wasser, Gesteinsrohmaterial, CO₂, SO₂ usw.) nicht vergessen, der durch Vulkanausbrüche an die Erdoberfläche und von dort über die Atmosphäre und die Erdoberfläche in den irdischen Kreislauf gelangt. Dass allein solche Stoff- und Energietransfers aus dem Erdinneren (bzw. dem Erdmantelbereich) vor rund 600–700 Mio. Jahren möglicherweise hinreichten, unsere damals u. U. zur Gänze und zugleich kilometerdick von Eis be-

deckte Erde (Schneeballerde) vollständig „abzutauen“ und in einen volltropischen Planeten umzuwandeln (HOFFMANN & SCHRAG 2000), mag die Bedeutung solcher oder anderer „Extras“ im Klimawandelgeschehen beleuchten, wobei sich dieser Vorgang nicht in Jahrzehnten oder Jahrhunderten abgespielt hat, sondern in Zehnern oder gar in Hunderten von Jahrillionen.

Immerhin, solche erdbürtigen und erst recht die zahlreichen potentiellen extraterrestrischen „Klimatreiber“ (vgl. HERGET 2000, S. 56 ff., und BOLDT 2000, S. 74 ff. in diesem Heft) müssen auch beim aktuellen Geschehen mit ins Kalkül gezogen werden. Es könnte uns sonst passieren, dass wir zwar mit einem Treibhaus rechnen, uns jedoch plötzlich in einem Kühlhaus wiederfinden (SEUFFERT 1993).

Eine Zukunftsvision

Am Ende des aktuellen Klimawandels, dem wir alle derzeit – noch weitgehend hilflos – ausgesetzt sind, wird sich nach einer mindestens Jahrzehnte andauernden Übergangsphase mit voraussichtlich besonders starken Defiziten und Negativfolgen für die Erdbewohner ein neues Weltklima mit einer veränderten klimatischen Raumgliederung einstellen. Die rechtzeitige realistische Prognose der wesentli-

chen Merkmale dieser künftigen Klimastrukturen wird für die Menschheit fraglos überlebenswichtig sein. Dies gilt insbesondere für die Kenntnis der qualitativen und quantitativen Merkmale der Ressourcenbilanz, die am Ende dieses Klimawandels resultiert. Wir gehen heute davon aus, dass diese Bilanz für die Menschheit insgesamt sehr negativ sein wird. Andererseits können wir mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit vorhersehen, dass es bei diesem Wandel des Klimas auch Gewinner geben wird. Damit bleibt wenigstens die Hoffnung, dass die Schnittmenge aus Negativ- und Positivfolgen nicht nur das Überleben der Menschheit gewährleisten wird, sondern möglicherweise auch zu besseren Einsichten in die Gesetzmäßigkeiten der Natur und damit zu im echten Sinne nachhaltigen ökologischen Lebens- und Wirtschaftsweisen der künftigen Menschen führen wird. Von der heutigen Bevölkerung der Erde kann man dies trotz aller regionalen und Einzelfallanstrengungen nicht erwarten. Man darf hoffen, dass die Menschheit wenigstens in der Lage ist, die wesentlichen geoökologischen Mensch-Umwelt-Zusammenhänge nicht nur genau genug zu erkennen, sondern dass dies auch so frühzeitig geschieht, dass sich auf dieser Erkenntnis noch Erfolg versprechende Gegenmaßnahmen gründen lassen.

Literatur

- ARU, A. (2000): Mündliche Mitteilung: arua@vaxca1.unica.it
- BENDIX, J., BENDIX A., & M. RICHTER (2000): El Niño 1997/98 in Nordperu: Anzeichen eines Ökosystem-Wandels? *Petermanns Geographische Mitteilungen*, **144** (4): 20–31.
- BOLDT, K. (2000): Zur Steuerung und methodischen Erfassung der globalen Klimavariabilität in den letzten 60 Mio. Jahren. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, **144** (4): 74–85.
- CUBASCH, U., SANTER B. D., & G. C. HEGGERL (1995): Klimamodelle – wo stehen wir? *Physikalische Blätter*, **51**: 269–276.
- Deutscher Bundestag [Hrsg.]: Schutz der Erde.
- HOFFMANN, P. F., & D. P. SCHRAG (2000): Als die Erde ein Eisplanet war. *Spektrum der Wissenschaft*, April: 58–66.
- HERGET, J. (2000): Klimaänderungen in Mitteleuropa seit dem Tertiär. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, **144** (4): 56–65.
- [HTTP://lbs.schule.de/klima/klimawandel/](http://lbs.schule.de/klima/klimawandel/)
- [HTTP://www.bom.gov.au](http://www.bom.gov.au)
- [HTTP://www.sawb.gov.za](http://www.sawb.gov.za)
- HOUGHTON, J. T., MEIRA FILHO, L. G., CALLANDER, B. A., HARRIS, N., KATTENBERG, A., & K. MASKELL [Eds.] (1996): *Climate Change 1995. The Science of Climate Change* (IPPC/WMO/UNEP). Scientific Assessment. Cambridge.
- KUTTLER, W., & E. ZMARSLY (2000): Der natürliche und anthropogene Treibhauseffekt – Ursachen und Auswirkungen. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, **144** (4): 6–13.
- SCHÖNWIESE, C. C. (1994): *Klimatologie*. Stuttgart.
- SEUFFERT, O. (1993): Die Eiszeit lebt! – Lebt die Eiszeit?. *Petermanns Geographische Mitteil.*, **137** (3): 153–167.

OTMAR SEUFFERT, Bensheim

Kommt die „Sintflut“? – Klimatologische Aspekte der Februarflut in Südafrika/Mosambik

Am 10.05.2000 meldete die „Pan-african News Agency“ unter Berufung auf den Distriktverwalter von Chokwe, AGOSTINHO CHIAU, dass mittlerweile 99% der Flutflüchtlinge Mosambiks in ihre Heimatgebiete im Süden zurückgekehrt seien. Die vorerst letzte „Sintflut“ auf der Erde ist also vorüber, der Wiederaufbau beginnt.

Doch wann und wo kommt die nächste große Flut? Die zum Teil extreme Erwärmung großer Teile gerade der innertropischen Meere durch das „global warming“ lässt erwarten, dass dies wieder in einer jener Regionen am Rande der Tropen bzw. in den Subtropen der Fall sein wird, in der nahe gelegene „überhitzte“ Ozeane ein Höchstmaß an Energie für die Verdunstung bereitstellen, in denen aber auch die Corioliskraft schon so stark ist, dass sich kräftige Tiefdruckgebiete bilden können, die die hoch feuchtebeladenen tropischen Luftmassen bündeln und auf

Wanderschaft schicken können. Wenn solche Tiefs auf Land übertreten und relativ küstennah gar noch auf eine Gebirgsmauer treffen (in Südafrika war dies die Große Randstufe), an der sie hochsteigen müssen, sind Intensivregen vorprogrammiert, die normalerweise am und vor dem Gebirgsrand ihre Maxima erreichen. In Räumen jedoch, in denen jenseits der Gebirgsmauer ein hoch gelegenes, ausgedehntes, flaches und trockenes Hochland existiert, über dem sich just in dieser (Jahres-)Zeit ein kräftiges Hitzetief entwickelt hat, kann die Vereinigung der wandernden dynamischen und der Hitzezyklonen zu einer extrem ausgebildeten Tiefdruckfurche führen, die Tropikluft von weit her, insbesondere auch aus dem küstennahen Tiefland ansaugt, und zwar so schnell und so kräftig, dass sich diese dort und selbst am steilen Gebirgsrand bei weitem nicht völlig abregnet –, vielleicht sogar noch Feuchte aufnimmt – sondern erst im meerfernen Hochland, und dort dann ausgesprochene Katastrophenregen niedergehen lässt.

Diese Situation war auch in Südafrika/Mosambik gegeben: ein kräftiges Tief, das um den 5. Februar im Mosambikkanal nahe der Stadt Beira entstanden war und sich von da nach WSW bis in den Ostteil von Botswana bewegte. Dort bildeten beide Tiefs zusammen schon am 7. Februar eine sehr kräftige und tagelang nahezu ortsfeste Tiefdruckfurche, die unter permanentem Nachschub tropisch feuchter Luft enorme Niederschläge vor allem über das Lan-

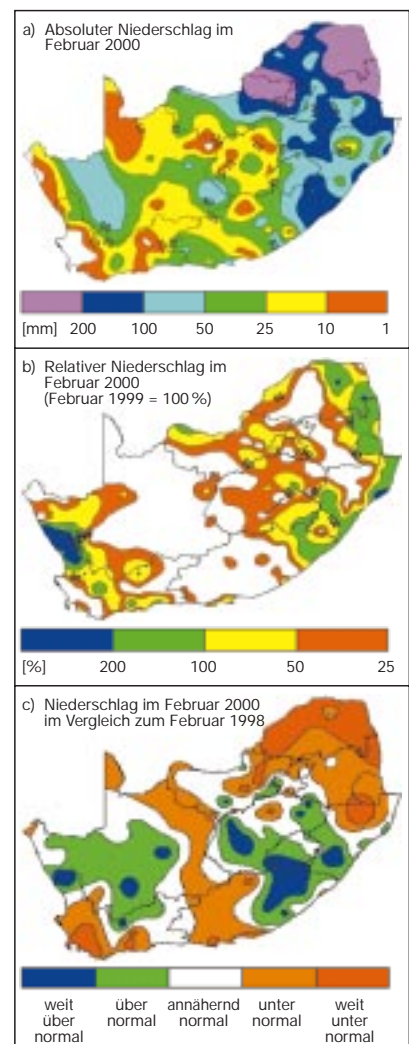
desinnere und die Randbereiche der Randstufe und zum Teil auch über das östliche Tiefland abregnen ließ (Fig. 1 und 2). Die unvermeidbare Folge waren Spitzenabflüsse vor allem in den vom Hochland nach Osten zum Indik hin fließenden Gewässern (Fig. 3), die nun – das ist besonders wichtig – auf ihrer gesamten Länge Nachschub von „oben und unten“ (Regen, Zuflüsse) erhielten.

Dies betraf hier besonders den weit ins Hochland zurückgreifenden Komatifluss (Komatirivier; in Mosambik: Incomati), der in diesen

Fig. 1 Einige Niederschlagssummen aus der Woche vom 4. bis 10. 2. 2000 im süd-afrikanischen Hinterland von Mosambik

Station	Niederschlag [mm]
<i>Große Randstufe</i>	
Venda	684
Louis Trichardt	252
Graskop	544
<i>Tiefland (Lowveld)</i>	
Skukuza	245
<i>Hochland (Highveld)</i>	
Pretoria	195
Johannesburg	272
Swaruggens	206

Fig. 2 Regenextreme im Februar 2000 in Südafrika. Man erkennt die sehr hohen Monatsmittel und die räumliche Konzentration im Norden Südafrikas (a). Vergleiche zu den Vorjahren zeigen gegenüber 1999 vor allem eine Tendenzverstärkung (b), gegenüber 1998 sogar eine völlige Umkehr der räumlichen Verteilung von feuchten und trockenen Regionen (c).



Tagen fast 2,5-mal so viel Wasser führte wie beim letzten Katastrophenabfluss im Gefolge des tropischen Zyklons Demoina (1984) und mit einem um mehr als 5 m höheren Spiegelstand die Grenze nach Mosambik überfloss. Seine Nebenflüsse, der Krokodilfluss – der auch im Hochland entspringt – und der Sabie, der (nahe Graskop) an der Stufe wurzelt, machten gleichzeitig den Südtteil des Krüger-Nationalparks, den beide durchfließen, zu einem einzigen „Strom“, der nahezu alles überschwemmte, auch alle Touristencamps, die ausnahmslos evakuiert werden mussten und fast ohne Ausnahme erhebliche Schäden erlitten.

Die schlimmsten Schäden allerdings traten im Süden von Mosambik auf und damit just in jenem Raum, in dem es, erst recht im Vergleich zum Landesinnern Südafrikas, am wenigsten geregnet hatte (Fig. 4). Doch im küstennahen Flachland hatten die Fluten wegen des extrem geringen Gefälles der Flüsse und der gesamten Landschaft, wegen der Rauigkeit der allenthalben von landwirtschaftlichen Kulturen sowie von Naturvegetation (Krüger-Nationalpark usw.) bestandenen Landschaft und – last but not least – auch wegen des Düngürtels entlang der Küste nicht die geringste Chance auf einen raschen Abfluss. Die Folgen sind bekannt. Weiträumige, lang andauernde Überschwemmungen, die enorme Sachschäden anrichteten, viele Menschen das Leben kostete und andere zwang, sich tagelang auf Dächern, Bäumen oder Telegrafmasten „über Wasser zu halten“, und von denen dennoch viele von den Hubschraubern der Retter nicht mehr rechtzeitig erreicht werden konnten.

Extreme Regenmengen in kurzer Zeit kommen in tropisch/subtropischen Regionen lokal immer wieder vor, ohne gleich katastrophale Auswirkungen zu haben. Wenn diese allerdings räumlich und zeitlich stark gebündelt auftreten, dann sind Überschwemmungen oder gar Katastrophen unvermeidlich, selbst in einer Region

Fig. 3
Binnen weniger Stunden schwillt ein kleiner Nebenarm des Komati zu einem reißenden Fluss (Foto: SAWB).



Fig. 4
Zu weiträumigen, lang andauernden Überschwemmungen mit enormen Sachschäden kam es vor allem im küstennahen Tiefland von Mosambik (Foto: SAWB).



mit einem gut entwickelten Gewässernetz und mit einer so hoch entwickelten und effizienten Wasserwirtschaft wie in Südafrika. Umso mehr gilt dies für stärker aride (semiaride oder vollaride) Gebiete, in deren meist sehr flachen und nur von ganz wenigen durchgängigen Abflussadern durchzogenen Gebieten Überschwemmungen recht häufig auftreten, allerdings meist nur kurze Zeit andauern und auch nur geringe oder keine Negativwirkungen haben, weil diese Gebiete siedlungsarm sind und außerdem wirtschaftlich wenig und zudem ausschließlich durch „mobile“ Wirtschaftsformen (Weidewirtschaft, Nomadismus) genutzt werden. In diesen Klimazonen am Trockenrand der Ökumene sind derartige Niederschlagsanomalien – die sich im Gefolge des „global warming“ zum Normalfall entwickeln können oder schon entwickelt haben – eher willkommene Vorgänge, weil sie hier in toto weit mehr Nutzen als Schaden anrichten.

Beispiele hierfür sind die jüngsten hygrischen Extremjahre im deshalb mittlerweile „grünen“ Na-

mibia und die seit Jahren andauernden Niederschlagsmaxima in den Wüsten- und Wüstensteppengebieten des zentralen und westlichen Australiens, vor allem im Landesinnern. Hier jagt seit Jahren ein Feuchteextrem das andere, ohne dass dies bisher größere ökologische oder ökonomische Gewinne abgeworfen hätte, denn dazu muss sich erst noch die Vegetation dem verstärkten Feuchtereime anpassen – die Weidetiere brauchen nicht nur Wasser, sondern auch Futter. Dies wird als „ständige Einrichtung“ wohl noch einige Zeit auf sich warten lassen. Und so lange dominieren selbst hier die negativen Auswirkungen, etwa dergestalt, dass viele Dünen im Landesinnern heute nicht mehr weitergebildet, sondern überformt oder zerstört, insbesondere durch Fließwasser zerschnitten werden. Dies stört zumindest den Tourismus, der in dieser Region jedenfalls bisher eine wesentliche Wirtschaftsgrundlage darstellt.

OTMAR SEUFFERT, Bensheim