

Ber. d. Reinh.-Tüxen-Ges. 22, 7-33. Hannover 2010

Klimawandel im System Erde

- Richard Pott, Hannover -

1. Einleitung

Der erfolglose globale „Klimagipfel“ aller Staaten der Erde in Kopenhagen vom 7.-18. Dezember 2009 ist vorbei. Aber immer noch gilt: Die sieben drängendsten Weltprobleme der heutigen Zeit sind Klimawandel, globale Umwelteinwirkungen von Chemikalien, wie beispielsweise Ozonabbau, Gefährdung der Weltmeere durch Eutrophierung und Überfischung, Verlust biotischer Vielfalt und Entwaldung, Bodendegradation und Süßwasserverknappung beziehungsweise Wasserverschmutzung und Wassermangel. Eingriffe in natürliche Ökosysteme haben heute zum Teil das Ausmaß und den Charakter von Naturgewalten angenommen.

Klimawandel war immer. Man kann als Geowissenschaftler das Klima nur als ein Teilsystem der ständig variablen komplexen Erde verstehen, das zudem noch durch extraterrestrische Größen wie solare Strahlung und das Weltall selbst mit seinen orbitalen Einflüssen beherrscht wird. Dieses Thema wurde eingehend und fundamental auf einer Fachtagung im Vorfeld der Kopenhagen-Konferenz vom 2.-4. November 2009 in Berlin diskutiert. Initiatoren und Veranstalter dieser Tagung zum Thema „Klimawandel – System Erde“ waren die führenden geowissenschaftlichen Forschungseinrichtungen Deutschlands, das GFZ (Geoforschungszentrum Potsdam, Prof. Dr. Dr. h. c. Reinhard HÜTTL), die Senckenbergische Naturforschende Gesellschaft in Frankfurt am Main, Prof. Dr. Volker MOSBRUGGER) und die Alfred-Wegener-Gesellschaft in Bremerhaven mit ihrer Präsidentin, Frau Prof. Dr. Karin LOCHTE. Davon gibt es eine erste Zusammenfassung (HÜTTL, LOCHTE & MOSBRUGGER 2009). Wir wissen schon seit Charles R. DARWIN (1809-1882), dass sich alles Leben auf der Erde in ständiger Anpassung an diesen Wandel vollzogen hat. Doch im Spiel mit der Angst der Menschen wird der Klimawandel immer neu und mit anderen Varianten als „Neue Bedrohung“ oder gar als „Klimakatastrophe“ schlechthin für unsere Erde und die Menschheit dargestellt (u.a. GORE 2006, 2009).

Das geschieht insbesondere immer dann, wenn Umweltgipfelkonferenzen zu diesem Thema einberufen werden. Gerade inmitten der aktuellen Klimadiskussion vor, während und nach der „Kopenhagen-Konferenz“ vom Dezember 2009 und über die Einhaltung, die Umsetzung oder die Nachfolge des „Kyoto-Protokolls“ zum Schutz des Klimas von 1997, sind wir wieder soweit: Nach den globalen Umwelt- und Klimakonferenzen von Toronto 1988, Rio de Janeiro 1992, Berlin 1999, Den Haag 2000, Johannesburg 2002, Buenos Aires 2004, Nairobi 2006, Heiligendamm und Bali 2007 sowie Kopenhagen 2009 werden die komplexen Fragen immer wieder neu aufgerollt. In Kopenhagen konnte man fragen, was kostet die Welt? Waren das Rollenspiele der etablierten Industriestaaten gegen die Emporkömmlinge der ehemaligen „Dritten Welt“ Afrikas, Asiens und einiger Länder Südamerikas mit ihrem neuen Promotor und Fürsprecher China in einer neuen Führungsrolle? Welche Rolle im Gezerre um Geld, Einfluss und dauerhafte Transfers spielt überhaupt das Klima selbst (GERMANWATCH 2008, PLÖGER 2009)? Im Klimavertrag von Kopenhagen sollte unter anderem auch zwischen den Tropenländern und den Industriestaaten zum ersten Mal vereinbart werden, dass die unsichtbaren Dienstleistungen von Ökosystemen einen Marktwert haben sollen: Wer den Regenwald

bewahrt und damit Kohlenstoffspeicher schont und Artenvielfalt schützt, soll dafür direkt oder mit handelbaren Klimazertifikaten belohnt oder gar bezahlt werden. Das wäre ein grundlegendes und wichtiges neues Handlungsfeld und Forschungsthema für unsere geobotanischen Disziplinen. Dies ist auch ein innovativer Aspekt in der globalen Klimadiskussion; ökologische und letztendlich sozio-ökonomische Fragen werden hiermit neu in die Umwelt- und Klimadiskussion implementiert. So wird auch der dringende Natur- und Artenschutz endlich in die internationalen Diskussionen und Verträge einbezogen, ein Faden, den wir aufgreifen sollten! Ein Fünftel der globalen Emissionen an CO₂ gehen auf das Konto der Tropenwaldrodungen.

Das finanzielle Geschachere in Kopenhagen 2009 um die konträren Interessen der sogenannten Drittweltländer, der Entwicklungsländer und der alten Industrieländer, – vor allem Europa und die USA –, die größtenteils ihre eigene Entwicklung und Industrialisierung auf Kosten ersterer, zumeist noch ehemaliger Kolonien zustande brachten, war wohl noch ein letzter Ausdruck eines vergangenen Rollenspiels globaler Entwicklungshilfepolitik. Die Zukunft wird auf diesem Feld neue politische Wege zeigen müssen.

Viel wichtiger in diesem Zusammenhang ist und bleibt doch wohl die Frage nach einer wirklichen globalen Bedrohung durch den aktuellen Klimawandel. Nicht allen Menschen und politischen Entscheidungsträgern sind die Grenzen der derzeit verfügbaren Klimamodelle, die meist in Computersimulationen vorliegen, in ihren Dimensionen und in ihren Wirklichkeitsbezüge verständlich, nachvollziehbar und bewusst.

2. Ist die gegenwärtige „Klimahysterie“ unbegründet?

Der CO₂-Gehalt der Lufthülle ist seit Beginn der „Industriellen Revolution“ in der Mitte des 19. Jahrhunderts stark angestiegen. Deshalb ist das Thema „Klimawandel“ derzeit in aller Munde und wird durch geschickte Wissenschafts- und Politpropaganda inzwischen auch in der Mitte zumindest der industrialisierten Gesellschaften unseres Globus angenommen.

Liegen wir jetzt in der Kohlendioxid-Diskussion richtig – ist das CO₂ ein quasi finales Giftgas modernen Wirtschaftens? Wie forciert Wasserdampf, das wichtigste Treibhausgas überhaupt, unsere Klimaerwärmung? Gibt es denn eine globale Klimaerwärmung – ein „Global warming“ oder sind das nur regional beobachtbare Phänomene? (vgl. WALTHER et al. 2001, PARMESAN & YOHE 2003, COLWELL et al. 2008). Welche Folgen beobachten wir derzeit und welche Prognosen lassen sich wissenschaftlich für die Zukunft ableiten? Ist es denn möglich, dass wir uns mit unseren Abgasen in eine neue Warmzeit heizen, in der die Binneneisvorkommen in der Antarktis oder in Grönland schmelzen, flache Inseln untergehen und das Marschenland der Nordsee wieder überflutet wird? Dass die Nordsee das kann, hat sie schon mehrfach in prähistorischer Zeit und in geschichtlicher Zeit, vor allem im Mittelalter ohne den CO₂-emittierenden Industriemenschen bewiesen. Davon zeugen der Dollart, der Jadebusen und die Geestkerninseln Nordfrieslands (BEHRE 2003, 2008, POTT 2003).

Biogeographische Veränderungen einiger mariner und terrestrischer Lebensräume werden oftmals als Folgen und Zeichen des neuartigen Klimawandels gewertet (LOARIE et al. 2009). Ist das alles natürliche Fluktuation oder Menschenwerk? Diese Fragen gilt es nun einzeln zu behandeln und nach dem derzeitigen Kenntnisstand der Naturwissenschaften abzufragen.

Alle die mit dem Thema Klima zu tun haben, sind sich weitgehend einig, dass wir derzeit einen Klimawandel an manchen Orten der Erde erleben. Ist der nun hausgemacht, also von Menschen verursacht, oder natürlich, also ein normales Phänomen der „gottgewollten“ Klimaschwankungen auf unserer Erde, die wir ja für die geologische Erdvergangenheit zu allen

Zeiten und Perioden nachvollziehen und wissenschaftlich mit Warm- und Kaltzeiten belegen können, wie dies eindrücklich die neuen Zusammenstellungen von FAGAN (2009), KLOS-TERMANN (2009) und SIROCKO (2009) zeigen?

3. Klima und Wetter

Klima ist nach der geographisch-naturwissenschaftlichen Definition „die für einen Ort, eine Landschaft oder einen größeren Raum typische Zusammenfassung der erdnahen und die Erdoberfläche beeinflussenden atmosphärischen Zustände und Witterungsbedingungen während eines längeren Zeitraumes in charakteristischer Verteilung der häufigsten mittleren und extremen Werte“. So hat es der Klimatologe Joachim BLÜTHGEN (1966) definiert. Noch eines muss vorangestellt werden: Klima und Wetter sind Begriffe, die wir auseinanderhalten sollten: Das Klima betrifft das großräumig-langfristige Geschehen; Wetter beinhaltet die kurzfristigen, lokalen, also an einem Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt wirksamen Kombinationen der atmosphärischen Elemente, wie zum Beispiel feuchte und trockene Sommer, kalte oder milde Winter, Hoch- und Tiefdruckgebiete während der Jahreszeiten etc.. Langfristig bilden die Witterungsfaktoren, also die Wetterabläufe, die jeweiligen Klimafaktoren. Diese messbaren Einzelercheinungen zur Charakterisierung des Klimas sind Strahlung, Luftdruck, Luftfeuchte, Temperatur, Wind, Verdunstung, Niederschlag und Bewölkung. Alle diese sogenannten Klimatelemente werden registriert, gesammelt, und für längere Zeiträume, im Regelfall mindestens 30 Jahre, nach Mittelwerten, Häufigkeiten und Abfolgen von Extremen ausgewertet. Klima ist also die „Synthese des Wetters über einen dreißigjährigen Zeitraum“, das ist die derzeit gültige Definition. So werden für bestimmte Großräume der Erde Makroklima definiert, wonach entsprechend den allgemeinen großklimatischen Bedingungen verschiedene Klimate oder Klimazonen erdweit existieren:

- polare und arktische Klimate des Ewigen Frostes und der Tundren,
- boreal-montane, winterfeuchte und wintertrockene Klimate,
- gemäßigte, feuchttemperierte Klimate,
- mediterranoide, warme, sommertrockene Steppenklimate,
- subtropische, warme wintertrockene Klimate, Wüstenklimate und
- tropische Savannen- und Regenwaldklimate.

Klimazonen sind großräumige Gebiete der Erde, in denen die Klimabedingungen gleichartig sind. Klimazonen sind demnach im Wesentlichen durch die unterschiedlichen Einstrahlungsbedingungen auf der Erdoberfläche und die damit verbundene allgemeine Zirkulation der Atmosphäre bedingt. Da sich die natürliche Vegetation den Klimaten sehr eng anpasst, zeigen Klimazonen und Vegetationszonen eine weitgehende Parallelität. Das ist eine Grundsäule der Geobotanik. Deshalb wird dieses auch hier erwähnt, denn die Klimageschichte, das heißt der durch die Paläoklimaforschung bekannte Ablauf des räumlichen und zeitlichen Wechsels der Klimabedingungen in erdgeschichtlicher Zeit, zum Beispiel die Klimaschwankungen im Verlauf des Tertiärs und der pleistozänen Eiszeiten und deren Vegetationswandel sind heute unsere essentiellen Forschungsdisziplinen, wie sie bei POTT et al. (1995), POTT (2005) und POTT & HÜPPE (2007) beschrieben sind.

4. System Erde

Die Analyse der Dynamik des Klimas unserer Erde wird immer komplexer, weil wir heute nicht nur physikalische, chemische und geologische, sondern inzwischen auch biologische

Prozesse berücksichtigen müssen. Dies impliziert zum Beispiel, dass Klimamodelle, die sinnvoll für die Rekonstruktion der Vergangenheit und für die Prognose der künftigen Entwicklung verwendet werden sollen, die Biosphäre nicht nur als statische Randbedingung, sondern als dynamische Prozesskomponente berücksichtigen müssen, wie es V. MOSBRUGGER (2003) annahmt: Dieses ist jedoch bislang in den meisten großen Klimamodellen nicht realisiert. So erscheinen unter diesem Blickwinkel auch die Phänomene und Prozesse eines „anthropogenen Klimawandels“ unter einem etwas anderen Licht: Die Rolle des Menschen im System Erde erweist sich vielleicht als nicht so einmalig – daraus soll aber auch nicht eine Verharmlosung der aktuellen menschlichen Eingriffe im System „Erde“ abgeleitet werden.

Der Klimawandel ist ein aktuelles Thema, welches wir auf dieser Jahrestagung auch aus geobotanischer Sicht behandeln wollen. „Klimawandel und Vegetationsveränderungen – Phantom oder Wirklichkeit“ haben wir uns als Tagungsmotto gegeben. Können wir wissenschaftlich belegbare und nachvollziehbare Daten liefern, oder beschreiben wir nur phänomenologische, also nicht kausal begründbare Erscheinungen? Gibt es Kausalanalysen, oder nicht? Welche Vegetationsveränderungen in regionaler oder globaler Sicht kennen wir wirklich? Das sind die neuen Fragen.

Wir haben es inzwischen mehrfach und an vielen Beispielen gesehen, bei näherer Prüfung der Informationen, die zu diesem gesamten Problemkreis zur Verfügung stehen, stellt sich jedoch heraus, dass die Gründe für beobachtete globale Erwärmungen keineswegs klar sind und das der vermutete menschliche Einfluss wohl doch in enger Wechselwirkung mit der natürlichen Veränderlichkeit des Klimas steht. Die jetzt registrierte Erwärmung der Erde hat sich offenbar im Takt mit der zunehmenden Industrialisierung über die letzten 150 Jahre entwickelt, nachdem eine mehrere hundert Jahre andauernde kalte Klimaphase, die „Kleine Eiszeit“, welche auf der nördlichen Hemisphäre von ca. 1450 bis 1780 besonders ausgeprägt war, zu Ende ging und sich die Durchschnittstemperaturen wieder auf die nacheiszeitlichen Mittelwerte einstellten, welche sie aber in den letzten 20 Jahren überschreiten.

Wer also meint, wir könnten das Klimageschehen heute vollständig kennen und begreifen, unterschätzt die große Zahl von Variablen und Wechselwirkungen im Klimageschehen, die wir bisher kennen gelernt haben. Wir können das Klima unseres Planeten derzeit nur in Szenarien berechnen und durchspielen, eine genaue Vorhersage ist noch nicht möglich. Wir haben auch bislang gesehen, dass Klimaänderungen etwas ganz natürliches sind. Das Wort „Klimaschutz“ verdeutlicht unfreiwillig wegen des systembedingten Klimawandels sogar eine grundlegende Ignoranz, wie dies auch R. HÜTTL (2008) formuliert: Nicht wir müssen das Klima schützen, sondern wir müssen uns vor möglichen Klimaänderungen, auch den von uns selbst verursachten, schützen.

5. Klimawandel und Vegetation

Wir haben es schon mehrfach gesehen, die jüngste Vergangenheit zeichnet sich durch eine Häufung von Jahren mit überdurchschnittlich warmen Temperaturen aus, und wir beobachten seit einigen Jahren deutliche Veränderungen nicht nur in den alpinen Floren weltweit, speziell wird dieses Phänomen besonders deutlich hinsichtlich des „Höhersteigens“ zahlreicher alpiner Pflanzen und entsprechender Pflanzengesellschaften. Näheres hierzu findet man unter anderem bei Georg GRABHERR et al. (1994), Gian-Reto WALTHER (1999, 2002, 2004), WALTHER et al. (2002, 2005) sowie POTT & HÜPPE (2007). Die Areale einiger Pflanzen und Tiere ändern sich derzeit als mögliche Antwort auf den derzeitigen Klimawandel; ähnliches mag für ganze Vegetationszonen und die Zonobiome der Erde auf uns zukommen – so wie es in der Erdvergangenheit ja schon mehrfach erfolgt ist – und nach den neuesten Modellen und

Prognosen auch in der Zukunft erfolgen kann (PARMESAN 2006; NAGY & GRABHERR 2009; LOARIE et al. 2009).

Ebenso sind in jüngster Zeit weitere Phänomene von Vegetationsveränderungen zu beobachten, wie beispielsweise die Ausbreitung immergrüner Holzgewächse als Lianen und Sträucher in den sommergrünen Wäldern Mitteleuropas, wo wir eine aktuelle Ausbreitung des Efeus (*Hedera helix*) beobachten (DIERSCHKE 2005), oder am Südrand der Alpen im Tessin, wo nachweislich seit den 1970er Jahren anhaltend milde Winter die Ausbreitung von immergrünen Kampferbäumen (*Cinnamomum glanduliferum*) und wärmebedürftigen Palmen (*Trachycarpus fortunei*) ermöglichen. Sind die Palmen also wieder in der Schweiz heimisch, wie im Tertiär? Oder kann eine Folge kalter Winterfröste dies wieder zunichte machen?



Abb. 1: Winteraspekt eines sommergrünen Eichenmischwaldes in der Südschweiz, reich an exotischen, immergrünen Arten, vor allem Hanfpalme (*Trachycarpus fortunei*) und Kampferbaum (*Cinnamomum glanduliferum*) aus Südostasien (Lago Maggiore, 2003, aus POTT 2005).

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen den Winteraspekt eines sommergrünen insubrischen Eichenmischwaldes in der Südschweiz, reich an exotischen, immergrünen Gehölzen, vor allem *Trachycarpus fortunei* und *Cinnamomum glanduliferum* aus China. Dieses Waldbild

entspricht annähernd dem des ausgehenden Tertiärs, seit dem Eozän vor 54 Millionen Jahren, als unter damaligen pantropischen Klimabedingungen diese Gehölze schon einmal heimisch waren. Sie dürften bis ins Miozän vor 12 Millionen Jahren existiert haben, als das Klima sich zum warm-gemäßigten Typ abkühlte. Bis dahin waren also solche teilimmergrünen Wälder im damaligen „Europa“ heimisch – und die Alpen in ihrer heutigen Form gab es damals noch gar nicht. Frank KLÖTZLI et al. (1996) und Gian-Reto WALTHER (2001) haben diesen anlaufenden Biomwandel am heutigen Südrand der Alpen in Insubrien mit dem neuen Fachwort „Laurophyllisation“ bezeichnet. Damit ist die neuartige Ausbreitung immergrüner, lorbeerähnlicher Gehölzpflanzen in die sommergrüne Waldvegetation Mitteleuropas gemeint.



Abb. 2: Reichhaltiger Jungwuchs immergrüner Baum- und Straucharten, wie *Trachycarpus fortunei*, *Prunus laurocerasus*, *Ruscus aculeatus* und *Laurus nobilis* kennzeichnet viele sommergrüne Laubwälder Insubriens.

Weitere Abbildungen (3 und 4) zeigen Efeu-behangene Eschen am Waldrand des hannoverschen Stadtwaldes Eilenriede am Neujahrstag 2010 und deren Frostschäden am 17. März 2010, die ich seit über 20 Jahren von meinem häuslichen Schreibtisch aus sehen kann und wo das Efeu lichtabhängig nach Holzeinschlägen sehr schnell bis in den Kronenbereich der Bäume emporgewachsen ist. Auch die Borkenrauhigkeit der etwa 60-70 Jahre alten Waldbäume dürfte ursprünglich für das erfolgreiche Anhaften von *Hedera helix* wichtig gewesen sein. Die Eilenriede war im und kurz nach dem 2. Weltkrieg durch Zerstörung und Holzentnahme stark in Mitleidenschaft gezogen und wurde wieder aufgeforstet (ELLENBERG 1971; SPEIER & POTT 1999). *Hedera helix* ist sehr empfindlich gegen Trittbelastung und reagiert sofort mit Schädigung der Blätter und der jungen Sprosse. Vielleicht ist die Ausbreitung von *Hedera helix* auch nur ein Phänomen der Ruhigstellung und Strukturveränderung in unseren Wäldern seit dem zweiten Weltkrieg. Das Efeu war über Jahrhunderte hinweg auch ein begehrtes Futterlaub. Sein Name *Epheu* (mittelhochdeutsch *ephöu* oder *ebehöu*, vermutlich in Anlehnung an *houwi* = Heu) lässt sich etymologisch gut ableiten und sogar noch im ersten Weltkrieg ist verbürgt, dass ganze Schulklassen in den Wäldern Deutschlands Efeublätter für die Versorgung der Frontpferde sammelten.

Hinter uns liegen ungewöhnlich warme Jahre. Die Klimaparameter weichen seit den 1970er Jahren immer stärker von den Werten ab, die wir bisher für normal gehalten haben. Ist diese Beobachtung überhaupt zulässig? Ist die Lebensspanne eines Menschen vielleicht nicht zu kurz, um klimarelevante Aussagen mit entsprechenden Veränderungen in Natur und Landschaft machen zu können? Bei allen Diskussionen um den Klimawandel und dessen Auswirkungen auf die Artenzusammensetzung der Vegetation darf man nicht vergessen, dass sich



Abb. 3: Efeu-behangene Eschen im Hannoverschen Stadtwald Eilenriede an der Walderseestraße am 1. Januar 2010.

auch die betrachteten Landschaften durch direktes Zutun des Menschen verändert haben und sich ständig noch verändern.

Welche Rolle spielt beispielweise bei der Laurophyllisation seit den 1970er Jahren die aufgelassene Wald- und Holznutzung in den Regionen der insubrischen Schweiz und in Norditalien? Können nicht in den insubrischen Wäldern die Folgen fehlender Ziegen- und Schafbeweidung nach dem Ende des 2. Weltkrieges und der anschließenden Notzeiten oder der intensiveren Holznutzung und Sammelwirtschaft jetzt nach nunmehr 60 Jahren Ruhe im Wald eine solche – vielleicht regional begrenzte – Etablierung exotischer immergrüner Gehölze aus den



Abb. 4: Die gleiche Baumgruppe am 17. März 2010 nach dreimonatigem Dauerwinter mit starken Frostschäden am Efeu (*Hedera helix*, Detail).

Parks und Gärten der Villen an den norditalienischen Seen ermöglichen? Ähnliches mag für die Ausbreitung der immergrünen *Ilex aquifolium* für die Wälder Nordwestdeutschlands,

Dänemarks und Norwegens zutreffen, wo Silje BERGER et al. (2007) eine neuartige Ausbreitung an den nördlichen Arealgrenzen dokumentieren konnten. *Ilex aquifolium* ist der europäische immergrüne Laubbaum, dessen Verbreitungsgebiet sich am weitesten nach Norden erstreckt. Die nördliche Verbreitung der Stechpalme wird durch starke Frostereignisse, also durch die Winterkälte, limitiert. Ihre Arealgrenze gilt seit IVERSEN (1944) als klassische, durch die 0°-Januar-Isotherme bedingte, also klimagesteuerte Arealgrenze (POTT 1990, 1995; BERGER et al. 2007). Sind hier Änderungen manifestiert? *Ilex aquifolium* ist eine atlantisch-subatlantisch verbreitete Gehölzart, die im Westen Frankreichs freistehend als Baum existieren kann, weiter nach Mitteleuropa – westlich der Weser – jedoch auf den Kronenschluss der Buchen und Eichen im Waldbestand angewiesen ist, wo sie als immergrüner Strauch den Überhalterschutz dieser Bäume benötigt. Diese Baumschicht schützt den *Ilex* im Spätwinter und vor allem im Frühling durch seine Gegenstrahlung vor den letzten Spätfrösten (POTT & HÜPPE 2007).

Auch die derzeit in Nordwestdeutschland – vor allem in Westfalen – beobachtbare Ausbreitung und Etablierung des submediterranen Walnussbaum (*Juglans regia*) und der Esskastanie (*Castanea sativa*) vor allem in den dortigen Buchen-Eichen-Wäldern vom Typ des Fago-Quercetum ist vielleicht ebenfalls der heutigen idealen Kombination fehlender Holz- und Waldnutzung und der Klimaerwärmung zuzuschreiben. *Juglans regia* und *Castanea sativa* sind nach Nordwestdeutschland zu römischer Zeit gelangt und wurden damals in den römisch besetzten rheinischen Provinzen eingebracht, als das Klima deutlich günstiger war als heute (BURRICHTER et al. 1988). Die Römer hatten schließlich Europa „in Sandalen“ erobert und der kostspielige Weinimport mit römischen Sorten aus Italien war seinerzeit sogar in England verboten, da man hier vor Ort bis zum Hadrianswall ertragreich eigenen Wein anbauen konnte.

Welche Ursachen der heutige Klimawandel auch immer hat, seine Auswirkungen müssen wir zur Kenntnis nehmen: Es gibt vielleicht mancherorts längere Trockenperioden, extreme Fröste werden eventuell in den temperaten Klimazonen seltener, die Häufigkeit von Starkre-



Abb. 5: Massenfunde von Schalen der Amerikanischen Schwertmuschel (*Ensis directus*) am Strand der Nordseeinsel Juist im Frühling 2010 (© Nationalpark Nds. Wattenmeer und Nds. Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz).

gen kann aber zunehmen. Im kalten Januar 2010 starben beispielsweise im Wattenmeer riesige Bestände des Neozoen *Ensis directus* (Abb. 5) mit neuen künftigen Auswirkungen im Wattenmeer-Ökosystem. All dies kann Auswirkungen auf Vegetation und Landschaften haben, die uns derzeit vertraut sind. Doch nicht jede Veränderung der klimatischen Bedingungen zieht automatisch eine Veränderung der Vegetation nach sich. Wir haben es schon mehrfach gesehen, das Klima ist während der vergangenen Jahrtausende nie konstant gewesen. Immer wieder wurden bestimmte Organismen zurückgedrängt und andere gefördert.

Wenn es eine hohe Variabilität der Individuen innerhalb einer Art von Tieren, Pflanzen oder Mikroorganismen gibt, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass immer wieder andere in Abhängigkeit von den sich wandelnden Umweltereignissen am Leben bleiben. Letztlich sind vor allem diejenigen Individuen an einem Standort zu finden, die alle Schwankungen der Witterungsbedingungen überdauert haben. Gerade die Pflanzen und Tiere Mitteleuropas überstanden in den vergangenen Jahrtausenden verschiedene Klimaänderungen sowohl Plusminus zwei Grad Celsius höhere Mitteltemperaturen als auch solche, die nur einige Grade kälter waren – mit allen dazugehörigen Ereignissen der Witterung (POTT & KÜSTER 2007).

Erhebliche Klimaänderungen können Pflanzenarten aussterben lassen oder andere in ihrer Ausbreitung fördern. Dabei spielt aber oft die Konkurrenz zu anderen Arten eine Rolle. Wärmere und trockenere Bedingungen benachteiligen eine Art und fördern die anderen. Ganz allmählich verändert sich auf diese Weise eine Lebensgemeinschaft über Sukzession. In Wäldern setzt sich eine neue Baumart erst allmählich durch (s. KÜSTER 2010, in diesem Band).

Doch wenn von diesen Veränderungen die Rede ist, darf nicht vergessen werden, dass die meisten Landschaften in unserer Umgebung viel stärker vom menschlichen Einfluss geprägt sind, als auf den ersten Blick klar wird. Wälder abzuholzen verändert die lokalen klimatischen Bedingungen viel stärker als der bisher beobachtete Klimawandel (z.B. POTT & HÜPPE, 2007). So liegen auf einer Freifläche die Temperaturschwankungen an einem Sommertag fast fünf Grad höher als in einem umgebenden Wald. Sind die Freiflächen nicht zu groß und grenzen sie an Waldgebiete an, können die Temperaturveränderungen allerdings durch ausgleichende Luftströmungen nivelliert werden. Das Mikroklima der bodennahen Luftschichten ist also nicht zu unterschätzen und zu vernachlässigen. Zusätzlich gestaltete der Mensch die Landschaft: Grundwasserstände wurden verändert, es entstanden Böschungen mit sonnenexponierten Flächen, zahlreiche Pflanzenarten wurden in Gärten eingeschleppt oder auf andere Weise in ihrer Ausbreitung gefördert, andere Arten dezimiert.

In vielen Landschaften lassen sich derzeit massive Veränderungen beobachten, die uns auch vielleicht nur deswegen besonders auffallen, weil wir zum ersten Mal die dort vorkommenden Arten mit exakten Erfassungen aus der Vergangenheit vergleichen können, etwa aus dem 19. oder frühen 20. Jahrhundert. Immergrüne Gewächse breiten sich unter anderem in den Südalpen aus, wie wir im vorigen Abschnitt gesehen haben. Die Veränderungen können auf den Klimawandel zurückgehen, aber auch zahlreiche andere Ursachen haben, die Ursachen müssen im Einzelfall klar und deutlich analysiert werden. Besonders große Auswirkungen auf die Vegetation hat derzeit das Aufgeben von Nutzungen auf Grenzertragsflächen in peripheren Landschaftsräumen. Weil es sich nicht mehr lohnt, kleine Äcker im Gebirge oder auf Inseln zu bewirtschaften, setzt auf ihnen eine Sekundärsukzession ein. Zunächst kommen Büsche auf, dann Bäume, schließlich Wald. Vor allem in den frühen Sukzessionsstadien können sich Pflanzenarten ausbreiten, die zuvor in Gärten der Umgebung angepflanzt worden waren. Das gilt auch, wenn Industrie- oder Eisenbahnanlagen aufgelassen werden. Standorte auf Schotter oder Asphalt sind besonders trocken und warm. Bahndämme und Halden haben unmittelbar der Sonne zugewandte Hänge mit spezifischen neuen Standortbedingungen. Dort finden Pflanzen- und Tierarten geeignete Lebensbedingungen vor, die es bisher in bestimm-

ten Regionen nicht gab. Gerade dort breiten sich, unabhängig vom Klimawandel, wärmeliebende Arten aus. Solche linearen Migrationen beobachten wir schon länger entlang von Bahnanlagen mit *Buddleya davidii*, *Ailanthus altissima*, *Syringa vulgaris* und *Laburnum anagyroides* (POTT 1995). In Flusstälern Mitteleuropas sehen wir mancherorts die Ausbreitung mediterraner Elemente, wie *Ficus carica*, *Celtis australis* und *Cornus mas*.

6. Mögliche Ursachen des Klimawandels

Palöoklimawissenschaftler diskutieren bislang ständig Zweifel an einem ausschließlich anthropogenen Klimawandel, betonen aber auch, dass der Einfluss des modernen Menschen auf eine globale Erwärmung durch die Emission von Treibhausgasen nicht vollkommen auszuschließen ist. Es ist darüber hinaus schon lange bekannt, dass die Wissenschaftler mit geologischem oder paläoökologischem Hintergrund bei der oftmals in den letzten Jahren prognostizierten Klimaentwicklung, die heute mit den Schlagworten „Global Warming“ oder „Klimakatastrophe“ belegt sind, mit Extrapolationen von Daten seit der Industrialisierung im 19. Jahrhundert schon immer eher zurückhaltend waren.

Es ist außerdem hinlänglich bekannt, dass der Klimawandel seit dem Präkambrium, also seit mehr als 3 Milliarden Jahren, mit sich ständig verändernden Klimazonen in globaler Sicht sowie mit immer wiederkehrenden Warm- und Kaltphasen offenbar Spielart einer „gottgewollten Ordnung“ ist, der wir ungezählte zyklische oder periodische Klimaveränderungen mit wiederkehrenden Abkühlungen und Erwärmungen in manchen Regionen der Erde verdanken. So wissen wir heute durch zahlreiche Messwerte, sogenannte Palöoklima-Proxydaten, dass sich die Erde seit etwa 2,588 Millionen Jahren im quartären Eiszeitalter befindet (GIBBARD et al. 2010) und dass unser Globus seither allein in dieser Phase zahlreiche Kaltzeiten erlebt hat, wobei die sie trennenden Warmzeiten jeweils rund zehnmals kürzer waren als die Kaltzeiten. Selbst innerhalb der Kaltzeiten gab es Zwischenwarmzeiten, die das rauhe Klima kurzzeitig etwas freundlicher erscheinen ließen. Diese Klimaschwankungen sind jedes Mal deutlich in zahlreichen Pollendiagrammen mit entsprechenden Vegetationsschwankungen repräsentiert. Auf der nördlichen Hemisphäre wuchsen während der Eiszeiten gigantische Inlandeischilder, die weite Gebiete Nordamerikas und Eurasiens bedeckten, die aber in den Warmzeiten wieder abschmolzen. Der heute noch vorhandene grönländische Eischild ist ein solcher Rest, der bei weiterer Erwärmung in Zukunft auch noch schmelzen kann. Während der Eiszeiten wurde über den atmosphärischen Wasserkreislauf durch Verdunstung und Niederschlag dem Weltmeer so viel Wasser entzogen, dass der weltweite Meeresspiegel um bis zu 140 Meter absinken konnte. Gegen Ende einer Eiszeit wurde das in den Eischildern gespeicherte Wasser nach deren Abschmelzen wieder dem Ozean zugeführt, was damals zu weiträumigen und dramatischen Überschwemmungen der Küstenzonen führte.

Die Grundlagen dafür sind mit den sogenannten „äußeren“ und „inneren“ Klimafaktoren zu beschreiben: Die Sonne ist ein Klimafaktor ersten Ranges, und ihre Rolle als „Energiefabrik“ ist immens: Sie strahlt – wie gesagt – nicht gleichmäßig wie eine Glühbirne, sondern ihre verschiedenen Sonnenfleckenzyklen und die Zwischenzeiten geringerer Aktivität, die Interferenzen, haben offenbar das Klima auf der Erde bis in allerjüngste Zeit bestimmt. Dunkle Stellen in der Lichthülle der Sonne in elfjährigen Zyklen sind auffälligste Anzeichen einer wechselnden Sonnenaktivität. Auch die Wirkungen der globalen Land-See-Verteilung heute und in der Erdvergangenheit sowie die Verschiebung der Kontinente hatten entsprechende Folgen für das Klima, und sie sind weiterhin fundamentale Bestandteile von Klimaänderungen. Solche Klimaschwankungen mit ihren Wechseln von Warm- und Kaltzeiten bilden somit einen besonders wertvollen Aspekt der neuen Klimaforschung: Wir kennen nun in groben Zügen die natürlichen klimatischen Grundphänomene und die Rolle des Menschen in der jet-

zigen Nacheiszeit, also im Holozän, für Nordwesteuropa. Aus historisch-globaler Sicht wissen wir ferner, dass die Konzentration des Kohlendioxids im Erdaltertum teilweise deutlich höher war als heute (Abb. 6). Das trifft auch für geologische Epochen zu, in denen sich die großen Eisschilde von den Polen her ausbreiteten, so etwa im Karbon und im Perm vor 360 bis 290 Millionen Jahren, während der genannten permo-karbonischen Vereisung. Darüber hinaus belegen die Rekonstruktionen von Temperatur und Kohlendioxid, dass der atmosphärische Kohlendioxidgehalt und die Lufttemperatur über die letzten Millionen Jahre hinweg nicht immer im Gleichschritt verliefen. Es gibt also verschiedene Faktoren für einen Klimawandel. Wir differenzieren derzeit die

- Solaren Klimafaktoren, die
- Orbitalen Klimafaktoren, die
- Geogenen und Biogenen Klimafaktoren sowie
- Anthropogene Klimafaktoren.

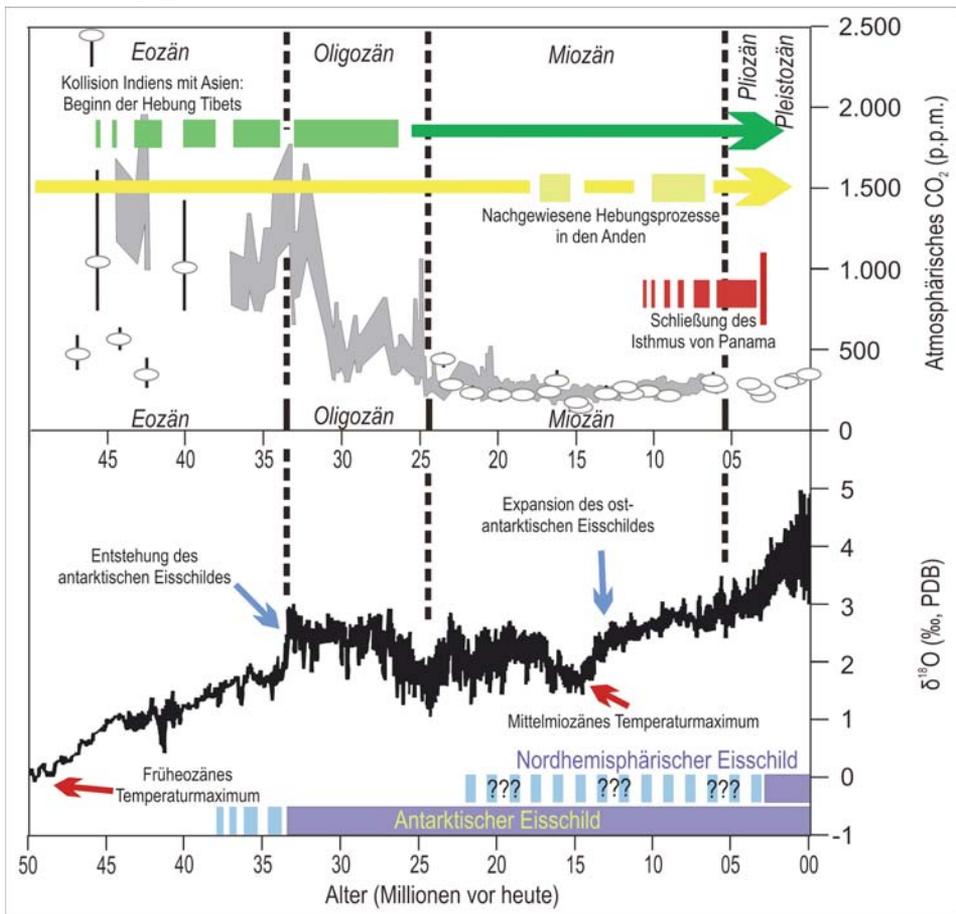


Abb. 6: Klimaentwicklung der Erde in den letzten 50 Millionen Jahre (oben), unter besonderer Berücksichtigung tektonischer Ereignisse und der CO₂-Entwicklung (unten). Seit dem früheozänen Temperaturmaximum im frühen Tertiär zeigen uns die ansteigenden $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (‰, PDB) einen kontinuierlichen Temperaturrückgang. Die Schließung des Isthmus von Panama führte zur erstmaligen Situation einer bipolaren Vereisung unseres Globus seit etwa 2,7 Millionen Jahren (leicht verändert aus PAGANI et al. 2009).

Ist vielleicht die menschengemachte Erhöhung des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre im Rahmen des komplizierten Wechselspiels der vielen natürlichen solaren, orbitalen, geogenen und biogenen Vorgänge nur ein kleiner Ausrutscher, der ohne weitreichende Folgen für das globale Klima mit all seinen regionalen und lokalen durchaus beobachtbaren Konsequenzen bleibt? Wie wirken sich an die oben genannten natürlichen Klimafaktoren gekoppelte globale oder regionale Phänomene aus? Denken wir an das Auftauen der riesigen Flächen auf der Nordhalbkugel mit kontinuierlichem und diskontinuierlichem Permafrost, die stellenweise auftauen und große Mengen an Methan freisetzen. Die weitere Verringerung der arktischen und grönländischen Meer- und Landeisdecken, das Abbrechen großer Tafelberge von den Eisschelfen der Antarktis, der langsam ansteigende Meeresspiegel an manchen Küsten und die biogeographischen Veränderungen einiger Lebensräume werden oft als Zeichen des neuartigen Klimawandels gewertet.

7. Solare Klimafaktoren

Und was die Sonne angeht: Die eingetragene Sonnenenergie kann sich aus verschiedenen Gründen ändern: Entweder durch die Schwankungen in der Leuchtkraft der Sonne oder durch Änderungen in der Erdbahn. Die Leuchtkraft der Sonne schwankt in Abhängigkeit von den Sonnenfleckenzyklen, damit verbundene Klimaveränderungen lassen sich mehrfach nachweisen: Die Sonne ist nicht massiv wie die Erde, sie besteht aus Gas und ungefähr 70 Prozent sind Wasserstoff, 28 Prozent Helium und zwei Prozent schwere Elemente. Die äußere sichtbare Schicht der Sonne, die Photosphäre, ist also ein aus positiv geladenen Kernen und freien negativen Elektronen zusammengesetztes Gasmisch, das man Plasma nennt. Wie jedes geladene Objekt erzeugt auch das Plasma Magnetfelder, wenn es sich bewegt. Elektrische Ströme entstehen durch Verlagerung solcher Felder, und Eruptionen oder Sonnenflecken sind die Folge davon. Sonnenflecken bilden sich, wenn Bündel von Magnetfeldlinien durch die Oberfläche der Sonne brechen. An diesen Stellen sind die Magnetfelder am stärksten. Plasma und Magnetfeld sind also ständig in Bewegung. Die Quelle dieser Energie ist die Kernfusion. Denn wie alle Sterne entstand auch die Sonne durch die Vereinigung von Gasen, die sich unter dem Einfluss der Gravitation zu einem Ball verdichteten. Die Masse wurde schließlich so groß, dass die Wasserstoffatome unter dem gigantischen Druck verschmolzen, wobei sie Helium und freie Neutronen bildeten. Diese Reaktionsprodukte haben zusammen weniger Masse als die Wasserstoffkerne, aus denen sie entstanden sind. Nach Albert EINSTEINS (1879-1955) berühmter Formel $E = mc^2$ wird der Unterschied in pure Energie umgewandelt. Diese Einstein-Gleichung von der Energie-Masse-Relation besagt, dass die Gleichwertigkeit von Energie = E und Masse = m eines physikalischen Systems, vor allem von Teilchen, relativ ist zur Lichtgeschwindigkeit im Vakuum = c.

Auf unserer Erde wäre jegliches Leben ohne die Sonne undenkbar. Wie weit aber ihr Einfluss und die Bedeutung der solaren Aktivität für den Klimawandel geht, ist umstritten. Es gibt Wissenschaftler, die glauben, dass Schwankungen in der Sonnenaktivität für das irdische Klima maßgeblich sind. Die Sonnenflecken haben offenbar das Klima auf der Erde bis in die jüngste Zeit bestimmt. Johannes FABRICIUS (1587-1615), ein Medizinstudent aus Ostseel bei Norden in Ostfriesland, und sein Vater David FABRICIUS (1564-1617), der dortige Pastor, entdeckten im Jahre 1611 hier vom mächtigen Kirchturm aus durch ein Fernrohr die Sonnenflecken zum ersten Mal. Das sind dunkle Stellen in der Lichthülle der Sonne, die in einem elfjährigen Zyklus auffälligste Anzeichen einer wechselnden Sonnenaktivität sind. Dunkle Flecken auf der Oberfläche der Sonne sind zuvor mehrfach im Mittelalter beobachtet worden. Damals hielt man sie für hochfliegende Vögel oder für Planeten, die vor unserem Zentralgestirn manchmal vorbeiflogen. Dass es sich um Erscheinungen der Sonne selbst handelt, wis-

sen wir erst durch den Universalgelehrten Galileo GALILEI (1564-1642), der sie gleichzeitig mit den Herren FABRICIUS und mit Thomas HARRIOT (1560-1621) aus England beobachtete und aus deren allmählicher Bewegung über die Sonnenscheibe schon damals richtig auf die Rotation der Sonne schloss. Diese Beobachtungen widersprachen seinerzeit teilweise dem an der aristotelischen Lehre ausgerichteten Weltbild. Aber erst 1843 hat der deutsche Astronom Samuel Heinrich SCHWABE aus Dessau (1789-1875) erkannt, dass sich die Häufigkeit der Flecken gleichsam periodisch ändert. Er begann 1826 damit, eine Strichliste zu führen, und 1843 gab er bekannt, dass ihre Zahl im Laufe von etwa zehn Jahren von einem Minimum über ein Maximum auf die Ausgangswerte zurückgeht. Alle durchschnittlich elf Jahre kehrt die Sonne ihre magnetische Polarität um: Der Nordpol wird zum Südpol und umgekehrt. Ein kompletter Sonnenzyklus dauert demnach im Durchschnitt 22 Jahre. Der engere Aktivitätszyklus beträgt ungefähr elf Jahre und wird deshalb auch als Schwabe-Zyklus entsprechend so bezeichnet.

Über längere Zeiträume ist die Aktivität der Sonne mal generell besonders hoch und dann eine Zeitlang wieder ausgesprochen niedrig. Dies kann man messen an der beobachteten Häufigkeit der Sonnenflecken, die so genannten Fleckenrelativzahlen, die ein Maß für die solare Aktivität sind, denn die Sonne ist zur Zeit ihres Maximums der „Dunklen Flecken“ heller als während des Fleckenminimums. Während des so genannten Maunder-Minimums in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts wurden gar keine Sonnenflecken beobachtet (Abb. 7). Das Maunder-Minimum ist benannt nach seinem Entdecker: Der britische Astronom Edward MAUNDER (1851-1928) untersuchte 1890 die historisch beobachteten Sonnenflecken und wies auf eine „Pause“ in den elfjährigen Zyklen zwischen 1645 und 1720 hin – eine Epoche, die auffällig mit dem Ende der „Kleinen Eiszeit“ zusammenfällt. Zwei besonders eisige Abschnitte in diesem Zusammenhang waren das Maunder-Minimum sowie das Dalton-Minimum von 1790 bis 1830. Seit den vierziger Jahren des 20. Jahrhunderts ist die Fleckenrelativzahl dagegen ungewöhnlich hoch, sie liegt derzeit bei ungefähr 75 und manchmal sogar

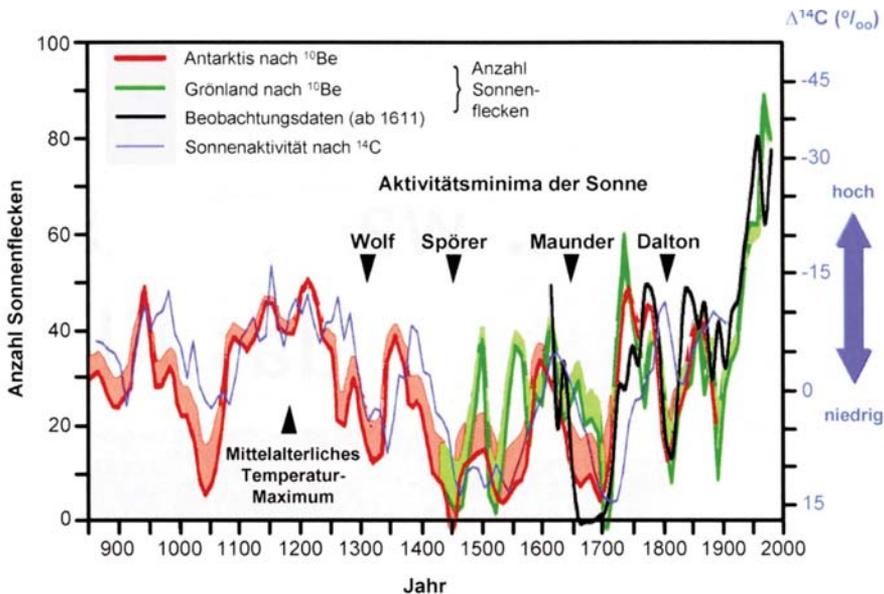


Abb. 7: Rekonstruktion der Sonnenaktivität während der letzten 1150 Jahre über verschiedene Proxydaten aus Eiskernen (rot, grün), Holz (blau) und direkte Beobachtungsreihen, z. B. auf der Basis von Sonnenflecken (schwarz) (aus BERNER & STREIF 2004).

geringfügig darüber, und man erwartet das Maximum bis zum Jahre 2014. Im Frühjahr 2007 hatte der letzte der elfjährigen Zyklen, in denen die Sonnenfleckenaktivität schwankt, sein Minimum erreicht. Dabei sank auch die Zahl der Sonnenflecken auf einen Tiefpunkt. Im Jahr 2008 waren 266 Tage fleckenlos und im Jahr 2009 waren es 260 Tage (ODENWALD 2010).

Solare Einflüsse auf das Erdklima sind demnach auch in jene Zeiten zurückzuverfolgen, die vor der Beobachtung und schriftlichen Aufzeichnung der Sonnenfleckenaktivitäten liegen. Durch die kosmische Strahlung wird nämlich in der oberen Atmosphäre die Bildung von ^{14}C und ^{10}Be angeregt. Diese Isotope werden in organischem Material oder im Eis gespeichert und lassen sich heute durch geeignete Messmethoden nachweisen. Sie spiegeln somit als Proxydaten den Gang der solaren Aktivität wider.

8. Orbitale Klimafaktoren

Notwendig ist also die Rekonstruktion der Klimavergangenheit mit Ausblicken in die Zukunft: Wir stehen offenbar am Anfang einer außergewöhnlich langen Warmphase. Sie ist durch die geringe Änderung der Sonneneinstrahlung in den nächsten 50000 Jahren bedingt, vorprogrammiert durch die Konstellation zwischen Erde und Sonne. In den frühen Jahrzehnten des vergangenen Jahrhunderts erkannten Wissenschaftler wie Alfred WEGENER (1880-1930) und Milutin MILANKOVITCH (1879-1958), dass die steten Wechsel zwischen Eiszeiten und Warmzeiten durch kleine Wechsel in der Geometrie der Erdbahn um die Sonne beeinflusst oder gesteuert werden. Damals tauchten die ersten Vermutungen über Zusammenhänge mit den periodischen Änderungen der Erdbahn und der Stellung der Erdachse auf. Die langfristigen, wiederkehrenden Änderungen der Sonneneinstrahlung im Rahmen von mehreren 10000 Jahren wurden erstmals vom genannten serbischen Mathematiker M. MILANKOVITCH im Jahre 1941 beschrieben. Solche Milankovitch-Zyklen lassen sich aus astronomischen Gesetzmäßigkeiten für Vergangenheit und Zukunft berechnen (Abb. 8).

Damals veröffentlichte MILANKOVITCH sogenannte „Strahlungskurven“ für einzelne Breitenkreise im Ablauf der Erdgeschichte, also Angaben über die Schwankungen der eingestrahlten Sonnenenergie aufgrund der erwähnten periodischen Veränderungen. Diese ergeben sich durch die wandelnde Stellung unseres Planeten und des Erdmondes zueinander und damit der Änderung der Anziehungskräfte untereinander. Als Erdbahnelemente werden im Allgemeinen für die Berechnung herangezogen: Die Neigung der Erdachse zur Umlaufbahn um die Sonne ist die Ursache für die Jahreszeiten. Sie ändert sich mit einer Periode von 41000 Jahren zwischen 21,5 Grad und 24,5 Grad und liegt heute bei 23,4 Grad. Sie nimmt zur Zeit ab, so dass sich die Unterschiede zwischen Sommer und Winter verstärken. Bei der Präzession legt man fest, dass die Erdachse einer Taumelbewegung unterliegt – eine Halbachse umschreibt dabei einen Kegel mit einem Öffnungswinkel von 47 Grad. Überlagert wird diese Bewegung durch eine Rotation der Umlaufellipse der Erde um die Sonne. Daraus ergeben sich zwei unterschiedliche Perioden: 23000 und 19000 Jahre. Bei der sogenannten Exzentrizität wird berechnet, dass die Erde die Sonne nicht exakt auf einem Kreis umläuft. Die größte Abweichung ihrer elliptischen Umlaufbahn vom Kreis beträgt 6 Prozent und wird alle 10000 Jahre erreicht.

Ferner ist die Erdbahn in hohen geographischen Breiten durch den Neigungswinkel der Erdrotationsachse gegenüber der Umlaufbahn der Erde um die Sonne, die sogenannte Obliquität, geprägt, während in niederen Breiten der Einfluss von den Änderungen des Ellipsenradius der Erdumlaufbahn um die Sonne, die Exzentrizität, und die entsprechende Strahlungsenergie durch den Abstand von Sonne und Erde überwiegen. Die sogenannten Orbitalparameter, wie die Ellipsenform der Erdbahn um die Sonne, der Winkel der Rotationsachse

der Erde in dieser Bahn und die Präzession der Erdrotation, ergeben regelmäßige Änderungen für Frequenzen von 100000, 41000, 23000 und 19000 Jahren, die in Wechselwirkung stehen, in ihrer Summe aber offensichtlich einen steuernden Einfluss auf das Klima der Erde haben. Diese Wechsel können mit modernen geologischen und paläoökologischen Messungen erfasst und durch Astronomen auch für zurückliegende Zeiten berechnet werden. Es gibt keinen Grund anzunehmen, dass diese langfristigen, zyklischen Wechsel in Zukunft ausbleiben werden. Alle Berechnungen deuten ferner darauf hin, dass die jetzige Warmzeit mit dem Einstrom des für Nordwesteuropa und für die Nordsee so wichtigen Golfstroms in den nördlichen Nordatlantik noch lange Zeit andauert, bis sie dann mit wesentlich kälteren Klimaten in eine neue

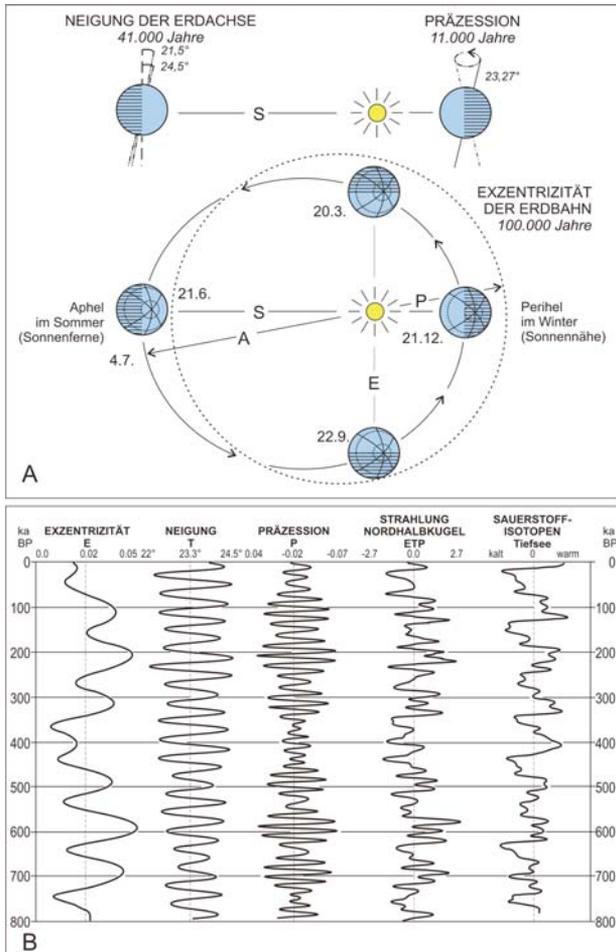


Abb. 8: **A:** Erdbahnelemente und ihre Änderungen, wobei die Darstellung der Schwankungen der Exzentrizität (E) überhöht ist (aus PASENAU 2002). **B:** Perioden der Erdbahnelemente und die Strahlungskurven (ETP) auf der Nordhalbkugel in den letzten 800 000 Jahren. Das Kürzel kaBP bedeutet *Kiloyears Before Present*, also Tausend Jahre vor heute. Die Abbildung zeigt den Vergleich zu den Kalt-Warm-Tendenzen nach den Ergebnissen von Sauerstoffisotopenuntersuchungen von fünf Tiefseesedimentprofilen aus den verschiedenen Ozeanen der Erde (nach PASENAU 2002).

Eiszeit übergeht. So ist nach den derzeitigen astronomischen Modellen eine nächste starke Abkühlung des Klimas erst in etwa 50000 Jahren zu erwarten. Ähnlich der „Achterbahnfahrt“

des Klimas in der jüngsten Vergangenheit während der letzten Weichseleiszeit vor etwa 22000 bis 18000 Jahren bewegen wir uns also danach auf eine neue Kaltzeit zu, und zwar unabhängig davon, ob die Menschheit heute die Konzentration des Kohlendioxids in der Atmosphäre durch die Verbrennung von Erdöl, Erdgas und Kohle erhöht. Um Missverständnissen vorzubeugen: Auch wenn der Kohlendioxid-Beitrag für die Klimaveränderungen weit schwächer sein sollte als oftmals befürchtet, so ist doch ein vernünftiger Umgang mit den Ressourcen der Erde unabdingbare Voraussetzung für den Erhalt einer gesunden Umwelt.

9. Geogene und Biogene Klimafaktoren

Die Biosphäre unseres Globus, einschließlich der Menschen und ihrer Evolution, haben den Planeten Erde entscheidend geprägt und tun dies bis auf den heutigen Tag. Alles begann mit der Eroberung des Festlandes durch Tiere und Landpflanzen im Paläozoikum, etwa 550 bis 250 Millionen Jahre vor heute. Diese Schlüsselprozesse der Biosphären-Evolution lassen sich um viele Beispiele vermehren. Es sind zunächst drei wesentliche Ereignisse festzuhalten: Die Erfindung der oxygenen Photosynthese im Präkambrium, die Besiedlung der Festländer der frühen Kontinente im jüngeren Paläozoikum und die Ausbreitung der Wälder auf den Urkontinenten bis in hohe Breiten im Mesozoikum und im Tertiär. Anders als auf den übrigen Planeten bedecken ausgedehnte Ozeane den größten Teil der Erdoberfläche. Seit Millionen von Jahren sind die Ozeane von Lebewesen besiedelt, die sich weiterentwickelt und das Festland erobert haben. Die Konsequenzen dieser Schlüsselprozesse für das System Erde sind weitreichend und drastisch; sie verändern die Stoffkreisläufe und die Atmosphären-Zusammensetzung (POTT 2005).

Unser heutiges Klima ist nicht zu verstehen, ohne die gut untersuchten Klimaschwankungen im Tertiär und Quartär zu kennen (Abb. 6). Das Tertiär von etwa 65 bis ungefähr 2 Millionen Jahre vor heute ist eine Zeit sehr ausgeprägten klimatischen Wandels. Während zu Beginn dieser Epoche ein mildes bis subtropisches Klima weit verbreitet war, setzte im Jungtertiär, vor allen im Miozän und im Pliozän seit etwa 26 Millionen Jahren bis zu zwei Millionen Jahren vor heute eine kontinuierliche Abkühlung des Klimas ein, die sich in den Eiszeiten des Quartärs fortsetzte (Abb. 6). Die erdweiten alpidischen Gebirgsbildungen, die Entstehung des Hochlandes von Tibet, die Orogenese der Anden, die Austrocknung des Mittelmeeres und die Drift der Landmassen in höhere geographische Breiten führten damals zur Ausbildung komplexer Klimate mit der Bildung von Eiskappen an den Polen und der Kontinentalisierung großer Landflächen, vor allem in Nordamerika und in Eurasien, wie wir es heute sehen. Die Schließung des Isthmus von Panama führte beispielsweise zur Trennung des Pazifischen und des Atlantischen Ozeans mit der Neukonfiguration des Golfstroms, der nun warmes Tropenwasser weit auf die Nordhemisphäre leitete, und mit erhöhten Niederschlägen schließlich vor 2,7 Millionen Jahren erstmals zur Vereisung der Arktis und Grönlands führte (Abb. 6). Seit dieser Zeit kennen wir die bislang einmalige bipolare Vereisung des Globus. Die Evolution von Flora und Vegetation wurde also durch diesen klimatischen und geomorphologischen Wandel stark beeinflusst.

Als geogene Klimafaktoren kommen weiterhin in Frage die Einschläge großer Meteorite, Kometen und Asteroide. Dabei wird oftmals so viel Staub aufgewirbelt, dass es auf Jahrhunderte oder Jahrtausende hinaus kälter wird, weil diese gewaltigen Staubmengen eine jahrelange Verringerung der Sonneneinstrahlung und damit eine deutliche Abkühlung des Klimas bedeuten. Die Klimaänderungen nach einem solchen Einschlag könnten beispielsweise vor etwa 65 Millionen Jahren beim Chicxulub-Event auf der Yukatan-Halbinsel in Mexiko zum Aussterben der Saurier beigetragen haben. Auch die Wirkungen von Vulkanausbrüchen zählen unter anderem zu den geogenen Faktoren.



Abb. 9: Die Rolle der Regenwälder hinsichtlich der CO₂-Bilanzen der Erde ist noch weitgehend ungeklärt. Das betrifft besonders die immergrünen, sommergrünen oder teilimmergrünen Vegetationstypen. Immergrüner Mata atlantica-Regenwald bei Iguazu, Argentinien (2000).



Abb. 10: Teilimmergrüner Gebirgswald in den Anden mit *Araucaria araucana* und *Nothofagus antarctica* am Vulkan Llaima, Chile (2010).

Dazu kommen die biogenen Klimafaktoren: Die Analyse der Dynamik des Klimas unserer Erde wird immer komplexer, weil wir heute nicht nur physikalische, chemische und geologi-

sche, sondern inzwischen auch biologische Prozesse berücksichtigen müssen. Dies impliziert zum Beispiel, dass Klimamodelle, die sinnvoll für die Rekonstruktion der Vergangenheit und für die Prognose der künftigen Entwicklung verwendet werden sollen, die Biosphäre nicht nur als statische Randbedingungen, sondern als dynamische Prozesskomponenten berücksichtigen müssen. Dieses ist jedoch bislang in den meisten großen Klimamodellen nicht realisiert. Wir wissen noch zu wenig über die wirkliche Rolle beispielsweise der immergrünen tropischen Regenwälder, der sommergrünen temperaten Laubwälder oder der teilimmergrünen Nadelmischwälder auf unserer Erde im Klimageschehen (Abb. 9 und 10).

10. Anthropogene Klimafaktoren

Menschliches Handeln hat bislang offenbar zu einem weiten Effekt globalen Ausmaßes geführt: Die Änderung der Zusammensetzung der Atmosphäre beispielsweise durch das Verbrennen fossiler Kohlenstoffe oder als Folge der Abholzung von natürlichen Wäldern haben den Anteil an Kohlendioxid (CO₂) dermaßen erhöht, dass innerhalb des nächsten Jahrhunderts mit einer erdweiten Änderung des Klimas und einer globalen Erwärmung der Erdoberfläche von deutlich mehr als einem Grad Celsius als Folge des Treibhauseffekts zu rechnen ist. Auf der Erde ist die Verbreitung von Tier- und Pflanzenarten hauptsächlich durch Klimaparameter bestimmt, und es wird angenommen, dass Änderungen der Temperatur oder der Niederschläge auch die Ausdehnung der Großlebensräume beeinflussen. In jüngster Zeit häufen sich Berichte über Verhaltensanpassungen von Pflanzen und Tieren und sich ändernde Artareale als Folge der wärmeren Klimabedingungen der vergangenen drei Jahrhunderte. Nachdem im vergangenen Jahrhundert die durchschnittliche Temperatur der Erdatmosphäre weltweit um rund 0,6 Grad Celsius angestiegen ist, rechnen Klimaexperten für die kommenden Jahre mit einer noch stärkeren Erwärmung, die naturraumabhängig negative oder positive Konsequenzen für Land- und Forstwirtschaft sowie für die Siedlungsflächen der Menschen in ökologisch sensiblen Regionen wie beispielsweise dem Nordseeraum haben kann.

Wärmere Temperaturen treiben aber auch den globalen Wasserkreislauf an. Dies äußert sich in zunehmend verstärkten Trockenzeiten oder Hochwasserereignissen in verschiedenen Teilen der Erde. Der Meeresspiegel steigt gegenwärtig um 2,4 Millimeter pro Jahr mit wahrscheinlicher Zunahme, wenn das Abschmelzen der Gletscher und Polkappen voranschreitet. Bis ins Jahr 2100 soll sogar mit einem Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels von 0,09 bis 0,88 Metern gerechnet werden. Kürzlich konnte obendrein eine Korrelation zwischen erhöhter Nordatlantischer Wellenoszillation und ansteigender Oberflächentemperatur nachgewiesen werden. Verschiedene Modelle weisen ferner darauf hin, dass auch mit einer verstärkten Niederschlagsintensität und einer Zunahme an Extremereignissen gerechnet werden muss, wie dies seit 1992 in den Berichten des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) nachzulesen ist. Hier ist jedoch Einhalt zum Nachdenken geboten: Zahlreiche Faktoren beschränken nach wie vor unsere Fähigkeiten und Möglichkeiten, eventuelle Folgen einer zukünftigen Klimaveränderung wirklich aufzudecken und konkret abschätzen zu können. Eines ist jedenfalls klar, die Zusammensetzung der Vegetationsdecke in einem Naturraum, wie zum Beispiel im Wattenmeer oder auf den Inseln, hängt einmal von den Migrationsraten der Pflanzen und Tiere ab und zum anderen davon, wie rasch sich in diesem Kontext die Bodenverhältnisse und andere Umweltfaktoren ändern. Es ist zum heutigen Zeitpunkt in keiner Art und Weise gesichert, ob die Wanderungskapazitäten der Pflanzen und Tiere mit der Rate der sich ändernden Umweltbedingungen Schritt halten können und dass derzeit beobachtete Veränderungen in der Vegetation einzelner Regionen wirklich und ursächlich dem „Global-Warming-Phänomen“ zugeordnet werden dürfen, wir werden das nachfolgend deutlicher sehen.

Mit modernen Untersuchungsmethoden ist es inzwischen gelungen, solche Änderungen im Strahlungshaushalt der Erde nachzuweisen. So untersucht man beispielsweise das Verhältnis der beiden Sauerstoffisotope O^{16} und O^{18} in kalkhaltigen Meeressedimenten. Das Meerwasser besteht hauptsächlich aus Wassermolekülen mit dem weit verbreiteten Sauerstoffisotop O^{16} . Nur 0,2 Prozent des Wassers enthält dagegen „schwere“ Sauerstoffatome mit der Massenzahl O^{18} . Beim Verdunsten des Meerwassers werden die leichteren Moleküle eher aufsteigen. Wird also während einer Kaltzeit vermehrt Meerwasser in Form fester Niederschläge mit Schnee und Eis an den Polen gebunden, erhöht sich allmählich der Meerwassergehalt an O^{18} . Untersucht man nun die Proben von Tiefseesedimenten oder aus den Eiskernen Grönlands auf ihren Sauerstoffisotopengehalt, so kann man anhand der O^{16}/O^{18} -Relation nachträgliche Informationen über die vergangenen Temperaturverläufe finden (Abb. 11). Überraschenderweise kann man in nahezu allen geeigneten Sedimenten, ob im Norden oder im Süden des Globus, fast identische Ergebnisse finden. Man hatte erwartet, dass durch periodische Schwankungen der Erdachsneigung auch deutliche Unterschiede in der Temperaturverteilung zwischen Nord- und Südhalbkugel der Erde auftreten würden. Man vermutet, dass die Koppelung der fast gleichzeitigen Abkühlung von Nord- und Südhemisphäre unter anderem über ein heute recht gut erforschtes übergreifendes ozeanisches Strömungssystem – wie inzwischen beim Golfstrom erkannt – mit entsprechenden kalten Tiefenströmungen, die ihren Ursprung im Nordatlantik haben, und oberflächennahen wärmeren Ausgleichsströmungen von Süden schon immer erfolgte.

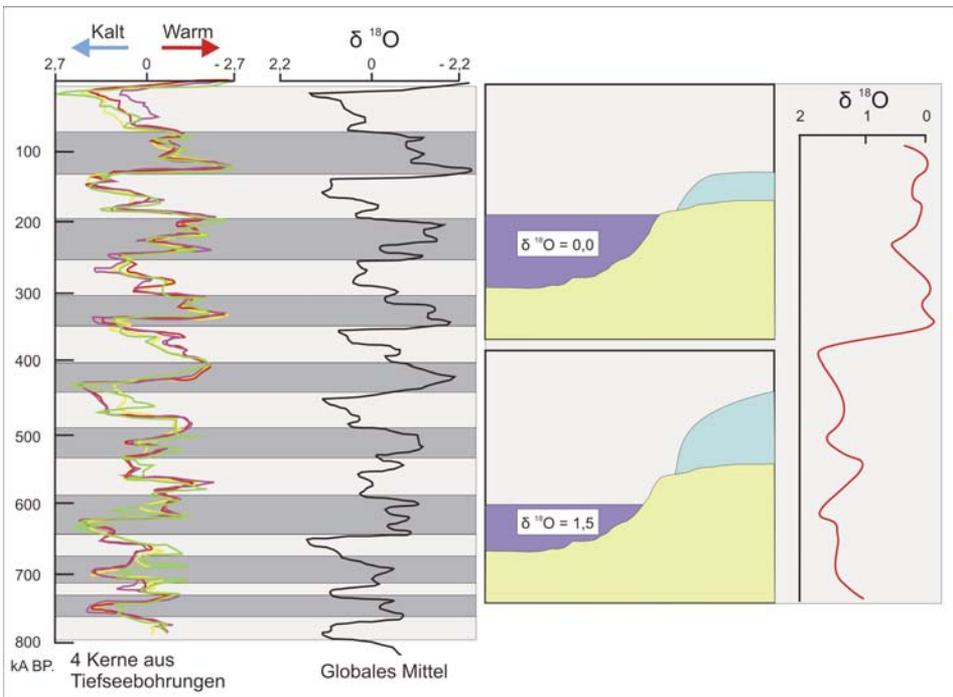


Abb. 11: Zur Rekonstruktion der Temperaturen misst man $\delta^{18}O$ -Sauerstoffisotope, deren Anteile in Kaltzeiten ansteigen (verändert nach IMBRIE et al. 1985)

Wenn langfristig wirksame Klimawechsel nachweislich die Entwicklung der Menschheit beeinflusst haben, so stellt sich die Frage, ob auch in den jüngsten Abschnitten der Erdgeschichte entsprechende Zusammenhänge zwischen Siedlungs- und Klimaentwicklung beste-

hen. Wie bereits ausgeführt, hat sich der Mensch über Jahrtausende an die Natur angepasst, sich aber auch aus der Natur bedient. Die Brandrodung und vor allen das Verbrennen fossiler Brennstoffe lassen seither das Kohlendioxyd in der Atmosphäre ansteigen. Der aktuelle Energiekonsum vor allen der Industrienationen ist eine der Schlüsselfragen für die nachhaltige Entwicklung unseres Globus: Etwa sechs Milliarden Menschen verbrauchen derzeit rund sechs Milliarden Tonnen Kohlenstoff jährlich – zu 90 Prozent aus fossilen Energieträgern wie Kohle, Erdöl und Erdgas – und produzieren damit pro Jahr etwa 22 Milliarden Tonnen Kohlendioxyd (CO_2), dem vielleicht wirksamen Faktor für den begonnenen globalen Klimawandel.

Wir haben es schon gehört, natürliche Klimaänderungen können durch variierende Aktivitäten der Sonne hervorgerufen werden, denn die Sonne ist der Motor unseres Klimasystems. Früher ging man davon aus, dass die Sonne ihre Energie über lange Zeiträume gleichmäßig wie eine Glühbirne abgibt. Der Begriff Solarkonstante ist für diese Ansichtweise ein typisches Beispiel. Heute weiß man, dass die Energieabgabe der Sonne nicht gleichmäßig verläuft, sondern Schwankungen unterworfen ist. Augenscheinlichstes Merkmal sind hierbei die wechselnden Häufigkeiten der erwähnten Sonnenflecken, die in bestimmte, unterschiedlich lange Zyklen der Sonnenaktivität eingebunden sind. Bekannt sind inzwischen der alle 11 Jahre auftretende Schwabe-Zyklus, der 20 Jahre währende Hale-Zyklus, der alle 80 bis 90 Jahre auftretende Gleißberg-Zyklus und der 180 bis 208 Jahre dauernde Seuss-Zyklus.

Die Zusammenhänge zwischen Sonnenaktivität und Klima sind bekannt, allerdings weiß man über die direkten Steuerungsmechanismen bisher noch recht wenig. Die Sonnenfleckenzyklen bzw. die Anzahl der Sonnenflecken werden maßgeblich über das Magnetfeld der Sonne gesteuert. Zeiten maximaler Anzahl von Sonnenflecken sind zugleich Phasen eines starken solaren Magnetfeldes, jedoch einer geringen kosmischen Strahlung. Der durch das solare Magnetfeld induzierte stärkere Sonnenwind führt in der Erdatmosphäre normalerweise zu einer stärkeren Abschirmung, so dass kosmische Strahlung während solcher Phasen nur in geringerem Maße in die Erdatmosphäre eindringen kann. Für Zeiten geringer Sonnenfleckenaktivität gelten genau die umgekehrten Bedingungen. Lange Zeit war die Verknüpfung zwischen Sonnenaktivität, kosmischer Strahlung und Erdklima unverstanden. Inzwischen wird die Möglichkeit diskutiert, dass Wechselwirkungen zwischen kosmischer Strahlung und Wolkenbildung bestehen. Diese Vermutung wurde inzwischen durch Satellitenmessungen bestätigt. Bei steigender Höhenstrahlung, wie sie in Phasen geringerer Sonnenaktivität zu verzeichnen ist, nimmt die Wolkenbildung in der Atmosphäre signifikant zu. Interessanterweise wird vor allem die Wolkenbildung in der unteren Atmosphäre angeregt, die für die Temperaturentwicklung der Erdatmosphäre von entscheidender Bedeutung ist. Durch zunehmende Bewölkung erhöht sich die Rückstrahlung der eingehenden Sonnenenergie signifikant, was zu Rückgängen der Temperaturen führt. Für derartige Änderungen der Wolkenbedeckung von ca. drei Prozent lässt sich ein Effekt von ca. 0.8 – 1.7 Watt pro Quadratmeter berechnen. Das ist ein durchaus signifikanter Wert, wenn man bedenkt, dass der gesamte Strahlungsantrieb durch Kohlendioxyd seit 1750 nach Christus mit 1.56 Watt pro Quadratmeter geschätzt wird.

Ein Vergleich der am grönländischen Eiskern Grip 2 rekonstruierten Temperaturkurve mit der $\delta^{18}\text{O}$ -Aktivitätskurve zeigt eine deutliche Korrelation zwischen Temperatur und solarer Aktivität und unterstreicht die Rolle der Sonne als Triebfeder der Klimaentwicklung. Weiterhin wird deutlich, dass die Sonne mehrfach längere Phasen äußerst geringer Sonnenfleckenaktivität durchlaufen hat. Wir haben schon gesehen, die wohl bekannteste dieser Phasen, das genannte Maunder-Minimum, korreliert in erstaunlicher Weise mit der schon erwähnten „Kleinen Eiszeit“, in der weltweit die Temperaturen um circa ein Grad Celsius zurückgegangen sind. Die heutige geologische Epoche seit etwa 12000 Jahren nach dem Abschmelzen der

weichseleiszeitlichen Gletscher ist also das Holozän. Neuerdings wird aber auch ein neuer Begriff für die Jetztzeit und die künftige Zeit geprägt, der den dominierenden Einfluss des Menschen über alle natürlichen Systeme von Wasser, Boden, Luft sowie Tier- und Pflanzenwelt verdeutlichen soll: das Anthropozän (CRUTZEN & STOERMER 2000; POTT 2005; EHLERS 2008). Manche halten den Begriff der Industrialisierung seit der Mitte des 18. und des 19. Jahrhunderts in dieser Hinsicht für einschneidend; manche aber, vor allem der renommierte amerikanische Klimatologe William F. RUDDIMAN (2003), halten den Beginn der neolithischen Landnahme mit ihren ersten absichtlichen Brandrodungen der damaligen Urwälder vor etwa 8500 Jahren als wichtige Zeitmarke für den zunehmenden Einfluss des Menschen auf die Lebensräume der Erde.

Wenn der Treibhauseffekt durch CO₂, Methan und Ozon und dessen Zunahme durch die aktuelle Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas die derzeit mancherorts registrierte Erhöhung der Temperatur verursacht und sich in Zukunft gravierend auf unsere Erde auswirkt, dann werden die Wetterextreme zunehmen, der Meeresspiegel wird weiter ansteigen und die Eisbedeckung der Erde wird rapide abnehmen, so folgert der Weltklimarat (IPCC) in seinen jüngsten Berichten (2007 und 2009). Neben den biogeographischen Veränderungen durch Migrationen stenothermer wärme- bzw. kälteangepasster Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen können sich die Artenzusammensetzungen der heutigen Ökosysteme und Zonobiome generell verändern; manche Hinweise gibt es seit längerer Zeit (s. WALTHER 1999; GRABHERR et al. 1994; POTT & HÜPPE 2007).

Einflüsse wie die Strahlung aus dem All, die Sonnenflecken, die Überbevölkerung, der Stand der Erdachse und vieles mehr werden entweder negiert oder gehen in der allgemeinen Diskussion unter, wahrscheinlich weil man zu wenig darüber weiß. Kohlendioxid ist derzeit in der Atmosphäre also mit 380 ppm enthalten, das sind 0.0380 Prozent Anteil an der Luft, der angeblich durch die Emissionen zur Zeit um 2 ppm = 0.0002 Prozent jährlich steigt. Wie der Anteil an Kohlendioxid in größeren Höhen (10 bis 30 Kilometer) steigt, weiß man offenbar noch nicht, denn dort soll ja angeblich die Rückstrahlung der energiereichen Infrarotstrahlung erfolgen. Da aber Kohlendioxid erheblich schwerer (Faktor zirka 1,5) ist als Luft, dürfte dieses unten in Erdnähe verbleiben und damit in großen Höhen schon gar keine Wirkung haben.

Klimawandel gab es – wie mehrfach gesagt – in der Erdgeschichte immer. Er ist ein normaler Vorgang und wird von Faktoren außerhalb der Erde (Sonne, Mond, Erdbahnelemente) und erdweiten Faktoren wie Erdplattenbewegungen, dem Erdmagnetfeld, Vulkanismus, der Land-Meer-Verteilung, der Wolkenbildung, den Kreisläufen in der Lithosphäre, der Hydrosphäre, der Biosphäre und der Atmosphäre bestimmt. Auf diese Vorgänge hat der Mensch global keinen Einfluss. Er muss sich deshalb auf das Machbare beschränken, vor allem in regionalen Bereichen. Ich denke da unter anderem an eine Wiederaufforstung entwaldeter Flächen oder an die Erhaltung von Mooren, an die Reduzierung der Verschmutzung von Meeren und Flüssen, an die Reduzierung der Energiegewinnung aus fossilen Brennstoffen, an die Nutzung alternativer Energiequellen, an Energieeinsparungen sowie an realistischere interdisziplinäre Modellrechnungen zur globalen Klimaentwicklung. Die gegenwärtige CO₂-Hysterie ist völlig unnötig und sachlich unbegründet. Sie verschleiert die Fakten. Besser wäre eine wahrheitsgemäße Information der Öffentlichkeit, verbunden mit der Aufforderung, wirklich Machbares zum Umweltschutz zu leisten.

Ernsthaft in Frage stellen wird die Öffentlichkeit diese Prämisse wohl nur, wenn, wie einige Wissenschaftler prognostizieren, ab 2012 oder 2014 eine weltweite Abkühlung beginnt, die aus der geringen Aktivität der Sonnenflecken resultiert. Persönlich halte ich daher eine Politik für sinnvoller, die versucht, mögliche Auswirkungen eines Klimawandels, in welcher Rich-

tung auch immer, vorbeugend zu antizipieren, um Probleme zu verhindern. Dies bedeutet auch einen verstärkten Ausbau des Küstenschutzes oder die Vorbereitung auf Extremwetterlagen und Starkregen, aber natürlich auch den sorgfältigen und effizienten Umgang mit fossilen Brennstoffen.

Wenn man weiß, dass jede Woche in China ein Kohlekraftwerk in Betrieb genommen wird, dort allein viele Milliarden Tonnen Kohlendioxid emittiert werden und Deutschland mit Brüssel darüber streitet, ob 450 oder 470 Millionen Tonnen emittiert werden dürfen, dann zeigt das, wie die Politiker heute arbeiten, denn China und Indien waren gar nicht durch Kyoto betroffen, beide Länder ratifizierten nicht das Kyoto-Protokoll. Einigen Zeitungen im März 2007 ist die Einsparung von 0,45 Millionen Tonnen Öl durch alle Solarheizanlagen in Deutschland durchaus eine Schlagzeile wert, das sind etwa eine Million Tonnen Kohlendioxid pro Jahr. Die Atomkraftwerke in Deutschland reduzieren die ansonsten anfallende Kohlendioxid-Menge um einen etwa einhundertmal größeren Wert. Deutschland baut seine Atomkraftwerke zurück, aus Frankreich wird Atomstrom importiert.

Die Frage ist heute so wichtig, weil man sich über die Ursachen des Klimawandels und die eventuellen Herkünfte des zunehmenden Kohlendioxid in der Atmosphäre im Klaren sein muss: Stammt er nur aus fossilen Kohlenstoff-Energieträgern oder überwiegend aus den Abholzungen und Brandrodungen der damaligen Wälder? Die Ozeane und die Waldökosysteme sind auf vielfältige Weise in die globalen Kohlenstoffflüsse eingebunden und stehen in einem komplexen Austauschverhältnis mit der Atmosphäre. Zum einen entziehen sie der Atmosphäre mit der Photosynthese der Algen und Pflanzen ständig das CO₂ und bauen dies dauerhaft in die Biomasse der Blätter und letztendlich in das Holz der Waldbäume ein. So werden die Ozeane und die Waldökosysteme (besonders die der Tropen) schließlich bedeutende Kohlenstoffspeicher der lebenden, terrestrischen Biosphäre. Über 50 Prozent der Pflanzenmasse der Erde ist reiner Kohlenstoff. Weltweit sind allein in den tropischen Wäldern etwa 380 Milliarden Tonnen Kohlenstoff gebunden, der bei Rodung und Verbrennung als Kohlendioxid freigesetzt würde, und somit würde ein gigantisches Kohlenstoffdepot in die Atmosphäre verlagert. Gegenwärtig sind dies aber jährlich immer noch etwas mehr als 4 Milliarden Tonnen! Welche Rolle spielen die Ozeane bei ihren CO₂-Freisetzungen oder den Bindungen in den Calciumcarbonaten der Tiefsee? Wir wissen es nicht! Auch die atmosphärischen Schwankungen des CO₂ nach den 10000- und den 41000-Jahreszyklen nach Milutin MILANKOVITCH und die Gründe hierfür sind noch nicht ganz und umfassend in all ihren Wechselwirkungen verstanden. Es gibt also noch viele offene Fragen für die Zukunft.

Entweder das Kohlendioxid ist die entscheidende Ursache, dann hätte es die Warm- und Eiszeiten nicht geben dürfen, oder es gibt weitere sehr gewichtige Einflussfaktoren. Die sind aber in den Klimamodellen unterschätzt, beziehungsweise ignoriert. Man muss auch zur Kenntnis nehmen, dass nur etwa drei Prozent des jährlich in die Erdatmosphäre emittierten Kohlendioxids vom Menschen stammen, 97 Prozent sind natürlichen Ursprungs. So weit zu unserer eigenen Wichtigkeit.

Interessant wäre auch die Beantwortung der Frage, warum dann, wenn es in der langen Klimavergangenheit unserer Erde überhaupt einmal signifikante Kohlendioxid-Konzentrationsanstiege gab, diese zumeist im Anschluss an Warmperioden, teilweise mehrere hundert Jahre danach auftraten und nicht zu deren Beginn. Bis heute verstehen wir nicht, warum die Wikinger in Grönland siedeln konnten, es dann aber dafür zu kalt wurde. Jene Periode, beginnend etwa um 1000 nach Christus, wird übrigens „Klimaoptimum“ genannt, und entspricht recht genau jenem Klima, dem wir uns zur Zeit nähern. Es ist irreführend, wenn die von der Klimakatastrophentheorie profitierenden Fachleute argumentieren, der Beweis für ihre Theorien sei der real zu beobachtende Klimawandel. Klimawandel ist die natürlichste Sache der Welt,

niemand stellt das in Abrede. Es gab ihn ohne den Menschen, und es wird ihn auch mit den Menschen immer geben. Nicht das Klima gilt es zu schützen, sondern die Menschen auf die jeweils aktuellen Klimaveränderungen vorzubereiten. Da ist Panikmache aber der schlechteste Ratgeber.

11. Zusammenfassung

Kritische Geister fragen sich schon lange, ob in der aktuellen politisch-wissenschaftlichen Klimadiskussion mit Blick nach Forschungsgeldern oder populärer Anerkennung eine neue Chimäre in die Welt gesetzt wird. Das „Waldsterben“ ist noch unvergessen. Damit ich nicht missverstanden werde, mir geht es nicht um Relativierung oder gar „Leugnung“ der aktuellen klimatischen Veränderungen und des Biodiversitätsverlustes weltweit (POTT 2005, 2008), es geht um den analytischen, naturwissenschaftlich eindeutig belegbaren, monokausalen Zusammenhang zwischen anthropogen angereichertem CO₂ und dem Klimawandel. Die Klimatologie ist noch weit davon entfernt, die hochkomplizierten Zusammenhänge des Klimas der Erde voll zu verstehen, um daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten.

Exzellente vermarktete „Apokalypse-Stories“ und Handlungsempfehlungen der grün-weißen Industrie, wie sie der Amerikaner Al GORE (2006, 2009) vorlegt, sind die eine Seite der Diskussion. Der Mensch in seiner Hybris überschätzt sich sehr, wenn er meint, die wesentlichen Abläufe der Natur beeinflussen zu können. Naturschutz ist meistens nur Schutz des Menschen, der glaubt, den Status quo wie einen Besitzstand erhalten zu können. Einflüsse wie die Strahlung aus dem All, die Sonnenflecken, Vulkanausbrüche, die Überbevölkerung, der Stand der Erdachse und vieles mehr werden entweder negiert oder gehen in der allgemeinen Diskussion unter, wahrscheinlich weil man zu wenig darüber weiß.

Ganz offensichtlich ist auch der Mensch durch ständig wachsende Treibhausgasemissionen sowie durch Land- und Ressourcennutzung an dieser aktuellen regionalen Klimaerwärmung beteiligt. Wenn dies so ist, wird ein politischer Strategiewechsel notwendig sein: Statt der Fokussierung auf willkürlich gesetzte CO₂-Minderungsziele sollte gerade in den Industrieländern das notwendige Potential für die Erforschung und Anwendung neuer Technologien genutzt und verstärkt werden. Eine Anpassung an eventuelle und unvorhersehbare Klimaveränderungen in bestimmten, unterschiedlich vulnerablen Regionen sollte Priorität erhalten.

Es ist auch an der Zeit, die Kritiker einer oftmals dogmatisch wirkenden Klimapolitik in die Diskussion einzubeziehen, denn immer mehr Menschen stehen den vielfach propagierten „Weltuntergangsszenarien“ zunehmend skeptisch gegenüber. Zu Recht: Der augenblickliche Konsens in der Wissenschaft zu den Ursachen klimatischer Veränderungen entpuppt sich mehr und mehr als „Zitierkartell“ politisierter Wissenschaftler, denen es gelungen ist, die mediale Deutungshoheit über eine These zu erlangen. Bekannt werdende Datenfälschungen und die Tatsache, dass eine unvorhersehbare Temperaturerhöhung vielerorts in den letzten Jahren ausgeblieben ist, sorgen für einen breiten Glaubwürdigkeitsverlust der gängigen Klimaforschung. Wir wissen über die Ursachen der Veränderungen des komplexen Systems „Klima“ offenbar noch zu wenig. Notwendig ist ein breiter, ganzheitlicher und transparenter Forschungsansatz im „System Erde“.

Da wir außerdem die konkreten Wechselwirkungen zwischen Klima und Biosphäre generell, bzw. zwischen den Ökosystemen einer jeweiligen Region und den klimatischen Faktoren bisher nicht vollständig oder manchmal auch gar nicht verstehen, besteht auch hier ein großes Potential für Mitigations- und Adaptationsmaßnahmen im Klimaschutz. So gibt es Vorschläge, ein Carbon-Capture-and-Storageverfahren (CCS) über Biomasse zu gestalten. Große Bedeutung kommt hier natürlich den walddreichen terrestrischen Biomen, besonders den tro-

pischen Regenwäldern und den borealen Nadelwäldern als derzeit größte zusammenhängende Zonobiome der Erde zu.

Im Sinne einer vorsorgenden Umweltpolitik ist es deshalb natürlicherweise richtig, eine Reduktion der Treibhausgasemissionen zu bewirken, im Sinne einer Mitigation, also mit Maßnahmen zur Reduktion der von Menschen verursachten Treibhausemissionen. Aufgrund der Trägheit des Klimasystems und der nach wie vor gegebenen Beteiligung natürlicher Faktoren an der Klimadynamik ist es ebenfalls nötig, Anpassungsstrategien als Adaptation an die Auswirkungen des Klimawandels zu entwickeln. Solche Maßnahmen müssen natürlich immer auf bestimmte Regionen zugeschnitten werden. Alle Maßnahmen sollten aber auf dem Wissen um die regionalspezifische Klimadynamik erfolgen; diese sollte auf den Daten der Paläoklimaforschung und der jeweiligen vegetationsgeschichtlichen Entwicklung basieren. Wir müssen uns darauf besinnen, dass die Anpassung an sich ständig, zum Teil dramatisch ändernde klimatische Grundbedingungen in der Erdvergangenheit der Normalfall war, und für die Erde insgesamt eine Erfolgsgeschichte der Evolution ist. Diese Zusammenhänge allein ermöglichen den räumlich-zeitlich differenzierten Blick in die Vergangenheit und geben konkrete Daten für entsprechende Zukunftsszenarien.

Literatur

- BEHRE, K. E. (2003): Eine neue Meeresspiegelkurve für die südliche Nordsee. Transgressionen und Regressionen in den letzten 10.000 Jahren. – Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet. Bd. 28: 9-63, Oldenburg.
- BEHRE, K. E. (2008): Landschaftsgeschichte Norddeutschlands. Umwelt und Siedlung von der Steinzeit bis zur Gegenwart. 308 S., Wachholtz-Verlag, Neumünster.
- BERGER, S., G. SÖHLKE, G.-R. WALTHER & R. POTT (2007): Bioclimatic limits and range shifts of coldhardy evergreen broad-leaved species at their northern distributional limit in Europe. – *Phytocoenologia* 37(3-4): 523-539, Berlin, Stuttgart.
- BERNER, U. & H. STREIF (2004): Klimafakten. Der Rückblick – ein Schlüssel für die Zukunft. 4. Aufl. Borntraeger, Stuttgart.
- BLÜTHGEN, J. (1966): Allgemeine Klimageographie. 2. Aufl., Walter de Gruyter, Berlin.
- BURRICHTER, E., R. POTT & H. FURCH (1988): Die potentielle natürliche Vegetation. Geogr. Landesk. Atlas von Westfalen. Lief. 4, 42 S., Münster.
- COLWELL, R. K., BREHM, G., CARDELNS, C. L., GILMAN, A. C. & J. T. LONGINO (2008): Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. – *Science* 322: 258-261.
- CRUTZEN, P. J. & E. F. STOERMER (2000): The „Anthropocene“. – *Global Change Newsletter* 41: 12-13.
- DIERSCHE, H. (2005): Laurophyllisation – auch eine Erscheinung im nördlichen Mitteleuropa? Zur aktuellen Ausbreitung von *Hedera helix* in sommergrünen Laubwäldern. – *Ber. d. Reinh. Tüxen-Ges.* 17: 151-168, Hannover.
- EHLERS, E. (2008): Das Anthropozän. Die Erde im Zeitalter des Menschen. 284 S. Wiss. Buchgesellschaft, Darmstadt.
- ELLENBERG, H. (1971): Die natürlichen Waldgesellschaften der Eilenriede in ökologischer Sicht. – *Beih. Ber. Naturhist. Ges.* 7 (Eilenriede-Festschrift): 121-128, Hannover.
- FAGAN, B. (2009): Die Eiszeit. Leben und Überleben im letzten großen Klimawandel. 239 S., Theiss, Stuttgart.
- GERMANWATCH (2008): Die Welt am Scheideweg: Wie retten wir das Klima? 318 S., Rowohlt, Reinbeck.
- GIBBARD, P., HEAD, M., WALKER, M. & SUBCOMMISSION ON QUATERNARY STRATIGRAPHY (2010): Formal ratification of the Quaternary System/Period and the Pleistocene Series/Epoch with a base at 2.58 Ma. – *Journal of Quaternary Science* 25/2: 96-102.
- GORE, A. (2006): *An Inconvenient Truth*, Rodale, Emmaus, PA, USA.
- GORE, A. (2009): *Wir haben die Wahl. Ein Plan zur Lösung der Klimakrise*. 415 S. Riemann, München.

- GRABHERR, G., GOTTFRIED, M. & H. PAULI (1994): Climate effects on mountain-plants. – *Nature* **369**: 448.
- HÜTTL, R. (2008): Was wissen wir vom Blauen Planeten? ZEIT-Wissen Edition: Planet Erde 286-293, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- HÜTTL, R., LOCHTE, K. & V. MOSBRUGGER (2009): Klima im System Erde. Klimawandel – Antworten und Fragen aus den Geowissenschaften. Terra Nostra, Beih. **5**, 36 S. Geo Union, Alfred-Wegener-Stiftung, Berlin.
- IMBRIE, J., HAYS, J. D., MARTINSON, D. G., MCINTYRE, A., MIX, A. C., MORLEY, J. J., PISIAS, N. G., PRELL, W. L. & SHACKLETON, N. J. (1985): The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine ¹⁸O record. In: BERGER, A. L. et al. (eds.): MILANKOVITCH and climate, Part 1. Reidel Publishing Comp.: 269-305.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007): The fourth Assessment report (AR4), 27. Januar 2007.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2009): The fifth Assessment report (AR5), 14-16. September 2009.
- IVERSEN, J. (1944): *Viscum*, *Hedera* und *Ilex* as climatic indicators. A contribution to the study of past-glacial temperature climate. – *Geol. Förens. Förhandl.* **66**: 463-483.
- KLOSTERMANN, J. (2009): Das Klima im Eiszeitalter. 2. Aufl. 260 S., Schweizerbarth, Stuttgart.
- KLÖTZLI, F., WALTHER, G.-R., CARRAO, G. & A. GRUNDMANN (1996): Anlaufender Biomwandel in Insubrien. – *Verhandl. Ges. Ökol.* **26**: 537-550.
- KÜSTER, H. (2010): Klima, Pflanzenarten, Landschaften: Was wandelt sich, was bleibt konstant? – *Ber. Reinh. Tüxen Ges.* **22**: 49-56, Hannover.
- LOARIE, S. R., DUFFY, P. B., HAMILTON, H., ASNER, G. P., FIELD, C. B. & D. D. ACKERLY (2009): The velocity of climate change. – *Nature* **462**: 1052-1055.
- LOZÁN, J. L. (1998): Warnsignal Klima. Wissenschaftliche Fakten. Wissenschaftliche Auswertungen. Geo. Hamburg.
- MILANKOVITCH, M. (1941): Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitproblem. – *Academic Royale Serbe Spec. Sect. Science Math. et Nat.* Tom **83**, Stamparija Mihaila, Curcica.
- MOSBRUGGER, V. (2003): Die Erde im Wandel – die Rolle der Biosphäre. – *Nat. wiss. Rundschau* **56**(7): 357-365.
- NAGY, L. & G. GRABHERR (2009): *The Biology of Alpine Habitats*. 376 pp. Oxford Univ. Press, Oxford.
- ODENWALD, M. (2010): Forscherstreit um die Sonne. – *Focus*, Nr. 2, 49, 11. Januar 2010.
- PAGANI, M., CALDEIRA, K., BERNER, R., & D. J. BEERLING (2009): The role of terrestrial plants in limiting atmospheric CO₂ decline over the past 24 million years. – *Nature* **460**: 85-88.
- PARMESAN, C. & G. A. YOHE (2003): A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. – *Nature* **421**: 37-42.
- PARMESAN, C. (2006): Ecological and evolutionary responses to recent climate change. – *Ann Rev. Ecol. Syst.* **37**: 637-669.
- PASENAU, H. (2002): Die Entstehung der Eiszeiten. In: FANSA, M. (Hrsg.): *Vom Eise befreit – Geest. Reiche Geschichte auf kargem Land.* – *Schriftenreihe des Landesmuseums für Natur und Mensch, Oldenburg* **25**: 35-40.
- PLÖGER, S. (2009): Gute Aussichten für morgen. – *Wie wir den Klimawandel für uns nutzen können*. 364 S. Westend, Frankfurt.
- POTT, R. (1990): Die nacheiszeitliche Ausbreitung und heutige pflanzensoziologische Stellung von *Ilex aquifolium* L. – *Tuexenia* **10**: 497-512. Göttingen.
- POTT, R. (1995): *Die Pflanzengesellschaften Deutschlands*. 2. Aufl., 622 S., Ulmer, Stuttgart.
- POTT, R. (2003): *Die Nordsee, Eine Natur- und Kulturgeschichte*. 351 S., C. H. Beck, München.
- POTT, R. (2005): *Allgemeine Geobotanik, Biogeosysteme und Biodiversität*. 652 S., Springer, Berlin Heidelberg New York.
- POTT, R. (2008): *Klimawandel in der Erdvergangenheit und Gegenwart.* – *Abhandl. d. Braunschweig. Wiss. Ges.* Band **59**: 73-109, Braunschweig.
- POTT, R. & J. HÜPPE (2007): *Spezielle Geobotanik, Pflanze-Klima-Boden*. Springer, Berlin Heidelberg New York.

- POTT, R., HÜPPE, J., REMY, D., BAUEROCHSE, A. & O. KATENHUSEN (1995): Paläoökologische Untersuchungen zu holozänen Waldgrenzschwankungen im Oberen Fimbartal (Val Fenga, Silvretta, Ostschweiz). – *Phytocoenologia* **25**(3): 363-398.
- POTT, R. & H. KÜSTER (2007): Der Klimawandel und die Vegetation. – *Garten und Landschaft* **8**: 20-21. Callwey-Verlag, Berlin.
- RUDDIMAN, W. F. (2003): The anthropogenic green house era began thousands of years ago. – *Climate Change* **61**: 261-293.
- SIROCKO, F. (2009): Wetter, Klima, Menschheitsentwicklung. Von der Eiszeit bis ins 21. Jahrhundert. 208 S., Theiss, Stuttgart.
- SPEIER, M. & R. POTT (1999): Der hannoversche Stadtwald „Eilenriede“ in geobotanischer und historischer Sicht. – *Ber. d. Reinh. Tüxen-Ges.* **11**: 279-303. Hannover.
- WALTHER, G.-R. (1999): Distribution and limits of evergreen broad-leaved (laurophyllous) species in Switzerland. – *Bot. Helv.* **109**(2): 153-167.
- WALTHER, G.-R. (2001): Laurophyllisation – a sign of a changing climate? In: BURGA, C. A. & KRATTOCHWIL, A. (eds): *General and Applied Aspects on Regional and Global Scales. – Tasks for Vegetation Science* **35**: 207-223, Kluwer Academic Press, Dordrecht.
- WALTHER, G.-R. (2002): Weakening of climate constraints with global warming and its consequences for evergreen broad-leaved species. – *Folia Geobotanica* **37**: 129-139.
- WALTHER, G.-R. (2004): Plants in a warmer world. – *Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst.* **6**(3): 169-185.
- WALTHER, G.-R., BEIBNER, S. & R. POTT (2005): Climate change and high mountain vegetation shifts. In: BROLL, G. & B. KEPLIN (eds): *Mountain Ecosystems – Studies in Treeline Ecology* 77-96, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- WALTHER, G.-R., BURGA, C. A. & P. J. EDWARDS (2001): “Fingerprints” of Climate Change. Adapted Behaviour and Shifting Species Ranges. 329 pp. Kluwer Academic Publ., New York.
- WALTHER, G.-R., POST, E., CONVEY, P., MENZEL, A., PARMESAN, C., BEEBEE, T. J. C., FROMENTIN, J.-M., HOEGH-GULDBERG, O. & F. BAIRLEIN (2002): Ecological response to recent climate change. – *Nature* **416**: 389-395.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Richard Pott, Institut für Geobotanik, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Str. 17, D-30167 Hannover

pott@geobotanik.uni-hannover.de

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der Reinhold-Tüxen-Gesellschaft](#)

Jahr/Year: 2010

Band/Volume: [22](#)

Autor(en)/Author(s): Pott Richard

Artikel/Article: [Klimawandel im System Erde 7-33](#)