

Klima- und Landschaftsveränderungen in der Vergangenheit (und Gegenwart) auf der Basis paläoökologischer Daten

- Felix Bittmann, Wilhelmshaven -

Abstract

With help of manifold palaeoecological methods people worldwide try to draft a precise picture of landscape developments in space and time, especially of the vegetation. The most important components forming the shape of the earth are climate and vegetation, respectively autotrophic plants at the base of the food pyramid and so of the whole life on earth. By a great number of proxy data, means indirect indicators for climate and climate-dependent processes, it is more and better possible to trace the corresponding changes and to analyse their causes. During the past 1000 years and especially since the start of industrialisation increasingly man appears to be a determining factor. An exponentially increasing population, large-scale reconfiguration of landscapes including vegetation, exploitation of resources and fossil fuels, have measurable impacts on the ecosystem earth. For estimating the consequences it is indispensable to know the natural variability (not only of climate) and their causes. Only by this it is possible to quantify the human influence approximately and to separate it from natural developments as well as to predict future courses, respectively to draft scenarios of higher probabilities than up to now.

1. Einleitung

Das heutige Bild der Erde, insbesondere die (Kultur-)Landschaft, wie wir sie täglich wahrnehmen, ist letztlich das aktuelle Ergebnis einer andauernden Entwicklung und Veränderung, die durch eine Vielzahl von Faktoren seit Beginn der Erdgeschichte gesteuert wird. Zeiten tiefgreifender Veränderungen wechselten sich dabei mit Phasen lang anhaltender Stabilität ab. Allerdings setzte die Entwicklung zur heutigen Kulturlandschaft erst vor etwas mehr als 7000 Jahren ein. Seitdem prägt zunehmend der Mensch durch seine wirtschaftlichen Tätigkeiten (Ackerbau, Viehzucht, Urbanisierung, Industrialisierung, Technisierung) und Bevölkerungszunahme das Aussehen seiner Umgebung und das in exponentiellem Maße – zunächst noch schwach, dann vor allem in den letzten tausend Jahren stark ansteigend.

Diese Entwicklung über lange Zeiträume lässt sich mit Hilfe paläoökologischer Methoden nachvollziehen und rekonstruieren. Die Paläoökologie umfasst dabei die Erforschung der fossilen Organismen in ihrer Umwelt und des dabei bestehenden Beziehungsgeflechts. Somit gehört auch die ‚unbelebte‘ Umwelt, die sozusagen das ‚Substrat‘ bildet, als Untersuchungsgegenstand dazu, die als Teil des Beziehungsgeflechts direkte und indirekte Schlüsse auf die Organismen erlaubt. Direkte Messungen, wie in der Rezent-Ökologie, sind jedoch nicht möglich, allerdings finden (experimentelle) Ergebnisse der Ökologie nach dem Aktualitätsprinzip Eingang in die Interpretation der Befunde aus der Vergangenheit. Die Paläoökologie arbeitet also mit sogenannten proxy-Daten. Das sind indirekte, abgeleitete (Klima-)Indikatoren oder Zeiger, aus denen quantitative Daten, vergleichbar Messdaten, gewonnen werden. Dazu zählen etwa Baumringe (jahrgenaue Datierungen, Änderungen des ¹⁴C-Gehaltes, Wachstumsdaten, Niederschlagsverhältnisse), Stalagmiten (verschiedene Isotope, Temperatur, Nieder-

schlag, Jahresschichten, Datierung), Diatomeen (pH-Werte, Trophiestufen, Temperatur, Niederschläge), Pollen und Makroreste (Vegetationsentwicklung, Klima, Vegetationsgeographie), Eiskerne (chemische Parameter, Sauerstoff-Isotope, Jahresschichten), Chironomidae (Temperatur), Cladocera (Temperatur), Gletscherstände (Temperatur, Niederschläge), Getreidepreise (Klima), Schriftquellen (Klima) und eine Vielzahl weiterer.

Um von diesen proxy-Daten jedoch zu quantitativen (Klima-)Werten zu kommen, ist eine Kalibrierung an instrumentellen Daten notwendig, wodurch die Paläoökologie wiederum eng mit der Ökologie, der Klimatologie, den Geowissenschaften, den Geisteswissenschaften, um nur einige wenige zu nennen, verknüpft ist.

Mit zu den ersten Belegen für Vegetationsänderungen in der Vergangenheit gehören Funde von Haselnüssen in hochgelegenen Mooren des Erzgebirges (v. CARLOWITZ 1713, zur Geschichte der Paläoökologie s. auch BIRKS 2008, BITTMANN 2010) oder Kiefernholz-Horizonte in Mooren (DAU 1829), die als Waldphase gedeutet wurden.

STEENSTRUP (1842) interpretierte die unterschiedliche Pflanzenerhaltung in Torfprofilen und das Vorkommen von Holzlagen, wie sie DAU beschrieben hatte, als Änderungen der Feuchtigkeits- und eventuell Temperaturverhältnisse. Er betonte dabei die Bedeutung von Pflanzen- und Tierresten als Indikatoren früherer Umweltveränderungen. Auch VAUPELL (1857) vertrat die Ansicht, dass die Torfstratigraphie durch Feuchtigkeitsänderungen bedingt ist. Aus der Vermessung von Jahrringbreiten an fossilen Moorkiefern und Holzartenbestimmungen an im Torf eingeschlossenen Holzresten schloss er auf Temperaturänderungen, die sowohl das Wachstum als auch die Baumartenzusammensetzung beeinflussen. Bis schließlich BLYTT (1876, 1881) und später SERNANDER (1890/94) die Holzlagen und die Änderungen in der Torfstratigraphie mit vergangenen Klimaphasen verknüpften: Boreal – warm, trocken; Atlantikum – am wärmsten, nass; Subboreal – warm, trocken; Subatlantikum – kühl, nass („Blytt-Sernander-System“), ergänzt von FÆGRI (1940) durch das Präboreal – kühl, subarktisch.

Nach wie vor eines der wichtigsten Instrumente, um die Vegetation, Vegetationsänderungen und das Klima der Vergangenheit zu rekonstruieren, ist die Pollenanalyse. Da die Vegetation eng mit dem Klima zusammenhängt und Klimazonen auch über deren Vegetation definiert werden (KÖPPEN 1884, SCHRÖDER 1998, PEEL et al. 2007), ist deren Entwicklung hervorragend als Klimazeiger geeignet. Seit VON POST (1918) die quantitative Pollenanalyse zur Rekonstruktion früherer Vegetations- und Klimazustände sowie zur relativen Datierung etabliert hat und damit die bis dahin praktizierte qualitative Analyse abgelöst wurde, hat sich die Methode rasch weiter entwickelt. Dazu schreibt VON POST (1946) selbst: „...the most complete and most realistic register of climatic fluctuations throughout the past which we now have at our disposal“ und DEEVEY (1967) ergänzt: „von Post's simple idea that a series of changes in pollen proportions in accumulating peat was a four-dimensional look at vegetation, must rank with the double-helix as one of the most productive suggestions of modern times.“

Praktisch von Anfang an stand dabei der Versuch im Vordergrund, die ermittelten Pollenanteile der einzelnen Taxa direkt in flächenhafte Anteile an der vorhandenen Vegetation zu übertragen. Durch unterschiedliche Pollenproduktionsraten, Verbreitungsmechanismen und -eigenschaften ist das ein sehr komplexes Thema, das heute mit Hilfe von quantitativen und multivariaten Datenanalysen, Pollenverbreitungsmodellen in Verbindung mit Einzugsgebieten und unter Einsatz von Computern, die in der Lage sind, solche Szenarien und Simulationen in angemessener Zeit durchzurechnen, angegangen wird (z.B. MIDDLETON & BUNTING 2004, SUGITA 2007 a, b, GAILLARD et al. 2008a, b).

Neben der Vegetationsrekonstruktion mit der verbesserten Abschätzung von Wald- und

Offenlandanteilen steht vor allem auch die pollengestützte Temperaturrekonstruktion über Transferfunktionen im Fokus der Auswertungen (BIRKS & SEPPÄ 2004, JUGGINS 2013). Aber auch MCR (mutual climate range, ATKINSON et al. 1987), bei der Verbreitungsgrenzen von Arten mit klimatischen Parametern verknüpft werden – im Prinzip eine Verbesserung der Zeigerartenmethode nach IVERSEN 1944 – und durch Überlagerung der Klimabereiche der einzelnen Taxa ein gemeinsames Klima rekonstruiert wird. Angelehnt daran ist die Aufstellung von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDF), bei denen An- und Abwesenheit einer Art in geographischen Rastereinheiten, die klimatisch charakterisiert sind, ausgewertet werden. Aus der Überlagerung aller Arten einer Zelle wird der wahrscheinlichste Wert bzw. Wertebereich ermittelt (KÜHL 2002).

Inzwischen sind die anthropogen bedingten Landschaftsveränderungen global soweit fortgeschritten, dass sogar über den Beginn einer neuen geochronologischen Epoche, das Anthropocene oder Anthropozän, (CRUTZEN & STOERMER 2000, CRUTZEN 2002), diskutiert wird. Besonders während der drei vergangenen Jahrhunderte eskalierte der Einfluss des Menschen auf die globale Umwelt und die Bevölkerung verzehnfachte sich.

2. Klima und Klimaänderungen

Was wissen wir über das Klima und vor allem dessen Änderungen in der Vergangenheit? Das Klima wird bestimmt durch die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre und der Ozeane, also die Winde und Strömungen, welche Wärme und Feuchtigkeit rund um die Erde transportieren. Angetrieben und in Gang gehalten wird das System durch die eingestrahelte Energie der Sonne. Die Ursache für Klimaänderungen oder Klimavariabilität muss daher zuerst bei der Sonne gesucht werden. In geologischen Zeiträumen gesehen ist daher der solare Energiefluss entscheidend und wird auch zukünftig entscheidend bleiben. Dieser Energiefluss wird durch zahlreiche Faktoren moduliert, so dass es bei Überschreitung von Schwellenwerten, die jedoch weitgehend unbekannt sind, zu mehr oder weniger abrupten Änderungen kommen kann. Offensichtlich sind dabei Selbstverstärkungsmechanismen notwendig, um z.B. den Übergang aus einem Eiszeitklima in ein Warmzeitklima anzustoßen und dann auch für eine Zeitspanne von mehreren tausend Jahren relativ stabil zu halten (kleinere Schwankungen nicht eingerechnet). Eine langfristige Auswirkung hat dabei auch die Lage der Kontinente - nur wenn sich größere Landmassen an den Polen bzw. in Polnähe befinden, ist es möglich mächtige Inlandseismassen aufzubauen, die so große Wassermassen speichern, dass deutliche Meeresspiegelbewegungen aufgezeichnet werden können und auch messbare Verschiebungen im Sauerstoff-Isotopenverhältnis auftreten (Anreicherung des schwereren ¹⁸O, das weniger leicht verdunstet und sich daher in einem geringeren Verhältnis in den Landeismassen findet). Aber auch die Verschiebung der Kontinente zueinander führt über Verlagerung von Meeresströmungen, die einen ungeheuren Energietransport leisten, zu Änderungen des globalen Klimasystems. So wird die Bildung der Mittelamerikanischen Landbrücke in Panama vor rund 900.000 Jahren, wodurch die Verbindung zwischen Atlantik und Pazifik in den niedrigen Breiten geschlossen wurde, mit den ab da zu verzeichnenden stärkeren Temperaturunterschieden zwischen Kalt- und Warmzeiten in Verbindung gebracht. Dieser Wechsel erfolgt seither etwa alle 100.000 Jahre, wobei etwa 80.000 Jahren kaltzeitlichen, 20.000 Jahre warmzeitliche Verhältnisse gegenüber stehen (SERVANT 2001). Als Ursache für diese Schwankungen erkannte MILANKOVITCH (1941) die Überlagerung der verschiedenen Erdbahnparameter, die die Umlaufbahn und Rotationseigenschaften bestimmen. Sie sind nicht konstant, sondern schwanken jeweils mit unterschiedlichen Periodizitäten mit einer definierten Amplitude um einen Mittelwert, so dass etwa alle 100.000 Jahre besonders günstige bzw. ungünstige Werte erreicht werden, die eine Umstellung des Systems einleiten können. So hat die Exzentrizität der Erdumlaufbahn um die Sonne eine Periode von etwa 100.000 Jahren zwischen dem

Minimal- und Maximalwert, die Schiefe der Erdachse von 40.000 Jahren (Schwankungsbereich etwa von 22 bis 25°) und die Präzession der Achse von etwa 26.000 Jahren. Letztere führt dazu, dass die einzelnen Jahreszeiten nicht immer am selben Punkt der Erdbahn erreicht werden, sondern sich langsam verschieben und sich damit auch die Menge an eingestrahelter Energie während der Jahreszeiten verändert – derzeit durchläuft die Erde ihren sonnennächsten Punkt, das Perihel, Anfang Januar (Winter auf der Nordhemisphäre), den sonnenfernsten Punkt Anfang Juli. In etwa 13.000 Jahren ist das Gegenteil der Fall. Aus den bekannten Erdbahnparametern mit ihren zyklischen Schwankungen kann daher die relativ genaue räumliche und zeitliche Berechnung des durchschnittlich eingestrahelten Energiestroms (Wärme und Licht) für jeden Punkt der Erde erfolgen.

Innerhalb dieser Zyklen wurden weitere, offensichtlich abrupte Wechsel, besonders gut bekannt aus der letzten Kaltzeit der Nordhemisphäre, der Weichsel- oder Würm-Eiszeit entdeckt. Abrupte Erwärmungen innerhalb weniger Jahrzehnte, die sogenannten Dansgaard-Oeschger events (Abb. 1), wurden erstmals im Grönland-Eiskern GRIP registriert (JOHNSON et al. 1992, DANSGAARD et al. 1993). Einigen der D-O-events gehen Heinrich events während Kältephasen voraus, in denen durch hohes Aufkommen von Eisbergen auf Grund von Eiszerfall an den Gletscherrändern im Eis enthaltene grobkörnige Sedimente (IRD, ice rafted debris) weit nach Süden verfrachtet wurden und auf ihrem Weg beim Abschmelzen auf den Meeresgrund sanken. Diese Horizonte finden sich in den Tiefseebohrkernen aus den entspre-

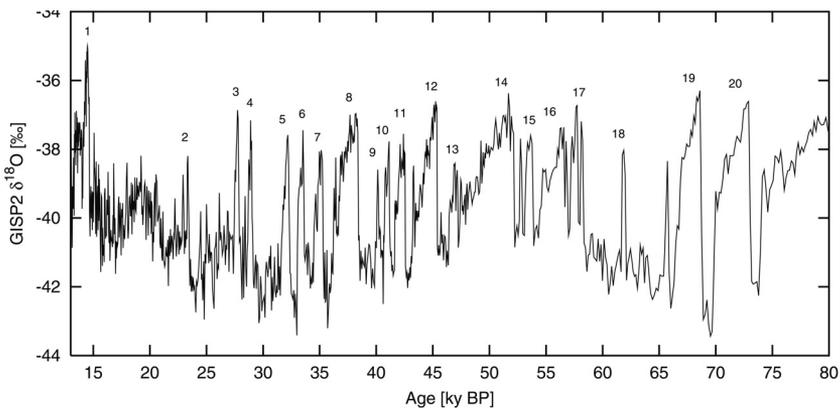


Abb. 1: Dansgaard-Oeschger-events (abrupte Klimaerwärmungen) während der letzten Kaltzeit (nach SCHULZ 2002).

chenden Regionen. Die Ursachen dafür sind weitgehend unbekannt. Einige der Abkühlungen werden auf Unterbrechungen der Thermohalinen Zirkulation auf Grund von Übersichtung mit Süßwasser, das in großer Menge durch den plötzlichen Ausbruch von aufgestauten Gletscherrandseen des nordamerikanischen Eisschildes in den Nordatlantik floss, zurückgeführt. So wird z.B. die Jüngere Dryaszeit am Ende der letzten Eiszeit (Ausbruch des Lake Agassiz, TELLER 2002) und der 8.2 ka event im frühen Holozän mit solch einer Unterbrechung der Zirkulation in Verbindung gebracht. Auch für das Holozän sind solche IRD-events belegt; neben 8200 auch noch 5900, 4200, 2800, 1400 und 500 cal. yr BP. (BOND et al. 1997).

Kurzfristige Schwankungen kennzeichnen die (magnetische) Sonnenaktivität. Bekannt ist z.B. der 11-jährige Sonnenfleckenzyklus, der zu Aktivitätsschwankungen führt, die in der Lebensspanne eines Menschen eine Rolle spielen können. Ob diese jedoch das Klima beeinflussen und wie ist nicht geklärt. Gleichzeitig variiert die Stärke der Sonnenfleckenaktivität in 80jährigen Zyklen und länger. Während des sogenannten Maunder Minimums (EDDY

1976, ca. 1645-1715), das mit dem Maximum der Kleinen Eiszeit korreliert wird, verschwand der Sonnenfleckenzyklus nahezu ganz.

Der ankommende Energiestrom trifft schließlich auf die Atmosphäre (und das Erdmagnetfeld), so dass auch deren Zusammensetzung entscheidend dafür ist, wie viel davon auf der Erdoberfläche ankommt und in welcher Form. Gase, Partikel (Staub, Verschmutzung) und Wolken treten in Wechselwirkung und absorbieren oder reflektieren einen Teil der Energie, kurzwellige energiereichere Strahlung wird in der Atmosphäre durch Gase wie CO₂ und Methan sowie an der Erdoberfläche teilweise zu langwelliger Wärmestrahlung umgesetzt, die nicht mehr frei zurückgestrahlt wird und somit zur Erwärmung der Atmosphäre beiträgt. Dieser natürliche Treibhauseffekt ist für das Leben auf der Erde notwendig, denn sonst wäre es zu kalt, um Leben zu ermöglichen. Heftig und kontrovers diskutiert wird, ob und in welchem Maß die globale anthropogene Erhöhung der Treibhausgase (vor allem CO₂ und Methan) durch Verbrauch der fossilen Energieträger Öl, Gas und Kohle den natürlichen Treibhauseffekt erhöht, so dass es wärmer wird.

Umgekehrt ist z.B. nach heftigen Vulkaneruptionen, bei denen Gase und Staub mit langer Verweildauer und globaler Verteilung vor allem in hohe Schichten gelangen, eine spürbare Reduzierung des Energiestroms durch verstärkte Reflexion zu beobachten, der zu einer kurzen globalen Temperaturniedrigung um 0.2-0.3 °C für 1-3 Jahre führen kann.

Damit wären wir bei der kleinskaligen Klimavariabilität angelangt, die die Menschen sehr viel unmittelbarer betrifft und wahrgenommen wird. Die North Atlantic Oscillation (NAO) und die El Niño Southern Oscillation (ENSO) z.B. sind periodisch ablaufende Änderungen in der Wechselwirkung zwischen Ozeanen und Atmosphäre, die zu starken Wechseln in der Niederschlagshäufigkeit führen und somit entscheidenden Einfluss auf Ernteerträge in den betroffenen Gebieten haben. Der Wechsel zwischen einer warmen El Niño- (Erwärmung des zentralen und östlichen Pazifiks hauptsächlich bis 10° nördlicher und südlicher Breite) und kühlen La Niña-Phase ist verbunden mit der atmosphärischen Komponente der Southern Oscillation. Sie ist gekennzeichnet durch einen regelmäßigen Luftdruckwechsel zwischen östlichem und westlichem Pazifik, begleitet durch Änderungen in der Windstärke über dem äquatorialen Pazifik, der einen großen Einfluss auf die mittleren Breiten hat.

So sinkt während eines warmen ENSO-Events der Luftdruck an der Meeresoberfläche im östlichen Pazifik und steigt im westlichen Teil, so dass sich die dominierenden östlichen Passatwinde abschwächen. Das führt zu Trockenheit in Australasien und Teilen von SO-Asien und S-Amerika, während heftige Regenfälle in den an das wärmere Wasser angrenzenden Gebieten wie Peru und Ecuador auftreten. Der Wechsel zwischen El Niño- und La Niña-Phasen ereignet sich etwa alle 4 bis 7 Jahre (WEATHER WORLD 2010).

3. Landschaftsveränderungen

Die Gründe für Landschaftsänderungen sind vielfältig. Zu unterscheiden sind einerseits natürliche, überwiegend klimatisch gesteuerte, lang- und kurzfristige, groß- und kleinräumige Änderungen wie z.B. Kontinentaldrift, Tektonik, (Gebirgs-)Erosion, Vereisungen mit glazialmorphologischen Prozessen, Verkarstung (Auslaugung, Erdfälle), Vermoorungen, Bodenbildungen, aber auch Vegetationsänderungen durch Sukzessionen/Einwanderungen auf Grund von Klimaänderungen, so z.B. der Wechsel der thermophilen und lichtliebenden Eichenmischwaldgesellschaften durch die besser an kühlere Bedingungen angepassten Schattholzgesellschaften mit Buche und Tanne (MAGNY et al. 2013) (Abb. 2) oder die Verdrängung der Linde durch die Fichte in Skandinavien (SEPPÄ et al. 2009), die mit der Abnahme der sommerlichen Energieeinstrahlung im Verlauf des Holozäns parallelisiert werden können.

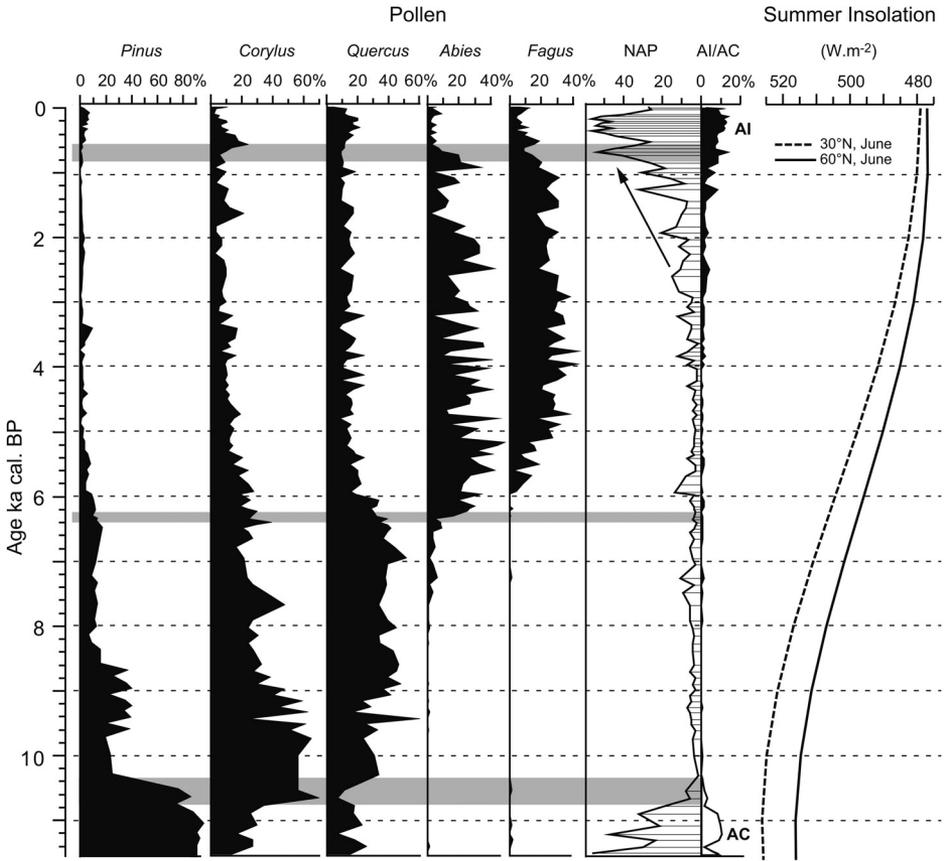


Abb. 2: Vegetationsänderungen in Abhängigkeit der Insolation; grau unterlegt Phasen schneller Änderungen (nach MAGNY et al. 2013).

Eine anthropogen verursachte Erwärmung von mehr als 2 °C, wie prognostiziert, müsste eine erneute Verschiebung zugunsten der Linde (*Tilia cordata*) zur Folge haben. Zumindest die Erwärmung, die seit dem Ende der kleinen Eiszeit zu verzeichnen ist, war offensichtlich dafür noch nicht ausreichend, kann aber auch mit der starken anthropogenen Reduzierung der Wälder insgesamt zusammenhängen, die keine natürliche Regeneration gemäß des bestehenden Klimas erlaubt, welche auch pollenanalytisch zu fassen wäre.

Von solchen natürlichen sind die anthropogenen Landschaftsänderungen zu trennen, die mit dem immer stärker werdenden Einfluss des Menschen auf seine Umwelt seit dem Neolithikum registriert werden können. Räumlich und zeitlich vergleichsweise kurz, sind sie jedoch global erkennbar. Dazu gehören vor allem die Schaffung von Kulturland durch Rodungen (Ackerland, Wiesen/Weiden), Verheidung durch Übernutzung, Anlage von Siedlungen, Industrieanlagen und Verkehrswegen sowie Nivellierung der Topographie durch Pflügen, Erosion und Kolluvienbildung.

Solche anthropogenen Landschaftsänderungen sind Gegenstand der Environmental Archaeology, definiert nach WILKINSON & STEVENS (2003, 15) „The study of the landscapes that were inhabited by past human populations and the economies they constructed, on the basis of preserved biological remains and geological phenomena“, eine Definition, die so auch für die Paläoökologie Gültigkeit besitzt.

Um die Ursachen der Landschaftsänderungen (natürlich und anthropogen) einerseits zu erfassen und andererseits auseinander zu halten, ist ein multiproxy-Ansatz notwendig. Nur aus der Kombination von möglichst vielen geochemischen, sedimentologischen, physikalischen und biologischen proxies ist ein besseres Verständnis der ablaufenden Prozesse zu erwarten. Individuelle proxies kommen oder können zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Eine schlüssige Rekonstruktion muss aber in der Lage sein, alle Ergebnisse zusammenzuführen und führt so wiederum zu einem neuen Verständnis oder Interpretationsansatz der Einzelergebnisse.

Für einen solchen Ansatz eignen sich vor allem Seesedimente und Torfkörper, wobei letztere in unseren dicht besiedelten und intensiv genutzten Landschaften durch Entwässerung, Mineralisierung und Torfabbau vor allem der jüngeren Schichten, die die letzten 1000-2000 Jahre mit dem größten menschlichen Einfluss repräsentieren könnten, kaum noch vorhanden bzw. auswertbar sind. Seen dagegen, insbesondere in abflusslosen Senken, enthalten in Form ihrer Sedimente in der Regel vollständige und ungestörte Archive, die bis zur Gegenwart reichen (Abb. 3). Tiefe, am Grund sauerstofffreie Gewässer sind häufig jahreszeitlich geschichtet, so dass im Idealfall eine jahrgenaue Chronologie erstellt werden kann und somit eine entsprechend hohe zeitliche Auflösung gewährleistet ist.

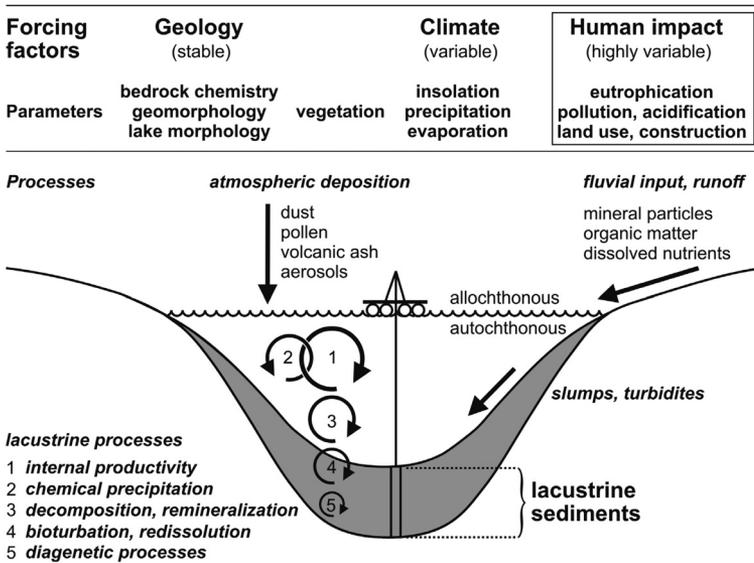


Abb. 3: Bildung von Seesedimenten als kontinuierliche Archive (nach ZOLITSCHKA & ENTERS 2009).

Beispiel Multiproxy-Studie Eversener See

Der Eversener See, Ldkr. Rotenburg/Wümme, ist zurzeit Gegenstand intensiver interdisziplinärer Untersuchungen. An einem rund 11 m mächtigen Sedimentkern werden zahlreiche verschiedene Analysen durchgeführt mit dem Ziel, die spätglazialen und holozänen Umweltveränderungen im Einzugsgebiet detailliert und hochauflösend zu rekonstruieren. Der See hat mit ca. 0.25 km² ein kleines, überschaubares Einzugsgebiet. Die Wasserfläche beträgt weniger als 1 ha, Bohrungen im Uferbereich ergaben jedoch, dass sie ursprünglich etwa doppelt so groß war. Historische Karten des 18. Jhs. zeigen für die Umgebung kaum Waldflächen, dafür ausgedehnte Heiden und (aktive) Sanddünen, Ackerland ist auf die Nähe der Siedlungen beschränkt.

Durchgeführt werden:

- Ermittlung und Kartierung archäologischer Funde und Siedlungsplätze im Einzugsgebiet als Zeiger für das Ausmaß des menschlichen Einflusses zu den unterschiedlichen Zeiten,
- ^{14}C -Datierungen zur Erstellung eines zuverlässigen Altersmodells anhand umfangreicher Datenserien,
- Untersuchungen der Diatomeenflora, vorläufige Ergebnisse zeigen die Entwicklung der pH- und Nährstoffverhältnisse im Verlauf des Holozäns.
- Chironomidenanalysen für die Rekonstruktion der sommerlichen Lufttemperatur (August) im Verlauf des Holozäns,
- Geochemische Messungen, u.a. Titangehalt als Indikator für den Eintrag terrigenen Materials, Gesamt-Kohlenstoff und biogenes Silicium als Zeiger für die Produktivität und Sedimentqualität, Gesamt-Schwefel steht für die Wasserzirkulation, das Verhältnis von Gesamt-Kohlenstoff zu Gesamt-Stickstoff sowie die Veränderung der stabilen Kohlenstoff- und Stickstoff-Isotope ($^{13}\text{C}_{\text{org}}$, $^{15}\text{N}_{\text{tot}}$) für Aussagen zur Quelle des organischen Materials, dessen Diagenese und Eutrophierung.
- Pollenanalysen (und Holzkohlenanalysen) – Rekonstruktion der Vegetations- und Landschaftsgeschichte, einschließlich der Einwanderungsgeschichte einzelner Taxa, basierend auf einem präzisen Altersmodell. Principal Component Analysen der Pollendaten geben Auskunft über die Stärke des menschlichen Einflusses im Verlauf der Zeit.
- ^{210}Pb - und ^{137}Cs -Messung der radioaktiven Isotope zur Datierung der jüngsten Sedimente,
- Quecksilberanalysen als Hinweis auf atmosphärischen Eintrag insbesondere auf Grund von Vulkaneruptionen.

Am Ende steht die integrative Analyse der Datensätze im Hinblick auf Mensch-Umwelt-Wechselwirkungen sowie die Verknüpfung mit anderen paläoökologischen Archiven in NW-Deutschland.

Als weitere indirekte Methoden zur Ermittlung von Landschaftsveränderungen sind geologische Bohrungen und geophysikalische Messungen (Geomagnetik, Georadar, Geoelektrik) zu nennen. Sie liefern Daten für die Rekonstruktion der Paläotopographie und die dreidimensionale Rekonstruktion von Schichten im Untergrund für Massenbilanzierungen. Aktuelle geomagnetische Messungen in der Marsch NW-Deutschlands liefern Belege für Wasserläufe und Kanäle, die teilweise während ihres Bestehens schiffbar waren und somit dem Warenaustausch dienten, wovon heute in der Landschaft nichts mehr zu sehen ist (Abb. 4).

4. Unwägbarkeiten

Wo liegen Unwägbarkeiten oder Probleme der paläoökologischen Rekonstruktionen?

Ein entscheidender Punkt bei allen Untersuchungen stellt die präzise Datierung von Archiven, Schichten oder Proben dar. Insbesondere, wenn Daten verschiedener Archive mit unterschiedlich hoher Auflösung und aus unterschiedlichen geographischen Regionen miteinander in Einklang (synchronisiert) werden sollen, um weitergehende Rekonstruktionen machen zu können (STRIEN & GRONENBORN 2005, CHARMAN 2010). Nur mit wenigen Methoden sind kontinuierliche (lückenlose) Untersuchungen langer Kerne in vertretbarer Zeit durchzuführen. Automatisierten kontinuierlichen Messungen wie die Elementzusammensetzung von Sedimenten mit Hilfe von XRF (Röntgenfluoreszenz) oder Messung der magnetischen Sus-

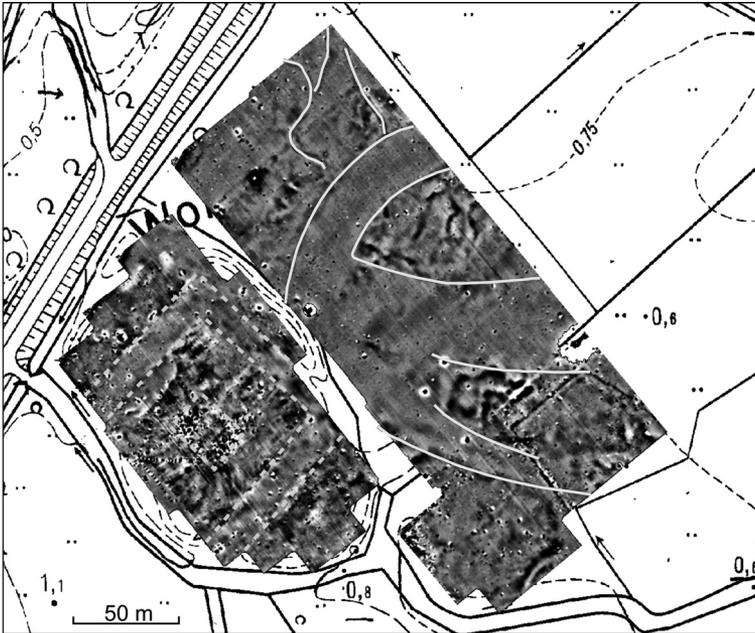


Abb. 4: Geomagnetik am Woltersberg bei Jever, Ldkr. Friesland - Standort einer mittelalterlichen Burganlage des 10.-13. Jh. mit vermuteter Hafenanlage. Burganlage (gestrichelte Linie) und Prielverläufe (durchgezogen) sind deutlich erkennbar (Grafik: I. Eichfeld, M. Spohr, NIHK).

zeptibilität (u.a. proxy für Sedimenteintrag in Seen) in relativ kurzer Zeit stehen zeitintensive Analysen biologischer proxies wie Pollen, Makroreste (Samen und Früchte), Chironomidae, Cladocera, Diatomeae und vielen mehr gegenüber. Für die meisten dieser proxies können nur Proben in mehr oder weniger großen Abständen untersucht werden, um den zeitlichen Aufwand in vertretbaren Grenzen halten zu können, so dass bestimmte Ereignisse, die bei kontinuierlicher Untersuchung registriert werden könnten, nicht entdeckt werden.

So ist z.B. die Beziehungskette niedrigere Sonnenaktivität – kühleres Klima – höhere Produktionsrate von ^{14}C in der Atmosphäre – hohe Seespiegel – IRD-event nach MAGNY 2004 schlüssig, wie auch die umgekehrte Situation: hohe Aktivität – wärmeres Klima – weniger ^{14}C – niedrige Seespiegel – höhere Zahl von (bekannten) Seeufersiedlungen und trifft auch in vielen Fällen zu. Bei genauer Betrachtung zeigt sich aber, dass in der Regel nicht alle Faktoren dafür sprechen, sondern einzelne auch (teilweise mehrfach) gegenläufig sein können. Liegt allen proxies ein zuverlässiges Altersmodell zu Grunde, das solch einen Vergleich erlaubt, wären nicht den Erwartungen entsprechenden Befunde ein Hinweis darauf, dass noch andere Faktoren steuernd eine Rolle spielen, die bei der Interpretation eventuell vernachlässigt bzw. (nach statistischer Analyse) als nicht relevant eingestuft wurden. Um also zu verlässlicheren Aussagen zu kommen, werden noch viele Daten mit höherer zeitlicher Auflösung benötigt und auch die multivariaten statistischen Ansätze der Datenauswertung müssen weiter verbessert werden. So kommt z.B. auch der IPCC Report 2007 zu dem Schluss, dass “many features of abrupt changes are still not well constrained due to a lack of precise temporal control of the sequencing and phasing of events between the surface, the deep ocean and ice sheets.” (Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis, 6.4.2.2 What Is Known About the Mechanism of these Abrupt Changes?)

Transferfunktionen sind derzeit die am häufigsten angewendete Möglichkeit, die Beziehungen rezenter Organismen oder proxies zu ihrer jeweiligen Umwelt mathematisch zu

beschreiben. Unter der Annahme, dass die für das Vorkommen oder für das Fehlen eines Organismus entscheidenden Faktoren richtig erkannt wurden (z.B. Temperatur, Niederschläge, Nährstoffversorgung) und diese unveränderlich in Zeit und Raum sind, werden die so festgestellten Beziehungen auf fossile Organismen angewendet. Je weiter zurück in der Vergangenheit die Beziehungen Anwendung finden, desto höher ist dabei die Gefahr auf Grund von Vergesellschaftungen, für die es heute kein Analogon gibt, zu abweichenden oder falschen Werten zu kommen. Auch ist mit der Möglichkeit zu rechnen, dass in der Vergangenheit noch andere Faktoren für das Vorkommen einer Art eine Rolle spielten, als das heute in einer anthropogen geprägten Umwelt der Fall ist (PAUS 2013).

Relativ komplexe Modelle und Simulationen heutiger und auch vergangener Zustände als Basis für Voraussagen müssen sich auf Grund von begrenzter Rechnerleistung und -kapazität in der Regel auf die wichtigsten Parameter beschränken, die den größten Teil der innerhalb einer Vergesellschaftung von Organismen festgestellten Varianz abdecken. Dabei besteht die Möglichkeit, dass der Einfluss weiterer Parameter unterschätzt bzw. vernachlässigt wird. Daher ist eine ständige Weiterentwicklung der Modelle unter Einbeziehung weiterer Daten und wirkenden Faktoren ‚untergeordneter‘ Bedeutung sowie Nutzung der fortschreitenden technischen Entwicklung notwendig. Für die Validierung der Modelle stellen paläoökologische Daten langer Zeiträume eine entscheidende Grundlage dar, denn ein Modell, das die Zukunft beschreiben oder prognostizieren soll, muss auch in der Lage sein, die Vergangenheit zu beschreiben. Eine große Schwierigkeit besteht darin, dass Modelle, die die gegenwärtige Situation ganz gut reproduzieren können, den Anteil des Menschen mit einschließen, dessen Höhe jedoch kaum zuverlässig beziffert werden kann. Solange sich das Klima noch innerhalb der natürlichen Schwankungsbreite der Vergangenheit bewegt, können die Ursachen für Veränderungen nicht allein am Mensch festgemacht werden. Als sehr wahrscheinlich gilt, dass der Mensch auf die natürlichen Schwankungen ‚aufsattelt‘ und die eher natürliche Erwärmung seit dem Ende der kleinen Eiszeit verstärkt. Ein Indiz für die Rolle des Menschen ist relativ sicher die Entwicklung des CO₂-Anteils in der Atmosphäre, da Vergleiche zu vergangenen Warmzeiten möglich sind, seit Gase wie CO₂ und Methan sehr genau in Eisbohrkernen gemessen werden können. Mit dem im Rahmen des europäischen Antarktis-Bohrprogramms (EPICA) erbohrten Kern Dome C liegt mittlerweile ein Archiv vor, das mehr als 800.000 Jahre zurückreicht (AUGUSTIN et al. 2004) und für Vergleiche der Warmzeiten herangezogen werden kann. Im Lauf der letzten 3-4 Eiszeitzyklen war der Klimaverlauf im Großen und Ganzen immer ähnlich: auf eine rasche Erwärmung zu Beginn einer Warmzeit folgte ein Anstieg des CO₂- und Methan-Gehalts, die somit eine starke Kopplung an den Temperaturverlauf zeigen (PETIT et al. 1999). Darauf folgte ein kontinuierlicher Rückgang bis zum Übergang in die anschließende Kaltzeit. Auch für das Holozän müsste sich folglich der CO₂- und Methan-Gehalt sowie die Temperatur verringern (und damit sich das Klima in Richtung kühler-feuchter entwickeln). Stattdessen steigen jedoch die Anteile mehr oder weniger seit Beginn des Neolithikums (RUDDIMAN 2003, 2005, RUDDIMAN & ELLIS 2009) (Abb. 5).

Häufig können Beziehungen oder Zusammenhänge zwischen zwei oder mehr Parametern hergestellt werden, ohne dass die Mechanismen dahinter bekannt sind. So haben VAN GEEL et al. 1996 einen Zusammenhang zwischen erhöhter ¹⁴C-Produktion bzw. ¹⁴C-Gehalt in der Atmosphäre und Abkühlung hergestellt, die zu einem Anstieg des Grundwasserspiegels und Moorausbreitung an der Wende Bronze-Eisenzeit um etwa 800 v. Chr. geführt haben. Da eine erhöhte ¹⁴C-Produktion in Phasen verringerter Sonnenaktivität (verringerte elektromagnetische Strahlung) auftritt, könnte das eine Erklärung für eine Abkühlung sein. Wie jedoch die Zusammenhänge im Einzelnen aussehen, ist unbekannt.

Ungeklärt ist auch, ob und wie Klimaänderungen in der Vergangenheit Einfluss auf die

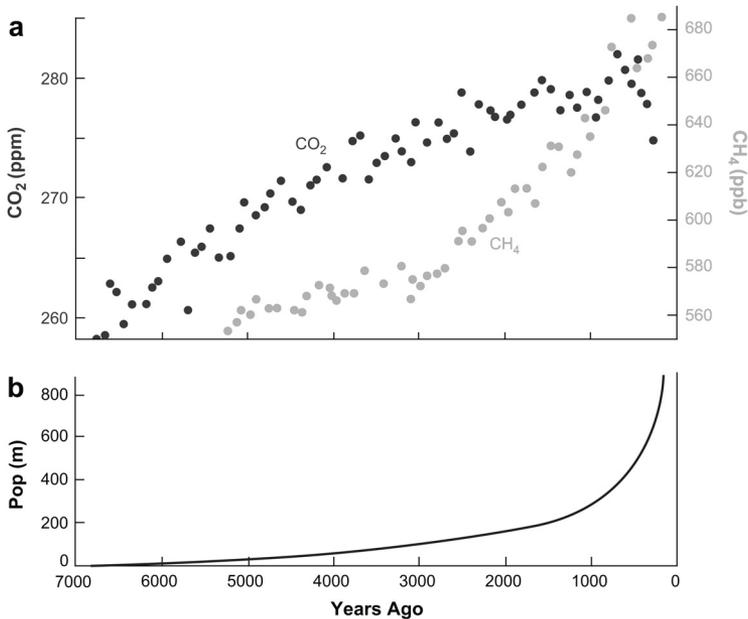


Abb. 5: (a) Zunahme von Methan und CO₂ im Eisbohrkern Dome C der Antarktis von 7000 bis 200 Jahre v.h.; (b) Schätzung der Bevölkerungszunahme im gleichen Zeitraum; (nach RUDDIMAN & ELLIS 2009).

Siedlungsgeschichte hatten bzw. bestimmte Neuerungen und Entwicklungsschübe initiierten. STRIEN & GRONENBORN (2005) und GRONENBORN (2010) diskutieren den klimatischen Einfluss als Ursache für die verschiedenen Phasen bzw. Übergänge der neolithischen Kulturstufen im Zuge der Neolithisierung, in dem globale Klima-proxies zusammengestellt und mit kulturellen Entwicklungen korreliert werden. Ähnlich in SIROCKO 2009, wo in mehreren Beiträgen die pleistozänen und holozänen Entwicklungen der menschlichen Kultur paläoökologischen Klimarekonstruktionen gegenübergestellt und deren Schwankungen als Auslöser für bestimmte Entwicklungen (z.B. Völkerwanderungszeit) dargestellt werden.

Neben der zeitlichen Unschärfe erlaubt vor allem die fehlende detaillierte Kenntnis der tatsächlichen Zusammenhänge zwischen scheinbar gut zu korrelierenden Parametern keine abschließende Festlegung.

Unstrittig ist jedoch der vor allem in den letzten 3 Jahrhunderten eskalierende Einfluss des Menschen auf die globale Umwelt, der in den Vorschlag mündete, das Holozän ab einem noch zu definierenden Zeitpunkt (z.B. Beginn des Neolithikums, Überschreiten einer bestimmten CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, Beginn der Industrialisierung) durch das Anthropozän abzulösen (CRUTZEN & STOERMER 2000, CRUTZEN 2002). Nach MAGNY et al. (2013) bestimmten bis ca. 1200 cal. BP orbital determinierte Klimaänderungen die Veränderungen der Umwelt. Danach dominiert der menschliche Einfluss die Rekonstruktionen durch massive Entwaldungen und vollständige sowie großflächige Umgestaltung der Landschaften weltweit. Dass dies zu global messbaren Veränderungen führte, ist evident. Wie die Entwicklung aber ohne menschlichen Einfluss verlaufen wäre, kann dagegen kaum rekonstruiert werden, da die Anteile möglicher natürlicher und anthropogen bedingter Schwankungen kaum zu beziffern sind. Hierzu stehen allenfalls die Verhältnisse vergangener Warmzeiten als Annäherung oder Modell zur Verfügung, etwa die Warmzeit vor rund 400.000 Jahren, Sauerstoff-Isotopenstadi-

um (OIS) 11, die als beste Entsprechung für das Holozän angesehen wird (LOUTRE 2003). Betrachtet man jedoch die Datenfülle, die notwendig ist, um das Klimasystem annähernd zu verstehen, wird klar, dass dies für lang zurückliegende Warmzeiten nicht zu erreichen ist.

Der seit dem Ende der Kleinen Eiszeit um 1850 zu beobachtende Trend zur Erwärmung bewegt sich noch weitgehend im natürlichen Schwankungsbereich des Klimas, auch die Geschwindigkeit der Änderung ist nicht ungewöhnlich, wie Änderungen in der Vergangenheit innerhalb weniger Jahrzehnte belegen. Neu dagegen ist die Zunahme der ‚Treibhausgase‘ im Gegensatz zu den vergangenen Warmzeiten und damit ist der Mensch als klimawirksamer Faktor evident.

Dennoch bleiben die Unsicherheiten groß und Prognosen schwierig, da die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Teilen des Klimasystems und das Klima insgesamt noch viel zu wenig verstanden sind. Welchen Effekt haben etwa die Treibhausgase im Detail auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre? Welche Auswirkung hat der Strahlungshaushalt auf Klima, Temperatur und Schneefall? Wie erfolgt die Wärmeaufnahme durch die Ozeane und welche Kapazitäten bzw. Schwellenwerte bestehen, bis ein mögliches Kippen droht. Wie sind regionale Klimaänderungen über Gletschern und Eiskappen sowie deren Reaktion zu bewerten? Welche Rolle spielt die Albedo angesichts anthropogen global veränderter Vegetationsbedeckung, um nur einige Punkte zu nennen. Auch methodische Probleme der quantitativen Rekonstruktionen bestehen weiterhin und müssen verbessert werden (JUGGINS 2013).

Abschließend noch eine Bemerkung zum Thema Anthropozän: Vor dem Hintergrund der Erdgeschichte, die durch ein lithostratigraphisches System gegliedert wird, ist die Einführung eines Anthropozäns als geochronologische Epoche nicht gerechtfertigt. Prinzipiell ist das Holozän wie alle Warmzeiten der letzten ca. 2.5 Millionen Jahre lediglich ein Teil des Pleistozäns, des Eiszeitalters, und nichts spricht dafür, dass das Pleistozän bereits zu Ende wäre. Der „Gegensatz“ der Bezeichnungen Pleistozän – Holozän impliziert bereits, dass das Holozän eher als neues ‚Erdzeitalter‘ begriffen wurde, eine sehr anthropozentrische Sichtweise, die geochronologisch gesehen aber wenig Sinn macht. Ein ‚Wechsel‘ innerhalb einer Epoche, die vielleicht einmal etwa 25.000 Jahre (wie OIS 11) umfassen wird und damit weniger als ein Wimpernschlag in der Erdgeschichte ausmacht, erscheint wenig gerechtfertigt, dann schon eher eine Umbenennung des Holozäns insgesamt.

5. Zusammenfassung

Mit Hilfe vielfältiger paläoökologischer Methoden wird weltweit versucht, ein möglichst genaues und zeitlich präzises Bild der Landschaftsentwicklung, insbesondere der Vegetation, zu zeichnen. Die wichtigsten Komponenten, die das Bild der Erde prägen, sind das Klima und die Vegetation, bzw. die autotrophen Pflanzen, die an der Basis der Nahrungspyramide und damit des organismischen Lebens der Erde stehen. Über eine Vielzahl sogenannter proxies, indirekte Zeiger für das Klima und klimaabhängige Prozesse, gelingt es immer besser, entsprechende Veränderungen nachzuzeichnen und deren Ursachen zu analysieren. In den letzten 1000 Jahren und insbesondere seit Beginn der Industrialisierung, tritt zunehmend der Mensch als Einflussgröße in Erscheinung. Exponentielle Bevölkerungszunahme, großflächige Umgestaltung der Landschaften einschließlich ihrer Vegetationsbedeckung, Ausbeutung von Ressourcen und fossiler Brennstoffe, haben messbare Auswirkungen auf das gesamte Ökosystem Erde. Um die Folgen abschätzen zu können, ist es unabdingbar, die natürliche Variabilität (nicht nur des Klimas) und deren Ursachen zu kennen. Nur so kann der Einfluss des Menschen annähernd quantifiziert und vom natürlichen Geschehen getrennt werden, und nur so sind Vorhersagen über zukünftige Verläufe bzw. Entwürfe von Szenarien mit höheren Wahrscheinlichkeiten als bisher möglich.

Literatur

- ATKINSON, T. C., BRIFFA, K. R., COOPE, G. R. (1987): Seasonal temperatures in Britain during the past 22,000 years, reconstructed using beetle remains. – *Nature* **325**: 587–592.
- AUGUSTIN, L. et al. (EPICA members) 2004: Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. – *Nature* **429**: 623–628.
- BIRKS, H.J.B. (2008): Holocene climate research – progress, paradigms, and problems. In: BATTERBEE, R.W., BINNEY, H.A. (eds) *Natural climate variability and global warming: a holocene perspective*. – Hoboken, pp 7–57.
- BIRKS, H.J.B., SEPPÄ, H. (2004): Pollen-based reconstructions of late-Quaternary climate in Europe – progress, problems, and pitfalls. – *Acta Palaeobotanica* **44**: 317–334.
- BITTMANN, F. (2010): Vegetationsänderungen und Klimawandel aus vegetationsgeschichtlicher Sicht. – *Berichte der Reinhold-Tüxen-Gesellschaft* **22**: 34–48.
- BLYTT, A. (1876): Forsøg til en Theori om Indvandringen af Norges Flora under vekslede regnfulde og tørre Tider. *Nyt Magazin for Naturvidenskaberne* – **21**: 279–362. Oslo.
- BLYTT, A. (1881): Die Theorie der wechselnden kontinentalen und insularen Klimate. – *Englers Botanische Jahrbücher* **2**: 1–50. Leipzig.
- BOND, G., SHOWERS, W., CHESEBY, M., LOTTI, R., ALMASI, P., DEMENOCAL, P., PRIORE, P., CULLEN, H., HAJDAS, I., BONANI, G. (1997) A pervasive millennial scale cycle in North Atlantic holocene and glacial climates. – *Science* **278**: 1257–1266.
- CHARMAN, D.J. (2010) Centennial climate variability in the British Isles during the mid-late Holocene. – *Quaternary Science Reviews* **29**: 1539–1554.
- CRUTZEN, P.J. (2002): Geology of mankind. – *Nature* **415**: 23.
- CRUTZEN, P.J., STOERMER, E.F. (2000): The ‘Anthropocene’. – *Global Change Newsletter* **41**: 17–18.
- DANSGAARD, W., JOHNSEN, S.J., CLAUSEN, H.B., DAHL-JENSEN, D., GUNDESTRUP, N.S., HAMMER, C.U., HVIDBERG, C.S., STEFFENSEN, J.P., SVEINBJORNSDOTTIR, A.E., JOUZEL, J., BOND, G. (1993): Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. – *Nature* **364**: 218–220.
- DAU, J.H.C. (1829): Allerunterthänigster Bericht an die Königliche Dänische Rentekammer über die Torfmoore Seelands. – Copenhagen, Leipzig.
- EDDY, J.A. (1976): The Maunder Minimum. – *Science* **192**: 1189–1202.
- FÆGRI, K. (1940): Quartärgeologische Untersuchungen im westlichen Norwegen. I. Über zwei präboreale Klimaschwankungen im südwestlichsten Teil. – *Bergens Museum Årbok* 1933, Naturvitenskapelig rekke **8**: 1–40, Bergen.
- GAILLARD, M.-J., SUGITA, S., BUNTING, M.J., DEARING, J., BITTMANN, F. (2008a) Human impact on terrestrial ecosystems, pollen calibration and quantitative reconstruction of past land-cover. – *Vegetation History and Archaeobotany* **17**: 415–418.
- GAILLARD, M.-J., SUGITA, S., BUNTING, M.J., MIDDLETON, R., BROSTRÖM, A., CASELDINE, C., GIESECKE, T., HELLMANN, S.E.V., HICKS, S., HJELLE, K., LANGDON, C., NIELSON, A.-B., POSKA, A., VON STEDINGK, H., VESKI, S. (2008b): The use of modelling and simulation approach in reconstructing past landscapes from fossil pollen data: a review and results from the POLLAND-CAL network. – *Vegetation History and Archaeobotany* **17**: 419–443.
- GRONENBORN, D. (2010) Climate, crises, and the »neolithisation« of central Europe between IRD-events 6 and 4. In: Gronenborn, D., Petrasch, J. (Hrsg.) *Die Neolithisierung Mitteleuropas*. – *Tagungen RGZM* **4**: 61–81.
- IVERSEN, J. (1944) *Viscum, Hedera and Ilex* as climate indicators. – *Geologiska Foereningens i Stockholm foerhandlingar* **66**: 463–483.
- JOHNSEN, S.J., CLAUSEN, H.B., DANSGAARD, W., FUHRER, K., GUNDESTRUP, N., HAMMER, C.U., IVERSEN, P., JOUZEL, J., STAUFFER, B., STEFFENSEN, J.P. (1992): Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core. – *Nature* **359**: 311–313.
- JUGGINS S (2013): Quantitative reconstructions in palaeolimnology: new paradigm or sick science? – *Quaternary Science Reviews* **64**: 20–32.
- KÖPPEN, W. (1884): Die Wärmezonen der Erde, nach der Dauer der heißen, gemäßigten und kalten Zeit und nach der Wirkung der Wärme auf die organische Welt betrachtet. – *Meteorologische Zeitschrift* **1**: 215–226.
- KÜHL N., GEBHARDT C., LITT T., HENSE A. (2002) Probability density functions as botanical-clima-

- tological transfer functions for climate reconstruction. – *Quaternary Research* **58**: 381-392.
- LOUTRE, M.F., BERGER, A. (2003) Marine Isotope Stage 11 as an analogue for the present interglacial. – *Global and Planetary Change* **36**: 209-217.
- MAGNY, M., LEROUX, A., BICHET, V., GAUTHIER, E., RICHARD, H., WALTER-SIMONNET, A.-V. (2013) Climate, vegetation and land use as drivers of Holocene sedimentation: A case study from Lake Saint-Point (Jura Mountains, eastern France). – *The Holocene* **23**: 137-147.
- MIDDLETON, R., BUNTING, M.J. (2004): Mosaic v1.1: landscape scenario creation software for simulation of pollen dispersal and deposition. – *Review of Palaeobotany and Palynology* **132**: 61-66.
- MILANKOVITCH, M. (1941): Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. – Königlich Serbische Akademie, Spezialband **132**, Belgrad.
- PAUS, A. (2013): Human impact, soil erosion, and vegetation response lags to climate change: challenges for the mid-Scandinavian pollen-based transfer-function temperature reconstructions. – *Vegetation History and Archaeobotany* **22**: 269-284.
- PEEL, M.C., FINLAYSON, B.L., MCMAHON, T.A. (2007): Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. – *Hydrology and Earth System Sciences* **11**: 1633-1644.
- PETIT, J.R., JOUZEL, J., RAYNAUD, D., BARKOV, N.I., BARNOLA, J.M., BASILE, I., BENDER, M., CHAPPELLAZ, J., DAVIS, M., DELAYGUE, G., DELMOTTE, M., KOTLYAKOV, V.M., LEGRAND, M., LIPENKOV, V.Y., LORIUS, C., PEPIN, L., RITZ, C., SALTZMAN, E., STIEVENARD, M. (1999): Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. – *Nature* **399**: 429-436.
- RUDDIMAN, W.F. (2003): The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. – *Climatic Change* **61**: 261-293.
- RUDDIMAN W.F. (2005) Plows, plagues, and petroleum. How humans took control of climate. – Princeton.
- RUDDIMAN, W.F., ELLIS, E.C. (2009): Effect of per-capita land use changes on Holocene forest clearance and CO₂ emissions. – *Quaternary Science Reviews* **28**: 3011-3015.
- SCHROEDER, F.-G. (1998): Lehrbuch der Pflanzengeographie. – Wiesbaden
- SCHULZ M. (2002): On the 1470-year pacing of Dansgaard-Oeschger warm events. – *Paleoceanography* **17**: 4-1 - 4-9.
- SEPPÄ, H., ALENIUS, T., BRADSHAW, R.H.W., GIESECKE, T., HEIKKILÄ, M., MUUKKONEN, P. (2009): Invasion of Norway spruce (*Picea abies*) and the rise of the boreal ecosystem in Fennoscandia. – *Journal of Ecology* **97**: 629-640.
- SERNANDER, R. (1894): Studier öfver den Gotländiska vegetationens utvecklingshistoria. – Akademiska afhandling, Uppsala.
- SERVANT, J. (2001): The 100 kyr cycle of deglaciation during the last 450 kyr: a new interpretation of oceanic and ice core data. – *Global and Planetary change* **29**: 121-133.
- SIROCKO F.H. (2009) Wetter, Klima, Menschheitsentwicklung: von der Eiszeit bis ins 21. Jahrhundert. – Stuttgart.
- STEENSTRUP, J. (1842): Geognostik-gelogisk Undersøgelse af Skovmoserne Vidnesdam-og Lille-mose i det nordlige Sjælland. – Vid. Selsk. naturvid. og math. Afd. Kjøbenhavn **9**: 17-120. Copenhagen.
- STRIEN, H.-C., GRONENBORN, D. (2005): Klima- und Kulturwandel während des mitteleuropäischen Altneolithikums (58./57.-51./50. Jahrhundert v. Chr.). In: GRONENBORN, D. (Hrsg.) Klimaveränderungen und Kulturwandel in neolithischen Gesellschaften Mitteleuropas, 6700-2200 v. Chr. – RGZM-Tagungen **1**: 131-149.
- SUGITA, S. (2007a) Theory of quantitative reconstruction of vegetation I: pollen from large sites REVEALS regional vegetation composition. – *The Holocene* **17**: 229-241.
- SUGITA, S. (2007b) Theory of quantitative reconstruction of vegetation II: all you need is LOVE. – *The Holocene* **17**: 243-257.
- TELLER, J.T., LEVERINGTON, D.W., MANN, J.D. (2002): Freshwater outbursts to the oceans from glacial Lake Agassiz and their role in climate change during the last deglaciation. – *Quaternary Science Reviews* **21**: 879-887.
- VAUPELL, C. (1857): Bögens Indvandring i de Danske Skove. – C.A. Reitzels Bo & Arvinger, Copenhagen.
- VON CARLOWITZ, H.C. (1713): Sylvicultura oeconomica. Anweisung zur wilden Baum-Zucht. – Reprint der Ausgabe Leipzig, Braun, 1731, bearb. von Klaus Irmer und Angela Kießling. TU Bergakademie Freiberg und Akademische Buchhandlung, Freiberg 2000.

- VON POST, L. (1918): Skogsträdpollen i sydsvenska torfmosselagerföddjer. – Forh. 16. Skand. naturforskerm. 1916: 433-465. Oslo.
- VON POST, L. (1946): The prospect for pollen analysis in the study of the earth's climatic history. – New Phytologist **45**: 193-217. Cambridge.
- WEATHER WORLD 2010 University of Illinois,
<http://ww2010.atmos.uiuc.edu/%28Gh%29/guides/mtr/elnl/elyr.rxml>, (abgefragt 10.03.2013)
- WILKINSON, K., STEVENS, C. (2003): Environmental archaeology: approaches, techniques & applications. – Stroud.
- ZOLITSCHKA, B., ENTERS, D. (2009): Lacustrine sediments. In: GORNITZ, V. (ed.) Encyclopedia of paleoclimatology and ancient environments. – Encyclopedia of Earth Sciences Series., Dordrecht, pp 485-488.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Felix Bittmann, Niedersächsisches Institut für historische Küstenforschung, Postfach
2062, D-26360 Wilhelmshaven

e-Mail: bittmann@nihk.de

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

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

Jahr/Year: 2013

Band/Volume: [25](#)

Autor(en)/Author(s): Bittmann Felix

Artikel/Article: [Klima- und Landschaftsveränderungen in der Vergangenheit \(und Gegenwart\) auf der Basis paläoökologischer Daten 108-122](#)