

**Hofbauer, G. (2006): Die Entdeckung der Eiszeit: Die Entwicklung der Vorstellungen von einer kalten Vergangenheit und Anmerkungen zum Thema „Klimawandel“. - - [www.gdgh.de/Berichte/B10](http://www.gdgh.de/Berichte/B10) (19. Februar 2006).**

## Die Entdeckung der Eiszeit

### Die Entwicklung der Vorstellungen von einer kalten Vergangenheit und Anmerkungen zum Thema „Klimawandel“

Gottfried Hofbauer, Erlangen

Die Darstellung gibt einen Rückblick auf den Vortrag in der Reihe „Klimawandel“ am 19. Januar 2006, veranstaltet von der NHG Nürnberg. Einige Punkte, die im Vortrag nur randlich gestreift wurden, werden hier ausführlicher angesprochen.



Szene aus der Ausstellung „Tiere der Eiszeit“, die bis April 2006 im Gebäude der Naturhistorischen Gesellschaft Nürnberg zu besichtigen ist.

*Homo homini lupus* – weniger der Klimawandel selbst, sondern der Mensch ist das Problem, wenn es um die Bewältigung einer klimatisch instabilen Zukunft geht. Unabhängig davon, ob und in wie weit der industrielle Ausstoß von Treibhausgasen daran Anteil hat, zeigen die Geowissenschaften, dass das Klima im „System Erde“ weniger durch dauerhafte Zustände als durch stetigen und mitunter auch raschen Wandel charakterisiert ist.

#### 1. Zum Charakter der erdgeschichtlichen Katastrophe

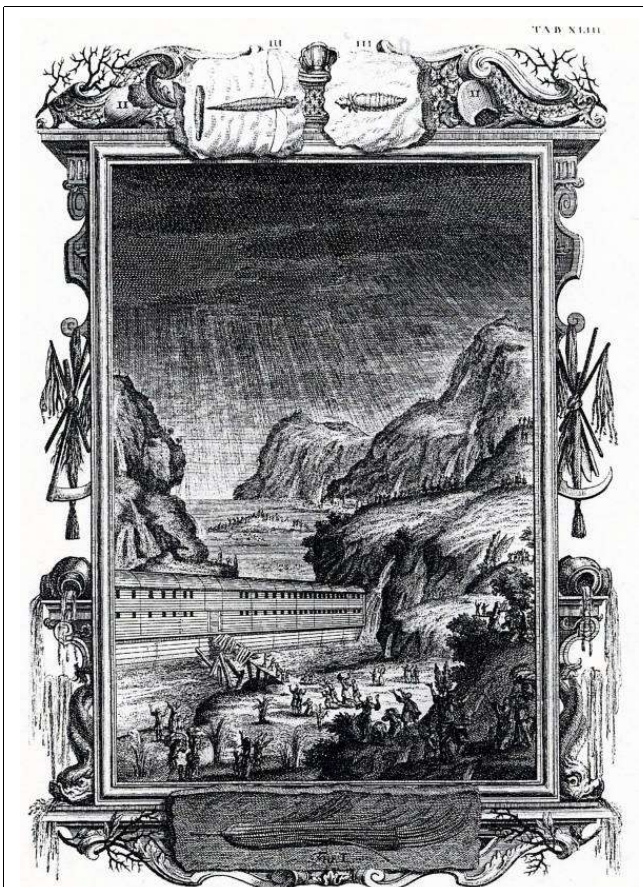
Die Geologie trägt mit ihren erdgeschichtlichen Enthüllungen in bedeutendem Umfang zur Ausgestaltung der menschlichen Vorstellungen über Vergangenheit und Zukunft bei. Was beim Studium der Erdgeschichte ans Licht kommt, ist aber in mancher Hinsicht nicht geeignet, die Gemüter in Ruhe und Sicherheit zu wiegen. Aus den in den Gesteinen überlieferten Zeugnissen können Katastrophen rekonstruiert werden, wie sie aus der menschlichen Alltagserfahrung oder den historischen Aufzeichnungen in Art oder Ausmaß nicht bekannt sind.

Die erdgeschichtlichen Katastrophen stehen zudem in einem merkwürdigen Verhältnis zur psychischen Befindlichkeit. Nüchtern betrachtet, liegen sie so fern, dass sie einen eigentlich nicht zu kümmern brauchen. Andererseits wirkt das Wissen davon aber als beharrliche Bedrohung, die mit tief verwurzelten, archetypischen Ängsten zusammentreffen kann. Katastrophenfilme schöpfen aus

diesem Fundus ihre Dramaturgie wie finanziellen Gewinn. Selbst das Aussterben der Saurier ist – unabhängig davon, wie es geschah – in dieser Hinsicht nicht ohne Relevanz, denn das Verschwinden dieser über Jahrmillionen so mächtigen Gattung ist schon von Beginn an auch als Parabel dafür gesehen worden, was dem heutigen, zweibeinigen „Herrscher der Erde“ widerfahren kann.

Diese die Katastrophen-Vorstellungen nährende Bedeutung der Geologie ist schon in ihrem vorwissenschaftlichen Stadium ausgeprägt. Die Funde versteinerner Organismen ließen sich ohne Umweg als naturgeschichtliche Bestätigung der Sintflut lesen. Zu den Worten der Bibel gab es damit greifbare Beweise für eine untergegangene Welt. Mehr als hundert Jahre war die Plötzlichkeit einer großen, globalen Flut in den Köpfen der Leute gegenwärtig, bevor die Entflechtung der Erdgeschichte aus der biblischen Tradition auch zur Auflösung dieses Katastrophenszenarios führte. In diesem wie in vielen folgenden Fällen scheinen drei methodologische Prinzipien immer wieder zur Entschärfung von Katastrophen-Bildern geführt zu haben, wobei die Entschärfung jeweils dann vollzogen war, wenn Ausmaß und Plötzlichkeit der Katastrophe am Ende in einem langsameren – also weniger plötzlichen – und kumulativ wirkenden Prozeß aufgegangen waren.

Erdgeschichtliche Zeugnisse erwecken oft nur auf den ersten Blick den Anschein von „Plötzlichkeit“. So können zum Beispiel Sedimente mit massenhaften Resten von Organismen auch das Produkt langsamer, kumulativer Prozesse sein. Zu diesem Ergebnis konnte man oft im Laufe des



Forschungsreisen und frühkoloniale Expansion führten im 17. und 18. Jahrhunderts zur Entdeckung zahlreicher, zuvor unbekannter Landtiere. Damit stiegen auch die Anforderungen an die Kapazität der Arche – in der *Physica Sacra* (1731-1735) des Schweizer Naturforschers JOHANN JACOB SCHEUCHZERS scheint die Manövrierfähigkeit schon erheblich eingeschränkt zu sein..

der Geologie charakteristischen Forschungsweges gelangen: ist eine Erscheinung erstmal wahrgenommen, wird sie in der Folge immer genauer untergliedert und damit in ihrem kausalen Kontext wie in ihrer zeitlichen Struktur komplexer, als wie es zu Beginn erschien. Hat man eine mächtige Schicht in viele weniger mächtige unterteilen können, ist auch der Lauf der Ereignisse, der zu ihrer Bildung geführt hat, langwieriger und vielfältiger geworden. Auf diese Weise sind auch die Zeugnisse, die scheinbar von **einer** großen Flut verursacht worden sein sollen, am Ende in Relikte vieler Fluten und schließlich langzeitlicher Meeressüberdeckungen umgewandelt worden.

Ein zweites Prinzip ist das des „quantitativen Modellierens“. Dieses Verfahren ist zwar erst in den modernen Geowissenschaften stärker in den Vordergrund gerückt, wurde aber, wenn auch oft in nur „grob überschlagender Weise“, auch schon im vorwissenschaftlichen Stadium wirksam. Je mehr man z. B. im 17. und 18. Jahrhundert von der Welt und der auf ihrer lebenden Tieren kennenlernte, desto klarer wurde, daß eine Arche niemals mehr alle Landtiere der Erde aufnehmen könnte. Um die Mitte des 18. Jahrhunderts wird die Darstellung der in der vorangegangenen Jahrzehnten immer größere gewordenen Arche schließlich weitgehend aufgegeben.

Ein drittes Prinzip wurde von einigen Geologen sogar extra zur Vermeidung von Katastrophenszenarien eingebracht. In Form eines methodologischen Gedankenexperiments haben Gelehrte wie JAMES HUTTON (1726-1797), JOHN PLAYFAIR (1748-1819) und schließlich CHARLES LYELL (1797-1875) Skepsis gegenüber der menschlichen Alltagswahrnehmung verbreitet und angeregt, sich die Entstehung bestimmter geologischer Erscheinungen doch in den gewaltigen zeitlichen Spielräumen der Erdgeschichte durch langsamen, akkumulative Prozesse zu denken. Dieses **Uniformitarianismus** (Gleichförmigkeitsprinzip) genannte Verfahren hat tatsächlich in vielen Fällen nicht nur viele Katastrophen entschärft, sondern auch zur Entdeckung langsamer geologischer Prozesse geführt. Daneben trug dieser Denkansatz wesentlich dazu bei, die zeitliche Dimension der Erdgeschichte vom menscheitsgeschichtlichen Rahmen zu lösen und sie mit dieser eigentlich unfasslichen Größe auszustatten. Aus dieser erdgeschichtlichen Perspektive konnte schließlich auch Darwin seine Vorstellungen zur Evolution der Arten formulieren.

Das zuletzt erwähnte methodologische Prinzip, plötzlich erscheinende Phänomene durch eine entsprechend erweiterte Zeitperspektive zu entschärfen, hatte sich spätestens mit LYELL in den Geowissenschaften weit etabliert. Anstatt in heuristischer (erkenntnisfindender) Weise gleichsam versuchsweise eingesetzt zu werden, kam es aber nicht selten auch zum dogmatischen Gebrauch, wodurch Erkenntnis eher behindert als gefördert wurde. Der Geologie ist es aber in den letzten Jahrzehnten gelungen, die zeitliche Auflösung der erdgeschichtlichen Zeugnisse bedeutend zu erhöhen. Dies geschah zum einen mit neuen technischen Mitteln, zum anderen aber auch dadurch, daß neue Archive aufgeschlossen wurden: Sedimente in Kraterseen mit im jahreszeitlich zyklischen Charakter, Sedimentschichten in der Tiefsee, Eis in Arktis und Antarktis. Dadurch ist jetzt in mancher Hinsicht die Möglichkeit gegeben, „plötzliche Ereignisse“ und „langsame Prozesse“ viel präziser unterscheiden zu können.

Die Diskussion um Meteoriteneinschläge und damit verknüpfte Aussterbeereignisse um 1980 (ALVAREZ ET AL. 1980) war ein wesentliche Phase in dieser Auseinandersetzung um langsame und schnelle erdgeschichtliche Abläufe. Ein plötzliches Ereignis (der Asteroiden-Impact) konnte darüber hinaus auch zu einem schnellen Aussterben von vielen Tierarten führen. Bei diesen Modell spielten zudem die durch einen Einschlag verursachten, ebenfalls plötzlich folgenden klimatischen Veränderungen eine Rolle. Die Aufregung um katastrophale Einschläge von Himmelskörpern trat aber bald wieder in den Hintergrund, wobei die Gefahr durchaus ernst zu nehmen ist und daher in der Folge Einrichtungen und Forschungsprogramme zur Früherkennung möglicher Einschlagskörper auf den Weg gebracht wurden.

Die Warnung vor einer Erwärmung durch den industriellen Ausstoß von Treibhausgasen kam anfangs vor allem von den Klimatologen und wurde spätestens in den 70iger Jahren ein öffentliches Thema. Die Geologie hatte zu jener Zeit zum Klimawandel wenig zu sagen. Aus der Perspektive der Erdgeschichte – und gerade auch des jüngsten Abschnitts, des Quartärs – war Klimawandel eine Selbstverständlichkeit. Es scheint, als ob die Geologen diese erdgeschichtliche Perspektive als wenig relevant für die Gegenwart ansahen und sich schwer vorstellen konnten, daß menschliche Aktivitäten der Beharrlichkeit des Systems Erde etwas anhaben konnten. Der Klimawandel im Sinne rascher, im Rahmen menschlicher Zeitmaßstäbe ablaufender Veränderungen, ist erst in den letzten 30 Jahren auch Thema der Geologie geworden. Das empirische Material, das den Hintergrund für die aktuellen Diskussionen um den Klimawandel bildet, wird nun nicht mehr nur von den Klimatologen eingebracht, sondern in erheblichen Ausmaß mit dem fundamentalsten methodologischen Prinzip der Geologie aus den erdgeschichtlichen Archiven gewonnen: Schicht für Schicht arbeitet man sich zurück in die Vergangenheit, sei es im Schlamm der Tiefsee oder im grönländischen Eis, und jede neue Schicht erschließt eine jeweils älteren Zeitabschnitt der Erdgeschichte.

Der Gewinn an zeitlicher Auflösung führte nun aber nicht – wie in so vielen Fällen zuvor – zu einer Entschärfung des Bildes vom Klimawandel. Man hätte ja durchaus erwarten können, daß sich der Wechsel von Kalt- und Warmzeiten, wie er in den letzten 1-3 Millionen Jahren das globale Klima geprägt hat, als glatte Kurve kontinuierlicher und weitgehend gleichmäßig verlaufender Temperaturänderungen zeigen würden. Aber genau das Gegenteil war der Fall: Die Daten zeugen von Klimaänderungen, die innerhalb des Rahmen dieses zeitlich großräumigen Wechsels von Kalt- und Warmzeiten auch in kurzer, rascher und oft auch heftiger Weise aufgetreten sind. Kräftige klimatische Verschiebungen konnten sich offenbar ohne Zutun des Menschen auch in Jahren bis einige Jahrzehnten vollziehen.

Der rasche Klimawandel ist also erdgeschichtliches Faktum, und zwar auch schon als „natürlicher“ Prozeß, also vor dem industriellen Treibhausgas-„Ausstoß“. Mit dieser Einsicht scheint erstmals in der Geschichte der Geologie der Fall eingetreten zu sein, in dem eine intensivierete Betrachtung nicht zur Entzerrung eines erdgeschichtlichen Prozesses oder Ereignisses geführt hat, sondern – im Gegenteil – aus der Erdgeschichte rekonstruierte Erscheinungen vehement in den Relevanzbereich des aktuellen menschlichen Horizonts gerückt wurden.

## **2. Die Entdeckung der Eiszeit**

Für die Menschen des 18. Jahrhunderts schien nichts auf eine „Eiszeit“ in der jüngeren erdgeschichtlichen Vergangenheit hinzuweisen. Als man daran ging, Zeugnisse einer in der Bibel nicht zur Darstellung gekommenen, naturgeschichtlichen Erdgeschichte wahrzunehmen, deutete alles darauf hin, daß die frühere Erde – wenn sie überhaupt als von den gegenwärtigen Verhältnissen abweichend wahrgenommen wurde – nur wärmer gewesen sein kann. Von diesem Ausgangspunkt kann der Weg zur heutigen Erkenntnislage in drei Schritte gegliedert werden.

2.1. Von einer warmen zu einer kalten Vergangenheit

2.2. Die Ausgestaltung der Eiszeit auf der Grundlage von Zeugnissen auf den Festländern

2.3. Die globale Erschließung neuer Klimaarchive

### **2.1. Von einer warmen zu einer kalten Vergangenheit**

Die Funde in den Schichten gaben den frühen Geologen des 17. und 18. Jahrhunderts keinen Hinweis auf eine kalte Vergangenheit. An vielen Stellen wurden Organismen wie Korallen, Fische, Stachelhäuter u.a. Organismen gefunden, wie man sie eher aus warmen, südlichen Meeren kennt. Als einer der ersten hat BUFFON (1778) versucht, mit Hilfe eines Experiments Vorstellungen über das Alter der Erde zu gewinnen. Sein Versuch, aus der Abkühlungszeit einer gegossenen Eisenkugel auf einen Körper mit der Größe der Erde zu extrapolieren, geht mit der Vorstellung einer wärmeren Vergangenheit einher und trägt bedeutend dazu bei, dieses Bild der erdgeschichtlichen Klimaentwicklung noch weiter zu verbreiten.

Ein wichtiges Element für den weiteren Gang der Vorstellungen war der Bericht von PETER SIMON PALLAS (1777/1778) über seine Forschungsreise nach Sibirien. Skelettreste großer eiszeitlicher Wirbeltiere sind dort sehr häufig und dienen sogar Rohmaterial für diverse praktische Zwecke. Das aufgefundene Wollnashorn wurde aber trotz Weichteilerhaltung nicht als Tier der kalten Sphären erkannt, sondern als Exemplar der gegenwärtig lebenden Arten warmer Klimazonen angesehen. Das Wollnashorn ist heute als ausgestorbene Spezies der kaltzeitlichen Steppe bekannt, aber zu PALLAS Zeit war noch nicht mal klar, daß es überhaupt große, ausgestorbene Wirbeltiere gab. Das Nashorn konnte in diesem Vorstellungshorizont nur von seinen südlichen Lebensräumen nach Sibirien geraten sein – eine große Flut erscheint PALLAS als wahrscheinlichster Mechanismus.

GEORGES CUVIER (1769-1832) wurde im ausgehenden 18. Jahrhundert zum führenden Anatom seiner Zeit. Seine Position am Nationalen Naturgeschichtlichen Museum in Paris sicherte ihm zudem allergrößten Einfluß. Im *Discours préliminaire*, anfangs als Einleitung zu dem Werk *Recherches sur les ossements de quadrupèdes* (1812) verfaßt, dann aber auch einzeln sowie in vielen Übersetzungen bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts hinein in zahlreichen Auflagen verbreitet, entwickelt CUVIER seine später oft auch als „Katastrophentheorie“ bezeichneten erdgeschichtlichen Vorstellungen. Die Vorstellung, große Fluten hätten womöglich gar wiederholt die Erde und das auf ihre wohnende Leben vernichtet, erfuhr dadurch eine gewaltige Zuspitzung. Der Forschungsbericht von PALLAS wie das 1808 in Rußland von MICHAEL ADAMS rekonstruierte Mammut waren wesentliche empirische Eckpfeiler dieses Konzepts – noch immer aber wurde der kaltzeitliche Charakter der sibirischen Wirbeltierfunde nicht wahrgenommen. Aber CUVIER konnte auf Grundlage seiner anatomischen Kompetenz das Aussterben großer Wirbeltieren zur wissenschaftlichen Tatsache machen. Er erkannte, daß sich das Mammut vom indischen und afrikanischen Elefanten unterschied und es, da man ein so großes Tier schlecht übersehen kann, offenbar ausgestorben sein muß. Die Bedeutung der „Flut“ erhält so einen weiteren Akzent: sie vernichtete Tiere, die es so danach nicht wieder gab. Da CUVIER insbesondere aus dem Tertiär des Pariser Beckens noch mehr ausgestorbene Wirbeltiere identifiziert hatte, ergab sich die Notwendigkeit, auch deren Ende mit einer „Katastrophe“ zu erklären. CUVIER war sich der Problematik bewußt, die der Gedanke an solche Katastrophen in einer Phase bedeutete, in der die Geologie auf dem mühsamen Weg zu einer empirisch soliden Wissenschaft war. Er trug dem insofern Rechnung, indem er sich nicht in weiteren spekulativen Details über den genauen Charakter und Verlauf der Katastrophen erging. Er merkte dazu an, daß weitere Überlegungen gar nicht möglich wären, denn im Hinblick auf diese Ereignisse sei „Der Faden der Induktion zerrissen.“

Ein spektakulärer Blick in eine von heute abweichende Vorwelt gelang dem Engländer WILLIAM BUCKLAND (1784-1856). In der Kirkdale-Höhle in Yorkshire entdeckt er die Reste von Knochen unterschiedlicher großer Wirbeltiere, die offenbar von Raubtieren zusammengetragen und dort in Ruhe verzehrt wurden. Es gelang ihm, die an den Knochen überlieferten Beißspuren auf Hyänen zurückzuführen. Dieser Nachweis erregte auch deshalb enorme öffentliche Aufmerksamkeit, weil BUCKLAND in radikal empirischer Weise vergleichende Beißttests mit lebenden Hyänen vorweisen konnte. (In jener Zeit gab es in Oxford tatsächlich ein Gehege – BUCKLAND konnte sein Expertentum auch auf fossile Kotreste ausweiten und sich den von manchen ironisch kommentierten Ruf als führender Koproolithen-Experte erwerben). BUCKLAND (1822) gelang es auf dieser Grundlage, das Bild einer Vorzeit mit einer von heute abweichenden Fauna zu entwerfen. Doch auch hier schien alles auf eine warme Zeit hinzuweisen, denn neben den Knochen der Hyänen gab es auch Skelett-Teile u.a. des Tigers (oder Löwen). Wie auch immer, das Ende dieser Epoche soll aber auch aus seiner Sicht durch eine große Flut gekommen sein. Diese Flut, bzw. die aus ihr stammenden Ablagerungen nennt er in seinem Werk *Reliquiae Diluvianae* (1823) **Diluvium**, die Zeit davor **Antediluvium** (vorsintflutlich), die danach folgende und die Gegenwart beinhaltende Epoche **Alluvium**. Diese Gliederung sollte weit bis in das 20. Jahrhundert gebräuchlich bleiben, als die Geologen schon lange nicht mehr an eine solche Flut dachten und schon „eiszeitliche“ Sedimente klassifizierten.

An dieser Stelle ist es wichtig, sich klar zu machen, daß die Neigung zum Erklärungsmodell „Flut/Sintflut“ nicht allein auf der Notwendigkeit herrührte, einen Aussterbemechanismus für Tiere in Mitteleuropa oder Sibirien zu finden. Mindestens ebenso erklärungsbedürftig wie das Verschwinden mancher Tierarten waren merkwürdige Landschaftsformen. Breite Täler mit U-förmigen Querschnitt und weit verbreitete, oft schlecht sortierte Lockergesteins-Ablagerungen schienen durch die gegenwärtig beobachtbaren Prozessen nicht erklärbar zu sein. Dazu kam das besonders erklärungsbedürftige Problem der erratischen Blöcke. Auf welche Weise konnten diese großen Steine von ihren oft in beträchtlicher Entfernung lokalisierbaren Ursprungsgebieten heran



transportiert worden sein? Auch dafür schien eine gewaltige Flut eine gute Erklärung zu bieten.

Die katastrophistischen Flut-Hypothesen CUVIERS wie BUCKLANDS wurden von CHARLES LYELL als methodologische wie inhaltliche Herausforderung empfunden. Um den Prinzipien einer empirisch-wissenschaftlichen Geologie zu genügen, bedurfte es einer Erklärung durch nachweisbare natürliche Prozesse. Der „Faden der Induktion“, oder – wie aus auch verstanden wurde – „der Faden der Kausalität“, durfte eben keine Lücken haben. LYELLS Antwort in den 30iger Jahren des 19. Jahrhunderts war die „Drifttheorie“: driftende Eisberge hätten die klastischen Sedimente wie auch die Erratika beim Abtauen fallen gelassen. Er konnte hier auf Beispiele aus den hohen Breiten verweisen, wo dieser Prozess offenkundig wirksam war, allerdings in einer Rate, deren Wirkung schwer einzuschätzen war. Eine andere Front, an der LYELL gegen die Flutkatastrophe kämpfte, betraf die Entstehung der Täler. Insbesondere bei den breiten, glazial überformten U-Tälern konnten sich aber viele Geologen nicht vorstellen, daß diese, wie LYELL forderte, durch die über lange Zeiträume kumulierte Erosionsleistung der heute darin laufenden, kleinen Flüsse geschaffen worden sein konnten.

Die Wende zum Konzept der „Eiszeit“ kam schließlich aus der Schweiz. Es war tatsächlich der von den morphologischen und sedimentären Zeugnissen ausgehende Erklärungsbedarf, der zu diesem Schritt drängte, und nicht etwa als „kaltzeitlich“ erkannte Faunenfunde. Die Erklärungsleistung bestand nicht darin, zu zeigen, daß Blöcke in den Alpentälern von einst weiter herunter reichenden Gletschern herantransportiert wurden – dies, so mußten die Forscher erfahren, ahnten auch manchen wissenschaftlich weniger gebildete Bewohner dieser Täler (HALLAM 1989). Es ging vielmehr darum, das Eis gedanklich aus den Alpentälern herauslaufen zu lassen und das große Becken des Schweizer Mittellandes so weit mit Eis aufzufüllen, daß auch die zum Jura aufsteigenden Höhen erreicht werden konnten: auch dort, am Rand zu dieser Hochfläche, waren z.T. spektakulär große Erratika aus Alpengesteinen bekannt.

Verschiedene Schweizer Naturforscher haben in den 20iger und 30iger Jahren des 18. Jahrhunderts Hinweise dafür gesehen, daß die Gletscher einst bedeutend größere Ausdehnung hatten (siehe dazu HALLAM 1989). Wir wollen uns hier auf den letzten, von LOUIS AGASSIZ vollzogenen Schritt beschränken. Dieser hatte schon durch seine Arbeit über fossile Fische internationale Anerkennung erworben, als er im Jahr 1836 in Exkursionen mit seinem Freund CHARPENTIER von der einst weiteren Verbreitung des Eises überzeugt wurde. Die abgeschliffenen und geschrammten Felsen, die ihm dabei präsentiert wurden, verfehlten nicht ihre Wirkung – mit Hilfe dieser markanten Erscheinungen sollte AGASSIZ in der Folgezeit, nun zum lautstärksten Eiszeit-Fürsprecher geworden, den Vorstellungen von einer „Eiszeit“ die Bahn brechen (Der Begriff „Eiszeit“ wurde offenbar erstmals 1837 von KARL SCHIMPER, ebenfalls einem Bekannten von AGASSIZ, verwendet). Die ersten Vorträge und Geländeführungen, in denen AGASSIZ die weite Eisverbreitung zu demonstrieren versuchte, wurden allerdings mit großer Skepsis aufgenommen, was zu einem beträchtlichen Teil auch an dem spekulativen Gestus lag, mit dem er weitere, unbelegbare Ideen daran angeknüpft hatte.

Der haptisch faßbaren Evidenz des Gletscherschliffs war es jedoch ganz wesentlich auch zu verdanken, daß AGASSIZ im Jahr 1840 in Großbritannien eine aufsehenregende Landung seiner Eiszeit-Idee hinlegen konnte. Im Anschluss an einen Kongress in Glasgow tourte er mit BUCKLAND in den Highlands – Gletscherschliffe gab es dort genug und BUCKLAND wurde zum ersten wichtigen Konvertiten. Im Zuge dieser Reise wurden auch die „Parallel Roads of Glen Roy“ besucht – ein Tal, an dessen Hang drei fossile Strandlinien zu sehen waren. DARWIN hatte sich einige Jahre zuvor daran geübt und, ohne dafür überzeugende Belege anführen zu können, darin gehobene Meeresküstenlinien gesehen. AGASSIZ konnte an dieser Stelle gleich zeigen, welches Erklärungspotential das neue Eiszeit-Modell hatte. Die Strandlinien wurden nun als Wasserstandsmarken eines Eisstausees angesehen, wobei der Stau von einem den Talausgang abriegelnden Gletscher verursacht worden

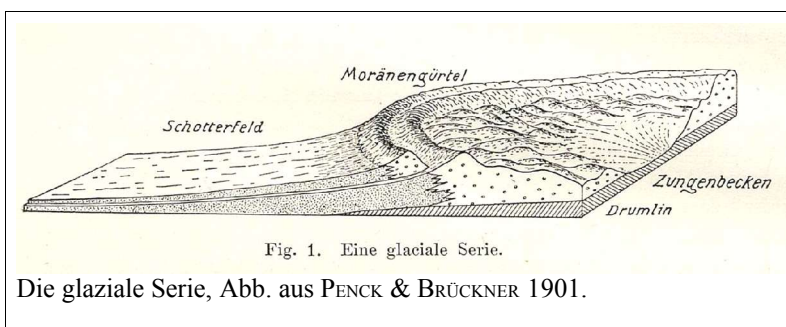
sein sollte. Die einzelnen Strandlinien ließen sich wiederum mit als Überlauf fungierenden Pässen korrelieren. Diese Erklärung wird tatsächlich auch heute als zutreffend angesehen.

Natürlich war damit die Wende noch nicht vollzogen, doch die Saat war gestreut. Die großen Fluten wie auch die Drifttheorie LYELLS waren damit nicht gleich vom Tisch: ein plötzlich schmelzendes Eis war nun als natürliche Ursache großer Fluten denkbar geworden, und BUCKLAND gehörte zu jenen, die hier eifrig altes mit neuem Gedankengut vermischten (siehe dazu auch RUPKE 1983). Eine gute geologische Erklärung setzt sich aber schließlich durch, weil mit ihr gearbeitet werden kann, und wenn sie Grundlage für weiteren Untersuchungen, Differenzierungen und Verfeinerungen sein kann. *The Great Ice Age* von JAMES GEIKIE (1874) markiert in Großbritannien den Wendepunkt von der Vorgeschichte zur Geschichte der Eiszeitforschung. In diesem Werk wird nicht nur ausführlich belegt, daß es offenbar nicht nur eine „Eiszeit“, sondern mehrere, von Warmzeiten unterbrochene Kaltzeiten gegeben habe muß, sondern auch, daß der vorgeschichtliche Mensch Zeuge dieser mehrfachen Klimaveränderungen war.

Nachdem in der Großbritannien und schließlich in der Schweiz die morphologischen Zeugnisse der Eistätigkeit herausgearbeitet und akzeptiert wurden, bedurfte es in Süddeutschland keiner besonderen Vorstellungskraft mehr, auch hier die Spuren der einst aus den Alpen herausreichenden Gletscher erkennen zu können. Ganz anders die Situation in Norddeutschland: Gletscherschliff und -schrammen sind in dem von mächtigen Lockergesteinen aufgebauten Grund nicht zu finden. Die Vorstellung, die Erratika aus skandinavischen Gesteinen wären durch Eistransport bis zum Harz oder nach Berlin gekommen, war schon eine beträchtliche Herausforderung. Aber so wie die Engländer durch Agassiz „bekehrt“ wurden, so war es in Deutschland der Schwede TORRELL, der den Einheimischen die Augen öffnete. Im Anschluß an eine Tagung der Deutschen Geologischen Gesellschaft in Berlin soll er schließlich an dem Muschelkalkaufbruch von Berlin-Rüdersdorf einen Gletscherschliff entdeckt und so die deutschen Geologen von der entsprechenden Reichweite des Skandinavischen Inlandeises überzeugt haben. Auch wenn die genauen Umstände dieser Wende bisher wissenschaftshistorisch noch nicht genau bekannt sind, wollen wir uns an dieser Stelle mit einer solchen oberflächlichen Darstellung begnügen.

## 2.2. Die Ausgestaltung der Eiszeit auf der Grundlage von Zeugnissen auf den Festländern

Mit GEIKIES *The great Ice Age* gehören die Arbeiten von ALBRECHT PENCK zu den Meilensteinen der Eiszeitforschung. In ihrer Bedeutung gehen sie über den Rahmen hinaus, den sie in regionaler Hinsicht bearbeiteten. Indem sie Arbeitsmethoden und grundlegende Gliederungen entwickelten, schufen sie die Ausgangsposition für den folgenden Forschungs-Abschnitt, der ganz im Sinne KUHNs als „normale Wissenschaft“ bezeichnet werden kann. Die große Idee „Eiszeit“ stand danach als solche nicht mehr zur Diskussion, nun wurden die kleinen wissenschaftlichen „Rätsel“ gelöst.



Die Gliederung der Eiszeit im süddeutschen Alpenvorland durch PENCK & BRÜCKNER (1901-1909) setzte am Beginn des 20. Jahrhunderts den Standard für den Bereich des Alpenraums insgesamt und auch darüber hinaus für die Gliederung der festländischen Eiszeit-Zeugnisse. Anhand der Schotterfluren der Iller-Lech-Platte

war es möglich, eine **morphostratigraphische** Gliederung zu erstellen, bei der die vertikale Abordnung der glaziofluviatilen Ablagerungen in eine Abfolge von Kaltzeiten übersetzt konnte:

Würm – Riß – Mindel – Günz. Diese Schotterfluren waren allerdings keine alleinstehenden Erscheinungen, sondern als Element des von PENCK als „glaziale Serie“ bezeichneten Formenschatzes genetisch an die Eisvorstöße angebunden. In diesem Sinn ließen sich die Schotter tatsächlich (mehr oder weniger gut ...) an die jeweiligen Endmoränen, bzw. diese an die dahinter liegenden Zungenbecken anschließen.

Die kontinentale Gliederung erfuhr in der Folgezeit zwar noch Modifikationen und Erweiterungen. So wurden in Süddeutschland noch glaziofluviatile Ablagerungen gefunden, die man einer Haßlach-, Donau- und Biber-Kaltzeit zuordnete (wobei es auch noch gelang, die von PENCK begonnene, absteigende alphabetische Reihung einzuhalten: d.h. Biber ist älter als Donau, Donau älter als Haßlach). Die genauere, „absolute“ zeitliche Einordnung insbesondere der älteren Zeugnisse diese relativen Alterabfolge blieb aber bis heute sehr unscharf. Nicht nur die Schotter selbst sind grundsätzlich schwer zu datieren, auch Sedimente aus Intergazialen sind rar und dann ebenfalls schwer genauer einzustufen. In den quartären Senkungsgebieten der Niederlande sind zwar relativ präziser festzulegende Spuren älterer Kaltzeiten erhalten, deren Zuordnung zu den deutschen und insbesondere süddeutschen Zeugnissen konnte aber bis heute nicht eindeutig hergestellt werden (siehe dazu HABBE 2003 sowie die Grafik **A** und **B2**). Die Gliederung der Eiszeit aufgrund der fluvioglazialen Zeugnisse war somit alles andere als optimal. Aber man hatte sich daran gewöhnt und bis hinein in die 70iger Jahre bestimmte das Muster der Schotterterrassen-Abfolge die Vorstellungen vom Klimaverlauf im Quartär.

### 2.3 Neue Klimaarchive und Proxydaten-Muster: Das komplexe System „Erde“

Die Geologie und viele ihr eng benachbarte Wissenschaften erlebten um die Mitte des 20. Jahrhunderts eine völlige Umgestaltung. Bis in die Hälfte des 20. Jahrhunderts bewegten sich die Geologen bei ihren Forschungen fast ausnahmslos auf den Festländern. Doch die Kontinente nehmen nur 1/3 der Erdoberfläche ein und wie – so mag man heute vielleicht fragen – war es möglich zu glauben, aus einer solch eingeschränkten Perspektive zu brauchbaren Einsichten über die Erde als Ganzes gelangen zu können? Die Umgestaltung der Geowissenschaften ging vom verstärkten Studium der Meeresräume aus, wobei nun auch andere Werkzeuge und Methoden als in der traditionellen Festlandsgeologie zur Anwendung kamen. Als erstes große Ergebnis dieser veränderten Arbeitswelt war man in den 60iger Jahren des 20. Jahrhunderts in der Lage, endlich eine überzeugende Theorie zur globalen Tektonik zu formulieren. Wesentliche Bausteine dieses plattentektonischen Modells waren die Kenntnis von der durchweg basaltischen Natur der ozeanischen Kruste, ihre paläomagnetische Symmetrie in Bezug auf die mittelozeanischen Rücken und die geophysikalisch gewonnenen Einsichten über die ungleichförmige Verteilung seismisch aktiver Zonen auf der Erde.

Die Plattentektonik als den End- oder Kulminationspunkt dieser methodischen Neuausrichtung zu sehen, wäre aber zu kurz gegriffen. Dieses Modell, daß so viele Erscheinungen in einen erklärenden Zusammenhang setzt, wird noch gewaltig übertroffen von dem Ansatz, die vielen verschiedenen Sphären der Erde als ein ganzes System zu sehen und auch verstehen zu wollen. Weil dieses „System Erde“ natürlich hochgradig komplex ist, ist es auch nicht einfach modellierbar, und man ist gegenwärtig noch immer weit davon entfernt, so etwas wie eine zusammenfassende „Theorie der Erde“ zu haben.

Mit dem neuen globalen Fokus der Geowissenschaften wurden auch neue Klimaarchive erschlossen: die Ablagerungen aktueller oder fossiler Binnenseen, die Sedimente in den ozeanischen Räumen, die Eisschilde der nördlichen wie südlichen Hemisphäre. Die Daten aus diesen Klimaarchiven erreichten in den letzten 30 Jahren in einigen wenigen Schritten eine zunehmend



feinere Auflösung, wodurch sich der empirische Hintergrund der Klimadebatte bedeutend veränderte.

Dabei muß man allerdings sehen, daß das Paläoklima und viele andere das System Erde betreffende erdgeschichtliche Daten sich nicht unmittelbar messen oder rekonstruieren lassen. Die meisten Daten sind vielmehr nur „Sekundäreffekte“ der jeweiligen erdgeschichtlichen Umweltbedingungen. Weil diese Daten gleichsam als „Stellvertreter“ für die eigentlich gesuchten Informationen dienen, werden sie auch **Proxydaten** genannt (*proxy* bedeutet: ein Wert, der für einen anderen eintreten kann). Proxydaten haben oft nicht absolute, sondern relative Aussagekraft – in der Klimadebatte bedeutet das, daß aus Proxydaten keinen exakten absoluten Angaben z.B. für Paläotemperaturen gewonnen werden können, aber aus der zeitlichen Entwicklung dieser Daten relativ präzise Vorstellungen über die Spannweite von Temperaturschwankungen gewonnen werden können. Der im folgenden dargestellte erste große Schritt zu einem neuen Verständnis des Paläoklimas ist zugleich ein sehr gutes Beispiel für die Verwendung solcher Proxydaten.

### 2.3.1 Die Sauerstoff-Isotopenkurve (1976)

Die erste Meilenstein zum heutigen Bild der Klimageschichte der letzten 2-3 Millionen Jahre war die im aus Sedimenten des Pazifiks gewonnenen Sauerstoff-Isotopenkurven (SHACKELTON & OPDYKE 1973, 1976 – siehe Grafik B1). Die Sedimente bestehen zu einem beträchtlichen Anteil aus Kalkschlamm, in welchem wiederum kleine Gehäuse planktonischer Organismen, der Foraminiferen, einen großen Anteil haben.

Für den Aufbau der Foraminiferen-Schalen aus Calciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) wird neben Ca und C auch Sauerstoff (O) gebraucht. Sauerstoff besteht nun aber, wie viele andere Elemente auch, nicht nur aus dem „normalen“ Sauerstoff mit der Ordnungs- und Massenzahl 16, sondern auch anderen Isotopen, die durch mehr oder weniger Anteile an Neutronen aber eine andere Masse haben. So hat das Isotop  $^{18}\text{O}$  zwei Neutronen mehr im Kern als das normale Isotop  $^{16}\text{O}$  und ist daher schwerer. Bei der Verdunstung von Wasser erfolgt deshalb eine Fraktionierung: indem bevorzugt leichteres  $^{16}\text{O}$  verdunstet, kommt es im Meerwasser zu einer relativen Anreicherung von  $^{18}\text{O}$ . Der relative  $^{18}\text{O}$ -Gehalt des Meerwassers bringt damit zum Ausdruck, wieviel verdunstetes Wasser dem hydrologischen Kreislauf – insbesondere in Form von Gletschereis – entzogen ist. Organismen, die für den Bau ihrer Hartteile Sauerstoff benötigen, fraktionieren die Isotope hingegen nicht und präsentieren im Sauerstoffisotopen-Verhältnis ihrer Schalen das Verhältnis im Meerwasser zur Zeit des Schalenbaus. Die aus diesen Schalen gewonnene Kurve mit aus den sich durch die Zeit ändernden Verhältnissen von  $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$  ist somit eine idealtypische Proxydaten-Kurve: sie repräsentiert den globalen Anteil des in Eis gebundenen Wassers und ist damit ein Indikator für den Gang des globalen Klimas.

Folgende Aussagen der Sauerstoff-Isotopenkurve können herausgehoben werden:

- a) Der Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten vollzog sich im Quartär viel öfter, als durch die Zeugnisse festländischer Vergletscherungen dokumentiert. Allein in den letzten 1.000.000 Jahren lassen sich 12 Wechsel von warmzeitlichen zu kaltzeitlichen Bedingungen erkennen, wobei die Gegensätze sich zur Gegenwart hin zunehmend verschärft zu haben scheinen.
- b) Der Wechsel scheint zudem einem relativ regelmäßigen Zyklus zu folgen, indem die Kaltzeiten etwa jede 100 000 Jahren von einer kräftigen, aber relativ kurzen Warmzeit unterbrochen werden. Diese Regelmäßigkeit deutet stark auf eine Steuerung durch astronomische Zyklen (im Sinne von MILANKOVITCH 1941), wobei aber unklar bleibt, durch welche Verstärkung die schwachen Änderungen der Sonneneinstrahlung eine derartige, zu diesem extremen klimatischen Wechseln führende Wirkung erfahren.
- c) Die Kurve zeigt außerdem, dass auch innerhalb der Warm- und v.a. der viel längeren Kaltzeiten

erhebliche Klimaschwankungen auftreten. Aufgrund des ebenfalls regelmäßig-zyklischen Auftretens werden auch hierfür astronomische Ursachen angenommen. Die Sauerstoff-Isotopen Kurve führte mit ihrem Zyklizitäten dazu, dass astronomischer Faktoren (im Sinne von MILANKOVITCH 1941) in der Diskussion um die Klimaentwicklung eine starke Aufwertung erfuhren. Zugleich wurde aber auch deutlich, daß diese astronomischen Faktoren (regelmäßige Schwankungen der Ellipsenform der Erdumlaufbahn, der Präzession des Perihels und der Ekliptikschiefe) so geringe Schwankungen der Sonneneinstrahlung mit sich bringen, daß auf der Erde verstärkende Systeme wirksam werden müssen. Diese Verstärkung wird allerdings bis jetzt nicht gut verstanden, drängte aber dazu, noch stärkeres Augenmerk auf die Zirkulation der Meeresströmungen, das Verhalten der Atmosphäre und andere Sphären zu richten.

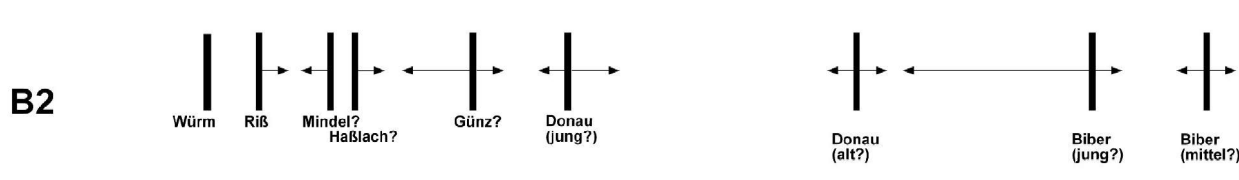
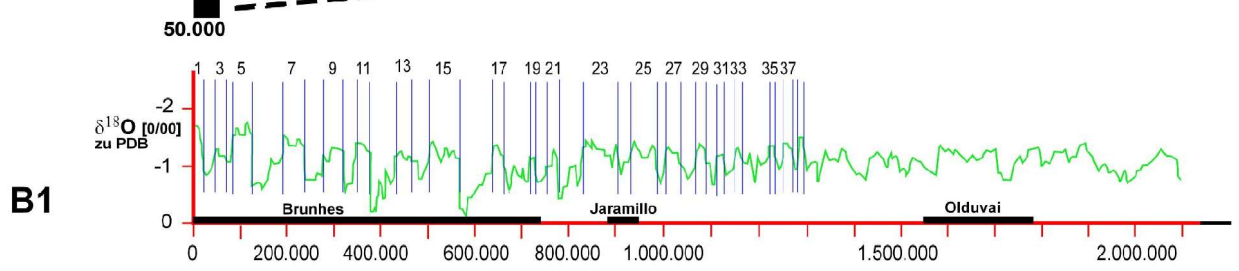
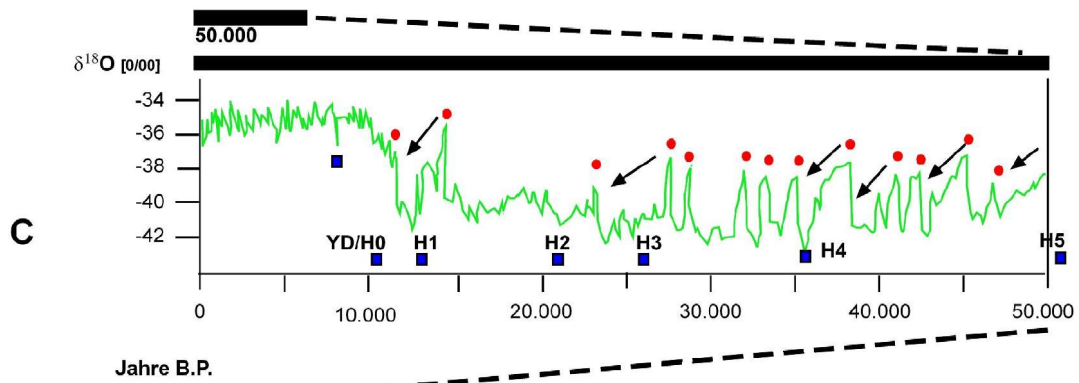
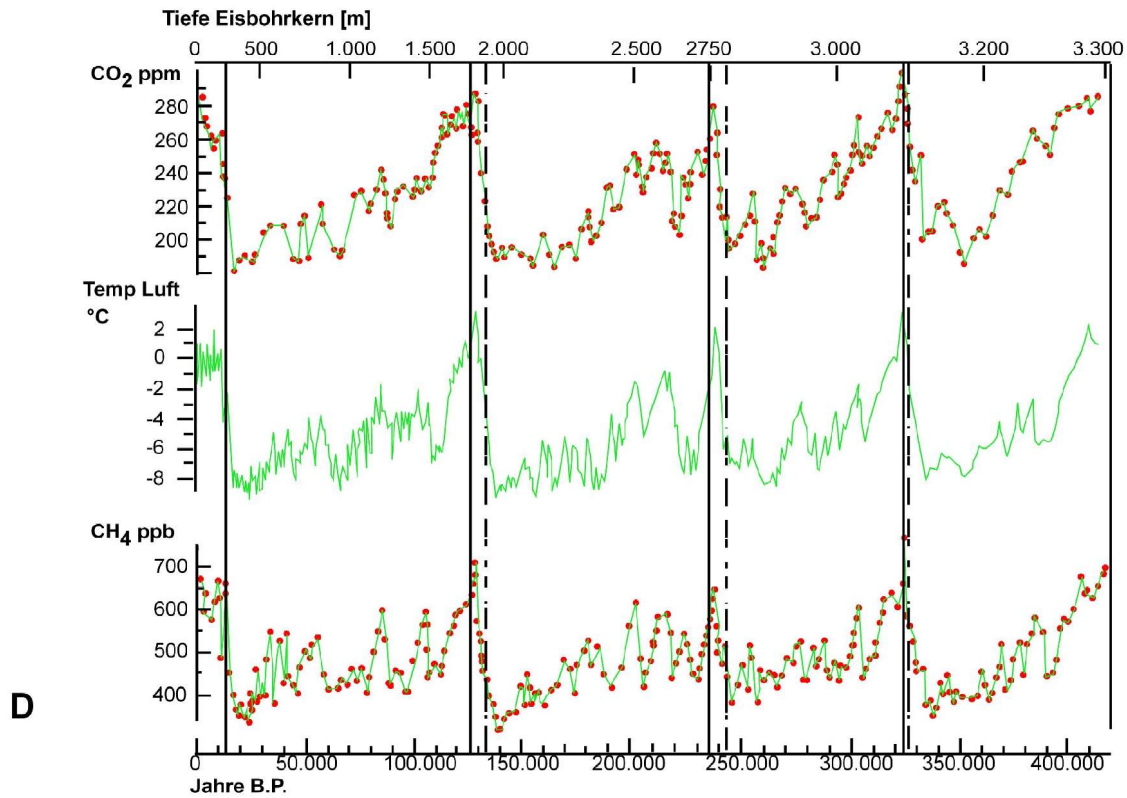
Die vorwiegend warm- und kaltzeitlichen Abschnitte der Sauerstoff-Isotopenkurve wurden als Grundlage für einen stratigraphischen Standard aus durchnummerierten **Sauerstoff-Isotopen-Stufen** genommen (vgl. **B2**). Diese Isotopenstufen bilden heute eine der Säulen der Stratigraphie der jüngeren Erdgeschichte.

### 2.3.2. Die ersten tiefen Grönland-Eiskerne GRIP (1989-1992)

Einer neuer Abschnitt in der Erforschung des Paläoklimas wurde durch die Bohrungen auf dem grönländischen Eis aufgeschlossen. Der GRIP-(Greenland Ice Core Project)-Eiskern erreichte eine Länge von 3029 m und lieferte Proxydaten bis über die letzten Kaltzeit hinaus. Weitere, zeitlich eng begleitende oder nachfolgende Bohrungen wie GISP 2 (Greenland Ice Summit Core Project 2) u.a. dienten auch dazu, die Aussagekraft durch gegenseitigen Kalibrierung zu stärken. Die Ergebnisse dieser Projekte wurden in zahlreichen Arbeiten und zum Teil auch im Internet veröffentlicht. Eisbohrkerne enthalten wesentlich mehr paläoklimatische Informationen als Sedimentproben. Im Eis können nicht nur Proxydaten gewonnen werden, in Lufteinschlüssen lassen sich sogar die einstigen Konzentrationen wichtiger Treibhausgase unmittelbar messen. Dazu kam speziell in Grönland die feine zeitliche Auflösung der Datenreihen.

Die wesentliche Überraschung der Grönlandeiskerne waren die darin abgebildeten Muster starker und zugleich rascher Klimaschwankungen während des letzten Glazials. Dabei scheinen kräftige Erwärmungen oft sehr abrupt im Laufe von Jahren bis Jahrzehnten eingetreten zu sein. Diese plötzlichen Erwärmungen werden als **Dansgaard-Oeschger-Ereignisse (D-O-Events)** bezeichnet (siehe die roten Punkte in **C**). Sie markieren häufig den Beginn einer längeren Phase stufenweise abnehmender Temperatur (Pfeile in **C**). Zusammen mit den D-O-Events werden diese Abschnitte zu **D-O-Zyklen** zusammengefasst. Die durchschnittliche Dauer eines solchen Zyklus beträgt ca. 1470 Jahre, wobei die dahinter stehende Steuerung noch nicht bekannt ist. Die D-O-Zyklen wurden inzwischen in weiten Bereichen des Atlantiks und den angrenzenden Festländern nachgewiesen, wobei die Effekte sich vor allem in Bereich der Nordhalbkugel zeigen.

Obwohl sich in den Kaltzeiten die Abkühlung eher kontinuierlicher und über längere Zeiträume vollzieht, gibt es aber auch hier Ausnahmen. Diese Ausnahmen werden zum Teil mit den so genannten **Heinrich-Events** korreliert (HEINRICH 1988). HEINRICH hatte bei der Bearbeitung von Sedimentkernen aus dem Nordatlantik mehrfach grobkörnige, unsortierte Lagen angetroffen, wie sie nur aus großen Mengen abschmelzenden Eises stammen können. Das Eis bzw. Eisberge müssen daher in diesen kurzen Phasen offenbar weit nach Süden vorgestoßen sein. Man nimmt an, dass der in diesem Zusammenhang verstärkte Eintrag kalten Süßwassers die Meeres-Zirkulation des Nordatlantiks weitgehend zum Erliegen gebracht und damit einen klimatischen Kälteeinbruch ausgelöst haben könnte. Die Heinrich-Events werden von **H6-H1** durchnummeriert, wobei die jüngere Dryas mitunter auch als **H0** betrachtet wird (Das blaue Quadrat ganz links in **C** markiert



## Grafiken zur Illustration der zunehmenden Präzision in der Kenntnis der Klimageschichte

**A** – Skizze zur Illustration der von PENCK & BRÜCKNER (1901-1909) erstellte morphostratigraphischen Gliederung der Kaltzeiten anhand der fluvioglazialen Terrassenfolge der Iller-Lech-Platte. Um die Mitte des 20. Jahrhunderts wurden nach diesem Prinzip im süddeutschen Voralpenland mit Haßlach, Donau und Biber noch weitere Kaltzeiten eingefügt.

**B1** – Die Sauerstoff-Isotopenkurve nach SHACKELTON & OPDYKE 1976. Die Kurve wurde aus den Analysen von Karbonataschlamm am Grund des Pazifiks erstellt. Das Muster wurde in der Folge zur Grundlage einer durchnummerierten Stufengliederung (hier eingetragen bis Stufe 37, die ungerade bezeichneten Stufen repräsentieren jeweils relativ geringe <sup>18</sup>O-Konzentrationen, also warme Phasen). Allein in den letzten 1.000.000 Jahren lassen sich 12 Wechsel von warmzeitlichen zu vorherrschend kaltzeitlichen Bedingungen erkennen, wobei die Gegensätze sich zur Gegenwart hin zunehmend verschärft zu haben scheinen.

**B2** – Der Versuch, die in der Regel nur sehr unscharf datierten fluvioglazialen Ablagerungen des Alpenvorlandes mit den Sauerstoff-Isotopen-Stufen zu korrelieren (hier nach HABBE 2003), ist vor allem bei älteren Schottern mit großen Schwierigkeiten verbunden. Da es methodologisch keine Möglichkeit gibt, anhand dieser Sedimente eine bedeutend präzisere zeitliche Auflösung zu erreichen, muß man damit rechnen, daß solche Korrelationen auch auf lange Sicht mit diesen Unschärfen behaftet bleiben werden. Wie auch immer, mit der Zusammenstellung der Sauerstoff-Isotopenkurve hat die kontinentale Eiszeitgliederung ihre Vorrangstellung hinsichtlich der Gliederung des Quartärs verloren.

**C** – Die in Grönland gewonnenen Eisbohrkerne (GISP, u.a.) ergaben eine bis dahin (1993) unerreichte Auflösung (nur der jüngere Abschnitt der gewonnenen Daten wird durch die Grafik repräsentiert; nach BOND et al. 1993). Daraus ließen sich völlig neue zyklische Klimabewegungen sowie zum Teil sehr rasch verlaufende Klimaschwankungen ablesen. Gerade die letzte Kaltzeit zeigte sich sehr wechselhaft, starke und rasche Schwankungen traten auch in der mehrere tausend Jahren währenden Übergangszeit zur warmzeitlichen geologischen Gegenwart, dem Holozän, auf. Das Muster zeigt, daß sich die Abkühlungsschritte in der letzten Kaltzeit eher kontinuierlicher und über längere Zeiträume vollzogen, wobei es aber auch hier zu extremen Kälteereignissen kam. Diese Kältemaxima werden zum Teil mit den so genannten **Heinrich-Events** korreliert (HEINRICH 1988). Heinrich hatte bei der Bearbeitung von Sedimentkernen aus dem Nordatlantik mehrfach grobkörnige, unsortierte Lagen angetroffen, wie sie nur aus großen Mengen abschmelzenden Eises stammen können, wobei das Eis bzw. Eisberge in diesen kurzen Phasen offenbar weit nach Süden vorgestoßen sein muß. Die Heinrich-Events werden von H6-H1 durchnummeriert, wobei die jüngere Dryas mitunter auch als H0 betrachtet wird. Das blaue Quadrat ganz links markiert eine rasche Abkühlung des Nordatlantiks vor ca. 8000 Jahren: Ursache soll der rasche Eintrag großer Schmelzwassermengen aus nordamerikanischen Seen gewesen sein.

Erwärmungen scheinen hingegen oft sehr abrupt im Laufe von Jahren bis Jahrzehnten eingetreten zu sein. Diese plötzlichen Erwärmungen werden als **Dansgaard-Oeschger-Events** bezeichnet (rote Punkte). Sie markieren häufig den Beginn einer längeren Phase mit stufenweise abnehmender Temperatur (Pfeile). Zusammen mit den D-O-Events werden diese Abschnitte zu **D-O-Zyklen** zusammengefasst. Die durchschnittliche Dauer eines solchen Zyklus beträgt ca. 1470 Jahre, wobei die dahinter stehende Steuerung noch nicht bekannt ist. Die D-O-Zyklen wurden inzwischen in weiten Bereichen der nördlichen Halbkugel nachgewiesen.

Das Holozän zeigt sich aus dieser Sicht als eine Periode mit einem eher ungewöhnlich stabilen Klima, wobei sich die globalen Veränderungen in den letzten 1000 Jahren einem dem Rahmen bewegt haben, die durch die Spitzen des mittelalterlichen Klimaoptimums, der spätmittelalterlichen-altneuzeitlichen kleinen Eiszeit, und der sich – warum auch immer – gegebärtigen noch verstärkenden neuzeitlichen Wärmephase bestimmt werden.

**D** – Der in der Antarktis bei der russischen Vostok-Station gewonnene Bohrkern ist der erste, der über vier Kaltzeiten hinweg bis in die Zeit vor ca. 420.000 Jahren zurückreicht. Die durchgezogenen senkrechten Linien markieren die Bereiche der Warmzeiten, wobei die etwas davor liegenden gestrichelten Linien insofern den Beginn dieser Warmzeiten zum Ausdruck bringen, als sie die im Eis nachlassende Staubkonzentration als Zeichen für die Ausbreitung der Vegetation anzeigen. Die wesentliche Botschaft dieser Meßreihen ist der enorme Anstieg der Treibhausgase Kohlendioxid und Methan in den Warmzeiten. In der im Eis eingeschlossener Luft wurden in der drittletzten Warmzeit beim CO<sub>2</sub> Konzentration bis ca. 300 ppm gemessen – mehr als der präindustrielle Stand im Holozän bei ca. 280 ppm. Durch den nachfolgenden industriellen Ausstoß ist die Konzentration aber inzwischen auf 360 ppm gestiegen, ein Wert (wobei die Tendenz weiter steigend ist). Ähnlich wurden beim CH<sub>4</sub> in der drittletzten Warmzeit Konzentrationen um 770 ppb gemessen, wobei der präindustrielle Wert im Holozän bei etwa 650 ppb lag, inzwischen aber mit ca. 1700 ppb eine Konzentration erreicht hat, die weit über den in älteren Warmzeiten nachgewiesenen Werten liegt. (Grafik nach PETIT et al. 1999)

eine rasche Abkühlung des Nordatlantiks vor ca. 8000 Jahren: Ursache soll der rasche Eintrag großer Schmelzwassermengen aus nordamerikanischen Seen gewesen sein).

Die Möglichkeit rascher Klimawechsel ist damit eindrucksvoll dokumentiert. **Der Umstand, daß diese sich in der letzten Kaltzeiten bei weitem drastischer als in der jetzigen Warmzeit gezeigt haben, darf nicht darüber hinwegtäuschen, daß die das Klima bestimmenden natürlichen Systeme offenbar grundsätzlich in der Lage sind, rasche und extreme Ausschläge zu verursachen.** Über das letzten Jahrhunderttausend oder vermutlich noch weiter, über mehrere Glaziale hinweg, sind die Instabilitäten die „normale“ Signatur. Warmzeiten erschienen aus dieser Perspektive als kurzzeitige Phasen „anomal“ erhöhter Stabilität, wobei die letzten Jahrtausende unserer jetzigen Warmzeit gar als (bisher) besonders stabil gelten können. Gleich, in welchem Maß die Klimawechsel von astronomischen Zyklen angeregt werden, die rasche und heftige Reaktion ist offenbar möglich, weil Systeme wie die ozeanische Zirkulation des Nordatlantiks (THC Thermohaline Zirkulation: von Temperatur und Salzgehalt gesteuert) und meteorologische Zonen (wie die Nordatlantik-Oszillation, NAO) sehr rasch veränderbare Wirkungskreise zu sein scheinen.

### 2.3.3. Das erste Klimaarchiv über 4 Kaltzeiten: Der Vostok-Eiskern 1999

Der in der Antarktis an der russischen VOSTOK-Station in nahezu 10jähriger Arbeit gewonnene Eiskerne hat als erster und bisher einziger ein zusammenhängendes Klimaarchiv über die letzten vier Kaltzeiten (bis vor ca. 420.000 Jahre) ergeben (PETIT ET AL. 1999, siehe Grafik D)

Die Meßreihen ergaben, daß die Schwankungen des Klimas in diesem Zeitraum zwar stark, aber zugleich zwischen relativ festen Grenzen verlief. Das Muster der Veränderungen von Warmzeit zu Kaltzeit wiederholt sich jeweils in relativ ähnlicher Weise. Das kommt besonders im Verhalten der Treibhausgase  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  zum Ausdruck, deren Konzentration in allen Warmzeiten in ähnlicher Weise anstieg, in den Kaltzeiten aber wieder zurückging. In im Eis eingeschlossener Luft wurden in der drittletzten Warmzeit eine  $\text{CO}_2$  Konzentration um ca. 300 ppm gemessen – mehr als der präindustrielle Stand im Holozän bei ca. 280 ppm. Durch den nachfolgenden industriellen Ausstoß ist die Konzentration aber inzwischen auf 360 ppm gestiegen (wobei die Tendenz weiter steigend ist). Ähnlich wurden beim  $\text{CH}_4$  in der drittletzten Warmzeit Konzentrationen um 770 ppb gemessen, wobei der präindustrielle Wert im Holozän bei etwa 650 ppb lag, inzwischen aber mit ca. 1700 ppb eine Konzentration erreicht hat, die weit über den in älteren Warmzeiten nachgewiesenen Werten liegt. Die Daten zeigen also nicht nur eine enge Korrelation zwischen dem natürlichen Klimagang und der Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre, sondern auch, daß der industrielle Ausstoß inzwischen zu Werten geführt hat, die nach bisheriger Kenntnis in den letzten, vorangegangenen Warmzeiten nicht erreicht wurden.

Trotz dieser klaren quantitativen Aussagen bleibt die Bedeutung der Kurven ambivalent. Auch wenn rasche Verschiebung der Treibhausgase zwischen verschiedenen Reservoirs des Systems Erde deutlich werden (Ozeanwasser, Atmosphäre, Boden, Permafrost, Bioproduktion, Gashydrate u.a.), bleibt die Steuerung insgesamt im Dunkeln. In welchem Maß sind die Veränderungen der Treibhausgase Wirkungs-faktoren oder Begleitfaktoren? In welchem Maß ist die offenbar gegenwärtig stattfindene Erwärmung die Folge der industriell verursachten hohen Treibhausgas-Konzentrationen oder „natürlicher“ Prozeß? Und wohin wird diese Entwicklung führen?



### 3. Fazit: Das Klima läßt sich nicht als gleichbleibender Zustand „schützen“

Klimawandel, und auch rascher Klimawandel, ist erdgeschichtliche Tatsache. Die Neuigkeit der letzten Jahre besteht darin, daß dieser Wandel sich nicht nur im Maßstab langer erdgeschichtlicher Zeiträume zeigt, sondern in der Erdgeschichte so rasche Instabilitäten sichtbar geworden sind, daß sie im Rahmen einer oder weniger menschlicher Generationen liegen würden. Diese „natürliche“ Charakteristik des Systems Erde läßt sich prinzipiell nicht durch „Klimaschutz“ ändern. Selbst wenn man den Ausstoß der Treibhausgase völlig zurückfahren würde (woran leider keiner ernsthaft glauben kann), könnte man sich nicht zuversichtlich in der Meinung zurücklehnen, nun zukünftige und möglicherweise auch baldige kräftige Klimaänderungen ausgeschlossen zu haben.

Wenn man umgekehrt völlig auf Klimaschutz bzw. Reduktion des Treibhausgasausstosses verzichten würde, dann bringt man – objektiv gesehen – das System Erde in einen Zustand, den es in den vorherigen Warmzeiten nicht erlebt hat (indem man noch weiter über die in den VOSTOK-Kernen dokumentierten Konzentrationen der letzten Warmzeiten hinausginge). Im Vergleich zu eines Szenarios mit „Klimaschutz“ würde das bedeuten, daß man die Referenz, die das erdgeschichtlich Klimamuster vorgibt, verläßt und damit rechnen muß, dass die darin dokumentierten Klimaschwankungen in ihrer Intensität wie im zeitlichen Muster nicht mehr als Maßstab dessen gelten könnten, womit man zukünftig rechnen muß. Andererseits sind die erdgeschichtlich überlieferten Klimaschwankungen derart extrem gewesen, daß es schwer fällt sich vorzustellen, der industrielle Treibhausgasausstoß würde Folgen nach sich ziehen, die diese dokumentierten Schwankungen übertreffen könnten.

Wie weit kann die Konzentration an Treibhausgasen zunehmen, ohne daß der Rhythmus der letzten Jahrmillionen gestört werden würde? Hätte das vielleicht zur Folge, dass es längerfristig nicht wieder zu einer Kaltzeit kommt, in der große Bereiche der Nordhalbkugel unter einem Eispanzer lägen? Wäre eine erwärmte Erde mit erhöhten Ozeanspiegel, Hurricanes und tropischer Luftfeuchtigkeit möglicherweise gar die bessere von zwei schlechten Perspektiven? Diese mit ihren sehr weit nach vorne weisenden Inhalten sollen unterstreichen, dass mit relativ großer Sicherheit irgendwann in der Zukunft Bedingungen auftreten werden, die jenseits des Horizonts liegen, der allgemein bei der Debatte um Klimaschutz eingenommen wird. Diese Debatte konzentriert sich ja auch darauf, das Problem vorwiegend als ein technisches zu behandeln, was es aber in erster Linie gar nicht ist: All diese Klimaphasen, wie sie im Wechsel der letzten Jahrhundertausende mehrfach in extremer Weise auftraten, sind von der Menschheit erfolgreich bewältigt worden – und dies mit geringstem technischen Potential. Wieso, so könnte man fragen, braucht man sich dann Sorgen um die Zukunft zu machen? Es ist die Gefahr sozialer und politischer Destabilisierung, die mit einem Klimawandel einher gehen könnte, vor allem dann, wenn dieser sehr rasch verlief. Auf einer bis an die Grenzen zugesiedelten Erde könnten solche Destabilisierungen verheerende Wirkungen haben. Die einfachste Strategie globaler Zukunftssicherung bestünde demnach nicht im Feilschen um Grenzwerte beim Treibhausgas, sondern in einer langfristigen Reduktion der Erdbevölkerung auf ein Maß, das auf gravierende Umweltveränderung nicht durch tödliche Konkurrenz, sondern in vereinter Solidarität reagieren kann.

Die Debatten um Klimaschutzprotokolle sollte auch nicht davon ablenken, daß die Menschen schon immer und so auch jetzt unter Klimänderungen und damit mehr oder weniger verknüpften Umweltkatastrophen leiden, dass Überschwemmungen, Hangrutsche, Hungersnöte tatsächlich im beträchtlichem – und erschreckendem – Ausmaß Alltag sind (ganz abgesehen von den Nöten, deren Ursache im wesentlichen unmittelbar sozialer und politischer Natur sind). Energiepolitische Interessen sind auch eine Form „klimagesteuerter“ Handelns. In der Politik der mächtigen Industrienationen nehmen sie daher schon lange eine wichtige Rolle ein, wobei ihre Durchsetzung (unter welchen Vorwänden auch immer) auch heute schon nicht selten mit Gewalt vollzogen wird.

Wer kann ausschließen, dass Strategen mächtiger Staaten nicht einfach locker sagen: Was wollen wir mit Klimaschutzvereinbarungen? – Wir werden uns in jedem Klimafall durchsetzen! Oder: Führt Klimaschutz-Diskussion, das lenkt davon ab, dass man viele Probleme auch lösen könnte, wenn man nur die Welt anders ordnete, was wir aber auf keinen Fall wollen ... Wie auch immer, was die Geologie zu diesem Thema beitragen kann, ist: Zukunft gibt es nur mit Klimawandel – man muß sich nur darauf einstellen!

## Literatur

- Agassiz, L. (1838): Upon glaciers, moraines, and erratic blocks. - Edinburgh New Philosophical Journal 24, 99-102.
- Agassiz, L. (1840): Etude sur les glaciers. - 2 Bde., Neuchâtel.
- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F. & Michel, H. V. (1980): Extraterrestrial cause for the cretaceous-tertiary extinction. - Science 208 (6. Juni 1980), 1095-1108.
- Bond, G.C., Broecker, W., Johnsen, S., McManus, J., Labeyrie, J. and Bonani, G. (1993): Correlations between climate records from north Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature* **365**, 143–7.
- Bond, G.; Showers, M.; Lotti, R.; Almasi, P.; de Menocal, P.; Priore, H.; Cullen, I., Hajdas; Bonani, G. (1997): A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates.- *Science* 278: 1257-1266.
- Bond, G. C., W. Showers, M. Elliot, M. Evans, R. Lotti, I. Hajdas, G. Bonani, and S. Johnson (1999). The North Atlantic's 1-2 kyr climate rhythm: Relation to Heinrich events, Dansgaard/Oeschger cycles and the Little Ice Age. In P. U. Clark, R. S. Webb, and L. D. Keigwin (Eds.), *Mechanisms of Global Climate Change at Millennial Time Scales*, Volume 112 of Geophysical Monograph, pp. 35-58. Am. Geophys. Union, Washington, D. C.
- Buckland, W. (1822): Account of an assemblage of fossil teeth and bones of Elephant, Rhinoceros, Hippopotamus, Bear, Tiger, and Hyaena, and sixteen other animals; Discovered in a Cave at Kirkdale, Yorkshire, in the Year 1821: with a comparative view of five similar caverns in various parts of England, and others on the Continent. - Philosophical Transactions of the Royal Society of London 112, 171-236.
- Buckland, W. (1823): Reliquiae Diluvianae; or, Observations on the organic remains contained in caves, fissures and diluvial gravel, and on other geological phenomena, attesting the action of an universal deluge. - London.
- Buffon, G. L. L. (1778): Les Èpoques de la Nature. - Bd. 5 der "Histoire naturelle, générale et particulière [...], Supplément. - Paris: Imprimerie Royal.
- Buffon, G. L. L. (1962): Les Èpoques de la Nature, édition critique avec le manuscrit, une introduction et des notes, ed. Jaques Roger. - Paris: Èditions du Muséum.
- Cuvier, G. (1812): Recherches sur les ossemens fossiles de quadrupèdes, où l'on rétablit les caractères de plusieurs espèces d'animaux que les révolutions du globe paroissent avoir détruites. - Paris: Deterville [enthält den Discours préliminaire]
- Dansgaard, W., S. J. Johnsen, H. B. Clausen, D. Dahl-Jensen, N. S. Gundestrup, C. U. Hammer, C. S. Hvidberg, J. P. Steffensen, A. E. Sveinbjornsdottir, J. Jouzel, and G. Bond (1993). Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature* 364, 218-220.
- Geikie, J. (1874): The Great Ice Age and ist relationship to the antiquity of man. - London.
- Habbe, K. A. (2003): Gliederung und Dauer des Pleistozäns im Alpenvorland, in Nordwesteuropa und im marinen Bereich - Bemerkungen zu einigen neuen Korrelierungsversuchen. - *Z. dt. geol. Ges.* 154, 171-192.
- Hallam, A. (1989): Great geological controversies. - Oxford: Oxford University Press [2. Auflage].
- Heinrich, H., 1988: Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quat. Res.*, 29, 142-152.
- Hutton, J. (1795): Theory of the earth, with proofs and illustrations. - 2 Bde., Edinburgh: Messrs. Cadell, junior, and Davies, London; William Creech, Edinburgh.
- Kuhn, T. S. (1962): The structure of scientific revolutions. - Chicago: University of Chicago Press.
- Lyell, C. (1830): Principles of Geology, being an attempt to explain the former changes of the earth's surface, by reference to causes now in operation. - London: Murray. [Bd. I (1830): 511 S., Bd. II (1832): 350 S., Bd. III (1833): 398 S. + Appendix 109 S.]
- Lyell, C. (1872): Principles of geology, or the modern changes of the earth and its inhabitats considered as illustrative of geology [11. völlig revidierte Auflage]. - 2 Bde., London: John Murray.
- Milankovitch, M. (1941): Kanon die Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. - Königl..

Serbische Akad. Belgrad, Spec. Publ. 133, 633 S.

Pallas, P.S. (1777): Observations sur la formation des montagnes et les changements arrivés à notre globe. - Acta historica Leopoldina 1, 21-64.

Pallas, P.S. (1778): Betrachtungen über die Beschaffenheit der Gebirge und Veränderungen der Erdkugel, besonders in Beziehung auf das Rußische Reich. Vorgelesen in der öffentlichen Versammlung der Rußisch-Kaiserl. Akademie der Wissenschaften, den 23ten Junius 1777, da dieselbe mit der hohen Gegenwart des Herrn Grafen von Gothland beehret wurde. - Frankfurt und Leipzig.

Penck, A. (1879): Die Geschiebformationen Norddeutschlands. - Z. dt. geol. Ges. 31, 117-203.

Penck, A. (1882): Die Vergletscherung der deutschen Alpen - Ihre Ursachen, periodische Wiederkehr und ihr Einfluß auf die Bodengestaltung. - Leipzig: Barth.

Penck, A.; Brückner, E. (1901-1909): Die Alpen im Eiszeitalter. - 3 Bde., Leipzig: Tauchnitz.

Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis J. Delaygue G., Delmotte M. Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.M., Lorius C., Pépin 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, 3 June 1999, 429-436.

Playfair, J. (1802): Illustrations of the Huttonian Theory of the Earth. - Edinburgh.

Rupke, N. A. (1983): The great chain of history: William Buckland and the English School of Geology (1814-1849). - Oxford: Clarendon Press.

Scheuchzer, J. J. (1731-1736): Kupfer-Bibel, in welcher die Physica Sacra, oder geheiligte Natur-Wissenschaft derer in Heiligen Schrift vorkommenden natürlichen Sachen, deutlich erklärt und bewahrt [...]. - Augsburg,

Shackelton, N.J. & Opdyke, N.D. (1973): Oxygene Isotope and palaeomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238: Oxygene isotope temperatures and ice volumes on a  $10^6$  year and  $10^5$  year scale. - Quat. Res. 3, 39-55.

Shackelton, N.J. & Opdyke, N.D. (1976): Oxygen isotope and palaeomagnetic stratigraphy of Pacific Core V28-239, Late Pliocene to Late Holocene. - Geol. Soc. Am. Mem. 145, 449-446.