

*Dieser von Prof. van Husen für die Wiss. Nachrichten geschriebene Aufsatz wird auf Grund seines interessanten Inhaltes als Jahresthema in drei Teilen ungekürzt abgedruckt.*

Univ.-Prof. Dr. Dirk van Husen, Institut f. Geologie, TU Wien

## Klimaentwicklung – Eiszeiten Ursachen und Auswirkungen

### Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung
2. Gegenwart–Eiszeit, ein Klimavergleich
3. Ursachen der Interglazial-Glazial Zyklen
4. Verlauf des letzten Interglazial-Glazial Zyklusses
5. Verlauf älterer Zyklen
6. Verlauf des Holozäns
7. Ausblick

### 1. Einleitung

Die vielseitigen intensiven Forschungen der letzten 20 bis 30 Jahre zu Fragen der Klimaentwicklung während des Quartärs haben sich nicht nur auf die klassischen Arbeitsgebiete quartärgeologischer Forschung auf den Kontinenten beschränkt, sondern auch die Ozeane und die Eisschilde (Grönland, Antarktis) eingeschlossen. Gerade aus diesen Räumen kamen sehr wichtige Erkenntnisse für den Klimagang über lange Zeiträume und dessen mögliche Ursachen. So können aus den weichen Sedimenten der Tiefseeböden Bohrkerne gewonnen werden, die Ablagerungen von mehreren Hunderttausenden oder Millionen Jahren in nicht unterbrochenen Abfolgen umfassen. Durch detaillierte Analysen dieser Kerne war es möglich über die erfaßten Zeiträume Daten über die Klimaentwicklung, ihre Periodizität und Trends zu sammeln. Dies ließ letztendlich eine Verknüpfung mit den Erdbahnelementen (Milankovitch-Theorie) zu. Durch diese Vergleiche und andere Erkenntnisse der Ozeanographie (z. B. Meeresströmungen, Entstehen und Verhalten bestimmter Wassermassen) wurden einerseits schon teilweise sehr fundierte Vorstellungen über die Ursachen und Mechanismen der Klimasteuerung sowie der Eiszeiten erarbeitet, andererseits auch eine große Zahl neuer Fragen aufgeworfen.

Die Gewinnung mehrerer tausend Meter langer Bohrkerne aus den Inlandeismassen Grönlands und der Antarktis erlauben heute einen detaillierten Einblick in die Änderungen in der Atmosphäre (z. B. Temperatur, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Staubbelastung) während der letzten beiden Eiszeitzyklen. Dies gestattet gute Einblicke in die weltweite Temperaturentwicklung und ihre zeitliche Übereinstimmung mit den Vorgängen im Ozean.

Die gleichzeitig weiter verfolgte Forschung an den terrestrischen Sedimenten (Moränen, Flußablagerungen, Lössen, Mooren und Seeablagerungen) hat ein wesentlich differenzierteres Bild der Reaktion dieser Räume auf die Änderungen in Meer und Atmosphäre besonders für den Zeitraum des letzten Interglazial-Glazial-Zyklusses und

das Holozän ergeben. Diese aus vielen Einzelergebnissen – terrestrische Aufschlüsse umfassen nur ganz selten größere Zeitabschnitte – gewonnenen Kenntnisse geben uns heute bereits ein recht genaues Bild dieses Zeitraumes. Das darf als Modellvorstellung für die älteren Zyklen angesehen werden, da diese entsprechend den Analysen der Tiefseeablagerungen sehr ähnliche Entwicklungen zeigen.

Schwankungen des Klimas, die durch die angeführten, breitgestreuten Forschungen belegt sind, haben sich auf das Erscheinungsbild unserer Erde ganz wesentlich ausgewirkt. Der Vergleich der heutigen, holozänen, unvertreten Bedingungen, mit denen der letzten Eiszeit soll die Bandbreite aufzeigen, innerhalb der unsere Umweltbedingungen schwanken können. Es ist dies der Gegensatz von interglazialen und glazialen Klimagegebenheiten, die die stabilen Endzustände darstellen.

Diese Zusammenstellung der heutigen Vorstellungen kann nur einen generellen Überblick der geologischen Daten und ihre wahrscheinliche Bedeutung für die Klimatologie geben. Für eine Vertiefung muß auf die angeführte Literatur verwiesen werden.

### 2. Gegenwart–Eiszeit – ein Klimavergleich

#### Holozän

Wenn wir von den gegenwärtigen klimatischen Verhältnissen ausgehen, die während des ganzen Holozäns mit geringen Schwankungen geherrscht haben (s. u.), so müssen wir uns darüber klar sein, daß wir es dabei mit interglazialen Klimabedingungen zu tun haben. Die Ausdehnung der Klimazonen (tropischer, gemäßigter und arktischer Bereich sowie ihre Übergänge) ist durch ein quasi stabiles Muster der Zirkulation der Atmosphäre und der Ozeane bestimmt. Diese Zirkulationen sorgen für die Verteilung der auf die Erde eingestrahelten Energie.

So bewirkt die im Bereich des Äquators eingestrahelte Energie den Aufstieg der erhitzten Luftmassen und ihr Abströmen nach Süden und Norden, wo sie (ca. beim 30° Breitengrad) großteils wieder absinken (Hadley Zellen). Die absteigende trockene Luft nimmt wieder Feuchtigkeit von Land und Meer auf, was zu Trockengebieten (z. B. Sahara) und zu starker Steigerung des Salzgehaltes der Oberflächenwässer der Ozeane führt. Diese Luftmassen fließen als Passatwinde wieder zum Äquator zurück. Die Anteile, die weiter, z. B. nach Norden (bis ca. 60°) abfließen, vermischen sich hier mit den kühlen, nach Süden vorstoßenden arktischen Luftmassen, was zu den Tiefdruckgebieten (Zyklonen) und ausgeprägten Westwindbändern in den mittleren Breiten führt (Abb. 1).

Diese Windsysteme erzeugen auch weltweit Oberflächenströmungen auf den Ozeanen (z. B. Äquatorialstrom im Pazifik, Indik und Atlantik sowie ihre Gegenströme). In der südlichen Hemisphäre, wo keine größeren Landmassen vorhanden sind, kann im Westwindband der sehr starke Zirkumantarktische Strom entstehen, der auch tiefere Wassermassen erfaßt (Abb. 2).

Aus diesen Strömungen kann man sehr leicht ersehen, daß der Energietransport im Pazifik weitgehend symmetrisch, im Atlantik aber deutlich nach Norden ausgerichtet ist. Hier wird Energie in großem Ausmaß durch den Golfstrom in höhere Breiten exportiert. Diesem verdanken wir ja in Europa die bis in hohe Breiten (Norwegen) auftre-

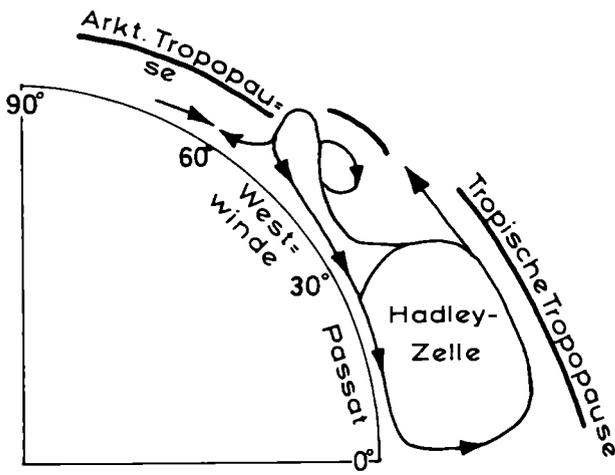


Abb. 1: Skizze der Luftzirkulation der Nordhalbkugel während des Winterhalbjahres.

tengebirge im Weg stehen, zum Indischen Ozean transportiert und sorgt somit für einen gewissen Ausgleich.

Diese Gegebenheiten beschenken uns die bekannte Verbreitung der Klimazonen auf der Erde mit ihren horizontalen wie vertikalen Temperaturverteilungen. Zum Beispiel in den ausgedehnten gemäßigten Zonen die bekannten natürlichen (ohne menschlichen Einfluß) Verhältnisse in der Vegetationsverteilung im Flachland und den Gebirgen (z. B. Baumgrenze in den Ostalpen ca. 2000 m am N-Rand und ca. 2300 m im zentralen Teil), und eine nennenswerte Vergletscherung nur in Hochgebirgen. Die Ozeane sind auch in hohen Breiten ganzjährig frei von Treibeis.

#### Eiszeit

Welche Unterschiede zu diesen günstigen interglazialen Verhältnissen traten während einer Eiszeit auf? Der Eintritt einer Eiszeit hatte extreme Veränderungen in allen Bereichen bewirkt (so betrug z. B. die Abnahme der Jahresdurchschnittstemperatur in den mittleren Breiten

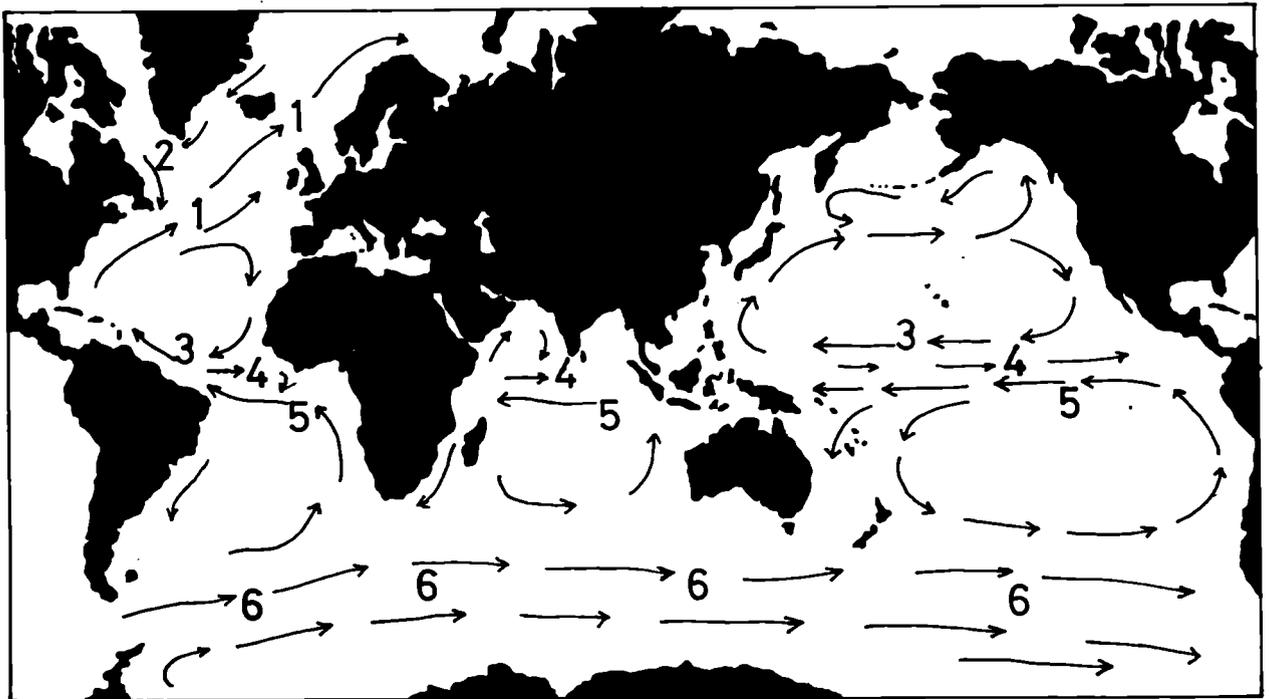


Abb. 2: Skizze der für den Energietransport und die Klimaentwicklung wichtigsten Meeresströmungen. 1 Golfstrom, 2 E-Grönland-Labradorstrom, 3 N-Äquatorialstrom (Passat), 4 Äquatorialer Gegenstrom, 5 S-Äquatorialstrom (Passat), 6 Zirkumantarktischer Strom (Westwind)

tenden günstigen Klimabedingungen. Er spielt auch für das Klimasystem der gesamten Erde eine eminente Rolle, wie wir noch sehen werden.

Durch die Verdunstung entsteht besonders im Nordatlantik sehr salzreiches Wasser (bis knapp über 37‰), das durch seine größere Dichte in die Tiefsee absinkt und nach Süden über den Äquator hinweg als relativ warmes, salzreiches Tiefenwasser abfließt. Dabei handelt es sich um die Größenordnung von ca. 20 Mio. m<sup>3</sup>/sec. Im Südatlantik vereinigt es sich mindestens mit der selben Menge von sehr kaltem, ebenso hochsalinem antarktischen Tiefenwasser und strömt in den Indischen und Pazifischen Ozean ab, wo es wieder an die Oberfläche kommt (s. Abb. 7). Der notwendige Ausgleich in dem System Wassermenge zu Salzmenge wird durch den atmosphärischen Transport des Wasserdampfes bewerkstelligt. Dieser wird, z. B. von den Passatwinden, über die niedrige mittelamerikanische Schwelle in den Pazifik und über Europa und Afrika, wo keine nord-süd-streichenden Ket-

auf den Landmassen zwischen 8 und 10 °C).

Durch diese Abnahme der Temperatur (zeitlicher Ablauf s. u.) blieb wesentlich mehr Schnee des Winters das ganze Jahr über erhalten, wodurch die Gletscher stark anwuchsen. Dies betraf einerseits alle Gebirge, andererseits auch die nördlichen Teile Europas, Asiens und Nordamerikas.

Gletscher und Eisschilde: In den Alpen zum Beispiel wuchsen die Eismassen derart an, daß die Täler zur Gänze bis in eine Höhe erfüllt wurden, so daß nur die höchsten Gipfel als sogenannte „Nunataker“ aus dem Eis aufragten. Die Eisströme flossen aus den Alpentälern ins Vorland ab, wo sie sich zu riesigen Vorlandzungen (Piedmontgletscher) ausbreiteten, indem sie ohne Stützung durch die Talflanken auseinanderflossen.

So waren die Alpen besonders im Norden (Rhône, Rhein, Inn, Salzach), aber auch im Süden (Gardasee, Tagliamento) von riesigen Gletscherzungen umrahmt. Nur im Osten blieben die Eisströme innerhalb der Gebirgs-

körper, da Niederschlag und Höhe der Berge abnahmen (Abb. 3).

Nicht nur die Alpen sondern auch alle andern Gebirgsketten Europas (z. B. Pyrenäen, Apennin, Karpaten) sowie die höheren Mittelgebirge (z. B. Vogesen, Schwarzwald) trugen mehr oder weniger ausgedehnte Eisströme. In gleicher Weise waren die Gebirge weltweit von ähnlichem Zuwachs der Vergletscherung betroffen. Dabei zeigte es sich, daß von den tropischen Gebieten bis in hohe Breiten die Schneegrenze im Mittel um ca. 1000 m gegenüber der heutigen abgesenkt war, was auf eine global gleichartige Temperaturabsenkung und nicht auf eine Niederschlagszunahme zurückgeführt wird. Dabei zeigten die Daten eine Temperaturabnahme von ca. 6–9 °C in den Gletschergebieten der Antarktis und Grönlands, von ca. 5 °C in den tropischen Gebirgen. Dagegen ist aber die Oberflächentemperatur des tropischen Ozeans um nur 2 °C gesunken, was gerade hier auf eine starke Erhöhung des vertikalen Temperaturgradienten hindeutet.

Neben diesen Gebirgsgletschern breiteten sich, von höher gelegenen Bereichen ausgehend, riesige Eisschilde in Nordeuropa und Nordamerika aus. Sie erreichten eine Mächtigkeit von 3000–4000 m und bildeten Eismassen, die – besonders in Nordamerika – Dimensionen ähnlich der heutigen Vergletscherung der Antarktis erreichten. Das Nordeuropäische Inlandeis reichte bis knapp südlich von Berlin, Posen und Warschau und erstreckte sich von Nordengland nach Osten bis weit nach Nordsibirien sowie nach Norden bis nach Spitzbergen, Franz-Josephs-Land und Novaja Semlja. Hier bedeckte es weite Teile des heute vom flachen Nordmeer bedeckten Schelfs.

zen in gleichem Maße. So waren die hochalpinen Weiden in den nicht vergletscherten mittleren Gebirgslagen Mitteleuropas weit verbreitet. Ebenso verschob sich der Bereich der Tundra mit dem vorrückenden Nordeuropäischen Eisschild weit nach Süden und nahm letztendlich den gesamten Bereich nördlich der Alpen ein und erstreckte sich von Südengland über Nordfrankreich bis zum Ural. Südlich davon schloß eine Steppe an, die bis Nordspanien-Norditalien reichte und große Gebiete des Balkans und den gesamten Raum nördlich des Schwarzen Meeres bedeckte.

Erst daran schlossen sich Steppengebiete und Nadelwälder mit Laubbäumen an. Diese stellten dann die Refugien dar, von denen dann am Ende der Eiszeit die Wiederbewaldung Europas ausgehen konnte.

Eine ähnlich starke Verschiebung der Vegetationsgrenze erfolgte in Nordamerika, so daß davon gesprochen werden kann, daß beide Kontinente bis auf die südlichen Teile entwaldet waren. Diese Vegetationsänderung ist neben der Temperatursteuerung auch durch eine Abnahme der Niederschlagsmengen bedingt.

Niederschläge: Infolge der geringeren Temperatur sind die Verdunstung und dadurch auch der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre und der Niederschlag stark zurückgegangen. So konnten in den ozeanischen Teilen Europas und Nordamerikas Rückgänge um 500 mm, in den kontinentalen Bereichen deutlich geringere Werte um 250–100 mm rekonstruiert werden. In den tropischen Bereichen war der Rückgang mit über 750 mm aber am stärksten. Dies drückt sich in einer drastischen Reduktion des Regenwaldes aus.

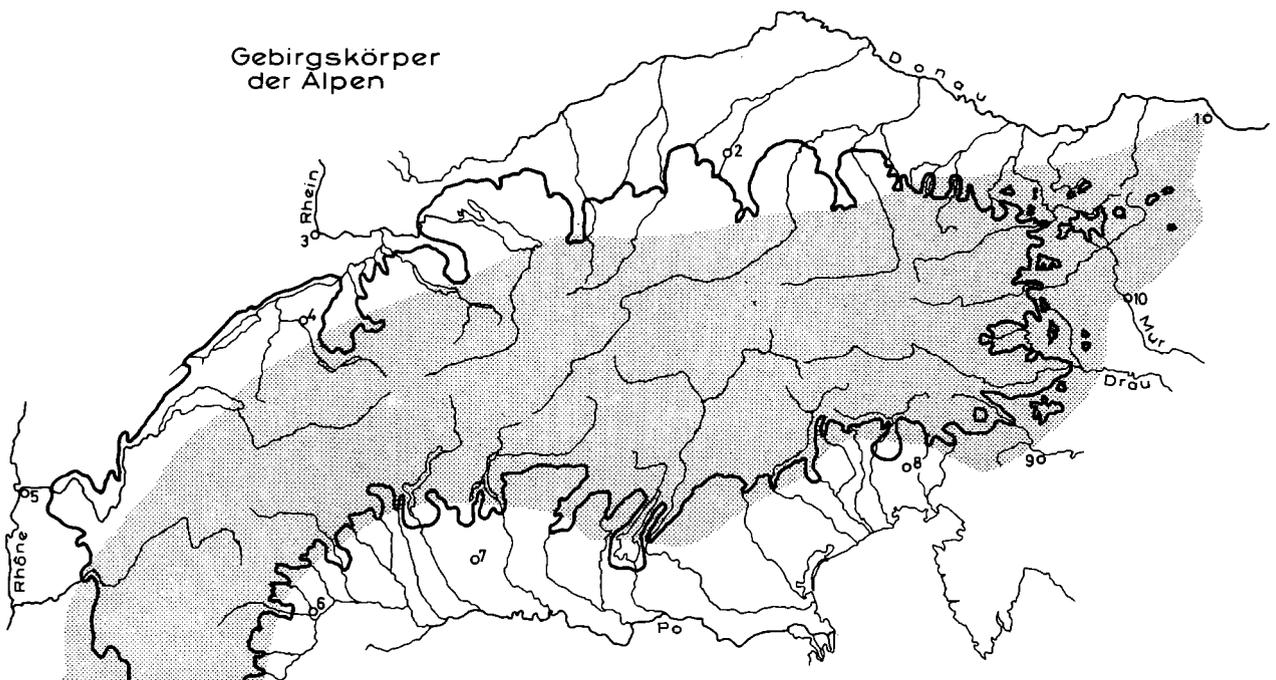


Abb. 3: Skizze der Vergletscherung der Alpen während der letzten Eiszeit (Würm) vor ca. 20 000 Jahren. Dargestellt sind das zusammenhängende Eisstromnetz und die kleineren vergletscherten Gebiete im Osten. 1 Wien, 2 München, 3 Basel, 4 Bern, 5 Lyon, 6 Turin, 7 Mailand, 8 Udine, 9 Laibach, 10 Graz.

Weitere große Eisschilde in Sibirien und Tibet, die postuliert werden, sind aus mehreren Gründen (z. B. fehlender Niederschlag) schwer vorstellbar und werden durch neuere Untersuchungen auch immer unwahrscheinlicher.

Vegetationsverteilung: Durch die Temperaturabnahme kam es nicht nur zu einer Verschiebung und Tieferlegung der Schneegrenzen auf den Kontinenten und in den Gebirgen, sondern auch zur Veränderung der Vegetationsgren-

Die Abnahme der allgemeinen Feuchtigkeit spiegelt sich auch in den gegenüber heute wesentlich ausgedehnteren Wüstengebieten (ca. auf die 3fache Größe) wider.

Flußaktivität: Eine wichtige Auswirkung der Temperaturabnahme und Vegetationsänderung ist am Verhalten der Bäche, Flüsse und Ströme zu rekonstruieren. Wenn diese heute in den gemäßigten Klimazonen das ganze Jahr – wenn auch den Niederschlägen entsprechend

schwankend – wasserführend sind, waren sie dies in den Eiszeiten nur während des Sommerhalbjahres. Wir können dieses Verhalten heute noch an den Flüssen der arktischen Gebiete (z. B. Yukon, Coppermine, Ob, Jenissei, Lena) beobachten. Das führte zu großer Aktivität des Flusses, da während dieser kurzen Periode ja die ganzen – gegenüber heute zwar reduzierten – Jahresniederschläge abfließen. Diese kurzfristig hohe Wasserführung hätte zu Erosion führen müssen. Im Gegenzug war aber durch die fehlende Decke höherer Vegetation (Sträucher, Bäume) an den Talflanken und durch die klimatisch bedingte, sehr verstärkte Frostverwitterung eine sehr hohe Schuttfuhr zu den Bächen und Flüssen gegeben. Diese wurde ja auch noch dadurch stark gefördert, das unter diesen Klimabedingungen weite Teile Europas (bis südlich der Alpen) von Dauerfrostboden bedeckt waren. In diesen Permafrostgebieten tauen nur die obersten Meter auf, wogegen die tieferen das ganze Jahr gefroren bleiben. Diese obere Schicht rutscht leicht ab und führt somit dem Gerinne große Schuttmassen zu, die dann bei hoher Wasserführung abtransportiert und dem nächst größeren zugeführt werden. Dadurch wurden die Wasserläufe dermaßen mit Schluff, Sand und Kies überladen, daß sie dieses Material trotz der hohen Wasserführung nicht mehr abtransportieren, sondern nur noch verteilen konnten. Durch diese Ablagerungen entstanden die Terrassen, die alle Flüsse in den Gebirgen und Hügelländern der mittleren Breiten begleiten.

**Lößbildung:** Ein sehr wesentliches Element der hochglazialen Verhältnisse ist der Löß – windverblasener grober Schluff – der besonders entlang der Flüsse die Hügelländer bedeckt.

Er erstreckt sich von Westeuropa bis an den Pazifik, tritt in Nordamerika südlich des Inlandeises und in Südamerika entlang der Flüsse der Pampa westlich der vergletscherten Anden auf. Seine Verbreitung ist somit an die mittleren Breiten gebunden, wo unter den Permafrostbedingungen auch die Terrassenbildung erfolgte. Die Akkumulationsflächen wurden immer wieder während der Sommerhochwässer überschwemmt und mit frischem Material bedeckt, wodurch sie ausgedehnte, vegetationslose Flächen darstellten. Aus diesen wurde der Staub nach dem Austrocknen ausgeblasen, der dann als Löß in der weiteren Umgebung abgelagert wurde.

**Ozeane:** Neben diesen Änderungen auf den Kontinenten hat es auch im Bereich der Ozeane weitreichende und wichtige Veränderungen gegeben.

Durch die Speicherung der Niederschläge in den Gebirgsgletschern – und besonders in den riesigen Eisschilden – sank der Meeresspiegel um ca. 120 m ab, wodurch weite Teile der Schelfbereiche trocken fielen, so daß die Konturen von Inseln und Kontinenten starken Veränderungen unterworfen waren.

Durch die Abkühlung kam es auch zu einer Verschiebung der Polarfronten beider Hemisphären äquatorwärts mit sehr starker Ausdehnung der Treibeisbildung. So verschob sich die heutige Südfront des Treibeises im Nordatlantik von ca. 78° (Spitzbergen) auf ca. 45° (Golf von Biscaya). Das hat ja die dramatische Änderung von Temperatur- und Niederschlagsmengen in Europa bedingt, da vom Nordatlantik nur mehr wesentlich kältere und trockenere Luft kam (s. o.). Gleichlaufend mit der Eisbedeckung kam auch der Golfstrom weitgehend zum Erliegen, wodurch die Bildung der oben erwähnten Tiefenwässer und deren Zirkulation in die anderen Ozeane unterbrochen war (s. u.).

Die Abnahme der durchschnittlichen Oberflächentemperatur der Ozeane erreichte im Nordatlantik ca. 8–12 °C,

in den anderen Gebieten höherer Breite um die 6 °C und in den Tropen ca. 2 °C. Da die Ausdehnung des tropischen Bereiches in etwa gleich geblieben war, ist die Übergangszone zu den polaren Bereichen, die sich stark ausgedehnt hatten, wesentlich eingeengt worden. Diese Einengung, die ja auch auf den Kontinenten zu beobachten ist, führte zu regional wesentlich stärkeren klimatischen Gegensätzen, da sich so in den mittleren Breiten horizontal ein höherer Temperaturgradient ausgebildet hat.

**Luftzirkulation:** Durch diese höheren Kontraste sind z. B. auch höhere Windgeschwindigkeiten zu erwarten, für die Belege vorhanden sind. So waren die Passatwinde über Nordafrika wesentlich verstärkt, was an der Größe der Partikel und ihrer wesentlich weiter reichenden Verbreitung im Atlantik gegenüber heute zu erkennen ist. Aber auch in den großen Eisschilden Grönlands und der Antarktis findet sich in den Eismassen aus den Perioden größter Kälte eine bis zum 5fachen vermehrte Staubkonzentration, gemessen an den Perioden vorher und nachher. Im Gegensatz dazu war der Monsunrhythmus Asiens weitgehend unterbrochen, da möglicherweise durch Schneebedeckung das Aufheizen der innerasiatischen Landmassen nicht im nötigen Maße stattfand.

**CO<sub>2</sub>, Methan:** Durch die direkten Messungen an Eisbohrkernen wissen wir heute auch über den Gehalt der wichtigsten Treibhausgase, CO<sub>2</sub> und Methan, während der letzten Eiszeit Bescheid. So haben die Werte für Methan um die Hälfte, die für CO<sub>2</sub> um ca. ein Drittel abgenommen. Während der beiden letzten Eiszeiten lag der Wert bei ca. 200 ppm, während im Interglazial dazwischen ca. 300 ppm und im Holozän in der vorindustriellen Zeit 280 ppm erreicht wurden.

(wird fortgesetzt)