



# Vorwort

Die letzte große Eiszeit in Mitteleuropa, die Würmeiszeit, begann vor rund 120 000 Jahren und ist wohl einer der spektakulärsten Abschnitte in der Geschichte unseres Planeten. Zum einen fällt das Auftreten des modernen Menschen in diese Zeit, zum anderen erhielt unsere Landschaft damals ihre heutige Form. Gletscher schürften tiefe Täler und die Becken der Alpenseen aus, Flüsse transportierten riesige Schottermengen ins Flachland. Starke Winde bliesen den Staub aus den urtümlichen Flusstälern aus, lagerten ihn als meterdicke Lössschichten wieder ab und schufen damit die heutigen fruchtbaren Böden des Weinviertels und des Donauraums. Auch die Vorstellung, dass große Teile Europas zeitweise durch über 3 000 Meter mächtiges Eis bedeckt waren, ist zweifellos von einer kühlen Faszination.

In Niederösterreich geben zahlreiche Fundstellen mit teils außergewöhnlichen Objekten Zeugnis von der damaligen Welt. Die Menschen der Eiszeit, die als Jäger und Sammler die Tundren und Kältesteppen des niederösterreichischen Raums durchstreiften, hinterließen vor allem entlang der großen Flusssysteme zahlreiche Spuren. Die Überreste ihrer Jagdbeute wie Mammut, Wollhaarnashorn, Pferd, Rentier, Steppenwisent, Wolf, Vielfraß und Bär erzählen von der Tierwelt, die unter kaltzeitlichen Bedingungen im Donaoraum lebte. Ihre Werkzeuge und die Spuren ihrer Behausungen lassen erahnen, wie der Mensch die damals herrschenden rauen Umweltbedingungen meistern konnte. Trotz widrigster klimatischer Verhältnisse waren diese Menschen in der Lage, heute weltbekannte Kulturdenkmale zu schaffen, wie sie uns mit der als „Fanny vom Galgenberg“ bekannten steinernen Statuette von Stratzing, der Venus von Willendorf und den ältesten Keramikfiguren von Krems-Wachtberg vorliegen.

Vor rund 10 000 Jahren endete die letzte Kaltzeit, womit Europa – zumindest vorerst – aus der Umklammerung des Eises befreit wurde. Wir sollten uns aber der Tatsache bewusst sein, dass dieser grundsätzliche klimatische Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten mit der geologischen Gegenwart nicht aufgehört hat. Auch in der Zukunft ist wieder mit großen Inlandvergletscherungen zu rechnen, selbst wenn kurzfristige Prognosen von einer künftigen Erderwärmung ausgehen.

Nicht nur die in letzter Zeit vermehrt aufflammenden Diskussionen zum Thema Klimawandel und den damit verbundenen zentralen Fragen nach deren Ursachen und Auswirkungen, sondern auch die hohe Medienpräsenz moderner Forschungen zum Neandertaler und zur Problematik des Auftretens des modernen Menschen haben die Eiszeiten nachhaltig ins Bewusstsein einer breiten Öffentlichkeit gerückt. Dieses Buch, das als Begleitinformation zur gleichnamigen Ausstellung im Niederösterreichischen Landesmuseum in St. Pölten erscheint, versucht verschiedene Aspekte dieser vielschichtigen Thematik anzureißen und so spannende Einblicke in diesen faszinierenden Abschnitt der Erdgeschichte zu vermitteln.

St. Pölten, März 2008

*Thomas Einwögerer    Erich Steiner*



## INHALT

- Dirk van Husen  
11 Eiszeiten: Ursachen, Verlauf, Auswirkungen
- Thomas Einwögerer  
23 Die Menschen der letzten Eiszeit
- Michaela Binder  
39 Die Evolution des Menschen
- Martina Pacher  
47 Eiszeitliche Tierwelt
- Ilse Draxler  
55 Die Pflanzenwelt im quartären Eiszeitalter
- Ernst Laueremann  
73 Die wichtigsten Altsteinzeitfundstellen Niederösterreichs im Überblick
- Thomas Einwögerer  
87 Eiszeitliche Steinbockjäger an der Kampmündung
- Martina Hinterwallner  
95 Elfenbein – Geweih – Knochen  
Begehrte Rohmaterialien des altsteinzeitlichen Menschen
- Thomas Einwögerer  
101 Treffpunkt Donauübergang  
Eiszeitliche Großwildjäger am Wachtberg in Krems an der Donau, Niederösterreich
- Christine Neugebauer-Maresch  
109 Menschengestaltige Plastiken der Eiszeit:  
Von der Statuette vom Galgenberg bis zu den „Venusfiguren“
- Walpurga Antl-Weiser  
119 Die Venus von Willendorf
- Christa Frank  
125 Landschnecken-Gemeinschaften als „biologische Thermometer“
- Ulrich Simon  
133 Datierungsmethoden für das Eiszeitalter und die Steinzeit
- Martina Pacher  
137 Höhlen als Faunenarchive
- Mathias Harzhauser  
143 Die Geschichte des Menschen als Produkt von Klimasteuerung:  
Eiszeit findet statt!
- 147 Literaturverzeichnis
- 151 Verzeichnis der Autoren



# Eiszeiten: Ursachen, Verlauf, Auswirkungen

Dirk van Husen

## Einleitung

Unser heutiges Wissen über die Klimasteuerung und -entwicklung der jüngeren Erdgeschichte beruht auf der Untersuchung der Sedimente der Ozeanböden und der Eismassen in der Antarktis und in Grönland. Die technischen sowie logistischen Möglichkeiten der zweiten Hälfte des 20. Jh. eröffneten die Möglichkeit diese Archive geologischer Information durch Bohrungen zu erkunden. So konnten aus den langen Bohrkernen der Tiefseesedimente durchgehende Abfolgen über einige Mio. Jahre erschlossen werden. Sie lieferten wichtige Daten zur Klimaentwicklung und Periodizität der Schwankungen sowie Änderungen der Strömungsverhältnisse in den Ozeanen. Die Eisbohrkerne erlaubten wichtige Daten über die Zusammensetzung der Atmosphäre der letzten 400 000 Jahre zu gewinnen. Auf Grund dieser Daten sind auch die eiszeitlichen Sedimente der Kontinente besser zu verstehen und einzuordnen.

## Klimaverhältnisse heute

Im heutigen interglazialen Zustand wird die auf die Erde einstrahlende Sonnenenergie über markante Luftzirkulationen verteilt, die unsere Klimazonen (tropisch, gemäßigt, arktisch) bestimmen. So haben wir bis ca. 30° nördl. wie südl. Breite die Passatwinde, während in höheren Breiten um 60° markante Westwindgürtel vorherrschen. Die durch diese angetriebenen Meeresströmungen – um den Äquator im Atlantik und Pazifik von Ost nach West, in höheren Breiten dann von West nach Ost (z.B. zirkumantarktischer Strom) –, tragen ebenso zur augenblicklichen Energieverteilung auf der Erde bei. Eine Ausnahme bildet der Nordatlantik mit dem Golfstrom, der bis weit nach Norden große Energiemengen transportiert und uns die warmen, günstigen Klimaverhältnisse

bis weit nach Norden in Skandinavien beschert. Er spielt auch, gemeinsam mit der Landverteilung, die entscheidende Rolle im Wechselspiel der eiszeitlichen Verhältnissen.

## Klimaverhältnisse zur Eiszeit

Durch eine verringerte Sonneneinstrahlung hatten sich in N-Amerika und N-Europa riesige Eisschilde gebildet, die, bis zu 4 000 m dick, ganz N-Amerika bis tief in den Süden (New York) und N-Europa von Berlin-Warschau bis über das Nordkap hinaus auf den Schelfbereich der Barentssee bis zum Franz Josef Land-Novaja Semlja bedeckten (Abb.1). Durch die so verstärkte Temperaturabnahme sank die Schneegrenze von den hohen Breiten bis zu den tropischen Gebieten um mehr als 1000 m ab, wodurch sich in den Gebirgen ebenfalls ausgedehnte Gletscher und Eisströme ausbildeten. Durch die gesamten Eismassen wurde wieder so viel Wasser gebunden, dass der Meeresspiegel um ca. 120 m absank und große Schelfgebiete trocken fielen. Die allgemeine Temperaturabnahme war in allen Teilen der Erde, wenn auch nicht gleich stark, so doch markant. So sank die Jahresdurchschnittstemperatur in mittleren Breiten um 8–10°. Sie lag somit im Raum von NÖ um die 0°, ein Wert, der heute im hohen Norden (z.B. Fairbanks, Alaska oder N-Russland) erreicht wird. Der Golfstrom kam zum Erliegen, da sich im Winter eine Treibeisdecke bis weit nach Süden bildete (Brit. Inseln), wodurch wesentlich kältere und trockenere Luft mit den Westwinden zu uns nach Europa kam.

Ebenso wie die Schneegrenze, wurden auch die Vegetationsgrenzen verschoben. So war Europa nördlich der Alpen bis zum Inlandeis von Tundra bedeckt. Waldvegetation fand sich erst wieder in S-Europa, von wo ja die Wiederbewaldung nach der Eiszeit ausging. Der allgemeine Temperaturrückgang führte weltweit auch zu geringerer

Verdunstung und weniger Niederschlag, was sich besonders im tropischen Regenwald auswirkte, der sehr dezimiert war. Durch den geringeren Niederschlag breiteten sich auch die Wüstengebiete stark aus und in den von Permafrost betroffenen Steppen Europas, Asiens sowie N- und S-Amerikas kam es zu ausgedehnten Lössablagerungen (Abb.1) im Umkreis der Flüsse. Auch der Dauerfrostboden war viel weiter verbreitet. So herrschten in NÖ flächendeckend Permafrostbedingungen wie heute in N-Kanada oder Sibirien.

### Voraussetzung für Eiszeiten

Während der geologischen Entwicklung der Erde hat es immer wieder Perioden mit ausgedehnten Eismassen und solche ohne Eis gegeben. Diese Veränderungen, die auch mit globalen Tempera-

turschwankungen einhergingen, wurden durch die plattentektonische Position der Kontinente bedingt. So lag im Paläozoikum der Kontinent Gondwana im Bereich des Südpols. Es bildete sich eine große Kontinentalvergletscherung (Permo-karbone Eiszeit). Während des Mesozoikums (Trias/Jura/Kreide) hingegen breiteten sich an beiden Polen Meeresflächen aus, und es gab keine Vergletscherungen. Erst wieder im Tertiär wanderte die Antarktis zum Südpol, wodurch erneut große Eismassen gebildet wurden und weltweit eine kräftige Abkühlung eintrat.

Der Grund dafür ist, dass, so lange beide Pole im Ozean liegen, das Temperaturniveau der Erde dergestalt ist, dass max. während des Winters Treibeis gebildet wird, da der dunkle Ozean mehr der eingestrahnten Energie (bis zu 96 %) aufnimmt als er zurückstrahlt. Liegt aber einer der

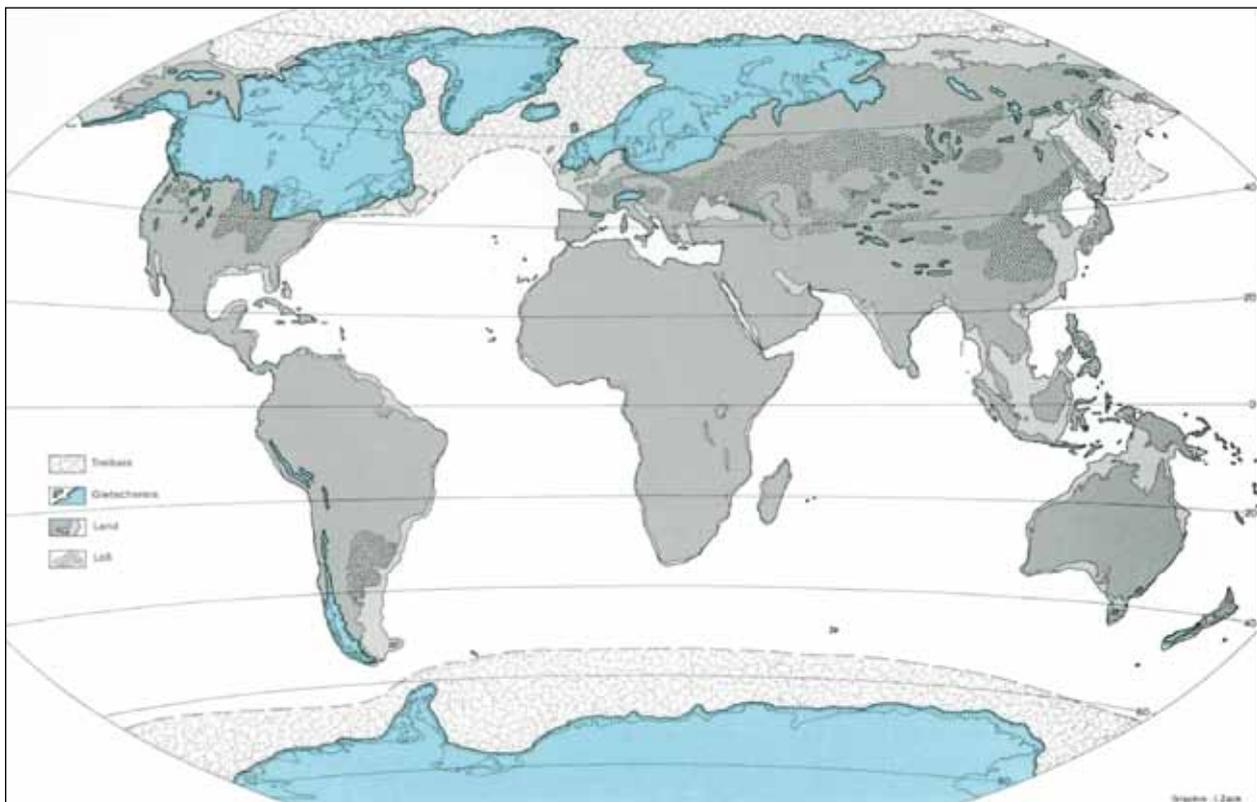


Abb. 1: Karte der Situation vor 20000 Jahren. Neben den ausgedehnten Eisschildern in N-Amerika und N-Europa waren auch die Gebirge stark vergletschert (Alpen, Anden). Das gebundene Wasser ließ den Meeresspiegel um ca. 120 m absinken, wodurch ausgedehnte Schelfgebiete trocken fielen (Ostasien, Nordsee, Sibirien, Beringsee). So konnten sich die Eisschilde weit über die heutigen Küstenlinien (Barentssee, Neufundland) ausbreiten (aus D. van Husen 1987).

Pole auf Land, so ist die Rückstrahlung (Albedo) der Sonnenenergie deutlich höher, woraus sich eine Abkühlung ergibt, die eine vermehrte Schneebedeckung nach sich zieht. Durch diese wird aber wiederum die Albedo stark erhöht (bis auf 90 %) und die Möglichkeit geschaffen, dass der Schnee ganzjährig liegen bleibt und Eis gebildet wird. So kommt es über längere Zeiträume zur Ausbildung einer Eiskappe, die an Mächtigkeit zunimmt und durch die größere Höhenlage auch mehr Eis produziert und sich somit ausdehnt. Dadurch wird schließlich der Kontinent mehr oder weniger von einer Inlandeismasse bedeckt. Die plattentektonische Entwicklung im Tertiär führte aber auch dazu, dass sich die Passage zwischen S-Amerika und der Antarktis öffnete, wodurch sich ein zirkumantarktischer Meeresstrom entwickeln konnte. Durch ihn wird kaltes

Wasser bis in große Meerestiefen bewegt und in die Ozeane im Norden verbracht. Ebenso löste die Schließung der Verbindung Atlantik-Pazifik durch die Entwicklung der Landenge von Panama vor ca. 3–4 Mio. Jahren die Bildung des Golfstroms aus. Durch diese Vorgänge konnten sich die modernen Strömungen in den Ozeanen herausbilden, die die Grundlage für Energietransport und -verteilung darstellen (Abb. 2).

### Periodische Schwankungen der Eiszeiten

Diese Konfiguration und die Temperaturabnahme schufen die Möglichkeit, dass die beschriebenen Schwankungen des Klimas zwischen den heutigen interglazialen und den eiszeitlichen Werten stattfinden können. Eine gute Methode, die Menge des Eises auf der Erde zu bestimmen, bietet das Ver-

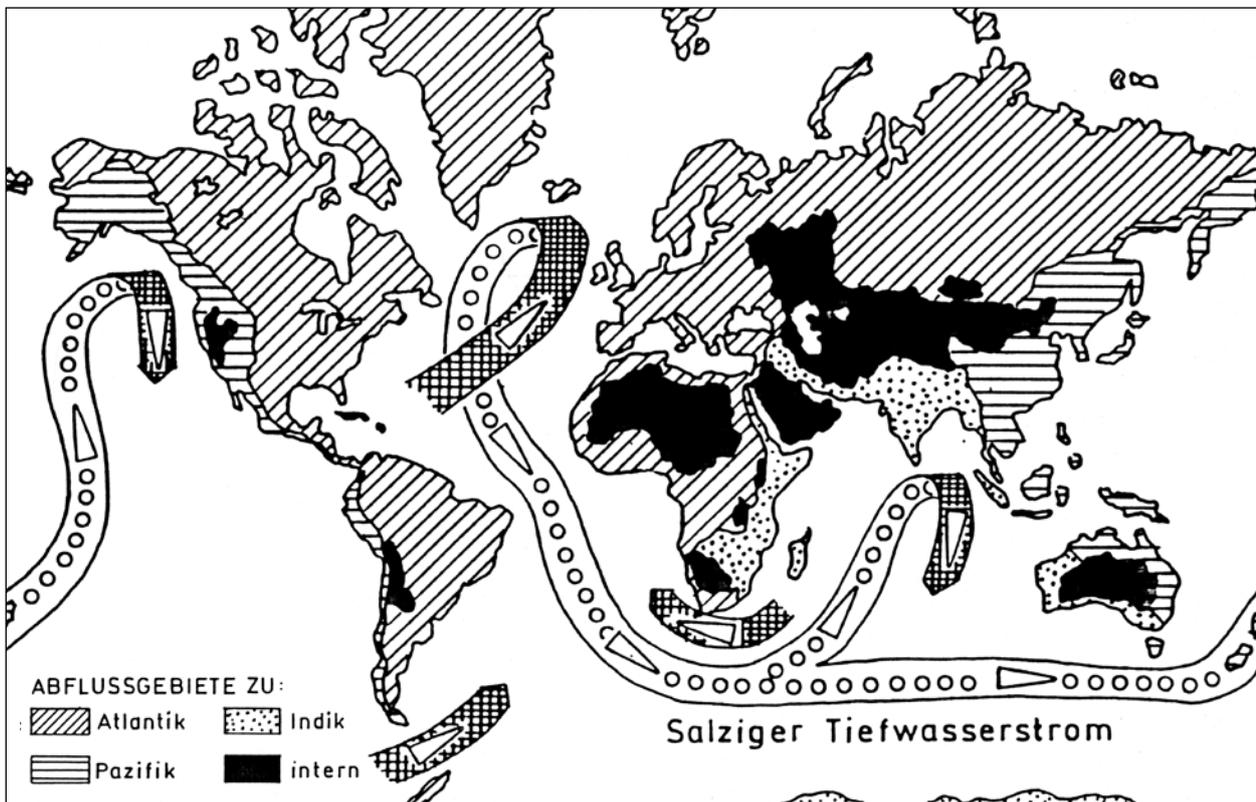


Abb. 2: Die Skizze zeigt die enge Verflechtung des N-Atlantiks und des Golfstroms mit den Landmassen und ihre Abflussverhältnisse. Der Strom der salzreichen Tiefenwässer, die durch das Absinken im N-Atlantik gebildet werden, reicht in die anderen Ozeane, wodurch sein Einfluss auf den Transport der Energie und Nährstoffe erkennbar wird (nach W. S. Broecker & G. H. Denton, Quat. Science Review, 1990, verändert).

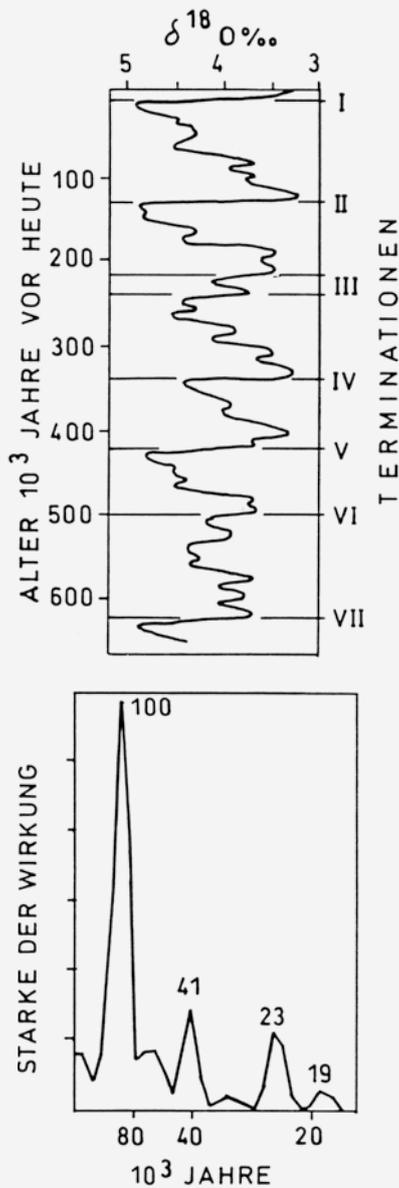


Abb.3: Die Veränderung des Sauerstoffisotopenverhältnisses ( $^{18}O$ ) ist rhythmischen Schwankungen unterworfen, die ein sehr ähnliches Muster aufweisen. Statistische Analysen der Stärke und Periodizität dieser Schwankungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem Verlauf der Änderungen der Stellung der Erde auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne (nach W. S. Broecker & G. H. Denton, Quat. Science Review 1990, verändert).

hältnis der Sauerstoffisotope  $^{18}O$  zu  $^{16}O$  in den Ozeanen. Bei der Verdunstung des Wassers geht das leichtere  $^{16}O$  bevorzugt in die Atmosphäre, wodurch  $^{18}O$  im Ozeanwasser angereichert wird. Der Ausgleich erfolgt wieder durch den Rückfluss der Niederschlagswässer von den Kontinenten (Abb.2). Wenn aber viel dieses Niederschlags im Eis auf den Kontinenten gebunden wird, bleibt diese Anreicherung bestehen, bis die Eismassen wieder abschmelzen. Mikroorganismen im Ozean (Foraminiferen) bauen in ihre Kalkschalen die Sauerstoffisotope aus dem Wasser ein, wodurch das augenblickliche Verhältnis beim Absterben des Organismus erhalten bleibt. Die Schalen werden im Schlamm am Meeresboden eingebettet, so dass die Änderung des Isotopenverhältnisses rekonstruiert werden kann. So kann dieses in den Bohrkernen kontinuierlich analysiert werden und damit auf die Eismenge und folglich auf den Klimaverlauf rückgeschlossen werden. Bei der Analyse vieler langer Bohrkerne, die die Sedimente der letzten 1–2 Mio. Jahre umfassen, zeigt ein typisches Muster die Schwankungen zwischen den heutigen (Interglazial) und den eiszeitlichen (Glazial) Eisverhältnissen an. Dabei erfolgte der Eisaufbau langsam, während der Abbau in kurzer Zeit (Termination) vonstatten ging (Abb. 3). Dieses Muster ist in allen Bohrkernen aus allen Ozeanen der Erde gleich. Die zeitliche Einordnung erfolgt über die Sedimentationsrate, die mit anderen Methoden bestimmt wird. Die statistische Auswertung der Ergebnisse dieser Vielzahl an Kurven ergab eine Periodizität der stärksten Schwankung (Glazial-Interglazial) von 100 000 Jahren, gefolgt von einer in 41 000, 23 000 und 19 000 Jahren (Abb. 3). Es sind dies die Periodizitäten der Exzentrizität, Ekliptik und Präzession der Erde in ihrem Umlauf um die Sonne. Dadurch ändert sich die eingestrahlte Energie je m<sup>2</sup> mit der Zeit und der geographischen Breite. Dabei bewirkt das Wandern der Äquinoktialpunkte eine Änderung der Einstrahlung abhängig von der geographischen Breite (besonders 0–60°) und der Jahreszeit (Winter oder Sommer). Die Variation der Ekliptik hingegen bewirkt verstärkte Schwankungen in den Breiten über 65°.

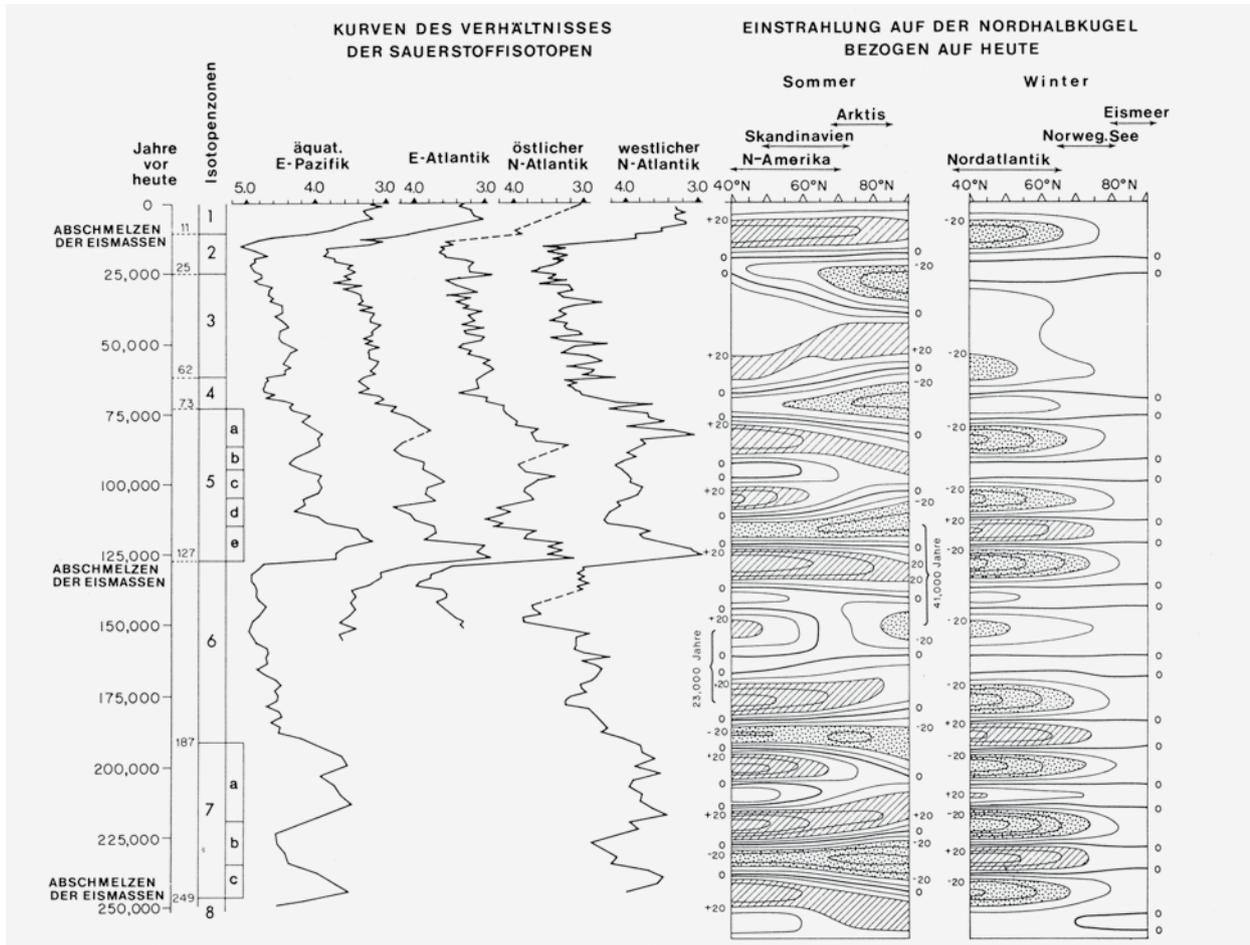


Abb. 4: Vergleich von Einstrahlungswerten und Isotopenkurven nach W. F. Ruddiman & A. McIntyre (Science, 212, verändert). Die Isotopenkurven zeigen die Veränderung des  $^{16}\text{O}:^{18}\text{O}$ -Verhältnisses (wobei die höheren Werte auf den Skalen höhere  $^{18}\text{O}$ -Werte im Meerwasser bedeuten) in den Ozeanen in ihrer zeitlichen Entwicklung während der letzten 250 000 Jahre. Der Vergleich mit den berechneten Werten der eingestrahelten Energie auf der N-Halbkugel (es wurde der Unterschied zum heutigen Wert in  $\text{Cal}/\text{cm}^2/\text{Tag}$  dargestellt) zeigt die Abhängigkeit von den Erdbahnelementen. Dabei sind beim Eisaufbau die Präzession (Periode ca. 23 000 Jahre) mehr in süd. Breiten, die Ekliptik (Periode 41 000 Jahre) in höheren wirksam. Die Exzentrizität (Periode ca. 100 000 Jahre) ist für den Eisabbau verantwortlich.

Wie sich diese Änderungen der Einstrahlung wieder auf die Oberflächentemperatur der Erde auswirken, hängt von der Verteilung von Land und Meer ab. Die Ozeane unterdrücken durch das hohe Energiespeichervermögen des Wassers die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen (die spezifische Wärmekapazität des Wassers ist 5x so hoch wie die von Gestein). Dadurch ist klar, dass diese Mechanismen auf der N-Halbkugel um den N-Atlantik mit dem Golfstrom am wirksamsten sind (Abb.2). Hier sind die großen Eismassen auf-

und abgebaut worden, wobei vielfältige Rückkopplungseffekte wirksam wurden (Abb. 1).

### Eisaufbau

Der Eisaufbau in N-Amerika und N-Europa fällt mit einer geringeren Sonneneinstrahlung im Sommer und einer vermehrten im Winter zusammen (Abb.4). Dadurch kann Schnee vermehrt liegen bleiben und in höheren Lagen Gletschereis gebildet werden. Durch die Rückstrahlung der hellen



Abb. 5: Grobes Gletschereis am Hardanger Gletscher, Norwegen. Die einzelnen Kristalle haben einen Durchmesser von 2–4 cm.

Flächen wird dieser Effekt noch verstärkt. Parallel dazu bleibt aber der Ozean warm und ist dadurch besonders im Winter als Feuchtigkeitsspende wirksam, da ja durch die Verdunstung der Salzgehalt im Oberflächenwasser steigt und so die Eisbildung hintangehalten wird. Zusätzlich verstärkt wird der Feuchtigkeitstransport dadurch, dass die Tiefdruckgebiete an der Grenze zwischen warmem Ozean und kaltem Kontinent bis weit nach N wandern und dort besonders wirksam Schnee abgelagert und Gletschereis gebildet wird.

### Bildung von Gletschereis

Gletschereis entsteht überall dort, wo über viele Jahre gemittelt mehr Schnee fällt als wieder abschmilzt. Der frisch gefallene Schnee unterliegt bald Veränderungen, die hauptsächlich durch

Reaktionen der Kristalle auftreten. So bildet sich körniger Firn. Mit der steigenden Überlagerung mit neuem Schnee nimmt die Lagerungsdichte so weit zu, dass ein Gewicht von  $550 \text{ kg/m}^3$  erreicht wird. Bei diesem Prozess spielen Sublimation und Sinterung (in Gebieten mit Jahresdurchschnittstemperaturen deutlich unter dem Gefrierpunkt) sowie Schmelz- und Regelationsvorgänge (in Gebieten wo Schnee und Firn nahe dem Gefrierpunkt sind) an den Rändern der Kristalle die entscheidende Rolle, die auch zum Zusammenwachsen und zur Vergrößerung der Körner führt. Die Entwicklung bei weiter steigendem Überlagerungsdruck ist dann aber von Rekristallisation bestimmt und führt zu körnigem Eis (Abb. 5). Gletschereis ist dann gebildet, wenn der Porenraum zwischen den Kristallen nicht mehr zusammenhängend ist und nur noch aus einzelnen geschlossenen Poren besteht. Das ist bei einem Gewicht von  $830 \text{ kg/m}^3$  erreicht. In diesen Poren ist die Luft in der Zusammensetzung zur Zeit der Bildung des Gletschereises gefangen. Das eröffnet uns heute die Möglichkeit, die Zusammensetzung der Atmosphäre (z.B.  $\text{CO}_2$ -Gehalt) von lange zurückliegenden Zeiträumen (Abb. 6) an Eisbohrkernen aus der Antarktis und Grönland zu analysieren.

### Eisabbau

Wenn sich die Einstrahlungsverhältnisse umkehren, werden ebenso wie beim Eisaufbau Rückkopplungseffekte wirksam. Es kommt zu starken Schmelzvorgängen, wodurch dem Ozean viel leichteres Süßwasser zugeführt wird, das sich auf dem schwereren Salzwasser ausbreitet. Dadurch friert der Atlantik bis weit nach Süden im Winter leichter zu (verminderte Einstrahlung). Die Zugbahnen der Tiefdruckgebiete werden auch nach Süden abgedrängt und die Eisschilde bekommen viel weniger Niederschläge. Durch das Abschmelzen des Eises steigt aber auch der Meeresspiegel wieder, wodurch die Schelfgebiete überflutet und die dort liegenden Ränder der Inlandeismassen zum Kalben gezwungen werden. Die dabei entstehenden Eisberge führen dem Ozean weiteres Süßwasser zu. Die Durchmischung wird zusätzlich

insofern behindert, als durch die Eisberge und Eisschollen der Angriff der Stürme stark gedämpft wird, wodurch das leichtere Frieren länger aufrechterhalten wird. Diese hier kurz umrissenen Rückkoppelungseffekte in beide Richtungen werden durch die orbitalen Gegebenheiten in Gang gesetzt und jeweils einige Zeit aufrecht erhalten. Dass diese Effekte in ihrer Stärke nicht immer gleich ablaufen (Abb. 3), liegt daran, dass die drei Zyklen in ihrer ungleichen Länge sich verschieden überlagern, sich einmal in ihrer Wirkung unterstützen, dann wieder dämpfen.

## Die Rolle des Ozeans

Der Einfluss dieser Rückkoppelungseffekte wäre ohne die Meeresströmungen – und besonders den Golfstrom – nicht so wirksam. Er transportiert einerseits Feuchtigkeit in die hohen Breiten von N-Amerika und N-Europa, die nötig ist, um die Eisschilde aufzubauen. Andererseits ist bekannt,

dass er zu Zeiten großer Vergletscherungen und Treibeisbedeckung des N-Atlantiks zum Erliegen kommt. Die Folge der starken Verdunstung aus den warmen Wässern des Golfstroms im N-Atlantik ist unser günstiges Klima in Europa – gemessen an dem anderer Landmassen in gleicher geographischer Breite. Zugleich sinkt das mit Salz angereicherte Wasser ab und fließt als salzhaltiger Tiefenstrom im Atlantik und den anderen Ozeanen ab (Abb. 2). Die Meeresströmungen sind auch für die Verteilung der Nährstoffe (Nitrat, Phosphat) verantwortlich, die hauptsächlich durch die Tiefenwässer transportiert werden. Kommt es in diesem System zu Veränderungen, so wird die Produktivität des Ozeans regional stark beeinflusst. Bei hohem Nährstoffangebot wird von den Mikroorganismen viel Kalk für den Schalenbau gebildet, wodurch der  $\text{CO}_2$ -Gehalt erst im Wasser und dann recht rasch als Folge in der Atmosphäre vermindert wird. Somit wird durch die Veränderung der Strömungen der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre beeinflusst. Dieser kann über die letzten 400 000 Jahre direkt am Eis der Antarktis gemessen werden, wodurch Aussagen über die gesamte Atmosphäre möglich sind. Beim Vergleich dieser Daten (Abb. 6) mit Temperaturwerten ist das gleiche Muster, aber keine absolute Deckung zu beobachten, was an regionalen Verschiedenheiten liegen dürfte und doch auf komplexere Zusammenhänge der Parameter hinweist. Die grundsätzliche Ursache für die Glaziale und Interglaziale sowie die Schwankungen zwischen wärmeren und kälteren Phasen ist somit hauptsächlich auf die oben kurz umrissenen Mechanismen als Motor zurückzuführen. Dabei spielen aber sicher noch andere Komponenten (Staub und der für die Vergangenheit leider nicht erfassbare Wasserdampfgehalt der Atmosphäre) eine wichtige Rolle.

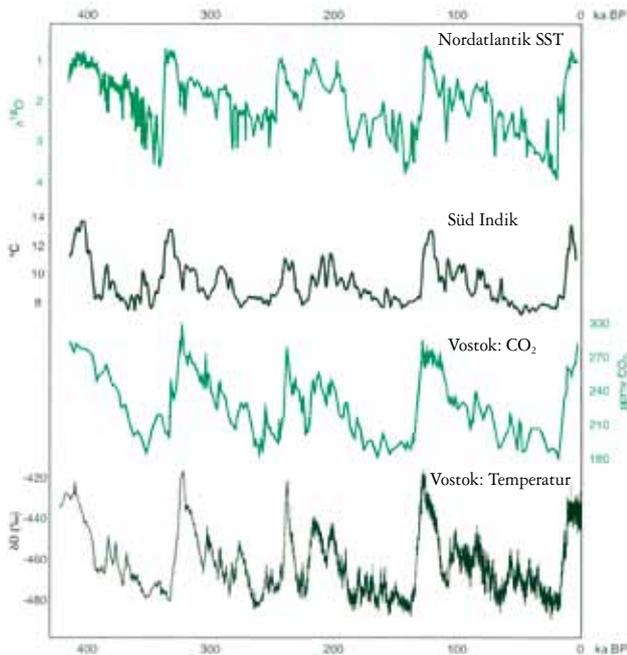


Abb. 6: Vergleich des im Gletschereis der Antarktis (Station Vostok) gemessenen  $\text{CO}_2$ -Gehalts von 4 Glazialzyklen mit Temperaturdaten, die durch das Verhältnis von Wasserstoffisotopen ( $\delta\text{D}$ ) und Meeresoberflächentemperaturen (SST) gegeben sind, bestimmt anhand von Foraminiferenschalen aus Sedimenten des N-Atlantiks und des südl. Indischen Ozeans (nach Labeyrie et al. 2003, verändert).

## Verlauf des letzten Interglazial-Glazial-Zyklus

Der Klimaverlauf, ausgedrückt durch die Eismenge auf der Erde, zeigt bei unterschiedlicher Amplitude doch einen recht ähnlichen Ablauf innerhalb der einzelnen Exzentrizitätszyklen

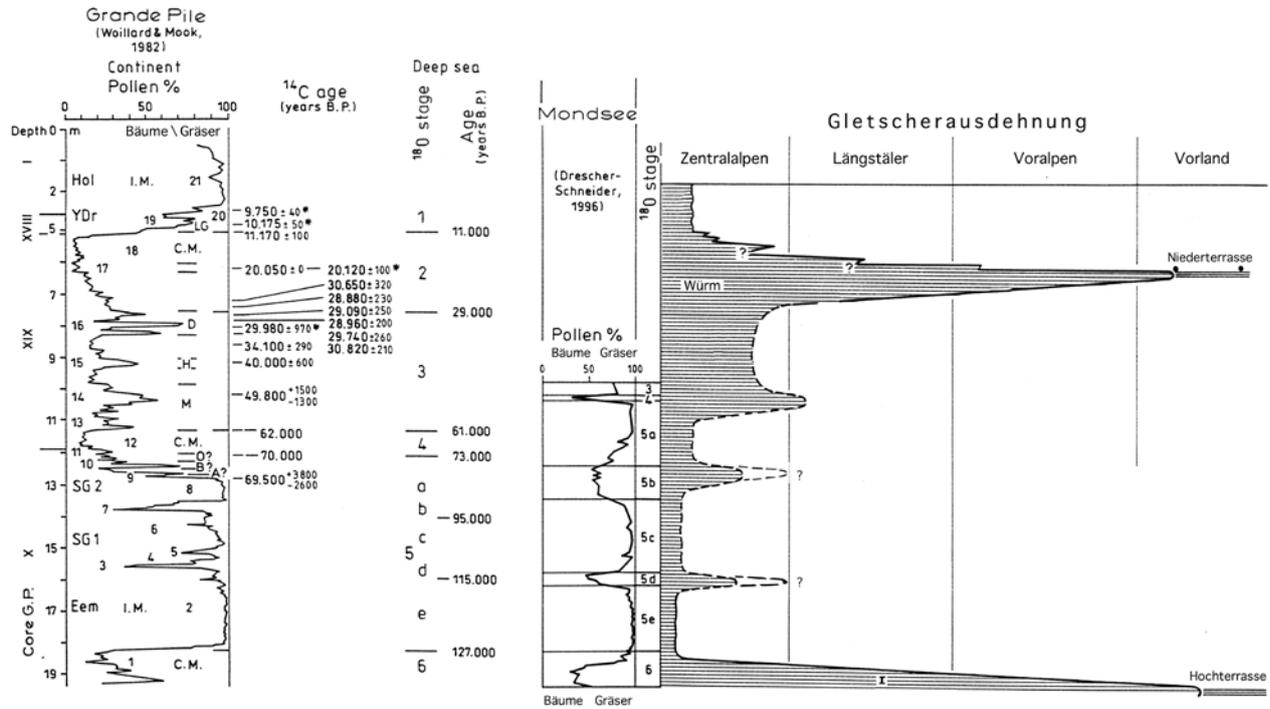


Abb. 7: Vegetations- und Gletscherentwicklung in den Ostalpen. Die zeitliche Entwicklung der Eisströme in den Ostalpen im Vergleich mit dem Pollenprofil aus älteren Seesedimenten im Ort Mondsee und dem gut datierten Profil Grande Pile (Vogesen) aus einer mächtigen Moorbildung. Die Verteilung von Baum- und Gräserpollen zeigt das Verhältnis von Wald- und offener Vegetation als Ausdruck der Klimaverhältnisse an (aus D. van Husen 2000, verändert).

(Abb. 3). So kommt es nach einem Interglazial zu Klimaeinbrüchen und Erholungsphasen, die letztlich zum anderen extremen Ausschlag des Glazials führen, wo die Eisbedeckung ihren Höhepunkt erreicht. Danach schlägt das Pendel sehr rasch wieder zum ersten Extrem aus, was durch rapides Abschmelzen der gesamten Eismassen (Termination) in kurzer Zeit charakterisiert ist. Sehr deutlich ist das für den Zeitraum der beiden letzten Eiszeiten zu rekonstruieren, da wir hier Beobachtungen aus verschiedenen Archiven haben (Abb. 7). Dieses Muster ist an der Vegetationsentwicklung in Mooren (z.B. Grande Pile in den Vogesen) sowie in Seesedimenten (z.B. Mondsee) ablesbar. Hier ist zu erkennen, dass die kurzen starken Klimaverschlechterungen am Beginn des Zyklusses massive Veränderungen der Vegetation verursachten. So ist die Baumgrenze bis deutlich unter 1000 m abgesunken, so dass nur noch die tieferen

Hanglagen in den Voralpen mit Wald bedeckt waren, bevor sich wieder bessere Verhältnisse einstellten und die Vegetation sich erholen konnte. In diesem Abschnitt hat sich noch keine wesentliche Vergletscherung in den Alpen aufgebaut, die über die Zentralalpen hinausgegangen wäre. Erst die endgültige Klimaverschlechterung führte zur Vergletscherung der alpinen Täler und zur Ausbildung eines Eisstromnetzes, das dann nur kurze Zeit existierte.

### Das Bild Niederösterreichs zur Eiszeit

In den Ostalpen nimmt nicht nur die Niederschlagsmenge von West nach Ost stetig ab, sondern auch die Höhe der Berge. So erreichen östlich des Gesäuses nur noch wenige einzelne Gipfel (Hochkar, Ötscher, Gemeindealpe) oder kleinere Plateaus (Dürrenstein, Rax, Schneeberg) größere



Abb. 8: Generelle Darstellung des Donautals und des südl. Niederösterreich zum Höhepunkt der letzten Eiszeit vor ca. 20000 Jahren. 1: Vegetationsarme Sedimentationsflächen und damalige Flussläufe (generalisiert), Niederterrasse. 2: Firn und eisbedeckte Käme über der Schneegrenze. 3: Lokalgletscher und Talgletscher. 4: Nicht vergletscherte Bereiche, Tundra. In tieferen Lagen entlang größerer Gerinne Lössbildung (aus D. van Husen 2000).

Höhen. Aus diesen Gründen entstehen in den Eiszeiten im Bereich von NÖ nur Einzelgletscher, aber kein Eisstromnetz wie im Ennstal und westlich davon (Abb. 8). So erreichen die Gletscher vom Hochkar und Dürrenstein noch das Ybbstal, die von Rax und Schneeberg noch die Talböden bei Puchberg und im Höllental. Lunzer und Erlauf See sind schöne Beispiele von Zungenbeckenseen der letzten Eiszeit. Sonst waren die Gipfel, die deutlich über 1000 bis über 1100 m aufragen, nur mit kleinen Gletschern und Eisfeldern bedeckt. Der östlichste Gletscher befand sich auf der N-Seite des Wechsels. Aus dem Waldviertel sind keinerlei Gletscherspuren bekannt.

Eine wesentlich stärkere Auswirkung hatte die Klimaverschlechterung aber auf die Flüsse. Durch die fehlende Bedeckung mit Sträuchern und Bäumen und die starke Frostverwitterung ist viel Schutt entstanden, der über die Bäche den Flüssen

zugeführt wurde. Diese konnten die Schuttmassen nicht abtransportieren, wodurch große Schotterkörper akkumuliert wurden, die heute die Terrassenkörper der verschiedenen Eiszeiten entlang der Flüsse bilden. Während der Akkumulation stellen sich die Täler als breite, vegetationslose Schotterebenen dar, auf denen die Flüsse, vielfach verzweigt, abfließen (Abb. 9 und 10). Am deutlichsten ausgeprägt war das entlang von Enns, Ybbs, Erlauf, Traisen und im südl. Wiener Becken (Abb. 8). Bis 10 km breite Flächen waren entlang der Donau (Machland, Tullner- und Marchfeld) entwickelt. Aus diesen Ebenen wurden zwischen den Überflutungen, wenn die Schotterflächen abgetrocknet waren, die frisch sedimentierten Feinteile ausgeblasen und auf den umgebenden Hängen und Flächen abgelagert. Hier wurde der Staub auf die Tundravegetation (Zwergbüsche und Gras) als Löss abgelagert (Abb. 11). Er bildete

schon damals die fruchtbare Basis für die Vegetation und somit die Nahrungsgrundlage z.B. für die Mammutherden. Der Löss wurde zu jeder ausgeprägten Kaltphase, hauptsächlich aber zu den Eiszeiten gebildet, wie das an vielen Plätzen an den Lössprofilen zu erkennen ist (Abb. 11).

Um die letzte Eiszeit folgte den Tieren der Mensch, der schon damals klimatische Gunstlagen zu schätzen wusste, wie z.B. die Wachau. Hier befanden sich offensichtlich die geschützteren, wärmeren Lagerplätze – im Gegensatz zu der dem

Wind ausgesetzten Kältesteppe im Waldviertel und Alpenvorland –, wie ja die reichen archäologischen Funde belegen (z.B. Venus/Willendorf, Fanny/Stratzing).

Wenn von Eiszeiten die Rede ist, so sind damit die extremen Klimaverhältnisse gemeint, die auf der Erde das letzte Mal vor ca. 20 000 Jahren geherrscht haben. Sie stellen das eine Extrem des Klimas dar – unser heutiges warmes Klima hingegen das andere –, unter dem die Entwicklung des modernen Menschen stattfand.



Abb. 9: Das Bild zeigt einen stark verzweigten Strom (Casement R. Glacier Bay Alaska) als ein typisches Erscheinungsbild der sedimentierenden Flüsse während der Eiszeiten.



Abb. 10: Vegetationslose Sedimentationsebene eingebettet in eine höhere Terrasse als Modell für unsere eiszeitlichen Flüsse. Aus derartigen Ebenen wurde der Löss ausgeblasen.



Abb.11: Löss bei Furth/Göttweig am Südrand der Donauebene. Unter der mächtigen Lössdecke der letzten Eiszeit ist deutlich der Verwitterungshorizont (Leimenzone) eines Interglazials über älterem Löss zu erkennen.