

akzent

Joachim Marcinek

Droht eine nächste Kaltzeit?



Joachim Marcinek

Droht eine nächste Kaltzeit?

Urania-Verlag Leipzig Jena Berlin

Autor: Doz. Dr. Joachim Marcinek,
Humboldt-Universität zu Berlin
Grafiken: Hasso Seyferth, Leipzig

1. Auflage 1982

1.-20. Tausend. Alle Rechte vorbehalten

© Urania-Verlag Leipzig/Jena/Berlin

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur, 1982

VLN 212-475/39/82 LSV 1469 D 131/81

Lektor: Ingelore Naukkarinen

Einbandreihenentwurf: Helmut Selle

Typographie: Julia Strube

Printed in the German Democratic Republic

Satz, Reproduktion und buchbinderische Weiterverarbeitung:

INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb Leipzig – III/18/97

Druck: Druckhaus Karl-Marx-Stadt – III/6/15

Best.-Nr. 6537479

DDR 4,50 M

Fotos: ADN-ZB/Göldner (10), (91); ADN-ZB/Linke (80); ADN-ZB/Neugebauer (17); ADN-ZB/Runge (21); ADN-ZB/Sturm (109), (125); G. Ginzler, Liberec (20); Prof. Dr. R. Hohl, Halle (31), (47), (70); Dr. J. Marcinek, Berlin (28), (53 unten), (60), (65), (72), (77), (119 beide), (123); Dr. H. Rast, Leipzig (14), (34), (44), (53 oben); Dr. M. Reichstein, Halle (102); W. Starke, Dresden (50), (98), (105); H. Täubert, Gotha (Einband), (87), (95); G. u. G. Teuscher, Dresden (15), (23), (112)

Inhalt

Ein klarer Sommertag vor 20 000 Jahren? 7

Leben wir in einem Eiszeitalter? 9

Schlammströme, Rollsteine oder Eisschollentransport? 13

Schlammströme oder Rollsteine 14

Eisschollentransport 16

»Eine Reihe höchst merkwürdiger Tatsachen über den Gang der Gletscher« 19

Anfänge der Gletschertheorie 22

Versuche und Fehlschläge 25

Wilhelm Meisters Bergfest 27

Eine neue Theorie setzt sich durch 30

Nicht nur *eine* Eiszeit 33

Ein Wechsel von Kalt- und Warmzeiten? 33

Inlandeis und Gletscher in früheren Kaltzeiten 37

Ältere Eiszeitalter? 40

Nord- und Südhalbkugel abwechselnd vergletschert? 44

Droht eine neue Kaltzeit? 46

Begriffe und Begriffe 46

Ist eine weitere Kaltzeit möglich? 49

Hat die nächste Kaltzeit schon begonnen? 52

Warum kommt das Gletschereis? 57

Was uns Lößserien berichten 61

Die »Gletschereischronik« von Camp Century 67

Hypothesen über Hypothesen 71

Zusammenspiel vieler Faktoren – endlich die Lösung? 100

Was wäre, wenn ... 107

... es wärmer wird 107

... es kälter wird 114

Der warmzeitliche Zustand 122

Auftrag für die Wissenschaft 124

Literaturverzeichnis 127

Ein klarer Sommertag vor 20 000 Jahren

Lieber Leser, bitte schließen Sie die Augen und drehen Sie für einen Augenblick die »Zeitmaschine« zurück. Stellen Sie sich vor, Sie stehen vor 20 000 Jahren an einem klaren Sommertag auf einer Höhe des kahlen Harznordrandes, der sich wie der Harz, ja, das gesamte überschaubare Land, ohne Wald, ohne jeglichen Baumwuchs im Sonnenlicht ausbreitet, und blicken nach Nordosten. Erst in über hundert Kilometer Entfernung ändert sich das Bild. Ihr Blick wird von einer ansteigenden, sich endlos hinziehenden, hellen Fläche gefesselt – dem Inlandeis. Überblickbar von Ihrem Standort ist lediglich ein Ausschnitt des riesigen nordeuropäischen Inlandeiskörpers.

Vor rund 20 000 Jahren begrub das nordeuropäische Inlandeis ein Areal von über 3,5 Mio km² unter sich. Sein Zentrum lag im Bereich des jetzigen Bottnischen Meerbusens, wobei das Gletschereis nach heutigen Berechnungen in seinen Zentralpartien auf rund 2 500 m angewachsen war.

Und nun im Zeitraffer zurück: Geht der Blick heute vom gleichen Aussichtspunkt in diese Richtung, so wird er von der leicht bewegten ackerreichen Landschaft nördlich des Harzes, von waldbekränzten Höhen, kleinen Dörfern und den Türmen der Stadt Quedlinburg gefangen. Bei klarem Wetter und weiter Sicht lassen sich jenseits des fruchtbaren Lößlandes die walddreieheren Landschaften des Flämings und der Umgebung von Brandenburg und Potsdam erahnen.

Der heutige Ausblick zeigt über diese große Entfernung nichts, was auf eine Ausbreitung des Inlandeises vor 20 000 Jahren bis in die Gegend östlich von Genthin, südlich

von Brandenburg und südwestlich von Potsdam, insgesamt bis in das Gebiet nördlich des Fläming und östlich der Elbe, hindeutet. War das vor 20 000 Jahren Erblickte Vision oder Wirklichkeit? Gewöhnlich provozieren kühle und verregnete Sommer oder extrem kalte, frost- und schnee-reiche Winter Fragen, wie: »Gab es tatsächlich eine Eiszeit oder gar mehrere?« – »Kann es wieder eine Eiszeit geben, und steuern wir vielleicht mit Macht auf sie zu?« – »Was sind Ursachen von Eiszeiten, und wie lassen sich Eiszeiten überhaupt nachweisen?«

In Zeitschriften und Zeitungen erschienen in den vergangenen Jahren – meist im Nachhinein von Wetterkapriolen – Artikel mit Überschriften, wie: »Wir leben in einer Eiszeit« – »Die nächste Eiszeit hat bereits begonnen« – »Klimaexperten mit widersprüchlichen Ansichten und Prognosen«.

Mögen diese Fragen mehr oder minder spektakulär gestellt sein. Wir, die wir auf der Erde leben, sind von Witterung und Klima abhängig, die wiederum z. B. die Vegetation, die Böden, den Anbau von Nutzpflanzen bis hin zu Ernteerträgen als Grundlage unserer Ernährung beeinflussen. Deshalb dürfte die Erörterung von Fragen: »Wie wurden Eiszeit, Eiszeitalter und der Wechsel von Kalt- und Warmzeiten im gegenwärtigen Eiszeitalter nachgewiesen?« – »Gab es weitere Eiszeitalter im Lauf der Erdgeschichte?« – »Droht eine neue Kaltzeit?« und »Welche möglichen Ursachen liegen dem Entstehen von Eiszeitaltern und dem Wechsel von Kalt- und Warmzeiten in unserem Eiszeitalter zugrunde?« – in diesem Taschenbuch einmal aus geologisch-geographischer Sicht auf Grundlage neuerer und neuester Forschungsergebnisse, ohne jedoch schon immer und überall eine erschöpfende Antwort parat zu haben – für uns von Interesse sein.

Leben wir in einem Eiszeitalter?

Aus dem Blickwinkel eines Mitteleuropäers ist die gegenwärtige Vergletscherung der Erde stark an den Rand des Bewußtseins gedrängt. Wir wissen aber aus Forschungen, daß das Erdmittelalter (Mesozoikum) wahrscheinlich gänzlich gletscherfrei war und die weitgehend vergletscherungsfreie Zeit in der Erdneuzeit (Känozoikum) bis weit in das Tertiär reichte. Auf der anderen Seite steht eine nicht unbeträchtliche Vergletscherung in der Gegenwart. Man kann also durchaus davon sprechen, daß sich unsere Erde jetzt in einem Eiszeitalter befindet.

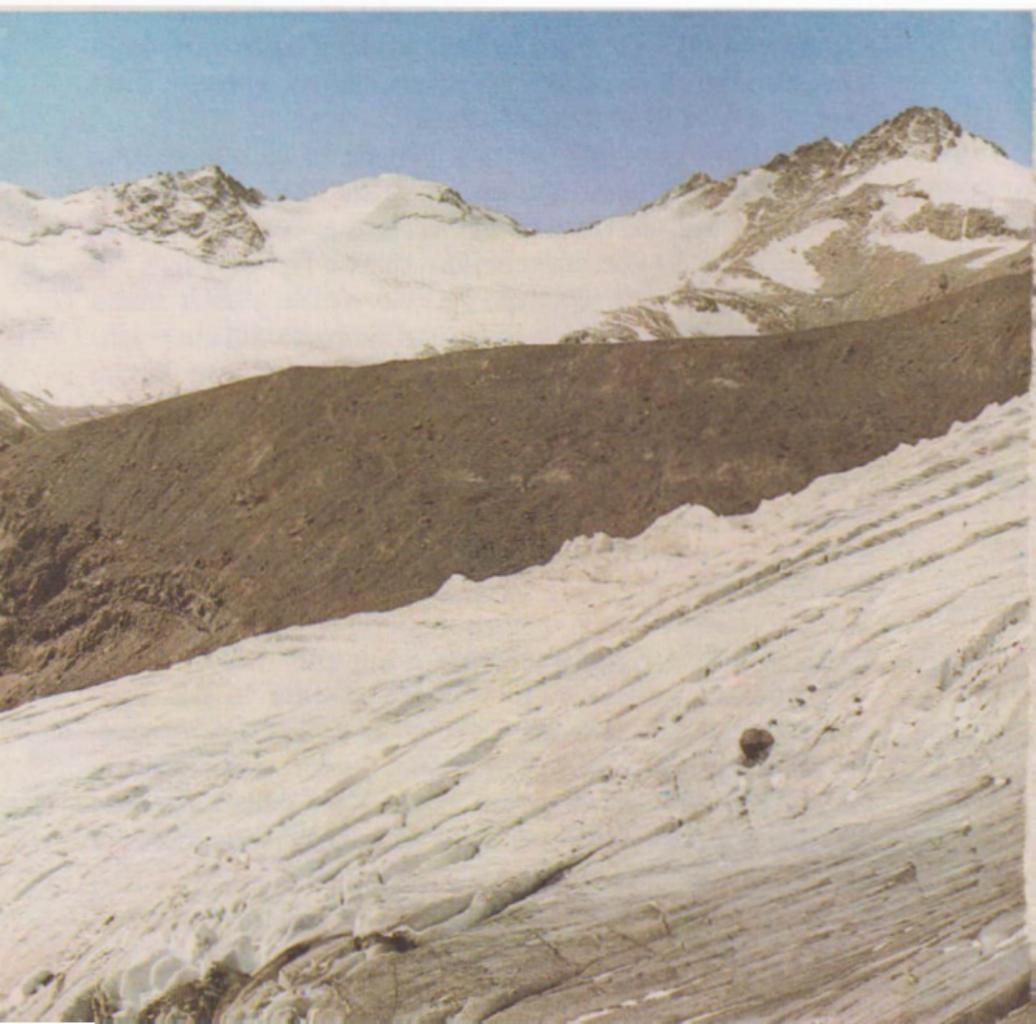
Da Tertiär und Quartär als jüngste erdgeschichtliche Perioden zur Erdneuzeit, zum Känozoikum, zusammengefaßt werden, der Beginn der erneuten Vergletscherung auf der Erde in das ausgehende Tertiär fiel und sich die ältere Epoche der Quartär-Periode sicher durch einen mehrfachen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten auszeichnete, ist es durchaus berechtigt, entweder von einem quartären Eiszeitalter oder – in Anlehnung an die permokarbone Vergletscherungszeit, die als jungpaläozoische Vergletscherung oder als jungpaläozoisches Eiszeitalter bezeichnet wird – von einem jungkänozoischen Eiszeitalter zu sprechen. Diese Bezeichnung schließt gleichzeitig den Beginn der erneuten Vergletscherung im ausgehenden Tertiär – nach einem langen Abschnitt einer gletscherfreien Zeit in der Erdgeschichte – mit ein.

Würde als Kriterium für ein Eiszeitalter in der Erdgeschichte der Nachweis einer großflächigeren Vergletscherung auf dem Erdball genügen, müßte man eindeutig feststellen, daß wir in einem Eiszeitalter leben. Als Eiszeitalter im engeren Sinne ließe sich dann – eingeordnet

in die Geschichte der Erde – das Pleistozän, der längere, ältere und durch den Wechsel von Kalt- und Warmzeiten gekennzeichnete Abschnitt des Quartärs, ansehen. Der kürzere und jüngere, bisher etwa 10 000 Jahre dauernde Abschnitt des Quartärs wird Holozän (holos, griech. = ganz; kainos, griech. = neu: das ganz Neue) genannt und umfaßt den Zeitraum von der jüngsten Kaltzeit bis zur Gegenwart.

Allein aus dem Vorkommen von Inlandeis, Gletschern, Dauerfrostboden und Meereis kann die Tatsache abgeleitet werden, daß wir in einem Eiszeitalter leben.

Höchster Berg des Großen Kaukasus ist der Elbrus (5 633 m). Sein Gipfel, eine doppelkegelige Vulkanruine, sitzt auf einem Sockel von Granit und kristallinen Schiefen. Er trägt eine Gletschereiskalotte, die eine Fläche von 144 km² bedeckt.



Heutige Inlandeis- und Gletscherbedeckung der Kontinente (nach verschiedenen Quellen, vor allem nach F. Wilhelm: Schnee- und Gletscherkunde. Berlin [West]/New York 1975)

Kontinent	km ²	%
Antarktika	13 779 000	85,45
u. subantarkt. Inseln	3 000	
Nordamerika	2 056 373	12,75
Eurasien	260 517	1,6
Südamerika	26 500	0,2
Australien u. Ozeanien	1 015	0,0
Afrika	15	0,0
Insgesamt	16 126 420	100,00

Gegenwärtige Vergletscherung der Polargebiete und polnahen Inseln sowie der Kontinente ohne Inseln (nach verschiedenen Quellen, vor allem nach F. Wilhelm: Schnee- und Gletscherkunde. Berlin [West]/New York 1975)

Gebiete/Kontinente	km ²	%	%
Antarktika	13 779 000	85,46	—
u. subantarkt. Inseln	3 000		
Grönland	1 802 600	11,18	—
Weitere arkt. u. subarktische Inseln	288 477	1,79	—
Eurasien	123 869	253 343 = 1,57	48,9
Nordamerika	101 944		40,2
Südamerika	26 500		10,5
Australien u. Ozeanien	1 015		0,4
Afrika	15		0,0
Insgesamt	16 126 420	100,00	100,0

Gegenwärtig sind immerhin rund 16 Mio km² der Landoberfläche unter Inlandeis und Gletschern begraben; das sind nahezu 11 % der Landflächen der Erde. Die größte Mächtigkeit oder Dicke erlangt das Gletschereis im antarktischen Inlandeisschild, in der größten zusammenhängenden, heute vorkommenden Gletschermasse, mit 4 335 m!

Wird der in kalten Gebieten vorkommende Dauerfrostboden, die ständige, vieljährige Bodengefrorenis, berücksichtigt, so müssen noch einmal rund 21 Mio km² hin-

zugerechnet werden. Der oft mehrere hundert Meter mächtige, zuweilen mehr als 1000 m, kleinflächig sogar über 1500 m mächtige Dauerfrostboden besitzt im nördlichen Eurasien und im nördlichen Nordamerika seine weiteste Verbreitung. Somit nehmen Inlandeise und Gletscher mit den noch riesigeren Dauerfrostbodenbereichen etwa 37 Mio km² der Landflächen ein; das ist nahezu ein Viertel der Festlandflächen der Erde!

Für das in Inlandeisen und Gletschern gebundene Wasser werden von den Wissenschaftlern unterschiedliche Werte – 29,2; 28,5 oder 24 Mio km³ – angenommen.

Bei einem Wassergehalt von 28,5 Mio km³ müßte der Meeresspiegel – falls ein völliges Abschmelzen des Gletschereises erfolgte – um fast 80 m, bezogen auf die gegenwärtige Meeresfläche, steigen und das ohne Berücksichtigung einer Überflutung niedriger Landgebiete sowie einer abwärts gerichteten Ausgleichsbewegung des Meeresbodens infolge höherer Belastung. Zu diesem Anstieg des Meeresspiegels würde der antarktische Inlandeisschild den Hauptanteil von ungefähr 71,5 m beisteuern; der Anteil des grönländischen Inlandeises läge bei etwa 6,9 m. Alle übrigen Gletscher würden nur einen sehr geringen Meeresspiegelanstieg hervorrufen – rund 0,5 m.

Das »kühle« Bild unseres Erdballs rundet sich ab, wenn das Meereis und die Eisberge in die Betrachtung eingeschlossen werden. Das meist nur wenige Meter mächtige Meereis kann – von jahreszeitlichen Schwankungen abgesehen – durchschnittlich 26 Mio km² bedecken. Eisberge dehnen den Eiseinfluß auf weitere 64 Mio km² aus.

Summa summarum unterliegt also gegenwärtig etwa ein Viertel unseres Planeten der Herrschaft und dem Einfluß von Inlandeisen, Gletschern, Dauerfrostboden, Meereis und Eisbergen!

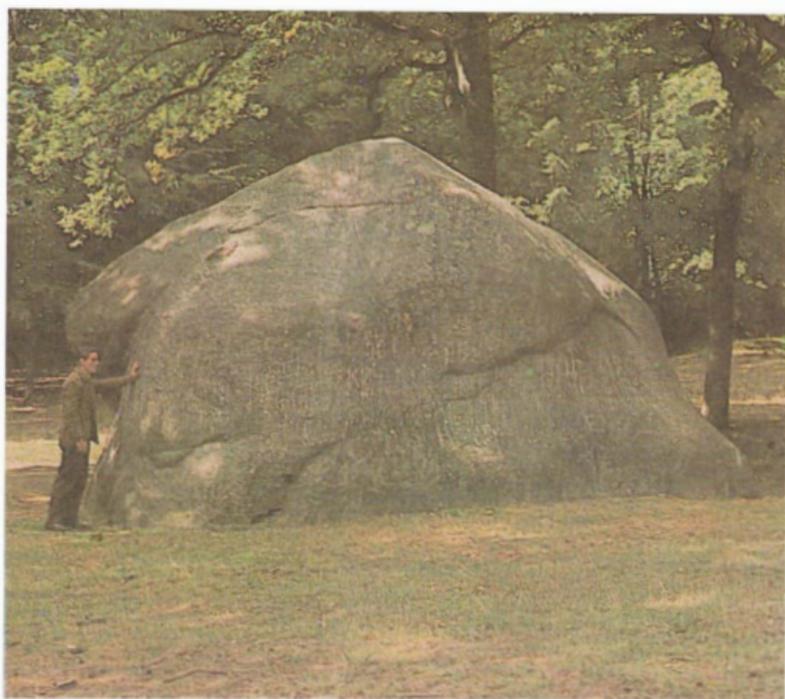
Schlammströme, Rollsteine oder Eisschollentransport?

»Sollten die nordischen Gletscher wirklich von den *Skandinavischen Bergen* bis an die *Wurzner* Hügel gereicht haben? Mich friert bei dem Gedanken!«

Als B. von Cotta im Jahre 1844 diese Sätze niederschrieb, hatte sich die erdwissenschaftliche Forschung schon weitgehend von der Schöpfungsgeschichte der Bibel gelöst, wenn auch etwa 20 Jahre zuvor (1822) die Bezeichnung »Diluvium«, d. h. in etwa »Überschwemmung«, für die ältere Epoche der jüngsten erdgeschichtlichen Periode, des Quartärs, eingeführt wurde. Dieser Begriff knüpft deutlich an den Sintflutgedanken der Bibel an. Erst in den letzten drei Jahrzehnten unseres Jahrhunderts verschwand die Bezeichnung »Diluvium« – seit langem historischer Ballast – aus deutschsprachigen erdgeschichtlichen Tabellen mehr und mehr und wurde schließlich völlig durch den Begriff Pleistozän (pleiston, griech. = am meisten; kainos, griech. = neu: das am meisten Neue) ersetzt.

Seit der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts fehlte es nicht an Versuchen, die Herkunft der im nördlichen Mitteleuropa und im Umkreis der Alpen auffälligen und weitverbreiteten Findlingsblöcke (erratische Blöcke oder Erratika) zu erklären. Es wurde an Ausbrüche aus Kratern und auch an eine Herkunft aus Gebirgen mit verschiedenartigem Antransport gedacht. Im nördlichen Mitteleuropa fiel dabei schon frühzeitig (1775) die Ähnlichkeit dieser Blöcke mit schwedischen Gesteinen auf.

Noch vor der Mitte des 19. Jahrhunderts standen drei wesentliche Hypothesen, wie wohl diese erratischen Blöcke nach Mitteleuropa gekommen sein mögen, im Mittelpunkt des Meinungsstreites. Alle drei Erklärungs-



Findlinge (Findlingsblöcke, erratische Blöcke, Erratika), hier der Kleine Markgrafenstein in den Rauenschen Bergen, erregten im nördlichen Alpenrandgebiet, in Nordeuropa und im nördlichen Mitteleuropa Aufmerksamkeit. Schließlich wurden sie mit Vergletscherungen in Verbindung gebracht und dienten erstmals um 1840 zum Ausscheiden aller einstmals vergletscherten Gebiete.

versuche – die Rollstein- oder Schlammflut-, die Drift- und die Gletscherhypothese – gingen von der Beobachtung heute noch wirksamer Vorgänge aus, obwohl sich ihre Auffassungen grundlegend und in Einzelheiten erheblich voneinander unterschieden. Umstritten war vor allem die Art des Transportes der Findlingsblöcke.

Schlammströme oder Rollsteine

Die Beobachtung des im Juli 1818 erfolgten Ausbruchs eines durch einen Gletscherwall aufgestauten Sees im Wallis lag der Schlammfluthypothese zugrunde, die in L. v. Buch (1776–1853) ihren bekanntesten Vertreter



Gletscherschliffe und -schrammen wurden bereits am Beginn der modernen Eiszeitforschung als Zeugnisse ehemalig größerer Vergletscherungen erkannt und als Beweise für eine einstmals größere Ausdehnung von Gletschern und Inlandeisen gewertet. – Blick auf ein von Gletschern bearbeitetes Fjell in Norwegen

besaß. Solche Seenausbrüche passieren immer wieder. So brach der durch den Allalingletscher im Saastal aufgestaute Mattmarksee seit 1859 z. B. sechszwanzigmal aus! Die verheerenden Fluten und Auswirkungen treten heutzutage auch bei Brüchen gewaltiger Staumauern und Dämme auf.

Die Beobachtung des Seeausbruchs mit all seinen furchtbaren Folgen veranlaßte L. v. Buch, sich diese Vorgänge noch gewaltiger vorzustellen und die Ursache der weiten Verbreitung von Findlingsblöcken 1827 in seinem Aufsatz »Über die Verbreitung großer Alpengeschiebe« in nachstehende Worte zu fassen: »Es ist von der Mitte der Alpen her, durch die Alpenthäler, eine ungeheure Fluth ausgebrochen, welche die Trümmer der Alpengipfel weit über entgegenstehende Berge und sehr entlegene Flächen verbreitet hat.« Diese Ansicht fand zahlreiche Anhänger. L. v. Buch übertrug seine Auffassung auch auf das nördliche Mitteleuropa, um hier ebenfalls so die auffallend weite Verbreitung der Findlingsblöcke zu erklären.

Ohne näher auf die Ursachen einzugehen, versuchte ein schwedischer Forscher namens Sefström anhand von Findlingsblöcken und den Schrammen, die diese auf festem Gestein hinterlassen haben sollen, eine erdumspannende Schlamm- oder Rollsteinflut nachzuweisen. Aus der Richtung der Schrammen wollte er das Ausgangsgebiet eingrenzen und bereiste deshalb weite Teile Europas. Dabei erhielt er auch in Berlin einen Hinweis auf Schrammen, die auf dem Rüdersdorfer Muschelkalk östlich von Berlin zu sehen waren. Diese Schrammen erlangten später (1875) eine erhebliche wissenschaftshistorische Bedeutung.

Diese Erklärungsversuche benötigten für die Deutung der auffallenden Verbreitung erratischer Blöcke noch keine Annahme eines kühleren Zeitabschnittes in der jüngsten Erdgeschichte.

Eisschollentransport

Eine weitere plausible Erklärung für die weite Verbreitung von Findlingsblöcken entwickelte der Engländer Ch. Lyell um das Jahr 1830. Wie schon der Schlammfluthypothese, so dienten auch ihr Beobachtungen von Vorgängen, die noch gegenwärtig auf der Erde vorkommen.

Nord- und Mitteleuropa waren nach Lyells Auffassung während der älteren Epoche des jüngsten Abschnittes der Erdgeschichte von einem Meer bedeckt, in das – von einer

größeren Vergletscherung als der heutigen – Eisberge hineindrifteten. Strandende Eisberge aus dem Polarbereich hätten nun in diesem bis in das nördliche Mitteleuropa hineingreifenden flachen Meer beim Abtauen ihr mitgeführtes Material abgesetzt.

Auch die Schrammen auf festem Gestein ließen sich deuten: Eingefrorenes Gesteinsmaterial an der Unterseite solch strandender Eisberge hätte sie auf dem festen Fels eingegraben. Noch 1875 betonte ein deutscher Forscher im wissenschaftlichen Meinungsstreit nachdrücklich diese Auffassung und wies auf die von Grönland zur Neufundlandbank driftenden Eisberge als vergleichbares Beispiel hin.

Auf der Hasswell-Insel (Antarktis) findet man vom Gletschereis zu Rundhöckern zugeschliffene und geschrammte Felsoberflächen. Im Mittelgrund des Bildes eine Gruppe der hier brütenden Adelige-Pinguine



Die südliche Küstenlinie des angenommenen Meeres in Mitteleuropa schien gut bekannt zu sein. Sie wurde in der Verbindungslinie der südlichsten Vorkommen von Findlingsblöcken und -gesteinen nordeuropäischer Herkunft sowie Feuersteinen gesehen und deshalb auch als »Feuersteinlinie« bezeichnet.

Noch 1875 hielt ein deutscher Forscher, H. Credner, einen Vortrag »über den Verlauf der südlichen Küste des Diluvialmeeres soweit dieselbe Sachsen berührt«. In diesem Vortrag wurde die südliche Küstenlinie nach neuesten Befunden sogar verbessert: »Von der Südgrenze des Diluviums findet man auch bei neueren Autoren angegeben, daß sie sich von Görlitz über Bautzen und Dresden bis in die Gegend von Wurzen bei Leipzig und von hier aus nach Altenburg ziehe. Diese Angabe ist irrig. . . . Es ergibt sich daraus, dass die Südküste des Diluvialsees 10 bis 12 d. Meilen südlicher zu suchen ist, als bisher angenommen. . . . Am überraschendsten aber ist die Erscheinung, dass sich von Dresden aus eine Diluvialbucht über die sächsische Schweiz *nach Nordböhmen* hinein erstreckt . . . hat.«

Die Drifthythese nahm also eine Vergrößerung von Gletschern im Polarbereich und ein südlicheres Vordringen des Treibeises an — es mußte demnach damals kälter als heute gewesen sein.

»Eine Reihe höchst merkwürdiger Thatsachen über den Gang der Gletscher«

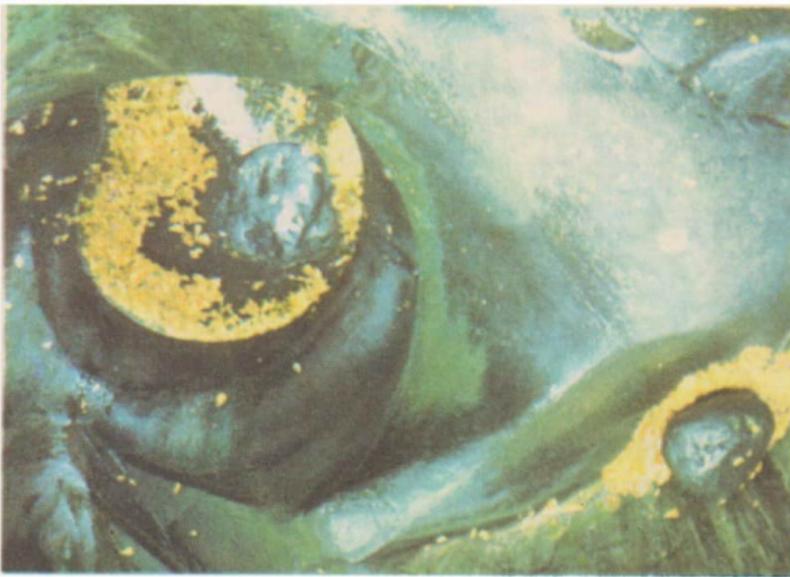
Schon vor der Entwicklung der Schlammflut- und Drifthythese und parallel zu ihr wurde die sogenannte Gletscherhypothese, die nachmalige Gletscher- und Inlandeisttheorie, diskutiert. Wie die anderen Hypothesen ging sie im wesentlichen von denselben Beobachtungen aus, vor allem von der Verbreitung der Findlingsblöcke und geschrammtem festem Gestein.

Während die Schlammfluthypothese an Bedeutung verlor, vertraten die Schweizer Forscher vor allem die Gletschertheorie, die Forscher im nördlichen Mittel-, in Nord- und Osteuropa – von wenigen Ausnahmen abgesehen – bis etwa 1880 die Drifthythese. Einige Forscher im nördlichen Mitteleuropa und in Osteuropa nahmen schließlich eine Kombination aus Drift- und Gletscherhypothese an.

Mit den Beobachtungen an Alpengletschern und in ihrem Vorland wie durch das Kennenlernen des grönländischen Inlandeises, der Vergletscherung Islands und Spitzbergens bahnte sich der Umschwung in der Anschauung der Wissenschaftler an.

Für Schweizer Forscher war um die Mitte des vergangenen Jahrhunderts die Gletschertheorie nicht mehr in Frage gestellt. In Deutschland behinderten jedoch objektive und subjektive Momente einen rascheren Durchbruch der Gletschertheorie. Mehrere frühere Versuche zur Einführung und Durchsetzung der Gletschertheorie scheiterten (Esmark 1824, Bernhardi 1832, v. Cotta, Naumann, v. Morlot 1844).

Zum einen war da der Autoritätenglaube! Ch. Lyell als Schöpfer der Drifthythese genoß großes Anse-



Zu den bekannten Sehenswürdigkeiten von Luzern/Schweiz gehört der Gletschergarten mit Findlingen, Gletscherschliffen, -schrammen und »Gletschermühlen«. Schmelzwasser des Gletschereises strudelte mit einem Mahlstein diesen Gletschertopf aus.

hen; Ch. Darwin war Anhänger dieses Erklärungsversuches.

Zum anderen gab es Schwierigkeiten im Vorstellungsvermögen über eine so riesige Gletscherentfaltung. »Findet man irgendwo in der Welt, daß auch Eis-Schollen polieren und parallel kritzen können, dann mag ich nicht mehr an Leipziger Gletscher denken«, schrieb B. v. Cotta. Ein gletschererfülltes Ostseebecken war für viele Forscher ein unüberwindliches Denkhindernis. Insgesamt war es wohl eine Art Angst vor der Tragweite der nun zu ziehenden Schlußfolgerungen, die viele Forscher zurückschrecken ließ.

Als der Schwede O. Torell in der berühmten Sitzung der Deutschen Geologischen Gesellschaft am 3. November 1875, unmittelbar nach dem Besuch der Rüdersdorfer Muschelkalkbrüche, seine Ansichten über eine ehemals größere Gletscherausdehnung darlegte und sie anhand von gletschergeschliffenen und gletschergeschrammten Beweisstücken aus Rüdersdorf einleuchtend vortrug, stieß er



Die riesigen Inlandeisschilde Antarktikas (13,8 Mio km²) oder Grönlands (1,8 Mio km²) vermitteln eine Vorstellung von der Ausdehnung der großen kaltzeitlichen Inlandeisschilde auf der Nordhalbkugel und sind zugleich Beispiele für eine dem Relief übergeordnete Vergletscherung, die das Land völlig unter sich begräbt. – Gletscherabbruch an der Küste von Grönland. Deutlich ist am unteren Eisrand die Brandungskehle zu erkennen. Immer wieder brechen ganze Eisberge ab und treiben in der See.

auf harte Gegenwehr. F. Wahnschaffe, ein später bekannter Eiszeitforscher, schrieb im Jahre 1898 rückblickend: »Ich selbst war in der Sitzung zugegen und werde nie den Eindruck vergessen, den diese völlig neue Lehre auf alle Anwesenden machte. Die meisten älteren Geologen und auch ich selbst hielten damals die Annahme einer so ausgedehnten und mächtigen Inlandeisdecke für ganz ungeheuerlich.«

Die Trennung von einem Denkmuster – der Drifthypothese –, die jahrzehntelang für zutreffend angesehen wurde, fiel den meisten Geowissenschaftlern des damaligen Berliner Zentrums offensichtlich sehr schwer.

In einer Rückschau schrieb der weltbekannte Geograph A. Penck, der ab 1906 an der Berliner Universität lehrte und

selbst zu den hervorragendsten Eiszeitforschern zählt, folgendes: »In der Novembersitzung der Deutschen Geologischen Gesellschaft hatte der schwedische Geologe (O. Torell, d. Verf.) 1875 mitgeteilt, daß er auf dem Kalkfelsen von Rüdersdorf bei Berlin echte Gletscherschliffe gefunden habe, die schon 1836 sein Landsmann SEFSTRÖM von dort erwähnt hatte. Er sagte, daß er die Spuren und Produkte einer früheren Vergletscherung ganz Skandinaviens so vollständig in den Diluvialbildungen des norddeutschen Flachlandes wieder erkennen könne, wie es nur bei Gletscherentstehung denkbar sei, damit war er bei den leitenden Geologen Berlins, denen jene Gletscherschliffe ebenso unbekannt geblieben waren wie die neueren Arbeiten skandinavischer Geologen über die Eiszeit, auf so große Gegnerschaft gestoßen, daß von seinen Ideen zunächst gar nicht gesprochen wurde.«

Anfänge der Gletschertheorie

Schon bevor L. v. Buch seine Schlammfluthypothese und Ch. Lyell seine Drifthypothese formulierte, ergab sich über Beobachtungen an Alpengletschern und ihres Vorlandes Schritt für Schritt die Erkenntnis einer ehemaligen größeren Gletscherausdehnung als in der Gegenwart. Sie gipfelte schließlich in der Theorie einer Vergletscherung sämtlicher Gebiete, in denen erratische Blöcke nachgewiesen worden waren, in einer Eiszeit. Der Nachweis einer Eiszeit mit den damit zusammenhängenden Vergletscherungen war das Neue, das bisher nicht Ausgesprochene — die Konsequenz aus dem Beobachtungsmaterial.

Die Bezeichnung Gletscher fand sich erstmals im Jahre 1507 in der Schweizer Chronik Petermann Etterlins aus Luzern. Messungen der Gletscherbewegung durch auf den Grindelwald-Gletscher aufgebraute Steine wurden im Jahre 1760 erstmals von G. S. Gruner ausgeführt: In sechs Jahren wurden sie 50 Schritte gletscherabwärts getragen. Unbeabsichtigte Messungen der Gletscherbewegung ergaben sich aus dem Abwärtswandern künstlich und zufällig eingebrachter Gegenstände. Am bekanntesten ist das Abwärtswandern der Leiter, die im Jahre 1788 bei der



Norwegen besitzt die ausgedehntesten Vergletscherungsareale des europäischen Festlandes. In Nord-Norwegen deckt beispielsweise allein die Vergletscherung Svartisens, ungefähr um den Polarkreis gelegen, mit fünf Gletschern ein Areal von 576,5 km². Die Zunge eines dieser Gletscher läßt sich gut überblicken.

Montblanc-Besteigung unter Führung von H. B. de Saussure am Mer de Glace verlorenging. Sie schmolz im Jahre 1832 4050 m talwärts wieder aus dem Gletscher aus. Dar- aus ließ sich eine Bewegung des Gletschereises von durch- schnittlich 92 m pro Jahr ableiten.

De Saussure, Philosophieprofessor in Genf, und Kuhn, »helvetischer Minister«, äußerten sich wohl als erste über eine ehemalg größere Gletscherausdehnung. Zu gleicher

Ansicht gelangte zu Beginn des 19. Jahrhunderts auch der schottische Geologe J. Playfair (1802).

Einen neuen Abschnitt leitete I. Venetz, damals »Ingénieur en chef des Kanton Wallis«, ein. »Eine Reihe höchst merkwürdiger Thatsachen über den Gang der Gletscher findet man hier mitgetheilt. Der Verfasser weist zuerst schlagend die ungeheure Ausdehnung der Gletscher in früheren Zeiten nach; ...«, schrieb L. Agassiz 1841 in seinem Buch »Untersuchungen über die Gletscher«.

I. Venetz sprach 1829 vor der schweizerischen naturforschenden Gesellschaft. Er wies nach, daß die Walliser Gletscher bis zum Jura vorgestoßen sein müssen, und schrieb auch die Verbreitung erratischer Blöcke in mehreren Bereichen Nordeuropas seither verschwundenen riesigen Gletschern zu.

J. v. Charpentier, in Freiberg/Sachsen geboren, eng befreundet mit I. Venetz, entwickelte 1834 die Venetzschen Auffassungen zu einer geschlossenen Theorie von einer ehemals größeren Alpenvergletscherung.

Agassiz und Schimper ließen sich von Charpentier im Gelände führen und wurden zu begeisterten Anhängern der Gletschertheorie. Schimper, ein Münchner Botaniker, sprach bereits in seinen Vorlesungen von der großen »Eiszeit« (1833–1836).

Schließlich dehnte L. Agassiz (1841) die Gletschertheorie auf alle Gebiete aus, in denen erratische Blöcke verbreitet sind, unter anderem auch auf das nördliche Mitteleuropa: »Zu Ende der geologischen Epoche, welche der Erhebung der Alpen vorherging, bedeckte sich die Erde mit einer ungeheuren Eiskruste, welche von den Polargegenden her über den größten Theil der nördlichen Halbkugel sich erstreckte. Die scandinavische und großbritannische Halbinsel, die Nord- und Ostsee, das nördliche Deutschland, die Schweiz, das Mittelmeer bis zum Atlas, das nördliche Amerika und asiatische Rußland waren ein ungeheures Eisfeld, aus welchem nur die höchsten Spitzen der damals bestehenden Berge (die Centralalpen waren noch nicht) auftauchten und dessen Grenzen uns noch heute überall durch die Grenzen der erratischen Blöcke bezeichnet sind.«

Damit waren die Erörterungen zur Gletschertheorie

abgeschlossen; das Grundgerüst dieser Theorie war klar und unumstößlich, problematisch blieb jedoch die Einführung und Durchsetzung der Gletschertheorie im nördlichen Mitteleuropa sowie in Ost- und auch in Nord-europa.

Versuche und Fehlschläge

Neben der erwähnten Vorstellung gab es aber bereits zuvor bei einigen Wissenschaftlern Europas Gedanken und Beobachtungen über eine vom Alpengebiet unabhängige größere Vergletscherung.

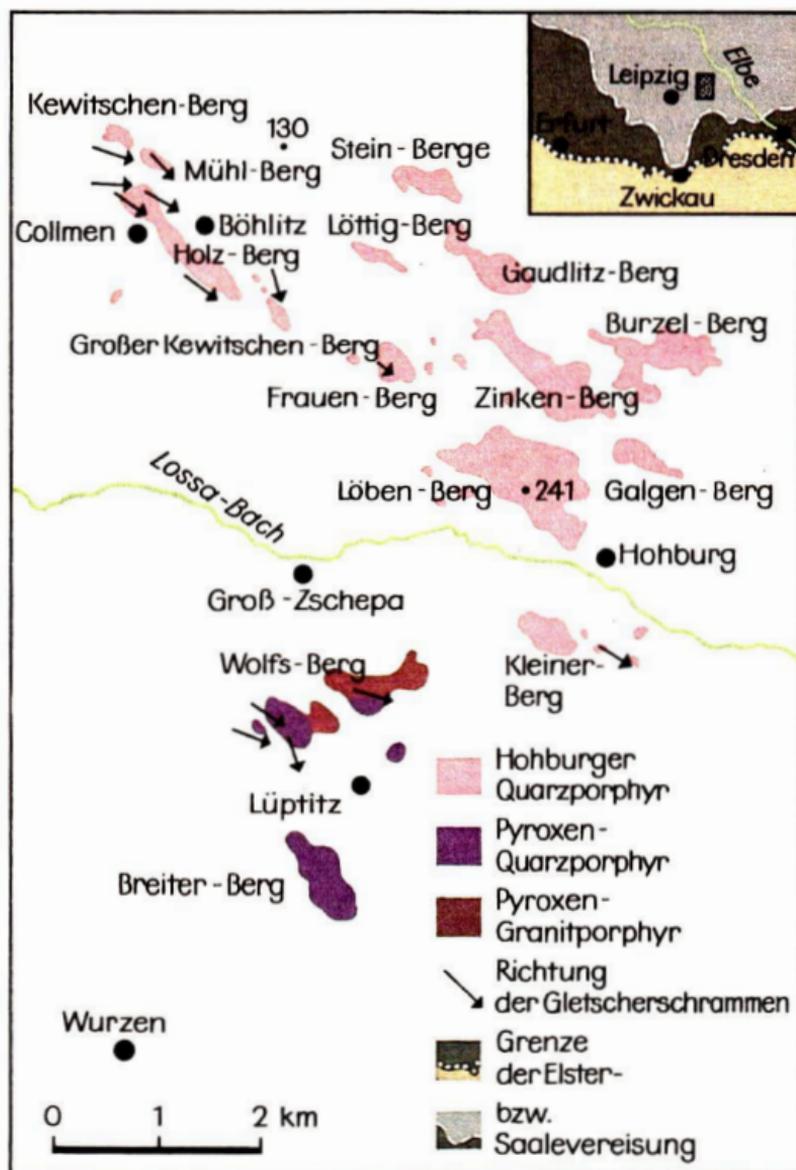
Im Jahre 1824 behauptete J. Esmark – gestützt auf überzeugende Argumente –, ganz Norwegen sei ehemals bis nach Dänemark hin von Gletschereis bedeckt gewesen.

Ebenso wie dieser begründete Versuch wurde auch die Ansicht von A. Bernhardt, Professor an der Forstakademie Dreißigacker bei Meiningen, nicht zur Kenntnis genommen und geriet in Vergessenheit. A. Bernhardt vertrat die durch Geländebeobachtung gewonnene Überzeugung einer einst bis an die zentraleuropäische Mittelgebirgsschwelle ausgedehnten Vergletscherung (1832).

Dramatisch spitzte sich die Frage der Vergletscherung im nördlichen Mitteleuropa zu, als B. v. Cotta, Geologieprofessor in Freiberg, im direkten Kontakt mit L. Agassiz im Jahre 1843 Zeugen der einstmals größeren Vergletscherung bei Neuchâtel kennenlernte (9. 8. 1843). Neben den schon mehrfach angeführten erratischen Blöcken wurden ihm im Gelände Gletscherschliffe als weitere Zeugen einer Vergletscherung gezeigt.

B. v. Cotta faßte sofort den Entschluß, Gletscherschliffe und -schrammen auf festem Gestein innerhalb der recht gut bekannten Verbreitung nordischer Findlingsblöcke nördlich der »Feuersteinlinie« zu suchen.

Als geeignetes Objekt boten sich die Hohburger Berge, nordöstlich von Leipzig und nördlich von Wurzen gelegen, an. Eine Erkrankung hinderte B. v. Cotta an einer eigenen Untersuchung. Er bat deswegen seinen Kollegen C. F. Naumann, Professor für Mineralogie und Geognosie in Leipzig, um eine entsprechende Erkundung. Nach einer



Skizze der Porphyrauftragungen in den Hohburger Bergen bei Wurzen. Die Richtung der Gletscherschrammen ist durch Steinbrüche meist nicht mehr rekonstruierbar (aus L. Eißmann, 1974)

zweiten Begehung konnte C. F. Naumann von einem positiven Ergebnis der Untersuchung berichten.

B. v. Cotta äußerte sich 1844 daraufhin: »In der Schweiz scheint zwischen Eis-Schollen und Gletschern keine Wahl

freigelassen; das Phänomen der transportirten Blöcke oder der äusseren Schliff-Flächen lässt sich zusammenhängend von den heutigen Gletschern bis zum *Jura* verfolgen. Sollten die nordischen Gletscher wirklich von den *Skandinavischen Bergen* bis an die *Wurzner* Hügel gereicht haben?«

Noch 1844 fuhr B. v. Cotta selbst in die Hohburger Berge, war aber von den dortigen Funden enttäuscht, wurde unsicher und erkannte 1850 wieder die Drifttheorie für das nördliche Mitteleuropa als gültig an.

C. F. Naumann führte ebenfalls noch 1844 A. v. Morlot, einen Schweizer, der in Freiberg studierte, in die Hohburger Berge. An den von C. F. Naumann entdeckten und vorgeführten Gletscherschliffen in den Hohburger Bergen begründete A. v. Morlot die bis in dieses Gebiet vorgegedrungene nordeuropäische Vergletscherung in der Schrift »Ueber die Gletscher der Vorwelt und ihre Bedeutung«, die im Jahre 1844 in Bern erschien.

C. F. Naumann verfocht weiterhin die Gletschertheorie, A. v. Morlots Schrift geriet in Vergessenheit. Insgesamt endete jedoch dieser Versuch, die Gletscher- oder Inlandeisttheorie auch für das nördliche Mitteleuropa zu begründen, mit einem Fehlschlag.

A. Heim, ein bekannter Eiszeitforscher aus den Alpen, sah 1870 nur zwei kleine Stellen in den Hohburger Bergen als möglichen Gletscherschliff an. Schließlich lehnten Heim und v. Fritsch auf einer Exkursion der Deutschen Geologischen Gesellschaft in die Hohburger Berge noch im Jahre 1874 die vorgeführten Stellen als Gletscherwirkungen ab.

Wilhelm Meisters Bergfest

Daß diese Probleme nicht nur die Wissenschaftler der damaligen Zeit beschäftigten, stellen wir mit Überraschung fest, wenn wir in Goethes »Wilhelm Meisters Wanderjahre« das 10. Kapitel des 2. Buches, »Bergfest« überschrieben, lesen. Den wissenschaftlichen Meinungsstreit, dieses Hin und Her von Erklärungs- und Deutungsversuchen über die Geschichte unserer Erde müssen wir



Als Schären werden nachträglich vom Wasser umgebene, durch Gletschereis geformte Rundhöcker bezeichnet. Sie treten oft in Schwärmen auf (baltischer Typ) und bilden sogenannte Schärenhöfe (z. B. vor Turku/Finnland). Für ihr Entstehen besitzt Wasser – außer der nachträglichen Umflutung der vom Gletschereis geformten Rundhöckerlandschaft – keinerlei Bedeutung.

versuchen, aus dem Geist der Zeit zu verstehen: Mühsam war man dabei, sich von den Gedanken einer Schöpfungsgeschichte zu befreien, der Drang, einen Zusammenhang zu entdecken, den Dingen wirklich auf ihren Grund zu kommen, war ungeheuer.

So beschäftigte Goethe sich zeitlebens mit erdwissenschaftlichen Fragen. Erstaunlich früh äußerte er sich in dichterischer Form zur Gletscher- und Drifthythese. Bisher konnte nicht genau und überzeugend geklärt werden, wie Goethe zu diesen Vorstellungen gelangte. Nicht ohne Interesse ist dabei, daß er bereits 1829 den Standpunkt vieler Forscher vorwegnahm, für die Alpen die Gletscherhypothese, für den Norden hingegen die Drifthythese gelten zu lassen. Auch die Sintflut-

geschichte der Bibel, die noch immer weitverbreitet das Denken jener Zeit beherrschte, wird im »Bergfest« als konservative Auffassung erwähnt: »Eine vierte, wenn auch vielleicht nicht zahlreiche, Partie lächelte über diese vergeblichen Bemühungen und beteuerte: gar manche Zustände dieser Erdoberfläche würden nie zu erklären sein, wofern man nicht größere und kleinere Gebirgstrecken aus der Atmosphäre heruntergefallen und weite, breite Landschaften durch sie bedeckt werden lasse. Sie beriefen sich auf größere und kleinere Felsmassen, welche zerstreut in vielen Landen umherliegend gefunden und sogar noch in unsern Tagen als von oben herabstürzend, aufgelesen werden.

Zuletzt wollten zwei oder drei stille Gäste sogar einen Zeitraum grimmiger Kälte zu Hilfe rufen und aus den höchsten Gebirgszügen auf weit ins Land hingesenkten Gletschern gleichsam Rutschwege für schwere Ursteinmassen bereitet und diese auf glatter Bahn fern und ferner hinausgeschoben im Geiste sehen. Sie sollten sich bei eintretender Epoche des Auftauens niedersenken und für ewig in fremdem Boden liegen bleiben. Auch sollte sodann durch schwimmendes Treibeis der Transport ungeheurer Felsblöcke von Norden her möglich werden. Diese guten Leute konnten jedoch mit ihrer etwas kühlen Betrachtung nicht durchdringen. Man hielt es ungleich naturgemäßer, die Erschaffung einer Welt mit kolossalem Krachen und Heben, mit wildem Toben und feurigem Schleudern vorgehen zu lassen. Da nun übrigens die Glut des Weines stark mit einwirkte, so hätte das herrliche Fest beinahe mit tödlichen Händeln abgeschlossen.

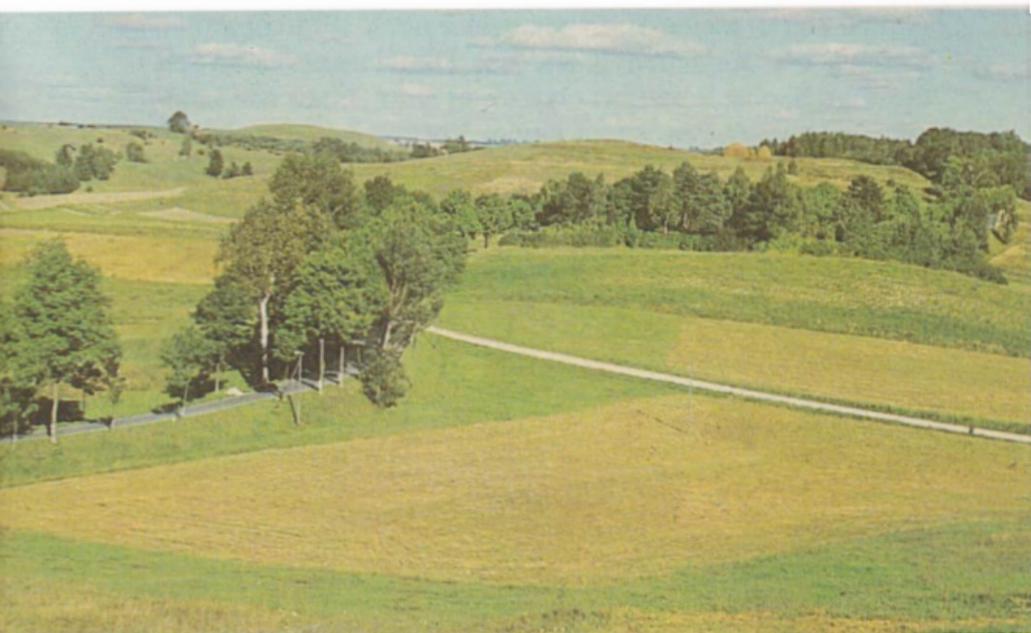
Ganz verwirrt und verdüstert ward es unserem Freund zumute, welcher noch von alters her den Geist, der über den Wassern schwebte, und die hohe Flut, welche funfzehn Ellen über den höchsten Gebirgen gestanden, im stillen Sinne hegte und dem unter diesen seltsamen Reden die so wohl geordnete, bewachsene, belebte Welt vor seiner Einbildungskraft chaotisch zusammenzustürzen schien.«

Eine neue Theorie setzt sich durch

Der bereits erwähnte, von O. Torell am 3. November 1875 gehaltene Vortrag auf der Sitzung der Deutschen Geologischen Gesellschaft in Berlin brachte noch nicht die große Wende zugunsten der Gletschertheorie, zur Anerkennung einer großen Kaltzeit oder Eiszeit mit riesiger Gletscherentfaltung auf der Erde. Der entscheidende Durchbruch gelang erst einige Jahre später. Er ist mit dem Namen des weltbekannten Geographen A. Penck (1858–1945) unlösbar verbunden. Auf einer ausgedehnten Erkundungsreise über das nördliche Mitteleuropa nach Schweden, Norwegen und zurück über Dänemark und Holstein trug A. Penck überzeugendes Beweismaterial zusammen.

Wenn trotz des direkten Kontaktes zwischen Forschern aus der Schweiz und Sachsen die Gletscherschliffe und Schrammen in den Hohburger Bergen allein nicht ausreichten, um den Durchbruch der Gletschertheorie zu erzwingen, so mag es unter anderem an folgendem gelegen haben: Einerseits befinden sich die Hohburger Berge in einem Gebiet der Vergletscherung, das nachträglich starke Veränderungen erfuhr und in dem deshalb die Gletscherwirkungen gegenüber denen der Alpen nicht mehr so deutlich erhalten sind, andererseits war den damaligen Forschern insgesamt die Entfernung zu der heutigen, verhältnismäßig geringen Vergletscherung Skandinaviens, einfach gesagt, zu groß, um die gedankliche Verbindung herzustellen und daraus die Konsequenzen zu ziehen. Den »leitenden Geologen Berlins«, die zäh an der Drifthythese hingen, warf A. Penck später jedoch vor, daß ihnen die Gletscherschliffe und -schrammen in einem günstiger gelegenen Bereich, auf dem nur 27 km östlich des Stadtzentrums anstehenden Rüdersdorfer Muschelkalk, »ebenso unbekannt geblieben waren wie die neueren Arbeiten skandinavischer Geologen über die Eiszeit«.

Seit dem Anfang der achtziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts begann sich die Gletscher- bzw. Inlandeis- theorie schließlich durchzusetzen. Ihr Durchbruch wurde sicher zusätzlich durch den Tod des Schöpfers und angesehensten und beharrlichsten Verfechters der Drift-



An Gletscherrändern entstehen charakteristische Formengemeinschaften, wenn Gletscher oder Inlandeise auf dem Land enden. Sie wurden als »glaciale Serien« bezeichnet. – Am Gletscherrand bildet sich häufig eine Endmoräne. Vor ihr liegt bei Inlandeisen oder großen Gletschereiskappen der Sander mit sandigen oder kiesigen Absätzen aus dem abfließenden Schmelzwasser. Bei schuttbeladenen Gebirgsgletschern breitet das Schmelzwasser eine grobkörnige Schotterflur oder -fläche aus. – Sander im Vorland der Pommerschen Endmoräne südwestlich von Sopot/VR Polen

hypothese, Charles Lyell, begünstigt. Er starb im Frühjahr 1875.

Erleichtert wurde der Sieg der Gletschertheorie vor allem durch Kennenlernen und Studium des riesigen Inlandeises und der Gletscher in Grönland, Island und Spitzbergen. Schließlich mußten erst aus den Zusammenhängen zwischen Gletschertätigkeit und Abtragungsformen im festen Gestein die schwerer erkennbaren Formen in den weiten Ablagerungsräumen zweifelsfrei in direkte Beziehung zur Gletscherwirkung gebracht werden.

Etwa um die gleiche Zeit setzte sich mit ähnlichen Schwierigkeiten die Gletschertheorie auch im damaligen Rußland durch.

1880 zog derselbe H. Credner, der noch 1875 »über den Verlauf der südlichen Küste des Diluvialmeeres soweit dieselbe Sachsen berührt« berichtet hatte, einer der Leipziger Lehrer A. Pencks, in einem Vortrag vor der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin für sich und wohl auch die meisten deutschen Geologen einen Schlußstrich unter die »Drifttheorie«. Der Titel des Crednerschen Vortrages lautete: »Die Vergletscherung Norddeutschlands während der Eiszeit.«

Nicht nur *eine* Eiszeit

Ein Wechsel von Kalt- und Warmzeiten?

Nach der Ansammlung von Kenntnissen über die Gletscherwirkung im festen Gestein, vor allem aber durch das Studium noch heute vergletscherten Gebiete mit dem riesigen grönländischen Inlandeis und der Gletscherbedeckung auf Island und Spitzbergen, vollzog sich der qualitative Umschlag zugunsten der Gletschertheorie. Die Drifthythese als übersteigerte Verallgemeinerung aus lokalen Beobachtungen also war überwunden.

Der Prozeß des Umdenkens, die völlige Lösung aus der biblischen Sintflutdarstellung, war unwiderruflich abgeschlossen. Die Befunde aus der Beobachtung waren nicht mehr zu erschüttern, nicht mehr zu widerlegen. Es stand fest: Die nachgewiesene riesige Gletscherentfaltung auf der Nordhalbkugel ist gleichbedeutend mit einer kälteren Zeit, einer Eiszeit. Der Begriff war bereits um 1835 aus den Forschungen in den Alpen geboren; der Begriff Eiszeitalter wurde 1874 geprägt.

Erste Beobachtungen in den Alpen, wie beispielsweise ein Lignit- bzw. Xylitlager zwischen zwei Moränen am Genfer See (1816) oder eine 45 m mächtige Schotterablagung in der Drance-Schlucht zwischen zwei Moränen, wurden als Beweis für wiederholte Gletschervorstöße gedeutet.

1879 veröffentlichte A. Penck seine Arbeit über »Die Geschiebformation Norddeutschlands«. In ihr wies A. Penck durch überzeugendes Beweismaterial, das er auf seiner Erkundungsreise zusammengetragen hatte, eindeutig die Berechtigung der Gletscher- bzw. Inlandeis-



Vor den Eisrandlagen schütten die Schmelzwässer riesige und mächtige Sand-, Kies- und Schotterablagerungen auf. Nach dem isländischen Ausdruck »sandar« für die weiten Aufschüttungsebenen werden sie als Sander bezeichnet. Sie dienen in vielfacher Weise dem Bauwesen; hier eine Grube am Ostufer des Templiner Sees bei Potsdam.

theorie für das nördliche Mitteleuropa nach. Ablagerungen aus wärmeren Zeiten, die etwa denen unserer Zeit gleichen und von Gletscheraufschüttungen, den Moränen, unter- und überlagert wurden, führten ihn zu folgendem Schluß: Es gab nicht nur eine Eiszeit mit mehrfachen Gletschervorstößen, sondern drei Eiszeiten, die von wärmeren Zeitabschnitten – gleich dem heutigen – getrennt sind. Dieses Erkenntnis, die weit über die Annahme *einer großen Eiszeit* mit gewaltiger Gletscherausdehnung hinausführte, forderte – kurz nach der gedanklichen Verarbeitung einer kalten Zeit mit riesiger Gletscherentfaltung – harte Gegnerschaft heraus. Es entbrannte ein heftiger Meinungsstreit zum Charakter der Zeiten zwischen den drei Eiszeiten mit ihren Inlandeisbedeckungen und Gebirgsver-

gletscherungen. Während einige Forscher an eine Eiszeit mit Inlandeisbedeckung und größerem Vordringen und Zurückweichen des Inlandeisrandes glaubten, vertraten andere Pencks Ansicht von längeren und wärmeren Zeitabschnitten zwischen den Eiszeiten.

Diese Frage ist längst zugunsten der Auffassung von A. Penck entschieden. Letzte Zweifel räumte die Pollenanalyse aus.

In jeder Kaltzeit vertrieb die abnehmende Temperatur und mit ihr eine riesige Gletscherentfaltung die Pflanzenwelt aus dem Raum der Gletscherbedeckung und weitgehend auch aus den anliegenden Gebieten. Dabei traten erhebliche Veränderungen der Pflanzenwelt im Umland von Inlandeis und Gletschern ein, wobei vor allem der Wald weithin verdrängt wurde. Nach Rückschmelzen des Gletschereises und besonders nach Ende jeder Kaltzeit kehrte die Pflanzenwelt in den nun wieder warmzeitlichen Ausgangsraum zurück. Diese Veränderungen in der Pflanzenwelt lassen sich durch Blütenstaubabsätze (Pollens) in Ablagerungen eindeutig nachprüfen. Durch eine Verarmung an Arten und wechselnde sowie unterschiedliche Zusammensetzung der Pflanzengesellschaften einschließlich unterschiedlich zeitlicher Rückkehr von Pflanzen, besonders von Bäumen, lassen sich die einzelnen Warmzeiten auseinanderhalten. Die warmzeitlichen Ablagerungen werden ihrerseits durch ihre Lage unter oder über kalt- bzw. eiszeitlichen Absätzen zur Gliederung des Eiszeitalters benutzt.

1882 veröffentlichte A. Penck seine Untersuchung: »Die Vergletscherung der deutschen Alpen«. Mit ihr schlug er eine feste Brücke zur Eiszeitforschung in den Alpen. Es gelang ihm, zunächst auch dort eine dreimalige Vergletscherung mit zwischengeschalteten Warmzeiten nachzuweisen.

Diese beiden großen Arbeiten A. Pencks wiesen den Wechsel von Kalt- und Warmzeiten im Eiszeitalter unumstößlich nach.

Im ersten Jahrzehnt unseres Jahrhunderts publizierte A. Penck mit seinem Schüler E. Brückner ein dreibändiges Werk über »Die Alpen im Eiszeitalter«. In ihm konnte aufgrund neuer Forschungsergebnisse der Nachweis von

vier Kaltzeiten mit drei dazwischenliegenden Warmzeiten geführt werden. Die Namen der vier Kaltzeiten – nach Flüssen im nördlichen Alpenvorland benannt: Günz- (älteste Kaltzeit), Mindel-, Riß- und Würm-Kaltzeit (jüngste Kaltzeit) – werden zur Verständigung international oft noch heute benutzt. Durch intensive Forschungen, durch die Erweiterung der Kenntnisse über Ablagerungen und Formen, durch interdisziplinäre Zusammenarbeit und Entwicklung und Einführung neuer Methoden werden heute im nördlichen Mitteleuropa sechs Kalt- und fünf Warmzeiten (ohne die Zeit nach der bisher jüngsten Kaltzeit) im gegenwärtigen Eiszeitalter unterschieden.

Gliederung des Quartärs für das nördliche Mitteleuropa

		Holozän		
Pleistozäne Eis- und Warmzeiten	{	<i>Weichsel-Eiszeit</i>	} Jung- pleistozän	(Würm- Kaltzeit)
		<i>Eem-Warmzeit</i> <i>Saale-Eiszeit</i>		(Riß- Kaltzeit)
	{	<i>Holstein-Warmzeit</i> <i>Elster-Eiszeit</i>	} Mittel- pleistozän	(Mindel- Kaltzeit)
Pleistozäne Kalt- und Warmzeiten	{	<i>Cromer-Warmzeit</i> <i>Menap-Kaltzeit</i>	} Alt- pleistozän	(Günz- Kaltzeit)
		<i>Waal-Warmzeit</i> <i>Eburon-Kaltzeit</i>		
	{	<i>Tegelen-Warmzeit</i> <i>Brüggen-Kaltzeit</i>		
		Tertiär		

Neuere Forschungen rechnen mit einem noch häufigeren Wechsel von Kalt- und Warmzeiten. Beispielsweise gab der britische Wissenschaftler D. Q. Bowen im Jahre 1978 für die letzten 1,6 Mio Jahre einen 17fachen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten an, die sich aus neuesten Forschungen auf dem Land und in den Meeresbereichen ergeben haben, und sprach daher mit Recht von revolutionären Umwälzungen in der Quartärsystematik. Auf diese gewaltige Umwälzung in der Gliederung des Quartärs müssen sich künftig sämtliche Erdwissenschaften einstellen.

Inlandeis und Gletscher in früheren Kaltzeiten

Liegt heute der Schwerpunkt der Vergletscherung auf dem Erdball mit dem antarktischen Inlandeisschild auf der Südhalbkugel, so lagen die größeren Vergletscherungsbereiche in den jüngeren Kaltzeiten, ganz sicher nachgewiesen für die bisher jüngste, die vorletzte und drittletzte Kaltzeit, auf der Nordhalbkugel.

Gletschereisflächen der Erde: gegenwärtig, während der bisher jüngsten (Weichsel- oder Würm-)Kaltzeit und der vorletzten (Saale- oder Riß-) Kaltzeit (nach verschiedenen Quellen, vor allem nach Donn, W. L., Farrand, W. R., und M. Ewing 1962)

Kontinent	Vergletscherungsflächen der Erde		
	heute Mio km ²	weichselkalt- zeitlich Mio km ²	saalekalt- zeitlich Mio km ²
Antarktika	13,78	14,51	14,51
Nordamerika	2,06	17,19	18,55
Eurasien	0,26	9,01	14,37
Südamerika	0,027	0,83	0,94
Afrika u. Australien	0,001	0,06	0,07
Insgesamt	16,12	41,60	48,44

Inlandeise und Gletscher begruben in der jüngsten Kaltzeit (Würm- oder Weichsel-Kaltzeit) zur Zeit ihrer maximalen Entfaltung – vor etwa 20 000 Jahren – ungefähr 42 Mio km² Land unter sich. Zur heutigen Gletscherbedeckung von rund 16 Mio km² kamen also weitere 26 Mio km² hinzu.

Noch gewaltiger waren Inlandeis und Gletscher in der vorletzten Kaltzeit (Riß- oder Saale-Kaltzeit) ausgedehnt.

Gegenwärtige und eiszeitliche Vergletscherung auf der Nordhalbkugel (nach L. Lliboutry, 1965)





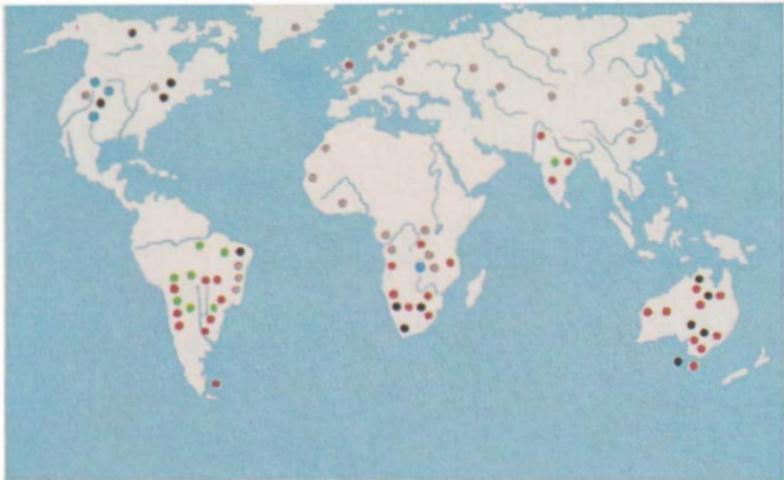
Wahrscheinlich erreichten während dieser Kaltzeit Inlandeis und Gletscher in den meisten Gebieten der Erde ihre größte Ausdehnung. Mit etwa 49 Mio km² inlands- und gletscherbedeckter Fläche übertraf sie die gegenwärtige Vergletscherung um 33 Mio km²; sie war dreimal so groß wie die heutige Vergletscherung.

Diese kaum vorstellbare riesige Vergletscherung hat ihre Spuren weithin auf der Erdoberfläche hinterlassen. Sie wirkte sich noch stärker als bei den übrigen Kaltzeiten in bedeutenden Verschiebungen der Klima- und Vegetationszonen, überhaupt der geographischen Zonen, aus und ließ den Meeresspiegel – umgerechnet auf die heutige Weltmeeresfläche und ohne Berücksichtigung weiterer Folgen – um fast 150 m absinken.

Ältere Eiszeitalter?

Mit der Erforschung der Gletschertätigkeit, besonders aber mit der Erforschung der Ablagerungen von Gletschern – den Moränen – und der Gletscherwirkung auf den Untergrund – vor allem den Gletscherschliffen und -schrammen –, lag die Frage nahe, weitere Vergletscherungsspuren bzw. Eiszeitalter in der Erdgeschichte aufzuspüren.

Auf festem Gestein hinterlassen Gletscher geschliffene und geschrammte Flächen sowie besonders gestaltete Erhebungen, die Rundhöcker genannt werden. Direkte Gletscherablagerungen, Moränen, werden in verfestigtem Zustand als Tillite bezeichnet. Diese Tillite werden wie Gletscherschliffe und -schrammen als Kriterien für ehemalige Vergletscherungen angesehen. Ihre Vorkommen erlauben es sogar, das ehemalige Verbreitungsareal zu rekonstruieren. Allerdings ist die Identifizierung – besonders von alten Moränen – nicht ganz einfach. Rutsch- und Bergsturzmassen können ähnlich aussehen, auch noch andere Ablagerungen, so daß vor allem bei älteren Vergletscherungsspuren Verwechslungen auftreten können. Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß ältere Vergletscherungsspuren – ob immer zu Recht, sei dahingestellt – bereits vor der Durchsetzung der Gletschertheorie und dem Nachweis eines jungen Eiszeitalters auf der Erde



- | | |
|---|---------------------------|
| ● alttertiäre Vereisungsspuren | ● eokambrische Vereisung |
| ● jungpaläozoische (Karbon/Perm) Vereisungsspuren | ● präkambrische Vereisung |
| ● altpaläozoische (Silur/Devon) Vereisungsspuren | |

Präpleistozäne Vergletscherungsspuren (nach M. Schwarzbach, 1961)

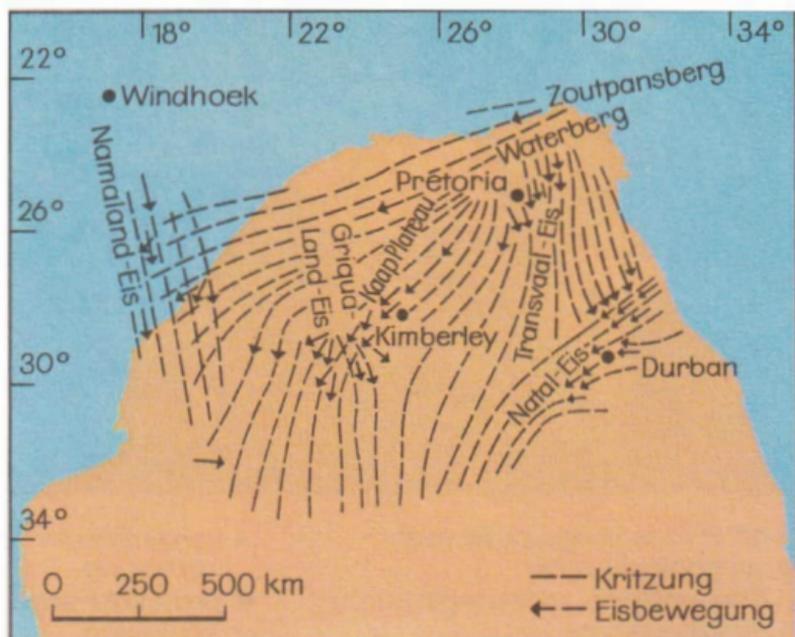
beobachtet und beschrieben wurden. Im Laufe der letzten Jahrzehnte des vergangenen Jahrhunderts, besonders aber nach der Jahrhundertwende, vermehrte sich das Beobachtungsmaterial so stark, daß nahezu für jede Periode der Erdgeschichte seit Beginn des Erdaltertums irgendwo auf dem Erdball angebliche Vergletscherungsspuren nachgewiesen werden konnten.

Nach sorgfältiger Überprüfung und Einordnung in den erdgeschichtlichen Ablauf darf mit der erforderlichen Sicherheit von mindestens drei *großen* Eiszeitepochen vor dem jüngsten Eiszeitalter gesprochen werden:

in vorkambrischer Zeit (vor dem Erdaltertum) vor rund 1 Milliarde Jahren,

in jungproterozoischer (eokambrischer) Zeit (kurz vor dem Beginn des Erdaltertums) vor rund 600 Mio Jahren,

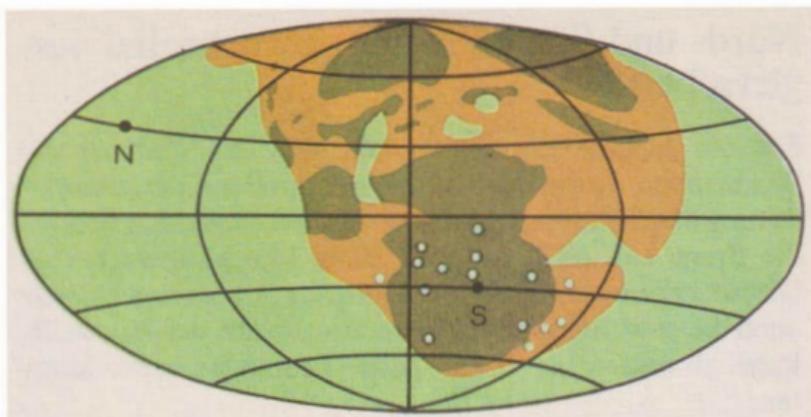
im jungen Erdaltertum (im Jungpaläozoikum: das permokarbone oder jungpaläozoische Eiszeitalter) vor rund 275 Mio Jahren.



Vergletscherungsspuren im Jung-Paläozoikum von Südafrika, aus denen sich vier Eiszentren erschließen lassen (nach Du Toit, aus M. Schwarzbach, 1961)

Während die Abkühlung zum jüngsten Eiszeitalter in der jüngsten Periode der Erdgeschichte (Quartär) bereits vor Ende der davorliegenden Tertiär-Periode mit Gletscherwachstum und -ausdehnung auf dem antarktischen Kontinent, auf Island und in Alaska einsetzte, ist das Erdmittelalter (Mesozoikum) auffallend arm an Vergletscherungsspuren. Verfestigte Moränen (Tillite) konnten in der Zeit des Erdmittelalters nirgendwo nachgewiesen werden. Dagegen zeigt das junge Erdaltertum (Jungpaläozoikum) etwa um die Wende von der Karbon- zur Perm-Periode, den beiden jüngsten Perioden des Erdaltertums, ein ganz anderes Bild.

Im Gegensatz zur Nordhalbkugel sind auf der Südhalbkugel vielfach und weitverbreitet Vergletscherungsspuren sicher nachgewiesen. In Südafrika konnte eine 300 bis 400m mächtige Tillit-Serie, die stellenweise bis 700m mächtig ist (Dwyka-Tillite), als einwandfreie Gletscherablagerung identifiziert werden. Außerordentlich gut erhal-



••• jungpaläozoische Vergletscherungsspuren

■ alte Schilde (auch Gondwana)

■ Deckgebirge

Lage der Urkontinente im Jungpaläozoikum. Nach den gesicherten Tillitvorkommen aus jener Zeit handelt es sich um eine zirkumsüdpolare Vergletscherung (nach M. Schwarzbach, 1961)

tene Rundhöcker, Gletscherschliffe und -schrammen ermöglichten nicht nur, die Verbreitung der ehemaligen Gletscherbedeckung zu verfolgen, sondern es ließen sich auch aus der Richtung und dem Verlauf der Schrammen sogar mehrere Vergletscherungszentren rekonstruieren. Vergletscherungsspuren in Form von Tilliten lassen sich nordwärts über Nord-Angola und bis zum Lukuga-Fluß verfolgen.

Ganz Australien war in dieser Zeit gletscherbedeckt. Die Schrammung des Untergrundes weist von Süden nach Norden. Im heutigen Südasien lagen große Bereiche Vorderindiens unter Gletschereis. Ebenso sind Spuren einer jungpaläozoischen Vergletscherung in Südamerika weithin nachgewiesen.

Insgesamt handelte es sich um eine riesige Vergletscherung der heutigen Südkontinente, die wohl in der damaligen Zeit zusammenhängend um den Südpol geschart lagen. Die Größenordnung dieser Vergletscherung stimmt auffallend mit der gletscherbedeckten Fläche des jetzigen antarktischen Kontinents überein.

Wichtig bleibt der aus Beobachtungen und Untersuchungen gesicherte Schluß, daß das jüngste Eiszeitalter der Erdgeschichte keine einmalige Erscheinung ist.

Nord- und Südhalbkugel abwechselnd vergletschert?

Für das jüngste Eiszeitalter läßt sich der Wechsel von Warmzeiten sowie Kaltzeiten mit großer Gletscherentfaltung überhaupt nicht mehr bestreiten. Wohl aber tauchte die Frage auf, ob Nord- und Südhalbkugel abwechselnd Gletscherbedeckung trugen und sogar, ob vielleicht nicht auch die gewaltigen Inlandeisbildungen auf der Nordhalbkugel zu unterschiedlichen Zeiten bestanden haben könnten.

Nach älteren Denkansätzen vor der Mitte des letzten Jahrhunderts, besonders aber in den dreißiger Jahren unseres Jahrhunderts, hat sich die Verknüpfung von kaltzeitlichem Sinken des Meeresspiegels und warmzeitlichem Anheben mit der Bildung und dem Schwinden der riesenhaften kaltzeitlichen Vergletscherungen für Parallelisierungen als sehr fruchtbar erwiesen.

Endmoränenlandschaft im Bereich der Nordrügener – Ostusedomer Staffel. – Blick vom Bakenberg nach Alt-Reddevitz



In neuer Zeit ist die Gleichzeitigkeit des Ablaufs großer Abschnitte der jüngsten Kaltzeit sicher nachgewiesen. Über Messungen mit der Radiokarbon-Methode (^{14}C -Methode) konnte das Maximum der jüngsten Vergletscherung auf rund 20000 Jahre vor unserer heutigen Zeit bestimmt werden. Das gilt für Neuseeland genauso wie für Europa und Nordamerika. Der letzte Abschnitt der bisher jüngsten Kaltzeit und auch der Zeitraum seit dem Ende der jüngsten Kaltzeit verliefen in vielen Einzelheiten mit den gleichen Schwankungen in Europa genauso wie in Nordamerika oder Neuseeland.

Aus der Zusammensetzung der Tierwelt in Ablagerungen auf Terrassen an den Meeresküsten kann sicher geschlossen werden, daß in der Warmzeit vor der jüngsten Kaltzeit, in der Eem-Warmzeit, auch auf der Südhalbkugel keine Kaltzeit herrschte. Wenn nun der Zeitraum nach der jüngsten Kaltzeit, die jüngste Kaltzeit und die Warmzeit vor der jüngsten Kaltzeit gleichartig und gleichzeitig auf dem gesamten Erdball abliefen, so darf dasselbe in ähnlicher Art und Weise für frühere Kalt- und Warmzeiten des gegenwärtigen Eiszeitalters angenommen werden.

Droht eine neue Kaltzeit?

Selbst in wissenschaftlicher Literatur lassen sich Überschriften finden, die mit und ohne Fragezeichen von unterschiedlichen Gesichtspunkten an das Problem einer möglichen erneuten Kaltzeit herangehen und es zu fassen versuchen: »Wann kommt die nächste Eiszeit?« – »Neue Eiszeit im Kommen« und gar: »Wir leben in einer Eiszeit«.

Es ist deshalb nicht verwunderlich, wenn in Zeitschriften und Zeitungen dem Leser Darstellungen über die Eiszeiten geboten werden, die eine kommende und mögliche Eiszeit beschwören, diese noch zu unseren Lebzeiten einsetzen sehen, eine plötzliche Abkühlung für möglich halten, einen »Kälte-Blitz« konstruieren oder die nächste Kaltzeit als schon begonnen betrachten. Die starke Veränderlichkeit des Wetters und der Witterung, nasse und kühle Sommer sowie kalte oder schneereiche Winter gaben und geben immer wieder Anlaß zu solchen Fragen.

Was ist davon zu halten? Kann es eine weitere Eiszeit oder Kaltzeit geben? Wenn ja – wann könnte eine neue Kaltzeit beginnen, oder hat sie möglicherweise schon begonnen? Welche Vorstellungen gibt es dazu von wissenschaftlicher Seite?

Begriffe und Begriffe

Um diesen Fragen näherzukommen, müssen einige Begriffe sowie der Charakter der Zeit, in der wir leben, geklärt werden.

Immerhin haben wir schon festgestellt, daß wir in einem



Das sich vorschiebende Gletschereis kann jegliches Material in Oberflächennähe bis etwa 200 m Tiefe in Falten legen, dachziegelartig übereinander schieben, stauchen. Die Schreibkreide Rügens, die Braunkohlen im Muskauer Faltenbogen, aber auch eigene und von seinen Schmelzwässern abgesetzte Ablagerungen können gefaltet werden – hier sind es in Becken rhythmisch abgelagerte Tone, die solche Störungen durch das Gletschereis bezeugen (bei Belzig, Fläming).

Eiszeitalter leben. Dieser Begriff wurde 1874 von dem Engländer J. Geikie geprägt. Aus heutiger Sicht wäre darunter ein Zeitabschnitt der Erdgeschichte zu verstehen, in dem größere Bereiche unseres Erdballs vergletschert sind. Gerade aus historischer Sicht läßt sich vor unserem jetzigen Eiszeitalter eine längere Zeit der Erdgeschichte erkennen, in der Vergletscherungsspuren über das gesamte Erdmittelalter bis weit in die Tertiär-Periode hinein fehlen. Weiterhin ist sicher, daß in der jüngsten Periode der Erdgeschichte, dem Quartär, mehrfach Kalt- und Warmzeiten miteinander wechselten.

Früher und auch noch gegenwärtig wird selbst in wissenschaftlichen Veröffentlichungen statt von Eiszeiten als Gleichbegriff für Kaltzeiten von *einer* Eiszeit gesprochen. Dabei wird die gesicherte Erkenntnis der mehrfach im Wechsel mit Warmzeiten aufgetretenen Eiszeiten einfach unterschlagen oder bei der Gleichsetzung von Eiszeit oder

Vereisung und Eiszeitalter der Wechsel von Eis- und Warmzeiten begrifflich überhaupt nicht ausgedrückt. Daraus ergaben und ergeben sich viele Mißverständnisse.

Gegen den Begriff Eiszeit wurde in jüngster Zeit verschiedentlich dann Stellung genommen, wenn er auf Gebiete außerhalb direkter Inlandeis- und Gletscherbedeckung angewendet wurde und wird. Da die Auswirkungen der großen Vergletscherungszeiten erdweit gesehen werden müssen – wenn auch zwischen niederen und höheren Breiten differenziert – sollte zur Kennzeichnung des Gesamtzustandes der Begriff *Kaltzeit* als übergeordneter Begriff gebraucht werden. Gletscher- und Inlandeisausweitung nehmen zudem nur den kleineren Abschnitt einer Kaltzeit, vor allem gegen deren Ende, ein.

Wichtig ist somit festzuhalten, daß unser Eiszeitalter durch einen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten charakterisiert ist, wobei innerhalb der Kaltzeiten die Zeiten größerer und großer Gletscher- und Inlandeisentfaltung liegen.

Wenn nun die jüngsten Abschnitte der ausgehenden Tertiärzeit durch Neubildung einer Vergletscherung gekennzeichnet sind, sich der ältere und längere Abschnitt des Quartärs, das Pleistozän, durch den Wechsel von Kalt- und Warmzeiten auszeichnet, steht die Frage, wie die Zeit seit der bisher jüngsten Kaltzeit, die letzten rund 10 000 Jahre, einzuordnen ist. Dieser jüngere und kürzere Abschnitt des Quartärs, das Holozän, früher auch Alluvium genannt, wurde und wird häufig noch als Nacheiszeit oder Postglazialzeit bezeichnet. Dieser Begriff drückt aus – ohne weitere Erklärungen gebraucht –, daß die Eiszeit, oft wiederum verstanden als Gleichwort für Eiszeitalter, für beendet angesehen werden kann oder wird.

Aus der begrifflichen Unklarheit und speziell aus der Bezeichnung Nacheiszeit oder Postglazialzeit sind viele weitere Mißverständnisse erwachsen, besonders sowohl für die Darstellung des gesamten Eiszeitalters als auch für die Charakterisierung des Zeitraumes seit der jüngsten Kaltzeit.

Wird nun die Zeit seit der bisher jüngsten Kaltzeit, mithin die letzten 10 000 Jahre, in das Eiszeitalter ein-

geordnet, so ergibt sich, daß sich diese bislang 10 000 Jahre nicht prinzipiell von den Warmzeiten vor der bisher jüngsten Kaltzeit und der vor der vorletzten Kaltzeit unterscheiden. Damit sind die seit der bisher jüngsten Kaltzeit vergangenen 10 000 Jahre ebenfalls als eine Warmzeit anzusehen. Es ließe sich auch sagen: Wir leben in einer Warmzeit des gegenwärtigen (enger gesehen: des quartären – etwas weiter gefaßt: des jungkänozoischen) Eiszeitalters.

Ist eine weitere Kaltzeit möglich?

In allen Erdteilen ist der Ablauf des Eiszeitalters zu ergründen versucht worden und wird weiterhin erforscht. Wenn auch die Untersuchungen oft zu unterschiedlichen Ergebnissen führten, so erzielten sie jedoch in einem Punkt die gesicherte Übereinstimmung: Im Ablauf des Eiszeitalters traten mehrere Kaltzeiten auf, und zwischen ihnen lagen Zeitabschnitte mit einem dem heutigen ähnlichen Klima.

Zum besseren Verständnis soll einmal ein mit einem Zeitraffer ausgestatteter Beobachter im erdnahen Kosmos aus einer größeren Entfernung den Ablauf des Eiszeitalters beobachten: Außer den rasch und ständig von Halbkugel zu Halbkugel wechselnden Jahreszeiten könnte er in größeren zeitlichen Abständen wiederkehrende erheblichere Veränderungen wahrnehmen – den Wechsel von Kalt- und Warmzeiten. Diese in größeren Abständen wiederkehrenden Veränderungen betreffen jedoch beide Halbkugeln gleichzeitig.

Nach sehr langer Zeit langsamer, wenn auch bedeutender Veränderungen der Land-See-Verteilung im Erdmittelalter bis in das Tertiär entwickelten sich erst wieder im jüngeren Tertiär – zunächst nur im Südpolarbereich, später auch im Nordpolarbereich – helle Schnee-, Eis- und Gletscherbereiche, die sich schließlich im Quartär mehrmals zeitweilig bis in die mittleren Breiten ausweiteten, während sich das schwarz erscheinende Grün der Waldvegetation äquatorwärts verschob und verengte. In anderen Zeiten verkleinerten sich die hellen Schnee-, Eis-



Im Rückland von Endmoränen schürfte das Gletschereis häufig rundliche oder längliche Becken aus. Sie wurden nach dem Schwinden des Gletschereises von Seen eingenommen. Der Tegernsee in Oberbayern (BRD) ist ein solcher Zungenbeckensee am Alpenrand.

und Gletscherbereiche mehr und mehr und schrumpften entweder auf ein deutlich kleineres Ausmaß zusammen oder schwanden in verschiedenen Erdbereichen fast oder gänzlich. Dafür verschob sich das schwarz erscheinende Grün der Wälder und dehnte sich weiter polwärts aus.

Neben der Verschiebung der Vegetations- und Klimazonen, insgesamt der geographischen Zonen, wäre im

gleichen Rhythmus auch das Fallen und Steigen des Weltmeeresspiegels wahrzunehmen. Hand in Hand mit dem Fallen während der Kaltzeiten ging ein Zurückweichen des Meeres aus den Flachmeerbereichen, mit dem Steigen bis in die Warmzeit hinein eine Überflutung der tiefliegenden meeresnahen Gebiete.

Der verhältnismäßig rasche Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten wirkte auf Pflanzen- und Tierwelt in ähnlichem Maße. In den Kaltzeiten wichen die Tier- und Pflanzenwelt vor dem vordringenden Gletschereis in klimatisch günstigere Gebiete äquatorwärts aus. Bei ihren erzwungenen Wanderungen nutzten sie auch die vielfältigen neuen Landverbindungen, die der sinkende Meeresspiegel trocken werden ließ, wie beispielsweise die in den Kaltzeiten landfeste Bering-Straße zwischen Asien und Nordamerika oder den Sunda-Schelf und die Torres-Straße zwischen Asien und Australien. Über die Bering-Straße wanderte in der jüngsten Kaltzeit unter anderem schließlich der Mensch nach Amerika hinüber, und über weitflächige Landbereiche wurde auch Australien erreicht.

Kaum waren Tier- und Pflanzenwelt in ihrer neuen Umgebung heimisch geworden, so veranlaßte die umgekehrte Klimaänderung aus den dort wieder existenzungünstiger gewordenen Gebieten Rückwanderungen in die ihnen gemäßen Bereiche. Das steigende Meerwasser überflutete die kaltzeitlichen Landverbindungen und unterbrach Wanderbewegungen. Ost-West verlaufende Gebirge und Meere (z. B. das Mittelmeer), die es vor allem in Europa gibt, hemmten und behinderten die Wanderungen. Im Gegensatz zu Nordamerika mit seinen breiten, gebirgsfreien Wandermöglichkeiten nach Süden und zurück nach Norden verringerte sich deswegen in Europa die Artenfülle in der Pflanzen- und Tierwelt besonders stark.

Alle genannten Erscheinungen – wie die Wiedereinwanderung des Waldes in unsere Breiten, das Ansteigen des Meeresspiegels nach der jüngsten Kaltzeit – vollzogen sich in ähnlicher Weise wie in vorhergehenden Warmzeiten.

Es erhebt sich nun nachdrücklich die Frage, ob nach dem eindeutig mehrfachen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten

dieser Wechsel gerade mit unserer Warmzeit zum Erliegen gekommen ist, das Eiszeitalter endet oder schon beendet ist, oder ob Kalt- und Warmzeiten in der nächsten Zeit der Erdgeschichte weiterhin miteinander wechseln werden – kurz: ob eine nächste Kaltzeit droht.

Aus allem bisher gesammelten Material, aus allen bisherigen Beobachtungen, aus allen wissenschaftlichen Erkenntnissen, die knapp skizziert wurden, zogen viele Forscher den Schluß, daß eine nächste Kaltzeit in einem gesellschaftlich unbeeinflußten Ablauf durchaus wahrscheinlicher ist als das Ende des Eiszeitalters. Mit dieser Frage beschäftigen sich Wissenschaftler in aller Welt, suchen nach einer Theorie, diese Erscheinung zu fassen und über weitere Erkenntnisse der menschlichen Gesellschaft eine Orientierung zur Einschränkung der Folgewirkungen einer Kaltzeit zu geben. Mit der Suche nach den Ursachen von Kaltzeiten, dem Fortschreiten der Erkenntnis sowie der weiteren Entwicklung der Produktivkräfte kann es sogar gelingen, die Auswirkungen einer erneuten Kaltzeit erheblich zu mindern und möglicherweise die Auslösung einer neuen Kaltzeit überhaupt zu verhindern.

Insgesamt sollten wir von der Annahme ausgehen, daß eine weitere Kaltzeit im Bereich des Möglichen liegt.

Hat die nächste Kaltzeit schon begonnen?

Diese Frage ist nicht nur im Blätterwald der Zeitungen gestellt worden. Sie muß ernsthaft geprüft werden.

Unsere bisherige Warmzeit war keineswegs frei von erheblichen Klimaänderungen. Nach dem Ende der bisher jüngsten Kaltzeit (vor rund 10 000 Jahren) stockten in unserem Raum Wälder ohne natürliche Unterbrechung. Ein etwa 3 000 Jahre währendender Zeitabschnitt (7 500 bis 4 500 Jahre vor heute) zeichnete sich in unserer Warmzeit durch ein deutlich wärmeres Klima als das heutige aus.

Die Jahresmittel- und Sommertemperatur lag 2 bis 3 grd über den heutigen Werten.

In West- und Mitteleuropa war es mäßig feucht, in Osteuropa niederschlagsärmer. Während dieser Periode, in

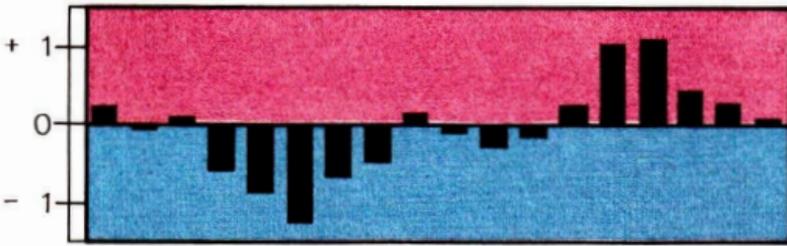


Im Rückland von Endmoränen, die ehemalige Gletscherränder markieren, können sich Drumlins oder Drums – geformt von dem sich vorschiebenden Gletschereis – bilden. Entweder werden ältere Erhebungen zu stromlinienartigen Körpern umgeprägt, oder es kann Material aus den schuttüberlasteten unteren Gletscherpartien ausgeschieden und zu Drumlins überformt werden. Drumlins im Rückland der Pommerschen Endmoräne in der Nähe von Chorin (oben) und im nördlichen Alpenvorland

der das Klimaoptimum unserer bisherigen Warmzeit lag, überzog der Eichenmischwald mit Edellaubhölzern weit hin West- und Mitteleuropa. Zuvor hatten sich in einem ebenfalls sommerwarmen, aber trockneren Klimaabschnitt bereits sehr haselreiche Kiefern-Laubholz-Mischwälder eingefunden.

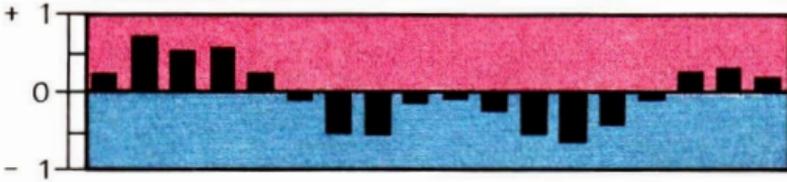
Lufttemperatur-Abweichung
vom Säkularmittel 1771 - 1970

Januar



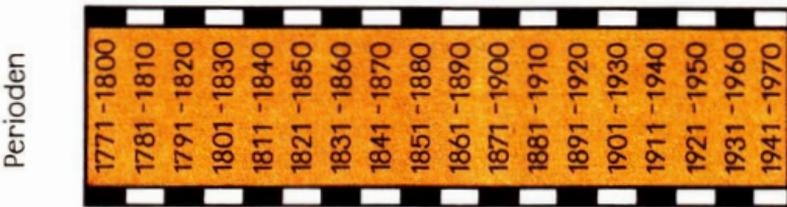
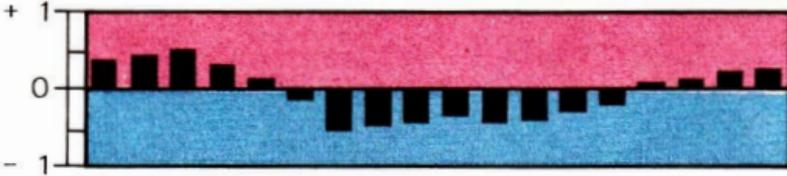
Lufttemperatur-Abweichung
vom Säkularmittel 1771 - 1970

Juli



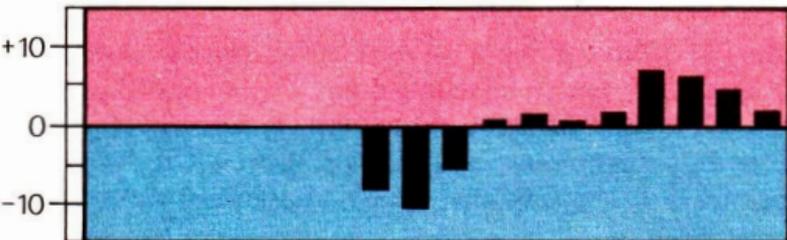
Lufttemperatur-Abweichung
vom Säkularmittel 1771 - 1970

Jahr



Relative Niederschlags-Abweichung
vom Säkularmittel 1841 - 1970

Jahr



Auf das Klimaoptimum unserer Warmzeit folgte ein erheblicher Temperaturrückgang, der bereits ab etwa 4000 Jahre vor heute einsetzte und schließlich zur früh-eisenzeitlichen Kälteperiode (rund 3000 bis 2500 Jahre vor der Gegenwart) führte. Die Vergletscherung der Gebirge erreichte die erste starke Ausdehnung seit Ende der bisher jüngsten Kaltzeit. Jahresmittel- und Sommertemperatur lagen wohl um etwa 1 grd niedriger als die heutigen. Eine weitere Klimaverschlechterung hätte geradewegs in eine Kaltzeit führen können.

Weitere Klimaänderungen – nun wieder zur »erfreulichen« Seite hin – führten zu einem mittelalterlichen Klimaoptimum mit Höhepunkten vor 1500 bis 1400 Jahren und 1000 bis 800 Jahren vor heute. Wohl etwas geringerer Niederschlag, Jahresmitteltemperaturen um etwa 1 grd höher als heute, warme Übergangsjahreszeiten und eine um 4 bis 5 Breitengrade nördlicher verlagerte Weinbaugrenze charakterisierten diese Zeit. Sicherlich begünstigte dieses Klima auch die Fahrten der Wikinger nach Grönland und zum nordamerikanischen Kontinent.

Ein heutzutage als »Kleine Eiszeit« bezeichneter Zeitabschnitt, der vor nicht ganz 500 Jahren begann und sich mit immer wieder auftretenden Kälterückfällen bis fast zu Beginn unseres Jahrhunderts fortsetzte, wies die wohl niedrigsten Temperaturen seit dem Ende der bisher jüngsten Kaltzeit auf, vor allem zwischen den Jahren 1550 und 1700 u. Z. Die Sommer- und Wintermitteltemperaturen lagen gegenüber den heutigen Werten um etwa 1,5 grd niedriger. In den Alpen erreichten die Gletscher seit der bisher jüngsten Kaltzeit ihre größte Ausdehnung (um 1850). Die Auswirkungen der »Kleinen Eiszeit« waren vielfältig und folgenreich. Wäre die erdwissenschaftliche Forschung damals schon weiter entwickelt gewesen, so hätten die Schlagzeilen der Zeitungen sicherlich den baldigen Beginn einer neuen Kaltzeit prophezeit.

Variationen von Lufttemperaturen (in °C) und Niederschlag (in %) an der mitteleuropäischen Station Praha-Klementinum (nach Primärdaten von V. Hlavač 1966 und L. Křivský 1957 sowie unter Verwendung von Manuskriptdaten des »Hydrometeorologický Ústav Praha«, Originalentwurf M. Hendl, 1978).

Die erste Hälfte unseres Jahrhunderts war jedoch durch eine deutliche Wärmeperiode charakterisiert.

Gehäuft traten milde Winter auf; zunächst (bis etwa 1930) kühle, danach ausgesprochen warme Sommer. Der Niederschlag erhöhte sich. In den Alpen und vielen anderen Gebirgen der Erde wichen die Gletscher stark zurück. »Die Dezennienmittelwerte der Lufttemperatur in Zentraleuropa zeigten an der Bezugsstation Praha-Klementinum Abweichungen bis $+1,16^{\circ}\text{C}$ im Winter und bis $+0,69^{\circ}\text{C}$ im Sommer vom säkularen Mittelwert der Periode 1771...1970; das wärmste Winterdezennium war 1912...1921, das wärmste Sommerdezennium 1944...1953« schrieb M. Hendl 1978. Diese Wärmeperiode ist abgeschlossen und hat nachweislich kühleren Verhältnissen mit einer Temperaturenniedrigung Platz gemacht.

Aus dem Verlauf unserer Warmzeit mit durchaus beträchtlichen Klimaschwankungen lassen sich keinerlei begründete Schlüsse auf den Beginn einer weiteren Kaltzeit ziehen. Auf jeden Fall weist die Existenz der wärmeliebenden laubholzreichen Bewaldung unseres Gebietes (mit Ausnahme vor allem der Birke) die Ansicht zurück, daß die nächste Kaltzeit bereits begonnen habe.

Warum kommt das Gletschereis?

Wenn nach dem jetzigen Kenntnisstand die Ansicht vertreten wird, daß die nächste Kaltzeit noch nicht begonnen hat, so läßt sich jedoch nach dem Einsetzen einer weiteren möglichen Kaltzeit fragen.

Diese Frage zu stellen, ist keineswegs überflüssig. Allein aus der weitesten Ausdehnung des bisher jüngstkaltzeitlichen Inlandeises läßt sich ermessen, welche riesigen Bereiche des Festlandes unter direkte Inlandeis- und Gletscherbedeckung gerieten.

Von völliger oder nahezu völliger Bedeckung durch Gletschereis bedrohte Länder sind Kanada, Grönland, Island, Irland, Großbritannien, Norwegen, Schweden, Finnland, Dänemark, Schweiz, Liechtenstein, Nepal, Sikkim, Bhutan und Neuseeland.

Von Gletscherbedeckung auf größeren Flächen wären teilweise folgende Länder betroffen: USA (Norden und Westen), Mexiko, UdSSR (Nordwesten, südliche und östliche Gebirge), VR Polen (besonders im Norden), DDR (Norden), BRD (Nordosten und Süden), Österreich, Italien (Norden), Afghanistan, Pakistan (Norden), Indische Union (Norden), VR China (besonders im Westen), Australien (kleine Bereiche im Osten), Kolumbien, Argentinien und Chile.

Weitere Bereiche mit kleinflächig möglicher Vergletscherung in Europa, Asien, Ozeanien, Afrika und Südamerika bleiben dabei unberücksichtigt.

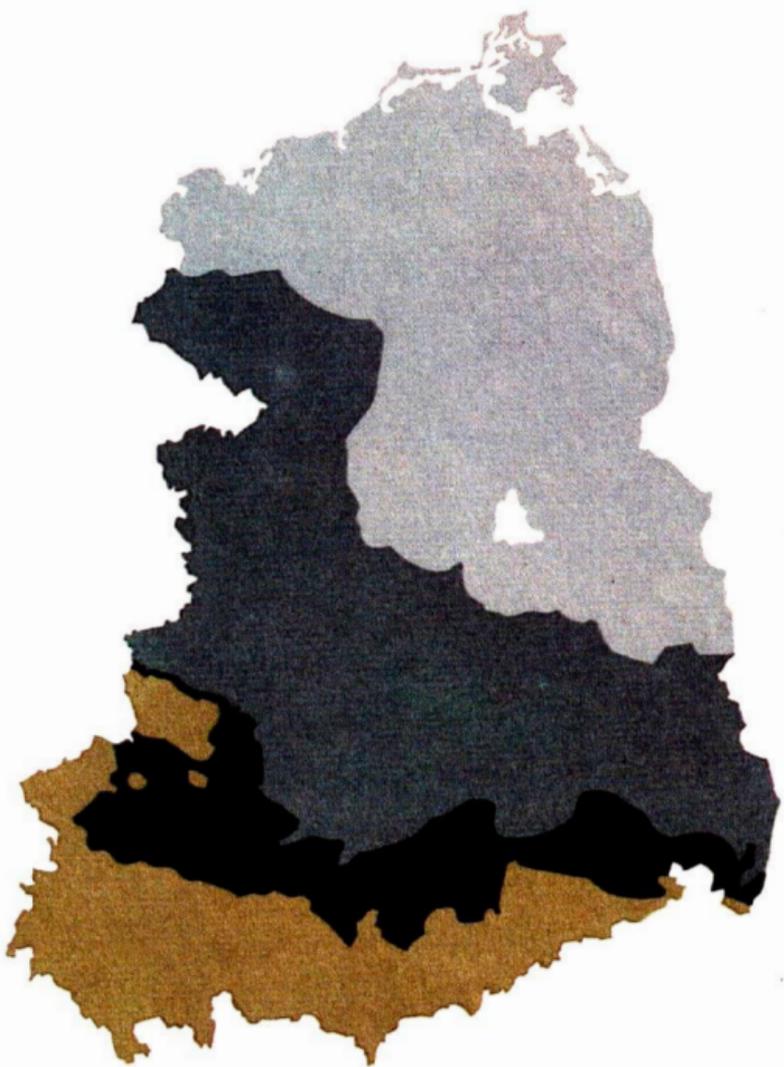
Um die Verhältnisse für unser Land genauer zu kennzeichnen, ließe sich für den Fall einer gleich weit nach Süden reichenden Ausdehnung des Inlandeises wie in der bisher jüngsten Kaltzeit aus folgenden Örtlichkeiten eine

Linie bilden: Diese südliche Begrenzungslinie verlief ungefähr vom Süden des Schaal-Sees über das Südende des Schweriner und des Plauer Sees, über Havelberg, die Gegend östlich von Genthin, südlich von Brandenburg zum Südende des Schwielow-Sees südwestlich von Potsdam, von dort nach Luckenwalde, in die Gegend nördlich von Baruth und durch den Spreewald bis südlich von Wilhelm-Pieck-Stadt Guben. Es wären etwa 30 % unseres Landes, die das Gletschereis in solch einem Falle bedecken würde! Allerdings wäre ein geringeres Vordringen nicht auszuschließen, ebenso läge jedoch auch eine noch südlichere Ausdehnung im Bereich des Möglichen, wie es vor allem in unserem Lande während der Elster-Kaltzeit und – etwas eingeschränkter – der Saale-Kaltzeit der Fall war.

Aber das Inlandeis muß nicht einmal bis an unsere Ostseeküste vordringen: mit der Klimaverschlechterung, mit dem Einfluß des Inlandeises auf sein Umland träten zahlreiche Folgewirkungen, wie beispielsweise Waldlosigkeit, Dauerfrostboden und andere kaltzeitliche Vorgänge, auf (Periglazialklima mit periglaziären Vorgängen und Bildungen; peri, griech. = um, herum; glacies, lat. = Eis).

Allein die Folgen einer nicht einmal unser Land unmittelbar bedrohenden Ausdehnung des Inlandeises wären so ungeheuer, so gewaltig und zerstörerisch für die gesamte Menschheit, daß die menschliche Gesellschaft und in ihr vor allem die Geowissenschaftler eine Erörterung und zielgerichtete Forschung nach den Ursachen von Eiszeitaltern und dem Wechsel von Kalt- und Warmzeiten nicht mehr nur als akademische Frage ansehen können.

Selbst wenn der Beginn einer nächsten Kaltzeit – vielleicht überspitzt gesehen – möglicherweise im kommenden Jahrtausend zu erwarten ist, muß die Forschung nach den Ursachen der Kaltzeiten doch schon jetzt zielbewußt vorangetrieben werden. Ist unter anderem doch noch nicht einmal genau bekannt, ob die »Kleine Eiszeit« vorbei ist oder ob sie sich nicht nach dem kurzen, wärmeren Zeitabschnitt in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts bereits fortsetzt. Weiterhin dauert unsere Warmzeit schon rund 10 000 Jahre an, und neuere Forschungen über den Wechsel von Warm- und Kaltzeiten in unserem Eiszeitalter errechneten gar aus der vermuteten Länge eines Kalt- und



-  Bereich des weichselkaltzeitlichen Inlandeises und des saale- und elsterkaltzeitlichen Inlandeises
-  Bereich des saalekaltzeitlichen Inlandeises und des elsterkaltzeitlichen Inlandeises
-  Bereich des elsterkaltzeitlichen Inlandeises
-  Gebiet der DDR, das nie vom Inlandeis bedeckt war

Maximale Ausdehnung der nordeuropäischen Vergletscherungen auf dem Gebiet der heutigen DDR (aus J. Marcinek u. B. Nitz, 1973)



Der in trockenen und kalten Phasen der Kaltzeiten vom Wind transportierte feine Staub, der in riesigen Decken abgesetzt wurde, trägt heute weithin sehr fruchtbare Böden. Er wird auf allen Kontinenten (außer Antarktika) von der Landwirtschaft besonders geschätzt; hier ein Lössbodenprofil bei Köchstedt (westl. von Halle)

Warmzeit-Abschnittes den Beginn einer nächsten Kaltzeit noch für das kommende Jahrtausend. Nach J. Kukla (1968) soll unsere Warmzeit, das Holozän, etwa in den Jahren zwischen 2500 und 3000 unserer Zeitrechnung enden.

Was uns Lößserien berichten

Zu den wichtigsten Ablagerungen, die während der Kaltzeiten im Periglazialraum, also im gletscherfreien, aber kaltklimatisch stark beeinflussten Bereich, entstanden, zählt der Löß. Der meist gelbliche Löß besteht überwiegend aus kleinen Quarzkörnchen, die von einer Kalkkruste umhüllt sind. In den eisferneren Räumen, in denen während der trockenkalten Abschnitte der Kaltzeiten Gräser und Kräuter weithin und ziemlich geschlossen das Land überzogen (Lößtundra, Lößsteppe, Waldtundra bis Waldsteppe und Steppe, z. B. im nördlichen Europa und Asien), schlug sich der vom Wind herangewehte Löß nieder. Durch Ferntransport, aber teilweise auch nur über kürzere Entfernungen, wurde überwiegend grobschluffiges Material (Korngröße: 0,063 bis 0,02 mm) in sich weithin erstreckenden Decken abgesetzt und ausgebreitet. Auf Löß entwickelten sich unter entsprechend warmzeitlich klimatischen Verhältnissen, wie beispielsweise in unserem Land, in großer Ausdehnung ertragreichste Böden (z. B. im nördlichen und östlichen Harzvorland und im inneren Thüringer Becken).

Während jeder Kaltzeit des Eiszeitalters wiederholte sich – mit Unterbrechungen – die Lößanwehung. In jeder Warmzeit entstand unter feuchteren Verhältnissen durch die Abfuhr des Kalkes in tiefere Bereiche der braune Lößlehm. Wenn solche Ablagerungsfolgen im Löß erhalten sind, wechseln im Bodenprofil hellgelber Löß und brauner Lößlehm übereinander ab.

In der ČSSR konnte an günstigen Stellen, vor allem in Geländevertiefungen, eine sich mehrfach wiederholende Folge solcher Ablagerungen festgestellt werden. In jeder dieser Schichtenfolgen wurde ein gesetzmäßiger Ablauf, der einzelne Phasen kennzeichnet, entdeckt. Ein völlig ausgebildeter Zyklus umfaßt in Geländevertiefungen sechs

Die Vegetationszonen Europas während des Höchststandes der bisher jüngsten Kaltzeit (nach B. Frenzel, 1960). Die schwarzen Punkte innerhalb der Inlandeisfläche sind Inseln oder kompliziert verlaufende Küstenlinien.

Inlandeis und Gletscher während des
Höchststandes der jüngsten Kaltzeit

jüngstkalzeitliche Küstenlinie
(meist 100m - Isobathe)

Seen und Binnenmeere,
bewiesen

Frostschutt - Tundra

zwergrauschreiche Tundra
mit Steppengesellschaften

Lößtundra

Wald- und Strauchtundra

Waldsteppe - Waldtundra

Taiga, borealer Nadelwald

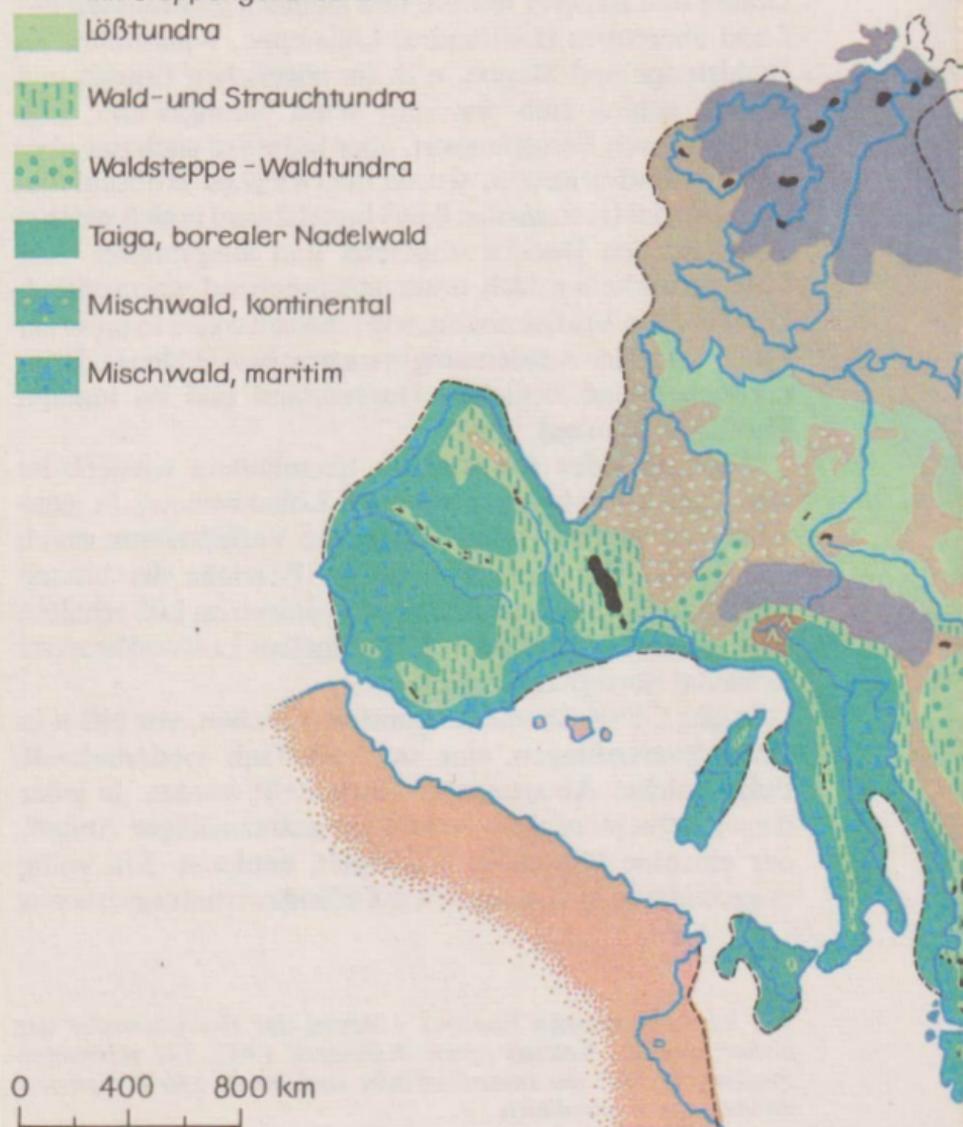
Mischwald, kontinental

Mischwald, maritim

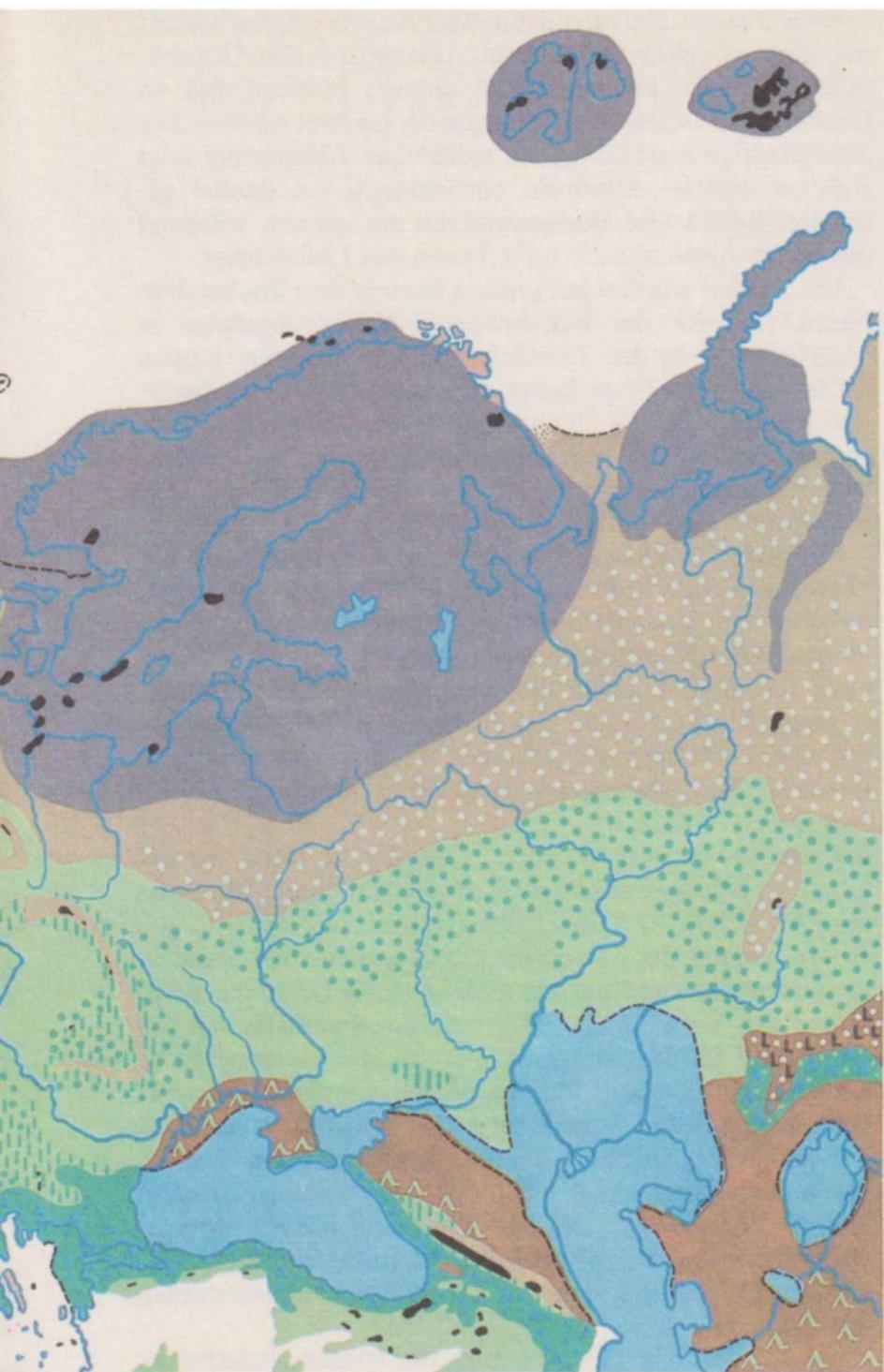
kühle Steppe,
Taigahaine

Steppe

Waldsteppe



0 400 800 km



solcher Phasen. Bei unvollständiger Ausbildung vertritt oft nur eine zweifach gegliederte Ablagerung den Gesamtzyklus. Sie ist besonders auf ebenen Flächen und an Rändern von Geländevertiefungen beobachtet worden. Die zweigliedrige Ausbildung der zyklischen Ablagerung setzt sich im unteren Abschnitt vornehmlich aus dunkel gefärbten Böden und Bodenabsätzen zusammen, während der obere Abschnitt die helle Farbe des Lößes zeigt.

Die Zyklen wurden mit großen lateinischen Buchstaben bezeichnet. An der bekanntesten Ablagerungsfolge in Mitteleuropa, in der Ziegeleigrube von Červený Kopec (Roter Berg) bei Brno, ließen sich acht solcher abgelaufenen Zyklen, die die Buchstaben B bis I erhielten, feststellen. Der Buchstabe A kennzeichnet den mit unserer Warmzeit beginnenden Zyklus (vor rund 10 000 Jahren). Inzwischen sind wenigstens 12 solcher Zyklen bekannt.

Für jeden Zyklus, der jeweils die Ablagerungen einer Warm- und einer Kaltzeit umfaßt, sollte die Dauer ermittelt werden, um zu einer absoluten Zeitbestimmung zu gelangen. Allerdings wurde vorausgesetzt, daß alle Zyklen etwa die gleiche Länge besitzen. Es wurden seinerzeit folgende Methoden und Fakten benutzt:

mit der Radiokarbon-Methode (^{14}C -Methode) ermittelte Daten für die Lößablagerungen in den letzten 30 000 Jahren von Dolni Věstonice,

mit der Radiokarbon-Methode festgestellte Daten für die humosen Böden von Dolni Věstonice mit einem Alter von minimal 52 000 bis 55 000 Jahren vor heute,

Isotopendaten der Uranreihe für Korallen- und Meeresstrandterrassen an tropischen Meeren. Sie geben das Alter von zwei wesentlichen Meeresspiegelhochständen zu 80 000 und 120 000 Jahren v. u. Z. an. Die nachgewiesene Gleichzeitigkeit der Meeresspiegelhochstände unserer Warmzeit mit der Entwicklung von Waldböden auf Löß ermöglicht die Annahme der Gleichzeitigkeit von Meeresspiegelhochständen und Waldbodenentwicklungen auch in älteren Warmzeiten. Bei der Datierung älterer Meeresspiegelhochstände ergibt sich somit automatisch die altersmäßige Einordnung des in der Abfolge zugeordneten Waldbodens.

Mit der zeitlichen Bestimmung der letzten Umkehr des



Erhält Gletschereis keinen Nachschub mehr und wird bewegungslos, kann Schmelzwasser auf, im und unter dem Gletschereis ausfließendem Wasser abgesetzte, langgestreckte Ablagerungen hinterlassen. Nach Abschmelzen des Gletschereises bilden diese Absätze bahndammähnliche – auch gewundene – Wälle, sogenannte Oser. – Os im Norden der VR Polen

Magnetfeldes der Erde und der Fassung dieser Umkehr im Profil von Červený Kopec ergab sich ein weiterer Anhaltspunkt für die zeitliche Einordnung.

Selbstverständlich schloß sich an die Ermittlung und Übertragung von Werten aus unterschiedlichen Beobachtungen (z. B. Verlauf der Kurve der Oberflächentemperatur des Meeres für die Vergangenheit nach C. Emiliani u. a.) eine kritische Auseinandersetzung über die zeitliche Einordnung an. In deren Gefolge gelangte J. Kukla zu der Feststellung, daß das klimatische Optimum während der Warmzeit vor der bisher jüngsten Kaltzeit, also das der Eem-Warmzeit, in Verbindung mit dem Meeresspiegelhochstand auf 120 000 und nicht auf 80 000 Jahre vor heute zu datieren sei. Da nun das Klimaoptimum unserer Warmzeit mit der entsprechenden Waldbodenbildung (Parabraunerde) – durch ^{14}C -Daten erhärtet – im Zeitraum 6 000 bis 5 000 Jahre vor heute lag, beträgt der Zeitraum des letzten Zyklus (= B, Eem-Warmzeit + Weichsel-Kaltzeit) rund 115 000 Jahre.

Aus vielfältigem Material leitete J. Kukla eine gleichlange Dauer und einen ähnlichen Ablauf der Zyklen von ungefähr 120 000 Jahren ab. Eine wesentliche Ursache und bedeutungsvolle Stütze für die aus datierbaren Beobachtungen abgeleitete Zeitdauer eines Zyklus sah er in sogenannten astronomischen Ursachen, in der Änderung des Trends in der Winterbestrahlung für die Nordhalbkugel, die sich periodisch alle 116 000 bis 117 000 Jahre wiederholt. Danach setzte J. Kukla den Beginn folgender Zyklen fest:

- Zyklus A auf 10 500 Jahre vor heute,
- Zyklus B auf 128 000 Jahre vor heute,
- Zyklus C auf 242 000 Jahre vor heute,
- Zyklus D auf 370 000 Jahre vor heute,
- Zyklus E auf 486 000 Jahre vor heute,
- Zyklus F auf 602 000 Jahre vor heute.

Die bisher letzte Umkehr des Magnetfeldes liegt zwischen 700 000 und 1 000 000 Jahre vor heute. Durch paläomagnetische Messungen konnte sie in Červený Kopec etwa im oberen Bereich des Zyklus I erfaßt werden. Bei Annahme gleichlanger Zyklen liegt der Grenzbereich der magnetischen Umkehr bei $(7 \times 120\,000) + 5\,000$ Jahren, bei rund 850 000 Jahren vor heute. Der Zeitpunkt bestätigt die Annahme gleichlanger Zyklen. Heute wird die letzte Umkehr des Magnetfeldes auf etwa 690 000 Jahre datiert.

Insgesamt wurde schließlich die Wiederholung des jeweils eine Warm- und Kaltzeit umfassenden Zyklus auf die Änderung des Trends der Winterbestrahlung für die Nordhalbkugel zurückgeführt. Da seine periodische Wiederkehr alle 116 000 bis 117 000 Jahre eintritt und die gegenwärtige Warmzeit vor 10 500 Jahren begonnen hat, konnte der Anfang des Zyklus B auf rund 128 000 Jahre vor heute festgelegt werden. Die periodische Wiederkehr der Änderung in der Winterbestrahlung der Nordhalbkugel beginnt jeweils mit einer positiven Abweichung, die ungefähr 10 000 Jahre andauert und mit einer Warmzeit gleichgesetzt wird. Für die Warmzeit vor der bisher jüngsten Kaltzeit dauerte dieser positive Trend von 127 800 bis 116 100 Jahre vor heute. Somit wurde das Einsetzen der Warmzeit vor der bisher jüngsten Kaltzeit auf ungefähr 128 000 Jahre $(10\,500 + 117\,000)$ festgelegt und der Beginn der bisher jüngsten Kaltzeit auf 116 000 Jahre vor heute angesetzt.

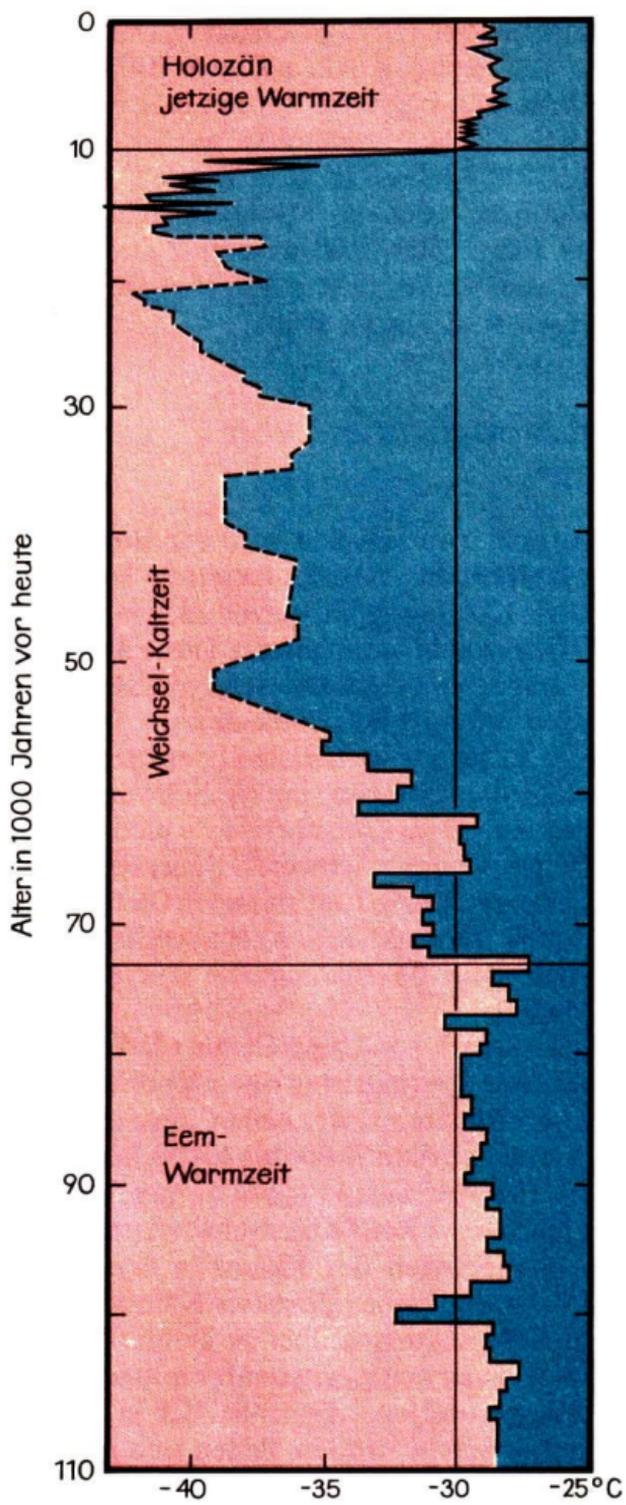
Unter der Annahme einer etwa gleichlangen Dauer auch der Warmzeiten, die nach J. Kukla auf etwa 10 000 Jahre währende Zeitabschnitte begrenzt werden und in denen erdweit mindestens solche Verhältnisse wie in den vergangenen letzten 10 000 Jahren erreicht wurden, wird die gegenwärtige Warmzeit oder das »Holozän-Interglazial« ... »ungefähr im Jahre 2500–3000 unserer Zeitrechnung enden, insofern seine Dauer nicht durch künstliche Eingriffe verlängert wird« (J. Kukla, 1968).

Die »Gletschereischronik« von Camp Century

Entgegen der Ansicht von J. Kukla wird der Beginn der bisher jüngsten Kaltzeit aus vielerlei datiertem Beobachtungsmaterial und Überlegungen gewöhnlich auf rund 75 000 bis 70 000 Jahre vor heute angesetzt. Diese Annahme wird durch die Ausdeutung eines Gletschereis-Bohrkerns einer 1 390 m tiefen Bohrung im grönländischen Inlandeis bei Camp Century in Nordwest-Grönland gestützt.

Anzeiger für Klimaänderungen sind die Schwankungen des Sauerstoffisotops ^{18}O im Gletschereis. Je niedriger die Temperaturen, umso weniger schweren Sauerstoff (^{18}O) enthält das Gletschereis. Der in Luftblasen im Gletschereis festgehaltene Anteil radioaktiven Kohlenstoffs wurde gemessen und mit ihm die Bildungszeit des jüngeren Gletschereises datiert.

Im langen Eis-Bohrkern von Camp Century ließ sich die starke und andauernde Verringerung des schweren Sauerstoffs im Gletschereis während der bisher jüngsten Kaltzeit für den Zeitraum von rund 70 000 bis 10 000 Jahren vor heute feststellen. Darüber hinaus konnten innerhalb der bisher jüngsten Kaltzeit weitere Klimaschwankungen und auch zahlreiche Änderungen des Klimas in den Warmzeiten vor und nach der bisher jüngsten Kaltzeit erfaßt werden. Auch die Schwankungen, über die bereits Berichte sowie Beweise aus anderweitig gewonnenem und datiertem Material vorliegen und jene, die schließlich in jüngster Zeit in Messungen ermittelt wurden, ließen sich in dieser »Gletschereis-Chronik« wiederfinden. Natürlich kann die



»Gletschereis-Chronik« zeitlich nicht übermäßig ausgedehnt werden, denn der Umschlag des Gletschereises in den Gletschern und Inlandeisen innerhalb des Wasserkreislaufes ist zeitlich begrenzt. Für das antarktische Inlandeis wird mit einer Umschlagdauer von rund 200 000 Jahren für die zentralen Partien des Inlandeisschildes gerechnet, d. h., älteres Gletschereis tritt insgesamt auf der Erde nicht auf.

Solche Bohrungen wie in Grönland wurden in der Zwischenzeit auch im antarktischen Inlandeis niedergebracht, so z. B. von sowjetischen Forschern bei der Station Wostok, weit von der Küste entfernt im Inlandeis Ostantarktikas.

Bei einer genaueren Untersuchung der »Gletschereis-Chronik« durch die dänischen Forscher zeigten sich beispielsweise zwei sich überlagernde Zyklen, die sich im Laufe von 80 und 180 Jahren wiederholen. Die erhöhte Wärme in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts wird auf das Zusammentreffen der Warmphasen beider Zyklen und die damit verbundene Verstärkung zurückgeführt.

Seit 1939 ließ sich jedoch wieder eine erhebliche Abnahme des Anteils schweren Sauerstoffs im Gletschereis Grönlands feststellen. Auswirkungen der augenblicklichen Temperaturenniedrigungen zeigen sich bereits in einer erschwerten Befahrung der nördlichen Schifffahrtswege.

Es wäre nun zu fragen, ob die beiden entdeckten Zyklen entsprechend in die Zukunft projiziert werden können. Die unter aller Vorsicht gegebene Vorhersage läßt bis in die achtziger Jahre hinein eine spürbare Abkühlung möglich erscheinen. Ihr soll anschließend (bis etwa 2015) eine wenig ausgeprägte Erwärmung folgen, die nicht an den Wärmehöhepunkt von 1930 heranreichen soll. Danach dürfte wieder mit einer Abkühlung zu rechnen sein. Allerdings können Einflüsse der menschlichen Gesellschaft, wie vor allem die Zunahme des Kohlendioxidgehaltes in der Atmosphäre aus dem Verbrennen fossiler Energieträger

Die Schwankung des Sauerstoffisotops ¹⁸O während der letzten 110 000 Jahre nach der Eisbohrung in Camp Century im Nordwesten von Grönland (nach Dansgaard, Johnsen, Moller und Langway, 1969)

(Kohle, Erdöl, Erdgas), die Umweltverschmutzung und anderes, Änderungen bewirken.

Diese Vorhersage wurde mit aller wissenschaftlichen Vorsicht und Einschränkung vom gegenwärtigen Stand der Erforschung her gegeben. Sicherlich müssen heutzutage die Untersuchungen und Ergebnisse auch anderer Disziplinen berücksichtigt werden, wie beispielsweise die Untersuchung der jährlich gebildeten Baumringe (Dendrochronologie) und vor allem das Verhalten der Gletscher selbst (Glaziologie).

Sämtliche bisherigen Ergebnisse der Forschungen zeigen mit aller Deutlichkeit mögliche künftige Zustände. Mit diesen möglichen Zuständen muß sich die menschliche Gesellschaft auseinandersetzen. Die Veränderungen, die die Menschheit bisher auf unserem Planeten verursacht hat, und die zu erwartende Entwicklung der Produktivkräfte muß, so scheint es nach allen bisherigen Erkenntnissen, darauf gerichtet sein, einen solchen theoretischen Vorlauf zu erlangen, um sinnvoll und planmäßig in die natürlichen Abläufe eingreifen zu können. Dies gilt nicht zuletzt auch in Hinblick auf eine zukünftig mögliche nächste Kaltzeit.

In einem größeren Ausschürfungsbecken abgelagerter Oszug, dessen tiefere Umgebung von Seeflächen eingenommen wird. — Os von Punkaharju/Finnland



Hypothesen über Hypothesen

Jedermann weiß, wie schwierig es ist, trotz eines hohen technischen Aufwandes – einschließlich der sogenannten Wettersatelliten –, das Wetter in unseren Breiten vorherzusagen.

Nicht weniger problematisch ist es, die Ursachen von Eiszeitaltern und des Wechsels von Kalt- und Warmzeiten aufzuklären. Sämtliche bislang erwogenen und vorgelegten Erklärungen der Ursachen sind Hypothesen und keine Theorien, obwohl sie häufig als solche bezeichnet wurden und werden. Bisher existieren mehrere Dutzend solcher Hypothesen, solcher Erklärungsversuche. Weitere werden hinzukommen, bis eine oder mehrere von ihnen zu einer Theorie gereift ist bzw. sich über vielfache gedankliche Verknüpfungen, Erfassungen und Nachweise eine Theorie ergibt.

Im Grunde genommen geht es um Klimaänderungen, die vom Verhalten der Atmosphäre und der Hydrosphäre ausgehen. Ursachen und Folgen lassen sich auf der Grundlage des Wärme- und Wasserhaushaltes unseres Planeten untersuchen. Erklärungen der Klimaänderungen können auch von der Art der Ursachenmöglichkeiten ausgehen.

Es lassen sich drei Gruppen von Ursachen unterscheiden:

extraterrestrische Ursachen – Ursachen, die außerhalb des Erdsystems liegen, wie beispielsweise die Änderung der Intensität und Art der Sonnenstrahlung oder die Veränderung der Sonnenstrahlung im Zwischenraum zwischen Sonne und Erde. Für beide Untergruppen gibt es wiederum verschiedene Möglichkeiten, die Veränderungen herbeiführen können,

sogenannte *astronomische Ursachen*, die aus periodischen Veränderungen der Erdbahnelemente im Sonnensystem herrühren, wie aus der unterschiedlichen Dehnung der Erdbahnellipse (Exzentrizität), der Veränderung der Neigung der Erdachse zur Erdbahnebene (Ekliptikschiefe) und dem Umlauf des Frühlingspunktes (Umlauf des Perihels),

terrestrische Ursachen – Ursachen, die im System der Erde begründet sind, wie beispielsweise



Unter dem Gletschereis fließendes Schmelzwasser schnitt oft gewundene Vertiefungen in den Untergrund. Nach Konservierung der häufig kilometerlangen, langgestreckten Vertiefungen durch verschüttete Gletschereisreste (Toteiskörper) und deren Schmelzen füllten sich die Rinnenzüge mit Wasser. Rinnensee im Gamengrund nordöstlich der Hauptstadt der DDR, Berlin

Veränderungen in der Land-See- sowie Höhen-Verteilung an der Erdoberfläche mit verschiedenen Möglichkeiten,

Veränderungen in der Bodenbedeckung,

stoffliche Veränderungen in der Atmosphäre und im Weltmeer,

Vorgänge aus dem Erdinneren, die sich an der Erdoberfläche und in der Atmosphäre auswirken, wie beispielsweise vulkanische Ereignisse oder der Erdwärmestrom.

In den Erklärungsversuchen, den Hypothesen, scheint an sämtliche Möglichkeiten von Ursachen gedacht worden zu sein. Doch hat keine der bisherigen, oft sehr interessanten, häufig aber auch sehr umstrittenen Hypothesen die Ursachen insgesamt befriedigend zu erklären vermocht.

Seitdem die Kaltzeiten über den Nachweis von großen Gebirgsgletscherungen und die Bildung und Ausdeh-

nung der riesigen Inlandeise auf der Nordhalbkugel erkannt wurden, hat es nicht an Versuchen gefehlt, ihre Ursachen zu finden. Eine Reihe von Erklärungsversuchen besitzt ihren Ursprung in Hypothesen, die bereits im vergangenen Jahrhundert entwickelt wurden.

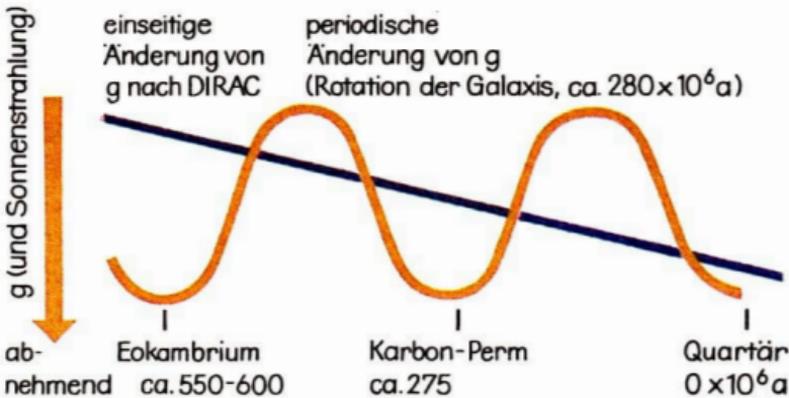
Die Eiszeitalter und ihre vielfältigen Auswirkungen, d. h. die großen Klimaschwankungen der Erdgeschichte, sind ohne Zweifel ein Forschungsgebiet vorwiegend der Geologen, das jüngste Eiszeitalter ein Forschungsbereich auch der Geographen. »Aber der größte Teil der *Eiszeithypothesen* stammt merkwürdigerweise nicht von Geologen und auch nicht von Meteorologen, sondern ausgerechnet von den Vertretern exakter Naturwissenschaften: von Physikern, Geophysikern, Astronomen. Die Ursache liegt wohl nicht darin, daß die Geologen zu wenig Phantasie und Einbildungskraft haben. Vielmehr ist einer der Gründe darin zu sehen, daß sie besser als die Nichtgeologen überblicken, wie unsicher und zwangsläufig auch ganz lückenhaft die Beobachtungstatsachen sind, und daß sie daher gar nicht wagen würden, darüber ein Gedankengebäude zu errichten, das dem Fernerstehenden leicht aus der Feder fließt (wenn man so sagen darf); denn je weniger man weiß, desto leichter entsteht eine Hypothese. Eine zweite Ursache liegt in der Tatsache, daß weiterführende Gedanken auch sonst eher von den Nachbarwissenschaften kommen« schrieb M. Schwarzbach 1968.

Um heutzutage zu den Ursachen der Eiszeitalter und mit Sicherheit zu den Ursachen für unser Eiszeitalter vorzustoßen und eine Hypothese oder gar eine Theorie zu entwickeln, muß mindestens folgendes bedacht werden: Es muß der mehrmalige Wechsel von Kalt- und Warmzeiten im quartären oder jungkänozoischen Eiszeitalter in die Deutung einbezogen werden.

Während des mehrmaligen Wechsels von Kalt- und Warmzeiten muß die Gleichzeitigkeit der Ausbreitung von Gletschern und Inlandeis auf der Nord- und Südhalbkugel erklärt werden. Sie ist für die weiteste Ausdehnung von Gletschern und Inlandeisen während der bisher jüngsten Kaltzeit, für weitere Klimaschwankungen der ausklingenden jüngsten Kaltzeit und für die unserer Warmzeit be-

Gravitationskonstante g (nach DIRAC)	abnehmend \Rightarrow
Volumen der Erde	zunehmend (Expansion) \Rightarrow
Sonnenstrahlung	abnehmend \Rightarrow
Pasc. Jordan	geschlossene Wolkendecke Hagel am Äquator und Gletscher

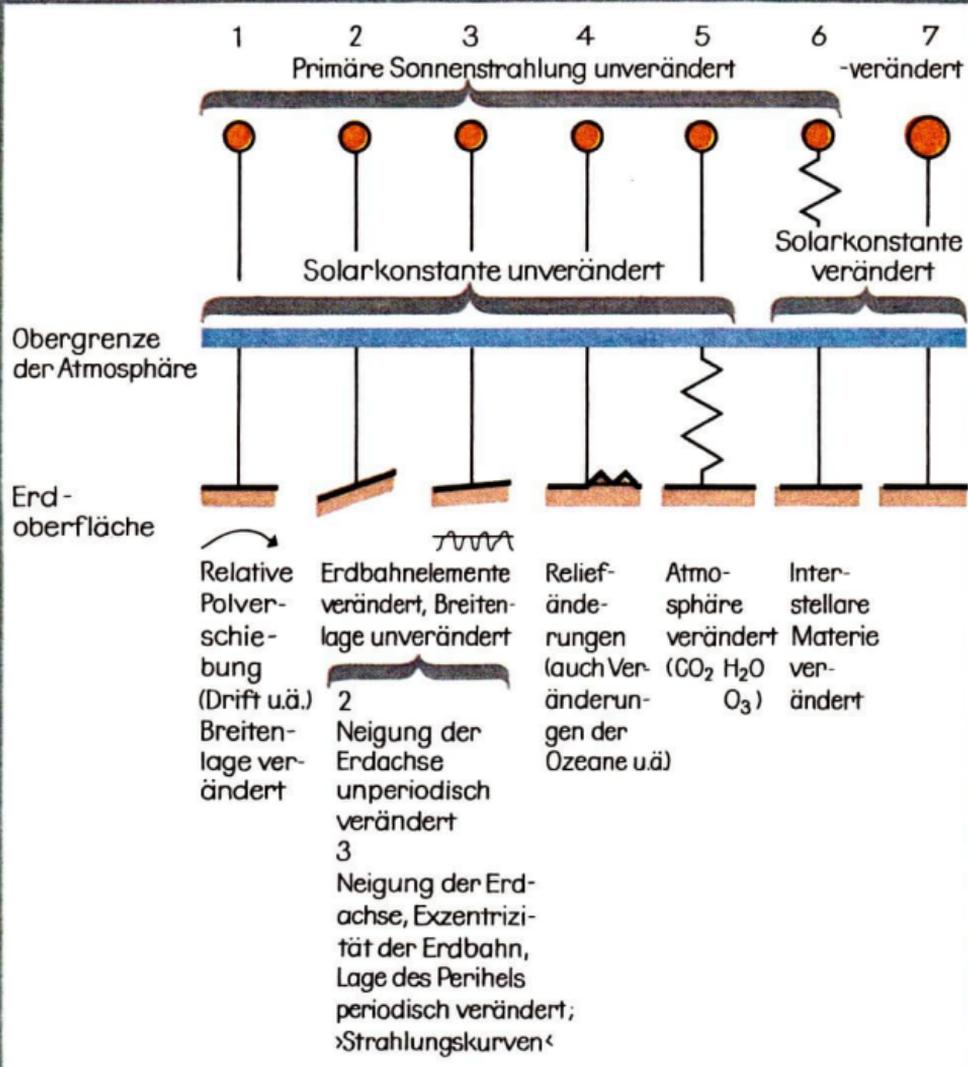
Präkambrium Karbon-Perm Quartär



Mögliche Eiszeithypothesen (nach M. Schwarzbach, 1968)

wiesen. Sie dürfte auch für den Ablauf der älteren Kalt- und Warmzeiten im Quartär gelten.

Es kann fernerhin nicht nur das quartäre oder jungkänozoische Eiszeitalter für sich allein betrachtet werden. Vielmehr muß das Auftreten wenigstens der beiden, zeitlich genau eingeordneten Eiszeitalter der Erdgeschichte im



Jungpaläozoikum (jüngeres Erdaltertum – im Karbon und Perm) und im jungen Proterozoikum (bislang Eokambrium – vor Anfang des Erdaltertums) mit erklärt werden.

Die Skala für die Erklärungsversuche der Entstehung der großen Klimaschwankungen spannt sich von außerir-

dischen bis zu rein irdischen Möglichkeiten. Viele Hypothesen schließen sowohl außerirdische als auch irdische Faktoren in die Deutungsversuche ein. Zuweilen ging die Erklärung zwar von gleichen Grundlagen aus, diese wurden aber von entgegengesetzten Standpunkten aus gedeutet. So wurde beispielsweise einerseits vermehrte, andererseits herabgesetzte Sonnenstrahlung als günstig für das Eintreten von Kaltzeiten angesehen, oder einerseits milde Winter und andererseits kühle Sommer als förderlich für die Gletscherbildung betrachtet.

Vermutlich spielen insgesamt kompliziert miteinander verflochtene Beziehungen für die Auslösung von Kaltzeiten eine wichtige Rolle.

Außerirdische Ursachen

Als Ausgang für das Entstehen von Eiszeitaltern wird die Änderung des Sonnenenergiestromes, der den oberen Atmosphärensaum der Erde erreicht, angesehen, d. h., die auf die äußere Atmosphärengrenze auftreffende Sonnenenergie ist über längere Zeiträume nicht konstant.

Die Änderung der auftreffenden Sonnenenergie kann zweierlei Ursachen besitzen: Änderung der von der Sonne abgegebenen Energie durch Veränderungen der Sonne selbst und Veränderungen der von der Sonne abgegebenen Strahlungsenergie im Raum zwischen Sonne und Erde.

Wird die Sonne als veränderlicher Stern betrachtet, so wäre einerseits an einen sich verringernden, andererseits an einen sich periodisch verändernden Energiefluß zu denken.

Bereits gegen Ende des vergangenen Jahrhunderts ging eine Hypothese von einer langsamen Abkühlung der Sonne aus, die schließlich im Quartär, der jüngsten erdgeschichtlichen Periode, zu einem Eiszeitalter führen sollte. Mit dieser Hypothese lassen sich jedoch nicht die älteren Eiszeitalter der Erdgeschichte erklären. Ähnliches gilt für eine Hypothese aus den fünfziger und sechziger Jahren unseres Jahrhunderts, die von einer Abnahme der Gravitationskonstanten bei einem sich ausdehnenden Erdkörper (Expansionstheorie) und einer Verringerung der Sonnenstrahlung ausgeht. Allerdings wird die als Voraussetzung angenommene Verminderung der Gravitation von



Sölle sind charakteristische Oberflächenformen in Ablagerungsbereichen vor allem großer Inlandeisbedeckungen. Als wassererfüllte, oberirdisch abflußlose, ringsum geschlossene Vertiefungen kennzeichnen sie – wie die trocken liegenden Hohlformen – fast ausnahmslos Gebiete der jüngstkalzeitlichen Vergletscherung. Im nördlichen Mitteleuropa wurden sie sogar einmal (um 1780) als Krater erloschener Vulkane und die Findlinge als Auswürflinge der vermeintlichen Vulkane gedeutet. – Soll bei Heinersdorf, nordöstlich von Fürstenwalde

einer Reihe von Geophysikern abgelehnt. Mit dieser neueren Hypothese könnte wiederum nur das quartäre Eiszeitalter erklärt werden.

Für die Einbeziehung des jungpaläozoischen Eiszeitalters in die Erklärung wurde eine unwahrscheinlich anmutende Hilfskonstruktion eingebracht, für die es keinerlei Beweise gibt: Die bis in das ausgehende Erdaltertum höhere Sonnenstrahlung erzeugte – wie zuvor – eine dichte Wolkendecke um den Erdball und diese ihrerseits ein recht gleichmäßiges Klima auf der Erde. Im Äquatorbereich sollen nun aus dieser dichten Wolkendecke gewaltige Hagelfälle niedergegangen sein, die die jungpaläozoische Vergletscherung verursacht hätten, deren Spuren heutzutage in gegenwärtigen äquatornahen Gebieten nachzuweisen sind.

Die großen quartären Klimaschwankungen (der Wechsel von Kalt- und Warmzeiten), die sich nicht aus einer stetigen

Abnahme der auftreffenden Sonnenenergie erklären lassen, werden auf Schwankungen der Sonnenstrahlung zurückgeführt, die sich aus den periodischen Veränderungen der Erdbahnelemente ergeben. Als Voraussetzung für das Wirksamwerden dieser Schwankungen wird angenommen, daß zu dieser Zeit ein bestimmter Schwellenwert bei der insgesamt abnehmenden Sonnenstrahlung unterschritten worden sei.

Eine weitere Hypothese, die wiederum von der stetigen Verminderung der Sonnenstrahlung im Zusammenhang mit der Abnahme der Gravitationskonstanten ausgeht, fügte dem ursprünglichen Erklärungsversuch neuere Erkenntnisse hinzu. Infolge der Rotation des Milchstraßensystems (Galaxis) wechselt auch die Lage des Sonnensystems in ihm. Damit ändert sich die Gravitationskonstante und mit ihr der Energiefluß von der Sonne. Entsprechend der Rotationszeit, die etwa 250 bis 300 Mio Jahre umfaßt, erfolgen somit periodische Strahlungsschwankungen. Die periodisch abnehmende Sonnenstrahlung und Gravitationskonstante erreichen in unserem Eiszeitalter – eingelagert in die angenommene allgemeine Abnahme der Gravitationskonstante und Verringerung der Sonnenstrahlung – einen negativen Ausschlag. Der davorliegende negative Ausschlag während der Rotation der Galaxis lag vor rund 275 Mio Jahren, mithin zur Zeit des jungpaläozoischen Eiszeitalters. Das Eiszeitalter kurz vor Beginn des Paläozoikums, dem beginnenden Erdaltertum (vor ungefähr 550 bis 600 Mio Jahren), entspräche einem weiteren negativen Ausschlag.

Im kausalen Zusammenhang zwischen der Rotation des Milchstraßensystems und den daraus resultierenden Schwankungen der Sonnenstrahlung wäre eine bestechende Erklärung für das Auftreten von Eiszeitaltern gefunden. Jedoch sollen die sich aus der Rotation der Galaxis ergebenden Schwankungen der Sonnenstrahlung zu gering sein, um Eiszeitalter zu verursachen. Für den nachgewiesenen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten in unserem Eiszeitalter müßte wiederum eine zusätzliche Erklärung gegeben werden.

Eine weitere Erklärungsmöglichkeit für das Entstehen von Eiszeitaltern wird in der Schwächung der Son-

nenstrahlung bei einem Durchgang durch interstellare Materie (inter, lat. = zwischen; stella, lat. = Stern), durch sogenannte Dunkelwolken, gesehen. Jedoch muß dazu gesagt werden, daß dafür der Abstand zwischen Sonne und Erde zu gering ist. Entsprechende Berechnungen haben gezeigt, daß die Sonnenstrahlung auf dieser relativ kleinen Entfernung durch Dunkelwolken nicht hinreichend vermindert werden kann.

Entgegen dieser Auffassung, daß interstellare Materie die Sonnenstrahlung abschwächen soll, rechnen andere Forscher damit, daß Dunkelwolken sekundär zu erhöhter Strahlung führen.

Sollte nach Ansicht der meisten Forscher verringerte Sonnenstrahlung zu Eiszeitaltern führen, so versuchte eine Hypothese, die Ende der zwanziger Jahre unseres Jahrhunderts entwickelt wurde, gerade aus dem Gegenteil, aus erhöhter Sonnenstrahlung – mit teilweise durchaus einsehbaren Folgerungen –, Gletscherwachstum und -schwinden abzuleiten.

Änderung der Erdbahnelemente – Änderung des Klimas?

Wohl kein anderer Ursachenkomplex hat für das Entstehen vor allem des Wechsels von Kalt- und Warmzeiten in unserem Eiszeitalter und als Erklärung für das quartäre Eiszeitalter insgesamt eine so bedeutende Rolle gespielt, ist etwa seit der Mitte, besonders aber seit dem Ausgang des vergangenen Jahrhunderts, so häufig diskutiert worden wie der Einfluß der periodischen Änderung der Erdbahnelemente auf das Klima.

Im Extrem gingen Eiszeitforscher mit Zusatz einer Hilfshypothese, die besondere Voraussetzungen für das Wirksamwerden auf dem Erdball vorsah, wie höhere Gebirge und weite Landflächen in größerer Höhe vor allem in gemäßigten und kalten Erdbereichen, soweit, nicht nur das Entstehen des jüngsten Eiszeitalters mit seinem Wechsel von Kalt- und Warmzeiten zu erklären, sondern in ihnen auch eine genaue und absolute Zeitrechnung für unser Eiszeitalter zu sehen.

Bis in die Gegenwart hinein erkennen Forscher die aus den periodischen Schwankungen der Erdbahnelemente abgeleiteten Aussagen über die Abfolge von Kalt- und



Reizvolle Seenlandschaften kennzeichnen die Ausdehnungsbereiche jüngerkaltzeitlicher Vergletscherungen (z. B. nördliches Nordamerika, Nordwest-, Nord-, Nordosteuropa und nördliches Mitteleuropa sowie zahlreiche Bereiche jüngerkaltzeitlicher Gebirgsvergletscherungen). Die Seebecken entstanden durch die ausschürfende Tätigkeit des Gletschereises, unter dem Gletschereis abfließende Schmelzwässer oder durch Kombination beider Vorgänge. Nach Konservierung der Becken durch verschüttetes Toteis füllten sie sich nach dem Ausschmelzen der Toteiskörper mit Wasser. — Seenlandschaft bei Carwitz/Feldberg

Warmzeiten in unserem Eiszeitalter und die damit gleichzeitig gelieferte Chronologie des quartären Eiszeitalters vorbehaltlos oder mit wenigen Einschränkungen und Abänderungen an.

Im Jahre 1842 wurde die »Eiszeit« zum ersten Mal durch periodische Änderung — und zwar durch periodischen

Umlauf des Frühlingspunktes (Umlauf des Perihels – Präzession der Tag- und Nachtgleiche) erklärt. Um 1860 wurde zusätzlich die wechselnde Dehnung der Erdbahn (Exzentrizität) bei der Erklärung berücksichtigt. Schließlich wurden auch die Veränderungen der Schrägstellung der Erdachse (Ekliptikschiefe) in die Betrachtungen einbezogen.

Auf Überlegungen und Berechnungen basierend, die aus dem 19. Jahrhundert stammten, berechnete M. Milankovitch neue »Strahlungskurven« über die Schwankungen der Sonnenstrahlung für die letzten 600 000 Jahre. Sie berücksichtigten die Veränderlichkeit der Erdbahn, die Neigung der Erdachse zur Erdbahnebene und den Umlauf des Frühlingspunktes.

Nahm Kopernikus noch an, daß die Erdbahn ein Kreis sei, so wies Kepler die elliptische Bahn der Erde um die Sonne nach, wobei die Sonne in einem der beiden Brennpunkte steht. Deshalb befindet sich die Erde bei ihrem jährlichen Weg um die Sonne einmal in Sonnennähe, einmal in Sonnenferne. Der Unterschied dabei beträgt gegenwärtig 4 bis 5 Mio km. Gegenüber dem mittleren Abstand zwischen Erde und Sonne von rund 150 Mio km ist das ein verhältnismäßig kleiner Betrag. Unter dem Einfluß anderer Planeten, vor allem des gewaltigen Jupiters, kann sich die elliptische Erdbahn so dehnen, daß der Unterschied zwischen Sonnennähe und -ferne auf 20 Mio km anwachsen kann. Daraus können sich merkliche Strahlungsunterschiede in den Jahreszeiten ergeben. Diese Schwankungen in der Exzentrizität der Erdbahnellipse erfolgen in einer Periode von durchschnittlich 91 800 Jahren.

Wesentlichen Einfluß auf das Klima der Erde besitzt die Schrägstellung der Erdachse gegen die Senkrechte zur Erdbahnebene. Sie ist Ursache für das Entstehen der Jahreszeiten im Verein mit dem jährlichen Weg der Erde um die Sonne. Die Neigung der Erdachse schwankt in etwa 40 400 Jahren zwischen $21^{\circ} 58'$ und $24^{\circ} 36'$. Je schiefere die Erdachse, um so größer ist der Unterschied zwischen der sommer- und winterlichen Strahlungsmenge für jeden Punkt auf der Erdoberfläche.

Schließlich wurde noch der Umlauf des Frühlingspunktes berücksichtigt. Er währt rund 20 700 Jahre. Aus

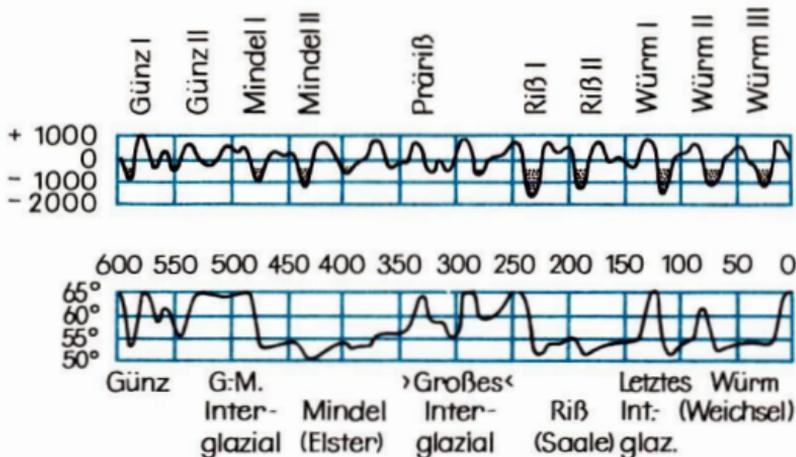
ihm folgt, daß die Sonnennähe zu verschiedenen Zeiten in verschiedenen Jahreszeiten liegen kann. Hierbei ist also wesentlich, ob die Sonnennähe in den Nord- oder Südsommer fällt.

Treffen nun im Zusammenspiel der Änderung der Erdbahnelemente die steile Lage der Erdachse, die große Dehnung der elliptischen Erdbahn und die Lage des Perihels im Nordwinter zusammen, so können Zeitabschnitte mit besonders kühlen Sommern auftreten.

Sah man früher besonders strenge Winter als wesentlich für Gletscherwachstum an, wurden später milde Winter und kühle Sommer als besonders günstig für die Mehrung des Gletschereises betrachtet. Untersuchungen über den Massenhaushalt heutiger Gletscher zeigten, daß vor allem die kühlen Sommer zu Gletscherwachstum führen. Entgegen dieser Erkenntnis ging J. Kukla bei der Deutung der Strahlungskurven wieder (wie schon ältere Forscher) vom Winterhalbjahr aus.

Die Berechnungen der Änderung der Erdbahnelemente werden zeichnerisch in »Strahlungskurven« umgesetzt. Wegen der Neigung der Erdachse sind die Schwankungen der Sonnenstrahlung für jede Breite verschieden und somit auch die empfangene Strahlungsmenge. Es müssen deswegen zahlreiche Strahlungskurven berechnet werden.

Während die Schwankung der Erdachse überall auf der Erde in gleicher Weise wirkt, verursacht der Umlauf des Frühlingspunktes im Verein mit der Exzentrizität Maxima und Minima bei den Strahlungskurven, die zu unterschiedlichen Zeiten auf der Nord- und Südhalbkugel auftreten. Das führte aber nachgewiesenermaßen nicht zu abwechselnden Vergletscherungen der Nord- und Südhalbkugel (siehe beispielsweise die Gleichzeitigkeit der größten Gletscherausdehnung auf beiden Halbkugeln in der bisher jüngsten Kaltzeit), sondern zu einheitlichen, erdweiten Kaltzeiten. Dieses Phänomen wird darauf zurückgeführt, daß die ausgedehnten Landflächen der Nordhalbkugel relativ rasch und nachdrücklich auf die verminderte Strahlung mit Gletscher- und Inlandeisbildung reagieren und das Klimageschehen nicht nur auf der landreichen Nord-, sondern auch auf der landärmeren Südhalbkugel steuern. Sicherlich verzögert sich dabei Gletscherwachstum und



Strahlungskurve (nach M. Milankovitch) und Vereisungskurve (nach W. Soergel) für die letzten 600 000 Jahre. Oberer Teil: Strahlungskurve für den Nordpolarbereich bis 55° nördl. Br. (einschl. Reflexionseffekt), dargestellt durch Deformation der Schneegrenze in Metern. Unterer Teil: Zeitlicher Verlauf der südlichen Randlage des europäischen Inlandeises zwischen 65° und 50° nördl. Br. sowie zwischen 11° und 19° östl. L. (Vereisungskurve) (nach W. Wundt, 1944)

-ausdehnung nicht unerheblich gegenüber dem Strahlungsminimum.

M. Milankovitchs Berechnungen der Strahlungsänderungen, die durch die Schwankungen der Erdbahnelemente hervorgerufen werden, wurden auch in Hebungen und Senkungen der Schneegrenze (später sogar unter Berücksichtigung untergeordneter Effekte, wie z. B. Änderung des Reflexionsvermögens u. a.) umgerechnet.

Bei der Deutung der »Strahlungskurve« wurde eine Angleichung an die von A. Penck vermutete zeitliche Länge des Eiszeitalters vorgenommen. Ausgehend von seiner klassischen Viergliederung des quartären Eiszeitalters wurden Günz-, Mindel- und Riß-Eiszeit zweifach und die Würm-Kaltzeit dreifach – entsprechend den Strahlungsminima anzeigenden Ausschlägen in der »Strahlungskurve« – untergliedert.

Manche Forscher glaubten, diese zwei- bzw. dreifache Untergliederung an der entsprechenden Anzahl von Resten ehemaliger Talböden, den Flußterrassen, bestätigen zu

können (z. B. an der Ilm), und sprachen von einer »Vollgliederung« des Eiszeitalters.

Eine Reihe von Forschern war und ist von dieser Deutung der »Strahlungskurve« so überzeugt, daß sie auch die ihr zu entnehmenden Zeitangaben für völlig gesichert ansahen und ansehen. Dementsprechend begann die Günz-Kaltzeit vor 590 000, die Mindel-Kaltzeit vor 476 000, die Riß-Kaltzeit vor 230 000 und die Würm-Kaltzeit vor 115 000 Jahren.

Die erhobenen Einwände gegen eine derartige Deutung sind sehr zahlreich.

Zunächst sind im quartären Eiszeitalter mindestens zwei weitere Kaltzeiten mit der erforderlichen Sicherheit festgestellt worden, weitere glauben andere Forscher nachgewiesen zu haben. Es erhebt sich deshalb die Frage, ob die getroffene Parallelisierung richtig ist.

Die Berechnungen von »Strahlungskurven« lassen sich über die letzten 600 000 Jahre hinausführen, dabei tauchen immer neue Strahlungsminima auf. Andere Berechnungen von »Strahlungskurven« weichen von der Kurve M. Milankovitchs ab. In der »großen Warmzeit« zwischen der Mindel- und Riß-Kaltzeit zeigt eine dieser anderen Kurven bedeutendere Strahlungsminima als in der Kurve von M. Milankovitch.

Neuere Deutungs- und Parallelisierungsversuche führten zu abweichenden Ergebnissen. So verlegt beispielsweise C. Emiliani auf seiner Kurve der Oberflächenwassertemperatur im Ozean für die vergangenen Jahrhunderttausende den Beginn der Günz-Kaltzeit auf 330 000 Jahre, statt – wie in älteren Darstellungen – auf 590 000 Jahre vor der Gegenwart.

Insgesamt ist dem subjektiven Ermessen bei der Deutung sehr viel Spielraum eingeräumt. Die zahlreichen Auslegungen haben die früher als so zwingend angesehene Übereinstimmung von »Strahlungskurve« und »Eiszeitgliederung« doch sehr stark verzerrt.

Jedoch ermöglichten neuere Forschungen Aussagen auf qualitativ höherer Stufe.

Eine Frage bleibt trotz allem offen: Warum sind die Strahlungsschwankungen, die durch die periodische Veränderung der Erdbahnelemente hervorgerufen werden,

erst im Quartär wirksam geworden, warum nicht im Erdmittelalter, warum nicht im Erdaltertum? Zur Beantwortung dieser Frage müssen weitere Hypothesen herangezogen werden. Sie beschreiben einen weiten Bogen von einer allgemeinen stetigen Verminderung der zugeführten Sonnenenergie bis zu irdischen Ursachen, die im Begriff einer sog. »Eiszeitbereitschaft« zusammengefaßt werden könnten. Auch solche Gedanken, wie die Verlegung von Meeresströmungen durch Hebung untermeerischer Schwellen oder die Umgruppierungen in der Land-See-Verteilung nach den Vorstellungen der Kontinentaldrift, auch im neuen Rahmen der globalen Plattentektonik u. a. m., sind enthalten.

Zusammengefaßt gesagt: Trotz aller Für und Wider wird die Änderung der Erdbahnelemente als mögliche Ursache für Klimaschwankungen vom Ausmaß des Wechsels von Kalt- und Warmzeiten künftig wieder stärker beachtet werden müssen.

Verantwortlich: Die Erde selbst?

In den Hypothesen sind sehr viele mögliche irdische Ursachen genannt. Sie gehen sämtlich davon aus, daß keine Veränderung des Energiezustroms von der Sonne erfolgt, mithin die auf den Grenzsaum der Atmosphäre auftreffende Sonnenstrahlung gleichbleibt.

Wenn diese Hypothesen auch diesem oder jenem Faktor besonderes Gewicht über das Entstehen von Kaltzeiten beimessen, so reicht die Gedankenfülle wohl aus, um aus rein irdischer Sicht sowohl das Entstehen von Eiszeitaltern als auch den Wechsel von Kalt- und Warmzeiten im jüngsten Eiszeitalter zu erklären.

Aus der Fülle dieser Hypothesen kann nur eine Auswahl getroffen werden.

»*Polar-Koinzidenz-Hypothese*«: Für das Entstehen von Eiszeitaltern aus irdischer Sicht spielt die Drift der Kontinente, auch in der neuen Form der globalen Plattentektonik, mit der Lage eines großen Kontinents oder eines von großen Festlandmassen fast eingeschlossenen Meeres um einen der beiden Pole eine wesentliche Rolle. Der von diesen wesentlichen Voraussetzungen ausgehende Erklä-

rungsversuch wurde auch als »Polar-Koinzidenz-Hypothese« bezeichnet.

Die Kontinentaldrift, die Lageveränderung der Kontinente, ihr Zusammenschluß zu größeren Festlandmassen oder ihr Zerfall in mehrere Einzelkontinente und ihr Auseinanderstreben, wurde lange Zeit nicht ernst genommen und sogar verspottet. Vor noch nicht 25 Jahren wurde sie einmal als »Lieblingsmärchen der Geophysiker« bezeichnet. Erst durch Ausarbeitung und weltweite Anwendung von paläomagnetischen Methoden und mit der Entwicklung der globalen Plattentektonik als qualitativ höhere Form eroberte sich diese einen festen Platz in den Erdwissenschaften. Über thermodynamische Vorgänge aus dem Erdinnern wird in den mittelozeanischen Schwellen (spreading-Achsen) neuer Ozeanboden erzeugt, der durch weiteren Nachschub zum Wachstum und damit zur Vergrößerung der Ozeanböden (ocean-spreading) – und mit ihnen der Ozeane – führt und der in Verschluckungsbereichen von ozeanischer Kruste (Subduktionszonen) wiederum abgebaut bzw. aufgeschmolzen wird. Würde solch ein Abbau nicht erfolgen, müßte sich der Erdkörper ausdehnen (Expansionstheorie). Diese, nach ihrem Begründer, dem deutschen Wissenschaftler Alfred Wegener, »neue Lehre«, die in den Geowissenschaften auch als »wegenerianische Revolution« bezeichnet wird, stieß nunmehr auf solche Aufgeschlossenheit, daß über sie kaum diskutiert wurde. Sie wurde fast als selbstverständlich angenommen.

Immer, wenn sich im Laufe der Erdgeschichte ein großer Kontinent in den Bereich einer der beiden Pole hinschiebt, oder auch, wenn eine ähnliche Land-Meer-Verteilung um einen der beiden Pole (annähernd der heutigen Situation um den Nordpol) auftritt, sind über eine Kette von Geschehnissen aus irdischer Sicht die Voraussetzungen für das Entstehen eines Eiszeitalters gegeben. – Demzufolge ließe sich die heutige Land-Meer-Verteilung für das Bestehen eines Eiszeitalters als besonders günstig ansehen! Unser Eiszeitalter müßte folglich solange andauern, bis eine grundsätzliche Änderung der Land-Meer-Verteilung durch Plattenverschiebungen auf dem Erdball eingetreten ist. Wird die Lage eines Konti-



Talgletscher drücken am besten den Gegensatz zu Inlandeisen aus und lassen eindeutig die vom Relief gesteuerte, die dem Relief untergeordnete Vergletscherung erkennen. — Am Fuß der etwa 2000 m hohen Fels- und Eiswand von Dongusorun (4454 m) und Nakra (4275 m) im Kaukasus bildete sich der Dongusorunseegletscher, der mit seiner linken Ufermoräne den rechts unten sichtbaren Dongusorunsee abdämmt.

nents im Bereich eines der beiden Pole höher bewertet als die Land-Meer-Verteilung um einen der beiden Pole, so würde erst das Hinausdriften Antarktikas aus dem Bereich des Südpols das jetzige, das jungkänozoische oder quartäre Eiszeitalter beenden.

Mit diesem Erklärungsversuch ließe sich weiterhin das Entstehen und Vergehen des jungpaläozoischen Eiszeitalters deuten. In dieser Zeit, so wird berechtigterweise angenommen, bestand auf der Südhalbkugel die zusammenhängende große Süderde, das Gondwanaland. Bereiche dieses Riesenkontinents lagen damals auch im Südpolarraum und trugen eine bedeutende Gletscherbedeckung. Nach dem Auseinanderbrechen und durch Plattenverschiebungen während des Erdmittelalters sind die

Spuren dieser Vergletscherung heutzutage in Vorderindien, Afrika, Australien und Südamerika zu finden. Antarktika, als Teil des ehemaligen Großkontinents, kann in seiner jetzigen Lage als Ursache für das Entstehen des gegenwärtigen Eiszeitalters betrachtet werden.

Wie eine Änderung der direkt von der Sonne ausgehenden Energie als außerirdische Ursache für das Entstehen von Eiszeitaltern gewertet werden kann, gibt die Lage einer größeren Landmasse im Bereich eines der beiden Pole die Möglichkeit für das Entstehen eines Eiszeitalters aus irdischer Sicht.

Autozyklische Hypothesen: Mit dieser Art von Hypothesen, gegen die sich – wie gegen sämtliche andere – Einwände erheben lassen, wird vor allem der Wechsel von Kalt- und Warmzeiten im jetzigen Eiszeitalter zu erklären versucht. Diese Hypothesen berühren unter anderem die wichtige Frage: Warum führten die großen Gletscherentfaltungen in den Kaltzeiten letztendlich nicht zu einer immer weitergehenden, schließlich den gesamten Erdball weitestgehend einhüllenden Vergletscherung?

Die Eisschelf-Hypothese (nach A. T. Wilson, 1964): Voraussetzung für diesen Erklärungsversuch ist das Vorhandensein eines am Beginn des Quartärs vergletscherten Kontinents im Südpolarbereich. Diese wesentliche Bedingung läßt sich mit Hilfe der globalen Plattentektonik, mit dem Hineinschieben Antarktikas in diesen Bereich und nachfolgendem Aufbau einer Vergletscherung und schließlich eines kontinenterfassenden Inlandeisschildes erklären. Daß der antarktische Kontinent bereits einige Millionen Jahre vor Beginn des Quartärs einen Inlandeisschild trug, belegen Meeresablagerungen um ihn.

Eine weitere Voraussetzung wird im warmzeitlichen Anwachsen des antarktischen Inlandeisschildes gesehen, eine Annahme, die gesichert scheint. Mit weiterem Anwachsen dieses Eisschildes rückt der Zeitpunkt seiner Instabilität näher. An seiner Basis, zusätzlich gefördert durch den Erdwärmestrom, wird der Schmelzpunkt des Eises erreicht; Faktoren, die rechnerisch ermittelt werden können.

Die derzeitig im wesentlichen (von Ausnahmen abgesehen) langsame Bewegung der kalten Inlandeismassen schlägt dann in eine relativ rasche Gletscherbewegung um. Sie wird ihrerseits durch eine dünne Wasserschicht, die aus der entstehenden Reibungswärme resultiert, beschleunigt. Das nun verhältnismäßig schnell auf das umliegende Meeresgebiet ausgleitende Inlandeis ergibt schließlich einen gewaltigen, ungefähr 35 Mio km² großen Eisschelfgürtel um den nur noch geringmächtig vergletscherten, weit über 10 Mio km² Gletscherbedeckung tragenden großen Kontinent. Es entsteht also eine Gletschereisfläche von nahezu 50 Mio km².

Die Ausbreitung erfolgt nach allen Seiten nordwärts bis etwa zur antarktischen Konvergenz (um 50° südl. Br.), wo heute an der Oberfläche des Weltmeeres das 8 bis 10°C warme Wasser der südlichen Ozeanbereiche an das wesentlich kältere Wasser rings um den antarktischen Kontinent grenzt.

Als Folge davon wird das Reflexionsvermögen, die Albedo, der Erde erheblich erhöht. Beträgt sie bei eisfreier Meeresoberfläche etwa 8 %, so liegt sie bei einer Eisoberfläche ungefähr bei 80 %. Damit besitzt die Erde plötzlich zusätzlich eine Fläche von 35 Mio km² mit höherer Reflexion. Davon wird der gesamte Wärmehaushalt der Erde beeinflusst, die Strahlungsbilanz der Erde um einige Prozent verringert und als Folge die Temperatur auf der Erde abgesenkt. Dadurch ragen zusätzlich größere Festlandflächen in den Bereich, in dem mehr Schnee fällt als abtauen oder verdunsten kann und der über Umwandlungsvorgänge zu Gletschereis wird. Als nächstes Glied der folgenschweren Kette bilden sich große Vergletscherungen auf den polnahen Festlandbereichen der Nordhalbkugel. Sie erhöhen das Reflexionsvermögen weiter und sorgen für eine zunehmende Abkühlung.

Ihr Ende, ihr Ausklingen, findet die kaltzeitliche Gletschereisbedeckung dadurch, daß das verhältnismäßig plötzlich ausgeglittene Inlandeis keinen Nachschub mehr erhält, nicht genügend und ständig ernährt werden kann, da die Ausgleitbedingungen auf dem Gletschereis erzeugenden Kontinent weggefallen sind. Der Eisschelfgürtel wird durch Abbrechen großer Eisplatten in Form

von Eisbergen im Meer zerstört. Mit der Zerstörung des Eisschelfgürtels, dem Abdriften und Schmelzen im Meer, verbessert sich der Wärmehaushalt der Südhalbkugel und der gesamten Erde, so daß auch die Nordhalbkugel davon ergriffen wird. Damit endet die Kaltzeit, eine Warmzeit beginnt.

Für die Beschleunigung des Abschmelzens der großen Inlandeismassen auf der Nordhalbkugel wurde zusätzlich von anderen Wissenschaftlern der Auftrag vor allem von Lößstaub auf das Gletschereis als förderlich angesehen.

A. T. Wilson hat in einer späteren Arbeit die periodische Änderung der Erdbahnelemente als begünstigend für die zyklische Auslösung des Ausgleitens des antarktischen Inlandeises in Betracht gezogen.

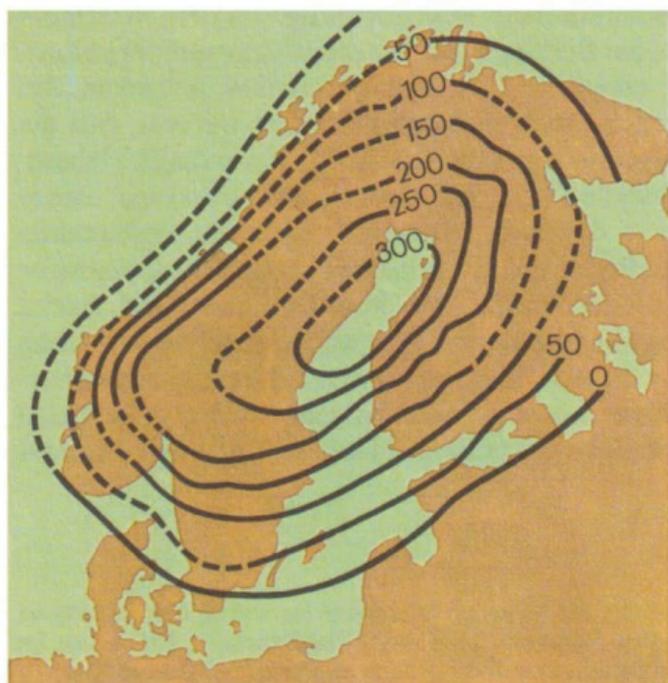
Sicherlich kann nur ein so riesiger Inlandeisschild wie der antarktische ein solches Wechselspiel erzeugen, d. h., es konnte erst ungefähr dann beginnen, als sich der antarktische Kontinent etwa mit seiner Mitte unter den Südpol geschoben hatte. Die Anfänge der Vergletscherung Antarktikas sind früher zu suchen. Sie liegen im mittleren Tertiär, so daß berechtigterweise – auch von dieser Seite her – unser Eiszeitalter als jungkänozoisches bezeichnet werden kann.

Hypothese aus der Land-Meer-Verteilung im Nordpolarbereich (nach M. Ewing u. W. L. Donn, 1958): Voraussetzung dieser Hypothese ist das Bestehen einer etwa den heutigen Verhältnissen entsprechenden Land-Meer-Verteilung seit dem Beginn des Quartärs. Ausgang für den zyklischen Wechsel ist jeweils ein eisfreies Nordpolarmeer, ein eisfreier Arktischer Ozean. Ein eisfreies Nordpolarmeer besitzt eine höhere Verdunstung und führt somit zu erhöhtem Niederschlag auf den umliegenden Festländern. Erhöhte Niederschläge bei kühlen Temperaturverhältnissen fördern Gletscher- und Inlandeiswachstum. Aus ihnen folgt der Beginn einer Kaltzeit. Bis zur weitgehenden Bildung der großen Inlandeisschilde auf der Nordhalbkugel muß für diesen Erklärungsversuch das Nordpolarmeer für die weitere Ernährung der Inlandeisschilde eisfrei bleiben. Erst dann darf als Rückwirkung der abkühlenden Einflüsse der großen Inlandeise, deren Auf-

bau mit beträchtlichem Wasserentzug aus dem Weltmeer einhergeht, die Bildung einer Meereisdecke auf dem Nordpolarmeer einsetzen. Sie soll durch das Absinken des Meeresspiegels noch dadurch gefördert werden, daß die Verbindung zum eigentlichen Atlantik verflacht (Island-Faröer-Schwelle). Deshalb soll – laut Aussage dieser Hypothese – der Wärmetransport über die Fortsetzung und die Ausläufer des Golfstromes in das Nordpolarmeer erheblich eingeschränkt werden. Die enge und flache Verbindung über die Bering-Straße zum Pazifischen Ozean ist ohnehin ohne Belang, da über sie kaum ein nennenswerter Wärmetransport in das Nordpolarmeer erfolgt und sie zudem in den Kaltzeiten für längere Zeiträume landfest wird.

Der Alibek zeigt als längster Gletscher im westlichen Kaukasus beispielhaft den Zungenbereich eines Talgletschers. Der rechts im Bild deutlich erkennbare Wall ist eine abgesetzte Seitenmoräne, die dann Ufermoräne genannt wird. Sie beweist einen ehemals höheren Gletscherstand, einen ehemals größeren Gletscher.





Mit der Bildung der Meereisdecke auf dem Nordpolarmeer wird die Verdunstung herabgesetzt, und die Inlandeisschilde und Gletscher können nicht mehr genügend ernährt werden. Damit kündigt sich das Ende einer Kaltzeit an. Gletscher und Inlandeise schwinden dahin. Nur das grönländische Inlandeis bleibt als Rest der größeren kaltzeitlichen Vergletscherung erhalten, ebenso überdauert das antarktische Inlandeis die Warmzeit. Schließlich schmilzt auch die Meereisdecke auf dem Nordpolarmeer oder dem Arktischen Ozean, und dem Beginn einer nächsten quartären Kaltzeit steht nichts mehr im Wege.

Einwände lassen sich auch gegen diese Hypothese erheben. Sicherlich bildet sich unter anderem eine Meereisdecke früher aus als erst nach dem Abschluß des Aufbaus der Inlandeisschilde. Auch die Rolle der Island-Faröer-Schwelle als Absperrung gegen den eigentlichen Atlantik wurde überschätzt, denn das Absinken des Meeresspiegels betrug höchstens 150 m – und das wohl auch nur während der Maximalausdehnung von Inlandeisen und Gletschern in der vorletzten, der Riß-Kaltzeit.

Hypothese des inlandeisernährenden Südwindes (nach W. F. Tanner, 1965): Wie die eben erwähnte Hypothese, so ist auch für diesen Erklärungsversuch die etwa den heutigen Verhältnissen entsprechende Land-Meer-Verteilung um den Nordpolarbereich Grundvoraussetzung; Ausgang sind die ehemaligen Kerngebiete der nordamerikanischen und nordeuropäischen Inlandeisflächen.

Im Gegensatz zur vorangegangenen Hypothese soll die Bildung und Ernährung der Inlandeise nicht nur durch Niederschlag aus dem Nordpolarmeerbereich, sondern durch niederschlagbringende Winde von Süden her erfolgen. Demnach würden sich die großen Inlandeise auf der Nordhalbkugel in Richtung auf ihre Ernährungsquelle ausbreiten. Nach einer Zeit der Ausdehnung und des

Isostatische Hebung Skandinaviens nach der jüngsten Eiszeit (in m) etwa seit 9 700 Jahren vor heute (nach E. Kayser u. R. Brinkmann, 1948)

Jetziges jährliches Aufsteigen (in mm) (nach E. Kayser u. R. Brinkmann, 1948)

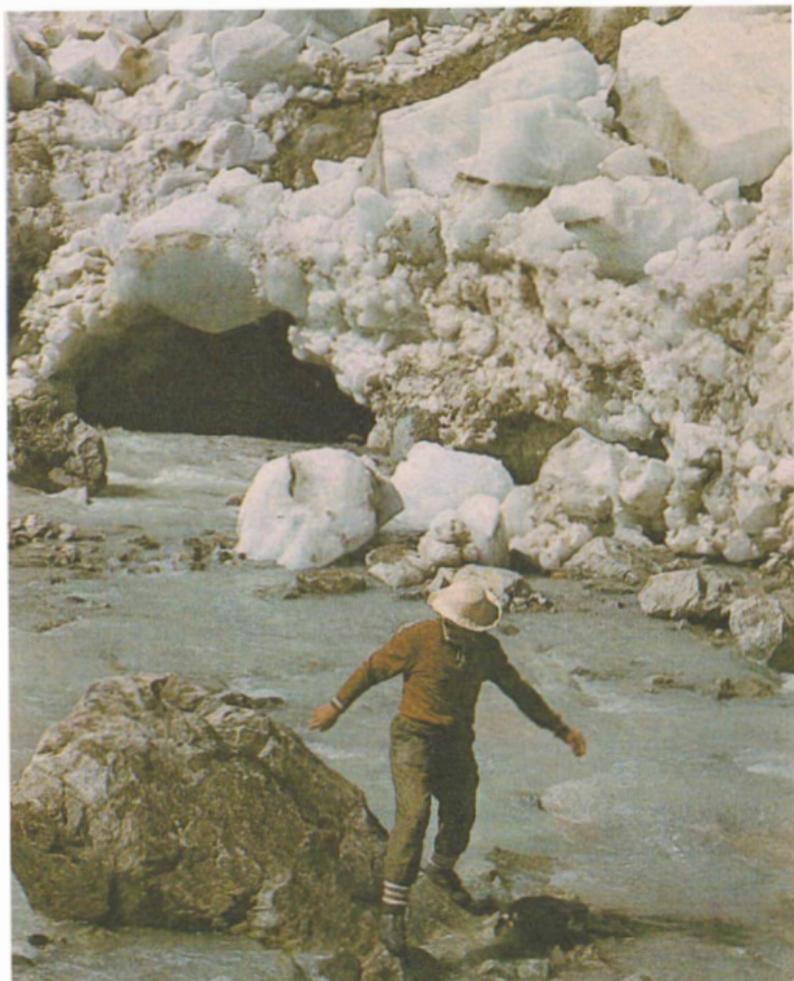
Vorschubs gerät der südliche Inlandeisrand schließlich in zu warme Breiten, und das Wachstum erlischt – eine Warmzeit beginnt.

Durch das Gewicht der Inlandeise und Gletscher wird die Erdkruste tiefer gedrückt. Dieser Vorgang wird als glazialisostatisches Absinken bezeichnet (glacialis, lat. = eisig; isos, griech. = gleich; stasis, griech. = Stellung). Das durch die Inlandeisbelastung erfolgte Tieferdrücken der Erdkruste begünstigte das Rückschmelzen des Inlandeises und verlängerte wegen der tiefen Lage des Landes die Warmzeit. Nach dem Schwinden des Inlandeises, nach der Entlastung, setzt der umgekehrte Vorgang – die Aufwölbung, die glazialisostatische Hebung – ein. Seit dem Schwinden des nordeuropäischen Inlandeises vor etwa 9700 Jahren vor heute stieg das Gebiet im Aufwölbungszentrum um den Bottnischen Meerbusen um über 300 m an. Dieser Betrag ist ersichtlich und nachmeßbar aus der Hebung ehemaliger Meeresstrände. Er stellt jedoch nur einen Teilbetrag dar. Der Gesamtbetrag des bisherigen Aufstiegs nach dem Tiefpunkt des Hinunterdrückens der Erdkruste durch das jüngste Inlandeis wird auf rund 500 m geschätzt. Auch der noch zu erwartende Aufstieg ist zu ermitteln, zu schätzen versucht worden. Er wird mit weiteren 200 m angegeben. Daraus ergibt sich ein Gesamtbetrag von etwa 700 m, der sich durchaus im skizzierten Sinne der erwähnten Hypothese auswirken kann.

Erst wenn der Untergrund wieder die ursprüngliche Höhe erreicht hat, beginnt nach dieser Hypothese eine erneute Bildung und Ausdehnung des Inlandeises. Dementsprechend ist eine weitere Kaltzeit und eine Fortsetzung des Eiszeitalters zu erwarten.

»Ozeanologische« Hypothese (nach D. D. Kvasov, 1971): Wie schon in anderen Autozyklen-Hypothesen wird auch in diesem Erklärungsversuch der bestehenden Land-Meer-Verteilung ein hohes Maß an sogenannter Eiszeitbereitschaft zuerkannt.

Große Bedeutung für das Entstehen des Eiszeitalters wird der Verbindung des Atlantiks zum Nordpolarmeer bzw. Arktischen Ozean beigemessen. Der Aufbau des Island-Faröer-Basaltmassivs soll den Austausch zwischen



Gletschertor des Schhelda-Gletschers im Großen Kaukasus, südöstlich des Elbrus. An der Stirn des Gletschers entspringt der Baksan.

beiden stark unterbunden haben und den Golfstrom erheblich daran hindern, weiter in das Nordpolarmeer einzuzießen. Im Aufbau dieser Schwelle wird der wesentliche Grund für die generelle Abkühlung seit dem Beginn der Tertiär-Periode gesehen, die schließlich im jüngeren Tertiär mit einem Sinken des Meeresspiegels (vermutlich durch Absenkung großer Ozeanbodengebiete) zur Bildung von Gletschereis in beiden Polarbereichen führte. Es entstanden hierbei Inlandeisschilde in Antarktika, auf

Grönland und im Gebiet des Barentssee-Schelfes, die ihrerseits nochmals ein Absinken des Weltmeeresspiegels und eine weitere Temperaturminderung im Weltmeer bedingten. Die Antizyklonen (Hochdruckgebiete) über dem Barentssee-Inlandeisschild und dem grönländischen Inlandeis erhöhten die Kontinentalität über Nordeuropa und Nordamerika und verhinderten die Bildung sowohl eines nordeuropäischen als auch nordamerikanischen Inlandeises.

Erst nach Beginn des Quartärs soll der Weltmeeresspiegel wieder etwas angestiegen sein. Der Barentssee-Inlandeisschild wurde wegen seiner tiefliegenden Unterlage durch den Meeresspiegelanstieg zerstört und die Landunterlage überflutet.

Als Folge dieser Zerstörung wurde auch die Sperre der Antizyklone aufgehoben, die bislang die Inlandeisbildung in Nordeuropa verhinderte. Mit dem Aufheben dieser Sperre soll folgender zyklischer Ablauf in Gang gesetzt worden sein, der zum Wechsel von Kaltzeiten mit Inlandeisbildung und -ausbreitung in Nordeuropa und daraus verursacht auch in Nordamerika sowie zu Warmzeiten führte:

1. Bildung eines zunächst kleinen Inlandeisschildes in Nordeuropa, über dem die entstehende kalte Luftmasse zum weiteren Wachstum des Inlandeises beitrug.
2. Die durch den nordeuropäischen Inlandeisschild hervorgerufene Abkühlung erfaßte weite Gebiete der Nordhalbkugel und löste vor allem das Gletscherwachstum in Nordamerika aus.
3. Die Bindung großer Wassermengen in den entstandenen Inlandeisen und großen Gebirgsvergletscherungen ließ den Meeresspiegel entsprechend absinken, wodurch das Weltmeer weite Schelfgebiete, darunter den Barentssee-Schelf, freigab.
4. Mit dem Trockenfallen von Schelfbereichen konnte sich nun wiederum auch der Barentssee-Inlandeisschild bilden.
5. Seine Wirkung verringerte beträchtlich die Niederschläge im östlichen und südöstlichen Randbereich des nordeuropäischen Inlandeises. Dieses wurde deshalb insgesamt rasch abgebaut.

6. Als Folge davon schwand die Vergletscherung in den Mittelbreiten einschließlich des nordamerikanischen Inlandeises und der Vergletscherung im Nordteil des westlichen nordamerikanischen Hochgebirges weitgehend. Der grönländische Inlandeisschild blieb weiterhin bestehen.
7. Mit dem Schwinden der Vergletscherung in den Mittelbreiten stieg der Weltmeeresspiegel.
8. Der steigende Meeresspiegel zwang den Barentssee-Inlandeisschild zu überaus starker Eisbergbildung, bis er völlig aufgelöst war.
9. Es begann eine Warmzeit, und mit ihr entstanden die bereits erwähnten Voraussetzungen für eine erneute Kaltzeit.

Wie es immer wieder in den autozyklischen Hypothesen anklingt, wird auch bei diesem Erklärungsversuch mit einem fördernden Einfluß durch die periodische Änderung der Erdbahnelemente gerechnet.

Der periodische Wechsel von Kalt- und Warmzeiten wird nach den Aussagen dieser Hypothese solange andauern, bis der Barentssee-Schelf nach mehrfachen Vergletscherungen so tief abgetragen ist, daß sich in diesem Gebiet kein Inlandeisschild mehr bilden kann. Infolgedessen wird der autozyklische Prozeß abgebrochen. Allerdings ergäbe sich – nach Aussagen dieser Hypothese – als Folge davon eine andauernde große Vergletscherung in den heute gemäßigten Breiten.

Änderungen von Wasserdampf- und Kohlendioxidgehalt sowie des Gehaltes an vulkanischem Staub in der Atmosphäre und ihre Bedeutung für große und langandauernde Klimaänderungen: Wasserdampf und Kohlendioxid (CO₂) zeichnen mit dem Ozon für die Glashauswirkung (Treibhauswirkung) der Atmosphäre verantwortlich. Die Atmosphäre ist fast völlig durchlässig für die einfallende kurzwellige Strahlung, hält aber die langwellige Wärmeausstrahlung der Erde zurück.

Ein verringerter Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre würde zur Temperaturenniedrigung an der Erdoberfläche führen; entgegengesetzt verhält es sich jedoch mit einer dichten Bewölkung.



Vom Fedtschenko-Gletscher im Nordwest-Pamir, der nach der Messung von 1928 mit 72 km Länge der zweitlängste Gletscher Asiens ist, schweift der Blick zum Gletscherbach des kleinen Tanyamas-Gletschers (vorn rechts), zur Schmelzwasserablagerung des Fedtschenko-Gletschers und dessen Stirnmoräne von 1925.

Sehr komplizierte Probleme wirft der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre auf, der mit einem Anteil von 0,03 Vol.-% neben dem Wasserdampfgehalt wesentlich für den Glashauseffekt ist. Es wurde angenommen, daß bei unveränderter Bewölkung eine Verdopplung des CO₂-Gehaltes eine Temperaturerhöhung um etwa 3°C, eine Halbierung des CO₂-Gehaltes eine Temperaturminderung um ungefähr 3°C nach sich zöge. Nach anderen Berechnungen ergaben sich jedoch bei einer Verdopplung bzw.

Halbierung des CO_2 -Gehaltes weitaus geringere bis fast keinerlei Auswirkungen auf die Temperatur.

Schwierig zu erklären sind – trotz guter Grundvorstellungen – die Austauschvorgänge, die den CO_2 -Gehalt betreffen und die zwischen Meer und Atmosphäre ablaufen, zumal biologische Vorgänge, Kohlebildung, vulkanische Zufuhr und Verwitterung eine Rolle spielen.

Es ließe sich aus dem Wechselspiel des Austausches von CO_2 zwischen der Atmosphäre und dem Meer eine Autozyklen-Hypothese entwickeln, die stark mit dem kaltzeitlichen Sinken und dem warmzeitlichen Anstieg des Meeresspiegels – also mit Volumenänderungen des Weltmeeres – gekoppelt ist.

Zusammenhänge zwischen dem Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre und der Temperatur lassen sich wohl kaum abstreiten. Ob sie jedoch zu großen, zu bedeutenden Klimaänderungen führen, ist bisher ungewiß, weil dem möglichen Erwärmungseffekt durch Kohlendioxid andere Effekte entgegenwirken.

Auch dem Auswurf in Form von Staub von Vulkanen ist verschiedentlich große Bedeutung sowohl für Klimaänderungen insgesamt als auch als begünstigender Faktor für Kaltzeiten beigemessen worden. Solche vulkanischen Auswürfe können, wie beispielsweise bei dem Ausbruch des Krakatau im Jahre 1883, riesige Mengen von Staub (18 km^3 !) in die Atmosphäre blasen. Jedoch scheinen sich dadurch nur verhältnismäßig kurzfristige Temperaturänderungen zu ergeben. Für die großen Klimaänderungen der Erdgeschichte sind die vulkanischen Aschenauswürfe vermutlich von untergeordneter Bedeutung.

Trotz dieser Bewertung für große und langwirkende Klimaänderungen müssen die vom Menschen verursachten Veränderungen des Kohlendioxidgehaltes und des Staubgehaltes beobachtet werden. Noch immer liegen keine eindeutigen Ergebnisse vor. Auswirkungen auf Witterungs- und Klimaverhältnisse zu untersuchen, ist deshalb ein überaus wichtiges Forschungsgebiet zum Nutzen für die menschliche Gesellschaft.

Zusammenspiel vieler Faktoren – endlich die Lösung?

»*Vielfaktoren*«-Hypothese (*Multilaterale Eiszeit-Entstehung nach M. Schwarzbach, 1968*): M. Schwarzbach, der sich seit Jahrzehnten mit Fragen langfristiger (z. B. Eiszeitalter), mittelfristiger (z. B. Wechsel von Kalt- und Warmzeiten im gegenwärtigen Eiszeitalter) und kurzfristiger Klimaänderungen und -schwankungen in der Erdgeschichte befaßt und die Vorlage immer neuer Hypothesen verfolgt hat, sieht als Fazit den Schlüssel für die großen Klimaschwankungen der Erdgeschichte in einem ganzen »Ursachenbündel«.

Zunächst gibt er zu bedenken, daß die großen Klimaschwankungen Ausnahmezustände im Verlauf der Erdgeschichte darstellen und die Klimakonstanz das eigentlich Normale ist. Weiterhin haben sich die großen Klimaschwankungen, beispielsweise des Quartärs, nicht überall auf der Erde so nachhaltig und tiefgreifend ausgewirkt wie gerade in den Gebieten, die mehrfach im Quartär vergletschert waren. In den Ländern, die kaltzeitliche Vergletscherungen und Inlandeisbedeckungen und ihre direkten Auswirkungen erlebten, sind nahezu sämtliche Hypothesen, die die Ursachen des Eiszeitalters und den Wechsel von Kalt- und Warmzeiten erklären wollen, entstanden. Diese Betrachtungsweise ist völlig berechtigt.

Grundpfeiler seiner zusammenfassenden Hypothese, die in dieser Form die Gedankengänge anderer Forscher etwas erweitert, sind:

von der Sonne ausgehende Schwankungen des Energiezuflusses, wenn auch in verhältnismäßig geringem Ausmaß angenommen,
die Drift der Kontinente auf Grundlage der globalen Plattentektonik.

Allerdings bewertet M. Schwarzbach die als geringfügig angenommenen Schwankungen des Sonnenenergiestromes etwas höher als andere Faktoren: »... *zu diesen können nun die zahlreichen anderen Faktoren kommen*, die von den einzelnen Eiszeithypothesen angegeben werden, und die dann den Klimagang im einzelnen beeinflussen: nämlich die tiefgreifenden geographischen Veränderungen in der

Verteilung von Land und Meer und im Relief, also das ständig wechselnde Antlitz der Erde, Änderungen im CO₂- und Wasserdampfgehalt der Atmosphäre, periodische Änderungen der Erdbahnelemente, Dunkelwolken im Weltenraum, aber auch Kontinentaldrift und manches andere. Das *Zusammenwirken aller dieser Faktoren* wäre im Sinne einer multilateralen Eiszeit-Entstehung die Ursache der kleinen und großen Klimaschwankungen der Erdgeschichte«, stellte er 1968 fest.

»Mehrfaktoren«-Hypothese aus rein irdischer Sicht (»Ein geophysikalisches Eiszeit-Modell« nach H. Flohn, 1969): Aus neueren Erkenntnissen verschiedener Geowissenschaften mit besonderer Berücksichtigung der Kontinentaldrift bzw. globalen Plattentektonik und der »Eis-schelf-Hypothese« wurde ein geschlossenes Gebäude eines Erklärungsversuches entwickelt, das – soweit überschaubar – nirgends mit den Beobachtungen kollidiert. Seine Geschlossenheit und schrittweise Ableitung wirkt sehr beeindruckend. Es besitzt den besonderen Vorzug, das Entstehen des gegenwärtigen Eiszeitalters mit seinem Wechsel von Kalt- und Warmzeiten rein aus irdischer Sicht zu erklären.

Als wesentlichste Voraussetzung für das Entstehen des gegenwärtigen Eiszeitalters wird die Drift einer größeren Landmasse in eine polnahe Lage angesehen. Für das jetzige Eiszeitalter, so wird vermutet, war die Drift Antarktikas in den Südpolbereich entscheidend.

Der Normalzustand der Erdoberfläche, eine eisfreie Erde, wurde durch die Lage eines zusammenhängenden, riesigen, etwa 65 Mio km² großen Südkontinentes (Gondwanaland) im Südpolbereich während des jungen Erdaltertums für ungefähr 30 Mio Jahre unterbrochen. Im Oberkarbon und Perm, im Jungpaläozoikum, befand sich der Gondwana-Kontinent mit seinem Zentrum etwa unter dem Südpol. Sein Zerfall, seine Aufspaltung und das Auseinanderdriften begannen gegen Ende des Erdaltertums und setzten sich im Erdmittelalter fort. Der heutige antarktische Kontinent lag als Teil des riesigen Gondwana-Kontinents vor dessen Auseinanderbrechen ungefähr im Bereich des heutigen Indischen Ozeans. Zu diesem



Ein Trogtal im Kaukasus. Deutlich ist im rechten Bildteil am Fuß die Schriffkante des einst das gesamte Tal ausfüllenden Gletschers zu erkennen, der heute bis fast an den Fuß des Bergmassivs zurückgewichen ist. Jedes Trogtal bezeugt eine ehemals größere Vergletscherung. Trogtäler stellen von Gletschern überformte Flußtäler dar; sie sind überprägtes Flußwerk.

Riesenkontinent gehörten neben Antarktika Afrika mit Madagaskar, Südamerika, Australien sowie die vorderindische Dekkan-Scholle.

Aus den Umkehrungen des Magnetfeldes der Erde, die sich entsprechend der Erzeugung von Ozeanboden in den mittelozeanischen Schwellen in langgestreckten Streifen entgegengesetzter Magnetisierung etwa parallel zu den mittelozeanischen Rücken finden und die sich unregelmäßig im Abstand von mehreren Jahrhunderttausenden bis zu rund einer Million Jahre wiederholten, ließ sich die seitliche Ausbreitung von Ozeanboden auf 1 bis 5 cm pro Jahr bestimmen. Die Altersdatierung der Ozeanböden – und über sie die Bestimmung der Driftgeschwindigkeit – erfolgte mit Hilfe von radioaktiven Isotopen-Methoden.

Die heutige mittlere Geschwindigkeit des Nachschubs von neuerzeugtem Ozeanboden aus den mittelozeanischen Schwellen soll ungefähr 6 cm pro Jahr betragen. Wird diese Geschwindigkeit der Plattenverschiebungen als konstant

betrachtet, so könnte der Rand des antarktischen Kontinents im beginnenden Alttertiär den südpolnahen Bereich erreicht haben, und im endenden Alttertiär wäre der Rand Antarktikas direkt unter den Südpol geschoben worden.

Eine ähnliche Position eines Kontinents in einem der beiden Polbereiche hat es während des gesamten Mesozoikums nicht gegeben, folglich blieb das gesamte Erdmittelalter eine warme, eisfreie Zeit in der Erdgeschichte. Erst im Tertiär gruppierten sich die Festländer mit Einschluß des Nordpolarmeeres allmählich um den Nordpol, wobei ständig eine Verbindung zwischen dem Nordpolarmeer und dem Atlantik existierte, und der antarktische Kontinent schob sich immer weiter unter den Südpol.

Mit Annäherung an den Südpol erhielt der antarktische Kontinent zunächst Jahr für Jahr eine winterliche Schneedecke. Das in das umgebende Meer abfließende Schneeschmelzwasser setzte über lange Zeiträume (wahrscheinlich von mehreren 10 Mio Jahren Dauer) die Temperatur des Meereswassers herab. Über langsam wirkende Mischungsvorgänge kühlte das gesamte Weltmeer ab. Von dieser Abkühlung wurde die Warmwassersphäre, die warme Deckschicht in den Tropen, zuletzt und nur abgeschwächt betroffen. Diese Deutung erklärt die sich insgesamt im Tertiär ausweitende allmähliche Abkühlung in den höheren Breiten und die Konstanz der warmen Verhältnisse in den Tropen.

Mit der weiteren Auskühlung des Weltmeeres und der zunehmend zentraleren Lage Antarktikas unter dem Südpol entwickelte sich in den letzten Abschnitten des Tertiärs eine bleibende Vergletscherung. Zunächst bildeten sich unter noch gemäßigten Bedingungen temperierte oder warme Gletscher, d. h. Gletscher, deren Eistemperatur in Nähe des Gefrierpunktes lag. Die weitere Abkühlung leitete – wohl im jüngeren Tertiär – die temperierte oder warme in eine polare oder kalte Vergletscherung über, d. h., die Gletschertemperatur blieb nun ständig unter 0°C . Zusätzlich übertraf die Anhäufung von Schnee – als Ausgangsmaterial für den Umwandlungsprozeß zu Gletschereis – den Abtrag durch Schmelzen, Verdunsten und Eisbergbildung, so daß der Einnahme eine geringere

Ausgabe gegenüberstand und sich somit eine positive Massenbilanz, eine Anhäufung, ergab. Mit der daraus resultierenden verstärkten Bildung von Wasserrücklagen auf dem Land in Form des Gletschereises sank zwangsläufig der Meeresspiegel (glazialeustatisches Absinken). Auch in den polaren Gebirgen der Nordkontinente bildeten sich noch im ausgehenden Tertiär Gletscher. Das jungkänozoische, das gegenwärtige, Eiszeitalter hatte begonnen.

Auf dem antarktischen Kontinent, der nun eine weitgehend zirkumpolare Position einnahm, hatte sich ein Inlandeisschild aufgebaut, der den gesamten Kontinent bedeckte. Mit dem mehrfachen Erreichen der größtmöglichen Mächtigkeit trat an der Unterseite des Inlandeises mehrmals Druckschmelzung ein, die das wiederholte Ausgleiten auf das umliegende Meer einleitete. Um den Kontinent bildete sich somit von Zeit zu Zeit ein riesiger Eisschelfgürtel aus. Zugleich führte das Ausgleiten des Gletschereises in das Meer zu einem Anstieg des Weltmeeresspiegels um etwa 20 m.

Eine so stark vergrößerte antarktische Eisfläche reicht aus, um über die Zunahme des Reflexionsvermögens eine erdweite Temperaturenniedrigung um rund 5 grd herbeizuführen. Ausgelöst durch diese erdweite Abkühlung, erfolgte die Entwicklung von Inlandeisschilden in geeigneten Bereichen der Nordkontinente. Sie führte gleichzeitig – durch die Verlagerung weiterer Wassermassen auf das Land und die Speicherung im Gletschereis – zum glazialeustatischen Absinken des Meeresspiegels.

Nach dem Ausgleiten des antarktischen Inlandeises und der mit ihm erfolgten Druckentlastung entfiel die Druckschmelzung. Der nun geringmächtige antarktische Inlandeisschild erlangte wieder stabile Verhältnisse. Der riesige Eisschelfgürtel, der keinen genügenden Nachschub erhielt, wurde durch das Meer nach und nach in Eisberge zerschlagen, die im weiteren Verlauf abschmolzen.

Von der im Süd- und Nordpolarbereich erfolgten Abkühlung wurde auch das Meer ergriffen. Meeresströmungen führten in den Tropen eine Senkung der Meerwassertemperatur um etwa 5 bis 6 grd herbei. Das kaltzeitlich erniedrigte Temperaturniveau löste eine Zeit deutlich ge-



Die Schönheit ehemals vergletschert Gebirge zeigt sich in vielen Karen, Ursprungsbereichen von Gletschern, deren Becken heute meist von kleinen Seen erfüllt sind. – Kar mit Karsee in der Hohen Tatra

ringerer Verdunstung aus. Die für diesen Zeitraum um ungefähr 30% niedriger als heute geschätzte Verdunstung ergab wiederum eine erdweit festgestellte Trockenphase in der Kaltzeit.

Während der hochkaltzeitlichen Trockenphase wurden sämtliche Inlandeise und Gletscher kaum noch ernährt. Ihr Wachstum schränkte sich auf ein Minimum ein. Auf den großen Landmassen der Nordhalbkugel konnte sich der

Wind unter den trockenkalten Bedingungen im waldfreien Umland der Inlandeise ungehemmt entfalten. Er nahm Feinmaterial in großen Mengen auf (Feinsand, Schluff und Ton), das, vom Frost zerkleinert, auf weiten Flächen bereitlag, und hüllte die Gletschereisoberflächen ein. Die Staubdecke auf dem Eis (Abnahme des Reflexionsvermögens) förderte nachhaltig das sommerliche Abschmelzen, womit der Übergang zum Abbau der Inlandeise eingeleitet wurde. Im Gegensatz zu den Inlandeisen in Europa und Nordamerika wirkte sich dieser Vorgang wegen der isolierten, der meerumgebenden Lage nicht auf den grönländischen und antarktischen Inlandeisschild aus.

Mit dem Abschmelzen des nordeuropäischen und nordamerikanischen Inlandeises wird der Weg in eine Warmzeit frei. Über sie führt jedoch der Weg in eine weitere Kaltzeit. Infolgedessen wird der Wechsel von Kalt- und Warmzeiten solange andauern, bis das inlandeisbedeckte Antarktika aus seiner zentralen Lage unter dem Südpol hinausdriftet. Solange der antarktische Kontinent seine zirkumpolare Position einhält, ist die wesentlichste Voraussetzung für ein Eiszeitalter gegeben.

Ohne Zweifel ist auch dieser – hier nur kurz skizzierte – Erklärungsversuch, der auf den Erkenntnissen vieler Disziplinen fußt und sie in einem geschlossenen Gebäude vereint, nicht unantastbar. Er gibt jedoch die Möglichkeit, aus rein irdischen Ursachen das Entstehen und Vergehen von Eiszeitaltern zu erklären. Darüber hinaus kann mit diesem Modell zusätzlich der Wechsel von Kalt- und Warmzeiten in unserem Eiszeitalter gedeutet werden. Weitere erdwissenschaftliche Erkenntnisse können zudem noch Verbesserungen bringen. Obwohl diese Zusammenschau auch ohne Berücksichtigung der periodischen Schwankungen der Erdbahnelemente auskommt, brauchen diese als Anstoß für den zyklischen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten nicht abgelehnt zu werden.

Was wäre, wenn ...

Nach allem, was die Erdwissenschaftler bisher in Erfahrung gebracht haben, hat es den Anschein, daß die menschliche Gesellschaft sich mit zweierlei abfinden und daraus Folgerungen ziehen muß:

Wir leben in einem Eiszeitalter – und zwar in einer Warmzeit,

Veränderungen des jetzigen Zustandes sind möglich.

Streifen wir mit einem kurzen Blick die Nachbarplaneten Venus und Mars, betrachten die Erdgeschichte seit dem Beginn des Erdalters ... und spielen in Gedanken folgende Varianten durch:

... es wärmer wird

Außerordentlich ungünstig wären Veränderungen auf der Erde, die zu Zuständen führten, wie sie – nach bisherigen Forschungsergebnissen – auf dem Nachbarplaneten Venus herrschen. Deren sehr dichte Atmosphäre enthält fast ausschließlich Kohlendioxid. Dabei ist der atmosphärische Druck auf der Venusoberfläche rund 90mal größer als auf der Erdoberfläche. Hohe Temperaturen, die weit höher als 300 Grad über dem Siedepunkt des Wassers liegen, prägen bei einer langsamen Rotation des Planeten die ungünstigen Verhältnisse. Für die hohe Erwärmung ist offenbar das Kohlendioxid und auch die größere Sonnennähe verantwortlich zu machen. Der steigende Kohlendioxidgehalt in der Erdatmosphäre sollte zumindest Anlaß sein, die Forschungen weiterhin erdweit zu betreiben, um die Auswirkungen dieser Zunahme richtig einzuschätzen.

Die jetzige Vergletscherung der Erde erforderte für ihr Abschmelzen nur eine verhältnismäßig geringfügige Erhöhung der Temperatur. Es müßten somit keineswegs so drastische Veränderungen eintreten, die etwa den Verhältnissen auf der Venus glichen, um der Menschheit vielfältige Schwierigkeiten zu bereiten.

Ein eisfreier Erdball, der den eigentlichen Normalzustand im Verlauf der Erdgeschichte repräsentiert, wäre eine recht annehmbare Variante. Allerdings, und das müßte in Kauf genommen werden, würde der ansteigende Meeresspiegel alles Land etwa bis zu einer Höhe von rund 60 m über dem jetzigen Meeresniveau überfluten. Wird das im Gletschereis gebundene Wasser mit 24 Mio km³ angenommen, so stiege der Weltmeeresspiegel ohne isostatischen Ausgleich und bezogen auf die heutige Meeresfläche um ungefähr 67 m. Bei einem geschätzten, im Gletschereis gebundenen Wasservolumen von 28,5 Mio km³ erhöhte sich der Anstiegsbetrag ohne isostatisches Absinken und im Rahmen des heutigen Weltmeeres gar auf etwa 79 m. Wird das Übergreifen des Weltmeeres auf das Land und mit ihm die Überflutung allen Landes bis zu einer Höhe von ungefähr 60 m über dem jetzigen Meeresspiegel als nicht zu hoch betrachtet, gingen viele Küstenbereiche und Tiefländer mit einer ganzen Reihe von großen Städten im Meer unter. In Europa beträfe es besonders das nördliche Mitteleuropa.

Welche Maßnahmen getroffen werden müßten, um das bedrohte Land und die dort lebenden Menschen vor einem, wenn auch nicht katastrophenartigen, aber unaufhaltsamen und stetigen Anstieg des Meeres zu retten, soll hier der Vorstellungskraft eines jeden Lesers überlassen bleiben.

Gesellschaftliche Einflüsse wirken auf die Umwelt schon seit Jahrtausenden, jedoch hat die Einflußnahme seit der ersten wissenschaftlich-technischen Revolution solche Ausmaße angenommen, daß Auswirkungen und Folgen auch auf das Klima und mögliche Änderungen bedacht werden müssen.

In den vergangenen Jahrzehnten wurde vielfach in der bemerkenswerten Erwärmung während der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts ein Ausdruck des zunehmenden



In Trogtälern liegen häufig Seen. Ihre Becken wurden von Gletschern ausgeschürft; hier ein Blick auf den Genfer See und Montreux (Schweiz)

Einflusses der Gesellschaft auf die klimatischen Verhältnisse erblickt.

Es sind vor allem drei Einflußbereiche, von denen zwei in Richtung einer Temperaturerhöhung abzielen: die Zunahme des Kohlendioxidgehaltes, der Eintrag von Staub in die Atmosphäre und die Zufuhr von Wärme aus der Energieerzeugung.

Allerdings – und das soll gleich eingangs festgehalten werden – klaffen auf Grund vielfältiger Schwierigkeiten die Deutungen der bisher vorliegenden Beobachtungen und Messungen weit auseinander, so daß selbst unter den Experten eine große Unsicherheit herrscht.

Sicher festgestellt wurde eine Erhöhung des Kohlendioxidgehaltes der Atmosphäre, ein unerbittlich in die Höhe gehender Trend. Gemessen wurde unter anderem an

Orten, die durch keinerlei bemerkenswerte besondere Einflüsse gestört sind (z. B. Mauna-Loa-Observatorium auf Hawaii). Im Ergebnis konnte eine erdweite Zunahme des Kohlendioxidgehaltes registriert werden. Sie wird vor allem auf die Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas zurückgeführt, mithin auf gesellschaftliche Einflußnahme. Für die vergangenen 100 Jahre wurde eine Zunahme des Kohlendioxidgehaltes um 20% nachgewiesen. Bis zur Jahrhundertwende wird die weitere Erhöhung auf nochmals 20% geschätzt.

Für die Abschätzungen möglicher Einflüsse auf das Klima müßte jedoch die weitere Zunahme einigermaßen sicher bekannt sein. Selbst diese notwendige Voraussetzung ist nicht genügend, solange nicht erforscht ist, in welchem Maße der erhöhte Zuwachs an Kohlendioxid gebunden wird. Für diese Bindung des CO₂ spielt das Weltmeer eine große Rolle. Es enthält etwa 50- bis 60mal mehr Kohlendioxid als die Atmosphäre, kann Kohlendioxid in großem Maße aufnehmen und über Karbonatbildung in Sedimenten binden. Nach Berechnungen der verbrannten Kohle-, Erdöl- und Erdgasmengen der vergangenen 100 Jahre hätte der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre erheblich höher sein müssen als tatsächlich registriert wurde. Entweder ist der nicht erfaßte Betrag im Weltmeer gebunden oder von der Vegetation zu stärkerem Wachstum aufgenommen worden.

Trotzdem braucht eine Erhöhung des Kohlendioxidgehaltes der Atmosphäre nicht zwangsläufig zu einer Erwärmung zu führen, da mit einer Erwärmung eine Zunahme der Bewölkung verbunden sein kann. Sie würde die Sonnenstrahlung mindern und könnte eine durch den Anstieg des Kohlendioxidgehaltes ausgelöste Erwärmung in Grenzen halten. Es wird unter anderem vermutet, daß eine Bewölkungszunahme um etwa 2% eine Erhöhung des Kohlendioxidgehaltes um 100% ausgleiche.

Unterschiedliche Bedeutung messen Wissenschaftler dem Staubeintrag in die Atmosphäre bei. Im Extremfall wird die Zunahme der Staubbelastung in der Atmosphäre für die gegenwärtige Abkühlung verantwortlich gemacht. Sie soll die Wirkung des erhöhten Kohlendioxidgehaltes bereits übertroffen haben.

Wichtig ist vor allem die Höhe, in die Staub gelangt. Unbestreitbar bewirkt ein Staubeintrag in größere Höhe – wie in die unteren Bereiche der Stratosphäre – eine Abkühlung an der Erdoberfläche. Für den unteren Bereich der Atmosphäre, die Troposphäre, zeigten Berechnungen für unterschiedliche Unterlagen (z. B. Ozeane, vegetationstragende Gebiete, Schneeflächen) überwiegend eine Temperaturerhöhung. Im Endresultat ergibt sich eine Erwärmung oder Abkühlung – abhängig vom Zustand des Staubes und der Unterlage – durch das Verhältnis von Absorption (Aufnahme) und Rückstreuung der Strahlung.

Stäube aus der wirtschaftlichen Tätigkeit werden fast gänzlich in die Troposphäre eingebracht, die verschmutzte Atmosphäre erfährt eine ständige Reinigung durch Niederschlag, also kann die seit Mitte unseres Jahrhunderts nachweisbare Abkühlung nicht auf gesellschaftliche Einflüsse zurückgeführt werden. Der vor allem aus der starken Industrialisierung und – untergeordnet – aus der landwirtschaftlichen Nutzung stammende Staub hat zwar in vielen Gebieten zugenommen, aber erweitert ist der von Menschen produzierte Staub noch nicht deutlich wirksam. Läßt sich die Staubbelastung auf dem jetzigen Stand halten, evtl. sogar durch Weiterentwicklung der Technik vermindern, scheidet der Staubeintrag als wesentlich beeinflussende Größe aus.

Es wurde vermutet, daß eine geringe vulkanische Tätigkeit in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts und damit verminderter Staubeintrag in die untere Stratosphäre die Warmphase in der ersten Jahrhunderthälfte hervorgerufen haben soll. Verstärkte vulkanische Ausbrüche und mit ihnen Einblasen von Staub in große Höhen in den zurückliegenden rund 30 Jahren hätten – wie schon zuvor – die Abkühlungstendenzen ausgelöst.

Schließlich kann bei der Beobachtung und Registrierung gesellschaftlicher Einflüsse auf das Klima nicht an der Energieerzeugung vorbeigegangen werden. Wie der Staub, so wirkt sich die direkte Wärmeabgabe nachweisbar über Industrieballungen und Großstädten (Stadtklima!) aus. Die abgegebenen Wärmemengen erreichen damit über Ballungsgebieten, die im Gegensatz zur gesamten Erdoberflä-



Fjorde sind »ertrunkene« Trogtäler, ihre unteren Bereiche gerieten nach der Gletscherformung unter den Meeresspiegel. – Fjord bei Narvik (Norwegen)

che sehr kleine Areale einnehmen, zwischen 20 und 50 % der natürlichen Strahlungsbilanz, wie in der Industrieballung an Ruhr und Niederrhein (rund 10 700 km²) nicht ganz 20 %, im engeren Ruhrgebiet (rund 3 300 km²) fast 25 %, in Hamburg (etwa 750 km²) ebenfalls fast 25 % und im bebauten Bereich von Hamburg einschließlich des Hafens (ungefähr 360 km²) um 50 %.

Daß Städte wärmer als ihr Umland sind, ist allen eine wohlvertraute Tatsache. Die Wärmequellen der menschlichen Gesellschaft üben somit zweifellos einen Einfluß auf örtliche oder lokale, vielleicht auch auf gebietliche oder regionale Klimaverhältnisse aus. Im erdweiten Maßstab ist die durch den Menschen verursachte Wärmeezeugung bisher noch zu gering, um bedrohlich zu sein. Für die nähere Zukunft ist jedoch eine deutlichere Einflußnahme zu erwarten.

Wäre – bei Ausschluß weiterer klimabeeinflussender

Faktoren – die gesellschaftliche Einwirkung auf das Klima bereits so stark, daß sie mit der durch den Menschen ausgelösten Erhöhung des Kohlendioxidgehaltes, des Staubeintrages und der Wärmeerzeugung Einfluß auf das Klima in Form einer Temperaturerhöhung nähme, so müßte sich beispielsweise als sichtbares Zeichen die Verbreitung des Meereises verringern. Gegenwärtig ist das Gegenteil der Fall. Die Abkühlung in den letzten rund 30 Jahren beweist eindeutig, daß die natürlichen Vorgänge und ihre Auswirkungen auf das Klima noch immer den Einfluß der menschlichen Gesellschaft übertreffen.

Der Verbrauch von fossilen Brennstoffen treibt den Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre jedoch unablässig höher und höher. Vor wenigen Jahren beruhte die Energieerzeugung zu rund 90 % auf fossilen Brennstoffen. Bisher ist der Anteil der Kern- und Solarenergie noch nicht entscheidend vergrößert worden. Für eine gewichtige Erhöhung ihres Anteils werden sicherlich noch etliche Jahrzehnte benötigt. Somit wächst der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre heute Jahr für Jahr um etwa 2 ppm (= parts per million = Teilchen pro Million = Teilchen einer Substanz pro Millionen Teilchen Luft). Der Stand vom Jahre 1980: rund 335 ppm.

»Die künftige Entwicklung unseres Klimas ist in den letzten Jahren in rasch wachsendem Umfang erörtert worden, nachdem der Einfluß des Menschen die Schwelle einer globalen Nachweisbarkeit voraussichtlich noch in diesem Jahrhundert erreichen wird. Die Diskussion hat mit der Welt-Klima-Konferenz in Genf (Februar 1979) einen ersten Höhepunkt erreicht: wegen des ständig anwachsenden Gehalts an Kohlendioxid spielt hier auch die künftige Energiepolitik eine Rolle« – stellte der bekannte Klimatologe H. Flohn 1980 auf einer Tagung der Leopoldina zum Thema »Raum und Zeit« in Halle fest.

Eine Vervierfachung des gegenwärtigen Kohlendioxidgehaltes in der Atmosphäre würde zu einer eisfreien Arktis und zu einer daraus ableitbaren Verschiebung der Klimazonen um rund 600 km nach Norden führen. Aus der nordwärtigen Verschiebung der Klimazonen folgte unausweichbar eine Verlagerung der Anbauzonen nach Norden.

Nach Modellrechnungen könnte eine Vervielfachung des Kohlendioxidgehaltes in der Atmosphäre bei uneingeschränktem Verbrauch fossiler Brennstoffe für die Energieproduktion und bei einer Erdbevölkerung von 9 Milliarden Menschen mit einem Pro-Kopf-Energieverbrauch von 5,6 kW schon in 100 Jahren zu einer davon abgeleiteten Temperaturerhöhung um rund 6 grd führen. Die sich daraus ergebenden, rasch eintretenden Folgewirkungen wären für die Menschheit äußerst schwerwiegend. So ergäben sich deutliche Änderungen im Volumen und in der Ausdehnung des Eises, die ihrerseits bereits einen erheblichen Anstieg des Meeresspiegels nach sich zögen, und eine um einige hundert Kilometer nordwärtige Verschiebung der Anbauzonen.

Ein verstärkter und rascher Einsatz der Kernenergie mit einem Anteil von rund 75 % an der Gesamtenergieerzeugung, die mögliche Erhöhung des Anteils der Sonnenenergie auf etwas über 20 % und eine überaus starke Verminderung der Energiegewinnung aus fossilen Energieträgern auf etwa 5 % könnte bei den zuvor genannten Voraussetzungen den hochschnellenden Anstieg des Kohlendioxidgehaltes in der Atmosphäre verhindern und hielte die Temperaturzunahme mit rund 1 bis 1,2 grd in annehmbaren Grenzen.

... es kälter wird

Verhältnisse, wie sie den Mars kennzeichnen, gab es im Laufe der Erdgeschichte bisher nicht. Die mittlere Oberflächentemperatur auf dem Mars beträgt 40 grd unter dem Gefrierpunkt. Seine Rotation ist der der Erde fast vergleichbar. Ihn charakterisiert eine dünne Atmosphäre aus Kohlendioxid und ein unbedeutender Wasservorrat. Bekannt sind die sehr ausgeprägten Stürme, die ihn oft wochenlang in Staub einhüllen. Sie deuten auf eine heftige atmosphärische Zirkulation hin.

Solche »unterkühlten« Verhältnisse wären für die Erde mit einer völligen Vergletscherung und Eisbedeckung vorstellbar, wenn es zu einer außerordentlich ungünstigen Anordnung der Kontinente auf dem Erdball käme. Die

Tendenzen in der Drift der Kontinente zeigen zwar keine so »dramatische« Änderung an, weisen aber über die zu erwartenden Änderungen der Land-See-Verteilung auf ein Andauern des Eiszeitalters hin.

Ein bekannter sowjetischer Forscher glaubt aus seinen Untersuchungen annehmen zu dürfen, daß in rund 500 Mio Jahren, also in einer kaum vorstellbaren Zukunft, die Temperaturen auf der Erde für einen gewissen Zeitabschnitt auf rund 50 Grad unter den Gefrierpunkt absinken werden.

Komplizierte Verhältnisse schüfe die Ausbreitung von Inlandeisen und Gletschern in einer künftigen Kaltzeit. Schon allein eine von gegenwärtig rund 16 Mio km² auf 42 Mio km² vergrößerte Ausweitung und Neuanlage der Gletschereisbedeckung – wie in der bisher jüngsten Kaltzeit – würde für die direkt betroffenen Gebiete ungeheure Zerstörungen bringen. Die entsprechende Temperaturerniedrigung vertriebe den Wald im Umkreis von Inlandeisen und Gletschern in weiten Bereichen der Nordhalbkugel. Diese Räume würden zur unwirtlichen, fast vegetationsleeren Frostschuttzone und zur kaum zu kultivierenden Tundra. Wälder, die vor Eingriff der menschlichen Gesellschaft in unseren Breiten geschlossen das Land bedeckten, fänden sich in die äußersten südlichen Randbereiche unseres Kontinentes verdrängt.

Insgesamt käme es zu einer gewaltigen südwardigen Ausdehnung der Gletscherzone, in der DDR bis südlich von Berlin. Frostschutt- und Tundrenzone erführen ebenfalls eine erhebliche Ausdehnung und südwardige Verlagerung. Das außertropische Waldland (Nadel-, Misch- und Laubwald) zeigte neben einer bedeutenden Südwardverschiebung jedoch gleichzeitig eine beträchtliche Einengung seiner Bestockungsfläche. Verschiebung und geringe Einengung beträfe die Zone der Hartlaubgewächse des heutigen Mittelmeerraumes, während bei südwardiger Verlagerung sich die Zone der Wüsten wohl noch etwas erweiterte. Schließlich verlagerte sich auch die Savannenzone um einiges äquatorwärts bei geringer Erweiterung. Auch der Nordrand der Zone des immergrünen tropischen Regenwaldes zöge sich noch etwas äquatorwärts zurück.



 Zone durchgängigen Dauerfrostbodens

 Zone unterbrochenen Dauerfrostbodens

 Zone sporadischen Dauerfrostbodens

Heutige Ausdehnung des Dauerfrostbodens auf den Nordkontinenten (nach R. F. Black, 1954)

Die während einer nächsten Kaltzeit künftig möglichen Verschiebungen der Vegetationszonen wurden aus den Verhältnissen der bisher jüngsten Kaltzeit abgeleitet,

wobei innerhalb einer Kaltzeit die Verhältnisse zweifellos differenzierter und komplizierter sind, als sie im hier gegebenen Überblick dargestellt werden konnten. Mit den Verschiebungen der Vegetationszonen gingen äquatorwärts gerichtete Verlagerungen der atmosphärischen Zirkulationsbereiche einher, mithin entsprechende äquatorwärtige Verlegungen der Klimagürtel, die die Verschiebungen der Vegetationszonen dirigierten.

Zusammenfassend ließe sich feststellen, daß die kaltzeitlichen Verschiebungen der Klima- und Vegetationszonen auf der Nordhalbkugel die Außertropen wesentlich stärker betrafen als die Tropen. Wegen der kaltzeitlich nur verhältnismäßig geringfügig vergrößerten Gletschereisbedeckung der Südhalbkugel – auf Grund der dortigen Land-Meer-Verteilung – träten auf ihr wesentlich kleinere Ausmaße der Verschiebungen ein.

Mit einer erdweiten Erniedrigung der Temperatur steht die Menschheit beim gegenwärtigen Entwicklungsstand der Produktivkräfte vor erheblichen Problemen. In Kaltzeiten muß mit einer durchschnittlichen Temperaturerniedrigung um rund 5 grd gerechnet werden, wobei sich in den Tropen eine Verringerung um etwa 4 grd und in den gletschereisnahen Bereichen auf den Nordkontinenten eine um ungefähr 8 bis 12 grd einstellen würde. Zusätzlich verminderten sich die Niederschläge.

Für den mitteleuropäischen Raum und für weite gletschereisnahe Bereiche insgesamt ergäbe sich ein weiteres hinderndes Phänomen, der Dauerfrostboden.

Sein heute weitab von Mitteleuropa liegender Verbreitungsraum umfaßt gegenwärtig etwa 21 Mio km² und ist um nahezu 5 Mio km² größer als die derzeitige Vergletscherung auf dem Erdball. Neben der Bezeichnung Dauerfrostboden sind als Gleichworte auch ständige Bodengefrorenis, Permafrostboden, Pergelisol, perenne Tjäle oder Mjerslota gebräuchlich.

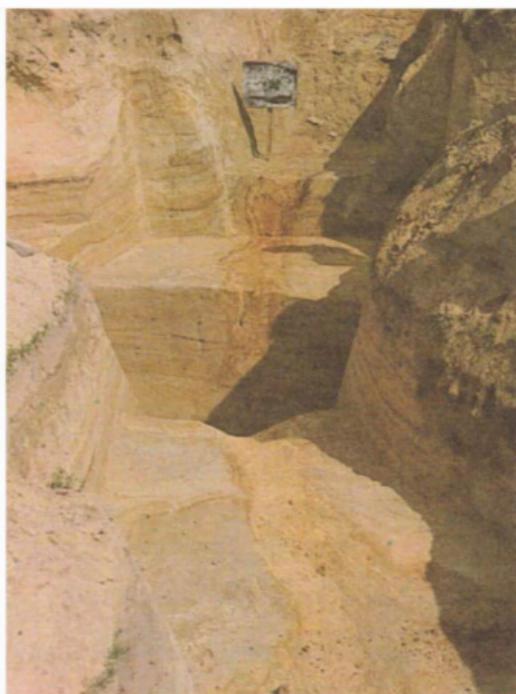
Infolge des kaltzeitlichen Absinkens des Meeresspiegels bildete sich in unvergletscherten Gebieten der bisher jüngsten Kaltzeit Dauerfrostboden in heute wieder meerüberfluteten Bereichen, wie beispielsweise weitverbreitet auf dem Boden der Kara-See vor den Halbinseln Jamal und Gyda, auf dem Boden der Laptew- und Ost-

sibirischen See, der heute noch vorhanden und in die Gesamtfläche von 21 Mio km² nicht eingerechnet ist.

Der Dauerfrostboden, der früher auch als »ewige Gefronnis« bezeichnet wurde, bildete und bildet sich in Bereichen extrem winterkalter Gebiete. Wichtigste Voraussetzung für das Ent- und Bestehen ist im Winter eine lang anhaltende Zeit mit Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. Gefördert wird die Bildung von Dauerfrostboden durch länger anhaltende Zeitabschnitte mit geringer Luftbewegung und Bewölkung. Im Gegensatz dazu hemmt eine früh in der winterlichen Jahreszeit ausgebildete und dicke Schneedecke seine Entstehung. Der Dauerfrostboden ist in den tieferen Bereichen Nordasiens sicher eine kaltzeitliche Bildung und in den oberen Bereichen abhängig von den heutigen Klimaverhältnissen. Bei Temperaturerniedrigung erweitert sich das Dauerfrostbodengebiet, bei Erhöhung der Temperatur engt es sich ein. Somit sind die Voraussetzungen für die Erhaltung und Bildung des Dauerfrostbodens noch heute gegeben (z. B. in Kanada erneute Bildung des Dauerfrostbodens nach Abschmelzen des jüngstaltzeitlichen Inlandeises). Weitere Faktoren, wie Bodenmaterial, Gestein, Wassergehalt, Pflanzendecke und Oberflächengestalt, nehmen Einfluß auf das Entstehen von Dauerfrostboden. Es ist ein Ursachenbündel, das zur Ausbildung des Dauerfrostbodens führt, so daß seine Verbreitung nur schwer gesetzmäßig zu fassen ist.

Im Dauerfrostboden, der einen Körper aus Boden, Gestein, Eis, Wasser und Luft darstellt, herrschen seit langer Zeit (jahrhunderte- bis jahrzehntausendlang) Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. Wenn sich schon in wärmeren Zeiten, wie beispielsweise zur Zeit des Klimaoptimums in unserer Warmzeit (Atlantikum: ungefähr 7 500 bis 4 500 Jahre vor heute), nachgewiesenermaßen das Areal des Dauerfrostbodens verkleinerte, wenn sich danach das Verbreitungsgebiet infolge ungünstigeren Klimas wieder ausdehnte, so dürfte sich das Dauerfrostbodengebiet in den Kaltzeiten bedeutend ausgeweitet haben.

Bestimmte Bildungen, die im heutigen Verbreitungsgebiet des Dauerfrostbodens auftreten, wie beispielsweise Eiskeile – keilförmig in den Dauerfrostboden eingreifende,



Neben riesigen Eiskeilen, die im heutigen Dauerfrostboden Jakutiens bis 100 m Tiefe in sich verschneidenden und abwärts verjüngenden Eiswänden vorkommen, bezeugen fossile Eiskeile, nachträglich mit anderem Material ausgefüllt, die kaltzeitliche Ausweitung des Dauerfrostbodens in Europa bis zur Atlantikküste.

sich nach unten verjüngende und sich vielfach überschneidende Eiswände – oder Täler in Sanden und Kiesen, die nur wegen des Dauerfrostbodens im Untergrund entstehen konnten, sind als heute nicht mehr aktive Bildungen weithin im Gebiet vor den ehemaligen Inlandeisen und Gletschern nachgewiesen worden. Aus ihrem Vorkommen und aus ihrer Verbreitung konnte auf das ehemalige Ausdehnungsgebiet des Dauerfrostbodens geschlossen werden.

Außer der Vergletscherung weiter Gebiete kämen – gesetzt den Fall, es wird »kälter« – ausgedehnte Dauerfrostbodenbereiche hinzu, die die Bodennutzung erheblich erschwerten.



-  Größere Vergletscherungsgebiete in der jüngsten Kaltzeit
-  Größere Vergletscherungsgebiete in der Gegenwart
-  Jüngstkaltzeitliche Küstenlinie des Meeres
-  Küstenlinie des Kaspisees im bisher wärmsten Abschnitt des Holozäns
-  Jüngstkaltzeitliche Küstenlinie des Binnenbeckens
-  Jüngstkaltzeitliche Ausdehnung des Dauerfrostbodens
-  Ausdehnung des Dauerfrostbodens im bisher wärmsten Abschnitt des Holozäns
-  Gegenwärtige Ausdehnung des Dauerfrostbodens

Veränderungen in der Verbreitung des Dauerfrostbodens in Nord-Eurasien und Zentralasien seit dem Höhepunkt der jüngsten Kaltzeit (nach B. Frenzel, 1960)

Jedes Jahr im Sommer tauen nur die obersten Dezimeter oder Meter auf, während der Untergrund gefroren und deshalb wasserundurchlässig bleibt.

Für die Tiefe des sommerlichen Auftaubodens spielt das anstehende Material eine bedeutende Rolle. Wassergehalt, tatsächliche Wasserkapazität, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit üben dabei einen starken Einfluß aus. Deshalb erschweren kiesige und sandige Böden das Entstehen von Dauerfrostboden, während feinkörniges Material mit hohem Wasseraufnahmevermögen seine Bildung

fördert. Torfe sind besonders frostbodengefährdet. Waldbestand hemmt das sommerliche Auftauen, so daß unter Wäldern nur verhältnismäßig geringe Auftautiefen registriert werden. Wegen der geringen Auftautiefe sind die Baumabstände sehr groß. Hingegen taut der Boden unter Wiesen und Wiesensteppen im Sommer besonders tief auf.

Die ungünstigen Folgen für die wirtschaftliche Nutzung und für die Wegsamkeit auf sommerlichem Auftauboden lassen sich leicht ausmalen. Insgesamt hemmt der Dauerfrostboden die wirtschaftliche Erschließung, wodurch die ökonomische Entwicklung dieser Bereiche hohe Investitionen erfordert.

Es überrascht kaum, wenn sowjetische Wissenschaftler und Techniker im Laufe der vergangenen Jahrzehnte eine Vielzahl von Erkenntnissen über den Dauerfrostboden und seine technische Behandlung gewonnen haben, denn auf dem Staatsgebiet der UdSSR nimmt der Dauerfrostboden eine Fläche von nahezu 10 Mio km² ein, d. h. etwa 48,1 % des gesamten Territoriums. Ohne Berücksichtigung von Antarktika sind das gleichzeitig fast 50% der Dauerfrostbodenfläche der Festländer der Erde.

Diese unwirtliche Fläche muß nun – nicht zuletzt wegen der reichen Bodenschätze – wirtschaftlich erschlossen werden. Das bedeutet, daß auf ihr Städte und Siedlungen, Werke, Verkehrstrassen, Staudämme und vielfältige weitere Anlagen errichtet werden müssen. Das verlangt nach neuen Ideen, neuen Technologien, neuen Materialien.

Wird unsere Warmzeit von einer Kaltzeit abgelöst (wir wissen allerdings nicht wann!), dann würde sich der Dauerfrostboden bis nach Mitteleuropa ausweiten. Die Pionierarbeit, die in Kanada, in den USA und vor allem in der Sowjetunion zur Nutzung der Dauerfrostbodengebiete geleistet wird, käme der gesamten Menschheit zugute, denn mit der Annahme einer fast zu einem Drittel vergletscherten Festlandsfläche und einer etwa gleichgroßen Ausdehnung der Wüstengebiete wären unter kaltzeitlichen Verhältnissen weniger als 50 % der Landflächen auf dem Erdball nutzbar. Durch die Ausweitung der Frostschutt- und Tundrenzonen im Vorland der Vergletscherungen und

weitere kaltzeitliche Erschwernisse könnten ungefähr zwei Drittel der Landflächen auf der Erde für eine forst- und landwirtschaftliche Nutzung ausfallen. Es ergäbe sich gegenüber dem warmzeitlichen Zustand etwa eine Umkehrung der nutzbaren Flächen auf dem Festland der Erde.

Der warmzeitliche Zustand

Die gegenwärtig herrschenden klimatischen Verhältnisse der Erde sind so günstig, daß nur rund ein Drittel der Landflächen auf dem Erdball grundsätzlich für eine forst- und landwirtschaftliche Nutzung entfällt. Diese liegen einerseits in den Kaltklima-, andererseits in den Trockenklimagebieten der Erde. Die Kaltklimagebiete umfassen 16,4% (24,4 Mio km²) der Landflächen, wovon auf 10,7% (15,9 Mio km²) der Festlandsfläche die Mitteltemperatur auch des wärmsten Monats den Gefrierpunkt nicht übersteigt (EF-Klima, nach W. Köppen). Diese Fläche entspricht nahezu dem unter Inlandeisen und Gletschern begrabenen Areal, das etwas über 16 Mio km² groß ist.

Die Höhenlage der Fläche, die bis auf die polnahen Bereiche den Erdkörper umgibt und über der sich Schnee anhäuft und zu Gletschereis umgewandelt wird, ist vor allem von den Temperatur- und Niederschlagsverhältnissen abhängig. Sie wird klimatische, besser regionale Schneegrenze genannt. Sämtliche Landgebiete in den polaren Breiten, die – von örtlichen Ausnahmen abgesehen – über diese Fläche hinausragen, tragen die Nährgebiete der Inlandeise und Gletscher. Je nach Ernährung schieben sich die Inlandeise und Gletscher mehr oder weniger weit unter diese Fläche herab, bis sich Abschmelzen und Verdunsten sowie Gletschereisnachschieben die Waage halten.

Zu den für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung »unbrauchbaren« Vergletscherungsgebieten von rund 16 Mio km² kommen fast uneingeschränkt die Bereiche des Tundrenklimas (ET-Klima nach W. Köppen) mit rund 8,5 Mio km² (5,7%) auf den Landflächen der Erde hinzu. Da die Mitteltemperatur des wärmsten Monats im Jahres-



Eine Art der Brodel- und Taschenböden, die in Dauerfrostbodenbereichen entstehen, sind die Tropfenböden.

verlauf unter 10°C liegt, können die Samen von Waldbäumen nicht mehr ausreifen.

Zu den vergletscherten und zu den unwirtschaftlichen Flächen der Tundrenbereiche kommen als weiterhin nicht forst- und landwirtschaftlich nutzbare Areale die Wüstengebiete der Festländer hinzu (BW-Klima nach W. Köppen). Insgesamt nehmen sie 26 Mio km² (17,5 %) der Landflächen ein. Sie verteilen sich auf die Kontinente unterschiedlich. Den größten Anteil weist Afrika mit 11,5 Mio km² (39,4 %) auf. Australien besitzt zwar nur auf 3,2 Mio km² wüstenhaftes Klima, jedoch sind es bei der kleineren Gesamtfläche 37,6 %. Eurasiens Flächen mit Wüstenklima betragen 11,5 Mio km² (17,8 %). Dieser Prozentsatz entspricht etwa dem Durchschnitt für die Landflächen der Erde. Unterdurchschnittliche Flächen mit Wüstenklima besitzen Nord- und Südamerika: in Südamerika etwa 0,9 Mio km² (5,0%), in Nordamerika 0,8 Mio km² (3,3%). Auf den übrigen zwei Dritteln der Landfläche bereiten Dauerfrostboden, bergiges Gelände und die weiten Übergangsräume zu den Wüsten der Landnutzung Schwierigkeiten.

Auftrag für die Wissenschaft

Als vor rund 140 Jahren die geowissenschaftliche Forschung die Öffentlichkeit mit dem Nachweis einer ehemals größeren Vergletscherung des Erdballs konfrontierte, setzte sie einen bis in unsere Tage fortdauernden Meinungsstreit in Gang, der mit seinen vielen Problemen und noch immer ungelösten Fragen heute stärker denn je gesellschaftliches Interesse beansprucht.

Die Entwicklung des Menschen ist auf das engste mit dem jungkänozoischen Eiszeitalter verknüpft, die Entwicklung der menschlichen Gesellschaft zur heutigen Höhe der Kultur, Wissenschaft und Technik fest in unserer Warmzeit verwurzelt. Bis in die Gegenwart hinein kann die menschliche Gesellschaft den von der Natur abgesteckten Rahmen weder insgesamt steuernd beherrschen geschweige denn sich aus ihm lösen.

Mit dem aus den Anfängen der Eiszeitforschung tief in das menschliche Bewußtsein eingedrungenen Gedanken, das Eiszeitalter als beendet anzusehen, als ein in »grauer Vorzeit« abgelaufenes Ereignis zu werten, muß gebrochen werden. Obgleich nach all unseren Kenntnissen nicht zu erwarten ist, daß noch zu unseren Lebzeiten eine weitere Kaltzeit beginnt, muß doch mit der Möglichkeit einer erneuten Kaltzeit gerechnet werden.

W. Köppen, der bekannte Klimatologe, stellte im Jahre 1931 fest: »Für die nächsten 20000 Jahre und noch weit darüber hinaus ist für die Nordhalbkugel der Wiedereintritt einer Eiszeit nach den astronomischen Daten ausgeschlossen.« M. Milankovitsch (1936) sah in immerhin 26000 Jahren noch Weinsorten aus Pommern, Mecklenburg und Holstein auf den Tischen Berliner Gaststätten.



Ein Blick vom Gornergrat in 3136m Höhe über die vom Eis geprägte Landschaft der Monte-Rosa-Gruppe (Walliser Alpen/Schweiz)

Dagegen meinte beispielsweise J. Kukla (1968), daß unsere Warmzeit in den Jahren 2500 bis 3000 u. Z. ende und somit in 500 bis 1000 Jahren eine weitere Kaltzeit ihren Anfang nähme.

Es kann nun die Ansicht vertreten werden, daß mit diesen Voraussagen kein Risiko eingegangen wird, da keiner der jetzt lebenden Menschen den zeitlich ungewissen Eintritt einer künftigen Kaltzeit kennt. Die Frage könnte auch kurz mit dem Hinweis abgetan werden, es seien doch nur Prophezeiungen; weder kleine noch große Klimaänderungen lassen sich voraussagen. Die Wetterkundler, die Meteorologen, die sich mit hohem Aufwand und großen Kosten mit der Wettervorhersage für kurze und kürzeste Zeiträume befassen, seien in unseren Breiten häufig nicht einmal in der Lage, für den nächsten Tag die Situation richtig einzuschätzen und das Wetter präzise vorauszusagen.

Über diesen springenden Punkt will nun die geowissenschaftliche Forschung mit Nachdruck hinwegkommen. Sie

versucht, über große internationale Programme die Fragen und Probleme einer genaueren Wettervorhersage zu lösen. Über das Ziel einer sicheren Vorhersage für kurze und kürzeste Zeitabschnitte hinaus sollen Erkenntnisse gesammelt werden, die den Mechanismus größerer Klimaänderungen aufdecken helfen.

Unter Nutzung von Kenntnissen über die erdgeschichtliche Vergangenheit und über die Aufbereitung von neuem Beobachtungsmaterial soll zur Klärung der Ursachen und des Entstehens von größeren Klimaänderungen, wie beispielsweise von Kaltzeiten, vorgezogen werden.

Große Hoffnung wird auf die intensive internationale Zusammenarbeit und die daraus resultierenden Ergebnisse im Rahmen des Globalen Atmosphärischen Forschungsprogramms (GARP) gesetzt. Nach der Konzeption sollte dieses Programm hauptsächlich auf die Verbesserung der laufenden Wettervorhersage ausgerichtet sein. Doch durch das Drängen vieler Forscher wurde bald dem zweiten Ziel, der Erforschung der Grundlagen des Klimas und mit ihnen der Erkundung und Erklärung von Klimaänderungen, stärkeres Gewicht beigemessen.

Im Rahmen des GARP ist das bisher größte Forschungsunternehmen, das Erste Globale GARP-Experiment (FGGE), seit dem 1. Dezember 1978 im Gange.

Grundlage ist jedoch das Stationsnetz der Wetterbeobachtung, so daß fast jedes Land an diesem Programm beteiligt ist. Ergänzt wird das Stationsnetz von Schiffen, Flugzeugen, Ballons, Satelliten und automatischen Bojen. Es sollen möglichst viele gleichzeitig vorgenommene Beobachtungen ein möglichst umfassendes Material ergeben. Noch nie zuvor ist auf diesem Gebiet ein so erdweites Projekt verwirklicht worden. Nur gründliche, aufeinander abgestimmte und erdweite Beobachtungen und Messungen scheinen den Schlüssel für die Kenntnis der Faktoren, die das Wetter in weit voneinander entfernten Gebieten mitbestimmen, zu liefern.

Die erdweiten Erhebungen im Rahmen des FGGE sollen, so wird gehofft, über das bessere Verständnis des Wetters zu tieferen Einsichten in den Mechanismus der Klimaänderungen führen. Für die Verarbeitung des Beobachtungsmaterials in komplizierten und verbesserten mathe-

matisch-physikalischen Modellen sollen die leistungsfähigsten Computer eingesetzt werden.

Die Experten sind insgesamt optimistisch gestimmt. Mit dem Stellen einer richtigen Diagnose auch für größere Klimaänderungen zeichnen sich sogar Möglichkeiten ab, einerseits dem Eintritt einer drohenden möglichen nächsten Kaltzeit wirksam zu begegnen sowie andererseits eine zu starke und unvorteilhafte Erwärmung für unseren Planeten abzuwenden.

Literaturverzeichnis

Agassiz, L.: Untersuchungen über die Gletscher. Solothurn 1841

Bach, W.: Energiebedarf und Klimaänderung. In: Geogr. Rundschau, 31. Jg. 1979

Bernhardi, A.: Wie kamen die aus Norden stammenden Felsbruchstücke und Geschiebe, welche man in Norddeutschland und den benachbarten Ländern findet, an ihre gegenwärtigen Fundorte? In: Neues Jahrb. f. Mineralogie usw., Stuttgart 1832

Buch v., L.: Über die Verbreitung großer Alpengeschiebe. In: Annalen der Physik und Chemie. 9. Bd., Leipzig 1827

Cotta v., B.: Fels-Schliffe an Porphy-Hügeln bei Kollmen. In: Neues Jahrb. f. Mineralogie usw., Stuttgart 1844

Cotta v., B.: Geschliffene und gestreifte Felsen bei Altenberg. In: Neues Jahrb. f. Mineralogie usw., Stuttgart 1844

Credner, H.: Über den Verlauf der südlichen Küste des Diluvialmeeres in Sachsen. In: Zeitschr. der Deutschen Geolog. Gesellsch., Bd. 27, Berlin 1875

Eissmann, L.: Die Begründung der Inlandeistheorie für Norddeutschland durch den Schweizer Adolph von Morlot im Jahre 1844. In: Abh. Ber. naturkd. Mus. Mauritium, Altenburg 8, 1974

Flohn, H.: Vereiste Antarktis – eisfreie Arktis. In: Nova Acta Leopoldina, Neue Folge, Bd. 54, Vorabdruck aus Nr. 244, Halle 1980

- Goethe, v., J. W.: Wilhelm Meisters Wanderjahre. 2. Buch.
In: Ausgewählte Werke in sechzehn Bänden, 12. Band.
Berlin o. J.
- Hendl, M., Marcinek, J., u. E. J. Jäger: Allgemeine Klima-,
Hydro- und Vegetationsgeographie. Gotha/Leipzig
1978
- Köppen, W.: Grundriß der Klimakunde. Berlin und Leipzig
1931
- Kuhn, B. F.: Versuch über den Mechanismus der Glet-
scher. In: A. Höpfners Magazin f. d. Naturkunde Hel-
vetiens, Bd. 1, Zürich 1787
- Kokla, J., Ložek, V., Macoun, J., Opravil, E., Pelíšek, J.,
und L. Smolíková: Die Lößserien der Tschecho-
slowakei. Vorläufige Ausgabe, Brno 1968
- Penck, A.: Die Geschiebformationen Norddeutschlands.
In: Zeitschr. der Deutschen Geolog. Gesellsch., Bd. 31,
Berlin 1879
- Penck, A.: Sechzig Jahre Eiszeitforschung. In: Die Erde.
Bd. 1, Berlin (West) 1949/50
- Schwarzbach, M.: Neuere Eiszeithypothesen. In: Eiszeit-
alter und Gegenwart, Bd. 19, 1968
- Torell, O.: Über Schlißflächen und Schrammen auf der
Oberfläche des anstehenden Muschelkalkes von Rüd-
ersdorf. In: Zeitschr. der Deutschen Geolog. Ge-
sellsch., Bd. 27, Berlin 1875
- Wahnschaffe, F.: Die Entwicklung der Glacialgeologie im
norddeutschen Flachlande. In: Zeitschr. der Deutschen
Geolog. Gesellsch., Bd. 50, Verhandlungen d. Gesellsch.,
Berlin 1898
- Wegener, A.: Die Entstehung der Kontinente. In: Pe-
termanns Geographische Mitteilungen, Bd. 58, 1912
- Wilhelm, F.: Schnee- und Gletscherkunde. Berlin (West),
New York 1975

»akzent« – die Taschenbuchreihe
mit vielseitiger Thematik:
Mensch und Gesellschaft,
Leben und Umwelt, Naturwissenschaft
und Technik. – Lebendiges Wissen
für jedermann, anregend und aktuell,
konkret und bildhaft.

Weitere Bände:

Nichelmann, Licht und Leben

Oppermann, Târnovo – Zarenstadt des
Balkan

Günther, Straßen, Brücken, Türme

Brentjes, Libyens Weg durch die
Jahrtausende

Rehbein, Oldtimer auf Schienen

Lange, Die Farben der Tiere