

Jürgen Ehlers

Das Eiszeitalter

SACHBUCH

 Springer

Das Eiszeitalter

Juergen Ehlers

Das Eiszeitalter

2. Auflage

Juergen Ehlers
Witzeeze, Schleswig-Holstein, Deutschland

ISBN 978-3-662-60581-3 ISBN 978-3-662-60582-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-60582-0>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über ► <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2011, 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Einbandabbildung: © vasin/stock.adobe.com

Planung/Lektorat: Stephanie Preuss

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Ein Buch zu schreiben, bedeutet nicht nur, dass man viele Stunden am Computer zubringt, sondern solch ein Vorhaben greift in viele Aspekte des täglichen Lebens ein. In diesem Fall führte es zum Beispiel dazu, dass ich eines Tages im Sommer 2019 in einem bekannten Laden für Comics und Scherzartikel in der Nähe der Universität Hamburg stand und nach etwas fragte, von dem ich annahm, dass es mühelos zu bekommen sei. Aber die Bedienung schüttelte den Kopf: „Eine Teufelsmaske? – Nein, so etwas haben wir nicht.“

Schade. Aber es gab zunächst einmal zahlreiche andere Dinge, die organisiert werden mussten. Zum Beispiel hatten sich viele Orte im Laufe der Jahre deutlich verändert. Dazu gehörten die Gletscher in Skandinavien und in den Alpen. Dazu gehörte auch der Findling „Alter Schwede“ in Hamburg, der im Januar 2019 plötzlich ganz anders aussah. Das einzige Objekt, das sich nicht wesentlich verändert hatte, war der Saurier aus Zement in Hagenbecks Tierpark in Hamburg. Nur unser Sohn, der damals wie heute als Größenvergleich gedient hat, hat sich verändert. Immerhin liegen mehr als zehn Jahre zwischen den beiden Aufnahmen.

Bei der Geländetätigkeit gab es viele schöne, aber auch spannende Momente. Zum Beispiel als meine Frau und ich kurz vor Einbruch der Dunkelheit und bei strömenden Regen mitten in einem schwedischen Strangmoor herumwaten und plötzlich begriffen, dass wir die Orientierung verloren hatten. Aber es ist alles gutgegangen. Und auch die Teufelsmaske haben wir schließlich bekommen, per Post, zusammen mit einer Packung von künstlichem Blut. Das Blut konnten wir nicht gebrauchen.

Damit das Buch nicht zu blutarm wird, habe ich wie schon bei der ersten Auflage viele Freunde und Bekannte gebeten, Teile des Manuskripts kritisch durchzusehen und/oder mir Abbildungen zur Verfügung zur Verfügung zu stellen:

Sarah Abu-Anbar, Abu Dhabi;
 Dr. Hinrich Bäsemann, Tromsø;
 Dr. Christine L. Batchelor, Cambridge;
 Toby Benham, Scott Polar Research Institute, Cambridge;
 Prof. Dr. Margot Böse, Freie Universität Berlin;
 Dr. Patrick L. Colin, Coral Reef Research Foundation, Palau;
 Dr. B. Brandon Curry, Illinois State Geological Survey;
 Dr. Jens Ehlers, Hamminkeln;
 Prof. Peter Felix-Henningsen, Universität Gießen;
 Ingrid Ese Folkestad, Filmmakeriet AS, Larsnes, Norwegen
 Prof. Phil Gibbard, University of Cambridge;
 Prof. Magnús Tumi Guðmundsson, University of Iceland, Reykjavik;
 Dr. Alf Grube, Geologisches Landesamt Hamburg;
 Dr. Robert Hebenstreit, Freie Universität Berlin;
 Dr. Christian Hoselmann, Hessisches Landesamt für Geologie und Umwelt;
 Prof. Dieter Jäkel, Freie Universität Berlin;
 Adriaan Janszen, TU Delft;
 H.P. Kaufmann, Brunnen, Schweiz;
 Dr. Kurt Kjær, Natural History Museum, Kopenhagen;
 Dr. Manfred Kupetz, Landesumweltamt Brandenburg, Außenstelle Cottbus;
 Prof. Kurt Lambeck, Australian National University, Canberra;
 Dr. Tobias Lauer, Max Planck Institute for evolutionary Anthropology, Leipzig;
 Marcus Linke, Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung, Hamburg;
 Prof. Dr. Thomas Litt, Universität Bonn;
 Thomas Mielke, Hamburg;
 Prof. Dr. Andrea Moscariello, Universität Genf, Schweiz;
 Johan Petter Nystuen, University of Oslo;
 Dr. Frank Preusser, Universität Bern;

Prof. Vladimir E. Romanovsky, University of Alaska, Fairbanks;
Dr. Henrik Rother, Landesamt für Geologie und Bergbau Sachsen-Anhalt;
Prof. Gerhard Schellmann, Universität Bamberg;
Prof. Christian Schlüchter, Universität Bern, Schweiz;
Dr. Petra Schmidt, Witzeeze;
Gertrud Seehase, Ratzeburg;
Eva-Maria Stellmacher-Ludwig, Wentorf;
Dr. Hans-Jürgen Stephan, Kiel;
Klaus Stribrny, Thünen-Institut, Trenthorst;
Dr. Klaus Steuerwald, Krefeld;
Dr. Þröstur Þorsteinsson, University of Iceland, Reykjavik;
Dr. Stefan Wansa, Landesamt für Geologie und Bergbau Sachsen-Anhalt;
Prof. Dr. Stefan Winker, Universität Würzburg;
Gerda und Holger Wolmeyer, Hamburg;
Dr. Jan Zalasiewicz, University of Leicester;
Prof. Bernd Zolitschka, Universität Bremen;

Ihnen allen möchte ich herzlich danken. Und auch dem Teufel natürlich.

In der Hölle soll es ja angeblich ziemlich heiß sein. Die Geschichte mit der Maske endete passenderweise damit, dass ich an einem der heißesten Tage des Jahres im Teufelskostüm in einem Dickicht in der Nähe von Lyon vor einem eiszeitlichen Findling stand und mich fotografieren ließ. Der Stein hieß „Pierre de la mule du diable“, und Albert Falsan, der ihn 1877 zuerst beschrieben hat, hat für sein Buch den Findling samt Teufel und Maultier gezeichnet. Ein Maultier hatten wir gerade nicht dabei; so blieb uns nur der Teufel. Als endlich alles überstanden war und ich die Maske wieder ablegen konnte und schweißüberströmt zu unserem Auto zurückkehrte, wartete dort bereits der Eigentümer eines benachbarten einsamen Hauses, der meiner Frau und mir auf Französisch erklärte, dass das sein Grundstück sei, und dass wir dort nicht parken dürften. Er zeigte uns einen Zettel, auf dem er unser Kfz-Kennzeichen notiert hatte. Das wäre nicht nötig gewesen. Wir kannten unser Kfz-Kennzeichen. Gut, dass der Mann nicht wusste, dass er gerade dem Teufel begegnet war. Wir entschuldigten uns höflich und fuhren davon.

Witzeeze
30.03.2020

Jürgen Ehlers

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Am Anfang war die Sintflut	3
1.2	Die Eiszeiten der Erdgeschichte	11
1.3	Eiszeitursachen	14
2	Der Ablauf des Eiszeitalters	19
2.1	Wann begann das Quartär?	21
2.2	Was ist was in der Stratigraphie?	21
2.3	Spuren in der Tiefsee	29
2.4	Systematik des Eiszeitalters	33
2.5	Günz, Mindel, Riß, Würm – gilt die Gliederung noch?	34
2.5.1	Alte Vereisungsspuren	35
2.5.2	(Günz)	37
2.5.3	(Haslach)	37
2.5.4	Mindel	37
2.5.5	Mindel-Riß-Interglazial	38
2.5.6	Riß	38
2.5.7	Riß-Würm-Interglazial (Eem)	39
2.5.8	Würm	40
2.6	Norddeutschland und angrenzende Gebiete	42
2.6.1	Elster-Kaltzeit	46
2.6.2	Holstein-Warmzeit	49
2.6.3	Saale-Komplex	49
2.6.4	Eem-Warmzeit	52
2.6.5	Weichsel-Kaltzeit	53
3	Eis und Wasser	61
3.1	Entstehung der Gletscher	63
3.2	Heutige Gletscher – vom Kargletscher bis zum Inlandeis	67
3.2.1	Wie bewegt sich ein Gletscher?	67
3.2.2	Entstehung des Eisstromnetzes	69
3.2.3	Entstehung der Täler und Becken	69
3.2.4	Entstehung des Inlandeises	71
3.3	Die Dynamik der Eisschilde	73
3.4	Schmelzwasser	79
4	Tills und Endmoränen – die Spuren der Gletscher	85
4.1	Till	87
4.1.1	Was ist ein Till?	87
4.1.2	Der Till – eine bunte Mischung?	93
4.1.3	Geschiebetransport	93
4.1.4	Geschiebe-Einregelung	99
4.1.5	Leitgeschiebe	100
4.1.6	Feinkies	104
4.1.7	Qemscan – alle Analysenwerte auf einen Streich	105
4.1.8	Sonderfall Mikrofossilien – Prä-Eem von Langeland	106
4.2	Endmoränen	106
4.2.1	Endmoränen und Endmoränenvertreter	106
4.2.2	Stauchmoränen	111
4.2.3	Gletscherdynamik am Beispiel der Weichsel-Vereisung	116

5	Von der Gletschermühle bis zum Urstromtal	121
5.1	Spuren pleistozäner Schmelzwassertätigkeit	123
5.1.1	Fjorde, Rinnen, Oser	123
5.1.2	Sanderflächen und Schotterterrassen	129
5.1.3	Eisstauseen	135
5.1.4	Kames – Ablagerungen am Eisrand	142
5.1.5	Katastrophaler Abfluss von Eisstauseen	144
5.1.6	Urstromtäler	145
6	Karten – wo sind wir denn hier eigentlich?	149
6.1	Digitale Karten	151
6.2	Satellitenbilder – Basisdaten für die Eiszeitforschung	154
6.3	Projektionen und Ellipsoide – der Teufel steckt im Detail	158
7	Wie weit reichten die Gletscher?	163
7.1	Gletscher in der Barentssee	165
7.2	Isostasie und Eustasie	168
7.3	Eis auch in Ostsibirien?	173
7.4	Asien – das Rätsel von Tibet	176
7.5	Nordamerika – die Eiszeiten werden älter	180
7.5.1	Die Prä-Illinoian-Warmzeiten	185
7.5.2	Prä-Illinoian-Glaziale	185
7.5.3	Das Interglazial unmittelbar vor dem Illinoian	185
7.5.4	Die Illinoian-Vereisung	186
7.5.5	Das Sangamon-Interglazial	186
7.5.6	Wisconsin-Vereisung	187
7.5.7	Holozän	189
7.6	Südamerika – Vulkane und Gletscher	189
7.7	Vergletscherungen im Mittelmeerraum	193
7.8	Afrika, Australien, Ozeanien – wo gab es Gletscher? Und wann?	195
7.9	Antarktis – Ewiges Eis?	197
8	Eis im Boden – die Formung der Periglazialgebiete	203
8.1	Dauerfrostboden in der Eiszeit	208
8.2	Periglazialbildungen	209
8.2.1	Frostverwitterung	209
8.2.2	Kryoplanation	210
8.2.3	Blockgletscher – Gletscher (fast) ohne Eis	213
8.2.4	Verwürgungen	214
8.2.5	Bodenfließen	216
8.2.6	Frostspalten und Eiskeile	217
8.2.7	Pingos, Palsas und andere Frostbeulen	223
9	Nilpferde an der Themse – die Geschichte der Warmzeiten	235
9.1	Entwicklung der Fauna	237
9.1.1	Die kleinen Tiere – Käfer, Schnecken, Foraminiferen	239
9.2	Vegetationsentwicklung	240
9.2.1	Pollenanalyse – Möglichkeiten und Irrtümer	240
9.3	Verwitterung und Bodenbildung	249
9.3.1	Paläoböden	250
9.4	Wasser in der Wüste – die Verschiebung der Klimazonen	256
9.5	Veränderungen des Regenwaldes	264
10	Ablauf der Enteisung	267
10.1	Eiszerfall	269
10.2	Die Entstehung der Sölle	272

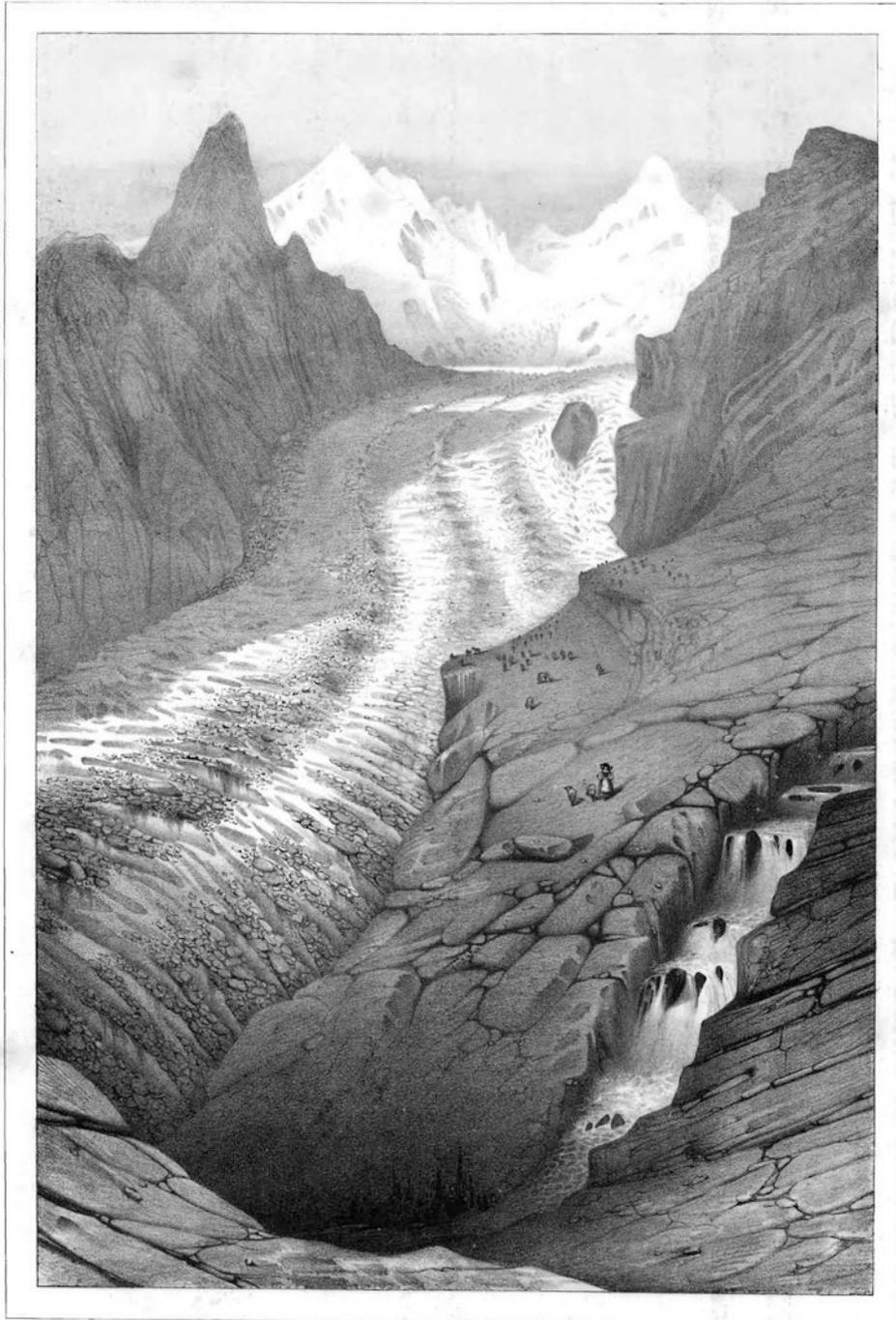
10.3	Druckentlastung	276
10.4	Ein plötzlicher Übergang?	276
10.5	Kleine Eiszeit	285
11	Wind, Sand und Steine – die äolischen Prozesse	287
11.1	Dünen	290
11.2	Flugsand	296
11.3	Löss	296
12	Was geschah mit den Flüssen?	301
12.1	Trockentäler	305
12.2	Der Rhein – beeinflusst von alpinem und nordischem Eis	305
12.3	Die Elbe floss zur Ostsee	314
13	Nord- und Ostsee in der Eiszeit	317
13.1	Die Entwicklung der Nordsee	320
13.2	Die Entwicklung der Ostsee	327
14	Klimarekonstruktionen und Modelle	337
14.1	Kerne aus dem Eis	339
14.2	Die marine Zirkulation	340
14.3	Vergletscherungsmodelle	343
14.3.1	Vom Ende der Saale-Kaltzeit bis zur frühen Weichsel-Kaltzeit	346
14.3.2	Von der Frühen zur Mittleren Weichsel-Kaltzeit	349
15	Der Mensch greift ein	357
15.1	„Out of Africa“ – Die Ausbreitung der Menschen	359
15.2	Neandertaler und Homo sapiens	364
15.3	Die Mittlere Steinzeit	364
15.4	Die Jungsteinzeit – Beginn des Ackerbaus	364
15.5	Bronze und Eisen	365
15.6	Die Römer	366
15.7	Mittelalter	367
15.8	Heutige Landnahme	367
15.9	Austrocknende Seen, abschmelzende Gletscher und andere schlechte Aussichten	370
	Serviceteil	
	Literatur	382
	Stichwortverzeichnis	409



Einführung

Inhaltsverzeichnis

- 1.1 Am Anfang war die Sintflut – 3
- 1.2 Die Eiszeiten der Erdgeschichte – 11
- 1.3 Eiszeitursachen – 14



ZERMATT - GLETSCHER

Mittlerer Theil.

Zermatt-Gletscher, Schweiz, mittlerer Teil (aus Agassiz 1841)

» „Die Eiszeiten! Man kann sich heute kaum vorstellen, mit welcher Ratlosigkeit und Verblüffung diese Theorie vor etwa 150 Jahren aufgenommen wurde. Allein die Vorstellung, dass sich riesige Eiswände von Norden her über unsere Landschaften geschoben und alles

verschlungen haben sollen, provozierte unverhohlene Ablehnung.“ (Zalasiewicz 2009).

Das Treffen der Schweizer Naturkundlichen Gesellschaft am 24. Juli 1837 in Neuchâtel begann mit einem Eklat. Der junge Präsident der Gesellschaft, Louis

Agassiz, sprach nicht über die neuesten Ergebnisse seiner Untersuchungen an fossilen Fischen, durch die er berühmt geworden war. Stattdessen entschloss er sich, darüber zu sprechen, dass die erratischen Blöcke im Jura (und in der Umgebung von Neuchâtel) Hinterlassenschaften einer großen Vergletscherung waren. Dieser „Diskurs von Neuchâtel“ gilt als die Geburtsstunde der Eiszeittheorie.

Agassiz war nicht der Erste, der dies behauptete, aber der erste ernsthafte Wissenschaftler. Sein Vortrag stieß auf eisige Ablehnung. Und auch auf der anschließenden Exkursion am 26. Juli, auf der eigentlich jeder die Beweise der früheren Vergletscherung mit eigenen Augen begutachten konnte, gelang es Agassiz nicht, die Fachkollegen zu überzeugen. Die Eiszeittheorie schien eine Totgeburt.

1.1 Am Anfang war die Sintflut

Der Mensch neigt dazu, ihm zunächst unverständliche Erscheinungen in der Natur durch bekannte Prozesse zu erklären. Die Vorstellung von „Eiszeiten“ war den Wissenschaftlern früherer Jahrhunderte fremd. Man wusste dagegen, dass im Laufe der Erdgeschichte immer wieder ausgedehnte Landgebiete vom Meer überflutet worden waren. So lag es nahe, auch die Hinterlassenschaften des Quartärs, speziell die erratischen Blöcke, als Folgen einer großen Flut zu deuten. War nicht auch in der Bibel von einer verheerenden Flut die Rede? An vielen Stellen der Erde fanden sich Spuren der Flut. Johann Friedrich Wilhelm Jerusalem listete einige davon auf. Er schrieb:

» „Die größte Aufmerksamkeit verdienen aber die zugespitzte südliche Gestalt von Afrika und Indien, und alle die um ganz Asien, vom rothen Meere an bis nach Kamschatka, von Süden nach Norden gehenden großen Meerbusen, die der sicherste Beweis sind, dass die Erde einmahl von Süden her, eine gewaltsame Überschwemmung erlitten haben müsse, welches wiederum die in Siberien sich befindende Menge von Gerippen großer südlicher Landthiere noch mehr bestätigt.“ (Jerusalem 1774)

Als Jerusalem diese Zeilen veröffentlichte, war der unbedingte Glaube an die wörtliche Bedeutung der biblischen Texte nicht mehr gegeben. Jerusalem, Berater Herzog Karl I. von Braunschweig-Wolfenbüttel, war einer der bedeutendsten Theologen der deutschen Aufklärung. Er war ein gebildeter Mann, hatte Jahre in Holland und England zugebracht. In seine Deutung der Sintflut bezieht er die toten Mammuts aus Sibirien mit ein. Er ist sich sehr wohl bewusst, dass „verstei-

nerte und über die ganze Erde verbreitete Seethiere, wie die Ammonshörner“ nicht aus der biblischen Sintflut stammen können. Aber eine Flut, eine sehr, sehr große Flut, die war schon vorstellbar.

Dass es sich dabei um die biblische Sintflut gehandelt haben sollte, wurde zu Beginn des 19. Jahrhunderts nur noch von wenigen geglaubt. Einer von ihnen, Reverend William Buckland aus Oxford, führte 1823 den Begriff „Diluvium“ in die stratigraphische Nomenklatur ein.

Der französische Naturforscher Georges Cuvier schrieb:

» „In gewissen Ländern finden wir zahlreiche große Blöcke primitiven Gesteins, die über die Oberfläche anderer Schichten verbreitet liegen, und die durch tiefe Täler oder gar Meeresarme von den Gipfeln und Gebirgen getrennt sind, von denen sie stammen müssen. Wir müssen daher notwendigerweise zu dem Schluss kommen, dass diese Blöcke entweder durch Eruptionen hinausgeschleudert worden sind, oder aber dass die Täler (die ihren Transport aufgehalten haben würden) zur Zeit ihres Transports nicht existierten, oder aber dass der Strom des Wassers, das sie transportiert hat, in seiner Gewalt alles übertraf, was wir uns heute vorstellen können.“ (Cuvier 1827)

Dieser älteste Versuch einer natürlichen Erklärung für das Vorkommen der Findlinge fern ihres Ausgangsgesteins entspricht der Rollstein- oder Schlammfluttheorie, die vor allem durch Leopold von Buch (1815), aber auch durch Alexander von Humboldt (1845) und den schwedischen Arzt und Naturforscher Nils Gabriel Sefström (1836) vertreten wurde. Man nahm an, dass die Findlinge durch gewaltige Wassermassen, die sogenannte „petridelaunische Flut“, transportiert worden seien. Der Grund für die Freisetzung solcher Wassermassen, die aus den Alpen und den Gebirgen Skandinaviens herausgeströmt sein sollten, musste freilich offenbleiben.

Von Hoff war der Erste, der sich in Deutschland in seiner *Geschichte der durch Ueberlieferung nachgewiesenen natürlichen Veränderungen der Erdoberfläche* (1834) gegen den Katastrophismus Cuviers wandte. Auch der Engländer Charles Lyell hatte sich in seinen *Principles of Geology* (1830–1833) gegen das entscheidende Wirken von Katastrophen ausgesprochen. Neptunisten stritten mit Plutonisten; die Theorie einer sanften Umgestaltung der Erde schien sich durchzusetzen.

Eine neue Deutung der erratischen Blöcke bahnte sich zu Beginn des 19. Jahrhunderts an. In einem flachen, kalten Meer sollten nach der Drifttheorie Eisberge den Boden geschrammt und die Findlinge antransportiert haben (Kasten Treibeistransport).

Treibeistransport

Der Sandsteinblock in **Abb. 1.1** ist $185 \times 175 \times 135$ cm groß; sein Gewicht wird auf 8 t geschätzt. Er liegt auf der mit *Spartina alterniflora* bestandenen Salzmarsch. Als der Stein bei seiner Ablagerung vom Treibeis landwärts gedrückt wurde, hat er im Boden eine deutliche Furche hinterlassen (im Vordergrund rechts).

Auch Goethe hatte davon gehört, dass Eisschollen Gesteinsmaterial aus Schweden quer über den Øresund nach Dänemark transportiert haben sollten. Waren auf diese Weise die erratischen Blöcke Norddeutschlands an ihren heutigen Ort gelangt?

Treibeis ist tatsächlich in der Lage, große Steine zu bewegen. Die Küstengewässer Nordkanadas sind im Winter von Eis bedeckt. Im Frühjahr kommt es zum Aufbrechen der Eisbedeckung und die entstehenden Eisschollen driften an der Küste entlang. Auf diese Weise kann angefrorenes Gesteins- und Bodenmaterial vom Treibeis verlagert werden (**Abb. 1.2**). Der kanadische Geograph Jean-Claude Dionne hat sich in



Abb. 1.1 Von Treibeis transportierte Gesteinsblöcke bei l'Isle-Verte, St. Lawrence Estuary, Kanada. (Aufnahme: Jean-Claude Dionne)



Abb. 1.2 Gestrandete Eisscholle mit einer dicken Schicht angefrorenen Bodens, St. Lawrence Estuary, Kanada. (Aufnahme: Jean-Claude Dionne)

zahlreichen Publikationen mit diesem Phänomen auseinandergesetzt.

Das Bild zeigt eine abschmelzende Eisscholle, die eine 25–30 cm dicke Schicht aus der Salzmarsch herausgerissen und mit dem Ebbstrom seewärts verlagert hat. Treibende Eisberge erzeugen erheblich größere Schrammen. Entsprechende *plough marks* von Eisbergen der Weichsel-Eiszeit werden am Meeresboden bis in große Wassertiefen gefunden.

Die Anhänger der Drifttheorie, zu denen auch Darwin und der Physiker Helmholtz gehörten, mussten zwar von einer größeren Ausdehnung der Gletscher ausgehen, um das Vorkommen der zahlreichen Eisberge zu erklären, lehnten jedoch eine umfassende Vergletscherung ab. Auch Lyell (1840) diskutierte die Entstehung der erratischen Blöcke in Nordeuropa und wandte sich entschieden gegen den von Agassiz ins Auge gefassten Neokatastrophismus.

Agassiz ließ nicht locker. Im Jahre 1840 brachte er sein Buch *Études sur les glaciers* heraus, ein Jahr später folgte die deutsche Ausgabe *Untersuchungen über die Gletscher*. Beide Bücher wurden auf Kosten des Verfassers gedruckt. Alexander von Humboldt gab Agassiz den Rat, doch lieber zu seinen fossilen Fischen zurückzukehren. „Dadurch würden Sie“, schrieb er, „der positiven Geologie einen größeren Dienst erweisen, als durch diese allgemeinen Betrachtungen (die etwas eisig sind) über die Umwälzungen der primitiven Welt, Erwägungen, von denen Sie selbst nur zu gut wissen, dass sie allenfalls diejenigen überzeugen können, die sie in die Welt gesetzt haben.“ (zit. nach Imbrie und Imbrie 1986).

Agassiz hatte dennoch Erfolg mit seinem Buch. Er konnte zeigen, dass die Hinterlassenschaften der Gletscher vom derzeitigen Eisrand über Serien von Endmoränen bis ins Alpenvorland reichten, und dass sich die Spur der Steine von ihrem Herkunftsgebiet bis zum äußersten Rand des Verbreitungsgebiets der erratischen Blöcke verfolgen ließ. Und er zögerte nicht, seine Ergebnisse nicht nur im Wort, sondern auch im Bild publik zu machen. Der aufwendig gestaltete Atlas vermittelte die Anschauungen seines Autors überzeugender als viele Worte.

Agassiz verlangte von seinen Lesern eine erhebliche Vorstellungskraft. Er schrieb:

» „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 Teil der nördlichen Halbkugel sich erstreckte. Die scandinavische und großbritannische Halbinsel (sic!), 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 (...) auftauchten.“ (Agassiz 1841, S. 284)

Den wissenschaftlichen Durchbruch brachte seine Reise nach Großbritannien, wo es ihm schließlich gelang, William Buckland von seiner Theorie zu überzeugen. Dieser wiederum überzeugte Charles Lyell, den wichtigsten Geologen seiner Zeit, und schon im November 1840 traten alle drei gemeinsam vor die Geological Society of London, um ihre neuen Erkenntnisse der Fachwelt vorzutragen. Diese blieb zunächst noch skeptisch, aber nun war der Siegeszug der Eiszeittheorie nicht mehr aufzuhalten.

Die Diskussion fand auch in der Öffentlichkeit ein großes Interesse. Die Schweiz und ihre Gipfel waren eines der beliebtesten Ziele des beginnenden Fremdenverkehrs (Abb. 1.3, 1.4). Die ersten waren vor allem englische Bergsteiger, die es in die Alpen drängte. Die Anreise war zunächst beschwerlich; erst die Eisenbahn erleichterte in den letzten Jahrzehnten des 19. Jahrhun-

derts die Fahrt (Hachtmann 2007). Die verkehrsmäßige Erschließung des Alpenraumes machte es auch den Wissenschaftlern leichter, ihre Forschungen vor Ort durchzuführen. Und auch die Gletscher Norwegens waren seit der Inbetriebnahme der Bergenbahn nicht mehr nur für wenige Auserwählte wie zum Beispiel den Kaiser (Kasten Nordlandreisen), sondern auch für gewöhnliche Touristen zugänglich.

Nordlandreisen

Kaiser Wilhelm II war ein großer Freund der nördlichen Landschaft. Mit der kaiserlichen Yacht „Hohenzollern“ unternahm er bereits ein Jahr nach seinem Amtsantritt im Sommer 1889 die erste ausgedehnte Nordlandreise (Abb. 1.5). Ein Jahr später stand ein Ausflug des Kaisers zum Briksdalsbreen auf dem Programm. Dieses Unternehmen stand jedoch unter einem ungünstigen Stern. Schon bei der Bootsfahrt über den 11 km langen See Oldenvatn

6

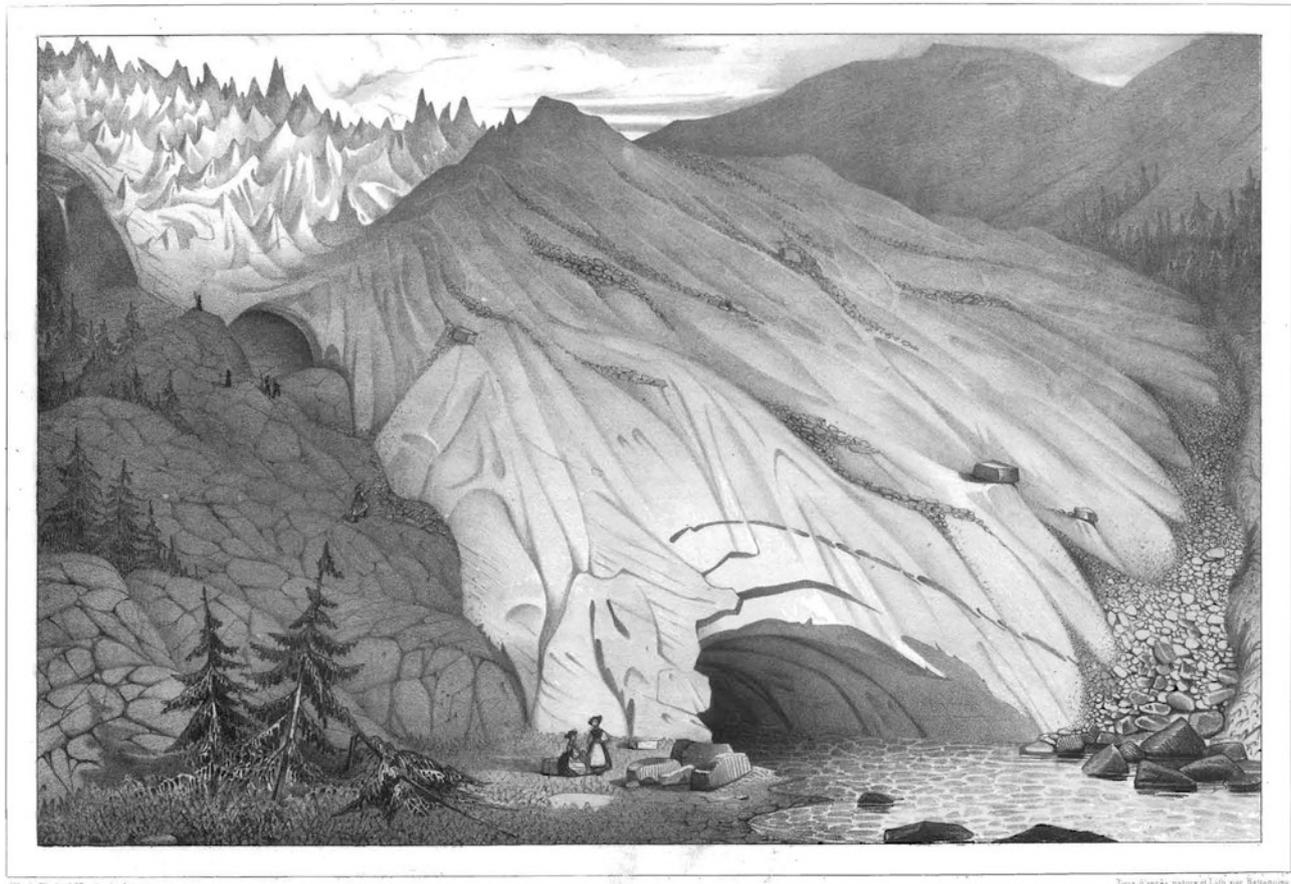


Abb. de Nivolin & Meylan (1841)

Tour de l'été au glacier et au lac de Zermatt

ZERMATT - GLETSCHER

Unteres Ende.

■ Abb. 1.3 Zermatt-Gletscher, Schweiz, unteres Ende (Agassiz 1841)



■ **Abb. 1.4** Ein Ausflug auf den Rhonegletscher, Schweiz. Im 19. Jahrhundert erlebte der Fremdenverkehr in der Schweiz einen starken Aufschwung. Die wilde Natur, und damit auch die Gletscher, wurden touristisch interessant und auch für wissenschaftliche Untersuchungen besser zugänglich. Die Länge des Rhonegletschers ist von 1879 bis 2017 um 1632m zurückgegangen (GLAMOS 1801–2018). Postkarte vor 1907



■ **Abb. 1.5** Die kaiserliche Yacht „Hohenzollern“ auf der Nordlandreise 1911 vor Balholm (heute: Balestrand), Norwegen (Riksarkivet, Oslo)

begann es zu regnen, und in den folgenden Stunden regnete es ohne Unterbrechung. Die Ausflugsgesellschaft stieg am Ende des Sees in Kutschen um. Schließlich ging es steil bergauf, und dann kehrte

man bei einem Bauern ein, dessen Haus kaum die große Zahl der Gäste aufnehmen konnte. Zwar hatte man Körbe mit Leckerbissen mitgebracht, aber da es durch das undichte Dach in das Wohnzimmer regnete, war die Stimmung gedrückt. Einige der Herrschaften entschlossen sich, zu Fuß bis zum Gletscher hinaufzusteigen. Der Kaiser blieb in der Bauernhütte und kehrte wenig später zur „Hohenzollern“ zurück.

Die Reisen des Kaisers führten dazu, dass auch andere Personen, die es sich leisten konnten, im Sommer nach Norwegen fuhren, um einen Blick auf den Kaiser und sein Gefolge zu werfen (■ Abb. 1.6). Kaiser Wilhelm fühlte sich Norwegen und den Norwegern sehr verbunden. Als bei einem verheerenden Brand im Januar 1904 die Stadt Ålesund fast vollständig zerstört wurde, organisierte er sofort eine umfangreiche Hilfsaktion. Später schenkte er Norwegen eine von dem deutschen Bildhauer Max Unger geschaffene 22m hohe Monumentalskulptur des sagenhaften Volkshelden Frithjof. An der Einweihungsfeier 1913 nahm der norwegische König Haakon



▣ **Abb. 1.6** Fest im Garten des norwegischen Künstlers Hans Dahl am 13. Juli 1911. In der Mitte Kaiser Wilhelm (Riksarkivet, Oslo)

VII teil, und es gab ein großes Volksfest für mehrere 1000 Personen. Ein Jahr später musste der Kaiser bei Ausbruch des Ersten Weltkrieges seine 26. Nordlandreise vorzeitig abbrechen.

In Norddeutschland hat sich die Glazialtheorie besonders spät durchgesetzt. Zwar hatte bereits Charpentier (1842) die Existenz einer nordwesteuropäischen Vereisung bis nach England, Holland, an den Harz, nach Sachsen, Polen und bis „fast nach Moskau“ gefordert. Er konnte sich mit dieser Meinung jedoch ebenso wenig durchsetzen wie vor ihm Bernhardt (1832) oder nach ihm Morlot (1844, 1847). Bernhard Cotta (1848) schrieb:

» „Es überschreitet die Grenzen des Denkbaren, Gletscher anzunehmen, welche von den norwegischen Gebirgen bis an die Elbe und bis nach Moskau, ja selbst bis an die Küsten Englands reichen, und sich über diesen kaum geneigten, aber unebenen Boden, mit Moränen beladen hinwegbewegen. (...) Dagegen kennt man in beiden Polargegenden der Erde durch Beobachtung eine Art des natürlichen Steintransportes, welche beständig stattfindet, und welche wohl geeignet sein dürfte, die nordischen Geschiebe Europas und Amerikas, sowie die erraticen Blöcke Patagoniens zu erklären. Das ist der Transport durch schwimmende Eisschollen.“

Die Drifttheorie setzte sich durch und blieb in Norddeutschland jahrzehntelang Lehrmeinung (z. B. Cotta 1867); siehe auch Kasten Ein Beweis der Drifttheorie?

Ein Beweis der Drifttheorie?

Ende der 1870er-Jahre machte sich Heinrich Otto Lang daran, der Frage der Glazialtheorie anhand der norddeutschen Findlinge auf den Grund

zu gehen (Lang 1879). Lang war am 10.09.1846 in Gera-Untermhaus geboren; er promovierte 1874 zum Dr. phil. und wurde anschließend Privatdozent für Mineralogie und Geologie an der Universität Göttingen. Als ihm zu Ohren kam, dass im Bremischen, bei Wellen, ein großes Kiesvorkommen gefunden worden sei, ließ er sich von Prof. Buchenau aus Bremen und einem Herrn von der Hellen über 180 Steine schicken, wobei er darum bat, nicht nur solche Gesteine einzusammeln, die besonders interessant aussahen, sondern vor allem auch diejenigen, die „die wesentlichen Constituenten der Ablagerung darstellten“.

Lang stand vor einer schier unlösbaren Aufgabe. Seine Arbeit wurde dadurch erschwert, dass er noch nie in Skandinavien gewesen war, und dass ihm auch die maßgebliche Literatur zum Teil nicht zugänglich war. Dafür konnte er auf verschiedene geologische Sammlungen zurückgreifen, unter anderem die petrographischen Sammlungen der Königlichen Universität Göttingen, in der sich erratiche Geschiebe aus dem Coburg'schen, aus Hannover, aus Loitz in Pommern, aus Dänemark, Schweden und Island fanden. Die isländischen Gesteine werden ihm wenig genützt haben, genau wie die Gesteine, die von der ersten deutschen Nordpol-Expedition gesammelt worden waren.

Da die Gesteine wegen der hohen Druckkosten nicht abgebildet werden konnten, blieb nur die genaue Beschreibung. Lang gab sich große Mühe:

» „Ein bräunlichrother Granit (156) besitzt als primäre Gemengtheile fast nur Feldspath und Quarz; die Feldspathe bilden gewissermassen eine rote Grundmasse, in welcher, mit blossem Auge betrachtet grau, im Anschliff sogar schwarz erscheinende Quarzkörner eingebettet sind; andere dunkle, mattere, unregelmässig begrenzte Stellen im Anschliffe finden sich spärlicher; auf einer Klufffläche, die an einer Stelle die Oeffnung einer Caverne erkennen lässt, finden sich stellenweise Anflüge von Eisenoxydhydrat oder auch eines hellgrünlichen, glimmerähnlichen Minerals und ist es besonders dieser Umstand, der eine Aehnlichkeit mit einem Granitgeschiebe von Zeitz in Thüringen (Liebe's Priv.-Sammlung) bewirkt ...“ (Lang 1879)

Lang fragte sich: Können diese Steine vom Gletscher nach Norddeutschland gebracht worden sein? Die Antwort lautete: Nein. Wie man weiß, kann ein Gletscher immer nur die Gesteine mitbringen, die er in seinem Herkunftsgebiet vorfindet. In der vorliegenden Sammlung zeigt sich aber eine große Mannigfaltigkeit der Gesteinsarten, und das spricht gegen einen Gletschertransport. Bei einem Transport durch driftende

Eisberge lässt sich dagegen die Durchmischung viel eher erklären.

Lang hat großen Aufwand betrieben, und als sich seine Arbeit schon im Druck befand, hat er noch letzte Ergänzungen als Anhang hinzugefügt. Inzwischen hatte sich für ihn überraschend die Möglichkeit einer Reise nach Christiania (Oslo) und Südkandinavien ergeben. Lang fand dort seine Auffassungen bestätigt: Es hatte keine Eiszeit gegeben. Er schloss mit der scherzhaften Bemerkung: „Man kann Herrn Torell den Vorwurf nicht ersparen, dass er mit dem Eise spiele.“

Doch alle Mühe war umsonst. Im gleichen Jahr erschien Albrecht Pencks Aufsatz über „Die Geschiebformation Nord-Deutschlands“ (1879), und damit wurden auch im Norden des Deutschen Reiches die letzten Zweifel an der Glazialtheorie ausgeräumt.

Als der schwedische Geologe Otto Torell (am 3. November 1875) auf einer Exkursion im Zusammenhang mit einer Sitzung der Deutschen Geologischen Gesellschaft in Berlin die bereits bei Sefström (1838) beschriebenen Schrammen auf dem Muschelkalk von Rüdersdorf eindeutig als Gletscherschrammen identifizierte, war ein Wechsel der Lehrmeinung längst überfällig. Die Glazialtheorie war zu jenem Zeitpunkt in England und Nordamerika bereits seit zehn Jahren fest etabliert (Lyell 1863, Dana 1863), und auch Torell hatte seine Ansichten über die Eiszeit in Nordeuropa schon 1865 veröffentlicht. Geglaubt haben ihm zunächst nur wenige.

Im folgenden Jahr (1880) fand Felix Wahnschaffe an mehreren Punkten am Nordrand der deutschen Mittelgebirge Gletscherschrammen. Er schrieb: „Bei Velpke, 5 km südwestlich von Oebisfelde gelegen, werden die von Südost nach Nordwest streichenden dort fast söhlig lagernden Sandsteine von Geschiebelehm oder Geschiebesand überlagert, nach deren Abdeckung sich in mehreren Steinbrüchen außerordentliche Glazialschrammen auf den Schichtoberflächen erkennen lassen.“ Die Gletscherschrammen gehörten zu zwei verschiedenen Eisvorstößen. Die älteren Schrammen, die um 27° streichen, werden von einem jüngeren, etwa 84° streichenden System gekreuzt. Eine große Rhät-sandsteinplatte wurde geborgen und in die Sammlung der Königlich Preußischen Geologischen Landesanstalt aufgenommen. Man kann sie noch heute in den Sammlungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Berlin-Spandau besichtigen (■ Abb. 1.7).

In Großbritannien war James Geikie einer der führenden Vertreter der Glazialisten. Im Jahre 1874 erschien sein Buch *The Great Ice Age and its relationship*

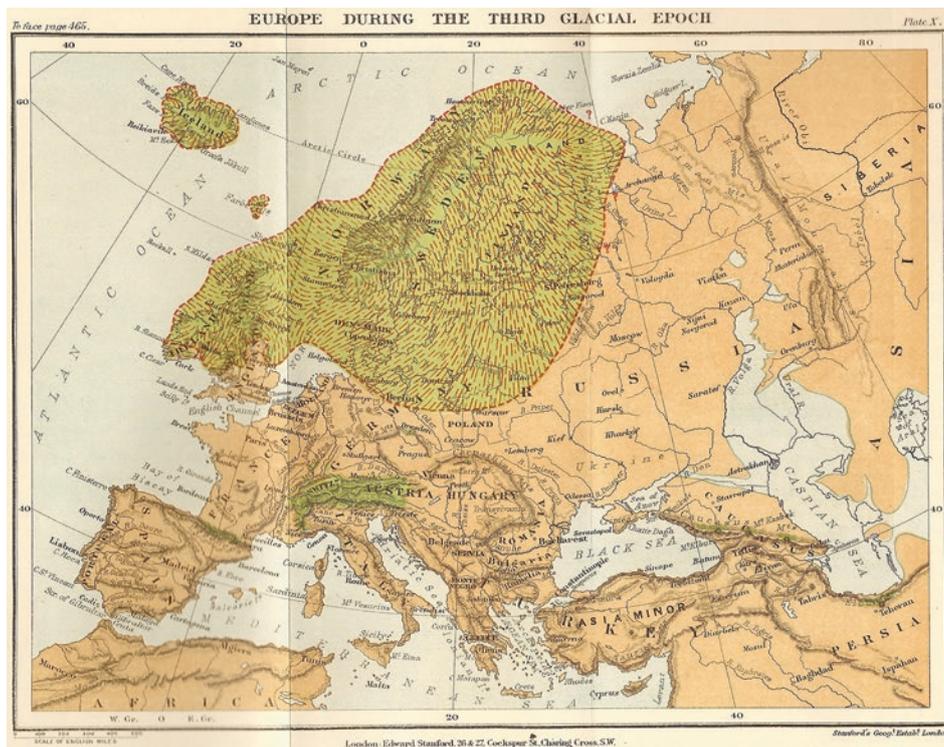
to the antiquity of man. Geikie stand im Kontakt mit den führenden Geologen seiner Zeit, und per Post wurden Schriften und Sonderdrucke ausgetauscht. Dazu gehörte natürlich auch, dass man den freundschaftlichen Kontakt zu den Kollegen aufrechterhielt. So schrieb Geikie: „Lieber Monsieur Boule, Erlauben Sie mir, Ihnen herzlich für die ausgezeichnete Analyse meiner *Great Ice Age* in (der Zeitschrift) *L' Anthropologie* zu danken, in der Sie das Buch Ihren Landsleuten freundlich empfehlen ...“ Selbstverständlich konnte es nichts schaden, wenn er dem guten Mann gleich ein Exemplar der völlig überarbeiteten dritten Auflage zuschickte (■ Abb. 1.8).

Im Vorland der französischen Alpen machten sich Naturkundler ans Werk, die von den Gletschern der Eiszeit transportierten erratischen Blöcke zu kartieren. Albert Falsan hat zusammen mit Ernest Chantre die Findlinge im Einzugsgebiet der Rhône erfasst und die auffälligsten Blöcke mit kleinen Zeichnungen dokumentiert (Falsan und Chantre 1877/78). Der „Stein des Maultiers des Teufels“ ist eines der markantesten Exemplare. Er liegt 1,5 km nordwestlich von Artas. Die Wissenschaft behauptet, die Gletscher hätten ihn dorthin transportiert. Die mündliche Überlieferung besagt allerdings, es sei der Teufel gewesen. Falsan hat dementsprechend den Teufel auf seiner Zeichnung dargestellt. Und auch bei unserem Besuch im Sommer 2019 war der Leibhaftige anwesend (■ Abb. 1.9).

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts erwachte auch das Interesse am Ursprung der Menschheit. Charles Darwin hatte 1859 *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or The Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life* veröffentlicht und damit eine lebhafte Diskussion unter den Wissenschaftlern und in der Öffentlichkeit ausgelöst. Teile seiner Vorstellungen wurden sehr rasch akzeptiert (Evolution, Abstammungslehre), andere, darunter die Selektion der Arten, erst Jahrzehnte später. Wie hatte der Mensch der Vorzeit ausgesehen? Geikie beschrieb die Funde, aber er zeichnete kein Bild. Andere waren da weniger zurückhaltend. Dr. W. E. A. Zimmermann zum Beispiel brachte seinen Lesern *Die Wunder der Urwelt* nahe. Untertitel: „Eine populäre Darstellung der Geschichte der Schöpfung und des Urzustandes unseres Weltkörpers so wie der verschiedenen Entwicklungsperioden seiner Oberfläche, seiner Vegetation und seiner Bewohner bis auf die Jetztzeit“. Da blieben keine Fragen offen (■ Abb. 1.10, ■ Abb. 1.11). Bilder zeigten zum Beispiel „Das Erdbeben von Lissabon“ (Rauch, Flammen, untergehende Schiffe). „Dreißigste Auflage. Nach dem neuesten Standpunkt der Wissenschaft verbessert“ – die erratischen Blöcke werden in dem Buch 1885 allerdings noch durch Treibeistransport erklärt.



■ **Abb. 1.7** Rhätsandsteinplatte von Velpke (10km OSO von Wolfsburg) mit Gletscherschrammen, die in zwei verschiedenen Richtungen verlaufen. Die Platte befindet sich heute in der Sammlung der BGR in Spandau. (Aufnahme: Klaus Steuerwald)



■ **Abb. 1.8** Karte von Geikie mit der Ausdehnung der Gletscher der „Dritten Glazialen Epoche“ (d. h. Weichsel-Eiszeit) in Europa. Die Südgrenze des Vereisungsgebietes entspricht fast dem heutigen Kenntnisstand. (Aus Geikie 1894)



■ **Abb. 1.9 a** Albert Falsan, der unter anderem die Findlinge im Einzugsgebiet der Rhône kartiert hat, hat diese Zeichnung der riesigen *Pierre de la Mule du Diable* angefertigt. **b** Der Teufel als Größenvergleich bei der *Pierre de la Mule du Diable*



■ **Abb. 1.10** *Die Wunder der Urwelt* von Dr. W. E. A. Zimmermann (1885)



■ **Abb. 1.11** Der vorsintfluthliche Mensch. Der Verfasser macht sich zwar im Text darüber lustig, dass sich jemand anmaßt „eine Abbildung unseres antediluvianischen Vorfahren zu veröffentlichen“, druckt diese aber dennoch nach (Zimmermann 1885)

1.2 Die Eiszeiten der Erdgeschichte

In anderen Ländern gab es bereits Mitte des 19. Jahrhunderts Belege dafür, dass die pleistozäne Vereisung innerhalb der Erdgeschichte kein Einzelfall gewesen war. Als man in Norddeutschland noch an das Drifteis glaubte, waren in Vorderindien (1856), Australien (1859) und Südafrika (1868) Spuren einer älteren, permokarbonen Eiszeit nachgewiesen worden (■ Abb. 1.12). Später (1871) gelang der Nachweis einer noch weiter zurückliegenden großen Vereisungsphase der Erdgeschichte, die sich während des späten Präkambriums im sogenannten Vendium (vor 600 Mio. Jahren) abgespielt hatte. Heute kennt man eine zusätzliche Vereisungsperiode am Ende des Ordoviziums (Hirnantium), deren Spuren wahrscheinlich auf

Erdzeitalter		Alter in Millionen Jahren	Eiszeitalter
Känozoikum	Tertiär	Quartär	Känozoisches Eiszeitalter 34 - 0
		Neogen	
		Paläogen	
Mesozoikum		Kreide	
		Jura	
		Trias	
		Perm	
Phanerozoikum	Paläozoikum	Karbon	Permokarbone Vereisung 360-260
		Devon	
		Silur	Anden-Sahara Vereisung 450-420
		Ordovizium	
		Kambrium	Cryogenium 720-635
Präkambrium	Archaikum	Neo-	Huronium 2400-2100
		Meso-	
		Paläo-	
		4000	

■ **Abb. 1.12** Geologische Zeittafel (unmaßstäblich) und Vorkommen von Eiszeitaltern in der Erdgeschichte. (Nach Cohen et al. 2019)

die Sahara beschränkt sind. Den ersten umfassenden Überblick über die saharischen Vereisungen bot Deynoux (1980). Darüber hinaus gilt das Vorhandensein weiterer, noch älterer Vereisungsperioden im Präkambrium vor ca. 950 Mio. und vor ca. 2000–2800 Mio. Jahren als gesichert (Hambrey und Harland 1981, Harland et al. 1990).

Die am längsten andauernde Eiszeit begann vor 2,4 Mrd. Jahren im Paläoproterozoikum (Huron-Vereisung). Sie dauerte 300 Mio. Jahre. Ob es in diesem Zeitraum den aus späteren Eiszeitaltern bekannten Wechsel zwischen Warm- und Kaltzeiten gegeben hat, lässt sich bisher nicht mit Sicherheit nachweisen. Dieses lang anhaltende Eiszeitalter wird im Zusammenhang mit der „Großen Sauerstoffkatastrophe“ (engl.: *Great Oxigenation Event*) gesehen (Holland 2006). Am Beginn des Paläoproterozoikums enthielt die Erdatmosphäre hohe Anteile an Methan, aber kaum Sauerstoff. Als Cyanobakterien als Abfallprodukt ihres Stoffwechsels große Mengen von Sauerstoff produzierten, reichte sich dieser schließlich in der Atmosphäre und in den Ozeanen an. Dies führte zu einem Massensterben anaerober Organismen, die der für sie toxischen Wirkung des Sauerstoffs zum Opfer fielen. In der Atmosphäre oxidierte der nun reichlich vorhandene Sauerstoff mithilfe der UV-Strahlung den größten Teil des Methans zu CO_2 und H_2O . Da Kohlenstoffdioxid aber ein wesentlich geringeres Treibhauspotenzial hat als Methan, setzte eine weltweite Abkühlung ein, und das Klima blieb 300 Mio. Jahre lang auf eiszeitlichem Milieu.

Die großen Vergletscherungen sind innerhalb der Erdgeschichte Ausnahmeerscheinungen. Die räumliche Verbreitung glazialer Sedimente aus diesen Erdzeitaltern ist zwar inzwischen recht gut bekannt; die genaue Lage zum Pol und die zeitliche Parallelität der verstreuten Vorkommen lässt sich jedoch in vielen Fällen nicht mit Sicherheit rekonstruieren. Fest steht nur, dass auch viele der alten Vereisungen mehrphasig gewesen sind.

In den Tillit-Serien Schottlands aus dem jüngsten Präkambrium (Port Askeig Formation) sind zahlreiche Lagen zu Stein gewordener Grundmoräne (Tillit) nachgewiesen worden. Glaziale Ablagerungen aus dieser Zeit sind auch an vielen Stellen auf der Erde ge-

funden worden, sodass schließlich gar die Vermutung auftauchte, die Erde sei damals eine Zeit lang durchgehend durch einen kilometerdicken Eispanzer bedeckt gewesen, der jedes Leben unmöglich machte. Besonders die Presse hat diese sensationelle Vorstellung gern aufgenommen. Der Nachweis einer derartigen Schneeball-Erde ist jedoch aufgrund der begrenzten Aufschlussverhältnisse und der wenigen vorliegenden Daten bisher nicht überzeugend gelungen. Diese Ablagerungen, die früher als Varanger-Eiszeit bezeichnet wurden, sind heute Teil des Cryogeniums, einer Periode des Neoproterozoikums, die von 720–635 Mio. Jahren vor heute gedauert hat (Abb. 1.13, Abb. 1.14, Nystuen und Lamminen 2011). Im Cryogenium hat es zwei ausgedehnte Vereisungen gegeben, die Sturtische und die Marinoische Vereisung. Tillite aus diesen Vereisungen finden sich auch in Gegenden, die damals in Äquatornähe gelegen haben – daher die Vorstellung einer „Schneeball-Erde“ (*Snowball Earth*). Die Übersichtskarte zeigt über 50 Lokalitäten, an denen entsprechende Gletscherablagerungen gefunden worden sind.

Eine Vereisung am Ende des Ordoviziums ist bisher in Südamerika und in der Sahara nachgewiesen worden (*Andean-Saharan Glaciation*). Sie dauerte von 450 bis 420 Mio. Jahren vor heute.

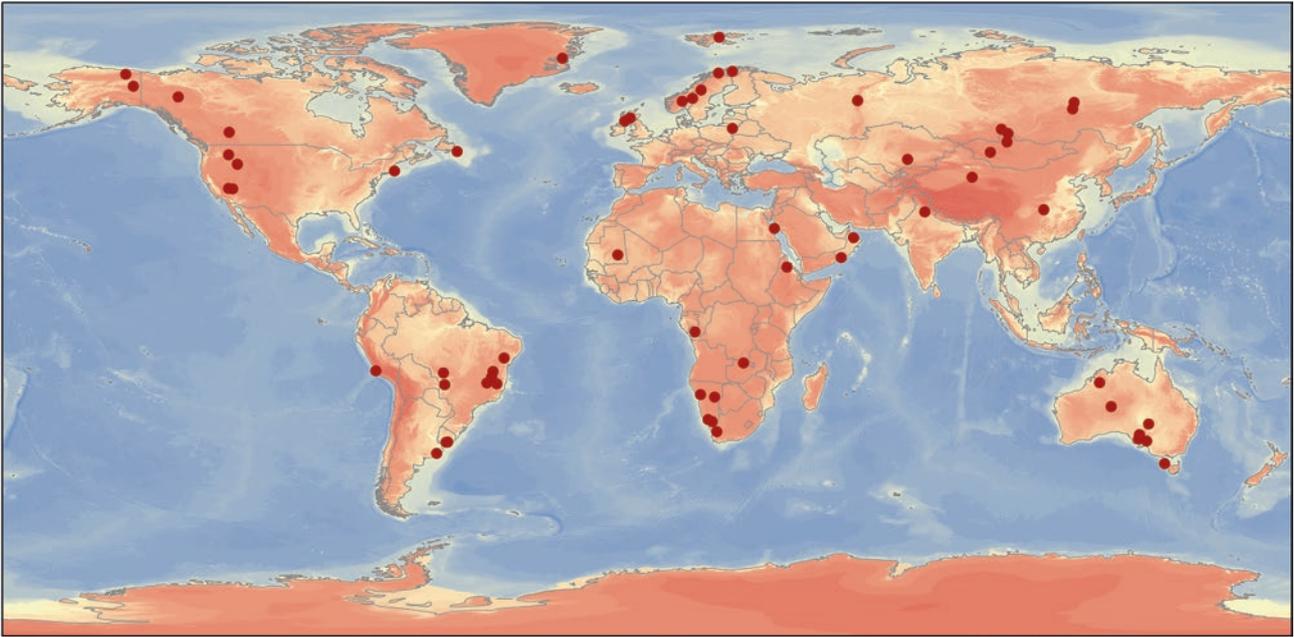
Spuren der permokarbonen Vereisung finden sich verbreitet auf den Südkontinenten (dem ehemaligen Gondwana). Sie sind insbesondere in Südafrika gut aufgeschlossen und die Vereisung wurde daher früher als *Karoo Glaciation* bezeichnet. Erste Vereisungsspuren stammen von der Grenze Devon-Karbon (Carmichaela et al. 2016). Ausgedehnte Vereisung setzte jedoch erst allmählich ein. Sie erreichte ihren Höhepunkt um 325 Mio. Jahre vor heute.

Bisher unerklärt sind die großen Schwankungen des Meeresspiegels von teilweise über 100m am Übergang vom Mitteljura zum Oberjura. Auf die Anwesenheit größerer Eisschilde zu jener Zeit gibt es keine Hinweise (Haq 2018).

Auf diese alten Ablagerungen soll hier nicht weiter eingegangen werden. Die Darstellung in diesem Buch beschränkt sich auf das jüngste Eiszeitalter der Erdgeschichte, das Quartär.



■ **Abb. 1.13** Neoproterozoischer Moelv-Tillit bei Moelv am Mjøsa-See, Norwegen; **a** Übersichtsaufnahme, **b** Detail. (Aufnahmen: Hans Petter Nystuen)



■ **Abb. 1.14** Nachweise von Gletscherablagerungen aus dem Cryogenium finden sich fast überall auf der Erde. Es ist allerdings keineswegs sicher, ob sie eine Schneeball-Erde repräsentieren. (Nach Angaben in Arnaud et al. 2011)

1.3 Eiszeitursachen

Wir leben in einem Eiszeitalter. Selbst wenn gegenwärtig Mitteleuropa frei von Inlandeis ist, gehört die heutige „Warmzeit“ zu den Kaltphasen der Erdgeschichte. Während des ganz überwiegenden Teils der Vergangenheit waren auch die Polregionen eisfrei, und in den gemäßigten Breiten herrschte ein wärmeres Klima als heute.

Die Klimaschwankungen des Eiszeitalters sind heute aufgrund der Untersuchungen an Tiefsee-Bohrkernen und Ablagerungen aus Binnenseen gut bekannt. Innerhalb des Pleistozäns lassen sich 61 Sauerstoffisotopenstadien ausgliedern, d. h. jeweils etwa 30 Kalt- und Warmzeiten. Mithilfe paläomagnetischer Untersuchungen ist es gelungen, die Abfolge dieser Kalt- und Warmzeiten so genau zu datieren, dass die Zeitdauer der Schwankungen feststeht. Während der letzten 600.000 Jahre dominierte ein Kaltzeit-Warmzeit-Zyklus von jeweils etwa 100.000 Jahren; davor herrschte ein kürzerer Zyklus von 40.000 Jahren vor. Heute weiß man, dass das Zusammenspiel von drei zyklischen Veränderungen, und zwar der Exzentrizität der Erdumlaufbahn (100.000 Jahre), des Neigungswinkels der Erdachse (40.000 Jahre) und dem Zeitpunkt des Perihels (20.000 Jahre) Veränderungen der Sonneneinstrahlung (Insolation) bewirkt (■ Abb. 1.15, Kasten Bahn der Erde). Sie müssen als Auslöser der zyklischen Klimaschwankungen angesehen werden.

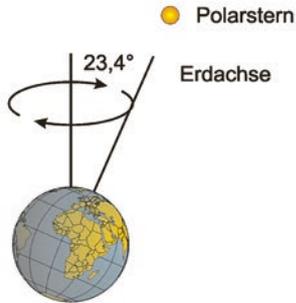
Diese Erkenntnis, die in ihren Grundzügen von Milankovitch (1941) dargelegt worden war, stieß zunächst vielfach auf Skepsis. Die Schwankungen der Erdbahnparameter hatten doch während der gesamten Erdgeschichte stattgefunden, während es nach damaligem Kenntnisstand nur vier Eiszeiten gegeben hatte. Erst viel später, als klar wurde, dass sich die Geschichte der Klimaschwankungen weit über die vier klassischen Eiszeiten hinaus zurückverfolgen ließ, wurde deutlich, dass die Milankovitch-Kurve im Prinzip doch richtig war.

Die Bahn der Erde um die Sonne ist nicht konstant

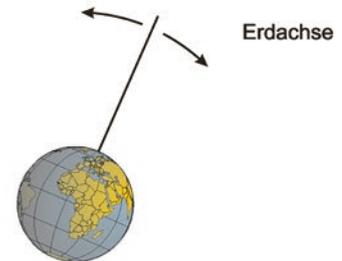
Exzentrizität der Erdumlaufbahn Die Bahn der Erde um die Sonne ist kein Kreis, sondern eine Ellipse, in deren einem Schwerpunkt die Sonne steht. Die Erdbahn verändert sich unter dem Einfluss der anderen Planeten unseres Sonnensystems. Mal ist sie fast kreisförmig, mal stärker elliptisch. Die Veränderungen erfolgen in einem Zyklus von etwa 100.000 Jahren.

Der Neigungswinkel der Erdachse Die Erdachse ist zurzeit $23,44^\circ$ gegen die Ebene geneigt, auf der sich die Erde um die Sonne bewegt. Der Neigungswinkel schwankt in einem Zyklus von etwa 41.000 Jahren zwischen $22,1^\circ$ und $24,5^\circ$. Eine geringere Achsneigung führt zu kälteren Sommern in Polnähe, sodass das winterlich gebildete Eis nicht abschmilzt.

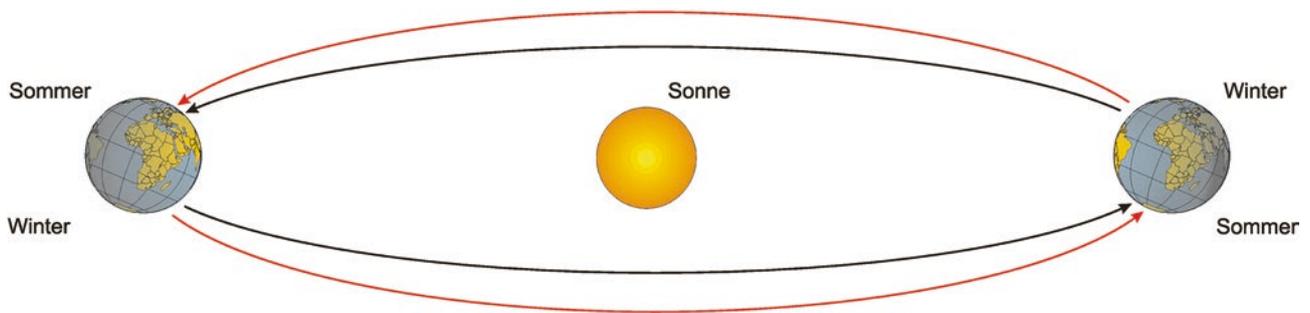
Lage der Erdachse im Raum



Schiefe der Erdachse



Exzentrizität der Erdbahn



■ **Abb. 1.15** Die Schwankungen der Erdbahnelemente: **a** Präzession, **b** Schiefe der Erdachse, **c** Exzentrizität der Erdumlaufbahn

Präzession Die Position der Erdachse im Raum verändert sich kaum. Während die Erde um die Sonne kreist, weist ihre Achse heute stets nach Norden, in Richtung auf den Polarstern. Langfristig ändert sie jedoch ihre Lage. In 13.000 Jahren wird sie auf die Wega (Sternbild Leier) weisen. Der Zyklus beträgt etwa 25.800 Jahre. Diese Veränderung führt dazu, dass die Erde ihren sonnennächsten Punkt auf der Umlaufbahn (das Perihel) zu verschiedenen Jahreszeiten erreicht. Zurzeit erreicht die Erde das Perihel im Winter.

Auswirkungen Die Auswirkungen dieser Faktoren auf den Strahlungshaushalt der Erde sind gering. Eine Grundvoraussetzung dafür, dass sie überhaupt zu Klimaschwankungen führen können, besteht darin, dass auf der Nordhalbkugel große Landmassen in Polnähe vorhanden sind, auf der Südhalbkugel dagegen nur die dauerhaft vergletscherte Antarktis. Zu den Zeiten, in denen die Sommer auf der Nordhalbkugel besonders kühl sind (größte Sonnenferne durch die Exzentrizität, Perihel im Sommer) und wenn die Winter am wärmsten sind (geringste Neigung der Erdachse), sind die Nordkontinente lange Zeit schneebedeckt. Schnee hat eine größere Rückstrahlung (Albedo) als der Erdboden, was zu einer weiteren Abkühlung beiträgt.

Mithilfe der Sensitivitätsanalyse hat sich gezeigt, dass die astronomischen Parameter in der Tat als Schrittmacher der Glazial-Interglazial-Zyklen wirken. Dabei kann der Antrieb durch die Sonneneinstrahlung die Klimazyklen auslösen, aber nur bei geringen CO_2 -Konzentrationen. Langfristige Schwankungen des CO_2 -Gehaltes allein sind nicht ausreichend, um Glazial-Interglazial-Zyklen zu erzeugen. Wenn man jedoch die Sonneneinstrahlung und die CO_2 -Schwankungen in der Modellrechnung berücksichtigt, so zeigt sich, dass sich sowohl der Beginn des Eiszeitalters um 2,75 Mio. Jahre vor heute, der unterpleistozäne Zyklus von 41.000 Jahren, der Übergang zu einem 100.000-Jahres-Zyklus um etwa 850.000 Jahre vor heute und die Glazial-Interglazial-Zyklen der letzten 600.000 Jahre nahezu exakt simulieren lassen (Berger und Loutre 2004).

Dieser Glazial-Interglazial-Zyklus von etwa 100.000 Jahren ist nicht nur eines der auffälligsten Merkmale des Quartärs, sondern bestimmt auch die zukünftige Klimaentwicklung. Da jeder der bekannten Klimazyklen dadurch gekennzeichnet ist, dass auf eine lange Kaltzeit ein kurzes Interglazial (circa 10.000–15.000 Jahre) folgt, und da unser Interglazial, das Holozän, schon 10.000 Jahre lang andauert, könnte man meinen, dass die nächste Eiszeit

unmittelbar bevorsteht. Modellrechnungen haben jedoch gezeigt, dass dies nicht der Fall ist. Die Erde wird innerhalb der nächsten Jahrzehntausende eine annähernd kreisförmige Bahn um die Sonne beschreiben. Dies war zum Beispiel im marinen Sauerstoffisotopenstadium 11 (MIS 11) vor etwa 400.000 Jahren der Fall, nicht aber in der Eem-Warmzeit (MIS 5e) (Berger und Loutre 2002). Dementsprechend ist für das derzeitige Interglazial wahrscheinlich eine Länge von etwa 30.000 Jahren oder mehr zu erwarten. Die weitere Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre durch menschliche Aktivitäten dürfte dazu führen, dass das Grönland-Eis weiter abschmilzt und innerhalb der nächsten 10.000 Jahre vollständig verschwindet, unter ungünstigen Voraussetzungen sogar schon innerhalb der nächsten 1000 Jahre (Gregory et al. 2004).

Die Klimazyklen sind folglich nur der „Schrittmacher“ (Hays et al. 1976), nicht die Ursachen des Eiszeitalters. Schwarzbach (1993) führt als eine mögliche Erklärung für das Auslösen von Eiszeiten große Reliefveränderungen (Gebirgsbildungsphasen) an. Matthias Kuhle (z. B. 1985) war der Auffassung, dass die Vereisung des Hochlands von Tibet einen erheblichen Einfluss auf die globale Abkühlung während des Pleistozäns ausgeübt hat. Er nahm an, dass das Hochland von Tibet im Frühquartär weit genug herausgehoben worden war, dass es zu Vereisungszyklen gekommen ist, die im Zusammenspiel mit den Strahlungszyklen ausreichen, weltweit großflächige Vereisungen auszulösen (Kuhle 1989). Die bisherigen Geländebefunde sprechen jedoch gegen eine großflächige Vereisung des Hochlandes während des Vereisungsmaximums der letzten Kaltzeit (Rother et al. 2017).

Es ist unbestritten, dass das Großrelief der Kontinente einen Einfluss auf das weltweite Klima hat. So weisen auch Ruddiman und Kutzbach (1990) auf die bedeutende Rolle hin, die die Heraushebung Tibets und der Hochgebiete im westlichen Nordamerika auf die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre gehabt haben müssen. Modellrechnungen legen jedoch die Vermutung nahe, dass dieser Einfluss auf die Windsysteme allein nicht ausreicht, um Eiszeiten auszulösen. Auch die Herabsetzung des atmosphärischen CO₂-Gehalts, die durch die verstärkte chemische Verwitterung jung herausgehobener Gebiete verursacht worden ist, ist als Auslöser des Eiszeitalters diskutiert worden (Raymo et al. 1988, Saltzman und Maasch 1990).

Eine wichtige Grundbedingung für die Auslösung von Eiszeiten scheint in der Verteilung der großen Landmassen auf der Erde zu liegen. Mithilfe moderner GIS-Technologie lassen sich die frühere Lage der Erdteile und das ungefähre Aussehen der Erdoberfläche inzwischen recht gut rekonstruieren. Zu ausgedehnten Vereisungen kann es nur kommen, wenn sich

entsprechende Landmassen in Polnähe befinden. Während der präkambrischen Vereisungen lagen fast alle Kontinente in der Nähe des Südpols (Blakey 2008). Auch während der permokarbonen Vereisung befand sich der Südkontinent Gondwana in Polposition (Stampfli und Borel 2004). Dasselbe gilt für die ordovizische Vereisung (Stampfli und Borel 2002).

Die Verschiebung der Kontinente im Zuge der Plattentektonik blieb nicht ohne Einfluss auf die Meeresströmungen. Das Schließen oder Öffnen wichtiger Meeresstraßen hat einen erheblichen Einfluss auf die ozeanische Zirkulation. Die Trennung Australiens und Südamerikas von der Antarktis und die daraus resultierende Öffnung der Tasmanischen Passage und der Drake-Passage führten im Oligozän zu einer Isolierung der Antarktis von warmem Oberflächenwasser und bildeten die Voraussetzung für die Vergletscherung dieses Kontinents. Die Schließung der Straße von Panama hat im frühen Pliozän die parallel zum Äquator laufenden Meeresströmungen unterbrochen und zu einem rascheren nord-südlichen Austausch der Wassermassen in den Weltmeeren geführt und damit die Vereisung der Nordkontinente begünstigt (Smith und Pickering 2003).

Da es im Laufe der Erdgeschichte wiederholt zu Eiszeiten gekommen ist (im Quartär, im Karbon/Perm, im Ordovizium und mehrfach im Präkambrium), stellt sich die Frage, ob ein gemeinsamer Auslöser für diese Vorgänge gefunden werden kann. Eine befriedigende Antwort auf diese Frage, die für alle bekannten Eiszeiten zuträfe, lässt sich bisher nicht geben. Einen Überblick über die vielen Faktoren, die eine Rolle spielen könnten, gibt Saltzmans Buch *Dynamical Paleoclimatology* (Saltzman 2001).

Die INQUA

Die *International Union for Quaternary Research* (INQUA) ist die weltweite Vereinigung der Eiszeitforscher. Sie wurde auf dem Geographenkongress 1928 in Kopenhagen gegründet. Die Initiative ging von Victor Madsen aus, dem Direktor von *Danmarks Geologiske Undersøgelse*, der damit eine Anregung Polens aufgriff. ■ Abb. 1.16 zeigt nur einen Ausschnitt der Fotografie, die im Naturhistorischen Museum in Kopenhagen aufbewahrt worden ist. Auf der Rückseite des Bildes sind die Namen der Teilnehmer notiert. Die meisten der seriös dreinblickenden Herren und Damen sind heute völlig vergessen. Von deutscher Seite waren Paul Woldstedt (vordere Reihe, 3. von links, mit Brille) und Rudolf Grahmann (schräg rechts dahinter) anwesend; am anderen Rand der Gruppe steht der Hamburger Professor Gürich, erkennbar an seinem weißen Spitzbart. Der Österreicher Gustav



■ **Abb. 1.16** Gründung der INQUA auf dem Geographenkongress 1928 in Kopenhagen. (Quelle: Kurt Kjaer)

Götzing, der den dritten INQUA-Kongress 1936 nach Wien holte, findet sich im Mittelpunkt (hinter dem Herrn mit der Zigarre in der Hand). Aber es fällt auf, dass viele wichtige Quartärforscher fehlen. Unter den Anwesenden ist zum Beispiel kein Amerikaner.

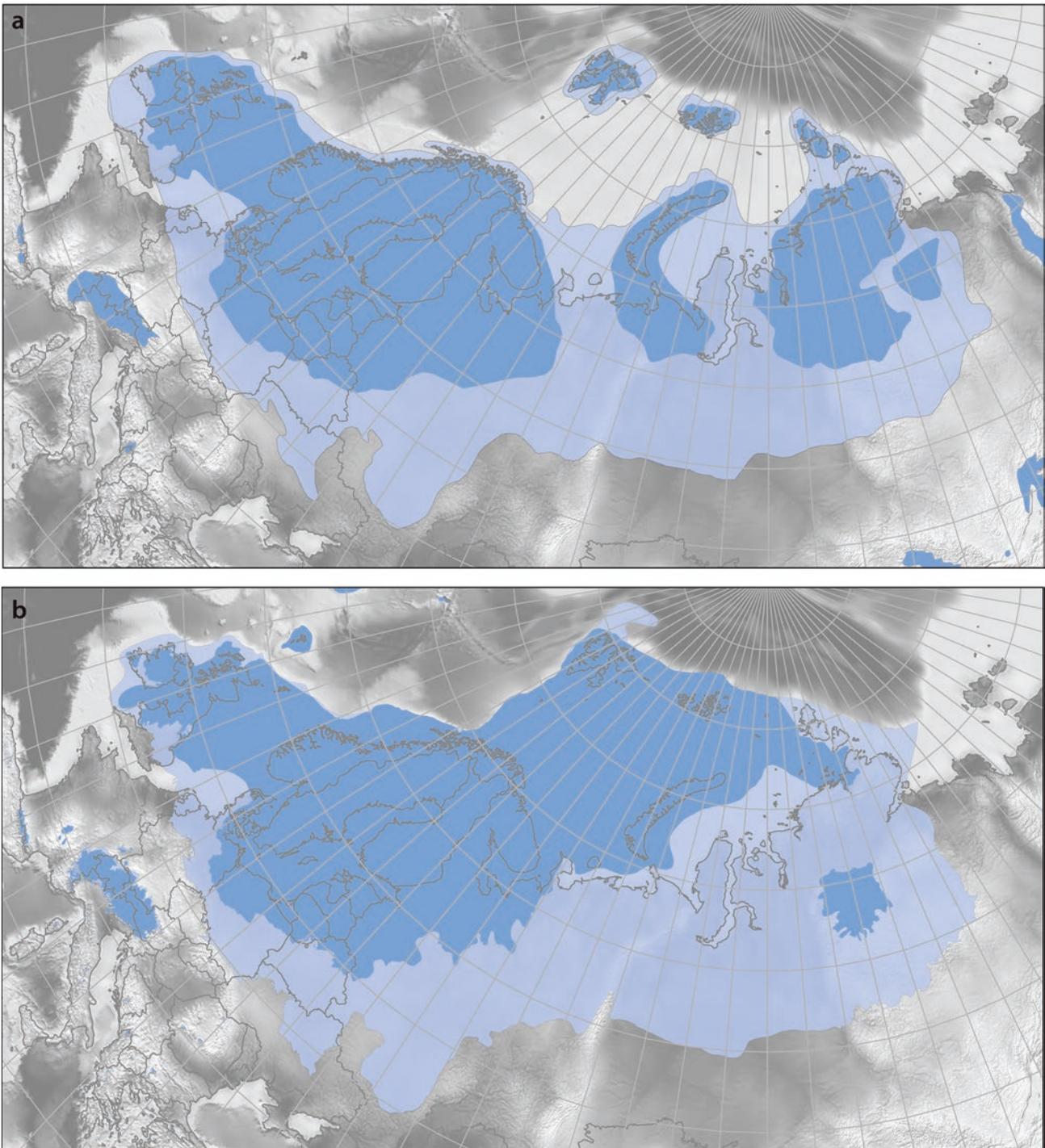
Die INQUA war zunächst eine europäische Gesellschaft. Götzing stellte auf dem 2. INQUA-Kongress in Leningrad den Antrag, Amerika und Asien einzubeziehen. Die Erweiterung zu einer „Weltassoziation“ wurde auf dem 16. Internationalen Geologenkongress in Washington 1933 gebilligt, und in Wien waren 1936 außer Vertretern der europäischen Nationen auch Wissenschaftler aus Japan, aus Niederländisch-Indien, der Türkei, aus Mexiko, Argentinien und erstmals 5 Wissenschaftler aus den USA anwesend. Insgesamt kamen 193 Teilnehmer (Götzing 1938). In seiner Abschiedsrede am 22. September 1936 schloss Rudolf Grahmann mit den Worten: „Ich schließe daher mit dem Wunsche, dass unsere INQUA wie ein liebes Mädchen sich weiterhin gut entwickeln möge, dass sie wachse und gedeihe und uns in einigen Jahren wieder in ihre Arme nehme! Auf Wiedersehen!“ – Die nächste INQUA Konferenz sollte 1940 in England (Cambridge) stattfinden, aber dazu kam es nicht mehr.

Die internationalen Tagungen, die in vierjährigem Rhythmus stattfinden, wurden nach dem Zweiten



■ **Abb. 1.17** Eröffnungsfeier des XI. INQUA-Kongresses 1982 in Moskau. (Quelle: INQUA)

Weltkrieg fortgesetzt. Die Tagung in Moskau 1982 (■ **Abb. 1.17**) bot erstmalig einen umfassenden Einblick in den Stand der russischen Quartärforschung. Die INQUA-Tagungen präsentieren die neuesten Forschungsergebnisse und geben den Wissenschaftlern Gelegenheit zum Gedankenaustausch. Die Zahl der Teilnehmer ist dabei inzwischen deutlich angestiegen. An dem 20th INQUA-Kongress 2019 in Dublin nahmen 2840 Wissenschaftler teil.



■ **Abb. 1.18** Vergleich der Vereisungsgrenzen während des Höchststandes der Weichsel-Eiszeit in Nordeuropa (hellblau) und der maximalen pleistozänen Vereisung (dunkelblau) zwischen **a** der Darstellung Flints (1971) und **b** der heutigen Auffassung (Ehlers et al. 2011)

Die Erforschung des Eiszeitalters (s. a. Kasten INQUA) hat in den letzten Jahrzehnten erhebliche Fortschritte gemacht. Das gilt nicht nur für die hochtechnischen Disziplinen der Altersbestimmung, der Tiefseeforschung oder der Untersuchung von Bohrkernen aus dem Eis Grönlands und der Antarktis. Selbst bei der Erfassung der Grenzen der Vereisungen sind die Veränderungen gewaltig (■ Abb. 1.18). Den

Unterschied veranschaulicht ein Vergleich der Karte Flints (1971) über die Ausdehnung der nordeuropäischen Vereisung mit der heutigen Darstellung, die auf der im INQUA-Projekt „Extent and Chronology of Quaternary Glaciations“ erarbeiteten digitalen Karte basiert (Ehlers et al. 2011). Man kann davon ausgehen, dass dies nicht die letzten Veränderungen bleiben werden.



Der Ablauf des Eiszeitalters

- 2.1 Wann begann das Quartär? – 21
- 2.2 Was ist was in der Stratigraphie? – 21
- 2.3 Spuren in der Tiefsee – 29
- 2.4 Systematik des Eiszeitalters – 33
- 2.5 **Günz, Mindel, Riß, Würm – gilt die Gliederung noch? – 34**
 - 2.5.1 Alte Vereisungsspuren – 35
 - 2.5.2 (Günz) – 37
 - 2.5.3 (Haslach) – 37
 - 2.5.4 Mindel – 37
 - 2.5.5 Mindel-Riß-Interglazial – 38
 - 2.5.6 Riß – 38
 - 2.5.7 Riß-Würm-Interglazial (Eem) – 39
 - 2.5.8 Würm – 40
- 2.6 **Norddeutschland und angrenzende Gebiete – 42**
 - 2.6.1 Elster-Kaltzeit – 46
 - 2.6.2 Holstein-Warmzeit – 49
 - 2.6.3 Saale-Komplex – 49
 - 2.6.4 Eem-Warmzeit – 52
 - 2.6.5 Weichsel-Kaltzeit – 53



Jan Mangerud erläutert das Eem-Vorkommen von Fjøsanger bei Bergen (Norwegen)

Mitte der 1970er-Jahre wurden in Fjøsanger bei Bergen organische Ablagerungen gefunden, bei denen es sich ganz offensichtlich um warmzeitliche Schichten handelte. Das war eine kleine Sensation, denn bis dahin hatte man angenommen, dass alle derartigen Ablage-

rungen von den Gletschern der letzten Eiszeit beseitigt worden wären. Die Quartärgeologen der Universität Bergen entschlossen sich, die Schichten genauer zu untersuchen. In den Jahren 1975/76 wurde eine 15 m tiefe Grube bis auf den anstehenden Felsuntergrund ausge-

hoben, bis 1 m unter dem heutigen Meeresspiegel. Der Fels wies Gletscherschrammen auf; er wurde überlagert von Till, der aus der Saalezeit stammen dürfte. Darüber folgten sandige Schichten mit Molluskenschalen. Die Muscheln gehörten zu einer Kaltwasserfauna. Diese Schichten wurden wiederum von anderen Meeresablagerungen überdeckt, deren Fauna nach oben hin immer wärmeliebender wurde, bis schließlich eine Schicht erreicht war, bei deren Ablagerung das Meer mindestens so warm gewesen war wie heute. Da diese Schicht von zwei weiteren Tills überlagert war, konnte es sich nur um Ablagerungen der Eem-Warmzeit handeln. Dieser Befund, über den Jan Mangerud und seine Kollegen auf der INQUA-Tagung 1977 in Birmingham berichteten, wurde später durch eingehende Untersuchungen bestätigt (Mangerud et al. 1981). Selbst in einer so offensichtlich durch Erosion geprägten Landschaft wie der norwegischen Fjordküste haben ältere Ablagerungen in geschützter Position die Überfahung durch das Eis der Weichsel-Eiszeit überstanden.

2.1 Wann begann das Quartär?

Der Beginn des Eiszeitalters stellt keinen abrupten Umschwung der klimatischen Verhältnisse dar, sondern einen allmählichen Übergang. ■ Abb. 2.1 zeigt, dass in Teilen der Erde schon im Paläogen Gletscher existierten, während in anderen Gegenden die Vereisungen sehr viel später eingesetzt haben. Infolgedessen muss die Festlegung der Grenze Neogen/Quartär mehr oder weniger willkürlich erfolgen, wobei für die Abgrenzung unterschiedliche Kriterien denkbar sind.

Etwa 2,7 Mio. Jahre vor heute zeichnet sich in den Sedimenten des Niederrheingebietes eine erhebliche Veränderung ab. Zu dieser Zeit hatte sich das Einzugsgebiet des Rheins im Süden bis in das Alpenvorland ausgedehnt, was in einer drastischen Änderung der Schwermineralführung zum Ausdruck kam (Boenigk 1982). Außerdem wurde zu dieser Zeit die wärmeliebende Vegetation des Pliozäns durch kältetolerantere Pflanzengesellschaften des Quartärs ersetzt. Die Schotterführung des Rheins änderte sich, und auch die Molluskenassoziationen passten sich an das kühlere und wechselhaftere Klima an. Wenn diese Veränderungen auch nicht alle genau gleichzeitig erfolgt sind, so ist in diesem Zeitraum doch ein deutlicher Floren- und Faunenwandel festzustellen, begleitet von einer Umstellung der Sedimentzusammensetzung. Im Niederrheingebiet ist daher schon früh die Grenze Tertiär/Quartär auf die Grenze Reuver/Prätegelen gelegt worden.

Auf Beschluss des Internationalen Geologenkongresses 1948 wurde als Grenze Tertiär/Quartär jedoch die Basis des Calabriums (Italien) festgelegt. In den Sedimenten des Calabriums sind im Mittelmeerraum zum ersten Mal Kaltwasser-Indikatoren festzustellen (unter anderem die

Foraminifere *Hyalinea baltica*). Die internationale Tertiär/Quartär-Grenze lag damit an der Obergrenze des Olduvai-Events, einer Phase normaler Magnetisierung innerhalb der revers magnetisierten Matuyama-Epoche. Die Grenze war auf diese Weise weltweit und auch in fossilfreien Ablagerungen identifizierbar. Die Position dieser Grenze wurde auf dem INQUA-Kongress in Moskau (1982) noch einmal bestätigt. Viele Quartärforscher waren damit jedoch unzufrieden. Diese Grenzziehung bedeutete, dass es zum Beispiel in Nord- und Südamerika auch im Pliozän ausgedehnte Vergletscherungen gegeben hatte. Man bemühte sich weiterhin um eine Korrektur der Grenze – am Ende mit Erfolg.

2.2 Was ist was in der Stratigraphie?

Bei sich überlagernden Gesteinsschichten ist es so, dass die ältesten Schichten unten liegen und von den jüngeren Schichten überlagert werden. Diese Regel, die als „stratigraphisches Prinzip“ bezeichnet wird, hat erstmals der dänische Wissenschaftler Nicolaus Stenonis (Niels Stensen) im Jahre 1669 formuliert (s. Kasten Das stratigraphische Prinzip).

Das stratigraphische Prinzip

Was hat Steno nun wirklich gesagt? Die Universitätsbibliothek Freiberg hat das entscheidende Buch gescannt und ins Netz gestellt (■ Abb. 2.2). Allerdings hat Niels Stensen sein Werk auf Latein geschrieben. Schon der Titel *De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus* ist eine Herausforderung. Und dann der Text. Zwar nur 69 Seiten, aber die haben es in sich. Wahrscheinlich findet sich die entscheidende Aussage in dem Abschnitt „*Strata terrae*“ (S. 26–31). Aber wo genau steckt sie? Mein „Ausreichend“ in Latein hat mich jedenfalls nicht ausreichend für die Suche qualifiziert.

Die Großmutter eines Kollegen, die Latein kann, zuckt nur mit den Achseln: „Dieses postklassische Latein ist zwar im Prinzip ziemlich einfach, aber das Problem steckt im themenspezifischen Vokabular, das die alten Gelehrten zum Teil frei erfunden haben.“

Eine Anfrage bei Phil Gibbard in Cambridge bringt schließlich die Lösung. Es gibt mindestens zwei Übersetzungen von Stenos Werk ins Englische, eine von 1671 und eine von 1916. So finde ich zunächst einmal den entscheidenden Absatz (Stenonis 1669, S. 29):

» Quo tempore formabatur quodlibet stratum, materiam illi superincumbentem totam fluidam sumpsit, adeoque quo tempore infimum stratum formabatur nullum e superioribus stratis extitisse.

In der englischen Ausgabe von Steno (London, 1671) wird das so übersetzt: