

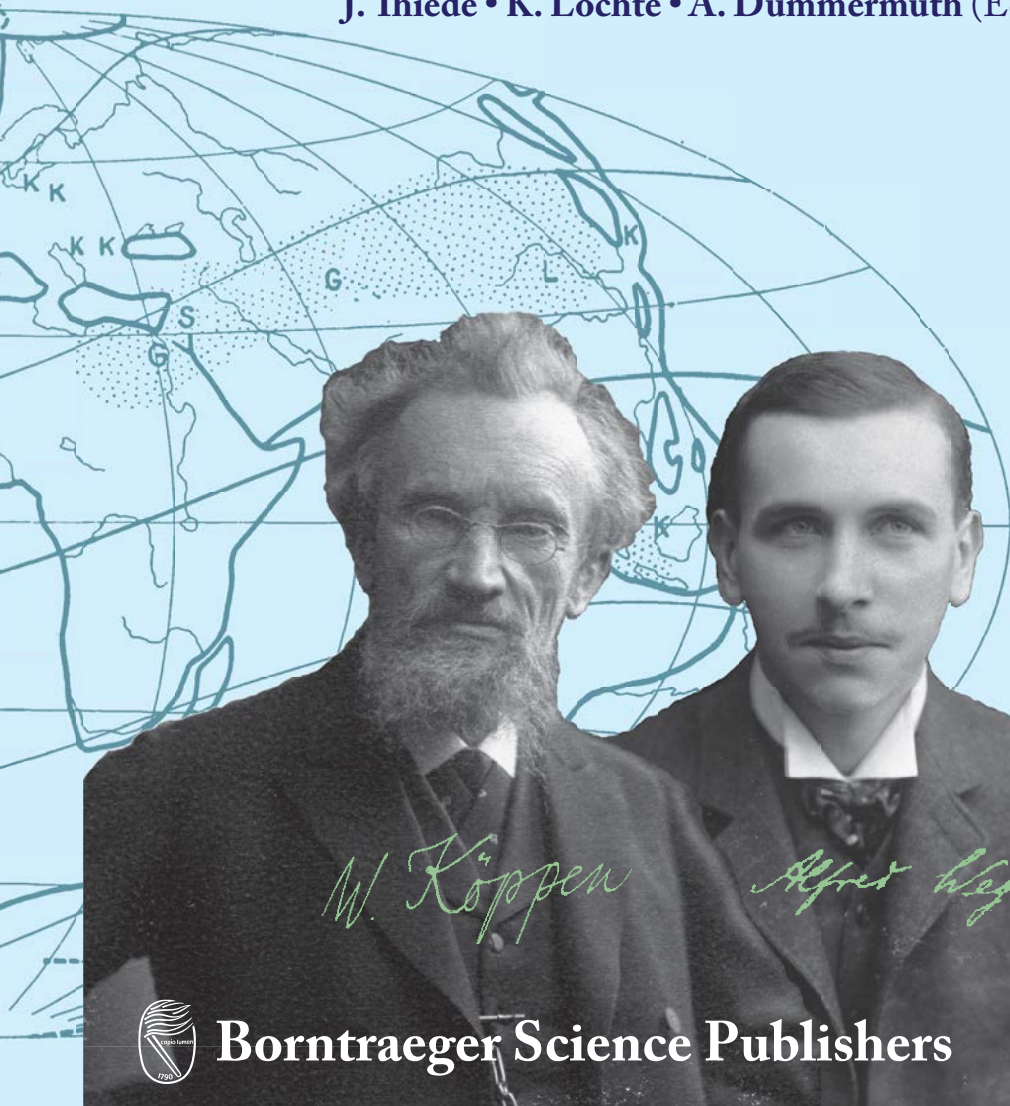
Wladimir Köppen • Alfred Wegener

# The Climates of the Geological Past

## Die Klimate der geologischen Vorzeit

*Reproduction and translation  
Faksimile-Nachdruck und Übersetzung*

J. Thiede • K. Lochte • A. Dummermuth (Eds./Hrsg.)



**Borntraeger Science Publishers**

Wladimir Köppen • Alfred Wegener

# The Climates of the Geological Past

Reproduction of the original German edition  
and complete English translation

# Die Klimate der geologischen Vorzeit

Faksimile-Nachdruck der deutschen Originalausgabe  
und komplette englische Neuübersetzung

edited by  
herausgegeben von

Jörn Thiede • Karin Lochte • Angelika Dummermuth

translated by  
übersetzt von

Bernard Oelkers



Borntraeger • Stuttgart 2015

The Climates of the Geological Past  
Die Klimate der geologischen Vorzeit

Addresses of editors:

Prof. Dr. Dres. h. c. Jörn Thiede  
Mainz Academy of Sciences, Humanities and Literature, c/o GEOMAR Helmholtz Center for Ocean  
Research, Wischhofstrasse 1-3, 24148 Kiel, Germany

and

Kathedra for Geomorphology, Institute of Earth Sciences/ KÖPPEN-Laboratory, SPbGU, V. O., Sredniy  
prospect 41, St. Petersburg 199 178 RF

Prof. Dr. Dr. h.c. Karin Lochte  
Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Am Handelshafen 12, 27570  
Bremerhaven, Germany

Dr. Angelika Dummermuth  
Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Am Handelshafen 12, 27570  
Bremerhaven, Germany

*We would be pleased to receive your comments on the content of this book:*  
editors@schweizerbart.de

Photo on the front cover, left side: Wladimir Köppen (1846–1940). Source: Archive for German Polar  
Research (AGPR), Bremerhaven.

Photo on the front cover, right side: Alfred Wegener, ca. 1912. Photographer: N. P. Sørensen, Originator:  
Arktisk Institut Kopenhagen. Source: Archive for German Polar Research (AGPR), Bremerhaven.

Photo on the back cover, left side: Alfred Wegener on board of the FS Danmark, 1906, Photographer: C. B.  
Thorstrup. Originator: Arktisk Institut Kopenhagen. Source: Archive for German Polar Research (AGPR),  
Bremerhaven.

Graphik on the back cover, right side: Melting margin of ground ice on Great Lyakhovsky Island east of  
Wanjkin Stan. (Fig. 17 of Köppen & Wegener: Die Klimate der geologischen Vorzeit).

Map on the cover: Ice, bogs and deserts in the Pliocene and Early Quaternary (Fig. 19 of Köppen &  
Wegener: Die Klimate der geologischen Vorzeit).

Original title: Köppen & Wegener: Die Klimate der geologischen Vorzeit (1924) (Gebrüder Borntraeger,  
Berlin)  
Köppen: Die Klimate der geologischen Vorzeit. Ergänzungen und Berichtigungen (1940)  
(Gebrüder Borntraeger, Berlin)

ISBN ebook (pdf) 978-3-443-01127-7  
ISBN 978-3-443-01088-1

Information on this title: [www.borntraeger-cramer.com/9783443010881](http://www.borntraeger-cramer.com/9783443010881)

© 2015 Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted,  
in any form or by any means, electronic, mechanical photocopying, recording, or otherwise, without the prior  
written permission of Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung.

Publisher: Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Johannesstr. 3A, 70176 Stuttgart, Germany  
mail@borntraeger-cramer.de  
www.borntraeger-cramer.de

© Printed on permanent paper conforming to ISO 9706-1994

Typesetting and production: Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Stuttgart

Printed in Germany by Gulde Druck GmbH, Tübingen

## Preface 2015

Alfred Wegener achieved world renown with the publication of his book “The Origin of Continents and Oceans” in 1915. With four editions printed between 1915 and 1929 (see Wegener 2005), Wegener’s ‘continental drift’ hypothesis was highly controversial at that time. However, it is less well known that Wegener published, together with his father-in-law and at the same time very close scientific collaborator Wladimir Köppen, an important monographic interpretation on the causal relationships of climate change in the geological past (Köppen and Wegener 1924). Before his death in 1940 at age 93, Köppen made additions to their work under the title “Supplements and Corrections”, notifying the printing office that he “urgently needed the proofs because he was dying” (Wegener-Köppen 1955).

Only one edition of Köppen and Wegener’s book was printed and, unfortunately, most copies of the edition were lost, including all originals, during World War II. Today, it is nearly impossible to purchase a copy of this book from an antiquarian bookstore. However, because of its importance in the light of modern climate and paleoclimate research, the Alfred-Wegener-Institute, Helmholtz Center for Polar and Marine Sciences in Bremerhaven/ Germany together with the original publisher (Gebr. Borntraeger in Berlin) and with the support of a number of learned societies and research institutions in Germany (see below) decided to reprint this book (in its original form), and to furnish it with an English translation, in order to make it available to the wide modern international community of climate researchers.

This volume commences with a reprint of the original (1924) text and incorporates the ‘Supplements and Corrections’ authored by Wladimir Köppen and published in 1940. Thereafter is introduced the first English-language translation of this seminal work. This translation affords non-German-speaking scientists and laypersons alike with access to the full and compelling arguments so carefully laid out in this important contribution to science.



### Scientific Importance and Impact of the “Climates of the Geological Past”

Köppen & Wegener’s book is of principal scientific interest for several reasons:

1. It contains a systematic inventory and description of the sedimentological and paleontological arguments which Wegener used to establish his historic (in a geological sense) climate zones for most of the Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic paleogeographic reconstructions. During the first two decades of the last century Köppen had developed important concepts of the modern global distributions of climate zones. The close cooperation between Wegener and Köppen led to their mutual conviction that these zones could in principle also be deduced from the stratigraphic records of fossil climate indicators.
2. The book critically describes and discusses paleogeographic reconstructions for most of the Phanerozoic periods. Because Köppen was fluent in Russian he was able to draw on information from many less known regions, for example, northern Eurasia.
3. The book then ventures into hypothesizing about climate changes in Earth history. The most important element of this discussion stems from a close collaboration they had established with Milankovitch. He claimed and precisely calculated that the Late Cenozoic climate changes were controlled by systematic variations of some of the parameters controlling the geometry of the earth’s orbit around the sun (eccentricity, obliquity, precession) generating differences in the insolation. Milankovitch actually allowed them to use his text, calculations and figures.
4. Acceptance of the principles of the Milankovitch frequencies made it possible for the first time early in the last century to establish a precisely defined time scale of Late Cenozoic glacial-interglacial history.

The latter aspect is probably the most important scientific contribution of this book. André Berger (1988, 2012) has revisited this entire complex in modern times. The Milankovitch frequencies of the orbital parameters control insolation; they can be calculated precisely for the past and for the future.

Köppen and Wegener encouraged Milankovitch, a Serbian engineer, to pursue this idea – which he did as prisoner of war during World War I. He had studied in Vienna, had won many good friends in Austria who finally succeeded to get him out of the POW camp, but he was confined to the building of the Hungarian Academy of Sciences in Budapest, where he could work scientifically. He published his calculations extensively many years later (Milankovitch 1941).

Nowadays the orbital parameters originally calculated by Milankovitch can be substantiated by means of time series obtained from deep-sea sediments (Hays et al. 1976) and ice cores (Augustin et al. 2004) for the past. Milankovitch’s frequencies can also be quantitatively predicted for the future and are hence a powerful argument when debating future climatic scenarios (Thiede & Tiedemann 1998). Consequently, this reflects an important piece of tradition in

the development of our understanding of how climate evolved in the course of time, reaching from Köppen, Wegener and Milankovitch to modern days.

### Biographical notes on the collaboration of Wladimir Köppen and Alfred Wegener

Wladimir Peter Köppen was born in St. Petersburg on September 22, 1846, and died on June 22, 1940 in Graz /Austria (at that time belonging to Germany). The Köppen family is of German origin, but had emigrated to Russia to provide medical services to the imperial Russian government, first in Charkow and later in St. Petersburg. The family was living in a flat provided by the Academy of Sciences. It became the place where the Russian Geographical Society was founded. In his youth Wladimir Köppen spent a lot of time in the Crimea where he became vividly aware of the impact of the climate on the vegetation. This motivated him to take up studies in meteorology and related subjects at various German universities. He got his first position at the Central Observatory in St. Petersburg and deepened his knowledge of meteorological processes, in particular the global distribution of climatic zones. He soon became quite famous in Russia and abroad. He participated in international conferences and it soon became clear that weather services required international collaboration. He was “discovered” by Georg Neumayer, founder and director of the “Norddeutsche/Deutsche Seewarte” in Hamburg (later the DHI = Deutsches Hydrographisches Institut, nowadays the BSH = Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie), who on March 15, 1875 offered him a position as department head in his new institution. This department was commissioned to gather daily weather observations needed for sailing instructions and Wladimir Köppen may be considered the founder of what later developed into the German Weather Service (“Deutscher Wetterdienst”). Köppen published articles on the global climate zones and became a famous and well established leading meteorologist (cf. Wegener-Köppen 1955 for a complete listing of his publications).

During the early years of the last century the young Alfred Wegener contacted Wladimir Köppen because he had the idea that the geography of planet Earth had gone through major changes. He wanted to prove it by means of reconstructions (“historic” – in a geological sense) of former climate zonations. During this time Alfred Wegener fell in love with Else, one of Wladimir Köppen’s daughters and the scientific liaison soon developed into close family bonds which remained throughout Köppen’s life until he died in Graz in 1940. The peak of their scientific relationship was reached when Wladimir Köppen and Alfred Wegener jointly published their monograph on “Die Klimate der geologischen Vorzeit” (Climates of the Geological Past) in 1924.

## The Modern Legacy of Wladimir Köppen and Alfred Wegener

The foundations of paleoclimate research laid by Wladimir Köppen and Alfred Wegener are expanded today in many laboratories worldwide. The Alfred Wegener Institute Helmholtz Center for Polar and Marine Research in Bremerhaven, Germany, researches past, present and future climate changes from a polar perspective. Based on traces enshrined in ice cores and sediment cores, reconstruction of past climates is now possible in much greater detail due to the development of new proxies. It enables not only analysis of paleotemperatures, but also of ice coverage, carbon dioxide and methane in the atmosphere, wind speed and many other variables of past climates. The understanding of paleoclimate processes and global linkages are fundamental to assess potential future developments. In contrast to Köppen's and Wegener's times, however, nowadays not only the natural dynamics are shaping the climate, but also anthropogenic impacts have to be considered complicating the already complex matter of climate processes.

The scientific legacies of Wladimir Köppen and Alfred Wegener are also pursued at the Wegener Center for Climate and Global Change, an interdisciplinary and internationally oriented institute of the Karl Franzens University Graz (Austria) and the recently founded Köppen Laboratory of Geochronology at the State University of Saint Petersburg (Russian Federation).

We are grateful for the help of many who contributed to the production of this book. Bernard Oelkers undertook the task of translation of the scientific text and he managed to convey the style of the scientific language of the last century in an authentic fashion. Paul Waite compiled the index in English and German. Gebrüder Borntraeger, the publisher of the original book printed the book in the same layout as the original and included the translation in a congenial way. Finally, the book was supported financially or otherwise by the Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Akademie der Wissenschaften und Literatur Mainz, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutsche Gesellschaft für Polarforschung e.V., Geologische Vereinigung e. V. and Senckenbergische Naturforschende Gesellschaft.

**Jörn Thiede**

**Karin Lochte**

**Angelika Dummermuth**

## Bibliography

- Agustin, L., C. Barbante, P. R. Barnes et al. 2004. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* 429: 623–628.
- Berger, A. 1988. Milankovitch Theory and Climate. *Rev. Geophys.* 26 (4): 624–657.
- Berger, A. 2012. A Brief History of the Astronomical Theories of Paleoclimates; p. 107–129. In: Berger et al. (eds.): *Climate Change. Inferences from Paleoclimate and Regional Aspects.* (Springer Verlag) Wien, pp. 1–239.
- Hays, J. D., J. Imbrie & N. Shackleton 1976. Variations in the Earth's Orbit: Pacesetter of the Ice Ages. *Science* 194 (4270): 1121–1132.
- Köppen, W. 1940. W. Köppen und A. Wegener: Die Klimate der geologischen Vorzeit – Ergänzungen und Berichtigungen von W. Köppen. (Gebr. Borntraeger) Berlin, pp. 1–38, 6 figs.
- Köppen, W. & A. Wegener 1924. Die Klimate der geologischen Vorzeit. (Gebr. Borntraeger) Berlin, pp. 1–255, 41 figs., 1 plate.
- Milankovitch, M. 1941. Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. Belgrade, Royal Serbian Sciences, Spec. Publ. 132, Sect. Math. Nat. Sci., vol. 33: pp. 1–633.
- Thiede, J. & R. Tiedemann 1998. Die Alternative: Natürliche Klimaveränderungen – Umkippen zu einer neuen Kaltzeit: pp. 190–196. In: Lozán, J. L., H. Graßl & P. Hupfer (eds): *Warnsignal Klima – Das Klima des 21. Jahrhunderts.* (Wissenschaftliche Auswertungen/ GEO), Hamburg, pp. 1–464.
- Wegener, A. 1912. Neue Ideen über die Herausbildung der Grossformen der Erdoberfläche (Kontinent und Ozeane) auf geophysikalischer Grundlage. Announcement of an oral presentation at the main Annual Meeting of the Geologische Vereinigung, Jan. 6, Frankfurt/ Main.
- Wegener, A. 2005. Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. – Nachdruck der ersten (1915) und vierten Auflage (1929) mit handschriftlichen Anmerkungen von Alfred Wegener. (Gebr. Borntraeger) Stuttgart (Krause, R., G. Schönharting & J. Thiede, eds.), pp. 1–481.
- Wegener-Köppen, E. 1955. Wladimir Köppen – ein Gelehrtenleben. (Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft m.b.H.) Stuttgart, pp. 1–195, 13 figs. (based on Wladimir Köppen's personal notes, also containing a complete listing of Köppen's publications 1868–1940).

### **Note of the Translator**

First of all I would like to thank the Alfred Wegener Institute, Helmholtz Center for Polar and Marine Research (Bremerhaven), for asking me to translate this milestone of science literature into the English language and thus bringing an almost ‘forgotten book’ back to the reading public. Despite the honor bestowed upon me, the translator, it also meant a challenge for several obvious reasons:

Written in 1923, hence almost 100 years ago, we sadly are no longer able to confer with the authors of this book. Even most of the references they have given us are irretrievably lost to time. The latter makes it difficult, for example, to avoid improper back translations of English quotations. (Fortunately I do own a copy of the textbook published by Chamberlin and Salisbury in 1909 and most of the references are in German). Anachronisms present another challenging issue. The stratigraphic nomenclature which has changed since the days of A. Wegener and W. Köppen has been updated according to suggestions made by Prof. Thiede, whereas the most essential, rather untranslatable key term in this book (“Klimazeuge”) has not been translated as “paleoclimate proxy”, as would be best understood by the modern-day reader, but as “climate indicator”, following the example of geologist Roger M. McCoy who in 2006 published a biographical account of Alfred Wegener’s “Revolutionary Idea and Tragic Expedition” (Ending in Ice, Oxford University Press).

We must also bear in mind that the authors of this book were men well versed in the professional terminologies of virtually every single branch of the life sciences (paleontology, geology, hydrology, glaciology, geophysics, botany, mathematics, just to mention a few) — surely exceeding the capacity of any one single science translator. Their style and personal writing preferences, characterized by saying as much as possible with the fewest possible words, which accounts for the very high information density of the text, in conjunction with an obvious preference for German Expressionism (Wegener), might result in a language appearing somewhat old-fashioned. As such, it was at least for me a novel and demanding experience. Although the book contains so many different subjects that it could be read as a textbook, it has been translated as a historical document, as true to the word as possible with the exceptions mentioned above, reflecting the state of knowledge of the time when it was first published (1924) and supplemented (1940).

**Dr. rer. nat. Bernard Oelkers**

Biologist, Translator of Science & Medicine

Bremen, 2014

**Inhaltsverzeichnis /Contents**

original S./p. 2015–S./p.

Preface 2015 .....	III	III
Note of the Translator .....	VIII	VIII

**Die Klimate der geologischen Vorzeit**

Einleitung .....	1	7
Kapitel I. Die fossilen Klimazeugen .....	6	12
Kapitel II. Die Klimagürtel im Karbon und Perm .....	21	27
Kapitel III. Die Klimagürtel im Mesozoikum .....	55	61
Kapitel IV. Die Klimagürtel in der Tertiärzeit .....	94	100
Kapitel V. Die Klimate in den vorkarbonischen Zeiten .....	141	147
Kapitel VI. Polwege und Breitenänderungen in der Erdgeschichte .....	154	160
Kapitel VII. Die Klimate des Quartärs .....	158	164
Index .....	261	267

**Die Klimate der geologischen Vorzeit –**

<b>Ergänzungen und Berichtigungen.....</b>	<b>1</b>	<b>301</b>
--	----------	------------

**The Climates of the Geological Past**

Contents .....	III	345
Table of Figures.....	V	347
Introduction .....	1	349
Chapter I. Fossil Climate Indicators .....	5	353
Chapter II. The Climate Belts of the Carboniferous and Permian .....	19	367
Chapter III. The Climate Belts of the Mesozoic .....	52	400
Chapter IV. The Climate Belts of the Tertiary .....	88	436
Chapter V. The Climates of the Pre-Carboniferous Periods .....	131	479
Chapter VI. Pole Migrations and Latitude Changes in Earth’s History .....	143	491
Chapter VII. Climates of the Quaternary .....	147	495
Index .....	243	591

**The Climates of the Geological Past –**

<b>Supplements and Corrections .....</b>	<b>1</b>	<b>625</b>
--	----------	------------





Köppen - Wegener

Die Klimate  
der geologischen Vorzeit



# Die Klimate der geologischen Vorzeit

von

**W. Köppen** und **A. Wegener**

Meteorologe der Seewarte a. D. o. Prof. a. d. Universität Graz

---

Mit 1 Tafel und 41 Abbildungen im Text

Berlin

Verlag von Gebrüder Borntraeger

W 35 Schöneberger Ufer 12 a

1924

---

---

Alle Rechte,  
insbesondere das Recht der Übertragung in fremde Sprachen, vorbehalten  
Copyright 1924, by Gebrüder Borntraeger in Berlin

---

---

Druck von der Buchdruckerei des Waisenhauses in Halle (Saale)

# Inhalt

**Einleitung.** Methoden des Buches S. 1. — Schichtenfolge S. 4

## **Kapitel I. Die fossilen Klimazeugen**

Fossiles Eis 6; Spuren von Inlandeis und Gletschern 7; Kohlen als Zeugen für Regenklimate 8; Heutige Trockengebiete 10; Gips und Steinsalz 10; Wüstensandstein 12; Löß 14; Bodenfarben 15; Pflanzenreste 16; Reste von Landtieren 18; Kalkproduktion der Meeresfauna 19.

## **Kapitel II. Die Klimagürtel im Karbon und Perm**

### A. Eisspuren 21

In Südafrika 24; mehrfache Vereisung 26; spezielle Schichtenfolge in Neusüdwales 26; zeitliche Verlagerung der Eiskappe 27; Schichtenfolge in Brasilien 28; desgl. in Südafrika 30; desgl. in Vorderindien 31; desgl. in Australien 32; Pseudoglaziale Erscheinungen 33.

### B. Kohle 34

Tropische Torfmoore 34; der äquatoriale Kohlegürtel des Karbon und Perm 36  
Kohlen der südlichen Regenzone auf Moränen 38.

### C. Salz, Gips, Wüstensandstein 39

In Nordamerika 39; in Europa 40; Entstehung des Staßfurter Salzlagers 41; Salzlager in Afrika 42.

### D. Die Pflanzenwelt 43

Tropennatur der europäischen Karbonflora 43; Pecopterisflora, Lepidodendronflora und Glossopterisflora 46.

### E. Die Tierwelt 53

Kalkriffbildner 53; Reptilien 54.

## **Kapitel III. Die Klimagürtel im Mesozoikum**

### A. Trias

Eisspuren 55; Kohle 56; Salz, Gips, Wüstensandstein 58; die Pflanzenwelt 61; die Tierwelt 63.

### B. Jura

Eis 65; Kohlen 65; Salz, Gips, Wüstensandstein 69; die Pflanzenwelt 71; die Tierwelt 72; Gliederung der Meeresfauna nach Neumayr-Uhlig 75; Kriterien aus der heutigen Fauna Australiens 77.

### C. Kreide

Eis 78; Kohle 80; Salz, Gips, Wüstensandstein 82; die Pflanzenwelt 85; die Tierwelt 88; Rudistenverteilung nach Daqué 89; Saurier 91; Kriterien aus der heutigen Fauna Australiens 92.

## **Kapitel IV. Die Klimagürtel in der Tertiärzeit**

### A. Das Frühtertiär (Paleozän, Eozän, Oligozän)

Eis 95; Kohle 96; Salz, Gips, Wüstensandstein 101; die Pflanzenwelt 103; Bernsteinwälder 105; frühtertiäre Waldflora des Nordpolargebietes 105; Südamerikanische Floren 108; äquatoriale Regenflora in Ägypten 109; die Tierwelt 110.

### B. Das Spättertiär (Miozän, Pliozän) 113

Eis 113; miozäne Tillite in Alaska 113; das fossile Steineis in Alaska und Nord-



ostsibirien 115; miozänes Alter desselben 121; pliozäne Vereisung Nordamerikas 122; Kohle 124; Salz, Gips, Wüstensandstein 125; galizisch-rumänisch-kleinasiatisch-persische Salzformation 126; spätpliozänes Trockenklima auf Sumatra 129; Schichtenfolge in Argentinien 130; die Pflanzenwelt 132; Floren von Südamerika und der Seymour-Insel 133; die Tierwelt 137; Meeresfauna Alaskas 137; Landfauna Südamerikas 139.

### **Kapitel V. Die Klimate in den vorkarbonischen Zeiten**

- A. Devon 141; Old Red 142.
- B. Silur 144; Salzformation Nordamerikas 145; Silurkorallen 146.
- C. Kambri um 148; Eisspuren 148; kambrische Salzlager in Vorderindien 149.
- D. Algonkium 151; Eisspuren in Nordamerika 151; Algonkischer Wüstensandstein 152.

### **Kapitel VI. Polwege und Breitenänderungen in der Erdgeschichte**

Polwege 153; Breitenänderungen 154; Tabelle derselben von 27 Orten seit dem Karbon S. 157.

### **Kapitel VII. Die Klimate des Quartärs**

- A. Übersicht der Tatsachen
  - 1. Europa: Vereisung der Alpen 159; das Inlandeis Nordeuropas 166; Klimazeugen außerhalb des Vereisungsgebietes: Blockfelder, Löss 167; Antizyklone, Orientierung der Dünen und Gletscher 170; Pflanzenwelt 174; Tierwelt 176; der Mensch 179; 2. Außereuropäische Länder: Das Inlandeis Nordamerikas 179, Eiszeiten 181, Seen 183; Alaska und Neusibirische Inseln 189, Mammutleichen 190; Asien 191; Südamerika 193; Südafrika 196; Australien und Neuseeland 196.
- B. Die Gliederung des Eiszeitalters, ihre Ursachen und Zeitrechnung. Temperatur des Sommers entscheidend 197; Schwankungen der Sonnenstrahlung 202; Milankovitch über das Verhältnis der Strahlung zu  $\epsilon$  und  $e \sin II$  und deren säkulare Schwankungen 207; Strahlungsmengen in den kalorischen Jahreszeiten, ausgedrückt in Breitenäquivalenten 208; Tabelle der Sonnenstrahlung im Sommerhalbjahr in 55°, 60° und 65° Breite in den letzten 650000 Jahren 214. Angenäherte graphische Ableitung der Strahlungsgröße als Funktion von  $\epsilon$  und  $e \sin II$  für beide Halbkugeln 215; Vergleich mit den Eiszeiten Alpengebiet 217; Dauer einer Eiszeit, Verschmelzung zweier Strahlungsminima zu einer Eiszeit 218; Eiszeiten beider Halbkugeln 222; Begleitende Umstände 223.
- C. Die Breitenänderungen im Quartär und die Klimawechsel bestimmter Gegenden
  - Tiefe Temperatur des ganzen Zeitraums in Europa und Nordamerika 224; Polwanderung nach den Beobachtungen in Europa, Nordamerika und Antarktika 226; Verlagerung des Äquatorialstroms 229; Gang der Sonnenstrahlung seit 120000 Jahren an fünf Orten 231.
- D. Das Ende der Eiszeit und die Postglazialzeit
  - De Geers Messungen in Schweden und Nordamerika 233; das Klimaoptimum vor 8000—5000 Jahren 234; eine Zeit der heißen Sommer wahrscheinlicher als zwei 238; Klimaänderung in Grönland und Spitzbergen 240; Vegetationswechsel in Dänemark und NW-Deutschland 242; zwei Tabellen für NW-Europa 244; Anschluß an das Alpenvorland 247; Temperaturwechsel am Rande des Inlandeises bei dessen Rückzug 247; Nordamerika 250. Geschichtliche Zeit 251; Änderung in der Feuchtigkeit 252; „Austrocknung“ unbewiesen 253.
- E. Tabelle der  $\epsilon$  und  $e \sin II$  seit 800000 Jahren 254

**Erklärung der Tafel 256**

Die Erforschung der Erdrinde hat zweifellos festgestellt, daß in den meisten Teilen der Erde, namentlich auch in den bestbekanntesten Erdteilen Europa und Nordamerika, wiederholt große Änderungen des Klimas stattgefunden haben. Norddeutschland war zeitweise von einer mächtigen Eisdecke bedeckt, wie jetzt Grönland, und zu anderer Zeit haben in Grönland Laubwälder gerauscht, die artenreicher waren als die jetzigen Wälder Deutschlands und Südeuropas.

In diesem Buche werden die vorzeitlichen Klimawechsel unter den Voraussetzungen der Theorie der Kontinentenverschiebung<sup>1)</sup> behandelt, die hier als richtig angenommen wird. Die einfache Klarheit, die damit in das bisher so verworrene Gebiet der Paläoklimatologie einzieht, beweist ihrerseits die Richtigkeit jener Voraussetzungen.

Im heutigen System der Klimate erkennen wir als Hauptgesetz eine zonale Anordnung, sowie Störungen derselben, welche letzten Endes auf die Verteilung von Wasser und Land zurückgehen. Das zonale Gesetz überwiegt aber stark, wie unter anderem aus der folgenden Tabelle der höchsten und niedrigsten Jahrestemperaturen in den verschiedenen Breiten hervorgeht:

Breite	80°	60°	40°	20°	0°	-20°	-40°	-60°	-80°
Höchstes Jahresmittel	-10	7	17	29	28	25	14	1	-12
Niedrigstes d. Temperatur	-19	-8	10	23	25	18	9	-6	-20
Differenz	9	15	7	6	3	7	5	7	8

Das zonale Gesetz kommt in der Tabelle zum Ausdruck in dem Unterschied zwischen dem Äquator und 80° Breite, welcher auf der Nordhalbkugel 38 bzw. 44° C, auf der Südhalbkugel 40 bzw. 45° C beträgt. Für die Störungen durch die Verteilung von Wasser und Land

1) A. Wegener, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. „Die Wissenschaft“ Bd. 66. 3. gänzlich umgearbeitete Auflage. Braunschweig 1922.

erhalten wir dagegen ein Maß durch die Differenzen zwischen den höchsten und den niedrigsten Werten. Wie man sieht, werden hier nur in einem Fall  $15^\circ$  erreicht, zwei Drittel aller Differenzen sind kleiner als die Hälfte davon. Das zonale Gesetz überwiegt also bei weitem. Würde man statt der Jahresmitteltemperatur die Mitteltemperatur des wärmsten Monats oder andere Elemente zugrunde legen, so würde man doch stets wie hier finden, daß die Unterschiede in meridionaler Richtung viel größer sind als in Richtung der Breitenkreise.

Auf Grund dieser Erwägungen wurde für die älteren Zeiten bis einschließlich Tertiär folgendes Verfahren benutzt: In die von A. Wegener rekonstruierten Erdkarten wurden die Zeugnisse für Polarklima (glaziale Blocklehme), für feuchtes Klima (Kohle) und für trockenes Klima (Salz, Gips, Wüstensandstein) eingetragen und mit den Anzeichen für Wärme und Kälte aus der Pflanzen- und Tierwelt verglichen, wie sie sich beispielsweise in den großen Kalkriffen der Korallen und Kalkalgen, den Jahresringen in Hölzern usw. kund tun.

Dabei ergaben sich, zumal wenn man die benachbarten Formationen mit berücksichtigt, stets zwei Trockenstreifen, zwischen denen ein feuchter Streifen längs einem Großkreise die Erde umzieht, und welche mit letzterem zusammen alle Zeugnisse für tropische Wärme enthalten; nach außen schließen sich an die beiden trockenen Streifen wiederum feuchte. Und wo sich ein Gebiet mit Polarklima erkennen läßt, liegt seine Mitte  $90^\circ$  vom mittelsten feuchten und etwa  $60^\circ$  vom nächsten trockenen Streifen entfernt.

Aus diesem empirischen Befund schließen wir, daß zu allen Zeiten in der Erdgeschichte die gleichen Klimagürtel wie heute bestanden haben, nämlich eine äquatoriale Regenzone, zwei Trockenzonen, zwei Regenzone der gemäßigten Breiten und zwei mehr oder weniger ver-eiste Polkappen.

Auch in unseren Vorzeitkarten zeigen sich ähnliche Störungen dieses zonalen Systems, wie in der heutigen Klimakarte; so sind z. B. die trockenen Streifen regelmäßig am Ostrande der Kontinente unterbrochen, ebenso wie im heutigen Klimasystem, wo diese Unterbrechung durch die Monsunregen bewirkt wird. Die Strenge des Polarklimas hat offensichtlich im Laufe der Erdgeschichte merkliche Änderungen erfahren, wie aus dem wechselnden Grad der Eisbedeckung und dem wechselnden Vordringen der Organismen gegen die Pole hervorzugehen scheint. Auch hier kommt vor allem der Wechsel der Land- und Wasserverteilung und der davon abhängigen Luft- und Meeresströmungen als Ursache in Frage, insbesondere ist die Ausbildung einer Inland-eiskappe naturgemäß an die Existenz einer genügenden Landmasse im Polargebiet gebunden.

Aber wie im heutigen Klimasystem, so sind auch in unseren Vorzeitkarten diese Störungen nicht imstande, das zonale Gesetz zu verdecken.

Betrachten wir nun die Lage dieser empirisch ermittelten Klimazonen im Laufe der Zeiten, so sehen wir, daß sich diese Lage von Formation zu Formation geändert hat. Die Pole sind also gewandert<sup>1)</sup>, wenn auch nur innerhalb gewisser Grenzen. Die Klimageschichte eines Ortes ist daher in erster Näherung die Geschichte seiner Lage zu Pol und Äquator.

Bei der Behandlung des Quartärs konnten wir noch einen Schritt weiter gehen. Gab die Berücksichtigung der Polwanderungen hier die Erklärung des Eiszeitalters, so fand die Gliederung in Eis- und Interglazialzeiten ihre wahrscheinliche Erklärung durch die Bedingungen des Strahlungsempfanges unter dem Einfluß der langsamen Änderungen von Exzentrizität, Perihel und Schiefe der Erdbahn. Glücklicherweise ist der mathematische Teil dieser Aufgabe vor kurzem in umfassender Weise von Prof. Milankovitch in Belgrad bearbeitet worden<sup>2)</sup>, und insbesondere ist es diesem gelungen, die Hauptschwierigkeit einer paläoklimatischen Deutung der Rechnungsergebnisse, nämlich die Verwandlung der Strahlungsmengen in Temperaturen, durch Einführung fingierter Breitenänderungen vollständig zu umgehen. Für das vorliegende Buch hat er die Grundlagen der Berechnung und ihre Ergebnisse selber in einem Aufsatz kurz und übersichtlich dargestellt, der mit bestem Dank im Original aufgenommen wurde.

Bei der Verwendung seiner Rechnungsergebnisse für die Klimafrage sind wir davon ausgegangen, daß stärkerer Sonnenstrahlung auch höhere Temperatur entspricht, und daß kalte Sommer, nicht kalte Winter, die Entwicklung des Inlandeises fördern — zwei fast selbstverständliche und dennoch von einigen Autoren angefochtene Annahmen! Nähere Ausführungen hierüber wird man im Abschnitt Quartär finden.

Unter diesen Voraussetzungen gewinnt die Kurve der sommerlichen Strahlungsmengen für die letzten 650 000 Jahre den Charakter einer absoluten Chronologie des Eiszeitalters. Ihre Einzelheiten stimmen, wie gezeigt werden wird, in weitgehendem Maße mit den Annahmen der hervorragenden Eiszeitforscher überein, so daß es un-

---

1) Änderungen der geographischen Breite bezeichnen wir wie in A. Wegeners oben genanntem Buch als Polwanderungen, wenn sie auch den Ausgangskontinent Afrika, und damit den Hauptteil des festen Landes, betroffen haben, dagegen als Kontinentenverschiebungen, wenn sie nur einen der übrigen Kontinente betreffen.

2) Milankovitch, Théorie mathématique des phénomènes thermiques, produits par la radiation solaire. 339 Seiten. Paris, Gauthier-Villars, 1920.

nötig erscheint, nach weiteren Ursachen für Klimaänderungen in dieser Zeit zu suchen.

Von den zahlreichen sonstigen Hypothesen, die zur Erklärung von Klimaänderungen aufgestellt worden sind, wird daher in diesem Buche nicht die Rede sein. Insbesondere erblicken wir in dem System der fossilen Klimazeugen keinen empirischen Anhalt für die Annahme, daß die von der Sonne ausgegebene Strahlung sich im Laufe der Erdgeschichte geändert habe. Desgleichen fehlt es an Tatsachen, welche durch Änderungen in der Durchstrahlbarkeit der Atmosphäre (A r r h e n i u s) oder des Weltalls (N ö l k e) zu erklären wären; denn diejenigen Tatsachen, zu deren Erklärung diese Theorien gewöhnlich herangezogen werden, finden bereits durch das heutige Klimasystem ihre Erklärung, wenn man seine in der Vorzeit geänderte Orientierung berücksichtigt, und können meist auch schon deshalb nicht als Beweise für sie in Frage kommen, weil sie nicht für die ganze Erde, sondern nur für bestimmte Teile gelten. Auf die Kritik der sehr schwachen Grundlagen dieser Hypothesen brauchen wir daher nicht einzugehen. Auch die zahlreichen Arbeiten von F. v. K e r n e r, welche auf eine zahlenmäßige Erfassung des Einflusses von Land und Wasser hinausgehen, erwiesen sich für unsere Zwecke nicht als brauchbar.

Die Polwanderung ist nach den hier folgenden Belegen keine Hypothese mehr, sondern ein empirischer Befund. Denn die zonenförmige Verteilung von trockenen und feuchten Gebieten schließt eine andere Erklärung aus.

Im Folgenden sind das Quartär von W. K ö p p e n, die übrigen Formationen von A. W e g e n e r bearbeitet, jedoch unter ständigem Gedankenaustausch.

Zur Erleichterung der Benutzung des Buches sei eine Übersicht über die geologische Schichtenfolge gegeben:

#### G e o l o g i s c h e S c h i c h t e n f o l g e

- |               |   |           |
|---------------|---|-----------|
| A. Känozoikum | 1. Alluvium<br>2. Diluvium (Eiszeitalter, Pleistozän)<br>3. Tertiär <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Pliozän</li> <li>b) Miozän</li> <li>c) Oligozän</li> <li>d) Eozän</li> <li>e) Paleozän</li> </ul> | } Quartär |
| B. Mesozoikum | 4. Kreide <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Senon</li> <li>b) Turon</li> <li>c) Cenoman</li> <li>d) Gault</li> <li>e) Neokom und Hils, Wealden</li> </ul>   |           |

- Jura
    - a) Weißer Jura (Malm)
    - b) Brauner Jura (Dogger)
    - c) Schwarzer Jura (Lias)
  - 6. Trias
    - a) Keuper [oberste Stufe desselben = Rhät]
    - b) Muschelkalk
    - c) Buntsandstein
  - C. Paläozoikum
    - 7. Dyas oder Perm
      - a) Zechstein
      - b) Rotliegendes
    - 8. Karbon
      - a) Produktives Karbon
      - b) Kulm
    - 9. Devon
    - 10. Silur
    - 11. Kambrium
    - 12. Präkambrium (Algonkium usw.)
  - D. Archaikum (Gneis, kristallinische Schiefer, ohne organ. Reste).
-



## Kapitel I

### Die fossilen Klimazeugen

Die Zahl der Zeugnisse für das vorzeitliche Klima ist Legion. Im Grunde genommen trägt jedes Gestein, jede fossile Flora und Fauna den Stempel des Klimas zur Entstehungszeit. Aber in der Auffindung und Deutung dieses Stempels stehen wir noch in den ersten Anfängen. Sind wir doch noch ganz im unklaren über die klimatische Bedeutung nicht nur mancher Lebensformen, die uns bei unseren Analogieschlüssen durch ihre überraschenden Eigenschaften leicht in die Irre führen, sondern auch solcher Gebilde, bei deren Entstehung es sich nur um physikalische und chemische Vorgänge handeln kann, wie z. B. des Petroleums, des Asphalts, des Graphits, des Dolomits und anderer Gesteine.

Obwohl in diesem Buche die ausführliche Besprechung der Klimazeugnisse der größeren Anschaulichkeit halber grundsätzlich dort erfolgen soll, wo sie in der Erdgeschichte auftreten, wird es doch nützlich sein, eine kurze Übersicht zur Orientierung vorzuschicken.

Die Spuren, welche frühere Inlandeisdecken zurückgelassen haben, bilden wichtige Klimazeugnisse. Wie später gezeigt werden wird, hängt die Entwicklung von Inlandeis weniger von der Niederschlagsmenge, als von der Temperatur ab, und insbesondere sind niedrige Sommertemperaturen dazu nötig. Im Innern großer Kontinente, wo die Jahreschwankung der Temperatur groß ist, sind daher die Bedingungen ungünstig, weil die Sommerwärme den Schnee beseitigt, während eine maritime Gegend selbst bei höherer Jahresmitteltemperatur Inlandeis tragen kann. Nicht überall im Polarklima braucht sich also dies durch Inlandeisspuren zu erkennen zu geben. Aber andererseits haben wir es da, wo wir solche Spuren finden, zweifellos mit Produkten des Polar Klimas zu tun. Heute finden wir Inlandeis höchstens bis 60° Breite herab.

Das deutlichste Merkmal einer ehemaligen Inlandeisbedeckung sind Reste des Eises selbst, wie sie auf Alaska, in Nordostsibirien und auf den Neusibirischen Inseln in Gestalt des später eingehend zu besprechenden fossilen Steineises seit dem Tertiär erhalten sind als Reste einer gewaltigen, diese Gegenden einst ganz bedeckenden Inlandeiskappe. Auch in Finnland scheinen sich letzte Reste des dortigen quar-

tären Inlandeises erhalten zu haben. Zur unbegrenzten Erhaltung dieses Steineises bedarf es nur zweier Bedingungen: erstens eines Schutzes von oben gegen die Sommerwärme durch eine etwa meterdicke Schicht von Moränenschutt oder Torf, und zweitens einer so tiefen Jahresmitteltemperatur, daß die Isothermenfläche von  $0^{\circ}\text{C}$ , das ist die untere Grenze des gefrorenen Bodens, unterhalb des Eises verläuft. Man kann daher aus der Erhaltung dieser Eisreste schließen, daß die Jahresmitteltemperatur seit der Entstehungszeit ständig oder bis vor kurzem unter  $-2^{\circ}\text{C}$  gelegen hat.

Aber auch wo das Eis nicht selbst erhalten ist, hinterläßt es Spuren seiner Tätigkeit. „Wo wir den felsigen Untergrund geglättet und geschrammt und darüber eine ungeschichtete sandiglehmige Ablagerung finden, in welcher fremde Gesteinsstücke, ebenfalls geglättet und gekritzelt, eingestreut sind, da muß fließendes Eis einmal vorhanden gewesen sein. Die Richtung der Schrammen ist ebenso wie das Heimatland der erratischen Blöcke ein unzweideutiger Hinweis auf die Herkunft der Eisströme“ (J. Walther). Am häufigsten findet man die Blocklehme, mit deren Namen treffend das unsortierte Durcheinander von feinstem und größtem Material gekennzeichnet wird. Eis saigert eben nicht das Material so, wie es Wind und Wasser tun. In der Regel sind die Blocklehme ungeschichtet. Wo Schichtung zu beobachten ist, in welche kleinere und größere erratische Blöcke eingestreut sind, haben wir es meist mit Ablagerungen unter schwimmendem Inlandeis zu tun, dessen unterste, mit Moräne durchsetzten Schichten im Wasser abschmelzen und ihren Inhalt herabsinken lassen. In vielen solchen Fällen kann diese Entstehung durch die Reste der Meeresfauna unmittelbar nachgewiesen werden. Die Blocklehme der älteren Zeiten sind meist zu festen Gesteinen, Tilliten, verhärtet. Man kennt solche Blocklehme bzw. Tillite aus dem Algonkium, Kambrium, Devon, Karbon, Perm, Miozän, Pliozän und Quartär. Leider sind gerade diesen häufigsten Spuren ehemaliger Inlandeisdecken andere „pseudoglaziale“ Konglomerate bisweilen zum Verwechseln ähnlich, die auf gewöhnlicher Schuttbildung beruhen. In letzteren kommen gelegentlich auch Gesteinsglättungen und Schrammen vor, welche gekritztes Geschiebe vortäuschen, in Wirklichkeit aber auf Gleitharnische zurückzuführen sind. Eine ganze Reihe derartiger Erscheinungen z. B. aus dem europäischen Karbon ist anfangs für glazial angesprochen worden, während man sie heute als pseudoglazial betrachtet. Über verschiedene andere Fälle sind die Meinungen geteilt. Im allgemeinen pflegt man erst dann die glaziale Natur als ganz einwandfrei erwiesen zu betrachten, wenn es, wie z. B. bei der permokarbonischen Vereisung in Südafrika, gelungen ist, unter dem Blocklehm der Grundmoräne noch die polierte Oberfläche des anstehenden Gesteins nachzuweisen.

Auf ein wichtiges Hilfsmittel zur Erkennung der vorherrschenden Windrichtung zur Zeit größerer Ausdehnung der Gletscher hat neuerdings Fr. Enquist<sup>1)</sup> aufmerksam gemacht. Die ungleiche Entwicklung der Gletscher auf verschiedenen Seiten eines Berges ist bisher sehr verschieden gedeutet worden. Enquist glaubt sie „ausschließlich“ der Wirkung des Windes zuschreiben zu müssen, der den Schnee vor und nach seinem Niederfallen der Leeseite des Berges zutreibt, im Gegensatz zum Regen, der überwiegend an der Luvseite ausfällt. Wir werden uns noch weiter unten im Abschnitt Quartär mit der Frage beschäftigen.

Auf dem nicht vom Eise bedeckten Raume des Polarklimas treten gewisse Erscheinungen auf, welche mit dem gefrorenen Boden bzw. mit dem Fließen seiner obersten, im Sommer aufgetauten Schicht zusammenhängen. Hierher gehören namentlich die Blockströme, die als „Steinmeere“ in den deutschen Mittelgebirgen bekannt sind und nach Harrassowitz im Quartär unter dem Einfluß kalten und dabei schneearmen Klimas entstanden sind. Beim europäischen Quartär wird neuerdings auch die Bedeutung der Verwitterungsrinden für die Klimafrage betont. Wenn wir z. B. unter dem oberen, wenig verwitterten Löß einen älteren Löß mit viel tiefer reichender und dunklerer Verwitterungsrinde finden, so ist dies ein Zeichen dafür, daß zwischen der Ablagerung beider eine viel längere Zeit mit zum Teil wärmeren Sommern vergangen ist, als seit der Ablagerung des oberen, viel jüngeren Lösses.

Eine andere wichtige Gruppe von Klimazeugnissen bilden die Kohlen. Aber merkwürdigerweise herrscht noch heute eine große Verwirrung über die Frage, wie das Klima beschaffen war, von dem sie zeugen. Die Unkenntnis der Tropenmoore, welche bisher wegen ihrer Unzugänglichkeit von den Reisenden nicht beschrieben wurden, hat zu dem lähmenden Vorurteil geführt, daß Torf- und damit Kohlenbildung in den Tropen nicht vorkomme, und man war schnell bei der Hand, in der hohen Temperatur, welche die Verwesung fördere, den Grund zu sehen. Noch heute krankten die meisten klimatischen Erörterungen über Kohlenbildung in den Lehrbüchern an dieser unheilvollen Irrlehre, die nicht einmal durch P o t o n i é s Protest ausgerottet worden ist, obwohl doch heute tropische Moore von Sumatra, Ceylon, Zentralafrika und British-Guyana bekannt sind! Wir begnügen uns hier mit diesem kurzen Hinweis und verweisen für das Nähere auf die Ausführungen im Kapitel Karbon und Perm. Über die Temperatur zur Entstehungszeit können uns Kohlenflöze und Torfschichten nur durch ihre Mächtig-

---

1) Fredrik Enquist, Der Einfluß des Windes auf die Verteilung der Gletscher. Bull. of the Geol. Inst. of Upsala, Vol. 14, 1916.

keit einigen Anhalt geben, denn selbst von den Anhängern der genannten Irrlehre wird zugegeben, daß die Torfbildung innerhalb ihrer angeblichen Grenzen um so intensiver vor sich geht, je höher die Temperatur ist. Der eigentliche Beitrag dieser Bildung zur Klimafrage liegt aber nicht auf dem Gebiet der Temperatur, sondern der Feuchtigkeit. Denn damit ein Wasserbecken vermooren kann, muß es jedenfalls mit Süßwasser gefüllt sein, was nur in den Regengürteln der Erde, nicht in den Trockengebieten geschehen kann. Kohlen können also nicht in den Trockengürteln der Roßbreiten, sondern nur in der äquatorialen Regenzone und den beiden Regenzone der gemäßigten Breiten entstehen, oder sonst an Stellen, wo die Trockengürtel durchbrochen sind, wie heute auf Florida oder am ostasiatischen Kontinentalrand. Freilich genügt feuchtes Klima noch nicht zur Moorbildung, es müssen noch die topographischen Vorbedingungen für die Bildung von Süßwasserseen gegeben sein. In alten, gut drainierten Landschaften ist dies nicht der Fall, und hier kann sich deshalb auch kein Torf bilden, trotz des Niederschlags. Wo aber das Inlandeis nach seinem Abschmelzen zahlreiche unregelmäßige Bodenvertiefungen hinterlassen hat, füllen sich diese unter dem Einfluß des subpolaren Regenklimas mit Wasser und vermooren. Zahllose Torfmoore bzw. Kohlenflöze folgen daher der Überschwemmung mit Inlandeis regelmäßig nach. Und ebenso schaffen Faltungen und ähnliche Bodenbewegungen neue Becken, die vermooren können. Alle großen Kohlenformationen der Erdgeschichte sind auf solche Art entstanden: entweder auf Moränen oder auf frischen Faltungen.

Die Kohlen der ältesten Zeiten werden von manchen Autoren als „Algenkohlen“, entstanden aus zusammengehäuftem Seetang oder anderen Meeresgewächsen, betrachtet. Nach unserer Ansicht muß diese Deutung unwahrscheinlich bleiben, bis es gelingt, gegenwärtig die Entstehung von Torf auf diesem Wege nachzuweisen. Die sogenannten „paralischen“ Kohlenflöze, welche durch marine Zwischenlagen zeigen, daß sie in Meeresnähe in Lagunen entstanden, können nicht als Übergang gedeutet werden. Es handelt sich auch bei ihnen um Vermoorung von Süßwasser, das sich in Lagunen hinter dem Dünenbügel sammelte, nur daß zeitweise das Meer über diese Moore hinwegschritt. Wir glauben deshalb, daß man die Kohlen auch für die ältesten Zeiten als Klimazeugen nicht zu verwerfen braucht, was nötig wäre, wenn sie wirklich als Algenkohlen entstanden wären, und daß sich vielleicht sogar die Graphitlager, soweit sie als umgewandelte Kohlenflöze betrachtet werden dürfen, als Zeugen für Regenklimate verwenden lassen. Natürlich kann hier nicht die Rede sein von den gangförmigen Vorkommen des Graphits, die nach R i n n e als Funarolenbildungen zu betrachten sind, sondern nur von den flözförmigen, die, wie „vornehmlich

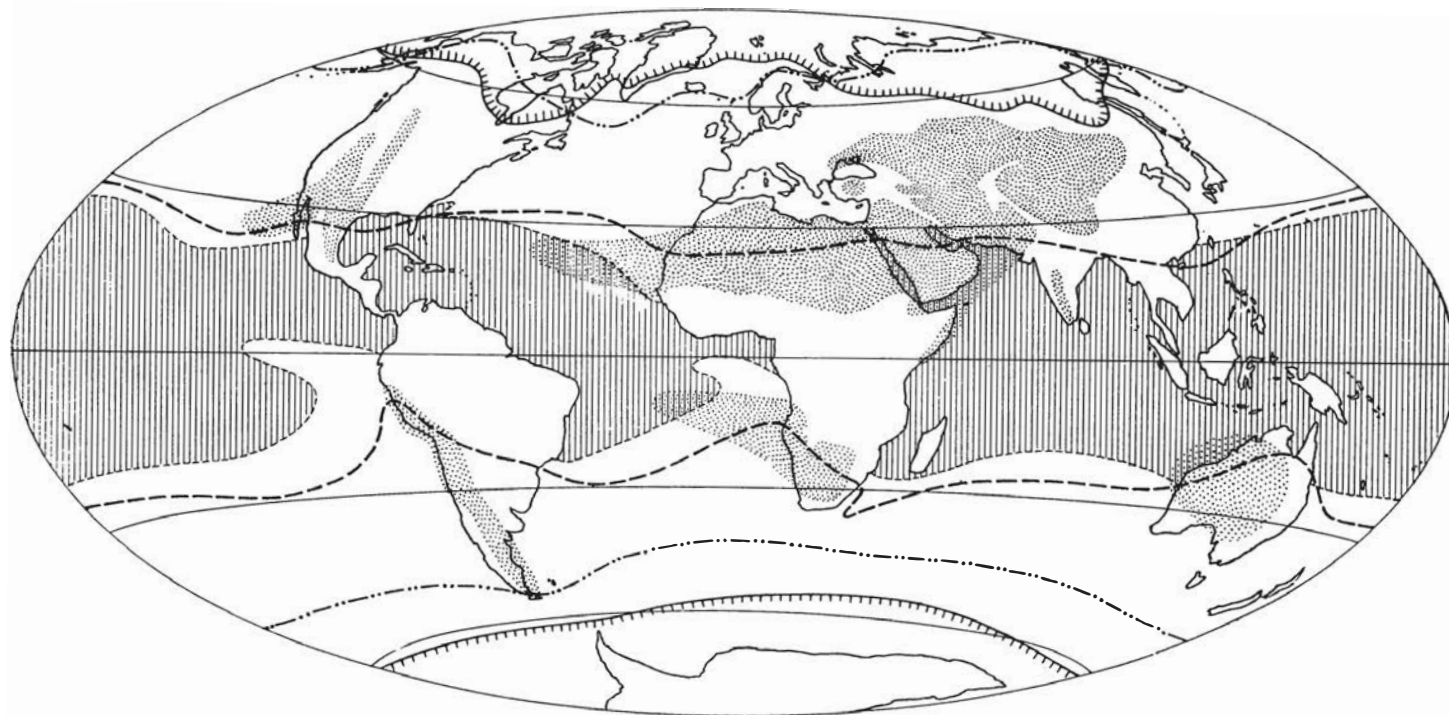
die österreichischen (Böhmen, Mähren, Niederösterreich, Steiermark), durch Kontaktmetamorphose aus Steinkohlen entstanden sind.“<sup>1)</sup>

Die wichtigste Gruppe von Klimazeugnissen sind die Produkte der Trockengebiete, insbesondere Salz, Gips und Wüstensandsteine, denn sie sind es hauptsächlich, welche eine richtige Orientierung der Klimazonen und des Gradnetzes in unseren Erdkarten der Vorzeit ermöglichen. Ihre heutige Lage zeigt Fig. 1, welche auch alle diejenigen Isothermen enthält, von denen in diesem Kapitel die Rede ist. Als Grenze der Trockengebiete ist, da die Temperatur hierbei wegen der Verdunstung eine wichtige Rolle spielt, nicht eine bestimmte Regenmenge, sondern, wenn  $t$  die Jahrestemperatur ist, der Ausdruck genommen  $(cm) 33 + t$ , wenn der Niederschlag gleichförmig über das Jahr verteilt ist; wo er überwiegend im Sommer fällt, ist die Konstante erhöht, bis zu 44 hinauf; wo er überwiegend im Winter fällt, ist sie erniedrigt, bis zu 22 hinab. Die auf diese Weise umgrenzten Trockengebiete ordnen sich, wie die Karte zeigt, in zwei Gürteln, die den Hochdruckgürteln der Roßbreiten entsprechen, mit den Kernen etwa zwischen 20 und 30° Breite. Im Innern der großen Kontinente, namentlich Asien, stoßen sie polwärts vor, und bei den meridionalen Gebirgen Amerikas liegen sie zum großen Teil in Lee des Gebirges, also im Passatgebiet westlich, im Westwindgebiet östlich der Bergketten. Am Ostrande der Kontinente sind die Trockenzonen unterbrochen, während sie am Westrande weit aufs Meer hinausreichen.

Die so definierten Trockengebiete umfassen sowohl das Wüsten- wie das Steppenklima. Das unzweideutigste Produkt derselben ist das Steinsalz, welches durch Verdunsten von Seewasser entsteht. In den meisten Fällen handelt es sich um größere Überschwemmungen (Transgressionen) des Festlandes, die durch Bodenbewegungen vom offenen Meere abgesperrt werden. Im Trockenklima, wo die Verdunstung gegenüber dem Niederschlag überwiegt, wird zunächst das Areal der Überschwemmung durch Austrocknung immer kleiner und dabei die Salzlösung immer konzentrierter, bis schließlich auf immer kleiner werdendem Raume die Ausscheidung des Salzes vor sich geht. Zuerst scheidet sich Gips aus, dann das Kochsalz (Steinsalz), und erst bei sehr scharfer Austrocknung auch die leichtzerfließenden Kalisalze. Diese Entstehungsweise, die später bei Besprechung der permischen Salzbildungen in Deutschland noch eingehender geschildert werden wird, macht es erklärlich, daß Salzbildungen oft in Form von „Salzformationen“ gleichzeitig über weiten Gebieten entstanden. Solche Salzformationen sind namentlich bekannt aus dem Kambrium (Indien), dem Silur (Nordamerika, Sibirien), dem Perm (Mitteleuropa, Nordamerika), dem Miozän

1) F. R i n n e, Gesteinskunde. 6./7. Aufl., S. 325, Leipzig 1921.





════════════ Mitteltemperatur des Jahres  $-2^{\circ}$   
 - - - - - Mitteltemperatur des wärmsten Monats  $10^{\circ}$  } im Meeresniveau  
 - - - - - Mitteltemperatur des kältesten Monats  $18^{\circ}$   
 Schraffierte Räume: Temperatur der Wasseroberfläche im kältesten Monat mindestens  $22^{\circ}$   
 Punktierte Räume: Trockengebiete einschließlich trockener Hochländer

Fig. 1. Trockengebiete und Isothermen heute



(Südeuropa, Kleinasien). Aber dies sind nur die ausgedehntesten Vorkommen. In jeder geologischen Formation finden sich Salzablagerungen kleinerer oder größerer Ausdehnung. Noch verbreiteter sind aber Gipsablagerungen, die meist gleichförmig große Gebiete bedecken, während die Salzstöcke örtlich beschränkt in sie eingestreut sind. Die Gipsausscheidung fand eben schon in einem früheren Stadium statt, als das Wasser noch größere Gebiete bedeckte.

Auch bei der Bildung von Salzlagern spielt das Klima — ebenso wie bei der Kohlenbildung — nur die Rolle einer notwendigen, aber nicht zugleich hinreichenden Bedingung. Es muß vielmehr außerdem auch Seewasser in abgeschlossenen Becken für die Verdunstung zur Verfügung stehen. In größerem Maßstabe ist dies nur in Regressionsgebieten der Fall, wo durch Hebung des Bodens die früheren Schelfmeere vom Weltmeere abgesperrt werden und nun, wenn das Klima trocken genug ist, der Austrocknung verfallen. Die Bildung großer Salzformationen geschieht daher stets nur in ausgedehnten Regressionsgebieten, soweit diese in Trockengebiete fallen. Wir können dies allgemeine Gesetz auch noch anders fassen, wenn wir berücksichtigen, daß solche ausgedehnten Regressionsgebiete sich in dem Quadranten vor dem wandernden Pol bilden, infolge des Nachhinkens des Erdkörpers bei der Neuanpassung an das Rotationsellipsoid, während das Meer die neue Form sogleich einnimmt.<sup>1)</sup> Die Gegenden, welche im Trockengebiet vor dem wandernden Pol liegen, müssen bei der vorangehenden Achsenlage in der äquatorialen Regenzone gelegen haben. Es sind daher gerade solche Gegenden, welche aus der äquatorialen Regenzone in das Trockengebiet versetzt werden, vorzugsweise befähigt, große Salzformationen zu bilden, viel weniger solche, welche aus den gemäßigten Regenzone in das Trockengebiet geraten. Die Beobachtungen bestätigen diese Regel in auffallender Weise: Im Karbon hatte so die Sahara günstige Bedingungen für Salzbildungen, im Perm dagegen Nordamerika und Europa; und auch die große miozäne Salzformation in Osteuropa und Kleinasien betraf Gebiete, die noch im Frühtertiär in der äquatorialen Regenzone lagen und massenhaft Kohle bildeten.

Als Wüstenbildungen sind ferner die mächtigen fossileren Sandsteine mit Rippelmarken, Trockenrissen, Netzleisten, Tierfährten und Regentropfeneindrücken anzusehen. Alle diese Erscheinungen zeigen, daß der Erdboden jeder schützenden Vegetationsdecke bar war. Kreuzschichtungen deuten auf die steilen Böschungswinkel von Wanderdünen hin. Freilich ist bei dem Schluß auf Trockenklima hier Vorsicht ge-

---

1) Vgl. A. Wegener, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. 3. Aufl., S. 85. Braunschweig 1922.

boten, denn Dünen kommen z. B. als Strandbildungen auch in dem regenreichen Klima Norddeutschlands vor, und gewaltige Sandmassen entstehen auch als „Sandr“ durch die saigernde Wirkung der Schmelzflüsse am Rande des Vatna-Jökul auf Island. Die im Quartär auf solche Weise in Deutschland entstandenen Sandmassen sind vielfach gleichfalls durch den Wind zu Wanderdünen umgeformt, die später bewachsen, doch an ihrer Form als Inlanddünen erkennbar sind.<sup>1)</sup> Solche meist weißen Sande können also auch unter ganz anderen Klimaten als in der Wüste entstehen. Aber die Räume, wo dies geschieht, sind doch nur klein im Vergleich zu der großen Ausdehnung der Wüsten auf der Erde.

Vor allem zeugt aber die große Mächtigkeit dieser Sandsteine von ihrer Entstehung in der Wüste. Denn „unter dem Einfluß der überaus starken Verwitterung in Trockengebieten zerfällt das Gestein in Schutt, der Schutt geht zu Tale, und so bleibt die Höhe ständig dem Einfluß intensivster Verwitterung ausgesetzt, so daß auf diese Weise schließlich eine Einebnung des hügeligen Geländes erfolgen kann.“<sup>2)</sup> Die letzten Reste der Höhen sind die „Zeugenberge“. Auf diese Weise sind auch die Konglomerate zu deuten, die vielfach an der Basis solcher Wüstensandsteine liegen und gelegentlich Anlaß zu Verwechslungen mit glazialen Blocklehmen gegeben haben. J. W a l t h e r schildert diese Vorgänge in anschaulichen Worten, die hier wiedergegeben seien:<sup>3)</sup>

„Glatt wie ein Tisch schneidet die steinige Hamada den Horizont, in sanften Wellenlinien verliert sich die Kieswüste in der Ferne. Rings geschlossene Wannen und Oasendepressionen hat der Wind ausgehoben; phantastische Felsen steigen aus dem ebenen Schuttlande; regellose Talsysteme mit wechselndem Gefälle verbinden locker die Niederungen. — Äolische Verwitterung hat weithin alle Felsen gelockert, zerbröckelt, gespalten, unterminiert. Jahrelange Trockenheit hat zahllose große und kleine Gesteinsbrocken erzeugt, heftige Stürme haben sie allseitig freigeblasen, aufsteigende Salzlösungen haben ihren Kern erweicht und ihren Zusammenhang vermindert, Bergstürze sind herabgebrochen und haben breite Schuttkegel gebildet. Der Sandschliff hat die Kanten und

---

1) Die nähere Erforschung dieser U-förmigen Dünen, die sich zahlreich, meist unter Wald, im Innern Skandinaviens, Norddeutschlands, Polens, Ungarns usw. finden, wird namentlich über die Windrichtung zu ihrer Entstehungszeit Aufschluß geben können. Vorläufig ist allerdings noch strittig, ob sie mit Ostwinden von der geschlossenen Seite des U abgelagert sind, wie es S o l g e r behauptet, oder mit Westwinden von seiner offenen Seite her, wie es die meisten andern lehren. (S o l g e r, Dünenbuch, Stuttgart 1910; — K e i l h a c k, Die großen Dünengebiete Norddeutschlands, Zeitschr. D. Geol. Ges. Bd. 69, 1917; — J. H ö g b o m, Ancient Inland Dunes of N. and Middle Europe, Geografiska Annaler 1923.)

2) W. V o l z, Nordsumatra, Bd. II. Berlin 1912.

3) J. W a l t h e r, Das Gesetz der Wüstenbildung. 2. Aufl., S. 161. Leipzig 1912.