

**Late- and postglacial oscillations of glaciers:
Glacial and periglacial forms**
**Spät- und postglaziale Gletscherschwankungen:
Glazial- und Periglazialformen**
**Oscillations fini- et postglaciaires des glaciers:
Formes glaciaires et périglaciaires**
Colloquium / Kolloquium / Colloque
Trier, 1980.05.15-17

In memoriam Hans Kinzl

1983, 25 x 18 cm, 432 pp., 68 photos

Cloth: Hfl.85 / \$35.00 / £19 90 6191 517 1

Investigation of glacier oscillations by analysis of glacial and periglacial forms in the environment of gletschervorfelds has contributed much to the understanding of late- and postglacial morphogenesis in mountain areas. There are 26 papers (8 English, 13 German, 5 French). Each paper has summaries as well as all figure captions in all three languages.

CONTENTS

Alps. L'évolution glaciaire d'altitude dans les Alpes Françaises du Sud au cours des quinze derniers millénaires (M.Jorda, Univ. d'Aix-Marseille II, France); The Val de Nendaz (Valais, Switzerland) – a type locality for the Eggen advance and the Daun advance in the Western Alps (H.-N.Müller, Univ. Zürich, H.Kerschner, Univ. Innsbruck & M.Küttel, Univ. Hohenheim, Germany); Westalpen-Gletscherstände. Neue Beobachtungen und Zwischenbilanz 1980 (A. Zienert, Heidelberg); etc.

Norway. Untersuchungen zur Deglaziation und Talentwicklung im Döralen/Rondane (Norwegen) (J.Gehrenkemper & U.Treter, Inst. für Phys. Geogr., Berlin); Lateglacial moraines, gletschervorfelds and periglacial forms in the Visdalen, Jotunheimen, central South Norway (H.Schroeder-Lanz); etc.

Pyrenees, Iberia. Besonders niedrig gelegene Zeugen einer wümeiszeitlichen Vereisung in Nordwestspanien und Nord-Portugal (P. Schmidt-Thomé, Ebenhausen); Les oscillations des glaciers fini- et post-glaciaires des Pyrénées orientales (F.Taillefer, Toulouse); etc.
Massif Central. Oscillations glaciaires et phénomènes périglaciaires dans le Massif-Central français (Monts du Forez et du Pilat) (B.Etlicher, Univ. Saint Etienne); Halte und Eisrandbildungen des wümeiszeitlichen Bärenal-Gletschers, Südschwarzwald (R. Meinig, Karlsruhe).

Outside Europe. Contribution to the glacial history of the Borup Fiord area, northern Ellesmere Island, N.W.T., Canada (L.King, Univ. Heidelberg); Zur Morphodynamik der Thufur und Palsas in den arktischen Tundren Nordamerikas und Nordeuropas (E. Schunke, Univ. Göttingen); etc.

Chronological questions. Establishing lichen growth curves by repeated size (diameter) measurements of lichen individua in a test area – a mathematical approach (H.Schroeder-Lanz); etc.

FROM THE SAME PUBLISHER

Schlüchter, Ch. (editor)

Moraines and varves – Origin / Genesis / Classification
– *Proceedings of an INQUA symposium on genesis and lithology of Quaternary deposits, Zurich, Sept., 1978*
1979, 25 cm, 455 pp., Hfl.95/\$45.00/£23.75
40 selected and edited contributions on the main mountainous areas of the world which have undergone glaciation during the Pleistocene period. Geology and genesis of moraines, varves and glaciolacustrine sedimentation. Figs., 113 photos.

Ehlers, Jürgen (editor)

Glacial deposits in North-West Europe
1983, 28 cm, 482 pp., Hfl.125/\$48.50/£30.50

In this volume forty six authors report on the current state of specialist research on various aspects of glacial deposits. The geographical coverage of their work – Norway, Sweden, Denmark, West Germany and the Netherlands – represents a transect from the centres of the major North European Quaternary glaciations to their margins. Among the topics covered are: drift prospecting, modern varve chronology, fine gravel analysis, internal structure of thrust moraines, stratigraphical interpretation of well-logs, echo-sounding of North Sea deposits, erratic pebbles as indicators, till fabrics, palaeontology of glacial deposits, multi-component till analyses, glacial deposition on the continental shelf and the genetic interpretation of glacial landforms. 300 photos, 95 in colour. Editor: Geological Survey, Hamburg.

Evenson, E.B., Ch.Schlüchter & J.Rabassa (editors)

Tills and related deposits

Genesis / Petrology / Application / Stratigraphy
Proc. of the INQUA symposia on the genesis and lithology of Quaternary deposits/USA 1981/Argentina 1982
1983, 25 cm, 464 pp., Hfl.120/\$45.00/£27

This volume contains a selection of contributions to two separate meetings of the INQUA Commission on Genesis and Lithology of Quaternary Deposits held in 1981 in the United States and in 1982 in Argentina. One of the primary purposes of these meetings was to provide a forum for discussions among specialists in Quaternary (mainly glacial) geology, glaciology, sedimentology and applied geology. The most recent results of research are presented by a geographic wide range of contributors. The valuable information provided is the result of ongoing research projects.

Bartstra, G.-J. & W.A.Casparie (editors)

Modern Quaternary research in southeast Asia
1975-, 23 cm, each c. 120 pp., Hfl.35/\$18.50/£8.25
Annual publication. Information on research projects & results. Bibliographies, plates, maps, figs.
Editors: Biologisch-Archaeologisch Inst., Groningen.

Rabassa, Jorge (editor)

Quaternary of South America and Antarctic Peninsula
Volume 1

1983, 23 cm, 168 pp., Hfl.55/\$20.00/£13

This is the first volume of an annual scientific publication related to the problems of the Quaternary of South America with a strong emphasis in the paleoenvironmental and paleoclimatic approach. Knowledge of this geological epoch of South America has up to now remained restricted to isolated investigations done by local researchers and few European and North American scientists and explorers. The aim is to contribute towards a better correlation of South American environmental events and endogenous episodes with their equivalents in other parts of the world.

COLLOQUIUM / KOLLOQUIUM / COLLOQUE
TRIER / 1980.05.15-17

**LATE- AND POSTGLACIAL OSCILLATIONS OF GLACIERS:
GLACIAL AND PERIGLACIAL FORMS**
**SPÄT- UND POSTGLAZIALE GLETSCHERSCHWANKUNGEN:
GLAZIAL- UND PERIGLAZIALFORMEN**
**OSCILLATIONS FINI- ET POSTGLACIAIRES DES GLACIERS:
FORMES GLACIAIRES ET PÉRIGLACIAIRES**

Editor / Herausgeber / Rédacteur

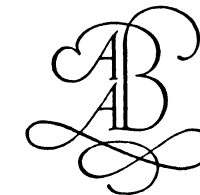
H.SCHROEDER-LANZ

Fach Geographie, Universität Trier

In memoriam

HANS KINZL

OFFPRINT



A.A.BALKEMA / ROTTERDAM

A.A.Balkema Publishers, P.O.Box 1675, NL-3000 BR Rotterdam, Netherlands
For USA & Canada only: A.A.Balkema, 99 Main Street, Salem, NH 03079

SPÄT- UND POSTGLAZIALE GLETSCHERSCHWANKUNGEN IN MEXIKO: BEFUNDE UND PALÄOKLIMATISCHE DEUTUNG

LATE- AND POSTGLACIAL GLACIER FLUCTUATIONS IN MEXICO: OBSERVATIONS AND PALEOCLIMATIC INTERPRETATION

OSCILLATIONS TARDI- ET POSTGLACIAIRES DES GLACIERS AU MEXIQUE: DONNEES ET INTERPRETATIONS PALEOCLIMATIQUES

KLAUS HEINE

Lehrstuhl Physikalische Geographie der Universität des Saarlandes, D-6600 Saarbrücken

Zusammenfassung

Aufgrund von ^{14}C -Datierungen, tephrochronologischen Untersuchungen, Paläoböden, Pollenanalysen, geomorphologischen Befunden, limnischen Ablagerungen und archäologischen sowie vor- und frühgeschichtlichen Zeugnissen wurde eine Chronostratigraphie der jungquartären Gletscherschwankungen der zentralmexikanischen Vulkangebirge erarbeitet. Eine Korrelierung und paläoklimatische Interpretation der Befunde aus Mexiko mit Beobachtungen aus dem nordamerikanischen Raum führt zu folgenden Ergebnissen: Es gibt eine gewisse Synchronität der Gletscherschwankungen während der „Kleinen Eiszeit“ zwischen Mexiko und Nordamerika. Es gibt jedoch für das frühere Holozän als auch für das jüngste Pleistozän keine Synchronität der mexikanischen und nordamerikanischen Gletscherschwankungen. Die paläoklimatische Deutung der in Raum und Zeit sehr differenzierten Gletscherschwankungen in Mexiko und Nordamerika führt zu einer

Summary

A chronostratigraphy of Late Quaternary glacier fluctuations of the central Mexican volcanoes was developed in conjunction with radiocarbon datings, tephrochronological investigations, paleosols, pollen analyses, geomorphological observations, lacustrine sediments, and archeological as well as prehistoric records. A correlation and paleoclimatic interpretation of these data from Mexico with observations from North America yield the following results: There is a certain synchronicity of the glacier fluctuations between Mexico and North America during the "Little Ice Age". But there is no synchronicity of glacier fluctuations between Mexico and North America neither during the Early Holocene nor during the Latest Pleistocene. The paleoclimatic interpretation of the glacial sequences which differ in space and time very much, yield to a reconstruction of the late and postglacial climatic conditions which may only be explained by non-actualistic models.

Résumé

Nous avons élaboré une chronostratigraphie des oscillations des glaciers du Quaternaire récent dans les montagnes volcaniques au Mexique Central d'après des datations ^{14}C , des recherches téphrochronologiques, des paléosols, des analyses palynologiques, des données géomorphologiques, des sédiments lacustres et des trouvailles préhistoriques. La corrélation et l'interprétation paléoclimatique des données au Mexique, avec des observations en Amérique du Nord, donne les résultats suivants: il existe, entre le Mexique et l'Amérique du Nord, un certain synchronisme des oscillations glaciaires pendant le „Petit âge glaciaire“. Cependant, ce synchronisme entre le Mexique et l'Amérique du Nord est absent aussi bien à l'Holocène qu'aux dernières phases du Pléistocène. L'interprétation paléoclimatique des oscillations des glaciers au Mexique et en Amérique du Nord que, chronologiquement et spatialement, sont très différenciées, mène à une reconstruction des situa-

Rekonstruktion der spät- und postglazialen Klimaverhältnisse, für die nicht-aktualistische Modelle entwickelt werden müssen.

tions climatiques tardi- et postglaciaires pour lesquelles il faut développer des modèles sans rapport avec les conditions actuelles.

EINLEITUNG

Obgleich in der Eiszeitforschung in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte erzielt worden sind, so fällt bei der näheren Betrachtung einzelner Teilprobleme auf, daß deren Lösung oft noch aussteht. Das gilt auch für Fragen, die sich mit den Gletscherschwankungen, ihren regionalen und überregionalen Korrelierungen wie auch ihren chronostratigraphischen Beziehungen zu anderen Prozessen des Eiszeitalters befassen. Korrelierungsversuche bekannter Gletscherschwankungen (vgl. Burrows 1979; Heine 1977) sind immer wieder diskutiert worden, doch muß sich unser heutiges Augenmerk auf die Frage der Datierung konzentrieren, da nur unter der Voraussetzung einer exakten Altersansprache der Gletscherschwankungen diese auch weitergehend paläoklimatisch ausgedeutet werden dürfen (Heine 1977).

Am Beispiel der spät- und postglazialen Gletscherschwankungen in Mexiko wird auf die Problematik hingewiesen, die sich aus den Beziehungen der mexikanischen Gletscherschwankungen mit den neuesten stratigraphischen und paläoklimatischen Befunden aus dem nordamerikanischen und nordatlantischen Raum ergeben. Die spät- und postglazialen Umweltbedingungen weichen in vielfacher Weise von den heutigen Umweltverhältnissen benachbarter Gebiete ab; aus diesem Grunde müssen wir darauf vorbereitet sein, den Mut zu haben, nicht-aktualistische Modelle zu entwickeln, die einerseits nicht mit Modellen der Gegenwart übereinstimmen, die andererseits jedoch die Befunde des Eiszeitalters erklären helfen.

1. SPÄT- UND POSTGLAZIALE GLETSCHERSCHWANKUNGEN IN MEXICO

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Bereich der Cordillera Neovolcánica, die in etwa 19°N von West nach Ost Mexiko durchzieht. Es handelt sich um ein aus verschiedenen tertiären und quartären Vulkaniten aufgebautes Gebiet, in dem über 2000 m hoch gelegene Becken von gewaltigen Vulkanmassiven überragt werden. Im Osten begrenzt der 5 700 m hohe Pico de Orizaba das vulkanische Hochland. Nach Westen schließen sich das Becken von Oriental/El Seco an, der Malinche-Vulkan, das Becken von Puebla/Tlaxcala, die Sierra Nevada mit Popocatepetl und Iztaccíhuatl, das Becken von Mexiko, die Ajusco-Vulkane, das Becken von Toluca und der Vulkan Nevado de Toluca. Die westlich folgenden Gebirge und Becken wurden nicht eingehender untersucht.

Das Arbeitsgebiet zeigt die charakteristischen klimatischen Bedingungen der Randtropengebirge mit einem etwa halbjährlichen Wechsel von Regen- und Trockenzeit. Innerhalb der Gebirge verändern sich die Jahresdurchschnittstemperatur und die Zahl der Eis- und Frostwechseltage streng höhenabhängig. Über die klimatischen und Vegetationsverhältnisse des Arbeitsgebietes wurden von Mitarbeitern des Mexiko-Projektes der DFG zahlreiche Untersuchungsergebnisse publiziert.

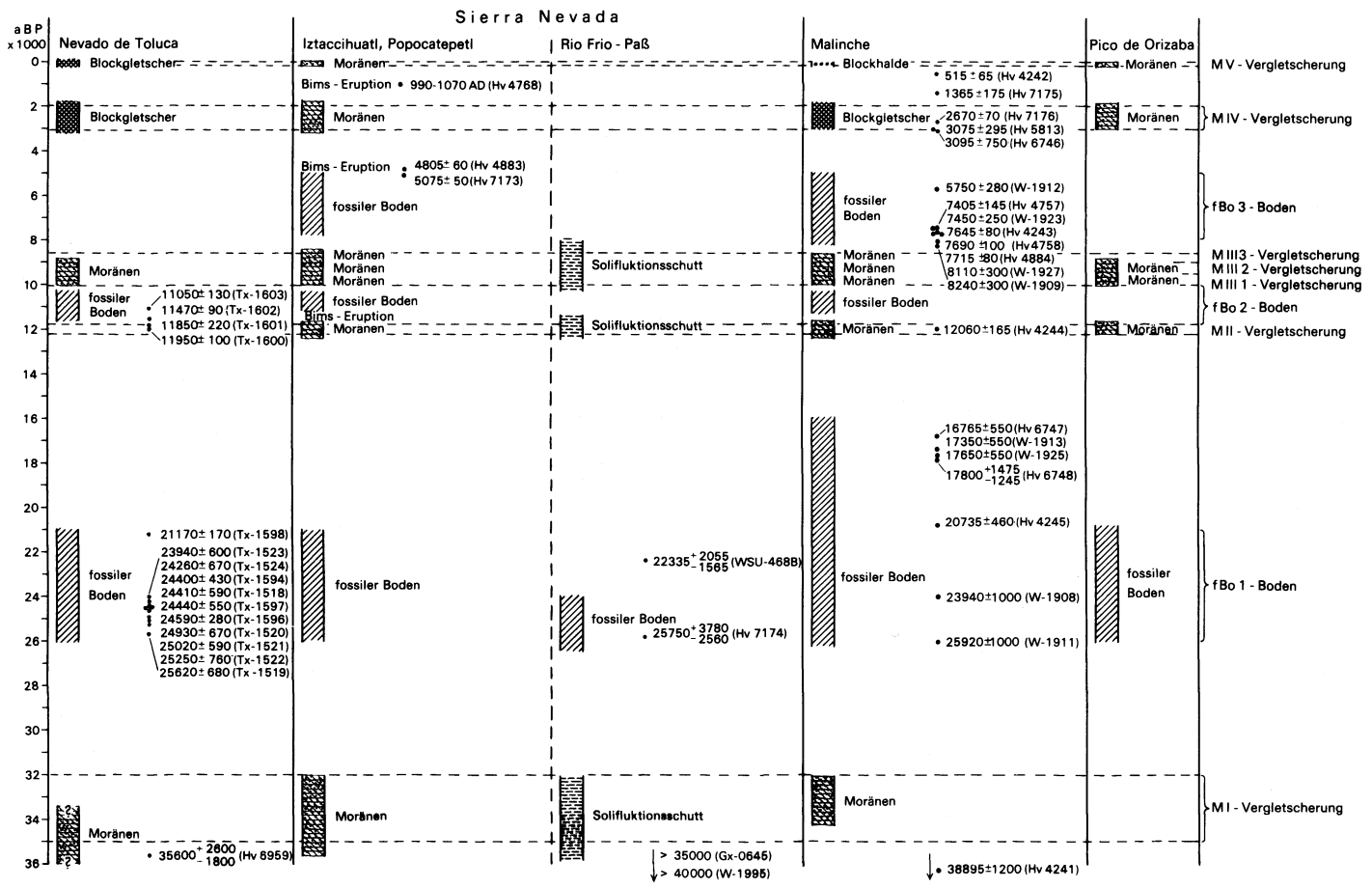
Wiederholt habe ich über die spät- und postglazialen Gletscherschwankungen aus dem Bereich der zentralmexikanischen Vulkangebirge berichtet (zuletzt Heine 1980). In Tab. 1 sind die chronostratigraphischen Beziehungen der glazialen und periglazialen Formen und Ablagerungen für die zentralmexikanischen Gebirge schematisch zusammengefaßt.

2. KLIMATISCHE INTERPRETATION DER GLETSCHERSCHWANKUNGEN

Die morphologischen, glazialgeologischen, bodenkundlichen und paläobotanischen Befunde, deren Chronostratigraphie bekannt ist, können paläoklimatisch gedeutet werden.

Eine komplexe klimamorphologische Zusammenschau bringt Fig. 1. Die M I-Zeit war kühler und feuchter als heute. Sie kann als morphologische Aktivitätszeit i.S. Rohdenburgs (1971) angesehen werden. Eine relativ warme Phase mit Temperaturen, die den heutigen entsprechen haben dürften, folgt der M I-Zeit; die Niederschläge sind vermutlich zuerst etwas geringer als heute, nach ca. 30 000 B.P. mit den rezenten vergleichbar. Ab ca. 25 000 B.P. wird es kühler. Die Abkühlung erreicht ihr Maximum erst um 17 000 B.P. oder später, die Niederschläge scheinen jedoch bereits vor ca. 20 000 B.P. geringer zu werden. Die Zeit zwischen 17 000 und 12 500 B.P. ist relativ trocken und kühl; vermutlich nehmen nach 15 000 B.P. die Temperaturen wieder langsam zu. Um 12 000 B.P. setzt für sehr kurze Zeit eine starke Niederschlagszunahme ein, die zur M II-Vergletscherung führt, die sich aber palynologisch nicht abzeichnet (Ohngemach & Straka 1978). Zwischen 12 000 und 8 500 B.P. steigen die Temperaturen an, ohne daß aus den morphologischen, pedologischen und palynologischen Befunden auf stärkere Temperaturschwankungen geschlossen werden könnte. Ab ca. 10 000 B.P. wird es recht feucht (mit Unterbrechungen). Glazialmorphologisch, sedimentologisch und palynologisch ist diese Pluvialzeit recht gut erfaßt. Sie führt zur M III-Vergletscherung, die sich in zwei Phasen mit einem zusätzlichen Rückzugsstadium gliedern läßt. Mit dem Ende der M III 3-Vergletscherung endet in Zentralmexiko das Pleistozän (Heine & Ohngemach 1976; Ohngemach & Straka 1978). Im Holozän ist es zwischen ca. 8 000 und 5 000 B.P. wärmer als heute; die Fichte, die im Pleistozän in Zentralmexiko weit verbreitet war, stirbt aus. Zwischen ca. 3 000 und 2 000 B.P. wird es zeitweise feuchter als heute, ebenso während der ‚Kleinen Eiszeit‘.

Aus der Darstellung des klimamorphologischen Formenwandels und der paläoklimatischen Interpretation geht hervor, daß im Spät- und Postglazial die Klimazonen bzw. die klimatischen Höhenstufen (oder: geoökologischen Zonen) sich nicht nur horizontal und vertikal verschoben haben, sondern inhaltlich veränderten. Aus diesem Grunde kann eine Rekonstruktion der jungquartären Klimageschichte für Mexiko nicht allein aus den Gletscherschwankungen abgeleitet werden, sondern nur aus der Zusammenschau aller paläoklimatischer Indizien. Dazu gehören neben den Gletscherschwankungen die Veränderungen der Vegetation, die unterschiedlichen Prozesse der Bodenbildung, die Vorgänge der Abtragung und Sedimentation. Da seit mindestens 3 000 Jahren in Zentralmexiko der Mensch einen starken Einfluß auf seine Umwelt ausübt, müssen wir für die letzten Jahrtausende auch die direkten und indirekten Folgen menschlicher Aktivitäten berücksichtigen (Heine 1978b). Klimatisch bedingte alluviale Füllungen in den Becken Zentralmexikos gab es nur vor 8 500 B.P.; aufgrund der Beobachtungen Vita-Finzis



(1977) in verschiedenen Regionen des zentralmexikanischen Hochlandes dauerte die spätglazial/frühholozäne Akkumulationsphase bis ca. 7 000 B.P. Die zweite Akkumulationsphase des Holozäns, die Vita-Finzi ebenfalls klimatisch deutet und zwischen 500 und 1 700 A.D. datiert, korrespondiert mit der Erosionsphase zwischen ca. 600 und 1 700 A.D. (Heine 1976), die jedoch von mir als anthropogen ausgelöst angesehen wird.

3.1. Korrelierung der Gletscherschwankungen mit Befunden aus benachbarten Gebieten

Bisher ist es nicht möglich, die datierten Gletscherschwankungen der zentralmexikanischen Vulkane mit Gletschervorstößen in Guatemala, Costa Rica oder der Sierra Madre Oriental bzw. Occidental zu korrelieren (vgl. Heine 1975). Es fehlt an entsprechenden Datierungen.

Schwierigkeiten bereiten auch die Versuche, stratigraphische Beziehungen zwischen den glazialen Sedimenten einerseits und den Beckensedimenten in Zentralmexiko andererseits herzustellen. Zwar sind in Verbindung mit archäologischen Arbeiten zahlreiche Profile im Becken von Mexiko und den angrenzenden Räumen untersucht worden, doch bleiben Korrelierungen über weitere Entfernungen wegen der differenzierten Schichtenfolgen problematisch. Nach Niederberger (1979) wurde im Becken von Mexiko (Chalco-See) vor ca. 14 500 B.P. Torf gebildet. Zwischen ca. 9 000 und 7 000 B.P. läßt sich anhand von limnischen Sedimenten eine bedeutende Transgression nachweisen; ab ca. 7 000 B.P. belegen die sedimentologischen und faunistischen Befunde relativ gleichbleibende Bedingungen im Chalco-See. Damit wird das holozäne Bild ergänzt, das sich durch feuchte Verhältnisse vor über 7 000 B.P. und durch fehlende Klimaschwankungen seitdem auszeichnet.

Die aufgrund der jungquartären Gletscherschwankungen und Paläoböden ermittelten Daten verschiedener Zeitabschnitte des Spät- und Postglazials stimmen mit der stratigraphischen Gliederung und paläoklimatischen Deutung der Sedimente des Golfes von Mexiko nahezu überein. Beard (1973) datiert folgendermaßen: Das Altonian Substage (kalt) endet um 32 000 B.P., das Farmdalian Substage (warm) um 22 000 B.P., das Woodfordian Substage (kalt) um 12 500 B.P., das Twocreekan Substage um 11 000 B.P. und das Valderan Substage um 7 000 B.P.; erst nach ca. 7 000 B.P. setzt Beard das Holozän an. Zwischen ca. 13 000 und 7 000 B.P. läßt sich eine Übergangszeit nachweisen; um 13 000 B.P. nimmt die Kaltwasser-Foraminifere *Globorotalia inflata* sehr schnell ab und um 7 000 B.P. nimmt die Warmwasserart *Globorotalia menardii* schnell zu. Untersuchungen von Emiliani et al. (1975) ergaben, daß im nordöstlichen Golf von Mexiko die Konzentration des Schmelzwassers des nordamerikanischen Inlandeises das Maximum um 11 600 B.P. erreichte. Nach Kennett & Shackleton (1975) nimmt im Golf von Mexiko die Salinität des Oberflächenwasser um 12 000 B.P. um 10 % ab. Berger (1978) spricht in diesem Zusammenhang vom „12 000 B.P.-Ereignis“. In diese Zeit oder wenig später fällt der Valdres-Eisvorstoß Nordamerikas, der — da er mit einem schnellen Meeresspiegelanstieg koinzidiert — als Surge gedeutet wird.

Tab. 1

Chronostratigraphie der Moränen und Paläoböden in Zentralmexiko (vgl. Heine 1978a, 1980).

Chronostratigraphy of tills and paleosols in central Mexico (see Heine 1978a, 1980).

Chronostratigraphie des moraines et des paléosols du Mexique central (cf. Heine 1978a, 1980).

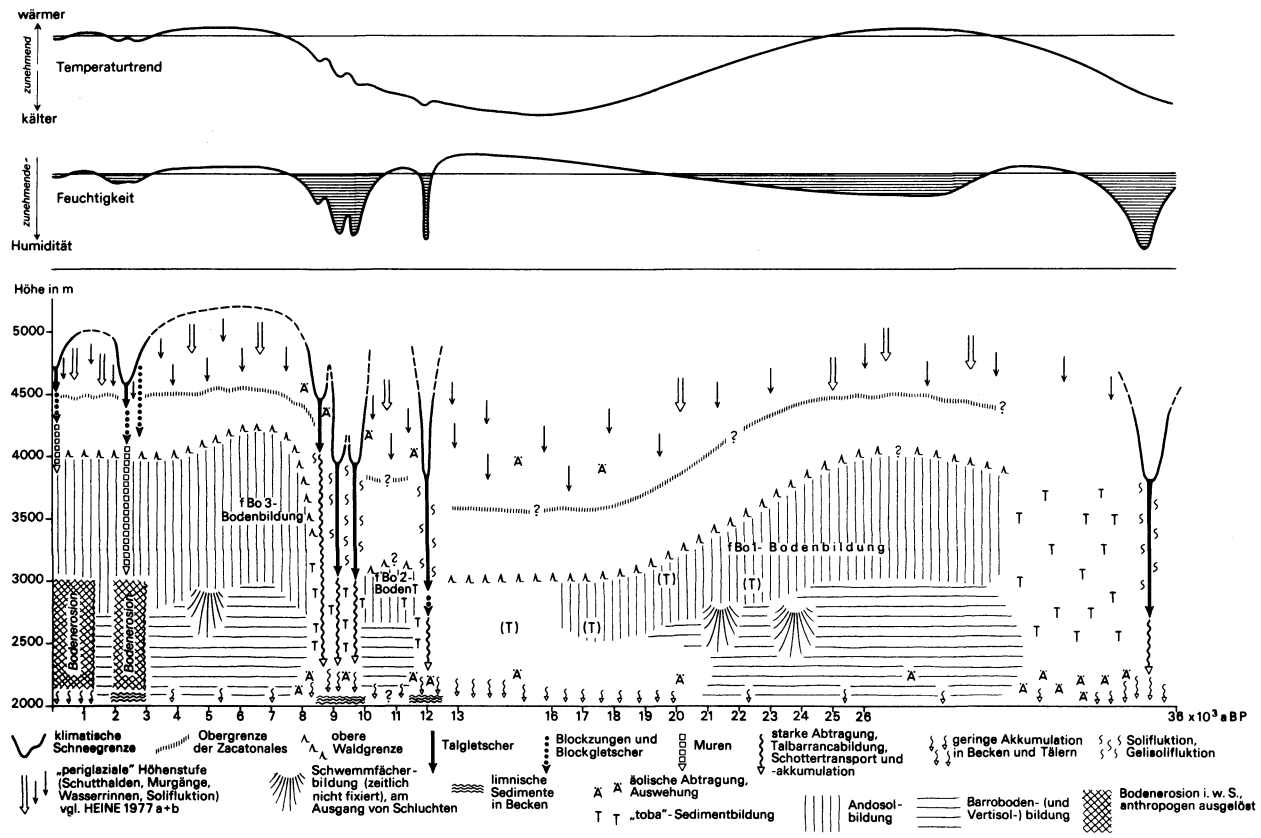


Fig. 1
 Schema des klimamorphologischen Formenwandels in Raum und Zeit für zentralmexikanische Vulkanlandschaften.

Model of climatogeomorphologic sequences in space and time of the central Mexican volcanoes.

Schéma spatio-temporel des séquences climato-géomorphologiques des régions volcaniques du Mexique central.

3.2. Korrelierung der Gletscherschwankungen Zentralmexikos mit ausgewählten Paläoklimazeugen Nordamerikas

Benedict (1975) hat für die Indian Peak-Region der Colorado Front Range eine Glazialchronologie zusammengestellt (Fig. 2). Ihr Vergleich mit den Gletscherschwankungen Zentralmexikos zeigt, daß sehr wahrscheinlich den Gletschervorstößen in Mexiko ein Zurückweichen der Gletscher in der Colorado Front Range entspricht. Möglicherweise um 12 000 B.P. liegt nach Benedict (1975) eine kurze spätglaziale Phase starken Gletscherabschmelzens, der die Vorstöße (Satanta Peak) zwischen ca. 11 000 und 10 000 B.P. folgen. Zwischen ca. 10 000 und 8 500 B.P. sind keine Gletschervorstöße nachgewiesen. Im Holozän treten nur kleinere Vorstöße um 8 000 B.P. (?), zwischen 5 000 und 3 000 B.P. und nach 2 000 B.P. auf. Östlich des Großen Salzsee (Wasatch Mountains) gab es Gletschervorstöße vermutlich um 20 000 B.P. und zwischen 14 000 und 13 000 B.P. (Madsen & Currey 1979).

Die jungquartären Seespiegelschwankungen des pluvialen Lake Lahontan beschreibt Benson (1978) ausführlich. Extrem hohe Seestände sind für die Zeitabschnitte zwischen 25 000 und 22 000 B.P. und zwischen 13 500 und 11 000 B.P. belegt, mäßig hohe Seestände zwischen 20 000 und 15 000 B.P., geringe Seestände zwischen 40 000 und 25 000 B.P. und sehr niedrige Seestände zwischen 9 000 und 5 000 B.P. (Fig. 2).

Die Gletscherschwankungen des laurentischen Eises vor über 18 000 B.P. können nur in groben Zügen rekonstruiert werden. Die M I-Vergletscherung vor ca. 36 000–32 000 B.P. fällt entweder mit den Cherrytree-Stadial oder mit dem Übergang von diesem zum Plum Point-Interstadial zusammen (Berti 1975; Terasmae & Dreimanis 1976). Um 18 000 B.P. wird die maximale Eisausdehnung angenommen. Die Hauptphase des Eisabbaus beginnt um 14 000 B.P. (Evenson et al. 1976). Zwischen ca. 11 000 und 10 000 B.P. wird das Zurückweichen des Eises von verschiedenen markanten Schwankungen unterbrochen (Saarnisto 1974). Hare (1976) vermutet, daß nach 11 000 B.P. das laurentische Inlandeis sehr schnell abschmilzt. Aufgrund glazialgeologischer Befunde wird das Spätglazial in verschiedene Stadiale und Interstadiale untergliedert (Dreimanis 1975), nämlich in Nissouri, Erie, Pt. Bruce, Mackinaw und Pt. Huron (Fig. 2). Jüngste palynologische Untersuchungen aus dem westlichen Massachusetts (Whitehead 1979), Illinois (Grüger 1972), dem Mississippi-Tal bei Memphis/Tennessee (Delcourt et al. 1980) und Nord-Iowa (van Zant 1979) sowie Untersuchungen an fossilen Käfergesellschaften (Morgan & Morgan 1979) ergeben jedoch keine Hinweise auf grössere Klimaschwankungen in der Zeit zwischen 14 000 und 9 000 B.P.; dieser Zeitabschnitt zeichnet sich durch eine Klimaverbesserung aus (Übergang von glazialen zu interglazialen Bedingungen). Schwert & Morgan (1980) nehmen aufgrund der spätglazialen Insektenfaunen an, für die es im Holozän kein Analogon gibt, daß dieser Abschnitt ein wärmeres Tundrenklima hatte als die heutigen nordamerikanischen Tundrengebiete, d.h. das spätglaziale Tundrenklima ist nicht mit dem heutigen vergleichbar. In den Rocky Mountains (Yellowstone Park) können palynologisch zwischen 14 500 und 9 000 B.P. ebenfalls keine markanten Klimaschwankungen ermittelt werden (Waddington & Wright 1974); dort nehmen ab ca. 11 500 B.P. die wärmeliebenden Arten schnell zu.

Eine vorsichtige Deutung der glazialgeologischen und paläobotanischen Befunde ergibt, daß die M II-Vergletscherung Mexikos um 12 000 B.P. möglicherweise mit dem rapiden Eisabbau im Gebiet der Großen Seen zusammenfällt. Die M II-Vergletscherung umfaßt eine äußerst kurze Phase (unter 200 Jahre), die als Anomalie der Niederschlagsverhältnisse aufgefaßt werden kann, sie fällt in die Zeit der spätglazialen Gletscher-

schwankungen während der Bölling- und Älteren Dryas-Zeit in Nord- und Westeuropa. Diese Gletscherschwankungen sind häufig paläoklimatisch interpretiert und in Paläotemperaturkurven umgesetzt worden.

Palynologisch lassen sich diese spätglazialen Gletscherschwankungen in Mexiko nicht nachweisen; auch für Nordamerika fällt der Nachweis paläobotanisch schwer. Da sich weder die Ältere noch die Jüngere Dryas-Zeit in Australien, Neuseeland, Südamerika und Südafrika als markante Temperaturschwankungen abzeichnen, wird vermutet, daß es sich hier vornehmlich um Phänomene der europäischen Vereisungsgebiete handelt (vgl. Heine 1977). Weiterhin ist bemerkenswert, daß auch die Rekonstruktion jungquartärer Seespiegelschwankungen aus allen Erdteilen und Klimazonen erkennen läßt, daß die für Europa ermittelten kurzfristigen Klimaschwankungen der Bölling-, Älteren Dryas-, Alleröd- und Jüngeren Dryas-Zeit sich nicht weltweit abzeichnen, sondern daß die jungquartären Seespiegelschwankungen sehr differenzierte (in Raum und Zeit) Verhältnisse während des Jungquartärs widerspiegeln.

4. PALÄOKLIMATISCHE REKONSTRUKTION DES JUNGQUARTÄRS

Viele Befunde aus den Tropen und Randtropen (Pollenprofile, Seespiegelstände, Seesedimente und Fauneninhalte, Gletscherschwankungen, fossile Grundwasser arider Gebiete, etc.) belegen, daß in den Tropen und Randtropen der Zeitabschnitt zwischen > 30 000 bis ca. 25 000 B.P. in der Regel feuchter als heute war, wobei die Temperaturen den rezenten Verhältnissen in etwa entsprochen haben dürften. Ab ca. 25 000 B.P. ändern sich die Verhältnisse in den Tropen; die Temperaturen scheinen langsam abzunehmen, ebenso die Niederschläge. Ab ca. 19 000–18 000 B.P. bis ca. 13 000–12 000 B.P. sind für viele Gebiete in den Tropen und Randtropen im Vergleich zu heute kühlere und trockenere Verhältnisse nachgewiesen. Kühlere Temperaturen und geringere Evaporation, worauf die geringen Salinitätswerte in vielen fossilen Seesedimenten deuten wie auch verschiedene kühlere Wasser anzeigende Diatomeen-Arten, haben niedrige Seespiegelstände zur Folge. In ariden Gebieten (Namib, Kalahari, Sahara, Australien) lassen sich neben ariden Bedingungen extrem starke Windverhältnisse rekonstruieren, wie sie zwischen ca. 40 000 und ca. 25 000 B.P. und nach ca. 13 000 B.P. nicht aufgetreten sind. Seit ca. 12 500 B.P. bis ca. 9 000 B.P. sind für tropische und subtropische Gebiete verschiedene – oft recht kurze, jedoch intensive – Pluvialphasen belegt. Ab ca. 12 000 B.P. scheinen in den Tropen und Randtropen auch die Temperaturen wieder merklich zuzunehmen. Das nacheiszeitliche Klimaoptimum wird auf der Südhemisphäre etwa um 9 500 B.P., in Nordeuropa um 6 000 B.P. und in Nordamerika um 4 500 B.P. erreicht. Zwischen ca. 9 000 und 4 500 B.P. gibt es in den Randtropen und ariden Subtropen verschiedene Klimaschwankungen vor allem hygrischer Art, die mit dem Trend einer zunehmenden Aridität verknüpft sind.

Fig. 2

Vergleich datierter jungquartärer Glazial- und Pluvial-Chronologien aus Mexiko und Nordamerika.

Comparison of dated Late Quaternary glacial and pluvial chronologies from Mexico and North America.

Comparaison des datations de la chronologie glaciaire et pluviale du Quaternaire récent, au Mexique et en Amérique du Nord.

Die M II- und M III-Gletscherschwankungen der zentralmexikanischen Vulkane fallen in eine Zeit weltweiter Erwärmung; die äußerst kurzfristige M II-Vergletscherung um 12 100 B.P. trifft mit dem („12 000 B.P.-Ereignis“ nach Berger 1978) zusammen, während die M III-Vergletscherung einen längeren Zeitraum einnimmt; die M III-Vergletscherung fällt mit dem sehr starken Abschmelzen des skandinavischen (Mörner 1976) und des nordamerikanischen Inlandeises zusammen.

Für das Jungquartär ergeben sich Klimaabschnitte, die hinsichtlich ihrer regionalen geomorphodynamischen Prozeßkombinationen große Unterschiede zeigen und die zu Vorgängen führen (z.B. synchrones bzw. nicht-synchrones Gletscher- und Seespiegel-Verhalten), wie sie im jüngsten Holozän nicht mehr beobachtet werden können. Folgende Abschnitte gliedern das Jungquartär:

(1) Der Abschnitt von > 30 000 bis ca. 25 000 B.P.: In Mexiko ist diese Zeit als ‚Warmzeit‘ ausgebildet mit Temperatur- und Niederschlagsverhältnissen, die den rezenten ähnlich sind, während in Nordamerika noch bedeutende Reste der Inlandeismassen liegen, die seit ca. 80 000 B.P. gebildet wurden (vgl. Ruddiman et al. 1980).

(2) Der Abschnitt zwischen ca. 25 000 bis ca. 18 000 B.P.: In Mexiko wird es kühler und trockener, so daß es nicht zum Anwachsen der Gletscher kommt. In Nordamerika wird das Inlandeis schnell aufgebaut und erreicht um 18 000 B.P. am südlichen Rand seine größte Ausdehnung, während in Ellesmere Island bereits infolge zunehmender Kontinentalität und Abkühlung das Vergletscherungsmaximum zwischen 25 000 und 20 000 B.P., d.h. früher als am Südrand, datiert werden muß (King 1980). Der Inlandeisaufbau ist jedoch nur bei relativ warmem Atlantik möglich (Ruddiman et al. 1980). Gleiches gilt auch für Nordeuropa. Mit dem Eisaufbau in Nordamerika und Nord-Eurasien geht eine Abkühlung einher, die ab ca. 18 000 B.P. zu großer Aridität führt. Es ist möglich, daß Zentralmexiko zwischen 25 000 und 18 000 B.P. durch eine geringe äquatorwärtige Verschiebung des subtropischen Trockengürtels etwas arider wird, weshalb sich die Abkühlung nicht in einem Anwachsen der Gletscher bemerkbar macht (wie z. B. in Äthiopien, wo die Gletscher ab ca. 25 000 B.P. anwachsen und ihre maximale Ausdehnung vermutlich zwischen 22 000 und 20 000 B.P. zeigen). Diese leichte Verschiebung der Klimazonen nach Süden könnte auch für den ariden Südwesten der USA feuchtere Bedingungen gebracht haben, wie sie sich aus den Seespiegelschwankungen für diese Zeit ableiten lassen.

(3) Der Abschnitt zwischen ca. 18 000 bis ca. 13 000 B.P.: In Zentralmexiko herrschen kühle und relativ aride Verhältnisse. Gletschervorstöße können nicht nachgewiesen werden. In Nordamerika beginnt der Eisabbau. Verschiedene, teilweise sehr schnelle Eisrückzüge zwischen ca. 17 000 und ca. 14 000 B.P. können wohl eher einer größeren Aridität als einer Erwärmung zugeschrieben werden (vgl. Dreimanis 1977); sog. ‚Interstades‘ früherer Autoren aus dem Zeitabschnitt zwischen 18 000 und 14 000 B.P. dürfen daher nicht unmittelbar in Paläotemperaturkurven umgesetzt werden. Auch zeigen die Ränder des nordamerikanischen Inlandeises im Osten stärkere Schwankungen als im Westen (Fig. 2).

(4) Der Zeitabschnitt zwischen ca. 13 000 bis ca. 9 000 B.P.: In Zentralmexiko wird es wärmer und feuchter, wobei um 12 100 B.P. eine kurze heftige Niederschlagszunahme durch ein schnelles Gletscherwachstum angezeigt wird. Ab ca. 10 000 B.P. setzt eine weitere pluviale Phase ein, die zur Bildung der M III-Vergletscherung führt. Während die M III-Gletscher um 9 000 B.P. rasch zurückschmelzen infolge Erwärmung, bleiben die relativ feuchten Bedingungen vermutlich noch länger bestehen. In Nordamerika be-

ginnt um 13 000 B.P. der rasche Eisrückzug, der um 11 600 B.P. von dem sog. Valders-Eisvorstoß unterbrochen wird, der in jüngster Zeit weniger mit einer kurzfristigen Abkühlung als vielmehr mit einem plötzlichen Eisausbruch in Verbindung gebracht wird. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob die spätglazialen Gletschervorstöße des nordamerikanischen und nordeuropäischen Inlandeises nicht primär durch wärmere Temperaturen im Gebiet des Nordatlantik und damit einhergehender höherer Niederschlagstätigkeit (= Eiszuwachs) verursacht wurden; als Folge der damit verbundenen größeren Eis-, Packeis- und Schneeflächen darf eine stärkere Abkühlung vermutet werden (z.B. Ältere Dryaszeit). Somit könnten in Europa die Ältere und die Jüngere Dryaszeit als kurzfristige ‚Rückfälle‘ in Klimaverhältnisse angesehen werden, wie sie vielleicht auch in der Zeit zwischen ca. 25 000 und 18 000 B.P. bestanden haben.

(5) Der Zeitabschnitt nach ca. 9 000 B.P.: Im Holozän beginnt in Zentralmexiko um 9 000 B.P. eine schnelle Erwärmung, die zum Abschmelzen der M III-Gletscher und zur Ausbildung der nacheiszeitlichen Vegetationsverhältnisse führt. In Zentralmexiko scheint das Klimaoptimum um 7 000 B.P. erreicht worden zu sein; ab ca. 5 000 B.P. wird es vermutlich trockener.

Zwischen ca. 3 000 und 2 000 B.P. können zwei feuchtere Phasen erkannt werden, die zur M IV-Vergletscherung geführt haben. Diese Zeit ist auch sehr deutlich palynologisch nachzuweisen (Ohngemach & Straka 1978). Während der ‚Kleinen Eiszeit‘ gab es wieder Gletschervorstöße, die bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts die M V-Moränen bildeten. Seit ca. 1 880 A.D. schmelzen die Gletscher zurück, wobei an den höchsten Vulkanen bis zu 4 Rückzugsmoränenwälle gebildet wurden. Die holozänen Gletscherschwankungen verhalten sich nicht synchron zu den Gletscherbewegungen der Colorado Front Range (Benedict 1975; Fig. 2). Da die Gletscher Zentralmexikos im Holozän in erster Linie niederschlagsabhängig reagieren, kann ausgesagt werden, daß Phasen mit geringerer effektiver Feuchtigkeit im Südwesten der USA Phasen mit vermehrter effektiver Feuchtigkeit in Zentralmexiko entsprechen. Diese Feststellung trifft für das Spät- und Postglazial zu, schließt aber die ‚Kleine Eiszeit‘ aus. Hier bestätigt sich die Vermutung Benedicts (1973), daß zwar für die letzten Jahrhunderte eine erstaunliche Synchronität der Gletscherschwankungen weltweit nachzuweisen ist, daß jedoch für die Zeiten vor der ‚Kleinen Eiszeit‘ ein synchrones Gletscherverhalten weltweit nicht auftritt.

5. SCHLUSSBEMERKUNG

Mit Hilfe von ^{14}C -Datierungen, tephrochronologischen Untersuchungen, Paläoboden-Analysen, Pollenprofilen, geomorphologischen Befunden (u.a. Blockgletscher, Blockzungen, Muren), limnischen Ablagerungen und archäologischen sowie vor- und frühgeschichtlichen Zeugnissen lassen sich für die zentralmexikanischen Vulkanlandschaften die jungquartären Gletscherschwankungen recht gut erfassen. Daher wird eine Korrelierung dieser Gletscherschwankungen mit Beobachtungen aus anderen Gebieten (u.a. Nordamerika) möglich. Zusammenfassend können folgende Thesen als wichtigste Erkenntnisse genannt werden:

- (1) Es gibt eine gewisse Synchronität der Gletscherschwankungen während der ‚Kleinen Eiszeit‘ zwischen Mexiko und Nordamerika (Fig. 2).
- (2) Es gibt sowohl für das Holozän als auch für das jüngste Pleistozän keine Synchronität der Gletscherschwankungen zwischen Mexiko und Nordamerika.

- (3) Im Holozän fällt die M IV-Vergletscherung (Fig. 2) einerseits mit Gletschervorstößen des Mt. Rainier und der St. Elias Mountains nahezu zusammen, andererseits mit einer Gletscherrückzugsphase in der Colorado Front Range und in Baffin Island.
- (4) Die M III-Vergletscherung Mexikos korrespondiert mit Gletscherrückzugsphasen in Nordamerikas Gebirgen und Vergletscherungsphasen in Baffin Island.
- (5) Die M II-Vergletscherung Mexikos fällt in eine Zeit des nordamerikanischen Gletscherrückzugs. Die M II-Vergletscherung ist identisch mit dem „12 000 B.P.-Ereignis“ i. S. Bergers (1978).
- (6) Die Befunde zeigen, daß Gletscherschwankungen nicht – wenn sie nicht absolut datiert worden sind – zu Korrelierungen herangezogen werden dürfen.
- (7) Eine paläoklimatische Deutung des sehr differenzierten Gletscherverhaltens in Mexiko und Nordamerika kann nur mit Hilfe nicht-aktualistischer Modelle vorgenommen werden. Im Holozän traten vermutlich geringe Verschiebungen der rezenten Klima- und Landschaftszonen auf. Im frühen Holozän und im Jungquartär sind die Klima- und Landschaftszonen in wesentlichen Merkmalen nicht mit den rezenten vergleichbar.

DANK

Die vorliegenden Ergebnisse basieren auf Forschungen, die ich im Rahmen des Mexiko-Projektes der Deutschen Forschungsgemeinschaft durchführen konnte; der DFG sage ich für großzügige finanzielle Unterstützung auch an dieser Stelle meinen Dank. Zahlreiche ¹⁴C-Datierungen besorgte dankenswerterweise Herr Professor M.A. Geyh (Hannover); ihm danke ich auch für viele anregende Diskussionen.

BIBLIOGRAPHIE

- Beard, J.H. 1973: Pleistocene-Holocene Boundary and Wisconsinan Substages, Gulf of Mexico, – *Geol. Soc. Amer. Memoir* 136: 277–316.
- Benedict, J.B. 1973: Chronology of Cirque Glaciation, Colorado Front Range. – *Quat. Research* 3: 584–599.
- 1975: Prehistoric Man and Climate: The View from Timberline. – *Quaternary Studies*, R.P. Suggate & M.M. Cresswell (Eds.), Royal Soc. New Zealand, Bull. 13: 67–74, Wellington.
- Benson, L.V. 1978: Fluctuation in the Level of Pluvial Lake Lahontan During the Last 40,000 Years. – *Quat. Research* 9: 300–318.
- Berger, W.H. 1978: Oxygen-18 stratigraphy in deep-sea sediments: additional evidence for the deglacial meltwater effect. – *Deep-Sea Research* 25: 473–480.
- Berti, A.A. 1975: Paleobotany of Wisconsinan Interstadials, Eastern Great Lakes Region, North America. – *Quat. Research* 5: 591–619.
- Burrows, C.J. 1979: A chronology for cool-climate episodes in the southern hemisphere 12 000–1 000 Yr B.P. – *Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol.* 27: 287–347.
- Delcourt, P.A., Delcourt, H.R., Brister, R.C. & Lackey, L.E. 1980: Quaternary Vegetation History of the Mississippi Embayment. – *Quat. Research* 13: 111–132.
- Dreimanis, A. 1975: Last Glaciation in Eastern and Central Canada. – *Quaternary Glaciations in the Northern Hemisphere*, V. Sibrava (Ed.), IUGS-Unesco Intern. Geol. Correlation Progr., Proj. 71/1/24: 130–143, Prag.
- 1977: Late Wisconsin Glacial Retreat in the Great Lakes Region, North America. – *Ann. New York Acad. Scienc.* 288: 70–89.

- Emiliani, C., S. Gartner, B. Lidz, K. Eldridge, D.K. Elvey, T.C. Huang, J.J. Stipp & M.F. Swansson 1975: Paleoclimatological analysis of late Quaternary cores from the north-eastern Gulf of Mexico. — *Science* 189: 1083–1088.
- Evenson, E.B., W.R. Farrand, D.F. Eschman, D.M. Mickelson & L.J. Maher 1976: Great-lakean Substage: A Replacement for Valderan Substage in the Lake Michigan Basin. — *Quat. Research* 6: 411–424.
- Grüger, E. 1972: Late Quaternary Vegetation Development in South-Central Illinois. — *Quat. Research* 2: 217–231.
- Hare, F.K. 1976: Late Pleistocene and Holocene Climates: Some Persistent Problems. — *Quat. Research* 6: 507–517.
- Heine, K. 1971: Observaciones morfológicas acerca de las barrancas en la región de la cuenca de Puebla-Tlaxcala. — *Comunicaciones (Mexiko-Projekt der DFG)* 4: 7–24, Puebla.
- 1975: Studien zur jungquartären Glazialmorphologie mexikanischer Vulkane — mit einem Ausblick auf die Klimaentwicklung. — *Das Mexiko-Projekt der DFG VII, Wiesbaden*.
- 1976: Schneegrenzdepressionen, Klimaentwicklung, Bodenerosion und Mensch im zentralmexikanischen Hochland im jüngeren Pleistozän und Holozän. — *Z. Geomorph. N. F.*, Suppl. 24: 160–176.
- 1977: Beobachtungen und Überlegungen zur eiszeitlichen Depression von Schneegrenze und Strukturbodengrenze in den Tropen und Subtropen. — *Erdkunde* 31: 161–178.
- 1978a: Neue Beobachtungen zur Chronostratigraphie der mittelwisconsinzeitlichen Vergletscherungen und Böden mexikanischer Vulkane. — *Eiszeitalter und Gegenwart* 28: 139–147.
- 1978b: Mensch und geomorphodynamische Prozesse in Raum und Zeit im randtropischen Hochbecken von Puebla/Tlaxcala, Mexiko. — 41. Dt. Geogr.-Tag Mainz, Tag.-Ber. und wiss. Abh.: 390–406, Wiesbaden.
- 1980: Quartäre Pluvialzeiten und klimamorphologischer Formenwandel in den Randtropen (Mexiko, Kalahari). — *Arb. Geogr. Inst. Univ. Saarland (Festschrift C. Rathjens)*, 29: 135–155.
- & D. Ohngemach 1976: Die Pleistozän/Holozän-Grenze in Mexiko. — *Münster. Forsch. Geol. Paläont.* 38/39: 225–251.
- Kennet, J.P. & N.J. Shackleton 1975: Laurentide Ice Sheet meltwater recorded in Gulf of Mexico deep-sea cores. — *Science* 188: 147–150.
- King, L. 1980: Postglaziale Gletscherschwankungen auf Ellesmere Island. — *Kolloquium „spät- u. postglaziale Gletscherschwankungen“*, 15.–17.5.1980, Trier.
- Madsen, D.B. & D.R. Currey 1979: Late Quaternary Glacial and Vegetational Changes, Little Cottonwood Canyon Area, Wasatch Mountains, Utah. — *Quat. Research* 12: 254–270.
- Miehlich, G. 1974: Klima- und altersabhängige Bodenentwicklung von Vulkanascheböden der Sierra Nevada de Mexico. — *Mitt. dt. Bodenkdl. Ges.* 18: 360–369.
- Morgan, A.V. & A. Morgan 1979: The Fossil Coleoptera of the Two Creeks Forest Bed, Wisconsin. — *Quat. Research* 12: 226–240.
- Mörner, N.-A. 1976: Paleoclimatic Records from South Scandinavia, Global Correlations, Origin and Cyclicity. — *Paleolimnology of Lake Biwa and the Japanese Pleistocene*, vol. 4: 499–528, Shoji Horie (ed.).
- Niederberger, C. 1979: Early Sedentary Economy in the Basin of Mexico. — *Science* 203: 131–142.
- Ohngemach, D. 1977: Pollen sequence of the Tlaloqua crater (La Malinche volcano, Tlaxcala, Mexico). — *Bol. Soc. botan. Mexico* 36: 33–40.
- & H. Straka 1978: La historia de la vegetación en la región Puebla-Tlaxcala durante el cuaternario tardío. — *Comunicaciones (Mexiko-Projekt der DFG)* 15: 189–204, Puebla.
- Rohdenburg, H. 1971: Einführung in die klimagenetische Geomorphologie. — *Gießen*.
- Ruddiman, W.F., A. McIntyre, V. Niebler-Hunt & J.T. Durazzi 1980: Oceanic Evidence for the Mechanism of Rapid Northern Hemisphere Glaciation. — *Quat. Research* 13: 33–64.
- Saarnisto, M. 1974: The Deglaciation History of the Lake Superior Region and its Climatic Implications. — *Quat. Research* 4: 316–339.
- Schwert, D.P. & A.V. Morgan 1980: Paleoenvironment Implications of a Late Glacial Insect Assemblage from Northwestern New York. — *Quat. Research* 13: 93–110.
- Terasmae, J. & A. Dreimanis 1976: Quaternary Stratigraphy of Southern Ontario. — *Quaternary Stratigraphy of North America*, W.C. Mahaney (ed.): 51–63, Stroudsburg, Penn.
- Van Zant, K. (1979): Late Glacial and Postglacial Pollen and Plant Macrofossils from Lake West Okoboji, Northwestern Iowa. — *Quat. Research* 12: 358–380.
- Vita-Finzi, C. 1977: Quaternary Alluvial Deposits in the Central Plateau of Mexico. — *Geol. Rdsch.* 66: 99–120.

Waddington, J.C.B. & H.E. Wright Jr. 1974: Late Quaternary Vegetational Changes on the East Side of Yellowstone Park, Wyoming. – *Quat. Research* 4: 175–184.

Whitehead, D.R. 1979: Late-Glacial and Post-glacial Vegetational History of the Berkshires, Western Massachusetts. – *Quat. Research* 12: 333–357.