

Auf den Spuren der Eiszeit in Mexiko

I.

Als erster äußerte B. v. COTTA im Jahre 1844 die Vermutung, daß in früheren Zeiten gewaltige Gletscher große Teile des norddeutschen Festlandes bedeckten und dort mitunter bestimmte Ablagerungen hinterlassen haben. In der Folgezeit mehrten sich dann die Beobachtungen über ähnliche Ablagerungen und Formen wie Moränen, Gletscherschliffe, erratische Blöcke etc. TORRELL sprach 1875 auf einem Vortrag in Berlin vor der Deutschen Geologischen Gesellschaft über die Gletscherschliffe von Rüdersdorf (Berlin) und stellte damit als erster die These auf, daß das nordische Inlandeis weit bis nach Mitteleuropa hineingereicht habe. Bald erfuhr die interessierte Welt auch von gewaltigen Eisausdehnungen früherer Zeiten in Nordamerika sowie in vielen Hochgebirgen der Alten und Neuen Welt. Aus Südamerika berichteten bereits im vergangenen Jahrhundert vor allem deutsche Forscher über mächtige Moränen in Audentälern, die auf eine ehemals großartige Talvergletscherung hindeuteten. Diese Eiszeitsspuren glaubte man zeitlich mit den Vergletscherungen der Alpen einerseits, aber auch der Rocky Mountains andererseits gleichstellen zu können.

Doch nicht nur die Spuren größerer Gletscher wiesen auf ein früher anders geartetes Klima hin, weshalb man diesen geologischen Zeithabschnitt ‚Eiszeit‘ oder auch ‚Diluvium‘ (heute: Pleistozän) nannte; in allen Teilen der Welt entdeckten die Forscher Zeugen verschiedener Klimaänderungen. So deuten beispielsweise alte Strandlinien großer Seen (Tschadsee, Gebiet des Great Basins/USA, Titicaca- und Poopo-See etc.) auf vergangene feuchte Zeiten; Dünenmeere, die heute weder weiter aufgebaut noch fortbewegt werden, gibt es südlich der Sahara

wie auch nördlich der Kalahari; in ihnen sieht man eine einst weiter äquatorwärts reichende Wüste. Mit der Verfeinerung der wissenschaftlichen Methoden wurden dann in den letzten fünfzig Jahren aus den verschiedensten Disziplinen Beobachtungen zum Problem ‚eiszeitlicher Klimawandel‘ dargebracht, die sich oft nicht recht miteinander in Beziehung bringen ließen. Erinnert sei nur daran, daß hoch gelegene Strandterrassen des Tschadsees auf feuchtere Klimabedingungen hindeuten, während die fossilen, festgelegten Dünen am gleichen See trockenere Verhältnisse dokumentieren. Dennoch glaubte man, die eiszeitlichen Klimaverhältnisse weltweit zu kennen: Während der Eiszeiten mit gewaltiger Gletscherausdehnung auf der Nordhemisphäre gab es ebenso Vergletscherungen auf der Südhalbkugel, so in Neuseeland und Patagonien/Feuerland. In den Tropen sollten sich die Eiszeiten lediglich durch eine größere Ausdehnung der Hochgebirgsgletscher bemerkbar gemacht haben. In den subtropischen Trockenräumen, wie der Sahara, der Kalahari, großen Teilen Australiens und anderen Gebieten, vermutete man während der Eiszeiten sogenannte ‚Pluvialzeiten‘, d. h. feuchte Phasen. Doch mit diesen Vorstellungen der Klimaveränderungen decken sich viele Befunde nicht. Heute nun scheint es möglich, diese Diskrepanzen zu erklären. Eine wichtige Entdeckung hat dabei wesentlichen Anteil: Im Jahre 1951 konnte LIBBY nachweisen, daß alle organische Substanz zur Zeit ihres Lebens radioaktives ^{14}C anreichert. Nach dem Absterben des Organismus zerfällt das ^{14}C (Halbwertzeit etwa 5570 Jahre) langsam wieder. Durch die Bestimmung des ^{14}C -Gehaltes eines vor unbekannter Zeit abgestorbenen Baumes beispielsweise läßt sich dessen ^{14}C -

Alter errechnen. Da — wie man heute weiß — ein ^{14}C -Jahr nicht einem Kalenderjahr entspricht, sollte man von ^{14}C -Jahren reden. (Die ^{14}C -Zeitskala konnte mit Hilfe dendrochronologischer Untersuchungen, das sind Baumringuntersuchungen zur absoluten Altersbestimmung, schon für viele Jahrtausende geeicht werden.)

Dadurch, daß heute ^{14}C -Daten zu eiszeitlichen Vorgängen aus der ganzen Welt vorliegen (HEINE 1974), läßt sich für die letzten 40 000 bis 50 000 ^{14}C -Jahre, denn nur soweit reicht die ^{14}C -Skala einigermaßen zuverlässig aufgrund der Halbwertzeit zurück, ein Schema der Klimaentwicklung anhand der Eiszeitspuren aufzeigen (Abb. 1). Daraus geht hervor, daß zur Zeit der maximalen Eisausdehnung in den gemäßigten Breiten (ca. 20 000 bis 14 500 ^{14}C -Jahre vor heute) kalte und trockene Phasen in den heutigen subtropischen Trockengebieten herrschten, daß dort aber gegen Ende der Eiszeit vor ca. 13 000 bis 9000 ^{14}C -Jahren mehrere kräftige Klimaschwankungen sowohl thermischer als auch hygrischer Art zu verzeichnen sind. Die weltweiten eiszeitlichen Temperaturabsenkungen, die überall auf der Erde zur gleichen Zeit auftraten (die Niederschlagsverhältnisse waren dagegen weltweit von dem Eiszeitklima unterschiedlich beeinflußt), erzeugten in den Tropen-

gebirgen ausgedehnte Vergletscherungen, als auch in den gemäßigten Breiten das Eis am weitesten vorgedrungen war. In den subtropischen Gebirgen jedoch fallen die Zeiten der maximalen Vergletscherungen mit den Zeiten der höchsten Niederschläge in diesen strahlungsreichen Gebieten zusammen, d. h. hier erstreckten sich größere Gletscher talwärts, als bei uns in Europa das Eis bereits wieder abzuschmelzen begann. Doch woher weiß man das alles so genau? Anhand eigener Untersuchungen in Mexiko, in einem Gebiet also, das heute im Bereich des nordhemisphärischen Trockengürtels liegt und nur im Sommer von der tropischen Zirkulation mit den entsprechenden Niederschlägen beeinflußt wird, soll darauf näher eingegangen werden.

II.

Der deutsche Geograph FRITZ JAEGER suchte vor über fünfzig Jahren als erster nach eiszeitlichen Spuren in Mexiko. Er fand sie in Form von Moränen und vom Eis abgeschliffenen Felsen (Rundhöckern) am Vulkan Iztaccíhuatl im zentralmexikanischen Hochland. Der Iztaccíhuatl überragt zusammen mit dem Popocatépetl das Hochtal von Mexiko im Osten (vgl. Abb. 2). Beide Vulkane tragen auch heute noch verschiedene kleine Gletscherfelder. HELMUT DE TERRA, der 1949 durch den Fund des Menschen von Tepexpan bei Mexiko-Stadt (der Tepexpan-Mensch wurde lange Zeit als „erster Mexikaner“ angesehen) bekannt wurde, versuchte, die Glazialspuren des Iztaccíhuatl mit verschiedenen fossilen höheren Seespiegelständen des Texcoco-Sees, der früher weite Teile des Beckens von Mexiko eingenommen hat, zu verbinden. 1962 unternimmt der Amerikaner S. E. WHITE den Versuch, die in unterschiedlicher Höhe an der Iztaccíhuatl gelegenen Moränen zeitlich zu bestimmen und mit den Vergletscherungsphasen der nordamerikanischen Rocky Mountains zu parallelisieren. Seine Datierungen der Moränen beruhen auf geologischen, morphologischen und pedologischen Kriterien, d. h. sie sind relativer Art; ^{14}C -Datierungen zieht WHITE nicht hinzu. Alle drei genannten Autoren gehen von der Annahme aus, daß die Hauptvergletscherung der Iztaccíhuatl zeitlich mit den großen Vergletscherungen der nördlichen Hemisphäre zusammenfällt.

Abb. 1. Schematische Korrelierung von „Glazialzeiten“ und „Pluvialzeiten“ in verschiedenen Klimazonen der Erde. Die Darstellung ist teilweise stark hypothetisch.

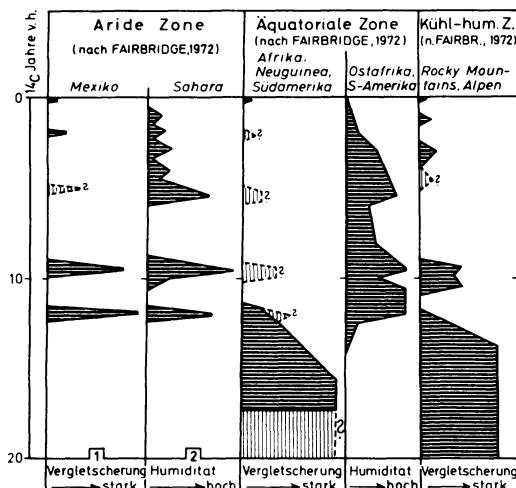
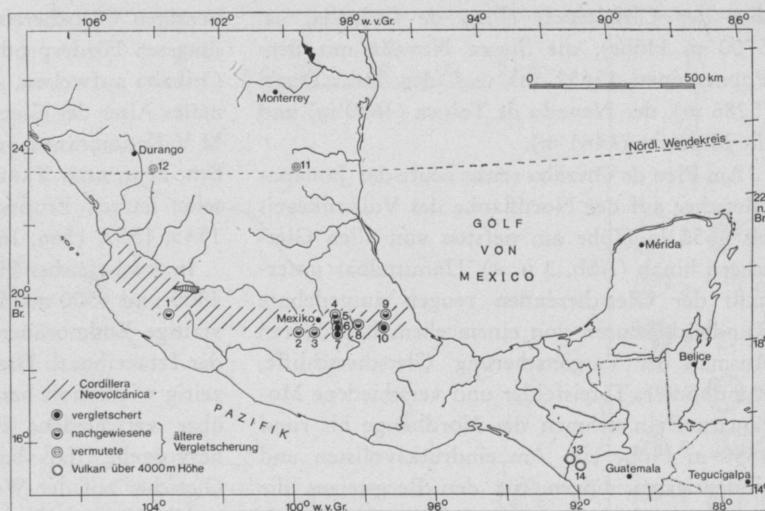


Abb. 2. Übersichtskarte der höchsten Berge Mexikos mit glazialen und periglazialen Erscheinungen. Es bedeuten: 1 = Nevado de Colima (4180 m), 2 = Nevado de Toluca (4690 m), 3 = Ajusco (3952 m), 4 = Tlaloc (4160 m), 5 = Telapón (4200 m), 6 = Iztaccíhuatl (5286 m), 7 = Popocatépetl (5452 m), 8 = Malinche (4461 m), 9 = Cofre de Perote (4282 m), 10 = Pico de Orizaba (Citlaltépetl, 5700 m), 11 = Cerro Peña Nevada (4056 m), 12 = Bergland von Durango (bis 3559 m), 13 = Tacaná (4064 m), 14 = Tajumulco (4210 m).



sphäre zusammenfielen, d. h. daß auch in Mexiko während des Maximums der Eiszeit die Gebirge am stärksten vergletschert waren. Diese Annahme zu überprüfen, hatte sich der Verfasser u. a. während mehrerer Mexiko-Aufenthalte zur Aufgabe gestellt¹⁾.

¹⁾ Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen des Mexiko-Projektes der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Der Verfasser dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die großzügige finanzielle Unterstützung, die die Forschungen ermöglichte. Herrn Professor Dr. M. A. GEYH (Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, ^{14}C -Labor) sei herzlichst für die Durchführung der ^{14}C -Bestimmungen gedankt.

III.

Über die Vulkanlandschaften Mexikos hat WEYL (1974) in dieser Zeitschrift berichtet. Die höchsten Vulkane, von denen man annehmen darf, daß sie früher vergletschert waren, krönen die Sierra Neovolcánica, ein aus vorwiegend vulkanischen Gebirgen aufgebauter Höhenzug, der das mexikanische Hochland nach Süden gegen die Balsas-Senke abgrenzt. Die höchsten Vulkane der Sierra Neovolcánica wurden eingehender nach Eiszeitspuren untersucht; es sind



Abb. 3. Die Zunge des Jampa-Gletschers. 1 = Gletschereis, 2 = Rundhöcker, 3 = Toteis unter Schuttmantel, 4 = M V-Ufermoräne, 5 = Zelt.

dies der Citlaltépetl (Pico de Orizaba, ca. 5700 m Höhe), die Sierra Nevada mit dem Popocatépetl (5452 m) und der Iztaccíhuatl (5286 m), der Nevado de Toluca (4690 m) und die Malinche (4461 m).

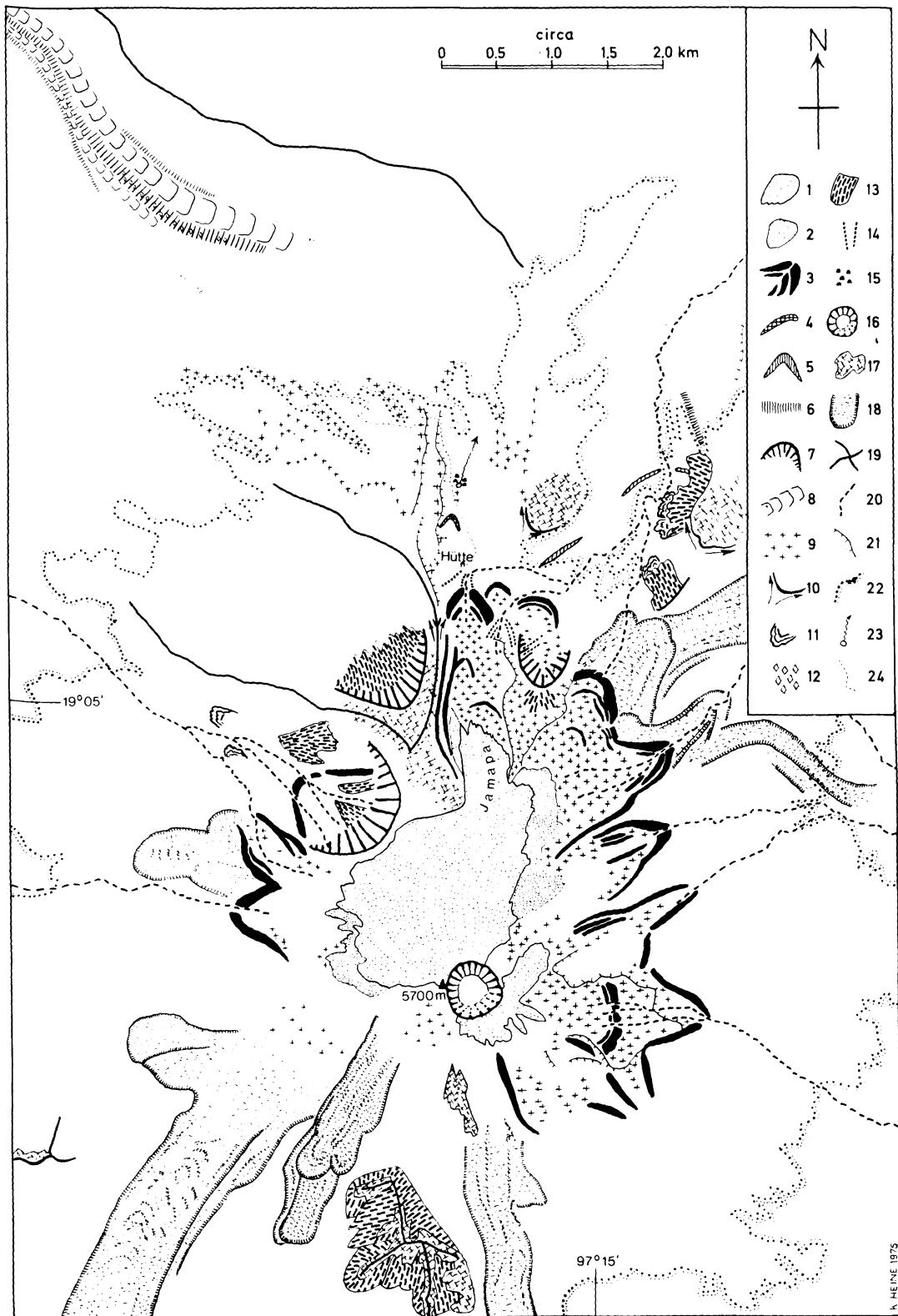
Am Pico de Orizaba reicht heute der Jamapa-Gletscher auf der Nordflanke des Vulkankegels bis 4650 m Höhe am tiefsten von allen Gletschern hinab (Abb. 3 u. 4). Unmittelbar unterhalb der Gletscherenden zeugen ausgedehnte Rundhöckerfluren von einem ehemals größeren Ausmaß der Vergletscherung. Gletscherschliffe, Rundhöcker, Toteisfelder und verschiedene Moränenstaffeln nehmen die Nordhänge bis rund 4450 m Höhe ein. Am eindrucksvollsten und eindeutigsten mögen für den Bergsteiger die Rundhöckerfelder belegen, daß das Gletschereis mit seiner abschürfenden Wirkung erst unlängst dieses Gebiet freigegeben hat. Aber auch die Toteismassen, die an verschiedenen Stellen unter einer Schuttdeckung unterhalb der Eiszungen, aber auch seitlich der Gletscher an den Bergflanken bis zu 200 m oberhalb des heutigen Gletschereises aufgefunden werden konnten, belegen wesentlich mächtigere Gletscher in der jüngsten Vergangenheit. Nicht zuletzt sind es die Moränenwälle, deren blockreiches Material weder verwittert noch von einer geschlossenen Vegetation bedeckt ist — nur Flechten und Moose haben sich bisher auf dem Gestein anzusiedeln vermocht —, die durch ihre frischen, nur wenig von den Abtragungsvorgängen beeinflußten Formen auf ein junges Alter schließen lassen. Oberhalb der Hauptendmoränenwälle, die weit über 100 m relative Höhe erreichen können, konnten bis zu drei Rückzugsmoränen aufgefunden werden, die ein etappenweises Rückschmelzen der Gletscher am Citlaltépetl bekunden. Berücksichtigt man, daß alle Formen zwischen den M V-Hauptendmoränen²⁾ und dem

heutigen Gletschereis keine Bedeckung mit den jüngsten Förderprodukten des Vulkans Pico de Orizaba aufweisen, so kann man auf ein maximales Alter der Gletscherausdehnung bis zu den M V-Endmoränen von rund 300 Jahren schließen, denn nach YARZA (1971) hatte der Vulkan seine letzten Eruptionen in den Jahren 1537, 1545, 1559, 1566, 1613 und 1687.

In etwa gleicher Höhenlage, nämlich zwischen 4300 und 4500 m Höhe, befinden sich auch gewaltige Endmoränenkränze am Vulkangebirge der Iztaccíhuatl. Dieser Berg wurde schon frühzeitig wiederholt bestiegen, und wir finden darüber verschiedene Beschreibungen, aus denen hervorgeht, daß beispielsweise der Ayoloco-Gletscher auf der Westflanke noch um 1880 bis an die Hauptendmoräne in rund 4300 m Höhe heranreichte (FARRINGTON 1897; Abb. 5). Ähnlich tief hinunter erstreckte sich der Popocatépetl-Gletscher im Ventorillo-Tal auf der Nordseite noch zu Beginn dieses Jahrhunderts (WHITE 1954). Die vier Rückzugsmoränen des Ayoloco-Gletschers müssen demnach erst nach 1890 gebildet worden sein; das geht auch aus den Beschreibungen von FARRINGTON (1897), FRÜH (1898), JAEGER (1926), DE TERRA (1949) und WHITE (1962) hervor. Die gerade erwähnten Moränen der Iztaccíhuatl stimmen hinsichtlich der absoluten Höhenlage, der morphologischen Ausbildung (Größe, Jugendlichkeit der Formen), des Verwitterungsgrades des Materials, des Moos- und Flechtenbewuchses, der Staffelung in Hauptendmoräne und verschiedene Rückzugsmoränen so gut mit den M V-Moränen des Pico de Orizaba überein, daß man beide Moränengruppen als unter gleichen Bedingungen entstanden, d. h. hier aber gleichzeitig entstanden, ansehen darf. Die Hauptendmoränen (M V) wurden demnach im vergangenen Jahrhundert bis etwa 1890 gebildet. Diese Beobachtung paßt gut mit unseren Vorstellungen über Gletscherschwankungen im vergangenen Jahrhundert zusammen, daß nämlich um 1850 bis

²⁾ Die verschiedenen Bezeichnungen der Moränen (= Stratigraphie) sind aus den Abb. 4 und 8 zu entnehmen.

Abb. 4. Glazialmorphologische Skizze des Citlaltépetl (Pico de Orizaba). Es bedeuten: 1 = rezente Gletscher, 2 = Toteis unter Schutt, 3 = M V-Moränen, 4 = M IV-Moränen, 5 = M III 3-Moränen, 6 = M III 2- und M III 1-Moränen, 7 = Kar, 8 = glaziales Trogtal, 9 = Rundhöcker, 10 = bei Maximalvergletscherung eisfreie Bergsporne, 11 = subrezente Blockgletscher, 12 = geschrämte Blöcke auf Moränen, 13 = Schutthalden, 14 = rinnenförmige Schutt-Rutschungsbahnen, 15 = Auffrier-Hügel (Thufur), 16 = Krater, 17 = steile Felswände, 18 = holozäner Lavastrom, 19 = Grat, 20 = 'Tiefenlinie' (Tal, Barranca), 21 = Geländekante, 22 = obere Waldgrenze ca. 4000 m Höhe), 23 = Quelle mit Bach, 24 = Weg.



1890 weltweit bedeutende Endmoränen unterhalb der heutigen Gebirgsgräber gebildet wurden sind.

Doch kehren wir zum Pico de Orizaba zurück. Auch unterhalb der Moränen aus dem vergangenen Jahrhundert stieß ich auf glaziale Spuren. Auffällig sind zu Rundhöckern abgeschliffene vulkanische Gesteinspartien, mächtige Talungen mit U-förmigem Querschnitt, wie man sie nur aus ehemals vergletscherten Gebieten kennt, und kilometerlange Ufer- und Mittelmoränenwälle (Abb. 6). Den Glazialmorphologen verwundert es sehr, daß diese markanten Formen, die eine früher wesentlich ausgedehntere Vergletscherung des Vulkans Citlaltépetl bezeugen, nicht bereits von den Besuchern dieses Bergmassivs entsprechend gedeutet worden sind. Ganz im Gegenteil, bis heute sind weder die Rundhöcker noch die Moränenwälle unterhalb der M V-Moränen eingehender beschrieben und gedeutet worden (vgl. HEINE 1975), und noch

1958 wird in einer Zusammenstellung der rezenten Gletscher der Nordhalbkugel der Pico de Orizaba als gletscherfrei erwähnt (Geographic Study of Mountain Glaciation).

IV.

Doch allein die Feststellung einer einst größeren Vergletscherung des Pico de Orizaba kann und darf den Eiszeitforscher nicht befriedigen. Ebenso wichtig ist die genaue Datierung der Vergletscherungsspuren und damit die Ermittlung der Zeit der gewaltigen Gletscherbildungen. Doch das ist in der Regel ein schwieriges Unterfangen. An den Vulkanen Mexikos jedoch, die fast ausnahmslos während der jüngeren geologischen Vergangenheit tätig waren oder doch zumindest aus vielen kleinen Parasitärkratern Bimse, Aschen, Glutwolken und/oder Lava förderten, läßt sich mit Hilfe tephrochronologischer Arbeitsweisen eine Datierung der glazialen Ablagerungen vornehmen. Unter Tephro-

Abb. 5. Luftbild der Iztaccíhuatl von Südwesten. In der Bildmitte der Ayoloco-Gletscher und — weit unterhalb der Gletscherzung — die M V-Hauptendmoränen aus dem vergangenen Jahrhundert. Links im Bild der Ayolotepeito-Gletscher, der ebenfalls von den M V-End- und Ufermoränen des 19. Jahrhunderts weit zurückgeschmolzen ist. Der Malinche-Vulkan ist jenseits des Beckens von Puebla rechts oben im Bild erkennbar, links dahinter — am Horizont — der Cofre de Perote.



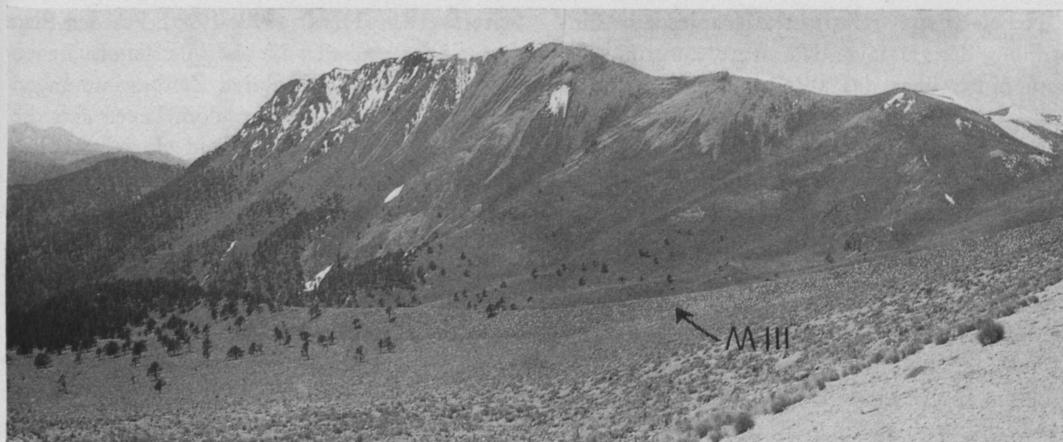


Abb. 6. M III-Ufermoränen am Osthang des Nevado de Toluca.



Abb. 7. Aufschluß an der Fahrstraße zum Krater des Nevado de Toluca. Moränenmaterial (M III) wird von vulkanischen Aschen und Bimslagen bedeckt. Der Moränenschutt ist nur geringfügig verwittert; der darauf liegende untere Tephra-Komplex wird durch eine Erosionsdiskordanz (E) vom oberen Tephra-Komplex getrennt. Die Tephra-Horizonte sind nur stellenweise leicht verwittert. Ein mächtiger schwarzer Andosol-Boden schließt das Profil im Hangenden ab.

chronologie wird die chronologische (zeitliche) Einordnung bestimmter Ablagerungen und Schichten mit Hilfe vulkanisch geförderter Lockerprodukte (Tephra) verstanden. Die vulkanischen Lockerprodukte können, wenn sie während kurz aufeinanderfolgender Eruptionen ein möglichst großes Gebiet bedeckten, heute in der Sedimentabfolge als stratigraphische Leithorizonte benutzt werden. So kann es beispielsweise geschehen, daß ein Gletschervorstoß das Eis über vulkanische Bimslagen schiebt, so daß nach dem Gletscherrückgang Moränenmaterial über eben diesen Bimsen zu liegen kommt. Außerdem kann das Moränenmaterial hernach von erneuten, jüngeren Tephraschichten bedeckt werden (Abb. 7). Unter günstigen Umständen können so verschiedene alte Moränen jeweils von

Tephra unter- und überlagert werden (Abb. 8). Gelingt es nun, die Horizonte der vulkanischen Lockersedimente genau in verschiedenen Profilen, in denen Moränenmaterial aufgeschlossen ist, zu identifizieren, so läßt sich unter Umständen die Ausdehnung bestimmter glazialer Ablagerungen im Bereich eines Vulkans rekonstruieren; damit erhält man gleichzeitig ein Bild der früheren Ausdehnung der Gletscher, und zwar — wenn es sich um mehrere Vergletscherungsphasen handelte — auch der einzelnen Phasen. Das ist ohne die Möglichkeit der Anwendung tephrochronologischer Arbeitsweisen oft nur äußerst schwer oder gar nicht möglich, wie viele Untersuchungen aus ehemals vergletscherten Gebieten zeigen, in denen ein entsprechend alter Vulkanismus fehlt.

Neben dieser relativ-stratigraphischen Einordnung der glazialen Sedimente, aufgrund der noch nichts über das absolute Alter derselben ausgesagt werden kann, ermöglichen aber auch oft die in die Profile eingeschalteten Lagen vulkanischer Sedimente eine genaue zeitliche Bestimmung, dann nämlich, wenn in den Tephra-schichten organisches Material eingelagert wurde. Das ist zum Beispiel der Fall, wenn Bäume bei der Sedimentation in die Tephra gelangen, möglicherweise infolge der Hitzeeinwirkung verkohlen, und dadurch in Form von Holzkohle erhalten geblieben sind. Wenn man Holzkohle aus bestimmten Horizonten gewinnen kann, so lässt sich diese mittels ^{14}C -Altersbestimmungen datieren, sofern die Holzkohle nicht ein Alter von über rund 50 000 ^{14}C -Jahren hat.

In Mexiko konnten bisher unter Anwendung tephrochronologischer Arbeitsweisen in Verbindung mit glazialmorphologischen, geologischen und paläopedologischen Befunden Stratigraphien zur jungquartären Vergletscherung des Malinche-Vulkans (Abb. 8) und der Sierra Nevada (Popocatépetl und Iztaccíhuatl) erar-

beitet werden (HEINE 1973, 1975). Für den Pico de Orizaba und den Nevado de Toluca liegen bisher noch keine absoluten Zeitbestimmungen der Vergletscherungen vor, doch lassen sich die verschiedenen Moränen anhand glazialmorphologischer, geologischer und paläopedologischer Beobachtungen den verschiedenen Vergletscherungen zuordnen.

Werden die Ergebnisse zusammenfassend betrachtet, so lassen sich bisher fünf verschiedene Vergletscherungszeiten im Jungquartär aufzeigen. Die bisher ältesten nachgewiesenen Moränen wurden vor rund 34 000 bis 32 000 ^{14}C -Jahren gebildet, die nächstjüngeren Moränen haben ein Alter von ca. 12 000 ^{14}C -Jahren vor heute, das dritte Stadium, das zwei kurz aufeinanderfolgende Gletschervorstöße und ein Rückzugsstadium erkennen lässt, wird auf rund 10 000 bis 9 000 ^{14}C -Jahre vor heute datiert, das vierte Stadium auf ca. 2 000 ^{14}C -Jahre vor heute. Zum letzten Mal rückten die Gletscher während der sog. „Kleinen Eiszeit“ (1620 bis 1890 A. D.) vor und bildeten in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts die ge-

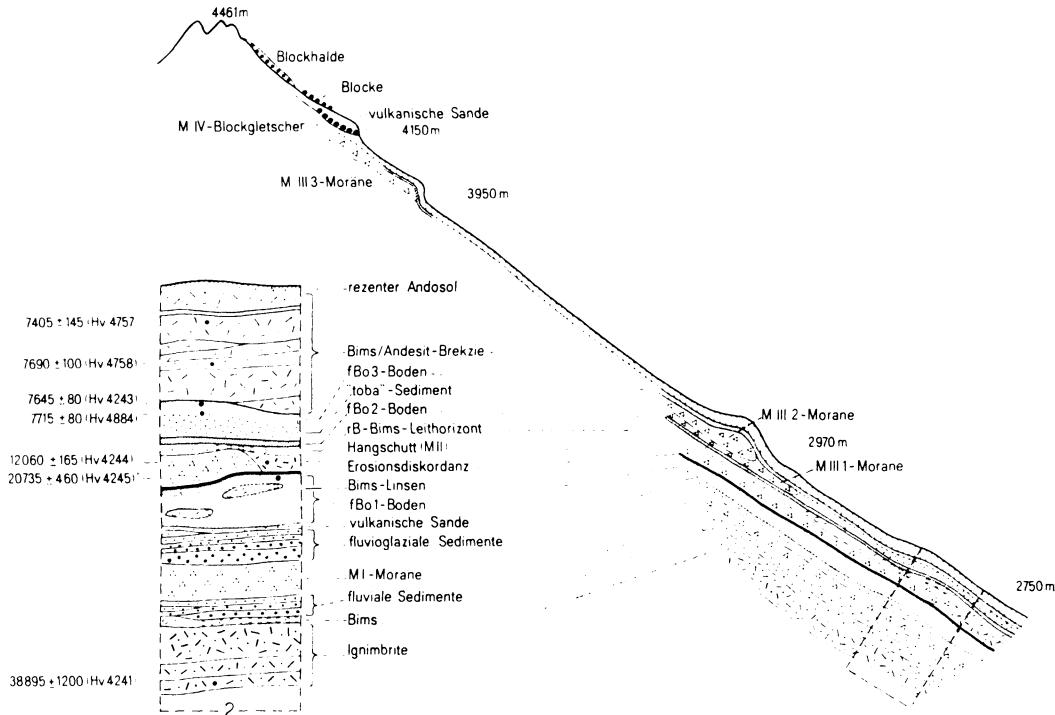


Abb. 8. Schematische Darstellung der Moränen-Stratigraphie am Malinche-Vulkan. Die mit * gekennzeichneten ^{14}C -Daten stammen vom Westhang des Vulkans.

waltigen M V-Endmoränen und seitdem bis zu vier Rückzugsmoränen an den drei höchsten Vulkanen aus. Neuere Untersuchungen, die der Verfasser im Frühjahr 1975 ausführen konnte, lassen vermuten, daß möglicherweise die M III 3-Rückzugsmoränen von einem kleinen Gletschervorstoß im Holozän erst nach 9000 ^{14}C -Jahren vor heute gebildet wurden. Doch die Arbeiten hierüber sind noch nicht abgeschlossen. Ebenso wenig sind bisher absolute Datierungen von den Vulkanen Nevada de Toluca und Citlaltépetl verfügbar, doch zeigen die Geländebeobachtungen, daß auch dort alle Vergletscherungsphasen ausgebildet sind, die am Malinche-Vulkan und in der Sierra Nevada gefunden wurden.

V.

Geomorphologische Befunde können klimatisch ausgedeutet werden; eine Rekonstruktion des Klimaablaufs während des jüngeren Eiszeitalters läßt sich so vornehmen. Dabei sollten Temperaturgang und Niederschlagskurve getrennt voneinander berücksichtigt werden, denn beide Klimaelemente haben sich — wenn man sie im weltweiten Vergleich betrachtet — unabhängig voneinander verhalten, was auch aus Abb. 1 hervorgeht. Der Temperaturgang war zwar auf der Erde während der hier betrachteten Zeit ± gleich hinsichtlich seiner Tendenz, d. h. eine Phase der Abkühlung trat überall ± gleichzeitig auf. Die Niederschläge hingegen hatten regional zu unterschiedlichen Zeiten unterschiedliche Verteilungen, d. h. zur gleichen Zeit konnte es in einem Gebiet trockener werden, während in einem anderen eine Zunahme der Niederschläge verzeichnet wurde; dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß die Effektivität der Niederschläge von unterschiedlichen Bedingungen abhängig sein kann. Beispielsweise setzen geringere Temperaturen die Verdunstung herab, was zur Bildung größerer Seen führen kann; der gleiche Effekt wird aber auch allein durch vermehrte Niederschläge bewirkt. Im Einzelfall ist daher genau zu prüfen, welche paläoklimatischen Folgerungen aus bestimmten Geländebeobachtungen abgeleitet werden können. Dabei helfen nicht selten die Ergebnisse anderer Disziplinen weiter. Für das Tehuacán-Tal des mexikanischen Hochlandes konnten MACNEISH (1967) und seine Mitarbeiter aufzeigen, daß dort die

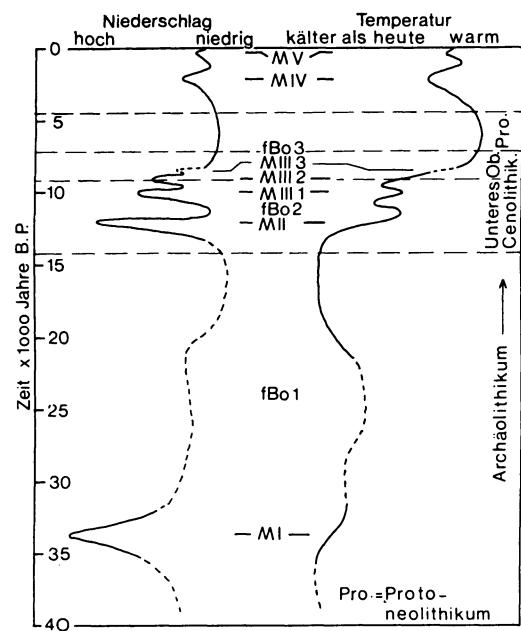


Abb. 9. Klimaentwicklung (Niederschlag und Temperatur) während der letzten 40 000 Jahre in Mexiko, ermittelt aufgrund morphologischer Befunde. Die Unterteilung der Steinzeit erfolgt nach LORENZO (1967). Im Oberen Cenolithikum beginnt der Mensch im Tal von Tehuacán mit dem Anbau von Kulturpflanzen.

eiszeitlichen, an Kälte und Trockenheit angepaßten Tiere und Pflanzen ab ca. 9000 ^{14}C -Jahren vor heute von einer nacheiszeitlichen Fauna und Flora abgelöst wurden. Hier stimmen die paläontologischen Ergebnisse also recht gut mit den glazialmorphologischen überein, denn nach Abschluß der M III-Vergletscherung um 9000 ^{14}C -Jahre vor heute muß aufgrund der morphologischen Befunde mit dem Beginn der Nacheiszeit gerechnet werden. OHNGEMACH — um ein weiteres Beispiel zu nennen — konnte in Pollendiagrammen die Grenze Pleistozän/Holozän ebenfalls auf die Zeit um 8500 ^{14}C -Jahre vor heute einengen (HEINE & OHNGEMACH 1976). Noch vor 9000 ^{14}C -Jahren vor heute lag die obere Waldgrenze um ca. 1000 m tiefer bei damals etwa 3000 m Höhe; wird diese Tatsache paläoklimatisch gedeutet, so darf man eine Temperaturerniedrigung von ca. 5°C vor nur 9000 ^{14}C -Jahren für Zentralmexiko annehmen. Vielleicht sollte in diesem Zusammenhang auch erwähnt werden, daß der Übergang

von der Jäger- und Sammlerkultur zu einer Ackerbau betreibenden Bevölkerung für das mexikanische Hochland kurz nach 9000 ^{14}C -Jahren vor heute angesetzt wird (LORENZO 1967); daß die gewaltigen Klimaänderungen der Eiszeiten und besonders der ausgehenden letzten Eiszeit für die Entwicklung der Menschheit von besonderer Bedeutung gewesen sind, scheint auch in Mexiko Bestätigung zu finden.

Die Klimaentwicklung (Temperatur und Niederschlag), wie sie für das zentralmexikanische Hochland rekonstruiert worden ist, zeigt Abb. 9. Daraus geht klar hervor, daß zwar den kalten Zeitabschnitten der letzten Eiszeit Europas und Nordamerikas auch in Mexiko kalte Temperaturen entsprechen (vgl. KLAUS 1973), daß aber stärkere Niederschläge (Pluvialzeiten), die für eine Vergletscherung unbedingt in dem strahlungsreichen Hochlandsklima erforderlich sind, erst während verschiedener kurzer Perioden am Ende der Eiszeit auftraten (sieht man einmal von der M I-Vergletscherung ab, die übrigens auch sehr wahrscheinlich am Ende einer kälteren Phase auftrat). Die eiszeitlichen Gletscher Mexikos und der gemäßigten Breiten (Europa, Nordamerika) haben also ein unterschiedliches Alter. Pluviale Verhältnisse, wie man sie noch heute wiederholt für die subtropischen Trockengürtel während des Maximums der letzten Eiszeit annimmt (z. B. bei der Diskussion um die weltweite pleistozäne Schneegrenzdepression), gab es dort erst gegen Ende der letzten Eiszeit, in Mexiko gleichermaßen wie in der Sahara (GEYH & JÄKEL 1974). Wir müssen uns also mit dem Gedanken vertraut machen, daß die Klimaänderungen während der Eiszeiten und in der Nacheiszeit in einem raum-zeitlich weit komplizierteren Ablauf erfolgten, als man bisher oft vermutete.

Schriften: COTTA, B. v. 1844: Polierte Felsen bei Wurzen. - N. Jb. Mineral., **1844**: 685, Stuttgart. — DE TERRA, H. 1949: Early man in Mexico. - Tepexpan man, Viking Fund Pub. Anthropol., **11**: 13-86, New York. — FAIRBRIDGE, R. W. 1972: Climatology of a Glacial Cycle. - Quaternary Research, **2**: 283-302, New York. — FARRINGTON, O. C. 1897: Observations on Popocatepetl and Iztaccihuatl. - Field Columbian Museum Pub. **18**, (1): 71-120, Chicago. — FRÜH, J. 1898: Neue Reisen in die Schneeregion des Popocatepetl und Iztaccihuatl. - Globus, **LXXXIII** (4): 1-5, Braunschweig. — Geographic Study of Mountain Glaciation in the Northern Hemisphere. Part 3: United States, Mexico and Northern Andes. - Dept. of Exploration and Field Research, Amer. Geogr. Soc., New York, Febr. **1958**: 3.1a.1-3.4.14, New York. — GEYH, M. A. & JÄKEL, D. 1974: Spätpleistozäne und holozäne Klimageschichte der Sahara aufgrund zugänglicher ^{14}C -Daten. - Z. Geomorph. N. F., **18**: 82-98, Berlin - Stuttgart. — HEINE, K. 1973: Zur Glazialmorphologie und präkeramischen Archäologie des mexikanischen Hochlandes während des Spätglazials (Wisconsin) und Holozäns. - Erdkde., **XXVII**: 161-180, Bonn. — HEINE, K. 1974: Bemerkungen zu neueren chronostratigraphischen Daten zum Verhältnis glaziale und pluviale Klimabedingungen. - Erdkde., **XXVIII**: 303-312, Bonn. — HEINE, K. 1975: Studien zur jungquartären Glazialmorphologie mexikanischer Vulkane, mit einem Ausblick auf die Klimaentwicklung. - Das Mexiko-Projekt der DFG, **VII**: 1-178, (Steiner) Wiesbaden. — HEINE, K. & OHNGEMACH, D. 1976: Die Pleistozän/Holozän-Grenze in Mexiko. - Münster. Forsch. Geol. Paläont., Münster (im Druck). — JAEGER, F. 1926: Forschungen über das diluviale Klima in Mexiko. - Pet. Mitt. Erg. H. **190**: 1-64, Gotha. — KLAUS, D. 1973: Die eiszeitlichen und nacheiszeitlichen Klimaschwankungen im zentralmexikanischen Hochland und ihre Ursachen. - Erdkde., **XXVII**: 180-192, Bonn. — LIBBY, W. F. 1951: Radiocarbon dating. - 1-175, Chicago & London. — LORENZO, J. L. 1967: La etapa lítica en México. - INAH, Dept. Prehistoria, **20**: 1-49, Mexiko. — MACNEISH, R. S. (Hrsg.) 1967: The Prehistory of the Tehuacan Valley. Vol. 1: Environment and Subsistence: 1-331, Austin & London. — WEYL, R. 1974: Vulkanismus und Vulkanlandschaft im Hochland von Mexiko. - Natur u. Museum, **104**: 137-152, Frankfurt a. M. — WHITE, S. E. 1954: The firn field on the volcano Popocatépetl, Mexico. - J. Glaciology, **2**: 389-393, Cambridge. — WHITE, S. E. 1962: Late Pleistocene Glacial Sequence for the West Side of Iztaccihuatl, Mexico. - Geol. Soc. Amer. Bull., **73**: 935-958, Washington. — YARZA DE LA TORRE, E. 1971: Volcanes de México: 1-237, (Aguilar) Mexiko.

Verfasser: Prof. Dr. KLAUS HEINE, Geographisches Institut der Universität, Franziskanerstraße 2, 5300 Bonn.