

ZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN WETTERLAGENHÄUFIGKEIT UND NIEDERSCHLAGSVERTEILUNG IM ZENTRALMEXIKANISCHEN HOCHLAND

dargestellt am Beispiel des Hochbeckens von Puebla\*)

Mit 6 Abbildungen, 1 Tabelle und 1 Beilage (II)

DIETER KLAUS

*Summary:* The linkages between frequency of weather situation and precipitation distribution in the central Mexican highland: the example of the Puebla high basin

High altitude weather maps (500 and 700 mb level), which exist for Mexico, the southern portion of the USA and the Gulf zone, were used to determine typical stream line structures and the frequency of their occurrence over the year for the Puebla high basin. These were correlated with the frequency of occurrence of precipitation of more than 0.1 mm on less than 25%, 25% to 65% and more than 65% respectively of the surface of the Puebla high basin. In addition, zones within the study area favoured by precipitation because of a particular type of circulation were determined and the basis of their dependence on weather and relief outlined. It could be shown that, in genetically identical precipitation areas, the annual sequence of monthly precipitation amounts was very similar for all observation stations and that the months with maximal precipitation amounts coincide with the months of maximum frequency of the type of circulation influencing the precipitation areas.

1. Aufgabenstellung

Die orographische Gestaltung Mexikos, die Größe des Landes und die geringe Dichte des vorhandenen Klimastationsnetzes erschweren eine eindeutige Klimaklassifikation des Landes erheblich. Es kann deshalb nicht erstaunen, daß immer neue Versuche (1, 2, 3) unternommen werden, mit Hilfe statistisch-beschreibender Methoden der wichtigsten Klimaelemente und ihrer zeitlichen und örtlichen Veränderung eine genaue Abgrenzung der Klimazonen zu erreichen. Die jüngsten Versuche MOSINOS (4), der unter Berücksichtigung der zeitlichen Andauer der kleinen sommerlichen Trockenzeit eine neue interessante Klimagliederung Mexikos gegeben hat, zeigen, daß auf der Basis effektiver Klimaeinteilungen noch nicht die für

Mexiko optimalen Klassifikationsprinzipien gefunden sind.

In dieser Abhandlung wird der Versuch unternommen, für das Hochbecken von Puebla (Abb. 1) die Klimaelemente nicht nur einer statistischen Schwellenwertbehandlung zu unterziehen, sondern sie gleichzeitig als Auswirkungen in bestimmter Häufigkeit und regionaler Verteilung auftretender Wetterlagen zu



Abb. 1: Die Lage des Untersuchungsgebietes zum Golf von Mexiko  
The position of the study area with respect to the Gulf of Mexico

\*) Diese Arbeit ist Teil von Untersuchungen über die klimatische Struktur des Hochbeckens von Puebla, die im Rahmen des Mexiko-Projektes der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter Leitung von Prof. W. Lauer im Geographischen Institut der Universität Bonn durchgeführt werden. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei herzlich für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeiten gedankt.

deuten (5). Es soll dabei insbesondere festgestellt werden, ob sich zwischen der regionalen Verteilung bestimmter Niederschlagsgebiete und der Auftrittshäufigkeit typischer Wetterlagen eine ursächliche Beziehung herleiten läßt und inwieweit diese ursächliche Beziehung orographisch bedingt ist.

## 2. Das ausgewertete Datenmaterial

Diese, für die moderne Klimatologie charakteristische Zielsetzung (6), erfordert zunächst eine Klassifikation der für den mexikanischen Raum typischen Wetterlagen. Da mehr als 60% des mexikanischen Staatsgebietes in Meereshöhen über 1000 m liegen, verlieren die Bodenwetterkarten, die bereits seit mehr als 50 Jahren für Mexiko täglich erstellt werden, an Bedeutung. Durch die Druckreduktion auf Meeresebene und die Vernachlässigung dynamischer Effekte (7, 8) bei der Reduktion des Druckes, werden die ohnehin in tropischen Gebieten geringen synoptischen Druckschwankungen so verfälscht, daß die Analyse der Bodenwetterkarten nur wenig brauchbare Ergebnisse liefert.

Unter diesen Umständen kommen den seit 1951 von der „Radio Aeronautica Mexicana S. A.“ herausgegebenen täglichen Höhenwetterkarten (0.00 und 12.00 GMT) der Hauptisobarenflächen besondere Bedeutung zu. Für die Jahre 1967, 1968 und 1969 wurden diese Höhenwetterkarten analysiert und nach Wetterlagentypen klassifiziert. Wie bei allen Versuchen dieser Art war es bei der Klassifikation unmöglich, alle meteorologischen Parameter an einem vorgegebenen Tag zu berücksichtigen. Dem Vorbild bereits publizierter Arbeiten (9, 10) für die Subtropen folgend, wurden für das 700-, 500- und 200-mb-Niveau alle ähnlich strukturierten Stromlinienanordnungen als ein Typ verstanden, wenn sie ähnliche Wirkungen im mexikanischen Hochland implizierten. Als Klimaindikator (11) zur Bestimmung der Auswirkungen, insbesondere in der Untersuchungszone Puebla-Tlaxcala, wurde die Niederschlagsmenge gewählt, da diese durch eine enge, gesetzmäßige Verknüpfung mit weiteren Klimaelementen wie etwa der Niederschlagshäufigkeit, der Bevölkerung, der Luftfeuchtigkeit und der Reinheit der Luft ausgezeichnet ist. (12).

## 3. Auftrittshäufigkeit der Wetterlagentypen

Einige typische Stromlinienstrukturen sind in Abbildung 2 und 3 dargestellt worden. Aus dem Verlauf der Stromlinien lassen sich zwei Regimegruppen ableiten:

- a) Westwindregime, verbunden mit Stromlinien aus vorwiegend westlichen Richtungen
- b) Tropisches Ostwindregime, verbunden mit Stromlinien aus vorwiegend östlichen Richtungen.

Die Auftrittshäufigkeitsauszählung der klassifizierten Zirkulationstypen gibt einen Überblick über die auftretenden Veränderungen im Jahresablauf.

Das Westwindregime ist kennzeichnend für die Wintermonate von Oktober bis April, das tropische Ostwindregime für die Sommermonate von Mai bis September. Eine gleiche Häufigkeitsstatistik wurde für

das 700-mb-Niveau angelegt. Die hier nicht angegebenen Auftrittshäufigkeiten zeigen, daß das Westwindregime in den Wintermonaten bis in das Niveau des mexikanischen Hochplateaus wirksam wird. Der Übergang von dem polaren zu dem tropischen Regime vollzieht sich in den Monaten April und Mai und kündigt sich durch das Auftreten des Zirkulationstyps  $T_1$  an. Dieser Zirkulationstyp ist durch tropische Ostwinde im südlichen Mexiko und durch Westwinde im Norden des Landes gekennzeichnet. Von April bis Juni vergrößert sich die Einflußzone der tropischen Ostwinde von Süden nach Norden vom Boden ausgehend bis in größte Höhen mehr und mehr. Die Westwinde werden dabei zunächst in Bodennähe nach Norden abgedrängt, dann setzt sich allmählich auch in größeren Höhen der tropische Ostwind durch. Im Mai sind über der Meseta noch häufig im 500-mb-Niveau P-Typen anzutreffen, während im 700-mb-Niveau bereits das tropische Ostwindregime bestimmend ist. Im Juni reicht das Ostwindregime bereits bis in größte Höhen (vgl. Abb. 4). Im September und Oktober erfolgt der Übergang vom Ost- zum Westwindregime, der ebenfalls durch das gehäufte Auftreten des Übergangstyps  $T_1$  deutlich nachweisbar wird.

Ein Vergleich der Lage des Zentrums der antizyklonalen Strömung, die in allen Abbildungen über dem Golf bzw. dem karibischen Raum auftritt, mit den Auftrittshäufigkeiten der zugehörigen Zirkulationstypen, läßt die Nord-Südwanderung dieser Antizyklone im Jahresablauf deutlich hervortreten (Abb. 5) (13).

Durch die winterlichen P-Typen werden verschiedene Phasen eines „Indexzyklus“ der polaren Westströmung repräsentiert. Mit den „Low-Index-Lagen“ (P-Typen) sind Kaltlufteinbrüche in den mexikanischen Raum verbunden.

Die Regenzeit dauert im Bereich der mexikanischen Meseta von Mai bis Oktober. In diesen Monaten herrschen die mit tropischen Ostströmungen verbundenen  $H_2$ ,  $T_1$  und W-Typen im Süden des Landes vor. Den Abbildungen 3a bis 3e kann entnommen werden, daß die Wellenstörungen in der tropischen Ostströmung, die in Verbindung mit den sommerlichen W-Typen auftreten, in einer direkten Beziehung zu den Trögen in der polaren Westströmung stehen. Sie werden in der tropischen Ostströmung als Reflexion der polaren Tröge induziert und vergrößern, wenn sie auf dem gleichen Meridian mit einem polaren Trog liegen, stark ihre Intensität. Oft werden sie in diesen Positionen zeitweilig stationär. Bei der Fortpflanzung der Wellenstörungen in der West- bzw. der tropischen Ostströmung, dreht sich die Trogachse des ausgedehnten Troges im antizyklonalen Sinne (14). Demnach geben die bevorzugten Lagen polarer Tröge über dem nordamerikanischen Raum zugleich Aufschluß über die Gebiete erhöhter Aktivität der Wellenstörungen in der tropischen Ostströmung und deren mögliche Fortpflanzungsrichtung. Bei der Analyse der Wetterkarten

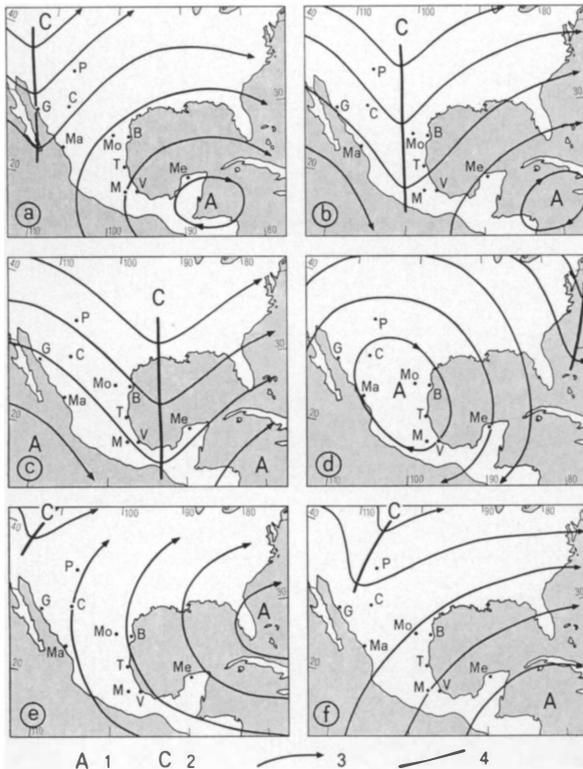


Abb. 2: Typische Stromlinienstrukturen für Mexiko im 500-mb-Niveau / Typical stream line structures for Mexico at the 500 mb level

- (a) Antizyklonale Südwestströmung (Typ P<sub>1/1</sub>)
- (b) Polarer Höhentrog überlagert die mexikanische Meseta (Typ P<sub>1</sub>)
- (c) Die Rückseite eines polaren Höhentroges überlagert die mexikanische Meseta (Typ P<sub>1/2</sub>)
- (d) Antizyklonale Nordost- oder Nordströmung (Typ H<sub>1</sub>)
- (e) Antizyklonale Südost- oder Ostströmung (Typ H<sub>2</sub>)
- (f) Antizyklonale Südwest- oder Südströmung (Typ H<sub>3</sub>)

1 Antizyklonale Strömung; 2 zyklonale Strömung;  
3 Stromlinie; 4 Trogachse

Radiosondenstationen:

Radio sonde station: M = Mexico, Me = Merida, V = Veracruz, Ma = Mazatlán, T = Tampico, Mo = Monterrey, C = Chihuahua, G = Guaymas, P = El Paso, B = Brownsville

- (a) anticyclonic south west flow (Type P<sub>1/1</sub>)
- (b) polar high level trough overlying the Mexican meseta (Type P<sub>1</sub>)
- (c) the rear of a polar high level trough overlying the Mexican meseta (Type P<sub>1/2</sub>)
- (d) anticyclonic north east or north flow (Type H<sub>1</sub>)
- (e) aticyclonic south east or east flow (Type H<sub>2</sub>)
- (f) anticyclonic south west or south flow (Type H<sub>3</sub>)

1 anticyclonic flow; 2 cyclonic flow; 3 stream line;  
4 trough axis

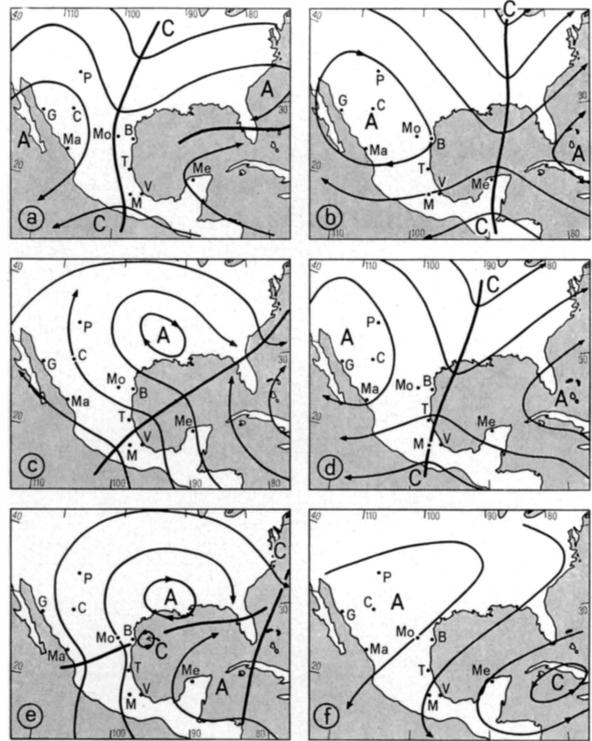


Abb. 3: Typische Stromlinienstrukturen für Mexiko im 500-mb-Niveau / Typical stream line structures for Mexico at the 500 mb level

- (a) Ausgedehnter Höhentrog überlagert die Meseta (Typ T<sub>1</sub>)
- (b) Wellenstörung in der tropischen Ostströmung. Die Meseta liegt im Bereich der divergenten Trogvorderseite dieser Störung (Typ W<sub>1</sub>)
- (c) Die zonal orientierte Trogachse einer Wellenstörung in der tropischen Ostströmung überlagert die Meseta (Typ W<sub>3</sub>)
- (d) Die meridional orientierte Trogachse einer Wellenstörung in der tropischen Ostströmung überlagert die Meseta (Typ W<sub>4/1</sub>)
- (e) Die zentrale Meseta liegt im Bereich der Trogrückseite einer zonal orientierten Wellenstörung in der tropischen Ostströmung (Typ W<sub>4/2</sub>)
- (f) Eine zyklonale Südwestströmung überlagert die Meseta im 200-mb-Niveau (Typ A)

- (a) extended trough overlying the meseta
- (b) wave disturbance in the tropical easterly flow. The meseta lies in the area of the divergent through front side of this disturbance (Type W<sub>1</sub>)
- (c) the zonally oriented trough axis of a wave disturbance in the tropical easterly flow overlying the meseta (Type W<sub>3</sub>)
- (d) the meridionally oriented trough axis of a wave disturbance in the tropical easterly flow overlying the meseta (Type W<sub>4/1</sub>)
- (e) the central meseta lies under the influence of the rear of the trough of a zonally oriented wave disturbance in the tropical easterly flow ((Type W<sub>4/2</sub>)
- (f) a cyclonic south west flow overlying the meseta at the 200 mb level (Type A)

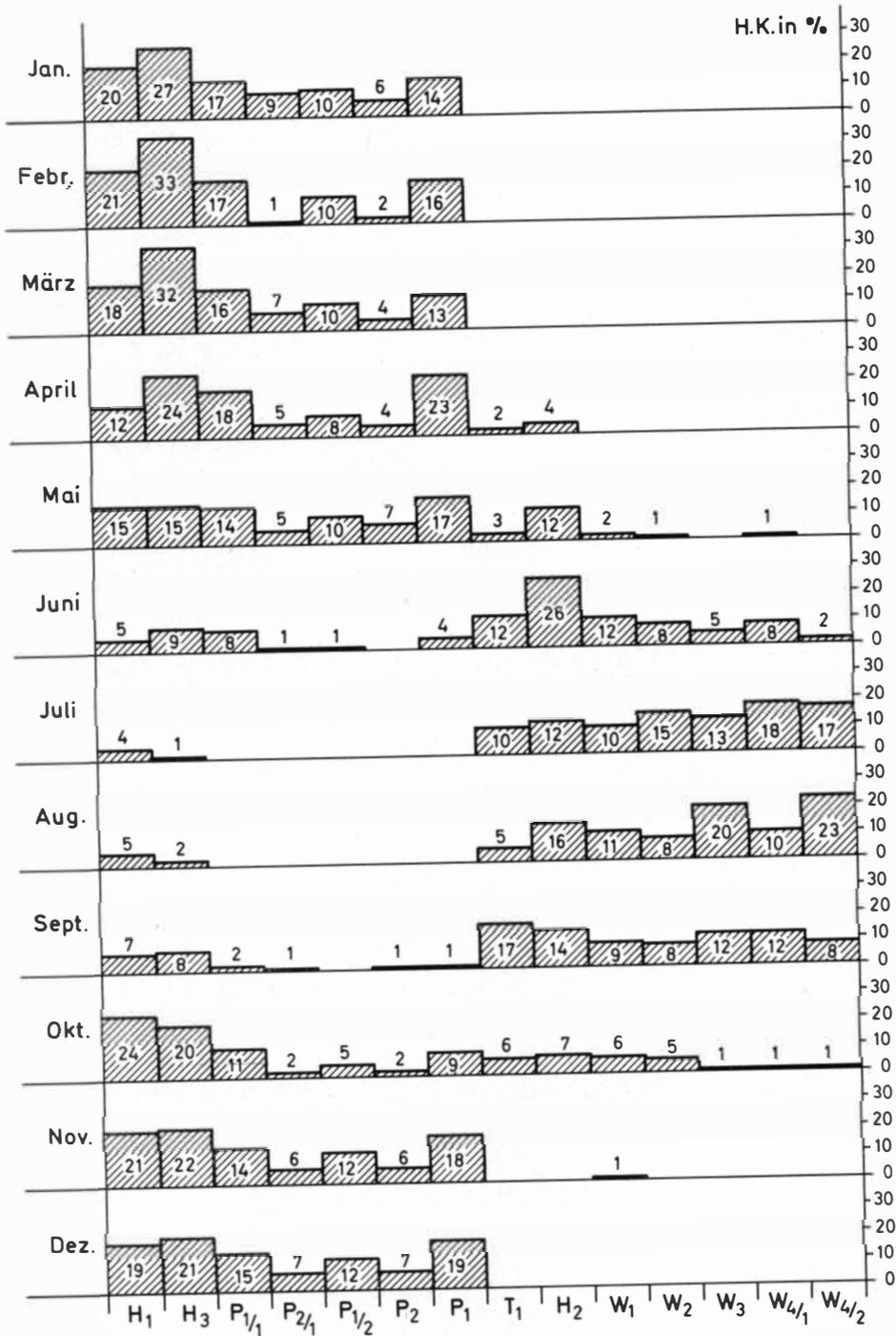


Abb. 4: Prozentuale monatliche Auftrittshäufigkeit der klassifizierten Stromlinienstrukturen für das 500-mb-Niveau (1967-1969). Für jeden Tag in den angegebenen Jahren wurden zwei Höhenwetterkarten (0.00 und 12.00 GMT) typisiert und ausgezählt. Die Zahlen geben die prozentuale Auftrittshäufigkeit der einzelnen Typen im jeweiligen Monat an. Die Gesamthäufigkeit ist in jedem Monat gleich 100% gesetzt worden.  
 Percentage monthly frequency of occurrence of the classified stream line structures for the 500 mb level (1967-1969). Two high level weather maps (0.00 and 12.00 GMT) were classified and counted for every day in the years cited. The figures give the percentage frequency of occurrence of the individual types in the respective months. The total frequency in any particular month is always equal to 100%.

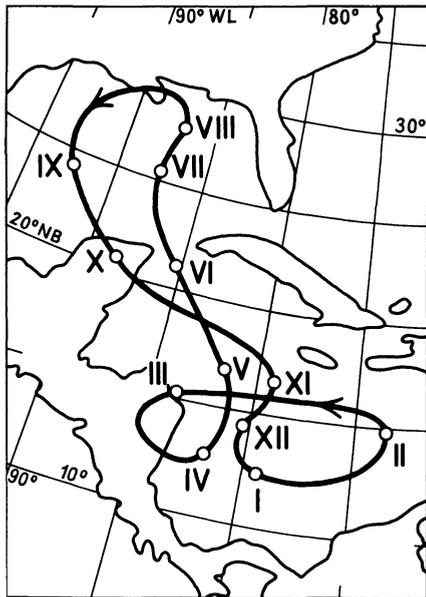


Abb. 5: Monatliche Verlagerung der Antizyklone über dem karibischen Raum nach den Monatsmittelkarten der absoluten Topographien der 500-mb-Flächen (nach INGRID JACOBS, 1958)  
Die römischen Ziffern zeigen die mittleren Monatspositionen der Antizyklone an  
Monthly displacement of the anticyclone over the Caribbean area on the basis of monthly mean maps of the absolute topography of the 500 mb surfaces (after INGRID JACOBS 1958). The Roman numerals show the mean monthly position of the anticyclone

des mexikanischen Raumes sind aus diesen Gründen die Zirkulationsverhältnisse höherer Breiten zu berücksichtigen.

#### 4. Die Auswirkungen der verschiedenen Zirkulationstypen im Hochbecken von Puebla

Die unterschiedlichen Auswirkungen der klassifizierten Zirkulationstypen lassen sich besonders instruktiv in orographisch stark ausgeformten Gebieten der Meseta nachweisen. Eine orographisch interessante Ausgestaltung, die die Ausbildung lokaler Zirkulationen begünstigt, ist im Becken von Puebla gegeben. Gleichzeitig liegen für diesen Raum die Niederschlagsdaten von 22 Niederschlagsmeßstellen vor.

Das Hochbecken von Puebla liegt im Südosten der Meseta Central (Abb. 1). Der Hochlandblock steigt in diesem Teil zu größten Höhen auf. Puebla ( $98^{\circ}17'$  w. L.  $19^{\circ}02'$  n. B.), die Hauptstadt des Staates Puebla, liegt im Zentrum der Untersuchungszone, die eine Größe von etwa  $100 \times 100$  km hat. Im Westen wird das Untersuchungsgebiet von den Vulkanen Tlaloc, Iztaccihuatl und Popocatepetl, im Norden vom Bloque de Tlaxcala und den Cerros de Terrenate, im Osten von der Malinche und den Cerros Pinal und Piñon,

im Süden durch die Ketten der Cerros de Atlixco, der Cordillera Tentzo und den Cerros de Tochtepec eingeschlossen (Beilage II). Das allgemeine Gefälle des Gebietes erfolgt von Norden nach Süden, wobei der Höhenunterschied zwischen den höchsten Teilen des Bloques de Tlaxcala (2600 m) und den Talebenen südlich von Atlixco (1500 m) mehr als 1000 m auf 100 km beträgt. Diesem Gefälle folgen die beiden Hauptflüsse der Zone Puebla-Tlaxcala, der Atoyac und die Nexapa.

Entsprechend dem starken nord-südorientierten Gefälle bilden sich von der dem Becken im Süden vorgelagerten Rio Balsas-Senke ausgehend tageszeitlich wechselnde Ausgleichswinde (15) zwischen der hochgelegenen Beckenlandschaft und der vorgelagerten Ebene (Abb. 1) aus. In den Tagesstunden erreichen diese Südwinde bei hoher Sonneneinstrahlung große Heftigkeit, vor Sonnenuntergang schwächen sie sich allmählich ab und treten Nachts als Nordwinde erneut in Erscheinung (16). Die Häufigkeit der Bodenwinde aus südlicher Richtung beträgt in Puebla in der Trockenzeit etwa 70%, in der Regenzeit knapp 50%.

Zur quantitativen Bestimmung der mit den klassifizierten Zirkulationsstrukturen verbundenen Wettererscheinungen wurde folgende Festlegung getroffen (17):

- „Schöner Tag“: Auf 25% und weniger der Fläche des Untersuchungsraumes fallen Niederschläge über 0,1 mm Höhe
- „Schauertag“: Auf 25% bis 65% der Fläche des Untersuchungsraumes fallen Niederschläge über 0,1 mm Höhe
- „Regentag“: Auf mehr als 65% der Fläche des Untersuchungsraumes fallen Niederschläge über 0,1 mm Höhe.

Die Auftrittshäufigkeit des so definierten täglichen Wettergeschehens wurde für den Beobachtungszeitraum bestimmt und in Abbildung 6 aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Auftrittshäufigkeiten der Zirkulationstypen so dargestellt, daß die Auftrittshäufigkeit für alle Typen in jedem Monat 100% beträgt.

Deutlich spiegeln die Verteilungskurven den Jahresgang der Niederschläge wider. Die Häufigkeit „schöner Tage“ ist im Juni, Juli, August und September minimal. In den gleichen Monaten treten, wenn auch noch im Ablauf der Monate stark differenziert, die „Schauer- und Regentage“ in großer Häufigkeit auf.

Zur Korrelation der Auftrittshäufigkeiten der Zirkulationstypen mit der Auftrittshäufigkeit „schöner Tage“ im Untersuchungsraum sind die Wetterlagen in ihrer monatlichen Häufigkeit zusammengefaßt worden, die nach dem Verlauf ihrer Stromlinien Niederschläge im Bereich des Beckens von Puebla ausschließen. Für die Typen  $H_1$ ,  $H_3$ ,  $P_{1/1}$  und  $P_{2/1}$  (der nicht dargestellte Typ  $P_{2/1}$  unterscheidet sich von Typ  $P_{1/1}$  nur durch eine NO-SW-Orientierung der Trogachse)

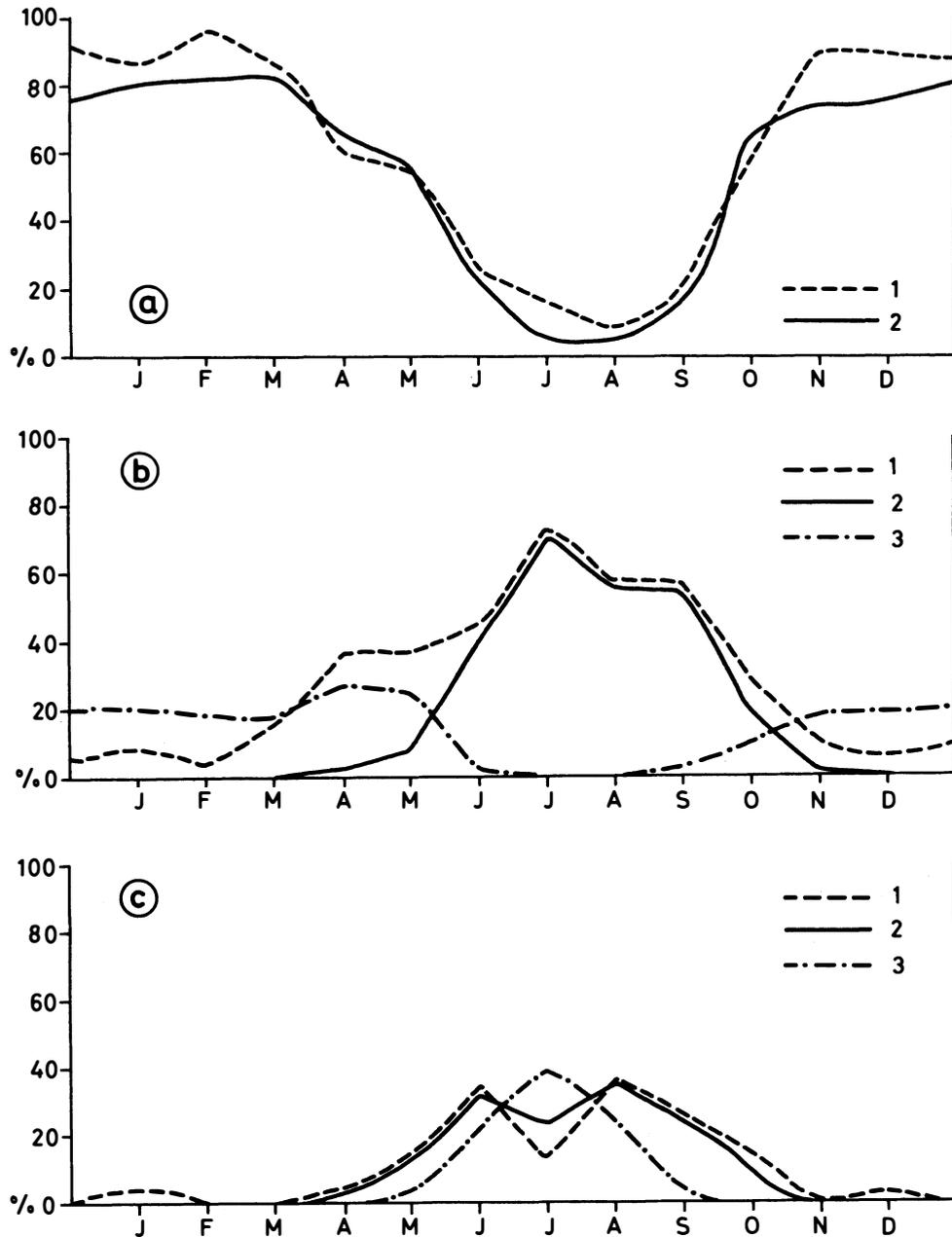


Abb. 6: Beziehungen zwischen den Höhenzirkulationen und der flächenmäßigen Verbreitung von Niederschlägen im Untersuchungsgebiet

- a: 1 Prozentuale Auftrittshäufigkeit „schöner Tage“: auf weniger als 25% der Fläche des Untersuchungsgebietes fallen Niederschlagsmengen über 0.1 mm Höhe  
 2 Prozentuale Auftrittshäufigkeit der antizyklonalen Höhenzirkulationen im 500-mb-Niveau ( $H_1 + H_3 + P_{1/1} + P_{2/1} + P_{1/2}$ )
- b: 1 Prozentuale Auftrittshäufigkeit der „Schauertage“: auf mehr als 25% jedoch weniger als 65% der Fläche des Untersuchungsgebietes fallen Niederschlagsmengen über 0.1 mm Höhe  
 2 Prozentuale Auftrittshäufigkeit aller im Bereich des Untersuchungsgebietes mit vorwiegend zyklonalen Strömungen verbundenen Höhenzirkulationen im 500-mb-Niveau ( $T_1 + W_{4/1} + W_1 + W_2 + W_{4/2}$ )  
 3 Prozentuale Auftrittshäufigkeit der polaren Höhenröge ( $P_1 + P_2$ )
- c: 1 Prozentuale Auftrittshäufigkeit der „Regentage“: auf mehr als 65% der Fläche des Untersuchungsgebietes fallen Niederschlagsmengen über 0.1 mm Höhe

läßt sich die niederschlagsgenetische Wirkungslosigkeit aus der antizyklonalen Stromlinienkrümmung und der damit verbundenen Abnahme der relativen „Vorticity“ (Wirbelgröße) sowie aus der im Mittel auftretenden antizyklonalen Windscherung unmittelbar erkennen (Abb. 2). Bei Zirkulationstyp  $P_{1/2}$  liegt der Untersuchungsraum im Bereich der mit absteigenden Luftbewegungen verbundenen Trogrückseite und bleibt ebenfalls vorwiegend ohne Niederschlag.

Die Superposition der Häufigkeitsverteilungen dieser Zirkulationstypen ergibt die in Abbildung 6a ausgezogene eingezeichnete Verteilung, die recht genau der Verteilungskurve „schöner Tage“ folgt. Nur im Juli und in den Wintermonaten treten zum Teil bedeutende Abweichungen auf, die jedoch die Phasengleichheit beider Kurven nicht beeinträchtigen.

Schwieriger erscheint die Bestimmung der Zirkulationstypen, die bevorzugt Schauertätigkeit im Untersuchungsraum verursachen, während aus dem Stromlinienverlauf des Zirkulationstyps  $W_3$  unmittelbar abgelesen werden kann, daß diese Wellenstörung mit Sicherheit Niederschläge überregionalen Charakters impliziert. Die nahezu meridionale Ausrichtung der Trogachse bei den meisten Wellenstörungen in der tropischen Ostströmung impliziert Niederschläge östlich und im Bereich der Trogachse (18). Bei zonaler Trogachsenorientierung ist infolge der intensiven Zunahme des Coriolisparameters und der gleichzeitigen Zunahme der relativen Vorticity das Gebiet überwiegender Konvergenz nach dem „theorem of conservation of potential vorticity“ vor und im Bereich der Trogachse sehr intensiv ausgebildet. Weitflächig auftretende Niederschläge sind die Folge.

Anders liegen die Verhältnisse beim Auftreten des Zirkulationstyps  $H_2$ . Die rein antizyklonal gekrümmten Stromlinien bedingen eine Abnahme der relativen Vorticity, die nicht unbedingt durch die Zunahme des Coriolisparameters, infolge der Süd-Nordwanderung der Luftteilchen in dieser Strömung, überkompensiert wird. Dieser im Mittel „nondivergenten“ Strömung

wird bei der Überwindung der Sierra Madre Oriental eine vertikale Wellenstruktur aufgezwungen. Nimmt man an, daß die tropischen Ostwinde als gleichförmige Strömung mit einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 15–20 km/h auftreten, so wird die maximale vertikale Ausscherrung der Luftteilchen zwischen dem 700- und 500-mb-Niveau etwas 200 km leewärts der Sierra Madre Oriental auftreten (19). In dieser Entfernung von der Sierra Madre Oriental liegt der Untersuchungsraum.

Die durch Strömungstyp  $H_2$  in die Untersuchungszone transportierten Luftmassen zeichnen sich durch bedingte Labilität aus. Der vertikalen Stromlinienführung entsprechend, kommt es in den orographisch induzierten Wellenbergen über der Untersuchungszone bevorzugt zur Kondensation, wobei Feuchtlabilität eintritt.

In Abbildung 6c läßt sich eine äußerst gute Korrelation zwischen der Häufigkeitsverteilung der „Regentage“ und der Superposition der Häufigkeitsverteilungen der Zirkulationstypen  $H_2$  und  $W_3$  erkennen. Die Abweichung der Julihäufigkeiten beider Verteilungen voneinander steht mit der Auftrittshäufigkeit des 200-mb-Zirkulationstyps A (Abb. 2f) in Beziehung. Diese Zirkulation ist durch eine starke Zunahme zyklonaler Vorticity ausgezeichnet, welche eine Dämpfung der in der mittleren Troposphäre eingeleiteten aufstrebenden Vertikalbewegungen impliziert (20). Tritt der Typ  $W_3$  in Verbindung mit dem 200-mb-Typ A auf, so fallen Niederschläge nur in Bereichen extremer orographischer Niederschlagsbegünstigung. Nach der gegebenen Definition des Witterungscharakters nimmt also die Anzahl der „Schauertage“ und „schönen Tage“ zu, die der „Regentage“ ab. Damit ist die oben genannte Juliabweichung (Abb. 6a) zwischen den Häufigkeitsverteilungen der „schönen Tage“ und der Typen  $H_1 + H_3$  erklärt.

Die verbleibenden Zirkulationstypen  $T_1$ ,  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_{4/1}$  und  $W_{4/2}$  stehen bei Superposition ihrer Häufigkeiten in einer sehr engen Korrelation zur Verteilung

2 Prozentuale Auftrittshäufigkeit der im Bereich des Untersuchungsgebietes niederschlagsgenetisch besonders wirksamen Höhenzirkulationen im 500-mb-Niveau ( $W_3 + H_2$ )

3 Prozentuale Auftrittshäufigkeit der zyklonalen sommerlichen Höhenströmung im 200-mb-Niveau (Typ A)

Relationships between high level circulation and the surface distribution of precipitation in the study area

a: 1 percentage frequency of occurrences of 'fine days': precipitation of more than 0.1 mm on less than 25% of the study area

2 percentage frequency of occurrence of anticyclonic high level circulation types at the 500 mb level ( $H_1$  plus  $H_3$  plus  $P_{1/1}$  plus  $P_{2/1}$  plus  $P_{1/2}$ )

b: 1 percentage frequency of occurrence of 'showery days': precipitation levels of more than 0.1 mm on more than 25% but less than 65% of the study area.

2 percentage frequency of occurrence of all the high level circulation types at the 500 mb level in the study area, linked to dominating cyclonic flows ( $T_1$  plus  $W_{4/1}$  plus  $W_1$  plus  $W_2$  plus  $W_{4/2}$ )

c: 1 percentage frequency of occurrence of 'rainy days': precipitation levels of more than 0.1 mm on more than 65% of the study area.

2 percentage frequency of occurrence of the high level circulation at the 500 mb level particularly effective in generating precipitation in the study area.

3 percentage frequency of occurrence of the cyclonic summer high level flows at the 200 mb level (Type A)

der „Schauertage“ in den Monaten Juni bis September. Berücksichtigt man die dynamischen Effekte, die in der Scherungszone des Typs  $T_1$  sowie im Bereich und östlich der Trogachse bei den W-Typen oft eng begrenzte Konvergenzen bedingen, so läßt sich die im Untersuchungsraum verbreitete Neigung zu lokal begrenzten Niederschlägen auf diese oft nur schwach ausgebildeten Konvergenzen zurückführen.

Die im Winterhalbjahr auftretenden „Schauer- und Regentage“ sind vorwiegend an das Auftreten des Zirkulationstyps  $P_1$  und  $P_2$  gebunden (Typ  $P_2$  hebt sich von Typ  $P_1$  durch eine Trogachsenorientierung in nordwest-südöstlicher Richtung ab). Beim Auftreten dieser Höhenströmungen liegt die Untersuchungszone im Bereich der Trogachse bzw. der Trogvorderseite, die durch starke, aufsteigende Vertikalbewegungen ausgezeichnet sind. Das Ausmaß der niederschlagsgenetischen Wirksamkeit dieser Polartröglagen hängt vom Feuchtegehalt der Luftmassen, dem vertikalen Temperaturgradienten, von der speziellen Lage der Trogachse zum Untersuchungsraum und insbesondere vom Verhalten des überlagerten Jetstreams ab. In Verbindung mit den Typen  $P_1$  und  $P_2$  können demnach alle definierten täglichen Wetterabläufe auftreten. Insgesamt kann man jedoch beim Vergleich der Verteilungen für die Wintermonate (Abb. 6a, 6b und 6c) erkennen, daß die Wahrscheinlichkeit von „Regentagen“ sehr gering ist. Die schlechte Approximation der Verteilungskurven in Abbildung 6a kann unter Berücksichtigung der anteilmäßig auch beim Auftreten der Typen  $P_1$  und  $P_2$  möglichen „schönen Tage“ erklärt werden.

##### 5. Niederschlagsbegünstigte Gebiete in der Untersuchungszone

Neben diese Überlegungen zur zeitlichen Änderung des Witterungscharakters und der Erklärung der Änderungsursachen muß eine Gliederung des Raumes in Regionen gleicher Wetterlagenauswirkungen treten. Zu dieser regionalen Gliederung bietet sich die Niederschlagsmenge als Klimaindikator aus den oben genannten Gründen an.

Nach der Klimaeinteilung von A. PENCK haben etwa 35% der Untersuchungszone (nördlicher Teil) semihumides Klima, während die restlichen 65% des Gebietes durch Niederschlagsmengen, die geringer als die Verdunstung sind, (semiarid) gekennzeichnet werden. Die positive Abweichung der Niederschlagsmenge vom Gebietsmittelwert erhält unter diesen Umständen eine entscheidende agrarökonomische Bedeutung für die Landbevölkerung. Um die mit dem Auftreten der klassifizierten Wetterlagen verbundene Niederschlagsbegünstigung von Teilzonen des Untersuchungsraumes festzustellen, wurden alle täglichen Niederschlagsmengen (1967–1969) für alle Stationen nach den für den jeweiligen Beobachtungstag klassifizierten Wetterlagen geordnet. Für die gesamte Beobachtungsperiode wurde

dann für jede Wetterlage aus den Werten aller 22 Stationen ein Gebietsmittelwert gebildet. Die positive Abweichung der mittleren, einem Zirkulationstyp zugeordneten Niederschlagsmenge von diesem Gebietsmittelwert wurde als Niederschlagsbegünstigung verstanden. Für die Zirkulationstypen  $H_2$ ,  $T_1$ ,  $W_3$ ,  $W_{4/1}$  sind die niederschlagsbegünstigten Gebiete in die Beilage eingezeichnet. Für die Typen  $W_1$ ,  $W_2$  und  $W_{4/2}$  ließen sich keine zusammenhängenden niederschlagsbegünstigten Gebiete festlegen (Schauertage). Die für diese Zirkulationstypen bestimmten Einzelgebiete koinzidieren weitgehend mit den in der Beilage dargestellten Regionen, die beim Auftreten der Typen  $H_2$ ,  $T_1$ ,  $W_3$  und  $W_{4/1}$  niederschlagsbegünstigt sind.

In Verbindung mit dem Auftreten des Zirkulationstyps  $H_2$  ist ein Gebiet südlich der Malinche und ein weiteres im Raume Tlaxcala niederschlagsbegünstigt. Neben die durch orographisch ausgelöste Vertikallen für den gesamten Untersuchungsraum herausgestellte Niederschlagsgenese tritt in diesen beiden Gebieten ein weiterer Effekt: Zwischen den täglichen Ausgleichswinden mit südlicher Richtungskomponente und den aus östlichen bis südöstlichen Richtungen kommenden synoptischen Winden, die mit Typ  $H_2$  verbunden sind, bildet sich eine breite Konfluenzzone in Bodennähe im Bereich der östlichen Talflanke. Die Aufspaltung des niederschlagsbegünstigten Gebietes in zwei Teilareale ist durch die Aufspaltung der Ostwinde durch die Malinche und den Pinal bedingt.

Die mit dem Auftreten von Zirkulationstyp  $W_3$  verbundene Niederschlagsbegünstigung in den tieferliegenden, südwestlichen Teilen des Untersuchungsraumes steht im Zusammenhang mit dem Eindringen wasserdampfgesättigter Luftmassen aus der Rio Balsas-Senke in diese Zone. Infolge des starken täglichen Bewölkungsganges, der für das Auftreten von Typ  $W_3$  charakteristisch ist, spielt der Ausgleichswind nur eine unwesentliche Rolle für die Niederschlagsverteilung.

Eine Zone starker Windscherung und resultierender Geschwindigkeitskonvergenz ist für Typ  $T_1$  kennzeichnend. Diese Höhenkonvergenz führt dort zu besonders kräftigen Vertikalbewegungen, wo erhöhte Konvektion oder Bodenkonvergenz ein vertikales Aufsteigen der aus der Konvergenz resultierenden Luftmassenüberschüsse erzwingt. Die Ausgleichswinde und die mit dem Auftreten von Zirkulationstyp  $T_1$  verbundenen Bodenwinde wehen aus südlichen Richtungen ins Becken von Puebla. Entsprechend erfolgen an den luvgerichteten Südhängen die stärksten Luftmassenauftriebe.

Im Gegensatz zu den beschriebenen Typen ist die Wetterlage  $W_{4/1}$  durch Bodenwinde aus vorwiegend nordöstlichen Richtungen gekennzeichnet. Da das Becken von Puebla gegen Nordosten weitgehend orographisch abgeriegelt ist, fehlen ausgedehnte Bodenkonzonenzonen zwischen den synoptischen und den lokalen Winden. Die Analyse der Wetterkarten führt zu dem Schluß, daß die Wellenstörung  $W_{4/1}$  nicht mit

Tabelle 1: Mittlere Monatsniederschläge in mm

Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	August	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	
2	1	2	27	93	215	133	100	210	99	19	7	Amozoc
2	1	2	4	73	170	162	158	151	52	9	1	Tlaxcala
4	1	3	52	153	198	204	185	190	110	22	3	Rio Frio
1	2	4	30	95	93	103	267	133	82	19	2	Atlixco

kontinuierlicher Fortpflanzungsgeschwindigkeit die Strecke zwischen der Golfküste und dem Untersuchungsraum zurücklegt, sondern zunächst – meist während der Nachtstunden – an der Küste stationär wird und sich dann fast sprunghaft in den frühen Abendstunden erneut stationär mit einer Trogachsenorientierung parallel zu den Vulkanen Iztaccihuatl und Popocatepetl westlich des Untersuchungsraumes einstellt (Abb. 1). Setzt man ein solches Verhalten als typisch für solche Wellen voraus (21), so fallen im Bereich der Osthänge die Zonen stärkster Konvergenz, die aus der Wellenstörung resultieren, mit der Stauwirkung der luvgerichteten Osthänge zusammen. Eine Niederschlagsbegünstigung dieser Hänge und der östlich angrenzenden Beckenlandschaften ist die Folge.

Diese Abgrenzung der durch verschiedene Wetterlagen bedingten niederschlagsbegünstigten Gebiete kann zugleich als genetische Klimagliederung der Zone Puebla-Tlaxcala gedeutet werden. Diese Klimagliederung bietet den Vorteil, daß durch die Verbindung zwischen Wetterlagenhäufigkeit und Niederschlagsbegünstigung für ein vorgegebenes Gebiet aus seiner Zugehörigkeit zu einem der gekennzeichneten Klimaareale sogleich Aussagen über die zeitliche Niederschlagsverteilung möglich sind.

Für Amozoc im Süden der Malinche lassen sich nach der Tabelle 1 zwei Niederschlagsmaxima im Juni und September erkennen. Amozoc liegt in einem Gebiet, welches beim Auftreten der Typen  $H_2$  und  $T_1$  niederschlagsbegünstigt ist. Typ  $H_2$  tritt mit maximaler Häufigkeit im Juni, Typ  $T_1$  im Juni und September auf.

Tlaxcala liegt in der durch das Auftreten des Typs  $H_2$  bestimmten Zone und erhält entsprechend der Auftretshäufigkeit von Typ  $H_2$  im Juni maximale Niederschlagsmengen.

Rio Frio, auf der Paßhöhe zwischen Iztaccihuatl und Tlaloc gelegen, liegt im Bereich der beim Auftreten des Zirkulationstyps  $W_{4/1}$  niederschlagsbegünstigten Zone. Das Niederschlagsmaximum wird in Rio Frio im Juli angenommen, also im gleichen Monat, in dem auch Typ  $W_{4/1}$  mit maximaler Häufigkeit auftritt.

Die Station Atlixco ist charakteristisch für den Gebietsteil, der beim Auftreten von Zirkulationstyp  $W_3$

bevorzugt Niederschlag erhält. Die maximale Häufigkeit dieser Wetterlage und die maximalen Niederschlagsmengen treten im August auf.

## 6. Ergebnisse

Diese Gliederung des Hochbeckens von Puebla in Gebiete, die durch Niederschläge vorwiegend gleichartiger Niederschlagsgenese charakterisiert sind, kann für die Monate der Regenzeit als Grundlage einer späteren genetischen Klimagliederung des Untersuchungsgebietes gelten, da in diesen Monaten die jahreszeitlich bedingten Temperaturschwankungen sehr gering sind.

Durch die vorliegende Untersuchung ist für den Untersuchungsraum nachgewiesen, daß

1. eine genetische Niederschlagsklassifikation auf kleinem Raum in einem tropischen Gebiet sinnvoll ist,
2. der Jahresgang der monatlichen Niederschlagsmengen unter Berücksichtigung der orographischen Beeinflussung in einer guten Korrelation zur Wetterlagenhäufigkeit steht und
3. unter Vernachlässigung der Temperatur für die Regenzeit auf der Basis der hier erörterten Niederschlagsklassifikation eine Klimagliederung innerhalb der Tropen auch auf kleinem Raum möglich ist.

## Literatur

- (1) VIVO, J. A., GOMEZ, J.: Climatología de México, México D.F., 1946, Inst. panamer. Geogr. Hist. Publ. Nr. 19.  
GARCIA, E., SOTO, C., MIRANDA, F.: Larrea y clima, México D.F., 1960, An. Inst. Biol., Vol. 31, Nr. 1 und 2, S. 133–171.  
GARCIA, E.: Distribución de la precipitación en la República Mexicana, Publ. del Inst. de Geogr., Vol. I, 1969, S. 191–192.
- (2) JÁUREGUI, E. O.: Mesoclima de la Región Puebla-Tlaxcala, Univ. Nac. Aut., Mex., Inst. de Geogr., México 1968.
- (3) MAS SINTA, J.: Klimaklassifikation nach KÖPPEN (abgewandelt). Die Karte ist noch nicht veröffentlicht.

- (4) MOSIÑO, P. A., GARCIA, E.: Evaluación de la sequía intraestival en la República Mexicana, Col. de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura, Nr. 6, México 1968.  
MOSIÑO, P. A.: La precipitación y las configuraciones del flujo aereo en la Rep. Mexicana, México D.F., 1959, Ingen. hidrául. Vol. 13,3.
- (5) FLOHN, H.: Die Niederschlagsverteilung in Süddeutschland und ihre Ursachen im Lichte der modernen Klimatologie, Mitt. d. geogr. Ges. München, München 1939.
- (6) KNOCH, K.: Zur Methodik klimatologischer Forschung, Tät. Ber. Preuß. Met. Inst., 1924, Nr. 49.
- (7) BECKWITH, W. B.: Why Subterranean Isobars?, Bull. Amer. Met. Soc. No. 27, Heft 4, 1946.
- (8) RIEHL, H.: Tropical Meteorology, New York, 1954, S. 186.
- (9) - Subtropical Flow Patterns in Summer, Univ. of Chicago, Dept. of Meteor., Miscel. Reports No. 22, 1947.
- (10) MOSIÑO, P. A.: Una clasificación de las configuraciones de flujo aéreo sobre la República Mexicana, Rev. de Ingen. Hidrául., Vol. 12, No. 2, México 1958.
- (11) GEIGER, R.: Die vier Stufen der Klimatologie, Met. Zeit., 1927, Nr. 7.
- (12) FLOHN, H., 1939, a.a.O., S. 2.
- (13) JACOBS, I.: 5- bzw. 40jährige Monatsmittel der absoluten Topographien der 1000-mb-, 850-mb-, 500-mb- und 300-mb-Flächen sowie der relativen Topographien 500/1000-mb und 300/500-mb über der Nordhemisphäre und ihre monatlichen Änderungen, Met. Abhdl. freie Univ. Berlin, Vol. IV, Heft 2, Folge 2, 1958.
- (14) RIEHL, H., 1954, a.a.O., S. 227.
- (15) TROLL, C.: Die Lokalwinde der Tropengebirge und ihr Einfluß auf Niederschlag und Vegetation, Bonner Geogr. Abhlg, Heft 9, 1952, S. 127.
- (16) WAGNER, A.: Theorie und Beobachtung der periodischen Gebirgswinde, Beitr. GEophys. 52, 1938, S. 408-449.
- (17) WATTS, I. E. M.: Equatorial Weather, London 1955, S. 184.
- (18) RIEHL, H., 1954, a.a.O., S. 210 ff.
- (19) QUENEY, P.: Theory of perturbations in stratified currents with applications to airflow over mountain barriers, Univ. of Chicago, Dpt. of Meteor., Misc. Rep. No. 23, 1947.
- (20) RIEHL, H., 1954, a.a.O., S. 208.
- (21) HOSLER, C. R.: A study of Easterly Waves in the Golf of Mexico, Bull. Amer. Meteor. Soc. 37, 1956, S. 101-107.

## DIE ZEITLICHE ÄNDERUNG DER WASSERBINDUNG IM BODEN UNTER VERSCHIEDENEN VEGETATIONSFORMATIONEN DER HÖHENSTUFEN EINES TROPISCHEN HOCHGEBIRGES (SIERRA NEVADA DE STA MARTA/KOLUMBIEN)<sup>1)</sup>

Mit 6 Abbildungen

REIMER HERRMANN

*Summary:* Temporal change in soil moisture potential under different vegetation formations at various heights on a tropical mountain mass.

From August 1967 to March 1968 soil moisture tension was measured under different plant formations in a profile from the dry coastal fringe of the northwestern Sierra Nevada de Sta. Marta/Colombia up to the páramo (3600 m). The results showed that, under the páramo vegetation of the northwestern Sierra Nevada, there was a marked period with soil moisture tension pF 2,5-3,6, whereas under tropical ombrophilous cloud forest, the plant formation below the páramo, pF 2,5 was never surpassed. The unexpected dryer period under páramo vegetation may be explained by certain climatic and hydropedological situations. Under tropical ombrophilous montane forest in the dry season there occurred a period with a high soil moisture tension of pF 2,5-3,6. But under all three plant formations the period with < pF 2,5 (mostly free gravitational water) was predominant. The plant formation below these, a tropical evergreen seasonal submontane forest, suffers high soil moisture tensions of > pF 4,2 (conventionally permanent wilting point) in the dry season. Moving downward from tropical semi-deciduous forest to drought-deciduous lowland forest and

finally to succulent drought-deciduous shrublands the period with > pF 4,2 gets increasingly longer. Even in the rainy season soil moisture tensions above pF 4,2 occurred, extending from over a few days to one month. Under tropical alluvial forest salts are enriched in the root zone by capillary supported water. If the capillary fringe reaches the surface the salt concentrates in the upper soil allowing only life for a halophytic shrubland.

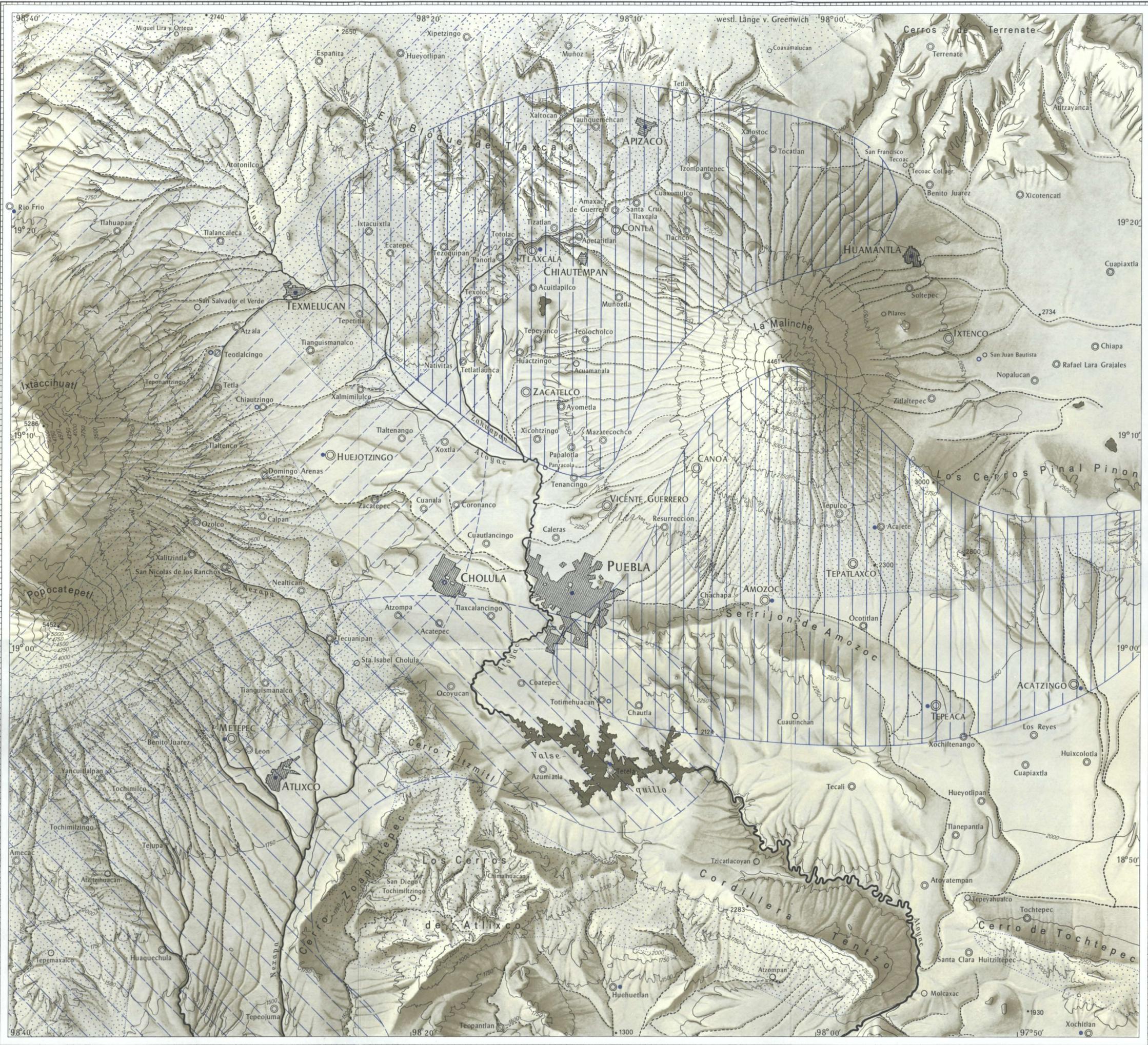
The results are explained by means of isopleths of soil moisture tension (pF) together with a profile of plant formations by abbreviated isopleths. A short introduction to the idea of soil moisture potential and to the climatic conditions introduce the paper.

Der Boden beeinflusst durch das in ihm wirkende Kräftefeld nahezu alle Prozesse im Wasserkreislauf wie Evaporation, Transpiration, Zuckersickerung zum

<sup>1)</sup> Ich danke der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die großzügige Unterstützung der Untersuchungen. Weiter danke ich dem Tropeninstitut der Universität Gießen, in dessen Außenstelle in Sta Marta, dem Instituto Colombo-Alemán, ich zu Gast sein durfte.

# UMGEBUNG VON PUEBLA

Beilage II zu ERDKUNDE XXV.2, Beitrag Klaus



D. GLADENBECK

Maßstab 1 : 250 000



## Niederschlagsbegünstigte Gebiete beim Auftreten bestimmter Höhengzirkulationen



- Niederschlagsstationen des Servicio Meteorologico Mexicano
- Niederschlagsstationen der Cimmyt (Centro Internacional de Mejoramiento de Maiz y Trigo)