

- (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.

Grundwasser oder Oberflächenabfluß. Das Verständnis dieser Kräfte erst ermöglicht, das räumlich und zeitlich wechselnde Verhalten des Wasserkreislaufs zu verstehen, ist also ein Schlüssel für die Erkenntnis der wichtigsten landschaftsökologischen und hydrologischen Probleme.

### 1. Saugdruck und Bodenwasserpotential

Die folgende allgemeine Einführung schließt sich im wesentlichen den Gedanken von L. A. RICHARDS (1965: 129–131) an. Ausführliche Darstellungen des Problems finden sich bei A. RODE 1959 und 1966, T. J. MARSHALL 1959, SCHEFFER-SCHACHTSCHABEL 1960, DON KIRKHAM 1964, G. BOLT, A. JANSE u. F. KOENIGS 1965.

Unter Boden soll im folgenden die Einheit der festen Bodenbestandteile, der Bodenluft und des Bodenwassers verstanden werden. Die festen Bestandteile werden die Matrix genannt werden, da sie Form und Art der Verteilung der Luft und des Wassers bestimmen. Über nahezu den ganzen Feuchtebereich, in dem die Pflanzenwurzeln aktiv werden, ist das Bodenwasser gebunden durch Kräfte, die von der Matrix ausgehen. E. BUCKINGHAM (1907) bezeichnete die Arbeit, die aufgewandt werden muß, um das Wasser aus dem Boden entgegen den wirkenden Kräften zu entfernen mit „capillary potential“. Es ist auch möglich, die Bindungsintensität durch den Saugdruck zu kennzeichnen, der notwendig ist, um das Wasser aus dem Boden zu lösen. Dieser Druck wird häufig in cm H<sub>2</sub>O-Säule oder in lg cm H<sub>2</sub>O-Säule (= pF-Wert nach R. K. SCHOFIELD [1935]) angegeben. Er soll, da er mit den Kräften, die von der Matrix ausgehen, im Zusammenhang steht, Matrixdruck genannt werden.

Schließt man unter isothermen Bedingungen eine Bodensäule von allen Seiten und nach oben ein, so daß sie nur noch mit dem Grundwasser in Verbindung steht (LINSLEY, KOHLER, PAULHUS, 1949: 290) und somit keine Verdunstung stattfinden kann, dann wird sich ein Feuchtegleichgewicht in dieser Bodensäule einstellen. Diese Feuchteverteilung im Gleichgewichtszustand ohne äußere Einflüsse soll im folgenden kurz „Gleichgewichtsprofil“ genannt werden. Vernachlässigt man die Schwerkraft, dann ist die Energie E, die notwendig ist, ein Wasserteilchen dm von der Höhe h auf die Höhe h + dh zu bewegen:

$$dE = \psi \cdot dm - \left( \psi + \frac{\partial \psi}{\partial h} \cdot dh \right) \cdot dm = - \frac{\partial \psi}{\partial h} \cdot dh \cdot dm \quad (1)$$

$\psi$  = Bodenwasserpotential.

Bei diesem Vorgang wurde die Masse dm auf einem Wege dh gegen die Schwerkraft bewegt, so daß die Arbeit, die dabei aufgewandt werden muß, ist:

$$dE = g \cdot dh \cdot dm \quad (2)$$

g = Erdbeschleunigung.

Da wir es mit einem Gleichgewichtsprofil zu tun haben, gilt:

$$- \frac{\partial \psi}{\partial h} \cdot dh \cdot dm + g \cdot dh \cdot dm = 0 \quad (3)$$

daraus folgt:

$$\frac{\partial \psi}{\partial h} = g \quad (4)$$

Integriert man Gleichung (4), dann folgt:

$$\psi = g \cdot h + C \quad (5)$$

Da für h = 0 auch  $\psi = 0$  ist, ist C = 0.

Wie oben schon angedeutet, läßt sich der Vorgang auch mit Hilfe des Saugdrucks beschreiben. In Abb. 6 ist das Gleichgewichtsprofil der Bodenfeuchte mit Hilfe des Saugdrucks (in lg cm H<sub>2</sub>O-Säule = pF) und der Energie (erg/g) nach Gleichung (5) berechnet und dargestellt.

Wenn aus dem Boden Wasser verdunstet oder durch Pflanzenwurzeln entnommen wird, wirken außerdem osmotische Kräfte. Diese Wasserbindung, die in bezug auf die Pflanze in gleicher Richtung wie der Matrixdruck wirkt, soll hier Lösungsdruck genannt werden. Dieser Druck ist im Gleichgewichtsprofil nicht berücksichtigt.

Das Gleichgewichtsprofil (Abb. 6) wird unter natürlichen Bedingungen ständig gestört, da durch die Wasserentnahme durch die Pflanzenwurzeln, direkte Verdunstung von der Bodenoberfläche, Sickerwasser und Absenkung des Grundwassers Druckgradienten (entsprechend Potentialgradienten) entstehen, die von den Gradienten des Gleichgewichtsprofils abweichen. Weicht die tatsächliche Druckverteilung nach rechts (also zu höheren Drucken) ab, dann wird der Ausgleich durch Nachströmen von Wasser von unten erfolgen. Weicht die Druckverteilung aber nach links ab (d. h. zu niedrigeren Drucken), dann ist die Wasserbewegung nach unten gerichtet. Der erste Fall, Abweichung der Druckverteilung nach rechts, entsteht in solchen Perioden, in denen durch die Pflanzen oder direkte Verdunstung mehr Wasser verbraucht wird als durch die Poren des Bodens nachgeliefert werden kann. Durch Wasserzufuhr von oben (Sickerwasser, Kondenswasser bei Abkühlung usw.) kann die Druckverteilung nach links abweichen, wenn z. B. die Pflanzen weniger als diese Zufuhr verbrauchen. In diesem Falle erfolgt ein Ausgleich durch Transport von Wasser nach unten. Es ist bei der Betrachtung des Gleichgewichtsprofils nicht notwendig, daß der gesamte Profilbereich vom Grundwasser an aufwärts durch die Kurve wiedergegeben wird. Es kann auch ein beliebiger Abschnitt herausgegriffen und verglichen werden, dessen Druckverlauf an der Basis mit dem in der Natur gleich ist. Zum Beispiel folgt die Druckverteilung im Gleichgewichtszustand in einem Boden ohne Grundwasser, bei dem über einer undurchlässigen Ge-

steinsohle ein Ausgangsdruck von  $pF\ 3$  (= 10 m Wassersäule) herrscht, der Kurve im Gleichgewichtsprofil von  $h = 10$  m an aufwärts. Es herrscht in diesem Falle in einer Höhe von 2 m über dieser Sohle ein Druck von  $pF\ 3,08$  (= 12 m Wassersäule). Jede Abweichung von dieser Druckverteilung hat eine Wasserbewegung zur Folge.

Die Art und Geschwindigkeit, in der dieser Ausgleich durch fließendes Wasser in Filmen über den Bodenteilen oder in der Gasphase erfolgt, hängt von der Porenraumverteilung der Böden ab. Zum Beispiel kann in einem Sandboden die Wassernachleitung in flüssiger Phase nur wenige Dezimeter über das Grundwasser hinaus erfolgen gegenüber einem gut strukturierten Lehmboden, in dem dieser für die Pflanze oft wichtige Transport bis über 3 m möglich ist. Umgekehrt sickert in einem Sandboden das Wasser entsprechend schneller in die Tiefe.

Der Vergleich der in der Regen- und Trockenzeit gemessenen Saugdruckverteilungen unter verschiedenen Vegetationsformationen mit dem Gleichgewichtsprofil ermöglicht direkte Aussagen über Richtung und Geschwindigkeit der Wasserbewegung in den Böden. Zusätzlich zu den Gleichgewichtsbedingungen, die zwischen den Matrixkräften und der Erdanziehungskraft bestehen, müssen in bestimmten Fällen hohe Lösungsdrucke mit berücksichtigt werden.

## 2. Die Meßmethode

Das größte Hindernis für eine verbreitete Anwendung der Lehre von der Wasserbindung im Boden in den ökologisch arbeitenden Wissenschaften und in der Bodenhydraulik war, daß eine einfache, im Gelände leicht zu handhabende und über den gesamten Druckbereich arbeitende Meßmethode fehlte. Bisher war es üblich, im Labor in den unteren Druckbereichen mit der Niederdruckapparatur, in den mittleren Bereichen mit einer Hochdruckapparatur und in den Bereichen hoher Drucke über den Dampfausgleich mit verschiedenen Salzlösungen (L. A. RICHARDS, 1965, S. J. RICHARDS 1965 und E. SCHLICHTING und H. P. BLUME 1966) zu messen. Im Gelände konnten im unteren Druckbereich (etwa  $< 0,85$  at) mit Erfolg fest installierte Tensiometer angewandt werden (P. BENECKE und K. H. HARTGE 1968). Dem Prinzip nach findet ein Druckausgleich zwischen dem Filmwasser der Matrix durch eine poröse keramische Zelle mit einer im Tensiometer befindlichen Wassersäule statt, deren Druck gemessen wird. Das Tensiometer mißt also den Matrixdruck.

In den letzten Jahren haben J. S. McQUEEN und R. F. MILLER (1966, Ia 10, 1–11) Gedanken von O. STOCKER (1930) und H. GRADMANN (1934), Papier als Saugdruckanzeiger zu verwenden, zu einer einfach im Gelände zu handhabenden, ausreichend genauen und über einen hohen Druckbereich verwendbaren Methode ausgebaut. Das Prinzip beruht darauf, daß Filter-

papier als ein Anzeiger für den Saugdruck im Boden verwandt werden kann, da eine sehr enge Korrelation zwischen dem Gewicht des sich im Druckausgleich mit dem feuchten Boden befindlichen Filterpapiers und dem Saugdruck dieses Bodens besteht. Der Fehler liegt unter 2% und der Meßbereich zwischen  $1 \cdot 10^0$  und  $1,5 \cdot 10^6$  cm Wassersäule (entsprechend  $pF\ 0$  bis  $pF\ 6,2$ )<sup>2)</sup>.

In Abschnitt 1 wurde eine kurze Einführung in die Lehre von der Wasserbindung im Boden gegeben. Es ist hier notwendig, darüber Klarheit zu gewinnen, was durch das Filterpapier gemessen wird. Da das Filterpapier bei dieser Methode immer im Kontakt mit dem zu untersuchenden Boden ist, braucht uns nur dieser Fall zu beschäftigen.

Im Kontakt mit wassergesättigtem Boden wird das Filterpapier die Bodenlösung aufsaugen und wird deshalb den Matrixdruck  $K_s$  allein angeben. Bei austrocknendem Boden nimmt die hydraulische Leitfähigkeit ab, so daß etwa bei Saugdrücken  $> pF\ 1,8$  das Filterpapier das Wasser über die Dampfphase aufnimmt. Jetzt werden also der Lösungsdruck  $\pi$  und der Matrixdruck  $K_s$  in ihrer Summe gemessen. Numerisch spielen aber bei Matrixdrücken dieser Größe die Lösungsdrucke in der Bodenlösung normalerweise keine Rolle. Anders ist es bei Salzböden, die auch in dem Untersuchungsgebiet auftreten, denn in ihnen können die Lösungsdrucke die Matrixdrucke übertreffen, so daß die Lösungsdrucke aus dem Salzgehalt des Sättigungsextraktes berechnet werden müssen.

<sup>2)</sup> Da die Methode an schwer zugänglicher Stelle veröffentlicht wurde, sei die Anweisung kurz wiederholt:

Notwendig sind:

1. Analysenwaage, 0,0002 g genau
2. Probendosen
3. Temperatorkammer (20 °C)
4. Filterpapier, Schleicher und Schüll, Nr. 589, Weißband.
5. Pentachlorphenol
6. Methanol
7. Plastikisolierband zum Versiegeln der Dosen

Vorgang:

1. Die Filterpapiere werden mit einer 2% Lösung von Pentachlorphenol in Methanol getränkt und getrocknet.
2. Nachdem die Bodenprobe in die Dose gefüllt ist, wird ein Filterpapier oben aufgelegt und die Dose mit dem Isolierband verschlossen
3. In der Temperatorkammer werden die Proben zur Einstellung des Gleichgewichts 1 Woche bei 20 °C aufbewahrt.
4. Das Filterpapier wird sofort nach Entnahme gewogen. Hier ist Vorsicht geboten, da sich sofort nach Entnahme ein neues Gleichgewicht zur Luft im Labor einstellt.
5. Aus den Regressionsgraden
 
$$pF = \lg \text{ cm WS} = 6,24617 - 0,0723 \cdot M \quad \text{für } (M < 54\%)$$

$$pF = \lg \text{ cm WS} = 2,8948 - 0,01025 \cdot M \quad \text{für } (M > 54\%)$$
 kann der Saugdruck errechnet werden.  $pF$  ist der Saugdruck ausgedrückt in  $\lg \text{ cm}$ -Wassersäule,  $M$  ist der Feuchtegehalt des Filterpapiers in Prozent seines Trockengewichts.

### 3. Pflanze und Boden als Einheit bei der Betrachtung des Wasserkreislaufs

Die Pflanze, eingeschaltet in das Feuchtigkeitsgefälle zwischen Boden und Luft (O. KLAUSING, 1961: 36) ändert das Druckgefälle des Bodenwassers und steuert damit entscheidend die Fließbewegungen im Boden. Es erweist sich daher als notwendig, Pflanze und Boden als Einheit zu betrachten. Wichtig ist vor allem für die weitere Betrachtung, daß die Pflanze ein Druckgefälle im Boden erzeugt und daß sie in ihrem Verhalten wiederum von diesem beeinflusst wird. In umfassender Weise hat O. KLAUSING (1961) auf diese Zusammenhänge aufmerksam gemacht.

### 4. Die Bedeutung der Wasserbindung im Boden für die Transpiration der Pflanze

Nachdem noch bis etwa 1965 (H. L. PENMAN 1966: C 1–12, F. J. VEIHMEYER 1956: 86 und R. O. SLATYER 1964: 24–19) die Meinungen darüber, ob die Transpiration durch die Pflanze schon zwischen „Feldkapazität“ und „Welkepunkt“ durch anwachsenden Saugdruck herabgesetzt wird, oder ob das erst mit Erreichen des Welkepunktes geschieht, gegensätzlich waren, scheinen sich jetzt die Ansichten von P. E. RIJTEMA (1959: 99–106), H. WALTER (1960: 203), R. O. SLATYER (1964: 24–19) und W. C. VISSER (1965: 257–267) durchzusetzen. Sie vertreten die Meinung, daß schon im unteren Druckbereich eine Einschränkung der Transpiration erfolgt. Das bestätigen auch Versuche von R. MICHLER und R. HERRMANN (1968: 19–27). R. I. COWAN und F. L. MILTHORPE (1968: 107–130) kommen nach der Diskussion der vorliegenden Arbeiten zu der Ansicht, daß auch zwischen „Welkepunkt“ und „Feldkapazität“ eine Erhöhung des Saugdrucks eine Verminderung der Transpiration zur Folge hat. Außerdem betonen H. WALTER (1960: 202) und auch später R. O. SLATYER (1964: 24–19), daß der Welkepunkt, bei dem die Transpiration ganz eingestellt wird, artabhängig ist und je nach Pflanze größer oder kleiner 16 at betragen kann. Zur Bildung eines Schwellenwertes wurde im folgenden konventionell ein Saugdruck von 16 at angenommen, bei dem die Transpiration nahezu aufhört, und wohl wissend um die Problematik mit Welkepunkt benannt.

Außerdem ist es offenbar so, daß Wasser, das durch den Stamm und die Knospen nach Abwurf der Blätter in der Trockenzeit verdunstet wird, auch entgegen sehr hohen Saugdrücken aus dem Boden aufgenommen wird (s. dazu auch O. KLAUSING 1958: 450).

Nach C. W. VISSER (1965: 258) ist das Verfügbarkeitsniveau V des Bodenwassers für die Pflanze durch

$$V = \frac{1}{\psi^{n-1}}$$

bestimmt. Allgemein ist  $n = 2$ , so daß wir auch

$$V = \frac{1}{\psi}$$

schreiben können. C. W. VISSERS Überlegungen zeigen weiter, daß die Transpiration vom Verfügbarkeitsniveau V abhängt (sowie von den klimatischen Einflüssen, z. B. ausgedrückt in Form der potentiellen Evaporation PENMANS). In letzter Konsequenz folgt daraus vor allem, daß die Verdunstungsformeln für aktuelle Evapotranspiration die Größe der Wasserpotentiale (oder anders ausgedrückt: den herrschenden Saugdruck im Boden) berücksichtigen müssen.

### 5. Die Bedeutung von Untersuchungen über die Wasserbindung im Boden für die Landschaftsforschung

Die Verteilung des Saugdrucks im Boden und seine zeitliche Änderung sind ein wesentliches Glied im Wirkungsgefüge zwischen den Pflanzengesellschaften und ihren Umweltbedingungen. Damit steht die Betrachtung der Wasserbindung im Boden voll in der von C. TROLL (zuletzt 1968: 17) definierten Landschaftsökologie: „Landschaftsökologie ist das Studium des gesamten, in einem bestimmten Landschaftsausschnitt herrschenden komplexen Wirkungsgefüges zwischen den Lebensgemeinschaften (Biozöosen) und ihren Umweltbedingungen...“

Die Bedeutung der Bodenwasserhaushaltsbetrachtung für die Landschaftsökologie hat schon früh E. NEEF (1960) erkannt. Er und seine Schüler (E. NEEF, G. SCHMIDT und M. LAUCKNER 1961) führten Wassergehaltsmessungen in Böden verschiedener Ökotope durch. Da aber die ökologische Aussage einer Wassergehaltsbestimmung (im Sinne einer Erklärung des Wirkungsgefüges) nur in Verbindung mit den Bodeneigenschaften (d. h. der Matrix und der Konzentration der Bodenlösung) eindeutig ist, sind dem unmittelbaren Vergleich von Wassergehaltsbestimmungen in bezug auf die Pflanze Grenzen gesetzt.

### 6. Vegetationsaufnahme

Im Bereich der nordwestlichen Sierra Nevada de Santa Marta sind nur noch spärliche Reste der natürlichen Vegetationsformationen erhalten, so daß aus diesen Resten und der Sekundärvegetation auf die natürliche Vegetation geschlossen werden mußte. Die Meßstellen wurden soweit irgend möglich unter der erhaltenen natürlichen Vegetation angelegt, oder aber unter Wuchsformen der Sekundärvegetation, die den ursprünglichen noch sehr ähnlich sind<sup>3)</sup>. Außerdem

<sup>3)</sup> O. KLAUSING (1958: 450) weist für den Volcan de San Salvador nach, daß eine Veränderung der Vegetation in dieser Form keinen großen Einfluß auf den Wasserhaushalt gehabt hat.

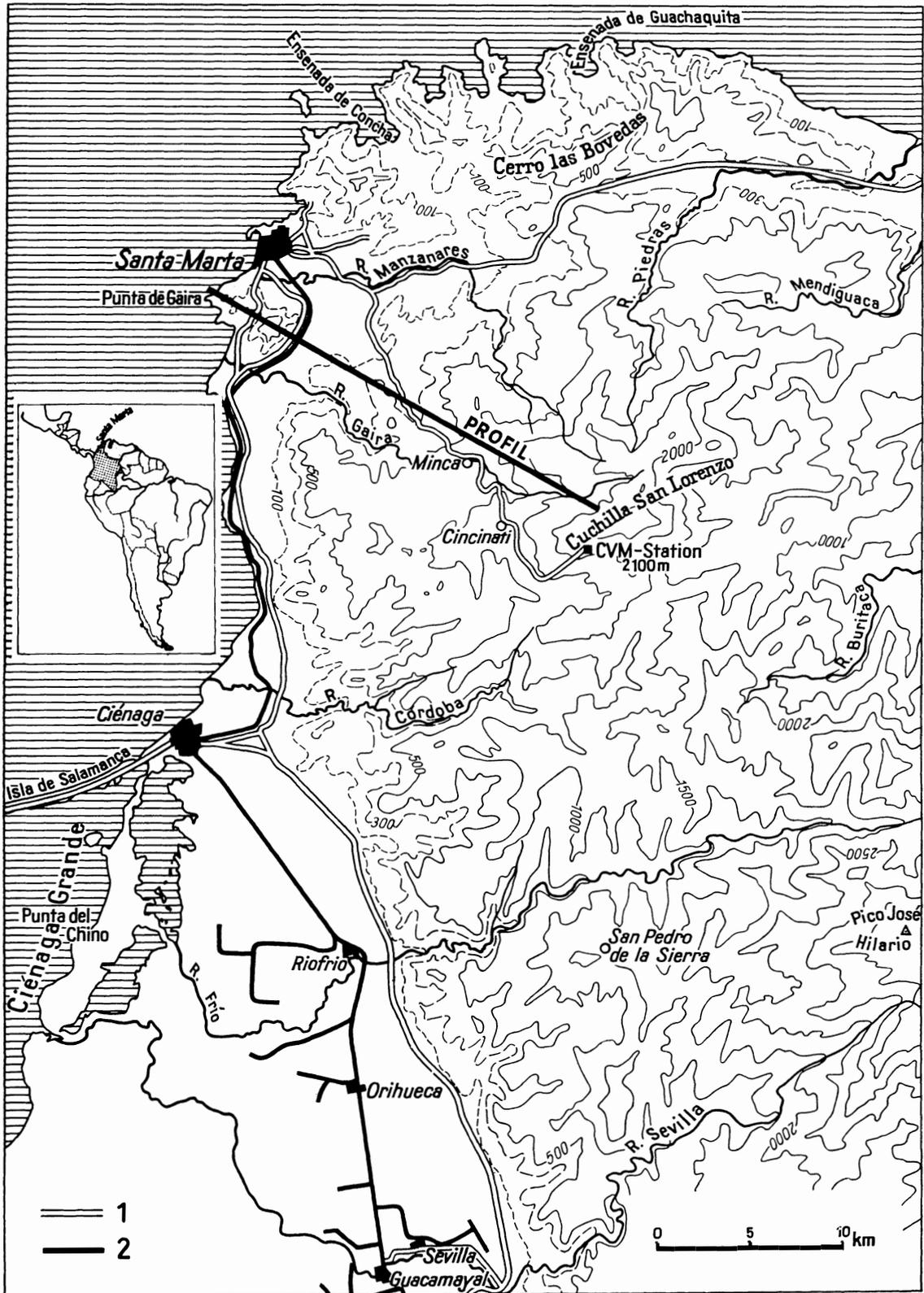


Abb. 1: Lage des Profils / location of the profile 1 wichtige Straßen / major roads; 2 Eisenbahn / railway

wurden die Meßstellen innerhalb der auftretenden Ökotox-Catenen so gelegt, daß die Ergebnisse vergleichbar sind.

Im Bereich des Profils (Abb. 2) war eine geobotanische Aufnahme von C. PÉREZ (1962) vorgenommen worden. C. PÉREZ folgt darin der Klassifikation von L. R. HOLDRIDGE (1947: 367–368). Diese Untersuchung gab entscheidende Hilfen für die Aufnahme des Profils, auch wenn später dem Vorschlag von H. ELLENBERG und D. MUELLER-DOMBOIS (1965/66: 21–55) zur physiognomisch-ökologischen Klassifikation gefolgt wurde. Ein Vergleich des Profils mit der

Karte bei C. PÉREZ (Mapa ecológica) zeigt, daß in den Grenzziehungen Abweichungen auftreten, die aber aus der konsequenten Befolgung des HOLDRIDGE-schen Schemas durch C. PÉREZ ausreichend erklärt werden können. Nach Abschluß der Kartierung erschien eine großmaßstäbliche geobotanische Aufnahme des Cerro San Fernando und des Cerro la Llorona im Trockengebiet von Santa Marta (R. SCHNETTER 1969: 289–302). Im Profil ist das der Bereich von km 22–26 mit dem sukkulentenreichen, offenen bis dichten trockenkahlen Laubgebüsch. Die Beschreibung der Vegetationsformationen erfolgt in Abschnitt 8.

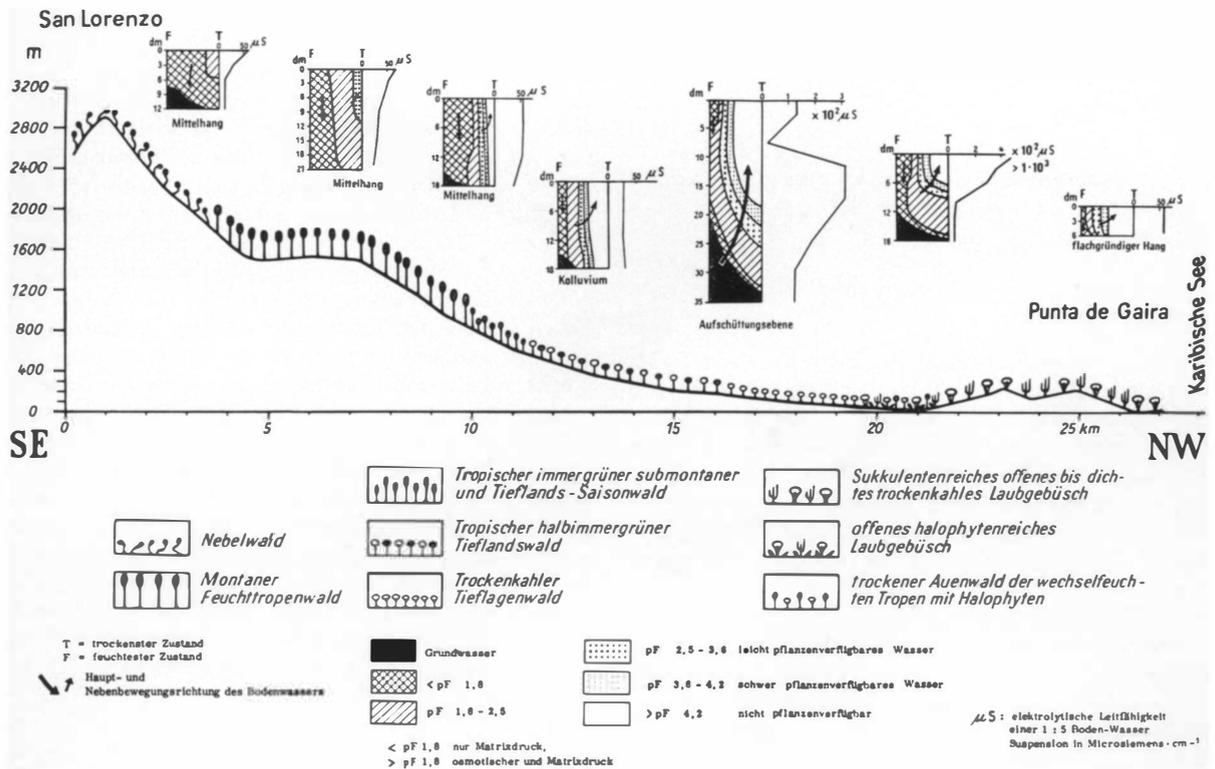


Abb. 2: Vereinfachte Darstellung der Saugdruckisoplethen und Vegetationsprofil  
Simplified presentation of the soil moisture tension isopleths and vegetation profile.

### 7. Klima und Witterung

Das Profil nimmt seinen Ausgang im klimatisch trockensten Bereich der nordwestlichen Sierra Nevada. Hier wirken gemeinsam austrocknende föhntartige Fallwinde (R. HERRMANN 1970), Strömungsdivergenzen im Küstengebiet (R. A. BRYSON und P. M. KUHN 1961) und im Lee der Sierra (F. LAHEY 1958). Durch dieses außergewöhnliche Zusammentreffen von Niederschlagsbildung hindernden Ursachen entsteht um Santa Marta eine deutliche Trockenzone. Da die föhntartigen Fallwinde im Profilausschnitt auf die Höhen ostwärts Punta de Gaira beschränkt sind und mit zunehmender Höhe die Strömungsdivergenzen

ihre Bedeutung verlieren, entwickelt sich gegenläufig durch kräftige Hangkonvektion eine wachsende Neigung zu Niederschlägen mit anwachsender Höhe. Trägt man die Niederschlagssummen gegen die Höhe für die in der Nähe des Profils liegenden Niederschlagsmeßstellen ab, so läßt sich mit Hilfe der Methode der kleinsten quadratischen Abweichungen eine Parabel (Abb. 5) einpassen, die zeigt, daß die Niederschläge bis 1660 m ansteigen, um dann wieder abzunehmen. Diese Erscheinung wurde in tropischen Gebirgen von W. WEISCHET (1965) und dann von St. HASTENRATH (1967) genauer untersucht und gedeutet. Die einzelnen Jahresgänge der Niederschläge für die Stationen entlang des Profils sollen nicht wei-

ter diskutiert werden, da nur in einem Fall Niederschlagsmesser und Saugdruckmeßstelle so nahe beieinander lagen, daß ein Vergleich zulässig gewesen wäre. Vor allem ist es aber das Ziel dieser Untersuchung, den regionalen Vergleich der Saugdruckänderungen (etwa im Sinne von C. TROLLS [zuletzt 1966: 297–327] Gedankenführung über das Wasser als pflanzengeographischem Faktor) anzustellen und nicht die am Standort wirkenden Beziehungen zwischen Witterung, Pflanze und Boden im einzelnen zu diskutieren.

Leider reichen die Ergebnisse dieser kurzen Meßreihe noch nicht aus, um eine eingehende Diskussion mit den von W. LAUER (1959) gefundenen Beziehungen zwischen der Dauer der ariden Monate aufgrund des MARTONNESchen Indexes und der Ausbildung von Vegetationsformationen tropischer Hochgebirge vorzunehmen.

#### 8. Die Änderung des Saugdrucks unter Vegetationsformationen verschiedener Höhenstufen (Abb. 3, A–H)

##### a) Sukkulente reiches, trockenkahles offenes bis dichtes Laubgebüsch

Diese Formation bedeckt die Berge ostwärts Punta de Gaira und kann nach R. SCHNETTER (1969: 291) in eine halbwüstenartige *Haematoxylon-Melochia-Lippia*-Kleinstrauchvegetation, ein Kakteendorngehölz, ein Kakteendorngehölz mit *Agave cocui* und in ein Dorngehölz gegliedert werden. An feuchteren Standorten, vor allem in den Rinnen wächst schon ein trockenkahler Tieflagenwald (bei R. SCHNETTER: regengrüner Trockenwald). Diese angegebene Reihenfolge entspricht etwa dem Feuchteanspruch der Vegetation.

Das Wasserdargebot hängt von der Mächtigkeit des Bodens, der Tiefe der Verwitterungsschicht und dem Ausstreichwinkel der Schieferflächen der Phyllite gegen die Oberfläche sowie der Lage am Hang ab. Bei diesen Trockenstandorten ist die Aussage der Saugdruckverteilung nicht allein Kriterium für die Wasserversorgung der Pflanze, da auch aus dem Zersetz und dem Gestein Wasser entnommen wird.

Das Isoplethendiagramm der Saugdrucke (Abb. 3, H) zeigt den Gang in einem nur 30 cm tiefen Boden über parallel zur Bodenoberfläche geschiefertem Zersetz unter einer etwa 80 cm hohen *Haematoxylon-Melochia-Lippia*-Kleinstrauchvegetation (vorwiegend *Haematoxylon brasiletto* KARST und *Melochia to-*

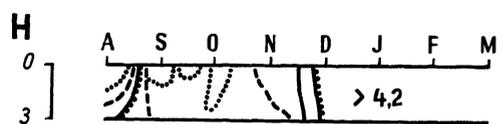
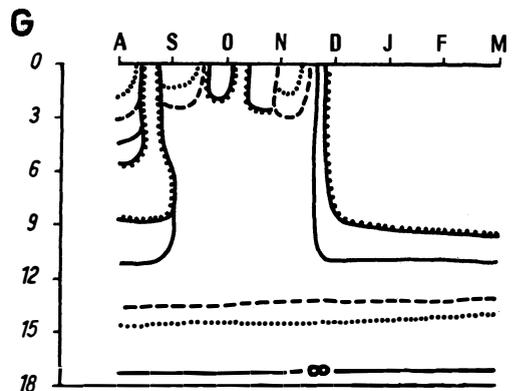
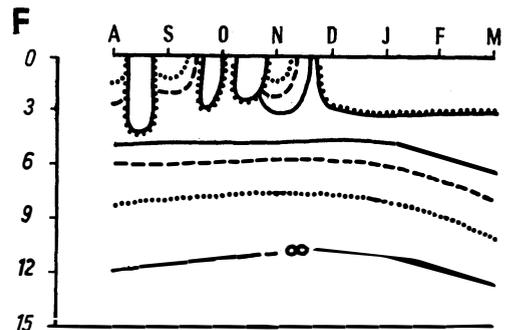
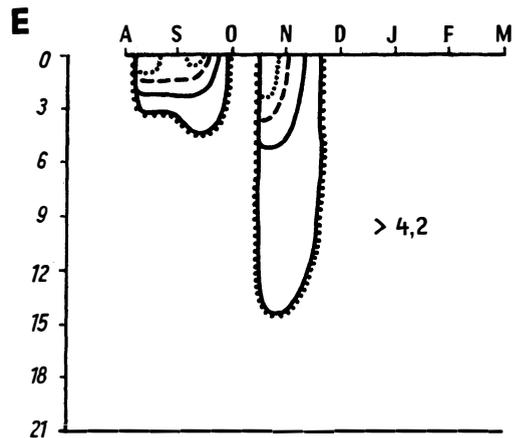
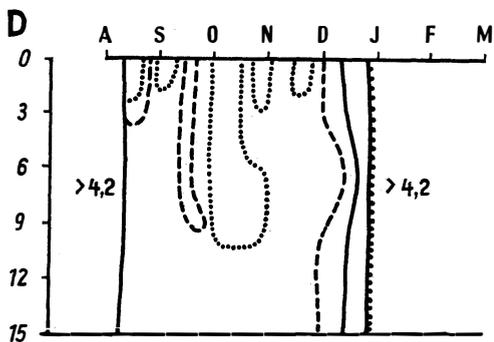
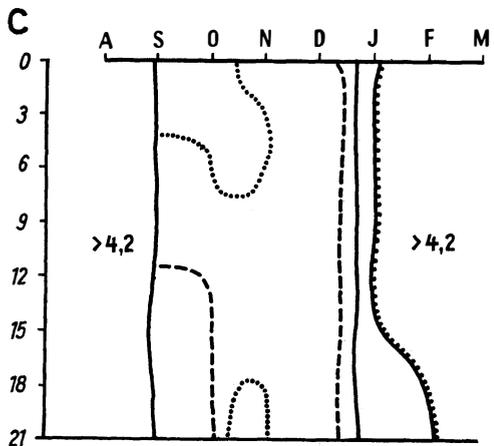
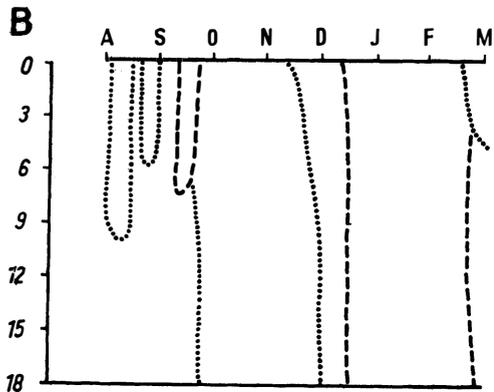
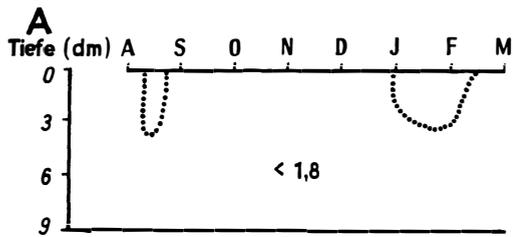
*mentosa* L., Vegetationsaufnahme R. SCHNETTER 1969). Aufgrund des geringen Speicherraumes dieses Bodens füllen schon geringe Niederschläge den Boden auf, so daß kurzzeitig im August im Oberboden geringe Saugdrucke von  $< pF$  1,8 auftreten und eine abwärts gerichtete Wasserbewegung entsteht, weil im Unterboden noch hohe Drucke bis  $> pF$  4,2 herrschen. In der Hauptregenzeit bewegt sich bei Drucken  $< pF$  2,5 Wasser hangabwärts. Sehr schnell erfolgt dann der Übergang zu hohen Drucken  $> pF$  4,2. Diese Schwelle, herkömmlich als permanenter Welkepunkt bezeichnet, gibt die Grenze an, an der viele Pflanzen noch die Energie aufbringen, Wasser aus dem Boden aufzunehmen.

Der Unterhang war mit einem 3–5 m hohen Dorngehölz bewachsen, in dem *Pereskia colombiana* Br. u. R. und *Pseudobombax septenatum* (JACQ.) DUGAND unter den Bäumen und *Benthamantha caribaea* (JACQ.) KTZE. und *Mimosa laiocarpa* DC. häufig vorkamen. Im Vergleich zu der zeitlichen und räumlichen Druckänderung unter der Kleinstrauchvegetation treten häufiger Drucke  $< pF$  1,8 im Oberboden auf, woraus auf eine deutliche Abwärtsbewegung des Bodenwassers geschlossen werden kann. Die hohen Drucke der Trockenzeit Anfang Dezember setzen aber genauso unvermittelt ein. Hier war aus der länger anhaltenden Turgeszenz der Blätter zu erkennen, daß die Pflanzen aus den Schieferflächen des Zersatzes und des festen Gesteins Wasser aufnehmen mußten. Bei einem nahe gelegenen ähnlichen Dorngehölz auf Terrassensanden mit 16 m Grundwasserflurabstand entnahm *Capparis* spp. aus dieser Tiefe noch Wasser als der Oberboden bis in eine gemessene Tiefe von 6 m auf  $> pF$  6 ausgetrocknet war. Die Pflanze war aber gezwungen, einen Teil der Blätter abzuwerfen. Eine benachbarte *Pereskia colombiana* warf erst bei Erreichen von  $pF$  4,8 (bis 6 m Tiefe) die Blätter ab.

##### b) Offenes holophytenreiches Laubgebüsch (Abb. 3, F)

In der südöstlich anschließenden Talau des Rio Gaira ist für die Ausbildung einer bestimmten Vegetationsformation der Grundwasserflurabstand und die kapillare Leitfähigkeit der Sedimente wichtig. Ist diese so, daß Wasser in flüssiger Phase bis zur Oberfläche nachfließt, dann reichert sich Salz im Oberboden an. Es können Leitfähigkeiten des Sättigungsextraktes von  $L > 10^4 \mu S cm^{-1}$  und pH (KCl)-Werte  $> 8,5$  auftreten. Aus diesem Grunde gedeiht auf solchen

Abb. 3: Saugdruckisoplethen (in pF) unter verschiedenen Vegetationsformationen (1967/68): A Nebelwald; B Montaner Feuchttropenwald; C Tropischer immergrüner submontaner Saisonwald; D Tropischer halbimmergrüner Wald; E Trockenkahler Tieflagenwald; F Offenes halophytenreiches Laubgebüsch; G Trockener Auenwald der wechselfeuchten Tropen; H Sukkulente reiches, trockenkahles Laubgebüsch  
Soil moisture tension isopleths (in pF) under different vegetation formations (1967/68): A cloud forest; B mountain wet tropical forest; C tropical evergreen submontane seasonal forest; D tropical semi-deciduous forest; E drought deciduous lowland forest; F open halophyte-rich deciduous shrubland; G dry lowland forest of the intermittent tropics; H succulent drought deciduous shrubland



..... 1,8    - - - - 2,5    ——— 3,6    - - - - 4,2

Standorten nur eine Formation aus weitstehenden Büschen – zumeist Mimosaceen – und auf dem sonst nackten Boden wachsen Halophyten (häufig *Batis maritima* L.). In Abb. 3, F ist ein stark im Oberboden versalzter Boden mit seinem Saugdruckjahresgang wiedergegeben. Bis 60 cm Tiefe ist der Boden stark versalzen ( $L > 0,5 \cdot 10^3 \mu \text{ S cm}^{-1}$ ), so daß auch bei voller Sättigung, wie sie zeitweise in der Regenzeit auftrat, neben den Matrixdrücken von  $< \text{pF } 2,5$  noch Lösungsdrucke von  $\pi = > 15 \text{ at}$  (entsprechend  $> \text{pF } 4,2$ ) auftreten. Diese Drucke wurden nach folgender empirischer Gleichung errechnet (K. KREB, 1964: 101):

$$\pi = 0,036 \cdot L \quad \pi \text{ in at}$$

L = Leitfähigkeit des  
Sättigungsextraktes  
in  $\mu \text{ S cm}^{-1}$

Deutlich sind die kurzen Phasen linksseitiger Verschiebung der Druckverteilung ( $< \text{pF } 2,5$ ), die nur nach den wenigen Niederschlagsperioden auftreten, zu erkennen. In der übrigen Zeit herrschen hohe Drucke, die nur noch einen kümmerlichen Pflanzenwuchs – vor allem in der Krautschicht – zulassen. Das Grundwasser steht ständig hoch an, so daß immer eine kapillare Wassernachlieferung erfolgt.

c) Trockener Wald grundwassernaher Standorte der wechselfeuchten Tropen (Abb. 3, G)

Da die Kapillareigenschaften und der Grundwasserflurabstand der Sedimente räumlich sehr rasch wechseln, treten schon wenige Meter benachbart von dem oben beschriebenen Standort Verhältnisse auf, bei denen die Wassernachlieferung in flüssiger Phase nur bis in die Wurzelzone reicht. Hier wächst dann ein halbimmergrüner – immergrüner Wald mit Bäumen bis zu 30 m Höhe und zwei Stockwerken. Diese Formation kann nur rekonstruiert werden, da diese Standorte vor allem als Bewässerungsweide und Ackerland genutzt werden. Die Bäume, deren Wurzeln den Saugsaum erreichen, vor allem die des oberen Stockwerkes, sind immergrün (*Anacardium excelsum* [BERT. und BALB.] SKEELS). Daneben treten aber laubabwerfende und teilweise laubabwerfende Mimosaceen auf. Stellenweise, bei hochreichender Wassernachlieferung in flüssiger Phase, erscheinen Halophyten. Diese Formation kommt in der Klassifikation von H. ELLENBERG (1965/66) nicht vor. In Abb. 3, G ist deutlich die kurze Phase mit Zusicerung (September–Oktober) mit Drücken  $< \text{pF } 2,5$  zu erkennen. In der „kleinen“ Trockenzeit (Anfang August) und vor allem in der Haupttrockenzeit steigen die Drucke so hoch an, daß die Pflanzen aus dem Oberboden kein Wasser mehr entnehmen können. Die Krautschicht verwelkt dann völlig. Aufgrund der starken Druckgradienten, d. h. einer rechtsseitigen Verschiebung der Druckverteilung, zwischen Oberboden und Grundwasseroberfläche strömt jetzt ständig Was-

ser (wie im Beispiel 3, F) erst kapillar und dann in Dampfphase nach oben, so daß im Unterboden Salzanreicherung stattfindet, besonders dort, wo in der Hauptwurzelzone ständig durch die Vegetation die Potentialdifferenzen erneuert werden. Auch hier treten in etwa 60 cm Tiefe neben den Matrixdrücken höhere Lösungsdrucke auf. In dem angegebenen Beispiel wurden nur Leitfähigkeiten in einer 1:5 Boden/Wasser-Suspension gemessen, aus denen der Lösungsdruck nicht berechnet werden kann.

d) Trockenkahler Tieflagenwald (Abb. 3, E)

Diese Formation schließt sich ostwärts auf der höheren Fußfläche und den Randhöhen der Sierra Nevada an. Die Bäume und Büsche, die selten über 18 m hoch werden, bilden zwei Stockwerke. In der Trockenzeit werfen über 70% des oberen Stockwerkes ihre Blätter ab. Die dünne Krautschicht verwelkt dann völlig. Unter den Sukkulenten kommt nur *Pereskia Colombiana* häufiger vor. Weiter kommen in der Baumschicht *Gyrocarpus americanus* JACQ., *Bursera graveolens* TRIANA und *PLANCH.*, sowie *Pseudobombax septenatum* (JACQ.) DUGAND sehr häufig vor (R. SCHNETTER 1969: 294).

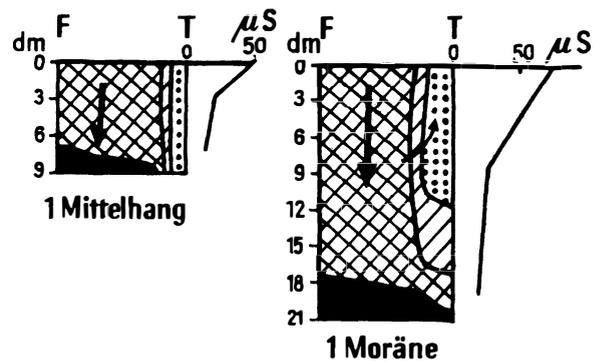


Abb. 4: Vereinfachte Darstellung der Saugdruckisoplethen des Páramo oberhalb San Pedro de la Sierra. Legende: s. Abb. 2.

Simplified presentation of the soil moisture tension isopleths of the Páramo above San Pedro de la Sierra. for Key: see Fig. 2

Die Saugdrucke für das Isoplethendiagramm wurden im Hangkolluvium gemessen. Die Niederschläge waren offensichtlich so gering, daß nur im Oberboden kurzzeitig eine linksseitige Abweichung der Saugdrucke mit  $< \text{pF } 2,5$  auftrat. Im übrigen war das Bodenwasser auch im Oberboden mit so hohen Drücken  $> \text{pF } 4,2$  gebunden, daß keine nennenswerte Transpiration mehr möglich war. Der Unterboden war auch in der Hauptregenzeit oft so trocken, daß das Wasser mit  $> \text{pF } 4,2$  gebunden war. Das hydrologische Jahr 1967 war verhältnismäßig trocken gewesen, so daß nur etwa 80% der Jahressummen des langjährigen Mittels erreicht wurden. Es ist daher schwer abzuschätzen, ob in Normaljahren in der Regenzeit Wasser aufgrund einer kräftigen linksseiti-

gen Druckverschiebung bis zum Grundwasser dringt (in Abb. 2, im verkürzten Diagramm, wurde es so dargestellt).

e) Tropischer halbimmergrüner Wald (Abb. 3, D)

In diesem Wald können zwei deutlich voneinander getrennte Stockwerke unterschieden werden. Im oberen werfen während der Trockenzeit 40–60% der Bäume die Blätter ab. Die Krautschicht ist nur sehr dünn und verwelkt während der Trockenzeit. Bombacaceen treten nur vereinzelt auf und entwickeln nicht ihre typischen bauchigen Wuchsformen, sondern geraten eher schlank.

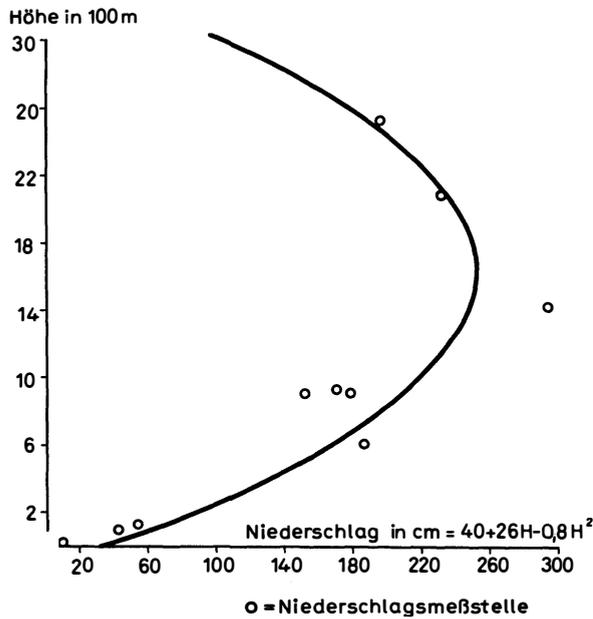


Abb. 5: Niederschlagsverteilung mit der Höhe entlang dem Vegetationsprofil (hydrologisches Jahr 1967). Anpassungsparabel nach der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate.

○ Niederschlagsmeßstelle / Precipitation gauge  
 Precipitation distribution with altitude along the vegetation profile (hydrologic year 1967). Curve fitting using the least squares method.

Dieser Wald nimmt die Berggrücken des unteren submontanen Bereiches der Sierra Nevada ein. Das Saugdruckisoplethendiagramm gibt die Messungen im sandigen Substrat aus Granodioritzersatz wieder. In der „kleinen Trockenzeit“ im August ist der Boden bis auf eine Tiefe > 150 cm auf > pF 4,2 ausgetrocknet. Die folgenden, wenig intensiven Regenfälle bis Anfang Oktober erreichten nur, daß schwer pflanzenverfügbares Wasser (pF 3,6–4,2) im Boden vorhanden war. Aber auch in der Hauptregenzeit war die Niederschlagszufuhr nie so kräftig, daß die Druckverteilung im ganzen Profil eine kräftige Abwärtsbewegung

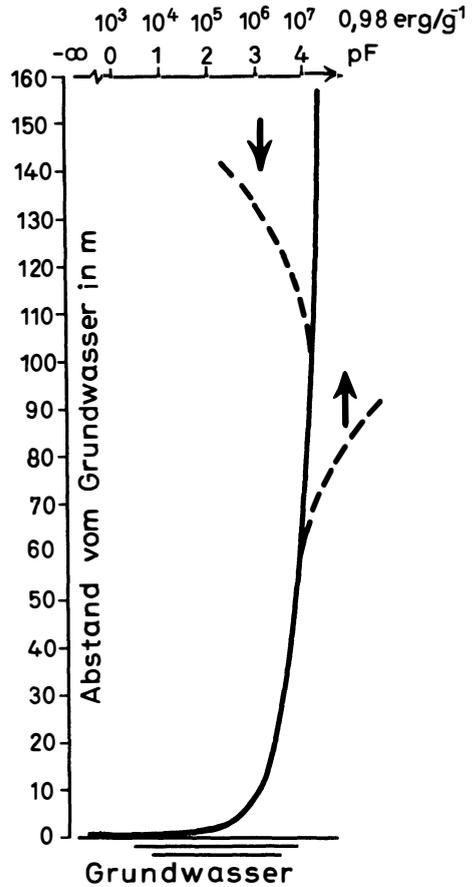


Abb. 6: Gleichgewichtsprofil des Saugdrucks (pF) und der Bodenwasserpotentiale (in erg/g) in einer abgeschlossenen Bodensäule über Grundwasser (ohne Lösungsdruck). Gerissene Linien: Abweichung vom Gleichgewichtsprofil. Die Pfeile geben die Richtung der bei sprechender Abweichung erfolgenden Wasserbewegung an.

Balance profile of moisture tension (pF) and groundwater potential (in erg/g) in a sealed soil column above ground water (without solution pressure). Pecked lines indicate deviation from the balance profile. The arrows give the direction of the water movements occurring with a specific deviation.

des Bodenwassers und somit eine Speisung des Grundwassers auslöste. Die Austrocknung von Dezember ab geschah dann sehr rasch, so daß von Januar ab der Boden über den Welkepunkt hin austrocknete und eine rechtsseitige Druckverschiebung vorherrschte. Während der Regenzeit trat kurzzeitig in 1,8 m Tiefe (nur in Abb. 2 dargestellt) Hanggrundwasser über dem Anstehenden auf, das aber wegen des Gefälles schnell in den Vorfluter abfloß, so daß die Vegetation aus diesem Vorrat während der Regenzeit nicht zehren konnte.

f) Tropischer immergrüner submontaner Wald  
(Abb. 3, C)

In diesem Walde werfen bis zu 20% des oberen (3.) dichten Stockwerkes die Blätter in der Trockenzeit ab, während andere nur einen Teil des Laubes abstoßen. Unter den laubwerfenden Bäumen fällt vor allem der Indio desnudo (*Bursera semaruba* SARG.) auf, dessen Häufigkeit mit der Trockenheit zunimmt. Viele Kräuter verwelken in der Trockenzeit. Unter den Bäumen sind am häufigsten *Bursera tomentosa* (JACQ.) Tr. u. Pl., *Byrsonima crassifolia* (L.) H. B. K., *Clusia* spp., *Sida* spp. und *Ficus* spp.

In dem Boden, der aus Granodioritzersatz besteht, entstand bei Saugdrücken  $< pF 2,5$  während der Regenzeit ständig eine kräftige Abwärtsbewegung. Im Vergleich zu dem vorher beschriebenen Isoplethendiagramm (halbimmergrüner Wald) ist die Zeit mit Saugdrücken  $< pF 4,2$  länger ausgedehnt. Trotz der Lage am Mittelhang tritt Ende Oktober über festerem Zersatz schon Stau ein. Ab Mitte Januar beginnen im Oberboden und sich nach unten fortsetzend schon Drucke von  $> pF 4,2$  aufzutreten, die eine Aufwärtsbewegung in Dampfphase bewirken, aber keine Wasseraufnahme durch die Pflanzen erlauben.

g) Montaner Feuchttropenwald (Abb. 3, B)

Die Bäume werden in diesem Vegetationsgürtel (800–1800 m) nicht über 35 m hoch. Der Unterwuchs ist nicht so dicht wie im Nebelwald, Epiphyten kommen noch häufig vor. Alle Bäume sind immergrün. Einige hygrophile Kräuter verwelken in der Trockenzeit. Im natürlichen Wald wie auf den Kaffeepflanzungen ist der Schattenbaum des Kaffees *Inga spuria* cf. (WILLD.) der Charakterbaum dieser Höhenstufe. Außerdem finden sich auf aufgelassenen Kaffeepflanzungen *Cecropia* spp. und *Hampea* spp. schnell ein. Häufig ist unter den Palmen *Dictyocaryum Schultzei* BURRET (ein Zeichen für starken anthropogenen Einfluß). Die Meßstelle befand sich in 1150 m Höhe in Mittelhanglage in schwach entwickeltem Boden aus Hanggrutschmaterial über kristallinem Schiefer.

Der charakteristische Unterschied zu den schon beschriebenen Isoplethendiagrammen ist, daß der Welkepunkt ( $> pF 4,2$ ) nicht erreicht wird. In der Regenzeit herrscht schnell dränendes Sickerwasser bei  $< pF 1,8$  vor. Nur zeitweilig, besonders in der Trockenzeit entstehen höhere Drucke zwischen  $pF > 2,5$ – $3,6$ ; das sind Drucke, bei denen einige hygrophile Kräuter offensichtlich schon Mühe haben, das Wasser aus dem Boden aufzunehmen. Zu dieser Zeit ist die Druckverteilung rechtsseitig verschoben, so daß sich das Wasser nach oben bewegt. Die rasche zeitliche Änderung der Bodenfeuchte – soweit sie nicht durch die kurze Zeitkoordinate scheinbar bedingt ist – (das gilt auch für einige andere Meßstellen der feuchteren Höhenstufen) kann mit einiger Vorsicht aus den guten Dräneigenschaften dieser Böden aus Zersatz und Grus der grobtexturierten kristallinen Gesteine erklärt werden. Die

rechtsseitige Druckverschiebung in der Trockenzeit wird vor allem durch die Pflanzen bewirkt, die ständig die Druckgradienten verschieben.

h) Nebelwald (Abb. 3, A)

In der Höhenstufe zwischen 1800 und 2800 m wächst im Bereich des Hauptwolkengürtels der immergrüne Nebelwald. An der Untergrenze werden die Bäume noch 15–25 m hoch, an der oberen Grenze jedoch nur noch 2–3 m. Die Bäume sind reich mit Epiphyten – an der oberen Grenze besonders mit Flechten bewachsen. Der Unterwuchs ist sehr dicht. Der auffallendste Baum ist die Palme *Ceroxylon Schultzei* BURRET. Nicht sehr häufig findet man die einzige heimische Konifere *Podocarpus oleifolius* DON.

Die Meßstelle befand sich unter Nebelwald in Böden aus Hanggrutschmaterial über kristallinem Schiefer am Mittelhang in 2100 m Höhe. In der Regenzeit sickert bei Drücken  $< pF 1,8$  ständig Sickerwasser durch das Profil, nur in der Trockenzeit steigen die Drucke leicht an auf  $pF 1,8$ – $2,5$ , wobei bei einer Hanggrundwassertiefe von 1,50 m zeitweise die Druckverteilung nach rechts verschoben ist, so daß eine leichte Aufwärtsbewegung stattfinden kann.

i) Páramo

Für das Höhenland über der Waldgrenze wurde auch für den nordwestlichen Bereich der Sierra Nevada der Begriff Páramo gewählt, obgleich dieses Höhenland nicht wie der weiter im Süden der Sierra vorkommende Páramo durch häufiges Auftreten von *Espeletia* spp. gekennzeichnet wird. Die sehr tiefe Waldgrenze liegt zwischen 2800 und 3000 m, was zum Teil durch das Abbrennen des Páramos und des angrenzenden Nebelwaldes durch die Indianer bedingt sein mag. Es kommen vor allem hohe Büschelgräser, Lupinen und Ericaceen vor. Diese Formation wurde nicht in das Profil aufgenommen. Wegen der schlechten Wegverhältnisse der nordwestlichen Sierra Nevada konnten nur wenige Saugdruckmessungen in flachgründigen podsoligen Böden unter Gras und tiefgründigen Rohböden aus Moränenmaterial durchgeführt werden. Diese Ergebnisse sind schematisch in Abb. 4 dargestellt. Bemerkenswert ist, daß im Gegensatz zum Nebelwald eine deutliche Phase mit Saugdrücken zwischen  $pF 2,5$  und  $pF 3,6$  im Januar und Februar auftrat.

9. Die Darstellung der Änderung der Wasserbindung im Boden mit der Höhe (Abb. 2)

In Anlehnung an A. RODE (1966: B 16) wurde der Gang der Potentialänderung in einfacher Form vom feuchtesten zum trockensten Zustand etwa im Zeitmaßstab dargestellt und in das Vegetationsprofil eingetragen. Anders als bei A. RODE wurde nach Schwellenwerten des Saugdruckes getrennt. Deutlich wird sofort die Zunahme der Zeit geringen Druckes mit der

Höhe und damit die Zunahme geringer Druckgradienten zwischen Oberboden und Unterboden. Diesen klimatisch bedingten Unterschieden ist in der Talaua des Rio Gaira ein Regime, das durch Grundwassereinfluß charakterisiert ist, eingeschoben.

Im einzelnen wurde der Gang der Druckänderung schon in Abschnitt 9, 1.–9. eingehend beschrieben.

#### Schrifttum

- BENECKE, P. u. K. H. HARTGE: Wasserspannungsgradienten in einem Schluff und in einem Sandboden. *Wasser und Boden*, 20 (1968) 18–21.
- BOLT, G., A. JANSE und F. KOENIGS: *Allgemeine Bodenkunde*. Wageningen (1965) 1–118.
- BRYSON, R. A. und P. M. KUHN: Stress-differential Induced Divergence with Application to Littoral Precipitation. *Erdkunde*, 15 (1961) 287–294.
- BUCKINGHAM, E.: Studies on the movement on soil moisture. U.S. Departm. Agric. Bur. of Soils, Bull. 38 (1907), zit. n. L. A. RICHARDS (a.a.O.).
- COWAN, J. R. u. F. L. MILTHORPE: Physiological responses in relation to the environment within the plant cover. In: Unesco, Natural Resources Research V, Proceedings of the Copenhagen Symposium: Functioning of terrestrial ecosystems at the primary production level. Paris (1968) 107–130.
- ELLENBERG, H. u. D. MUELLER-DOMBOIS: Tentative physiognomic-ecological classification of plant formations of the earth. *Ber. Geobot. Inst. ETH Zürich*, 37 (1965/66) 21–55.
- GRADMANN, H.: Über die Messung von Bodensaugwerten. *Jb. Wiss. Bot.*, 80 (1934) 92–111.
- HASTENRATH, S.: Rainfall Distribution and Regime in Central America. *Archiv Meteor. Geophys. Bioklimat.*, B, 15 (1967) 201–241.
- HERRMANN, R.: Deutungsversuch der Entstehung der „Brisa“, eines föhnartigen Fallwindes der nordwestlichen Sierra Nevada de Santa Marta, Kolumbien. *Mitt. Inst. Colombo-Alemán Invest. Cient.*, 4 (1970) 83–95.
- HOLDRIGE, L. R.: Determination of World Plant Formation from Simple Climatic Data. *Science*, 105 (1947) 367–368.
- KIRKHAM, DON: Soil Physics, in: Ven Te Chow (Hrsg.): *Handbook of Applied Hydrology*. New York (1964) 5.9–5.19.
- KLAUSING, O.: Untersuchungen über Vegetation und Wasserhaushalt am Volcan de San Salvador. *Ber. dt. Bot. Ges.* 71 (1958) 439–452.
- Wasserzustand und Wasserbilanz von Vegetation und Boden an Standorten bestimmter Pflanzengesellschaften des Mittelwesergebietes. *Angewandte Pflanzensoziologie*, 18 (1961) 1–255.
- KREBB, R.: Ökologische Grundlagen der Bewässerungskulturen in den Subtropen. Stuttgart (1964) 1–149.
- LAHEY, F.: On the Origin of the Dry Climate in Northern South America and the Southern Caribbean. *Dept. Meteor. Univ. Wisconsin, Sci. Rep.*, 10 (1958) 1–290.
- LAUER, W.: Klimatische und pflanzengeographische Grundzüge Zentralamerikas. *Erdkunde*, 13 (1959) 344–354.
- LINSLEY, R. K., M. KOHLER and J. PAULHUS: *Applied Hydrology*. New York (1949) 1–689.
- MARSHALL, T. J.: Relations between water and soil. *Commonwealth Bur. Soils, Tech. Commun.*, 50 (1959) 1–91.
- MICHLER, R. u. R. HERRMANN: Untersuchungen über die Beziehungen zwischen der Wasserspannung im Boden und der Geschwindigkeit des Wassertransportes im Stamm von *Citrus aurantium sinensis* Engler unter Bedingungen eines trockenen Tropenklimas. *Mitt. Inst. Colombo-Alemán Invest. Cient.* 2 (1968) 19–27.
- NEEF, E.: Der Bodenwasserhaushalt als ökologischer Faktor. *Ber. dt. Landeskde*, 25 (1960) 272–282.
- NEEF, E., G. SCHMIDT u. M. LAUCKNER: Landschaftsökologische Untersuchungen an verschiedenen Physiotopten in Nordwestsachsen. *Abh. Sächs. Akad. Wiss. Leipzig. Mathem.-naturwiss. Klasse* 47, 1 (1961) 7–113.
- MCQUEEN, J. S. und R. F. MILLER: Calibration and Evaluation of a Wide Range Method for Measuring Moisture Stress in Field Soil Samples. *Symposium on water in the saturated zone*. Wageningen (1966) Ia. 10, 1–11.
- PENMAN, H. L.: The Role of Vegetation in Soil Water Problems. *Symposium on water in the unsaturated zone*. Wageningen (1966) C, 1–12.
- PÉREZ, C. A.: Estudio ecológico para el manejo de las cuencas de los rios Gaira y Manzanares de la Sierra Nevada de Santa Marta. *Revista Acodal*, 15 (1962) 1–71.
- RICHARDS, L. A.: Physical Condition of Water in Soil, in: C. A. Black (Hrsg.): *Methods in Soil Analysis*. Madison (1965) I, 128–152.
- RICHARDS, S. J.: Soil Suction Measurements with Tensiometers, in: C. A. Black (Hrsg.): *Methods in Soil Analysis*. Madison (1965) I, 153–163.
- RIJTEMA, P. E.: Evapotranspiration in relation to suction and capillary conductivity. *Arid Zone Research, Unesco: Plant-Water Relationships in Arid and Semi-Arid Conditions. Proceedings of the Madrid Symposium*. Paris (1959) 99–106.
- RODE, A.: Hydrophysical Properties and Moisture Regime in the Unsaturated Zone. *Symposium on water in the unsaturated zone*. Wageningen (1966) B, 1–14.
- *Das Wasser im Boden*. Berlin (1959) 1–464.
- SCHIEFFER-SCHACHTSCHABEL: *Lehrbuch der Agrikulturchemie und Bodenkunde*, 1. Teil Bodenkunde. Stuttgart (1960) 1–332.
- SCHLICHTING, E. u. H.-P. BLUME: *Bodenkundliches Praktikum*. Hamburg u. Berlin (1966) 1–209.
- SCHNETTER, R.: Die Vegetation des Cerro San Fernando und des Cerro La Llorona im Trockengebiet bei Santa Marta, Kolumbien. *Ber. dt. Bot. Ges.* 81 (1969) 289–302.
- SCHOFIELD, R. K.: The pF of the Water in Soil. *Trans. 3rd Intern. Congr. Soil Sci.*, 2 (1935) 37–48.
- SLATYER, R. O.: Hydrology of Arid and Semiarid Regions, in: Ven Te Chow (Hrsg.): *Handbook of Applied Hydrology*. New York (1964) 24. 1–46.
- STOCKER, O.: Physiological and morphological changes in plants due to water deficiency, in: *Plant-water Relationships in Arid and Semi-arid Conditions*. Unesco, Switzerland (1960) 63–104.
- Über die Messung von Bodensaugkräften und ihrem Verhältnis zu den Wurzelsaugkräften. *Z. Bot.*, 23 (1930) 27–56.

- TROLL, C.: Ökologische Landschaftsforschung und vergleichende Hochgebirgsforschung. *Erdkundliches Wissen*, 11 (1966) 1–361.
- Landschaftsökologie, in: Pflanzensoziologie und Landschaftsökologie. Bericht über das internationale Symposium in Stolzenau 1963 der Internationalen Vereinigung für Vegetationskunde. Hrsg. v. R. Tüxen. Den Haag (1968) 1–21.
- VAN BAVEL, S. H. M.: The Three-Phase Domain in Hydrology. Symposium on water in the unsaturated zone. Wageningen (1966) A, 1–9.
- UHLIG, H.: Die Sierra Nevada de Santa Marta (Kolumbien). *Natur und Museum*, 96 (1966) 50–59 (mit ausführlichem landeskdl. Schr.-Verz.).
- VEIHMEYER, F. J.: Soil moisture, in: W. RUHLAND (Hrsg.): *Handbuch der Pflanzenphysiologie*. New York (1956) III, 64–117.
- VISSER, W. C.: The Moisture Consumption of Plants Described as a Hydrological Phenomenon. *Inst. Land. Water Managem. Research. Wageningen, Techn. Bull.* 40 (1965) 257–267.
- WALTER, H.: Einführung in die Phytologie, III: Grundlagen der Pflanzenverbreitung, 1. Teil: Standortlehre. Stuttgart (1960) 1–566.
- WEISCHET, W.: Der tropisch-konvektive und der außertropisch advektive Typ der vertikalen Niederschlagsverteilung. *Erdkunde*, 19 (1965) 6–14.

## BEOBACHTUNGEN ZUR KLIMA-MORPHOLOGISCHEN HÖHENSTUFUNG DER CORDILLERA REAL (BOLIVIEN)

Mit 8 Photos und 4 Tabellen

STEFAN HASTENRATH

*Summary:* Observations on the climate-morphological altitudinal gradations of the Cordillera Real (Bolivia)

Field observations taken during travel through the Cordillera Real in June 1969 are evaluated in conjunction with meteorological data and air photographs. The temperature field in the free atmosphere over the Altiplano and the Cordillera Real is examined on the basis of radiosonde ascents and surface measurements. Turf exfoliations occur from about 4,400 m upward, which is somewhat above the 0°C level of mean minimum temperature. A belt of bound solifluction with turf garlands, etc., extends from here to about 5,000 m, where the grass cover terminates abruptly. This is considered the lower limit of the belt of free solifluction, comprising stone stripes, stone nets, polygon soils, and stone packings. Its upper limit is given by the snow line in about 5,400 m. Penitentes are a characteristic form of ablation here.

Auf einer Reise durch Bolivien im Juni 1969 ergab sich die Gelegenheit, vor allem zwei Gebiete der Cordillera Real zu besuchen. In der Region des Chacaltaya und Huayna Potosí, nordöstlich von La Paz, wurden Höhen um 5400 m erreicht. Ein West-Ost-Profil führte von La Paz (3700 m) über den 4700 m hohen Paß „La Cumbre“ quer durch die Kordillere hinunter bis Caranavi (650 m) in der Tiefebene des Oriente. Auf diesen Wanderungen wurden fortlaufend morphologische und Vegetationsbeobachtungen angestellt; dabei wurde ein Aneroid-Höhenmesser benutzt, der regelmäßig an Orte bekannter Meereshöhe angeschlossen wurde. Die Feldbeobachtungen wurden in Zusammenhang mit den verfügbaren meteorologischen Daten und Luftaufnahmen ausgewertet. Über die Ergebnisse soll in der vorliegenden Mitteilung berichtet werden.

An dieser Stelle möchte ich den folgenden bolivianischen Institutionen für ihre freundliche Unterstützung danken: Laboratorio de Física Cósmica (Universidad Mayor de San Andrés), Instituto Geográfico Militar, Servicio de Meteorología e Hidrología, Servicio Geológico Nacional.

nischen Institutionen für ihre freundliche Unterstützung danken: Laboratorio de Física Cósmica (Universidad Mayor de San Andrés), Instituto Geográfico Militar, Servicio de Meteorología e Hidrología, Servicio Geológico Nacional.

### 1. Temperaturverhältnisse

Der Bolivianisch-Peruanische Altiplano und die ihn umrahmenden Kordilleren bilden eine der größten Massenerhebungen der Erde. Das Temperaturfeld in der freien Atmosphäre über dem Gebirge und nahe der Erdoberfläche ist daher gerade hier von besonderem Interesse.

Eine repräsentative Vertikalabstufung ist mit den mehrjährig arbeitenden Stationen Irupana (1848 m) in den Yungas, La Paz (3632 m), El Alto (4103 m) am Rande des Talkessels von La Paz, und dem Observatorium am Chacaltaya in 5280 m gegeben (Servicio de Meteorología e Hidrología, früher Dirección General de Meteorología, 1956–1966). 1955–1964 ist die längste für die drei höheren Stationen gleichzeitige und nahezu vollständige Meßperiode. Danach wurden die Temperaturmessungen am Chacaltaya eingestellt. Die Meßreihe für Irupana beginnt erst 1959. Die Beobachtungen wurden über den ganzen Zeitraum 1955–1964 gemittelt, und zwar zunächst getrennt für die Halbjahre Mai–Oktober (Winter) und November–April (Sommer). Das aus den 8, 12, 14, und 18 Uhr-Terminen gewonnene Tagesmittel ist in Tabelle 1 aufgeführt, zusammen mit den mittleren Minimum- und Maximumtemperaturen; außerdem sind die absoluten Extreme während der gesamten Beobachtungsperiode wiedergegeben.