

Untersuchungen zum Standortklima im Trockengebiet von Santa Marta, Kolumbien

Von

REINHARD SCHNETTER

Mit 20 Abbildungen und 3 Tabellen

Resumen

Durante los años 1965 a 1967 se realizaron estudios micrometeorológicos en la región xerofítica de Santa Marta. Las condiciones meteorológicas durante el tiempo de las investigaciones están descritas por los datos sobre las temperaturas y las precipitaciones, por los climatogramas y por un diagrama de la economía hídrica del suelo de 1966. La temperatura promedio del año 1966 fué 27,7° C, las precipitaciones oscilaron entre 378 y 750 milímetros anuales. En el suelo hay carencia de agua durante la mayor parte del año. Los estudios micrometeorológicos se llevaron a cabo en dos sitios, uno situado en un cardonal y el otro en la región de un bosque de galería. Los cardonales y las regiones del bosque de galería forman dos extremos respecto a la economía hídrica de la vegetación. Por la capa vegetal más cerrada y las mejores condiciones edáficas y orográficas, el microclima en el bosque de galería tiene una tendencia menor a situaciones extremas que el mismo en el cardonal. Se comunican numerosos datos sobre las temperaturas y la humedad del aire, las velocidades de las brisas y la evaporación, dependientes tanto de las estaciones del año como del nivel sobre el suelo.

Zusammenfassung

Im Trockengebiet bei Santa Marta wurden 1965—1967 mikrometeorologische Untersuchungen durchgeführt. Die meteorologischen Verhältnisse während des Untersuchungszeitraumes werden durch Temperatur- und Niederschlagsdaten, Klimatogramme und ein Wasserhaushaltsdiagramm für 1966 beschrieben. Die Jahresdurchschnittstemperatur betrug 1966 27,7° C, die jährlichen Niederschläge schwankten zwischen 378 und 750 mm. Während des größten Teils des Jahres herrscht im Boden Wassermangel. Mikrometeorologische Untersuchungen wurden an je einer Stelle in einem Kakteendorngewächs und an einem Auwaldstandort durchgeführt, die bezüglich des Wasserhaushaltes zwei Extreme darstellen. Durch die geschlossenere Vegetationsdecke und günstigere edaphische und orographische Verhältnisse neigt das Mikroklima am Auwaldstandort weniger leicht zu Extremen als das im Kakteendorngewächs. Zahlreiche Angaben über Lufttemperaturen, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeiten und Evaporation in Abhängigkeit von Jahreszeit und der Höhe über dem Erdboden werden mitgeteilt.

Der Charakter von Flora und Fauna eines Gebietes wird in entscheidendem Maße von den örtlichen klimatischen und mikroklimatischen Verhältnissen bestimmt. Die in zwei Meter Höhe über dem Boden aufgestellten meteorologischen Hütten dienen der Untersuchung des Makroklimas. In diesen standardisierten Hütten sind die Meßgeräte gegenüber Einflüssen, die durch lokale Eigenschaften des Bodens und der Vegetation hervorgerufen werden, weitgehend abgeschirmt.

Mit dem Klima in Bodennähe und seiner Abhängigkeit von einer Vielzahl örtlicher Besonderheiten befaßt sich die Mikroklimatologie, die sich in unserem Jahrhundert zu einer selbständigen Wissenschaft entwickelt hat (vgl. R. GEIGER 1961, D. BERÉNYI 1967), an deren Ergebnissen der Ökologe besonders interessiert ist, da die für die Lebensprozesse von Pflanzen und Tieren wichtigen standortsklimatischen Faktoren erheblich von denen des Makroklimas abweichen können.

Aus der Umgebung von Santa Marta und, soweit aus der Literatur zu ersehen war, auch von anderen Trockengebieten ähnlichen Charakters im nördlichen Südamerika, liegen noch keine mikrometeorologischen Untersuchungen vor. Daher wurden an zwei ausgewählten Untersuchungsplätzen im Trockengebiet von Santa Marta (vgl. Abb. 1) stichprobenartig mikrometeorologische Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse hier nach einer kurzen Beschreibung des Makroklimas mitgeteilt werden sollen.

Das Klima bei Santa Marta

Langfristige klimatologische Beobachtungsreihen, die eigentlich die Grundlage jeder Betrachtung der klimatischen Verhältnisse eines Gebietes bilden sollten, liegen leider von den meisten Teilen Kolumbiens noch nicht vor. Ein gut ausgebautes meteorologisches Netz fehlt. Von einigen privaten oder staatlichen Institutionen durchgeführte Beobachtungen umfassen häufig nur wenige Jahre. Nicht selten sind die spärlichen zur Verfügung stehenden Daten wegen des Fehlens geeigneten Personals zur Betreuung der Meßinstrumente wenig zuverlässig. Daher werden die auf solchen Werten basierenden Karten der Niederschlags- und Temperaturverhältnisse von Kolumbien (R. D. SCHMIDT 1952, R. SCHRÖDER 1952, Banco de la República 1959) zweifellos noch einige Korrekturen erfahren müssen, wenn einmal mehr Beobachtungsmaterial vorliegen wird. Für Santa Marta stimmen die Angaben von SCHMIDT (1952) und SCHRÖDER (1952) mit Meßergebnissen aus den Jahren 1965 bis 1967 überein. Diese an der Station „Instituto Colombo-Alemán“ gesammelten Daten bilden die Grundlage der folgenden kurzen Betrachtung der klimatischen Gegebenheiten bei Santa Marta. Da sich diese Beobachtungen nur auf einen Zeitraum von knapp drei Jahren beziehen, kann daraus ebenfalls noch kein endgültiges Bild des Klimas bei Santa Marta abgeleitet werden.

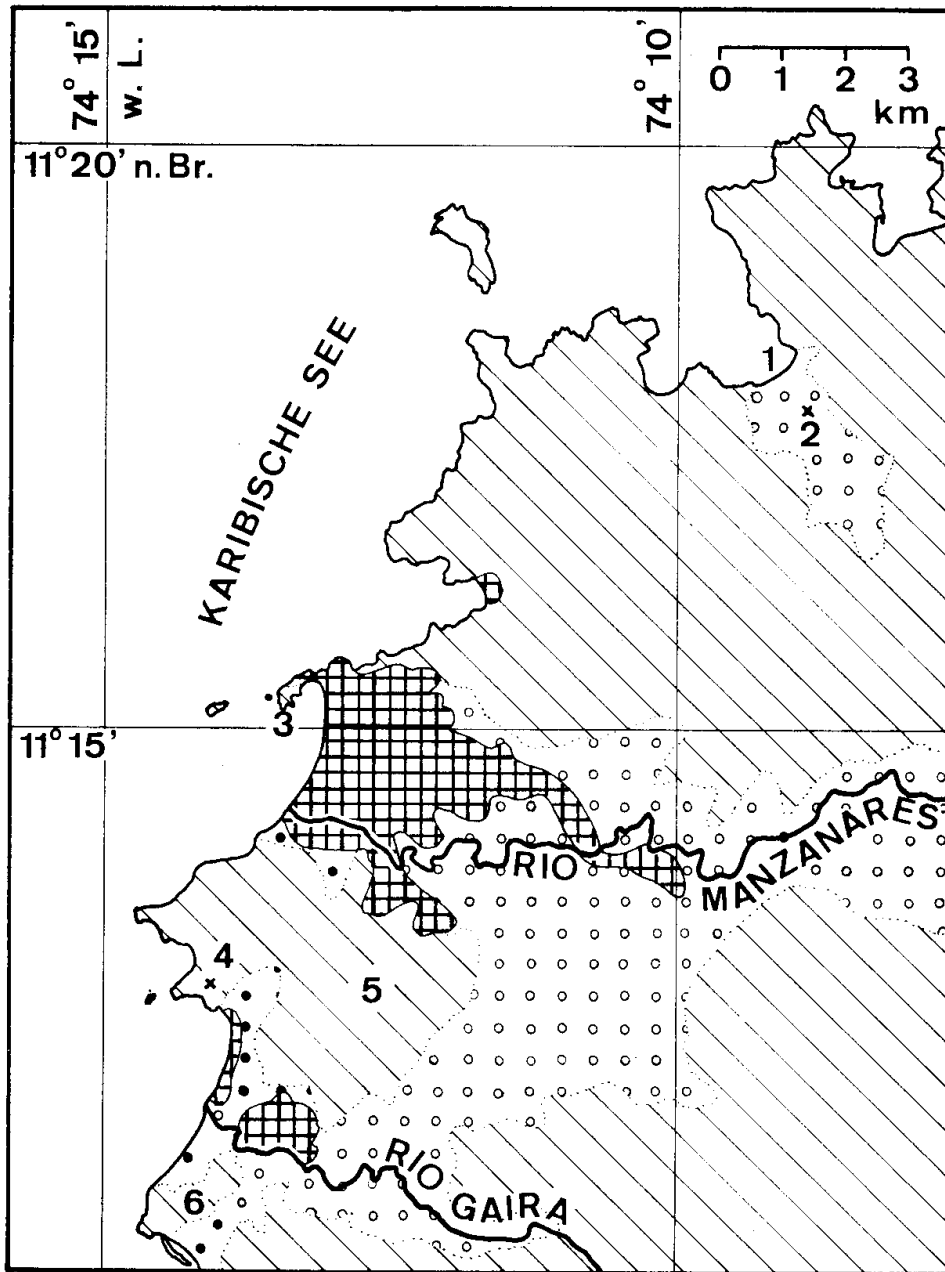


Abb. 1. Lage des Untersuchungsgebietes. Gekreuzt: Siedlungen; schraffiert: bergiges Land; nicht ausgefüllte Kreise: Niederungen mit nicht oder nur schwach versalzten Böden; ausgefüllte Kreise: Niederungen mit stärker versalzten Böden. 1 = Ensenada de Concha; 2 = Auwaldstandorte in der Schwemmebene der Quebrada de Concha, Untersuchungsplatz bei x; 3 = Halbinsel Punta de Betín; 4 = Cerro San Fernando, Untersuchungsplatz im Kakteendorngehölz bei x; 5 = Cerro La Llorona; 6 = Cerro La Gloria.

Das Trockengebiet bei Santa Marta bildet einen Teil des Trockengürtels im nördlichen Südamerika. Der kolumbianische Anteil an diesem Gürtel erstreckt sich von der Guajira-Halbinsel parallel zur Küste der Karibischen See nach Südwesten. Er nimmt je nach den geographischen Gegebenheiten einen mehr oder weniger breiten Teil des Küstenhinterlandes ein. Die trockensten Gebiete stellen die nordöstlichen Teile der Guajira-Halbinsel dar, die halbwüstenartigen Charakter besitzen. Nach Westen zu übersteigen die jährlichen Niederschlagssummen etwa ab Cartagena 1000 mm. An den Nordabhängen der Sierra Nevada de Santa Marta ist der Trockengürtel durch etwas niederschlagsreichere Gebiete unterbrochen. Westlich dieses etwas feuchteren Abschnittes stellt das Trockengebiet um Santa Marta die Zone mit den geringsten Niederschlägen dar. Den trockensten Kern bildet der Küstenstreifen zwischen der Halbinsel Punta de Betín und dem Cerro La Gloria (Abb. 1: Nr. 3 und 6). Weiter nach Süden, Norden und besonders zum Landesinneren hin nehmen die Niederschlagsmengen zu; dies ist an der Vegetation der betreffenden Gebiete unschwer zu erkennen.

Die Ergebnisse der Niederschlagsmessungen an der meteorologischen Station des Instituto Colombo-Alemán (Halbinsel Punta de Betín, 25 m Seehöhe) aus den Jahren 1965, 1966 und 1967 sind in Abbildung 2 wiedergegeben. Schon die aus diesen drei Jahren vorliegenden Beobachtungen zeigen deutlich, daß die jährlichen Niederschlagssummen starken Schwankungen unterworfen sind. So fielen 1965 420 mm Niederschlag, 1966 750 mm und 1967 378 mm. Die durchschnittliche jährliche Niederschlagsmenge in dem Gebiet um Santa Marta dürfte 500 bis 600 mm betragen.

Neben der Niederschlagsmenge ist auch die jährliche Verteilung der Regenfälle für die Vegetationsentwicklung von Bedeutung. Über das Niederschlagsregime im karibischen Raum schreibt S. L. HASTENRATH (1967; vgl. auch HASTENRATH 1968): „Jahreszeitliche Zirkulationsschwankungen auf der Westflanke der Nordatlantischen Hochdruckzelle sind verbunden mit aufsteigender Bewegung über dem Karibischen Meer während des Sommerhalbjahres, mit einem sekundären Minimum im Hochsommer; von November an wird die Aufwärtsbewegung geringer, und ein starkes Absinken entwickelt sich gegen Ende des Winterhalbjahres...“. Diese Feststellung charakterisiert auch die grundsätzliche Situation der Niederschlagsverhältnisse für das nördliche Kolumbien, wenn man berücksichtigt, daß Niederschläge bei aufsteigender Luftbewegung zu erwarten sind, Trockenheit dagegen bei absteigender.

Das Klima bei Santa Marta ist durch eine strenge Trockenzeit gekennzeichnet, die Anfang bis Mitte Dezember einsetzt und bis Ende April/Mitte Mai andauert. Die danach beginnende Regenzeit wird noch einmal von einer kürzeren und oft weniger ausgeprägten Trockenzeit, dem „Veranillo de San Juan“, im Juli/Anfang August unterbrochen.

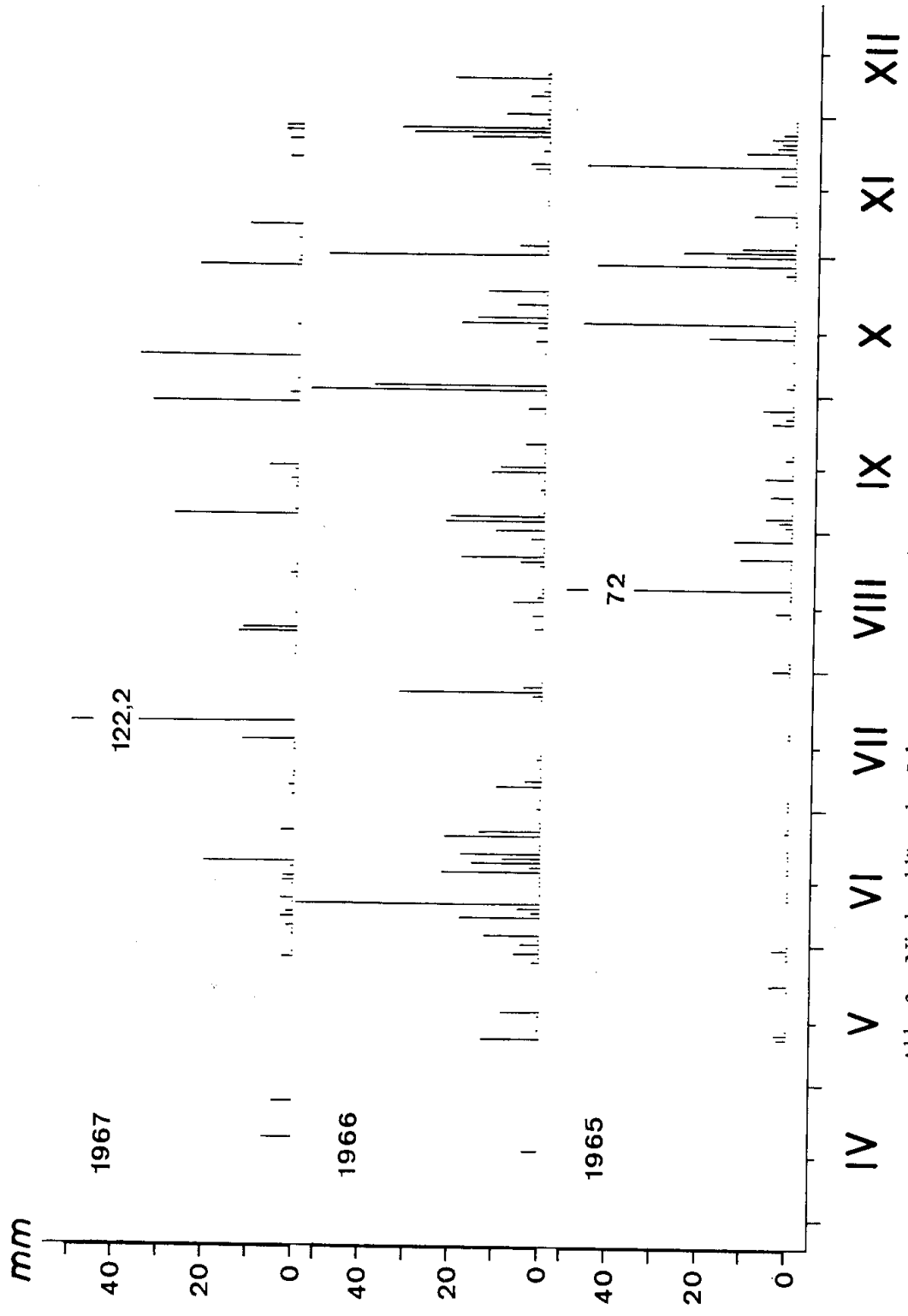


Abb. 2. Niederschläge der Jahre 1965—1967 auf der Halbinsel Punta de Betín.

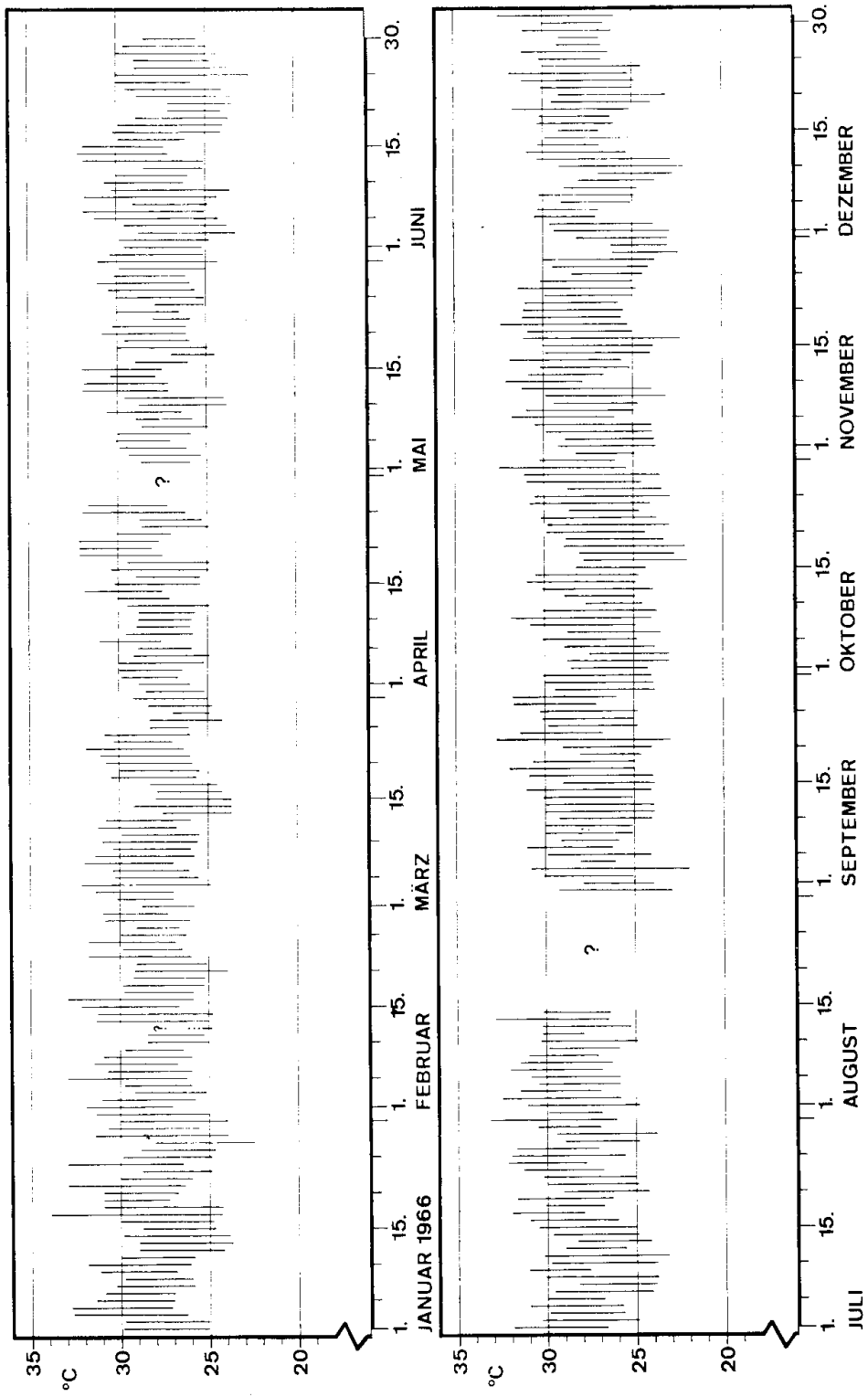


Abb. 3. Tägliche Temperaturschwankungen im Jahr 1966, nach Beobachtungen an der Wetterstation des Instituto Colombiano Alemán, Halbinsel Punta de Betín.

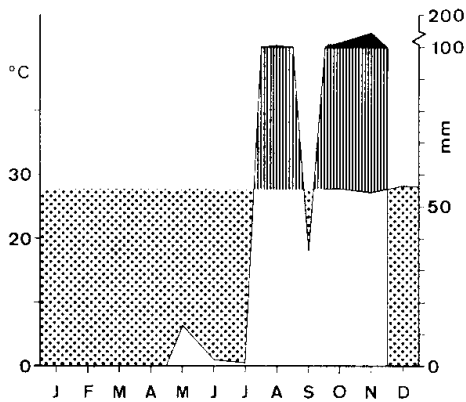


Abb. 4. Klimatogramm für das Jahr 1965. Monatssummen der Niederschläge in mm.

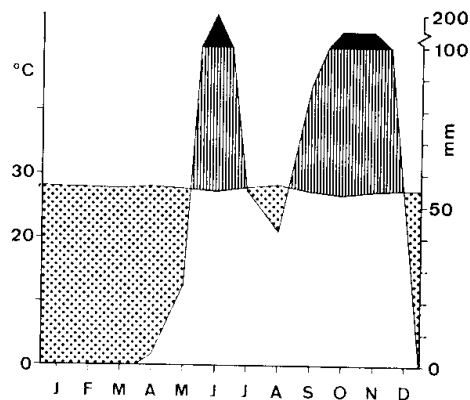


Abb. 5. Klimatogramm für das Jahr 1966.

1967 war das regenärmste der drei Beobachtungsjahre; besonders die zweite Hälfte der Regenzeit, in der gewöhnlich die meisten Niederschläge fallen, war sehr trocken (vgl. Abb. 2 und 4—7). Diese Verhältnisse müssen jedoch schon als Ausnahme angesehen werden. Die Vegetation des Cerro San Fernando (Abb. 1: Nr. 4) zeigte bereits im August starke Trockenschäden, und einige Gehölze, wie z. B. *Diphyssa carthagenensis* JACQ., hatten ihre Blätter abgeworfen. Der Laubfall tritt sonst erst ab Dezember ein.

Der Jahresgang der Lufttemperaturen ist sehr gleichmäßig. Die täglichen Minima und Maxima von 1966 sind in Abbildung 3 dargestellt. Für das Jahr 1966 wurde daraus eine Durchschnittstemperatur von 27,7° C errechnet. Die Mittel der einzelnen Monate betragen:

Januar	28,0° C	Juli	28,0° C
Februar	28,0° C	August (1.—14. und 31.)	28,5° C
März	27,7° C	September	27,4° C
April	28,1° C	Oktober	26,8° C
Mai	27,8° C	November	27,3° C
Juni	28,0° C	Dezember	27,6° C

Die Abweichungen der Monatsmittel vom Jahresmittel sind gering. Sie betragen 1966 maximal $-0,9$ und $+0,8^{\circ}$ C. Wegen dieser geringen Abweichungen erschien es zulässig, in den Klimatogrammen der Jahre 1965 und 1967 (Abb. 4 und 6) für die Monate, deren Temperaturmittel nicht vorliegen, jeweils das Jahresmittel von 1966 einzusetzen; in diesen Fällen wurde die Temperaturkurve nicht gezeichnet. 1966 überstiegen die täglichen Temperaturschwankungen nie 10° C. Das absolute Minimum betrug $22,1^{\circ}$ C (18. Oktober, 10. Dezember), das absolute Maximum

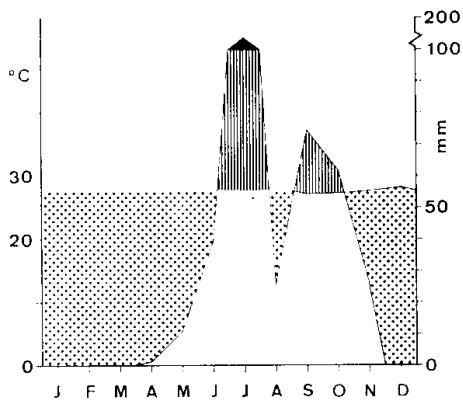


Abb. 6. Klimatogramm für das Jahr 1967.

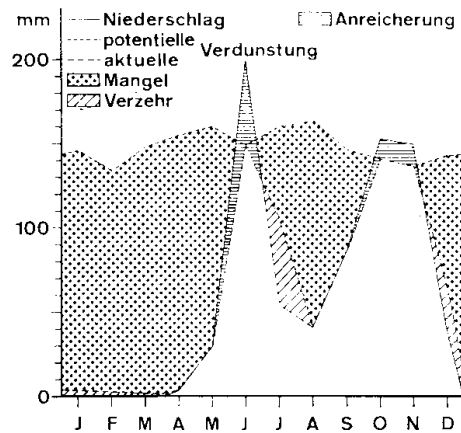


Abb. 7. Wasserhaushaltsdiagramm für das Jahr 1966. Wasserkapazität des Bodens: 50 mm Niederschlagshöhe oder mehr

33,2°C (31. Juli). A. DUGAND (1941) berichtet, daß in Barranquilla während einer 23jährigen Beobachtungsperiode die Extreme 17,5°C und 38°C betragen. Barranquilla liegt etwa 100 km westlich von Santa Marta an der Küste.

Die aus den Jahren 1965 bis 1967 verfügbaren Beobachtungsergebnisse von Temperatur und Niederschlag wurden zur Entwicklung von Klimatogrammen (H. WALTER 1960) und einem Wasserhaushaltsdiagramm nach THORNTHWAITE (C. W. THORNTHWAITE & J. R. MATHER 1957) verwendet (Abb. 4—7). Bei dem Wasserhaushaltsdiagramm wurde eine Bodenwasserkapazität von 50 mm oder mehr angenommen. Diese Annahme dürfte für die Niederungen bei Santa Marta im allgemeinen zutreffen. Die zeitliche Verteilung von Regen- und Trockenzeiten ist aus den Abbildungen klar zu erkennen. Wie aus dem Wasserhaushaltsdiagramm nach THORNTHWAITE (Abb. 7) abzulesen ist, herrschte in dem feuchteren Jahr 1966 nur an drei Monaten (Juni, Oktober und November) kein Wassermangel. Die in den Diagrammen wiedergegebenen Verhältnisse beruhen auf Monatsmittelwerten und stellen das überhaupt mögliche Optimum der Wasserversorgung bei den jeweiligen Monatssummen der Niederschläge dar. Zwei sehr wesentliche Faktoren sind in den Schemata jedoch nicht berücksichtigt worden: die Einflüsse der Hangneigung und die Tatsache, daß wesentliche Anteile der Niederschläge als Starkregen fallen. Häufig dauern diese wolkenbruchartigen Regenfälle nur kurze Zeit an, und Wasser, welches nicht sofort in den Boden eindringen kann, läuft auf geneigtem Gelände oberflächlich ab. Weiterhin übersteigt bei manchen Starkregen die Regenmenge die Wasserkapazität der geringmächtigen Erdauflagen auf den meist aus Phylliten bestehenden Erhebungen bei Santa Marta. Die Anteile der in Starkregen fallen-

den Wassermengen an den jährlichen Niederschlagssummen können recht erheblich sein, wie die folgende Aufstellung zeigt:

Anteile von Regenfällen mit über 20 mm und über 10 mm Niederschlag in 24 Stunden an der jährlichen Niederschlagssumme

Jahr	Niederschlags- summe	Summe täglicher Niederschläge von über	
		20 mm	10 mm
		Regenhöhe und deren Anteil am Gesamtniederschlag	
1965	420 mm	247 mm (59 0/0)	313 mm (75 0/0)
1966	750 mm	397 mm (53 0/0)	615 mm (82 0/0)
1967	376 mm	261 mm (69 0/0)	309 mm (82 0/0)

Während des in Abbildung 6 feucht erscheinenden Monats Juli 1967 fielen von insgesamt 136 mm Niederschlag 122,2 mm an einem Tag (vgl. Abb. 2). Je nach den örtlichen orographischen und edaphischen Verhältnissen (Hangneigung, Bodenmächtigkeit) können durch die hohen Anteile der Starkregenfälle am Gesamtniederschlag die der Vegetation zur Verfügung stehenden Wassermengen wesentlich geringer sein als die Niederschlagsmengen vermuten lassen.

Um einen Anhaltspunkt für den tatsächlichen oberflächlichen Abfluß bei Starkregenfällen zu gewinnen, wurde auf einem um 40° geneigten Hang eine etwa 1/4 m² große Fläche mit Blechstreifen gegen die Umgebung abgegrenzt und das oberflächlich ablaufende Wasser in einem Kanister aufgefangen. Bei Niederschlägen geringer Ergiebigkeit (bis 6,5 mm) war kein Abfluß festzustellen. Während eines Regenfalles mit 32,8 mm Regenhöhe dagegen flossen 55 0/0 des Wassers oberflächlich ab. Hangneigungen von 40° sind in den Erhebungen nahe Santa Marta verbreitet.

Einen wesentlichen Einfluß auf die Vegetation haben aus ostnord-östlicher Richtung wehende Winde (R. SCHNETTER 1968), die, bedingt durch die Sierra Nevada de Santa Marta, als böige und trockene Fallwinde auftreten. Ihre relative Luftfeuchte kann weniger als 40 0/0 betragen. Diese Winde haben zwei Ursachen: den Passat und den abendlichen, aus gleicher Richtung wehenden Land-See-Wind. Besonders während der Trockenzeit macht sich der Passat stark bemerkbar; er überlagert dann den Land-See-Wind. Durch den antagonistisch wirkenden See-Land-Wind wird die Geschwindigkeit der östlichen Winde mittags oft vermindert. Die Windrichtung kann dann sogar umgekehrt werden. Die Luftbewegung während der Regenzeit ist allgemein geringer als in der Trockenzeit und die Windrichtung wechselnd. In niederschlagsreichen Zeitabschnitten weht der Wind bevorzugt aus westlichen Richtungen; dagegen treten in trockeneren Perioden abends gehäuft kräftige Land-See-Winde auf. Eine ausführliche Deutung der

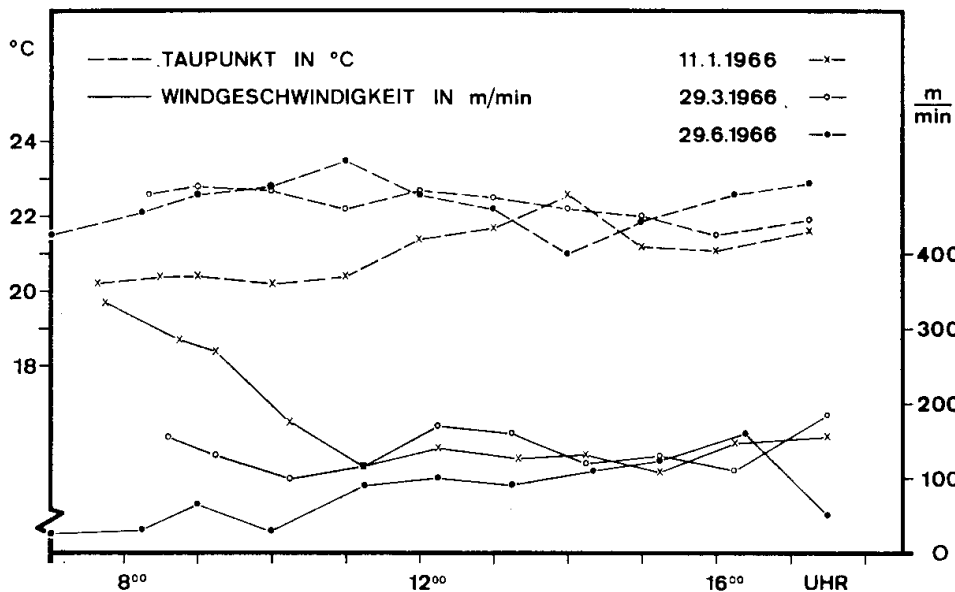


Abb. 8. Tagesgänge des Taupunktes bei geringen Änderungen der Windgeschwindigkeit (gemessen am Untersuchungsplatz „Kakteendorngehölz“).

Windverhältnisse bei Santa Marta gibt R. HERRMANN (1970). Je nach Windrichtung sind die herangeführten Luftmassen feuchter oder trockener. Durch einen Wechsel der Windrichtung können starke plötzliche Schwankungen der Luftfeuchtigkeit auftreten. Aus östlichen Richtungen wehende Winde tragen trockene, die vom Meer her wehenden westlichen Winde feuchte Luftmassen heran.

Die Tagesgänge der Luftfeuchte lassen sich in zwei Typen unterscheiden. Bei dem einen Typ sind relativ geringe Luftfeuchteschwankungen mit ziemlich konstanten Windgeschwindigkeiten und Winden aus gleicher Richtung verbunden. Derartige Verhältnisse sind in Abbildung 8 wiedergegeben. Die Ergebnisse wurden an zwei Tagen der Trockenzeit (11. 1. 1966, 29. 3. 1966) und an einem Regentag (29. 6. 1966) ermittelt. Am 11. 1. 1966 war allerdings am Vormittag bei erhöhter Windgeschwindigkeit eine verminderte Luftfeuchtigkeit festzustellen. Während der Trockenzeit findet man sehr häufig einen zweiten Typ, bei dem um die Mittagszeit eine Verminderung der Stärke der östlichen Winde oder sogar eine Umkehrung der Windrichtung durch den Einfluß der See-Land- und Tal-Berg-Winde eintritt, wodurch feuchte Luftmassen herangeführt werden. Abbildung 9 verdeutlicht derartige Verhältnisse. Hier sind die Meßergebnisse von drei Tagen der Trockenzeit 1965/66 dargestellt, an denen am späten Vormittag der Taupunkt durch herangetragene feuchtere Luft anstieg. Im weiteren Tagesverlauf kam es dann später bei wieder zunehmender Windgeschwindigkeit zu einer Erniedrigung des Taupunktes.

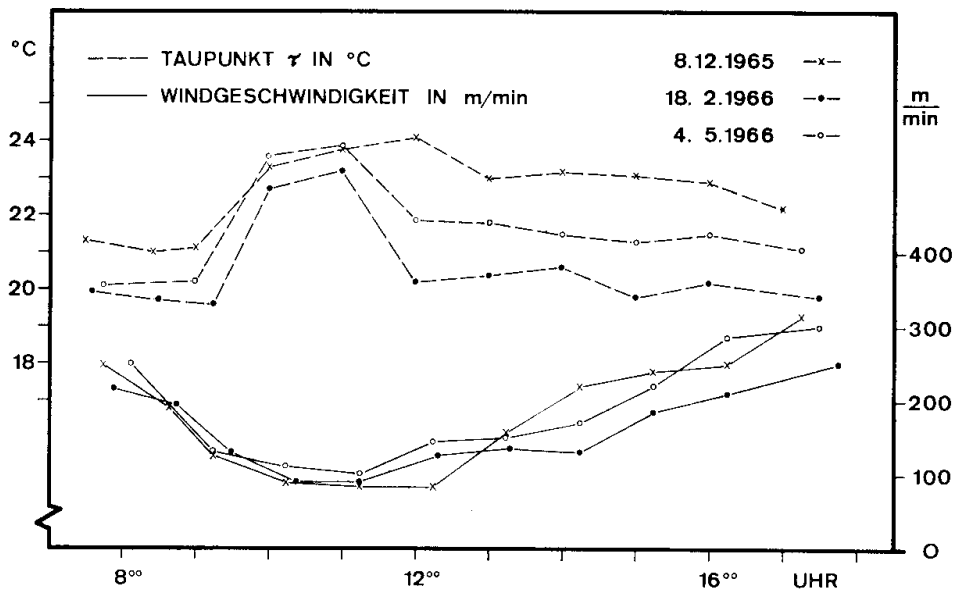


Abb. 9. Tagesgänge des Taupunktes bei nachlassender Windgeschwindigkeit um die Mittagszeit (gemessen am Untersuchungsplatz „Kakteendorngehölz“, Cerro San Fernando).

An der Mehrzahl aller Tage im Jahr herrscht bei Santa Marta ausgesprochenes Strahlungswetter. Auch an Tagen mit Niederschlägen, die gewöhnlich erst am Nachmittag oder gegen Abend fallen, ist der Himmel vorher meist heiter. H. TROJER (1959) gibt für die Orte Aracataca, Galerazamba und Cartagena mehr als 2500 Sonnenscheinstunden im Jahr an. Dies gilt auch für Santa Marta, zumal die jährlichen Niederschlagssummen hier noch geringer sind als an den drei genannten Orten.

Mikrometeorologische Untersuchungen

Lage der Untersuchungsplätze und Meßmethoden

Für die Durchführung der Messungen wurden zwei Untersuchungsplätze ausgewählt; diese befanden sich an einem Auwaldstandort und in einem Kakteendorngehölz. Sie lagen damit in zwei Gebieten, die hinsichtlich der Wasserversorgung der dort jeweils gedeihenden Pflanzenarten zwei einander entgegengesetzte Extreme innerhalb des Trockengebietes bei Santa Marta darstellen.

Der Untersuchungsplatz „Auwaldstandort“ lag in der Schwemmebene der Quebrada de Concha (Abb. 1: Nr. 2; Formación monte espinoso tropical, asociación de los valles, C. A. PÉREZ 1962). Die Messungen wurden hier an verschiedenen benachbarten Stellen durchgeführt. Reste des Auwaldes waren noch vorhanden, wodurch die hefti-

gen Winde der Trockenzeiten etwas abgebremst wurden. Die Seehöhe beträgt hier weniger als 10 m. Das Gelände besitzt praktisch kein Gefälle, die Bodenschicht ist mindestens 0,5 m mächtig. Der Untergrund ist stellenweise sandig, teilweise auch lehmig.

Der Auwald verdankt seine Existenz einem hohen Grundwasserstand, wodurch mehrere Arten auch während der Trockenzeit ihr Laub behalten (semi-deciduous seasonal forest; tropical semi-deciduous lowland forest, H. ELLENBERG & D. MUELLER-DOMBOIS 1967). Die Bäume erreichen eine Höhe von etwa 30 m. Häufig sind hier die folgenden Baum- und Straucharten: *Anacardium excelsum* (BERT. & BALB.) SKEELS, *Capparis* spp., *Cassia emarginata* L., *Ceiba pentandra* (L.) GÄRTN., *Cordia dentata* POIR., *Crescentia cujete* L., *Enterolobium cyclocarpum* (JACQ.) GRISEB., *Gyrocarpus americanus* JACQ., *Hura crepitans* L., *Lecythis minor* JACQ., *Platymiscium pinnatum* (JACQ.) DUGAND, *Prosopis juliflora* (SW.) DC. s. str., *Pseudobombax septenatum* (JACQ.) DUGAND, *Samanea saman* (JACQ.) MERRILL und *Senegalia affinis* BRITT. & KILLIP. Verbreitet sind verholzende Lianen, hauptsächlich Bignoniaceen. Auf frisch gerodeten Flächen entwickelt sich in der Regenzeit eine dichte Unkrautvegetation.

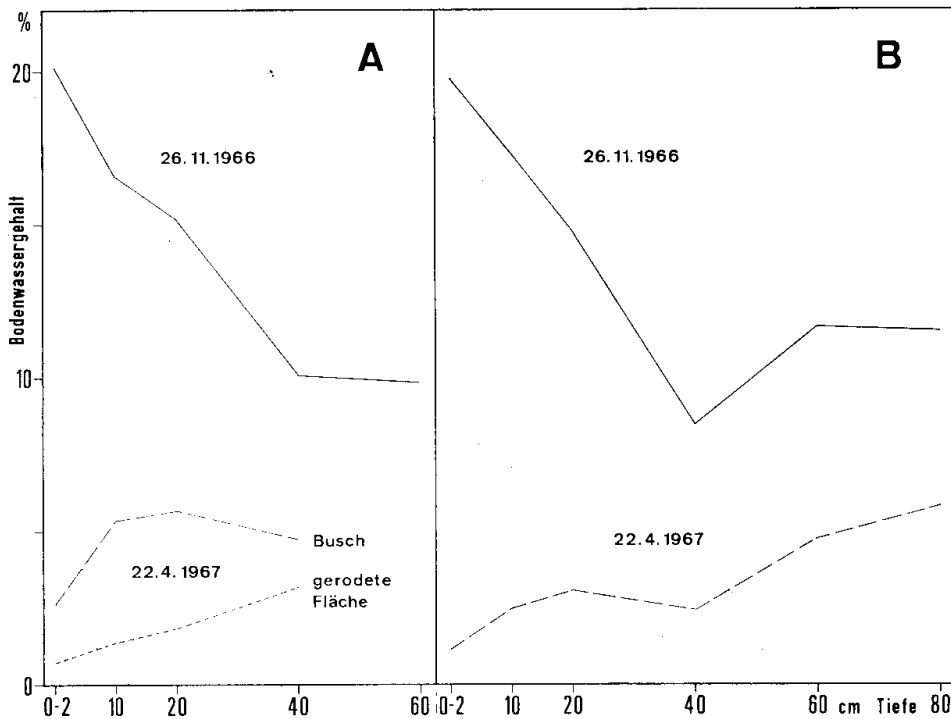


Abb. 10. Bodenwassergehalte am Auwaldstandort in der Regenzeit (26.11.1966) und der Trockenzeit (22.4.1967) in verschiedener Tiefe. A = Sekundärbusch, der am Ende der Regenzeit teilweise gerodet wurde, B = Weidefläche.

In Abbildung 10 sind die Ergebnisse von Bestimmungen der Bodenwassergehalte in verschiedener Tiefe dargestellt. Die Proben wurden unter einem Sekundärbusch (A) und auf einer Weidefläche entnommen (B). Gegen Ende der Regenzeit (26. 11. 1966; vgl. Abb. 2) und gegen Ende der Trockenzeit (22. 4. 1967) bestanden keine wesentlichen Unterschiede im Wassergehalt des Bodens zwischen beiden Stellen. Der geringe Wassergehalt im Boden der Weide in 40 cm Tiefe ist auf eine Sandschicht zurückzuführen. Durch die dichte Unkrautvegetation auf der gerodeten Fläche kam es dort zu einem stärkeren Austrocknen der obersten Bodenschichten als unter dem noch erhaltenen Busch.

Der Untersuchungsplatz „Kakteendorngelölz“ lag auf dem Westhang des Cerro San Fernando (Abb. 1: Nr. 4). Der Platz befand sich in etwa 15 m Seehöhe am Rand eines wenig befahrenen Weges, der durch ein Kakteendorngelölz führte. Kakteendorngelölze wachsen bei Santa Marta an Stellen mit sehr ungünstiger Wasserversorgung. Lediglich die Standorte der halbwüstenartigen *Haematoxylon-Melochia-Lippia*-Kleinstrauchvegetation (vgl. R. SCHNETTER 1968) sind noch trockener. Die häufigsten Baum- und Straucharten in der Umgebung des Untersuchungsplatzes waren: *Pereskia colombiana* BR. & R., *Prosopis*

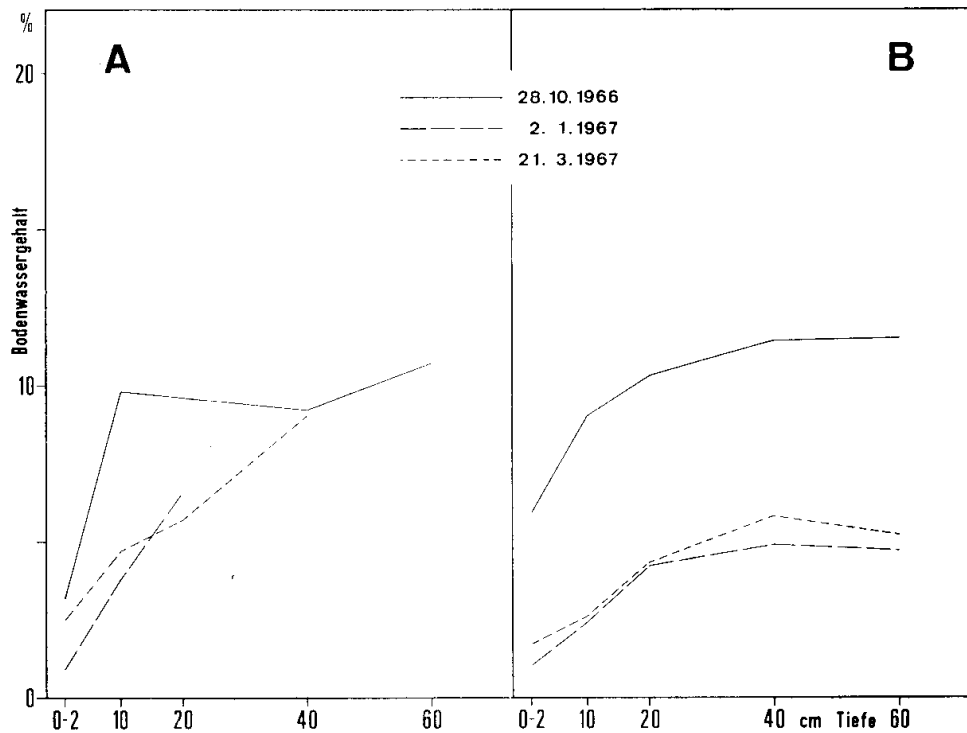


Abb. 11. Bodenwassergehalte am Cerro San Fernando. Probenentnahme am 28. 10. 1966 (Regenzeit) sowie am 2. 1. 1967 und 21. 3. 1967 (Trockenzeit). A = Riedel mit *Haematoxylon-Melochia-Lippia*-Kleinstrauchvegetation, B = Rinne mit Dorngehölz.

juliflora (Sw.) DC. s. str., *Lemaireocereus griseus* (Haw.) Br. & R., *Capparis linearis* Jacq., *Diphysa carthagenensis* Jacq., *Melochia tomentosa* L., *Lippia origanoides* Jacq. und *Haematoxylon brasiletto* Karst. Zur Bestimmung von Bodenwassergehalten wurden auf dem Cerro San Fernando Proben von einem Riedel und aus einer Rinne (*Haematoxylon-Melochia-Lippia*-Kleinstrauchvegetation und Dorngehölz; vgl. R. SCHNETTER 1968) entnommen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 11 dargestellt. Auf dem Riedel (A) wurde der Boden bei Tiefen von mehr als 10 cm aus Höhlungen in dem tiefgründig verwitterten Gestein entnommen, wodurch zu günstige Verhältnisse vorgetäuscht werden. Der Boden dieser Hohlräume war meist frei von Wurzeln. In der Rinne (B) wurde bis 60 cm Tiefe von Geröll durchsetzte und durchwurzelt Feinerde gefunden. Hinsichtlich der Wasserversorgung steht das Kakteendorngehölz zwischen dem Dorngehölz und der *Haematoxylon-Melochia-Lippia*-Kleinstrauchvegetation.

Zum Messen von Bodenoberflächen- und Lufttemperaturen wurden Kupfer-Konstantan-Thermoelemente verwendet. Die Thermodrähte der Meßfühler hatten einen Durchmesser von 0,1 mm und waren mit Silberlot zusammengelötet. Die Vergleichslötstelle befand sich in einer Thermosflasche mit etwa 30° C warmem Wasser. Zum Ablesen der Thermospannung diente ein Multiflex-Galvanometer der Fa. Dr. B. Lange, Berlin (Typ MG 0). Die Meßfühler wurden der Bodenoberfläche in einer Länge von 20 mm angelegt, um Fehler durch Wärmeleitung in den Zuführungsdrähten möglichst auszuschließen. Der Gesamtfehler bei der Messung der Bodenoberflächentemperaturen ist mit maximal $\pm 1^\circ\text{C}$, der bei der Messung der Lufttemperaturen auftretende Fehler mit $\pm 0,5^\circ\text{C}$ anzusetzen.

Zur Messung von Lufttemperatur und Luftfeuchte wurde ein Aspirationspsychrometer nach ASSMANN verwendet, das beim Einsatz in Bodennähe entsprechend einem Vorschlag von J. BARTELS (1930) parallel zur Bodenoberfläche langsam fortbewegt wurde, um immer frische Luft aus ungestörter Schichtung anzusaugen. Durch die unterschiedliche Trägheit des feuchten und trockenen Thermometers nimmt die Genauigkeit der Feuchtebestimmung bei starker Insolation mit Annäherung an die Bodenoberfläche durch die Luftunruhe ab (vgl. D. BERÉNYI 1967).

Zur Messung der Windgeschwindigkeit wurden Hand-Schalensternanemometer und ein thermisches Anemometer (Lambrecht, Göttingen; Typ TK 201) benutzt.

Evaporationsuntersuchungen wurden mit Piche-Evaporimetern durchgeführt; als verdunstender Körper wurde eine weiße Filtrierpapierscheibe von 5 cm Durchmesser gewählt (vgl. B. HUBER 1956, O. STOCKER 1956, F. E. ECKARDT 1960). Viele Autoren benutzen das Piche-Evaporimeter in Verbindung mit einer grünen Filtrierpapierscheibe von 3 cm Durchmesser (H. WALTER 1960, L. STEUBING 1965). Zahlreiche weitere Evaporimeter sind in Gebrauch. Die mit den verschiedenen Gerätetypen ermittelten Ergebnisse stellen nur Relativwerte dar; sie sind nicht unmittelbar miteinander vergleichbar. Der Grad des Einflusses bestimmter meteorologischer Faktoren auf die Evaporation ist geräteabhängig. Untersuchungen hierüber wurden von mehreren Autoren durchgeführt (z. B. S. BAUMBACH 1952, C. L. KUCERA 1954, R. M. HOLMES & G. W. ROBERTSON 1958, W. BAIER & G. W. ROBERTSON 1965). Ein direkter Vergleich der Transpiration von Pflanzen mit der Evaporation ist nur bedingt möglich. Eine weitgehende Übereinstimmung zwischen Transpiration und Evaporation konnte

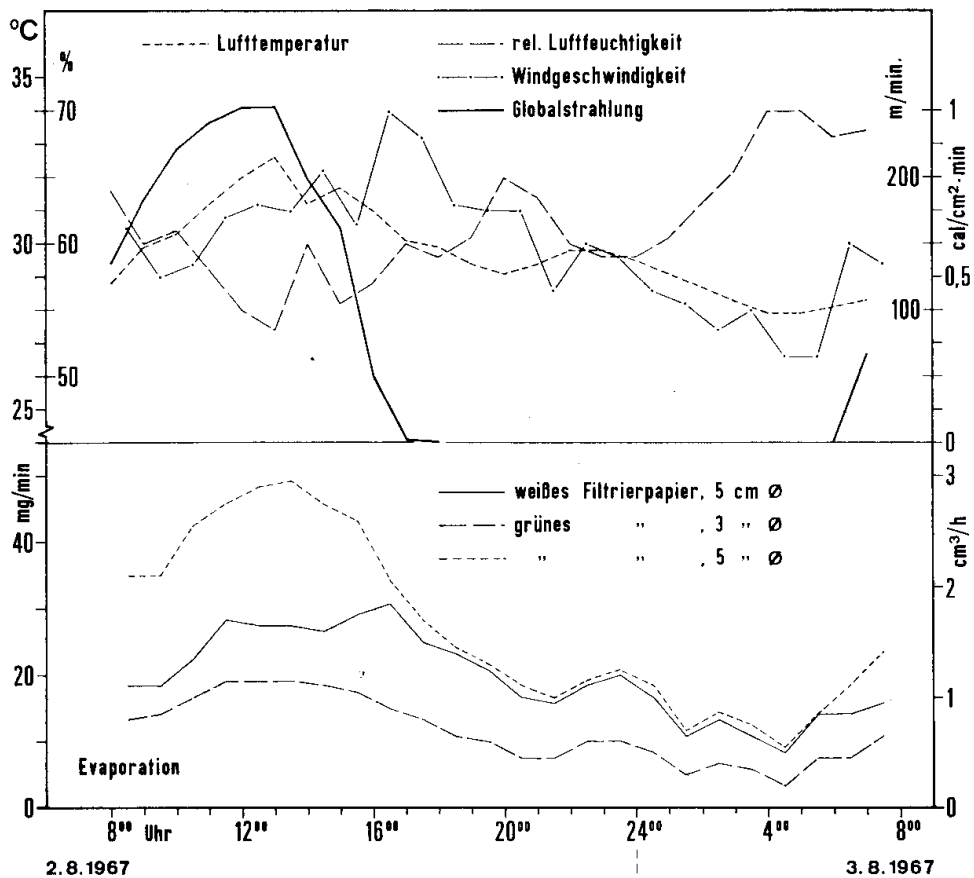


Abb. 12. 24-Stundengänge der Evaporation (Halbinsel Punta de Betín), gemessen mit Piche-Evaporimetern in Verbindung mit verschiedenen Filtrierpapierscheiben.

G. BOSS (1952) bei poikilohydrischen Arten feststellen (vgl. auch H. WALTER 1960).

Für die Umrechnung der mit Piche-Evaporimetern mit weißer und grüner Scheibe sowie mit Scheiben verschiedenen Durchmessers ermittelten Evaporationsraten werden von H. WALTER (1960) Umrechnungsfaktoren angegeben. LEYERER (zit. nach O. STOCKER 1956) fand in Algerien hiervon abweichende Werte. In Santa Marta ergaben sich bei nebeneinander aufgestellten Evaporimetern mit verschiedenen Scheiben ebenfalls andere Faktoren. In Abbildung 12 sind mit verschiedenen Filtrierpapierscheiben ermittelte stündliche Evaporationsraten gemeinsam mit den wichtigsten sie beeinflussenden meteorologischen Faktoren dargestellt. Nachts besteht zwischen der Evaporation gleich großer grüner und weißer Scheiben praktisch kein Unterschied, während am Tag der ungleiche Einfluß der Globalstrahlung deutlich wird, der bei grünen Scheiben die Wirkung anderer meteorologischer Faktoren überlagern kann.

Besonders hingewiesen sei auf den die Evaporation der weißen Scheibe erhöhenden Einfluß der Luftbewegung zwischen 16 und 17 Uhr, der bei beiden grünen Scheiben durch die zu dieser Zeit stark nachlassende Globalstrahlung überhaupt nicht in Erscheinung tritt. Während des Versuchszeitraums ergab sich für die Zeit zwischen 8 und 15 Uhr sowie zwischen 7 und 8 Uhr des folgenden Tages ein recht konstantes Verhältnis zwischen der Evaporation der grünen

Scheibe von 3 cm Durchmesser und der weißen Scheibe. Die Evaporation der weißen Scheibe war um 40% höher als die der kleinen grünen. In den Nachtstunden war die Evaporation der weißen Scheibe genau doppelt so hoch und zwischen 15 und 16 Uhr um 70% höher als die der grünen Scheibe von 3 cm Durchmesser.

Die Intensität der Globalstrahlung wurde mit einem Solarimeter nach MOLL-GORCZINSKY (Fa. Kipp & Zonen, Delft, Holland) gemessen.

Die Bestimmung von Bodenwassergehalten erfolgte durch das Trocknen der Proben bei 105°C.

Temperaturen der Bodenoberfläche und der angrenzenden Luftschicht

Mit Annäherung an den Boden wird die Lufttemperatur zunehmend von der Temperatur der Bodenoberfläche beeinflusst. Die Höhe der Temperatur der Bodenoberfläche wiederum ist bei einer bestimmten Energiezustrahlung von verschiedenen Faktoren abhängig. So erhöht sich der Wärmeaustausch zwischen der Bodenoberfläche und der Luft bei steigender Windgeschwindigkeit (Übersicht bei R. GEIGER 1961). Großen

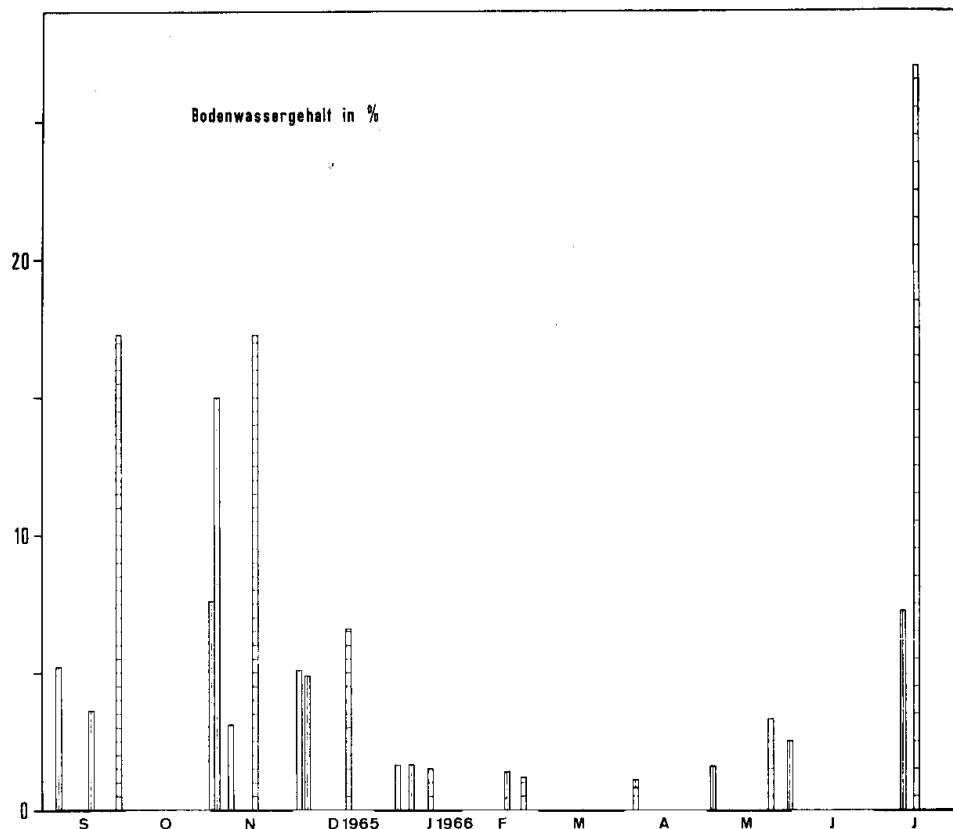


Abb. 13. Wassergehalte der obersten Bodenschicht (0—2 cm Tiefe) am Auwaldstandort (querschraffierte Säulen) und im Kakteendorngehölz (längsschraffierte Säulen).

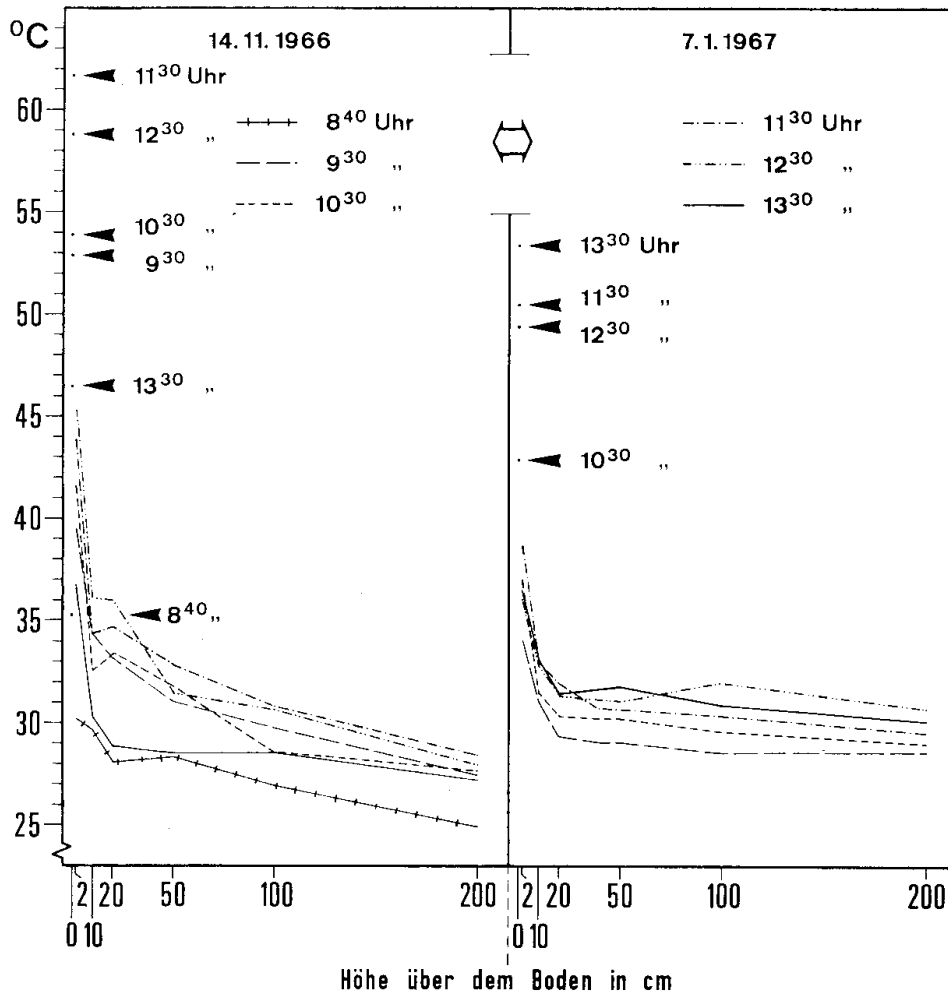


Abb. 14. Temperaturen der Bodenoberfläche (durch Pfeile gekennzeichnet) und Tautochronen der Lufttemperatur im Kakteendorngelölz an einem Regenzeittag (14. 11. 1966) und einem Trockenzeittag (7. 1. 1967).

Einfluß auf die Temperatur der Bodenoberfläche hat weiterhin der Wassergehalt der obersten Bodenschichten. Eine Abnahme des Wassergehaltes verringert die Wärmeleitfähigkeit des Bodens und vermindert dessen Energieverlust durch Evaporation. Das Austrocknen der obersten Bodenschichten führt zu einem Anstieg der täglichen Temperaturmaxima (D. A. DE VRIES 1952, 1958; Übersichten bei R. GEIGER 1961 und D. BERÉNYI 1967). In Abbildung 13 sind einige Ergebnisse von Wassergehaltsbestimmungen in der obersten Bodenschicht (0—2 cm Tiefe) zusammengestellt. Die oberste Bodenschicht trocknet im Kakteendorngelölz sehr rasch aus; dies ist besonders an den Ergebnissen von Wassergehaltsbestimmungen während der ersten Novemberhälfte zu erkennen. Im Kakteendorngelölz gemessene Bodenoberflächentemperaturen sind aus

Tabelle 1 zu entnehmen. Die niedrigsten Temperaturen wurden bei feuchtem Boden festgestellt, so nach den Niederschlägen zu Beginn des Monats November 1965 (am 3. 11. 1965) und am 5. 8. 1967. Hohe Bodentemperaturen wurden in der Trockenzeit und auch während trockenerer Abschnitte der Regenzeit erreicht (z. B. am 9. 11. 1965).

Kräftiger Wind kann in der Trockenzeit das Auftreten hoher Extremwerte verhindern (z. B. am 7. 1. 1967; vgl. Abb. 15). Die Maxima der Bodenoberflächentemperaturen treten gewöhnlich mittags, zur Zeit der stärksten Einstrahlung, auf. Am 7. 1. 1966 kam es nach 10 Uhr zu einem Wechsel der Windrichtung, wodurch etwas kühlere Meeresluft herangeführt wurde. Nach einem erneuten Wechsel der Windrichtung nach 14 Uhr stieg die Lufttemperatur wieder an. Hierdurch wurden die Maxima der Bodenoberflächentemperatur um 10 und 15 Uhr gemessen. Die absolut höchste Temperatur betrug $69,2^{\circ}\text{C}$ (am 7. 1. 1966, um 10 Uhr). 60°C wurden an 7 und 50°C an 12 von 16 Untersuchungstagen erreicht oder überschritten. Der Maximalwert von etwa 70°C entspricht den Ergebnissen von Bodentemperaturmessungen verschiedener Autoren an unterschiedlichen Standorten (H. F. NEUBAUER 1952, A. HADAS 1954, A. VAUPEL 1958; Zusammenstellungen bei B. HUBER 1935 und R. GEIGER 1961).

Höhere Bodenwassergehalte während der Regenzeit (Abb. 10, 11 und 13; R. MICHLER & R. HERRMANN 1968) und die dadurch bedingte

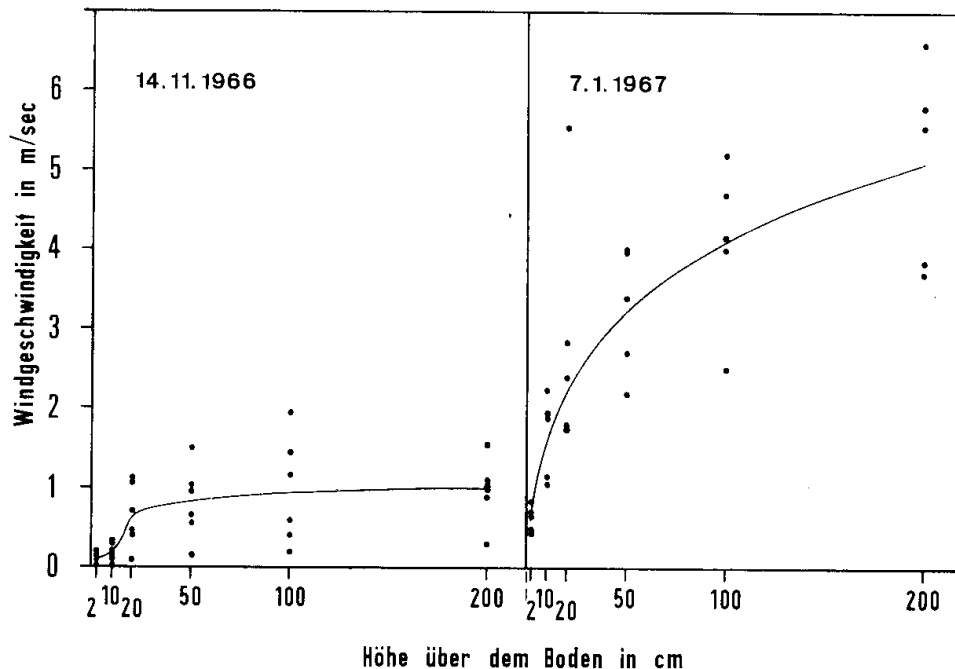


Abb. 15. Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen über dem Boden im Kakteendorngelände; vgl. Abbildung 14.

bessere Vegetationsentwicklung und stärkere Beschattung des Bodens verhindern am Auwaldstandort das Auftreten sehr hoher Temperaturen der Bodenoberfläche (vgl. C. S. CHRISTIAN & R. O. SLAYTER 1958). Das Maximum wurde mit 58° C am 4. 4. 1966 gemessen.

Hohe Temperaturen der Bodenoberfläche haben eine starke Erwärmung der untersten Luftschichten zur Folge. Mit zunehmender Entfernung von der Bodenoberfläche nähern sich die Temperaturen rasch denjenigen in 2 m Höhe. Tautochronen der Lufttemperatur aus dem Kakteendorngelölz von einem Tag eines trockenen Abschnitts der Regenzeit (14. 11. 1966) und einem Tag aus der Trockenzeit (7. 1. 1967) sind in Abbildung 14 wiedergegeben. Die wesentlich höhere Windgeschwindigkeit am 7. 1. 1967 (Abb. 15) läßt den Einfluß der Temperatur des Bodens schon in geringerer Höhe abklingen als am 14. 11. 1966. Weitere Beispiele für Temperaturgradienten der untersten Luftschichten im Kakteendorngelölz enthält folgende Übersicht:

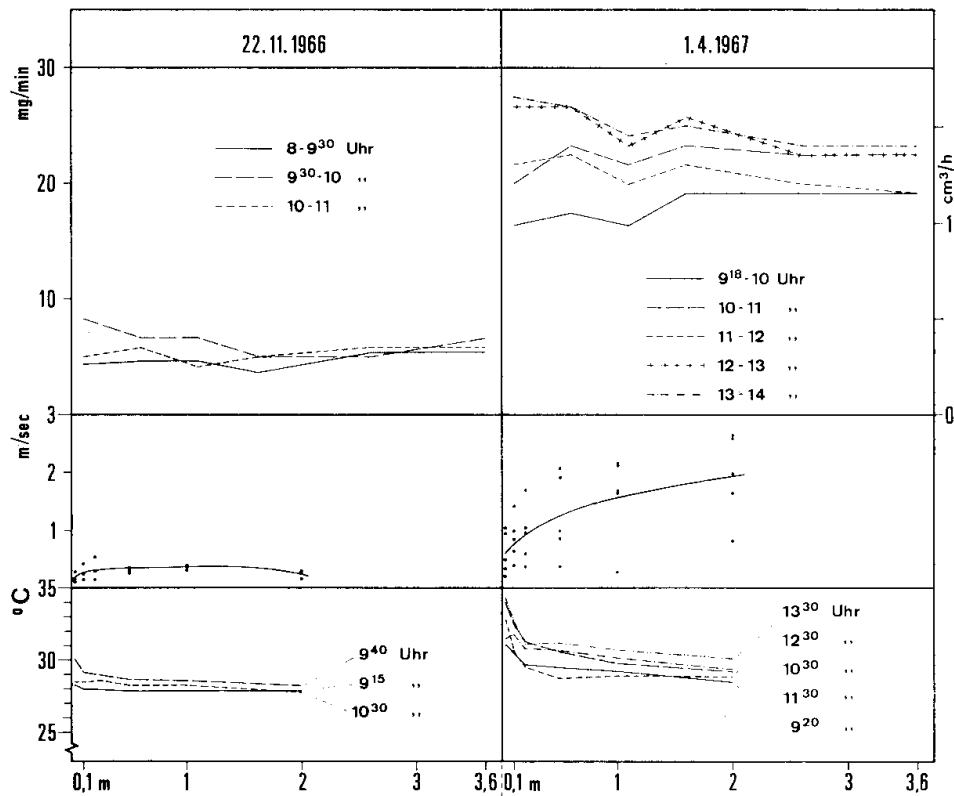


Abb. 16. Ergebnisse von Evaporationsmessungen (in mg/min und cm³/h; weiße Filtrierpapierscheibe von 5 cm Durchmesser), Windgeschwindigkeitsmessungen (in m/sec) und Lufttemperaturmessungen in verschiedenen Höhen über dem Boden einer Papaya-Kultur am Auwaldstandort in Regenzeit (22. 11. 1966) und Trockenzeit (1. 4. 1967).

Höhe über dem Boden	23. 2. 1967	29. 12. 1966	14. 11. 1966	
	11.30 Uhr	11.30 Uhr	11.30 Uhr	12.30 Uhr
2 cm	40,5° C	37,4° C	43,9° C	45,3° C
10 cm	34,4° C	32,7° C	34,4° C	36,1° C

Vom Auwaldstandort liegen entsprechende Messungen aus einer gelegentlich bewässerten Papaya-Kultur vor (Abb. 16). Am 22. 11. 1966 wick die Temperatur des feuchten Bodens bei allerdings nur geringen Einstrahlungsintensitäten nur wenig (etwa 2° C) von der Lufttemperatur in 2 m Höhe ab. Am 1. 4. 1967 kam es zu einer stärkeren Erwärmung der Erdoberfläche, da diese durch die Trockenzeit stärker ausgetrocknet war. Die Bodentemperaturen erreichten an besonnten Stellen folgende Werte:

9.20 Uhr 44,8° C, 10.30 Uhr 48,1° C, 11.25 Uhr 55,5° C,
12.30 Uhr 51,8° C, 13.30 Uhr 53,8° C.

Die vertikalen Gradienten der Lufttemperatur sind aus Abbildung 16 zu entnehmen.

Luftfeuchtigkeitsmessungen

In Abbildung 17 sind Tautochronen des Taupunktes aus dem Kakteendorngehölz dargestellt. Sowohl in der Regenzeit als auch in der Trockenzeit war während der Messungen eine Zunahme der Luftfeuchtigkeit mit Annäherung an die Bodenoberfläche festzustellen. Eine Ausnahme bilden die Meßergebnisse vom 7. 1. 1967. An diesem Tag verhinderte kräftiger Wind durch eine rasche Durchmischung der Luft die Ausbildung steiler Gradienten von Lufttemperatur und Luftfeuchte. Die niedrigen Wassergehalte an diesem Tag sind typisch für die häufigen Brisenwetterlagen der Trockenzeit. Die Zunahme der Luftfeuchtigkeit mit Annäherung an den Boden am 23. 2. 1967 muß auf eine Wasserabgabe des Bodens zurückgeführt werden; die Kraut- und Gramineenflora war nach über zwei regenlosen Monaten fast vollständig vertrocknet. Die Wasserabgabe des Bodens dürfte allerdings lediglich in einem sich täglich wiederholenden Austausch von Wasserdampf zwischen der obersten Bodenschicht und der Luft bestehen, bei dem der Boden während der Nacht bei höheren Wasserdampfsättigungswerten der Luft (oder durch leichten Taufall) Wasser aufnimmt, das dann tagsüber bei ansteigenden Temperaturen und vergrößertem Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft wieder an diese abgegeben wird. Während der Brisenwetterlagen ist in der Trockenzeit mit nächtlicher Taubildung nicht zu rechnen.

Durch die bei kräftiger Einstrahlung erhöhten Lufttemperaturen in Bodennähe ist die relative Luftfeuchte dort meist geringer als in höheren Luftschichten (Tab. 2). Lediglich bei guter Bodendurchfeuchtung nach Niederschlägen (5. 8. 1967) kann in Bodennähe auch eine erhöhte

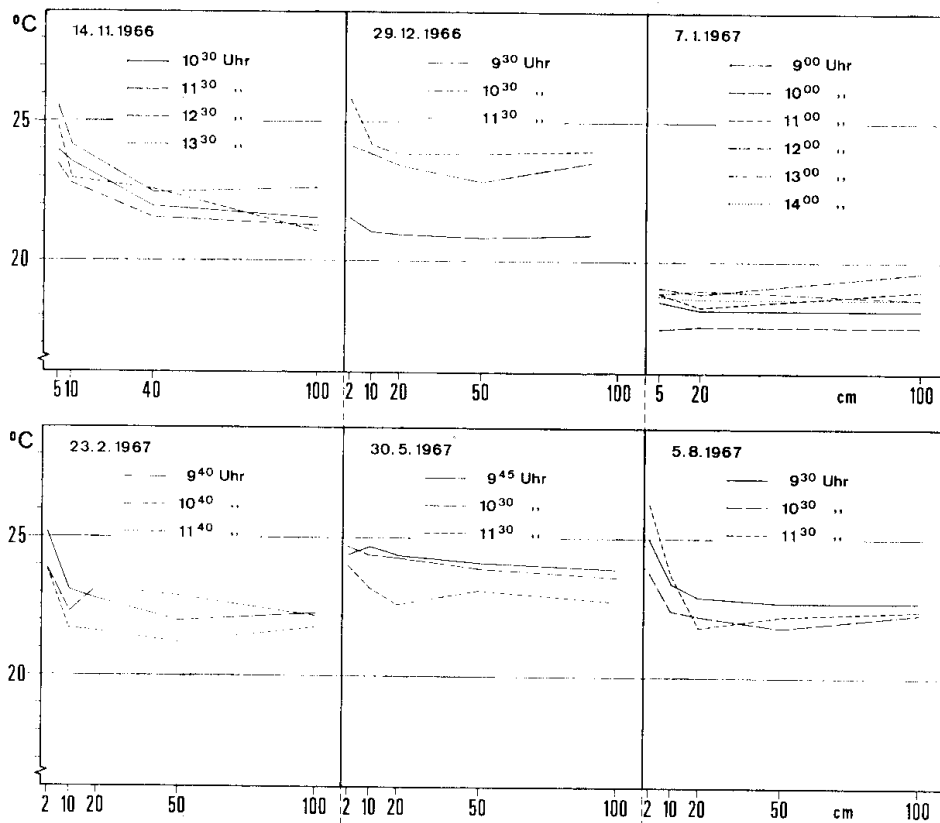


Abb. 17. Taupunkte in verschiedenen Höhen über dem Erdboden im Kakteen-
dorngehölz.

relative Luftfeuchte beobachtet werden. An diesem Tag war bis 20 cm Höhe eine Abnahme der Luftfeuchte festzustellen; durch die mit zunehmender Höhe zurückgehenden Lufttemperaturen erhöhte sich darüber die relative Luftfeuchte wieder. Um 11.30 Uhr betrug der Dampfdruckunterschied zwischen der Luft in 2 und 20 cm Höhe 6 Torr; hierbei sei allerdings nochmals auf die im methodischen Teil erwähnte Meßungenauigkeit des Aspirationspsychrometers nach ASSMANN in Bodennähe hingewiesen.

Messungen der Luftfeuchtigkeit in verschiedenen Höhen über dem Erdboden liegen auch von dem Auwaldstandort vor. Innerhalb einer Papaya-Kultur wurden Messungen am 22. 11. 1966 (trüber Tag, Regenzeit) und am 1. 4. 1967 durchgeführt (vgl. Abb. 16). An dem Regenzeittag betrug die relative Luftfeuchte in 5 cm Höhe 79 % und in 1 m Höhe 80,5 %. Die entsprechenden Dampfdrucke betragen in 5 cm Höhe 27,7 Torr und in 1 m Höhe 22,9 Torr, die Taupunkte lagen bei 27,6° und 24,4° C. An dem Trockenzeittag waren nur geringe Unterschiede im Taupunkt festzustellen. Durch den Wind wurde die Bildung eines starken Gradienten im Wassergehalt der Luft verhindert; dieser wäre

zu erwarten gewesen, da der Boden unter der Papaya-Pflanzung durch gelegentliche Bewässerung nicht völlig ausgetrocknet war.

Weitere Luftfeuchtmessungen wurden auf einer kleinen Lichtung in einem Sekundärbusch und auf einer benachbarten gerodeten Fläche durchgeführt. Während der Messungen in der Regenzeit wurde sowohl im Busch (2. 12. 1966) als auch auf der gerodeten Fläche (14. 12. 1966), auf der sich eine dichte Unkrautvegetation entwickelt hatte, der Naßtyp der Gradienten der relativen und absoluten Luftfeuchtigkeit (Zunahme der Feuchtigkeit bei Annäherung an den Boden) festgestellt. Während der entsprechenden Messungen in der Trockenzeit (17. 3. 1967) konnten an der offenen Stelle durch von kräftigem Wind verursachte Durchmischung der Luft kaum Unterschiede der Luftfeuchtigkeit in verschiedenen Höhen gemessen werden, während im Busch ein schwach ausgeprägter Trockentyp des Gradienten der relativen Luftfeuchte (Abnahme zum Boden hin) und ein Naßtyp der absoluten Luftfeuchte beobachtet wurden (vgl. auch Abb. 18).

Windverhältnisse

Neben dem Fehlen der Niederschläge gehört die verstärkte Luftbewegung zu den auffälligsten Charakteristika der Trockenzeit. Ergebnisse von Windgeschwindigkeitsmessungen an je einem Regen- und Trockenzeittag im Kakteendorngehölz sind in Abbildung 15 dargestellt. Die Messungen wurden in stündlichem Abstand mit einem thermischen Windmesser vorgenommen. Gleichzeitig wurde das Stundenmittel der Windgeschwindigkeit in 60 cm Höhe über dem Boden mit einem Schalensternwindmesser ermittelt. Diese Stundenmittel sind nachfolgend zusammengestellt:

Uhrzeit	Windgeschwindigkeiten in 60 cm Höhe über dem Boden im Kakteendorngehölz	
	14. 11. 1966 Regenzeit	7. 1. 1967 Trockenzeit
8.25— 9.10	60 m/min	—
9.00—10.00	90 m/min *)	305 m/min
10.00—11.00	115 m/min	285 m/min
11.00—12.00	115 m/min	285 m/min
12.00—13.00	115 m/min	315 m/min
13.00—14.00	100 m/min	280 m/min
*) 9.10—10.00		

Wie die Aufstellung zeigt, war die Windgeschwindigkeit, abgesehen von der ersten Messung am 14. 11. 1966, an beiden Tagen während der Untersuchungszeiträume von jeweils annähernd gleicher Höhe. Es erschien daher berechtigt, die mit Hilfe des thermischen Windmessers in stündlichem Abstand in verschiedenen Höhen nacheinander gemessenen

Windgeschwindigkeiten über die Untersuchungszeiträume hinweg zu mitteln, um einen von zufälligen kurzfristigen Schwankungen weniger beeinflussten Mittelwert zu bekommen. Die Ergebnisse der in stündlichen Abständen durchgeführten Messungen (Mittel aus 15—20 Einzelablesungen im zeitlichen Abstand von etwa 2 Sekunden) sind in Abbildung 15 als Punkte dargestellt.

An dem Regenzeittag (14. 11. 1966) war in den bodennächsten Luftschichten der Einfluß der krautigen Vegetation gut zu erkennen. Die Rauigkeitshöhe betrug etwa 20 cm. Die Zunahme der Windgeschwindigkeit in den höheren Luftschichten war gering. Während der Messungen in der Trockenzeit (7. 1. 1967) war die Rauigkeitshöhe deutlich erniedrigt. Dies ist sowohl auf das Vertrocknen der Krautschicht als auch auf die absolut höhere Windgeschwindigkeit zurückzuführen. Bei steigender Windgeschwindigkeit kann eine Verminderung der Rauigkeitshöhe durch die Elastizität der Pflanzen eintreten (W. PAESCHKE 1937, 1938).

Am Auwaldstandort und im Kakteendorngehölz wurden keine Windgeschwindigkeitsmessungen gleichzeitig vorgenommen, so daß ein zahlenmäßiger Vergleich der unterschiedlichen Windeinwirkung an beiden Stellen nicht möglich ist; durch die am Auwaldstandort noch vorhandenen Reste des Waldes und dichtes Buschwerk kommt es jedoch in den bodennahen Luftschichten zu einer stärkeren Abbremsung des Windes als an der als Untersuchungsplatz ausgewählten lichten Stelle des Kakteendorngehölzes. Abbildung 16 zeigt Ergebnisse von Windgeschwindig-

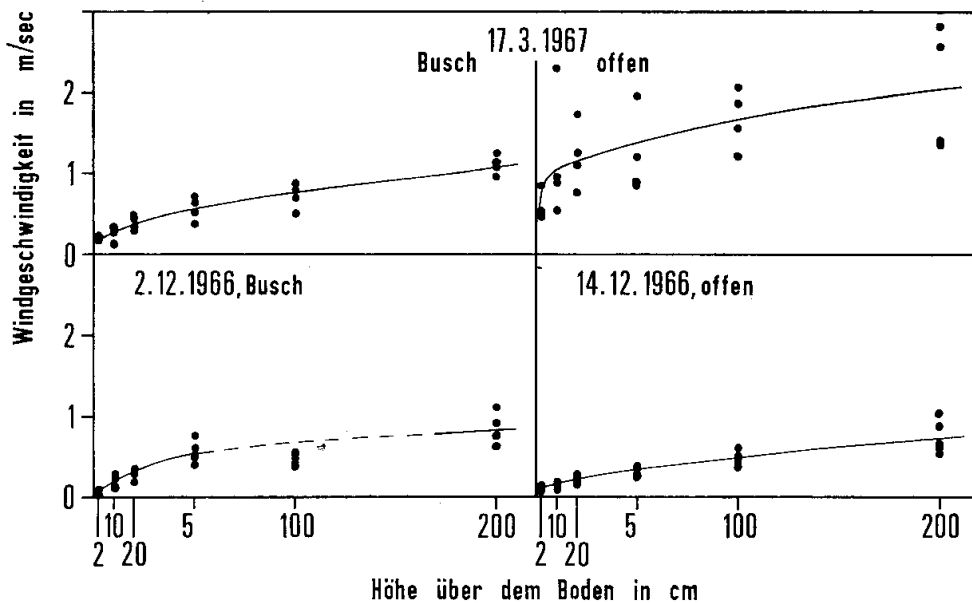


Abb. 18. Ergebnisse von Windgeschwindigkeitsmessungen in einem Sekundärbusch und auf einer benachbarten gerodeten Fläche (offen). 2. und 14. 12. 1966 = Regenzeit, 17. 3. 1967 = Trockenzeit. Auwaldstandort.

keitsmessungen in einer Papaya-Kultur. Der Stammraum der Anpflanzung war sehr licht. Die einzelnen Pflanzen hatten einen Abstand von 2—4 m voneinander. Die Untergrenze der Kronen der niedrigeren Pflanzen lag bei 2,50 Höhe; die höchsten Kronen erreichten eine Höhe von etwa 5,50 m. Die Abstände zwischen den Kronen betrug 2 m oder mehr. An dem Regenzeittag (22. 11. 1966) herrschte im gesamten Stammraum eine etwa gleich hohe Windgeschwindigkeit; am Boden und in 2 m Höhe war die Windgeschwindigkeit vermindert. Während der Messungen am 1. 4. 1967 (Trockenzeit) war eine deutliche Zunahme der Windgeschwindigkeit bis zu 2 m Höhe festzustellen. Ein von den Kronen hervorgerufener Rauigkeitseffekt machte sich in 2 m Höhe nicht bemerkbar. Abbildung 18 gibt die Ergebnisse von Messungen im Sekundärbusch und auf einer angrenzenden Rodungsfläche wieder. Am 17. 3. 1967 wurde die Windgeschwindigkeit gleichzeitig im Busch und auf der angrenzenden Rodungsfläche gemessen. Die Windgeschwindigkeit auf der gerodeten Fläche war höher als im Busch und der Wind böiger. Die beiden Meßreihen aus der Regenzeit stammen von verschiedenen Tagen; sie sind daher nicht unmittelbar miteinander vergleichbar. Besonders hingewiesen sei noch auf die unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten über der gerodeten Fläche am 14. 12. 1966 (noch Regenzeit) und am 17. 3. 1967 (Trockenzeit).

Evaporationsmessungen

Vor allem H. WALTER (1960; hier weitere Literaturangaben) verwendete die Evaporation zur Charakterisierung unterschiedlicher Standortsklimate. Die Wasserabgabe der Evaporimeter wird von ihm als ein Ausdruck für die „Verdunstungskraft der Atmosphäre“ angesehen. In El Salvador wurden von W. LÖTSCHERT (1959, 1960) bei vergleichenden standortsklimatischen Untersuchungen zahlreiche Evaporationsmessungen durchgeführt. O. STOCKER (1923) und F. FIRBAS (1924) benutzten Ergebnisse von Evaporationsmessungen zur Charakterisierung kleinräumiger klimatischer Unterschiede.

In den Abbildungen 16, 19 und 20 sind Tautochronen der Evaporation dargestellt, die die Abhängigkeit der Evaporation von der Höhe über dem Erdboden an einzelnen Tagen der Regen- und Trockenzeit erkennen lassen. Im Kakteendorngelände wurden Messungen am 14. 11. 1966 und am 7. 1. 1967 (Abb. 19) durchgeführt. Die Evaporation an dem Regenzeittag war wesentlich niedriger als an dem Trockenzeittag. Die Zunahme der Evaporation am Morgen, bedingt durch ansteigende Lufttemperaturen und Intensitäten der Globalstrahlung, ist an Hand der verschiedenen Tautochronen leicht zu erkennen.

Messungen der Evaporation in der Papaya-Kultur am Auwaldstandort (Abb. 16) ergaben vom Boden bis 3,60 m Höhe jeweils fast gleich hohe Wasserverluste bei großen absoluten Unterschieden zwischen Re-

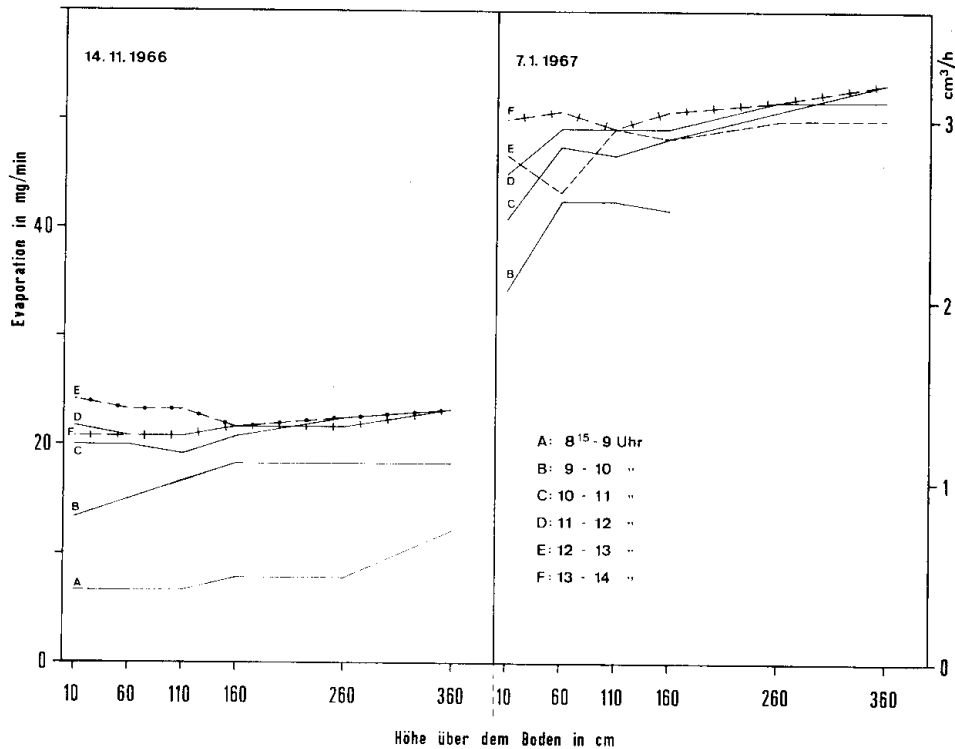


Abb. 19. Tautochronen der Evaporation im Kakteendorngehölz an einem Regenzeittag (14. 11. 1966) und einem Trockenzeittag (7. 1. 1967).

genzeit (22. 11. 1966) und Trockenzeit (1. 4. 1967). Geringe vertikale Gradienten von Windgeschwindigkeit und Temperatur am 22. 11. 1966 erklären die in allen Höhen etwa gleich hohe Wasserverdunstung. Bei hohen Temperaturen der Luft über dem Boden (9.40 Uhr) konnte auch eine verstärkte Verdunstung in den unteren Luftschichten beobachtet werden (9.30—10 Uhr). Am 1. 4. 1967 wurde die verdunstungsmindernde geringere Luftbewegung am Boden durch höhere Temperaturen ausgeglichen oder überkompensiert, wodurch es dort zwischen 12 und 13 Uhr zu den stärksten Wasserabgaben kam. Am 2. 12. 1966, 14. 12. 1966 und 17. 3. 1967 (Abb. 20) wurden Evaporationsmessungen im Sekundärbusch und auf der benachbarten gerodeten Fläche durchgeführt, wobei jeweils an einer der Stellen die Evaporation zwischen 0,1 und 3,6 m Höhe, an der anderen in 1,1 m Höhe (2. 12. 1966, 14. 12. 1966) oder in 0,1—1,1 m Höhe (17. 3. 1967) untersucht wurde. Die Meßergebnisse zeigen in allen Fällen eine verminderte Evaporation im Busch, wofür hauptsächlich die geringere Luftbewegung verantwortlich sein dürfte. Die höchsten Evaporationswerte wurden in der Trockenzeit gemessen (17. 3. 1967), wobei im Gegensatz zu den Regenzeittagen kaum ein vertikaler Gradient festzustellen war.

In Tabelle 3 sind Evaporationswerte aus dem Kakteendorngehölz

zusammengestellt, die durch Wägung eines 2 Minuten lang in 60 cm Höhe exponierten feuchten Filtrierpapiere (weiß, 5 cm Durchmesser; O. STOCKER 1956) ermittelt wurden. Die niedrigsten Evaporationsraten wurden an einigen Tagen der Regenzeit (z. B. 10. 9. 1965, 3. 11. 1965) gemessen, die höchsten an windigen Trockenzeittagen (18. 2. 1966). Jedoch konnten auch während der Regenzeit Verdunstungsraten festgestellt werden, die an Trockenzeitwerte heranreichen.

Vergleich zwischen den beiden Untersuchungsplätzen „Auwaldstandort“ und „Kakteendorngehölz“

Wie weiter oben bereits gesagt wurde, stellen die beiden Untersuchungsplätze „Auwaldstandort“ und „Kakteendorngehölz“ hinsichtlich der Wasserversorgung der dort wachsenden Pflanzen einander entgegengesetzte Extreme innerhalb des Trockengebietes von Santa Marta dar, zwischen die die meisten anderen Standorte eingeordnet werden können. Der Vergleich der standortklimatischen Verhältnisse an diesen beiden Plätzen stellt daher zugleich den Versuch dar, einen Eindruck von der mikroklimatischen Amplitude des Trockengebietes von Santa Marta zu gewinnen und das Zusammenspiel von Vegetation und Mikroklima grob zu erfassen.

Für die an den beiden Untersuchungsplätzen vorkommende Vegetation stellt das Wasser den Minimumfaktor dar; deswegen sind für ihre Entwicklung alle Faktoren von besonderer Bedeutung, die den Wasserhaushalt des Bodens und der Pflanzen beeinflussen. Die orographischen und edaphischen Gegebenheiten am Auwaldstandort haben während der Regenzeit einen höheren und ausgeglicheneren Bodenwassergehalt als im Kakteendorngehölz zur Folge, wodurch sich eine dichtere Vegetationsdecke entwickeln kann. Die dichtere Vegetationsdecke wiederum verhindert durch Beschatten des Bodens während der Regenzeit das Auftreten extrem hoher Bodentemperaturen und damit hoher Temperaturen in den untersten Luftschichten. Die noch vorhandenen Restbestände des Auwaldes mindern den Einfluß der austrocknenden Winde und deren nachteilige Wirkung auf die Vegetation (vgl. H. WALTER 1960, L. STEUBING 1963). Zusammengenommen schaffen alle diese Faktoren am Auwaldstandort ein ausgeglicheneres und weniger zu Extremen neigendes Mikroklima als das, welches im Kakteendorngehölz herrscht (vgl. auch R. L. SPECHT 1958). Hierdurch werden niederschlagsarme Perioden in ihren Auswirkungen auf die Vegetation etwas abgeschwächt, und die Folgen der Trockenzeit machen sich auch bei nicht das Grundwasser erreichenden Arten erst später bemerkbar als im Kakteendorngehölz und den anderen Pflanzengesellschaften der Erhebungen bei Santa Marta.

Wegen des raschen Austrocknens der dünnen Bodenschicht nach

Regenfällen im Kakteendorngelände herrschen hier auch während der Regenzeit mikroklimatische Verhältnisse vor, die für die Trockenzeit charakteristisch sind (z. B. die Neigung zu hohen Bodenoberflächentemperaturen). Eine üppige Krautvegetation entwickelt sich nur, wenn während einer längeren Zeitspanne in wenigen Tagen Abstand ergiebige Niederschläge fallen; daß es auch in niederschlagsarmen Jahren während der Regenzeit noch zur Entwicklung einer spärlichen Krautflora kommt, muß auf das bei hohen Temperaturen rasche Keimen der Samen hier vorkommender Arten (W. LEHMANN 1967) zurückgeführt werden, die dann allerdings auch in der Lage sein müssen, in kurzer Zeit ein ausreichend großes Wurzelsystem zu entwickeln (H. WALTER 1962).

Die mikrometeorologischen Messungen wurden während meiner Tätigkeit am Instituto Colombo-Alemán in Santa Marta durchgeführt. Die Vorbereitung und Auswertung der Untersuchungen erfolgten am Botanischen Institut in Gießen. Meiner Frau, Dr. M. L. SCHNETTER, danke ich für ihre Mithilfe bei den Geländearbeiten. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für eine großzügige Unterstützung.

Tabelle 1. Temperaturen der Bodenoberfläche im Kakteendorngelände in °C.

Uhrzeit	21. 9. 1965	3. 11. 1965	9. 11. 1965 ¹⁾	3. 12. 1965 ²⁾	7. 1. 1966	11. 1. 1966	18. 2. 1966
7.30	—	—	31,1	—	—	—	28,3
8.15	—	—	32,9	—	—	—	—
8.30	—	—	—	—	36,5	—	35,8
9.00	—	36,9 ³⁾	35,7	—	37,2	—	41,6 ⁶⁾
10.00	—	41,4 ⁴⁾	53,1 ⁵⁾	—	69,2	—	50,1
11.00	60,0	43,5	64,8	44,1	54,3	51,0	54,9
12.00	59,2	43,8	51,4	43,8	58,0	65,9	61,8
13.00	—	42,1	59,5	50,5	57,8	—	56,8
14.00	55,0	39,2	54,1	41,6	57,8	—	57,4
15.00	51,0	40,0	48,0	38,7	60,4	—	50,7
16.00	—	35,7	36,6	33,6	42,0	—	42,6
17.00	—	—	—	31,0	36,8	—	—
17.30	—	—	—	—	—	—	35,8
	29. 3. 1966	4. 5. 1966	21. 6. 1966	Uhrzeit	14. 11. 1966	29. 12. 1966	7. 1. 1967
7.00	—	—	25,4	8.40	35,3	—	—
8.00	—	37,6	27,7	9.30	52,9	40,4	—
8.30	35,0	—	—	10.30	53,9	56,2	42,9
9.00	39,1	45,8	36,8	11.30	61,7	56,2	50,5
10.00	43,1	49,2	42,3	12.30	58,8	—	49,4
11.00	48,9	60,8	38,9	13.30	46,5	—	53,4
12.00	51,4	62,5	46,8				
13.00	57,2	61,3	—				
14.00	59,5	56,3	—		23. 2. 1967	30. 5. 1967	5. 8. 1967
15.00	48,7	49,5	—		1967	1967	1967
16.00	45,6	39,0	—	10.30	53,4	48,7	32,8
17.30	37,0 ⁷⁾	32,5	—	11.30	53,9	48,2	35,9

¹⁾ oberste Schicht trocken; ²⁾ starker Wind; ³⁾ 9.45 Uhr; ⁴⁾ 10.15 Uhr; ⁵⁾ 10.25 Uhr; ⁶⁾ 9.15 Uhr; ⁷⁾ 17.15 Uhr.

Tabelle 2. Relative Luftfeuchtigkeit (in %) im Kakteendorngehölz in verschiedenen Höhen über dem Erdboden.

Datum	Höhe über dem Boden in cm						
Uhrzeit	2	5	10	20	40	50	100
14. 11. 1966							
10.30		38	42,5		55		58
11.30		36	37,5		56		60
12.30		37	32		53		53
13.30		50,5	57		61		63
29. 12. 1966							
9.30	55		55	55,5		57,5	59,5
10.30	50,5		58	58		65	73
11.30	48		53	58		62	67
7. 1. 1967							
9.00		50		51,5			53
10.00		44		46,5			47,5
11.00		44		47			50,5
12.00		45		47			53
13.00		45		46			46
14.00		45		45,5			47,5
23. 2. 1967							
9.40	70		64	64,5		63	70,5
10.40	54,5		54	64,5		62,5	63
11.40	43,5		50,5	52,5		52	61
30. 5. 1967							
9.45	60,5		66	66,5		70	71
10.30	58,5		63,5	65,5		68	67,5
11.30	51		56	55		58	59
5. 8. 1967							
9.30	75		70,5	69,5		70	71
10.30	67		62	61,5		63	66
11.30	64,5		56,5	50,5		58	59,5

Tabelle 3. Evaporationsmessungen im Kakteendorngehölz in 60 cm Höhe über dem Erdboden (weiße Filtrierpapierscheibe von 5 cm Durchmesser, Wägemethode). Angaben in cm³/h.

10. 9. 1965						
8.55 Uhr	1,3		11.40 Uhr	1,1	14.00 Uhr	1,1
9.40 Uhr	1,7		12.00 Uhr	1,4		
10.30 Uhr	1,1		13.00 Uhr	1,6		
21. 9. 1965						
7.25 Uhr	0,9		11.00 Uhr	1,6	15.00 Uhr	1,7
8.25 Uhr	1,2		12.00 Uhr	1,8	16.00 Uhr	1,8
9.00 Uhr	1,7		13.00 Uhr	2,0	17.00 Uhr	1,6
10.00 Uhr	1,4		14.00 Uhr	1,6	17.40 Uhr	1,3
3. 11. 1965						
9.35 Uhr	0,9		12.00 Uhr	1,0	15.00 Uhr	1,5
10.15 Uhr	0,7		13.00 Uhr	1,7	16.00 Uhr	1,1
11.00 Uhr	1,0		14.00 Uhr	0,9		

(Tabelle 3, Fortsetzung)

9. 11. 1965					
7.30 Uhr	0,4	11.00 Uhr	1,5	15.00 Uhr	1,0
8.15 Uhr	0,6	12.00 Uhr	1,4	16.00 Uhr	0,8
9.00 Uhr	0,7	13.00 Uhr	1,3		
10.00 Uhr	0,8	14.00 Uhr	1,3		
3. 12. 1965					
8.00 Uhr	1,7	12.00 Uhr	2,9	16.00 Uhr	2,2
9.00 Uhr	2,1	13.00 Uhr	2,3	17.00 Uhr	2,0
10.00 Uhr	1,9	14.00 Uhr	2,4		
11.00 Uhr	2,1	15.00 Uhr	2,5		
8. 12. 1965					
7.30 Uhr	1,4	11.00 Uhr	1,3	15.00 Uhr	1,7
8.25 Uhr	1,7	12.00 Uhr	1,3	16.00 Uhr	1,5
9.00 Uhr	1,6	13.00 Uhr	1,8	17.00 Uhr	1,6
10.00 Uhr	1,0	14.00 Uhr	1,8		
7. 1. 1966					
7.40 Uhr	1,7	11.00 Uhr	1,1	15.00 Uhr	2,4
8.30 Uhr	2,0	12.00 Uhr	1,4	16.00 Uhr	2,2
9.00 Uhr	2,0	13.00 Uhr	2,5	17.00 Uhr	1,8
10.00 Uhr	2,2	14.00 Uhr	2,8		
11. 1. 1966					
7.40 Uhr	2,0	11.00 Uhr	2,0	15.00 Uhr	1,6
8.30 Uhr	2,1	12.00 Uhr	2,6	16.00 Uhr	1,9
9.00 Uhr	2,2	13.00 Uhr	2,0	17.00 Uhr	1,5
10.00 Uhr	2,5	14.00 Uhr	2,1		
18. 2. 1966					
7.35 Uhr	1,4	11.00 Uhr	1,3	15.00 Uhr	2,4
8.30 Uhr	1,9	12.00 Uhr	2,1	16.00 Uhr	2,9
9.15 Uhr	2,2	13.00 Uhr	2,6	17.00 Uhr	2,1
10.00 Uhr	1,1	14.00 Uhr	2,0		
29. 3. 1966					
8.20 Uhr	0,8	12.00 Uhr	1,4	16.00 Uhr	2,3
9.00 Uhr	0,8	13.00 Uhr	1,7	17.15 Uhr	1,7
10.00 Uhr	1,0	14.00 Uhr	1,9		
11.00 Uhr	1,4	15.00 Uhr	2,1		
4. 5. 1966					
7.45 Uhr	2,3	12.00 Uhr	2,4	16.00 Uhr	2,1
9.00 Uhr	2,0	13.00 Uhr	1,8	17.15 Uhr	1,9
10.00 Uhr	0,9	14.00 Uhr	2,1		
11.00 Uhr	1,2	15.00 Uhr	2,5		
21. 6. 1966					
7.00 Uhr	0,2	9.00 Uhr	0,7	11.00 Uhr	0,8
8.00 Uhr	0,5	10.00 Uhr	0,8	12.00 Uhr	0,7
29. 6. 1966					
8.15 Uhr	0,5	12.00 Uhr	1,3	16.15 Uhr	1,1
9.00 Uhr	0,8	13.00 Uhr	1,4	17.15 Uhr	0,8
10.00 Uhr	1,0	14.00 Uhr	1,6		
11.00 Uhr	1,0	15.00 Uhr	1,1		

Schrifttum

- BAIER, W. & ROBERTSON, G. W.: Estimation of latent evaporation from simple weather observations. — *Can. J. Plant Sci.*, **45**, 276—284, Ottawa 1965.
- Banco de la República: Atlas de Economía Colombiana. I. Aspectos físico y geográfico. — Bogotá 1959.
- BARTELS, J.: Temperaturmessungen in Bodennähe und Aspiration. — *Meteorol. Z.*, **47**, 76—77, Braunschweig 1930.
- BAUMBACH, S.: Vergleichsmessungen mit verschiedenen Verdunstungsmessern unter definierten Versuchsbedingungen. — *Ber. Dt. Wetterdienst US-Zone*, **35**, 211—213, Bad Kissingen 1952.
- BERÉNYI, D.: Mikroklimatologie. — 328 S., Stuttgart 1967.
- BOSS, G.: Die Brauchbarkeit des Piche-Evaporimeters bei Verdunstungsmessungen. — *Ber. Dt. Wetterdienst US-Zone*, **35**, 194—201, Bad Kissingen 1952.
- CHRISTIAN, C. S. & SLAYTER, R. O.: Some observations on vegetation changes and water relationships in arid areas. — *UNESCO Arid Zone Res.*, **11**, 156—158, Paris 1958.
- DUGAND, A.: Estudios geobotánicos colombianos. — *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Exact. Fís. Nat.*, **3**, (14), 135—141, 2 Taf., Bogotá 1941.
- ECKARDT, F. E.: Methods of research on water relations. — *UNESCO Arid Zone Res.*, **15**, 139—171, Paris 1960.
- ELLENBERG, H. & MUELLER-DOMBOIS, D.: Tentative physiognomic-ecological classification of plant formations of the earth. — *Ber. geobot. Inst. ETH., Stiftung Rübel, Zürich*, **37**, 21—55, Zürich 1967.
- FIRBAS, F.: Studien über den Standortscharakter auf Sandstein und Basalt. — *Beih. Bot. Cbl.*, **40/2**, 253—409, Dresden 1924.
- GEIGER, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht. — XII u. 646 S., F. Vieweg, Braunschweig 1961.
- HADAS, A.: Soil temperatures at the Evaporation Station, Lydda Airport, Israel, in 1951—1952. — *Israel Meteorol. Service, Ser. A, Met. Notes* (9), 1—14, 9 fig., Jerusalem 1954.
- HASTENRATH, S. L.: Rainfall distribution and regime in Central America. — *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, **B 15**, 201—241, Wien 1967.
- A contribution to the wind conditions over the Caribbean Sea and Gulf of Mexico. — *Tellus*, **20**, 163—178, Stockholm 1968.
- HERRMANN, R.: Deutungsversuch der Entstehung der „Brisa“, eines föhnrartigen Fallwindes der nordwestlichen Sierra Nevada de Santa Marta, Kolumbien. — *Mitt. Inst. Colombo-Alemán Invest. Cient.*, **4**, 83—95, Santa Marta 1970.
- HOLMES, R. M. & ROBERTSON, G. W.: Conversion of latent evaporation to potential evaporation. — *Can. J. Plant Sci.*, **38**, 164—172, Ottawa 1958.
- HUBER, B.: Der Wärmehaushalt der Pflanzen. — 148 S., H. Datterer, Freising-München 1935.
- Die Evaporation. — In: W. RUHLAND: *Handb. Pflanzenphysiologie*, **3**, 265—284, J. Springer, Berlin - Göttingen - Heidelberg 1956.
- KUCERA, C. L.: Some relationships of evaporation rate to vapor pressure deficit and low wind velocity. — *Ecology*, **35**, 71—75, Durham N. C. 1954.
- LEHMANN, W.: Untersuchungen über die Keimung einiger bei Santa Marta in Kolumbien vorkommender Pflanzen. — *Ber. oberhess. Ges. Natur- u. Heilkde. Gießen, N. F., Naturwiss. Abt.*, **35**, 177—186, Gießen 1967.
- LÖTSCHERT, W.: Vegetation und Standortsklima in El Salvador. — *Bot. Studien*, **10**, VIII u. 88 S., 20 Taf., Jena 1959.
- Das Standortsklima in den Tropen. — *Umschau*, **1960**, 52—54, Frankfurt a. M. 1960.
- MICHLER, R. & HERRMANN, R.: Untersuchungen über die Beziehungen zwischen 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, 19—27, Santa Marta 1968.
- NEUBAUER, H. F.: Notizen über die Temperatur der Bodenoberfläche in Afghanistan. — Wetter u. Leben, 4, 165—168, Wien 1952.
- PAESCHKE, W.: Mikroklimatische Untersuchungen innerhalb und dicht über verschiedenartigem Bestand. — Bioklimat. Beibl. Meteorol. Z., 4, 155—163, Braunschweig 1937.
- Experimentelle Untersuchungen zum Rauigkeits- und Stabilitätsproblem der bodennahen Luftschicht. — Beitr. Phys. d. freien Atmosphäre, 24, 163—189, Leipzig 1938.
- PÉREZ, C. A.: Estudio ecológico para el manejo de las cuencas de los ríos Gaira y Manzanares de la Sierra Nevada de Santa Marta. — Acodal, 6, (15), 5—112, Bogotá 1962.
- SCHMIDT, R. D.: Die Niederschlagsverteilung im andinen Kolumbien. — Bonner Geogr. Abh., 9, 99—119, 5 Karten, 1 Tab., Bonn 1952.
- SCHNETTER, R.: Die Vegetation des Cerro San Fernando und des Cerro La Llorona im Trockengebiet bei Santa Marta, Kolumbien. — Ber. Dt. Bot. Ges., 81, 289—302, Berlin 1968.
- SCHRÖDER, R.: Die Verteilung der mittleren Lufttemperatur in Kolumbien. — Bonner Geogr. Abh., 9, 120—123, Bonn 1952.
- SPECHT, R. L.: Micro-environment (soil) of a natural plant community. — UNESCO Arid Zone Res., 11, 152—155, Paris 1958.
- STEBING, L.: Untersuchungen zum Wasserhaushalt windgeschützter und windexponierter Pflanzen am natürlichen Standort. — Biol. Zbl., 81, 585—596, Leipzig 1963.
- Pflanzenökologisches Praktikum. — 262 S., P. Parey, Berlin-Hamburg 1965.
- STOCKER, O.: Klimamessungen auf kleinstem Raum an Wiesen-, Wald- und Heidepflanzen. — Ber. Dt. Bot. Ges., 41, 145—150, Berlin 1923.
- Meßmethoden der Transpiration. — In: W. RUHLAND: Handb. Pflanzenphysiologie, 3, 293—311, J. Springer, Berlin - Göttingen - Heidelberg 1956.
- THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, J. R.: Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. — Drexel Inst. Technology, Lab. Climatol., Publ. Climatol. (Centerton, N. J.), 10, (3), Centerton, N. J. 1957.
- TROJER, H.: Fundamentos para una zonificación meteorológica y climatológica del trópico y especialmente de Colombia. — Cenicafé (Chinchiná, Caldas, Colombia), 10, (8), 289—373, Chinchiná, Col., 1959.
- VAUPEL, A.: Mikroklima und Pflanzentemperaturen auf trockenheißen Standorten. — Flora, 145, 487—541, Jena 1958.
- DE VRIES, D. A.: Het warmtegeleidingsvermogen van grond. — Mededel. Landbouwhoges. Wageningen, 52, 1—73, Wageningen 1952.
- The thermal behaviour of soils. — UNESCO Arid Zone Res., 11, 109—113, Paris 1958.
- WALTER, H.: Grundlagen der Pflanzenverbreitung. I. Standortslehre. — 566 S., E. Ulmer, Stuttgart 1960.
- Die Vegetation der Erde in ökologischer Betrachtung. I. Die tropischen und subtropischen Zonen. — XIII u. 538 S., G. Fischer, Jena 1962.

Anschrift des Verfassers:

Dr. REINHARD SCHNETTER, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D. E., Kolumbien.

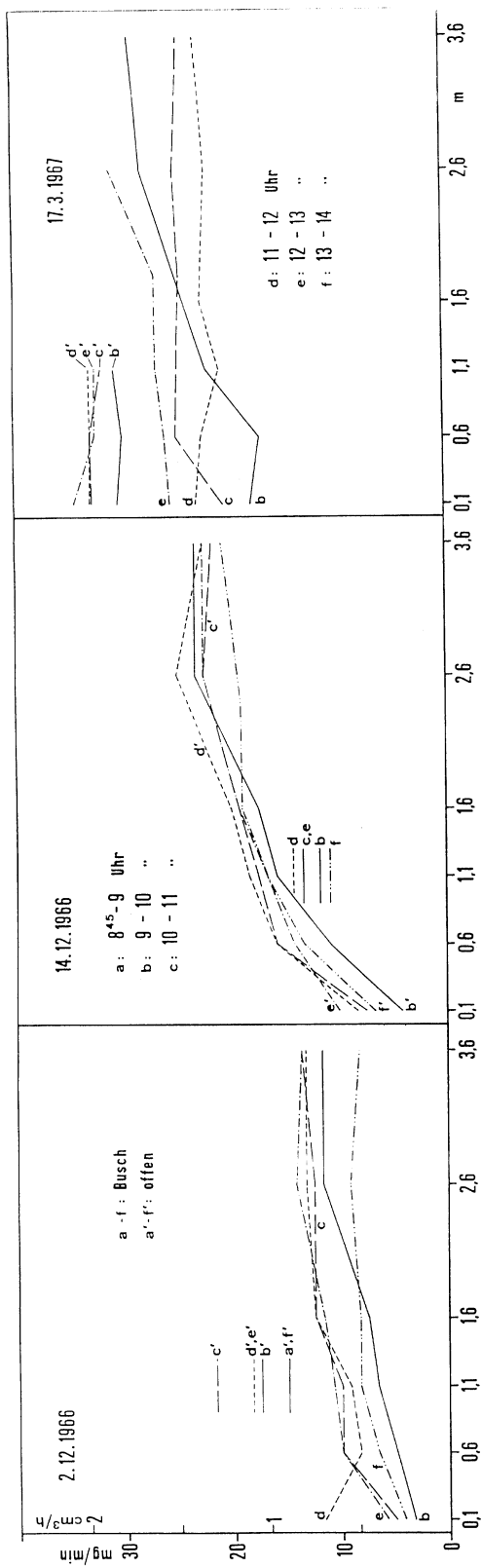


Abb. 20. Gleichzeitige Evaporationsmessungen (Piche-Evaporimeter, weiße Fil-
terpapierendecke von 5 cm Durchmesser) auf einer kleinen Lichtung im Wald
am Auswäldrandort. An jeweils einer Stelle wurde in ver-
schiedenen Höhen (bis 3,6 m), an der anderen nur in 1,1 m Höhe
oder in 0,1, 0,6 und 1,1 m Höhe (17.3.1967) gemessen. Regenzeit:
1.12.1966 bis 1.1.1967. Die einzelnen Erklärungen gelten für alle Teilabbildungen.