

- advektive Typ der vertikalen Niederschlagsverteilung. In: *Erdkunde* 19, 1965, S. 6–14.
- : Zur Klimatologie der Nordchilenischen Wüste. In: *Meteorologische Rundschau* 19, 1966, S. 1–7.
 - : Zur Geomorphologie des Glatthang-Reliefs in der ariden Subtropenzone des Kleinen Nordens von Chile. In: *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. 13, 1969a, S. 1–21.
 - : Klimatologische Regeln zur Vertikalverteilung der Niederschläge in Tropengebirgen. In: *Die Erde* 100, 1969b, S. 286–306.
 - : Chile, seine länderkundliche Individualität und Struktur. Darmstadt 1970. (Wissenschaftliche Länderkunden Bd. 2/3).
- ZAMORANO, M.: *Boletín climatológico mensual*, Dic. 1973. Universidad del Norte, Departamento de Agricultura, Boletín No. 21. Arica 1974.
- : Cuatro Años de siembra de nubes en el extremo Norte de Chile, 1968–1971, (maschinenschriftl. Manuskript). Arica o. J.

STADTKLIMATISCHE EFFEKTE DER RAUM-ZEITLICHEN NIEDERSCHLAGSVERTEILUNG AUFGEZEIGT AM BEISPIEL VON MEXIKO-STADT

Mit 7 Abbildungen und 1 Tabelle

ERNESTO JAUREGUI UND DIETER KLAUS

Summary: Urban effects on precipitation in a large metropolis in the tropics: the case of Mexico City

Precipitation analysis using urban/rural precipitation ratio for Mexico City is used to detect time trends in urban effects. A steady increase in rainfall amounts (since the 1940's) is apparent from this analysis. At the same time amounts of precipitation seem to have decreased to the windward and the leeward side of this tropical city in relation to the east winds of the rainy season. Precipitation increase in the urban area is accompanied by a rise in the frequency of heavy rains.

In wet years there is evidence of a marked preference of precipitation for falling during weekdays. The city's aerosol production, too, shows maximum values towards the middle and end of the week. In dry years a weekend reduction in aerosols apparently favours additional amounts of precipitation. Genetic relationships are discussed.

SCHMAUSS (1927) war der erste Wissenschaftler, der in einer klimatologischen Studie nachwies, daß die Urbanisation einen signifikanten Einfluß auf die Niederschlagsverteilung nehmen kann. In den folgenden Jahrzehnten ist dieser Sachverhalt wiederholt für Städte der gemäßigten Breiten überprüft worden (ATKINSON 1970).

In jüngster Zeit führen Bevölkerungsexplosion und Landflucht zu einem Anwachsen städtischer Siedlungen in der dritten Welt. Am Ende dieses Jahrhunderts werden minde-

stens zwei Drittel der Menschen tropischer Länder in Städten leben. Welche stadtklimatischen Effekte als Folge dieses Urbanisationsprozesses in der Tropenzone zu erwarten sind, ist bisher nur unzureichend geprüft worden.

Am Beispiel von Mexiko-Stadt soll gezeigt werden, daß mit ganz erheblichen Veränderungen der Niederschlags-höhen und Niederschlagsintensitäten im Bereich rasch wachsender tropischer Städte zu rechnen ist. Die daraus resultierenden städtebaulichen Konsequenzen sollten so früh wie möglich erkannt und in die Stadtplanung einbezogen werden (vgl. JAUREGUI 1974).

Datenmaterial und klimatologische Lagebeschreibung

Mexiko-Stadt liegt im Südwesten des Hochbeckens von Mexiko, welches durch Erhebungen, die zum Teil mehr als 1000 m das mittlere Beckenniveau (2250 m) überragen, in westlicher, südlicher und östlicher Richtung abgeschlossen wird (Abb. 1). Nur in nördlicher Richtung steigt die Beckenumrandung maximal bis 200 m über das mittlere Beckenniveau auf.

Die Lage der berücksichtigten meteorologischen Stationen ist in Abb. 1 angegeben. Winde aus östlichen Richtungen herrschen im Hochbecken von Mexiko während der Regenzeitmonate Mai–Oktober vom Bodenniveau bis in große

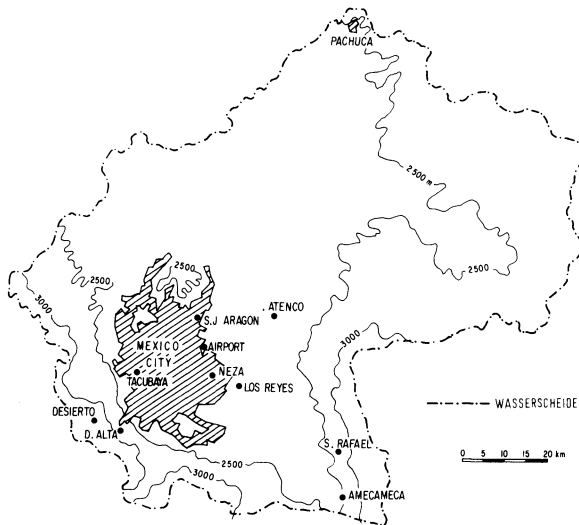


Abb. 1: Lage der berücksichtigten Stationen im Hochbecken von Mexiko

Location of stations in the high basin of Mexico

Höhen vor. Leider gibt es – infolge der topographischen Gegebenheiten – nur eine kontinuierlich betriebene außerstädtische Station, die – bezogen auf die vorherrschenden Regenzeitwinde – im Lee der Stadt liegt. Alle sonstigen berücksichtigten außerstädtischen Meßstationen sind Luvstationen.

Das Klima von Mexiko-Stadt ist tropisch wechselfeucht mit Niederschlägen, die im langjährigen Mittel in den Mona-

ten Juni und September maximal werden. Im Juli und oft auch im August ist eine kurzfristige Niederschlagsreduktion regelmäßig ausgebildet, die als kleine Trockenzeit bezeichnet wird.

In der winterlichen großen Trockenzeit von November bis April kommt es nur gelegentlich im Gefolge von Kaltluft-einbrüchen, den sogenannten „Nortes“, zu wenig ergiebigen Niederschlägen. Generell sind die Wintermonate wolken- und niederschlagslos, aber dennoch infolge der Höhenlage durch vergleichsweise geringe Temperaturen gekennzeichnet.

Langfristige Entwicklung stadtklimatisch bedingter Niederschlagseffekte

Die kurzfristigen Fluktuationen der jährlichen Niederschlagswerte der Beobachtungsstationen des Beckens von Mexiko wurden für den jeweils verfügbaren Zeitraum durch die Berechnung fünfjähriger gleitender Durchschnitte eliminiert. Eine deutliche Zunahme der Niederschlagssummen ist seit den fünfziger Jahren bei einigen Stationen erkennbar. Diese ist allerdings für die Station Tacubaya, die im innerstädtischen Bereich von Mexiko-Stadt liegt, stärker als an den Stationen des städtischen Umlandes ausgeprägt (Abb. 2, Tab. 1).

Natürliche Niederschlagsänderungen, die für große Bereiche des zentralmexikanischen Hochlandes belegt sind, machen es zunächst schwierig, durch stadtklimatische Effekte bedingte Niederschlagsänderungen im Stadtbereich von

Tabelle 1: Fünfjähriger mittlerer saisonaler Niederschlag (in mm für Mai–Oktober) sowie der Quotient städtischer/außerstädtischer Niederschläge
Five year average seasonal rainfall (in mm., May to October) and urban/rural rainfall ratios

Periode	Tacubaya (Stadt) 1	Atenco (Land) 2	Quotient $\frac{1}{2}$	Periode	Tacubaya (Stadt) 1	Desierto (Land) 2	Quotient $\frac{1}{2}$
1952–55	615	538	1.142	1941–43	626	1301	0.482
1956–60	652	530	1.229	1951–55	651	1207	0.539
1961–65	736	564	1.305	1956–60	652	1207	0.540
1966–70	808	548	1.476	1961–65	736	1136	0.647
1971–75	764	468	1.634	1966–70	808	1247	0.648
1976–80	834	487	1.713	1971–75	764	1233	0.620
				1976–80	834	1116	0.747

Periode	Tacubaya (Stadt) 1	San Juan (Land) 2	Quotient $\frac{1}{2}$	Periode	Tacubaya (Stadt) 1	San Rafael (Land) 2	Quotient $\frac{1}{2}$
1941–45	593	535	1.11	1941–45	593	981	0.605
1946–48	587	482	1.22	1946–50	579	789	0.734
1954–56	666	488	1.37	1961–65	736	931	0.790
1957–60	657	496	1.33	1966–70	808	999	0.809
1961–65	736	534	1.38	1971–75	764	959	0.796
1966–70	808	519	1.56	1976–80	834	966	0.863
1971–75	764	532	1.44				
1976–80	834	567	1.47				

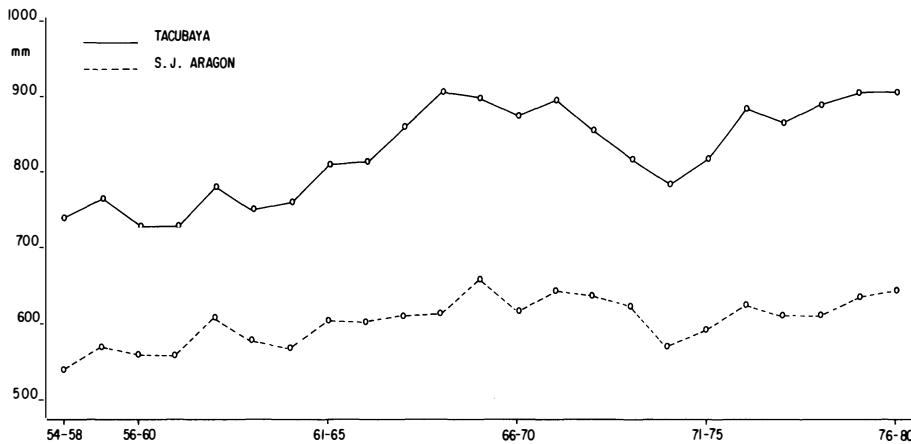


Abb. 2: 5-jährige gleitende Durchschnitte der jährlichen Niederschlagssummen für eine städtische (Tacubaya) und eine randstädtische (S. J. Aragon) Station

Quinquennial running mean values of annual precipitation totals for an urban (Tacubaya) and a suburban station (S. J. Aragon)

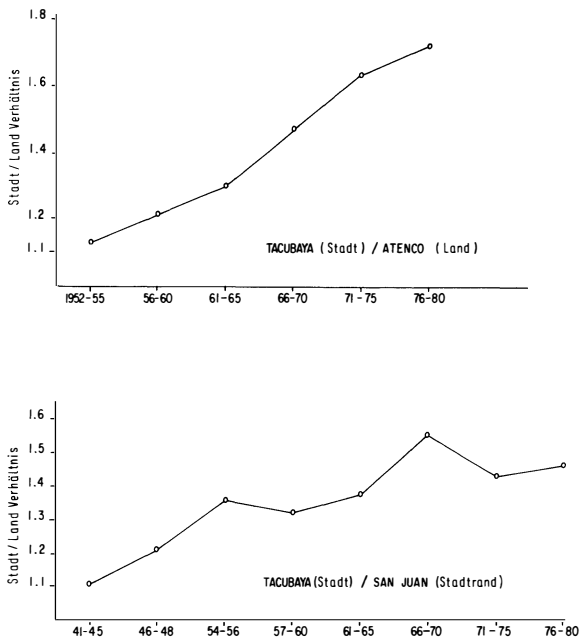


Abb. 3: Zeitreihen der Quotienten aus den regenzeitlichen Niederschlagssummen städtischer und ländlicher sowie städtischer und randstädtischer Stationen

Time trends of the ratios from the rainy season precipitation totals at urban and rural as well as urban and suburban stations

städtischen Niederschlagshöhen bestimmt. In Tab. 1 und in Abb. 3 wird deutlich, daß diese Quotienten mit wachsender Distanz vom Stadtzentrum stromauf zur vorherrschenden Windrichtung durch eine verstärkte Zunahme des für alle außerstädtischen Stationen deutlich ausgeprägten Trends gekennzeichnet sind. Mit Ausnahme der Station Desierto, die bezüglich der vorherrschenden Ostwinde im Lee der mexikanischen Metropole liegt, ist der auf der Basis der fünfjährigen gleitenden Durchschnitte berechnete Trend für alle Stationen signifikant im 1%-Niveau. Für Desierto kann der zeitliche Wertzuwachs dieses Quotienten noch in 10% aller Fälle durch Zufall erklärt werden.

Räumlich haben sich die Differenzen der Niederschlagshöhen luv- und leewärts der Metropole unterschiedlich entwickelt. Die Differenz zwischen Tacubaya und Desierto (Abb. 1) hat von 1951-1955 zum Jahrfünft 1976-1980 um 52% abgenommen, während die Differenz zwischen Tacubaya und S. J. Aragon um 7% und zwischen Tacubaya und Atenco um 34% anstieg (jeweils bezogen auf das Regenzeitmittel Tacubayas). Die im Lee der Stadt gelegene Station Desierto, die infolge ihrer Gebirgsluvlage (Abb. 1) höhere mittlere Niederschlagssummen als Tacubaya aufweist, zeigte also in den vergangenen 30 Jahren keine der Niederschlagszunahme Tacubayas vergleichbare Entwicklung. Im Gegenteil, während in Tacubaya ein signifikanter Niederschlagsanstieg zu verzeichnen war, sanken in Desierto die Niederschlagshöhen sogar leicht ab. Die regenzeitlichen Stadt-Land-Niederschlagsdifferenzen haben sich dadurch um knapp 300 mm reduziert.

In dem luvwärts der Metropole gelegenen Vorort S. J. Aragon nahmen die Niederschlagssummen im Beobachtungszeitraum schwächer zu als in Tacubaya. Die Stadt-Umland-Niederschlagsdifferenzen stiegen dadurch um 7% an.

Im ebenfalls luvwärts der Stadt, allerdings in größerer Distanz, gelegenen Atenco, wo im langjährigen Mittel ähnlich wie in S. J. Aragon stets geringere Niederschlagshöhen als in Tacubaya zu beobachten sind (Tab. 1), nahmen die Nie-

Mexiko-Stadt nachzuweisen. Dieser Nachweis gelingt, wenn die Niederschlagshöhen der Umlandstationen in Relation zu den Niederschlagshöhen der Stationen des Stadtgebietes interpretiert werden. Dazu wurden für die Regenzeitmonate die Quotienten aus den saisonalen städtischen und außer-

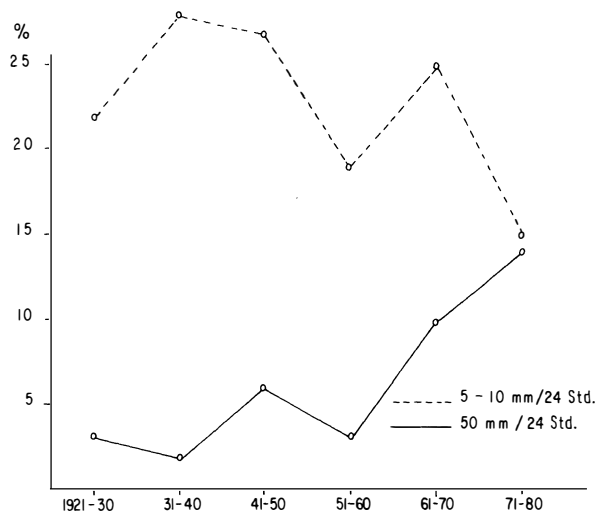


Abb. 4: Zeitliche Häufigkeitsänderung der täglichen Niederschlagshöhen in den Klassen 5-10 mm/24 h und ≥ 50 mm/24 h für die Station Tacubaya während der Regenzeit (Mai-Okt.)

Temporal frequency changes in two categories of 24 hr rainfall intensities: 5-10 mm/24 hr and ≥ 50 mm/24 hr range for the Tacubaya station during the rainy season (May-Oct.)

erschlagssummen im Beobachtungszeitraum deutlich ab. Diese Niederschlagsreduktion führte in Verbindung mit der erheblichen Niederschlagssteigerung in Tacubaya zu einem Anstieg der Stadt-Umland-Niederschlagsdifferenz um 34%.

Die stadtklimatischen Niederschlagseffekte beschränken sich, wie diese Analyse zum Stadtzentrum luv- und leeorientierter Stationen zeigt, auf den Stadtbereich und die Vororte. Im weiteren Umland ist sowohl lee- als auch luvwärts der Stadt in einiger Distanz eine schwache Abnahme der effektiven Niederschlagswerte erkennbar. In beiden Richtungen ändern sich insgesamt die Stadt-Umland-Niederschlagsdifferenzen so, daß eine niederschlagsgenetische Bevorzugung des innerstädtischen Raumes eindeutig belegt ist.

Vielfach beschrieben ist die Niederschlagszunahme im innerstädtischen Bereich. Eine schwache Niederschlagsabnahme ist gelegentlich auch für luvwärts der Stadt gelegene Stationen nachgewiesen worden. In der stadtklimatischen Literatur ist nach Kenntnis der Autoren allerdings bisher kein Fall beschrieben worden, in dem auch leewwärts des Urbanisationsbereiches eine gleichbleibende oder sogar schwach abnehmende Tendenz in den Niederschlagshöhen bei gleichzeitiger Zunahme der Niederschlagssummen im städtischen Bereich auftrat. In allen bisher untersuchten Fällen konnte vielmehr eine deutliche Zunahme der Niederschlagssummen im Lee der Städte, bezogen auf die vorherrschende Windrichtung, belegt werden (CHANGNON 1970).

Bezogen auf Mexiko-Stadt liegen die leewärtigen Stationen im Luv der bis zu 1000 m aufragenden westlichen Beckenumrandung (Abb. 1). Stadtklimatologisch begründete Niederschlagsänderungen sind auch für Städte, in deren Lee ein Gebirgshindernis aufragt, noch nicht beschrieben

worden. Der Versuch, dieses Phänomen niederschlagsgenetisch zu deuten, wird im letzten Abschnitt dieser Arbeit unternommen.

Änderung der Niederschlagsintensität im Stadtbereich

Es stellt sich die Frage, ob mit der Zunahme der Niederschlagshöhen im städtischen Raum auch eine Änderung der Niederschlagsintensität erfolgt. Für den Zeitraum von 1921-1980 wurden die Häufigkeiten bestimmter Intensitätsklassen ausgezählt. Als charakteristisches Ergebnis zeigt Abb. 4 die zeitlichen Häufigkeitsänderungen der täglichen Niederschlagshöhe für die Klassen 5-10 mm pro Tag und 50 mm pro Tag.

Seit dem Jahrzehnt 1940-1950 ist eine deutliche Zunahme der Starkregenhäufigkeit zu verzeichnen, die einhergeht mit

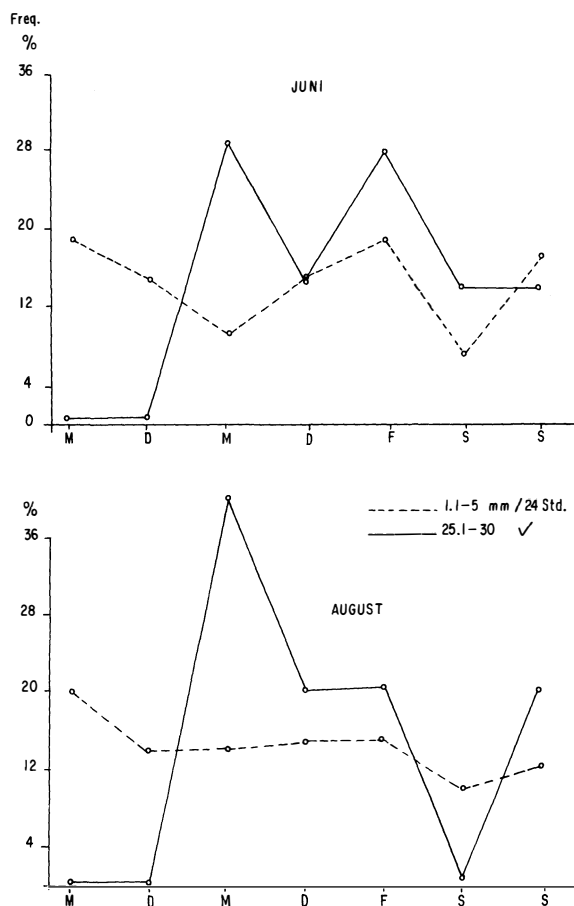


Abb. 5: Prozentuale Häufigkeit von Niederschlagstagen in Abhängigkeit von den Wochentagen für die Intensitätsklassen 1.1-5 mm/24 h und 25.1-30 mm/24 h im Zeitraum 1970-80 für die Station Tacubaya

Percentage frequency of days with precipitation in their dependency upon the days of the week in the intensity range 1.1-5 mm/24 hr and 25.1-30 mm/24 hr for station Tacubaya over the period 1970-80.

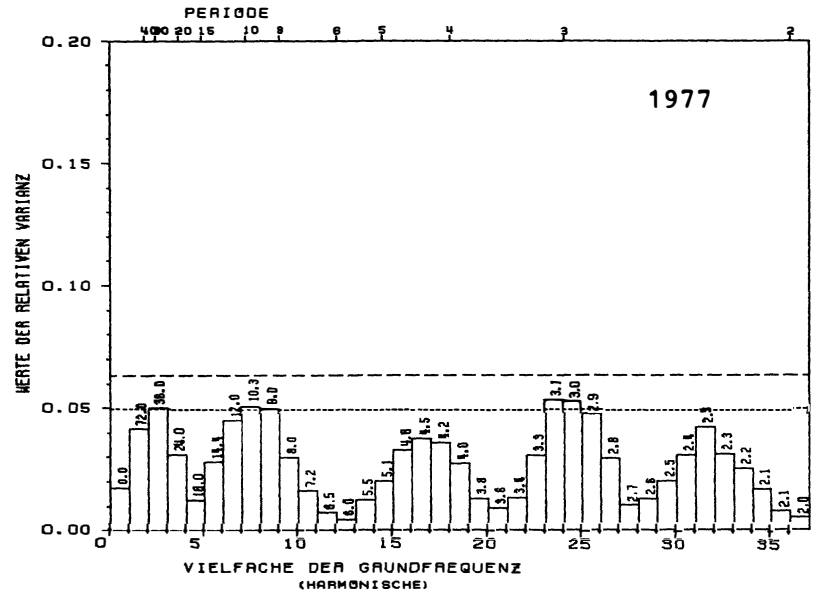
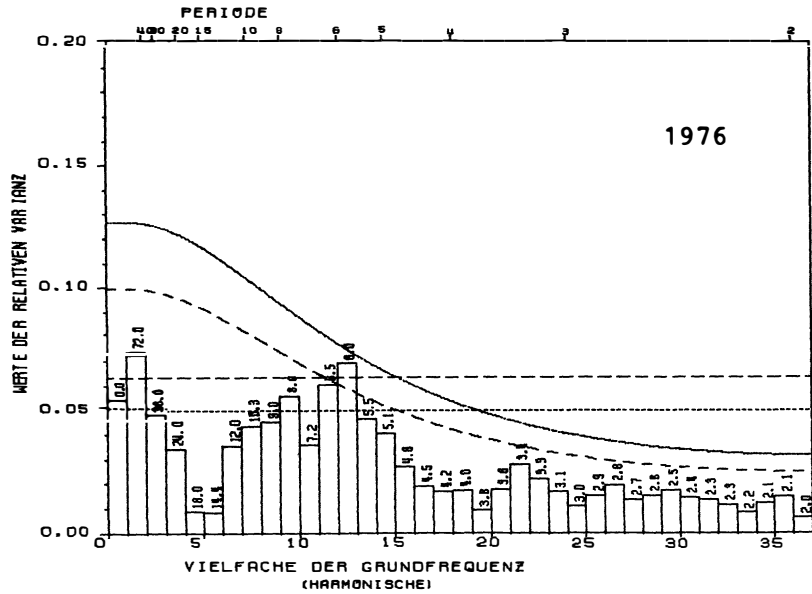
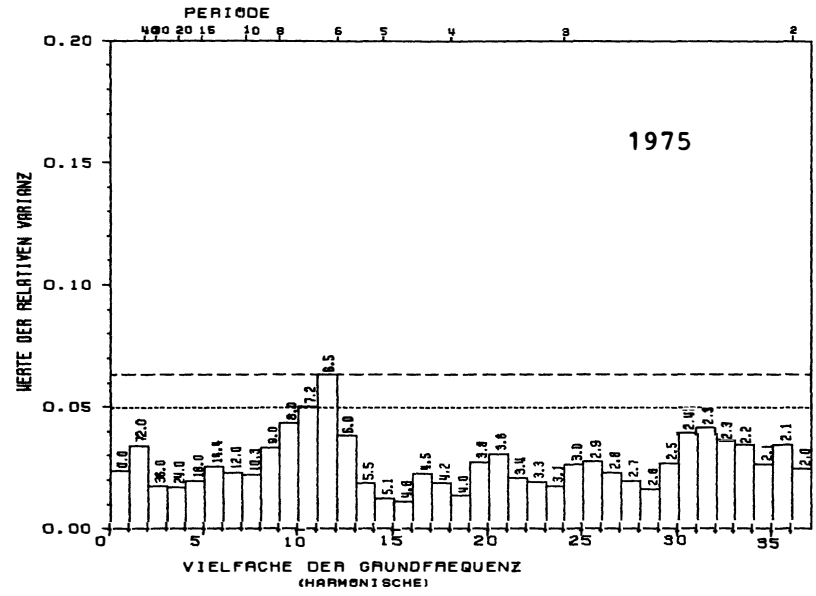
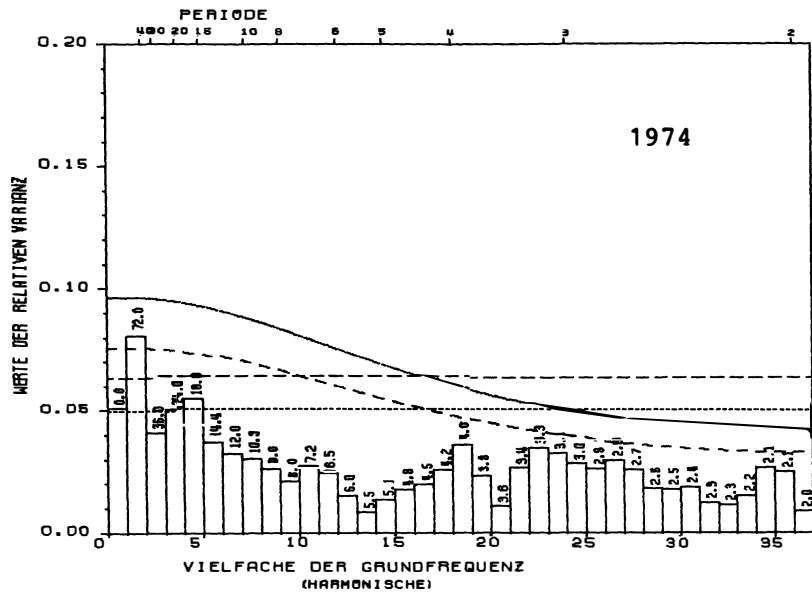


Abb. 6: Varianzspektren der täglichen Niederschlagssummen Tacubayas in der Regenzeit (Mai–Okt.) der Jahre 1974–1977
 Spectrum of variance of daily precipitation totals at Tacubaya during the rainy season (May–Oct.) for the period 1974–1977

einer Häufigkeitsabnahme mäßiger und schwacher Niederschlagsintensitäten, welche allerdings weniger deutlich in Erscheinung tritt. Die Frage nach der dominanten Ursache dieser Änderung der Niederschlagsintensität ist durch eine Analyse der Starkregenhäufigkeit in Abhängigkeit zu den Werktagen insofern zu klären, als der Partikelaustritt eine schwache Wochenperiodizität zeigt (KLAUS, JAUREGUI 1979), die für den Wärmeineffekt fehlt. Die Änderung in der Aerosolkonzentration könnte über die Verfügbarkeit von Kondensationskernen, der Wärmeineffekt über eine Verstärkung konvektiver Kräfte auf die niederschlagsgenetischen Prozesse Einfluß nehmen.

Abb. 5 zeigt für Juni und August der Periode 1970–1980, daß eine Bevorzugung der Werktage besteht, die sich allerdings nur für August als signifikant erweist. Geringe Niederschlagsintensitäten zeichnen keinen Wochenrhythmus nach.

Die Bedeutung der Wochenperiodizität im Hinblick auf die Ursachenklärung stadtklimatisch bedingter Niederschlagseffekte veranlaßt zu einer weitergehenden Analyse dieser Phänomene, die für einige Städte der gemäßigten Breiten bereits von DETWILLER (1970) beschrieben wurden.

Wochenperiodizität der Niederschlagshöhen

Für ausgewählte Regenzeitmonate läßt sich eine signifikante niederschlagsgenetische Bevorzugung der Werktage Mittwoch und Donnerstag während der Periode 1970–1980 nachweisen. Der prozentuale Anteil an der mittleren wöchentlichen Niederschlagssumme ist in diesen Monaten an den Werktagen ohne Berücksichtigung der Niederschlagsintensität signifikant höher als an den Wochenenden. Sollte diese Erscheinung generelle Gültigkeit haben, so müßte eine Varianzspektrumanalyse der 184 täglichen Niederschlagswerte während der Regenzeitmonate eine siebentägige Periodizität signifikant hervorheben.

In Abb. 6 sind beispielhaft die Ergebnisse dieser Varianzspektrumanalysen für die Jahre 1974–1977 dargestellt. Eine Durchsicht der Spektren zeigt, daß nur in den Jahren 1975 und 1976 die ca. siebentägige Periode, deren Wert, durch das Auflösungsvermögen des Verfahrens bedingt, zwischen 6 und 8 Tagen liegt, signifikant in Erscheinung tritt. In den Jahren 1972, 1973, 1974, 1977 und 1979 kann eine 36-tägige bzw. 72-tägige Periode signifikant herausgestellt werden, die bekannte regenzeitliche Fluktuationen in den Niederschlagshöhen, wie die bereits erwähnte kleine Trockenzeit, nachzeichnet. Eine Eliminierung der langfristigen Fluktuationen größer 30 Tage aus dem Datensatz bewirkt zwar einen deutlichen Anstieg der auf der siebentägigen Periode erklärten Varianzanteile, das Signifikanzniveau wird aber nicht erreicht.

Die Frage ist zu stellen, warum in mehreren Jahren der siebentägige Rhythmus in den Niederschlagshöhen ausgebildet ist, während er in anderen fehlt. In Abb. 7d ist die erklärte Varianz in Prozent der Gesamtvarianz für die 7-tägige Periode in Abhängigkeit zur Summe der regenzeitlichen Niederschläge abgetragen. Ein positiver linearer, signifikanter Zu-

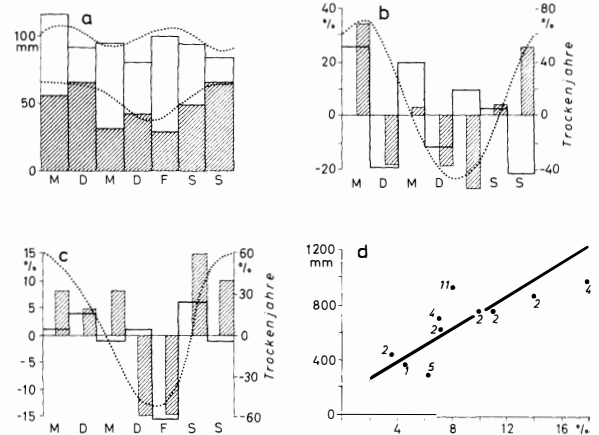


Abb. 7: a) Mittlere wochentägliche Niederschlagshöhe in mm für die Regenzeitmonate der Periode 1970–79. Schraffiert abgehoben sind die mittleren wochentäglichen Niederschlagshöhen für die Trockenjahre der Beobachtungsperiode mit Regenzeitniederschlag < 500 mm

b) Prozentuale Abweichung der Zahl der Tage mit Niederschlagshöhen größer 10 mm vom Wochenmittel der Regenzeit für die Periode 1970–79 insgesamt sowie für die Trockenjahre (schraffiert)

c) Prozentuale Abweichung der Zahl der Niederschlagstage vom Wochenmittel für die Regenzeitmonate der Periode 1970–79 und für die Trockenjahre dieses Zeitraumes (schraffiert)

d) Zusammenhang zwischen der Höhe der regenzeitlichen Niederschlagssumme und dem im Periodenbereich 6–8 Tage erklärten Varianzanteil (%) an der Gesamtvarianz

a) Mean weekday amount of precipitation in mm. for the months of the rainy season during the period 1970–79. Mean weekday precipitation amounts (hatched) during the dry years of the observation period with a precipitation < 500 mm. during the rainy season

b) Percentage deviation of the number of days with precipitation exceeding the weekly mean of the rainy season by more than 10 mm. during the period 1970–79 altogether, as well as during the dry years (hatched)

c) Percentage deviation from the mean of the number of days with precipitation during the months of the rainy season for the period 1970–79, and for the dry years of this period (hatched)

d) Relationship between the amount of precipitation total of the rainy season and the proportion of variance explained for the periodic range of 6–8 days (%) in the total variance

sammenhang wird deutlich, der die Hypothese nahelegt, daß mit wachsender Höhe der saisonalen Niederschläge der Siebentagesrhythmus in den täglichen Niederschlagshöhen an Bedeutung gewinnt. Betrachtet man die Jahre, in denen dieser Zusammenhang weniger deutlich hervortritt, so zeigt sich, daß hier tägliche Niederschläge größer 10 mm wiederholt in ununterbrochener Abfolge auftreten. In den Fällen mit besonders großer Abweichung von der Regressionsgeraden sind es 11, 5 und 4 aufeinanderfolgende Tage, während in allen übrigen Fällen im Mittel an nur zwei aufeinanderfolgenden Tagen Niederschlagshöhen über 10 mm während der gesamten Regenzeitmonate erreicht werden.

Zwei Phänomene scheinen demnach die Wochenrhythmik im Niederschlagsgeschehen zu stören:

1. Das Auftreten von unterdurchschnittlich geringen saisonalen Niederschlagshöhen, die durch eine Abnahme der Zahl der Niederschlagstage sowie durch relativ geringe tägliche Niederschlagssummen bedingt sind.

2. Das Auftreten von quasistationären Störungen, das zu exzeptionellen täglichen Niederschlagshöhen an einer großen Zahl aufeinanderfolgender Tage führt.

Beide Aussagen zeigen, daß synoptische Gegebenheiten stadtklimatische Effekte überkompensieren, da das Inerscheintreten ihrer Wirkung unterdrückt wird. Der positive Zusammenhang zwischen Intensität der Wochenperiodizität der täglichen Niederschlagshöhen und der Größe der saisonalen Niederschlagssummen kann nur bedeuten, daß mit wachsender synoptisch bedingter potentieller Niederschlagsbereitschaft, also der Häufigkeitsbevorzugung vertikal indifferent geschichteter relativ feuchter Luftmassen, die stadtklimatischen Wirkungen maximiert werden. In diesen Fällen könnte die Wochenperiodizität der Aerosolkonzentration die Wochenperiodizität der täglichen Niederschlagshöhen signifikant bedingen. Insbesondere würde durch diese Mechanismen das Anwachsen der Starkregenhäufigkeiten ursächlich mit dem Anwachsen der Zahl der Kondensationskerne verknüpft.

Wie Abb. 7 zeigt, können diese Erscheinungen im Mittel der zehnjährigen Periode nicht mehr belegt werden. Weder die mittleren wochentäglichen Niederschlagshöhen für den Zeitraum 1970–1979 (Abb. 7a), noch die prozentualen Abweichungen der Zahl der Niederschlagstage insgesamt vom Wochenmittel (Abb. 7c), noch die Abweichung der Zahl der Tage mit Niederschlagshöhen größer 10 mm vom entsprechenden Wochenmittelwert (Abb. 7b) spiegeln eine Bevorzugung bestimmter Werkstage wider.

Etwas anders scheinen die Verhältnisse für Trockenjahre mit saisonalen Niederschlagshöhen unter 500 mm zu sein. Hier ist zwar die Wochenrhythmik im Mittel der Trockenjahre nicht signifikant ausgebildet, eine Niederschlagsbegünstigung des Wochenanfangs und Wochenendes kann aber in allen Diagrammen abgelesen werden und tritt besonders deutlich für die Zahl der Niederschlagstage mit Niederschlagssummen größer 10 mm in Erscheinung.

Diese auf der Grundlage eines Datensatzes von 552 Niederschlagstagen gewonnene und mit einer zehnprozentigen Irrtumswahrscheinlichkeit richtige Aussage führt zu der bedeutsamen Folgerung, daß möglicherweise stadtklimatische Effekte in Dürre Jahren niederschlagsunterdrückend wirken können. Eine ursächliche Erklärung ergibt sich daraus, daß mit steigender Zahl sehr kleiner Kerne die Niederschlagswahrscheinlichkeit deshalb abnimmt (KLAUS 1981), weil an den vielen kleinen Kernen so viele winzig kleine Wassertropfchen kondensieren, daß letztlich keine Niederschlagsbildung zustande kommt. Erst durch einen starken synoptischen Impuls ausgelöste Niederschläge führen über wash-out-Effekte zur Reinigung der Atmosphäre, wodurch bis zur neuerlichen Aerosolanreicherung die Bildung von Miniaturtropfchenwolken unterbleibt.

Die Injektion hygroskopischer Substanzen in die städti-

sche Atmosphäre führt im Falle hinreichend großer Feuchte- werte zwar zur Wolkenbildung, die beim Fehlen dieser Substanzen oft ausgeblieben wäre, bewirkt aber infolge der Kleinheit der Wolkenelemente keinen Niederschlag. Die Wolkenbildung behindert die Einstrahlung und damit die Ausbildung starker konvektiver Kräfte, die möglicherweise zur Niederschlagsauslösung beim Fehlen der Feinaerosole unter sonst gleichen Bedingungen geführt hätte.

Diskussion

Bedingt durch stadtklimatische Effekte ist im Stadtbereich von Mexiko-Stadt gegenüber dem weiteren Umland eine beständige Niederschlags-erhöhung im Ablauf der letzten dreißig Jahre erfolgt, die heute – konservativ abgeschätzt – in der Größenordnung von 150 Mill. m³ Niederschlagswasser pro Jahr liegt. Da dieses Niederschlagswasser dem Abfluß zugeführt wird, lindert es die durch die Bevölkerungsexplosion der letzten Jahre ausgelöste Wassernot kaum. Planerische Maßnahmen sollten hier Abhilfe schaffen.

Eine wesentliche Ursache für diese Niederschlags-erhöhung könnte die wachsende Aerosolproduktion in der Hochtalung von Mexiko sein. Ein grobes Maß zur Abschätzung der optisch wirksamen Luftverunreinigung stellt die Sichtweite dar. Im dreißigjährigen Zeitraum von 1937–1966 ist die mittlere Sichtweite sowohl im Januar als auch im Juli (14 Uhr Termin) von 20 km auf 4 km zurückgegangen (JAUREGUI 1969). Im Jahre 1978 lagen die entsprechenden mittleren Schichtweiten bei nur 2 km. Das ist eine Reduktion um etwa 18 km in nur vierzig Jahren.

Für amerikanische Städte konnte eine Beziehung zwischen Partikelkonzentration und Sichtweite belegt werden (BACH, HAGEDORN 1970). Danach entspricht einer Sichtweite von 4 km eine Aerosolkonzentration von 300 kg/km³, einer Sichtweite von etwa 15 km hingegen eine Konzentration von nur 100 kg/km³. Grob geschätzt ist also in vierzig Jahren mehr als eine Verdreifachung der Aerosolkonzentration im Bereich der bodennahen Schichten von Mexiko-Stadt zu verzeichnen.

Ein genaueres Maß zur Bestimmung der optisch wirksamen Luftverunreinigungen, die durch undurchsichtige Staubteilchen und durch nur teilweise durchsichtige Wasserlösungströpfchen (Dunstteilchen) bewirkt wird, stellt der dekadische Trübungskoeffizient B bezogen auf die Wellenlänge $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ dar. Dieser gibt die Stärke des sichtbaren Strahlungsverlustes wieder und ist aus Aktionometermessungen direkt erfaßbar. Solche Messungen liegen seit 1911 für Mexiko-Stadt (Station Tacubaya) vor (GALINDO, MUHLIA 1970).

Während der Trübungskoeffizient B seit 1911 in den Trockenzeitmonaten von 0.08 auf 0.18 im Mittel zunahm, stieg B in den Regenzeitmonaten von 0.06 auf 0.18. Höchste Veränderungen sind im April und Juni zu beobachten, die geringsten in den Monaten November–März.

Nach empirischen Untersuchungen von McCOMICK und BAULCH (1962) kann durch Multiplikation von B mit 10³ die

Aerosolkonzentration im Bodenniveau in kg pro km^3 näherungsweise für Partikel des Größenspektrums $0.1\text{--}1.0\ \mu\text{m}$ bestimmt werden. Für die Monate April und Juni ist demnach eine Zunahme der bodennahen Aerosolkonzentration um etwa $200\ \text{kg/km}^3$ seit 1911 zu beobachten. Höchste Zuwachsraten kennzeichnen die Jahre nach 1950 bis zur Gegenwart.

Aus Aktinometermessungen verschiedener Wellenlängenbereiche kann der Exponent α der Wellenlängenabhängigkeit der Trübung bestimmt werden. Das Verfahren basiert auf der Tatsache, daß die Strahlungsminderung durch Dunst und Staub bei Änderung der Wellenlänge eine Intensitätsvariation erfährt. Die Häufigkeitsverteilung des Wellenlängenexponenten für die Jahre 1960–1962 – differenziert nach Regenzeit und Trockenzeit – zeigt, daß in der Trockenzeit α -Werte größer 1, in der Regenzeit hingegen kleiner 1 eindeutig vorherrschen (GALINDO, MUHLIA 1970).

Der Wellenlängenexponent läßt, soweit Trübung durch ein Gemisch von Teilchen verschiedener Größen bedingt ist, Folgerungen auf das Größenspektrum der Teilchen zu. Nach ROOSEN et al. (1973) ist $\alpha < 1$ ein Indikator für Aerosole arider Räume, $\alpha > 1$ hingegen Indikator für Industrieaerosole (PROSPERO, NEES 1979). Erstere erscheinen im Falle starker Anreicherung in der unteren Troposphäre bräunlich-grau, letztere hingegen in grau-schwarzer Färbung. Die Änderungen in der Häufigkeitsverteilung der α -Werte belegen demnach eindeutig eine jahreszeitliche Änderung in der Aerosolstruktur, die vor der Industrialisierung und Verkehrserschließung der Stadt offensichtlich nicht bestand, wie durch die starke regenzeitliche Zunahme des Trübungskoeffizienten B in jüngster Zeit nahegelegt wird. Es ist demnach festzuhalten, daß Aerosole kleinster Radien in den Regenzeitmonaten dominieren und nur teilweise den rain- und wash-out-Effekten unterliegen.

Klimatisch wirksam werden können diese Partikelanreicherungen durch ihre Fähigkeit zur Erwärmung der unteren Luftschichten. Steigen die Partikel bis zur Passat-Inversion auf, so können sie hier eine Intensivierung dieser Sperrschicht auslösen, niederschlagsbildende Prozesse also unterdrücken.

Andererseits wirkt die Partikelproduktion von Mexiko-Stadt hinsichtlich der leewärts zur vorherrschenden Windrichtung gelegenen Gebirge und deren orographisch ausgelösten Wolkensysteme ähnlich den Partikelgeneratoren, die zur Impfung orographischer Wolkensysteme erfolgreich in den Vereinigten Staaten eingesetzt werden. Die bei diesem Verfahren verwandten Silberjodidpartikel werden im Luv der Gebirge im Bodenniveau freigesetzt und von den erzwungen aufsteigenden Luftmassen den orographischen Wolkensystemen zugeführt. Sie bewirken eine statistisch signifikante Niederschlagserhöhung in der Größenordnung von 10–15% des langjährigen Mittelwertes. Die spezielle orographische Exposition von Mexiko-Stadt legt es nahe, die Wirksamkeit ähnlicher Prozesse hier zu vermuten.

Neben der Impfung orographischer Wolkensysteme dürften aber auch konvektive Wolkensysteme eine stadtklimatisch bedingte Modifikation erfahren. Nichtkonvektive Wolken geben etwa 50–70% ihres Wassergehaltes als Nieder-

schlag ab, konvektive Wolken können im Gegensatz dazu etwa 10–30mal so viel Wasser ausscheiden, wie sie zum Zeitpunkt ihres Reifestadiums an Wassergehalt aufweisen. Hier wird also fortwährend neue Umgebungsluft durch die Vertikalbewegung innerhalb der Cumuluswolke in den Kondensationsprozeß einbezogen. Das bedeutet aber, daß das Ausmaß der beim Kondensations- bzw. Eiskristallbildungsprozeß freigesetzten latenten Energie über die Stärke der Vertikalbewegungen die Zufuhr kondensationsfähiger Umgebungsluftmassen steuert. Das sogenannte dynamische Impfen, wobei etwa 100mal so viel Impfstoff den Wolken zugeführt wird wie beim Impfen orographischer Wolken, führt zunächst zur Verstärkung des Wolkenwachstums infolge der durch den Impfstoff ausgelösten raschen Verwandlung unterkühlter Tröpfchen in Eiskristalle. Die dadurch freigesetzte latente Energie läßt die vertikalen Auftriebskräfte in der Wolke ansteigen. Dieses Verfahren ist dann besonders wirksam, wenn eine schwache Inversionsschicht von der sich bildenden Cumuluswolke zu durchbrechen ist. Genau diese Bedingungen sind aber in Mexiko-Stadt in großer Häufigkeit zu beobachten. Einerseits ist die Zahl der Kondensationskerne beliebig groß, wobei allerdings in den Regenzeitmonaten bei weitem die Kerne mit kleinsten Radien überwiegen, andererseits ist die Passatinversion in ca. 2 km über dem Bodengrund zu durchbrechen.

Ein weiterer Effekt könnte in dem etwa 25×25 km umfassenden Stadtbereich von Mexiko-Stadt wirksam sein. Besonders ergiebig werden nämlich dann die Niederschläge aus Cumuluswolken, wenn zwei oder mehr dieser Wolken zusammenwachsen. Genau dieses Phänomen kann über der Stadt Mexiko in der Regenzeit immer wieder beobachtet werden und ist vermutlich Folge der reichen Aerosolfracht sowie der verstärkten Konvektion, die aus dem Wärmeiselleffekt resultiert. Der Wärmeiselleffekt ist bekanntlich in den frühen Abendstunden besonders stark ausgebildet und könnte dadurch einen Erklärungsbeitrag zur großen Häufigkeit frühabendlicher Gewitter liefern. In diesem Zusammenhang ist sicherlich auch von Bedeutung, daß gerade in den Abendstunden die Aerosolver Verschmutzung ihr zweites Maximum annimmt (KLAUS, JAUREGUI 1979).

Zusammengefaßt ergeben sich folgende Indikatoren zur ursächlichen Begründung der innerstädtischen Niederschlagszunahme: Bis in die Gegenwart erfahren sowohl die innerstädtischen Niederschlagshöhen als auch die städtische Aerosolproduktion eine beständige Zunahme. Der städtische Wärmeiselleffekt ist in der randtropischen Stadt Mexiko weitgehend durch die Wärmespeicherkapazität der Bausubstanz bedingt und zeigt in jüngster Zeit keine adäquate Intensitätszunahme. Verbunden mit der nicht immer ganz deutlich ausgeprägten Wochentagsperiodizität der Niederschlagshöhen in Feucht- und Trockenjahren scheint demnach die Aerosolproduktion wesentlich für die besonders in den letzten Jahren erkennbare Niederschlagszunahme in dieser randtropischen Stadt zu sein.

Daß die Niederschlagshöhen leewärts der Stadt im Bereich der westlichen Beckenumrandung (Station Desierto) nicht den vielfach für städtische Leestationen beschriebenen Anstieg zeigen, könnte gleichfalls auf diese Effekte zurück-

zuführen sein, die eine Niederschlagsbegünstigung über der Stadt, also einige Kilometer vor dem orographischen Hindernis, auslösen. Konvektive Wolkenbildung über der Stadt führt zu Kompensationsströmungen, die sowohl luv- als auch leewärts der Stadt Niederschlagsminderungen begründen.

Modellrechnungen von ORVILLE et al. (1979) zeigen, daß die thermische Emission von Kraftwerken, die einige Kilometer stromauf zur Hauptwindrichtung vor der Gebirgsluvseite in die Modellrechnungen eingeführt wurden, zu einer Verlagerung der Zone maximaler Steigungsniederschläge stromauf zur Windrichtung führen. Ähnliche Effekte schei-

nen in Mexiko-Stadt durch die städtische Überwärmungszone ausgelöst und durch die Aerosolproduktion noch verstärkt zu werden.

Die in dieser Arbeit gegebenen Erklärungsmodelle für die aus dem vorliegenden Beobachtungsmaterial erschlossenen Niederschlagsänderungen im urbanen Raum von Mexiko-Stadt können als erster Ansatz zur genetischen Deutung dieser Phänomene in der Tropenzone angesehen werden. Weitere Forschungen in tropischen Städten sind zur Ergänzung, Modifikation und weiteren Absicherung dieser Erklärungsmodelle notwendig.

Literatur

- ATKINSON, B. N.: The Reality of the Urban Effect on Precipitation. In: Urban Climate. Techn. Note No. 108, WMO, Genf 1970, S. 342–360.
- BACH, W., HAGEDORN, T.: Atmospheric Turbidity. An Index of Aerosol Loading of Atmosphere in U.S. Cities. Reprint of a Manuscript, 1969.
- CHANGNON, S. A.: Recent Studies of Urban Effects on Precipitation in the United States. In: Urban Climate. Techn. Note No. 108, WMO, Genf 1970, S. 325–341.
- DETTWILLER, J.: Incidence possible de l'activité industrielle sur les précipitations à Paris. In: Urban Climate. Techn. Note No. 108, WMO, Genf 1970, S. 361–362.
- GALINDO, G. J., MUHLIA, A.: Contribution to the Turbidity Problem in Mexico City. In: Arch. Met. Geophys. Biokl. Ser. B, Vol. 18, 1970, S. 169–186.
- JAUREGUI, E.: Aspectos meteorológicos de la contaminación del aire en la ciudad de México. In: Rev. Ing. Hidr. México, Vol. 23, 1969, S. 17–28.
- : La isla de lluvia en la ciudad de México. In: Rev. Ing. Hidr. México, Vol. 33, 1974, S. 138–151.
- KLAUS, D.: Klimatische und klima-ökologische Aspekte der Dürre im Sahel. Erdwiss. Forsch. Vol. 16, Wiesbaden 1981.
- KLAUS, D., JAUREGUI, E.: Análisis espectral del bióxido de azufre en la ciudad de México y su relación con algunos parámetros meteorológicos. In: Geofísica Internacional, Vol. 18, 1979, S. 263–308.
- MCCOMICK, A., BAULCH, D. M.: The Variation with Height of the Dust Loading over a City as Determined from Atmospheric Turbidity. In: APCA J Vol. 12, 1962, S. 492–496.
- ORVILLE, H. D., ECKHOFF, P. A., PEAK, J. E., HIRSCH, J. H., KOPP, F. J.: Numerical Simulation of the Effects of Cooling Tower Complexes on Clouds and Severe Storms. Inst. of Atmosph. Science, South Dakota School of Mines and Techn., NRC Fin. No. B 5764, 1979.
- PROSPERO, J. M., NEES, R. T.: Dust Concentration in the Atmosphere of the Equatorial North Atlantic: Possible Relationship to the Sahelian Drought. 1978, Reprint.
- ROOSEN, R. G., ANGIONE, R. J., KLEMCKE, C. H.: Worldwide Variations in Atmospheric Transmission: I. Baseline Results from Smithsonian Observations. In: Bull. Am. Met. Soc. Vol. 54, 1973, S. 307–316.
- SCHMAUSS, A.: Großstädte und Niederschlag. In: Met. Zeitsch., Vol. 44, 1927, S. 339–341.