

IMMISSIONSÖKOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN IN TUCUMÁN/NORDWESTARGENTINIEN

Mit 15 Abbildungen

WILFRIED ENDLICHER und ECKART SCHULTZ

Summary: Investigations on air pollution in Tucumán/Northwest Argentina

Over a two year period weekly integrating measurement of suspended particulate matter and nitrogen dioxide was carried out in Tucumán using the Sigma-2 sampler of the German Weather Service. The particle concentration based on deposition sampling and subsequent microscopical analysis is given for coarse (12–48 μm) and fine (3–12 μm) fraction of airborne dust. Acid sulfate and nitrate particles have been determined by ionchromatography. Nitrogen dioxide was sampled by diffusion tubes and determined ionchromatographically as well.

The dust load shows marked seasonal variations with maximum values during the dry winter months. The peaks considerably exceed German comparative values. The pronounced sulfate load may have adverse effects on health. Nitrogen dioxide values, however, are lower than in Central Europe. In conclusion, measures are recommended to improve air quality conditions in Tucumán.

1 Problemstellung

Das rasche Wachstum vieler Großstädte in Entwicklungs- und Schwellenländern führt zu einer immer schnelleren Zunahme von Problemen, die mit Fragen des lokalen Klimas, der Lufthygiene und allgemein der Stadtökologie verbunden sind. Während in Mitteleuropa in den 70er und 80er Jahren eine ganze Reihe großer Stadtklima-Projekte durchgeführt wurden, die zu neuen Einsichten und auch einer ganzen Reihe von Maßnahmen führten, fehlen aus der Dritten Welt immer noch vergleichbar breite Datensätze und umsetzbare Erkenntnisse. Während das Bevölkerungswachstum zu einer nahezu ungehemmten vertikalen und horizontalen Ausdehnung der Stadtlandschaften zwingt, sind die damit verbundenen Belastungen für die dort lebenden Menschen unter den jeweils spezifischen regionalklimatischen Bedingungen nur unzureichend bekannt. So liegen z. B. aus Lateinamerika quantitative Ergebnisse meist nur aus den großen Metropolen wie Mexiko Stadt oder São Paulo vor (JAUREGUI 1988a,b; WEHRHAHN 1993, 1994). Vor allem fehlen Untersuchungen, welche aus einer stadtoökologischen Sicht die Verbindung zwischen dem lokalen Klima und den verschiedensten Luftbelastungen herstellen.

Auch in Argentinien wurden bisher nur in wenigen Städten Klima und Luftqualität untersucht. Aus diesem Grunde wurde in der nordwestargentinischen Provinzhauptstadt Tucumán von 1991 bis 1993 in deutsch-argentinischer Kooperation ein Meßprogramm zum Stadtklima und zur lufthygienischen Situation durchgeführt (ENDLICHER und WÜRSCHMIDT 1995). Dabei lag der Schwerpunkt in dieser ca. 600 000 Einwohner umfassenden Bergfußoase zwischen Puna und Gran Chaco auf den thermischen und hygri-schen Differenzierungen und auf der Luftbelastung durch partikel- und gasförmige Luftbeimengungen (Abb. 1).

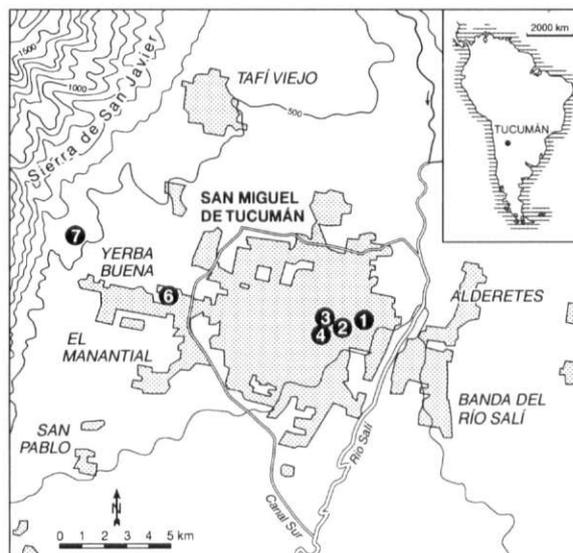


Abb. 1: Untersuchungsgebiet mit der Stadt Tucumán und der Positionierung der sieben Sigma-2 Depositionssammler

- 1 = Parque (Stadtpark)
- 2 = Laprida (Stadtzentrum)
- 3 = Córdoba (Stadtzentrum)
- 4 = Mendoza (Stadtzentrum)
- 6 = Yerba Buena (Villenvorort)
- 7 = Horco Molle (Westliches Umland)
- 8 = San Javier (nicht abgebildet)

Investigation area with the City of Tucumán and the emplacement of the seven Sigma-2 samplers

2 Regionalklimatische Situation

Tucumán (26°S, 65°W) besitzt ein ausgesprochenes Sommerregen-Subtropenklima (Abb. 2 und 3). Während des Südsommers liegt die Bergfußoase im Kernbereich des südamerikanischen Hitzetiefs und damit im Einflußbereich feuchter, amazonischer Luftmassen. Das Witterungsgeschehen wird weitgehend durch konvektive Schauer und Gewitter bestimmt, die z. T. eine erhebliche Intensität besitzen und zur Hochwassergefährdung an der Puna-Ostabdachung beitragen (HUNZINGER 1995). Der Jahresniederschlag von etwa 1000 mm wird im wesentlichen durch die Niederschläge des Sommerhalbjahres geliefert. Im Winter liegt Nordwestargentinien zwischen dem südostpazifischen und dem südatlantischen Hochdruckgebiet. Die Brückensituation wird dabei meist durch wandernde Antizyklonen gebildet (ENDLICHER 1995). Dazwischen kommt es aber zum Durchzug von Kaltfronten, die jedoch so weit in den Subtropen nur wenig wetterwirksam sind. Während die absoluten Minima im Winter den Gefrierpunkt unterschreiten können, und die Zuckerrohrplantagen deswegen einer mäßigen Frostgefährdung ausgesetzt sind, sind die Sommermonate durch Maximaltemperaturen über 30 °C, vor allem aber durch große Schwüle gekennzeichnet. Lokalklimatologisch von Bedeutung ist ein kräftiges Berg-Talwind-System, welches sich am Puna-Ostrand entwickelt und nachts von den feuchten Subtropenwäldern (südlichste Ausläufer der bolivianischen Yungas) und den darüber ausgebildeten Vorpuna-Matten herunterweht (SORIA 1995). Die nächtlichen Bergwinde sind nicht nur von erheblicher bioklimatologischer Wirkung, insbesondere in den westlichen Stadtteilen und den Villenvierteln der gehobenen Bevölkerungsschichten, sondern auch von lufthygienischer Bedeutung.

3 Meßmethodik

In Tucumán wurde ein 7 Stationen umfassendes und zwei Jahre in Betrieb gehaltenes Sondermeßnetz eingerichtet (Abb. 1). Station 1 „Parque“ wurde 1 km östlich des Stadtzentrums im großen Stadtpark in 431 m NN eingerichtet. Die Stationen 2–4 befinden sich im Stadtzentrum, die Station 2 „Laprida“ dabei auf einer unbebauten Parzelle, die Station 3 „Córdoba“ an der sehr stark befahrenen Straße gleichen Namens in der Nähe eines Parkplatzes und die Station 4 „Mendoza“ in der gleichnamigen Straße in der Fußgängerzone der Stadt. Die Station 6 „Yerba Buena“ wurde im gleichnamigen Villenvorort im

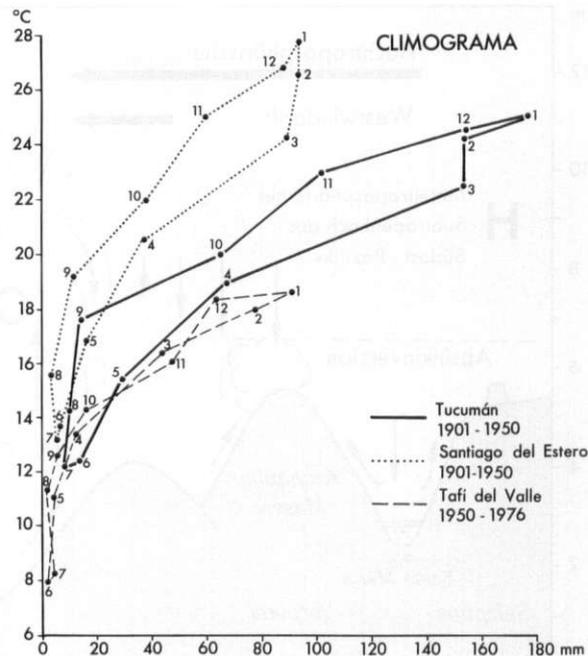


Abb. 2: Temperatur-Niederschlagsdiagramm von Tucumán sowie zum Vergleich von Santiago del Estero (Gran Chaco) und Tafí del Valle (Vorpuna)

Temperature-Precipitation diagramme of Tucumán as well as of Santiago del Estero (Gran Chaco) and Tafí del Valle (Prepuna)

Westen der Stadt bereits in einer Höhe von 480 m NN auf dem Rasen einer Villa aufgebaut. Stationen 7 und 8 befinden sich im Umland, Station 7 „Horco Molle“ 3 km westlich der Stadt am Bergfuß der Sierra de San Javier in 600 m NN und die Station 8 „San Javier“ auf der Kammhöhe der Sierra in 1350 m NN 10 km westlich und etwa 1000 m oberhalb der Stadt.

Als Meßinstrument wurde das von der Zentralen Medizin-Meteorologischen Forschungsstelle des Deutschen Wetterdienstes entwickelte Probenahmegerät Sigma-2 gewählt. Die Probenahme partikel- und gasförmiger Luftverunreinigungen erfolgt in diesem Gerät wind- und niederschlagsgeschützt (Abb. 4). Am unteren Ende einer vertikalen Sedimentationsstrecke von 15 cm Länge wurden dann transparente Haftfolien für die Probenahme partikelförmiger Luftbeimengungen exponiert. Die Probenahme erfährt vollständig den sedimentierfähigen Staub oberhalb von 2 µm Partikeldurchmesser (SCHULTZ 1989). Die sedimentierten Partikel werden auf der kleberbeschichteten Oberfläche der Haftfolie fixiert und sind für eine anschließende mikroskopische Durchlichtuntersuchung zugänglich. Außerdem wurden Gasdiffusionsröhrchen nach PALMES zur Probenahme

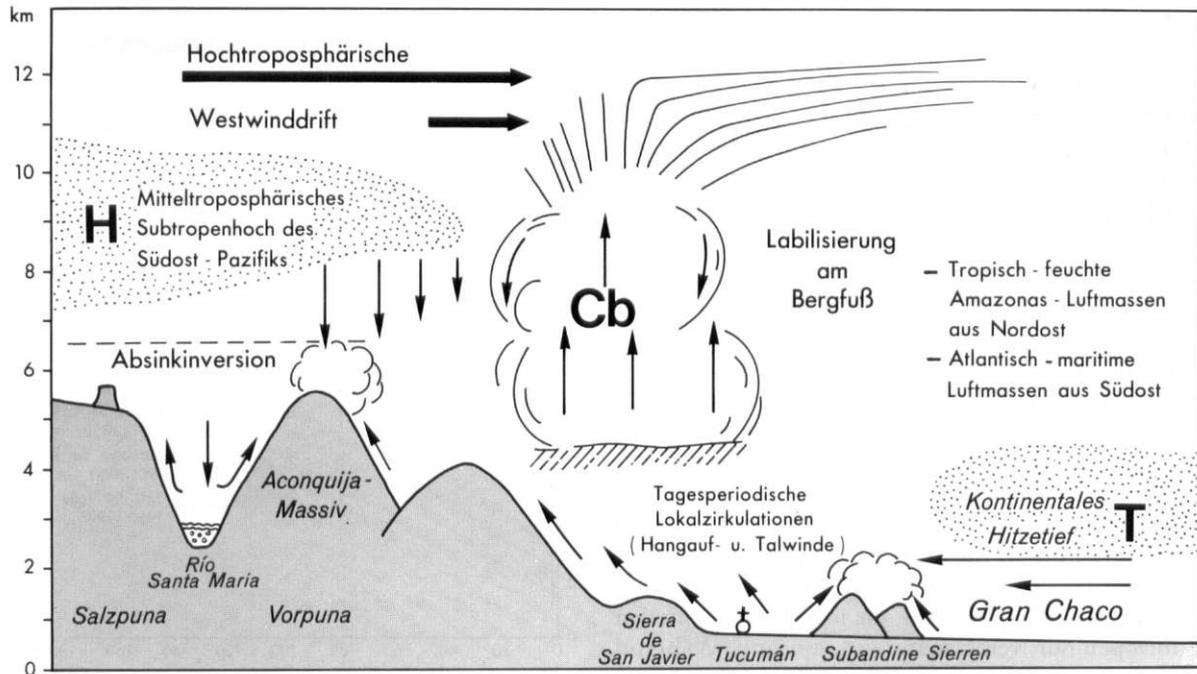


Abb. 3: Topographisches Profil des nordwestargentinischen Punaandes mit atmosphären Aktionszentren, Luftmassen sowie regionalen und lokalen Zirkulationssystemen

Topographic profile of the Puna border in Northwest Argentina with atmospheric action centers, air masses as well as regional and local circulation systems

des Schadgases Stickstoffdioxid (NO_2) exponiert (PALMES et al. 1976; BROWN 1993). Die Expositionsdauer sowohl der Haftfolien als auch der Diffusionsröhrchen betrug in dem zweijährigen Untersuchungszeitraum einheitlich 7 Tage, jeweils von Montag bis Montag.

Der auf den Haftfolien sedimentierte Staub wurde mikroskopisch untersucht (VDI 1992). Es kann zwischen weitgehend lichtundurchlässigen, schwarzen und transparenten, hellen Partikelkomponenten unterschieden werden. Die schwarzen Partikelanteile können einer elementarkohlenstoffhaltigen Partikelkomponente wie Ruß und Flugasche zugerechnet werden, die aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe oder von Biomasse stammt. Schwarze Partikel oberhalb von $20 \mu\text{m}$ stammen überwiegend aus dem Reifenabrieb der Kraftfahrzeuge. Transparente Partikel sind vorwiegend natürlicher Herkunft (Mineralbestandteile, Pollen und Sporen). Aufgrund der windgeschützten Probenahme kann aus der mikroskopisch bestimmten größendifferenzierten Anzahldepositionsrate unter Annahme der Kugelgestalt und einer Einheitsdichte auf die größendifferenzierte Massenkonzentration der Partikel (Mikrogramm/Kubikmeter) zurückgerechnet werden (ENDLICHER und SCHULTZ 1995; SCHULTZ 1994).

Die Verfahrenskenngrößen der NO_2 -Bestimmung nach der PALMES-Methode sind an anderer Stelle beschrieben (SCHULTZ et al. 1992).

4 Ergebnisse

4.1 Mittlere Staubbelastrung

Die Abbildungen 5–8 zeigen die Gesamtstaubbelastrung der 7 Meßstellen während des zweijährigen Meßzeitraums im Vergleich, differenziert nach Feinstaub ($3\text{--}12 \mu\text{m}$) und Grobstaub ($12\text{--}48 \mu\text{m}$). Abbildung 5 und 6 geben die Belastrung durch einen transparenten mineralischen und biologischen Staubanteil wieder. Deutlich lassen sich dabei drei Belastungsbereiche unterscheiden:

- Die gering belasteten Umlandstationen „San Javier“ und „Horco Molle“,
- die mittel belasteten Stationen im Stadtpark und im Baublock der Calle Laprida sowie
- die stark belasteten Stationen Córdoba und Mendoza im Stadtzentrum und Yerba Buena im Westen.

Diese Verteilung gilt sowohl für Grob- als auch für Feinstaub, wobei bei letzterem das hohe Maximum in

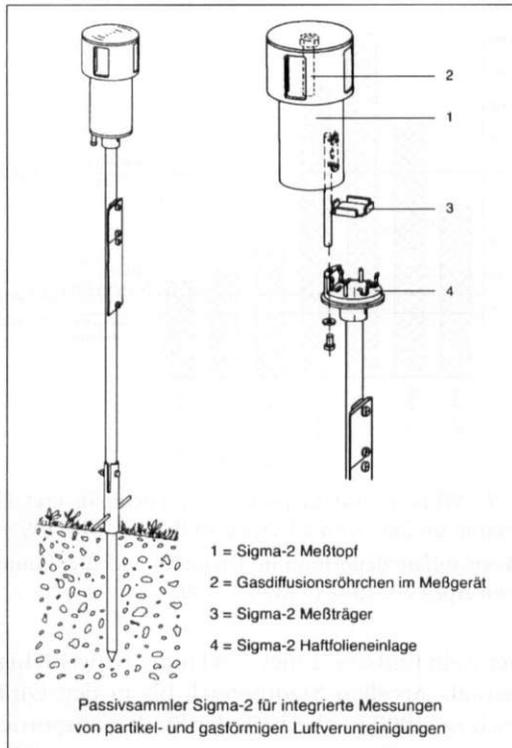


Abb. 4: Sigma-2 Staub-Depositionssammler (nach SCHULTZ 1989)

Sigma-2 dust deposition sampler (according to SCHULTZ, 1989)

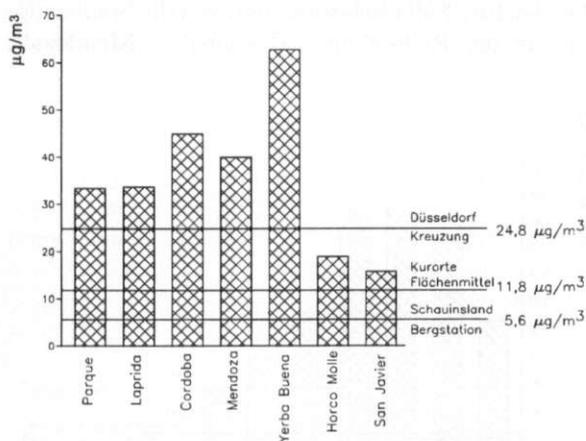


Abb. 5: Mittlere Feinstaubbelastung (3-12 µm Partikeldurchmesser) durch mineralische und biologische Staubpartikel in Tucumán und Umgebung im Zeitraum 29. April 1991 bis 3. Mai 1993

Mean fine dust concentration (3-12 µm particle diameter) of mineral and biological dust particles in Tucumán and surroundings from April 29, 1991 to May 3, 1993

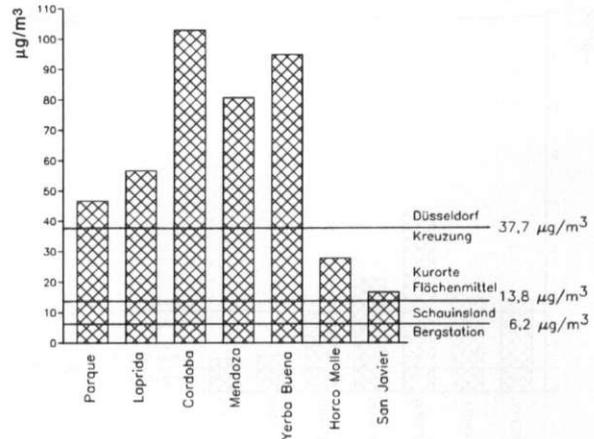


Abb. 6: Mittlere Grobstaubbelastung (12-48 µm Partikeldurchmesser) durch mineralische und biologische Staubpartikel in Tucumán und Umgebung im Zeitraum 29. April 1991 bis 3. Mai 1993

Mean coarse dust concentration (12-48 µm particle diameter) of mineral and biological dust particles in Tucumán and surroundings from April 29, 1991 to May 3, 1993

Yerba Buena auffällt. Der Ziel- und Quellverkehr des Villenviertels Yerba Buena erzeugt auf den unbefestigten Schotterstraßen eine hohe Staubemission, welche den hohen natürlichen Feinstaubanteil erklärt. Die im Vergleich zur Calle Córdoba niedrige Grobstaubbelastung deutet auf eine staubfilternde Wirkung einer ca. 2 m hohen Hecke hin, von der die Rasenfläche des Meßgrundstücks umgeben war.

Abbildung 7 und 8 stellen die Staubbeklastung durch einen schwarzen, kohlenstoffhaltigen Staubanteil dar. Hierbei ist besonders das Maximum der Calle Córdoba bemerkenswert. Diese Straße ist eine der am stärksten belasteten Straßen des Zentrums. Hier konzentriert sich der Verkehr von Kleinomnibussen, Taxis und Lastwagen. Aufgrund der hohen Verkehrsdichte fließt der Verkehr nur langsam und führt dadurch zusätzlich zu erhöhten Emissionen. In Anbetracht der Standortcharakteristik im Bereich des klassischen spanischen kolonialen Schachbrettgrundrisses ist es auffallend, daß sowohl die Stationen an der Calle Laprida und an der Calle Mendoza (Fußgängerzone!) als auch im Stadtpark für den schwarzen Partikelanteil nur ca. 30-50% niedrigere Werte als die Station Córdoba aufweisen.

Auf die Gesundheitsgefährdung, welche von Ruß unterhalb 10 µm Partikeldurchmesser ausgeht, haben kürzlich HEINRICH (1991) und BAUMBACH (1992) hingewiesen. Besonders betroffen sind davon viele Kinder und Jugendliche des informellen Sektors, die sich häufig auf den Gehwegen des Geschäftszentrums auf-

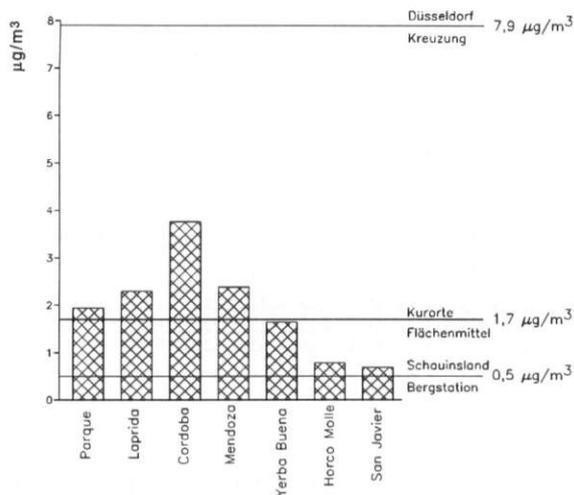


Abb. 7: Mittlere Feinstaubbelastung (3–12 µm Partikeldurchmesser) durch schwarze elementarkohlenstoffhaltige Partikel in Tucumán und Umgebung im Zeitraum 29. April 1991 bis 3. Mai 1993

Mean annual concentration of fine black carbon particles (3–12 µm particle diameter) in Tucumán and surroundings from April 29, 1991 to May 3, 1993

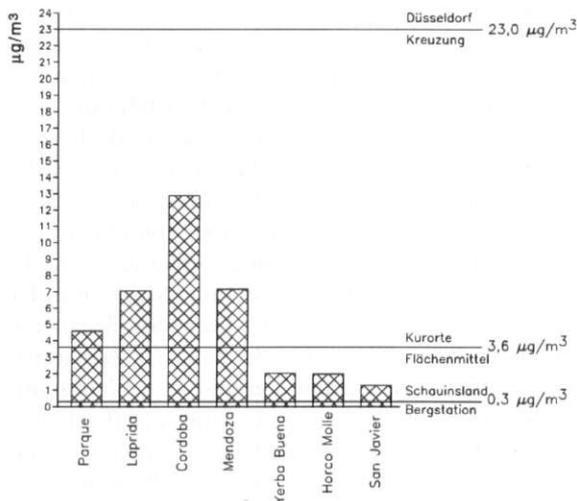


Abb. 8: Mittlere Grobstaubbelastung (12–48 µm Partikeldurchmesser) durch schwarze elementarkohlenstoffhaltige Partikel in Tucumán und Umgebung im Zeitraum 29. April 1991 bis 3. Mai 1993

Mean annual concentration of coarse black carbon particles (12–48 µm particle diameter) in Tucumán and surroundings from April 29, 1991 to May 3, 1993

halten. Schwarze Kohlenstoffpartikel sind aber auch im Umland nachzuweisen. Hierbei muß auch auf den Talwind hingewiesen werden, der am Tage zwischen dem Bergfuß und den Gipfelhöhen der Sierra San

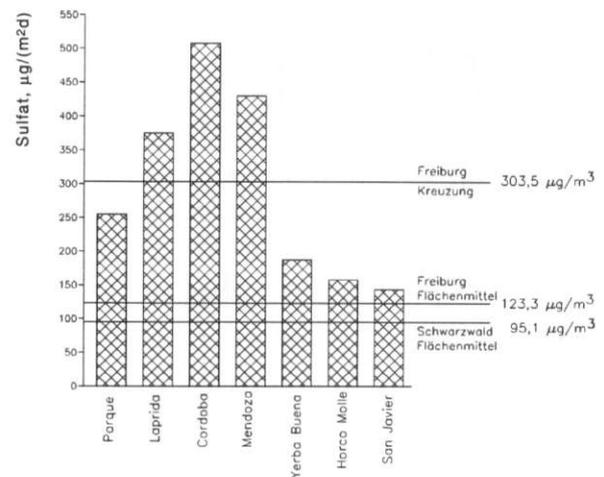


Abb. 9: Mittlere Sulfatdeposition in Tucumán und Umgebung im Zeitraum 29. April 1991 bis 3. Mai 1993

Mean sulfate deposition in Tucumán and surroundings from April 29, 1991 to May 3, 1993

Javier weht und bevorzugt den länger schwebfähigen Feinstaub aus dem Stadtbereich bis in den Gipfelbereich ca. 1000 m oberhalb der Stadt transportiert.

4.2 Depositionsraten von Sulfat- und Nitratpartikeln

Die Abb. 9 und 10 zeigen die mittlere Depositionsraten für Sulfat- und Nitratpartikel. Die Verteilung innerhalb der Stadt sowie zwischen Stadt und Umland weist Ähnlichkeiten mit der Staubbelastung auf. Die höchste Sulfatbelastung besitzen die Stadtstationen in der Reihenfolge „Córdoba“, „Mendoza“,

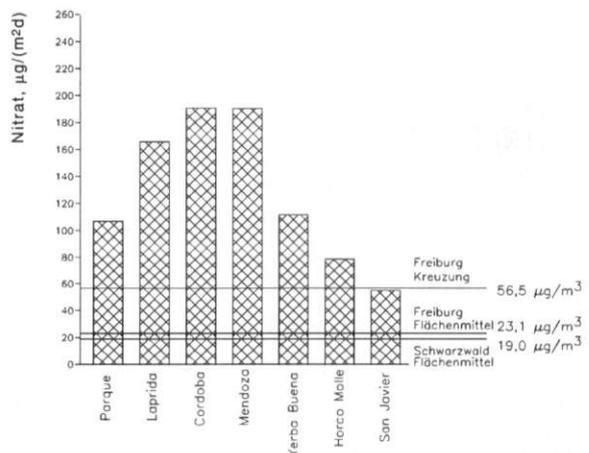


Abb. 10: Mittlere Nitratdeposition in Tucumán und Umgebung im Zeitraum 29. April 1991 bis 3. Mai 1993

Mean nitrate deposition in Tucumán and surroundings from April 29, 1991 to May 3, 1993

„Laprida“ und „Parque“. Bereits in „Yerba Buena“ tritt die Belastung um etwa zwei Drittel zurück, und die Umlandstationen sind vergleichsweise niedrig belastet. Insgesamt betrachtet ist die Sulfatbelastung jedoch bemerkenswert hoch, was im Stadtgebiet höchstwahrscheinlich auf den hohen Schwefelgehalt insbesondere der Dieselkraftstoffe zurückzuführen ist. Hinzu kommt sehr wahrscheinlich ein Eintrag durch die verbreitete offene Abfallverbrennung sowie die Verbrennung der Bagasse bei der Zuckerrohrverarbeitung. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, daß die Sulfatbelastung nahezu ausschließlich anthropogenen Ursprungs ist.

Hingegen handelt es sich bei den Nitraten vorwiegend um einen natürlichen Staubeintrag aus dem Umland. Quellbereiche sind insbesondere die im Winter brach liegenden Zuckerrohr- und Sojabohnenfelder. Auch die semiariden Vorpuna-Landschaften im Westen von Tucumán erleichtern mit ihrer Lößauflage und der geringen Vegetationsdeckung die Mobilisierung von nitrathaltigem Bodenmaterial. Möglicherweise liefert auch Nitratdünger aus dem Sojaanbau einen Beitrag. Trotzdem liegt das Maximum, wie in Abbildung 10 zu sehen ist, nicht im Umland oder bei der östlichen Station „Parque“, sondern bei den Stadtstationen „Córdoba“, „Mendoza“ und „Laprida“. Demnach ist auch hier der Verkehr der entscheidende Faktor. Einmal absedimentierter Staub wird weiter durch die Reifen zerkleinert und durch die Wirbelschleppe hinter den Fahrzeugen immer wieder aufgewirbelt, was so zu einer insgesamt höheren Nitratbelastung der Luft führt, als in den verkehrsfernen Standorten „San Javier“ und „Horco Molle“.

4.3 Gasförmige Belastung durch NO_2

Bei der rein anthropogenen Belastung durch NO_2 ist eine ähnliche Differenzierung wie beim Staub festzustellen, wobei die durchweg sehr hohe Belastung der Innenstadt, insbesondere der Calle Córdoba auffällt (Abb. 11). Die NO_2 -Belastung wird nahezu ausschließlich durch den Verkehr verursacht. Eine bemerkenswerte Ausnahme von der beschriebenen Abstufung zwischen den städtisch beeinflussten Stationen und den Hintergrundstationen bildet allerdings der Probenahmestandort „Yerba Buena“, dessen hohe Belastung beim NO_2 nur knapp unter dem entsprechenden Wert an der Calle Córdoba liegt. Dieser Standort befand sich in einem Villengarten auf einer Rasenfläche, die wöchentlich mit einem Motorrasenmäher sehr sorgfältig gemäht wurde. Die Verfrachtung und Verdünnung der entstehenden Abgase

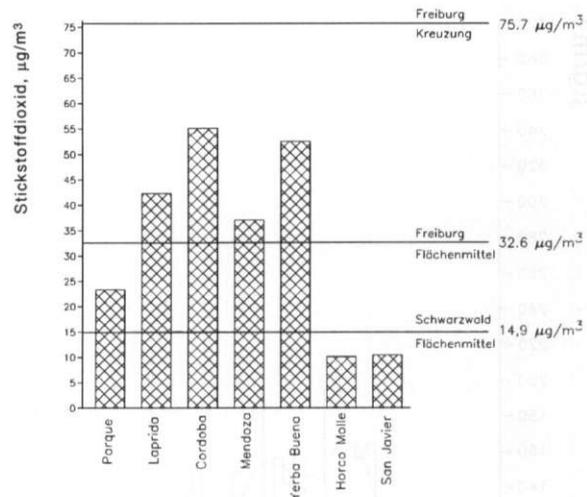


Abb. 11: Mittlere NO_2 -Konzentration in Tucumán und Umgebung im Zeitraum 29. April 1991 bis 3. Mai 1993
Mean NO_2 concentration in Tucumán and surroundings from April 29, 1991 to May 3, 1993

wurde dabei durch die bereits erwähnte mannshohe dichte Hecke stark eingeschränkt und verlängerte so die Einwirkung der NO_2 -Emissionen des Motorjägers. Hierin wird die Ursache für die gefundene hohe NO_2 -Belastung vermutet. Aufgrund der geschilderten Besonderheiten müssen die Immissionswerte dieser Station in ihrer räumlichen Repräsentanz als stark eingeschränkt angesehen werden.

4.4 Jahresgänge der Belastung

Im Subtropenklima Nordwestargentinien weist die Schadstoffbelastung in Abhängigkeit von den Feuchteverhältnissen erhebliche Schwankungen auf. Alle Belastungswerte zeigen einen markanten winterlichen Anstieg. Als Ursache für die im Vergleich zum Sommer und Herbst etwa doppelt so hohe Belastung im Winter und Frühjahr kommen in Betracht

- die hohe Zahl windschwacher, antizyklonaler Wetterlagen mit Absinkinversionen,
- die geringe Luftfeuchte kühlerer Luftmassen,
- die selteneren Niederschlagsereignisse mit ihren Auswascheffekten,
- die Winderosion der abgeernteten Zuckerrohr- und Sojabohnenfelder sowie
- die erheblichen Rußemissionen durch die Verbrennung ausgepreßter Zuckerrohrrückstände, wie dies auch in anderen Erntegebieten praktiziert wird (HINDY 1991).

In Abbildung 12 und 13 ist der Verlauf der untersuchten Luftbeimengungen für den zweijährigen

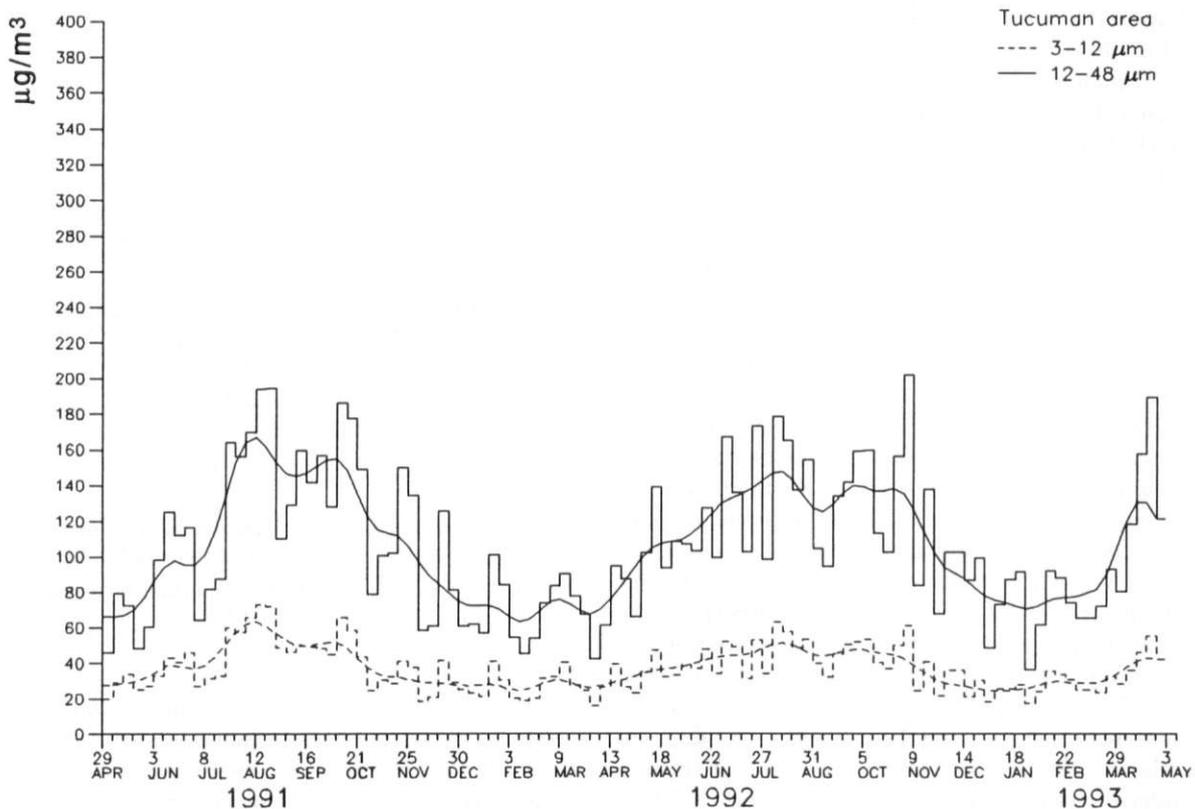


Abb. 12: Jahresgang der mineralischen und biologischen Fein- und Grobstaub-Konzentration im Stadtgebiet von Tucumán
Annual cycle of mineral and biological fine and coarse particle concentration in Tucumán City

Meßzeitraum dargestellt. Die wöchentlichen Belastungswerte sind in Form einer Treppenkurve wiedergegeben. Die Stufenbreite entspricht dem wöchentlichen Expositionszeitraum der Sammler. In die Darstellungen wurde zur Verdeutlichung des saisonalen Ganges zusätzlich eine Filterkurve aufgenommen, die durch Anwendung einer gleitenden, gewichteten Mittelbildung nach HANN berechnet wurde (BLACKMAN a. TUCKEY 1958). Dazu wurden die Einzelwerte jeweils mit dem Faktor 0,5, die Nachbarwerte mit dem Faktor 0,25 gewichtet und zu einem neuen Zentralwert zusammengezogen. Für die Darstellung des saisonalen Ganges wurden die Zeitreihen nach diesem Verfahren jeweils 6-fach behandelt. Für einen Vergleich des Belastungsverlaufs von Tucumán mit der Umgebung wurde ein wöchentliches Flächenmittel aus den innerstädtischen Stationen „Parque“, „Laprida“, „Córdoba“ und „Mendoza“ gebildet (Tucumán area) und der Verlauf dargestellt. Als Vergleichsstation, von der angenommen wird, daß sie die Hintergrundverhältnisse weitgehend ungestört wiedergibt, wurde der Standort auf der Sierra de San Javier ausgewählt. Allen Kurvenverläufen ist der

oben beschriebene Jahresgang mit einem Maximum jeweils in der Zeit von Juli bis Oktober und einem deutlich erkennbaren Minimum in den Monaten Dezember bis April zu entnehmen.

Die Abbildungen 12 und 13 zeigen die Jahresgänge der Fein- und Grobstaubbelastung durch transparente, mineralische und biologische Partikel im Stadtgebiet von Tucumán und in San Javier. Es ist zu erkennen, daß während des Winterhalbjahres zwischen Mai und Oktober die Schwebstaubbelastung sowohl beim Fein- als auch beim Grobstaub etwa auf das Doppelte zunimmt. In einzelnen Wochen werden dabei Mittelwerte von über $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ erreicht. Bedenklich ist, daß es sich dabei nicht nur um kurze Einzelepisoden, sondern um teilweise mehrere Wochen anhaltende Belastungen handelt. Eine auffällige Abnahme der Staubb Belastung ist in San Javier im Sommer zu erkennen. In dieser Jahreszeit nimmt hier die Belastung auf etwa $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ab. Der Belastungsverlauf im Feinstaub-, vor allem aber im Grobstaubbereich eines mineralischen und biologischen Partikelanteils spiegelt damit in erster Näherung den Jahresgang der relativen Luftfeuchte und des Nieder-

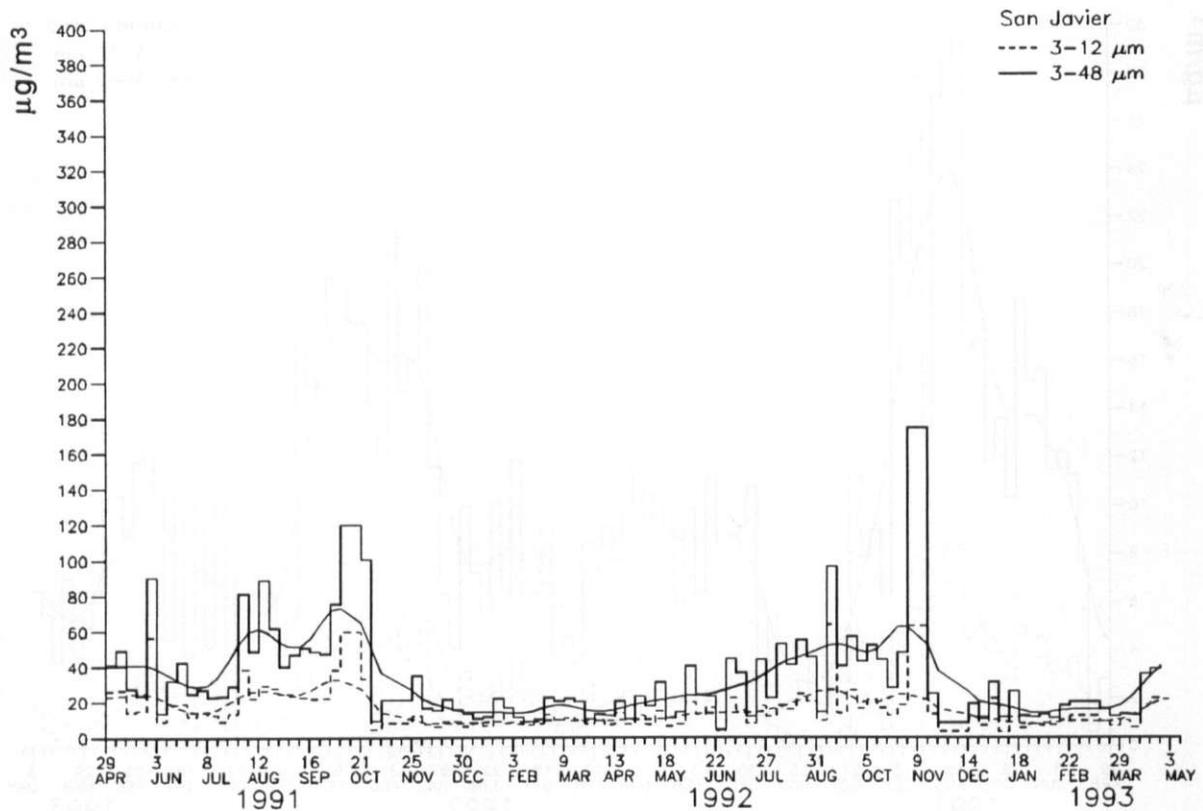


Abb. 13: Jahrgang der mineralischen und biologischen Fein- und Grobstaub-Konzentration in der Sierra de San Javier (1350 m NN)

Annual cycle of mineral and biological fine and coarse particle concentration in the Sierra of San Javier (1350 m a.s.l.)

schlags wider. Der Zusammenhang zwischen Grobstaubkonzentration und relativer Feuchte ergibt einen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,9$. Der Feinanteil von $3-12 \mu\text{m}$ Partikeldurchmesser hat einen deutlich geringeren Jahrgang als der Grobstaub. Dieser ausgeglichene Jahrgang ist das Ergebnis der stärkeren Mobilität und längeren atmosphärischen Aufenthaltsdauer dieser Partikel gegenüber den größeren Partikeln, die verstärkt im Stadtbereich und in Straßennähe auftreten. Abseits der Straßen verschwinden die groben Partikel durch Sedimentation rasch aus der Atmosphäre.

Der Gang der schwarzen kohlenstoffhaltigen Partikelkomponente zeigt zwischen Tucumán und der Bergstation auf dem San Javier stärkere Abweichungen als der entsprechende Gang der mineralischen und biologischen Partikel (Abb. 14 und 15). Auffällig sind insbesondere sekundäre Maxima im Sommerhalbjahr in Tucumán, die darauf hindeuten, daß ihre Entstehung weniger witterungsabhängig ist. In Übereinstimmung damit kann bei diesen Partikeln von einer vorwiegend verkehrsbedingten Entstehung ausgegangen werden. Die sommerlichen Anstiege kön-

nen aufgrund der verringerten mechanischen Partikelentstehung vornehmlich den Primäremissionen des Verkehrs zugeordnet werden. Auf der Sierra de San Javier fehlen entsprechende Anstiege im Sommer. Die winterlichen Maxima können an diesem Standort in ca. 1350 m NN im Gegensatz zu Tucumán zusätzlich durch Heizungsimmisionen erklärt werden. Ein Indiz dafür ist der mikroskopische Nachweis von groben Flugaschepartikeln, die als Verbrennungsreste aus einer offenen Holzfeuerung eines nahen landwirtschaftlichen Anwesens identifiziert werden konnten. Der dort vorhandene Kamin wurde nach Angaben der Bewohner während der Wintermonate und gelegentlich im Frühjahr betrieben.

5 Bewertung im Vergleich zu mitteleuropäischen Standorten

5.1 Partikelbelastung

In den Abbildungen 5 bis 8 ist in Säulenform die mittlere Belastung im Fein- und Grobstaubbereich in Tucumán und Umgebung dargestellt. Als Vergleichs-

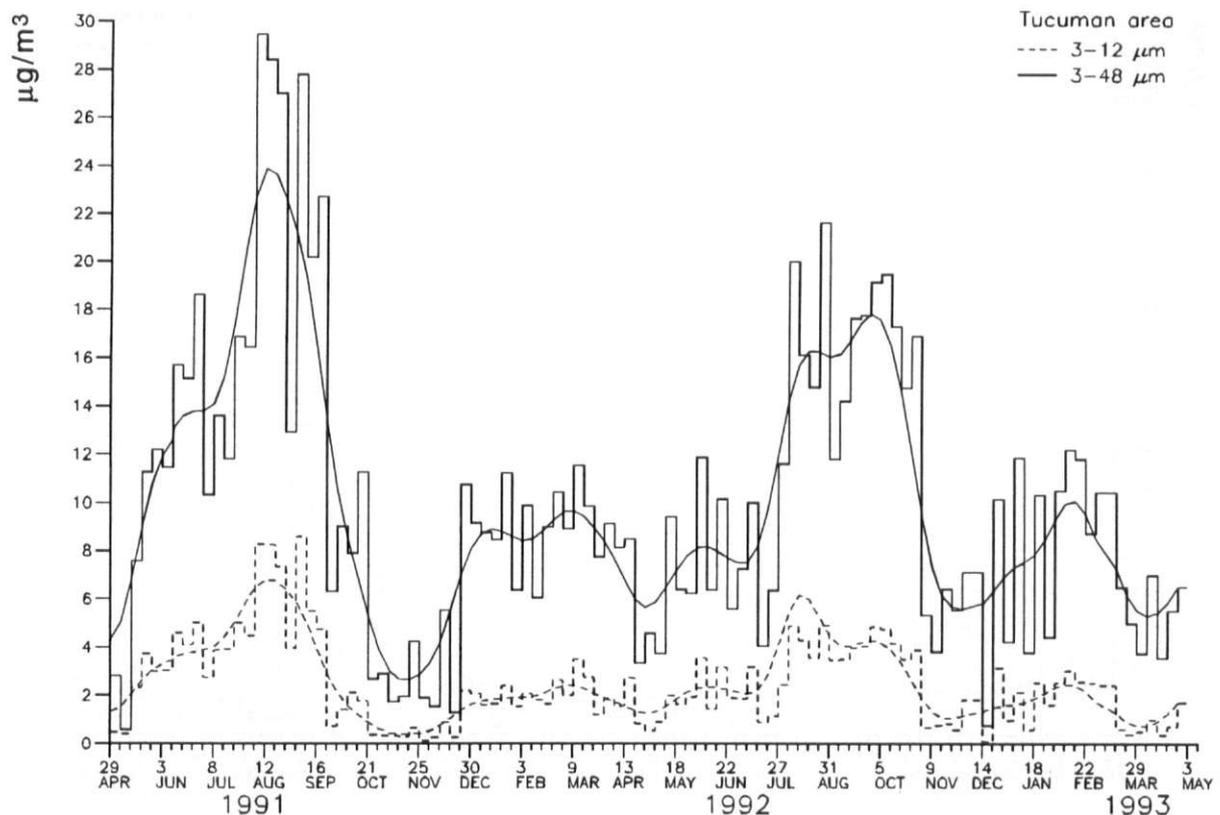


Abb. 14: Jahresgang der Staubbelastung durch einen elementarkohlenstoffhaltigen Partikelanteil in verschiedenen Größenbereichen im Stadtgebiet von Tucumán

Annual cycle of black carbon particles of different sizes in Tucumán City

werte sind durch horizontale Balken die Ergebnisse aus Messungen in Deutschland angegeben, die mit der gleichen Methodik durchgeführt wurden. Damit sind sie direkt mit den argentinischen Messungen vergleichbar. Der untere Balken gibt die mittlere Belastung von Messungen an der Reinluftmeßstelle „Schaunsland“ im Schwarzwald an. Der obere Balken gibt den Mittelwert aus Messungen am extrem verkehrsbelasteten „Mörsenbroicher Ei“ bei Düsseldorf wieder. In jeweils mittlerer Position ist der Mittelwert aus 128 einjährigen Kurort-Meßreihen an straßennahen Standorten angeführt.

Der Vergleich zeigt, daß sowohl beim Fein- als auch beim Grobstaub die Belastung durch einen mineralischen und biologischen Partikelanteil in Tucumán erheblich über dem typischen Belastungsbereich in Deutschland liegt. Im Feinstaubbereich liegt sogar der Belastungswert des vom Verkehr nur wenig beeinflussten Standortes „Parque“ noch um mehr als 30% über dem Niveau der stark verkehrsbelasteten Meßstelle in Düsseldorf. Im Grobstaubbereich erreicht der am stärksten verkehrsbelastete Standort in Tucumán, die „Calle Córdoba“, im Ver-

gleich zum „Mörsenbroicher Ei“ sogar die mehr als 2,5-fache Belastung. Auffällig ist weiterhin, daß selbst die stadtfernen Hintergrundstationen „Horco Molle“ und „San Javier“ noch über dem typischen Wert verkehrsbezogener Messungen in deutschen Kurorten und um den Faktor 2–3 über den Werten einer vergleichbaren Hintergrundstation im Reinluftbereich liegen. Als wesentliche Ursache ist der hohe Staubeintrag zu vermuten, der in den weitgehend niederschlagsfreien Winter- und Frühlingmonaten von den erosionsanfälligen Flächen der Umgebung von Tucumán herrührt. Die Mobilisierung und Verfrachtung der Bodenpartikel wird dabei schon bei geringen Windgeschwindigkeiten wesentlich von der atmosphärischen Turbulenz und Konvektion getragen.

Weniger auffällig sind die Differenzen zwischen deutschen Belastungswerten und den Meßergebnissen in Tucumán für den schwarzen, kohlenstoffhaltigen Partikelanteil. Es zeigt sich vielmehr, daß die Belastung durch diesen potentiell toxischen Partikelanteil in Tucumán deutlich unterhalb des Niveaus eines extrem belasteten Verkehrsstandortes in

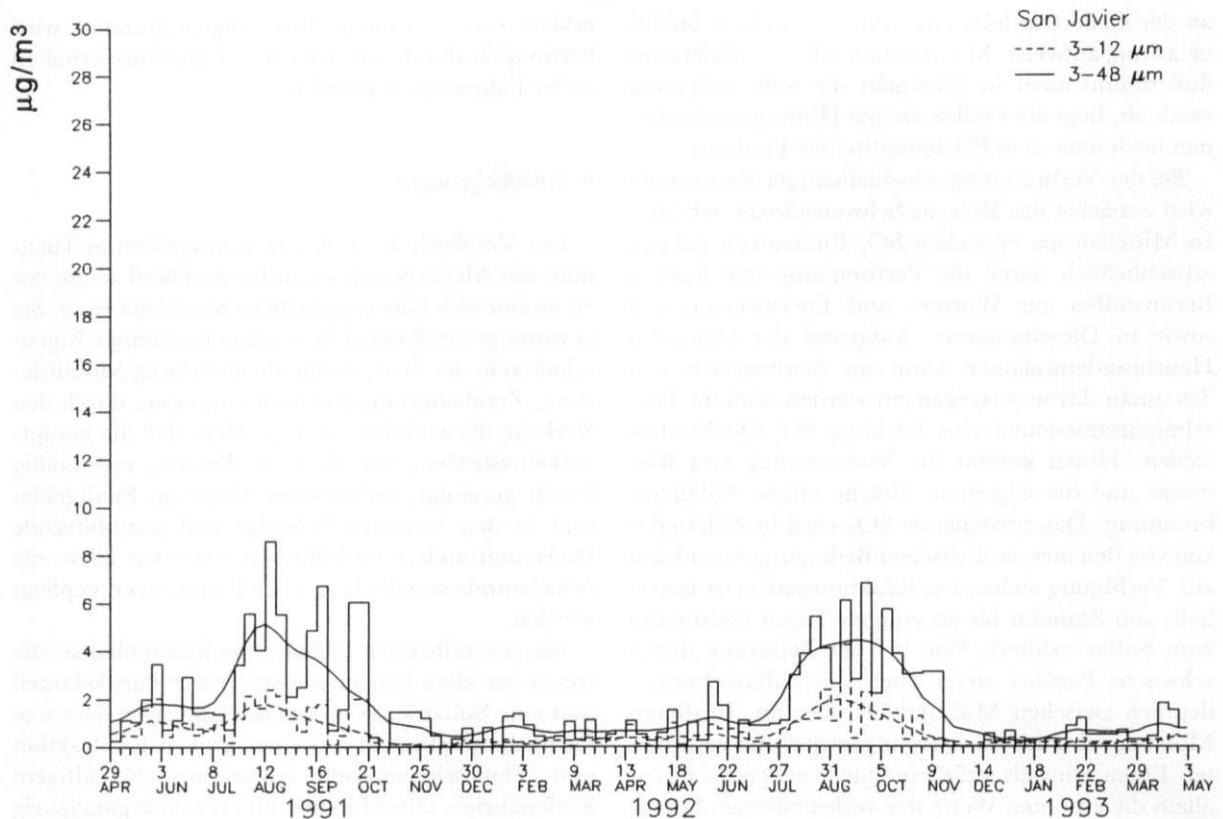


Abb. 15: Jahrgang der Staubbelastung durch einen elementarkohlenstoffhaltigen Partikelanteil in verschiedenen Größenbereichen in der Sierra de San Javier (1350 m NN)

Annual cycle of black carbon particles of different sizes in the Sierra of San Javier (1350 m a.s.l.)

Deutschland liegt. Allerdings übertreffen die Werte von Tucumán das mittlere Belastungsniveau verkehrsbezogener Messungen in deutschen Kurorten.

Nachteilig fallen die unerwartet hohen Belastungswerte an den Hintergrundstationen „Horco Molle“ und „San Javier“ auf. In dem lufthygienisch besonders bedeutsamen Feinbereich von 3–12 µm Partikeldurchmesser liegt die Belastung um etwa 50% über den Werten der deutschen Reinluftstation. Damit wird mit diesen Werten eine Hintergrundbelastung sichtbar, die in dem erfaßten Partikelgrößenbereich deutlich über dem Hintergrundniveau in Deutschland liegt. Ein Hinweis auf die mögliche Ursache gibt die saisonal getrennte Auswertung. In den Monaten Juni–Oktober liegt die Hauptverarbeitungszeit des Zuckerrohrs. Die durch Abbrennen der Zuckerrohrfelder und Beheizen der Zuckerfabriken mit der Bagasse entstehenden und auch visuell sehr auffälligen Rußemissionen können als wesentliche Quelle für die gefundene Hintergrundbelastung angesehen werden. Unterstützt wird die Einwirkung der Rußemissionen durch die vorherrschend stabile atmosphärische Schichtung in den Wintermonaten, die eine

flächenhafte Anreicherung der abgegebenen Rußemissionen begünstigt. Die lokalen Talwindzirkulationen verfrachten die Immissionen bis in den Gipfbereich der Sierra de San Javier.

5.2 Saure Staubbestandteile

Für eine Bewertung der gefundenen Belastung durch die sauren Staubbestandteile Sulfat und Nitrat wurden die Flächenmittel dieser Bestandteile für Freiburg sowie den südlichen Schwarzwald herangezogen (SCHULTZ et al. 1992). Bezüglich Topographie und Höhenlage sind diese Standorte durchaus mit Tucumán und der Sierra de San Javier vergleichbar. Zusätzlich wurde das Mittel einer hochbelasteten Verkehrsmessstelle in Freiburg aufgenommen (Abb. 9 und 10). Die Darstellung verdeutlicht eine im Mittel höhere Belastung für alle Standorte im Vergleich zu den deutschen Werten. Der mit dem obersten Balken wiedergegebene maximale Sulfatwert von einer stark befahrenen Kreuzung in Freiburg liegt noch deutlich unter den straßennahen Messungen in Tucumán, wobei der vom Verkehr her ähnlich belastete Standort

an der Calle Córdoba eine um 65% höhere Sulfatbelastung aufweist. Mit abnehmendem Verkehrseinfluß nimmt auch in Tucumán die Sulfatbelastung rasch ab, liegt aber selbst an den Hintergrundstationen noch über dem Flächenmittel für Freiburg.

Bei der Verbrennung schwefelhaltiger Brennstoffe wird zunächst das Reizgas Schwefeldioxid gebildet. In Mitteleuropa entstehen SO₂-Emissionen nahezu ausschließlich durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen zur Wärme- und Energieerzeugung sowie in Dieselmotoren. Aufgrund der fehlenden Hausbrandemissionen kann im Stadtbereich von Tucumán davon ausgegangen werden, daß die Dieselmotoremmissionen eine wichtige SO₂-Quelle darstellen. Hinzu kommt die Verbrennung von Biomasse und die allgemein übliche offene Abfallverbrennung. Das entstehende SO₂ wird in Abhängigkeit von den meteorologischen Bedingungen und den zur Verfügung stehenden Reaktionspartnern innerhalb von Stunden bis zu einigen Tagen vollständig zum Sulfat oxidiert. Wie bei der Belastung durch schwarze Partikel steigt auch die Sulfatbelastung deutlich zwischen Mai und Oktober an. In diesen Monaten wird das Zuckerrohr geerntet und verarbeitet. Einen Hinweis auf diese Quelle geben dabei vor allem die erhöhten Werte der verkehrsfernen Standorte „Horco Molle“ und „San Javier“ außerhalb von Tucumán. Aufgrund der gesundheitlichen Bedeutung der Sulfatpartikel wird der gefundene Sulfateintrag als erheblicher lufthygienischer Belastungsfaktor für die Bevölkerung eingestuft.

Eine im Vergleich zu Deutschland im Flächenmittel noch höhere Belastung ist durch das Nitrat gegeben. Die am stärksten nitratbelastete Meßstelle in Freiburg liegt auf dem gleichen Niveau wie die Hintergrundstation „San Javier“. Alle anderen Standorte in Tucumán und Umgebung weisen eine noch wesentlich höhere Nitratbelastung auf. Mit diesen Werten wird wiederum der erhöhte natürliche Staubeintrag sichtbar. Nitrate sind natürliche Bestandteile des Bodens und werden durch die Düngung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen zusätzlich angereichert. Durch die erhöhte Erosion während der Wintermonate werden diese Partikel mobilisiert und mit dem natürlichen Staubeintrag auch in das Stadtgebiet verfrachtet.

5.3 Stickstoffdioxid

Die gefundenen Werte liegen im unteren Erwartungsbereich einer deutschen Stadt der Größe Tucumáns (Abb. 11). Die unauffällige NO₂-Belastung kann mit einer deutlich geringeren Verkehrsdichte

erklärt werden. Eine noch günstigere Situation wird vermutlich durch das schlechte Emissionsverhalten vieler Fahrzeuge verhindert.

6 Schlußfolgerungen

Der Vergleich der Luftbelastungsgrößen in Tucumán mit Meßergebnissen in Deutschland zeigte vor allem eine weit höhere natürliche Staubbelastung. Sie gewinnt gesundheitlich besonders nachteilige Eigenschaften in der Stadt durch die mehrfache Mobilisierung, Zerkleinerung und Kontamination durch den Verkehr. Es ist daher zu empfehlen, daß die Hauptverkehrsstraßen, vor allem im Winter, regelmäßig feucht gereinigt, unbefestigte Wege im Stadtgebiet und in den Vororten befestigt und staubfilternde Parks und andere Grünflächen sowie vor allem die Alleebaumbestände besser und intensiver gepflegt werden.

Als gesundheitlich bedeutsame Staubinhaltsstoffe treten vor allen Dingen ein schwarzer Partikelanteil und eine Sulfatphase in Erscheinung. Der schwarze Partikelanteil besteht aus einer groben Rußfraktion und Flugaschepartikeln sowie aus rußhaltigem Reifenabrieb. Diese Inhaltstoffe entstehen ganzjährig mit den Fahrzeugemissionen. Daher sind alle Maßnahmen im Verkehrsbereich zu unterstützen, die zu einer besseren technischen Überprüfung und Emissionskontrolle der Fahrzeuge führen und die Verbesserung der Kraftstoffqualität, insbesondere die Senkung des Schwefelgehalts bei Dieselmotoren zum Inhalt haben. Mit einer weiteren Zunahme der Motorisierung ist auch ein Anstieg der NO₂-Belastung zu erwarten, dem durch die Einführung der Katalysatorteknik für Ottomotoren begegnet werden sollte. Zur Minderung der verkehrsbedingten Emissionen insgesamt wird als ganz wichtiger Punkt die Reduzierung des privaten Kurzstreckenverkehrs durch den Ausbau des Öffentlichen Personennahverkehrs empfohlen. Hier ist unbedingt auch insbesondere aus lufthygienischen Gründen ein Umdenken weg von dem immer noch sehr stark privat ausgerichteten Stadtverkehr hin zu öffentlichen Verkehrsmitteln notwendig. Auch sollte die Ausweitung der autofreien Fußgängerzone in der Innenstadt angestrebt werden.

Die Verbrennung von Biomasse auf den Zuckerrohrfeldern und das Verheizen der Bagasse in den Zuckerrohrfabriken ohne wirksame Abgasreinigung und Entstaubung steigern die Luftbelastung. Nicht nur eine Verbesserung der Emissionsüberwachung von Gewerbe und Industriebetrieben durch staatliche Aufsichtsbehörden, sondern vor allen Dingen auch

die Durchsetzung einmal beschlossener gesetzlicher Maßnahmen zur Verringerung der Immissionsbelastung sind notwendige Voraussetzungen für eine Verbesserung der Situation. Es bleibt zu hoffen, daß mit dem wachsenden Bewußtsein der Bevölkerung für Maßnahmen des Umweltschutzes der Druck auf die Behörden von Stadt, Provinz und Staat derart wächst, daß die vorgeschlagenen Maßnahmen auch realisiert werden.

Literatur

- BAUMBACH, G. (1992): Luftreinhaltung. Entstehung, Ausbreitung und Wirkung von Luftverschmutzungen - Meßtechnik, Emissionsverminderung und Vorschriften. Berlin.
- BLACKMAN, R. B. a. TUCKEY, I. W. (1958): The Measurement of Power Spectra. New York.
- BROWN, R. H. (1993): The use of diffusive samplers for monitoring of ambient air. Pure & Appl. Chem. 65, 1859-1874.
- ENDLICHER, W. (1995): Zur Witterungsklimatologie von Nordwestargentinien. In: ENDLICHER, W. u. WÜRSCHMIDT, E. (Hg.): Stadtklimatologische und lufthygienische Untersuchungen in Tucumán/Nordwestargentinien. Marburger Geogr. Schriften 128, 17-43.
- ENDLICHER, W. u. SCHULTZ, E. (1995): Messung und Bewertung von Luftverunreinigungen in Tucumán und Umgebung. In: ENDLICHER, W. u. WÜRSCHMIDT, E. (Hg.): Stadtklimatologische und lufthygienische Untersuchungen in Tucumán/Nordwestargentinien. Marburger Geogr. Schriften 128, 184-220.
- ENDLICHER, W. u. WÜRSCHMIDT, E. (1995): Stadtklimatologische und lufthygienische Untersuchungen in Tucumán/Nordwestargentinien. Marburger Geogr. Schriften 128.
- HEINRICH, U. (1991): Lungenkrebs und Dieselmotorabgase. Aktueller Stand der Forschung. In: Information Umwelt, GSF-Forschungszentrum (Hg.), 35-39.
- HINDY, K. T. (1991): Contribution of cane bagasse used as a fuel in the sugar industry to changes in outdoor and indoor air quality in Middle Egypt. Atmospheric Environment 25 B, 107-113.
- HUNZINGER, H. (1995): Struktur und Intensität der Starkniederschläge zwischen Gran Chaco und Vorpuna. In: ENDLICHER, W. u. WÜRSCHMIDT, E. (Hg.): Stadtklimatologische und lufthygienische Untersuchungen in Tucumán/Nordwestargentinien. Marburger Geogr. Schriften 128, 60-77.
- JAUREGUI, E. (1988 a): Local wind and air pollution interaction in the Mexico Basin. *Atmósfera* 1, 131-140.
- (1988 b): The dust storms of Mexico City. *International Journal of Climatology* 9, 169-180.
- PALMES, E. D.; GUNNISON, A. F.; DIMATTIO, J. and TOMCZYK, C. (1976): Personal Sampler for nitrogen dioxide. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 37, 570-577.
- ROMIEU, I.; WEITZENFELD, H. and FINKELMANN, J. (1990): Urban Air Pollution in Latin America and the Caribbean: Health Perspectives. *World Health Statistics. Quarterly* 43, 153-167.
- SCHMITZ, S. (1991): Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs als Gegenstand räumlicher Umweltforschung. *Geogr. Rundschau* 43, 90-96.
- SCHULTZ, E. (1989): Größendifferenzierende Messung der Partikeldepositionsrate. *Staub-Reinhaltung der Luft* 49, 113-118.
- (1994): Messung und Bewertung verkehrsbedingter Grobstaubemissionen. *Meteorol. Zeitschrift, N.F.* 3, 143-146.
- SCHULTZ, E.; STAIGER, H. u. JENDRITZKY, G. (1992): Luftverunreinigungen und Atemwegserkrankungen bei Kindern und Erwachsenen. Projektteil C - Kernforschungszentrum Karlsruhe - PUG2 Abschlußbericht 87/002/1C und 90/007/1C.
- SORIA, F. (1995): Los vientos en Horco Molle y en el centro de la ciudad de San Miguel de Tucumán. In: ENDLICHER, W. u. WÜRSCHMIDT, E. (Hg.): Stadtklimatologische und lufthygienische Untersuchungen in Tucumán/Nordwestargentinien. Marburger Geogr. Schriften 128, 149-158.
- VDI 2119, Blatt 4 (1992): Messen partikelförmiger Niederschläge. Größendifferenzierende Bestimmung der Partikeldepositionsrate mittels der Hauffolienmethode (im Druck).
- WEHRHAHN, R. (1993): Ökologische Probleme in lateinamerikanischen Großstädten. In: Petermanns Geogr. Mitteilungen 137, 79-94.
- (1994): São Paulo: Umweltprobleme einer Megastadt. *Geogr. Rundschau* 46, 359-366.