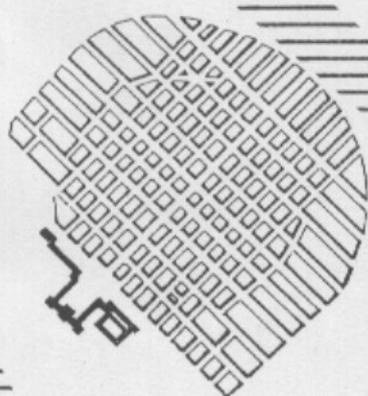


*Sonderdruck aus:*

# MANNHEIMER GEOGRAPHISCHE ARBEITEN

14



I. Dörrer, F. Fezer (Hg.)

Umweltprobleme im  
Rhein - Neckar - Raum

Mannheim 1983

ZUR NIEDERSCHLAGSWASSERQUALITÄT EINES INDUSTRIELLEN  
BALLUNGSRAUMES - VORLÄUFIGE ERGEBNISSE EINER UNTER-  
SUCHUNG ÜBER DIE BELASTUNG URBANER ÖKOSYSTEME DURCH  
ANTHROPOGENE SCHADSTOFFE

Mit 8 Abbildungen und 3 Tabellen

Wilhelm Kuttler, Bochum

1. Problemstellung, Ziel und Methode

Industrielle Ballungsräume setzen in großen Mengen Schadstoffe frei, die im gesamten Spektrum der Ökosysteme Schädigungen der vielfältigsten Art auftreten lassen. In Mitleidenschaft gezogen werden nicht nur der Verursacher Mensch (HETTICHE 1966; GRANDJEAN 1973; SCHLIPKÖTER 1970) sowie Flora und Fauna (BÖRTITZ 1974; van HAUT 1961; HEIDT 1978; KNABE 1970; KUTTLER 1980; MÜLLER, P. 1978; SUKOPP 1974; KELLER 1974; GUDERIAN 1966), sondern auf dem abiotischen Sektor auch in steigendem Maße sakrale und profane Bauwerke (LUCKAT 1976, 1978; RUFFERT 1981).

Die beinahe schon zahllos auftretenden chemischen Stoffe, die zum Verschmutzungsprozeß der bodennahen Troposphäre beitragen, können verschiedenen Schadstoffklassen zugeordnet werden (Tab. 1), an denen vornehmlich Schwefel-, Stickstoff- und Chlorverbindungen einen großen Anteil besitzen.

Tab. 1: Schadstoffspektrum einer Industriegebietsatmosphäre  
(nach PETRI aus KUTTLER 1979b, ergänzt)

1. Schwefelverbindungen  
SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, CS<sub>2</sub>
2. Stickstoffverbindungen  
"nitrose Gase" (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>); Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>)
3. Kohlenmonoxid  
CO
4. Halogene und Halogenverbindungen  
Chlor-, Brom- sowie Fluorverbindungen (z.B. HF, SiF<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> und ihre Salze, HCl)
5. flüchtige aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe und ihre Oxydationsprodukte  
z. B. Aldehyde, Ketone, Säuren, Peroxyde
6. verschiedenartige belästigende Stoffe mit intensiverem Geruch  
z. B. Amine, Mercaptane, Buttersäure, Pyridin
7. anorganische Stäube  
Verbindungen von Blei, Eisen, Mangan, Chrom, Kupfer, Nickel, Vanadium, Beryllium, Zink, Arsen, Molybdän, Selen, Silizium u. a.
8. Ruß und organische Produkte  
z. B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe wie das krebserzeugende 3,4 - Benzpyren
9. Abrieb von Teer- und Asphaltstraßen sowie von Autoreifen
10. Oxydantien  
z. B. Ozon (O<sub>3</sub>), eine allotrope Modifikation des Sauerstoffs

Freigesetzt werden die partikel- und gasförmigen Schadstoffe hauptsächlich durch die drei Quellengruppen Industrie-, Hausbrand und Kleingewerbe sowie den Straßenverkehr.

Für die Ausbreitung der emittierten Schadstoffe ist neben meteorologischen und topographischen Parametern auch die Quellhöhe der entsprechenden Emittenten verantwortlich, was sich besonders deutlich bei Vorherrschen austauscharmer Wetterlagen in heizungsintensiven Winterhalbjahren zeigt, wenn durch Emissionen des Hausbrandes und Straßenverkehrs die bodennahen Luftschichten stark belastet werden.

Nach ihrer Freisetzung erfahren die in die Atmosphäre eingeleiteten Schadsubstanzen durch verschiedene chemische Vorgänge Veränderungen wie sie z.B. von BEILKE 1980, GIEBEL 1977, GEORGII & HERRMANN 1979) näher beschrieben werden. Darüber hinaus werden die Atmosphärenfremdstoffe abtransportiert und verdünnt. Je nach den vorherrschenden meteorologischen und topographischen Parametern, die die Ausbreitung der Schadstoffe bestimmen, lassen sich grundsätzlich zwei verschiedene Möglichkeiten nennen, durch die die belastete Atmosphäre wieder gereinigt wird. Dieser Reinigungsprozeß umfaßt einerseits die trockene Deposition (dry deposition), andererseits die nasse Deposition (wet deposition). Während sich bei der trockenen Deposition die Schadstoffe auf den der Atmosphäre ausgesetzten Oberflächen ablagern und auch von den Pflanzen im Rahmen der Photosynthese durch die Stomata aufgenommen werden, erfolgt bei der nassen Schadstoffdeposition die Rückführung aus der Atmosphäre durch die verschiedenen Formen des Niederschlags, wobei die Niederschlagsart in quantitativer Hinsicht eine entscheidende Rolle bei der Schadstoffablagerung spielt, worauf später eingegangen wird.

Die Bestimmung der über den Vorgang der trockenen Deposition dem Boden zugeführten Schadstoffmengen ist auf rechnerischem bzw. meßtechnischem Wege nicht einfach, da zahlreiche Parameter

die schadstoffspezifischen Ablagerungsgeschwindigkeiten<sup>1)</sup> beeinflussen bzw. diese durch die Art der Aufnahmeoberflächen der Sammelgefäße bestimmt werden (MAYER 1978).

Für verschiedene Schadstoffe und Gebiete in der Bundesrepublik Deutschland führten GEORGII et al. (1980) hierzu Berechnungen durch; während PERSEKE et al. (1980) dies am Beispiel des Schwefels für die Gesamtfläche der Bundesrepublik und KUTTLER (1981) für den gleichen Schadstoff im 'Mittleren Ruhrgebiet'<sup>2)</sup> zeigte.

Um Aussagen über die dem Boden zugeführten Mengen der verschiedenen Schadstoffe aus der Industriegebietsatmosphäre zu erhalten, werden seit Mai 1978 an der Station Bochum (Botanischer Garten der Universität) Analysen des Niederschlagswassers und Berechnungen zur trockenen Deposition - vorerst für den Schadstoff Schwefel - durchgeführt.

In diesem Zusammenhang sollen Ergebnisse des in offenen Auffanggefäßen wöchentlich gesammelten Niederschlagswassers vorgestellt werden, das u.a. auf die Inhaltsstoffe Sulfat, Calcium und Chlorid untersucht wurde. Zusätzlich erfolgte eine Bestimmung des pH-Wertes und der jeweiligen Niederschlagsmenge.

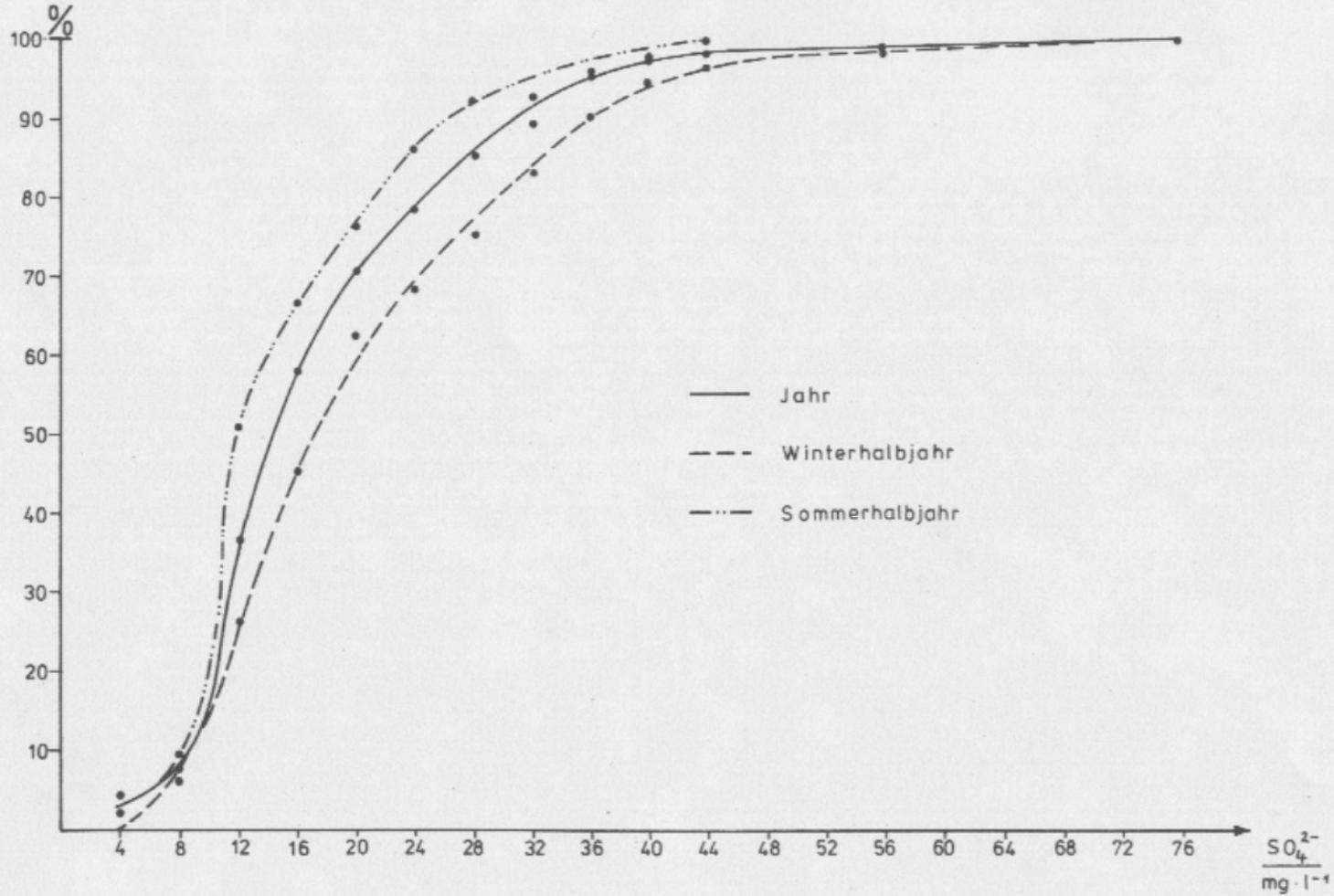
Bei dem hier vorgelegten Datenmaterial handelt es sich um vorläufige Ergebnisse aus dem zweijährigen Untersuchungszeitraum Mai 1978 - April 1980. Das gesamte Vorhaben soll im Mai 1982 abgeschlossen werden. Die Schadstoffe wurden nach konventionel-

---

1) "Die Ablagerung von atmosphärischen Gasen und Teilchen (wird) aus dem Verhältnis der abgelagerten Schadstoffmenge auf dem Boden oder der Vegetation und der Konzentration des betreffenden Schadstoffes in der bodennahen Luftschicht bestimmt. Bedingt durch die Dimension dieser Größe (cm/s bzw. m/s) wird auch der Begriff der Ablagerungsgeschwindigkeit verwendet" (HORBERT 1978, S. 46/47).

2) Der Raum 'Mittleres Ruhrgebiet' umfaßt eine Fläche von 765 km<sup>2</sup>. Die westliche Begrenzung des Gebietes folgt den Westgrenzen der Städte Essen, Bottrop, Gladbeck, Marl; die östliche Begrenzung entspricht in etwa den Ostgrenzen der Städte Bochum, Herne, Recklinghausen, Oer-Erkenschwick. Im Süden wird das Gebiet von der Ruhr und im Norden von der Lippe begrenzt (nach LUFTREINHALTEPLAN RUHRGEBIET MITTE 1980-1984).

Abb.1: Häufigkeitsverteilung der Sulfatkonzentrationen im Niederschlagswasser (Mai 1978 -April 1980)



len Methoden gewichtsanalytisch (Sulfat) bzw. titrimetrisch (Calcium und Chlorid) bestimmt; der pH-Wert mit der Glaselektrode (Schott N 61) ermittelt.

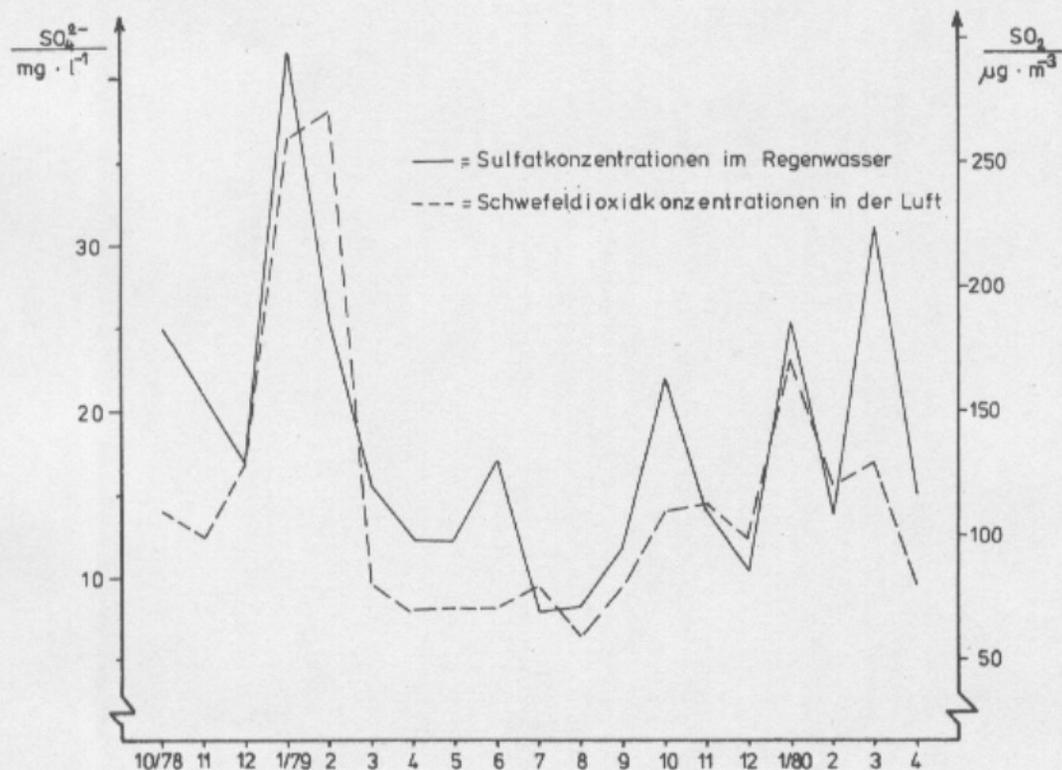
## 2. Ergebnisse

### *Sulfatkonzentrationen*

Die Ergebnisse der Konzentrationsmessungen werden in Form von Summenkurven dargestellt, wodurch die absolute Schwankungsbreite und die jeweilige prozentuale Verteilung der Meßwerte deutlich wird.

Wie Abb. 1 zu entnehmen ist, bewegten sich die gemessenen Sulfatkonzentrationen zwischen den Extremwerten 0,9 und 75 mg Sulfat/l und wiesen für den zweijährigen Untersuchungszeitraum einen Mittelwert von  $\bar{x} = 18$  mg Sulfat/l bei einer mittleren Schwankungsbreite von 12,4 - 33,5 mg Sulfat/l auf. Die den einzelnen Monaten entsprechenden Sulfatkonzentrationen wurden zum Zwecke einer besseren Vergleichbarkeit jeweils für die Sommer- und Winterhalbjahre des Untersuchungszeitraumes berechnet, um festzustellen, ob jahreszeitenbedingte Unterschiede in den Konzentrationen auftraten. Es zeigte sich, daß sich im Winterhalbjahr höhere Konzentrationen einstellten als im Sommerhalbjahr, was bei einem Vergleich der 90 %-Werte (36 mg Sulfat/l im Winterhalbjahr, 26 mg Sulfat/l im Sommerhalbjahr) deutlich wird. Die höhere Belastung der Atmosphäre an Schwefelverbindungen während der kalten Jahreszeit geht konform mit den in Bochum gemessenen Schwefeldioxidkonzentrationen in der Luft, die im langjährigen Mittel im Winter 0,24 mg Schwefeldioxid/m<sup>3</sup> Luft, im Sommer dagegen rund 0,11 mg/m<sup>3</sup> erreichen und damit um über 50 % unter dem Winterhalbjahreswert liegen. Wie Abb. 2 zu entnehmen ist, läßt sich anhand des Verlaufs der Monatsmittelwerte der Sulfat- und Schwefeldioxidkonzentrationen das gleichsinnige Verhalten der Schadstoffkomponenten erkennen. Aus dem Verteilungsmuster der beiden Komponenten im Jahresverlauf

Abb.2: Verlauf der Sulfatkonzentrationen im Niederschlagswasser und der Schwefeldioxidkonzentrationen in der Luft (Oktober 1978–April 1980)



WX 201

wird die Abhängigkeit der Sulfatkonzentrationen im Niederschlagswasser von den Schwefeldioxidkonzentrationen in der Luft deutlich.

Neben der jahreszeitlichen Unterschiedlichkeit der Sulfatkonzentrationen ließ sich auch eine Abhängigkeit der Schadstoffkonzentrationen von der jeweils gefallenen Niederschlagsmenge nachweisen, worauf u.a. schon GEORGII (1965) in seinen Untersuchungen hingewiesen hat. Tabelle 2 zeigt hierzu die Ergebnisse sowohl für den Jahresdurchschnitt als auch für das Sommer- und Winterhalbjahr. Wie der Tabelle zu entnehmen ist, nimmt die

Tab. 2

Zusammenhang zwischen der Sulfatkonzentration (in mg/l) und der wöchentlichen Niederschlagsmenge (in mm) (Mai 1978 - April 1980)

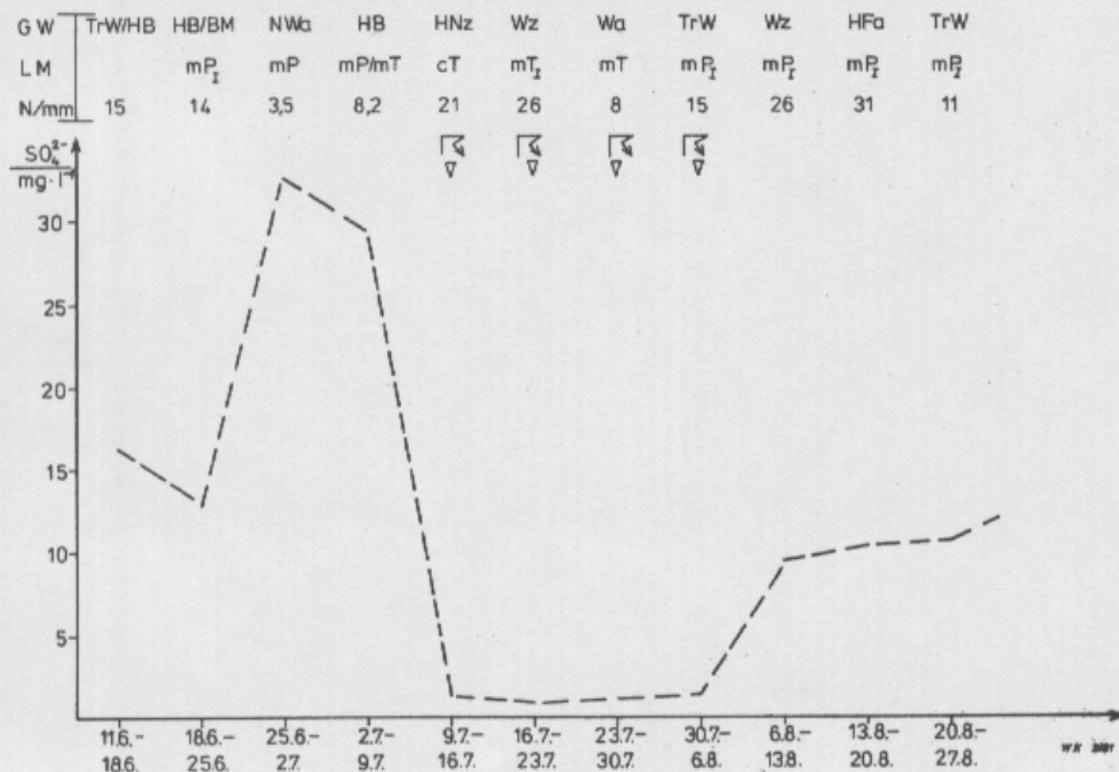
N	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>								
	Jahr			Sommerhalbjahr			Winterhalbjahr		
	$\bar{x}$	s	n	$\bar{x}$	s	n	$\bar{x}$	s	n
- 5	31	17	17	22	10	8	35	16	9
- 15	18	8	33	16	8	21	21	8	12
- 25	13	7	16	12	9	9	16	4	7
- 35	11	2	11	11	2	8	12	3	3
- 45	11	4	3	-	-	-	11	3	3
- 55	9	1	3	10	1	2	8	0	1

Sulfatkonzentration mit Zunahme der Regenmenge prinzipiell ab, und zwar im Durchschnitt auf rund 1/3 (9 mg Sulfat/l) der Ausgangskonzentration bei einem Anstieg der Niederschlagsmenge auf den 11fachen Wert (55 mm). Wie die Vergleichszahlen für das Sommer- und Winterhalbjahr zeigen, ist die Konzentrationsabnahme bei Zunahme der Niederschlagsmenge im Winterhalbjahr wesentlich stärker ausgeprägt als im Sommerhalbjahr. Während im Winterhalbjahr die Sulfatkonzentration von 35 auf 8 mg Sulfat/l - also auf rund 1/4 der Ausgangskonzentration absinkt - erfolgt im Sommerhalbjahr nur eine Konzentrationsabnahme auf rund die Hälfte des Ausgangswertes (von 22 auf 10 mg Sulfat/l). Im wesentlichen wird dieses Verhalten durch den im Vergleich zum Sommerhalbjahr stärker belasteten Niederschlag (im Bereich 5 bis 15 mm) im emissionsreicheren Winterhalbjahr bestimmt.

In diesem Zusammenhang sollen zwei Niederschlagsereignisse herausgegriffen werden, die zu extremen Sulfatkonzentrationen im Regenwasser führten.

**Abb.3:** Verlauf der wöchentlichen Sulfatkonzentrationen im Niederschlagswasser für die Zeit vom 11.6.1979 bis 27.8.1979

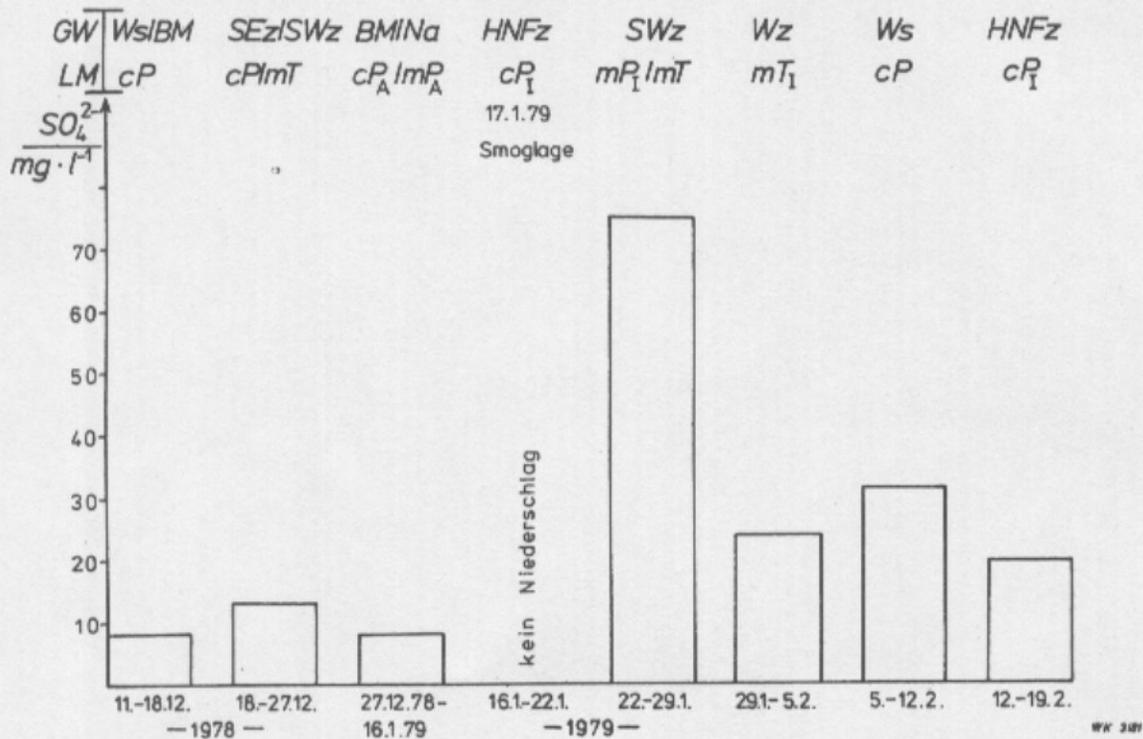
(GW = Großwetterlage; LM = Luftmasse; ☒ = Gewitter; ▽ = Schauer)



Die niedrigsten Schadstoffkonzentrationen wurden im Juli 1979 gemessen, mit Werten, die bei rund 1 mg Sulfat/l lagen (vgl. Abb. 3). Während in den Wochen vor dem 9.7. die Sulfatkonzentrationen Werte zwischen 12 und 30 mg/l erreichten, wurden in der Zeit vom 9.7. bis 6.8. außerordentlich niedrige Sulfatkonzentrationen gemessen, die sich um 1 mg Sulfat/l bewegten. In der Zeit nach dem 6.8. stiegen die Konzentrationen wieder an. Die sehr niedrigen Werte zwischen dem 9.7. und dem 6.8. wurden durch starke Gewitterschauer hervorgerufen.

Da Schauerniederschläge von ihrer Entstehung her über größere Tropfenradien verfügen als z. B. warmfrontgebundener Aufgleitregen und dadurch viel höhere Fallgeschwindigkeiten aufweisen als letzterer (MÖLLER 1973), ist die zeitliche Aufnahmekapazität von Schadstoffen wesentlich geringer als bei einem langsam fallenden Landregen.

Abb.4: Verlauf der wöchentlichen Sulfatkonzentrationen im Niederschlagswasser für die Zeit vom 11.12.1978 bis 19.2.1979 (GW= Großwetterlage, LM= Luftmasse)

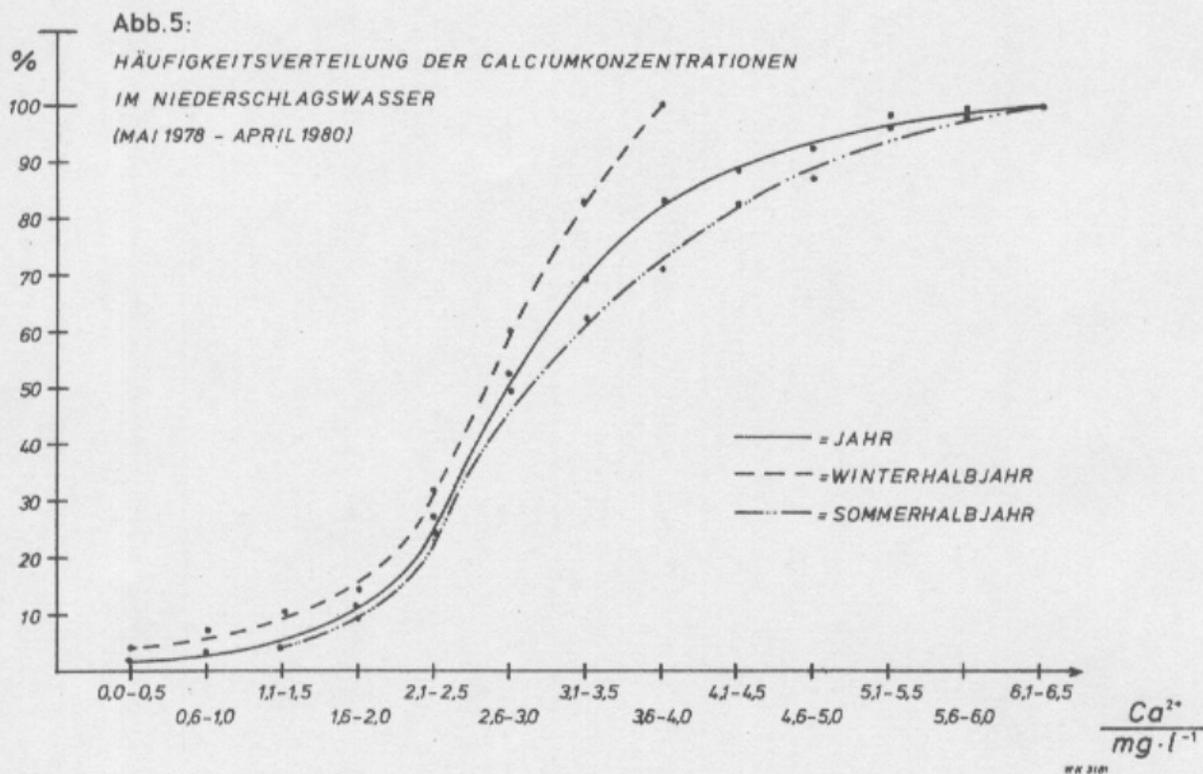


Die höchsten Sulfatkonzentrationen mit 75 mg Sulfat/l wurden in der Woche vom 22. bis 29. Januar 1979 gemessen (Abb. 4), nachdem in der Woche zuvor kein Niederschlag gefallen war und sich die Schadstoffe in der bodennahen Atmosphäre ansammeln konnten, bis sie mit dem ersten Regenguß der darauffolgenden Woche dem Boden zugeführt werden konnten. Wie stark die bodennahe Verschmutzung der Troposphäre war, wird auch daran erkenntlich, daß während dieser unter dem Einfluß gealterter kontinen-

taler Polarluft stehenden niederschlagsfreien Woche zum ersten Mal in der Geschichte der Luftüberwachung in NRW am 17.1.1979 wegen der Bildung von SO<sub>2</sub>-Smog (KUTTLER 1979a) im westlichen Ruhrgebiet Smogalarm der Stufe 1 ausgelöst werden mußte, da die Schwefeldioxidwerte die vorgegebene Grenze überschritten hatten. Wie Abb. 4 zu entnehmen ist, sanken in der Folgezeit die Sulfatkonzentrationen wieder auf niedrigere Werte ab.

### Calciumkonzentrationen

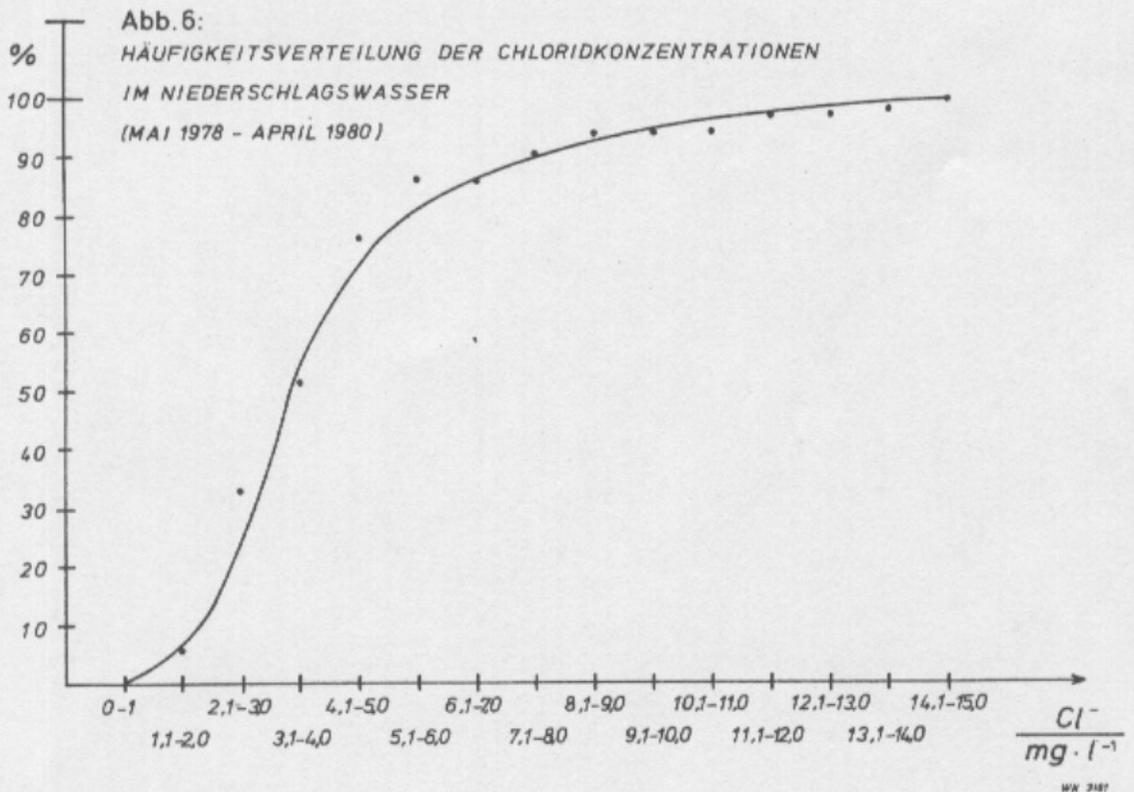
Auch dieser Spurenstoff zeigte einen Jahresgang der Konzentrationswerte mit relativ niedrigen Werten im Winter sowie im Frühjahr und etwas erhöhten Werten in den Sommer- und Herbstmonaten (vgl. Abb. 5). Im arithmetischen Mittel wurde an der Station Bochum ein Wert von  $\bar{x} = 3,2$  mg Calcium/l erreicht, bei einer mittleren Schwankungsbreite, die zwischen 2,3 und 4,0 mg Calcium/l lag. Während im Winterhalbjahr Werte bis zu 4,0 mg Calcium/l auftraten, konnten im Sommerhalbjahr Maximalwerte von bis zu 6,5 mg/l festgestellt werden. Bezogen auf den



arithmetischen Mittelwert ( $\bar{x} = 3,2 \text{ mg/l}$ ) ergaben sich im Sommerhalbjahr im Mittel um 11 % höhere Werte, während im Winterhalbjahr um 18 % niedrigere Konzentrationen gemessen werden konnten. Da Calcium ein wesentlicher Bestandteil des atmosphärischen Staubes ist und hauptsächlich in der Bauindustrie als Zement verwendet wird, könnten die höheren Sommerwerte möglicherweise durch verstärkte Bautätigkeit interpretiert werden.

#### Chloridkonzentrationen

Der arithmetische Mittelwert der Chloridkonzentrationen betrug 4,4 mg Chlorid/l mit einer Schwankungsbreite von 2,4 - 7,1 mg Chlorid/l. Nach den vorläufigen Ergebnissen weisen die Chloridkonzentrationen keinen Jahresgang auf. Abb. 6 zeigt den Verlauf der Summenkurve.



### pH-Werte

Der arithmetische Mittelwert der pH-Werte des Niederschlags lag bei 4,3 mit einem mittleren Schwankungsbereich von 3,8 - 5,1.

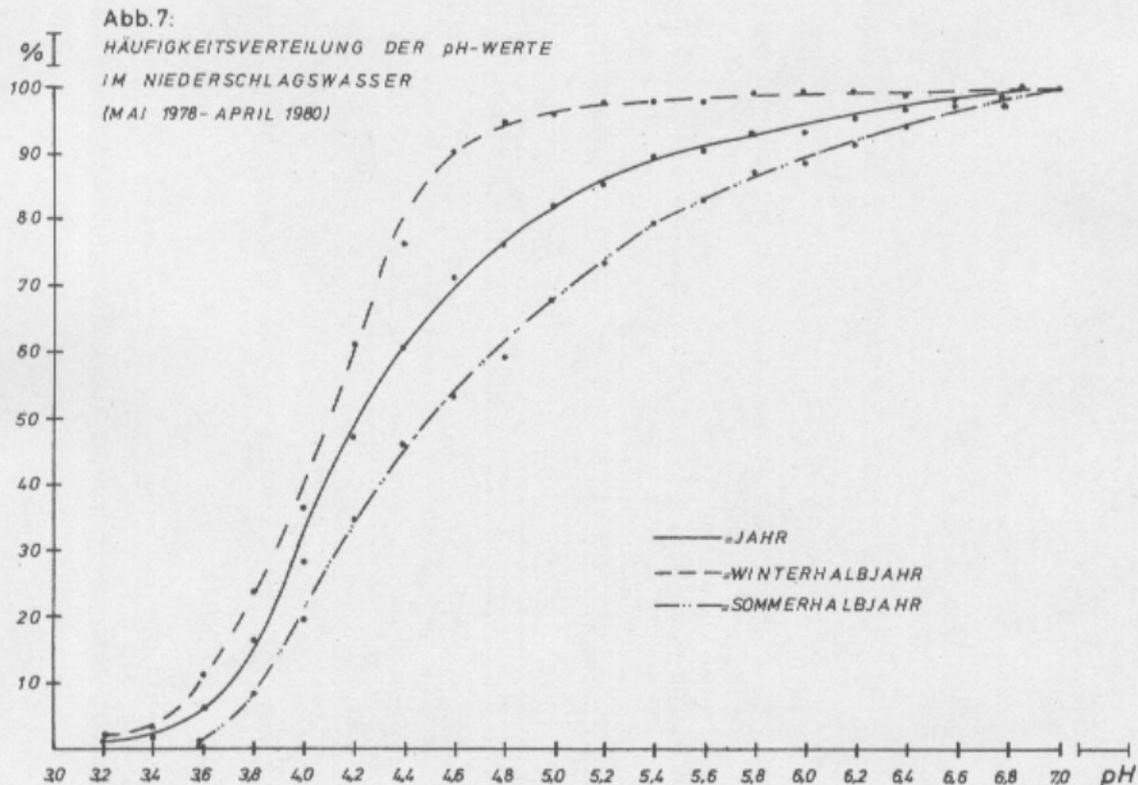
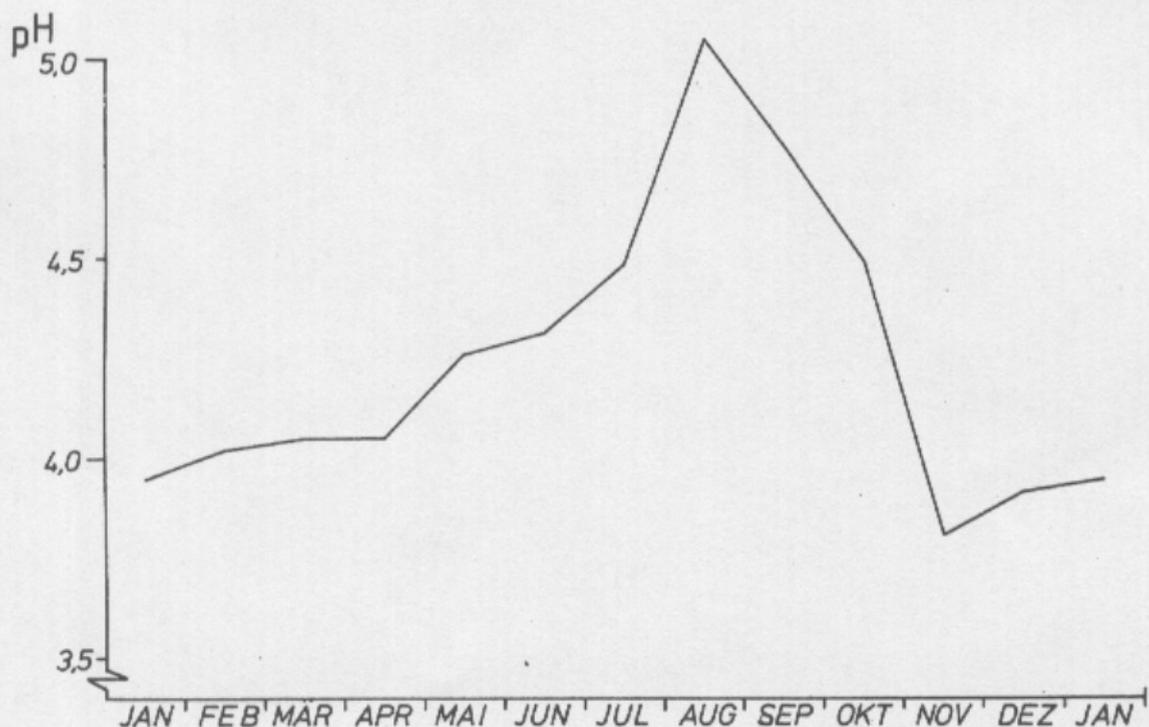


Abb. 7 zeigt die Häufigkeitsverteilung der pH-Werte im Niederschlagswasser für den Untersuchungszeitraum. Deutlich lassen sich die Unterschiede der pH-Werte zwischen den Jahresmittelwerten und den für die jeweiligen Halbjahre dargestellten Werten erkennen. In den Winter- und Frühjahrsmonaten ( $\text{pH} = 4,0$ ) trat gegenüber den übrigen Monaten des Jahres ( $\text{pH} = 4,5$ ) ein wesentlich höherer Säuregehalt im Niederschlagswasser auf. Im Durchschnitt erwies sich das Regenwasser in Bochum in den Wintermonaten um mehr als dreimal saurer als in den Sommermonaten. Diese in Abhängigkeit von den Jahreszeiten auftretenden unterschiedlich hohen pH-Werte sind auch schon von anderer Seite

beschrieben worden (KAYSER et al. 1974; KLOCKOW 1978). Allgemein werden die höheren winterlichen Säurekonzentrationen auf die verstärkte Heizintensität und den dadurch verstärkten Ausstoß verschiedener säureproduzierender bzw. -haltiger Schadstoffe zurückgeführt. Abb. 8 zeigt den Jahresgang der pH-Werte.

Abb.8: Über einen Zeitraum von 2 Jahren (Mai 1978 - April 1980) gemittelter Jahresgang der pH-Werte von Niederschlägen an der Station Botanischer Garten, Universität Bochum



WK 8/81

Die höchsten Säurekonzentrationen ließen sich in den Monaten November bis April beobachten, mit dem niedrigsten Wert von pH = 3,8 im November. Höhere pH-Werte traten in den Monaten Mai bis Oktober auf, wobei im Monat August das Zweijahresmittel der pH-Werte über 5 lag.

Wegen der in letzter Zeit verstärkt geführten Diskussion um das Problem "saure Niederschläge" soll in diesem Zusammenhang noch auf folgendes hingewiesen werden:

Niederschläge, die z. B. in nicht belasteten Gebieten fallen, weisen aufgrund der Lösung des in der Atmosphäre enthaltenen Kohlendioxids als Kohlensäure einen mittleren pH-Wert auf, der von vornherein schon im leicht sauren Bereich liegt. Im allgemeinen wird davon ausgegangen, daß Regenwasser, das nicht anthropogen durch Industrieabgase bzw. -stäube verschmutzt ist, einen pH-Wert von etwa 5,6 aufweist.

Diesen Wert nennt man auch den "biologischen Neutralpunkt".

Niederschläge, deren pH-Werte deutlich unter diesem Punkt liegen, müssen außer dem ubiquitär vorhandenen Kohlendioxid in der Atmosphäre noch andere ansäuernde Substanzen aufgenommen haben, die zu einer weiteren Absenkung des pH-Wertes führen. Erst wenn der pH-Wert unter 5,6 liegt, spricht man von "saurem Niederschlag".

Ein Blick auf die Summenverteilungskurven der pH-Werte (Abb. 7) macht deutlich, daß im Jahresmittel in etwa 90 % der Fälle der im mittleren Ruhrgebiet fallende Niederschlag einen pH-Wert aufwies, der unter 5,6 lag. Ein Vergleich der Jahreszeitenwerte für den Sommer und den Winter macht deutlich, daß die Sommerniederschläge nur in 83 % der Fälle nach dieser Definition als "saurer Regen" gelten können, während im Winter die Niederschläge zu 98 % sauer sind.

Orientiert man einen Vergleich der pH-Werte, die in Bochum für das Winter- (pH = 4,0) bzw. Sommerhalbjahr (pH = 4,5) gemessen wurden am pH-Wert des biologischen Neutralpunktes, dann ist das Niederschlagswasser im Winter etwa vierzigmal und im Sommer etwa dreizehnmal saurer als nicht industrierverschmutztes Regenwasser.

### 3. Vergleich der pH-Werte und der Schadstoffkonzentrationen mit anderen Stationen

Ein Vergleich der Schadstoffkonzentrationen im Niederschlagswasser an der Station Bochum mit den Ergebnissen anderer Stationen läßt sich nur schlecht durchführen, da einerseits die

Tab. 3

Vergleich der pH-Werte und der Schadstoffkonzentrationen im Niederschlagswasser für verschiedene Gebiete<sup>1)</sup>

	1	2	3	4	5	6	7
	Küstengebiet mit sauberer Luft Westirland 1967	Binnenland mit sauberer Luft Nordschwe- den 1956	Binnenland mit schmut- ziger Luft Südnorwegen 1974/75	Küstengebiet mit schmut- ziger Luft Südnorwegen 1972	Binnenland mit schmut- ziger Luft New Hemp- shire 1973/74	Brotjackl- riegel Bay.Wald 1980 <sup>2)</sup>	Ruhrge- biets- stadt Bochum 1978/80
pH-Wert	5,8	5,4	4,3	4,2	3,9	4,3	4,3
Calcium (mg/l)	3,0	1,4	0,3	1,8	0,4	0,4	3,2
Chlorid (mg/l)	35,9	0,4	0,4	20,9	0,4	0,5	4,4
Sulfat (mg/l)	12,6	2,8	5,0	15,7	10,6	3,6	18,6

1) Werte der Spalten 1-5 nach LIKENS et al. (1979); umgerechnet

2) nach UMWELTBUNDESAMT (1981); Werte gerundet

Untersuchungszeiträume meist nicht vergleichbar sind und sich andererseits die Analysenmethoden der verschiedenen Bearbeiter unterscheiden. Um jedoch eine Einordnung der Bochumer Ergebnisse zu ermöglichen, wurden die ermittelten Werte den an anderen Stationen gefundenen Ergebnissen in Tabelle 3 gegenübergestellt. Es zeigt sich, daß z. B. die Bochumer pH-Werte relativ niedrig sind und gut korrespondieren mit Analyseergebnissen aus Südnorwegen, aber auch mit den Ergebnissen, die im Bayerischen Wald (Brotjacklriegel) gefunden wurden. Gerade die Reinluftstation Brotjacklriegel (Werte in Spalte 6, Tab. 3) macht deutlich, daß der pH-Wert allein keinen ausreichenden Parameter beim Vergleich von Niederschlagswasserproben unterschiedlich belasteter Gebiete darstellt, sondern erst durch eine Gegenüberstellung der Spurenstoffe deutlich wird, in welchem Maße die Vergleichsstationen sich in ihrer Niederschlagsqualität unterscheiden. Anhand der in Tab. 3 aufgelisteten Werte lassen sich die unterschiedlich belasteten Gebiete in Europa voneinander unterscheiden.

#### 4. Zur Höhe der Schadstoffdeposition im mittleren Ruhrgebiet

Aus den im Niederschlagswasser bestimmten Spurenstoffkonzentrationen lassen sich mit Hilfe der gefallenen Niederschlagsmengen die für die Diskussion geoökologischer Fragestellungen wichtigen Schadstoffbelastungen pro Flächeneinheit nach folgender Beziehung ermitteln:

$$S = C \cdot N$$

$$S = \text{Schadstoffmenge pro Fläche (mg} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$$

$$C = \text{Schadstoffkonzentration (mg} \cdot \text{l}^{-1}\text{)}$$

$$N = \text{Niederschlagsmenge (l} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$$

Als vorläufige mittlere Schadstoffdepositionen im mittleren

Ruhrgebiet ergaben sich für den zweijährigen Untersuchungszeitraum folgende Werte:

Sulfat: 104 kg · ha<sup>-1</sup> · Monat<sup>-1</sup>

Calcium: 23 " " "

Chlorid: 32 " " "

Darüber hinaus wurden in diesem Zusammenhang Regressionsgeraden der Flächenbelastung der Spurenstoffe Sulfat, Calcium und Chlorid in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe berechnet, woraus sich bei Kenntnis der monatlichen Niederschlagssumme die jeweils bestehende Flächenbelastung ermitteln läßt.

Folgende Formeln ließen sich hierzu aufstellen:

$$y_{\text{SO}_4} = 7,09 x + 320,4$$

$$y_{\text{Ca}^{2+}} = 2,99 x - 0,47$$

$$y_{\text{Cl}^-} = 2,9 x + 28,2$$

$$y = \frac{\text{Spurenstoff}}{\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Monat}^{-1}} \quad x = \frac{\text{Niederschlag}}{\text{mm} \cdot \text{Monat}^{-1}}$$

Vergleicht man die o.g. Flächenbelastungswerte der drei Spurenstoffe Sulfat, Calcium und Chlorid mit Werten, die an der vom Umweltbundesamt betreuten Reinluftstation auf dem Brotjacklriegel im Bayerischen Wald im Jahre 1980 ermittelt wurden, dann ergeben sich für die belastete Station Bochum im mittleren Ruhrgebiet Spurenstofferrhöhungen, die beim Sulfat eine dreifach, bei Calcium und Chlorid eine über sechsfach höhere Belastung gegenüber der Reinluftstation aufweisen.

Literatur

- BEILKE, S. (1980): Luftchemisches Verhalten von  $\text{SO}_2$ . - Luftchemisches Verhalten anthropogener Schadstoffe. Ergebnisse der Arbeitsgruppe "Luftchemie" in der VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, Düsseldorf. 12-24.
- BÖRTITZ, S. (1974): Bedeutung "unsichtbarer" Einflüsse industrieller Immissionen auf die Vegetation. - Biol. Zbl., 93 (3). 341-349.
- GEORGII, H. W. (1965): Untersuchungen über Ausregnen und Auswaschen atmosphärischer Spurenstoffe durch Wolken und Niederschlag. - Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 14 (100).
- GEORGII, H. W. u. K. HERRMANN (1979): Umwandlung luftfremder Stoffe in der Atmosphäre. - Umwelt, 6. 463-465.
- GEORGII, H. W., C. PERSEKE, E. ROHBOCK u. E. GRAVENHORST (1980): Untersuchung über die trockene und feuchte Deposition von Luftverunreinigungen in der Bundesrepublik Deutschland. - Forschungsbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Luftreinhaltung Forschungsprojekt 10402 600.
- GIEBEL, J. (1977): Untersuchungen zur Abbaurate von Schwefeldioxid in der Atmosphäre. - Schriftenreihe der Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 40. Essen. 13-22.
- GRANDJEAN, E. (1973): Epidemiologie der Luftverunreinigungen. - Naturwissenschaftliche Rundschau, 16 (8). 323-329.
- GUDERIAN, R. (1966): Luftverunreinigungen und Pflanzenschutz. - Zeitschr. f. Pflanzenkrankheiten, Pflanzenpath. u. Pflanzenschutz, 73. 241-265.
- van HAUT, H. (1961): Die Analyse von  $\text{SO}_2$ -Wirkungen auf Pflanzen im Laborversuch. - Staub-Reinh. d. Luft, 21. 52-56.
- HEIDT, V. (1978): Flechtenkartierung und die Beziehung zur Immissionsbelastung des südlichen Münsterlandes. - Biogeographica, 12.
- HETTICHE, K. (1966): Die Gefahren der Luftverunreinigungen für die Gesundheit. - Med. Welt, 4. 2552-2554.
- HORBERT, M. (1978): Klimatische und lufthygienische Aspekte der Stadt- und Landschaftsplanung. - Natur und Heimat, 38 (1/2). 34-49.
- KAYSER, K., K. JESSEL, A. KÖHLER u. G. RÖNICKE (1974): Die pH-Werte des Niederschlags in der Bundesrepublik Deutschland 1967-1972. - Deutsche Forschungsgemeinschaft, Mitteilungen IX der Kommission zur Erforschung der Luftverunreinigung.
- KELLER, Th. (1974): Verkehrsbedingte Luftverunreinigung und Vegetation. - Garten und Landschaft, 84. 547-551.
- KLOCKOW, D. (1978): Zum Zusammenhang zwischen pH-Wert und Elektrolytzusammensetzung von Niederschlägen. - VDI-Berichte, 314. 21-26.

- KNABE, W. (1970): Kiefernwaldverbreitung und Schwefeldioxid-Immission im Ruhrgebiet. - Staub-Reinh. d. Luft, 30. 32-35
- KUTTLER, W. (1979a): London-Smog und Los Angeles-Smog. - Erdkunde 33: 236-240.
- (1979b): Einflußgrößen gesundheitsgefährdender Wetterlagen und deren bioklimatische Auswirkungen auf potentielle Erholungsgebiete. - Bochumer Geographische Arbeiten, 36. Paderborn. 130 Seiten.
  - (1980): Auswirkungen gasförmiger Luftverunreinigungen auf die Ökophysiologie junger Fichtennadeln. - Verh. d. Ges. f. Ökologie, VIII. Freising-Weißenstephan 1979. 471-480.
  - (1981): Trockene und nasse Schwefeldepositionen im mittleren Ruhrgebiet. - Vortrag auf der 11. Jahrestagung der Gesellschaft für Ökologie in Mainz. (im Druck)
- LIKENS, G. E., R. F. WRIGHT, J. N. GALLOWAY u. T. J. BUTLER (1979): Saurer Regen. - Spektrum der Wissenschaft, 12. 73-78.
- LUCKAT, S. (1976): Die Erhebungen und Untersuchungen der LIB am Kölner Dom und seinen Baumaterialien. - Schriftenreihe der Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 37. 112-122.
- LUCKAT, S. (1978): Wirkungen von sauerstoffhaltigen Schwefelverbindungen auf Werkstein. - VDI-Berichte, 314. 97-99.
- LUFTREINHALTEPLAN RUHRGEBIET MITTE 1980-84 (1980): Herausgegeben vom Ministerium für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen.
- MAYER, R. (1978): Nasse und trockene Deposition von Schwefelverbindungen auf industrieferne Wälder und ihre Wirkung auf den Boden. - VDI-Berichte, 314. 263-265.
- MÖLLER, F. (1973): Einführung in die Meteorologie, Bd. 1. Mannheim 1973
- MÜLLER, P. (1978): Ökologische Informationen für die Raum- und Stadtplanung. - Schriftenreihe Siedlungsverband Ruhrkohlenbezirk, 61. 49-80.
- PERSEKE, C., S. BEILKE u. H. W. GEORGII (1980): Die Gesamtschwefeldeposition in der Bundesrepublik Deutschland auf der Grundlage von Meßdaten des Jahres 1974. - Berichte des Institutes für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt/M., 40.
- RUFFERT, G. (1981): Schadstoffe der Luft zerstören den Beton. - VDI-Nachrichten, 1. 6.
- SCHLIPKÖTER, H. W. (1970): Wirkung von Luftverunreinigungen auf die menschliche Gesundheit. - Bericht über den gegenwärtigen Stand der Forschung. Herausgegeben vom Minister für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen.

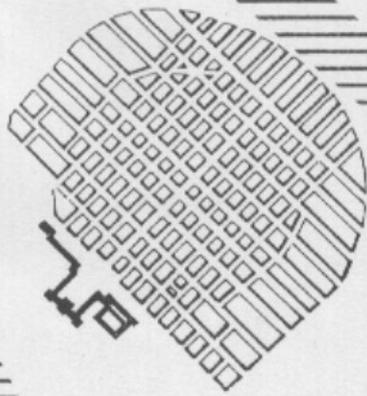
SUKOPP, H. (1974): Ökologische Charakteristika von Großstädten, bes. anthropogene Veränderungen von Klima, Boden und Vegetation. - Zeitschr. d. TU Berlin, 4. 469-488.

UMWELTBUNDESAMT (1981): Luftqualität 1980, Meßnetz des Umweltbundesamtes, Pilotstation Schauinsland. Datenband.

*Sonderdruck aus:*

# MANNHEIMER GEOGRAPHISCHE ARBEITEN

14



I. Dörrer, F. Fezer (Hg.)

Umweltprobleme im  
Rhein - Neckar - Raum

Mannheim 1983

ZUR NIEDERSCHLAGSWASSERQUALITÄT EINES INDUSTRIELLEN  
BALLUNGSRAUMES - VORLÄUFIGE ERGEBNISSE EINER UNTER-  
SUCHUNG ÜBER DIE BELASTUNG URBANER ÖKOsysteme DURCH  
ANTHROPOGENE SCHADSTOFFE

Mit 8 Abbildungen und 3 Tabellen

Wilhelm Kuttler, Bochum

1. Problemstellung, Ziel und Methode

Industrielle Ballungsräume setzen in großen Mengen Schadstoffe frei, die im gesamten Spektrum der Ökosysteme Schädigungen der vielfältigsten Art auftreten lassen. In Mitleidenschaft gezogen werden nicht nur der Verursacher Mensch (HETTICHE 1966; GRANDJEAN 1973; SCHLIPKÖTER 1970) sowie Flora und Fauna (BÖRTITZ 1974; van HAUT 1961; HEIDT 1978; KNABE 1970; KUTTLER 1980; MÜLLER, P. 1978; SUKOPP 1974; KELLER 1974; GUDERIAN 1966), sondern auf dem abiotischen Sektor auch in steigendem Maße sakrale und profane Bauwerke (LUCKAT 1976, 1978; RUFFERT 1981).

Die beinahe schon zahllos auftretenden chemischen Stoffe, die zum Verschmutzungsprozeß der bodennahen Troposphäre beitragen, können verschiedenen Schadstoffklassen zugeordnet werden (Tab. 1), an denen vornehmlich Schwefel-, Stickstoff- und Chlorverbindungen einen großen Anteil besitzen.

Tab. 1: Schadstoffspektrum einer Industriegebietsatmosphäre  
(nach PETRI aus KUTTLER 1979b, ergänzt)

1. Schwefelverbindungen  
SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, CS<sub>2</sub>
2. Stickstoffverbindungen  
"nitrose Gase" (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>); Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>)
3. Kohlenmonoxid  
CO
4. Halogene und Halogenverbindungen  
Chlor-, Brom- sowie Fluorverbindungen (z.B. HF, SiF<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> und ihre Salze, HCl)
5. flüchtige aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe und ihre Oxydationsprodukte  
z. B. Aldehyde, Ketone, Säuren, Peroxyde
6. verschiedenartige belästigende Stoffe mit intensiverem Geruch  
z. B. Amine, Mercaptane, Buttersäure, Pyridin
7. anorganische Stäube  
Verbindungen von Blei, Eisen, Mangan, Chrom, Kupfer, Nickel, Vanadium, Beryllium, Zink, Arsen, Molybdän, Selen, Silizium u. a.
8. Ruß und organische Produkte  
z. B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe wie das krebserzeugende 3,4 - Benzopyren
9. Abrieb von Teer- und Asphaltstraßen sowie von Autoreifen
10. Oxydantien  
z. B. Ozon (O<sub>3</sub>), eine allotrope Modifikation des Sauerstoffs

Freigesetzt werden die partikel- und gasförmigen Schadstoffe hauptsächlich durch die drei Quellengruppen Industrie-, Hausbrand und Kleingewerbe sowie den Straßenverkehr.

Für die Ausbreitung der emittierten Schadstoffe ist neben meteorologischen und topographischen Parametern auch die Quellhöhe der entsprechenden Emittenten verantwortlich, was sich besonders deutlich bei Vorherrschen austauscharmer Wetterlagen in heizungsintensiven Winterhalbjahren zeigt, wenn durch Emissionen des Hausbrandes und Straßenverkehrs die bodennahen Luftschichten stark belastet werden.

Nach ihrer Freisetzung erfahren die in die Atmosphäre eingeleiteten Schadsubstanzen durch verschiedene chemische Vorgänge Veränderungen wie sie z.B. von BEILKE 1980, GIEBEL 1977, GEORGII & HERRMANN 1979) näher beschrieben werden. Darüber hinaus werden die Atmosphärenfremdstoffe abtransportiert und verdünnt. Je nach den vorherrschenden meteorologischen und topographischen Parametern, die die Ausbreitung der Schadstoffe bestimmen, lassen sich grundsätzlich zwei verschiedene Möglichkeiten nennen, durch die die belastete Atmosphäre wieder gereinigt wird. Dieser Reinigungsprozeß umfaßt einerseits die trockene Deposition (dry deposition), andererseits die nasse Deposition (wet deposition). Während sich bei der trockenen Deposition die Schadstoffe auf den der Atmosphäre ausgesetzten Oberflächen ablagern und auch von den Pflanzen im Rahmen der Photosynthese durch die Stomata aufgenommen werden, erfolgt bei der nassen Schadstoffdeposition die Rückführung aus der Atmosphäre durch die verschiedenen Formen des Niederschlags, wobei die Niederschlagsart in quantitativer Hinsicht eine entscheidende Rolle bei der Schadstoffablagerung spielt, worauf später eingegangen wird.

Die Bestimmung der über den Vorgang der trockenen Deposition dem Boden zugeführten Schadstoffmengen ist auf rechnerischem bzw. meßtechnischem Wege nicht einfach, da zahlreiche Parameter

Freigesetzt werden die partikel- und gasförmigen Schadstoffe hauptsächlich durch die drei Quellengruppen Industrie-, Hausbrand und Kleingewerbe sowie den Straßenverkehr.

Für die Ausbreitung der emittierten Schadstoffe ist neben meteorologischen und topographischen Parametern auch die Quellhöhe der entsprechenden Emittenten verantwortlich, was sich besonders deutlich bei Vorherrschen austauscharmer Wetterlagen in heizungsintensiven Winterhalbjahren zeigt, wenn durch Emissionen des Hausbrandes und Straßenverkehrs die bodennahen Luftschichten stark belastet werden.

Nach ihrer Freisetzung erfahren die in die Atmosphäre eingeleiteten Schadsubstanzen durch verschiedene chemische Vorgänge Veränderungen wie sie z.B. von BEILKE 1980, GIEBEL 1977, GEORGII & HERRMANN 1979) näher beschrieben werden. Darüber hinaus werden die Atmosphärenfremdstoffe abtransportiert und verdünnt. Je nach den vorherrschenden meteorologischen und topographischen Parametern, die die Ausbreitung der Schadstoffe bestimmen, lassen sich grundsätzlich zwei verschiedene Möglichkeiten nennen, durch die die belastete Atmosphäre wieder gereinigt wird. Dieser Reinigungsprozeß umfaßt einerseits die trockene Deposition (dry deposition), andererseits die nasse Deposition (wet deposition). Während sich bei der trockenen Deposition die Schadstoffe auf den der Atmosphäre ausgesetzten Oberflächen ablagern und auch von den Pflanzen im Rahmen der Photosynthese durch die Stomata aufgenommen werden, erfolgt bei der nassen Schadstoffdeposition die Rückführung aus der Atmosphäre durch die verschiedenen Formen des Niederschlags, wobei die Niederschlagsart in quantitativer Hinsicht eine entscheidende Rolle bei der Schadstoffablagerung spielt, worauf später eingegangen wird.

Die Bestimmung der über den Vorgang der trockenen Deposition dem Boden zugeführten Schadstoffmengen ist auf rechnerischem bzw. meßtechnischem Wege nicht einfach, da zahlreiche Parameter

die schadstoffspezifischen Ablagerungsgeschwindigkeiten<sup>1)</sup> beeinflussen bzw. diese durch die Art der Aufnahmeoberflächen der Sammelgefäße bestimmt werden (MAYER 1978).

Für verschiedene Schadstoffe und Gebiete in der Bundesrepublik Deutschland führten GEORGII et al. (1980) hierzu Berechnungen durch; während PERSEKE et al. (1980) dies am Beispiel des Schwefels für die Gesamtfläche der Bundesrepublik und KUTTLER (1981) für den gleichen Schadstoff im 'Mittleren Ruhrgebiet'<sup>2)</sup> zeigte.

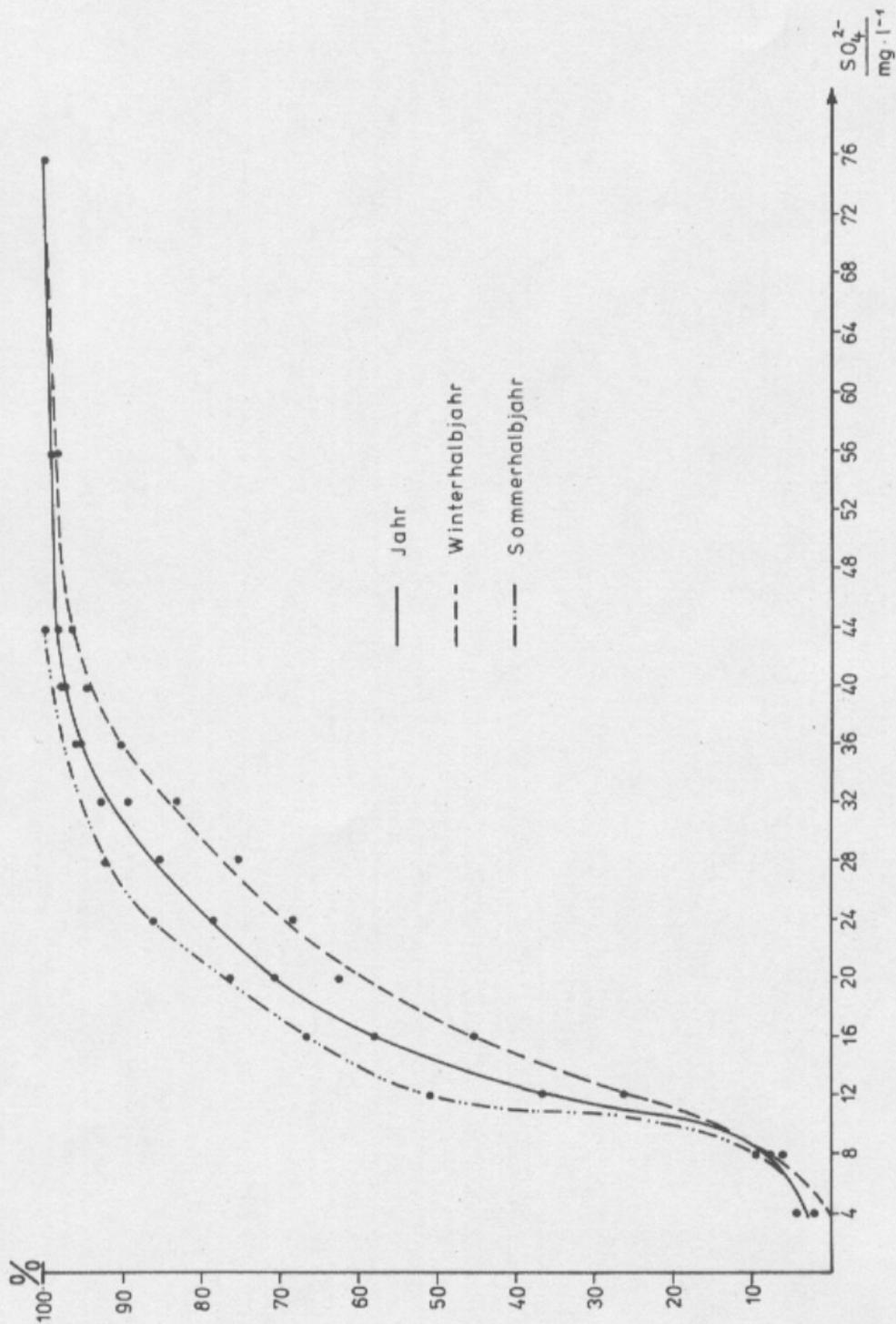
Um Aussagen über die dem Boden zugeführten Mengen der verschiedenen Schadstoffe aus der Industriegebietsatmosphäre zu erhalten, werden seit Mai 1978 an der Station Bochum (Botanischer Garten der Universität) Analysen des Niederschlagswassers und Berechnungen zur trockenen Deposition - vorerst für den Schadstoff Schwefel - durchgeführt.

In diesem Zusammenhang sollen Ergebnisse des in offenen Auffanggefäßen wöchentlich gesammelten Niederschlagswassers vorgestellt werden, das u.a. auf die Inhaltsstoffe Sulfat, Calcium und Chlorid untersucht wurde. Zusätzlich erfolgte eine Bestimmung des pH-Wertes und der jeweiligen Niederschlagsmenge.

Bei dem hier vorgelegten Datenmaterial handelt es sich um vorläufige Ergebnisse aus dem zweijährigen Untersuchungszeitraum Mai 1978 - April 1980. Das gesamte Vorhaben soll im Mai 1982 abgeschlossen werden. Die Schadstoffe wurden nach konventionel-

- 
- 1) "Die Ablagerung von atmosphärischen Gasen und Teilchen (wird) aus dem Verhältnis der abgelagerten Schadstoffmenge auf dem Boden oder der Vegetation und der Konzentration des betreffenden Schadstoffes in der bodennahen Luftschicht bestimmt. Bedingt durch die Dimension dieser Größe (cm/s bzw. m/s) wird auch der Begriff der Ablagerungsgeschwindigkeit verwendet" (HORBERT 1978, S. 46/47).
  - 2) Der Raum 'Mittleres Ruhrgebiet' umfaßt eine Fläche von 765 km<sup>2</sup>. Die westliche Begrenzung des Gebietes folgt den Westgrenzen der Städte Essen, Bottrop, Gladbeck, Marl; die östliche Begrenzung entspricht in etwa den Ostgrenzen der Städte Bochum, Herne, Recklinghausen, Oer-Erkenschwick. Im Süden wird das Gebiet von der Ruhr und im Norden von der Lippe begrenzt (nach LUFTREINHALTEPLAN RUHRGEBIET MITTE 1980-1984).

Abb.1: Häufigkeitsverteilung der Sulfatkonzentrationen im Niederschlagswasser (Mai 1978 - April 1980)



len Methoden gewichtsanalytisch (Sulfat) bzw. titrimetrisch (Calcium und Chlorid) bestimmt; der pH-Wert mit der Glaselektrode (Schott N 61) ermittelt.

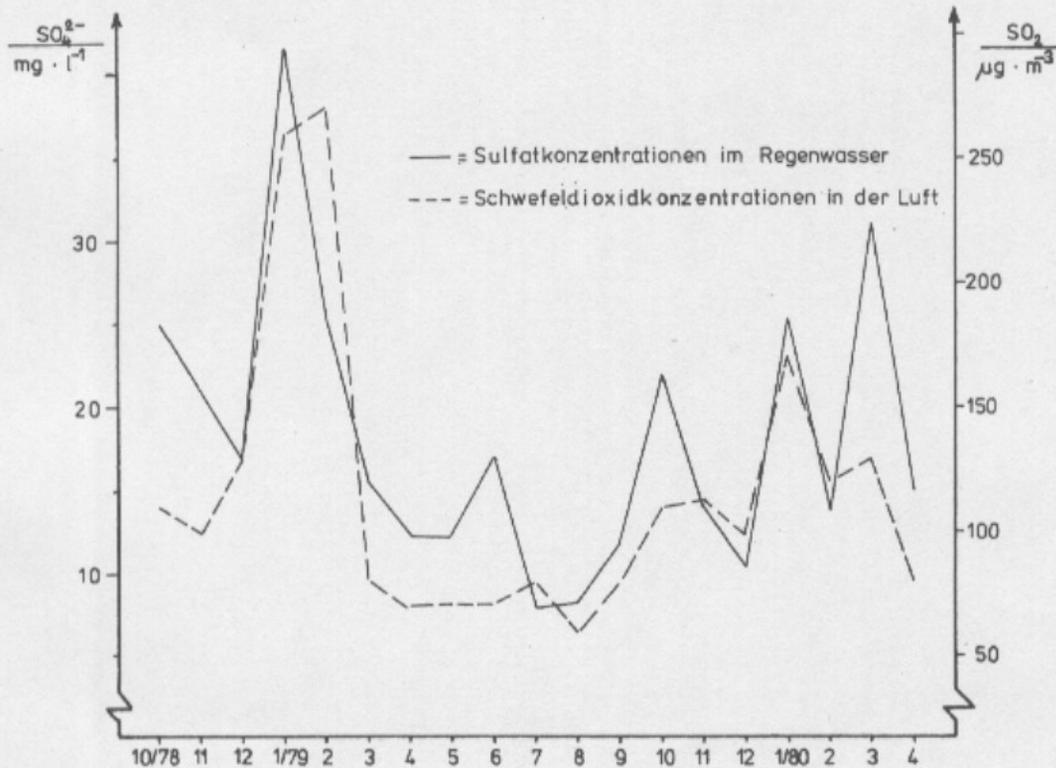
## 2. Ergebnisse

### *Sulfatkonzentrationen*

Die Ergebnisse der Konzentrationsmessungen werden in Form von Summenkurven dargestellt, wodurch die absolute Schwankungsbreite und die jeweilige prozentuale Verteilung der Meßwerte deutlich wird.

Wie Abb. 1 zu entnehmen ist, bewegten sich die gemessenen Sulfatkonzentrationen zwischen den Extremwerten 0,9 und 75 mg Sulfat/l und wiesen für den zweijährigen Untersuchungszeitraum einen Mittelwert von  $\bar{x} = 18$  mg Sulfat/l bei einer mittleren Schwankungsbreite von 12,4 - 33,5 mg Sulfat/l auf. Die den einzelnen Monaten entsprechenden Sulfatkonzentrationen wurden zum Zwecke einer besseren Vergleichbarkeit jeweils für die Sommer- und Winterhalbjahre des Untersuchungszeitraumes berechnet, um festzustellen, ob jahreszeitenbedingte Unterschiede in den Konzentrationen auftraten. Es zeigte sich, daß sich im Winterhalbjahr höhere Konzentrationen einstellten als im Sommerhalbjahr, was bei einem Vergleich der 90 %-Werte (36 mg Sulfat/l im Winterhalbjahr, 26 mg Sulfat/l im Sommerhalbjahr) deutlich wird. Die höhere Belastung der Atmosphäre an Schwefelverbindungen während der kalten Jahreszeit geht konform mit den in Bochum gemessenen Schwefeldioxidkonzentrationen in der Luft, die im langjährigen Mittel im Winter 0,24 mg Schwefeldioxid/m<sup>3</sup> Luft, im Sommer dagegen rund 0,11 mg/m<sup>3</sup> erreichen und damit um über 50 % unter dem Winterhalbjahreswert liegen. Wie Abb. 2 zu entnehmen ist, läßt sich anhand des Verlaufs der Monatsmittelwerte der Sulfat- und Schwefeldioxidkonzentrationen das gleichsinnige Verhalten der Schadstoffkomponenten erkennen. Aus dem Verteilungsmuster der beiden Komponenten im Jahresverlauf

Abb.2: Verlauf der Sulfatkonzentrationen im Niederschlagswasser und der Schwefeldioxidkonzentrationen in der Luft (Oktober 1978–April 1980)



WX 201

wird die Abhängigkeit der Sulfatkonzentrationen im Niederschlagswasser von den Schwefeldioxidkonzentrationen in der Luft deutlich.

Neben der jahreszeitlichen Unterschiedlichkeit der Sulfatkonzentrationen ließ sich auch eine Abhängigkeit der Schadstoffkonzentrationen von der jeweils gefallen Niederschlagsmenge nachweisen, worauf u.a. schon GEORGII (1965) in seinen Untersuchungen hingewiesen hat. Tabelle 2 zeigt hierzu die Ergebnisse sowohl für den Jahresdurchschnitt als auch für das Sommer- und Winterhalbjahr. Wie der Tabelle zu entnehmen ist, nimmt die

Tab. 2

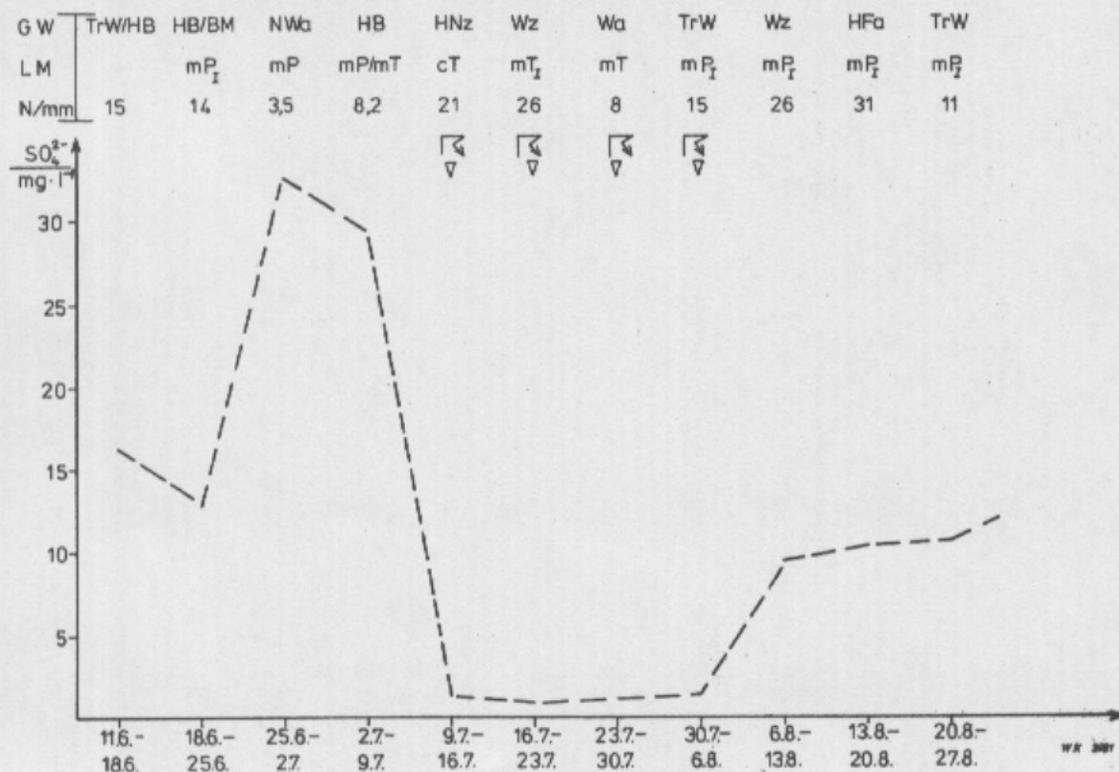
Zusammenhang zwischen der Sulfatkonzentration (in mg/l) und der wöchentlichen Niederschlagsmenge (in mm) (Mai 1978 - April 1980)

N	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>								
	Jahr			Sommerhalbjahr			Winterhalbjahr		
	$\bar{x}$	s	n	$\bar{x}$	s	n	$\bar{x}$	s	n
- 5	31	17	17	22	10	8	35	16	9
- 15	18	8	33	16	8	21	21	8	12
- 25	13	7	16	12	9	9	16	4	7
- 35	11	2	11	11	2	8	12	3	3
- 45	11	4	3	-	-	-	11	3	3
- 55	9	1	3	10	1	2	8	0	1

Sulfatkonzentration mit Zunahme der Regenmenge prinzipiell ab, und zwar im Durchschnitt auf rund 1/3 (9 mg Sulfat/l) der Ausgangskonzentration bei einem Anstieg der Niederschlagsmenge auf den 11fachen Wert (55 mm). Wie die Vergleichszahlen für das Sommer- und Winterhalbjahr zeigen, ist die Konzentrationsabnahme bei Zunahme der Niederschlagsmenge im Winterhalbjahr wesentlich stärker ausgeprägt als im Sommerhalbjahr. Während im Winterhalbjahr die Sulfatkonzentration von 35 auf 8 mg Sulfat/l - also auf rund 1/4 der Ausgangskonzentration absinkt - erfolgt im Sommerhalbjahr nur eine Konzentrationsabnahme auf rund die Hälfte des Ausgangswertes (von 22 auf 10 mg Sulfat/l). Im wesentlichen wird dieses Verhalten durch den im Vergleich zum Sommerhalbjahr stärker belasteten Niederschlag (im Bereich 5 bis 15 mm) im emissionsreicheren Winterhalbjahr bestimmt.

In diesem Zusammenhang sollen zwei Niederschlagsereignisse herausgegriffen werden, die zu extremen Sulfatkonzentrationen im Regenwasser führten.

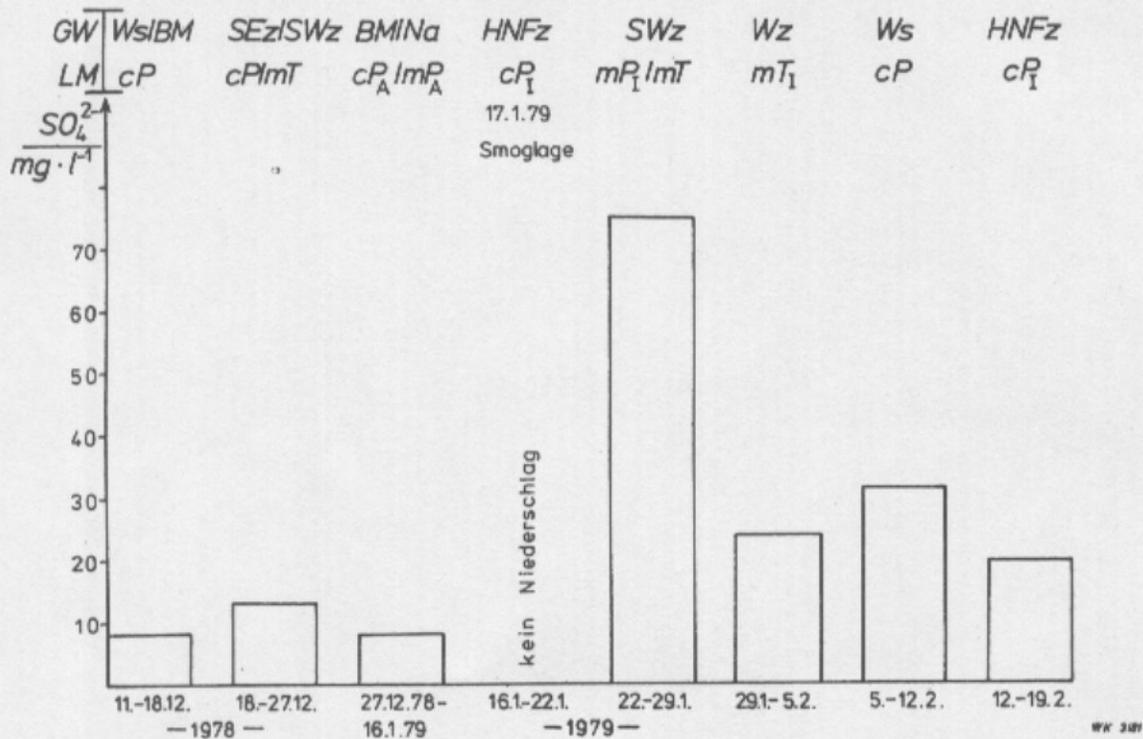
**Abb.3:** Verlauf der wöchentlichen Sulfatkonzentrationen im Niederschlagswasser für die Zeit vom 11.6.1979 bis 27.8.1979  
(GW = Großwetterlage; LM = Luftmasse; ☒ = Gewitter; ▽ = Schauer)



Die niedrigsten Schadstoffkonzentrationen wurden im Juli 1979 gemessen, mit Werten, die bei rund 1 mg Sulfat/l lagen (vgl. Abb. 3). Während in den Wochen vor dem 9.7. die Sulfatkonzentrationen Werte zwischen 12 und 30 mg/l erreichten, wurden in der Zeit vom 9.7. bis 6.8. außerordentlich niedrige Sulfatkonzentrationen gemessen, die sich um 1 mg Sulfat/l bewegten. In der Zeit nach dem 6.8. stiegen die Konzentrationen wieder an. Die sehr niedrigen Werte zwischen dem 9.7. und dem 6.8. wurden durch starke Gewitterschauer hervorgerufen.

Da Schauerniederschläge von ihrer Entstehung her über größere Tropfenradien verfügen als z. B. warmfrontgebundener Aufgleitregen und dadurch viel höhere Fallgeschwindigkeiten aufweisen als letzterer (MÖLLER 1973), ist die zeitliche Aufnahmekapazität von Schadstoffen wesentlich geringer als bei einem langsam fallenden Landregen.

Abb.4: Verlauf der wöchentlichen Sulfatkonzentrationen im Niederschlagswasser für die Zeit vom 11.12.1978 bis 19.2.1979 (GW= Großwetterlage, LM= Luftmasse)

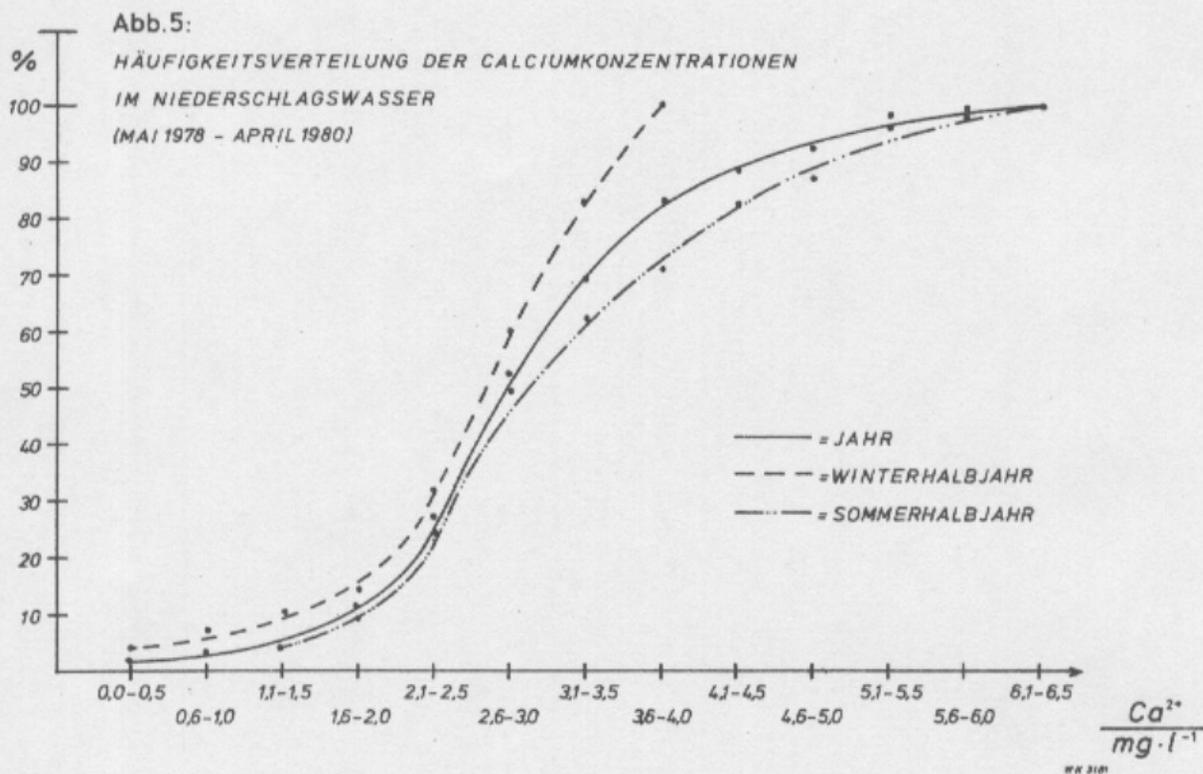


Die höchsten Sulfatkonzentrationen mit 75 mg Sulfat/l wurden in der Woche vom 22. bis 29. Januar 1979 gemessen (Abb. 4), nachdem in der Woche zuvor kein Niederschlag gefallen war und sich die Schadstoffe in der bodennahen Atmosphäre ansammeln konnten, bis sie mit dem ersten Regenguß der darauffolgenden Woche dem Boden zugeführt werden konnten. Wie stark die bodennahe Verschmutzung der Troposphäre war, wird auch daran erkenntlich, daß während dieser unter dem Einfluß gealterter kontinen-

taler Polarluft stehenden niederschlagsfreien Woche zum ersten Mal in der Geschichte der Luftüberwachung in NRW am 17.1.1979 wegen der Bildung von SO<sub>2</sub>-Smog (KUTTLER 1979a) im westlichen Ruhrgebiet Smogalarm der Stufe 1 ausgelöst werden mußte, da die Schwefeldioxidwerte die vorgegebene Grenze überschritten hatten. Wie Abb. 4 zu entnehmen ist, sanken in der Folgezeit die Sulfatkonzentrationen wieder auf niedrigere Werte ab.

### Calciumkonzentrationen

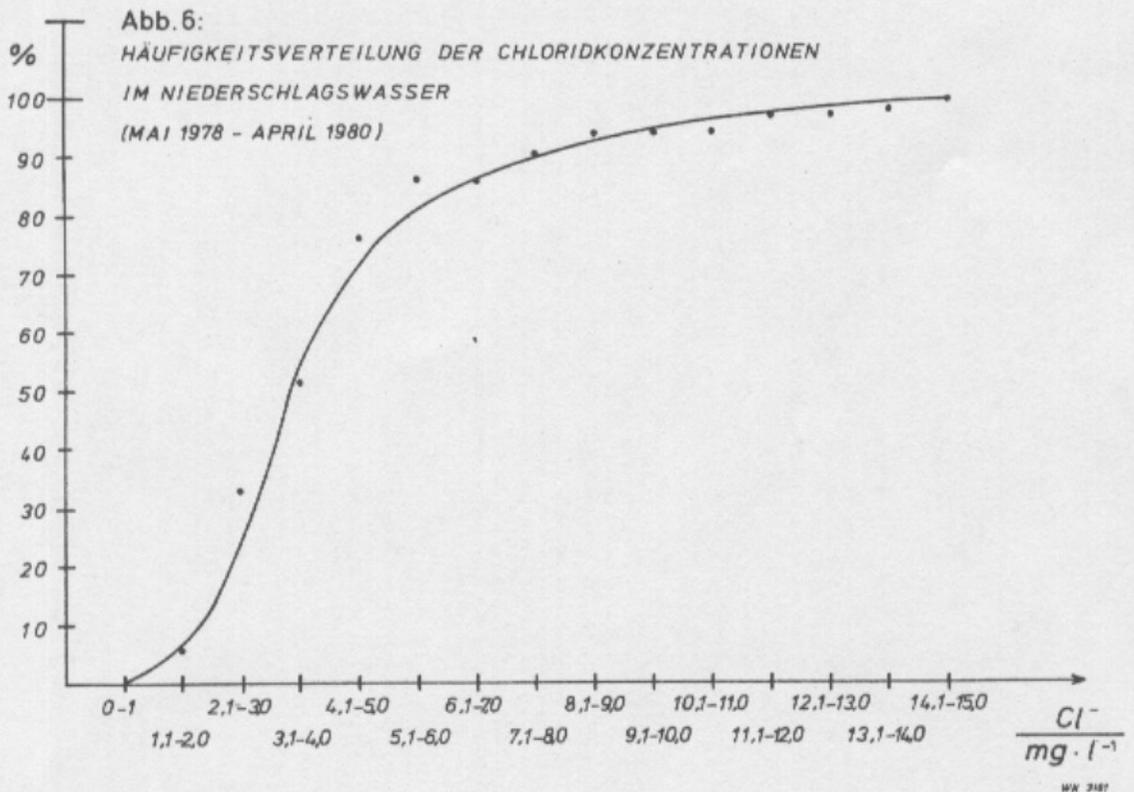
Auch dieser Spurenstoff zeigte einen Jahresgang der Konzentrationswerte mit relativ niedrigen Werten im Winter sowie im Frühjahr und etwas erhöhten Werten in den Sommer- und Herbstmonaten (vgl. Abb. 5). Im arithmetischen Mittel wurde an der Station Bochum ein Wert von  $\bar{x} = 3,2$  mg Calcium/l erreicht, bei einer mittleren Schwankungsbreite, die zwischen 2,3 und 4,0 mg Calcium/l lag. Während im Winterhalbjahr Werte bis zu 4,0 mg Calcium/l auftraten, konnten im Sommerhalbjahr Maximalwerte von bis zu 6,5 mg/l festgestellt werden. Bezogen auf den



arithmetischen Mittelwert ( $\bar{x} = 3,2 \text{ mg/l}$ ) ergaben sich im Sommerhalbjahr im Mittel um 11 % höhere Werte, während im Winterhalbjahr um 18 % niedrigere Konzentrationen gemessen werden konnten. Da Calcium ein wesentlicher Bestandteil des atmosphärischen Staubes ist und hauptsächlich in der Bauindustrie als Zement verwendet wird, könnten die höheren Sommerwerte möglicherweise durch verstärkte Bautätigkeit interpretiert werden.

#### Chloridkonzentrationen

Der arithmetische Mittelwert der Chloridkonzentrationen betrug 4,4 mg Chlorid/l mit einer Schwankungsbreite von 2,4 - 7,1 mg Chlorid/l. Nach den vorläufigen Ergebnissen weisen die Chloridkonzentrationen keinen Jahresgang auf. Abb. 6 zeigt den Verlauf der Summenkurve.



### pH-Werte

Der arithmetische Mittelwert der pH-Werte des Niederschlags lag bei 4,3 mit einem mittleren Schwankungsbereich von 3,8 - 5,1.

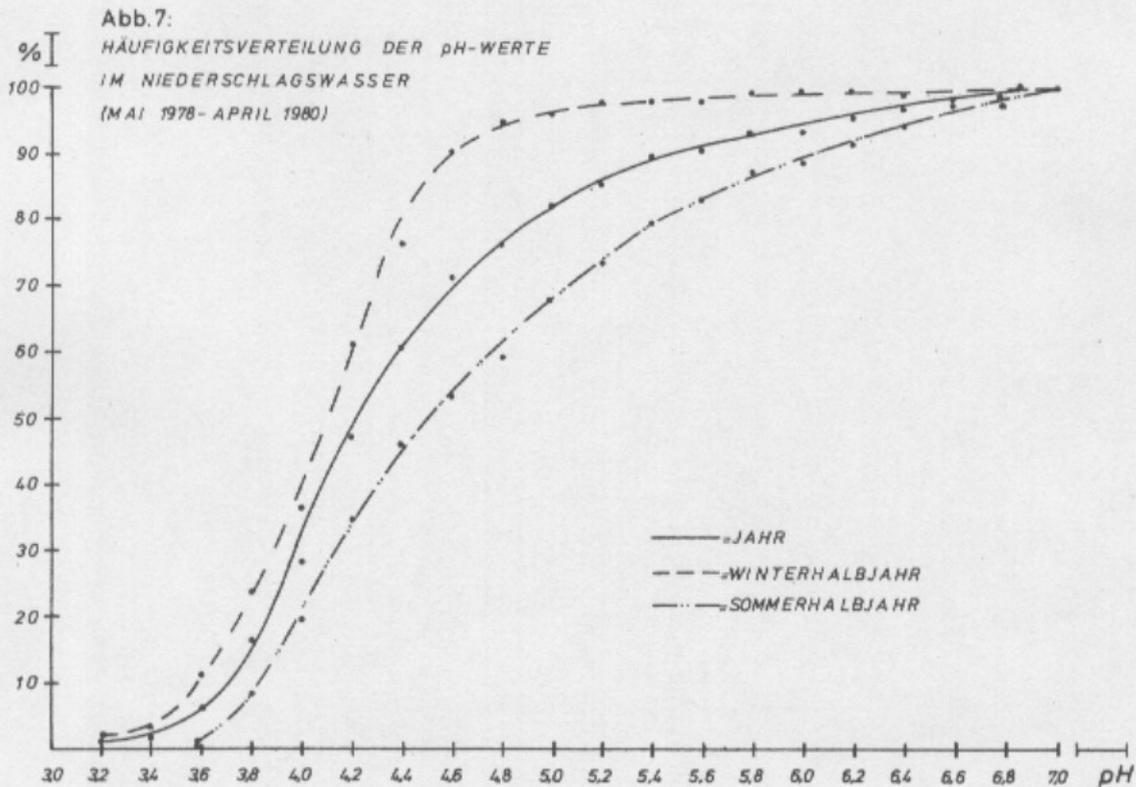
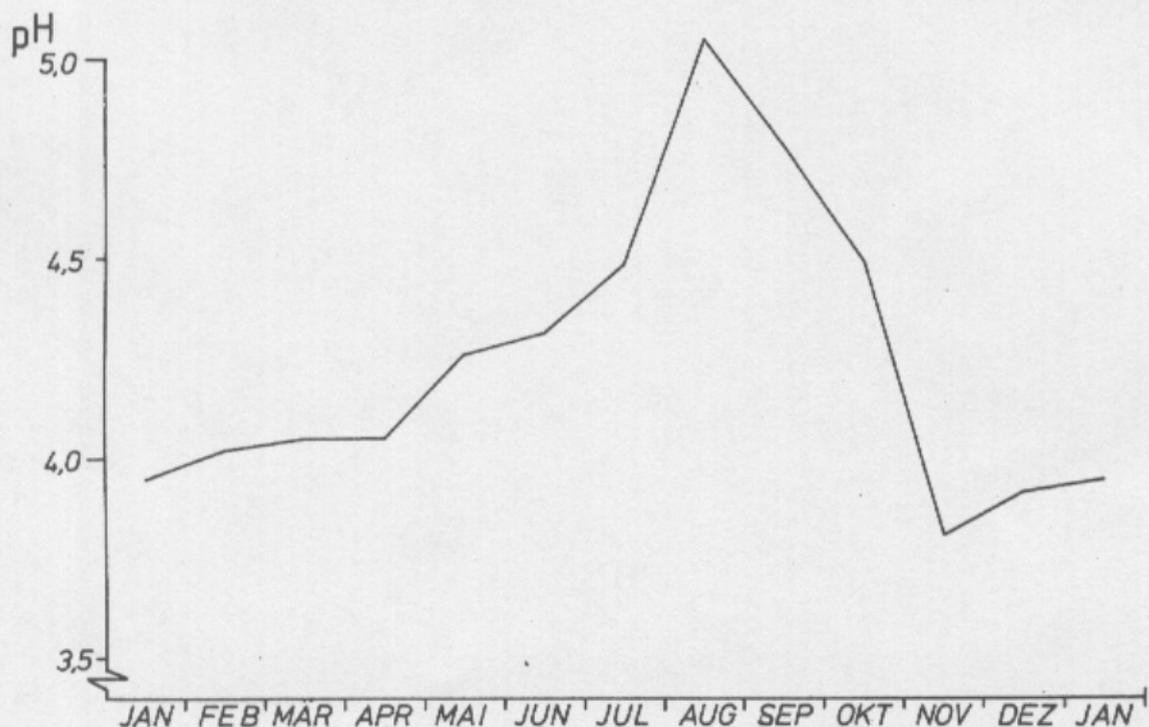


Abb. 7 zeigt die Häufigkeitsverteilung der pH-Werte im Niederschlagswasser für den Untersuchungszeitraum. Deutlich lassen sich die Unterschiede der pH-Werte zwischen den Jahresmittelwerten und den für die jeweiligen Halbjahre dargestellten Werten erkennen. In den Winter- und Frühjahrsmonaten ( $\text{pH} = 4,0$ ) trat gegenüber den übrigen Monaten des Jahres ( $\text{pH} = 4,5$ ) ein wesentlich höherer Säuregehalt im Niederschlagswasser auf. Im Durchschnitt erwies sich das Regenwasser in Bochum in den Wintermonaten um mehr als dreimal saurer als in den Sommermonaten. Diese in Abhängigkeit von den Jahreszeiten auftretenden unterschiedlich hohen pH-Werte sind auch schon von anderer Seite

beschrieben worden (KAYSER et al. 1974; KLOCKOW 1978). Allgemein werden die höheren winterlichen Säurekonzentrationen auf die verstärkte Heizintensität und den dadurch verstärkten Ausstoß verschiedener säureproduzierender bzw. -haltiger Schadstoffe zurückgeführt. Abb. 8 zeigt den Jahresgang der pH-Werte.

Abb.8: Über einen Zeitraum von 2 Jahren (Mai 1978 - April 1980) gemittelter Jahresgang der pH-Werte von Niederschlägen an der Station Botanischer Garten, Universität Bochum



WK 8/81

Die höchsten Säurekonzentrationen ließen sich in den Monaten November bis April beobachten, mit dem niedrigsten Wert von pH = 3,8 im November. Höhere pH-Werte traten in den Monaten Mai bis Oktober auf, wobei im Monat August das Zweijahresmittel der pH-Werte über 5 lag.

Wegen der in letzter Zeit verstärkt geführten Diskussion um das Problem "saure Niederschläge" soll in diesem Zusammenhang noch auf folgendes hingewiesen werden:

Niederschläge, die z. B. in nicht belasteten Gebieten fallen, weisen aufgrund der Lösung des in der Atmosphäre enthaltenen Kohlendioxids als Kohlensäure einen mittleren pH-Wert auf, der von vornherein schon im leicht sauren Bereich liegt. Im allgemeinen wird davon ausgegangen, daß Regenwasser, das nicht anthropogen durch Industrieabgase bzw. -stäube verschmutzt ist, einen pH-Wert von etwa 5,6 aufweist.

Diesen Wert nennt man auch den "biologischen Neutralpunkt".

Niederschläge, deren pH-Werte deutlich unter diesem Punkt liegen, müssen außer dem ubiquitär vorhandenen Kohlendioxid in der Atmosphäre noch andere ansäuernde Substanzen aufgenommen haben, die zu einer weiteren Absenkung des pH-Wertes führen. Erst wenn der pH-Wert unter 5,6 liegt, spricht man von "saurem Niederschlag".

Ein Blick auf die Summenverteilungskurven der pH-Werte (Abb. 7) macht deutlich, daß im Jahresmittel in etwa 90 % der Fälle der im mittleren Ruhrgebiet fallende Niederschlag einen pH-Wert aufwies, der unter 5,6 lag. Ein Vergleich der Jahreszeitenwerte für den Sommer und den Winter macht deutlich, daß die Sommer-niederschläge nur in 83 % der Fälle nach dieser Definition als "saurer Regen" gelten können, während im Winter die Niederschläge zu 98 % sauer sind.

Orientiert man einen Vergleich der pH-Werte, die in Bochum für das Winter- (pH = 4,0) bzw. Sommerhalbjahr (pH = 4,5) gemessen wurden am pH-Wert des biologischen Neutralpunktes, dann ist das Niederschlagswasser im Winter etwa vierzigmal und im Sommer etwa dreizehnmal saurer als nicht industrierverschmutztes Regenwasser.

### 3. Vergleich der pH-Werte und der Schadstoffkonzentrationen mit anderen Stationen

Ein Vergleich der Schadstoffkonzentrationen im Niederschlagswasser an der Station Bochum mit den Ergebnissen anderer Stationen läßt sich nur schlecht durchführen, da einerseits die

Tab. 3

Vergleich der pH-Werte und der Schadstoffkonzentrationen im Niederschlagswasser für verschiedene Gebiete<sup>1)</sup>

	1	2	3	4	5	6	7
	Küstengebiet mit sauberer Luft Westirland 1967	Binnenland mit sauberer Luft Nordschwe- den 1956	Binnenland mit schmut- ziger Luft Südnorwegen 1974/75	Küstengebiet mit schmut- ziger Luft Südnorwegen 1972	Binnenland mit schmut- ziger Luft New Hemp- shire 1973/74	Brotjackl- riegel Bay.Wald 1980 <sup>2)</sup>	Ruhrge- biets- stadt Bochum 1978/80
pH-Wert	5,8	5,4	4,3	4,2	3,9	4,3	4,3
Calcium (mg/l)	3,0	1,4	0,3	1,8	0,4	0,4	3,2
Chlorid (mg/l)	35,9	0,4	0,4	20,9	0,4	0,5	4,4
Sulfat (mg/l)	12,6	2,8	5,0	15,7	10,6	3,6	18,6

1) Werte der Spalten 1-5 nach LIKENS et al. (1979); umgerechnet

2) nach UMWELTBUNDESAMT (1981); Werte gerundet

Untersuchungszeiträume meist nicht vergleichbar sind und sich andererseits die Analysenmethoden der verschiedenen Bearbeiter unterscheiden. Um jedoch eine Einordnung der Bochumer Ergebnisse zu ermöglichen, wurden die ermittelten Werte den an anderen Stationen gefundenen Ergebnissen in Tabelle 3 gegenübergestellt. Es zeigt sich, daß z. B. die Bochumer pH-Werte relativ niedrig sind und gut korrespondieren mit Analyseergebnissen aus Südnorwegen, aber auch mit den Ergebnissen, die im Bayerischen Wald (Brotjacklriegel) gefunden wurden. Gerade die Reinluftstation Brotjacklriegel (Werte in Spalte 6, Tab. 3) macht deutlich, daß der pH-Wert allein keinen ausreichenden Parameter beim Vergleich von Niederschlagswasserproben unterschiedlich belasteter Gebiete darstellt, sondern erst durch eine Gegenüberstellung der Spurenstoffe deutlich wird, in welchem Maße die Vergleichsstationen sich in ihrer Niederschlagsqualität unterscheiden. Anhand der in Tab. 3 aufgelisteten Werte lassen sich die unterschiedlich belasteten Gebiete in Europa voneinander unterscheiden.

#### 4. Zur Höhe der Schadstoffdeposition im mittleren Ruhrgebiet

Aus den im Niederschlagswasser bestimmten Spurenstoffkonzentrationen lassen sich mit Hilfe der gefallenen Niederschlagsmengen die für die Diskussion geoökologischer Fragestellungen wichtigen Schadstoffbelastungen pro Flächeneinheit nach folgender Beziehung ermitteln:

$$S = C \cdot N$$

$$S = \text{Schadstoffmenge pro Fläche (mg} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$$

$$C = \text{Schadstoffkonzentration (mg} \cdot \text{l}^{-1}\text{)}$$

$$N = \text{Niederschlagsmenge (l} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$$

Als vorläufige mittlere Schadstoffdepositionen im mittleren

Ruhrgebiet ergaben sich für den zweijährigen Untersuchungszeitraum folgende Werte:

Sulfat: 104 kg · ha<sup>-1</sup> · Monat<sup>-1</sup>

Calcium: 23 " " "

Chlorid: 32 " " "

Darüber hinaus wurden in diesem Zusammenhang Regressionsgeraden der Flächenbelastung der Spurenstoffe Sulfat, Calcium und Chlorid in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe berechnet, woraus sich bei Kenntnis der monatlichen Niederschlagssumme die jeweils bestehende Flächenbelastung ermitteln läßt.

Folgende Formeln ließen sich hierzu aufstellen:

$$y_{\text{SO}_4} = 7,09 x + 320,4$$

$$y_{\text{Ca}^{2+}} = 2,99 x - 0,47$$

$$y_{\text{Cl}^-} = 2,9 x + 28,2$$

$$y = \frac{\text{Spurenstoff}}{\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Monat}^{-1}} \quad x = \frac{\text{Niederschlag}}{\text{mm} \cdot \text{Monat}^{-1}}$$

Vergleicht man die o.g. Flächenbelastungswerte der drei Spurenstoffe Sulfat, Calcium und Chlorid mit Werten, die an der vom Umweltbundesamt betreuten Reinluftstation auf dem Brotjacklriegel im Bayerischen Wald im Jahre 1980 ermittelt wurden, dann ergeben sich für die belastete Station Bochum im mittleren Ruhrgebiet Spurenstofferrhöhungen, die beim Sulfat eine dreifach, bei Calcium und Chlorid eine über sechsfach höhere Belastung gegenüber der Reinluftstation aufweisen.

Literatur

- BEILKE, S. (1980): Luftchemisches Verhalten von  $\text{SO}_2$ . - Luftchemisches Verhalten anthropogener Schadstoffe. Ergebnisse der Arbeitsgruppe "Luftchemie" in der VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, Düsseldorf. 12-24.
- BÖRTITZ, S. (1974): Bedeutung "unsichtbarer" Einflüsse industrieller Immissionen auf die Vegetation. - Biol. Zbl., 93 (3). 341-349.
- GEORGII, H. W. (1965): Untersuchungen über Ausregnen und Auswaschen atmosphärischer Spurenstoffe durch Wolken und Niederschlag. - Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 14 (100).
- GEORGII, H. W. u. K. HERRMANN (1979): Umwandlung luftfremder Stoffe in der Atmosphäre. - Umwelt, 6. 463-465.
- GEORGII, H. W., C. PERSEKE, E. ROHBOCK u. E. GRAVENHORST (1980): Untersuchung über die trockene und feuchte Deposition von Luftverunreinigungen in der Bundesrepublik Deutschland. - Forschungsbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Luftreinhaltung Forschungsprojekt 10402 600.
- GIEBEL, J. (1977): Untersuchungen zur Abbaurate von Schwefeldioxid in der Atmosphäre. - Schriftenreihe der Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 40. Essen. 13-22.
- GRANDJEAN, E. (1973): Epidemiologie der Luftverunreinigungen. - Naturwissenschaftliche Rundschau, 16 (8). 323-329.
- GUDERIAN, R. (1966): Luftverunreinigungen und Pflanzenschutz. - Zeitschr. f. Pflanzenkrankheiten, Pflanzenpath. u. Pflanzenschutz, 73. 241-265.
- van HAUT, H. (1961): Die Analyse von  $\text{SO}_2$ -Wirkungen auf Pflanzen im Laborversuch. - Staub-Reinh. d. Luft, 21. 52-56.
- HEIDT, V. (1978): Flechtenkartierung und die Beziehung zur Immissionsbelastung des südlichen Münsterlandes. - Biogeographica, 12.
- HETTICHE, K. (1966): Die Gefahren der Luftverunreinigungen für die Gesundheit. - Med. Welt, 4. 2552-2554.
- HORBERT, M. (1978): Klimatische und lufthygienische Aspekte der Stadt- und Landschaftsplanung. - Natur und Heimat, 38 (1/2). 34-49.
- KAYSER, K., K. JESSEL, A. KÖHLER u. G. RÖNICKE (1974): Die pH-Werte des Niederschlags in der Bundesrepublik Deutschland 1967-1972. - Deutsche Forschungsgemeinschaft, Mitteilungen IX der Kommission zur Erforschung der Luftverunreinigung.
- KELLER, Th. (1974): Verkehrsbedingte Luftverunreinigung und Vegetation. - Garten und Landschaft, 84. 547-551.
- KLOCKOW, D. (1978): Zum Zusammenhang zwischen pH-Wert und Elektrolytzusammensetzung von Niederschlägen. - VDI-Berichte, 314. 21-26.

- KNABE, W. (1970): Kiefernwaldverbreitung und Schwefeldioxid-Immission im Ruhrgebiet. - Staub-Reinh. d. Luft, 30. 32-35
- KUTTLER, W. (1979a): London-Smog und Los Angeles-Smog. - Erdkunde 33: 236-240.
- (1979b): Einflußgrößen gesundheitsgefährdender Wetterlagen und deren bioklimatische Auswirkungen auf potentielle Erholungsgebiete. - Bochumer Geographische Arbeiten, 36. Paderborn. 130 Seiten.
  - (1980): Auswirkungen gasförmiger Luftverunreinigungen auf die Ökophysiologie junger Fichtennadeln. - Verh. d. Ges. f. Ökologie, VIII. Freising-Weißenstephan 1979. 471-480.
  - (1981): Trockene und nasse Schwefeldepositionen im mittleren Ruhrgebiet. - Vortrag auf der 11. Jahrestagung der Gesellschaft für Ökologie in Mainz. (im Druck)
- LIKENS, G. E., R. F. WRIGHT, J. N. GALLOWAY u. T. J. BUTLER (1979): Saurer Regen. - Spektrum der Wissenschaft, 12. 73-78.
- LUCKAT, S. (1976): Die Erhebungen und Untersuchungen der LIB am Kölner Dom und seinen Baumaterialien. - Schriftenreihe der Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 37. 112-122.
- LUCKAT, S. (1978): Wirkungen von sauerstoffhaltigen Schwefelverbindungen auf Werkstein. - VDI-Berichte, 314. 97-99.
- LUFTREINHALTEPLAN RUHRGEBIET MITTE 1980-84 (1980): Herausgegeben vom Ministerium für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen.
- MAYER, R. (1978): Nasse und trockene Deposition von Schwefelverbindungen auf industrieferne Wälder und ihre Wirkung auf den Boden. - VDI-Berichte, 314. 263-265.
- MÖLLER, F. (1973): Einführung in die Meteorologie, Bd. 1. Mannheim 1973
- MÜLLER, P. (1978): Ökologische Informationen für die Raum- und Stadtplanung. - Schriftenreihe Siedlungsverband Ruhrkohlenbezirk, 61. 49-80.
- PERSEKE, C., S. BEILKE u. H. W. GEORGII (1980): Die Gesamtschwefeldeposition in der Bundesrepublik Deutschland auf der Grundlage von Meßdaten des Jahres 1974. - Berichte des Institutes für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt/M., 40.
- RUFFERT, G. (1981): Schadstoffe der Luft zerstören den Beton. - VDI-Nachrichten, 1. 6.
- SCHLIPKÖTER, H. W. (1970): Wirkung von Luftverunreinigungen auf die menschliche Gesundheit. - Bericht über den gegenwärtigen Stand der Forschung. Herausgegeben vom Minister für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen.

SUKOPP, H. (1974): Ökologische Charakteristika von Großstädten, bes. anthropogene Veränderungen von Klima, Boden und Vegetation. - Zeitschr. d. TU Berlin, 4. 469-488.

UMWELTBUNDESAMT (1981): Luftqualität 1980, Meßnetz des Umweltbundesamtes, Pilotstation Schauinsland. Datenband.