

Sonderdruck
aus

Verhandlungen
Gesellschaft für Ökologie
Band X
Mainz 1981

Im Auftrag der Gesellschaft
herausgegeben
von Ragnar Kinzelbach

Göttingen 1983

Trockene und nasse Schwefeldepositionen im Mittleren Ruhrgebiet

Wilhelm Kuttler

Fluxes of wet and dry deposition of the pollutant sulphur, which is usually spread out as SO_2 and sulphate in the 'Central Ruhr District', have been determined. The dry deposition of sulphur was calculated from the mean SO_2 -concentration in the air (0.10 mg/m^3) and a deposition velocity for SO_2 of $V_g = 0.8 \text{ cm/s}$. The wet deposition of sulphur was determined with the help of an analysis of precipitation according to the amount of precipitation. Rainfall was collected in 'bulk-samplers' which were exposed for a week. The results show a mean total deposition of sulphur of $176 \text{ kg/ha} \cdot \text{a}$ in the Central Ruhr District in 1979. The proportionate rates are about 20% for the wet deposition and about 80% for the dry deposition. Referring to the total sulphur production in this area about 9% of the sulphur is deposited in the area itself while about 91% are going in the long-range-transport.

Central Ruhr District, deposition velocity, SO_2 -concentrations in the air, sulphur sources, vertical profile of SO_2 -concentrations, wet and dry deposition.

1. Problemstellung

Im Rahmen eines umfangreichen Forschungsvorhabens über stadtökologische Fragestellungen werden seit Mai 1978 mit Hilfe von Niederschlagswasseranalysen im Rhein-Ruhr-Raum und dessen Umland Bilanzierungen für verschiedene Fremdstoffe vorgenommen. Am Beispiel des nach wie vor weitverbreiteten Schadstoffes Schwefel werden für den gewählten Modellraum 'Mittleres Ruhrgebiet' Schadstoffflüßraten bestimmt. Grundlage der Untersuchungen sind Berechnungen und Messungen der trockenen (dry deposition) und nassen Schadstoffablagerung (wet deposition).

Da die Kenntnis des räumlichen und zeitlichen Verteilungsmusters der Schwefelverbindungen in der Industriegebietsatmosphäre eine notwendige Voraussetzung für diese Untersuchung ist, werden der Ergebnisdarstellung und -diskussion Angaben über das Verhalten des Schadstoffes Schwefel, der überwiegend als Schwefeldioxid auftritt, im Mittleren Ruhrgebiet vorangestellt.

2. Der Schadstoff Schwefel in der Industriegebietsatmosphäre

Im Spektrum der beinahe schon zahllos auftretenden chemischen Verbindungen, die als anthropogene Schadstoffe in den bodennahen Industriegebietsatmosphären enthalten sind (KUTTNER 1979b), stellt das durch den Verbrauch fossiler Brennstoffe in großen Mengen entstehende Schwefeldioxid eines der bekanntesten Leitgase im Verschmutzungsprozeß dar.

Schwefeldioxid gehört zu denjenigen Schadgasen, die auf der Nordhalbkugel hauptsächlich in den Industriegebieten im Nordosten Nordamerikas und in Europa in großen Mengen freigesetzt werden und in unterschiedlichster Weise Mensch (HETTCH 1966; SCHLIPKÜTER 1970; GRANDJEAN 1973), Tier und Pflanze (VAN HAUT 1961, GUDERIAN 1966; WENTZEL 1968; KNABE 1970; BÖRTITZ 1974; KELLER 1974; SUKOPP 1974; HEIDT 1978; MÜLLER P., 1978; KUTTNER 1980) sowie Bauwerke (LUCKAT 1976, 1978) schädigen.

Einem Schwefeldioxid-Emissionskataster für Europa (Abb. 1) kann entnommen werden, daß die stärksten 'Schwefelquellen' in Mittelengland, London, den Niederlanden und Belgien sowie im Rhein-Ruhr-Raum, in der DDR und in Polen (Industriegebiet bei Kattowitz) liegen und daß in diesen Gebieten jährlich zwischen $5 \cdot 10^5$ und $2 \cdot 10^6 \text{ t}$ Schwefeldioxid produziert und an die Außenluft abgegeben werden.

Nach neueren Abschätzungen (BMI 1981) ergibt sich für die Staaten West- und Mitteleuropas eine Schwefelemission von rund $9 \cdot 10^6$ t Schwefel, von denen allenfalls 3% natürlichen Ursprungs (Vulkanexhalationen) sind, der überwiegende Rest auf menschliches Wirtschaften zurückgeführt werden kann. Von diesen $9 \cdot 10^6$ t werden auf den industriellen Flächen der Bundesrepublik Deutschland etwa $1,8 \cdot 10^6$ t emittiert. Etwa ein Drittel der für die Bundesrepublik Deutschland berechneten bzw. abgeschätzten Schwefelemissionen entstammen dem flächenmäßig größten Ballungsraum, dem Rheinisch-Westfälischen Industriegebiet. Zum Überwiegenden Teil gelangen die abgegebenen Schwefelmengen als Schwefeldioxid (90%) in die untere Atmosphäre, während die Schadstoffe SO_4^{2-} , SO_3 bzw. H_2S den restlichen Teil der Schwefelemissionen bestreiten.

Nach Untersuchungen von BALTRUSCH (1979) und GEORGII (1981) läßt sich über Westdeutschland eine mit der Höhe relativ rasch erfolgende Konzentrationsabnahme,

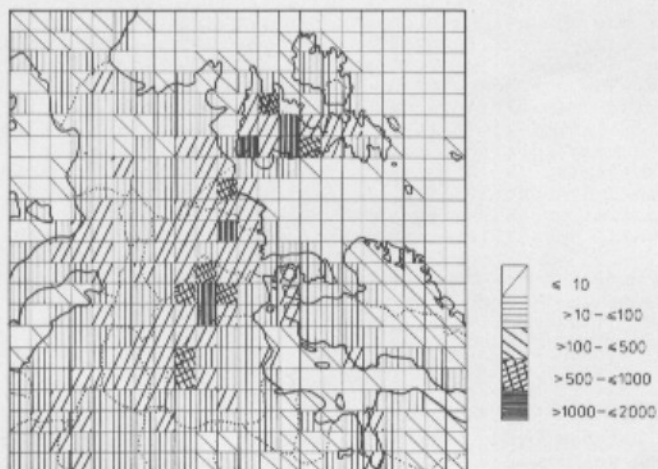


Abb. 1: SO_2 -Emissionskataster für Europa.
(Nach BINGEMER 1977, verändert; Angaben in 1000 t/a).

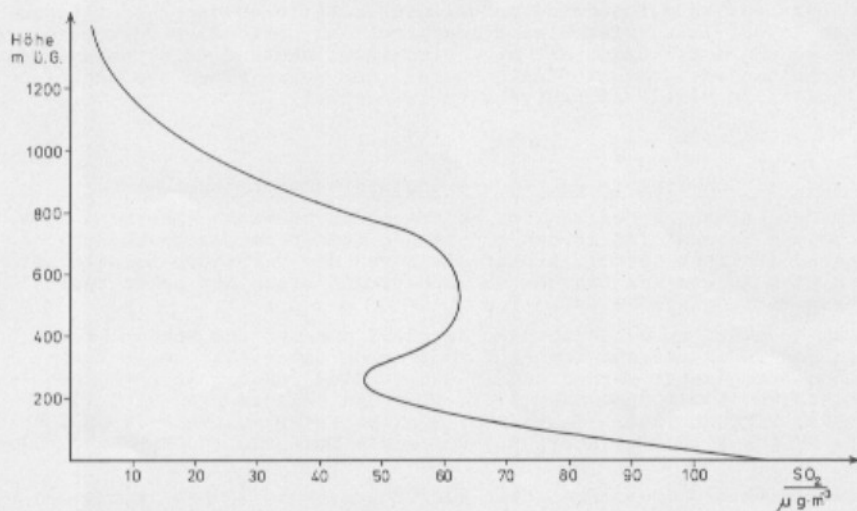


Abb. 2: Vertikalprofil der Schwefeldioxidkonzentrationen der Luft über dem nördlichen Ruhrgebiet.
(nach Werten von BALTRUSCH 1979; schematisiert und verändert).

Über dem Ruhrgebiet eine deutliche Differenzierung im Bereich über den Quell-niveaus der Schornsteine nachweisen, wie in Abb. 2 schematisch dargestellt.

Die sich nach diesen Angaben bis zu einer Höhe von rund 1000 m über dem Erdboden verteilenden Schwefeldioxid-Immissionen zeigen neben dem differenzierten räumlichen Konzentrationsverlauf in der Vertikalen und einer typischen horizontalen Verteilung im Rhein-Ruhr-Raum auch in zeitlicher Hinsicht deutliche Unterschiede in ihrem mengenmäßigen Auftreten. Wie Abb. 3 zeigt, unterliegen die Schwefeldioxid-Immissionskonzentrationen einem ausgeprägten winterbetonten Jahresgang. Den unter $0.10 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ liegenden Schadstoffkonzentrationen in den Sommermonaten steht eine Verdoppelung der Werte in den Wintermonaten gegenüber.

Als Ursache des winterlichen Schadstoffanstiegs können erstens die in den Wintermonaten verstärkt auftretenden austauscharmen Inversionswetterlagen genannt werden, die zu einer Akkumulation der Schadstoffe in der Peplosphäre führen können (KUTTLER 1979a, b); zweitens kann an einer Gegenüberstellung der langjährigen Lufttemperatur- und Schwefeldioxidwerte verdeutlicht werden, daß der autotemperaturabhängige Hausbrand als Flächenquelle in größtem Maße die bodennahe Ökosphäre verschmutzt (Abb. 4).

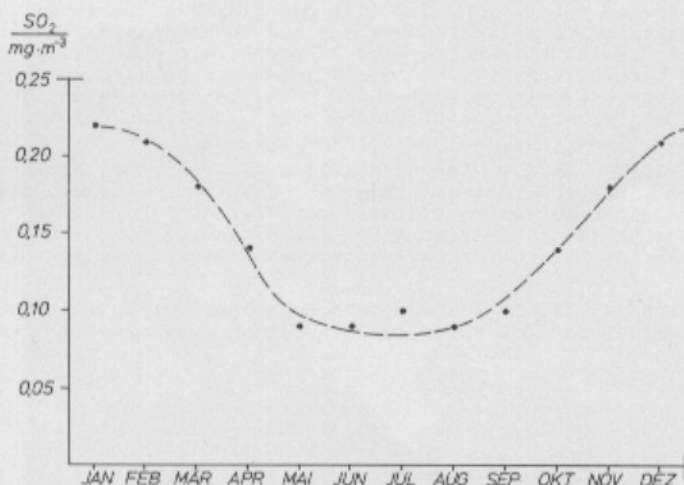


Abb. 3: Jahresgang der SO₂-Immissionskonzentrationen. (langjährige Monatsmittel der Station Bochum 1964-74 [nach LIS 1980]).

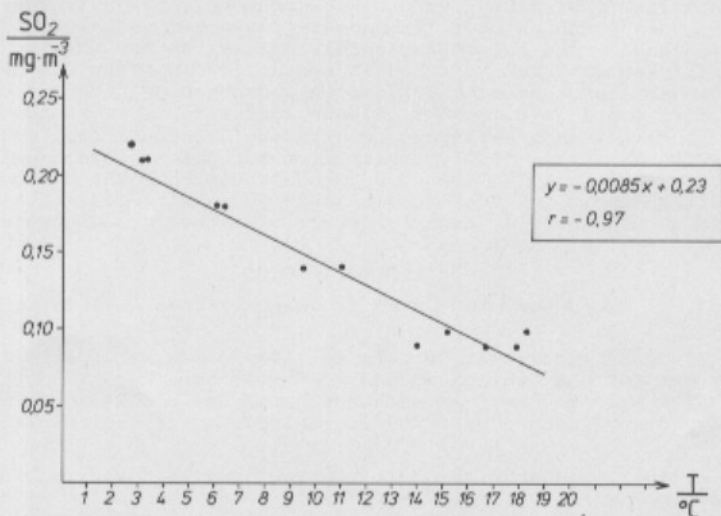


Abb. 4: Korrelation zwischen langjährigen Monatsmitteln der SO₂-Konzentrationen und langjährigen Monatsmitteln der Lufttemperaturen in Bochum (1964-1974).

3. Möglichkeiten der Schadstoffeliminierung aus der Atmosphäre

Die in die untere Troposphäre eingeleiteten Schadstoffe werden durch das Zusammenwirken der meteorologischen Elemente und Faktoren sowie die Orographie in ihrem Chemismus verändert und zeitlich und räumlich in dem zur Verfügung stehenden Luftvolumen verteilt. Während ein Teil der Schadstoffe aus den industriellen Ballungsräumen abtransportiert wird und in entfernten Gebieten zur Ablagerung kommt (long-range-transport), entledigt sich die Atmosphäre des anderen Teils durch Ablagerung auf den verschiedenen Oberflächen in den Industriegebieten. Den gesamten Ablagerungsprozeß unterteilt man in zwei Vorgänge, und zwar erstens in die trockene Ablagerung (dry deposition) der Schadstoffe und zweitens in die nasse Ablagerung (wet deposition), die durch die verschiedenen Formen des Niederschlags erfolgt und von dessen Umfang abhängig ist.

3.1 Trockene Ablagerung (dry deposition)

Unter der trockenen Ablagerung von Schadstoffen versteht man die Deposition auf den verschiedenen der Atmosphäre ausgesetzten Oberflächen, wie z.B. Erdboden, Wasser, Bauwerken und Vegetation. Die Höhe der Sedimentationsmenge von Schadstoffen auf den entsprechenden Oberflächen wird durch verschiedene Parameter bestimmt. Hierzu zählen einerseits klimatologische Faktoren, wie z.B. Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und die Schichtungsverhältnisse der bodennahen Atmosphäre, andererseits die verschiedenen Rauigkeitsparameter der Oberflächen und der Zustand der Vegetation (Art, Jahreszeit) sowie der Zustand der Fremdstoffe (gasförmig, fest).

Nach HORBERT (1978, S. 46/47) wird "die Ablagerung von atmosphärischen Gasen und Teilchen 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 in der Literatur verwendet."

Nach der bei GIEBEL (1977, S. 14) angegebenen Formel setzt sich die Ablagerungsgeschwindigkeit eines Stoffes aus folgenden Termen zusammen:

$$Vg(z) = F : c(z)$$

$Vg(z)$ = Ablagerungsgeschwindigkeit in m/s für die Höhe (z)
 F = Fluß eines Schadstoffes zur Erdoberfläche ($mg/m^2 \cdot s$)
 $c(z)$ = Konzentration eines Stoffes in der Höhe (z) über der Erdoberfläche (mg/m^3)

Wie der Formel zu entnehmen ist, bedeutet ein hoher Wert der Ablagerungsgeschwindigkeit, daß viel des in der Luft enthaltenen Schadstoffes auf den entsprechenden Oberflächen abgelagert wird bzw. wurde. Die Größe der Ablagerungsgeschwindigkeit (Vg) ist unter verschiedenen Oberflächenbedingungen gemessen worden. Eine Zusammenstellung der verschiedenen Ablagerungsgeschwindigkeiten für unterschiedlich strukturierte Oberflächen gibt Tab. 1 (PERSEKE et al. 1980). Diese für den Schadstoff SO_2 berechneten Ablagerungsgeschwindigkeiten schwanken je nach Art der Oberfläche zwischen 0.1 cm/s und 2 cm/s. Als Mittelwert, der zur Durchführung von Vergleichsberechnungen im allgemeinen herangezogen wird (vgl. OECD-Bericht 1974, zit.n. GIEBEL 1977; PERSEKE et al. 1980), ergibt sich für das Schwefeldioxid eine Ablagerungsgeschwindigkeit (Vg) von 0.8 cm/s. Da die Höhe der Ablagerungsgeschwindigkeit abhängig ist von der Windgeschwindigkeit, läßt sich nach STRATMANN (zit.n. GIEBEL 1977) auch folgender einfacher Zusammenhang herstellen:

$$Vg = 0.002 + 0.002 \cdot u$$

u = Windgeschwindigkeit in Anemometerniveau (m/s)

Wird für die Windgeschwindigkeit (u) ein Wert von 3 m/s verwendet (langjähriger Durchschnittswert für die Station Bochum: 3.6 m/s; nach Angaben der Westfälischen Berggewerkschaftskasse Bochum), so errechnet sich der bereits oben angegebene, allgemein Verwendung findende Wert für die Ablagerungsgeschwindigkeit (Vg) von 0.8 cm/s.

Obwohl diese Ablagerungsgeschwindigkeit von den jeweils vorherrschenden lokalen Parametern bestimmt wird (vgl. BINGEMER 1977), wurde zum Zwecke einer besseren Vergleichbarkeit dieser Unsicherheitsfaktor bewußt in Kauf genommen. An Hand des festgelegten Wertes der Ablagerungsgeschwindigkeit (Vg) = 0.8 cm/s für Schwefeldioxid und der gemessenen Schadstoffkonzentration in der Luft läßt sich

nach CHAMBERLAIN (1973, zit. in PERSEKE et al. 1980) somit die Schadstoffdeposition (D) berechnen:

$$D = V_g \cdot C$$

D = Schadstoffdeposition [$\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]
 V_g = Ablagerungsgeschwindigkeit [m/s]
 C = Schadstoffkonzentration [mg/m^3]

Mit Hilfe dieser letztgenannten Formel wurden die in den folgenden Kapiteln erwähnten Berechnungen zur trockenen Schwefeldeposition im mittleren Ruhrgebiet durchgeführt.

3.2 Nasse Ablagerung (wet deposition)

Wesentlich einfacher als die trockene Deposition ist die auf nassem Wege erfolgende Schadstoffablagerung mit Hilfe von Niederschlagswasseranalysen zu bestimmen. An Hand des analysierten Niederschlages wird der zu untersuchende Schadstoff in seinen Konzentrationen bestimmt und mit Hilfe der festgestellten Niederschlagsmenge wird die jeweilige Schadstoffmenge nach folgender Formel berechnet:

$$S = C \cdot N$$

S = Schadstoffmenge pro Fläche [mg/m^2]
 C = Schadstoffkonzentration [mg/l]
 N = Niederschlagsmenge [l/m^2]

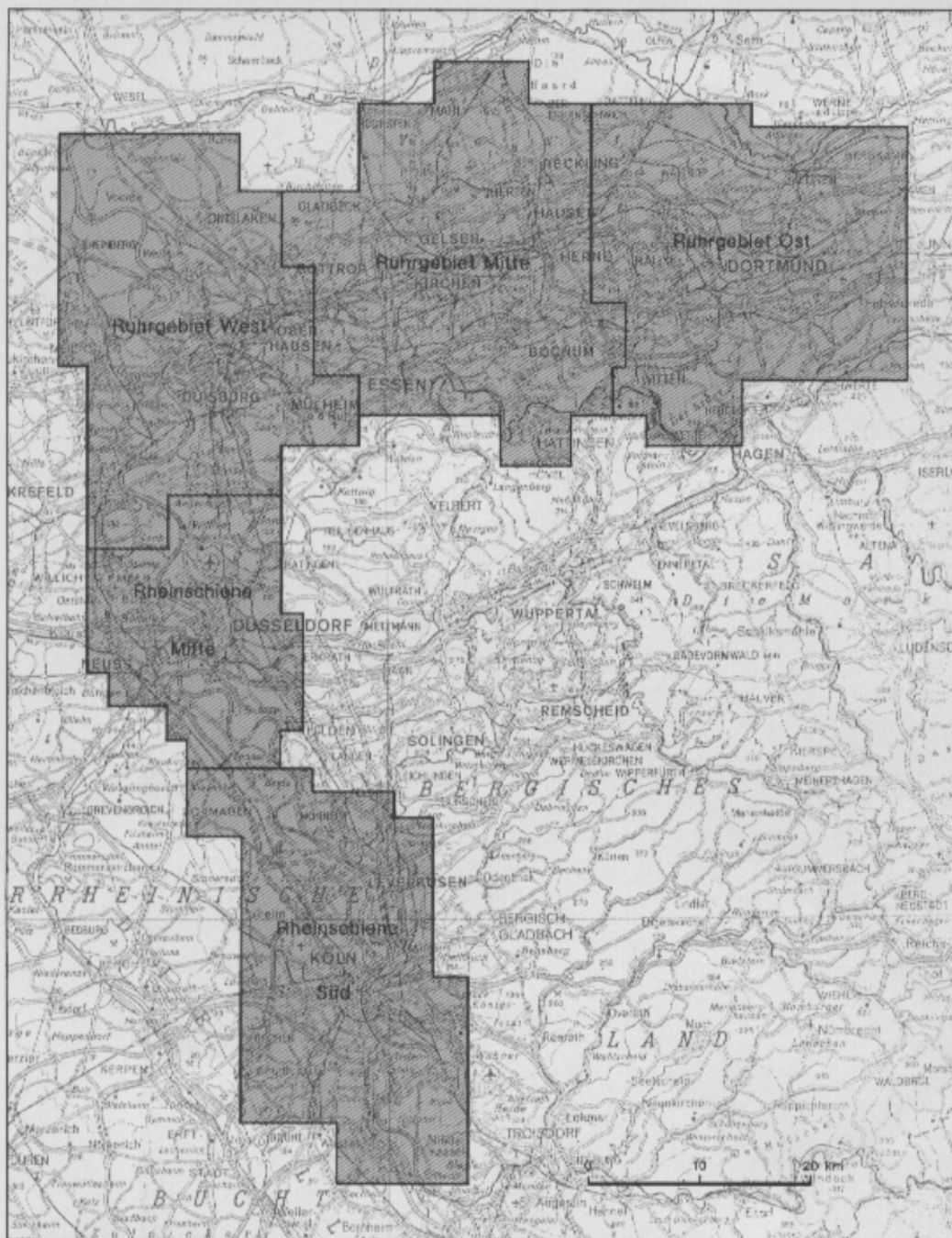
Bei der Aufnahme der Schadstoffe in den Regentropfen unterscheidet man im allgemeinen zwischen dem sogenannten "rain out", worunter man die Aufnahme von Schadstoffen in den Tropfen innerhalb der Wolke versteht, und dem sogenannten "wash out", bei dem es sich um einen Auswaschprozeß von Fremdstoffen unterhalb der Wolkenbasis handelt.

Nach den Angaben bei PERSEKE et al. (1980, S. 8) ist die Effektivität der Auswaschprozesse von der Niederschlagsintensität, der Tropfengrößenverteilung, dem pH-Wert und der Temperatur des Tropfens sowie der vertikalen Konzentrationsverteilung des Spurenstoffes abhängig.

Zur Bestimmung der nassen Ablagerung im Untersuchungsgebiet wird die im Regenwasser gemessene Sulfatkonzentration zugrunde gelegt. Eine Unterscheidung von auf nassem Wege abgelagertem Schwefeldioxid bzw. Sulfat kann aus verschiedenen Gründen nicht erfolgen (vgl. BEILKE 1970; BETZ 1976; BEILKE et al. 1977, zit. bei PERSEKE et al. 1980).

Tab. 1: Ablagerungsgeschwindigkeiten von Schwefeldioxid über verschiedenen Oberflächen
 (nach PERSEKE et al. 1980).

Oberfläche	Ablagerungsgeschwindigkeit	
	Bereich	mittlerer Wert
kurzes Gras (0.1 m Höhe)	0.1 - 0.8 cm/s	0.5 cm/s
Getreide (1.0 m Höhe)	0.2 - 1.5 "	0.7 "
Wald (10 m Höhe)	0.2 - 2.0 "	unsicher
Kalkboden pH 7. trocken	0.3 - 1.0 "	0.8 cm/s
Kalkboden pH 7. feucht	0.3 - 1.0 "	0.8 "
Saure Böden pH 4. trocken	0.1 - 0.5 "	0.4 "
Saure Böden pH 4. feucht	0.1 - 0.8 "	0.6 "
Schnee trocken	-	0.1 "
Wasser	0.2 - 1.5 "	1.0 "
Land	0.2 - 2.0 "	0.8 "
Stadt (London)	-	0.7 "



Quelle: Luftreinhalteplan Rheinschiele Süd (Köln) 1977 - 1981.
 Ministerium für Arbeit, Gesundheit und Soziales
 des Landes NRW (Hrsg.) 1976

Grundlage: Ausschnitt aus SK 600 Ü - N -
 Mit Genehmigung des Landesvermessungsamtes NRW
 vom 12. 10. 1979, Kontrollnummer D 6351
 vervielfältigt durch die Ruhr - Universität Bochum.

Abb. 5: Belastungsgebiete in Nordrhein-Westfalen.
 (nach KUTTLER 1979b).

4. Das Untersuchungsgebiet Ruhrgebiet-Mitte

Als Teil des Rheinisch-Westfälischen Industriegebietes erstreckt sich das mittlere Ruhrgebiet auf der Fläche zwischen Ruhr und Lippe sowie zwischen den Städten Hamm und Moers. Die Fläche des 761 km² großen Belastungsraumes wird durch die im Luftreinhalteplan Ruhrgebiet-Mitte 1980 bis 1984 festgesetzten Grenzen bestimmt. Bei einer durchschnittlichen Bevölkerungsdichte von ca. 2600 Einwohnern pro km² leben in diesem Raum etwa 2 Mio. Menschen. Abb. 5 zeigt den Belastungsraum Ruhrgebiet-Mitte als Teil der in den Luftreinhalteplänen festgesetzten Belastungsgebiete in Nordrhein-Westfalen. Nach Angaben des Luftreinhalteplans Ruhrgebiet-Mitte 1980-1984 beläuft sich die Gesamtsumme der SO₂-Emissionen im Untersuchungsgebiet auf etwa 312 000 t pro Jahr. Die Industrie ist an der Gesamtemission zu 94% beteiligt, der Hausbrand bzw. das Kleingewerbe zu etwa 5,6%, und der Anteil des Kraftfahrzeugverkehrs beläuft sich auf etwa 0,4% an der Gesamtsumme der SO₂-Emissionen.

Die relativ geringe Beteiligung des Hausbrandes an der SO₂-Emission mit rund 5,6% tritt jedoch im Lebensraum des Menschen als Immissionsbelastung stärker in Erscheinung. Auf Grund des Flächenquellencharakters und der niedrigen effektiven Quellhöhen erreicht die Gruppe Hausbrand und Kleingewerbe 23% an der Immissionsbelastung, die Industrie 75% und der Kraftfahrzeugverkehr 2%. Auf die deutliche heizungsabhängige und damit lufttemperaturabhängige Steuerung des SO₂-Gehaltes an der Station Bochum wurde bereits in Kapitel 2 hingewiesen.

Aus den zum Teil abgeschätzten Emissionskonzentrationen ergeben sich folgende Immissionskonzentrationen im Untersuchungsraum:

Von den 761 Einheitsflächen (km²) wurden auf 5 Flächen Immissionskonzentrationen zwischen 0,15 - 0,16 mg SO₂/m³, auf 512 Flächen 0,07 - 0,14 mg SO₂/m³ und auf 237 Flächen < 0,07 mg SO₂/m³ gemessen. Für 7 Flächen liegen keine Angaben vor. Aus diesen Angaben läßt sich eine über alle Flächen gemittelte durchschnittliche Belastung der SO₂-Immissionskonzentrationen von rund 0,10 mg SO₂/m³ Luft im Untersuchungsgebiet für das Jahr 1979 berechnen.

5. Meßergebnisse

5.1 Zur Höhe der trockenen Schwefelablagerung im Untersuchungsgebiet

Für den Untersuchungszeitraum vom 1.1.1979 bis 31.12.1979 wurde die trockene Schwefelablagerung für den Modellraum 'mittleres Ruhrgebiet' berechnet. Grundlage dieser Berechnungen bildet die für Schwefeldioxid bestimmte Ablagerungsgeschwindigkeit von 0,8 cm/s. Da die für das Jahr 1979 aus den Monatsmittelwerten berechneten Jahresmittelwerte der Schwefeldioxidkonzentration für die Station Bochum 0,11 mg SO₂/m³ beträgt und damit recht gut vergleichbar ist mit der Flächenbelastung im mittleren Ruhrgebiet von 0,10 mg SO₂/m³, werden für die monatlich erfolgenden Depositionsberechnungen für das Jahr 1979 die an der Station Bochum gemessenen Schwefeldioxidkonzentrationen zugrunde gelegt.

Das Ergebnis dieser Berechnungen zeigt Tab. 2. Da die SO₂-S-Deposition von der SO₂-Immissionskonzentration abhängt und letztere einen deutlichen winterbetonten Jahresgang aufweist, läßt sich bei der Schwefeldeposition ein relativ großer Unterschied zwischen den Schadstoffmengen, die im Sommer- und Winterhalbjahr abgelagert werden, erkennen. Nach diesen Berechnungen werden im mittleren Ruhrgebiet pro Jahr und Quadratmeter 14,2 g Schwefel auf trockenem Wege abgelagert.

5.2 Zur Höhe der nassen Schwefelablagerung im Untersuchungsgebiet

Im Gegensatz zur Erfassung der trockenen Schwefeldeposition im Untersuchungsgebiet lassen sich die mit dem Niederschlag zum Boden geführten Schwefelablagerungen genauer erfassen. Zur Bestimmung der nassen Schwefelablagerung im mittleren Ruhrgebiet werden seit Mai 1978 an der Station Bochum Niederschlagswasseranalysen auch für Schwefel durchgeführt. Das Niederschlagswasser wird

Tab. 2: Monatsmittelwerte der SO₂-Immissionskonzentrationen und trockene SO₂-S-Deposition an der Station Bochum (1979).

	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
SO ₂ [mg/m ³]	0,26	0,27	0,08	0,07	0,07	0,08	0,06	0,08	0,11	0,11	0,11	0,10	0,11 (Mittel)
SO ₂ -S [mg/m ²]	2785	2612	856	726	750	726	856	642	829	1178	1140	1071	14 171 (Summe)

in wöchentlichen Abständen gesammelt und im Labor des Geographischen Institutes der Ruhr-Universität Bochum auf die verschiedenen Schadstoffe hin untersucht. Aus den wöchentlich bestimmten Sulfatkonzentrationen [mg/l] im Niederschlagswasser werden Monatsmittel- und Jahresdurchschnittswerte berechnet. Es handelt sich bei dem Probengut um sogenannte "bulk-samples", die auf Grund der Bauart des offenen Sammelgefäßes nicht in einen naß abgelagerten und trocken abgelagerten Sulfatanteil unterschieden werden können; dies ist für die hier zugrundeliegende Fragestellung auch nicht notwendig.

Schwankungen der Sulfatkonzentrationen werden verursacht durch die Menge und die Art des gefallenen Niederschlags. Den Zusammenhang zwischen den mittleren monatlichen Sulfatkonzentrationen und den mittleren monatlichen Niederschlagshöhen zeigt Abb. 6. Es wird deutlich, daß bei relativ hohen Niederschlägen die Sulfatkonzentrationen niedrigere Werte annehmen als bei geringeren Niederschlagshöhen. Abb. 7 läßt darüber hinaus erkennen, daß in den Wintermonaten die Sulfatkonzentrationen höher sind als in den Sommermonaten.

Für die Jahresmittelwerte liegt der Medianwert bei 15 mg Sulfat/l, der 10%-Wert bei 9 mg/l und der 90%-Wert bei 31 mg Sulfat/l. Im Sommerhalbjahr liegt der Medianwert bei 12 mg Sulfat/l, der 10%-Wert bei 8 mg/l und der 90%-Wert bei 26 mg/l. Zur heizungsintensiven Zeit in der Wintermonaten erreicht der Medianwert 17 mg Sulfat/l, der 10%-Wert 9 mg/l und der 90%-Wert 36 mg/l. Das bedeutet, daß sich im Vergleich zum Sommerhalbjahr der 90%-Wert im Winterhalbjahr um 10 mg Sulfat/l bzw. - bezogen auf den Sommerwert - um 38% erhöht, während der Medianwert um 42% und der 10%-Wert um 13% gegenüber den Sommermonaten ansteigt.

Die Menge des zur Ablagerung kommenden Schadstoffes wird in entschiedenem Maße durch die anfallende Niederschlagshöhe bestimmt, wobei die räumliche und zeitliche Variabilität der Niederschlagsereignisse zu wesentlichen Unterschieden in der abgelagerten Schadstoffmenge führen können. Aus den jeweils bestimmten Sulfatkonzentrationen im Niederschlagswasser und der jeweils gemessenen Niederschlagshöhe wurden die entsprechenden Sulfatdepositionen für verschiedene Zeiträume berechnet.

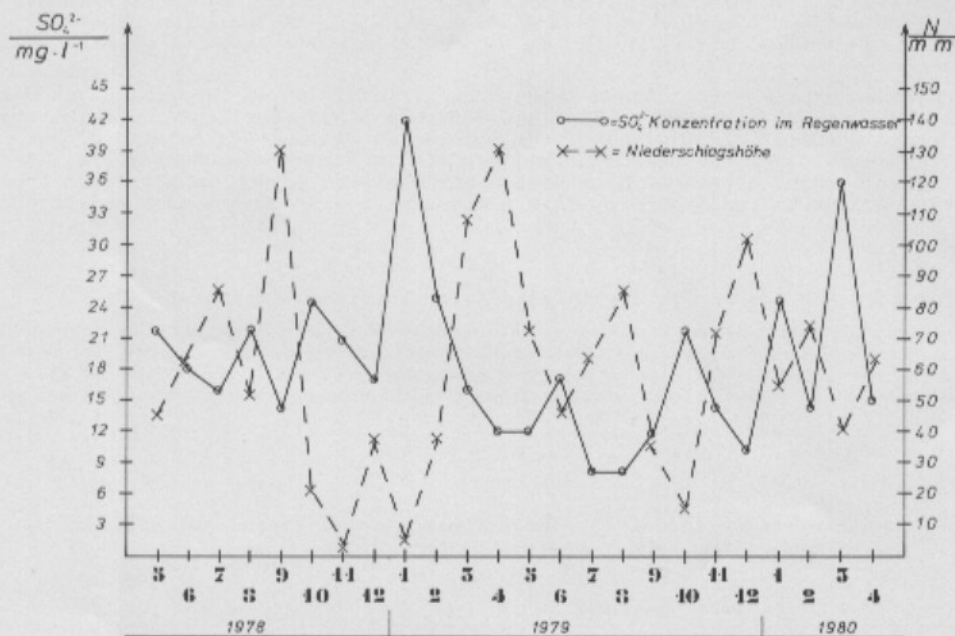


Abb. 6: Mittlere monatliche Sulfatkonzentrationen und monatliche Niederschlagshöhen an der Station Bochum (Mai 1978 - April 1980).

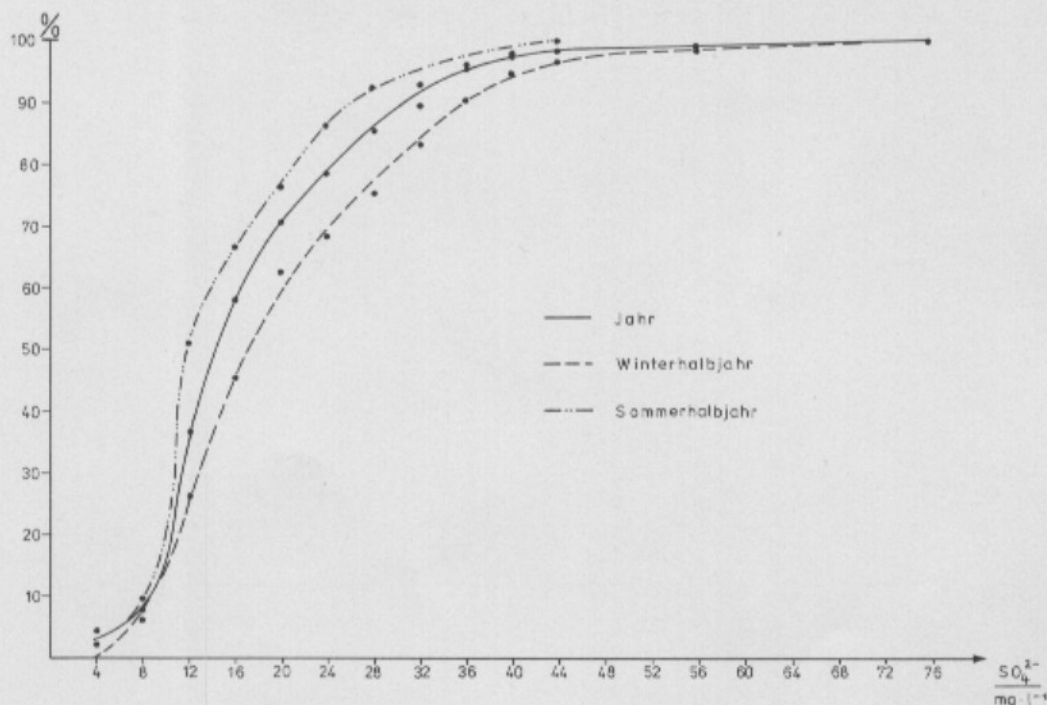


Abb. 7: Summenhäufigkeitsverteilung der Sulfatkonzentrationen im Niederschlagswasser (Mai 1978 - April 1980).

Um festzustellen, wie stark die Menge der Sulfatdepositionen von der jeweiligen Niederschlagshöhe abhängt, wurde eine Korrelationsrechnung mit den Monatsmittelwerten der Sulfatdepositionen und den mittleren monatlichen Niederschlägen durchgeführt (Abb. 8). Die trendmäßige Abhängigkeit der Sulfatablagerungen von der Niederschlagsmenge weist einen Korrelationskoeffizienten von $r = 0.67$ auf. Für das Jahr 1979 wurde an der Station Bochum eine mittlere nasse Schwefeldeposition von $\bar{X} = 0.29 \text{ g S/m}^2 \cdot \text{Monat}$ bestimmt. Nach den für das Jahr 1974 durchgeführten Abschätzungen von PERSEKE et al. (1980) beliefen sich die "maximalen feuchten Depositionen" im Ruhrgebiet auf $4 \text{ g S/m}^2 \cdot \text{Jahr}$. Die Jahressumme der nassen Schwefeldeposition (1979 nach unseren Messungen) erreichte in Bochum 3.4 g S/m^2 . Die Unterschiedlichkeit der Werte dürfte mit der unterschiedlich hohen Niederschlagsmenge der beiden Vergleichsjahre und den verschiedenen Standorten im Ruhrgebiet zusammenhängen. Eine Zusammenfassung der für 1979 berechneten Werte findet sich in Tab. 3.

Tab. 3: SO_4^{2-} -S-Konzentrationen im Niederschlagswasser, monatliche Niederschlagshöhen (N) und monatliche nasse Schwefeldepositionen (S_{nass}) an der Station Bochum (1979).

	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
SO_4^{2-} -S [mg/l]	14.0	8.3	5.3	4.0	4.0	5.7	2.7	2.7	4.0	7.3	4.7	3.3	5.5 (Mittel)
N [mm]	26	37	131	47	72	47	63	85	34	16	72	102	732 (Summe)
S_{nass} [mg/m ²]	364	307	694	188	288	268	170	229	136	117	338	337	3436 (Summe)

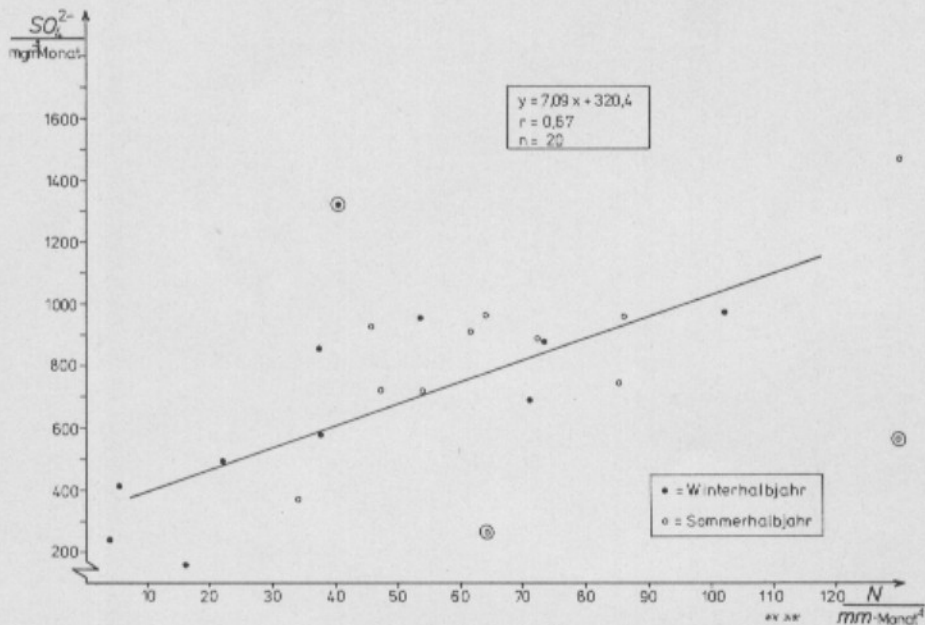


Abb. 8: Sulfatdepositionen in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe (Mai 1978 - April 1980).

Um eine flächenmäßige Aussage über die Schadstoffbelastung im Untersuchungsgebiet 'mittleres Ruhrgebiet' machen zu können, war es notwendig, Angaben über die Niederschlagsstruktur zu kennen. Hierzu wurden in dem 761 km² großen Untersuchungsraum die Werte von 19 Niederschlagsmeßstationen für das Jahr 1979 ausgewertet. Die räumliche Verteilung des Niederschlags im Jahre 1979 im Untersuchungsgebiet zeigt Abb. 9. Aus den berechneten Jahressummen des Niederschlags für die verschiedenen Stationen und der Kenntnis der Sulfatkonzentrationen im Niederschlagswasser wurden die Abbildungen 10, 11 und 12 angefertigt. Abb. 10 verdeutlicht, daß im Südwesten des Untersuchungsgebietes mit 5.5 g S/m² · Jahr die höchsten Schadstoffmengen im Jahre 1979 abgelagert wurden, während die niedrigsten Schwefeldepositionen im Nordwesten, Süden und Südosten erfolgten. In Abb. 11 sind die maximalen monatlichen nassen Schwefeldepositionen im Untersuchungsgebiet eingetragen. Die Karte zeigt, daß im südlichen Bereich mit rund 700 mg/m² · Monat beinahe doppelt so viel Schwefel auf nassem Wege abgelagert wird wie in den nördlichen Bereichen um die Stadt Marl. Abb. 12 läßt erkennen, daß auch bei der minimalen monatlichen nassen Schwefeldeposition im südlichen Bereich des Untersuchungsgebietes, im Raum Essen, Hattingen und Bochum, mehr Schwefel auf feuchtem Wege zum Boden gelangt als in anderen Bereichen des Untersuchungsraumes.

Tab. 4: Trockene, nasse und Gesamtschwefeldeposition im Jahre 1979 an der Station Bochum

	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahres- summe
SO ₂ -S _{trocken} [mg/m ²]	2785	2612	856	726	750	726	856	642	829	1178	1140	1071	14171
SO ₂ ²⁻ -S _{naß} [mg/m ²]	364	307	694	188	288	268	170	229	136	117	338	337	3436
Σ _{naß, trocken} [mg/m ²]	3149	2919	1550	914	1038	994	1026	871	965	1295	1478	1408	17607
prozen- tualer Anteil													
trocken	88	89	55	79	72	73	83	74	86	91	77	76	80
naß	12	11	45	21	28	27	17	26	14	9	23	24	20

6. Die Gesamtsumme der Schwefeldeposition im mittleren Ruhrgebiet

Aus den in vorangegangenen Kapiteln erfolgten Berechnungen zur trockenen und nassen Schwefeldeposition für den Untersuchungsraum mittleres Ruhrgebiet kann nunmehr die Gesamtschwefeldeposition berechnet werden. Tab. 4 gibt einen zusammenfassenden Überblick über trockene, nasse und Gesamtschwefeldeposition sowie die prozentualen Anteile der trocken und naß erfolgenden Schwefelablagerungen im Untersuchungsraum. Nach den Berechnungen beläuft sich die Gesamtmenge der jährlichen Schwefeldeposition auf 17.6 g S/m^2 . Im Jahresverlauf 1979 schwanken die einzelnen Monatsbeträge zwischen 871 und 3149 mg S/m^2 .

Um die Effektivität der beiden Depositionsvorgänge abschätzen zu können, wurden die prozentualen Anteile der nassen und der trockenen Schwefelablagerungen an der Gesamtablagerungssumme berechnet. Es zeigte sich, daß im Mittel etwa 80% des Schwefels auf trockenem Wege abgelagert werden, bei einer monatlichen Variabilität zwischen 55 % und 91%. Mit der nassen Ablagerung gelangen etwa 20% des Schwefels auf den Boden, bei einer monatlichen Variabilität zwischen 9% und 45%.

Legt man für eine Berechnung der Gesamtmenge der jährlichen Schwefeldepositionen auf die Fläche des Untersuchungsgebietes 'mittleres Ruhrgebiet' eine Fläche von 761 km^2 und einen Wert von $17.6 \text{ g Schwefel/m}^2$ zugrunde, so wurden nach unseren Untersuchungen im Jahre 1979 insgesamt $13\,394 \text{ t}$ Schwefel auf den Oberflächen des Untersuchungsgebietes sedimentiert. Nach Angaben des Luftreinhalteplanes Ruhrgebiet-Mitte werden etwa $312\,000 \text{ t}$ Schwefeldioxid bzw. rund $156\,000 \text{ t}$ Schwefel pro Jahr emittiert. Ginge man davon aus, daß es sich bei dem Untersuchungsgebiet um einen abgeschlossenen Raum handelte, der keinerlei Schadstoffe von seinen Nachbarräumen empfangt, so würden von den $156\,000 \text{ t}$ Schwefel, die pro Jahr in diesem Bereich emittiert werden, rund 9% hier abgelagert. Rund 91% des Schwefels würden nach diesen Berechnungen aus dem Untersuchungsgebiet hinaus transportiert.

Die für den Schadstoff Schwefel hier dargelegten Ergebnisse sollen im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens auch für die anderen Schadstoffe, die im Niederschlagswasser bestimmt werden, berechnet werden.

Die Analysen wurden im Labor des Geographischen Instituts der Ruhr-Universität Bochum von den Chemielaboranten Frau G. Stein und Herrn W. Gosda durchgeführt. Beiden sei, ebenso wie Herrn A. Pohle, der die Geräte betreute, herzlichst gedankt.

Literatur

- BALTRUSCH M., 1979: Flugzeugmessungen von Schwefeldioxid und Sulfat in der Abgasfahne des Ruhrgebietes. Staub-Reinhalt. Luft 39/7: 252-256.
- BELKE S., 1970: Untersuchungen über das Auswaschen atmosphärischer Spurenstoffe durch Niederschläge. Ber. Inst. Meteorologie, Geophysik Univ. Frankfurt 19.
- BETZ M., 1976: Untersuchungen über die Absorption und die Oxidation von Schwefeldioxid in natürlichem Regenwasser. Diplomarbeit Univ. Frankfurt.
- BINGEMER H., 1977: Transport und Abbau schwefelhaltiger Luftverunreinigungen im Lee großer Flächenquellen. Diplomarbeit Univ. Frankfurt.
- BÖRITZ S., 1974: Bedeutung "unsichtbarer" Einflüsse industrieller Immissionen auf die Vegetation. Biol. Zbl. 93/3: 341-349.
- BMI (Bundesministerium des Innern), 1981: Umwelt 1981. Inf. BMI 80: 21.
- CHAMBERLAIN A.C., 1973: Deposition of SO_2 by gaseous diffusion. Paper presented at Symposium on turbulent diffusion, Charlottesville, N.C.
- GEORGI H.W., 1981: Luftchemische Umsetzungen und Verweildauer von Luftverunreinigungen beim regionalen und globalen Transport. In: (Ed. Ministerium für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen) Hohe Schornsteine als Element der Luftreinhaltepolitik in Nordrhein-Westfalen: 39-53.
- GIEBEL J., 1977: Untersuchungen zur Abbaurate von Schwefeldioxid in der Atmosphäre. Schriftenr. Landesanst. Immissionsschutz Essen 40: 13-22.
- GRANDJEAN E., 1973: Epidemiologie der Luftverunreinigungen. Naturw. Rundsch. 26/8: 323-329.
- GUDERIAN R., 1966: Luftverunreinigungen und Pflanzenschutz. Z. Pflanzenkrankheiten, Pflanzenpath. Pflanzenschutz 73: 241-265.
- HAUT H. van, 1961: Die Analyse von SO_2 -Wirkungen auf Pflanzen im Laborversuch. Staub-Reinh. Luft. 21: 52-56.

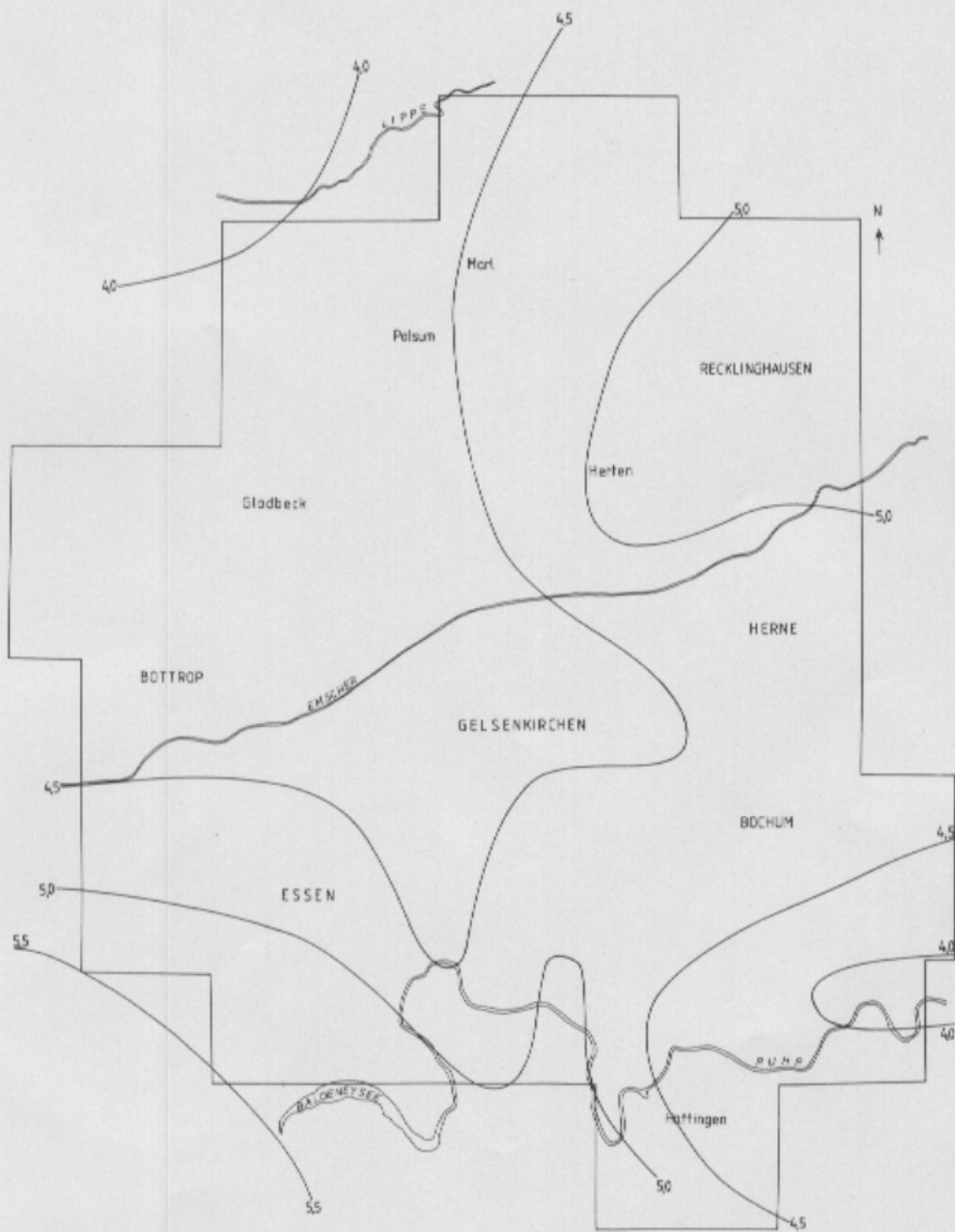


Abb. 10: Jahressumme der nassen Schwefeldeposition (g S/m^2) im Jahre 1979.

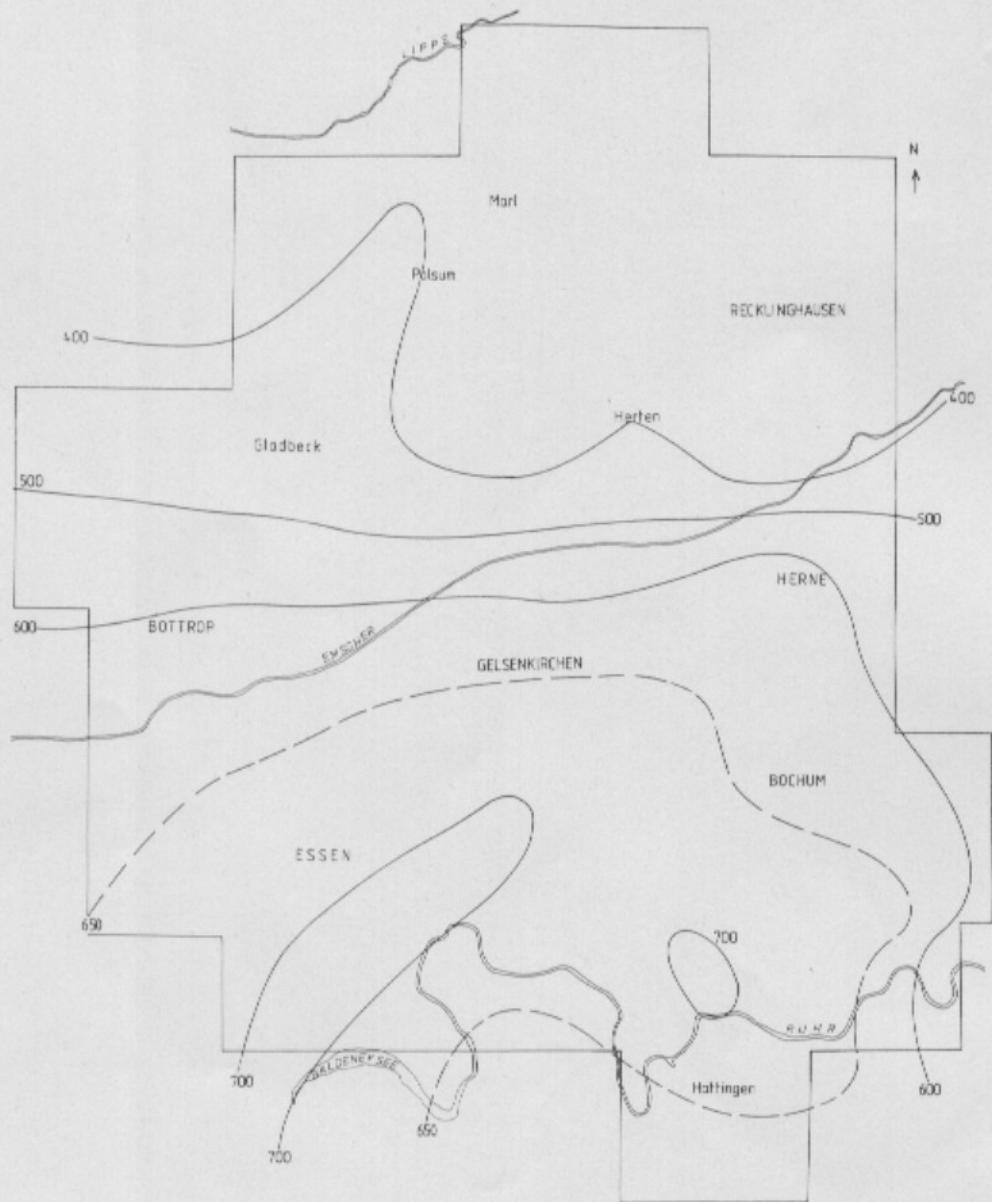


Abb. 12: Minimale monatliche nasse Schwefeldeposition (mg S/m^2) im Jahre 1979.

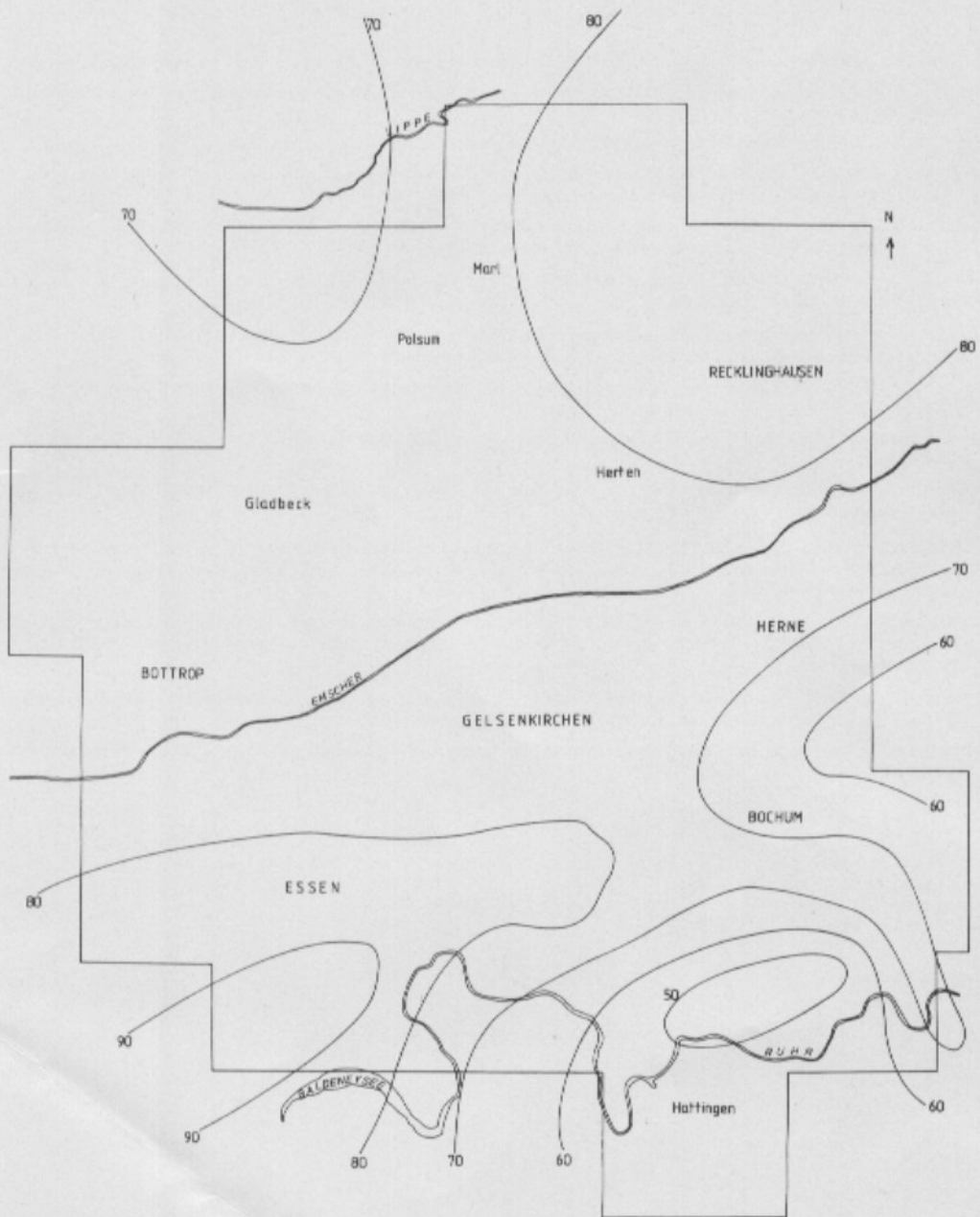


Abb. 11: Maximale monatliche nasse Schwefeldeposition (mg S/m^2) im Jahre 1979.

- 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 Heimat 38/ 1/2: 34-49.
- KELLER Th., 1974: Verkehrsbedingte Luftverunreinigung und Vegetation. Garten Landschaft 84: 547-551.
- KNABE W., 1970: Kiefernwaldverbreitung und Schwefeldioxid-Immissionen im Ruhrgebiet. Staub-Reinh. Luft 30: 32-35.
- KUTTLER W., 1979a: London-Smog und Los Angeles-Smog. Erdkunde 33: 236-240.
- KUTTLER W., 1979b: Einflußgrößen gesundheitsgefährdender Wetterlagen und deren bioklimatische Auswirkungen auf potentielle Erholungsgebiete. Boch. Geogr. Arb. 36: 130 S.
- KUTTLER W., 1980: Auswirkungen gasförmiger Luftverunreinigungen auf die Ökophysiologie junger Fichtennadeln. Verh. Ges. Ökologie (Freising-Weihenstephan 1979) 8: 471-480.
- LIS (Landesanstalt für Immissionsschutz NRW), 1980: Monatsbericht über die Luftqualität an Rhein und Ruhr (Nr. 1-12).
- LUCKAT W., 1976: Die Erhebungen und Untersuchungen der LIB am Kölner Dom und seinen Baumaterialien. Schriftenr. Landesanst. Immissions-, Bodennutzungsschutz NRW 37: 112-122.
- LUCKAT S., 1978: Wirkungen von sauerstoffhaltigen Schwefelverbindungen auf Werkstein. VDI-Ber. 314: 97-99.
- Min. f. Arbeit, Gesundheit und Soziales (Hrsg.) 1980: Luftreinhalteplan Ruhrgebiet-Mitte 1980-1984. Düsseldorf.
- MÜLLER P., 1978: Ökologische Informationen für die Raum- und Stadtplanung. Schriftenr. Siedlungsverb. Ruhrkohlenbezirk 61: 49-80.
- PERSEKE C., BEILKE S., GEORGII H.W., 1980: Die Gesamtschwefeldeposition in der Bundesrepublik Deutschland auf der Grundlage von Meßdaten des Jahres 1974. Ber. Inst. Meteorologie, Geophysik Univ. Frankfurt 40.
- SCHLIPKÖTER H.W., 1970: Wirkung von Luftverunreinigungen auf die menschliche Gesundheit. In: (Ed. Minister für Arbeit, Gesundheit und Soziales NRW) Bericht über den gegenwärtigen Stand der Forschung.
- SUKOPP H., 1974: Ökologische Charakteristika von Großstädten, bes. anthropogene Veränderungen von Klima, Boden und Vegetation. Z. TU Berlin 4: 469-488.
- WENTZEL K.F., 1968: Wirkungen der Luftverunreinigung auf Pflanzen und Tiere. Allg. Forstzeitschr. 23: 494.

Adresse

Dr. Wilhelm Kuttler
 Geographisches Institut
 Ruhr-Universität
 Universitätsstr. 150
 Postfach 10 21 48
 D-4630 Bochum 1