

Sonderdruck aus:

# Berichte zur deutschen Landeskunde

Herausgegeben im Auftrag des

Zentralausschuß  
für deutsche Landeskunde e. V.

von

Klaus Fehn, Günter Heinritz, Hans-Jürgen Klink,  
Walter Sperling und Klaus Wolf (federführend)

57. Band

Heft 1

1983

---

Selbstverlag  
des Zentralausschuß für deutsche Landeskunde e. V.  
Trier

Wilhelm KUTTLER, Bochum

## Zum Ausmaß der Schwefelablagerung im Ruhrgebiet

### 1. PROBLEMSTELLUNG

Das in Ballungsräumen entstehende Schwefeldioxid nimmt unter den anthropogenen Spurenstoffen in der bodennahen Troposphäre hinsichtlich seiner emittierten Menge nach wie vor eine Sonderstellung ein. So wurden im Jahre 1975 in der Bundesrepublik Deutschland etwa 3,6 Millionen Tonnen  $\text{SO}_2$  freigesetzt (BEILKE 1980), wovon allein 1,6 Millionen Tonnen auf den Rhein-Ruhr-Raum entfielen. Über 40 Prozent dieses Spurenstoffes wurden somit auf rund drei Prozent der Staatsfläche emittiert. Nach seiner Freisetzung unterliegt dieser Spurenstoff den verschiedensten luft- und photochemischen Reaktionen (BEILKE 1975 u. 1980; GEORGII 1975; GEORGII et al. 1979; GIEBEL 1977; PENZHORN et al. 1974), verteilt sich in der bodennahen Mischungsschicht und lagert sich emittentennah beziehungsweise -fern (long-range-transport) auf den zur Verfügung stehenden Oberflächen ab.

Um festzustellen, welche Schwefelmengen dem Boden in einem lufthygienisch belasteten Gebiet durch die verschiedenen Ablagerungsprozesse zugeführt werden, wurde das mittlere Ruhrgebiet als Untersuchungsraum gewählt.

### 2. EMISSIONS- UND IMMISSIONSSITUATION IM UNTERSUCHUNGS- GEBIET

Nach den im Luftreinhalteplan Ruhrgebiet-Mitte (MINISTERIUM FÜR ARBEIT, GESUNDHEIT U. SOZIALES 1980) festgelegten Grenzen liegt der Untersuchungsraum Ruhrgebiet-Mitte zwischen den Flüssen Ruhr und Lippe und zwischen den Städten Herne und Bottrop (Abb. 1). Auf einer Fläche von  $761 \text{ km}^2$  leben etwa zwei Millionen Menschen bei einer mittleren Bevölkerungsdichte von rund  $2600 \text{ E/km}^2$ . Die Gesamtsumme der  $\text{SO}_2$ -Emissionen belief sich im Jahre 1979 auf rund 312 000 Tonnen, wovon 94 Prozent durch die Industrie, 5,6 Prozent durch den Hausbrand und das Kleingewerbe und 0,4 Prozent durch den Kraftfahrzeugverkehr freigesetzt wurden. Demgegenüber zeigt die prozentuale Zusammensetzung der Immissionsbelastung eine im Vergleich zur Emissionsbe-

lastung deutlich höhere Einflußnahme des Hausbrandes, der nunmehr einen Anteil von 23 Prozent erreicht, während die Industrie zu 75 Prozent und der Kraftfahrzeugverkehr zu zwei Prozent beteiligt sind. Das Flächenmittel der Immissionsbelastung für den Untersuchungsraum berechnete sich zu  $0,1 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$  (KUTTLER 1981) und erreichte damit in etwa das Jahresmittel (1979) der  $\text{SO}_2$ -Immissionskonzentration der Stadt Bochum, wie es in Tabelle 1 für die Jahreszeiten aufgeschlüsselt ist.

Tab. 1:  $\text{SO}_2$ -IMMISSIONSKONZENTRATIONEN AN DER STATION BOCHUM IM JAHRE 1979 (in  $\text{mg}/\text{m}^3$ )  
(berechnet nach KUTTLER 1981)

Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
0,07	0,07	0,11	0,21	0,11

### 3. MÖGLICHKEITEN DER SPURENSTOFFABLAGERUNG

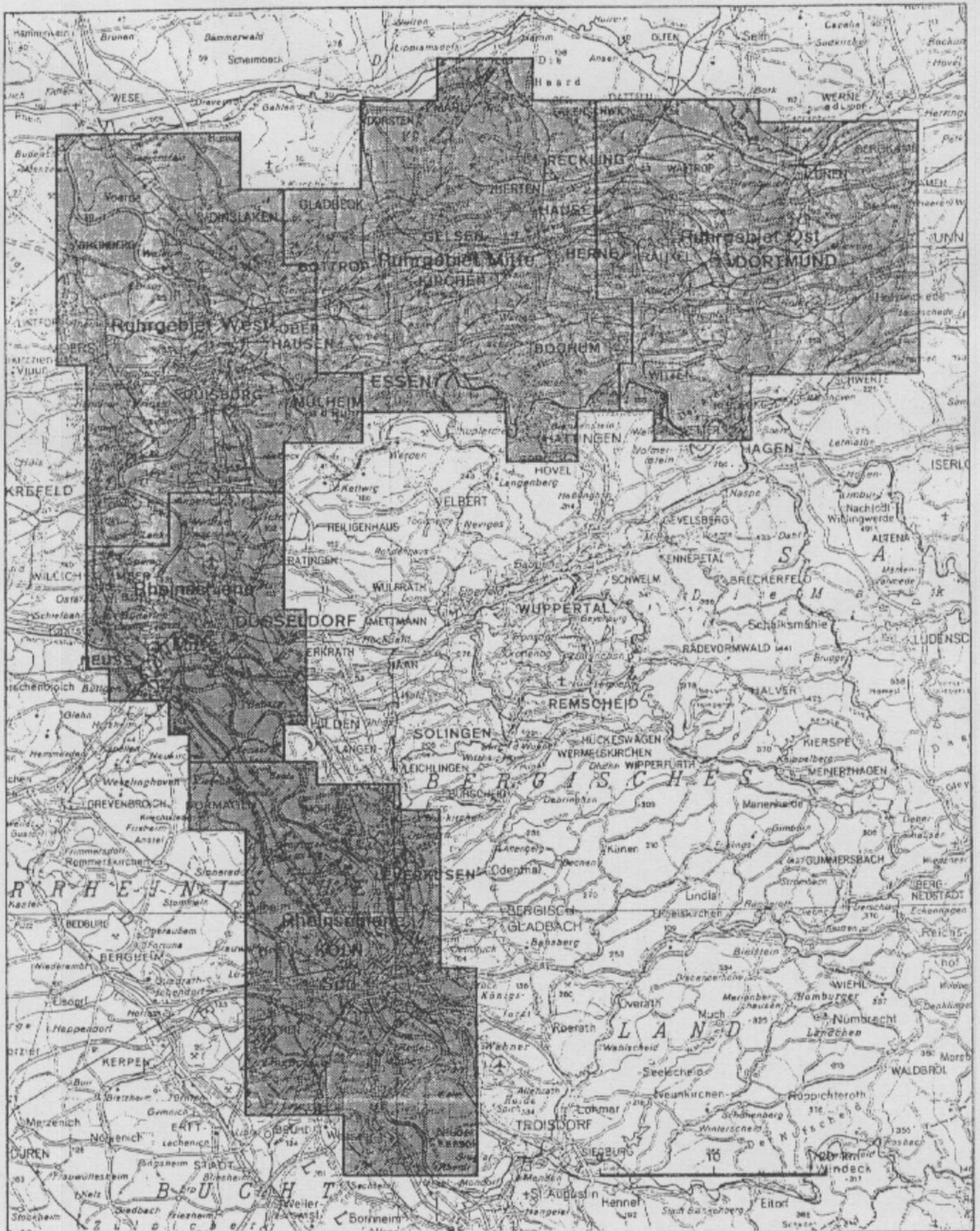
Spurenstoffe können aus der Atmosphäre – wenn man einmal die bereits angesprochene chemische Umwandlung außer Betracht läßt – auf zwei Wegen wieder entfernt werden, und zwar einerseits durch die trockene Deposition (dry deposition) und andererseits durch die feuchte Deposition (wet deposition) (GEORGII 1965). Bei der trockenen Deposition werden die Spurenstoffe von beziehungsweise an verschiedenen künstlichen und natürlichen Oberflächen ad- oder absorbiert. Der Umfang dieses Vorganges wird durch meteorologische Parameter und physikalisch-chemische Eigenschaften der Oberflächen gesteuert, zum Beispiel bei Landoberflächen durch den Feuchtigkeitsgehalt des Bodens und den pH-Wert sowie den Vegetationstyp.

Ein Maß für den Umfang des zur Ablagerung kommenden Spurenstoffes ist dabei die schadstoffspezifische Ablagerungsgeschwindigkeit (deposition velocity) (GIEBEL 1977), die sich nach Gleichung (1) aus folgenden Termen zusammensetzt:

$$V_g(z) = F : C(z)$$

$$\begin{aligned} V_G(z) &= \text{Ablagerungsgeschwindigkeit für die Höhe } (z) \text{ [m/s]} \\ F &= \text{Fluß eines Spurenstoffes zur Erdoberfläche [mg/m}^2 \cdot \text{s]} \\ C_{(z)} &= \text{Konzentration eines Spurenstoffes in der Höhe } (z) \\ &\quad \text{über der Erdoberfläche [mg/m}^3\text{].} \end{aligned} \quad (1)$$

Abb. 1: Belastungsgebiete in Nordrhein-Westfalen (nach KUTTLER 1979)



In Abhängigkeit von verschiedenen meteorologischen Bedingungen und Landoberflächen wurden für  $\text{SO}_2$  Ablagerungsgeschwindigkeiten zwischen  $V_g = 0,2$  und  $2,2 \text{ cm/s}$  bestimmt (PERSEKE et al. 1980). Zum Zweck der Vergleichbarkeit von Werten aus verschiedenen Räumen wird auch für die in dieser Untersuchung durchgeführte Berechnung der trockenen  $\text{SO}_2$ -Schwefeldeposition der vielfach benutzte Wert der Ablagerungsgeschwindigkeit von  $V_g = 0,8 \text{ cm/s}$  gewählt. Bei Kenntnis der  $\text{SO}_2$ -Immissionskonzentration und des Wertes der Ablagerungsgeschwindigkeit läßt sich nach Umformung von Gleichung (1) die pro Zeiteinheit erfolgende  $\text{SO}_2$ -Schwefelablagerung berechnen.

Zur Ermittlung der feuchten Schwefeldeposition<sup>1</sup> werden die analysierte Sulfatkonzentration im Niederschlagswasser und die pro Zeiteinheit gefallene Niederschlagsmenge herangezogen (Gleichung (2)); beides wird seit 1978 an der Station Bochum (Botanischer Garten) gemessen (KUTTLER 1982).

$$D_t = K_t \cdot N_t$$

$$D_t = \text{Bodenbelastung im Zeitraum } t \text{ [mg/m}^2\text{]}$$

$$K_t = \text{Spurenstoffkonzentration im Niederschlagswasser im Zeitraum } t \text{ [mg/l]} \quad (2)$$

$$N_t = \text{Niederschlagsmenge im Zeitraum } t \text{ [l/m}^2\text{]}.$$

#### 4. UMFANG DER TROCKENEN UND FEUCHTEN SCHWEFELABLAGE- RUNG IM MITTLEREN RUHRGEBIET

Für das Jahr 1979 wurde unter Zugrundelegung der durch die Landesanstalt für Immissionsschutz NW gemessenen  $\text{SO}_2$ -Immissionskonzentrationen und einer Ablagerungsgeschwindigkeit für  $\text{SO}_2$  von  $V_g = 0,8 \text{ cm/s}$  für die einzelnen Jahreszeiten die trockene Schwefeldeposition im Untersuchungsgebiet berechnet. Das Ergebnis zeigt Tabelle 2, Reihe 1, wonach in den drei Wintermonaten rund 45 Prozent der Jahressumme an Schwefel ( $14,2 \text{ g/m}^2$ ) trocken zur Ablagerung gelangt, während in den anderen Jahreszeiten nur zwischen 16 und 22 Prozent der Jahressumme trocken deponiert werden. Der überragende Einfluß der Wintermonate auf das Depositionsverhalten beruht auf den im Vergleich zum Frühjahr, Sommer und Herbst wesentlich höheren Immissionskonzentrationen.

Zur Berechnung der feuchten Schwefeldeposition wurden die für die einzelnen Jahreszeiten ermittelten Sulfatkonzentrationen und die entsprechenden Niederschlagsmengen herangezogen. Im Frühjahr und Winter wurden jeweils 30 Prozent und 34 Prozent, im Sommer und Herbst jeweils 19 und 17 Prozent

1 Unter feuchter Spurenstoffdeposition werden der Sulfatgehalt des Niederschlagswassers und der Anteil des trockenen abgelagerten Sulfataerosols zusammengefaßt.

Tab. 2: TROCKENE, FEUCHTE UND GESAMTSCHWEFELDEPOSITION IM MITTLEREN RUHRGEBIET FÜR DAS JAHR 1979 (in mg/m<sup>2</sup>)

	Frühjahr <sup>1</sup>	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
SO <sub>2</sub> -S <sub>tr.</sub>	2332	2224	3147	6468	14 171
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S <sub>na.</sub>	1170	667	591	1008	3 436
Σ <sub>tr.,na.</sub>	3502	2891	3738	7476	17 607
Quotient trocken/naß	1,99	3,33	5,32	6,41	4,12

- 1 Klimatologische Jahreszeiten  
 Frühjahr: März, April, Mai  
 Sommer: Juni, Juli, August  
 Herbst: September, Oktober, November  
 Winter: Dezember, Januar, Februar

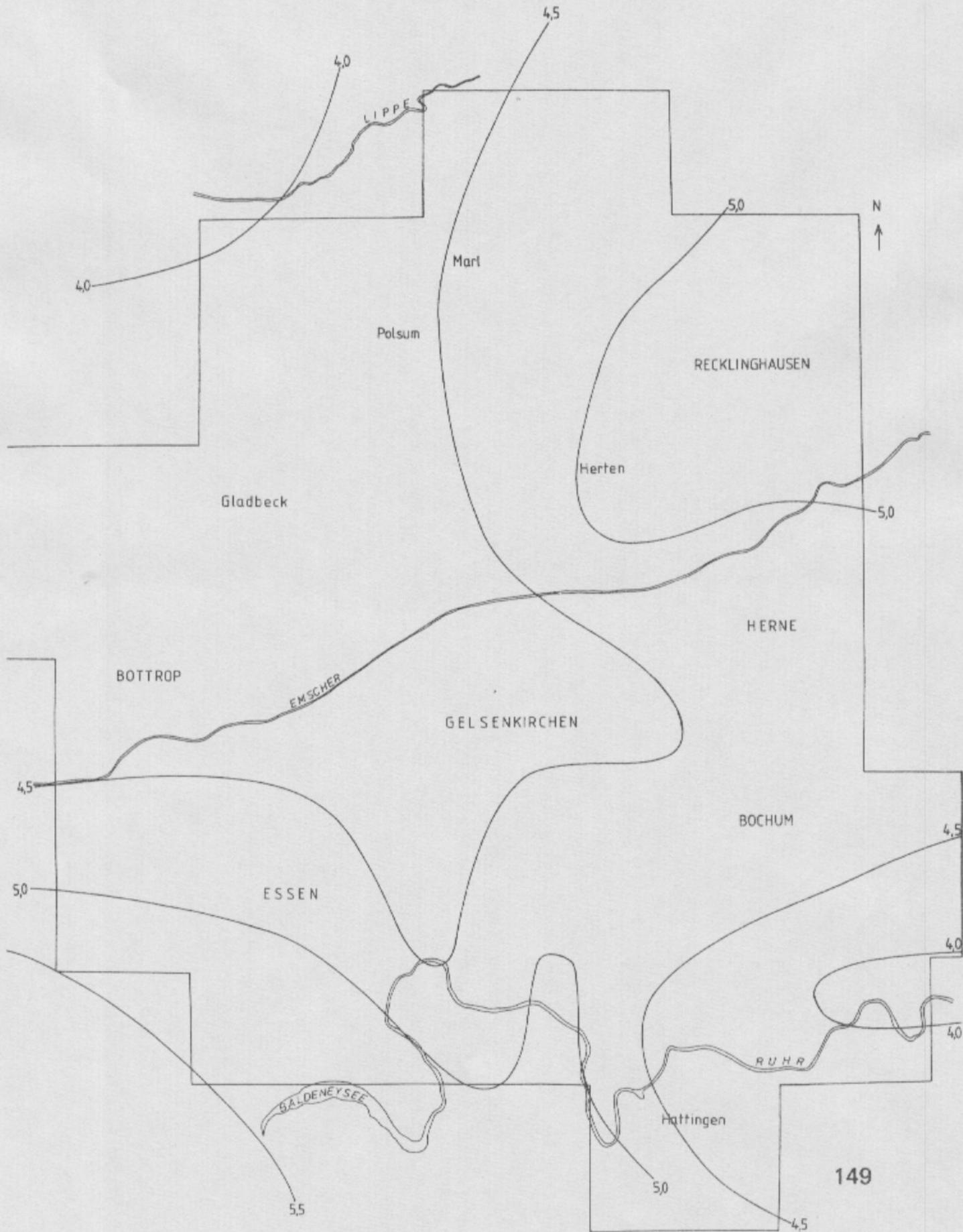
der Jahressumme abgelagert (vgl. Tab. 2, Reihe 2). Für die feuchte Schwefel-deposition wurde für das Untersuchungsgebiet Ruhrgebiet-Mitte unter Verwendung von 19 Niederschlagsmeßstationen (Lage siehe KUTTLER 1981) und unter Berücksichtigung einer gewichteten Schwefelkonzentration von 5,5 mg/l eine Verteilungskarte angefertigt (Abb. 2). Diese Isosulfendarstellung (Linien gleicher Schwefelablagerungsmenge) zeigt, daß im Südwesten und Nordosten des Belastungsraumes mehr als 5 g S/m<sup>2</sup> im Jahre 1979 abgelagert wurden, während der Südosten und Nordwesten nur etwa 4 g S/m<sup>2</sup> über die feuchte Ablagerung erhielten.

Von den 17,6 g S/m<sup>2</sup>, die auf trockenem oder feuchtem Wege im Jahre 1979 im Untersuchungsraum dem Boden zugeführt wurden (vgl. Tab. 2, Reihe 3), entfielen 42 Prozent auf die Wintermonate, 20 beziehungsweise 21 Prozent auf Frühjahr und Herbst und 16 Prozent auf die Sommermonate.

##### 5. GEOGRAPHISCHER VERGLEICH DER GESAMTDEPOSITION VON SCHWEFEL IN VERSCHIEDENEN GEBIETEN

Anhand der Zusammenstellung in Tabelle 3, die Meßwerte zur trockenen und feuchten sowie zur Gesamtd deposition von Schwefel enthält, wird auf die Verteilung der Schwefelablagerungen in ausgesuchten Gebieten und auf deren unterschiedliche Belastung durch diesen Spurenstoff eingegangen. Mit Hilfe dieser Aufstellung lassen sich die in Bochum ermittelten Meßwerte im geographischen Vergleich besser einordnen.

Abb. 2: Jahressumme der feuchten Schwefeldeposition im mittleren Ruhrgebiet  
 (in  $\text{g S} \cdot \text{m}^{-2}$ ) für das Jahr 1979  
 (nach gew. Mittel:  $x = 5,5 \text{ mg S} \cdot \text{l}^{-1}$ ; nach KUTTLER 1981)



Tab. 3: TROCKENE, FEUCHTE UND GESAMTSCHWEFELDEPOSITIONEN IN VERSCHIEDENEN GEBIETEN  
(nach GEORGII et al. 1982)

Reihe	Gebiet	Trockene Deposition		Feuchte Deposition in mg S · m <sup>-2</sup> · d <sup>-1</sup>	Gesamt- deposition	Gesamtdeposition in Prozent		Verfasser <sup>1</sup>							
		SO <sub>2</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>			trocken	feucht								
1	Europa	2,609	0,146	3,131	5,886	46,8	53,2	MESZAROS et al. 1978							
2	Europa	3,3		1,7	5,0	66,0	34,0	OTTAR 1978							
3	Deutschland	8,5 – 27,4		2,74 – 6,85	9,6 – 34,2	71,5 – 80,1	19,9 – 28,5	OTTAR							
4	Deutschland: belastet	PERSEKE et al. 1980													
	Ruhrgebiet								27,4	–	7,95 – 11,78	35,35 – 39,18	69,9 – 77,5	22,5 – 30,1	
	Rhein-Main- Gebiet								25 – 26	–	3,84	28,84 – 29,84	86,7 – 87,1	12,9 – 13,3	
	unbelastet														
	Deuselbach Schauinsland								5 2	– –	2,74 5,48	7,74 7,48	64,6 26,7	35,4 73,3	
5	Deutschland: belastet	GEORGII et al. 1982													
	Ruhrgebiet								–	1,87	5,55	34,82	84,1	15,9	
	Rhein-Main- Gebiet								–	1,16	3,70	29,86 – 30,86	87,6 – 88,0	12,2 – 12,4	
	unbelastet														
	Deuselbach Schauinsland								– –	0,73 0,36	3,00 3,66	8,73 6,02	65,6 38,9	34,4 61,1	
6	Deutschland: belastet	KUTTLER 1981													
	Ruhrgebiet (Bochum)								38,8		9,4	48,2	80,0	20,0	
7	Deutschland: Berlin 1953 Berlin 1978	– –	– –	– –	30 20	– –	– –	LAHMANN et al. 1980							
8	England: ländliches Gebiet	7,4	0,30	2,52	10,22	75,3	24,7	DAVIES et al. 1981							
9	Nigeria: Savanne	–	–	0,63	–	–	–	BEAUVINGTON et al. 1979							
10	USA: Tennessee	–	–	0,6 – 3,7	–	–	–	LINDBERG et al. 1977							

1 zitierte Arbeiten in: GEORGII et al. 1982

Einer großräumig angelegten Analyse für Europa zufolge (vgl. Reihen 1 und 2 in Tab. 3), bewegt sich die Gesamtschwefelablagerung zwischen 5 und 6  $\text{mg S} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . Für Deutschland werden Werte zwischen 9,6 und 34,2  $\text{mg S} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  (Reihe 3) genannt, die durch spätere Untersuchungen (Reihen 4, 5 und 6), differenziert nach belasteten und unbelasteten Gebieten (Reihe 4), im wesentlichen bestätigt werden können.

Die vergleichsweise hohen Werte, die für das mittlere Ruhrgebiet berechnet beziehungsweise gemessen wurden und die immerhin 48  $\text{mg S} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  erreichen (Reihe 6), sind auf den relativ großen Einfluß der trockenen Schwefelablagerung von rund 39  $\text{mg S} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  zurückzuführen. Die Heterogenität der Angaben für den Großraum Ruhrgebiet (Reihen 4, 5 und 6) beruht auf den unterschiedlichen Meßzeiträumen und der Lageverschiedenheit der Probenmestandorte.

Die Messungen in Berlin (Reihe 7) aus den Jahren 1953 und 1978 lassen eine Diskussion über eine langfristige Abnahme der Spurenstoffbelastung nicht zu, da nur diese beiden Meßjahre berücksichtigt wurden. Darüber hinaus kann nicht festgestellt werden, ob die Veränderung der Schwefelbelastung zwischen diesen beiden Jahren auf einen Wandel der trockenen beziehungsweise feuchten Deposition zurückgeht.

Für England wurde nur die Gesamtschwefelbelastung in ländlichen Gebieten mitgeteilt. Hier entspricht sie mit rund 10  $\text{mg S} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  in etwa der Belastung deutscher Reinluftgebiete.

Für Nigeria liegt ein Meßwert aus dem Savannengebiet vor, der jedoch nur die trockene und feuchte Sulfatablagerung, nicht jedoch die  $\text{SO}_2$ -Deposition berücksichtigt. Mit 0,63  $\text{mg S} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  ist der in diesem Gebiet gemessene Wert im Vergleich zu denjenigen in deutschen Reinluftgebieten (Reihe 5, Deuselbach 3,7  $\text{mg S} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) beziehungsweise in ländlichen Gebieten Englands (Reihe 8) um ein Vielfaches niedriger. Ähnlich geringe Belastungen zeigen auch die Messungen in ländlichen Gebieten aus den USA (Reihe 10).

Diejenigen Stationswerte, die aufgrund der Meßmethodik eine Differenzierung der trockenen Deposition in  $\text{SO}_2$ -Schwefel und  $\text{SO}_4^{2-}$ -Schwefel ermöglichen und damit eine Effektivitätsbetrachtung der trockenen und feuchten Deposition zulassen (Reihe 1 bis 6, 8) verdeutlichen – von einigen Ausnahmen abgesehen – den bestimmenden Charakter der trockenen Deposition. In Industriegebieten wird durch die trockene Senke bis zu 90 Prozent des Gesamtschwefels abgelagert. Auf dieses Problem wiesen bereits CHAMBERLAIN (in PERSEKE et al. 1980) sowie WHELPDALE und SHAW (1974) hin, wonach in stark verunreinigten Gebieten die trockene Ablagerung als dominierender Faktor mit 79 bis 92 Prozent und in unbelasteten Gebieten mit 36 bis 66 Prozent an der Gesamtdosition beteiligt ist (PERSEKE et al. 1980).

Zusammenfassend läßt sich für das mittlere Ruhrgebiet feststellen, daß die Belastung der Ökosysteme in diesem Raum durch Schwefel zu rund 80 Prozent durch die trockene Deposition verursacht wird, 20 Prozent dagegen über

den Niederschlag auf den Boden gelangen. Die Gesamtschwefelbelastung dieses Raumes erreicht nach den in Tabelle 3 angeführten verschiedenen Untersuchungen mit  $35$  bis  $48 \text{ mg S} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  im Vergleich zu Meßwerten aus unbelasteteren Räumen recht hohe Werte.

## LITERATURVERZEICHNIS

- BEILKE, S. 1975: Die Abscheidungsprozesse der Spurenstoffe aus der Atmosphäre. — *Promet* 5, 2/3, S. 35–38.
- BEILKE, S. 1980: Luftchemisches Verhalten von SO<sub>2</sub>. Luftchemisches Verhalten anthropogener Schadstoffe. — Ergebnisse der Arbeitsgruppe „Luftchemie“ in der VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, Düsseldorf, S. 12–24.
- GEORGII, H.-W. 1965: Untersuchungen über Ausregnen und Auswaschen atmosphärischer Spurenstoffe durch Wolken und Niederschlag. — *Ber. Deutscher Wetterdienst* 14, 100.
- GEORGII, H.-W. 1975: Die aerosolbildenden Spurengase. *Promet* 5, 2/3, S. 21–25.
- GEORGII, H.-W. und K. HERRMANN 1979: Umwandlung luftfremder Stoffe in der Atmosphäre. — *Umwelt* 6, S. 463–465.
- GEORGII, H.-W., PERSEKE, C. und E. ROHBOCK 1982: Feststellung der Deposition von sauren und langzeitwirksamen Spurenstoffen aus Belastungsgebieten. — *Umweltforschungsplan des Bundesministers des Inneren. Luftreinhaltung Forschungsprojekt 10 402 600*, im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- GIEBEL, J. 1977: Untersuchungen zur Abbaurate von Schwefeldioxid in der Atmosphäre. — *Schriftenreihe der Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes NW*, 40, Essen, S. 13–22.
- KUTTLER, W. 1979: Einflußgrößen gesundheitsgefährdender Wetterlagen und deren bioklimatische Auswirkungen auf potentielle Erholungsgebiete — dargestellt am Beispiel des Ruhrgebietes und des Sauerlandes. — *Bochumer Geographische Arbeiten*, Heft 36, Paderborn, Schöningh Verlag.
- KUTTLER, W. 1981: Trockene und nasse Schwefelablagerungen im mittleren Ruhrgebiet. — *Gesellschaft für Ökologie*, Oktober 1981 (im Druck).
- KUTTLER, W. 1982: Niederschlagswasseranalysen im Rahmen des Stauseeprojektes „Kemnade“. In: SCHREIBER, D. und K. H. HOTTES (Hrsg.): *Stausee Kemnade — Geographische Beiträge im interdisziplinären Forschungsprojekt der Ruhr-Universität Bochum*. *Bochumer Geographische Arbeiten*, Heft 42, Paderborn, Schöningh Verlag, S. 24–66.
- MINISTERIUM FÜR ARBEIT, GESUNDHEIT UND SOZIALES NW 1980: *Luftreinhalteplan Ruhrgebiet-Mitte 1980–84*, Düsseldorf.
- PENZHORN, R. D., FILBY, G. und H. GÜSTEN 1974: Die photochemische Abbaurate des Schwefeldioxids in der unteren Atmosphäre Mitteleuropas. — *Z. Naturforsch.* 29a, 1449.
- PERSEKE, C., BEILKE, S. und H.-W. GEORGII 1980: Die Gesamtschwefel-deposition in der Bundesrepublik Deutschland auf der Grundlage von Meß-

daten des Jahres 1974. — Berichte des Institutes für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt/M. 40.

WHELPALE, D. M. und A. W. SHAW 1974: Sulfur dioxide removal by turbulent transfer over grass, snow and water surfaces. — *Tellus* 26, S. 196–204.