

Spredning av luftforurensninger over store avstander

Av Brynjulf Ottar

Brynjulf Ottar er instituttsjef ved Norsk Institutt for Luftforskning.

*Foredrag holdt på møte i
Norsk Forening for Vassdragspleie
og Vannhygiene, 28. september 1976.*

Innledning.

Atmosfærens kjemiske sammensetning er resultatet av en lang utvikling, som har ført til en dynamisk likevekt mellom tilførsel og utfelling av kjemiske forbindelser. Plantenes opptak av kuldiosyd under utskillelse av oksygen og den naturlige sirkulasjon av nitrogen og svovel mellom jordoverflaten og atmosfæren er bare noen eksempler på de mange prosesser som finner sted, og som er av vesentlig betydning for livet på jorden.

I årtusener har menneskene kunnet bruke atmosfæren til å bli kvitt sine forurensninger. Men med økende befolkningstetthet og industrialisering har dette vist seg å føre til alvorlige problemer.

Bilder av det forrige århundrets industriområder karakteriseres ved sine mange høye og rykende skorsteiner — et tegn på velstand. De fleste industrialiserte land begynte ikke for alvor å bekymre seg om luftforurensningene i byer og indu-

stristrøk før i midten av dette århundre. Tiltak som forbedret forbrenningskontroll, renere brensel og bedre spredning av forurensningene ved økte skorsteinshøyder og bedre planlegging ved utbygging av nye industriområder har ført til en vesentlig bedring av lokale forhold. Spørsmålet er imidlertid om ikke mange av disse tiltak skaper nye problemer i områder lenger unna.

Det forhold at asmosfæren kan spre materialer over store avstander, er vel kjent fra vulkanutbrudd, sandstormer og skogbranner. Allerede i 1945 fant Meetham at 10—40 % av røyken og svoveldioksyden i industribyen Leicester kunne skyldes utslipp som lå mer enn 50 km unna, muligens i enkelte situasjoner tilførsler fra det europeiske kontinent (1).

OECD-prosjektet.

I slutten av 1960-årene ble det vist at nedbøren i Europa ble stadig surere (2). Et sentralt område med pH-verdier i nedbøren omkring 4 i den sentrale del av Europa hadde i løpet av de siste 10—15 år utvidet seg slik at det nå også omfattet de sydlige deler av Skandinavia. En

omfattende svensk undersøkelse ble presentert på De Forenede Nasjoners konferanse i Stockholm i 1972 (3). Samtidig ble forholdene tatt opp til nærmere undersøkelse innenfor OECD etter initiativ fra de nordiske land, og etter omfattende forberedelser koordinert gjennom NORD-FORSK (4) ble 10 vesteuropeiske land i 1972 enige om å foreta en felles undersøkelse for å klarlegge den relative betydning av lokale og fjerne kilder for luftforurensningene i Europa, spesielt forurensningen av nedbøren. Koordineringen av programmet ble lagt til Norsk Institutt for Luftforskning som også har analysert resultatene av undersøkelsen. Prosjektets måleprogram ble avsluttet i 1975, og en regner med at slutt-rapporten vil foreligge ved utgangen av 1976. Siden bearbeidingen av materialet ennå ikke er avsluttet, vil en her begrense seg til en beskrivelse av programmet og en del generelle konklusjoner.

Planen for OECD-prosjektet gikk i korthet ut på å anvende utslippstall for svoveldioksyd og observerte meteorologiske data, sammen med atmosfæriske spredningsmodeller, til å beregne konsentrasjonen av svoveldioksyd og sulfat-aerosol i et grovt rutenett som dekket den nordvestlige del av Europa. Disse beregninger ville så bli sammenlignet med daglige målinger fra bakkestasjoner og med målinger fra fly.

Emisjonsoversikten.

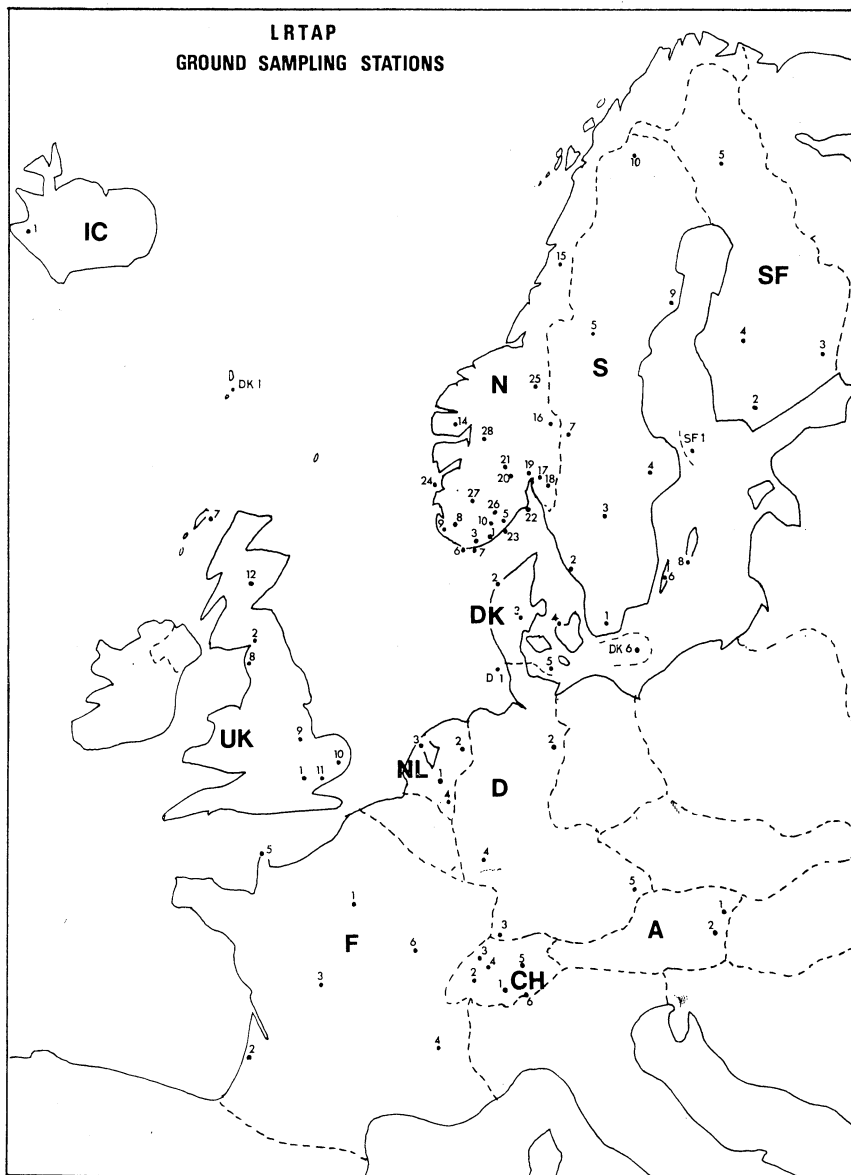
Det samlede utslipp av svoveldioksyd fra bruken av fossilt brensel i Europa utgjør for tiden omkring 25 millioner tonn svovel pr. år. Et de-

taljert emisjonskart som gir utslippene i et rutenett ($\frac{1}{2}^\circ$ bredde \times 1° lengde) ble utarbeidet sammen med de deltakende land (5). I oversikten er det skille mellom konstante utslipp fra industriprosesser og utslippene fra husoppvarming og annet som varierer med årstiden. Det er også skilt mellom utslipp med effektiv utslippshøyde over og under 100 meter. På basis av disse data er det så utarbeidet emisjonsfelter for bruk i modellberegningene. Et eksempel er vist i *figur 1*. Utslippsdataene er hovedsakelig beregnet ut fra forbruket av brensel og dettes svovelinnhold. For land som ikke deltok i programmet, har en anvendt befolkningsstatistikk og andre informasjoner til å anslå utslippene. Figuren viser at hovedutslippene finner sted i et belte tvers over Europa, der de store kullforekomster ga grunnlaget for en omfattende industrialisering.

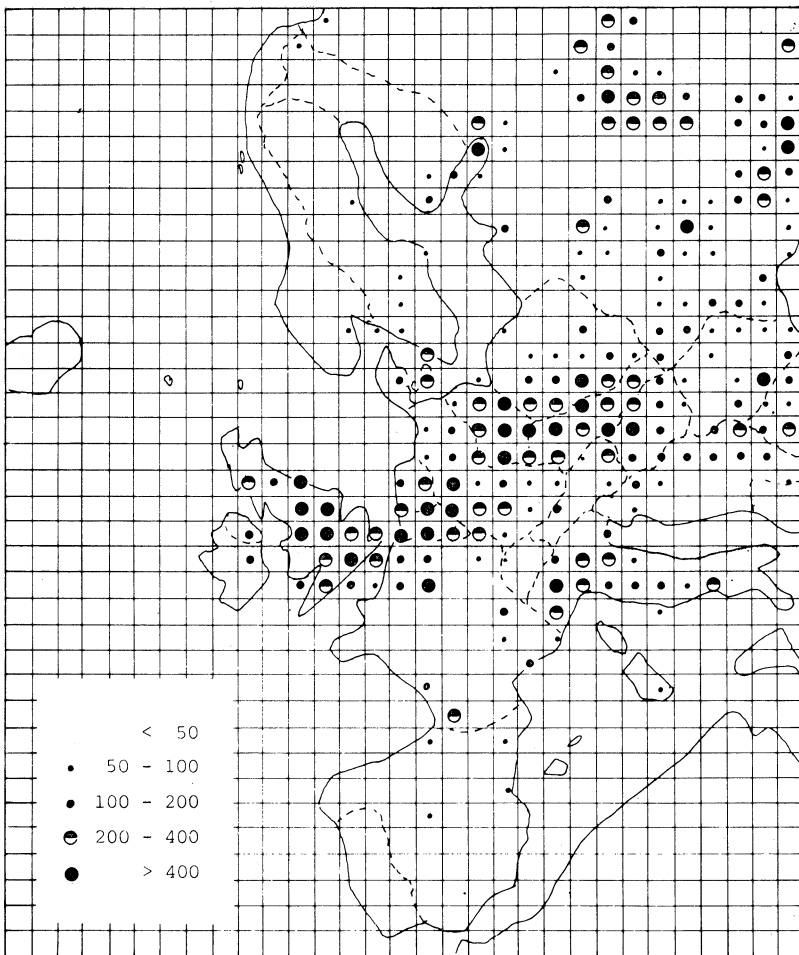
På tilsvarende måte er det også mulig å anslå utslippene av andre luftforurensninger, som f.eks. nitrogenoksyder og svevestøv ved å anvende emisjonsfaktorer, men en kan ikke vente at slike oversikter vil bli like nøyaktige.

Måleprogram.

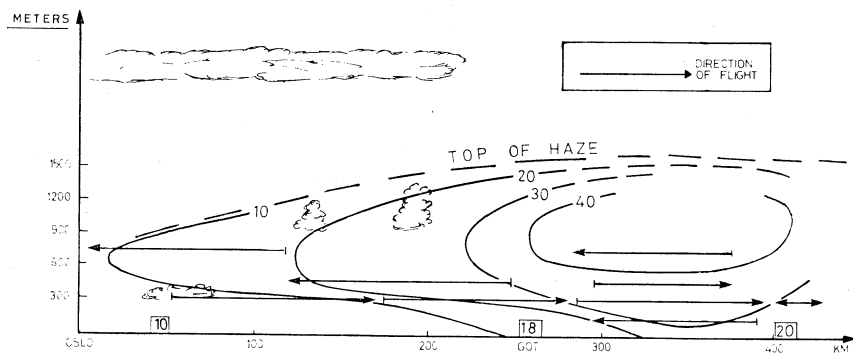
For å få egnede måledata, ble det opprettet nærmere 70 bakkestasjoner, se *figur 2*. De rutinemessige målinger omfattet døgnlige verdier for svoveldioksyd og sulfat-aerosol, samt konsentrasjonen av sulfat og sterk syre i nedbør. I kortere perioder er også prøvene analysert på andre komponenter. Resultatene viser at nedbøren foruten sulfat som det dominerende anion også innehol-



Figur 1. LRTAP-stasjoner for døgnlig prøvetaking av luft og nedbør.



Figur 2. Beregnet utslipp av SO_2 , i 1973 (10^3 tonn SO_2 /år)
 fordelt på 37×37 ruter.
 ($d = 127$ km ved $60^\circ N$).



Figur 3. Flymålinger av SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) på strekningen Oslo—Göteborg—Skåne 26. august 1974. Retning og transport fra trajektoriene var syd-sydvestlig, og modellberegningene indikerte en sterk S-N stigning i SO_2 - og aerosol sulfat konsentrasjonene.

(□ målte 24-t middelkonsentrasjoner av SO_2 på bakken.)

der betydelige mengder ammonium og nitrat. I hovedtrekk bestemmer disse ioner sammen nedbørens surhet.

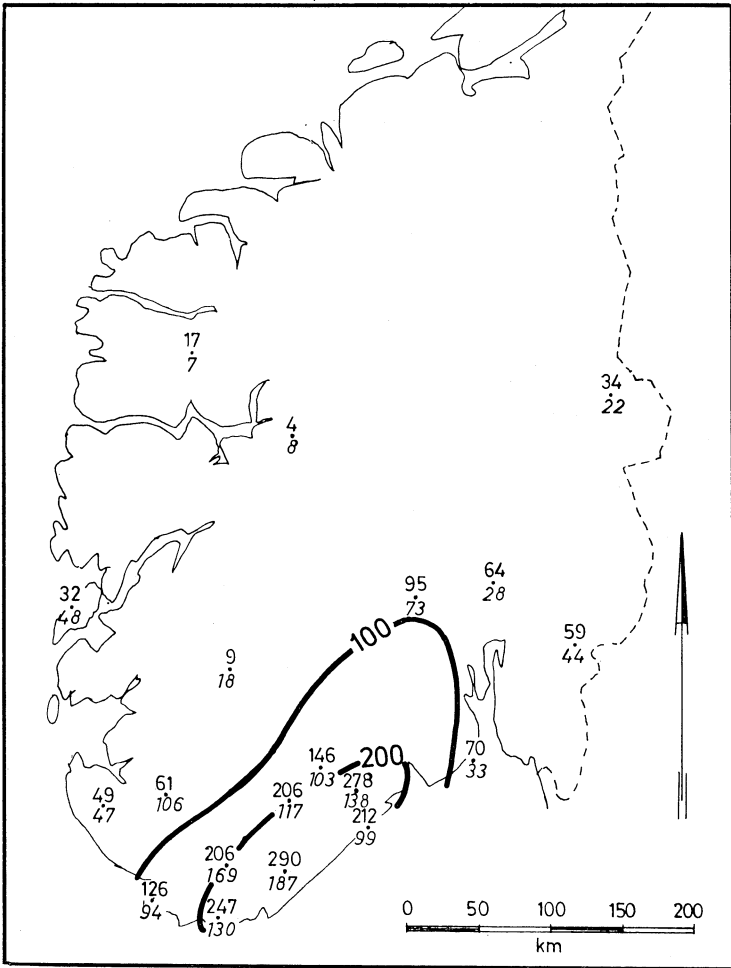
Bakkestasjonene i Skandinavia var særlig egnet til å studere langtransporten av forurensninger, idet Nordsjøen og Østersjøen er emisjonsfrie soner som skiller observasjonspunktene fra de store utslippsområder. En rekke undersøkelser viser at en ved disse stasjoner for vind fra sydøst til sydvest stadig finner økte konsentrasjoner av svoveldioksyd og aerosol-sulfat i luften, sammen med andre forurensninger.

Flymålinger før programmet startet (6, 7) og under dette viser at de antropogene luftforurensninger stort sett holder seg innenfor den nederste del av atmosfæren, 1–2 km over over bakken. Flymålinger over Nordsjøen bekrefter at en transport av svoveldioksyd på stor skala finner sted, og undersøkelser at de uventet

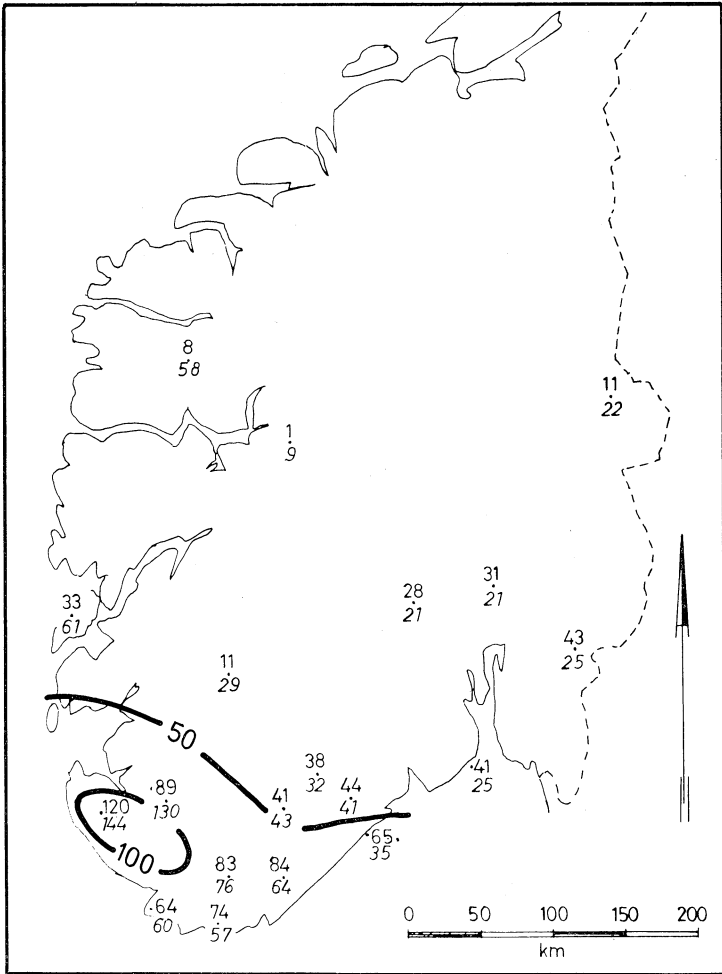
høye konsentrasjoner som observeres ved sydlige vinder i Skandinavia ikke skyldes lokale forhold.

Et eksempel på denne transport er vist i figur 3. Selv om de observerte konsentrasjoner ikke er store sammenlignet med konsentrasjonsnivået i byer og industristrøk, ligger de ca. 10 ganger over gjennomsnittskonsentrasjonen i bakgrunnsområder. Disse konsentrasjonene er også tilstrekkelig høye til at de har en betydelig innflytelse på nedbørkjemien.

Målingene viser også at nedbør-områder virker som sluk hvor luftforurensningene kontinuerlig fjernes fra de luftmasser som passerer området. Resultatet er at forurensninger fra store deler av Europa kan avsettes innenfor relativt små områder i løpet av kort tid (8). Den avsetning av sulfat i milligram pr. m^2 som er vist i figurene 4 og 5 er sammenlignbar med emisjonen fra større



Figur 4. Nedfall av sulfat (mg/m^2) i Syd-Norge 5.—13. januar 1974. Tall i kursiv angir nedbørmengde.



Rigur 5. Nedfall av sulfat (mg/m^2) i Syd-Norge 23.—31. januar 1974.
Tall i kursiv angir nedbørmengde.

kildeområder i Europa. Tilsvarende forhold finner en også i andre områder hvor fjellkjeder eller høyere terreng er utsatt for tilførsel av forurensete luftmasser.

Modellberegninger.

En rekke forskjellige atmosfæriske spredningsmodeller har vært utviklet og anvendt til å stimulere transporten av luftforurensninger på stor skala (9—13). Sammenligninger viser at valget av numerisk modell ikke er kritisk, men at vanskelighetene ligger i å finne fram til et vindfelt som beskriver transporten og i å velge parametre som beskriver avsetningen av forurensningene på bakken, og transformasjonen av svoveldioksyd til sulfat-aerosol.

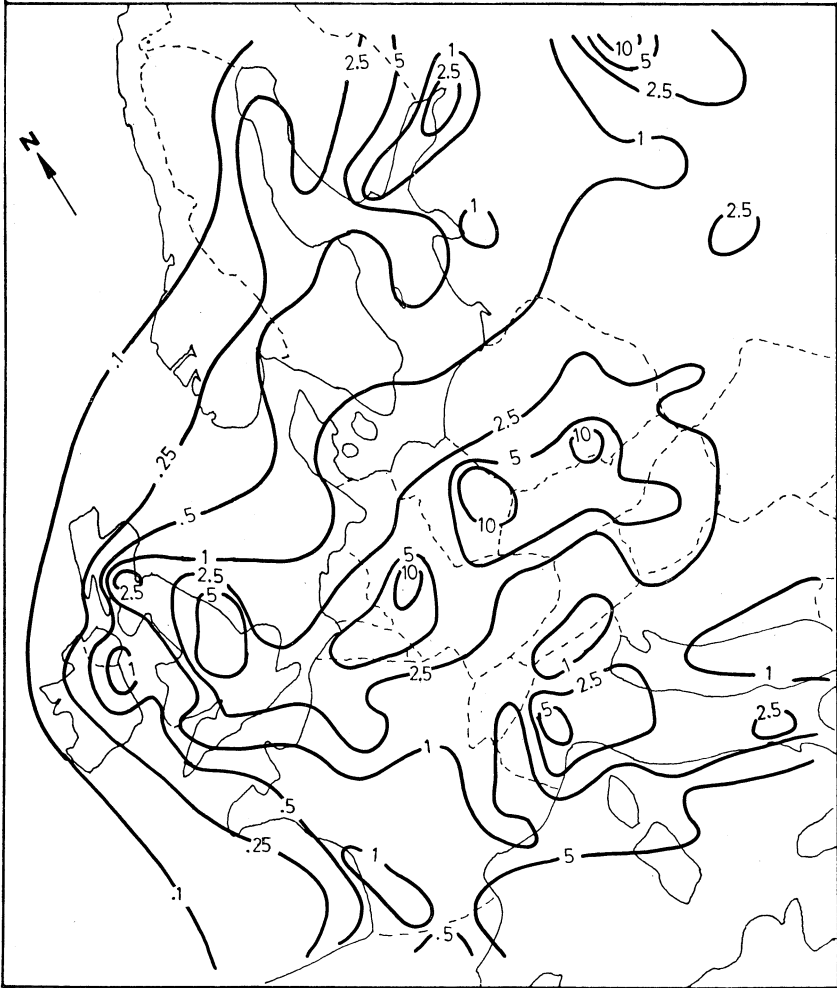
En del resultater oppnådd med en Lagrange-modell utviklet av Eliasen og Saltbones (14, 15) vil vise dette. I denne modell blir spredningen av forurensningene beregnet ved å anslå konsentrasjonen av svoveldioksyd i luftpakker som beveger seg med vinden langs trajektorier over et rutenett som vist i figur 1. Tilførselen av svoveldioksyd beregnes trinnvis ut fra emisjonen og den tid det tar for luftpakkene å passere rutene i nettet. Samtidig beregnes det tap som skyldes kjemisk transformasjon og avsetning på bakken. Det er åpenbart at når en utfører beregninger i et slikt grovt rutenett (127 km \times 127 km), så må de parametre som inngår, såvel som den konsentrasjon en beregner, representere midlere verdier for store arealer. Det betyr at høye lokale konsentrasjoner vil bli glattet ut, og de målinger en skal sammenligne beregningene med må

foretas i tilstrekkelig avstand fra enkeltutslipp.

Som nevnt finner hovedtransporten av luftforurensninger normalt sted innenfor de nederste 2 kilometer av atmosfæren. I beregningen ble forurensningene antatt å være jevnt fordelt med høyden innenfor dette luftlag. I de fleste beregninger ble vinden ved 850 mb (ca. 1500 m) anvendt uten at en tok hensyn til endringer i vindens retning og styrke med høyden over bakken, idet en kan anta at virkningen av disse forenklinger utjevnes betydelig ved beregning av middelverdier over lengre tid.

Konsentrasjonsfelter beregnet på dette grunnlag er blitt anvendt til å anslå tørravsetningen av svoveldioksyd og våtavsetningen av sulfat for hver rute i nettet. Tørravsetningen av svoveldioksyd ble beregnet ved å multiplisere konsentrasjonsfeltet med en avsetningshastighet på 0,8 cm s⁻¹. En beregning av den samlede avsetning for tidsrommet desember 1973 til mars 1975 er vist i figur 6. Fordelingen er direkte proporsjonal med det midlere konsentrasjonsfelt for svoveldioksyd i det samme tidsrom. En sammenligning med utslippene i figur 2 viser at avsetningen er størst nær de store utslippsområder. Tørravsetningen av sulfat-aerosol ble ikke tatt med i denne beregning og utgjør mindre enn 10 % av bidraget fra svoveldioksyd.

Avsetningen av sulfat med nedbøren ble beregnet for hver av rutene i nettet ved å anvende en empirisk sammenheng mellom den midlere verdi for den beregnete svoveldioksydkonsentrasjon i luften, veiet med nedbørmengden, og den målte mid-



Figur 6. Beregnet tørravsetning av SO₂ (gs/m³) for 1974

lere sulfatkonsentrasjonen i nedbøren. Fysisk betyr dette at den midlere konsentrasjon i nedbøren over lengre tid er proporsjonal med nedbørmengden multiplisert med luftens innhold av forurensning. Siden luftens innhold av sulfat-aerosol er sterkt korrelert med innholdet av svoveldioksyd, finner en en tilsvarende relasjon med de beregnete verdier av sulfat-aerosol. I senere beregninger har en anvendt den sistnevnte relasjon, idet konsentrasjonen av sulfat-aerosol er mindre påvirket av lokale kilder, fordi overgangen fra svoveldioksyd til sulfat krever en viss tid.

Resultatet er vist i figur 7. En ser fremdeles beliggenheten av de store utslippsområder, men markerte maksima opptrer i områder som er utsatt for en kombinasjon av forurensete luftmasser og stor nedbør. Den dominerende betydning av orografisk nedbør i Syd-Norge, Sveits og Scotland er lett å se. I alminnelighet er tørravsetningen større enn våtavsetningen i Europa. Men i områder som er utsatt for orografisk nedbør og hyppig tilførsel av forurenset luft dominerer våtavsetningen.

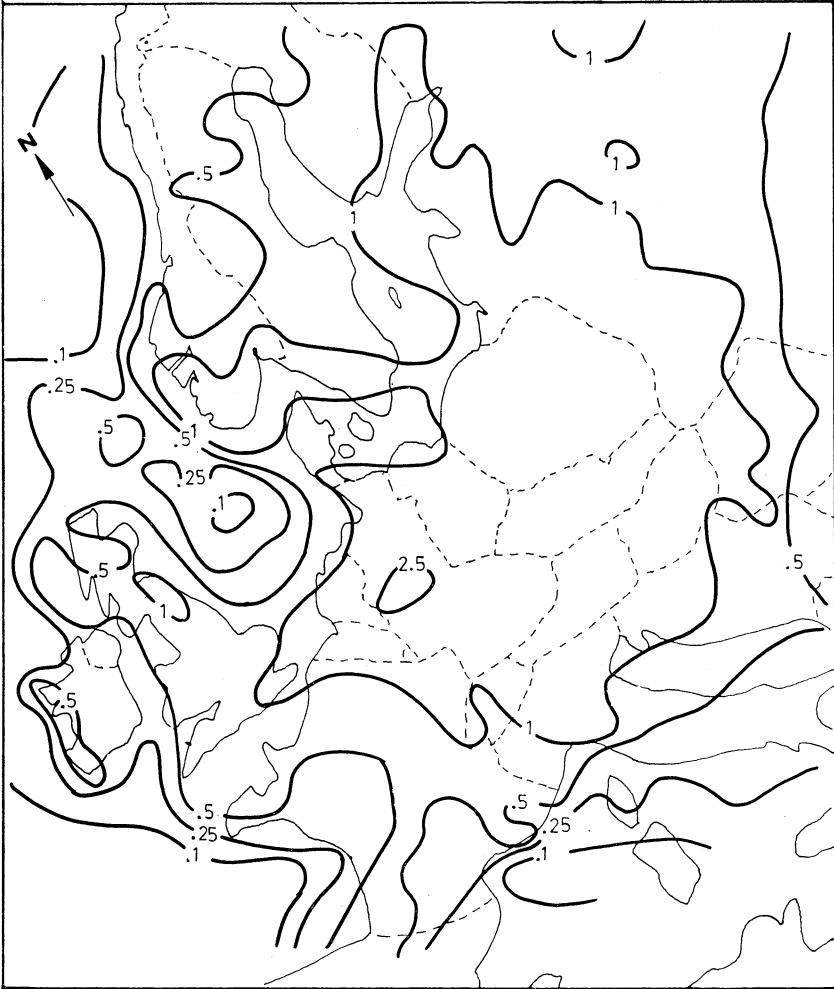
De fordelinger som er vist er resultatet av løpende beregninger som ble startet i 1972. En har senere fått mer nøyaktige utslippsdata. Beregningene gir imidlertid en god illustrasjon i stor skala av de fysiske forhold ved langtransporten av luftforurensninger i Europa. Ved vurdering av de resultater som er vist, bør en være oppmerksom på at det kan være være meget store variasjoner i avsetningsmønsteret fra år til år, og at beregningene dekker et relativt kort

tidsrom. Mer detaljerte beregninger på basis av nyere data vil komme i prosjektets sluttrapport, hvor også de mengder av luftforurensninger som landene tilfører hverandre vil bli anslått ved hjelp av tilsvarende beregninger som ovenfor for hvert enkelt land.

Konklusjon.

OECD-undersøkelsen har vist at betydelige mengder av svoveldioksyd transporteres fra de store utslippsområder i Europa til fjernere regioner. Hovedkildene er fossilt brensel og spesielle industriprosesser. Undersøkelsen har vist at det er mulig ved hjelp av utslippsdata sammen med atmosfæriske spredningsmodeller og vindtrajektorier å beregne forurensningenes spredning og avsetning i et område som inneholder store arealkilder.

Den modellteknikk som er utviklet, begrenser det antall stasjoner som er nødvendig for å overvåke luftforurensningssituasjonen år for år i Europa, og gjør det derfor mulig å gjennomføre en løpende overvåking av luftkvaliteten. Utnyttelse av den kunnskap og erfaring som er innvunnet gjennom prosjektet i et fremtidig europeisk monitoring system for luftforurensninger, vil bidra til å kvantifisere betydningen for miljøet av endringer på stor skala av bosetting og industriutvikling, forhold som en i dag stort sett er henviset til å vurdere på kvalitativ basis. Dette gjelder også for andre forurensninger enn svoveldioksyd. Arbeid i denne retning er i løpet av de seneste år tatt opp innenfor FN's økonomiske kommisjon for Europa og i nært



Figur 7. Beregnet våtavsetning for sulfat (gs/m^2) for 1974.

samarbeid med Verdens Meteorologi-organisasjon og FN's miljøvernprogram.

Referanser.

- (1) *Meetham, A. R.* (1945) *Atmospheric Pollution in Leicester*, Department of Scientific and Industrial Research, H.M.S.O., London, 1945.
- (2) *Odén, S.* Nederbördens och luftens förurning, dess orsaker, förlöpp och verkan i olika miljöer. Statens Naturvetenskapliga forskningsråd, Stockholm 1968 (Ekologikommittéen, Bull. No. 11).
- (3) Swedish Preparatory Committee for the UN Conference on the human environment. *Air Pollution Across National Boundaries: The Impact on the Environment of Sulphur in Air and Precipitation.*, Royal Ministries of Foreign Affairs and Food, Stockholm 1971.
- (4) *Ottar, B.* Årsakene til nedbørens forurning. Rapport fra et samnordisk forskningsprosjekt, NORDFORSK, Miljøvårdsekretariatet, Publ. 1975:10.
- (5) *Rystad, B., Strømsøe S., Amble, E., Knudsen, T.*: The LRTAP Emission Survey (LRTAP 2/74). Norwegian Institute for Air Research, Kjeller.
- (6) *Georgii, H.-W., Jost, D.* (1964). *Pure and Applied Geophysics*, 50, 217.
- (7) *Rodhe, H.*: (1972) *J. Geophys. Res.*, 77, 4494.
- (8) *Nordø, J.* (1974) *Ann. Met.*, 9, 71.
- (9) *Bolin, B., Persson, G.* (1975) *Tellus*, 27, 289.
- (10) *Nordlund, G.* (1975) *J. Applied Met.*, 14, 1095.
- (11) *Scriven, R. A., Fisher, B. E. A.* (1975) *Atm. Env.*, 9, 49.
Scriven, R. A., Fisher, B.E.A. Ibid 9, 59.
- (12) *Fisher, B.E.A.* (1975) *ibid* 9, 1063.
- (13) *Eliassen, A., Saltbones, J.* (1975) *Atm. Env.*, 9, 425.
- (14) *Eliassen, A., Saltbones, J.* Sulphur Transport and Dry Deposition over Europe described by a simple Lagrangian model. (LRTAP 22/75), Norwegian Institute for Air Research, January 1976.
- (15) *Eliassen, A., Soltbones, J.* Sulphur Deposition Patterns over Europe estimated using a Lagrangian Dispersion model, concentration data and Precipitation Observations (LRTAP 21/75), Norwegian Institute for Air Research, December 1975.