

# Nedbørens forurening, transport av luftforurensninger over lange avstander

Forsker Jack Nordø

Jack Nordø er ansatt som forsker ved Meteorologisk institutt. Han er cand.real. fra Universitetet i Bergen i 1950, med meteorologi som hovedfag.

*Etter foredrag i Norsk Forening for Vassdragspleie og Vannhygiene, Ingeniørenes Hus 24. januar 1972.*

Overlagsberegninger viser at minst 20 %, kanskje opp til 40 %, av svovelforbindelsene i atmosfæren skyldes menneskelig aktivitet. Når en da vet at de industrialiserte områder bare dekker en liten brøkdel av jordoverflaten, så kan en slutte seg til at industri og boligoppvarming er ansvarlige for brorparten av forurensningene over Vest-Europa. Forurensningene avsettes langsomt ved kontakt med bakken og havoverflaten. Nedbørsaktivitet virker sterkt rensende på luftmassene. — Avstanden fra Midlands og Ruhr til Sørlandet er knapt 1000 km, og det tar vanligvis luftmassene omkring ett døgn for å tilbakelegge denne avstanden. Men selv om utslippene av forurensninger er store over kontinentet, kan små nærliggende kilder dominere det lokale forurensningsbilde. Det er derfor særs viktig å få et kvantitativt grunnlag for å fastslå de fjerne kilders betydning, idet bekjempelsen av slike forurensninger er et inter-

europaisk problem som må takles av politikerne.

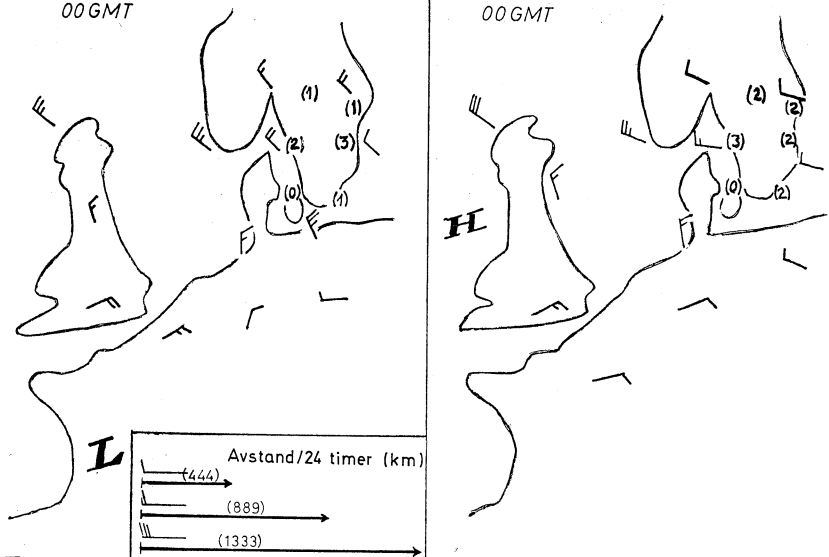
Den altoverveiende fjerntransport av luftforurensninger skjer ved vindsystemene til de vandrende lavtrykk og høytrykk. Værdata samles inn døgnet rundt i et tett nett over Europa. Kjenner en utslippkildenes størrelse og beliggenhet, kan en nytte alle disse værdata til å beregne spredningen av forurensningene utover Europa. Ved å sammenholde beregningene med målinger er det mulig å tilpasse parametrene i regneskjemaet, og deretter å teste modellen på aktuelle data. Det tar sin tid å få slike målinger, og en må foreløpig nøye seg med data fra Norge og Sverige. Saltbones vil i sitt foredrag vise preliminnære beregninger for en episode i 1969. —

Meteorologisk Institutt bruker et større regneanlegg til å beregne de atmosfæriske strømningsforhold de neste 48 timer. Ved å benytte disse beregningene i spredningsmodellen, er det mulig å beregne størrelsen av en fjerntransport og når den måtte inntre. Tilsvarende service er mulig for beregning av lokale konsentrasjo-

Fig.1 Tallene i ( ) er „48 timers verdier“ av  $\mu\text{g SO}_3/\text{m}^3$

3/9-69  
00 GMT

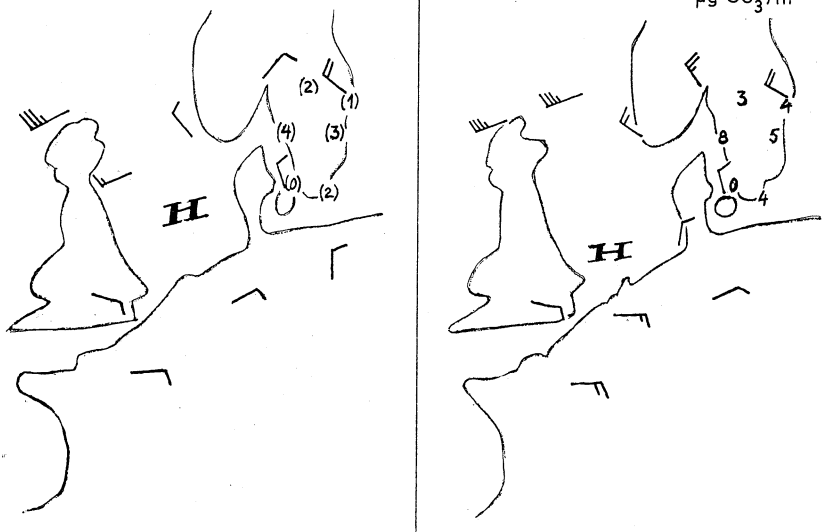
5/9-69  
00 GMT



7/9-69  
00 GMT

850 mb

Tallene er „24 timers verdier“ av  
8/9-69 00 GMT  $\mu\text{g SO}_3/\text{m}^3$



ner på grunn av nærutslipp, idet de lokale spredningsforhold primært er bestemt av den storstilte vær-situasjonen.

Et eksempel på transport av luftforurensninger over lange avstander fikk man ved utbruddet på Beerenberg høsten 1970. Beerenberg er den eneste aktive vulkan i Norge og den ligger på øya Jan Mayen i Nordishavet. Toppen har en høyde av vel 2 200 meter. Utbruddene varte i mange dager, og satelittbildene som ble mottatt av Meteorologisk Institutt viste store røykmasser.

På et bilde tatt dagen etter utbruddet ser en tydelig en røykfane mot sørøst som er veldefinert til en avstand av 4—500 km. To røykfaner er synlige på bildet og skyldes antagelig røykutvikling i to høyder. Fortynningen av røykmassene er tilsynelatende liten selv i en avstand av 300 km, og de indikerer at forurensninger fra en stor kilde kan gjøre seg gjeldende langt borte. I dette tilfelle ble det rapportert nedsett sikt etter hvert som restene av røykfanen kom inn til kysten av Nord-Norge.

Professor Brosset ved Institutt för Vatten och Luftvård har foretatt en rekke målinger av svovelinnholdet på aerosoler (meget små partikler, faste eller flytende, med så liten fallhastighet at de nærmest «flyter» i luften). Aerosolene fanges opp ved at luften suges gjennom tette filtre, og disse blir derpå analysert for svovel vha. røntgenfluorescens. Ved å analysere filtre fra et nett av stasjoner i søndre og midtre deler av Sverige, viste professor Brosset at de daglige målinger

gikk godt i takt over hele området. Dette indikerer en storstilt utbredelse av forurensningene, av samme dimensjon som strømmingene i atmosfæren. Her skal gjengis målinger fra september 1969 hvor Brosset's data sammenholdes med de aktuelle værforhold en gang i døgnet (00 GMT). I den daglige rutine bruker meteorologene data fra mange lag av atmosfæren fra jordoverflaten til en høyde av ca. 30 km. Her skal bare vindforholdene i ett nivå vises, nemlig de i 850 mb flaten. Denne trykkflaten ligger omtrent i 1500 meters høyde, og vindene i denne flaten er derfor ganske representative for transportforholdene i de lavere lag av atmosfæren. På de følgende kart er vindhastigheten tegnet inn i enhet av ti knob (ti knob tilsvare fem meter per sekund). En pil med tverrstreker angir retning og styrke for vinden. Symbolet  $\equiv$  betyr at vinden blåser fra venstre mot høyre og at styrken er 30 knob. Tilsvarende vil  $\equiv$  bety at det er vind fra bunnen av siden mot toppen, og at styrken er  $2\frac{1}{2}$  delstrek eller 25 knob. På Fig. 1 har en fremstilt værforholdene i begynnelsen av september 1969, og over Sverige er det gjengitt noen målinger fra Brosset's undersøkelser.

Det første kartet viser værforholdene 3. september, og en ser at det er vestenvind over Skandinavia. Luften er meget ren over Sverige med konsentrasjoner for  $\text{SO}_3$  på noen få mikrogram per  $\text{m}^3$ . Nå vil en vesentlig del av sbovelet på partiklene være som sulfat,  $\text{SO}_4$ , og tallene for sbovelet omregnet til sulfat er da 20 % høyere. Midt på figuren er angitt hvor stor

9/9-69

Fig. 2

10/9-69



Tallene er „24 timers verdier“ av  $\mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$

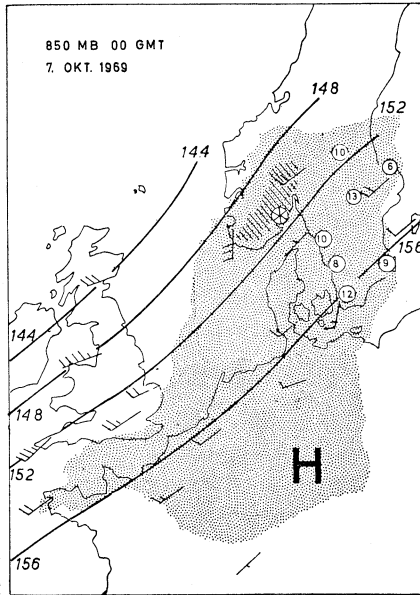
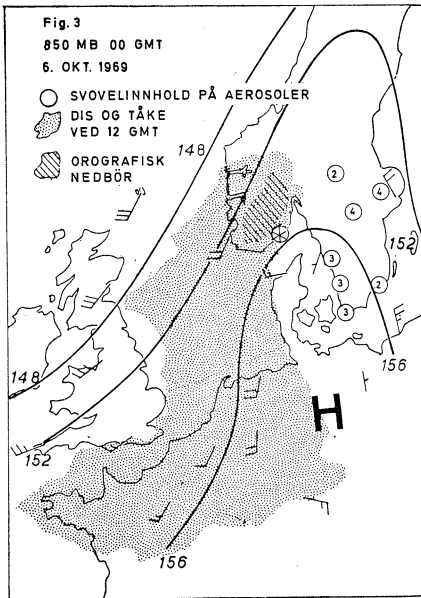
850 mb

00 GMT

11/9-69

12/9-69





distanse luftpartiklen tilbakelegger i et døgn ved ulike vindhastigheter. Er det f.eks. en sørvestlig luftstrøm på 20 knob over Nordsjøen, tar en luftpakke ett døgn fra Midlands i England til den når Vest-Agder. —

Kartene for den 5. og 7. september viser fortsatt luftstrøm direkte fra Atlanterhavet, og konsentrasjonene er jevnt over lave, nærmest som de en har for naturens egne prosesser.

Den 5. september ligger det et høytrykk over Irland, og to dager senere har det flyttet seg til Nordsjøen. Over England og de nordlige deler av kontinentet er det svake vinder med et østlig drag. Den vertikale skiktning av luftmassene er blitt meget stabil (normalt i høytrykksområder), og

den vertikale utveksling av luftforurensninger er svært liten. Slike værforhold vil føre til at det bygges opp høye konsentrasjoner i de lavere lagene av atmosfæren. Figurene 1 og 2 gjengir så daglige kart for perioden 3.—12. september. Når en vurderer de døgnlige konsentrasjonene av  $\text{SO}_2$ , må en ha i minne at værkartet er fra 00 GMT, dvs. i begynnelsen av døgnet. Værkartene viser at høytrykksentret beveger seg videre østover, og at de luftmassene som opprinnelig lå over England og kontinentet sannsynligvis kommer inn over Skandinavia i dagene 9.—12. september. Forurensningene kommer nordover rundt høytrykket og måles først i de vestlige og nordlige deler av det

området det observeres i. Saltbones vil i sitt innlegg vise beregninger nettopp for denne episoden.

Ved å blåse forurenset luft gjennom et dråpekammer vil en finne en meget stor renseeffekt, og vasketårn er derfor brukt i industriell målestokk til å rense avgasser. I naturen er nedbørsområdene mektige dråpekammer som raskt renser luftmassene, og fjerntransport av forurenninger er minimal under slike værforhold.

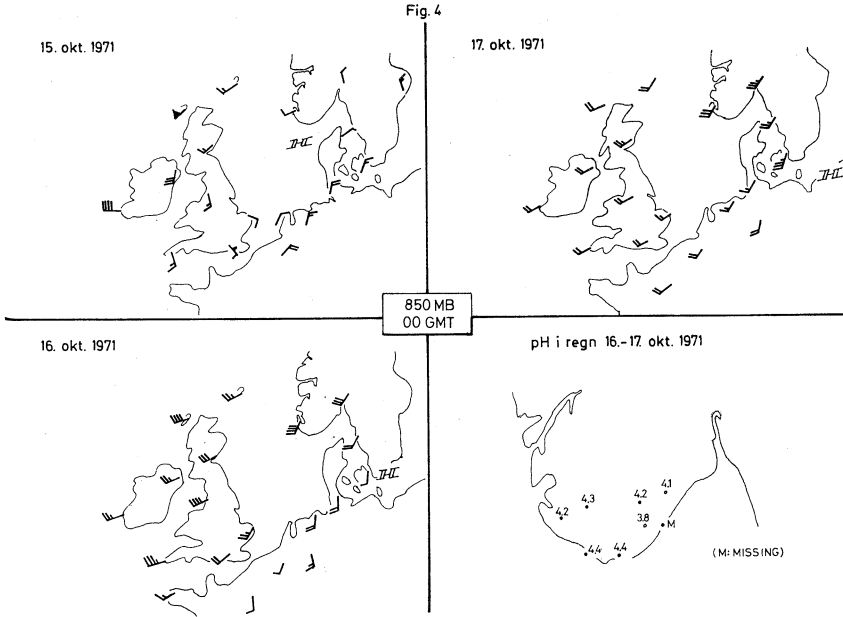
I de fleste områder av Norge vil det ofte oppstå vindforhold hvor luftmasser blir presset inn mot stigende terreng og løftes oppover i atmosfæren. Når luften heves vil den avkjøles p.g.a. ekspansjon (adiabatisk avkjøling), og metning kan inntre og påfølges av nedbørsutløsning (orografisk nedbør). Dersom luften var forurenset før den tvungne hevingen, vil forurenningene vaskes ut med nedbøren på vindsiden av fjellene. Områdene mellom Ryfylke og Oslofjorden har et stortiltet profil som lett kan føre til orografisk nedbør ved sørlige vinder. Vind fra denne kanten forekommer vanligst på forsiden av lavtrykk fra vest, og i denne sektoren av lavtrykket er det normalt stortiltet heving av luftmassene og utstrakte nedbørsområder. Noen nevneverdig transport av forurenninger er derfor lite sannsynlig under disse forholdene.

Men i noen spesielle vær-situasjoner ligger alt vel til rette for fjerntransport. Sør-Norge ligger da i utkanten av et høytrykksområde med sentret over kontinentet. Sentret må helst ligge sør eller sørøst for Norge. Luft-

massene over kontinentet og England er under slike værforhold forholdsvis stabile og vindforholdene er svake. Det vil da bygges fort opp betydelige konsentrasjoner av svovelforbindelser i de lavere lagene av atmosfæren over de industrialiserte strøkene av kontinentet og England. Dersom det så settes opp et sørlig vindfelt, f.eks. ved at et lavtrykk nærmer seg Storbritannia fra vest, vil den forurensete luften føres nordover og orografisk nedbør kan bli utløst når luften støter mot de norske fjellområdene. Dette er de værforhold som fører til svært sur nedbør. Er luftmassene på forhånd nokså fuktige, vil det kunne bli betydelige nedfall av surt regn helt ut til kysten. —

Som første eksempel på sur nedbør skal en vise forholdene 6.—7. oktober 1969. Situasjonen er tidligere beskrevet av Dannevig i Aftenposten. På disse to dagene falt det mellom 5 og 10 mm med nedbør over de sørlige deler av Norge, og pH ble i Flødevigen (utenfor Arendal) målt til å være henholdsvis 3,3 og 3,7. Situasjonen er gjengitt på Fig. 4. Som på de foregående figurer har en vist vindforholdene i 850 mb flaten, og en stjerne viser beliggenheten av Flødevigen. Over Sverige har en videre gjengitt noen av Brosset's målinger av svovelinnholdet på partikler. Økningen av dette fra den 6. til den 7. oktober er iøynefallende og står i forbindelse med at den sørlige luftstrømmen langsomt brer seg østover. I denne situasjonen var luftmassene meget stabile i de laveste 1500 m. Det er rapportert dis og tåkeskyer innenfor det prikkede området.

Fig. 4



I oktober 1971 begynte NILU å ta luft- og nedbørsprøver på en rekke stasjoner i Sør-Norge. Kjemiske analyser er nå tilgjengelige for de første seks ukene. I tre tilfelle forekom ganske sur nedbør, det gjelder døgnene 16.—17. oktober, 30.—31. oktober og 28.—29. november. Forut for slike episoder er det vanligvis høytrykk og svak vind over Vest-Europa. I en høyde av 1—2 km er den vertikale temperaturfordelingen svært stabil (ofte inversjon), og dette fører til at den vesentlige delen av forurensningene fra de store utslippene blir liggende i de lavere skikt av atmosfæren. Nærmende lavtrykk fra Atlanterhavet setter så opp en sørlig luftstrøm som fører de forurensede

luftmasser opp mot Norge. Vertikal løfting av luftmassene foran lavtrykket og tvungen heving mot fjellprofilet (orografisk nedbør) fører til at det utløses nedbør over Sør-Norge, og med nedbøren følger luftens innhold av forurensninger, deriblant svovelsyre. Fig. 4 viser pH-tallene for den første episoden. Manglende observasjon antydes med M. De observerte pH-verdier på Sørlandet ligger mellom 3,8 og 4,4, hvilket er forholdsvis surt. Den sureste nedbøren falt på Tvedten i Birkenes (pH = 3,8), som ligger i et nylig etablert forskningsfelt til å studere den sure nedbørens virkninger på vann, jordsmonn og plantevekst.

Neste sure nedbørstilfellet (Fig. 5)

inntraff mot slutten av oktober. Bare fire stasjoner hadde store nok nedbørmengder til at en kunne foreta kjemiske analyser. To stasjoner i Rogaland og Tvedten i Birkenes ga lave pH-verdier, dvs. meget sur nedbør. For en stasjon i indre Aust-Agder måltet pH til 4,4. Noen forklaring på denne lave surheten er det vanskelig å gi på meteorologisk hold; men nedbørsprøven var liten, og dette kan ha ført til at tørravsetning og andre effekter får innflytelse.

En skal også ta med en svært kort episode som inntraff mot slutten av november 1971. Den 27. var det vestlig vind over området, dvs. at forurensningene ble ført østover. Den neste dag, Fig. 6, dreide vindfeltet

mot sør over Nordsjøen. Nedbøren det påfølgende døgnet var meget sur over hele området øst for Langfjellenes utløpere mot Skagerak. Selv i Rogaland er det forholdsvis lave pH-verdier, hvilket skulle antyde at den første delen av nedbøren må ha vært ganske sur.

Hvordan er så surheten i nedbøren fra luftmasser som *ikke* nylig har passert de store industri- og befolkningssentre? Data fra 5.—8. november gis som et typisk eksempel, se Fig. 7. Et lavtrykk kommer inn fra vest, passerer gjennom Skagerak og videre østover gjennom Midt-Sverige. pH varierer stort sett mellom 5,0 og vel 6,0, hvilket er nokså normalt for luft som kommer direkte fra Nord-

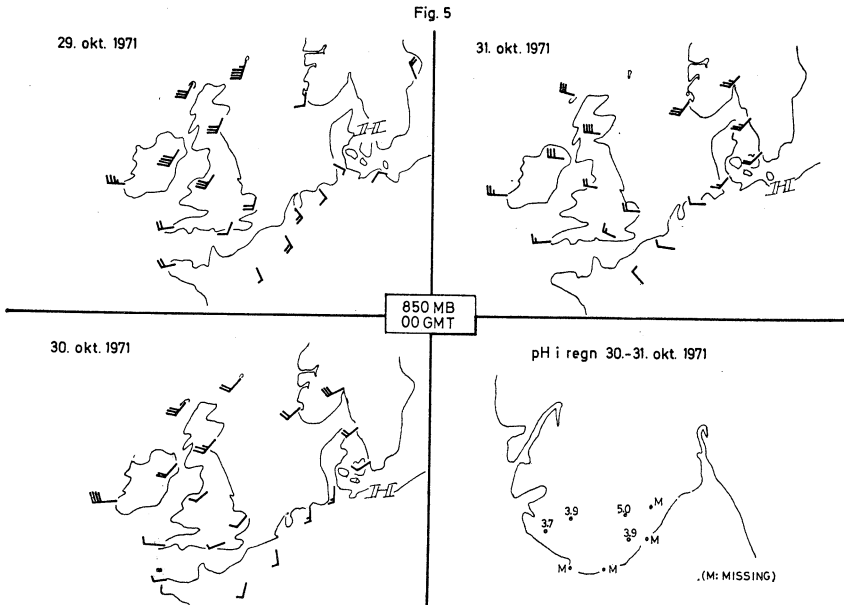
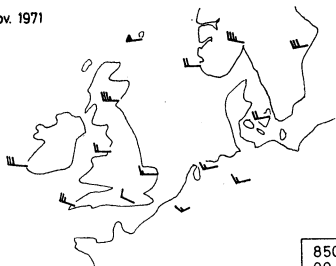


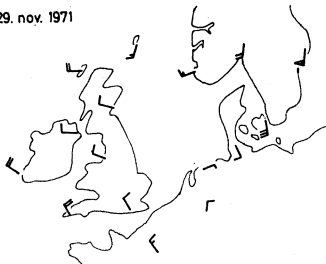


Fig. 6

27. nov. 1971



29. nov. 1971



850 MB  
00 GMT

28. nov. 1971



pH i regn 28.-29. nov. 1971

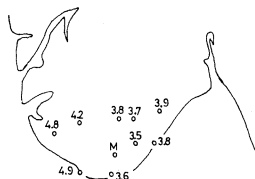
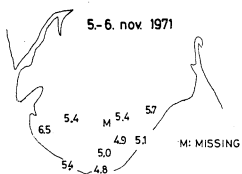
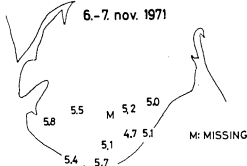


Fig. 7  
pH i NEDBÖR

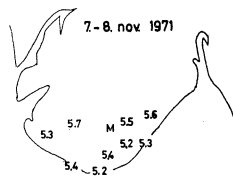
5.-6. nov. 1971



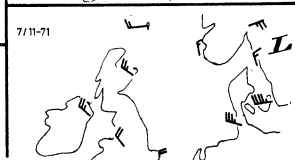
6.-7. nov. 1971



7.-8. nov. 1971



pH i NEDBÖR i  
RELATIVT „REN“ LUFT  
FRA NORDATLANTEROMRÅDET

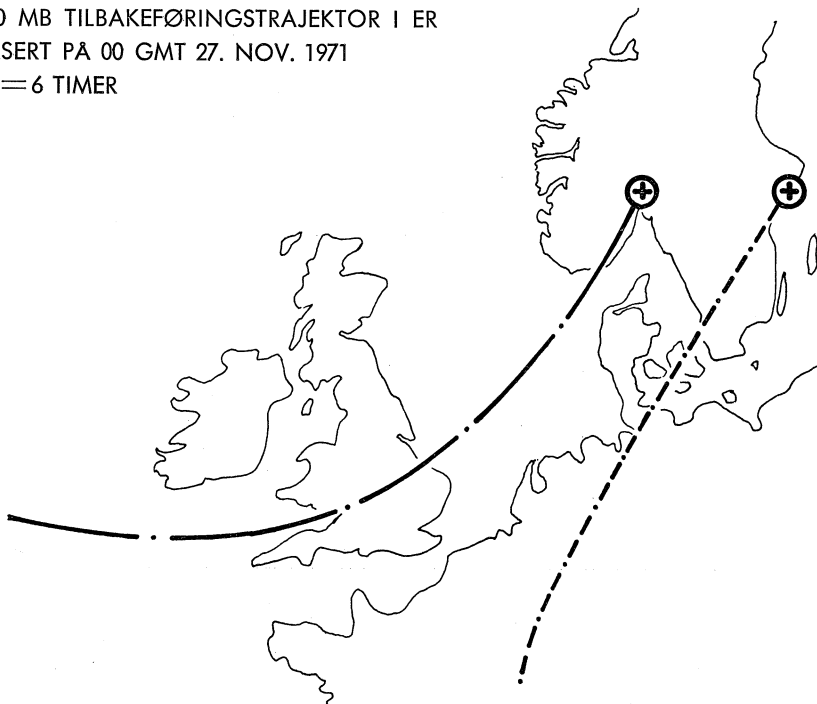


850 MB 00 GMT

Fig. 8

850 MB TILBAKEFØRINGSTRAJEKTOR I ER  
BASERT PÅ 00 GMT 27. NOV. 1971

$\Delta T = 6$  TIMER

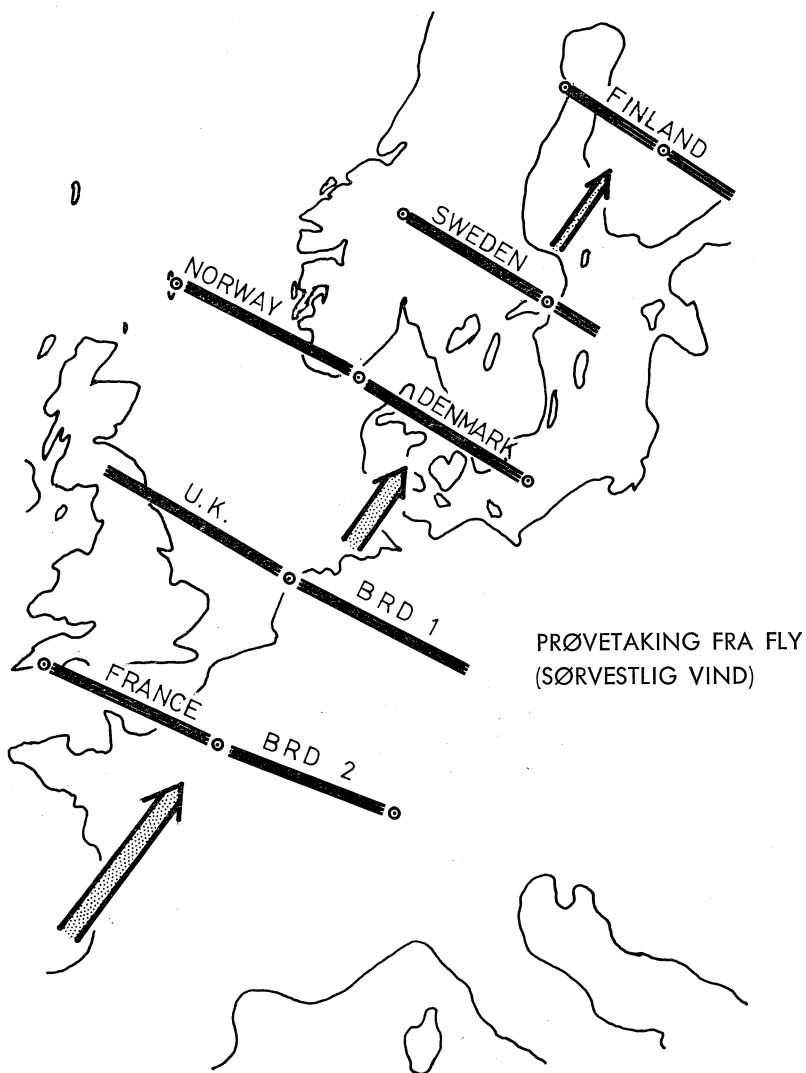


Atlanterhavet. Nå får Nord-Norge, Trøndelag og størstedelen av Vestlandet det meste av sin nedbør fra vestlig kant, og det er liten sannsynlighet for at disse luftmassene nylig har vært over de store sentre i Europa eller U.S.A. En har heller ikke observert noen tegn til økende surhet over disse strøkene av Norge. Rogaland, Agderfylkene og Telemark er derimot spesielt utsatt, idet de ofte har nedbør med luftmasser som strømmer inn fra sørlig kant, og som på sin vei har passert sentrene i Vest-Europa. Østlandet er også ut-

satt for nedbør under slike vind- og værforhold. Det er over disse strøkene av Norge at en har observert økende surhet av nedbøren i de siste desennier, i takt med de økede utslipp av svovelgasser i denne delen av verden.

Nå må en som sagt ikke tro at all nedbør i luft fra sørlig kant er sur. Sørlige vinder oppstår som oftest i forbindelse med et lavtrykk som nærmer seg fra vest. På forsiden (dvs. østsiden) av lavtrykket er det normalt et nedbørsområde (front), og nedbøren fører til en rask utvasking

Fig. 9



av luftforurensningene. Noen nevneverdig langtransport finner derfor ikke sted i denne værstsituasjon: Eksempelene ovenfor viser at sterkt sur nedbør på grunn av utslipp i fjernliggende kilder, normalt bare forekommer hvor det har vært liten eller ingen nedbørsaktivitet før luftmassene kommer frem til Norge. Oppstigende luftstrømmer på grunn av lavtrykksutvikling eller ved løfting mot fjellmassivet vil så kunne gi episoder med betenkelig sur nedbør.

Som nevnt vil Saltbones presentere noen numeriske beregninger for utbredelsen av luftforurensninger over Europa. En annen betraktningmåte vil også bli brukt, og den vil baseres på beregnede baner (trajektorier) for utvalgte luftpakker. En kan enten beregne banen bakover i tiden for å se hvilke områder luftpakken har passert og til hvilken tid; eller en kan beregne banen fremover i tiden for å se hvor og når den vil passere. På dette viset kan en f.eks. finne ut hvorfra den luften kom som passerte en målestasjon en gitt dag. Likeledes kan en følge luftpakken fra den forlater et større kildeområde og se når den eventuelt passerer et valgt måleområde. Beregningene kan enten baseres på observerte data for vitenskapelig bruk, eller en kan nytte varslede data for å vurdere om det oppstår en interessant eller kritisk forurensningssituasjon. En har i vinter hatt en slik varslingstjeneste gå-

ende for å ha en tilstrekkelig frist om en skulle sette i gang med flymålinger. Bortsett fra et tilløp mot slutten av november har det ikke vært noen lignende episoder som dem der inntraff høsten 1969. Som en illustrasjon på trajektorier skal en vise de varslede baner for den nevnte søndag i november, se Fig. 8.

O.E.C.D.'s plan for å studere transport av forurensninger over lange avstander baseres primært på ca. 80 målestasjoner ved jordoverflaten. Men det meste av fjernttransporten i atmosfæren skjer i luftlagene mellom noen hundre meter og tre tusen meter. Flymålinger er derfor vitale for prosjektet om en skal få etablert en pålitelig modell for transporten. Svenske og spesielt tyske forskere har alt utført en del målinger. England er nå også kommet i gang, og NILU har i disse dager fått utstyret klart. Det er ønskelig å samordne flyvningene, og på Fig. 9 er gjengitt et forslag til flyturer for en sør til sørvestlig luftstrøm.

Skal en prøve med få ord å gi status per i dag, så vil vel de fleste forskere godta at fjernttransport finner sted i visse episoder. Men det råder usikkerhet om hvor meget denne transporten utgjør kvantitativt. Når det store måleprogrammet til O.E.C.D.-planen blir gjennomført, skulle det være et berettiget håp om å få brukbare kvantitative anslag i løpet av noen år.