Ozon og ozonhuller

Aksel Walløe Hansen, Geofysisk Institut, Københavns Universitet

Atmosfærens indhold af ozon ændrer sig i disse årtier. I troposfæren (0-15 km's højde) vokser indholdet, mens det falder i stratosfæren (15-50 km). Begge dele menes at have deres årsag i menneskelig aktivitet og kan forventes at forvolde skader på plante- og dyrelivet samt bidrage til klimaændringer.

Problemerne med det faldende ozonindhold i stratosfæren deler sig i to typer. Det ene er globalt og tilskrives en generel forurening af atmosfæren med CFC-gasser. Det andet er regionalt/lokalt, men mere intenst. Indtil nu er dette fænomen - bedre kendt under betegnelsen et ozonhul - kun observeret over Antarktis.

Begivenhederne har optaget såvel forskere som den brede offentlighed. Debatten har været domineret af kontroversen mellem dem, der tror på den kemiske forklaring og dem, der mener, at udviklingen er et udslag af klimavariationer. Sandsynligvis ligger sandheden et sted imellem disse to yderpunkter. I hvert tilfælde når det gælder ozonhullerne, regnes det nu for en kendsgerning, at de helt ekstreme klimatiske forhold over Antarktis er en nødvendig betingelse for dannelsen af hullerne, mens forureningen med freongasser er den udløsende faktor.

Denne artikel vil omhandle det stratosfæriske problem og specielt koncentrere sig om den grundlæggende teori for ozons dannelse, nedbrydning samt fordelingen af ozon. I slutningen af artiklen vil der være en diskussion af de foruroligende fald i ozonindholdet i den sydpolare stratosfære. Derimod vil samspillet mellem ozon og de meteorologiske/klimatologiske forhold blive beskrevet i en senere, selvstændig artikel.

Indledning

Meteorologer har traditionelt haft den opfattelse, at vejr og klima er det, der foregår i de nederste 15 km af atmosfæren, nemlig troposfærens vejrsystemer. Men denne opfattelse er nu under revision. Forståelsen af de fysiske-kemiske processer i den del af atmosfæren, der ligger over de 15 km, har i flere sammenhænge vist sig at have afgørende betydning.

Det er selvfølgelig ikke uden grund, at det har været en almindelig opfattelse, at stratosfæren fungerer som et slags låg på den underliggende og langt mere aktive troposfære. Det er således kun i troposfæren, der dannes de vejrbegivenheder, vi kender fra dagligdagen. Det gælder eksempelvis det omskiftelige vejr, vi lever med på vore breddegrader. Dette vejr skyldes, at der i det såkaldte vestenvindsbælte omkring 45-60°N til stadighed udvikles høj- og lavtryk, som bevæger sig rundt om Jorden, normalt fra vest mod øst. Det er også i troposfæren, at langt de fleste skyer dannes (det skal dog senere blive demonstreret, at nogle af de få skyer, der dannes i stratosfæren, har stor betydning for ozonnedbrydningen over Antarktis). Nedbør kendes kun fra skyer i troposfæren. Stratosfærens virkning som et låg kan iagttages på en varm sommerdag, hvor der udvikles kraftige tordenbyger. Ved optrækket til tordenbygen ser man ofte en udbredt og diffus skytop. Luften er inde i skyen nået op til højder omkring 12-15 km, hvor stratosfæren starter. Det er svært for ikke at sige umuligt for en sådan luftstrøm at trænge ind i stratosfæren, hvorfor luften søger ud til siden. Dette ses som den diffuse top.

Troposfæren er altså en aktiv maskine, hvor der hele tiden omsættes store mængder energi. Det er kendetegnende for en sådan maskine, at der i forbindelse med energiomsætningen normalt forekommer vertikale bevægelser, hvilket giver god opblanding. Vi observerer da også, at troposfæren er langt mere homogen i vertikal retning, end atmosfæren er højere oppe.

Boks 1

Mængden af atmosfærisk ozon angives ofte på tre forskellige måder, nemlig som:

a) antal ozon molekyler pr. m^3
b) brøkdelen af 1 m^3 luft, der er ozon

eller

c) den totale mængde ozon i en luftsøjle over 1 m^2.

Version b) kaldes et blandingsforhold. Et blandingsforhold kan også angive, hvor stor ozonmassen er i 1 kg luft.

De to første mål angiver koncentrationer, b) angives i ppmv (antal rumfangsenheder ozon pr. million luftenheder) (eller hvis det angives i masseenheder blot ppm), mens c) er en integreret størrelse. Den måles i Dobson-enheder, se boks 2. Vi vil herefter omtale en luftsøjles Dobson-tal som ozons søjleværdi.

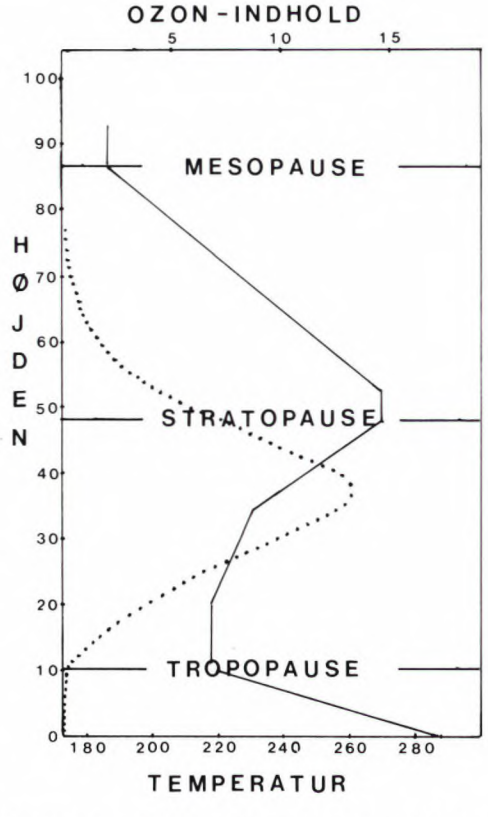
De største koncentrationer af ozon findes, hvor sollyset har størst effekt, men man får lidt forskellige resultater alt efter om man bruger det ene mål eller det andet. Således finder man de højeste ppmv-tal i store højder, med de største over Ækvator, mens det højeste antal ozonmolekyler pr. m^3 findes ved noget lavere højder og følger med solen mod sommerhalvkuglen. Man skal bemærke, at et mindre ppmv-tal kan give flere molekyler absolut set, hvis luften alt i alt er tilsvarende tættere. De største koncentrationer, udtrykt for eksempel i ppmv-enheder, findes i en højde på cirka 37 km (se figur 1), mens det højeste antal molekyler pr rumfangsenhed luft allerede nås i omkring 22 km's højde.

Boks 2 Hvad er en DU ?

Atmosfærens ozon findes ved meget forskellige tryk og temperaturer. I mange situationer er man kun interesseret i den totale ozon-masse i en luftsøjle, fra jordoverfladen og op til atmosfærens top. Som enhed kunne man naturligvis anvende massen af ozon pr. arealenhed, kg/m^2. Men af historiske årsager har man valgt at angive det totale ozonindhold som højden af det rene ozonlag, man kunne danne, dersom al ozonen - i en luftsøjle - blev bragt ned til jordoverfladen ved normalt tryk og temperatur dér. Yderligere har man valgt en anden højdeskala end normalt: højden af ozonlaget måles i Dobson-enheder (DU), hvor 1 DU = 1/100 mm.

Atmosfærens totale ozon-indhold svinger mellem 150 DU og 450 DU, med en middelværdi på cirka 300 DU = 3 mm!

Til sammenligning: et rent CO_2-lag skabt på en tilsvarende måde vil fylde omkring 3 meter.



Figur 1. Temperaturens forløb med højden er vist med fuldt optrukken linie, mens ozonfordelingen er angivet ved den prikkede linie.

Skalaen for temperatur er udtrykt i absolut-temperatur, og er givet forneden, mens ozonskalaen er vist foroven og viser blandingsforholdet, det vil sige hvor stor en brøkdel af en given rumfang luft, der er ozon. Højden over jordoverfladen er angivet i km.

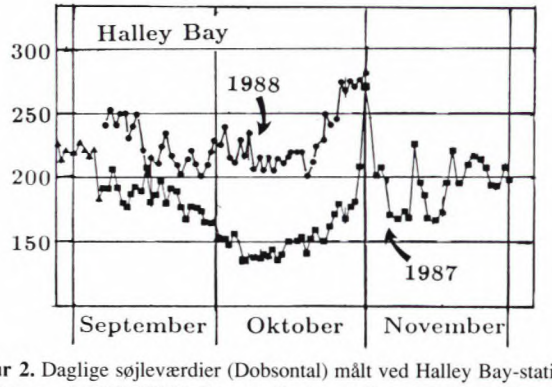
Begge de viste kurver repræsenterer gennemsnitsforhold, karakteristisk for mellembreddegrader. Det skal således bemærkes, at på højere breddegrader vil både ozon-maksimaet og tropospausen ligge væsentligt lavere.

I figur 1 er vist en skitse af atmosfærens vertikale struktur. Den konstante eller stigende temperatur med højden gør stratosfæren til et meget stabilt lag og afslører, at opblandingen i vertikal retning må være ringe. Forskydninger i vertikal retning dæmpes kraftigt på grund af temperaturfordelingen. Man siger, at der er negativ opdrift eller hvad der er mere normalt i meteorologisk sprogbrug, at laget er statisk stabilt. Den svage omrøring i vertikal retning gør selvfølgelig, at der kan være store forskelle mellem for eksempel stratosfærens bund og dens top, hvad angår tilstedeværelsen af kemiske stoffer og de processer, de indgår i.

Et andet resultat er, at stratosfæren taget som helhed ikke kan producere energi. Der må til stadighed pumpes energi ind i laget. Dette sker igennem den mekaniske kontakt til troposfæren nedenunder. Høj- og lavtryk, der bevæger sig, resulterer i bølgeforplantning af energi til stratosfæren.

Men hvad fik egentlig det simple verdensbillede til at smuldre? Hvorfor er det nu et stærkt opprioriteret forskningsområde at studere stratosfærefysik/-kemi ?

Svaret på dette spørgsmål finder vi tilbage i 60'erne og 70'erne, hvor man for første gang kunne påvise, at en række miljømæssige problemer udvikler og manifesterer sig i stratosfæren, selv om de kan have deres årsager ved jordoverfladen i form af udslip af potentielt farlige stoffer. Man måtte erkende, at stratosfæren nok ikke var så død endda, men at den netop på grund af generelt langt større tidskonstanter, og fordi fotokemien er så vigtig, kunne være arnestedet for skadelige processer.



Figur 2. Daglige søjleværdier (Dobsontal) målt ved Halley Bay-stationen, der ligger på 75°S, 26°W. Sammenligning mellem 1988 og 1987, der var året med de indtil nu laveste målte værdier.

Både meteorologer og atmosfærekemikere ser derfor nu atmosfæren som en helhed. Det er ikke mere tilstrækkeligt at betragte atmosfæren som blot en energiomsættende, fysisk maskine - der må også tages hensyn til atmosfærens kemiske processer, som foregår overalt. I stor højde er de fysiske omgivelser så meget anderledes end nær jordoverfladen, at mange kemiske processer får nye interessante konsekvenser dér. Hvad man har lært om atmosfærekemi ved studier nær jordoverfladen er derfor ikke tilstrækkeligt, når det gælder stratosfæren.

Det er et interessant og videnskabeligt udfordrende

billede, der således er ved at danne sig. Den meteorologiske atmosfæremaskine skal kobles til den kemiske reaktor, som atmosfæren i en vis forstand også er. Der er tale om en udpræget tværvidenskabelig problemstilling, som også bør tale til fysikere. Kemikere, fysikere og meteorologer må tage hinanden i hånden og hver især inddrage de andres metoder og viden.

Kemiens rolle vil blive klargjort i denne artikel og er i høj grad knyttet til gasfaseprocesser, dvs reaktioner mellem gasarter i atmosfæren. For fysikere har det måske særlig interesse, at der eksisterer en tæt kobling af kemien og fysikken, eksemplificeret ved de heterogene processer, der finder sted på overflader af partikler i atmosfæren. Disse partikler er ganske små, og vi taler om atmosfæriske aerosoler.

Jordens atmosfære er igennem hele dens levealder blevet "forurenet" med sådanne aktive partikler og gasser. Det kan ske ved udslip fra Jordens indre, for eksempel igennem vulkaner, eller fra universet og fra processer ved overfladen. Da atmosfæren imidlertid synes at have haft en nogenlunde stabil sammensætning over en meget lang periode, må den også have sine egne renseprocesser. Her spiller kemien en stor rolle, naturligvis sammen med de fysiske processer som udvaskning ved nedbørsdannelse og tørdeposition, dvs afsætning på overfladen ved direkte kontakt mellem luften og den fysiske overflade.

Den kraftige vækst i udforskningen af stratosfæren har især været koncentreret omkring stratosfærens indhold af ozon. Den særlige interesse skyldes naturligvis ozons store betydning for livet på jordoverfladen, idet denne gas (sammen med atmosfærens indhold af ilt) virker som et effektivt værn mod den mest skadelige del af det ultraviolette lys (UV-lys) fra Solen, og desværre tyder en del undersøgelser på en vis svækkelse af ozonlaget. Ilten tager sig af UV-lys med bølgelængder mindre end 240 nm (1nm = 10^{-9} meter), mens ozon beskytter mod UV-lys med bølgelængder fra 240 nm til 290 nm. UV-lys er en fællesbetegnelse for strålingen fra Solen med bølgelængder fra 200 nm til 400 nm. Midt i dette interval er atmosfærens indhold af ozon den eneste beskyttelse af Jordens plante- og dyreliv mod Solens UV-lys.

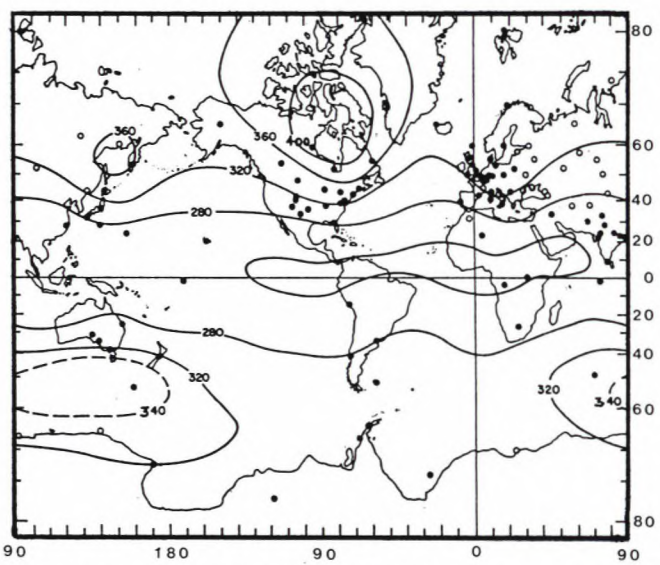
Ozon

Ozon er en sekundær gas, da den dannes i atmosfæren og ikke har nogen kilde af betydning ved jordoverfladen.Ozon har i store koncentrationer et blåligt skær og kan eksplodere. Men heldigvis - i denne forstand - er atmosfærens indhold af ozon ganske ringe. I troposfæren er mindre end 1 milliontedel af luften ozon, mens der i stratosfæren kan være op til 10 milliontedele. Se figur 1, hvor man kan følge ozonkoncentrationens karakteristiske forløb op igennem atmosfæren.

Det relativt set høje indhold af ozon i stratosfæren skyldes, at man dér på én gang har et stort indhold af ilt og et næsten usvækket indfald af sollys. Ilten er oprindeligt dannet af levende organismer ved omdannelse af kuldioxyd. Ret tidligt i Jordens historie har ozonindholdet nået et niveau, der stort set svarer til det nutidige og således har været baggrunden for udviklingen af liv på land og i vandoverfladen. Troposfærens indhold af ozon er som nævnt stigende og tilskrives kemiske processer i troposfæren selv samt blandingsprocesser mellem troposfære- og stratosfæreluft. Stigningen skyldes ændringer i troposfærens kemi på grund af en almen luftforurening.

Biologer og medicinere har beregnet, hvilke effekter et reduceret ozonindhold vil have på dyr og planter. Ingen levende organisme synes at have fordel af mindre ozon i stratosfæren og dermed mere UV-lys ved overfladen.Igennem Jordens udviklingshistorie har liv justeret sig ind efter et ozonlag, der tager sin del af det hårde UV-lys, hvorfor selv få procents formindskelse angiveligt kan føre til væsentlige biologiske skader, som for eksempel hudkræft.

I denne artikel er det ikke hensigten at beskrive de biologiske effekter. Det skal dog nævnes, at en del af det biologisk set interessante UV-lys forekommer ved bølgelængder, hvor ozon absorberer dårligt. Betydningen af et faldende ozonindhold er derfor ikke helt simpel at udlede. Ingen målinger synes endnu at have påvist en systematisk stigning i UV-lyset. Kun på kysten af Antarktis er der i forbindelse med forekomsterne af ozonhuller rapporteret stigninger. (se iøvrigt boks 3)



Figur 3. Geografisk fordeling af søjleværdier af ozon. Gennemsnit over en 10-årig periode (1957-66, altså før ozonhullets udvikling). Værdier er angivet i Dobson-enheder (se boks 2). Et bælte af lave værdier findes i troperne, mens der er en tydelig variation i øst/vest-retningen på høje breddegrader. Bemærk for eksempel maksimaet over Canada. Ozonstationerne er angivet i figuren ved åbne cirkler (Dobson's oprindelige måleteknik) eller lukkede cirkler, der repræsenterer andre typer.

I figur 3 er ozonfordelingen vist, som den geografiske fordeling af søjleværdierne. Vi ser, at de største mængder findes forholdsvis tæt ved polerne med værdier omkring 400 DU, mens der ved Ækvator er ca. 250 DU. Vi noterer os, at den geografiske variation er karakteriseret ved denne variation nord-syd, men også at der er markante variationer øst-vest. Det vil være naturligt at søge forklaringen på disse variationer i luftens strømninger, såvel vertikalt som horisontalt. Der er en tydelig årstidsvariation i søjleværdier-

ne på høje breddegrader, mens der ved Ækvator kun ses småændringer i årets løb.

Det er værd at notere sig, at livet på høje breddegrader beskyttes mod for høje doser af UV-lys på hele to måder :

1) den gennemsnitlige højde af Solen over horisonten er mindre end i troperne, hvorved sollyset skal igennem mere luft og dermed alt andet lige også igennem mere ozon;
2) alt andet er ikke lige, da der faktisk er mere ozon på de høje breddegrader.

Produktion og nedbrydning af ozon

Der sker til stadighed produktion og nedbrydning af ozon i stratosfæren. Balancen på et givet sted er givet ved netto-effekten af: lokal produktion og nedbrydning og hvor meget der transporteres til eller fra stedet.

Produktion og nedbrydning er kemiske processer, der forløber under påvirkning af sollyset og derfor kaldes fotokemiske processer. De meteorologiske forhold (d.v.s. atmosfærens strømninger og de kræfter, der styrer strømningerne) er ansvarlig for transporten, men der er en tilbagekobling, idet fotokemien påvirker temperaturfordelingen, der igen påvirker strømningen og dermed transporterne.

De fotokemiske processer har været kendt i flere årtier. En samlet forståelse kan tilskrives englænderen S. Chapman, der som den første også gav en forklaring på eksistensen af et egentlig stratosfærisk ozonlag. Ifølge Chapman dannes ozon ved sollysets indvirkning på atmosfærens indhold af ilt.

Chapmans ligninger kan skrives

1) $$O_2 + h\nu \rightarrow O + O$$

der efterfølges af

2) $$O_2 + O \xrightarrow{M} O_3$$

I reaktion 1) betyder + $h\nu$, at der absorberes et energikvant $h\nu$ fra sollyset. Bølgelængden af det absorberede 'lys' er mindre end 240 nm og ligger i den del af UV-området, man kalder UV-C stråling. Denne stråling kaldes også hård, da den let trænger ind i levende organismers celler og ødelægger disse.

Atmosfæren indeholder så meget ilt, at processen 1) effektivt blokerer for al den hårde stråling, før den når overfladen. Ja, faktisk er det meste af absorptionen af denne del af UV-C lyset allerede overstået i højder over ca 35 km.

I reaktion 2) står bogstavet M som et symbol på et molekyle, der ikke selv tager del i processen, men fjerner den frigjorte energi. M kan for eksempel være et kvælstofmolekyle, som der jo er flest af i atmosfæren.

Ozons beskyttende virkning mod UV-lys skyldes følgende proces

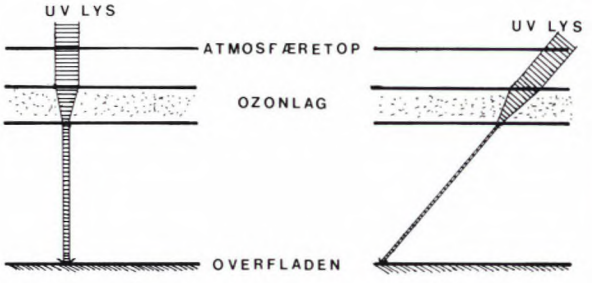
3) $$O_3 + h\nu \rightarrow O + O_2$$

I dette tilfælde er energien $h\nu$ mindre end i 1), hvorfor bølgelængden er større. Absorptionen virker stærkest omkring 250 nm, men fortsætter med stor effekt op til omkring 300 nm. Strålingen ved disse bølgelængder omtales som blødere, fordi energimængden $h\nu$ mindre.

Man taler om UV-B lys, når bølgelængden er større end 280 nm. De biologiske effekter af UV-B strålingen studeres intenst i disse år, idet strålingen i området 290-300 nm påvirkes kraftigt af ændringer i ozonlagets tykkelse. Det skal her blot bemærkes, at nok bliver en del UV-B lys filtreret

Boks 3

Ozon's evne til at absorbere UV-lys vokser med den samlede ozonmængde, lyset gennemløber. Hvis Solen står lavt over horisonten, skal en lysstråle gennemløbe en længere distance i ozonlaget og dermed en større ozonmængde, end hvis Solen står højt.
Dette kan illustreres som vist i efterfølgende figur

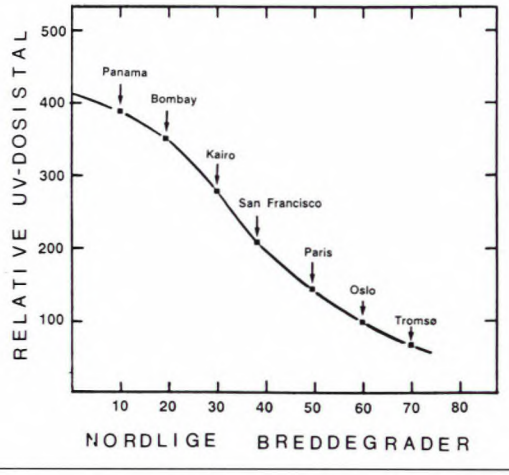


I figuren til venstre når mere UV-lys ned til jordoverfladen end i tilfældet til højre. Figuren illustrerer de kvalitative forskelle mellem sommer og vinter samt mellem Ækvatornære egne og høje breddegrader i gennemsnit.

Ved at samle det indfaldende UV-lys op over et helt år, bliver kun breddegradsafhængigheden tilbage.

I nedenstående figur vises resultatet af en beregning af denne variation.

Tallene for den samlede UV-dosis er angivet i relative enheder, således at værdien er 100 i Oslo, som ligger på 60°N.





(Herover) Fotografi taget på McMurdo-stationen om aftenen den 28. august 1987. Den stærke rødlige farve skyldes sollysets spredning i stratosfæren, der på dette tidspunkt sandsynligvis har haft et stort indhold af mange faste, men meget små partikler.



(til venstre) Fotografi taget samme sted, blot den 20. september 1987. På denne dag er der i cirka 20 km's højde et skylag, såkaldte perlemors-skyer, der dannes på grund af luftens opstigning hen over en bjergkæde.

bort af ozonlaget, men der kommer dog noget af det ned til jordoverfladen.

Ligningerne 2) og 3) beskriver hurtige processer, som regulerer den relative fordeling af ilt i form af O og O_3. Chapman afrundede sin ozonmodel med følgende ozonnedbrydende proces

4) $$O_3 + O \rightarrow O_2 + O_2$$

Denne reaktion var i mange år den eneste proces, man kunne pege på, når man skulle forklare, hvordan der kunne etableres en balance i ozonindholdet. Samlet kan reaktionerne 1)- 4) nemlig beskrive en global ligevægt for ilt og ozon. Men man blev hurtigt klar over, at Chapmans model ikke kunne give en præcis kvantitativ beskrivelse. Det er nemlig således, at med de kendte hastigheder for processerne kunne man beregne, at der burde være væsentligt mere ozon, end man observerer. Reaktion 4) foregår langsomt og er specielt ineffektiv i højder under 25 km. Resultatet er, at levetiden for ozonmolekylerne stiger til flere år, når de via luftbevægelserne bringes ned under denne højde, hvor O-koncentrationen er ganske lav.

Den kvantitative uoverensstemmelsen mellem teori og observationer afklares nedenfor, men først skal det noteres, at reaktionerne 1) - 4) faktisk giver en fyldestgørende forklaring -omend kun kvalitativ - på den vertikale fordeling af ozonindholdet. Vi kan nemlig se, at ozonkoncentrationerne må have et maksimum et stykke oppe i atmosfæren, idet ligevægtstilstanden fremkommer som resultatet af to modsat rettede effekter: styrken af den nødvendige hårde UV-stråling falder ned igennem atmosfæren, mens det tilstedeværende iltindhold stiger, og dermed sandsynligheden for dannelse af frie iltatomer, som krævet i reaktion 2). Men som antydet ovenfor spiller transporten af de dannede ozonmolekyler også en stor rolle.

Konflikten mellem det beregnede ozonindhold i stratosfæren og det målte var erkendt i 30'erne og 40'erne. Først i løbet af 50'erne blev man opmærksom på betydningen af visse stoffers katalytiske egenskaber i reguleringen af ozonindholdet. Det var især iltforbindelser af kvælstof, man fokuserede på. En medvirkende drivkraft til en stærk indsats inden for udforskningen af dette atmosfære-kemiske problem var behovet for viden om, hvilke effekter det ville have på ozonlaget, dersom man igangsatte overlydsflyvninger og senere også opsendelser af rumfærger.

I 1960'erne forestillede man sig virkelig tæt trafik med disse transportmaskiner, hvilket ville medføre meget store udslip af NO-forbindelser og klorforbindelser. Debatten blev også ført i offentligheden og var vel ligeså hed som den nuværende omkring CFC-gasserne.

Men overlydsflyvningerne startede og rumfærgerne blev sendt op, i begge tilfælde dog i langt mindre omfang end forventet. Vi må konstatere, at hvis der overhovedet har været skader, har disse været minimale, og vores kemiske forståelse af stratosfæren giver ikke mere grund til den samme bekymring som tidligere.

Ud af debatten voksede den i indledningen omtalte stærke videnskabelig interesse for en bedre forståelse af atmosfærens kemi og specielt den del, der foregår i stratosfæren. Hurtigt derefter blev meteorologerne inddraget i den igangsatte udvikling. Kimen til de meget bredt anlagte projekter for 1990'erne var dermed lagt, og den globale, tværfaglige miljøforskning var født.

Vores nuværende viden om stratosfærens kemi siger, at mængden af ozon reguleres af forbindelser som NO_x, ClO_x og HO_x. Nogle af disse er kemiske forbindelser, andre er frie radikaler, som blot deltager katalytisk i processer, der fastlægger ozonindholdet.

Hvis vi lader X repræsentere en af disse forbindelser kan de ozonnedbrydende, katalytiske processer beskrives ved følgende generelle reaktionsligninger

5) $$X + O_3 \rightarrow XO + O_2$$

og

6) $$XO + O \rightarrow X + O_2$$

som tilsammen giver

7) $$O_3 + O \rightarrow O_2 + O_2$$

Vi kan nu se, at nettoeffekten er præcist den samme som i Chapmans model. Pointen er blot, at processerne 5) og 6) forløber meget hurtigere. På denne måde får man en meget bedre kvantitativ overensstemmelse mellem beregnede ozonværdier og de målte.

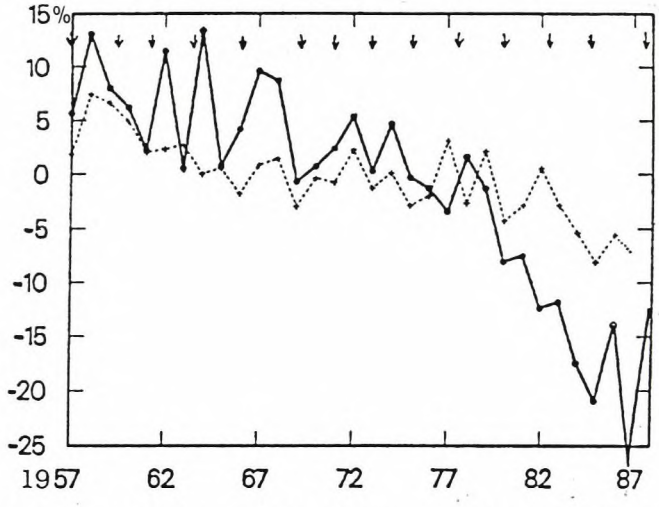
Der er naturlige kilder til de nævnte radikaler. Specielt er det interessant at spørge om kilden til NO_x. Det viser sig, at en vigtig kilde er N_2O (lattergas). Denne gas dannes i naturen for eksempel af levende organismer i jordoverfladen, men kan også have et menneskeskabt udspring for eksempel fra kraftværker. N_2O stiger forholdsvis uforstyrret op igennem troposfæren og først i stratosfæren spaltes gassen til frie radikaler. Man kan derfor udtrykke det således, at lattergas opfører sig som en slags naturens egen CFC-gas. Man kan yderligere bemærke, at livet på Jorden altså aktivt deltager i reguleringen af den for liv på én gang så livsnødvendige og giftige luftart ozon. Man skal bemærke, at mængden af N_2O i atmosfæren er stærkt stigende i disse år.

Det skal til slut nævnes, at man nu kan opfatte det som et videnskabeligt bevist faktum, at menneskeheden er i færd med at forstyrre balancen mellem de ozonregulerende katalysatorer og selve ozonproduktionen. Dette skyldes dannelsen af et nyt stort ClO_x-reservoir gennem udslip af CFC-gasser. Vi må se i øjnene, at en konsekvens heraf kan være, at de regulerende processer tager overhånd og driver balancen mod et lavere ozonindhold.

Truslen mod ozonlaget

Teoretiske overvejelser i form af beregninger med computermodeller viser, at ozonlaget omkring 20-40 km's højde er i fare for at blive udtyndet p.g.a. forurening af atmosfæren med de efterhånden så berømte og berygtede CFC-gasser, hvoraf de mest kendte er freon-gasserne.

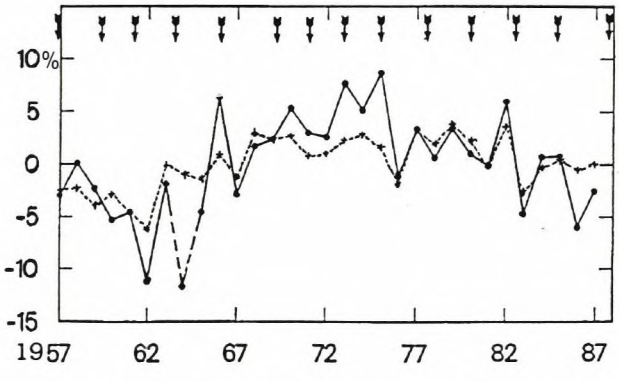
FIG 4a



Figur 4a. Udsving i sæsonværdier af gennemsnittet af 4 stationer langs kysten af Antarktika. Den fuldt optrukne linie viser udviklingen for gennemsnittet over forårsmånederne september til december. Den prikkede kurve viser tilsvarende værdier for sommerperioden januar til marts. Udsvingene er angivet i procenter. Man skal bemærke, at udviklingen er væsentligt mindre dramatisk i sommermånederne end i foråret.

Helt nye og endnu ikke publicerede data fra 1989 synes at indikere et tilbagefald til en situation, der ligner 1987. I begyndelsen af oktober 1989 observerede man som det laveste værdier omkring 125 DU.

FIG 4b



Figur 4b. Tilsvarende udvikling i det arktiske område, her dog gennemsnit for 12 stationer nord for 59°N. Sommer er her maj til august, mens den fuldt optrukne linie her viser vinterperioden december til marts. Man bemærker, at der ikke kan ses vedvarende tendens til lavere og lavere ozonindhold på høje breddegrader på den nordlige halvkugle.

Disse gasser er kemisk inaktive og kan overleve en langsom opstigning igennem troposfæren. Men vel ankommet til stratosfæren begynder der at ske ting og sager. I denne højde er UV-lyset mere intenst og stærk nok til at splitte CFC-molekylerne. Et produkt af denne proces er klor i form af kloratomer, der er kemisk meget aktiv og kan deltage katalytisk i ozonnedbrydende processer. Det må kaldes skæbnens ironi, at årsagen til, at CFC-gasserne uhindret kan nå op i stratosfæren og dér true ozonlaget, lige netop er ozonlaget selv.

Det er et skræmmende faktum, at selv om vi øjeblikkeligt stoppede al CFC-udslip, ville øgningen af stratosfærens indhold af disse gasser og produkter dannet heraf fortsætte i mange år endnu. Dette tilskrives den langsomme opstigning, der bevirker, at koncentrationerne i troposfæren er højere end i en ligevægtssituation, hvor nedbrydningen i stratosfæren lige netop balancerer transporten op fra troposfæren.

Verden blev advaret om en mulig negativ udvikling allerede i 1974, da den amerikanske kemiker Rowland fremlagde beregninger, der viste at en ozonnedbrydning måtte være igang, og at den sandsynligvis ville blive værre i årene fremover. Men signalerne fra naturen selv var ikke klare nok, og problemet tiltrak efterhånden mindre og mindre opmærksomhed. Kun i USA tog man de første spæde skridt til standsning af produktionen af CFC-gasser.

Men billedet ændrede sig radikalt i 1985, da engelske forskere kunne berette om hurtige og store fald i ozonindholdet i stratosfæren over Antarktis. Dette var begivenheden, der kunne sætte skub i udviklingen. Her var konkret syn for sagn, selv om fænomenet kun delvist er sammenhængende med det globale, generelle ozonproblem.

I faglitteraturen og folkemunde kendes det antarktiske fænomen nu som ozonhullet. I tiden efter opdagelsen frygtede man, at dette hul ville brede sig som ringe i vand, da man ved tilbageblik på satellitdata kunne se en fortsat forværring af problemet siden 1979, som vist på farvebilledet på forsiden af bladet.

Men den faktiske udvikling siden 1985 har vist, at ozonhuller nok må anses for at være reserveret de helt særlige meteorologiske forhold, der hersker ved polerne. Og ydermere er det indtil nu kun over Sydpolen, at de særlige forhold har udmøntet sig i et egentligt ozonhul. Under de særlige forhold ved polerne dannes nogle tynde iskrystalskyer i stratosfæren omkring 20 km's højde. På partiklerne i disse skyer synes der at foregå en række kemiske processer, og man mener nu, at tilstedeværelsen af skyerne sammen med nogle kemiske stoffer, der skyldes udslippet af CFC-gasser, er baggrunden for dannelsen af ozonhuller.

Mængden af iskrystal-skyerne svinger med udsving i klimaet. I en tilbundsgående undersøgelse af ozonhulsproblemet må derfor indgå undersøgelser af klimaets udsving og årsagerne hertil. Det skal også bemærkes, at tilstedeværelsen af ozon i den nedre del af stratosfæren (specielt på høje breddegrader) kun kan forklares ved transport ned fra de højere liggende lag, hvor produktionen af ozon finder sted. Disse transporter hænger naturligvis nøje sammen med meteorologien, hvilket yderligere understreger det vigtige i koblingen mellem kemien og dynamikken/klimatologien.

En række faktorer af periodisk natur påvirker et fænomen som det antarktiske ozonhul. Dette gælder Solens aktivitetsniveau og en klimatisk begivenhed i troperne, som meteorologer omtaler som QBO'en. Disse faktorer har sandsynligvis i bestemte år (for eksempel 1988) påvirket stratosfærens ozonindhold i positiv retning, mens de i andre år bidrager til et lavere ozonindhold.

Der er altså tale om om to adskilte problemstillinger : for det første en langsom, men systematisk reduktion af ozonindholdet, specielt i toppen af ozonlaget. Denne udvikling må forventes at påvirke ozonlaget over hele

Jorden. For det andet et mere lokalt problem, der indtil nu kun har ramt et sted på Jorden, nemlig Antarktis. Til gengæld har udviklingen her været dramatisk, både mht styrke og den hastighed, hvormed ozonnedbrydningen forløber.

Observationer synes at bekræfte formodningen om et generelt og globalt fald i stratosfærens ozonindhold. På grund af et begrænset data-materiale er det dog ikke muligt at beregne ozonindholdets ændring fra år til år i en helt præcis forstand.

Egentlige målemetoder har kun eksisteret i godt 50 år. Og kun ganske få steder har man målt i så lang tid. Langt de fleste steder har man kun målt ozon i 2-3 årtier. Dvs i forhold til mange andre klimatiske tidsserier er ozonserierne ganske korte. Dette gør konklusioner vedrørende langtidstendenser i ozonudviklingen problematisk.

Ydermere er kvaliteten af observationerne stærkt svingende. Kalibrering, dvs en afstemning af måleinstrumentet mod kendte værdier, er således en ganske kompliceret opgave.

Det er heller ikke nogen nem opgave at foretage en analyse af den geografiske fordeling og dermed at sammenligne flere målestationer med hinanden. Ozonkoncentrationernes store variation fra sted til sted og fra ét tidspunkt til et andet stiller store krav til den statistiske bearbejdning af observationerne. I denne forbindelse skal det nævnes, at i de sidste 10 år har satellitter givet et nyt, værdifuldt datamateriale om ozons fordeling. En af de store gevinster har været en næsten samtidig dækning af store områder. Men målinger fra satellit har ikke samme fejltyper og kilder til usikkerhed som målinger taget ved jordoverfladen, hvorfor man må være forsigtig ved sammenligninger. Hertil kommer, at satellitter ikke kan måle ozon i vintermørket omkring polerne.

Store, internationale undersøgelser konkluderer imidlertid, at der er sket et fald på nogle få procent over en længere årrække, men billedet er noget diffust, med forskelle fra sæson til sæson og fra lokalitet til lokalitet.

Der er derimod ikke noget at diskutere, når man betragter forholdene over Antarktis. Her har udviklingen som sagt været ret så dramatisk. Områder på størrelse med USA har oplevet fald i ozonværdierne på op til 50 % hvert forår, der på disse breddegrader er september/oktober. Udviklingen synes at starte omkring 1979/1980 og er fortsat helt op til 1987/1988. I 1988/1989 udviklede ozonhullet sig ikke så dramatisk som de foregående år. Dette førte naturligvis straks til spekulationer over muligheden for en tilbagevenden til forholdene fra 70'erne. Men allerede i sæsonen 1989/1990 blev disse spekulationer gjort til skamme. Hullet udviklede sig til samme rekordlave værdier som tidligere. Om der er tale om en moderne foreteelse eller ej er umuligt at sige, da der simpelt hen ikke findes nogen observationer, der kan fortælle os, om noget lignende er indtruffet tidligere. Ozon sætter hverken fod- eller fingeraftryk.

Vi har oven for gennemgået basisprincipperne i ozonkemien og diskuteret de mulige trusler mod ozonlaget. Emnet vil som nævnt blive analyseret nærmere i en senere artikel, hvori jeg vil demonstrere nogle meteorologiske forholds betydning for ozonforekomsterne, og specielt hvordan de pludselige nedbrydningsbegivenheder over Antarktis må tilskrives de helt særlige forhold dér.



Aksel Walløe Hansen Lektor ved Geofysisk Institut på Københavns Universitet. Arbejder med simuleringer af atmosfærens klima ved brug af computermodeller, herunder specielt betydningen af ozonlaget.