

Ozonlaget.

Af Paul Eriksen og Ib Steen Mikkelsen
Forsknings- og Udviklingsafdelingen
Danmarks Meteorologiske Institut

Hvad er ozon, og hvilken betydning har den for miljøet?

Den luft, vi er omgivet af, består stort set af 1/5 ilt og 4/5 kvælstof i form af ilt- og kvælstofmolekyler. Luftens indhold af andre gasarter er forsvindende i forhold hertil. Atmosfæren har denne sammensætning op til godt 100 km's højde. Iltmolekyler indeholder 2 ilt-atomer. Den kemiske betegnelse for ilt-atomet er O (Oxygen), og det normale iltmolekyle betegnes derfor O₂.

Ozon er en speciel form af ilt, hvor molekylerne indeholder 3 ilt-atomer. Den kemiske betegnelse er derfor O₃. Ozon har helt andre egenskaber end almindelig ilt. Bl.a. har ozon let ved at afgive det ene ilt atom, dvs. ozon er et kraftigt iltningemiddel. De små mængder ozon der f.eks. dannes i en gammel kopimaskine, er derfor ubehagelige at indånde, fordi ozonen generer ens slimhinder.

Selv om atmosfærens indhold af ozon-molekyler er forsvindende i forhold til mængden af ilt- og kvælstof-molekyler, har ozonen dog afgørende betydning for mange forhold i atmosfæren (bl.a. kemiske) samt for liv på jorden.

Det meste ozon befinder sig (heldigvis) højt over jordoverfladen fra ca. 10 km's højde og op til ca. 30 km's højde, hvor vi ikke er i kontakt med den. Her har ozonen en stor gavnlig virkning for livet på jorden, idet den skærmer os mod den skadelige ultraviolette (UV) stråling fra solen.

Der er også ozon ved jordoverfladen. Her er den for det meste et problem som en bestanddel af luftforureningen over de fleste store byer. Denne ozon *kan* betegnes som skadelig, idet den i store koncentrationer kan give slimhindeirritationer og vejrtrækningsproblemer, og kan have en negativ indflydelse på plantelivet. I de sidste hundrede år er der sket en fordobling af ozonen ved jordoverfladen over store dele af den nordlige halvkugle, bl.a. på grund af den store vækst i trafikken.

Ozon har en vigtig funktion i atmosfærens såkaldte strålingsbalance. Når ozonen opfanger solens ultraviolette stråling opvarmer den atmosfæren i 10-85 km's højde. Det har afgørende betydning for jordens klima. Ændrer vi på ozonlaget, f.eks. ved forurening, er der derfor også en risiko for, at vi ændrer jordens klima. Dette problem må ikke forveksles med den drivhuseffekt, der skyldes en forøget mængde kuldioxid i atmosfæren fra vort store forbrug af fossile brændsler (gas, kul og olie).

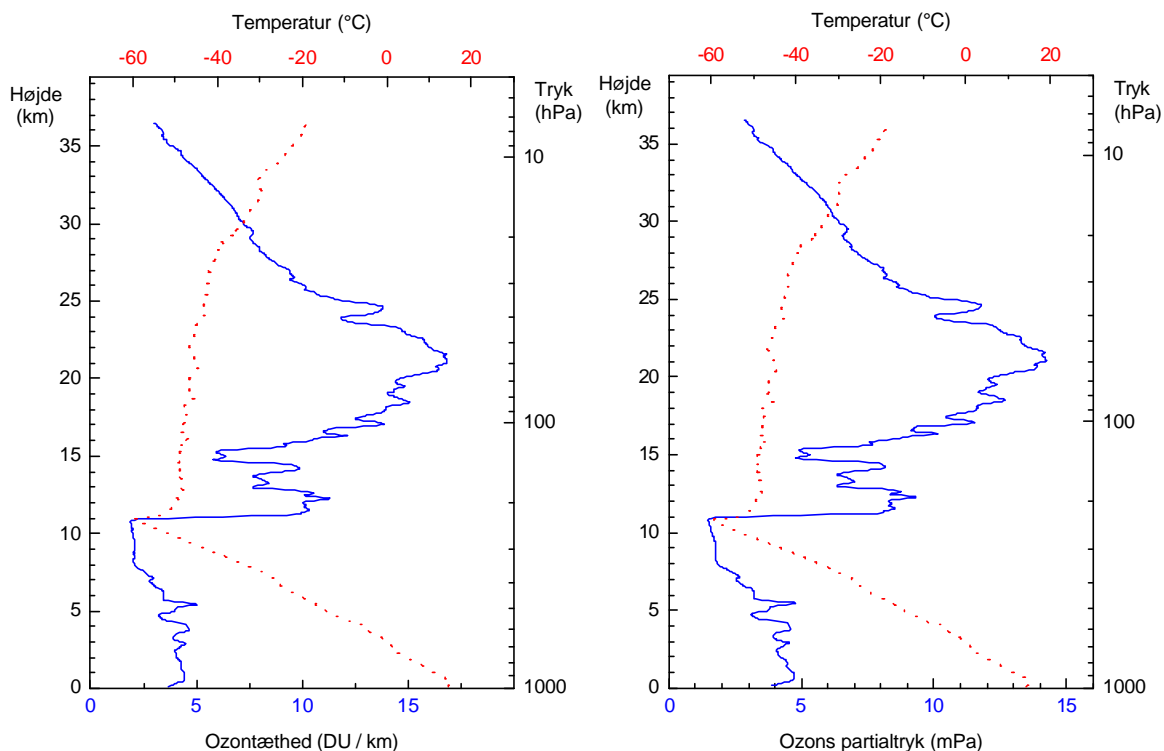
Når vi taler om *ozonlaget*, mener vi ofte den ozon der findes mellem ca. 10 og 25 km's højde. Konkret er det imidlertid det totale indhold af ozonmolekyler i en "søjle" fra jordoverfladen og til toppen af atmosfæren. I praksis kan toppen af atmosfæren sættes til ca. 50 km's højde, da ozon-bidraget fra større højder er forsvindende. Indholdet af ozon i en sådan luftsøjle kan f.eks. angives ved antallet af ozonmolekyler i en søjle med en bundflade på 1 kvadratmeter. Selv om der er meget få ozonmolekyler i forhold til ilt- og kvælstofmolekyler, indeholder en sådan luftsøjle naturligvis et meget stort antal ozonmolekyler. Derfor angiver man oftest ozonlagets tykkelse som den tykkelse søjlen ville have, hvis vi kunne

flytte al ozonen ned til jordens overflade. Så ville det typisk give en søjletykkelse – eller ozonlags-tykkelse – på 2-5 mm, idet ozonen skal presses betydeligt sammen på grund af det større tryk ved jordens overflade.

Hvordan dannes ozonen, og hvordan er den fordelt i jordens atmosfære?

Figur 1 viser en typisk ozonprofil – dvs. ozonkoncentrationen som funktion af højden over jorden – fra en af vore Grønlandske stationer, Scoresbysund på Østkysten. Ozonmængden (ozonkoncentrationen) bliver målt med et instrument, der bliver sendt op med en ballon.

Den lodrette skala i højre side af figurerne viser luftens tryk målt i hPa (hekto-Pascal, det samme som millibar). Ved jordoverfladen er trykket ca. 1000 hPa (svarende til 1 atmosfæres tryk eller 760 mm kviksølv-søjle). Den lodrette skala i venstre side af figurerne viser højden over jorden i kilometer. Målingen ophører i godt 34 km's højde, fordi ballonen går i stykker i den meget tynde luft. Den fuldt optrukne blå kurve viser, hvor meget ozon der er i forskellige højder. Op til 10 km's højde er der ikke ret meget, men over ca. 10 km's højde stiger ozonkoncentrationen brat. Der er mest ozon i ca. 20 km's højde. Over 34 km ved man, at ozonkoncentrationen fortsætter med at falde til ganske små værdier.



Figur 1. Ozonprofil og temperaturprofil fra Scoresbysund, Grønland, den 13. juli 1994 målt med en såkaldt ozon-sonde, et instrument der sendes op med ballon. Instrumentet måler koncentrationen af ozon under opstigningen. Koncentrationen kan angives på flere måder: f.eks. som antal ozonmolekyler pr. kubikmeter luft, som antal Dobson-enheder pr. km. (som i figuren til venstre), eller som ozonens partialtryk i mPa (milli-pascal) (som i figuren til højre). Ozonkoncentrationen er vist med den fuldt optrukne blå kurve, mens temperaturen er vist med den stiplede røde kurve. Skala for ozon er nederst, for temperatur øverst.

Den totale mængde ozon i atmosfæren over Scoresbysund den 13. juli, 1994 – altså ozonlagets tykkelse – er givet ved arealet under den fuldtoptrukne blå kurve (i forhold til den lodrette akse). Ozonlagets tykkelse var 338 DU (se også herunder).

Dobson enheden.

Hvis man, i et tankeeksperiment, tog alle ozonmolekylerne i den lodrette søjle over Scoresbysund og pressede dem sammen til 1 atmosfæres tryk, dvs. til jordens overflade, ville de danne en ”søjle” på 3,38 mm’s tykkelse (altså ca. tre millimeter). Det illustrerer hvor få ozonmolekyler der er i forhold til de almindelige luftmolekyler. Ganger man dette tal med 100, får man 338 – det er ozonsøjleens (ozonlagets) tykkelse i **Dobson** enheder (eng: Dobson Units, forkortet DU). Enheden er opkaldt efter den engelske fysiker Gordon Dobson, som var en af pionererne indenfor forskning i ozonlaget, og som i slutningen af 1920’erne konstruerede et instrument til måling af ozonlagets tykkelse, det såkaldte Dobson instrument. I tidens løb er der konstrueret mere end 100 af disse instrumenter, og mange er stadig i daglig drift verden over. Instrumentet, der betjenes manuelt, anvender solens ultraviolette stråling til måling af ozonlagets tykkelse. DMI har et sådant instrument i drift i Grønland.

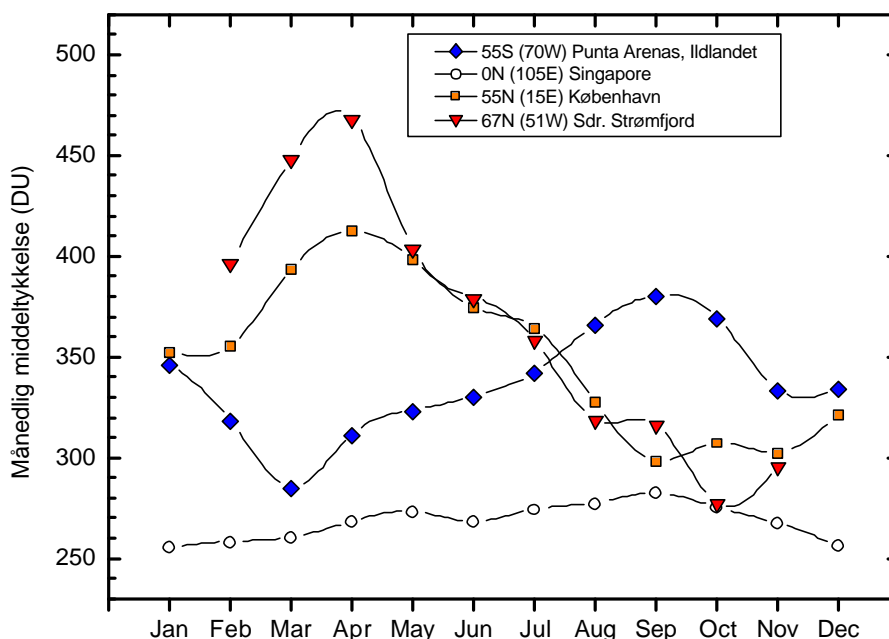
Troposfære, tropopause og stratosfære.

Den røde stiplede kurve i figur 1 viser temperaturens forløb op gennem atmosfæren målt samtidigt med ozonen. Skalaen er øverst på figuren (grader Celsius). Ved jordoverfladen er der et par graders varme. Bortset fra en lille temperaturstigning lige over jordoverfladen falder temperaturen jævnt op til 10 km’s højde, hvor den er -50° C (Celsius). Herover stiger temperaturen ca. 10° over nogle km og holder sig så konstant op til 25 km, hvorefter den stiger lidt igen. Den nederste del af atmosfæren op til 10 km’s højde kaldes **troposfæren**. Vejret, med skyer, sne og regn foregår i dette område. Grænsen ved 10 km, hvor temperaturen lige pludselig stiger, virker som et låg. Den luft, der er nedenunder, har svært ved at komme højere op, og den luft, der er ovenover, har svært ved at komme ned igennem grænsen. Grænsen kaldes **tropopausen**. Området over tropopausen kaldes **stratosfæren**, der strækker sig helt op til ca. 50 km’s højde.

Ozondannelse, fordeling og variation.

Den energirige UV-stråling fra solen danner hele tiden ozon i atmosfæren. Den nederste del af atmosfæren beskytter mod denne stråling, så det er i 30-50 km’s højde, at ozonen dannes, og især over ækvator, hvor solen står lodret på himlen. UV-strålingen ødelægger imidlertid også ozonen, så den har en kort levetid i 30-50 km’s højde. Store ”bølger”, der hele tiden findes i atmosfæren, fører den dannede ozon væk fra ækvator og i retning mod nord- og sydpolen, forholdsvis højt i stratosfæren. Under denne bevægelse ”falder” ozonen længere ned i atmosfæren, hvor den hårde UV stråling fra solen er svagere, og dermed får ozonen en meget længere levetid. Der sker derfor en ophobning af ozon omkring 20 km’s højde, hvor ozonen har en levetid på flere måneder. Den store ozonkoncentration når ikke helt ned til jordoverfladen, fordi tropopausen i ca. 10 km’s højde danner en grænse, som den ikke kan passere. Transporten af ozon væk fra kilden ved ækvator går mest mod den nordlige halvkugle, når det er vinter og tidligt forår på den nordlige halvkugle, dvs. i perioden fra november til marts. Fra oktober/november, hvor ozonlaget er tyndest, vokser ozonlaget derfor i tykkelse hen til marts-april, hvor det er tykkest. Derefter aftager det igen mod det næste lavpunkt i oktober/november. Den samme **årlige gang** ses på den sydlige halvkugle,

blot forskudt med 6 måneder, fordi det her er vinter i juni/juli og sommer i december/januar. Eksempler på ozonlagets årlige gang er vist nedenfor i figur 2.



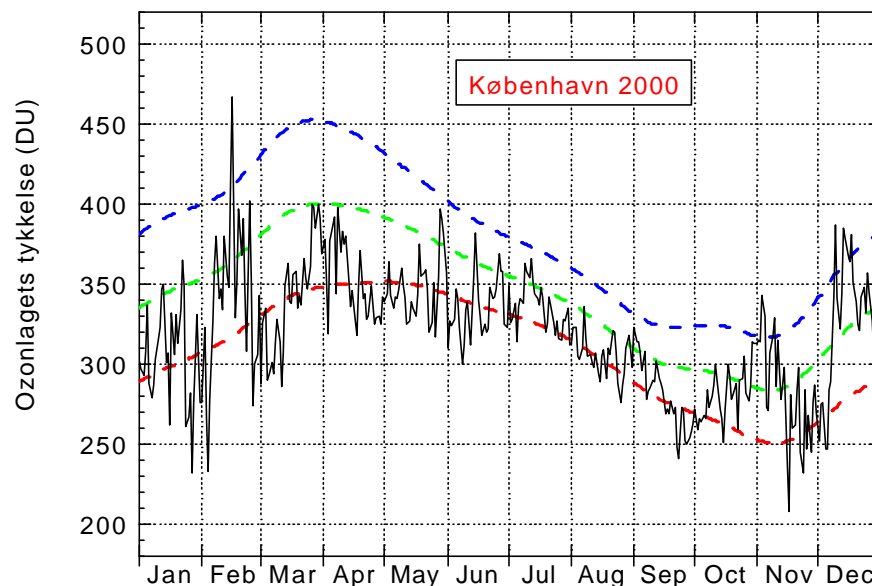
Figur 2. Den årlige gang af ozonlaget for 4 forskellige geografiske positioner: for Punta Arenas på Ildlandet (sydligste Sydamerika) på 55° sydlig bredde, Singapore ved ækvator, København ved 55° nordlig bredde, og Søndre Strømfjord ved 67° grader nordlig bredde. Målingerne er satellitmålinger er fra 1980 foretaget af TOMS instrumentet på NASA's Nimbus-7 satellit. Bemærk, at der ikke er målinger for januar og december i Søndre Strømfjord. Det skyldes, at satellitten kræver sollys for at kunne måle, og samtidigt, at solen er mere end 5-10 grader over horisonten ved middagstid. Det sidste er ikke tilfældet i Søndre Strømfjord i december og januar.

Som det fremgår af figur 2, er der næsten ingen årlig variation ved ækvator (Singapore), mens der på den nordlige halvkugle er en tydelig årlig gang, med et maksimum i foråret og et minimum i efteråret. Jo længere væk fra ækvator, jo større er udsvingene. På den sydlige halvkugle er årstidsvariationen forskudt med ca. 6 måneder (sammenlign f.eks. den årlige gang for København og Punta Arenas).

Ud over den årlige gang varierer ozonlaget også på kort tid. Det er den såkaldte dag-til-dag variation, som for det meste skyldes forandringer i troposfæren, dvs. vejr-ændringer. På dage med "godt" vejr, hvor der normalt er højtryk, er ozonlaget lidt tyndere end normalt (tyndere i forhold til normalt tryk), mens det er lidt tykkere i lavtryksvejr, dvs. når der er "dårligt" vejr. Det kan man forstå ved hjælp af en simpel model af ozonlaget. Forestil dig, at du har en meget bred, og ikke ret høj, spand med lidt vand i – kun et lag med 5-10 cm. Vandet, eller vandlaget skal forestille ozonlaget. Forestil dig også, at spanden har en (forholdsvis stiv) gummi-membran som bund. Et "lokalt" højtryk kan illustreres ved, at du med en finger trykker ganske let opad på gummi-membranen i bunden. På det sted du trykker opad, bliver vandlagets tykkelse lidt mindre end andre steder. Tilsvarende med ozonlaget ved et "lokalt" højtryk: tropopausen ligger højere end normalt, og højtrykket skubber ozonen til siderne. Et lavtryk kan så illustreres ved at der "suges" lidt, eller rykkes lidt nedad, på gummi-membranen i bunden, og der dannes en lille gryde. Der hvor det sker, bliver vandlagets tykkelse lidt større end andre steder. Tilsvarende med ozonlaget ved "lokale"

lavtryk: tropopausen ligger forholdsvis lavt, og der dannes en lille gryde der fyldes med ozon fra den omkringliggende stratosfære.

Dag-til-dag variationerne kan være ganske store (50 DU er ikke unormalt). I København har vi oplevet, at ozonlagets tykkelse ændrede sig med 40 DU i løbet af få timer. Det skete i forbindelse med en frontpassage. Figur 3 viser ozonlagets tykkelse med daglige målinger fra København i år 2000.

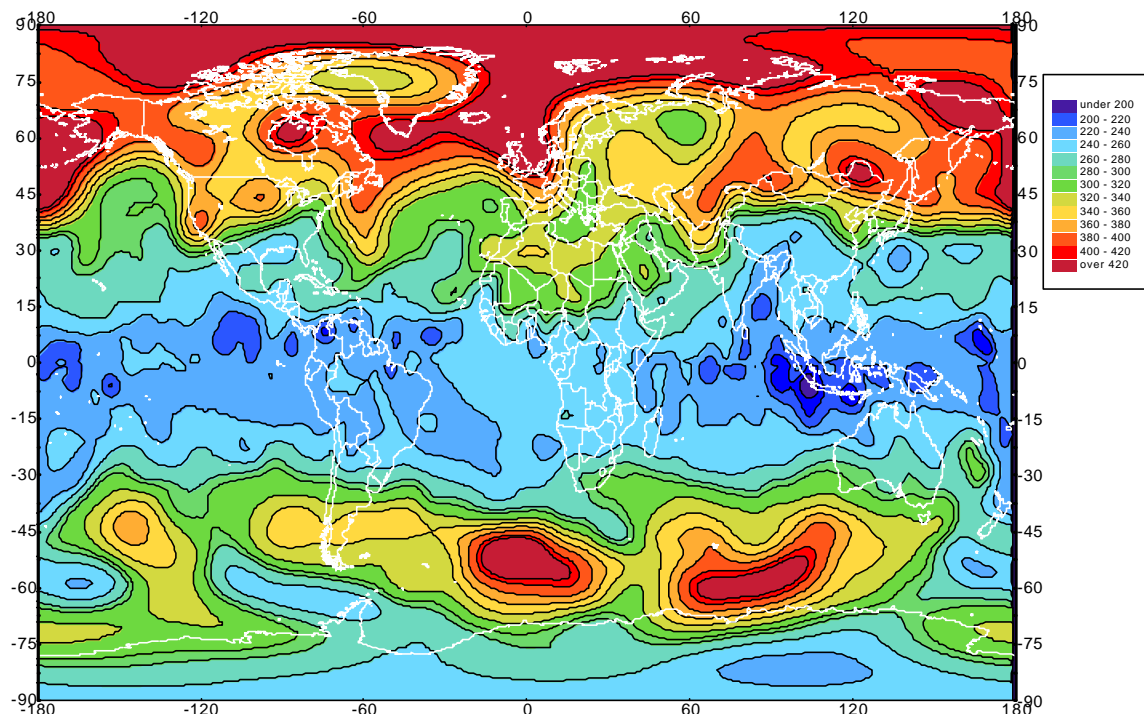


Figur 3. Daglige målinger af ozonlagets tykkelse over Danmark (København) i 2000. Som det ses, er der store dag-til-dag variationer, f.eks. i begyndelsen eller i slutningen af februar. De største dag-til-dag variationer forekommer næsten altid i vinter- og forårs månederne, mens variationerne i sommerhalvåret ikke er så store. Den midterste stiplede glatte linie angiver den middel-årslige gang for 10-års perioden fra 1979 til 1988, dvs. fra før den værste ozonnedbrydning var begyndt. De yderste stiplede glatte linier angiver, at ca. 2/3 af alle målingerne faldt indenfor disse linier. I statistikken kaldes de for standardafvigelsen fra middelværdien, og giver et mål for, hvor meget målingerne spreder sig omkring middelværdien. Som det ses, er der størst spredning på målingerne i vinter og forår, mens målingerne sidst på sommeren ligger indenfor et forholdsvis snævert interval.

Måling af ozonlagets tykkelse.

Ozonlagets tykkelse måles hver dag over hele jorden ved hjælp af forskellige målemetoder. Flere af de optiske metoder, der bruges til at måle ozonlagets tykkelse, benytter ozonens evne til at absorbere UV-stråling. Det gælder de jordbaserede målinger med Dobson og Brewer instrumenter (som bl.a. DMI anvender), ozonprofilmålinger med LIDAR (laser) og målinger med instrumenter fra satellitter. Andre instrumenter benytter ozonens absorption i det synlige spektralområde, og atter andre benytter ozonens absorption i det infrarøde område. De jordbaserede målinger er vigtige, fordi de kan videreføre de målinger, der nogle få steder påbegyndtes allerede i 1930'erne, andre steder først senere, i 50'erne og 60'erne. Det giver et langtidsbillede af, hvordan ozonlaget udvikler sig. De jordbaserede instrumenter kan repareres og vedligeholdes. Det er ikke tilfældet med satellit-instrumenter: når de først er sendt op, kan man blot håbe på at de virker, og at de virker som tiltænkt, og så længe som muligt.

Satellit-målinger af ozonlaget er imidlertid meget værdifulde fordi de kan give et dagligt billede af ozonlaget over *hele* kloden. Et af de mest værdifulde satellit-instrumenter er det såkaldte TOMS instrument (Total Ozone Mapping Spectrometer), der er udviklet hos den amerikanske rumfartsorganisation NASA. Der har været flere instrumenter på forskellige satellitter, men det mest succesrige instrument, var det der fløj med Nimbus-7 satellitten, der blev opsendt i efteråret 1978. Oprindeligt havde man givet instrumentet en levetid på nogle få år, men det holdt sig helt til 1993. Dermed har et og samme instrument kunnet give os informationer om ozonlagets daglige tilstand i mere end 10 år, og samtidig i den periode, hvor ozonlaget er blevet tyndere. Andre TOMS-instrumenter har fløjet på andre satellitter, men har kun holdt få år. For tiden flyver et TOMS-instrument på NASA's Earth Probe satellit, men andre instrumenter står klar i kulisserne og opsendes i løbet af de næste år. Et andet kendt satellit-instrument er TOVS (Total Ozone Vertical Sounder), som flyver på flere satellitter. Et billede af ozonlaget den 12. juni 1998, set fra et TOVS-instrument er vist i figur 4.

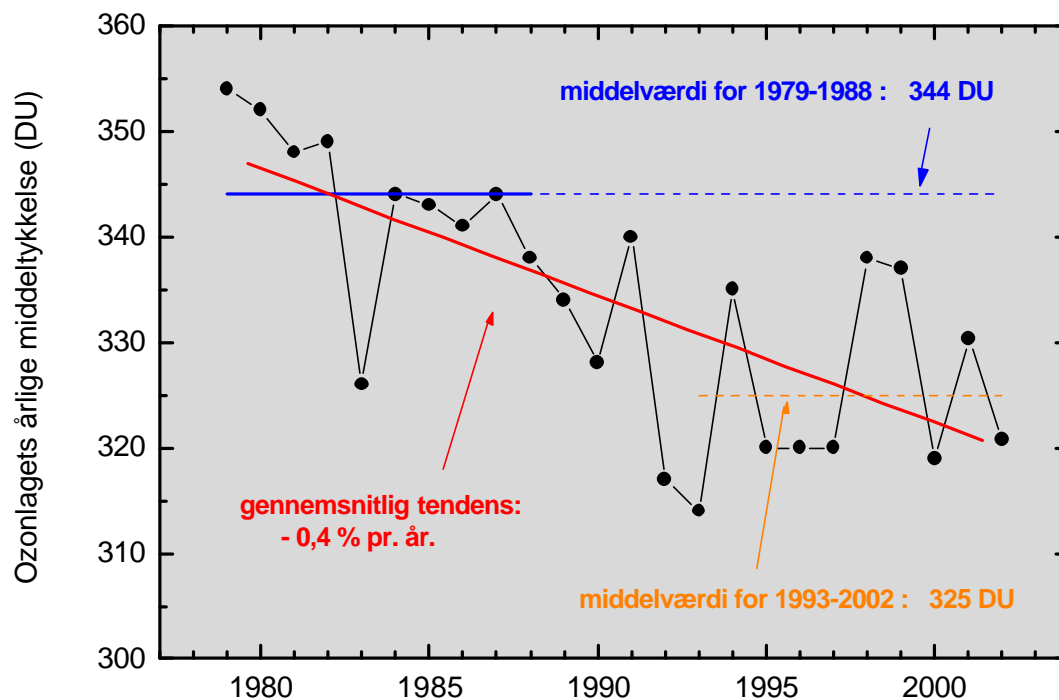


Figur 4. Ozonlaget den 12. juni 1998 målt med et TOVS-instrument. Farverne angiver ozonlagets tykkelse, hvor rødlige farver angiver et tykt ozonlag, mens blå farver angiver et tyndt ozonlag. Der er sommer på den nordlige halvkugle, hvor ozonlaget er forholdsvis tykt, mens der over Antarktis er vinter med et forholdsvis tyndt ozonlag (ozonhullet kommer først i september). Bemærk det store bælte omkring ækvator, hvor ozonlaget er forholdsvis tyndt – det varierer næsten ikke året igennem.

Andre satellit-instrumenter, der kan måle andet end blot ozonlaget, er mindst lige så værdifulde fordi de giver målinger af nogle af de molekyler, der medvirker til ozonlagets nedbrydning. Derved får man indsigt i atmosfærens kemi. Et sådant instrument er det europæiske GOME-instrument (Global Ozone Monitoring Experiment), der flyver på den europæiske rumfartsorganisation ESA's ERS-2 satellit. Flere af den salgs instrumenter opsendes med andre satellitter i de kommende år.

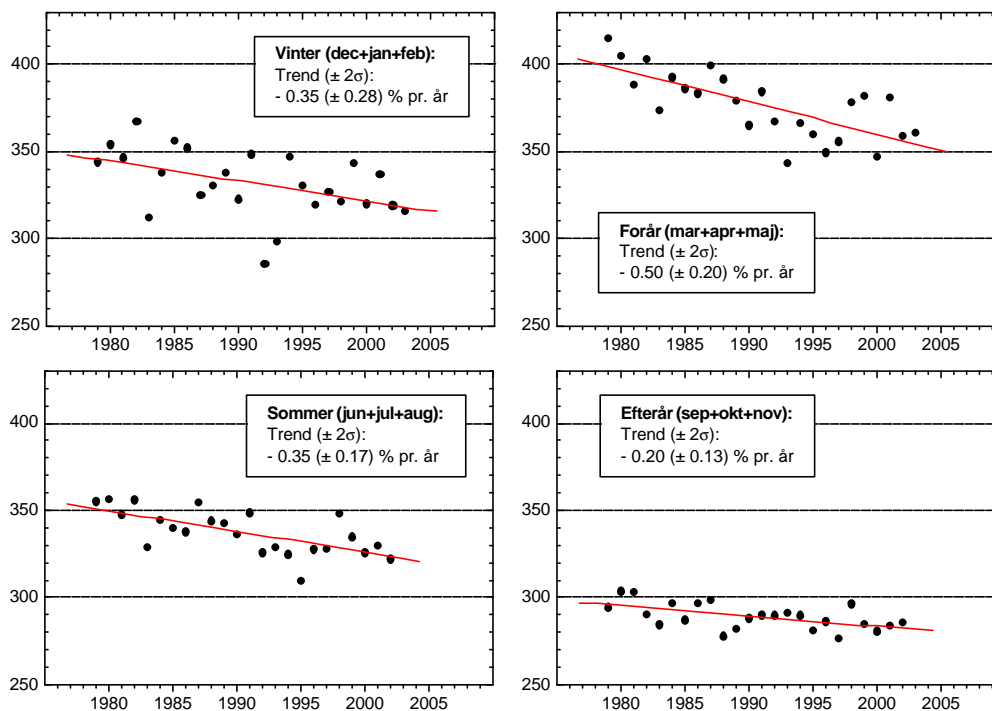
Hvordan har ozonen ændret sig i årenes løb?

Ozonlagets tykkelse er faldet gennem de sidste 25 år. Faldet er størst på den sydlige halvkugle og især omkring sydpolen er der sket en reduktion. På den nordlige halvkugle aftager ozonen også, og her er faldet også størst omkring polen. I middel mindskes ozonlagets tykkelse over Danmark med ca. 4 % pr. ti-år (figur 5). Faldet er størst i forårsmånederne marts, april og maj på den nordlige halvkugle (figur 6), og i forårsmånederne september, oktober, november på den sydlige halvkugle.



Figur 5. Tendensen for ozonlagets årlige middeltykkelse over Danmark er en udtynding på ca. 0,4% pr. år.

På figur 5 ses, at der er flere ”punkter”, der afviger noget fra den nedadgående røde linie. Det gælder punkterne for årene 1983, 1992 og 1993, samt årene 1998, 1999 og 2001. De førstnævnte tre år er alle år der følger efter et år med et kraftigt vulkanudbrud (El Chicon i 1982 og Mt. Pinatubo i 1991), mens de sidstnævnte år var år med forholdsvis høje temperaturer i stratosfæren over Arktis. Kraftige vulkanudbrud forstærker ozonnedbrydningen mens høje temperaturer i stratosfæren hæmmer ozonnedbrydningen. Eksempler på år med en forholdsvis varm stratosfære er årene 1991, 1994, 1997, 1998, 1999 og 2001, hvor ozonnedbrydningen ikke var særlig stor.



Figur 6. Sæson-tendenserne for ozonlaget over Danmark. Figuren viser tendensen for vinter (dec+jan+feb), forår (mar+apr+maj), sommer (jun+jul+aug) og efterår (sep+okt+nov). Tendensen er angivet negativ, hvilket betyder, at ozonlagets tykkelse aftager (udtyndes). Den største udtynding af ozonlaget sker i forårs månederne, hvor udtyndingen for tiden er ca. 0,5 % pr. år. Tendensen er mindst i efteråret, mens tendensen for sommeren er omtrent det samme som tendensen på årsplan, nemlig ca. 0,4 % pr. år. Det betyder, at ozonlaget gennem de seneste 25 år i gennemsnit er blevet ca. 10% tyndere.

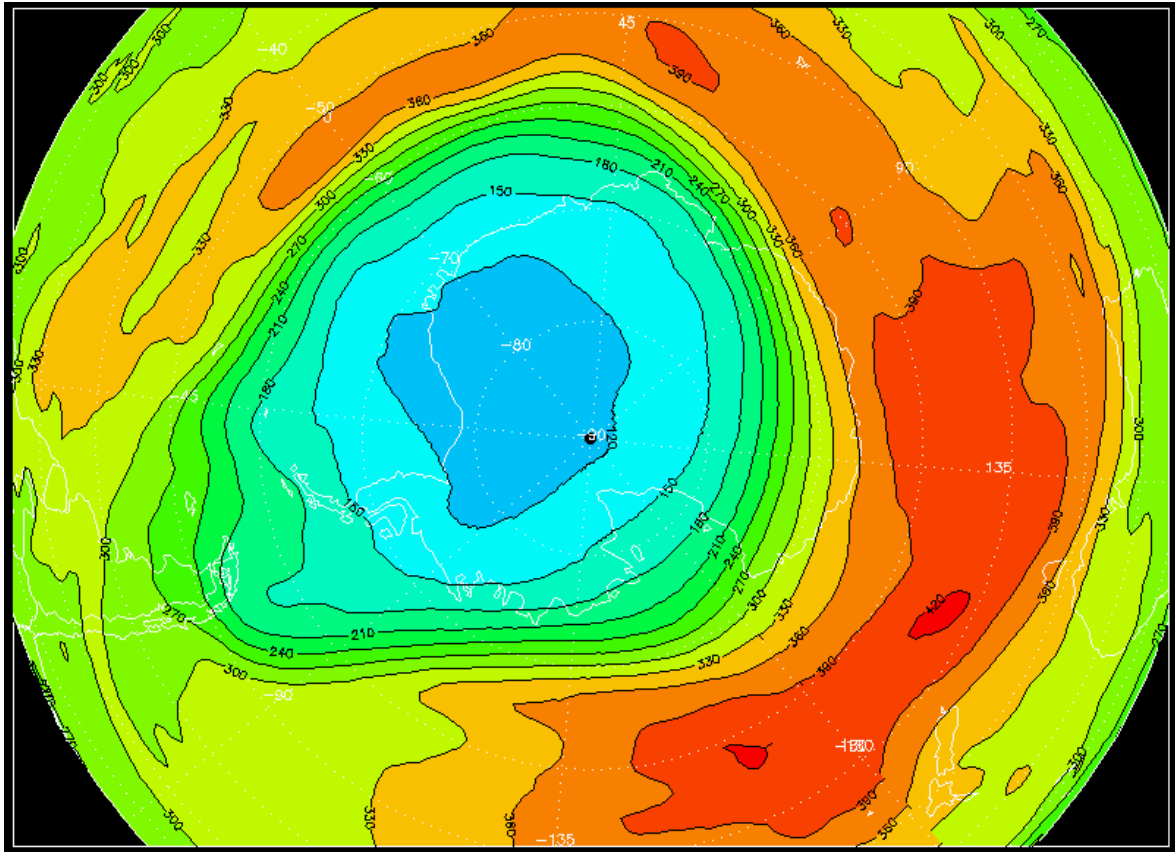
UV-strålingen på jordens overflade er formentlig vokset tilsvarende, men man ved ikke præcist hvor meget, fordi der ikke foreligger nøjagtige målinger af UV-strålingen over en tilstrækkelig lang årrække. Vi laver nu sådanne nøjagtige målinger bl.a. i Danmark og Grønland, men de går kun få år tilbage i tiden.

Hvad skyldes ozonnedbrydningen?

Ozonhullerne.

Den kraftigste ødelæggelse af ozonlaget finder sted over Antarktis (sydpolen), hvor der hvert år i oktober måned dannes et hul. Når vi taler om et ozonhul, mener vi oftest, at ozonnedbrydningen er *væsentlig* i forhold til normale udsving eller ændringer i lagets tykkelse. Ozon nedbrydes ikke lige meget i alle højder, men mest i området mellem 15 og 20 km's højde, hvor næsten al ozonen forsvinder. Ozonhullet over Antarktis varer i 1-2 måneder, hvorefter det fyldes op med ny ozon i november-december. På figur 7 er vist ozonlagets tykkelse den 7. oktober 2000 over Antarktis. Herpå er farverne brugt til at angive

lagets tykkelse. I et stort område centreret over Antarktis er ozonlagets tykkelse mere end halveret (de blå og blå-grønne farver) i forhold til ozonlagets tykkelse uden for (de orange og røde områder). Det årligt tilbagevendende ozonhul over Antarktis begyndte i starten af 1980'erne og er efterhånden blevet dybere og større. Hullerne dannes i løbet af få uger. Ballon-målinger fra Antarktis viser, at det meste af ozonen er væk imellem 12 og 22 km's højde. I disse højder har man normalt de største ozonkoncentrationer (figur 1).



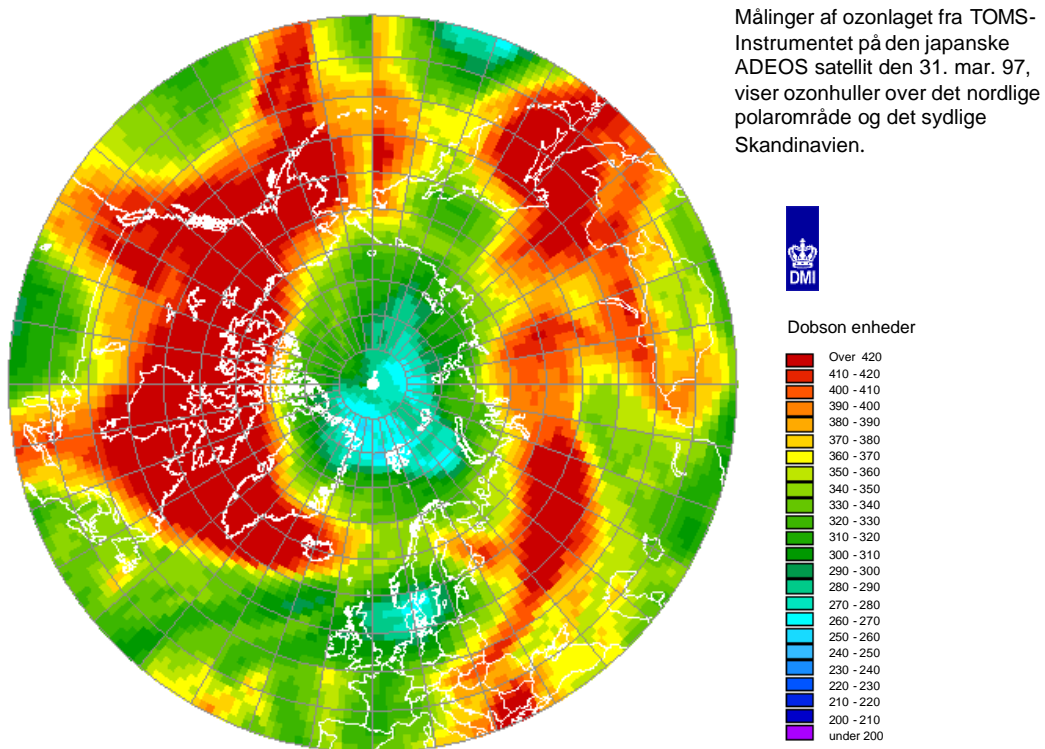
Figur 7. Ozonhullet over Antarktis den 7. oktober 2000. Data er fra NASA's TOMS-instrument på Earth Probe satellitten. Inden for det central blå område er ozonlagets tykkelse mindre end 120 DU! Konturintervallerne er 30 DU. Det ses, at en 'tunge' af ozonhullet strækker sig over mod Ildlandet i Sydamerika.

Nedbrydningen af ozonen skyldes klor og brom. Disse grundstoffer forekommer ikke naturligt i atmosfæren i store mængder, men der er sket en tilførsel fra udslippet af CFC-gasser og haloner.

CFC-gasser er kemiske forbindelser, der indeholder klor og/eller brom. De er blevet brugt til mange formål, fordi de er meget stabile kemiske forbindelser. F.eks. som drivgas i spraydåser, eller til oppustning af isoleringen i køleskabe. Den store anvendelse har også betydet, at der er sluppet mange CFC gasser ud i atmosfæren, f.eks. når køleskabe skrottes, uden at CFC-gasserne gen-indvindes. Deres store kemiske stabilitet betyder, at de kan vandre op gennem atmosfæren, uden at blive nedbrudt, og nå op til ozonlaget. Atmosfæren har ellers evnen til at nedbryde en stor del af forureningen og udvaske den med regnen. Højere oppe i atmosfæren spaltes CFC gasserne i deres bestanddele, heriblandt klor, af UV-strålingen fra solen, der er stærkere heroppe. Heldigvis er den frigjorte klor dog bundet det meste af året i kemiske forbindelser, der ikke har evnen til at nedbryde ozonen. Mærkeligt nok bliver klor frigjort, når det er ekstremt **koldt** i 15-20 km's højde. Klorforbindelserne

sætter sig på 'krystallerne' i skyer, der dannes, når temperaturen kommer under -80° Celsius. Skyerne kaldes Polare Stratosfæreskyer (PSC, fra engelsk: Polar Stratospheric Clouds). Disse lave temperaturer har man især over Antarktis om vinteren. Så længe det er mørkt over Antarktis, gør den frigjorte klor ikke noget ved ozonen, men når solen vender tilbage i september, ødelægger klore hurtigt ozonen, så ozonhullet dannes. Processen stopper i november-december, når det bliver varmere, og klore atter bliver bundet i kemiske forbindelser, der ikke påvirker ozonen. Haloner er stoffer, der indeholder grundstoffet brom, der også har en skadelig virkning på ozon. Haloner er meget stabile kemiske forbindelser, der bl.a. bruges som brandslukningsmidler.

Der dannes ikke et ozonhul over nordpolen af samme dybde og størrelse som over sydpolen. Det skyldes, at vinter-temperaturerne i 15-20 km's højde ikke er så lave som over sydpolen. Dermed dannes der ikke så mange stratosfæreskyer, som klorforbindelserne kan sætte sig fast på, for derefter at blive spaltet. I vore ballon målinger fra Grønland har vi dog set en betydelig ødelæggelse af ozonen. F.eks. i 1997, hvor der f.eks. fra januar til marts forsvandt 40% af ozonen mellem 13 og 20 km's højde. Figur 8 viser et billede af ozonlaget over den nordlige halvkugle set fra satellit fra den 31. marts 1997. På figuren ses områder med meget tyndt ozonlag ('huller') over Svalbard og det sydlige Skandinavien, som skyldes en kraftig nedbrydning af ozonlaget over Arktis i perioden januar-marts.



Figur 8. Ozonlaget over den nordlige halvkugle den 31. marts 1997, viser mindre 'huller' i ozonlaget over det nordøstlige Grønland og Svalbard samt over det sydlige Skandinavien.

Ozonnedbrydning uden for ozonhullerne.

Hvad skyldes så ozonnedbrydningen uden for ozonhullerne, som vi ser det over f.eks. Danmark? Som sagt er nedbrydningen størst i forårsmånederne, og den skyldes tildels, at luften i ozonhullerne over polerne fortynder ozonen udenfor. Desuden kan klor og brom

ødelægge en mindre del af ozonen, selvom det ikke er så koldt, at der dannes stratosfæreskyer. Af og til bevæger ozonnedbrudte luftmasser sig hen over Danmark, hvorved vi kan registrere betydeligt tyndere ozonlag end normalt.

Internationale aftaler.

Det internationale samfund blev klar over disse alvorlige problemer i midten af 80'erne, og allerede i 1987 enedes verdens lande om at begrænse udslippet af CFC gasser og haloner i den såkaldte Montreal protokol. Det viste sig imidlertid hurtigt, at de krav og begrænsninger der oprindeligt blev aftalt, ikke var tilstrækkelige. Kravene er derfor sidenhen blevet skærpede i tillægsaftaler (i London 1990, i København 1992, i Wien 1995 og i Montreal 1997).

Fremtiden.

De begrænsninger af CFC- og halon-udslippet, som er aftalt ved Montreal protokollen, har ført til, at mængden af CFC'er og haloner i luften ved jordoverfladen er for nedadgående, og at de sandsynligvis har toppet. Det tager imidlertid nogle år før den renere luft viser en positiv indvirkning på ozonlaget, men når den gør det, skulle ozonlaget få det 'bedre og bedre', det vil sige, vende tilbage til sin oprindelige tilstand (fra før 1970). På grund af den store variation der er i ozonlagets tykkelse over f.eks. norrlige polare- og mellembreddegrader, vil der gå mange år før målinger med sikkerhed kan godtgøre, at ozonlaget er i bedring. Modelberegninger sandsynliggør, at den største ozonnedbrydning over de nordlige polaregne vil finde sted i årtiet 2010-2020, og at ozonlaget først derefter langsomt vil blive tykkere år for år. Der vil gå ca. 50 år før virkningen af klor- og brom- forureningen er helt væk.

Yderligere informationer.

Informationer på Tekst-TV.

De daglige målinger af ozonlaget over Danmark kan ses på Tekst-TV, side 408.

Informationer på DMI's hjemmesider.

<http://www.dmi.dk>

Klik på 'METEOROLOGI' og følg så menuen i venstre side. På de forskellige sider kan du få oplysninger om mange emner relateret til ozonlaget.

Internationale links.

Det er nødvendigt at forstå engelsk, men de fleste af teksterne er ikke svære at forstå.

<http://jwocky.gsfc.nasa.gov/index.html>

Dette er den såkaldte TOMS hjemmeside. Dvs. NASA's hjemmeside med data og informationer om ozonlaget, samt målinger med TOMS instrumenter. Der er mange informationer på denne hjemmeside. Du kan bl.a. få de seneste satellitmålinger, dels som billeder, dels for et vilkårligt sted på jorden.

<http://www.atm.ch.cam.ac.uk/tour/>

En hjemmeside på Cambridge University med en god TOUR til ozonhullet over Antarktis.

<http://www.epa.gov/docs/ozone/index.html>

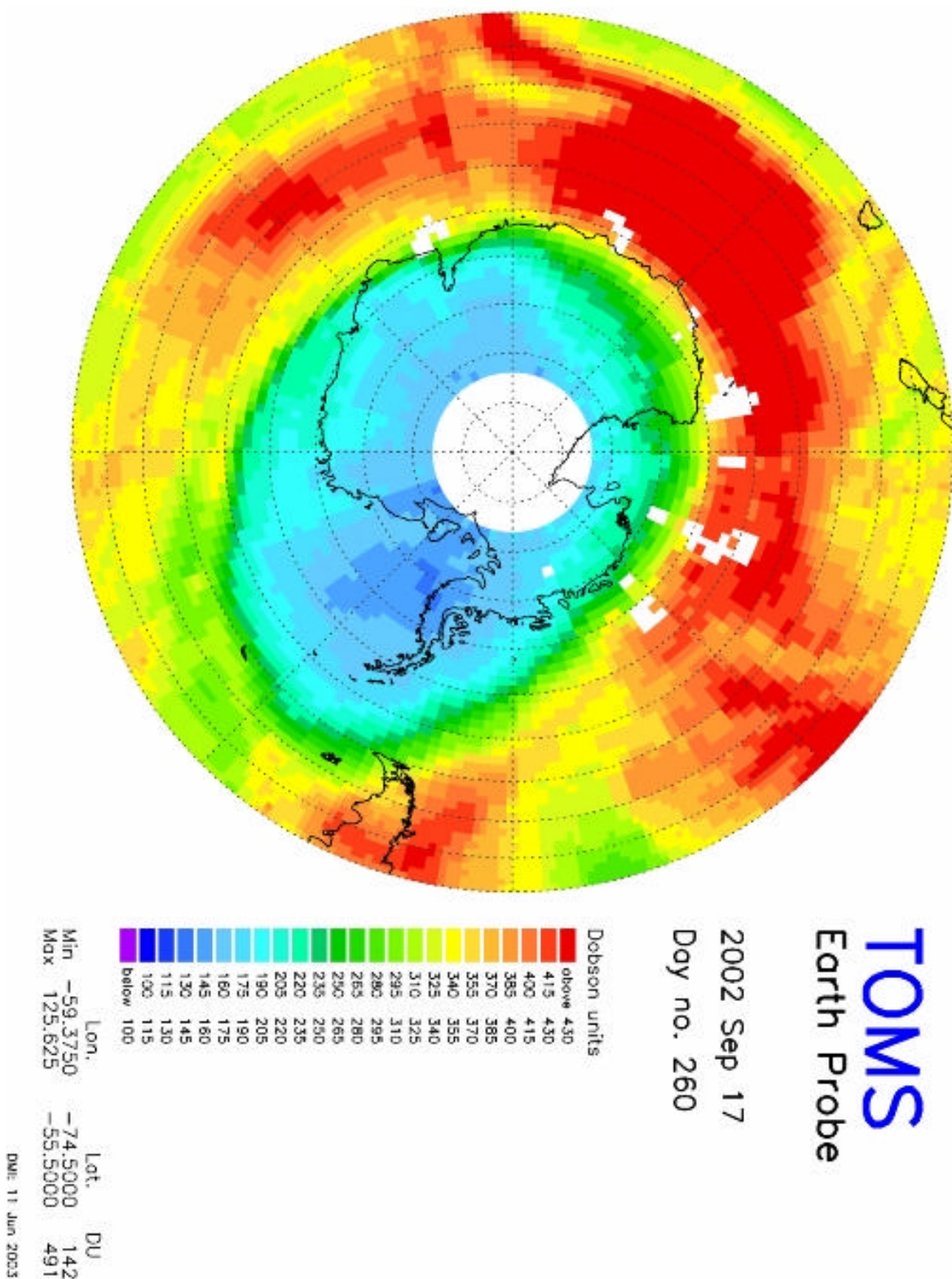
Den amerikanske miljøstyrelses (EPA) hjemmeside med mange oplysninger om ozon.

<http://exp-studies.tor.ec.gc.ca/e/ozone/ozoneworld.htm>

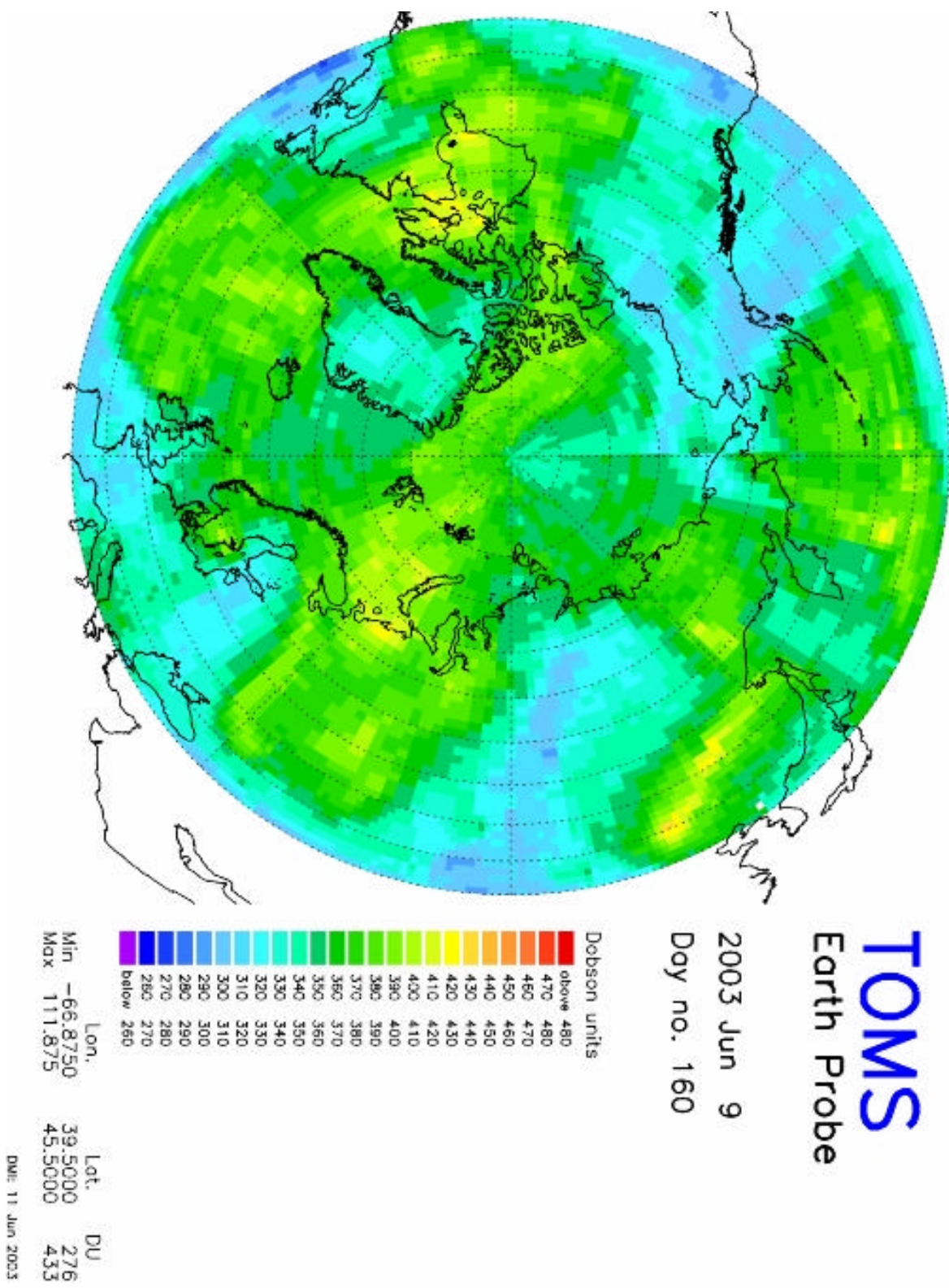
En hjemmeside hos det canadiske meteorologiske institut, hvor man dels kan finde aktuelle kort med ozonlagets tykkelse, dels historiske. Instituttet er nemlig hjemsted for jordbaserede målinger af ozonlagets tykkelse, der nogle steder går mere end 50 år tilbage i tiden. Der er mange muligheder fra denne side.

Multimedie-film.

Hvis du har fået dette dokument på CD-ROM kan du se den vedlagte multimediefilm 'ozonhullet.avi'. Klik på denne fil i windows stifinder, og 'filmen' skulle starte. Filmen viser et året igennem hvorledes temperaturen i stratosfæren og ozonlaget over sydpolen ændres fra dag til dag. Du skal huske, at der er sommer på den sydlige halvkugle i december-januar. Se hvorledes temperaturen i stratosfæren falder vinteren igennem (juni-juli), og hvorledes ozonlaget begynder at udtyndes når sollyset vender tilbage efter polarnatten (september-oktober). Du kan se, at ozonkoncentrationen bliver nul i visse højder over jorden: det er ozonhullet over sydpolen. Det hele er på engelsk, men skulle være forholdsvis let at forstå. Kør evt. filmen flere gange.



Figur X. Det seneste ozonhul over Antarktis. Dato fremgår af figuren. Farveskalaen viser tykkelsen af ozonlaget i Dobson enheder. Det violette og blå område er 'ozonhullet'. Hvide felter er manglende data.



Figur Y. Ozonlaget over den nordlige halvkugle for nylig. Dato fremgår af figuren.