

Videnskabelig rapport 15-03

Ozonlaget over Danmark og Grønland 1979-2014

Paul Eriksen, Nis Jepsen, Helge Jønch-Sørensen og
Niels Larsen



Kolofon

Serietitel:

Videnskabelig rapport 15-03

Titel:

Ozonlaget over Danmark og Grønland 1979-2014

Undertitel:**Forfatter(e):**

Paul Eriksen, Nis Jepsen, Helge Jønch-Sørensen og Niels Larsen

Andre bidragsydere:**Ansvarlig institution:**

Danmarks Meteorologiske Institut

Sprog:

Dansk

Emneord:

Videnskabelig Rapport. Ozonlag over Danmark, Grønland og Antarktis. Tendensanalyser

Url:

www.dmi.dk

Digital ISBN:

978-87-7478-660-3

ISSN:

1399-1957

Versions dato:

19. juli 2015

Link til hjemmeside:

www.dmi.dk

Copyright:

Danmarks Meteorologiske Institut



Indhold:

Abstract	4
Resumé.....	5
Forord.....	6
Ozonlag og UV-stråling over Danmark og Grønland.....	7
Observationssteder i Danmark og Grønland.....	7
Ozonlaget over Danmark	7
Ozonlaget over Grønland.....	10
Kangerlussuaq.....	10
Målinger af ozonlaget over Pituffik.....	11
Ozonsonderinger.....	12
Arktisk ozonnedbrydning og klimatiske forandringer.....	18
Ozonnedbrydning og UV-stråling.....	20
Ozonhullet over Antarktis.....	21
Appendix A – Daglige målinger af ozonlaget	25
Appendiks B – Ozonlaget	54
Ozonlaget – og Dobson-enheden	54
Fordeling i jordens atmosfære.....	54
Troposfære, tropopause og stratosfære	56
Ozondannelse, fordeling og variation	56
Måling af ozonlagets tykkelse.....	58
Ozonnedbrydning og ozonhul.....	59
Ozonlaget i fremtiden.....	61
Appendiks C - Wien-konventionen og Montreal-protokollen	64
Appendiks D - Internationalt samarbejde	66
Appendix E. Det arktiske ozonhul i foråret 2011.	67
Referencer.....	71
Tidligere rapporter	71



Abstract

DMI, in collaboration with the Danish Environmental Protection Agency and the Danish Energy Agency, is carrying out measurements of the thickness of the ozone layer from one station in Copenhagen and three stations in Greenland. Data from the measurements of the thickness of the ozone layer over Denmark throughout the period 1979-2014 are presented; data from before 1993 are American satellite measurements, and data from 1993 onwards are DMI's ground-based measurements. Similar time series are presented for Kangerlussuaq (Søndre Strømfjord) and Pituffik (Thule Air Base) where DMI has performed ground-based measurements since 1990. Data from DMI's weekly balloon-launched ozone sondes in Illoqqortoormiut (Scoresbysund) since 1992 are presented.

The ozone layer protects the surface of the Earth from harmful solar ultraviolet radiation. Since the beginning of the 1990'es, we have witnessed years with strong depletion of the Arctic ozone layer, latest in the 2010/2011 winter where around 40% of the ozone column inside the polar vortex was depleted and up to 80% of the ozone around 19 km disappeared and therefore comparable with Antarctic ozone loss (Manney et al., 2011). Also in spring 2005, more that 30 % of the ozone column was broken down and up to 70 % of the ozone around 18 km altitude disappeared (Rex et al., 2006).

Strong links exist between climate changes and the recovery of the ozone layer. As a consequence of the Montreal Protocol, concentrations of ozone depleting substances are now declining in the stratosphere and are expected to be back to pre-1980 levels around mid-century (WMO, 2011). This will eventually lead to a slow recovery of the ozone layer. Meanwhile, however, other climate changes are occurring which affect the ozone layer. Increases in greenhouse gases, combined with already low ozone levels, tend to cool the stratosphere. At the same time concentrations of nitrous oxide, methane, and perhaps water vapour are increasing. Measurements performed in the Arctic since the beginning of the 1990'es have revealed a significant linear relationship between the chemical ozone depletion and temperatures in the ozone layer low enough for the formation of polar stratospheric clouds (PSC) (Rex et al., 2006). These temperatures show a strong interannual variability, but since 1960 there has been a trend that the cold winter temperatures are getting colder with associated increasing ozone depletion.

In four appendices are presented historical records of DMI ozone measurements, background information on the ozone layer and the causes of ozone depletion as well as descriptions of the Vienna Convention and the Montreal Protocol, and DMI's participation in international cooperations within the subject. The occurrence of the first Arctic ozone hole in spring 2011 is also covered in an appendix.



Resumé

DMI foretager, i samarbejde med Miljøstyrelsen og Energistyrelsen, målinger af ozonlagets tykkelse fra en station i København og tre stationer i Grønland. Data for ozonlagets tykkelse over Danmark gennem årene 1979-2014 præsenteres; før 1993 er der tale om amerikanske satellitdata, herefter DMI's egne jordbaserede målinger. Tilsvarende måleserier præsenteres for Kangerlussuaq (Søndre Strømfjord) og Pituffik (Thule Air Base), hvor DMI har foretaget jordbaserede målinger siden 1990. Data fra DMI's ugentlige opsendelser af ozonsonder med ballon fra Illoqqortoormiut (Scoresbysund) siden 1992 præsenteres.

Ozonlaget beskytter jordens overflade mod skadelig ultraviolet stråling. Siden begyndelsen af 1990'erne har vi været vidne til vintre med stor kemisk ozonnedbrydning over Arktis, senest i vinteren 2010/2011, hvor mere end 40% af den totale ozonlagstykkelse inden for den polare hvirvelstrøm blev nedbrudt, og hvor op til 80% af ozonen omkring 19 km højde forsvandt, hvilket gør forholdene sammenlignelige med Antarktis (Manney et al., 2011). Også i foråret 2005 blev mere end 30% af ozonlagets tykkelse nedbrudt, og op til 70% af ozonen omkring 18 km højde forsvandt (Rex et al., 2006).

Der eksisterer stærke koblinger mellem klimaforandringer og genoprettelsen af ozonlaget. Som følge af Montreal-protokollen stagnerer eller aftager koncentrationerne nu af de ozonnedbrydende stoffer i stratosfæren, som forventes at være tilbage på 1980-niveau i midten af indeværende århundrede (WMO, 2011). Dette vil i sidste instans føre til en langsom genopretning af ozonlaget. Imidlertid foregår der sideløbende andre klimaforandringer, der påvirker ozonlaget. Forøgede koncentrationer af drivhusgasser, kombineret med allerede lave ozonforekomster, bevirker en afkøling af stratosfæren. Samtidig stiger koncentrationerne af lattergas, metan og måske også vanddamp. Målinger foretaget siden begyndelsen af 1990'erne har afdækket en signifikant lineær sammenhæng mellem kemisk ozonnedbrydning og temperaturer lave nok til dannelse af polar-stratosfæriske skyer (PSC) (Rex et al., 2006). Disse temperaturer udviser en stor årlig variabilitet, men der er konstateret en tendens til, at de kolde arktiske vintre bliver stadig koldere med tilhørende kraftigere ozonnedbrydning.

I fire appendikser gives baggrundsinformation om ozonlaget og årsagerne til ozonnedbrydning samt beskrivelser af Wien-konventionen, Montreal-protokollen og DMI's internationale samarbejde inden for området. Fremkomsten af det første arktiske ozonhul i foråret 2011 er også beskrevet i et appendix.



Forord

Ozonlaget beskytter det biologiske liv ved jordens overflade mod indtrængning af skadelig ultraviolet (UV) stråling fra Solen. Ozonlaget påvirkes af klor- og bromforbindelser fra menneskeskabte CFC- og Halon-gasser. Udslip og brug af disse stoffer er nu reguleret af Montreal-protokollen fra 1987 med senere tilføjelser. Klorkoncentrationerne i stratosfæren maksimerede i slutningen af 1990'erne og er langsomt aftagende som følge af Montreal-protokollen. Samtidig undergår stratosfæren andre klimatiske forandringer, navnlig i form af aftagende temperaturer, ændringer i kemisk stofsammensætning (navnlig forøget lattergas (N_2O), metan (CH_4) og muligvis stigende vanddamp, der indirekte påvirker ozonbalancen), forøgede koncentrationer af drivhusgasser samt naturlige påvirkninger fra vulkanudbrud og solen; processer og forceringer der alle har indvirkning på genopretningen af ozonlaget.

Et centralt videnskabeligt spørgsmål af relevans for det danske og internationale samfund vil derfor være, om og hvornår ozonlaget genoprettes under fremtidige klimatiske forandrede betingelser, samt hvordan det ultraviolette strålingsniveau vil ændres som følge af ozon- og klimaforandringer.

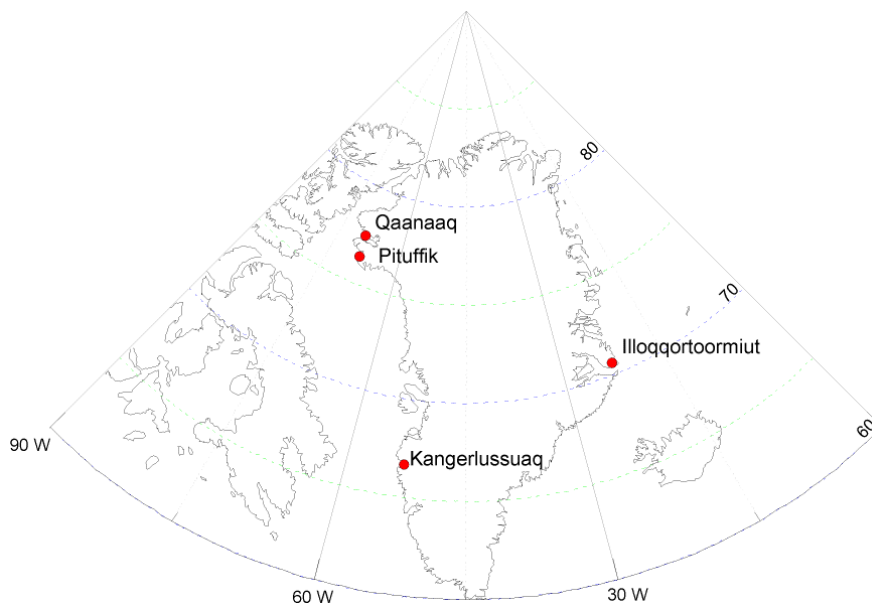
Danmarks Meteorologiske Institut opdaterer hvert år i løbet af første halvår denne statusrapport om tilstanden af ozonlaget over Danmark og Grønland, dækkende perioden op til afslutningen af det foregående kalenderår, ligesom ozonnedbrydningen i den senest forgangne vinter/forår analyseres. Rapporten er opdelt i en række kapitler, der behandler forskellige aspekter vedrørende ozonproblematikken og UV-stråling. Det er således hensigten at give en løbende opdateret information om de gennemførte målinger af ozonlaget. Ozonlagets tilstand over Danmark og Grønland afhænger i høj grad af, hvor stor kemisk ozonnedbrydning, der finder sted i de arktiske områder i løbet af foråret. Det kan konstateres fra internationale ozonmålinger siden begyndelsen af 1990'erne, som DMI bidrager til, at graden af arktisk kemisk ozonnedbrydning påvirker den samlede UV-strålingsdosis i Danmark gennem den efterfølgende sæson. Rapporten giver derfor en oversigt over de meteorologiske forhold i stratosfæren af betydning for den arktiske kemiske ozonnedbrydning. Den kraftigste kemiske nedbrydning af ozonlaget er hidtil foregået over Antarktis med udvikling af et egentligt ozonhul i hvert sydpolart forår, hvilket omtales i rapporten. For første gang er tilsvarende betingelser observeret over Arktis i vinteren 2010/2011 (Manney et al., 2011). Som følge af Montreal-protokollen kan det forventes, at ozonlaget genoprettes over en længere årrække, og rapporten giver en opdateret analyse af, om en forbedring i ozonlagets tilstand kan detekteres. I et antal appendikser præsenteres historiske målinger, og der gives baggrundsinformation om ozonlaget, de internationale aftaler om beskyttelse af ozonlaget, samt om det internationale forsknings- og monitoringsarbejde.

Rapporten er udarbejdet af sektionen for Klima og Arktis i Forsknings- og Udviklingsafdelingen ved DMI. Sektionen beskæftiger sig bl.a. med studier af de fysiske processer, der fører til forandringer i ozonlaget samt stratosfærisk monitoring af relevans for det fremtidige klima. Sektionens forskning og systematiske observationer understøttes af Montreal-protokollens anbefalinger og er et led i den forskning, som Danmark har forpligtet sig til ved ratificering af Wien-konventionen af 22. marts 1985 om beskyttelse af ozonlaget. Programmets forsknings- og monitoringsindsats indgår endvidere som et prioriteret indsatsområde i Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) under Arktisk Råd, og monitoringsindsatsen gennemføres med støtte fra Miljøstyrelsen og Energistyrelsen. Det skal endelig påpeges, at DMI's målinger af ozonlagets tilstand og UV-stråling samt løbende informationer om ozonlaget kan findes på DMI's internetsider <http://www.dmi.dk/vejr/maalinger/ozon/> og <http://www.dmi.dk/groenland/maalinger/ozonlaget-over-groenland/> samt <http://www.dmi.dk/vejr/sundhedsvejr/uv-indeks/> og <http://www.dmi.dk/vejr/sundhedsvejr/uv-indeks/uv-indeks-i-hele-verden/uv-indeks-groenland/>

Ozonlag og UV-stråling over Danmark og Grønland

Observationssteder i Danmark og Grønland

I Danmark måler DMI ozonlagets tykkelse og UV-strålingen i København med et såkaldt Brewer-ozonspektrofotometer. Brewer-instrumentet måler ozonlagets tykkelse ved hjælp af ozonens absorption i det ultraviolette område. I Grønland måles der tre steder. I Pituffik (Thule Air Base) måles ozonlagets tykkelse og stratosfærens NO₂-indhold med et såkaldt SAOZ-spektrometer, der anvender differentiell absorption i det synlige spektralområde. I Kangerlussuaq (Søndre Strømfjord) anvendes som i København et Brewer-spektrofotometer til måling af ozonlagets tykkelse og UV-stråling. Endelig måler DMI ozonlagets tykkelse i Illoqqortoormiut (Scoresbysund) ved hjælp af ozonsonder: instrumenter der sendes op med balloner og som måler ozonkoncentrationen som funktion af højden. De grønlandske stationer, se figur 1, indgår alle i det verdensomspændende netværk til detektion af forandringer i den øvre troposfære og nedre stratosfære (NDACC, Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, <http://ndacc.dmi.dk/ndacc-dmi/>). Desuden indgår målinger fra alle stationer i den internationale meteorologiorganisation WMO's netværk af målestationer, der betegnes GAW (Global Atmosphere Watch). Monitoringsdata bliver indrapporteret til databaserne under NDACC og World Ozone and UV-radiation Data Center (WOUDC).



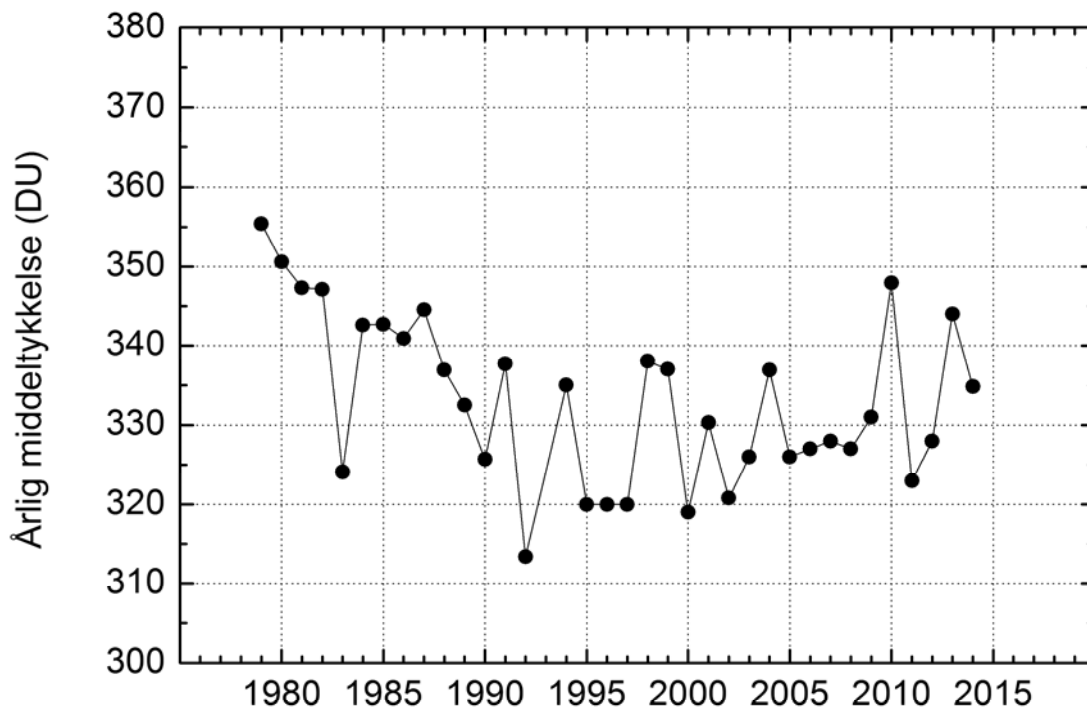
Figur 1. DMI's observationssteder i Grønland.

Ozonlaget over Danmark

Målinger af ozonlaget påbegyndtes i juni 1992 med et Brewer-spektrofotometer, der tillige måler UV-stråling. Daglige målinger siden 1979 er præsenteret i Appendix A. På grund af Danmarks forholdsvist ringe geografiske udstrækning kan ozonlagets tykkelse over København opfattes som ozonlagets tykkelse over landet som helhed. Fra oktober 1978 og frem til maj 1993 er ozonlagets tykkelse målt globalt med satellitinstrumentet TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) ombord på den amerikanske rumfartsorganisation NASA's (National Aeronautic and Space Administration) Nimbus7-satellit. Dette instrument målte gennem 15 år ozonlaget globalt, og målinger fra instrumentet stemmer godt overens med målinger fra jordbaserede instrumenter. Derfor har vi i det følgende medtaget Nimbus7-TOMS målinger (version 8), således at der i denne rapport er målinger af

ozonlaget over Danmark og Grønland siden 1979. Det vil af figurtekster fremgå, hvilke data der stammer fra NASA.

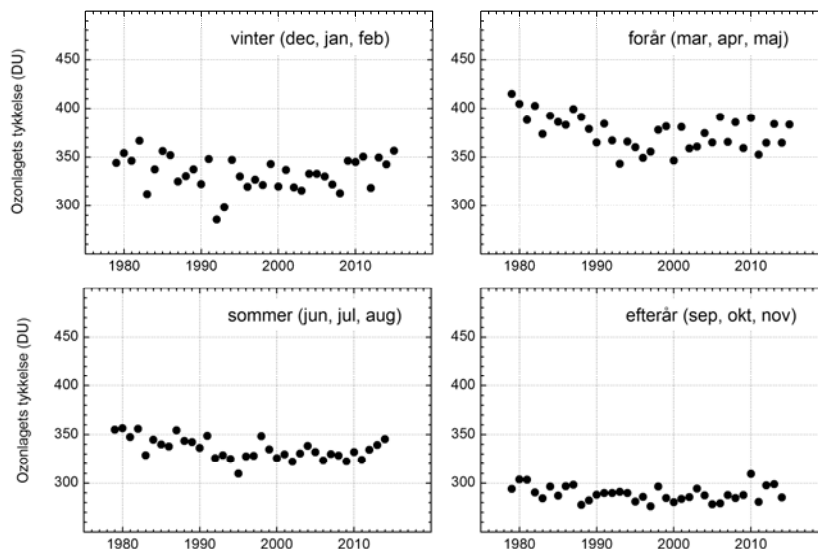
Ozonlagets årlige middeltykkelse over Danmark fremgår af figur 2. Selv om man i meteorologisk sammenhæng oftest anvender klimatiske normaler, der er gennemsnit over 30 år eller mere, anvendes 10-års perioden 1979-1988 i sammenhæng med ozonlaget ofte som reference, fordi der kun få steder i verden er målinger tidligere end 1979. I denne periode var der allerede påbegyndt ozonudtynding, så afvigelser fra denne reference udgør en nedre grænse for udtyndingen af ozonlaget over Danmark og Grønland.



Figur 2. Ozonlagets årlige middeltykkelse over Danmark for perioden 1979-2014. Den gennemsnitlige årlige middelværdi for 10-års perioden 1979-1988 er 344 DU. Data fra før 1993 er data fra NASA's TOMS instrument på Nimbus7- satellitten. Data fra og med 1993 er DMI's målinger i København med et Brewer-instrument.

Det er væsentligt at kunne forklare de fysiske årsager til nogle af de store udsving i ozonlagets gennemsnitlige tykkelse. År med store negative udsving i figur 2 er 1983, 1992 og 1993. Det er år efter store vulkanudbrud – El Chichon i Mexico i 1982, og Mt. Pinatubo på Philippinerne i 1991 – hvor udbruddene var så kraftige, at svovludledningen gav mærkbar indflydelse på ozonlaget (forøgede nedbrydningen) i et (El Chichon) eller to år (Mt. Pinatubo) efter udbruddene. Andre år med mindre negative udsving er 1995, 1996, 1997, 2000, 2005 og 2011, der alle er år efter en vinter med forholdsvis kold arktisk stratosfære, der giver en stor ozonnedbrydning. År med store positive udsving i figur 2 er 1998, 1999 og 2004; alle år efter en vinter med forholdsvis varm arktisk stratosfære, hvilket begrænser ozonnedbrydningen. Ozonnedbrydningen i den arktiske stratosfære i den sene vinter og tidlige forår påvirker ozonlaget helt ned på mellembreddegrader, dvs. også over Danmark. Hvis der for eksempel er stor nedbrydning i den arktiske stratosfære i januar-marts, bliver ozonlaget over Danmark tyndere gennem resten af foråret og sommeren, og bliver først normalt igen sidst på efteråret. Den meget høje værdi af ozonlagets tykkelse i 2010 over Danmark (figur 2 og figur 3) er generelt observeret over alle nordlige mellembreddegrader. Analyser har vist, at denne uventede høje værdi (anomali) kan forklares ved en fremtrædende og vedholdende negativ fase af den Nordatlantiske Oscillation (NAO) i kombination med en østlig fase af den kvasi-biennale oscillation (QBO), hvilket har givet anledning til forøget transport af ozon til områder uden for tropenerne (Steinbrecht et al., 2011). Derfor har ozonlagets gennemsnitlige tykkelse over f.eks. hele Europa været usædvanligt høj i 2010.

De sæsonmæssige ændringer af ozonlaget over Danmark er vist i figur 3 som middelværdi af de daglige målinger i sæsonerne: vinter (dec., jan., feb.), forår (marts, apr., maj), sommer (juni, juli, aug.) og efterår (sept., okt., nov.). Man bemærker især de store negative udsving for vinterperioden i årene efter vulkanudbrud (1983, 1992 og 1993) men også den usædvanligt høje værdi i efteråret 2010 pga. de forhold der er beskrevet ovenfor. Set over hele måleperioden 1979-2014 er det (nu) kun forår og sommer der viser en signifikant (lineær) trend (på hhv. $-0,18\%$ pr. år og $-0,16\%$ pr. år). Set over årene siden 1994 er der ikke nogen signifikant trend for nogen af sæsonerne.



Figur 3. Ozonlagets sæsonmæssige middeltykkelse over Danmark for perioden 1979-2014. Data fra før 1993 er data fra NASA's TOMS-instrument på Nimbus7- satellitten. Data fra og med 1993 er DMI's målinger i København med et Brewer-instrument.

Ozonlaget over Grønland

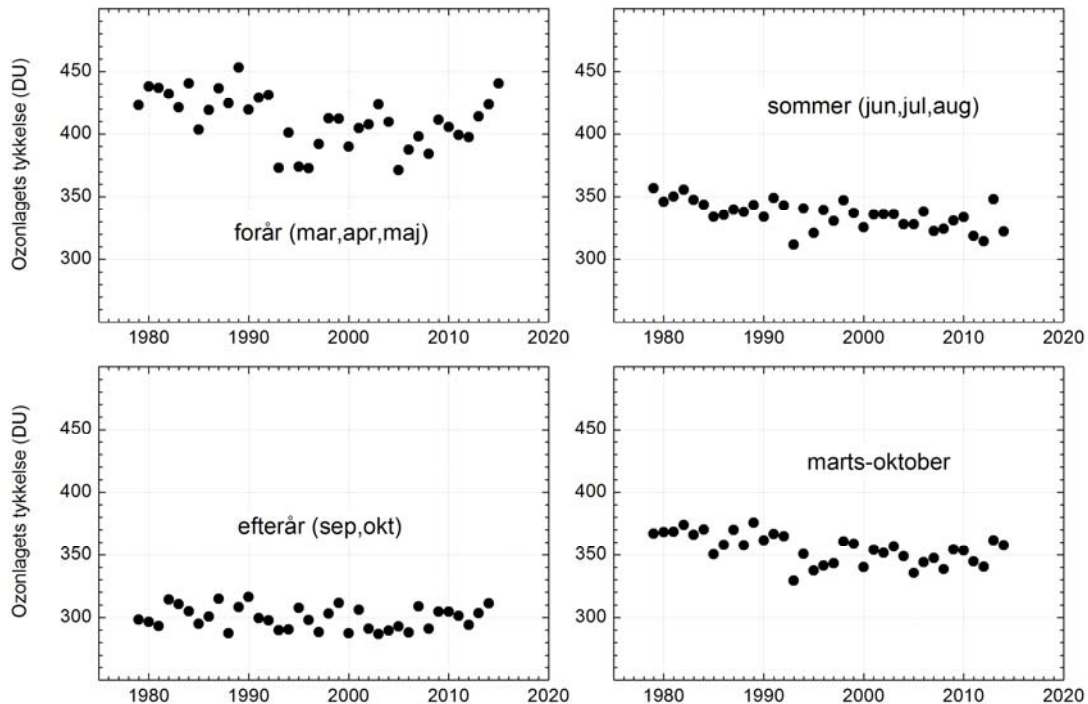
DMI påbegyndte målinger af ozonlagets tykkelse i Kangerlussuaq (Søndre Strømfjord) og Pituffik (Thule Air Base) i efteråret 1990. Daglige målinger er præsenteret i Appendix A. I Kangerlussuaq måles ozonlagets tykkelse og UV-strålingen med et Brewer-spektrofotometer (som i København), og i Pituffik måles ozonlagets tykkelse med et SAOZ-spektrometer – et såkaldt UV-Visible, eller DOAS-spektrometer (Differential Optical Absorption Spectrometer). SAOZ-spektrometret i Pituffik måler efter et andet princip end Brewer-spektrometret. Hvor Brewer-spektrometret måler på den direkte solstråling, måler SAOZ-spektrometret på zenitlyset ved solopgang og solnedgang. På grund af polarnatten giver placeringen af SAOZ-spektrometret i Pituffik den fordel, at der kan måles fra tidligt i februar til sent i oktober, samme periode som Brewer-spektrometret kan måle i Kangerlussuaq, fordi sidstnævnte behøver en vis solhøjde, før det kan måle. SAOZ-spektrometret er derimod ikke særlig god til målinger, når solen er på himlen hele dagen, hvilket er tilfældet i Pituffik i perioden maj-august.

Kangerlussuaq

Brewer-spektrometret i Kangerlussuaq kræver en solhøjde på mere end ca. 8 grader før målingerne er pålidelige, og tilmed skal der være direkte sollys for de laveste solhøjder. Derfor er den størst mulige måleperiode fra omkring 10. februar til omkring 1. november. Der kan således ikke måles i en periode på godt og vel 3 måneder omkring vintersolhverv. Derfor kan der ikke beregnes en årlig gennemsnitlig ozonlagstykkelse. DMI's Brewer-instrument påbegyndte målinger i Kangerlussuaq i september 1990. For fuldstændigheds skyld er på de følgende sider vist data fra 1979, men data frem til og med 1990 er, som for Danmark frem til 1992, NASA's satellitmålinger (TOMS-instrumentet på Nimbus-7 satellitten).

Figur 4 viser ozonlagets middeltykkelse fordelt på 3 sæsoner, hvoraf efteråret kun er 2 måneder, samt for hele måleperioden marts-oktober. Heraf fremgår tydeligt, at forårets ozonlagstykkelse har stor variabilitet. Det skyldes, at den polare hvirvelvind af og til ligger over Kangerlussuaq, og såfremt ozonnedbrydningen heri er stor, får det mærkbar indflydelse på måleværdierne. Det samme er ikke tilfældet for København, idet den polare hvirvelvind kun sjældent kommer så sydligt. I Appendix A er vist de daglige målinger af ozonlagets tykkelse over Kangerlussuaq i årene 1979-2014.

I de sæsonmæssige ændringer af ozonlaget over Kangerlussuaq (figur 4) bemærker man ikke år efter vulkanudbrud i samme grad som for Danmark. På nær efteråret er der for hele måleperioden 1979-2014 signifikant (lineær) trend for forår, sommer og perioden marts-oktober på hhv. -0,19%, -0,19% og -0,18% pr. år). Men som for Danmark er der efter 1994 ingen signifikant trend i nogen af sæsonerne.



Figur 4. Ozonlagets sæsonmæssige middeltykkelse for Kangerlussuaq for perioden 1979-2014. Der kan kun måles i perioden fra midt i februar til slutningen af oktober. Efterår er derfor begrænset til to måneder, og den årlige middeltykkelse kan ikke bestemmes. Data fra før 1991 er data fra NASA's TOM-instrument på Nimbus7-satellitten, mens data fra og med 1991 er DMI's målinger med et Brewer-instrument.

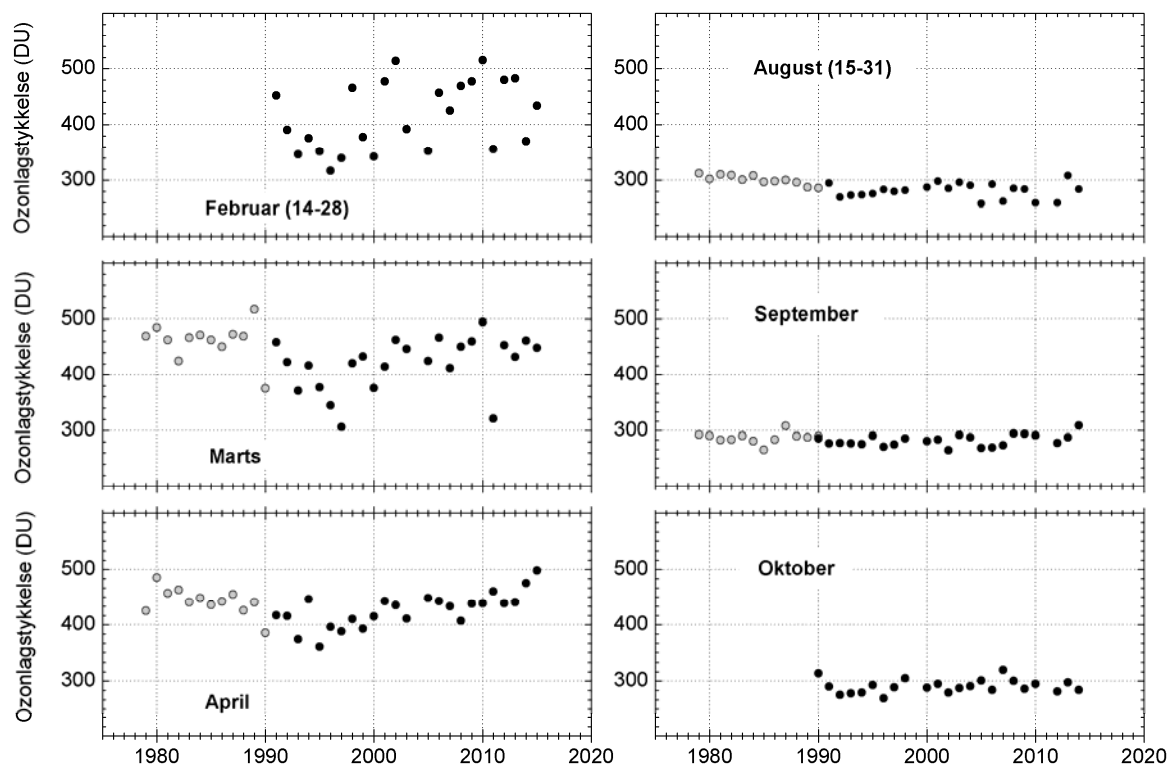
Målinger af ozonlaget over Pituffik

I Pituffik måles ozonlagets tykkelse med et SAOZ-spektrometer, der samtidig måler atmosfærens indhold af NO₂. SAOZ-spektrometret måler sollyset spredt fra zenit i et spektrum fra det ultraviolette og synlige bølglængdeområde. Ved hjælp af DOAS-metoden (Differential Optical Absorption Spectroscopy) kan atmosfærens indhold af ozon og NO₂ bestemmes. Pålidelige målinger kan kun opnås omkring solopgang og solnedgang; i Pituffik er det i forårsperioden fra ca. 15. februar til 5. maj og efterårsperioden fra ca. 10. august til 1. november. I sommerperioden er der midnatssol.

I figur 5 ses de observerede månedsmidler af ozonlaget over Pituffik. For perioden fra 1979 og frem til SAOZ-spektrometret blev opstillet i efteråret 1990, er vist målinger fra satellitinstrumentet TOMS. TOMS-instrumentet kan ikke måle, når solen står meget lavt. Derfor er der ikke TOMS-målinger i februar og oktober. SAOZ-målinger fra foråret 2004 mangler på grund af instrumentproblemer. Især i forårsmånederne varierer målingerne meget fra år til år i perioden efter 1990. De år, hvor ozonlaget er tyndt, svarer til de år, hvor der har været kraftig kemisk ozonnedbrydning. I Appendix A er vist de daglige målinger af ozonlagets tykkelse over Pituffik i den periode SAOZ-instrumentet kan måle for årene 1990-2014.

Målingerne i Pituffik (figur 5) viser den store variabilitet i foråret, i særdeleshed i februar og marts.

Men der er ikke signifikant trend, dertil er variabiliteten for stor. Man bemærker især de meget lave værdier i februar og marts 2011 hvor der var rekordstor ozonnedbrydning i den arktiske stratosfære pga. meget lave temperaturer og netop fordi den polare vortex var til stede over Pituffik i store perioder i disse måneder. Det var også tilfældet i 1997, som gav den hidtil laveste middelværdi for marts måned. Også årene 2000 og 2005 havde stor kemisk ozonnedbrydning i forårsmånederne.



Figur 5. Månedsmidler af ozonlagets tykkelse over Pituffik. Data fra før september 1990 (åbne cirkler) er målinger med NASAS's TOMS-instrument på Nimbus-7 satellitten. Data fra og med september 1990 (fyldte cirkler) er målinger med DMI's SAOZ-instrument. Instrumentfejl efterår 2011.

Ozonsonderinger

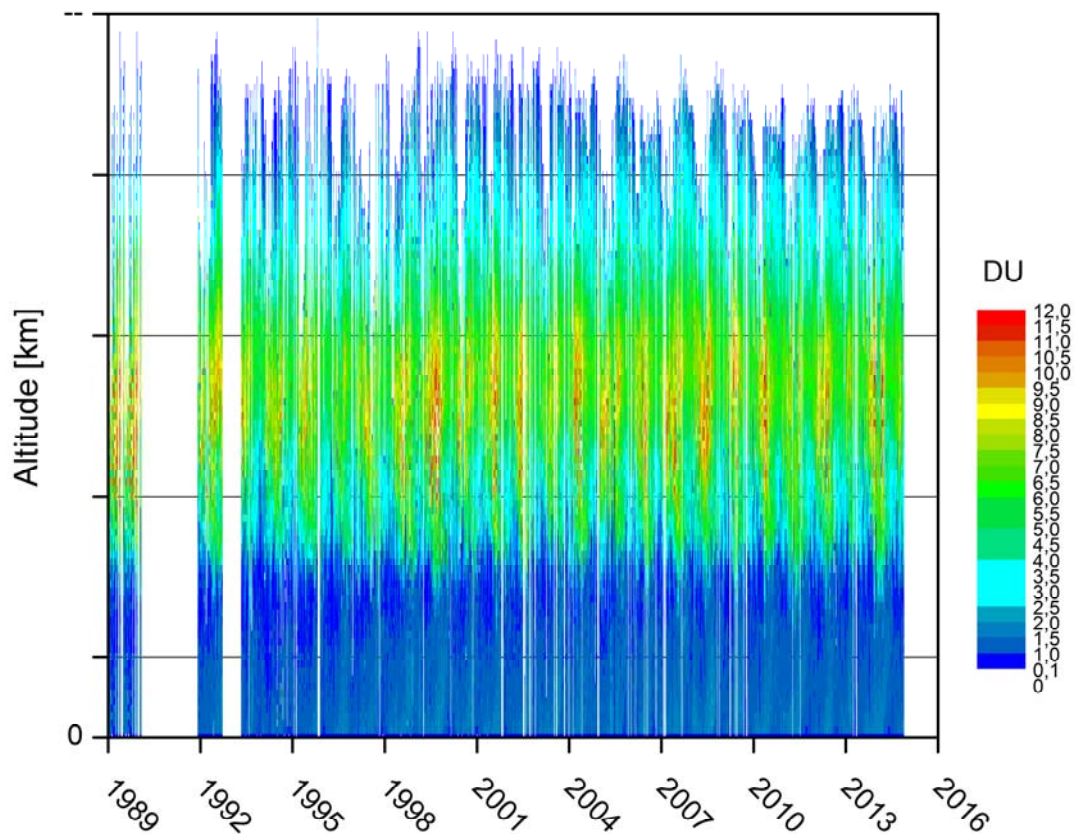
DMI foretager ugentlige ozonsonderinger i Illoqqortoormiut (Scoresbysund). Endvidere foretages ozonsonderinger i Pituffik (Thule Air Base) på kampagnebasis som del af internationale samarbejder til bestemmelse af arktisk ozonnedbrydning eller satellitvalidering. I særlige tilfælde foretages ozonsonderinger fra København.

I 2014 blev der foretaget 48 ozonsonderinger i Illoqqortoormiut og 17 i Pituffik.

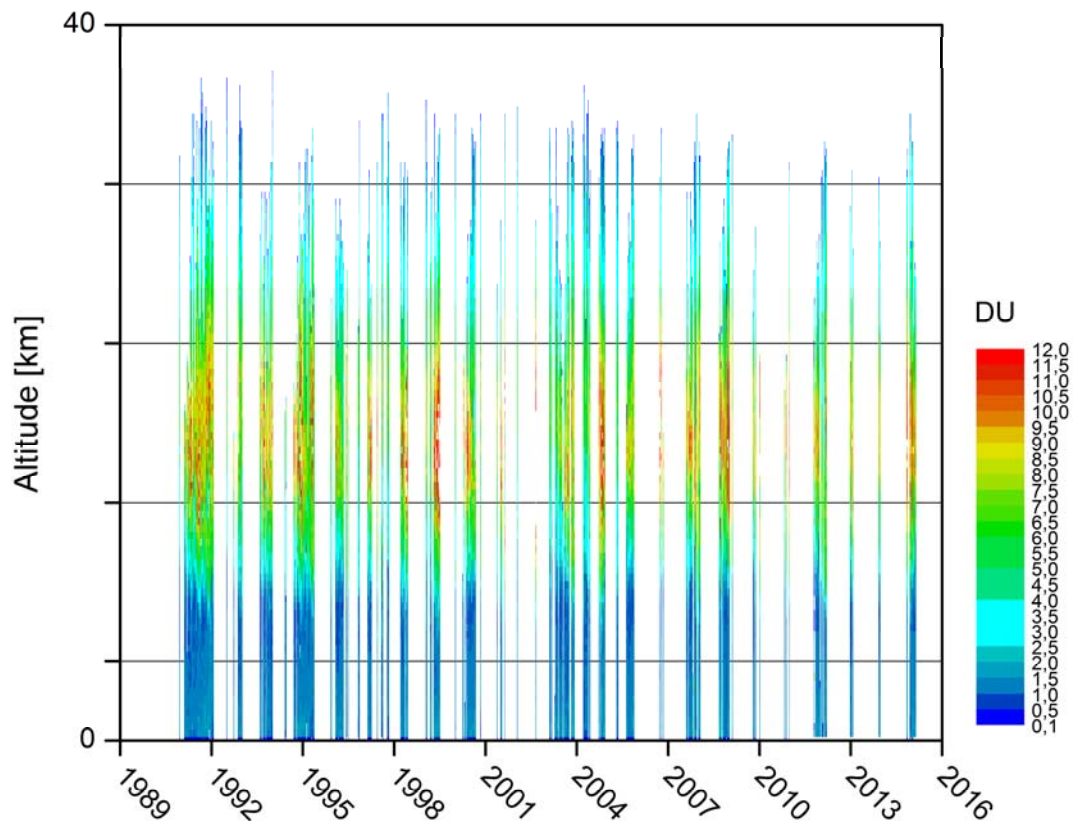
Ozonsonder er elektro-kemiske sensorer, som opsendes med ballon. Ozonsonderne kan måle ozonprofilen op til ca. 35 kilometers højde. Med ozonsonderingerne kan man studere, om der sker ændringer af ozonlaget i bestemte højder på grund af forandringer i atmosfærens kemiske sammensætning eller klimaet. Eksempelvis ventes regenerering af ozonlaget pga. udfasning af ozonnedbryden-

de stoffer først at kunne observeres i den øverste del af ozonprofilen. Arktisk ozonnedbrydning forekommer primært i 15-22 kilometers højde.

Der er foretaget ozonsonderinger i Illoqqortoormiut siden 1989, dog først på ugentlig basis siden 1992. I Pituffik er der foretaget ozonsonderinger siden 1991. Figur 6a viser en oversigt over ozonsonderingerne i Illoqqortoormiut og Figur 6b sonderinger i Pituffik. Det ses på Figur 6a, at ozonens partialtryk var relativt høj i 2006. Modsat var det relativt lavt i 2007 i intervallet 150-30 hPa (svarende til ca. 15-25 km) og sammenlignelig med værdierne i 2000 og midten af halvfemserne, hvor der var kraftig ozonnedbrydning. Se endvidere figur B1 og B2 i appendiks B.



Figur 6a. Oversigt over alle ozonsonderinger i Illoqqortoormiut. Figuren viser ozonens partialtryk som funktion af tid og højde. Se også figur B1 i appendiks B.



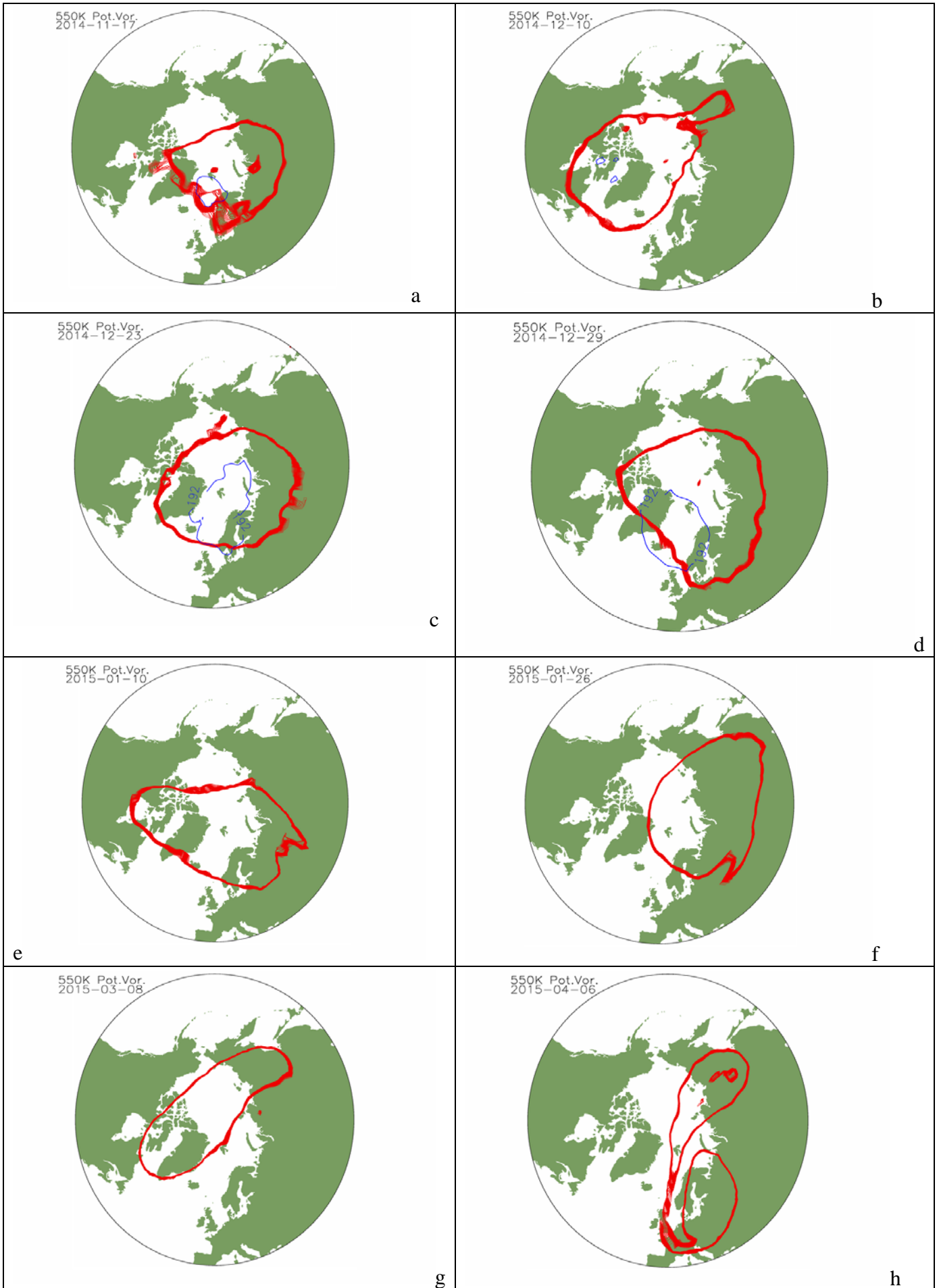
Figur 6b. Oversigt over alle ozonsonderinger i Pituffik. Figuren viser ozonens partialtryk som funktion af tid og højde.

Meteorologiske forhold i den arktiske stratosfære i vinteren 2014-2015

Almindeligvis skal der mindst være fire betingelser opfyldt, for at der sker en kraftig ozonnedbrydning over polarområderne:

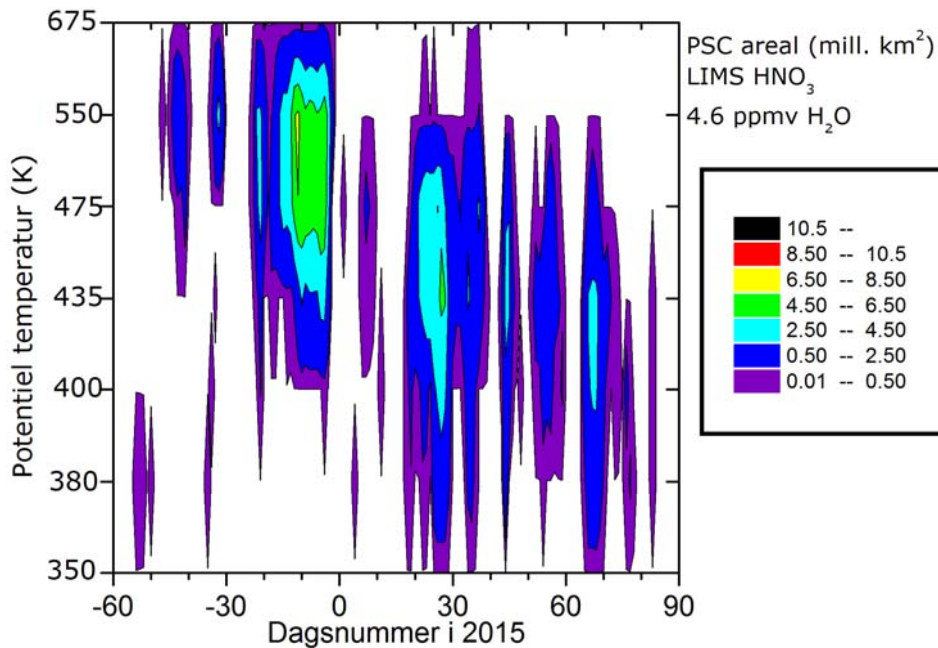
1. Forhøjede koncentrationer af klor- og bromholdige stoffer i atmosfæren. Koncentrationerne er steget pga. tilførsler af menneskeskabte CFC- og HALON-gasser (freon mm.).
2. Lave temperaturer i stratosfæren. Klorforbindelserne er kun ozonnedbrydende, når de omdannes til en kemisk reaktiv form (aktivering). Dette sker navnlig på overfladen af polarstratosfæriske skyer (forkortet fra engelsk til PSC'er), som kun dannes ved meget lave temperaturer. Samtidig udvaskes reaktivt nitrogen fra stratosfæren gennem skypartiklernes fald (denitrifikation), hvilket fremmer ozonnedbrydningen.
3. Sollyss. De kemisk reaktive klor- og bromforbindelser nedbryder kun ozon under indvirkning af sollyss, der vender tilbage til polområderne i det tidlige forår.
4. En isoleret luftmasse. Hver vinter dannes over polarområderne den polare hvirvelvind (vortex): kraftige vinde, der blæser i højder over ca. 15 km rundt om polerne. Vorticitet isolerer de polare luftmasser, der beskyttes mod opblanding med ozonrig luft fra lavere breddegrader.

Udviklingen af grænsen for den arktiske vortex gennem vinteren 2014/2015 er vist med røde konturlinjer i figur 7. Figuren viser vorticitets beliggenhed i en højde på 550 K potentiel temperatur, svarende til ca. 23 km højde. Med blå konturlinjer er vist isothermen for mulig dannelse af polarstratosfæriske skyer (type 1 PSC). Vorticitet dannes i anden halvdel af november med de første antydninger af dannelse af PSC omkring 17. november 2014 (a). Vortex splittes dog op uden PSC dannelse indtil 28. november, hvor næste mulighed for PSC dannelse forekommer. Omkring 10. december dækker vorticitet hele Grønland og det nordlige Atlanterhav (b). Omkring 23. december er der mulighed for PSC dannelse over store dele af Nordatlanten, Skandinavien ned mod Danmark (c), og omkring 29. december ses den største udbredelse af PSC dannelse gennem vinteren. Vorticitet holder sig stort gennem januar 2015 (e) uden mulighed for udbredt PSC dannelse og forskydes østpå og dækker store dele af det nordlige Rusland i slutningen af januar (f). Vorticitet er stadig stabilt omkring 8. marts (g), dækkende meste af Grønland, stadig uden mulighed for PSC dannelse. Først i begyndelsen af april undergår vorticitet en større perturbation og opvarmning, og omkring 6. april (h) er vorticitet i opløsning. Vinteren var således karakteriseret ved en stabil vortex, men PSC dannelsen har ikke været særlig udbredt, og ozonnedbrydningen (ca. 19%, baseret på målinger fra SAOZ netværket) blev derfor forholdsvis begrænset i det forgangne forår (se også efterfølgende figur 10).



Figur 7. Røde konturlinjer viser grænsen for den polare vortex i 550 K potentieltemperaturshøjde, svarende til ca. 23 km, i perioden 17. november 2014 – 6. april 2015. Blå konturlinjer viser isotermerne for dannelse af type 1 polar-stratosfæriske skyer.

Arealet af det område, der dækkedes af PSC'ere gennem vinteren i højdeintervallet 350-675 K potentieltemperatur, svarende til ca. 14-26 km, er vist i figur 8.

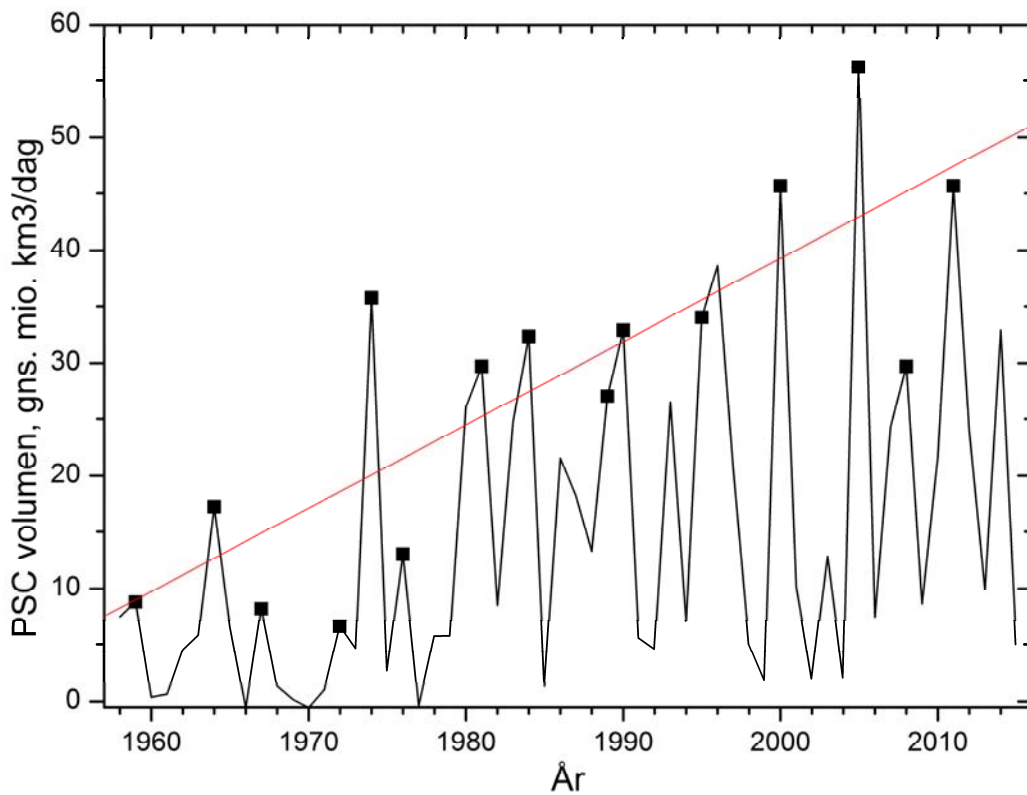


Figur 8. Areal af den nordlige halvkugle dækket af PSC'ere i højdeinterval 350-675 K potentieltemperatur, svarende til ca. 14-26 km gennem vinteren 2014-2015.

Den forgangne vinters PSC dannelse kan sammenlignes med vintrene 1994-2014 i figurerne A4a-e i Appendix A. Navnlig vintrene 1995, 1996, 1997, 2000, 2005, 2007, 2008 og 2011 var meget kolde med udbredt dannelse af PSC'ere og i konsekvens heraf en stor kemisk ozonnedbrydning.

Arktisk ozonnedbrydning og klimatiske forandringer.

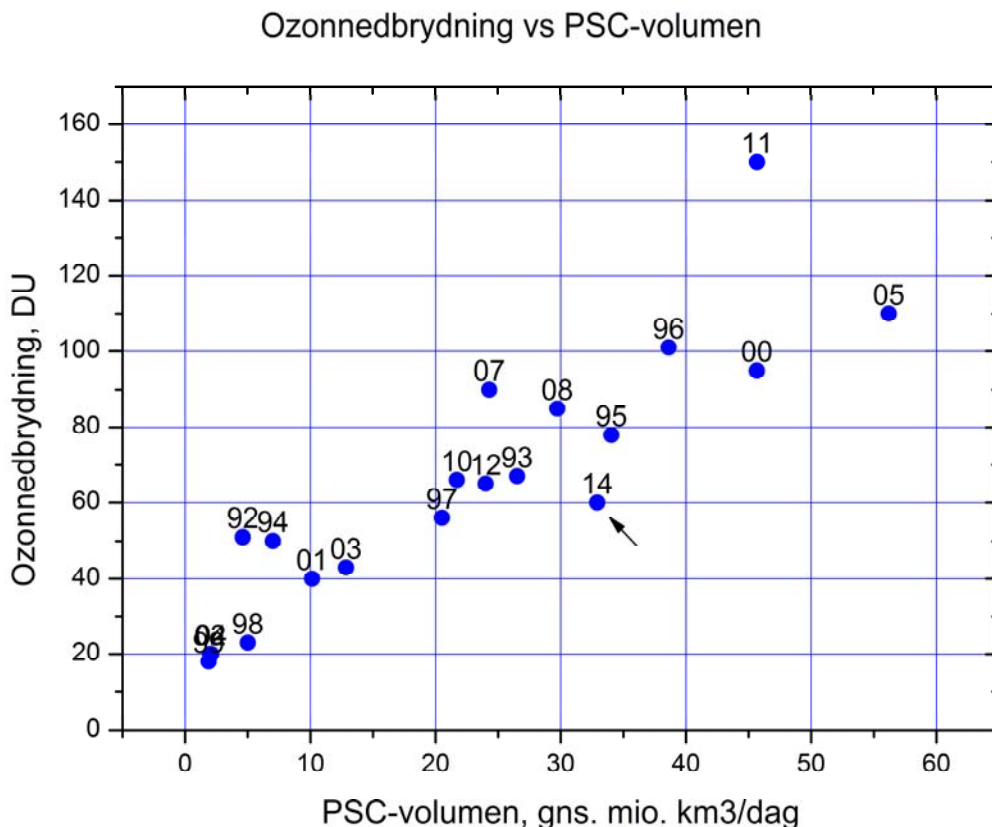
I den arktiske stratosfære sker der af og til en massiv tilførsel af varme fra lavere breddegrader. Det betyder, at der i nogle vintre kun dannes mindre mængder af polar-stratosfæriske skyer. I figur 9 er vist vinterens gennemsnitlige PSC-volumen siden 1958. Figuren viser for hvert år volumen af atmosfærisk luft med tilstrækkeligt lave temperaturer til, at PSC'er kan forekomme. PSC-volumnet ses at variere kraftigt fra år til år, men de kolde vintre udviser en yderst signifikant stigende tendens mod større PSC-volumen. De kolde vintre er med andre ord blevet koldere i den arktiske stratosfære, og det har – alt andet lige – ført til en forøget ozonnedbrydning i disse vintre. Denne afkøling kan bl.a. skyldes drivhuseffekten, der varmer op ved jordoverfladen, men afkøler ozonlaget.



Figur 9. Det gennemsnitlige volumen af atmosfærisk luft med temperaturer tilstrækkeligt lave til dannelse af polar-stratosfæriske skyer (PSC) siden 1958. Vintrene med de største PSC-volumener er markeret med kvadrater og danner grundlaget for regressionslinjen. PSC-volumnet er beregnet ud fra ECMWF analysedata analogt med Rex et al., 2004. Beregningen udføres i perioden 15. december til 31. marts, ialt 105 dage for normalår og 106 dage for skudår. Det beregnede volumen angives derefter som en gennemsnitlig værdi pr. dag (i mio. km³). Data fra før 1992 er baseret på reanalyseredata fra ECMWF ERA-40 (Uppala et al., 2005). Der er et overlap mellem de to dataserier på 11 år fra 1992-2002. Korrelationen i overlapsperioden er 94%. De fremhævede punkter er den største værdi i et 5 års glidende interval, og regressionslinjen er beregnet for disse punkter.

Mest interessante er de koldeste vintre, hvor der sker kraftig ozonnedbrydning. I figur 9 er de vintre, der i successive 5-års-intervaller har de største PSC-volumner, fremhævet, og regressionslinjen er beregnet ud fra disse punkter.

Inden for den polare hvirvelvind nedbrydes ozonen kemisk i de tidlige forårsmåneder. Når den polare hvirvelvind bryder sammen i slutningen af foråret, standser ozonnedbrydningen, og den ozonfattige luft spredes til middelbreddegraderne. Figur 10 viser den omtrentlige maksimale ozonnedbrydning fra januar til marts i den arktiske hvirvel fra 1992-2014 som funktion af vinterens gennemsnitlige PSC-volumen. Den arktiske ozonnedbrydning er bl.a. beregnet på baggrund af DMI's grønlandske ozonsonderinger som led i de internationale Match-kampagner (som dog ikke blev gennemført i 2006, 2009, 2013 og 2015 pga. forholdsvis høje stratosfæretemperaturer).



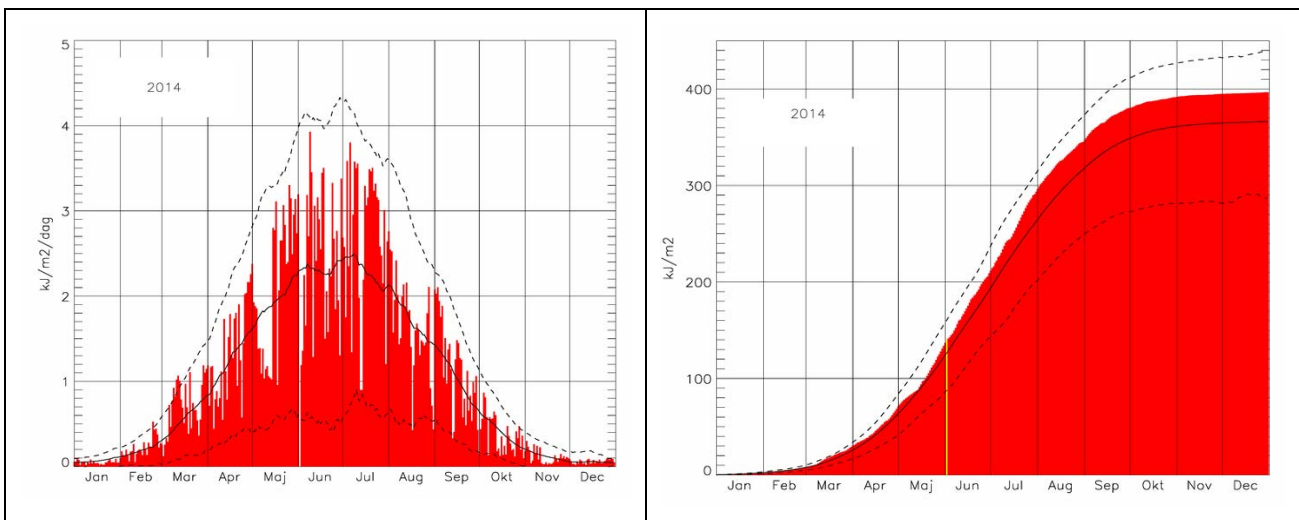
Figur 10. Den maksimale ozonnedbrydning fra januar til marts i den arktiske hvirvel fra 1992-2014 som funktion af vinterens gennemsnitlige PSC-volumen. Tallene angiver årstallet. Vinteren 2011 skiller sig ud fra de øvrige år med en rekord stor ozonnedbrydning. PSC-volumendata er de samme som i Fig 9. Den anførte ozonnedbrydning er resultatet af den årlige Match-kampagne, styret fra Alfred Wegener Instituttet (AWI).

Figur 10 viser, at ozonnedbrydningen i meget høj grad er korreleret med PSC-voluminet. Da de koldeste vintre er blevet koldere de sidste 52 år (figur 9), kan det antages, at der også vil forekomme en større ozonnedbrydning i de koldeste vintre i fremtiden. Imidlertid er mængden af ozonnedbrydende stoffer begyndt at aftage som følge af Montreal-protokollens krav om begrænset produktion (se Appendiks B og C).

Ozonedbrydning og UV-stråling

Den skadelige UV-stråling, der rammer jordens overflade, afhænger af flere parametre, hvoraf de vigtigste er: skydække og skytype, solhøjde, ozonlagets tykkelse, jordoverfladens refleksionsevne (albedo) og atmosfærens indhold af aerosoler. Solhøjde og skyer er de vigtigste parametre. Om sommeren er intensiteten af den skadelige UV-stråling ved Ækvator ca. dobbelt så stor, som den kan blive i Danmark – her spiller det dog også ind, at ozonlaget over Ækvator er tyndere end over Danmark. Skyer har en mærkbar indflydelse på UV-strålingen: på en dag med overskyet himmel og lavtliggende, regntunge skyer, bliver intensiteten af den skadelige UV-stråling kun 10-20 % af, hvad den ville have været uden skyerne. Omvendt vil intensiteten af den skadelige UV-stråling på en overskyet dag, hvor skyerne er høje, tynde cirrus-skyer, være op mod 90 % af det, den ville være uden skyerne. Hvis der i gennemsnit over en lang årrække ikke er ændringer i skytypeforekomst, skydække, albedo og aerosoler, er det således ozonlagets tykkelse, der er afgørende for ændringer i UV-strålingen.

I figur 11 vises indflydelsen af både ozonlagets tykkelse og skyforholdene på UV-strålingen gennem 2014. Fra de kontinuerte målinger af UV strålingen i København er den daglige akkumulerede dosis (kJ/m²) beregnet. I figur 11 (venstre panel) er de daglige resultater vist. Den fuldt optrukne kurve viser middelværdien af den målte UV dagsdosis i København for årene 2000-2010, og de stiplede kurver angiver hhv. +2 og -2 standardafvigelser. Den store variation fra dag til dag skyldes varierende skydække. I figur 11 (højre panel) vises den totale akkumulerede dosis i løbet af året.

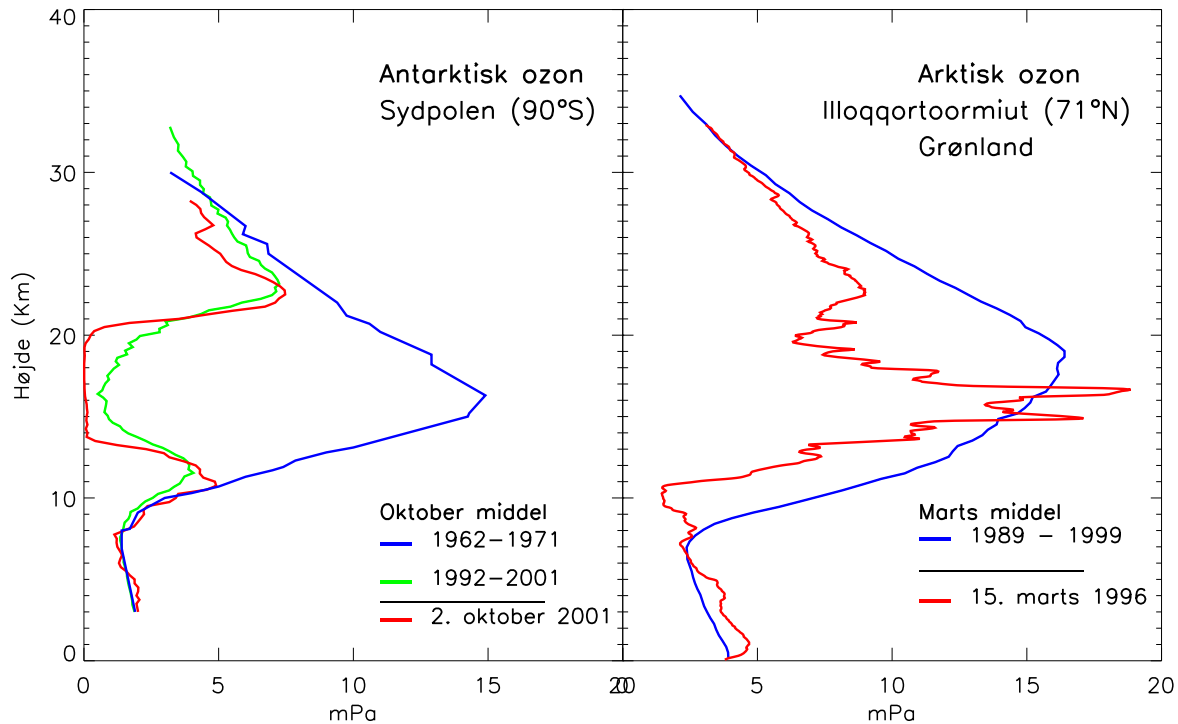


Figur 11 . (Venstre panel) Den dagligt målte totale dosis af hudskadelig UV stråling i 2014 i København i kJ/m²/dag. Fuldt optrukken kurve er den tilsvarende middel-dosis for 2000-2010. Øvre og nedre punkterede kurver viser hhv. +2 og -2 standardafvigelser. (Højre panel) Den totale dosis i løbet af året af hudskadelig UV stråling i 2014 i København i kJ/m². Fuldt optrukken kurve er den tilsvarende middel-dosis for 2000-2010. Øvre og nedre punkterede kurver viser hhv. +2 og -2 standardafvigelser.

Den meget solrige marts satte sit præg på den akkumulerede dosis, der her nåede op +2 standardafvigelse fra middelværdien for 2000-2010. Et meget solfattig start på maj måned bragte den akkumulerede dosis ned på 'normalen' igen, mens det klare, varme sommervejr i slutningen af maj bragte dosis over normalen igen. Aftrykket af den meget solskinsrige sidste halvdel af juli ses også tydeligt i figurene. Alt i alt endte den akkumulerede dosis for 2014 på 7% over middelværdien for 2000-2010.

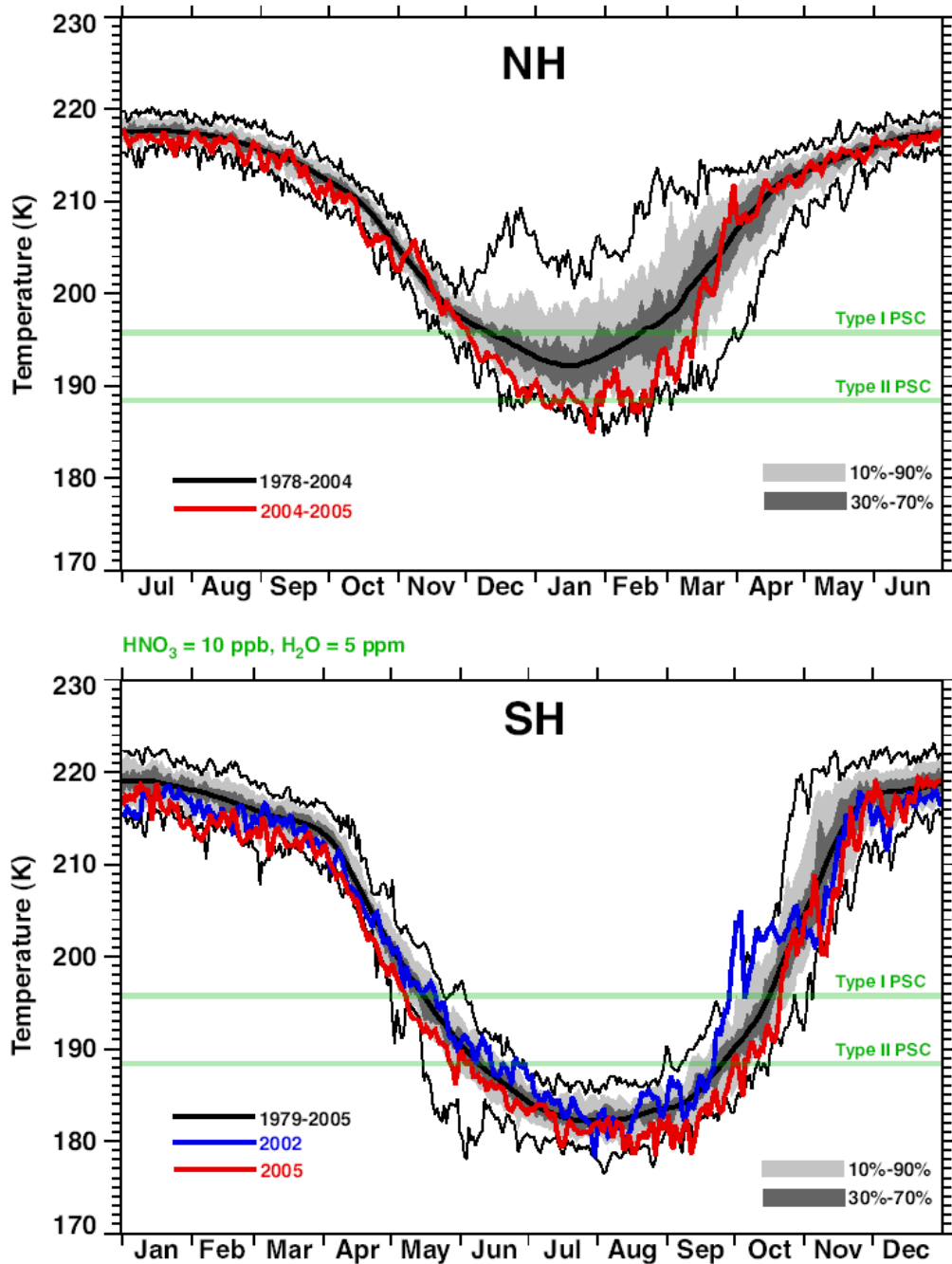
Ozonhullet over Antarktis

Ozonnedbrydning over Antarktis er væsentlig kraftigere end over Arktis, og der opstår hvert år et egentligt ozonhul i september og oktober, hvor ozonen fra ca. 14-20 km's højde er fuldstændig nedbrudt (se Figur 12).



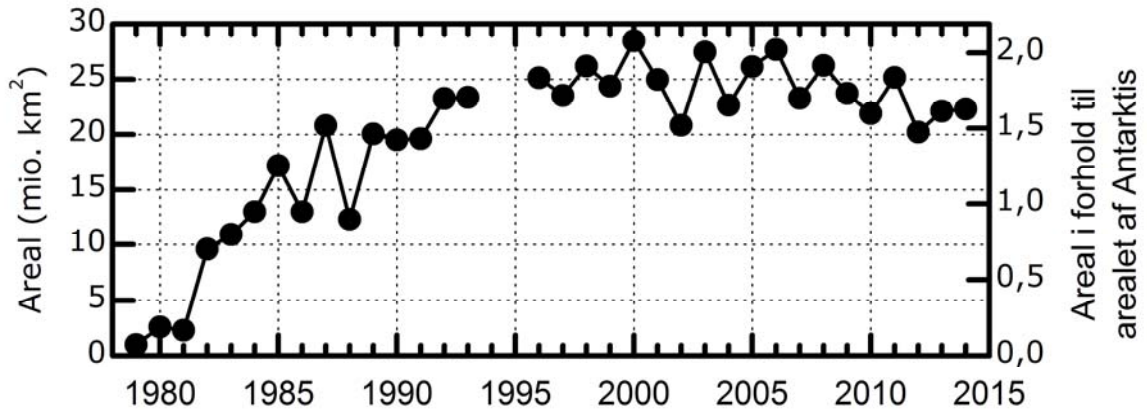
Figur 12. Højdeprofil af ozonnedbrydningen over Antarktis (til venstre) og Arktis (til højre). (WMO Assessment, 2002)

Grunden til den større ozonnedbrydning over Antarktis er, at temperaturerne her er væsentligt lavere end over Arktis. Det skyldes, at der på høje sydlige breddegrader er færre kontinenter og bjerge til at forstyrre cirkulation end på den nordlige halvkugle. Figur 13 viser temperaturer i Arktis og Antarktis. Det ses, at de laveste minimumstemperaturer i Arktis kun af og til når ned på de højeste minimumstemperaturer i Antarktis, og gennemsnitstemperaturerne i Arktis er omtrent 10 grader højere end i Antarktis. Dette betyder, at der dannes langt større mængder af PSC'er over Antarktis, hvilket fører til en langt kraftigere ozonnedbrydning, når sollyset fortrænger vintermørket.



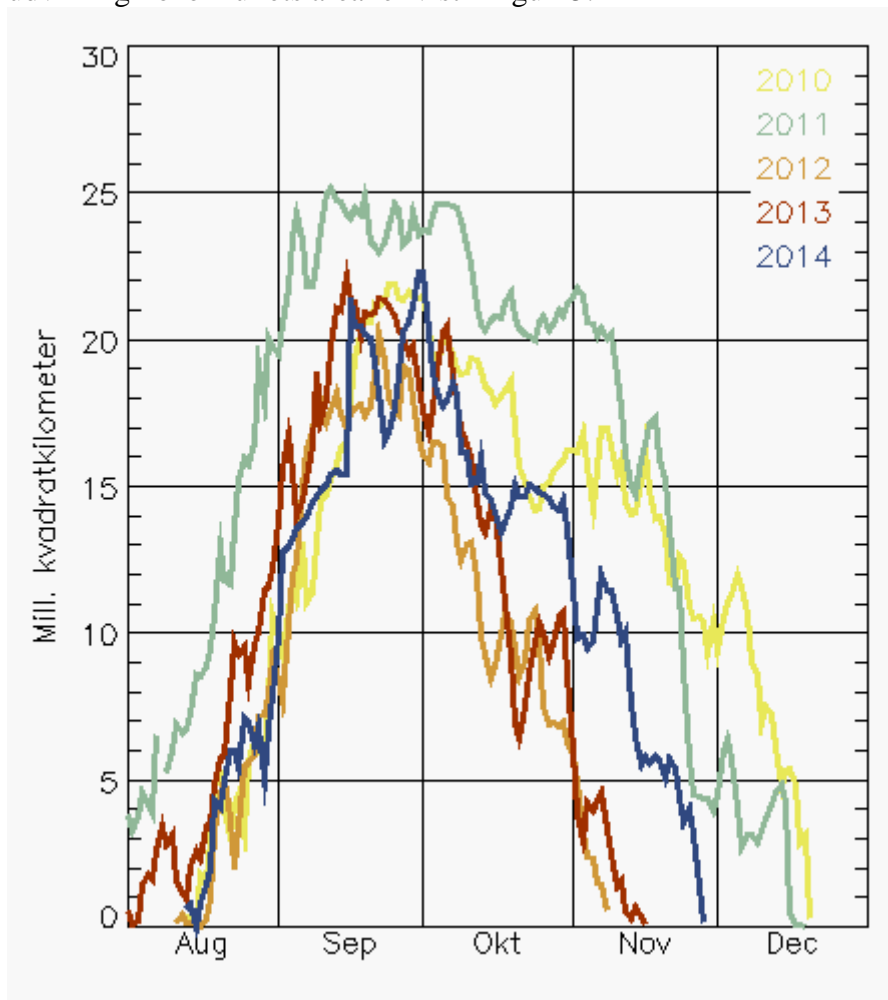
Figur 13. Årlig stratosfærisk temperatur cyklus og variabilitet i Arktis (NH) og Antarktis (SH). De grønne linjer angiver temperaturen, hvorunder PSC'er kan dannes. Den sorte kurve angiver middeltemperatur i perioden 1979-2004 (NH) og 1979-2005 (SH) med angivelse af rekordværdier (tynde sorte kurver). Den røde linje angiver udviklingen i Arktis (2004/2005) og Antarktis (2005) og 2002 (blå). Det grå areal angiver det interval, inden for hvilket procentdelen af observationerne falder. (WMO Assessment, 2007).

Hvordan arealet af ozonhullet over Antarktis har udviklet sig, siden det blev opdaget i 1985, er vist i Figur 14. Ozonhullet defineres her som det område, hvor ozonlagets tykkelse er under 220 DU, dvs. at ca. 1/3 af ozonen er nedbrudt. Det fremgår af figuren, at vi faktisk skal helt tilbage til 1981, for at der ikke fandtes noget ozonhul. I de senere år har ozonhullets areal dækket et område, der er dobbelt så stort som det antarktiske kontinent.



Figur14. Det maksimale areal af det antarktiske ozonhul i perioden 1979-2014.

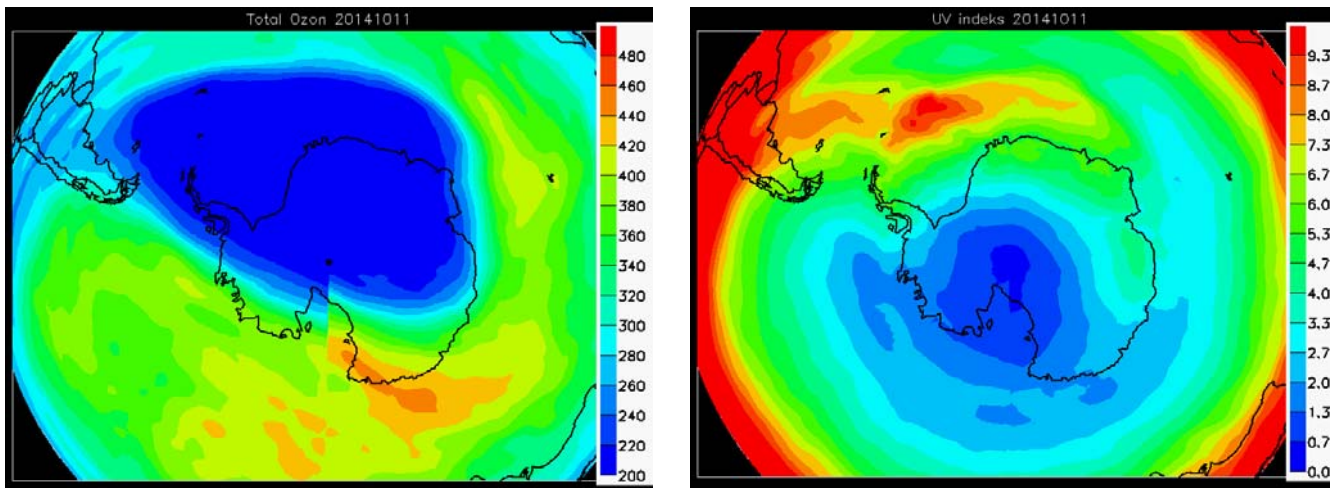
De sidste 5 års udvikling i ozonhullets areal er vist i Figur15.



Figur 15. Udviklingen i det antarktiske ozonhuls areal de seneste 5 år.

Ozonhullet over Antarktis startede som normalt i august og voksede til en maksimal størrelse på 22.3 millioner kvadratkilometer den 2. oktober 2014, meget tæt på normalen for årene 1990-2011, der er på 21.9 mill. km². Årets ozonhul var fra starten og i tiden indtil midt i oktober meget lig de to foregående års, med arealer der lå noget under normalen, men modsat årene 2012 og 2013, hvor ozonhullerne svandt rekord hastigt ind fra midt i oktober, så fulgte ozonhullet i 2014 lige under normalen og forsvandt først helt sidst i november.

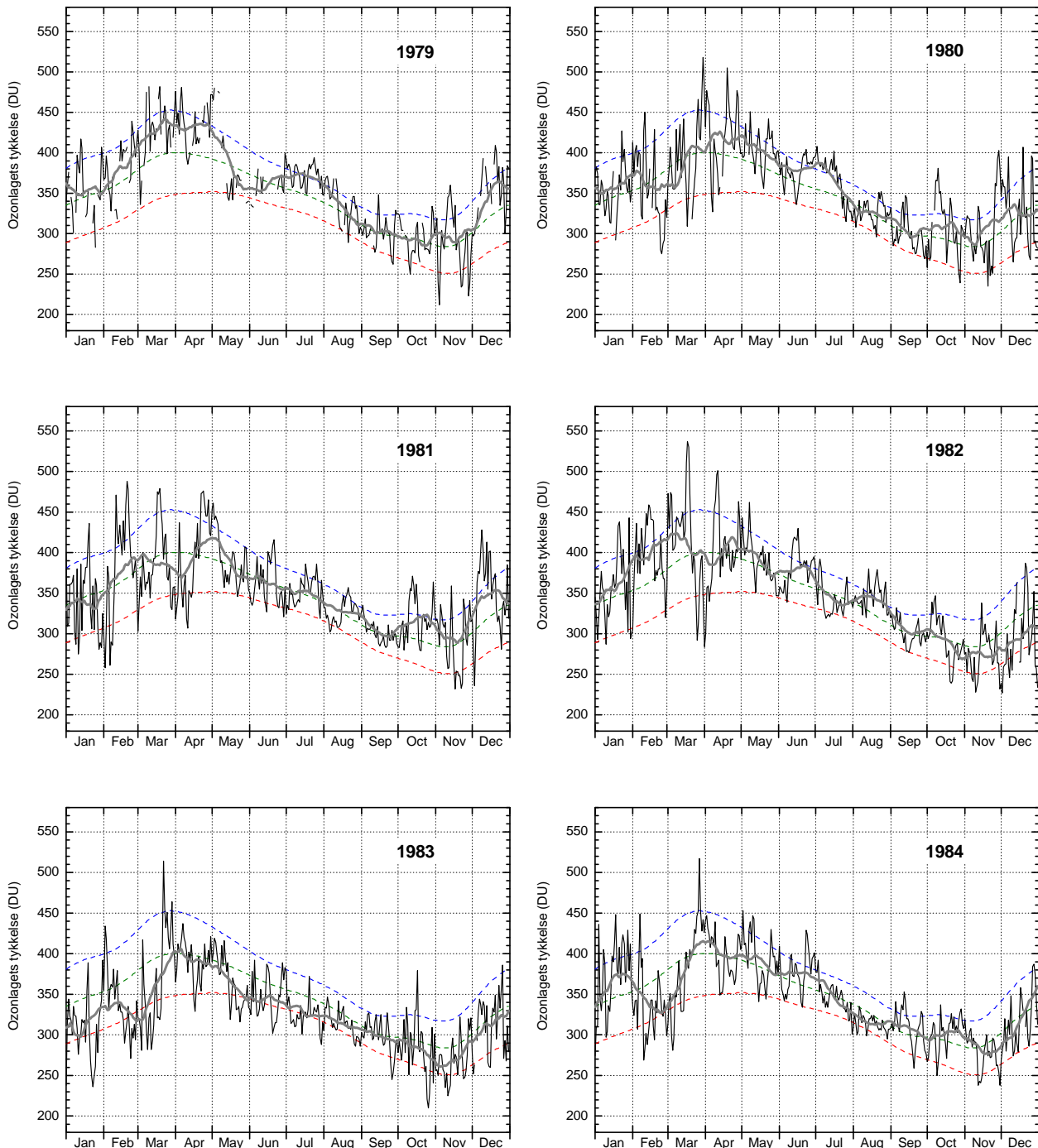
I figur 16(tv) er vist situationen den 11. oktober 2014, hvor ozonhullet er reduceret til ca. 75% af den maksimale størrelse, men placeringen af det og den tiltagende solhøjde giver en stærkt forøget UV stråling (th) over dele af det sydlige Atlanterhav, bl.a. Falklandsøerne. I området kunne der på skyfri dage modtages et UV-indeks på lidt over 10, hvilket er dobbelt så højt som tilsvarende områder uden for ozonhullet.



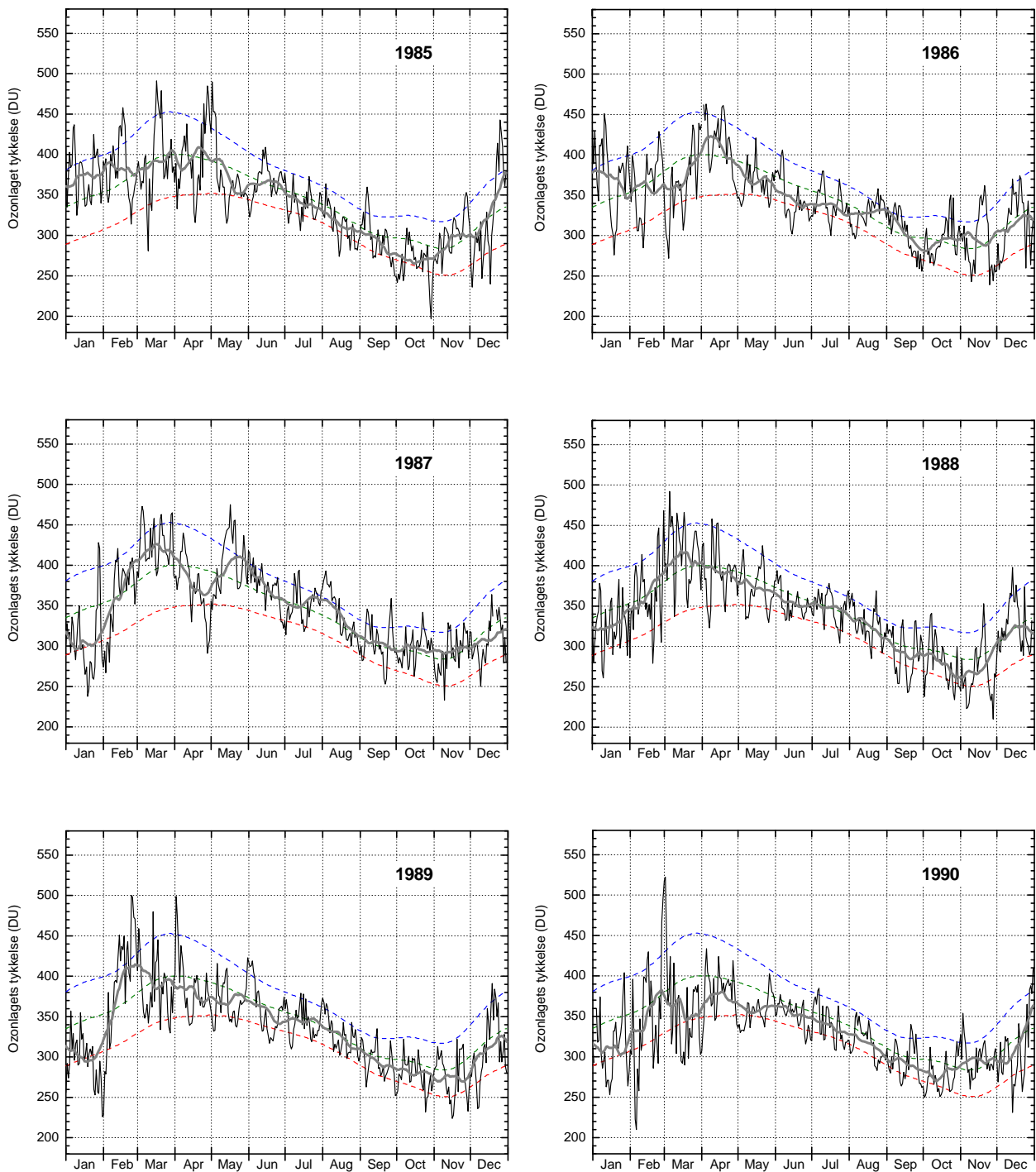
Figur 16. Beregnede UV-indices over det sydlige Amerika 11.oktober 2014 (højre panel) i forbindelse med det antarktiske ozonhul (venstre panel, DU).

Appendix A – Daglige målinger af ozonlaget

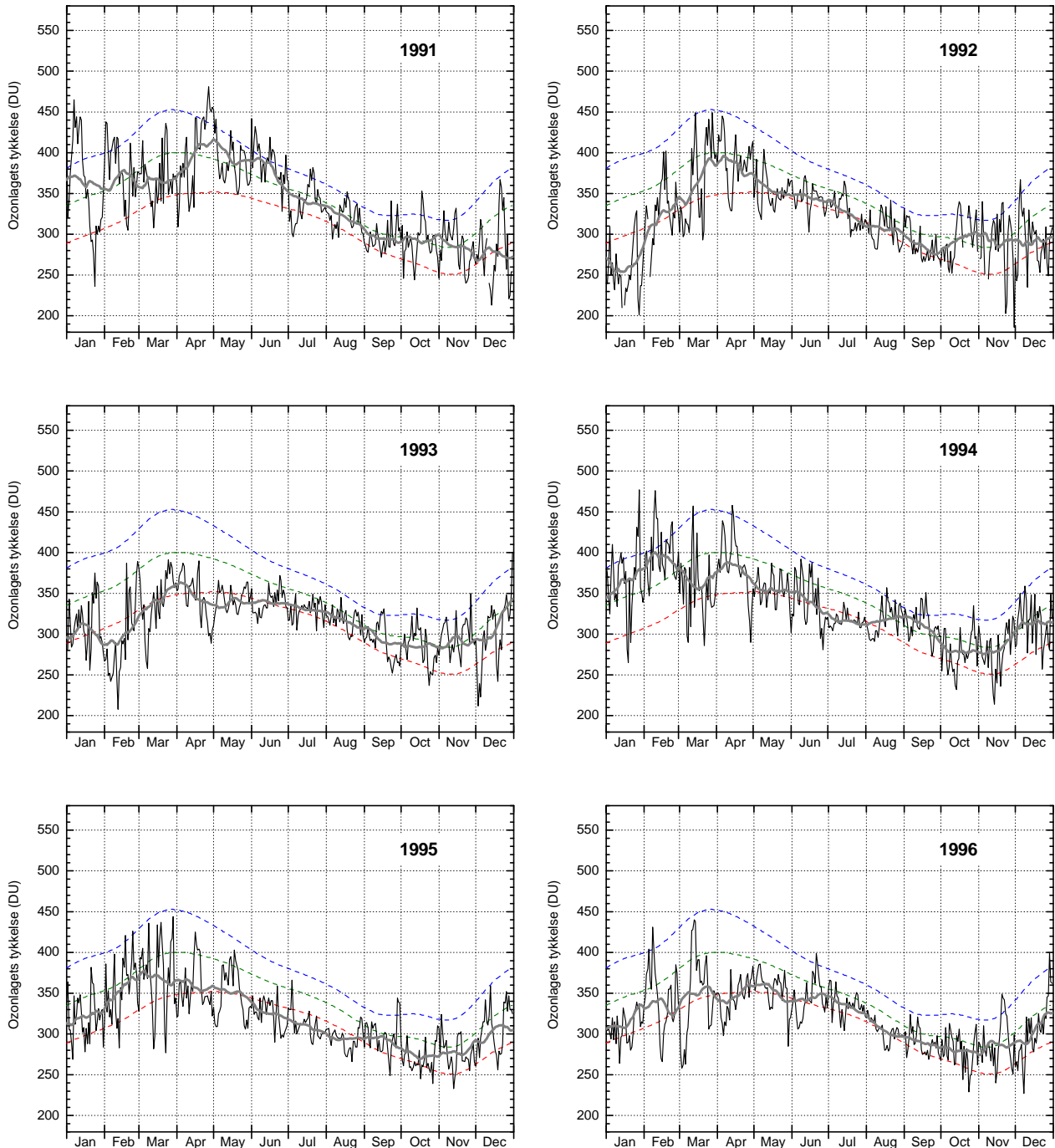
De daglige målinger over Danmark 1979-2014 fremgår af figurene A1a-A1g.



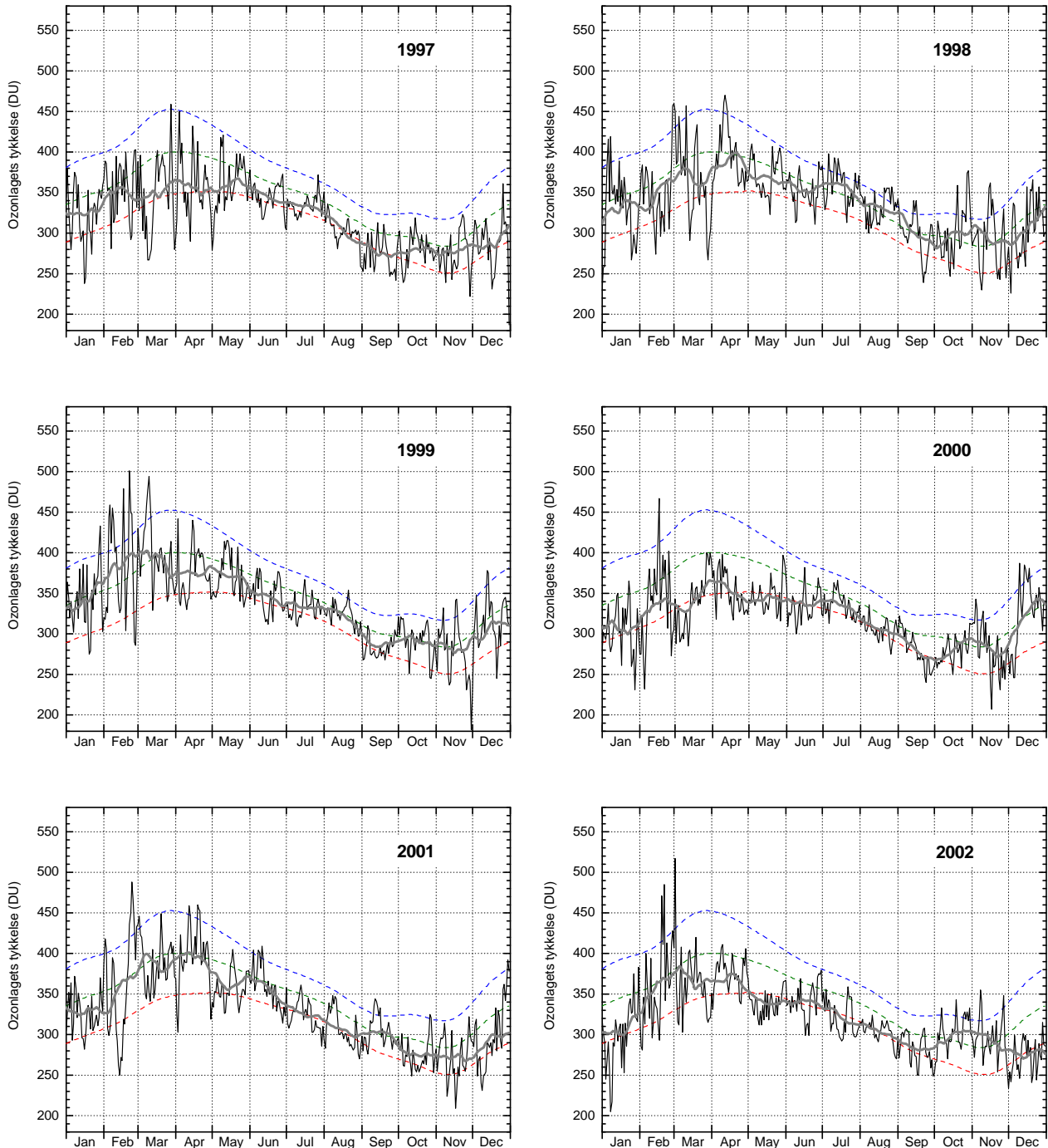
Figur A1a. Ozonlagets tykkelse over Danmark 1979-1984. Daglige målinger (tynd, sort linje) er fra NASA's TOMS-instrument på Nimbus7-satellitten. Den grønne stiplede linje angiver middelværdien af daglige målinger i 10-års perioden 1979-1988, mens de blå og røde stiplede linjer angiver henholdsvis middelværdien plus (blå) eller minus (rød) en standardafvigelse fra middelværdien. Det betyder, at ca. 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje. Den tykke grå linje er en 31-dages løbende middelværdi af de daglige målinger. Nogle kraftige vulkanudbrud fandt sted mellem 28. marts og 4. april 1982 (El Chichon, Mexico). Sandsynligvis skyldes det gennemsnitligt noget tynde ozonlag i 1983 dette vulkanudbrud.



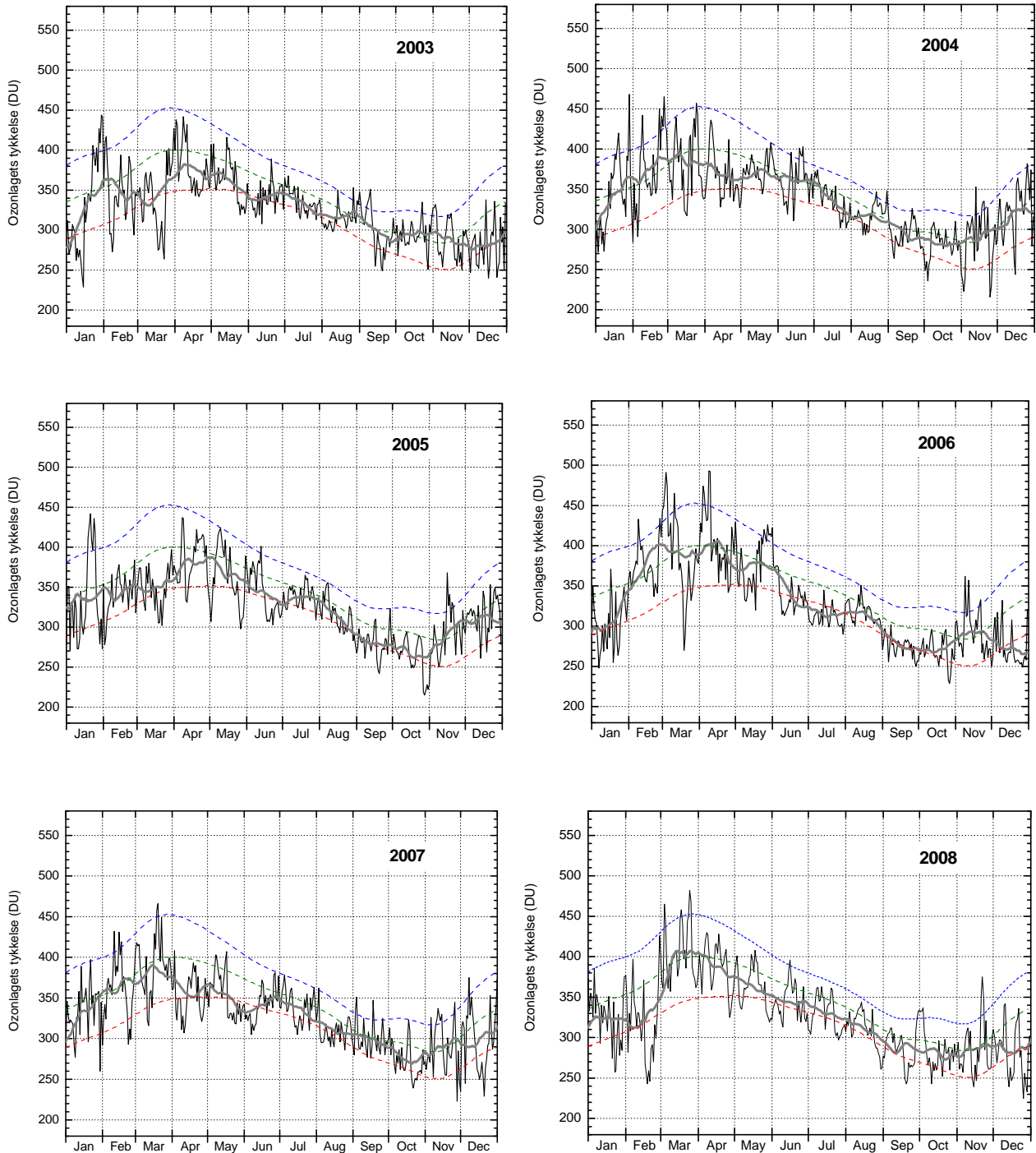
Figur A1b. Ozonlagets tykkelse over Danmark 1985-1990. Daglige målinger (tynd, sort linje) er fra NASA's TOMS-instrument på Nimbus7-satellitten. Den grønne stiplede linje angiver middelværdien af daglige målinger i 10-års perioden 1979-1988, mens de blå og røde stiplede linjer angiver henholdsvis middelværdien plus (blå) eller minus (rød) en standardafvigelse fra middelværdien. Det betyder, at ca. 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje. Den tykke grå linje er en 31-dages løbende middelværdi af de daglige målinger.



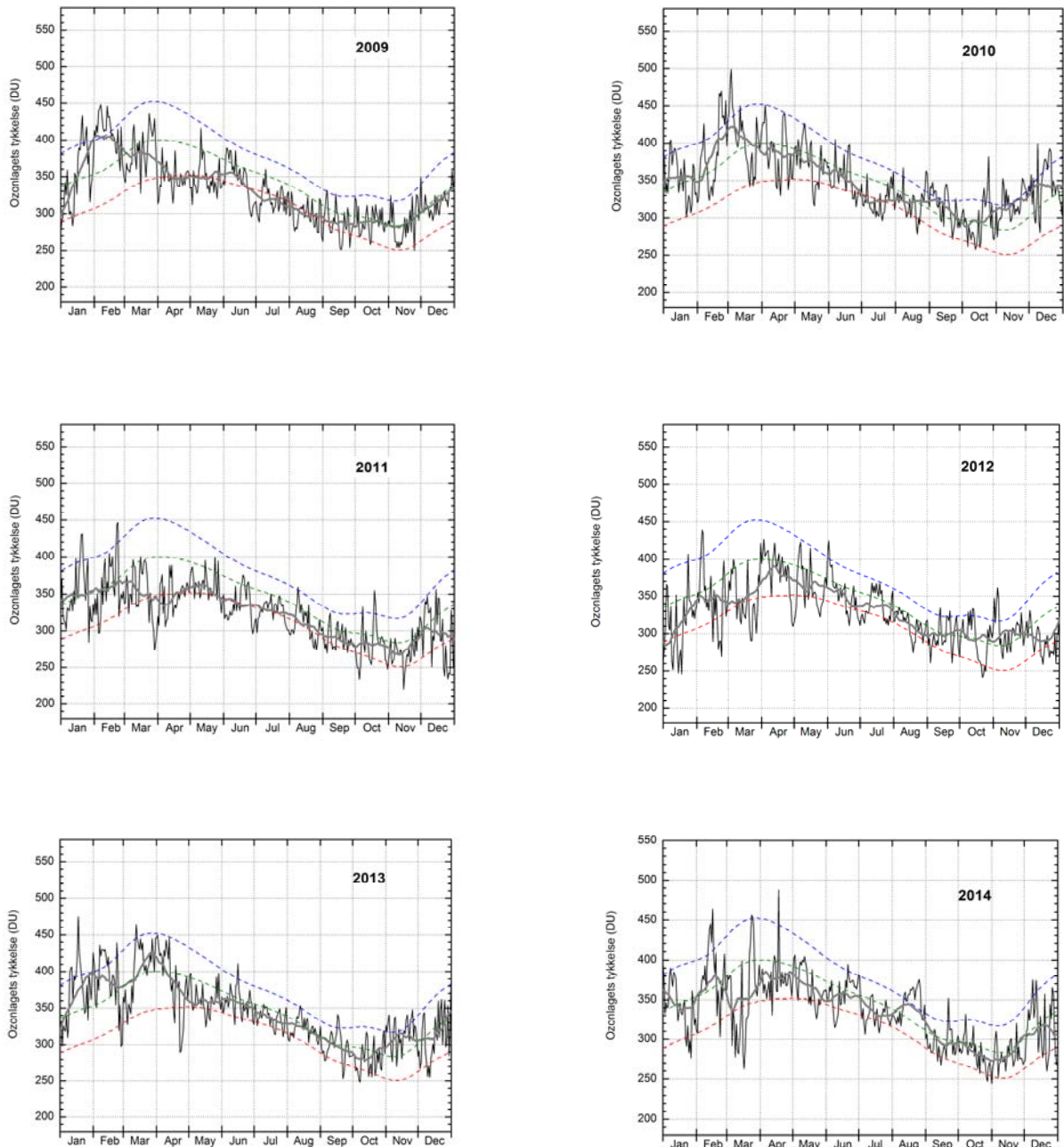
Figur A1c. Ozonlagets tykkelse over Danmark 1991-1996. Daglige målinger (tynd, sort linje) frem til maj 1992 er fra NASA's TOMS-instrument på Nimbus7-satellitten, og fra og med juni 1992 DMI's daglige målinger i København. Den grønne stiplede linje angiver middelværdien af daglige målinger i 10-års perioden 1979-1988, mens de blå og røde stiplede linjer angiver henholdsvis middelværdien plus (blå) eller minus (rød) en standardafvigelse fra middelværdien. Det betyder, at ca. 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje. Den tykke grå linje er en 31-dages løbende middelværdi af de daglige målinger. Et kraftigt vulkanudbrud i juni 1991 (Mt. Pinatubo, Filippinerne) påvirker ozonlaget i 1992 og 1993. Forholdsvis stor ozonnedbrydning i den polare stratosfære i vintrene 1991-1992, 1992-1993, 1994-1995 og 1995-1996 sætter sine spor med forholdsvis tyndt ozonlag gennem de efterfølgende somre. I Danmark var sommeren 1995 desuden præget af langvarigt højtryk, hvilket også bidrog til et tyndt ozonlag.



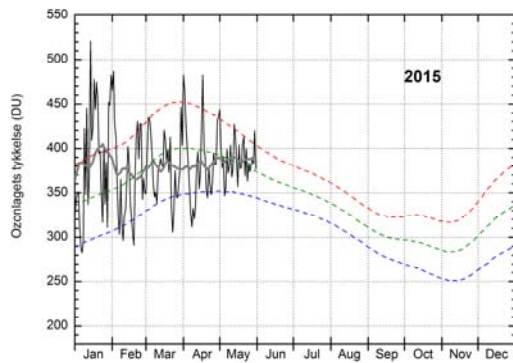
Figur A1d. Ozonlagets tykkelse over Danmark 1997-2002. Daglige målinger (tynd, sort linje) er DMI's målinger i København. Den grønne stiplede linje angiver middelværdien af daglige målinger i 10-års perioden 1979-1988, mens de blå og røde stiplede linjer angiver henholdsvis middelværdien plus (blå) eller minus (rød) en standardafvigelse fra middelværdien. Det betyder, at ca. 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje. Den tykke grå linje er en 31-dages løbende middelværdi af de daglige målinger. Forholdsvis stor ozonnedbrydning i den polare stratosfære i vinteren 1999-2000 sætter sine spor med forholdsvis tyndt ozonlag forår og sommer 2000. En forholdsvis varm polar stratosfære i vintrene 1997-1998, 1998-1999, 2000-2001 og 2001-2002 med deraf følgende ringe ozonnedbrydning sætter sine spor i de følgende forår og somre med forholdsvis normalt ozonlag.



Figur A1e. Ozonlagets tykkelse over Danmark 2003-2008. Daglige målinger (tynd, sort linje) er DMI's målinger i København. Den grønne stiplede linje angiver middelværdien af daglige målinger i 10-års perioden 1979-1988, mens de blå og røde stiplede linjer angiver henholdsvis middelværdien plus (blå) eller minus (rød) en standardafvigelse fra middelværdien. Det betyder, at ca. 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje. Den tykke grå linje er en 31-dages løbende middelværdi af de daglige målinger. En forholdsvis varm polar stratosfære i vintrene 2002-2003 og (især) 2003-2004 med deraf følgende ringe ozonnedbrydning sætter sine spor i de følgende forår og somre med forholdsvis normalt ozonlag.

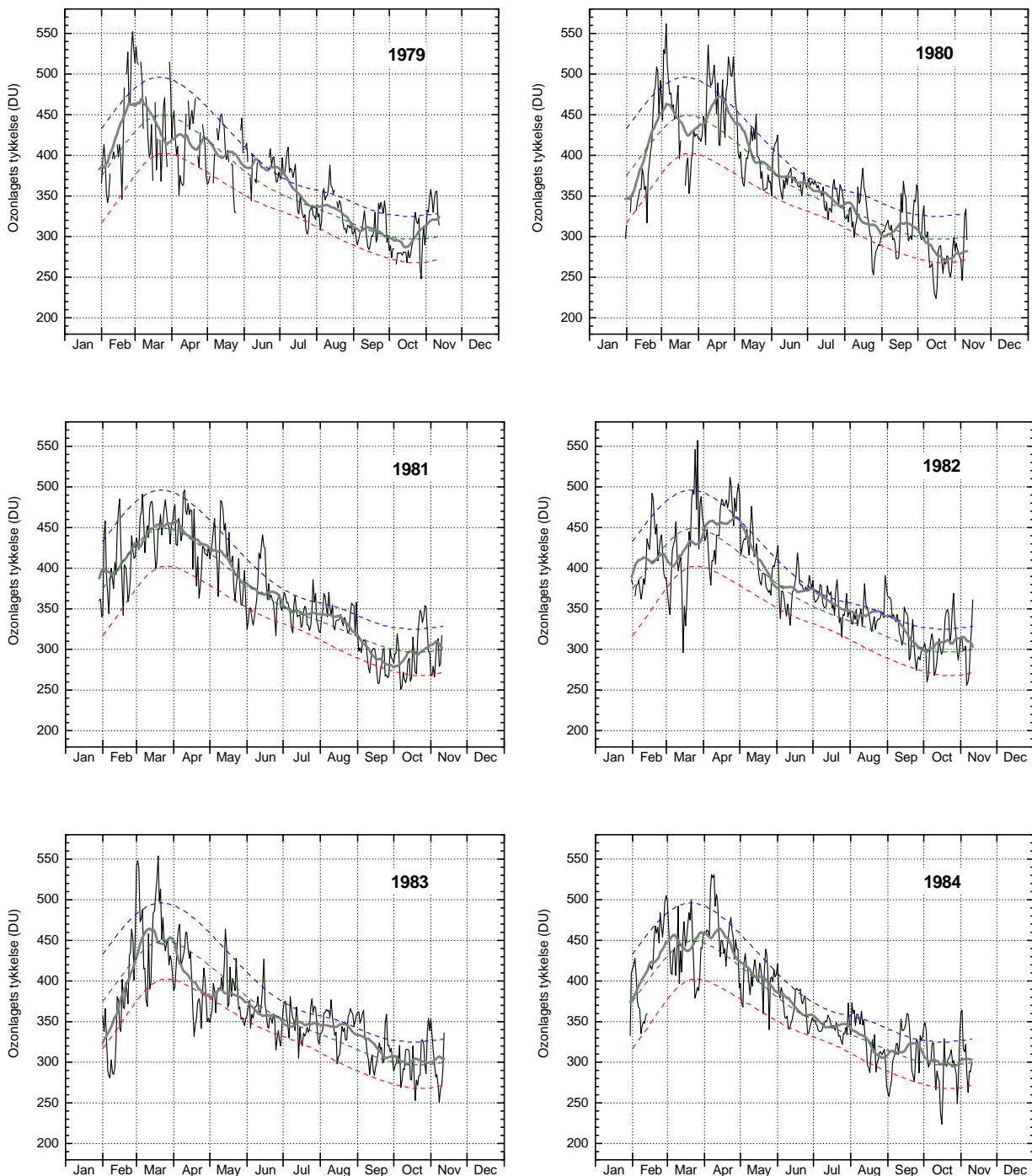


Figur A1f. Ozonlagets tykkelse over Danmark 2009-2014. Daglige målinger (tynd, sort linje) er DMI's målinger i København. Den grønne stiplede linje angiver middelværdien af daglige målinger i 10-års perioden 1979-1988, mens de blå og røde stiplede linjer angiver henholdsvis middelværdien plus (blå) eller minus (rød) en standardafvigelse fra middelværdien. Det betyder, at ca. 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje. Den tykke grå linje er en 31-dages løbende middelværdi af de daglige målinger.

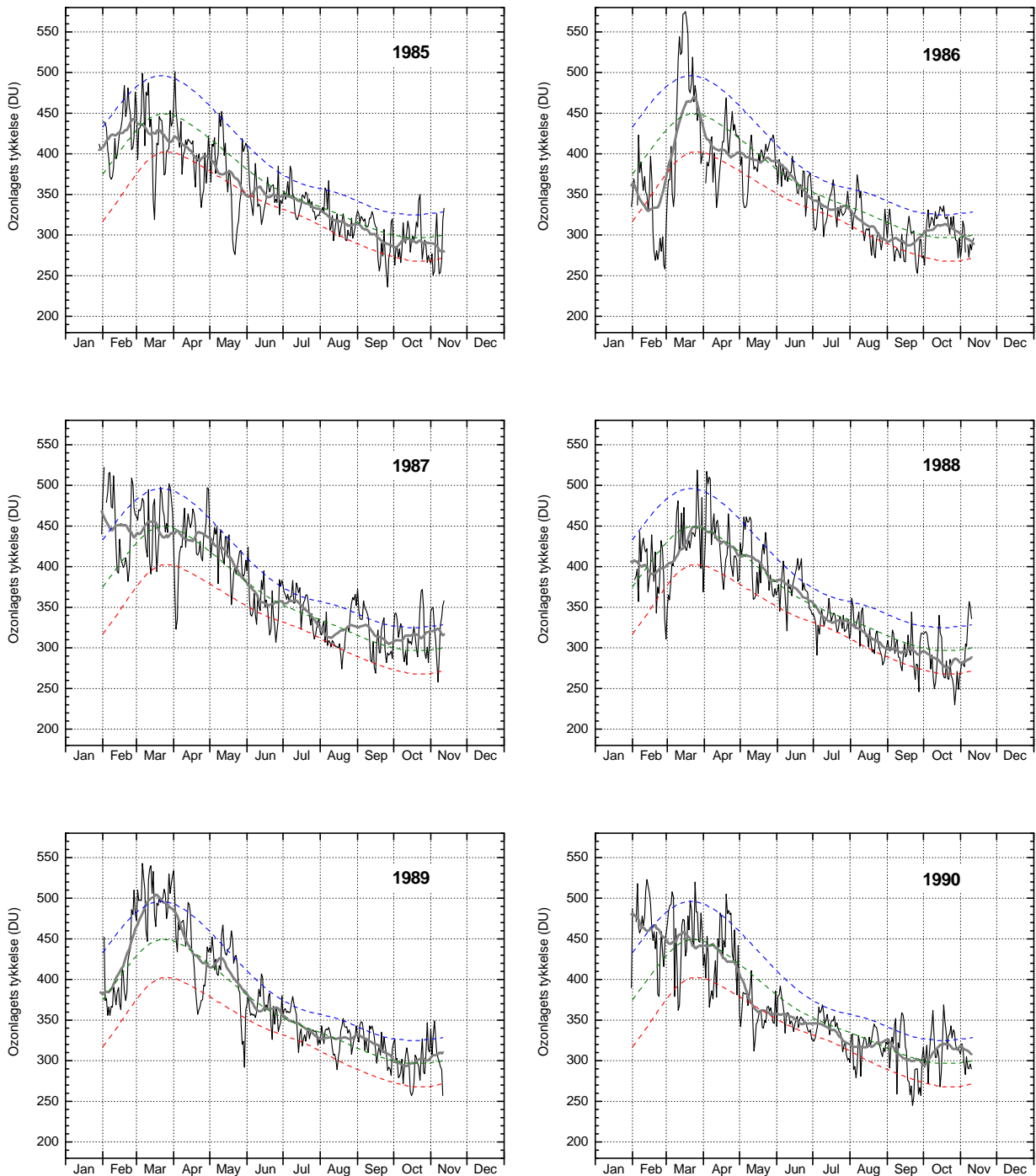


Figur A1g. Ozonlagets tykkelse over Danmark første halvdel af 2015. Daglige målinger (tynd, sort linje) er DMI's målinger i København. Den grønne stiplede linje angiver middelværdien af daglige målinger i 10-års perioden 1979-1988, mens de blå og røde stiplede linjer angiver henholdsvis middelværdien plus (blå) eller minus (rød) en standardafvigelse fra middelværdien. Det betyder, at ca. 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje. Den tykke grå linje er en 31-dages løbende middelværdi af de daglige målinger.

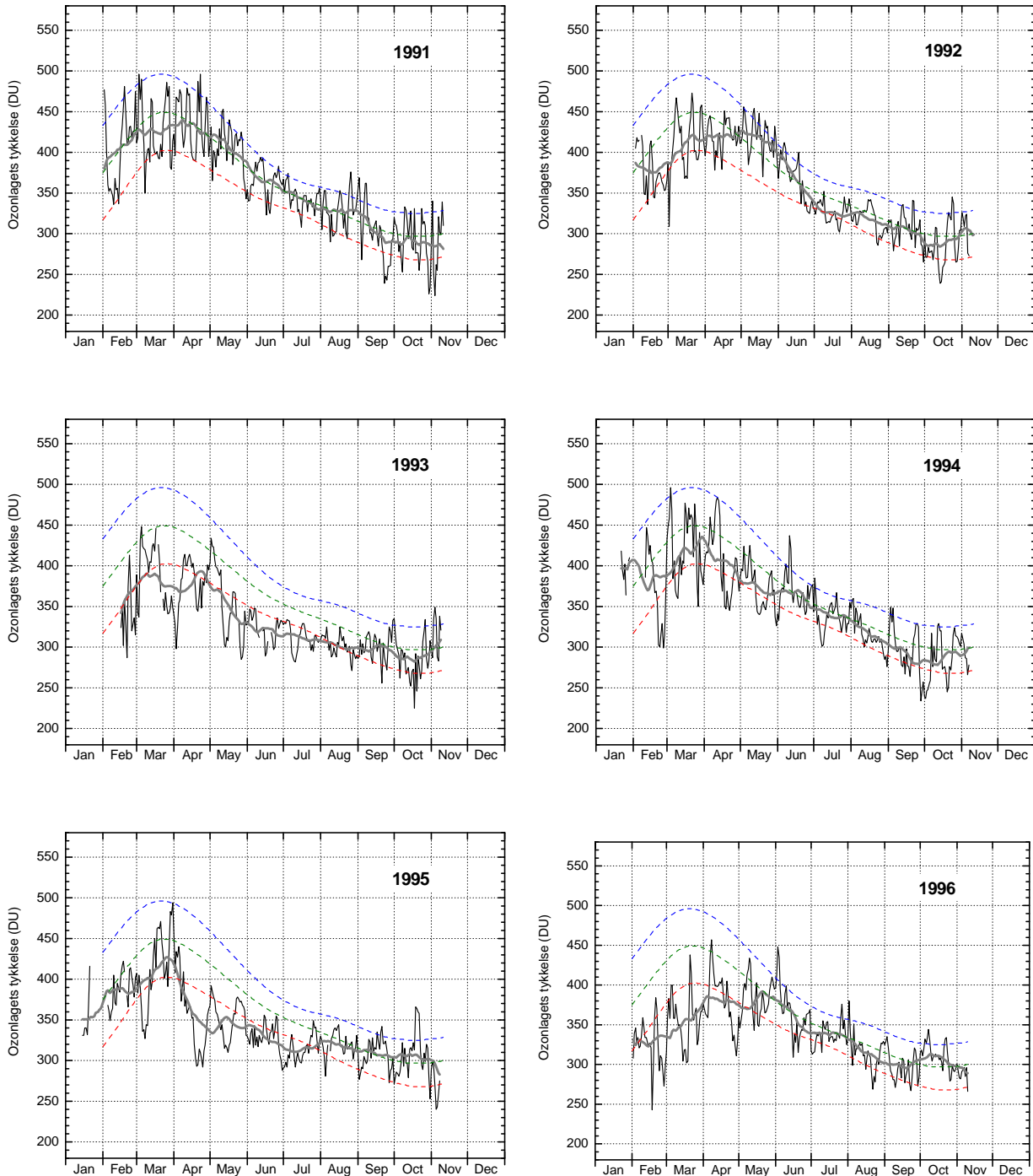
De daglige målinger over Kangerlussuaq 1979-2014 fremgår af figurene A2a til A2g.



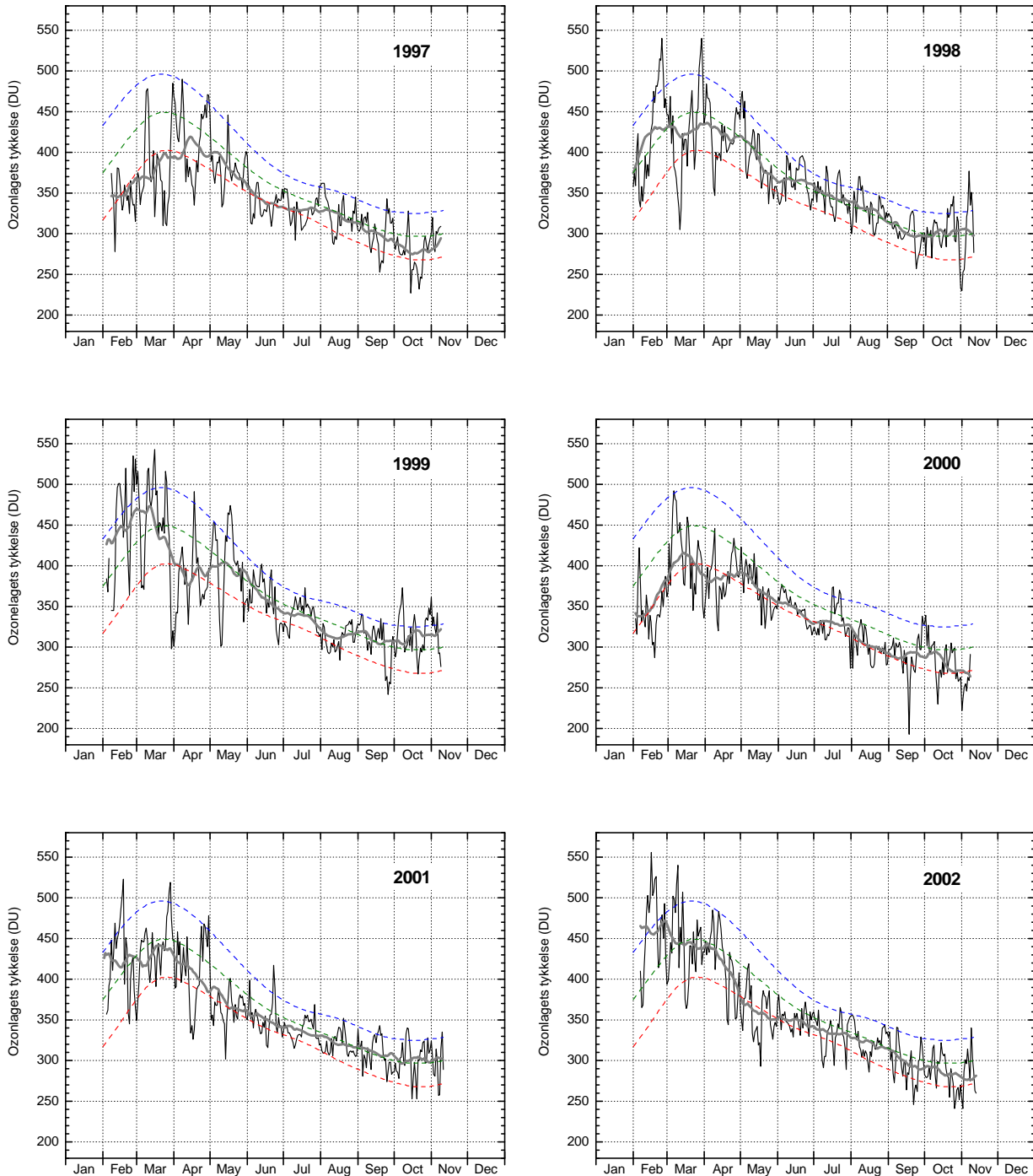
Figur A2a. Ozonlagets tykkelse over Kangerlussuaq 1979-1984. Daglige målinger (tynd, sort linje) er fra NASA's TOMS instrument på Nimbus7-satellitten. Den grønne stiplede linje angiver middelværdien af daglige målinger i 10-års perioden 1979-1988, mens de blå og røde stiplede linjer angiver henholdsvis middelværdien plus (blå) eller minus (rød) en standardafvigelse fra middelværdien. Det betyder, at ca. 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje. Den tykke grå linje er en 31-dages løbende middelværdi af de daglige målinger.



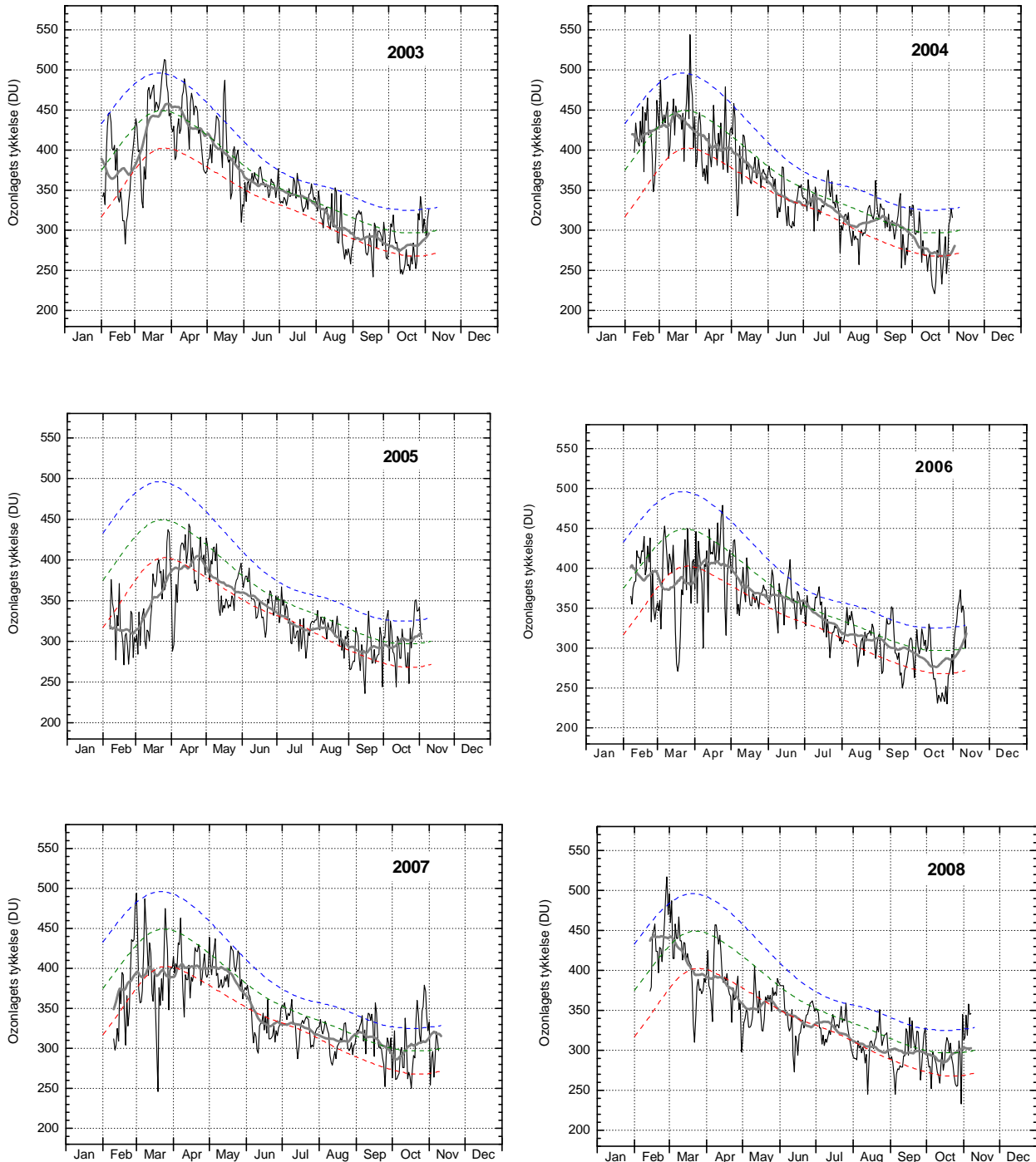
Figur A2b. Ozonlagets tykkelse over Kangerlussuaq 1985-1990. Daglige målinger (tynd, sort linje) er fra NASA's TOMS instrument på Nimbus 7 satellitten. Den grønne stiplede linje angiver middelværdien af daglige målinger i 10-års perioden 1979-1988, mens de blå og røde stiplede linjer angiver henholdsvis middelværdien plus (blå) eller minus (rød) en standardafvigelse fra middelværdien. Det betyder, at ca. 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje. Den tykke grå linje er en 31-dages løbende middelværdi af de daglige målinger.



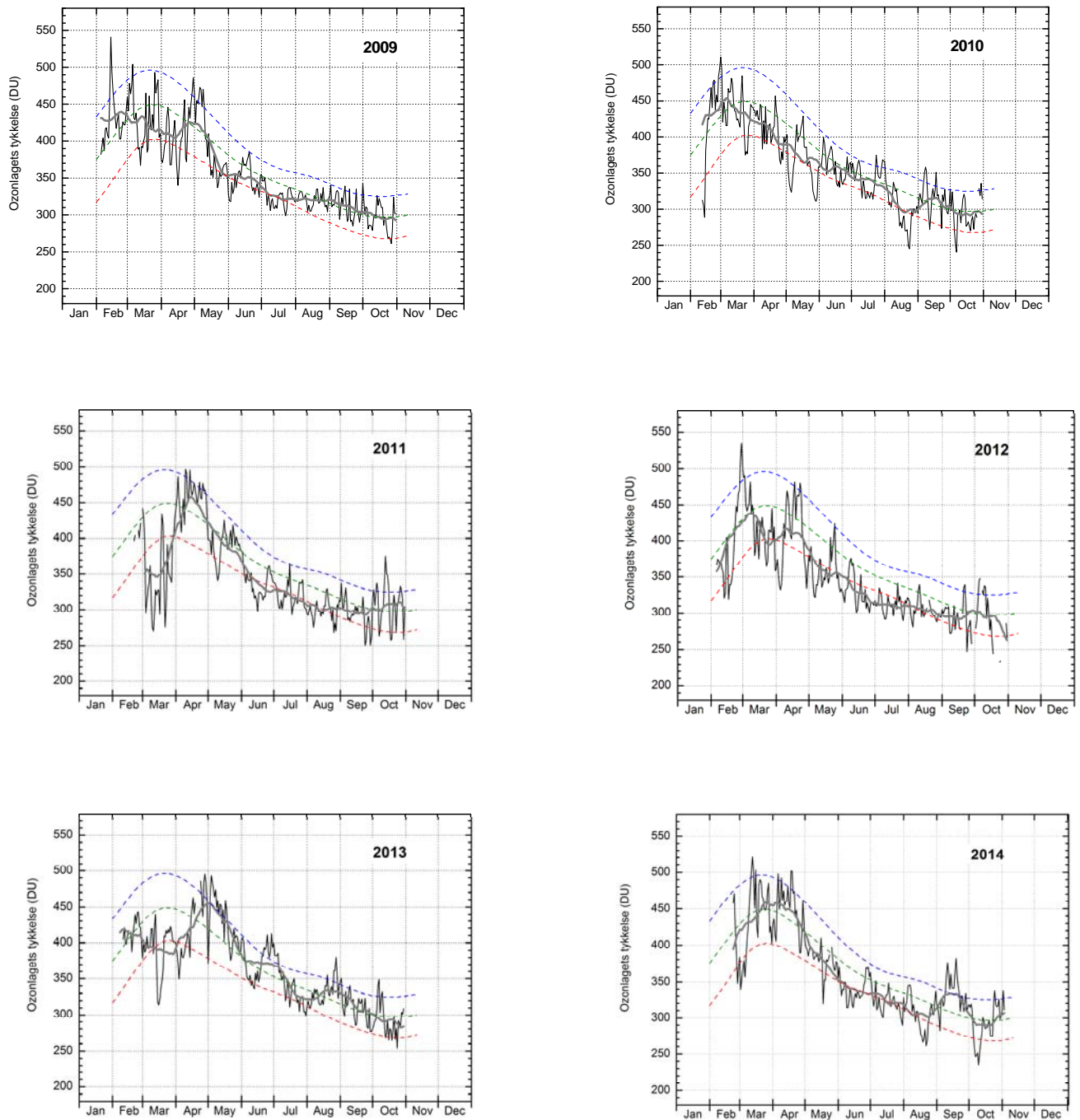
Figur A2c. Ozonlagets tykkelse over Kangerlussuaq 1991-1996. Daglige målinger (tynd, sort linje) er DMI's målinger i Kangerlussuaq. Den grønne stiplede linje angiver middelværdien af daglige målinger i 10-års perioden 1979-1988, mens de blå og røde stiplede linjer angiver henholdsvis middelværdien plus (blå) eller minus (rød) en standardafvigelse fra middelværdien. Det betyder, at ca. 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje. Den tykke grå linje er en 31-dages løbende middelværdi af de daglige målinger. Virkningen af et kraftigt vulkanudbrud i juni 1991 (Mt. Pinatubo, Filippinerne) ses i 1992-1993. Forholdsvis stor ozonnedbrydning i den polare stratosfære i vintrene 1991-1992, 1992-1993, 1994-1995 og 1995-1996 sætter sine spor når den polare hvirvelvind er over Kangerlussuaq, hvilket tydeligt ses i februar, marts og april 1996.



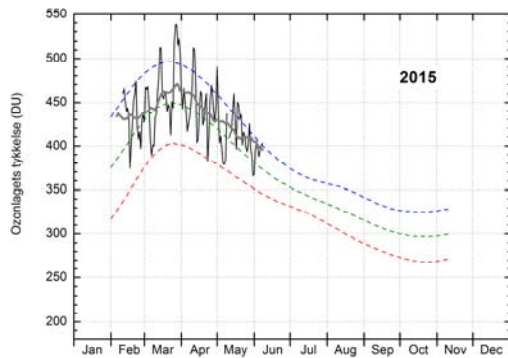
Figur A2d. Ozonlagets tykkelse over Kangerlussuaq 1997-2002. Daglige målinger (tynd, sort linje) er DMI's målinger i Kangerlussuaq. Den grønne stiplede linje angiver middelværdien af daglige målinger i 10-års perioden 1979-1988, mens de blå og røde stiplede linjer angiver henholdsvis middelværdien plus (blå) eller minus (rød) en standardafvigelse fra middelværdien. Det betyder, at ca. 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje. Den tykke grå linje er en 31-dages løbende middelværdi af de daglige målinger. Forholdsvis stor ozonnedbrydning ses i den polare stratosfære i vinteren 1999-2000, mens en forholdsvis varm polar stratosfære i vintrene 1997-1998, 1998-1999, 2000-2001 og 2001-2002 medfører ringe ozonnedbrydning.



Figur A2e. Ozonlagets tykkelse over Kangerlussuaq 2003-2008. Daglige målinger (tynd, sort linje) er DMI's målinger i Kangerlussuaq. Den grønne stiplede linje angiver middelværdien af daglige målinger i 10-års perioden 1979-1988, mens de blå og røde stiplede linjer angiver henholdsvis middelværdien plus (blå) eller minus (rød) en standardafvigelse fra middelværdien. Det betyder, at ca. 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje. Den tykke grå linje er en 31-dages løbende middelværdi af de daglige målinger. En forholdsvis varm polar stratosfære i vintrene 2002-2003 og (især) 2003-2004 medfører ringe ozonnedbrydning.

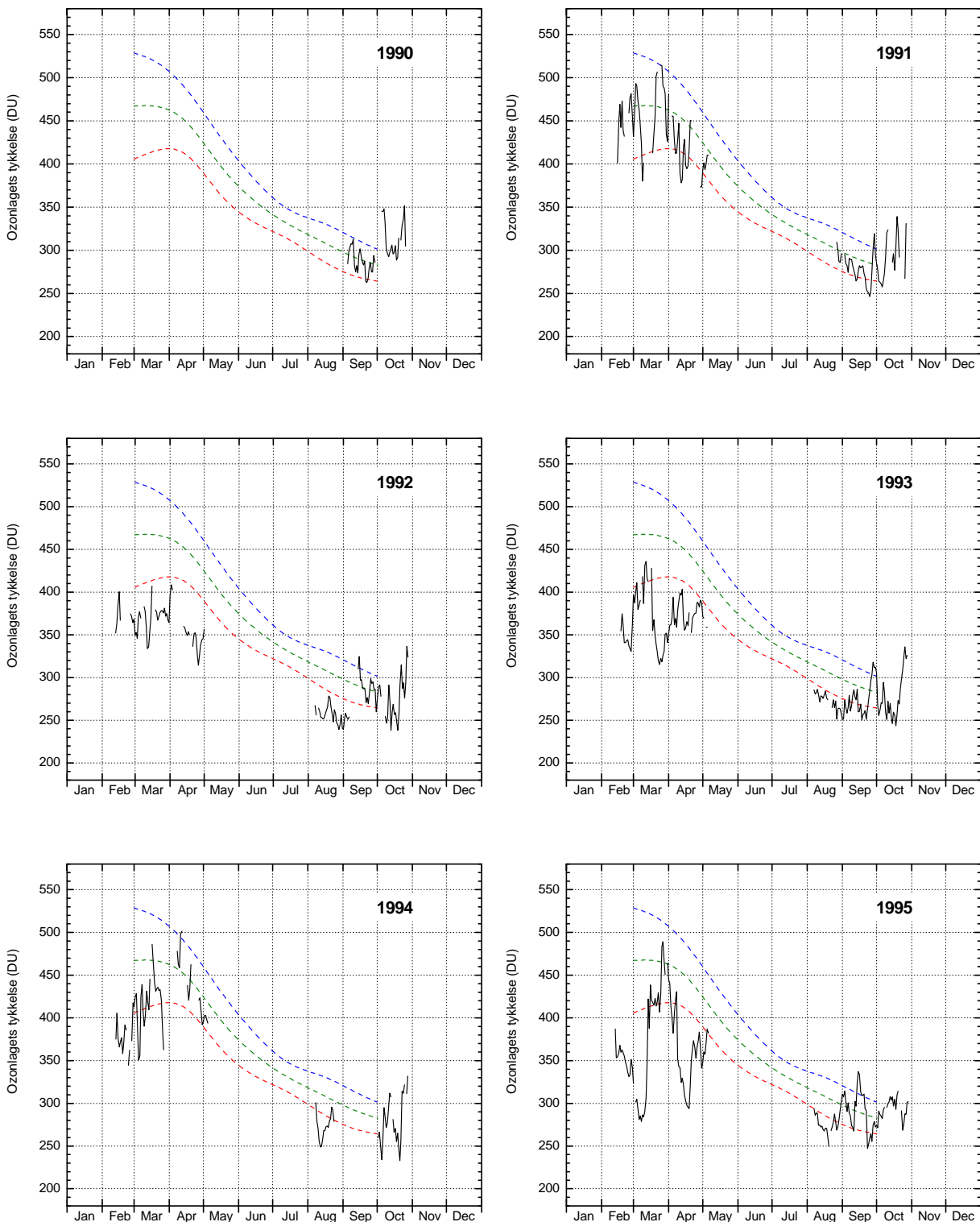


Figur A2f. Ozonlagets tykkelse over Kangerlussuaq 2009-2014. Daglige målinger (tynd, sort linje) er DMI's målinger i Kangerlussuaq. Den grønne stiplede linje angiver middelværdien af daglige målinger i 10-års perioden 1979-1988, mens de blå og røde stiplede linjer angiver henholdsvis middelværdien plus (blå) eller minus (rød) en standardafvigelse fra middelværdien. Det betyder, at ca. 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje. Den tykke grå linje er en 31-dages løbende middelværdi af de daglige målinger.

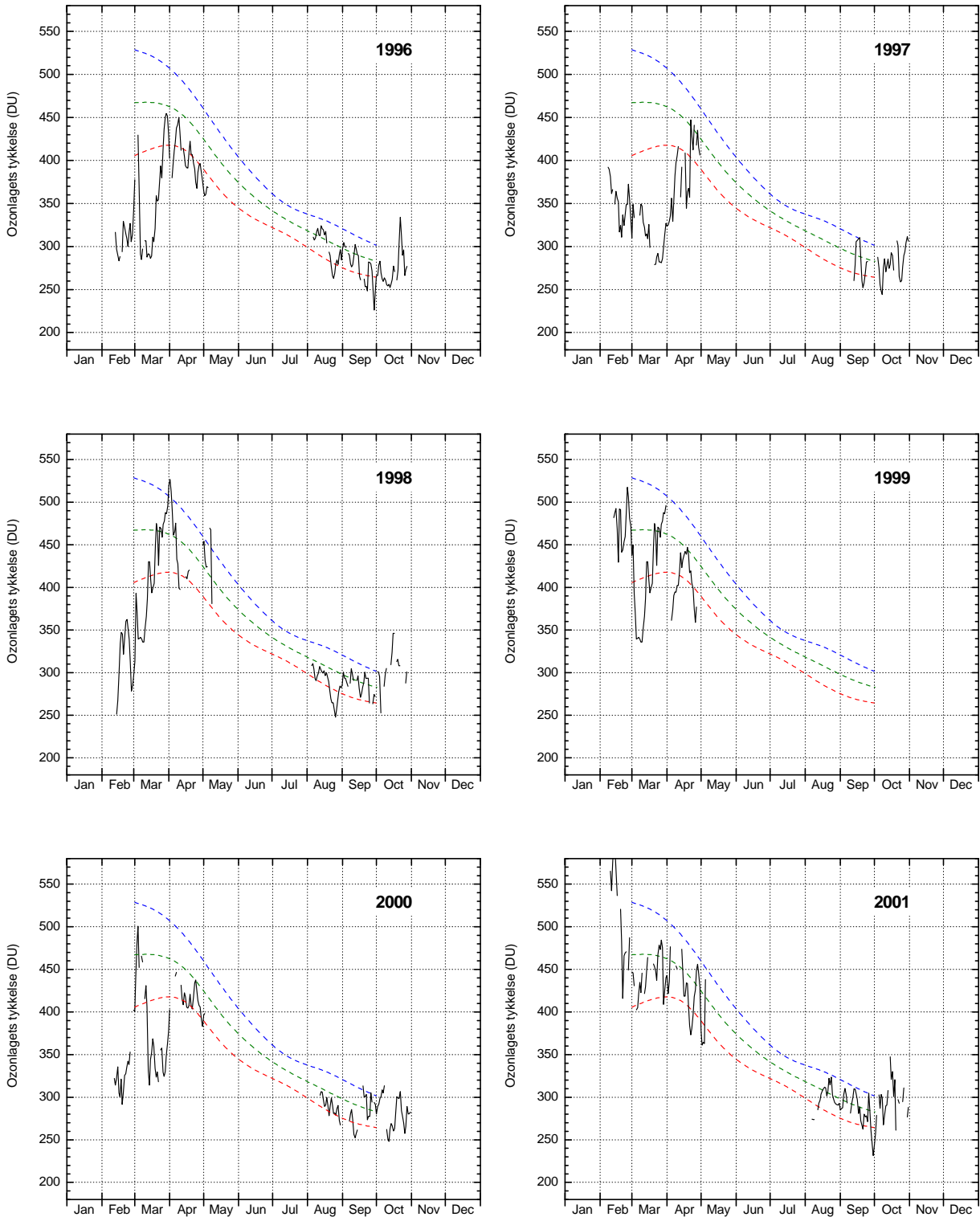


Figur A2g. Ozonlagets tykkelse over Kangerlussuaq forår 2015. Daglige målinger (tynd, sort linje) er DMI's målinger i Kangerlussuaq. Den grønne stiplede linje angiver middelværdien af daglige målinger i 10-års perioden 1979-1988, mens de blå og røde stiplede linjer angiver henholdsvis middelværdien plus (blå) eller minus (rød) en standardafvigelse fra middelværdien. Det betyder, at ca. 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje. Den tykke grå linje er en 31-dages løbende middelværdi af de daglige målinger.

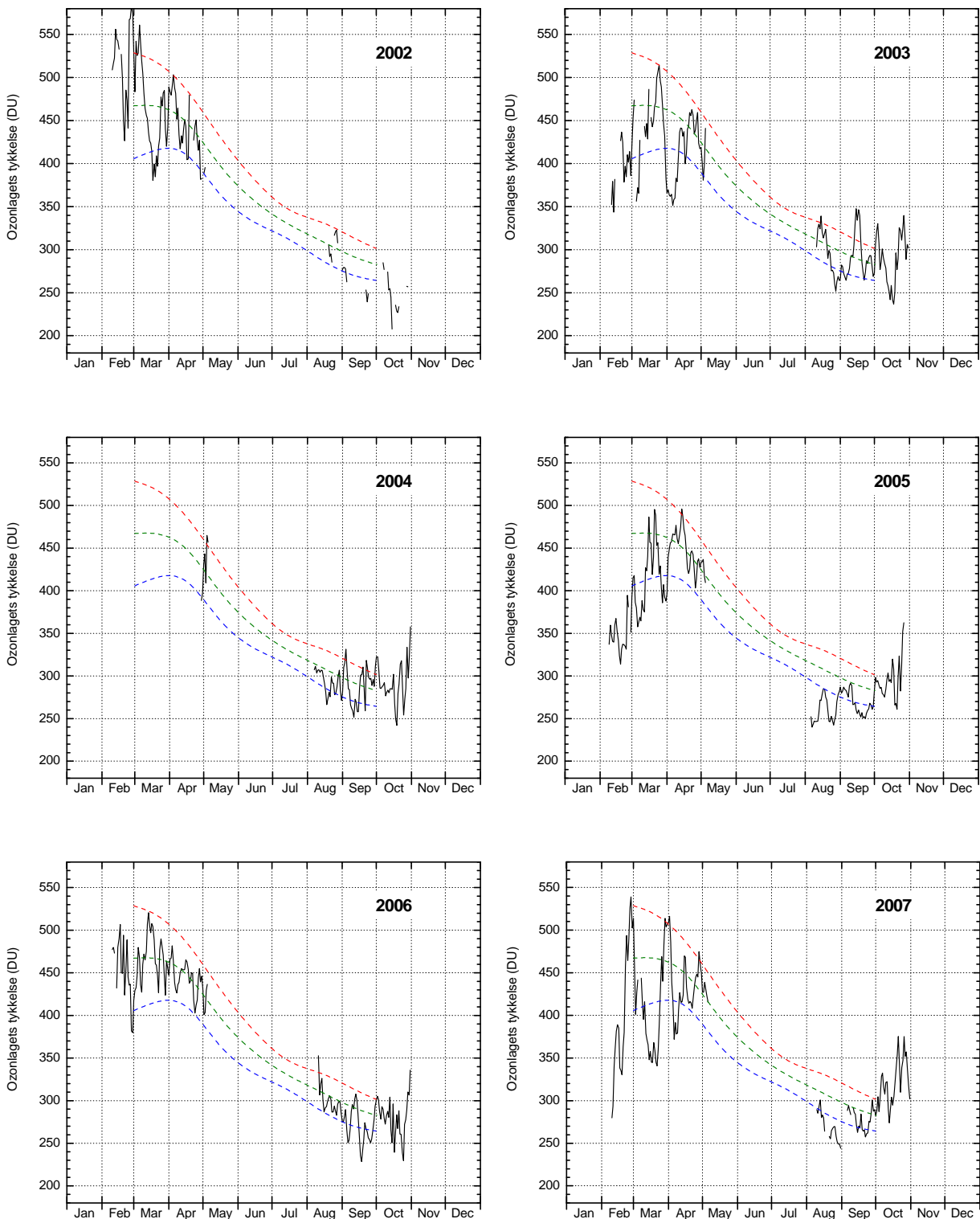
De daglige målinger over Pituffik 1990-2015 fremgår af figurerne A3a til A3f.



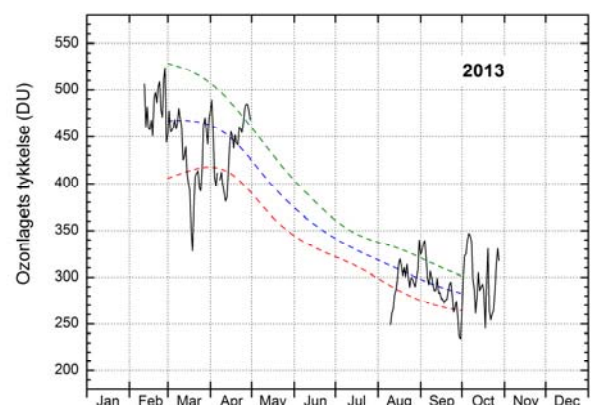
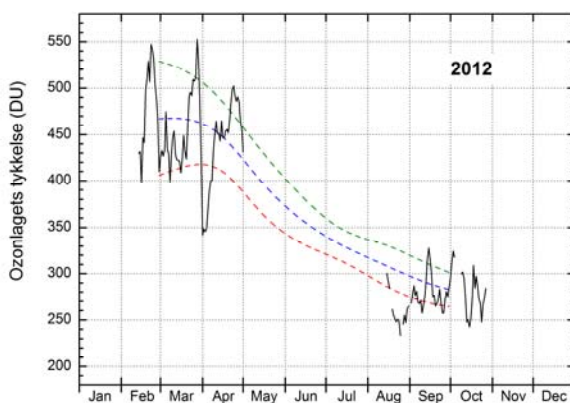
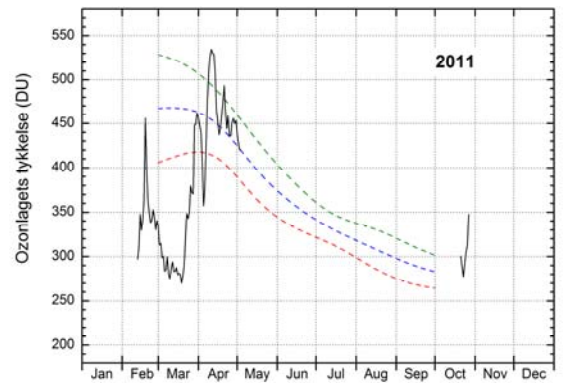
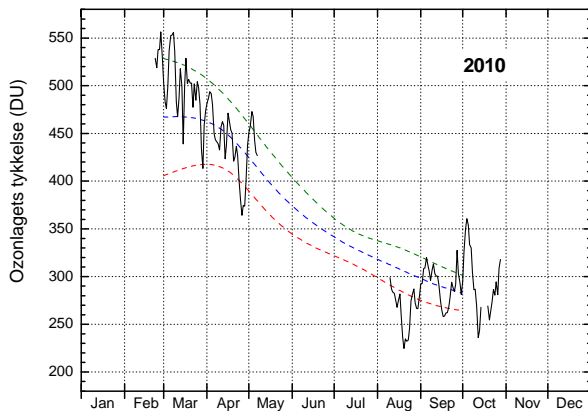
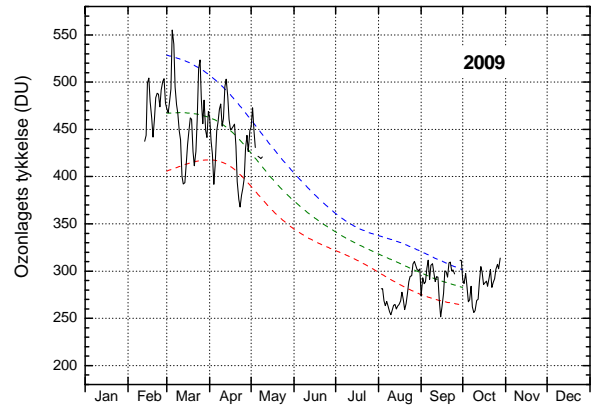
Figur A3a. Ozonlagets tykkelse over Pituffik 1990-1995. Daglige målinger med SAOZ-spektrometeret. Den grønne linje angiver middelværdien af daglige målinger i ti-års perioden 1979-1988 målt med TOMS-instrumentet ombord på Nimbus7-satelliten. De blå og røde stiplede linjer angiver plus og minus en standardafvigelse fra middelværdien. Det betyder, at 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje.



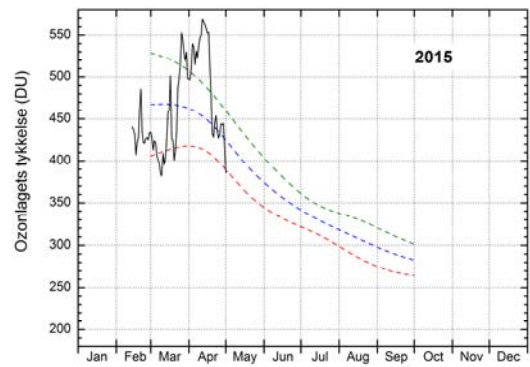
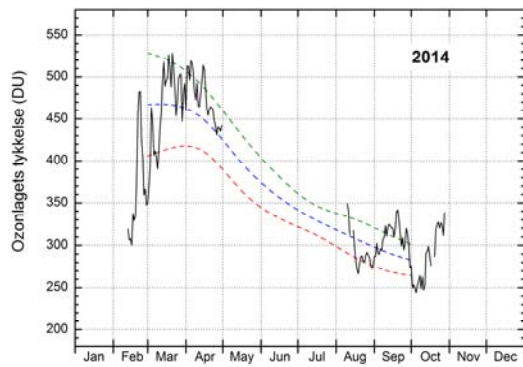
Figur A3b. Ozonlagets tykkelse over Pituffik 1996-2001. Daglige målinger med SAOZ-spektrometeret. Den grønne linje angiver middelværdien af daglige målinger i ti-års perioden 1979-1988 målt med TOMS-instrumentet ombord på Nimbus7-satellitten. De blå og røde stiplede linjer angiver plus og minus en standardafvigelse fra middelværdien. Det betyder, at 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje.



Figur A3c. Ozonlagets tykkelse over Pituffik 2002-2007. Daglige målinger med SAOZ-spektrometeret. Den grønne linje angiver middelværdien af daglige målinger i ti-års perioden 1979-1988 målt med TOMS-instrumentet ombord på Nimbus7-satellitten. De blå og røde stiplede linjer angiver plus og minus en standard afvigelse fra middelværdien. Det betyder, at 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje.

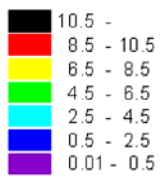


Figur A3d. Ozonlagets tykkelse over Pituffik 2008-2013. Daglige målinger med SAOZ-spektrometeret. Den grønne linje angiver middelværdien af daglige målinger i ti-års perioden 1979-1988 målt med TOMS-instrumentet ombord på Nimbus7-satellitten. De blå og røde stiplede linjer angiver plus og minus en standard afvigelse fra middelværdien. Det betyder, at 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje.

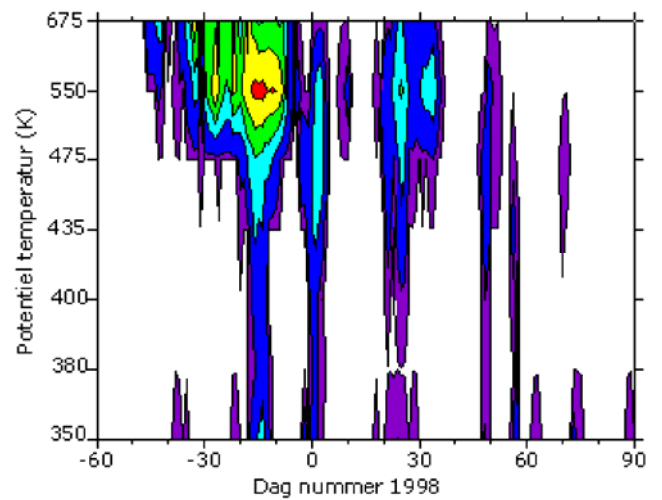
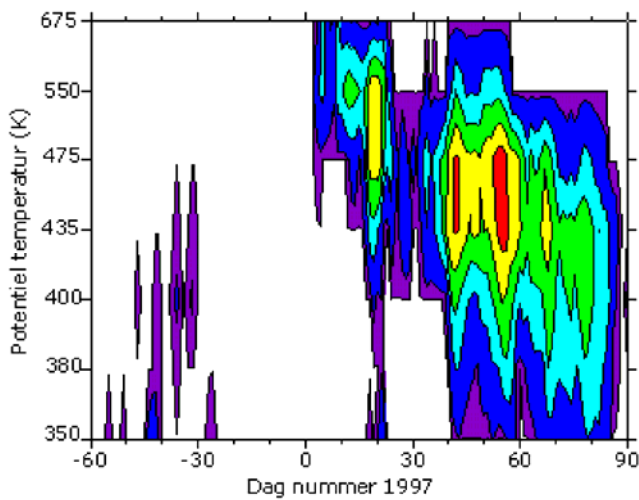
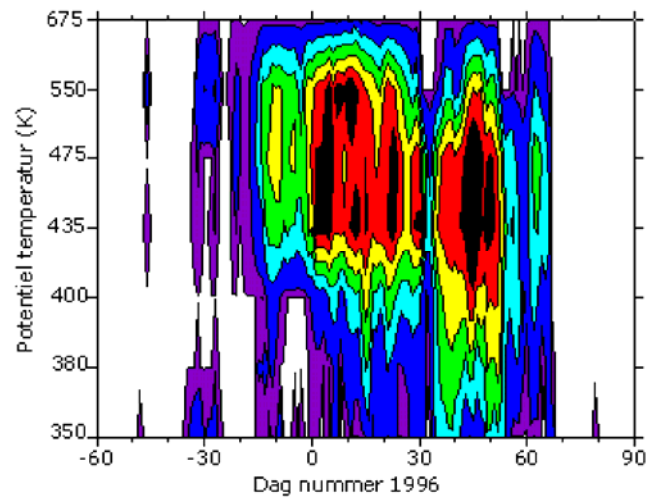
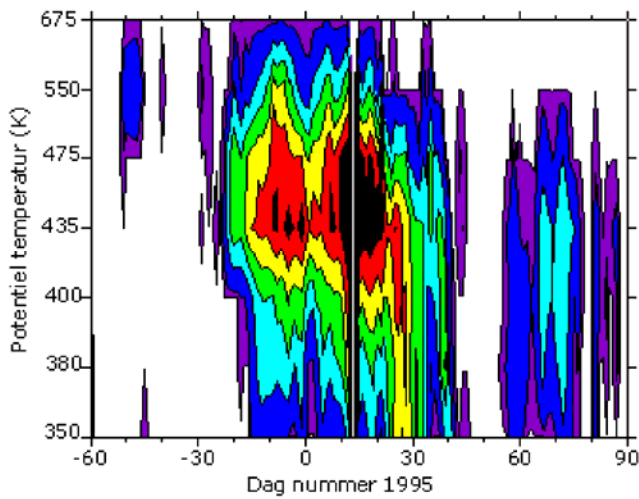
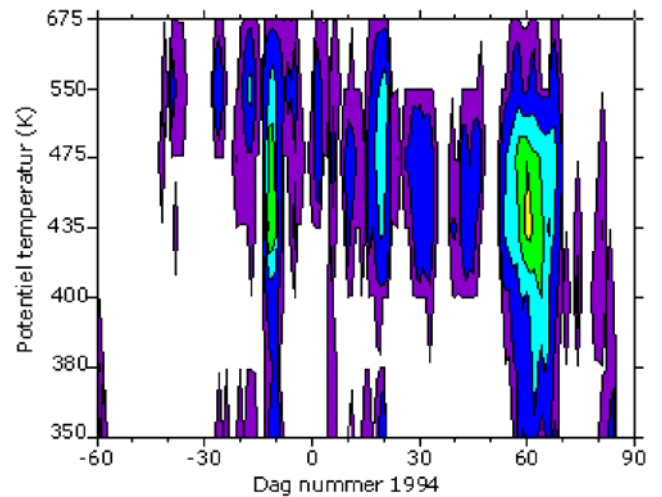


Figur A3f. Ozonlagets tykkelse over Pituffik 2014-15. Daglige målinger med SAOZ-spektrometeret. Den grønne linje angiver middelværdien af daglige målinger i ti-års perioden 1979-1988 målt med TOMS-instrumentet ombord på Nimbus7-satellitten. De blå og røde stiplede linjer angiver plus og minus en standard afvigelse fra middelværdien. Det betyder, at 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje.

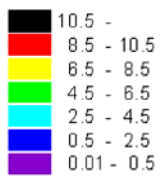
PSC areal (mill. km²)



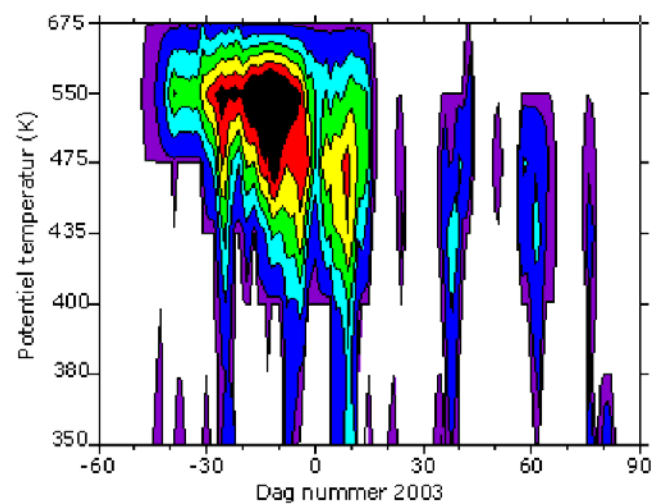
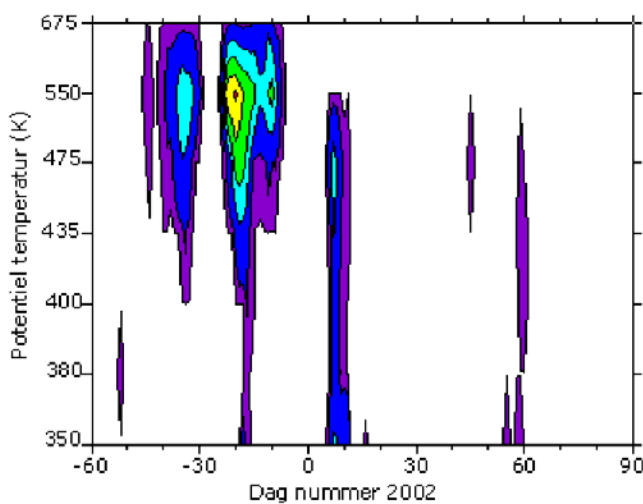
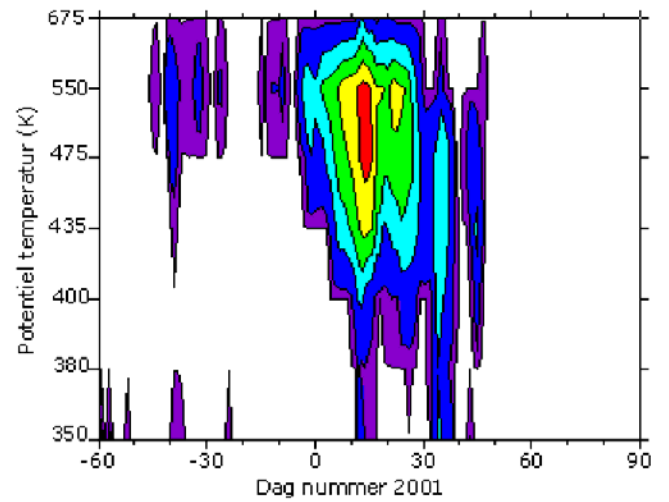
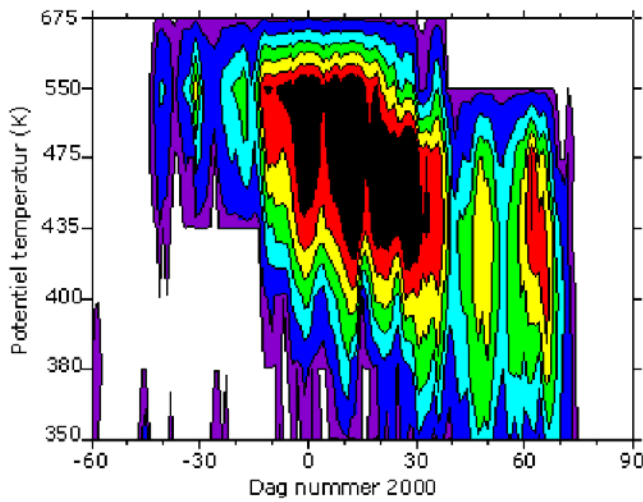
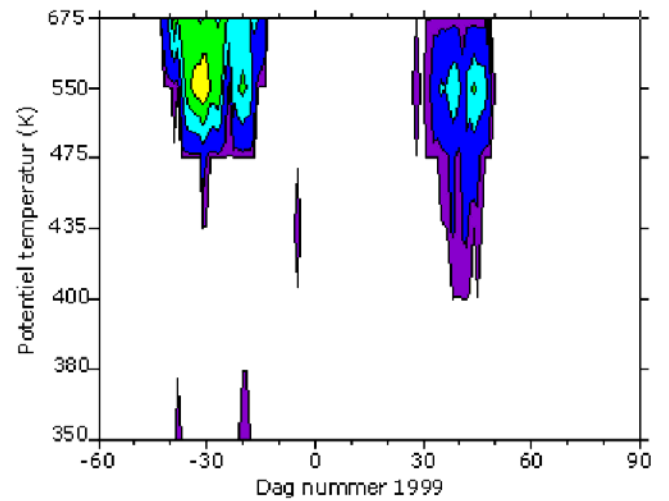
Figur A4a. Areal af den nordlige halvkugle dækket af PSC'ere i højdeinterval 350-675 K potentiel temperatur, svarende til ca. 14-26 km gennem vintrene 1994-1998.



PSC areal (mill. km²)



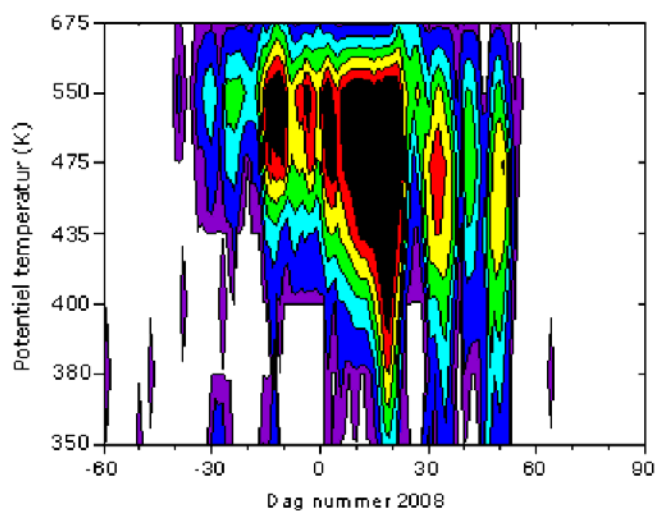
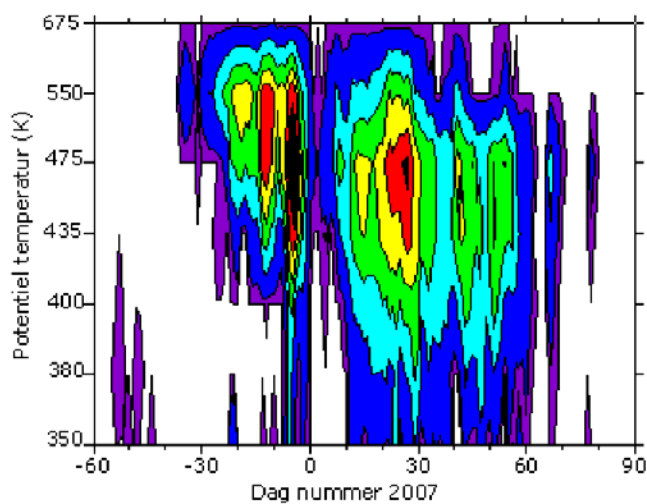
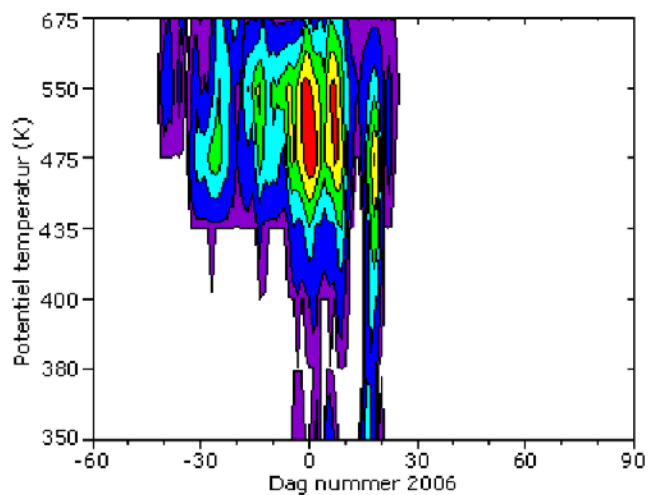
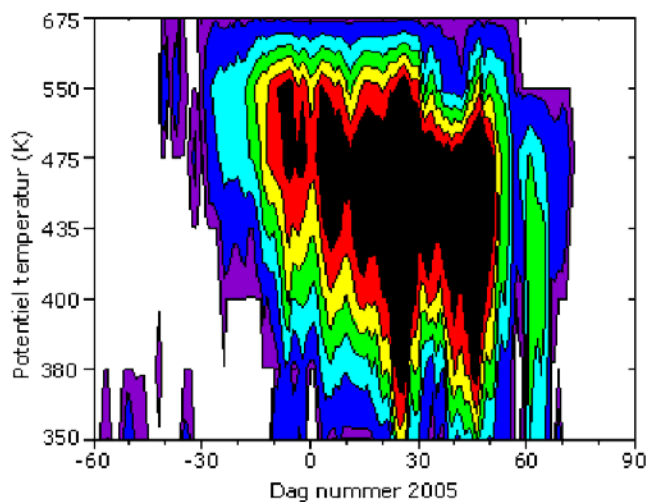
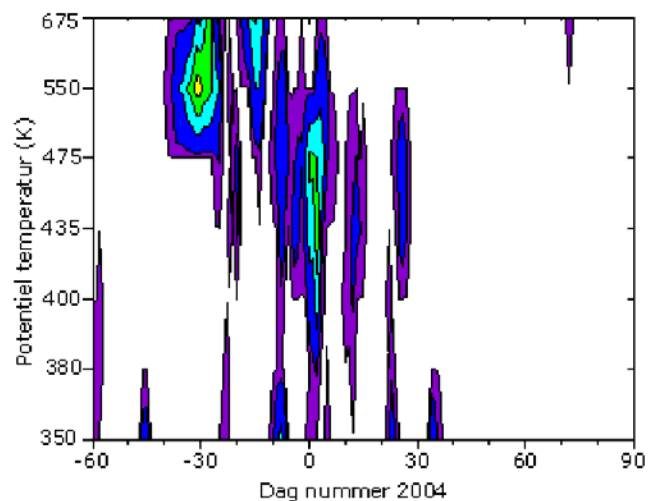
Figur A4b. Areal af den nordlige halvkugle dækket af PSC'ere i højdeinterval 350-675 K potentiel temperatur, svarende til ca. 14-26 km gennem vintrene 1999-2003.



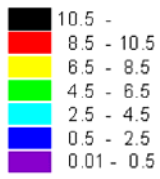
PSC areal (mill. km²)



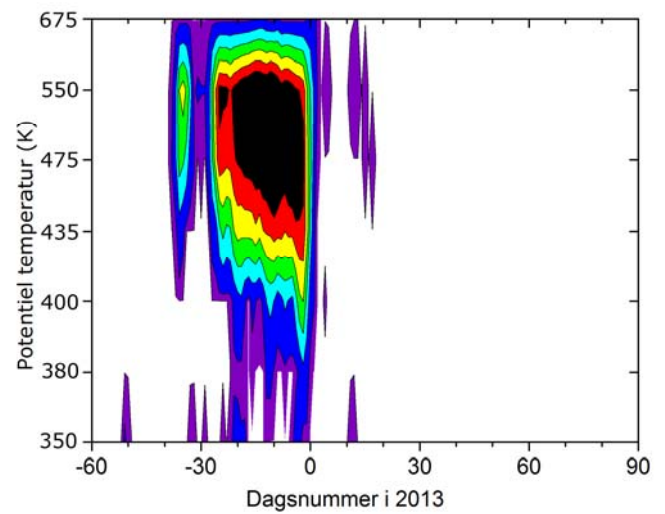
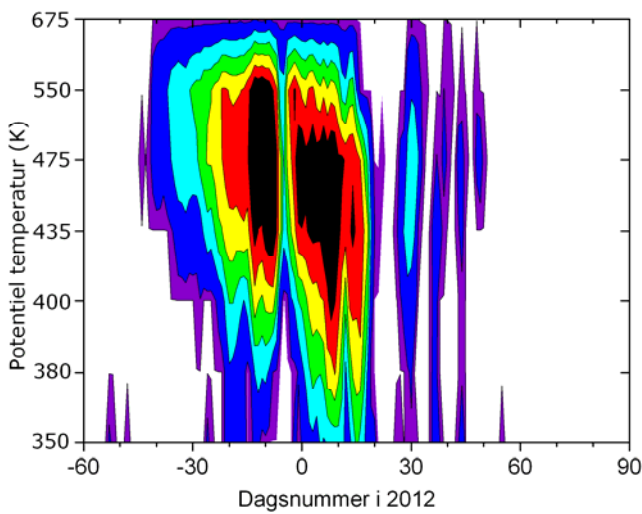
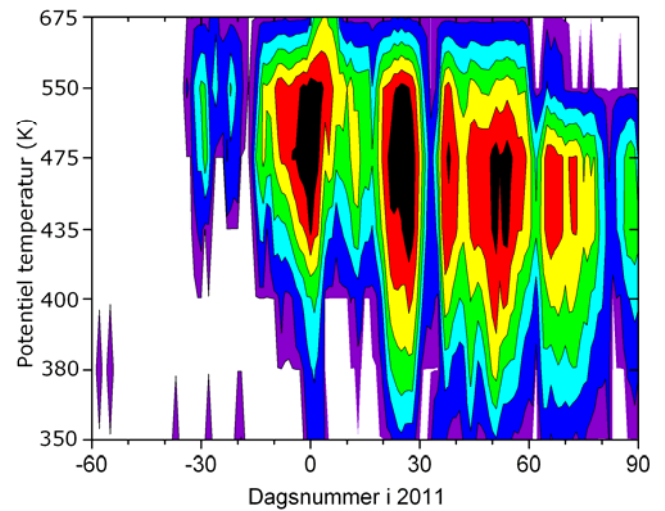
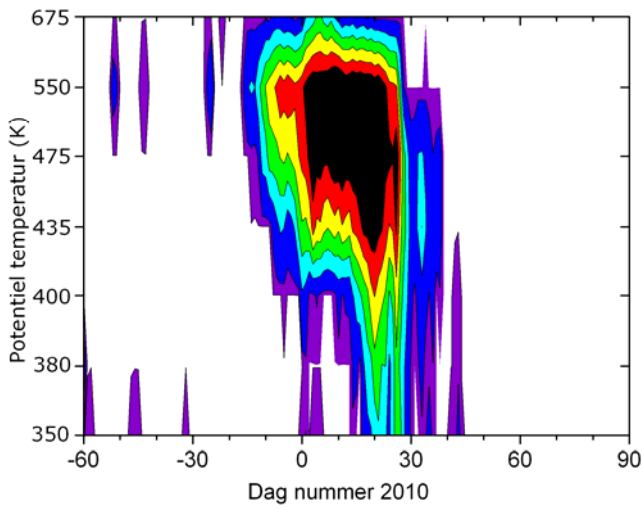
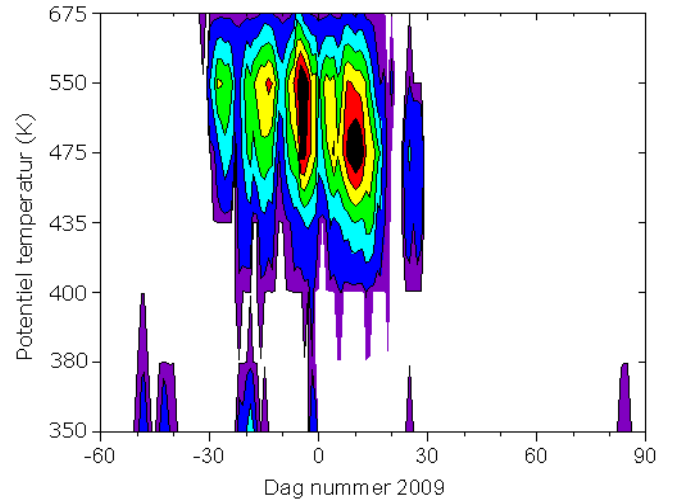
Figur A4c. Areal af den nordlige halvkugle dækket af PSC'ere i højdeinterval 350-675 K potentiel temperatur, svarende til ca. 14-26 km gennem vintrene 2004-2008.



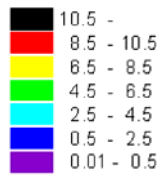
PSC areal (mill. km²)



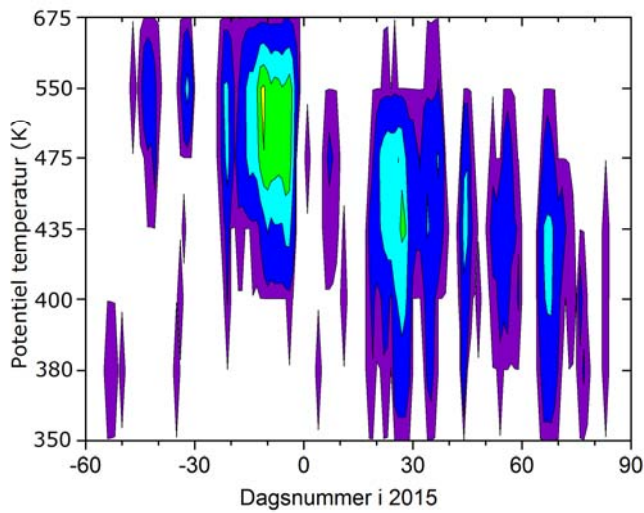
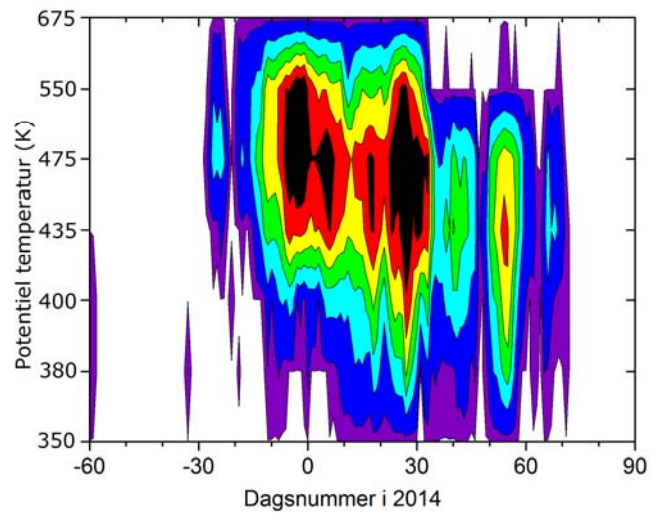
Figur A4d. Areal af den nordlige halvkugle dækket af PSC'ere i højdeinterval 350-675 K potentiel temperatur, svarende til ca. 14-26 km gennem vinteren 2009- 2013.

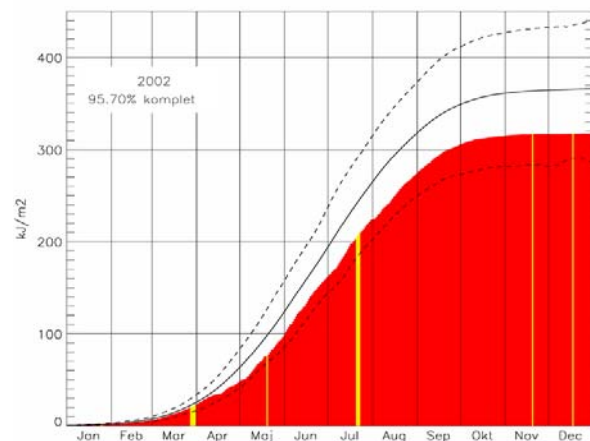
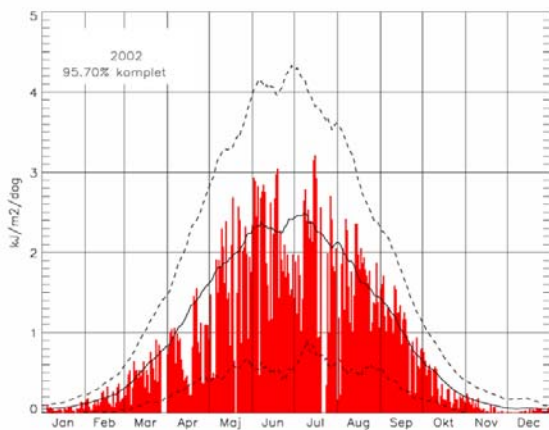
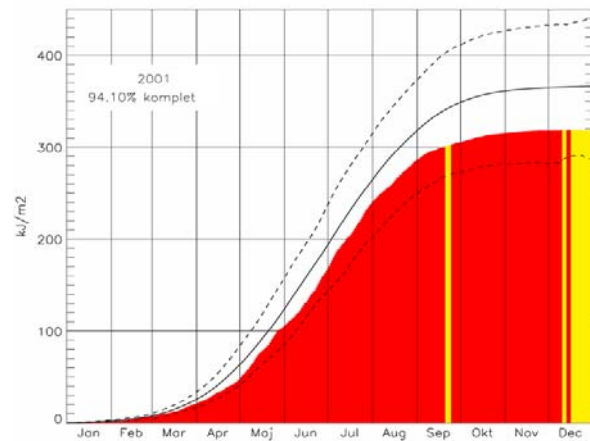
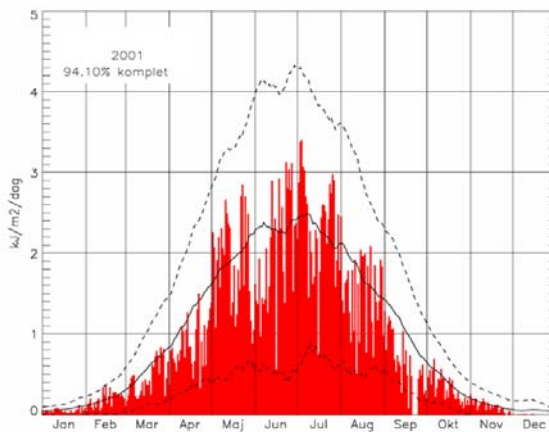
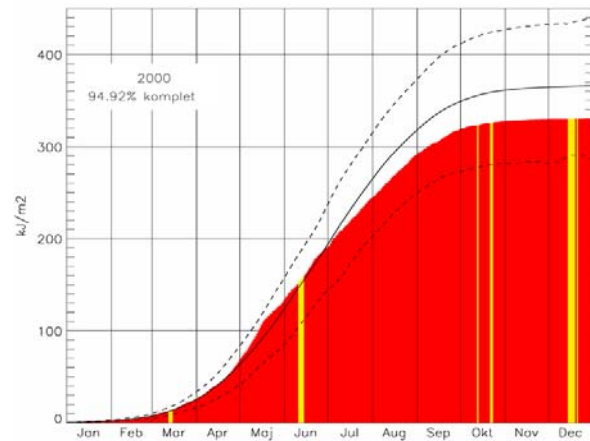
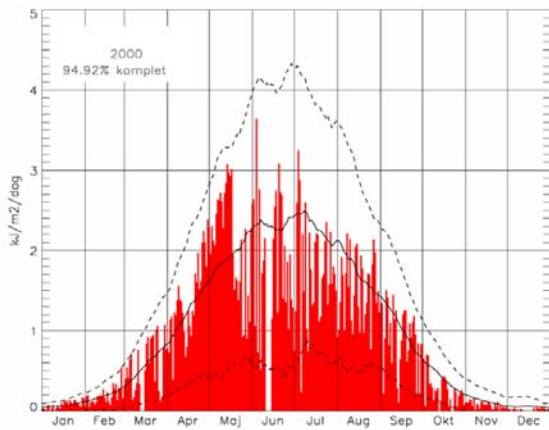


PSC areal (mill. km²)



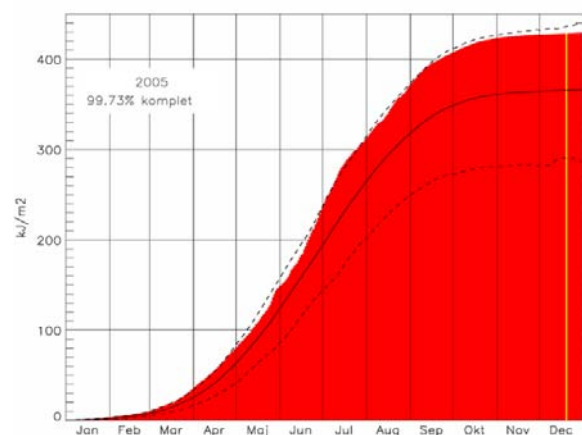
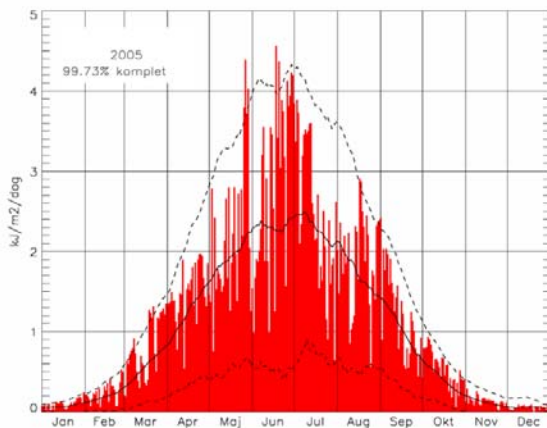
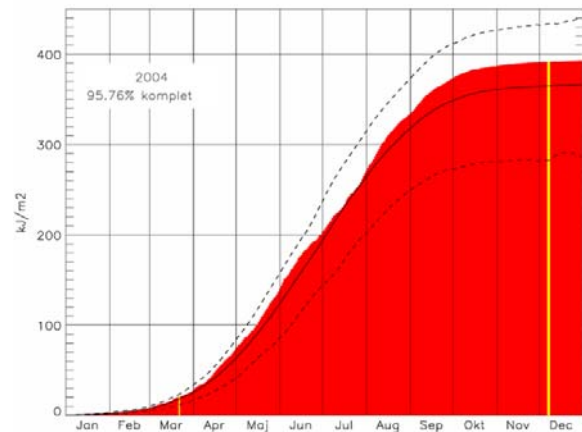
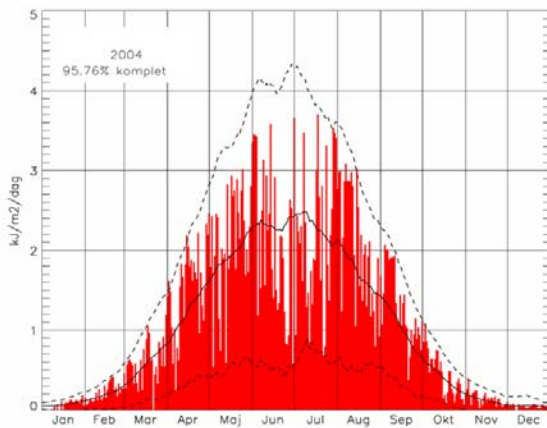
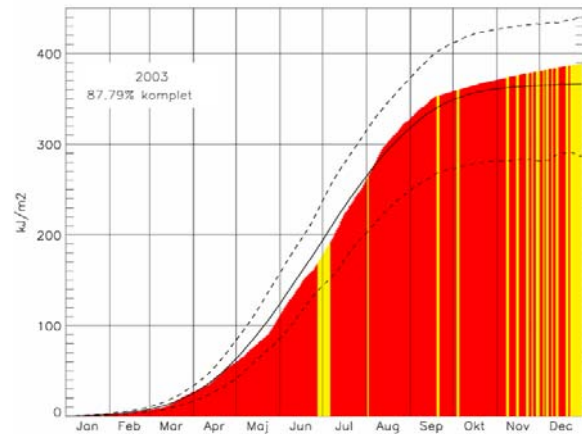
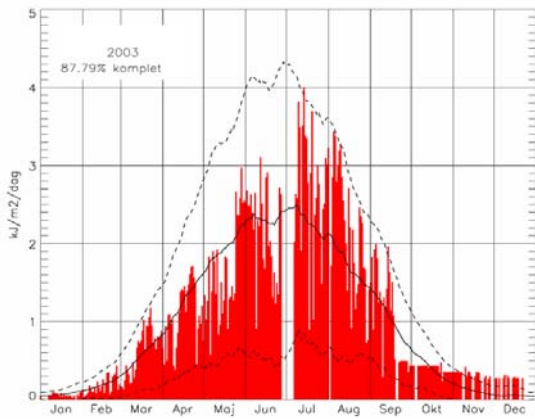
Figur A4e. Areal af den nordlige halvkugle dækket af PSC'ere i højdeinterval 350-675 K potentiel temperatur, svarende til ca. 14-26 km gennem vinteren 2014-2015.



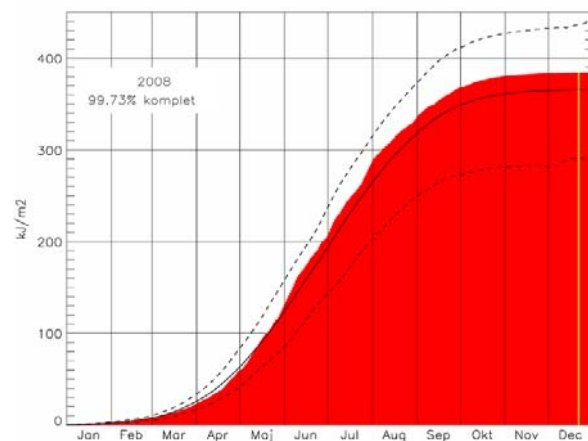
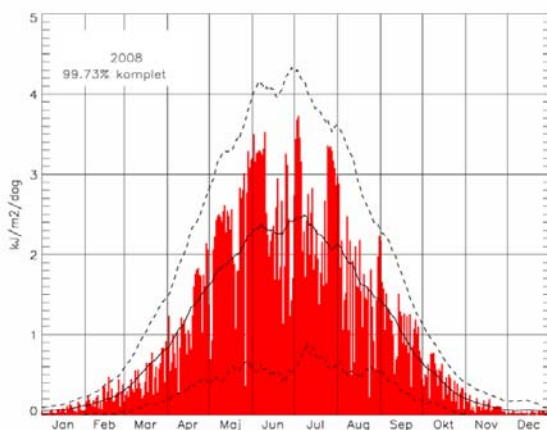
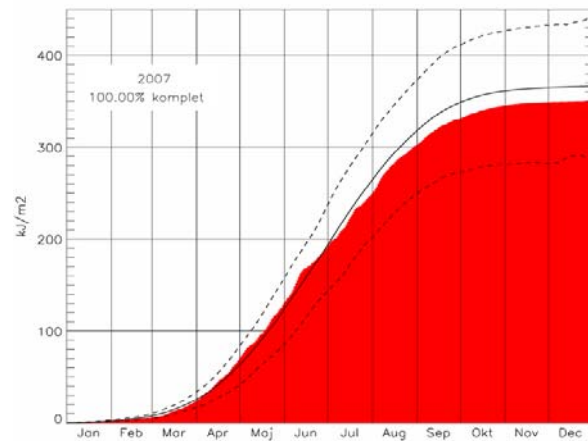
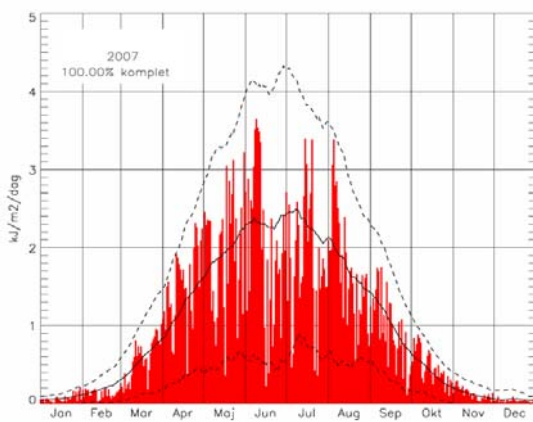
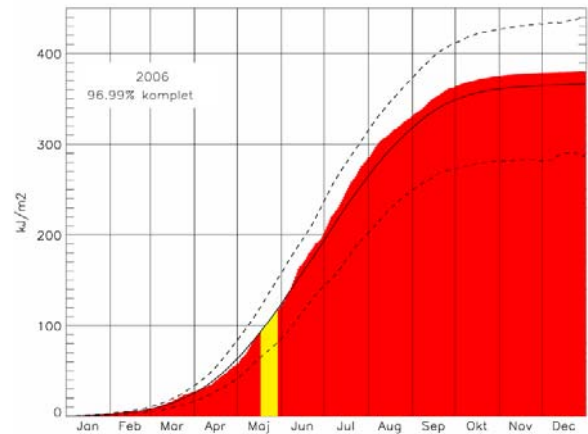
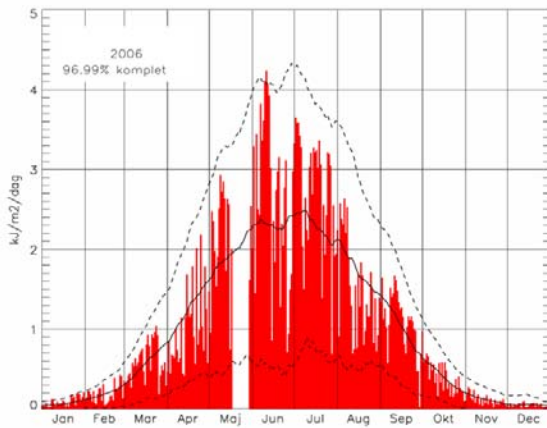


Figur A5a . (Venstre panel) Den dagligt målte totale dosis af hudskadelig UV stråling i 2000 til 2002 i København i $\text{kJ}/\text{m}^2/\text{dag}$. Fuldt optrukken kurve er den tilsvarende middel-dosis for 2000-2010. Øvre og nedre punkterede kurver viser hhv. +2 og -2 standardafvigelser. (Højre panel) Den totale dosis i løbet af året af hudskadelig UV stråling i København i kJ/m^2 . Fuldt optrukken kurve er den tilsvarende

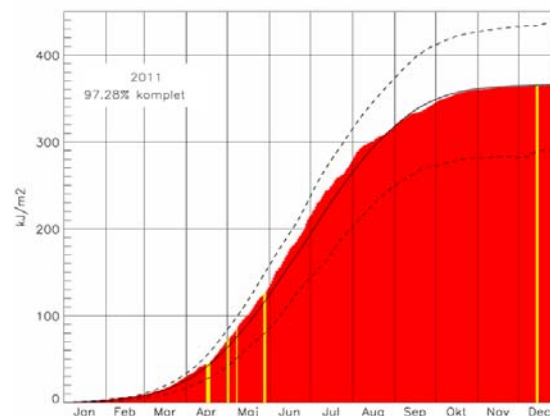
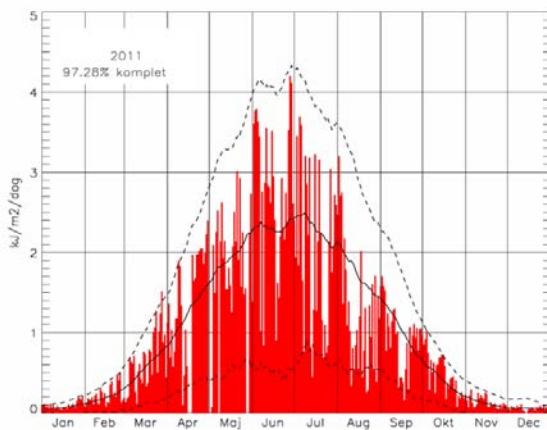
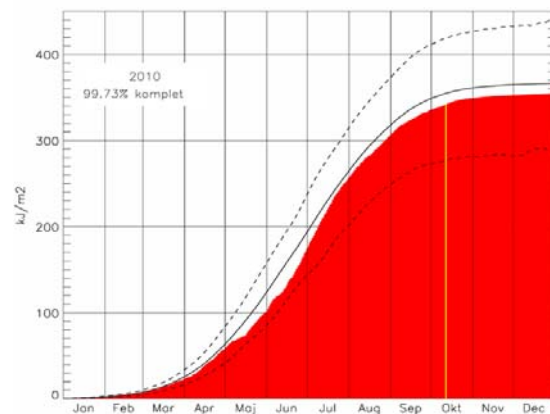
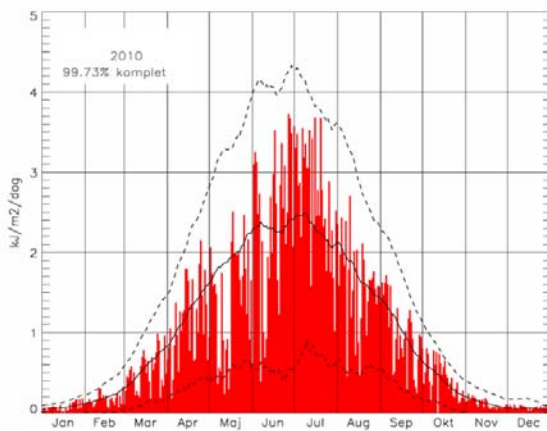
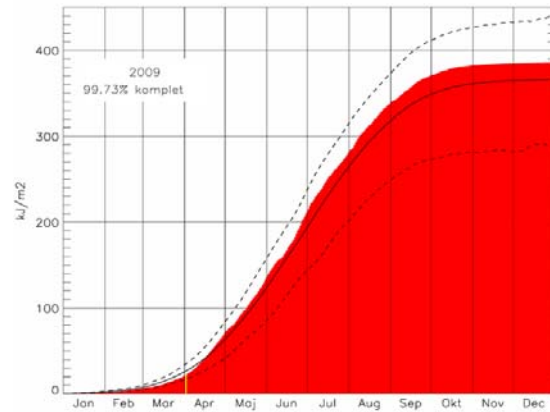
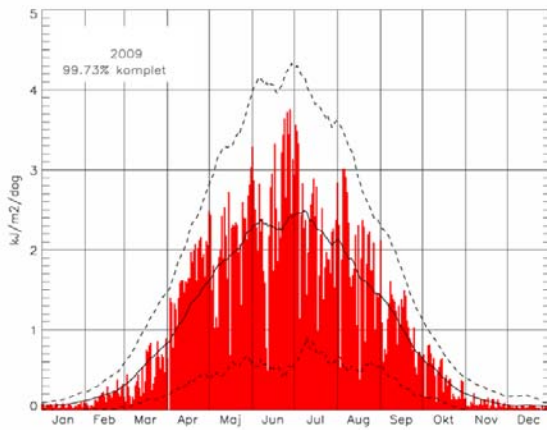
de middel-dosis. Øvre og nedre punkterede kurver viser hhv. +2 og -2 standardafvigelser.



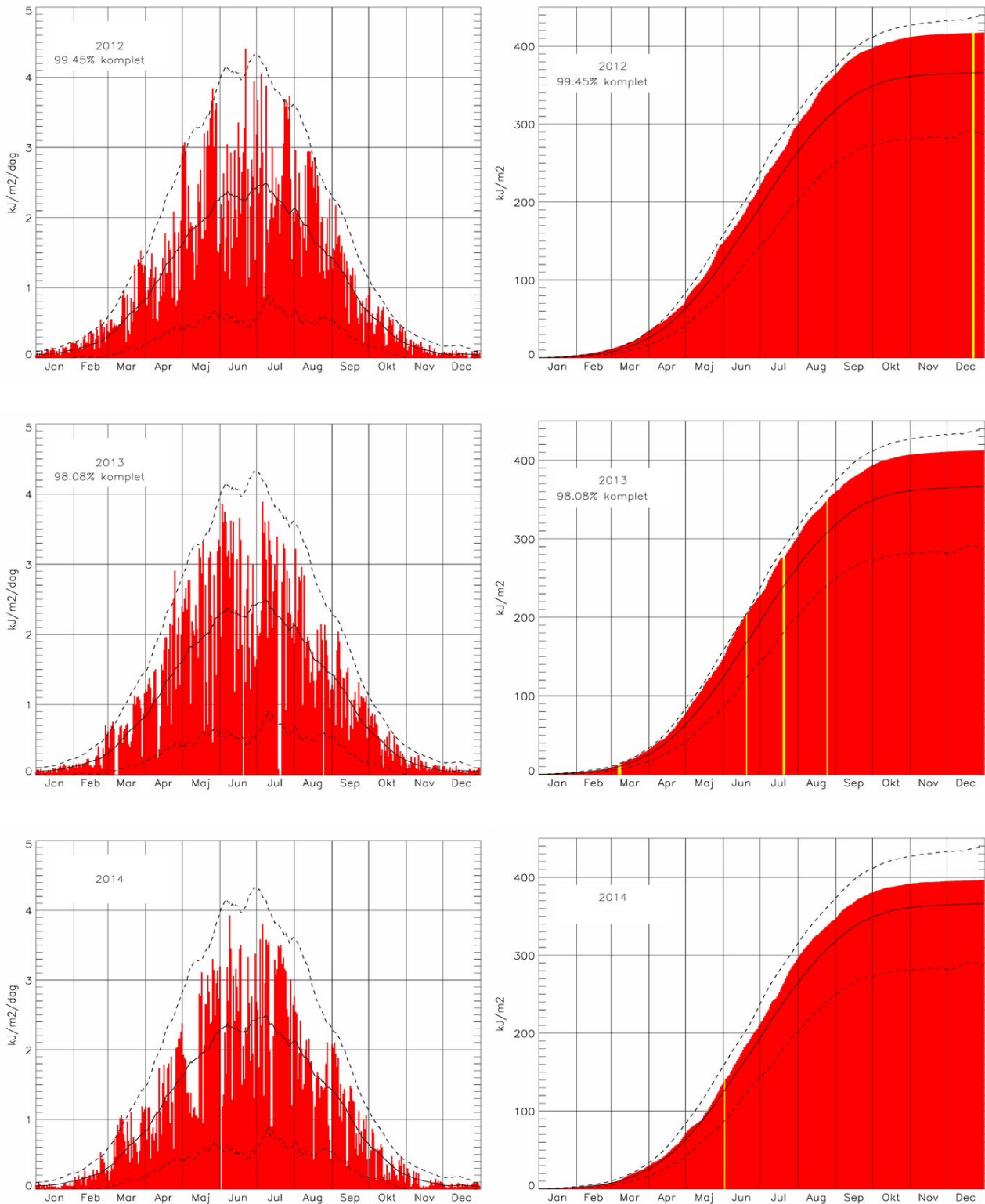
Figur A5b . (Venstre panel) Den dagligt målte totale dosis af hudskadelig UV stråling i 2003 til 2005 i København i $\text{kJ}/\text{m}^2/\text{dag}$. Fuldt optrukken kurve er den tilsvarende middel-dosis for 2000-2010. Øvre og nedre punkterede kurver viser hhv. +2 og -2 standardafvigelser. (Højre panel) Den totale dosis i løbet af året af hudskadelig UV stråling i København i kJ/m^2 . Fuldt optrukken kurve er den tilsvarende middel-dosis. Øvre og nedre punkterede kurver viser hhv. +2 og -2 standardafvigelser.



Figur A5c . (Venstre panel) Den dagligt målte totale dosis af hudskadelig UV stråling i 2006 til 2008 i København i $\text{kJ/m}^2/\text{dag}$. Fuldt optrukken kurve er den tilsvarende middel-dosis for 2000-2010. Øvre og nedre punkterede kurver viser hhv. +2 og -2 standardafvigelser. (Højre panel) Den totale dosis i løbet af året af hudskadelig UV stråling i København i kJ/m^2 . Fuldt optrukken kurve er den tilsvarende middel-dosis. Øvre og nedre punkterede kurver viser hhv. +2 og -2 standardafvigelser.



Figur A5d . (Venstre panel) Den dagligt målte totale dosis af hudskadelig UV stråling i 2009 til 2011 i København i $\text{kJ}/\text{m}^2/\text{dag}$. Fuldt optrukken kurve er den tilsvarende middel-dosis for 2000-2010. Øvre og nedre punkterede kurver viser hhv. +2 og -2 standardafvigelser. (Højre panel) Den totale dosis i løbet af året af hudskadelig UV stråling i København i kJ/m^2 . Fuldt optrukken kurve er den tilsvarende middel-dosis. Øvre og nedre punkterede kurver viser hhv. +2 og -2 standardafvigelser.



Figur A5e . (Venstre panel) Den dagligt målte totale dosis af hudskadelig UV stråling i 2012 til 2014 i København i $\text{kJ}/\text{m}^2/\text{dag}$. Fuldt optrukket kurve er den tilsvarende middel-dosis for 2000-2010. Øvre og nedre punkterede kurver viser hhv. +2 og -2 standardafvigelser. (Højre panel) Den totale dosis i løbet af året af hudskadelig UV stråling i København i kJ/m^2 . Fuldt optrukket kurve er den tilsvarende middel-dosis. Øvre og nedre punkterede kurver viser hhv. +2 og -2 standardafvigelser.



Appendiks B – Ozonlaget

Ozon er et molekyle bestående af tre ilt-atomer, og har den kemiske betegnelse O_3 . Selv om atmosfærens indhold af ozon-molekyler er forsvindende i forhold til mængden af ilt- og kvælstofmolekyler, har ozonen afgørende betydning for mange forhold i atmosfæren – samt for liv på jorden. Det meste ozon befinder sig højt over jordoverfladen fra ca. 10 km's højde og op til ca. 30 km's højde. Her har ozon en stor gavnlig virkning, idet den skærmer jordens overflade mod den skadelige ultraviolette stråling fra solen.

Ozon forekommer også ved jordoverfladen som en bestanddel af luftforureningen over og i de fleste store byer. Denne overfladeozon er 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.

Ozonlaget – og Dobson-enheden

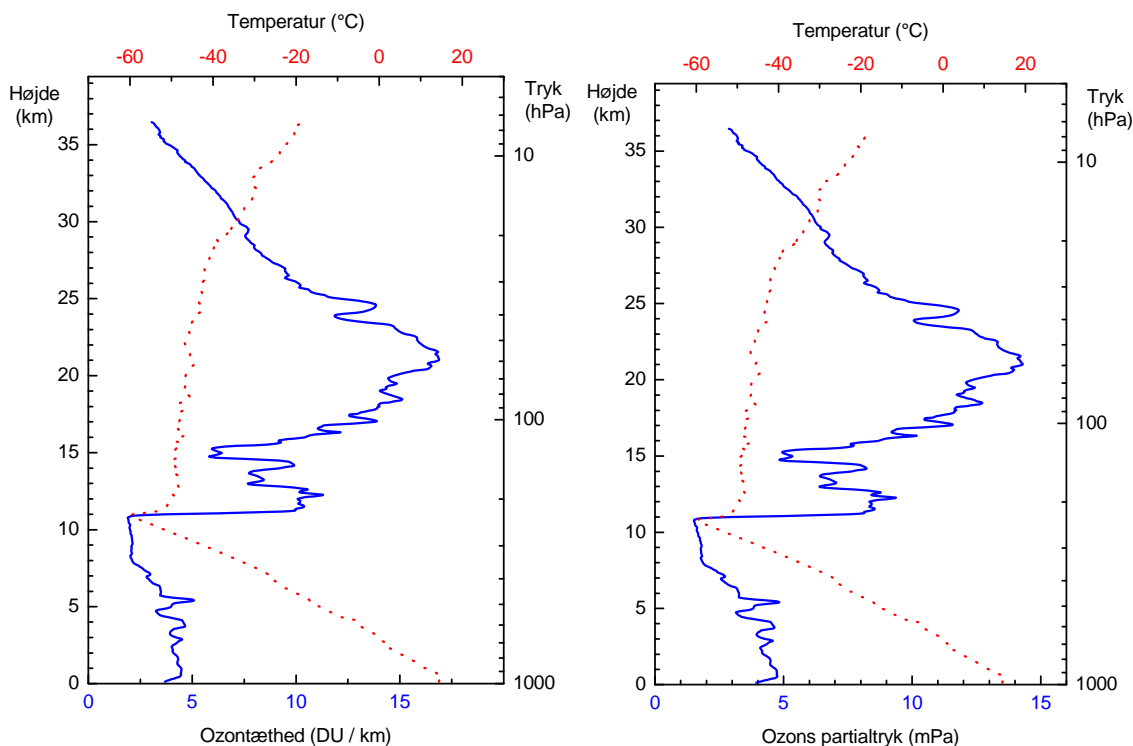
Ozon har en vigtig funktion i atmosfærens strålingsbalance. Ozon absorberer solens UV-stråling og opvarmer herved atmosfæren i 10-85 km's højde. Det har afgørende betydning for jordens klima.

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 denne sammenhæng kan toppen af atmosfæren sættes til ca. 50 km's højde, fordi ozonbidraget fra større højder er forsvindende. Indholdet af ozon i en sådan luftsøjle kan angives på mange måder, f.eks. 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 alligevel et uhyre 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 ozonlagstykkelse – på 2-5 mm, idet ozonen skal presses betydeligt sammen på grund af det større tryk ved jordens overflade. Eller, som det oftest angives, en ozonlagstykkelse på 200-500 **Dobson**-enheder (forkortet DU, efter eng: Dobson Units). Enheden er opkaldt efter den engelske fysiker Gordon Dobson, der var en af pionererne inden for forskning i ozonlaget.

Fordeling i jordens atmosfære

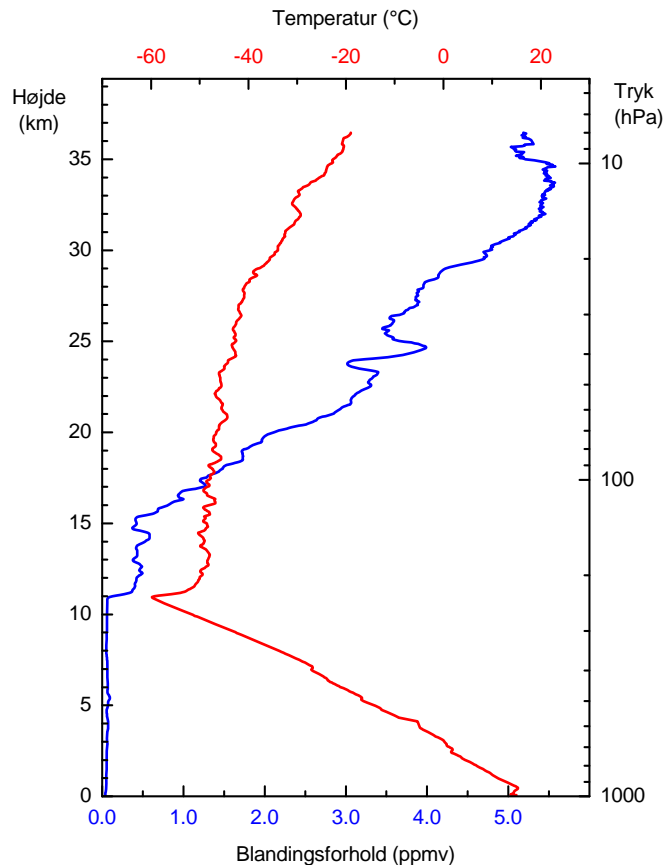
Figur B1 viser en typisk ozonprofil fra Illoqqortoormiut (Scoresbysund). Ozonkoncentrationen bliver målt med en ozonsonde, der sendes op med en ballon.

Den lodrette skala i højre side af figurerne viser luftens tryk målt i hPa (hekto-Pascal, det samme som millibar), mens den lodrette skala i venstre side viser højden over jorden i kilometer. Målingen ophører i godt 36 km's højde, fordi ballonen går i stykker. Den fuldtotrukne blå kurve viser ozonkoncentrationen som funktion af højden over jorden. Op til ca. 11 km's højde er ozonkoncentrationen lav, men over ca. 11 km's højde stiger den brat, og når sin største koncentration i ca. 21 km's højde, hvorefter den aftager med stigende højde. Fra andre typer målinger ved man, at ozonkoncentrationen over 36 km fortsætter med at aftage med stigende højde.



Figur B1. Ozon- og temperaturprofil fra Illoqqortoormiut (Scoresbysund), Grønland, den 13. juli 1994 målt med en ozonsonde. Instrumentet måler ozonkoncentrationen 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 (millipascal) (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.

Ozonprofilen kan vises på flere måder, hvoraf to er vist i figur B1 ovenfor. Den kunne også vises som antal ozonmolekyler pr. m^3 eller som gram pr. m^3 , hvilket ville give et kurveforløb som i figur B1, med maksimumkoncentration omkring 20-21 km's højde. En anden måde at angive ozonkoncentrationen på, ofte anvendt i modelberegninger, er blandingsforholdet, der angiver, hvor mange ozonmolekyler der findes pr. million molekyler i den omkringliggende luft. Det angives i ppmv – parts per million (volume) – hvor v angiver, at der er tale om en volumenmængde. Hvis ozonprofilen i figur B1 vises som blandingsforhold, bliver udseendet som i figur B2. Bemærk forskellen: såfremt ozonprofilen vises som blandingsforhold (ppmv) forekommer det største blandingsforhold omkring 33-35 km's højde, mens den maksimale ozonkoncentration er omkring 21 km's højde (figur B1), såfremt koncentrationen angives i antal molekyler pr. m^3 , i DU/km eller som partialtryk.



Figur B2. Ozon- og temperaturprofil fra Illoqqortoormiut (Scoresbysund), Grønland, den 13. juli 1994 målt med en ozonsonde. Den samme profil som vist i figur B1, blot med en anden enhed for ozonkoncentrationen. Blandingsforholdet angiver, hvor mange ozonmolekyler der findes for hver million molekyler i den omgivende luft. Skala for ozon er nederst, for temperatur øverst.

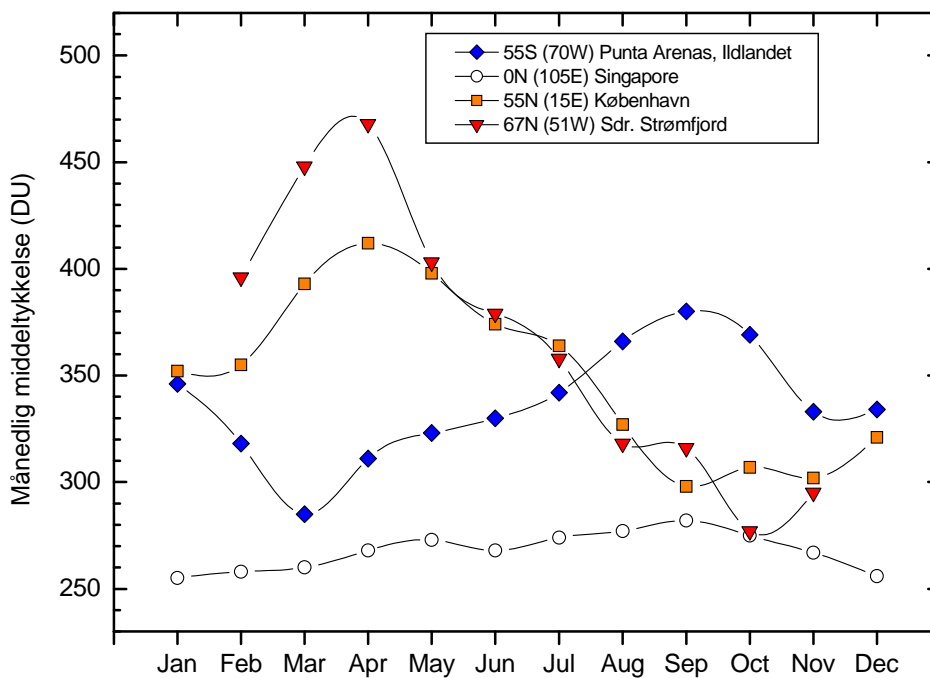
Troposfære, tropopause og stratosfære

Den røde kurve i figur B1 og B2 viser temperaturens forløb op gennem atmosfæren målt samtidigt med ozonen. Ved jordoverfladen er der ca. 10°, og bortset fra en lille temperaturstigning lige over jordoverfladen, falder temperaturen jævnt op til 11 km's højde, hvor den er ca. -60° C. Herover stiger temperaturen med højden. Den nederste del af atmosfæren, op til ca. 11 km's højde i figur B1 og B2, kaldes **troposfæren**. Grænsen ved ca. 11 km's højde, hvor temperaturkurven pludselig knækker, kaldes **tropopausen**. Området over tropopausen kaldes **stratosfæren**, der strækker sig op til ca. 50 km's højde.

Ozondannelse, fordeling og variation

Den energirige UV-stråling fra solen danner hele tiden ozon i atmosfæren. Det er især i 30-50 km's højde, at ozonen dannes, og især over ækvator, hvor solen står højt på himlen og UV-strålingen derfor er særlig intens. UV-strålingen ødelægger imidlertid også ozonen, så den har en forholdsvis kort levetid i 30-50 km's højde. Cirkulationen forholdsvis højt i stratosfæren fører den dannede ozon væk fra ækvator og i retning mod Nord- og Sydpolen. Under denne bevægelse synker ozonen længere ned i atmosfæren, hvor UV-strålingen 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 dog 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 på den nordlige halvkugle, 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 **årliche 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 årliche gang er vist nedenfor i figur B3.



Figur B3. Den årlige variation 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 (Kangerlussuaq) ved 67° grader nordlig bredde. Målingerne er satellitmålinger er fra 1980 foretaget af TOMS-instrumentet på NASA's Nimbus-satellit. Bemærk, at der ikke er målinger for januar og december i Kangerlussuaq. Det skyldes, at satellitinstrumentet kræver sollys for at kunne måle, og samtidig, at solen er mere end 5-10 grader over horisonten ved middagstid. Det sidste er ikke tilfældet i Kangerlussuaq i december og januar.

Som det fremgår af figur B3, 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 i den årlige gang. På den sydlige halvkugle er årstidsvariationen forskudt med ca. 6 måneder – sammenlign f.eks. den årlige gang for København og Punta Arenas, som har ca. samme breddegrad.

Ud over den årlige gang varierer ozonlaget også over kort tid. Det er den såkaldte dag-til-dag variation, der for det meste skyldes forandringer i troposfæren, dvs. vejrændringer. 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 end normalt i lavtryksvejr, dvs. når der er dårligt vejr.

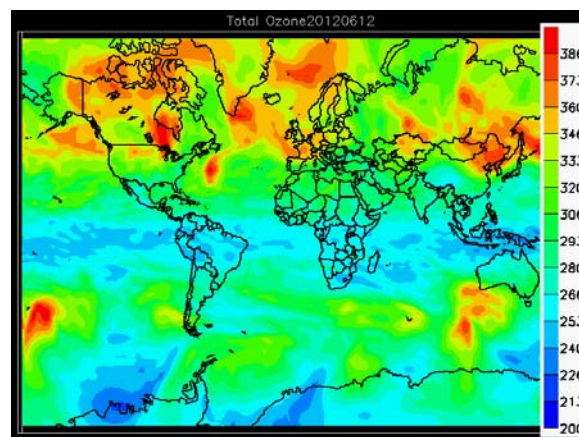
Dag-til-dag variationerne kan være ganske store, og en dag-til-dag variation på 50 DU er ikke unormalt. Disse kortidsvariationer fremgår f.eks. af figur A1a-f.

Måling af ozonlagets tykkelse.

Ozonlagets tykkelse måles ved hjælp af forskellige målemetoder. Flere af de optiske metoder benytter ozonens evne til at absorbere UV-stråling. Det gælder bl.a. de jordbaserede målinger med Dobson- og Brewer-instrumenter (som bl.a. DMI anvender), ozonprofilmålinger med LIDAR (Light Detection And Ranging, et laserbaseret instrument) 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, bl.a. 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. Desuden er jordbaserede målinger vigtige for validering af satellitmålinger.

Satellitmålinger af ozonlaget er vigtige fordi de kan give et dagligt "billede" af ozonlagets tykkelse over *hele* kloden. Desværre er levetiden for satellitinstrumenter ofte kort. Et af de mest værdifulde datasæt fra et satellitinstrument er målinger fra TOMS-instrumentet (Total Ozone Mapping Spectrometer) på Nimbus7-satellitten. Trods en forventet levetid på 5 år holdt det i 15 år (1978-1993). Dermed har et og samme instrument kunnet give os informationer om ozonlagets daglige tilstand i mere end 10 år, og tilmed i en periode, hvor ozonlaget er blevet tyndere. TOMS-instrumentet er udviklet hos den amerikanske rumfartsorganisation NASA. Andre TOMS-instrumenter har fløjet på andre satellitter, men har kun holdt få år. Andre kendte satellitinstrumenter er f.eks. SBUV (Satellite Backscatter UV) og TOVS (Total Ozone Vertical Sounder, der udnytter ozonens infrarøde absorption), GOME-instrument (Global Ozone Monitoring Experiment), der flyver på den europæiske rumfartsorganisation ESA's ERS-2 satellit, det europæiske SCHIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography) på ESA's ENVISAT-satellit, OMI (Ozone Monitoring Instrument) på NASA's AURA-satellit og GOME-2 på Eumetsat's Metop. Andre satellitinstrumenter, der kan måle andet end blot ozonlagets tykkelse, er værdifulde, fordi de samtidig måler koncentrationen af nogle af de molekyler, der medvirker til ozonlagets nedbrydning. Derved får man indsigt i atmosfærens kemi.

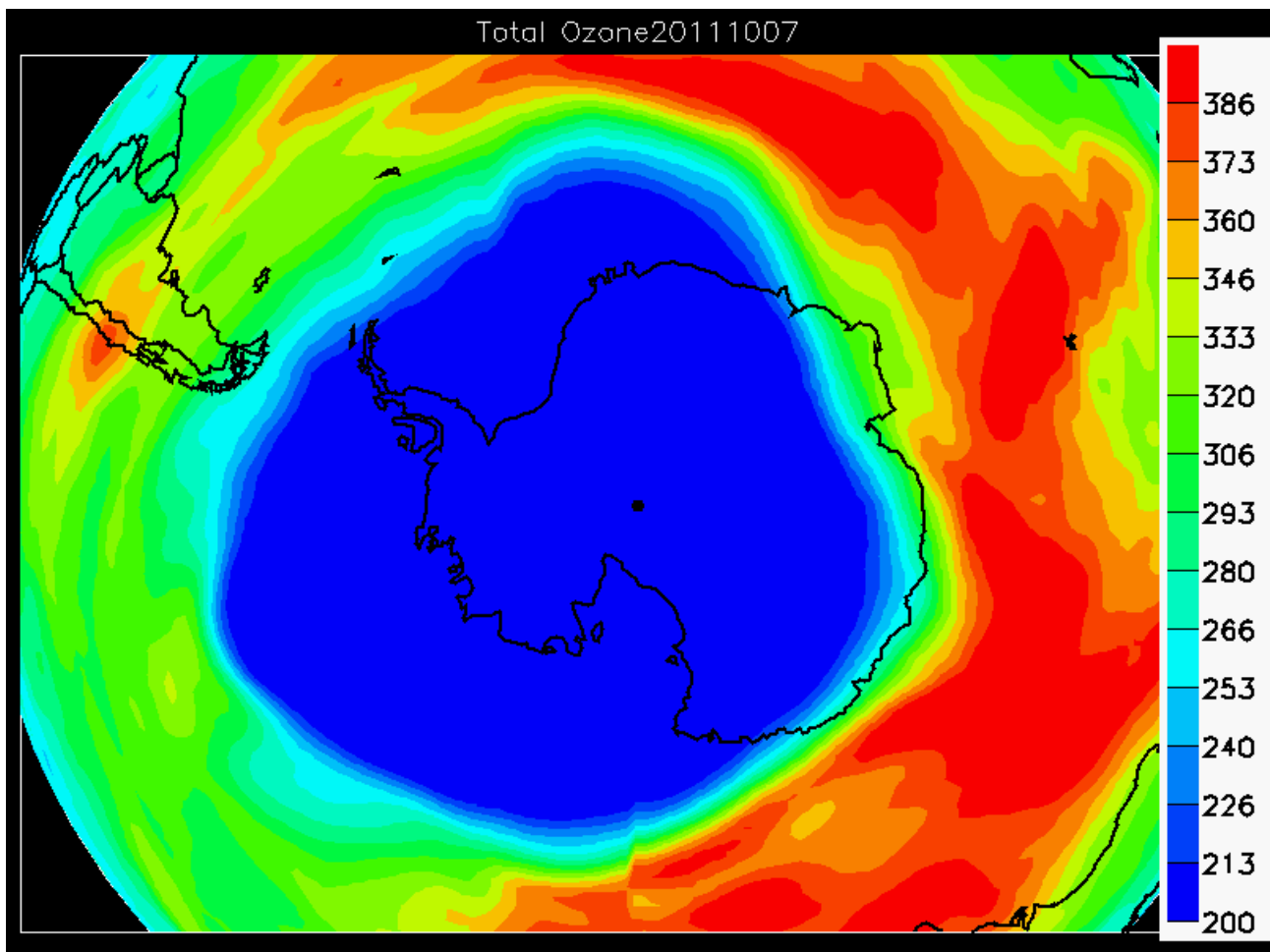
Et eksempel på et "satellitbillede" af ozonlaget den 12. juni 2012 er vist i figur B4, hvor målingerne stammer fra et GOME-2 instrumentet ombord på Eumetsat MetOp-A satellit.



Figur B4. Ozonlaget den 12. juni 2012 målt med GOME-2-instrument på Eumetsat's MetOp-A satellit. 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 indtræffer først i september). Bemærk det store bælte omkring ækvator, hvor ozonlaget er forholdsvis tyndt.

Ozonedbrydning og ozonhul

Den kraftigste ødelæggelse af ozonlaget finder sted over Antarktis, hvor der hvert år i oktober måned dannes et såkaldt ozonhul. Når vi taler om et ozonhul, mener vi oftest, at ozonedbrydningen er *væsentlig* i forhold til normale udsving eller ændringer i lagets tykkelse, men i praksis betyder det, at ozonlagets tykkelse er mindre end halvdelen af hvad det normalt skulle være. Ozonen nedbrydes imidlertid ikke lige meget i alle højder, men mest i området mellem 15 og 20 km's højde, hvor næsten al ozonen forsvinder over Antarktis, når ozonhullet opstår. Ozonhullet over Antarktis varer typisk i 1-2 måneder. Ozonlagets tykkelse den 7. oktober 2011 over den sydlige halvkugle er vist i figur B5. Ballonmålinger fra Antarktis viser, at det meste af ozonen i 14-20 km's højde er væk (Figur 17). I disse højder findes normalt de største ozonkoncentrationer (figur B1).



Figur B5. Ozonhullet over Antarktis den 7. oktober 2011. Data er fra Eumetsat's GOME-2 på MetOp-A satellitten. Røde farver viser et tykt ozonlag, blå et tyndt ozonlag, og ozonlagstykkelsen i DU er angivet langs konturlinjerne, med interval på 30 DU. Inden for det centrale blå område – ozonhullet – er ozonlagets tykkelse mindre end 120 DU. Det ses, at en tunge af ozonhullet strækker sig over mod Ildlandet.

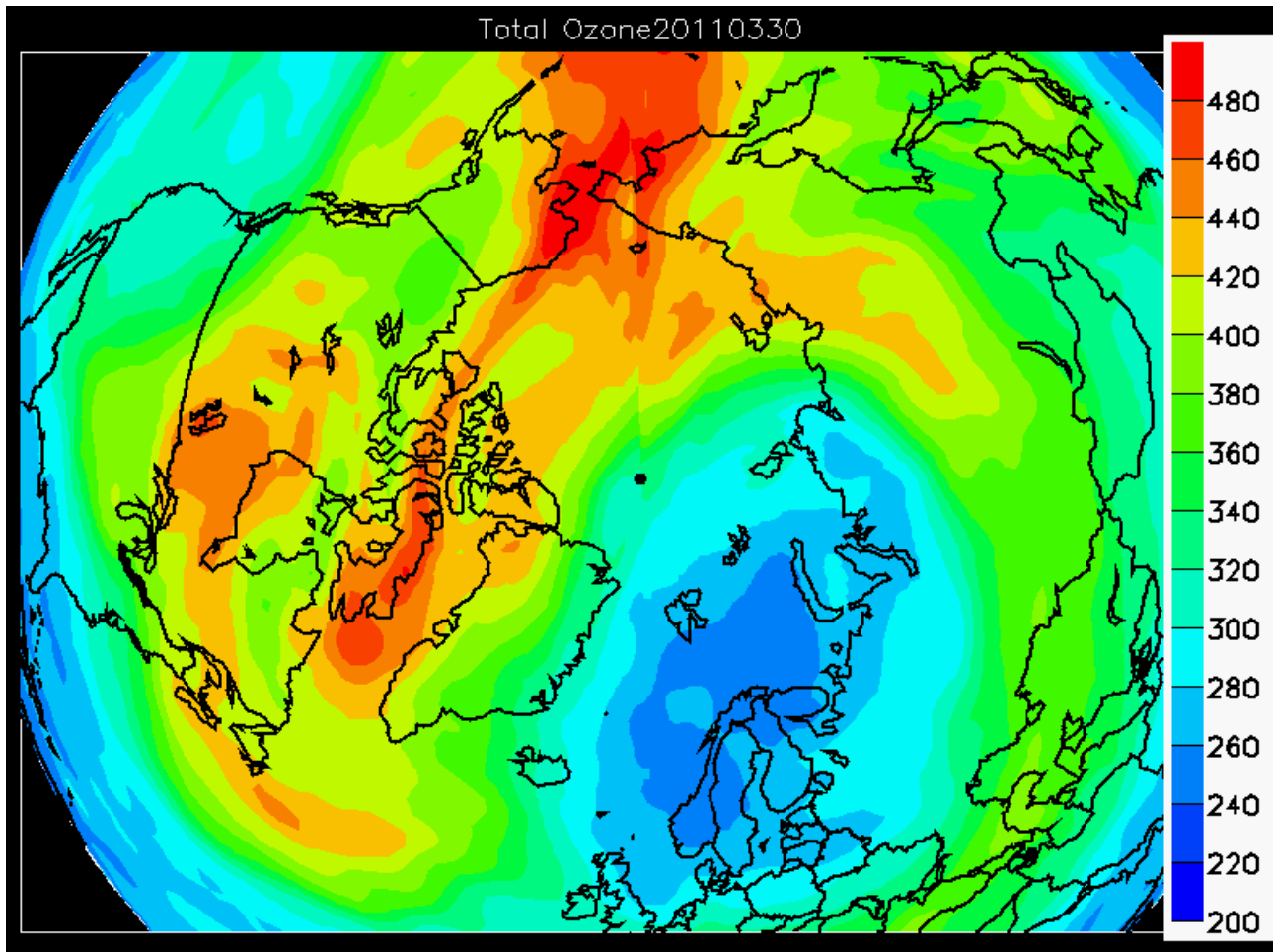


Nedbrydningen af ozonen skyldes klor (Cl) og brom (Br) som naturligt kun forekommer i uhyre små mængder i atmosfæren. Men gennem de seneste 30-40 år er der sket en tilførsel af disse stoffer fra udslippet af CFC-gasser og haloner.

CFC-gasser er kemiske forbindelser, der indeholder klor, mens haloner er stoffer der indeholder brom. CFC står for Cloro-Flouro-Carbon – altså klor, fluor og kulstof – og er en betegnelse for en gruppe af kemiske forbindelser, der indeholder de tre nævnte grundstoffer. Fordi CFC'erne er meget stabile kemiske forbindelser er de i tidens løb blevet brugt til mange formål, f.eks. som drivgas i spraydåser eller til oppustning af isoleringen i køleskabe. Deres store anvendelse har imidlertid også betydet, at der er sluppet store mængder CFC-gasser ud i atmosfæren. Haloner er tilsvarende stabile forbindelser, der bl.a. bruges som brandslukningsmidler. CFC-gassernes og halonernes store kemiske stabilitet betyder også, at de kan vandre op gennem atmosfæren, uden at blive nedbrudt. De kan herved nå op i stratosfæren, hvor de kan spaltes i deres bestanddele af solens UV-stråling.

I stratosfæren er klor det meste af året dog bundet i kemiske forbindelser, der *ikke* har evnen til at nedbryde ozon – den er inaktiv. Om vinteren over polarområderne sætter klorforbindelserne sig på de skykrystaller, der dannes, når temperaturen kommer under -80°C . Skyerne kaldes polarstratosfæriske skyer (PSC, eng: Polar Stratospheric Clouds). Så lave temperaturer har man især i stratosfæren over Antarktis om vinteren, men af og til også i stratosfæren over Arktis. På overfladen af skypartiklerne kan klorforbindelserne omdannes til kemisk aktive former, der potentielt kan nedbryde store mængder ozon. Skypartiklerne i PSC'erne indeholder salpetersyre, som kommer fra kondensation af reaktivt nitrogen i atmosfæren. Når skypartiklerne pga. af tyngdekraften falder ned, udvaskes ozonlaget for reaktivt nitrogen – en proces der kaldes denitrifikation. Lavere koncentrationer af reaktivt nitrogen bevirker, at de reaktive klorforbindelser får en længere levetid og dermed giver anledning til en større ozonnedbrydning. I det sene efterår og tidlige vinter dannes den såkaldte stratosfæriske polare hvirvelvind (vortex) over såvel Antarktis som Arktis. Det er en kraftig vestenvind der blæser i højder over ca. 12 km, og som i geografisk udstrækning dækker et område svarende til det antarktiske kontinent. Denne hvirvelvind er så kraftig, at luftmasserne indenfor ikke kan opblandes med luftmasserne udenfor: den så at sige holder på sin luft. Normalt ophører denne hvirvelvind sidst på foråret pga. solopvarmning og atmosfæriske bølger. Så længe det er mørkt over Antarktis eller Arktis, og så længe den polare hvirvelvind blæser, så gør klorforbindelserne ikke noget ved ozonen. Men når sollyset efter polarnatten vender tilbage til stratosfæren (i september over Antarktis) aktiveres klorforbindelserne ved sollysets indvirken og kan hurtigt ødelægge ozonen. Herved dannes ozonhullet, fordi den stratosfæriske hvirvelvind samtidigt forhindrer luften uden for hvirvlen i at trænge ind gennem hvirvlen og blande luften op med mere ozonholdig luft. Ozonindholdet inden for hvirvlen bliver således mindre og mindre, indtil hvirvelvinden ophører. Processen stopper først i november-december (altså i det sene forår over Antarktis), når det bliver varmere, hvirvelvinden ophører, og den ozonfattige luft blandes op med ozonrig luft fra lavere breddegrader.

Der dannes ikke et ozonhul over Arktis af samme dybde og geografiske størrelse som over Antarktis. Det skyldes især, at vintertemperaturerne i 15-25 km's højde ikke er helt så lave som over Antarktis. Dermed dannes der ikke så mange polar-stratosfæriske skyer, som er en af forudsætningerne for dannelse af et ozonhul. I nogle vintre er der dog set en betydelig ødelæggelse af ozonlaget over Arktis. F.eks. i 1997, 2000, 2005, 2007, 2008 og 2011, hvor der f.eks. fra januar til marts i 2011 forsvandt op mod 80 % af ozonen mellem 13 og 20 km's. Figur B6 viser et "satellitbillede" af ozonlaget den 30. marts 2011 over den nordlige halvkugle. På figuren ses områder med meget tyndt ozonlag over Skandinavien. Det skyldes en kraftig nedbrydning af ozonlaget over Arktis i perioden januar-marts.



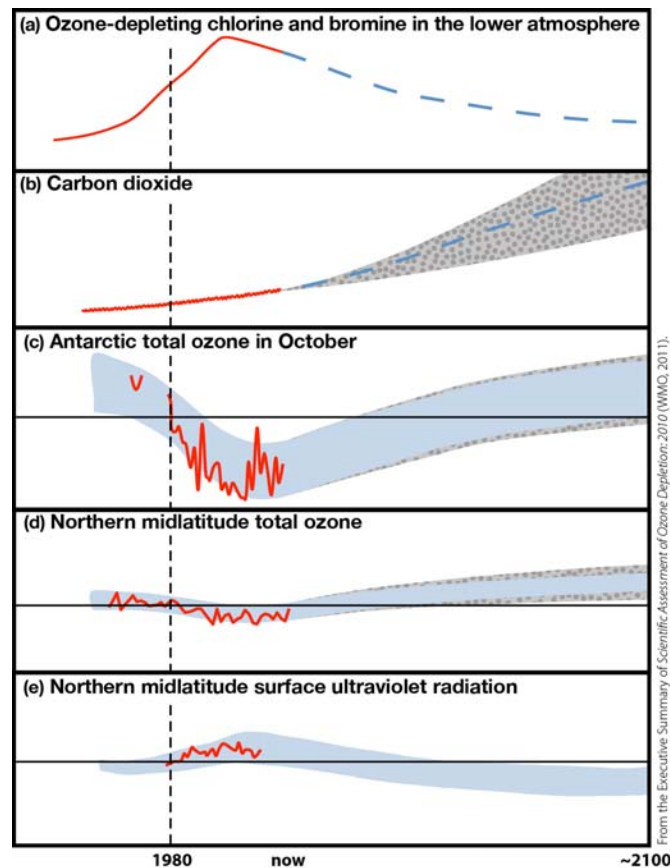
Figur B6. Ozonlagets tykkelse (DU) over den nordlige halvkugle 30. marts 2011, observeret fra Gome-2 instrument ombord på Eumetsat's MetOp satellit. Vorticet er drejet ind over Skandinavien, og inden for vorticet måles de lave tykkelser af ozonlaget ned til omkring 250 DU.

Den ozonnedbrydning, som vi ser f.eks. over Danmark i forårmånederne, skyldes, at den ozonfattige luft over polerne opblandes med den ozonrige luft uden for den polare hvirvelvind, når denne ophører midt i eller sidst på foråret. Derved bliver ozonlaget på mellembreddegrader også tyndere end normalt for foråret. Desuden kan klor og brom ødelægge en mindre del af ozonen, selvom det ikke er så koldt, at der dannes stratosfæreskyer.

Ozonlaget i fremtiden

Takket være internationale tiltag (Montreal-protokollen med tilføjelser) er udledningerne af mange ozonnedbrydende stoffer (ODS; ozone depleting substances) blevet begrænset, jf. figur B7a. Således kan man, alt andet lige, i fremtiden forvente, at ozonlaget vil regenereres. Dette vil dog gå langsomt, da levetiden af mange af de stoffer, der er udledt, er meget lang. Endvidere kan klimaændringer måske resultere i en koldere stratosfære med flere polar-stratosfæriske skyer, hvilket kan udsætte tidspunktet for, hvornår ozonlaget er fuldt genoprettet i polarområderne. Omvendt vil lavere stratosfæretemperaturer føre til langsommere ozonnedbrydning på mellem breddegrader og måske en over-opretning af ozonlaget der. Næste skridt er at måle, om begrænsningerne i ozonnedbrydende stoffer reelt har en positiv effekt på ozonlagets tykkelse. På grund af de store naturlige variationer i ozonlaget er dette en kompliceret opgave.

Figur B7 (fra WMO, 2011) viser i skematisk form indflydelsen af de ozonnedbrydende stoffer (ODS) og klimaforandringer på ozonlaget og indflydelsen af forandringer i ozonlaget på UV-strålingen.



Figur B7. Skematisk udvikling i ozonlaget. De røde kurver repræsenterer observationer op til nu-tiden. De blå stiplede kurver repræsenterer et generelt accepteret scenarie for fremtiden. Skyggede områder repræsenterer årlig variabilitet og usikkerheder i målinger og simuleringer. Den stiplede lodrette linie ved 1980 repræsenterer året, hvor problemerne med nedbrydningen af ozonlaget viste sig for første gang. Kurven for CO₂ er vist, fordi forøgede koncentrationer påvirker temperaturen og vinde (transport) i stratosfæren af betydning for ozonlaget. (WMO, 2011)

Figur B7a viser udviklingen af de ozonnedbrydende stoffer i troposfæren. Pga. Montreal-protokollen (se appendix C) forventes koncentrationerne at være på 1980-niveau i midten af indeværende århundrede. Figur B7b viser de forventede stigende koncentrationer af CO₂, der også påvirker stratosfæren og ozonlaget. Figur B7c viser ozonhullets tykkelse i middel over Antarktis i oktober måned. Det antarktiske ozonhul er den klareste manifestation af virkningerne af ODS. Det antarktiske ozonlag forventes at være regenereret sidst i det 21. århundrede. Det stiplede område viser den årlige variabilitet i et scenarie, der indeholder ændringerne i ODS (figur a) og CO₂ (figur b) samt ændringer i lattergas (N₂O) og methan (CH₄). Figur B7d viser den årgennemsnitlige ozonlagstykkelse på 30-60 grader nordlig bredde. Naturlig variabilitet gør det vanskeligt at estimere en genopretning af ozonlaget på nordlige mellem breddegrader til niveauet før 1980, men det vil formentlig ske inden midten af indeværende århundrede; altså før de stratosfæriske koncentrationer af ODC er helt nedbragt til 1980-niveau og før genopretningen over Antarktis. Den hurtigere genopretning på nordlige mellembreddegrader skyldes til dels en klimatisk afkøling af stratosfæren, der nedsætter hastigheden af ozonnedbrydningen på mellem breddegrader (i modsætning til polar om-



råderne). I slutningen af århundredet ses et forventet tykkere ozonlag end 1980-niveauet. Figur B7e viser udviklingen i UV stråling under skyfri betingelser på nordlige mellem breddegrader. Skyer, aerosoler og luftforurening påvirker også i høj grad den faktiske UV-stråling, men disse faktorer er vanskelige at forudsige og er ikke medtaget. På grund af en over-genopretning af ozonlaget (figur d) forventes lavere UV-niveau end før 1980 hen mod slutningen af århundredet.



Appendiks C - Wien-konventionen og Montreal-protokollen

Politisk reagerede verdenssamfundet i begyndelsen af 1980'erne på den stigende bekymring om nedbrydningen af ozonlaget. Under FN' miljøprogram (United Nations Environmental Programme, UNEP) blev der vedtaget internationale aftaler om beskyttelsen af ozonlaget gennem Wienkonventionen samt aftaler om forbud mod anvendelse og begrænsning i udslip af klor- og bromholdige gasser gennem den tilhørende Montreal-protokol og dens senere tilføjelser.

Wien-konventionen af 22. marts 1985 om beskyttelse af ozonlaget blev ratificeret af Danmark 23. september 1988. Bekendtgørelsen om Wien-konventionen er udstedt af Udenrigsministeriet den 9. august 1990. Konventionen administreres af Miljøministeriet.

Wien-konventionen indebærer, at der oprettes en konference for parterne (til konventionen). Til videnskabelig støtte for konferencen modtager Udenrigsministeriet invitationer til deltagelse i forberedende møder kaldet Meetings of the Ozone Research Managers of the Parties to the Vienna Convention. Det seneste møde af denne art fandt sted i regi af FN's meteorologiske organisation (World Meteorological Organisation, WMO) i Wien i maj 2011. Gennem Miljøstyrelsen er DMI blevet opfordret til at deltage som Danmarks repræsentant ved dette og alle tidligere møder. Møderne resulterer i en række anbefalinger vedrørende, bl.a. nødvendigheden af fortsat monitorering af ozonlagets tilstand og den ultraviolette stråling, ikke mindst i de Arktiske områder, samt forskning i sammenhæng mellem genopretning af ozonlaget og klimaforandringer, herunder kvantificering af kemiske og dynamiske processer. På det 8. ministermøde for parterne til Wien-konventionen (COP 8) i Doha i Qatar blev den såkaldte Doha deklARATION vedtaget, der bl.a. opfordrer parterne til fortsat monitorering af ozonlaget og vekselvirkningen med klimaforandringerne.

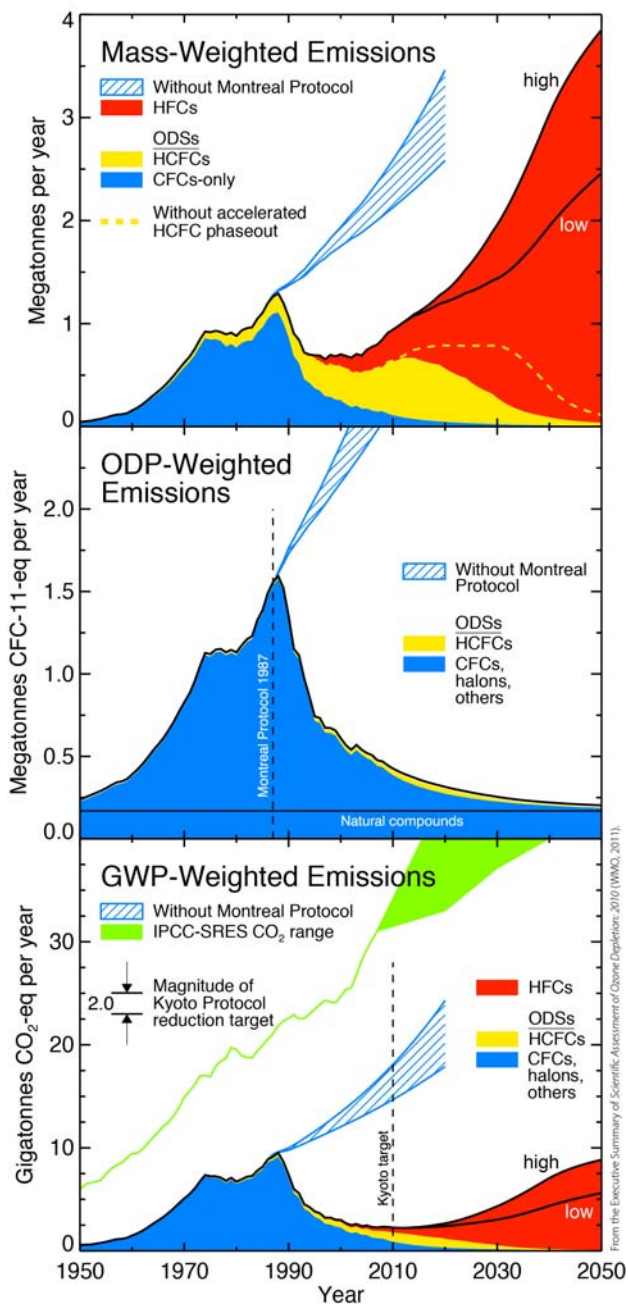
I følge Wien-konventionens artikel 3.1 forpligter parterne sig til at gennemføre forskningsarbejder og videnskabelige vurderinger gennem kompetente internationale organer. De danske forpligtelser er bl.a. foregået gennem den udbyggede ozonforskning ved DMI ved deltagelse i adskillige EU- og nationalt finansierede forskningsprojekter samt medvirken ved udarbejdelse af videnskabelige vurderinger om stratosfærisk ozonnedbrydning i WMO-UNEP- og EU-regi. Seneste tilstandsrapport om ozonlaget er udarbejdet i 2010 (WMO, Assessment of Ozone Depletion: 2010, World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 52, Geneva, 2011).

I Wien-konventionens artikel 3.2 fremhæves det, at parterne gennem kompetente internationale organer vil fremme fællesprogrammer med henblik på systematiske observationer af udviklingen i ozonlaget. I praksis foregår den danske indsats her gennem DMI's medlemskab af Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC), der understøttes af UNEP og Den Internationale Ozonkommission. DMI har opført og driver observatoriebygninger i Pituffik (Thule) og Kangerlussuaq (Søndre Strømfjord) i Grønland, som udgør arktiske NDACC-stationer, og observationerne herfra, tillige med målinger fra Scoresbysund (NDACC-station) og København, indrapporteres regelmæssigt til NDACC databasen og til World Ozone and UV Data Center under WMO's Global Atmosphere Watch program. Fra og med 2007 har DMI indgået et samarbejde med Miljøstyrelsen om monitorering af ozon og UV i Grønland. Projektet er registreret under Arktis Råds Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) som et National Implementation Plan Project.

Den til Wien-konventionen hørende protokol – Montreal-protokollen – er en bindende aftale for parterne om forbud mod produktion og brug af ozonlagnedbrydende stoffer (ODS; ozone depleting substances) som CFC-, HCFC- og Halon-gasser. Montreal-protokollen blev underskrevet i 1987 og

har fået efterfølgende tilføjelser i 1990, 1992, 1997 og 1999. EU og dermed Danmark har indført yderligere begrænsninger, end hvad Montreal-protokollen foreskriver, f.eks. i form af hurtigere afvikling i af de ozonnedbrydende stoffer.

Virkningerne af Montreal-protokollen ses klart i form af stagnerende eller aftagende koncentrationer af ozonnedbrydende stoffer i atmosfæren (Figur C1, øverste og midterste figur) og repræsenterer således et positivt resultat af internationale aftaler om begrænsninger af et globalt miljøproblem. Dog er ODS-gasserne svært nedbrydelige, og der vil derfor gå adskillige årtier, inden koncentrationerne af klor- og bromforbindelser i stratosfæren vil synke til niveauer som i begyndelsen af 1980'erne. ODS-gasserne er også kraftige drivhusgasser, og Montreal-protokollen har reduceret det substantielle bidrag fra disse gasser til den globale opvarmning, jf figur C1 (nederste panel).



Figur C1 (fra WMO, 2011).

Emissioner af ODS og deres ikke-ozonnedbrydende erstatning HFC fra 1950 til 2050. Emissionerne er summen fra udviklingslande og udviklede lande. Kurverne er grupperet under hhv. HFC (rød), HCFC'ere (gul) og CFC'ere (blå). Den lyseblå skravering angiver emissionerne uden en Montreal-protokol med en årlig vækst i produktionen på 2-3%.

Øverste figur: Globale masse-vægtede emissioner i megatons pr år. Den gule stiplede linie er emissionerne uden den i 2007 vedtagne accelererede udfasning af HCFC.

Midterste figur: Global emission af potentielt ozonnedbrydende stof (ODP; ozone depletion potential), udtrykt som megatons CFC-11 ækvivalenter pr år.

Nederste figur: Globale emissioner, udtrykt som gigatons af CO₂-ækvivalenter pr år, vægtet efter deres globale opvarmingspotentiale (GWP; global warming potential). Vist i sammenligning er CO₂ udslipsscenarioer (grøn) fra IPCC's SRES scenarier (A1B, maksimum) og (B2, minimum). Den stiplede linie markerer 2010; det midterste år i den første forpligtelsesperiode under Kyoto-protokollen. Vist er også størrelsen af reduktionsmålet for denne periode (2 gigatons). Faldet i GWP fra ODS som følge af Montreal protokollen er ca. 5 gange så stort som Kyoto-reduktionsmålet. Dette viser, at Montreal-protokollen også er vigtig for begrænsning af den globale opvarmning.

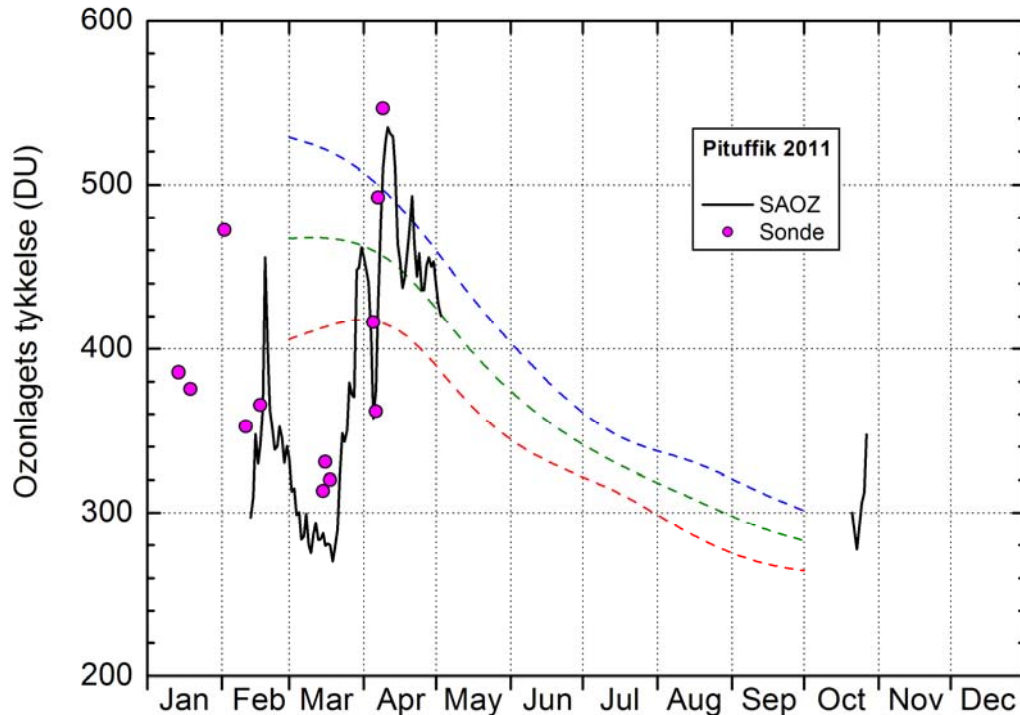


Appendiks D - Internationalt samarbejde

DMI udfører stratosfæreforskning med både dansk og international støtte. Således har DMI siden 1990 deltaget i 35 projekter støttet af EU-Kommissionen, og i samme periode er der også opnået støtte fra danske forskningsfonde. DMI har deltaget i alle større europæisk-amerikanske arktiske ozonforskningskampagner gennem 1990'erne som EASOE, SESAME, THESEO, THESEO-2000/SOLVE, Vintersol og SCOUT-2/AMMA. DMI's stratosfæreobservatorier i Grønland udgør arktiske stationer i NDACC, et verdensomspændende netværk af målestationer udstyret med standardiseret instrumentering af verificeret høj kvalitet til overvågning af stratosfærens tilstand og processerne, der fører til kemisk nedbrydning af ozonlaget, og DMI deltager i NDACC's styregruppe. DMI's forsknings- og monitoringsindsats indgår endvidere som et prioriteret indsatsområde i Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) under Arktisk Råd. DMI deltager endvidere i EUMETSAT Satellite Application Facility on Ozone Monitoring med henblik på udvikling af operationelle UV-index produkter, baseret på satellitmålinger af ozonlaget.

Appendix E. Det arktiske ozonhul i foråret 2011.

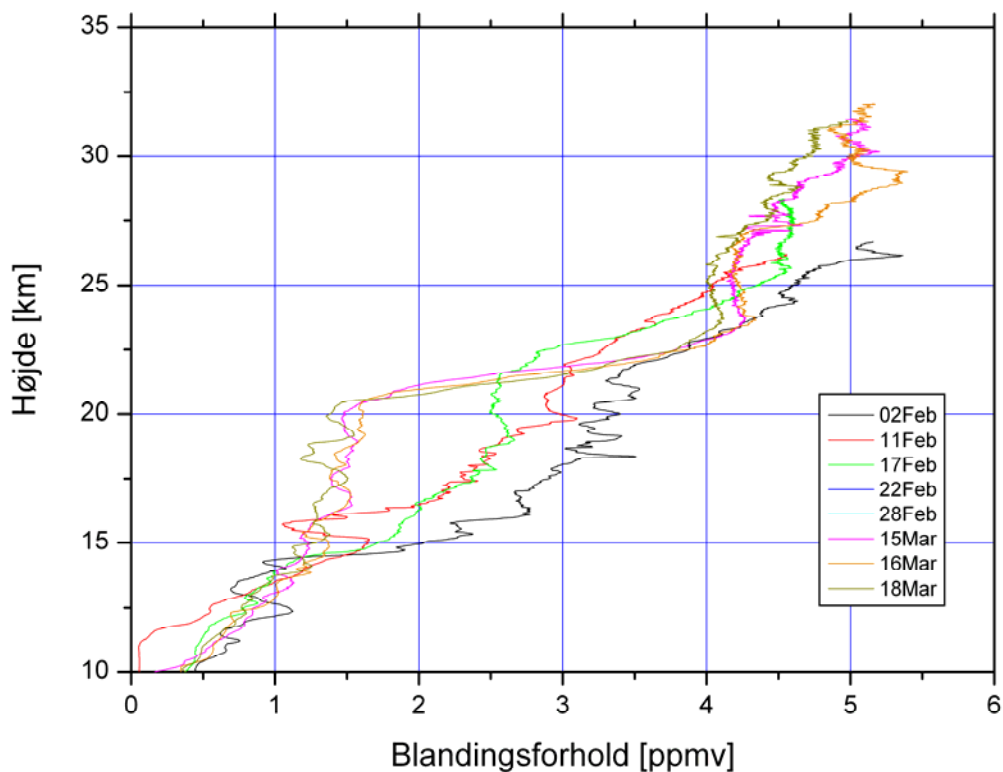
Skønt foråret 2011 ikke udgjorde en rekord i PSC areal, er det navnlig forholdet, at temperaturerne var lave i marts og begyndelsen af april 2011 i et stort højdeinterval med en stabil vortex, der har bevirket den rekord store ozonnedbrydning i foråret 2011 (Manney et al., 2011).



Figur E1. Daglige SAOZ målinger af ozonlagets tykkelse over Pituffik 2011 (sort kurve). Den grønne linje angiver middelværdien af daglige målinger i ti-års perioden 1979-1988 målt med TOMS-instrumentet ombord på Nimbus7-satellitten. De blå og røde linjer angiver plus og minus standardafvigelse fra middelværdien. Det betyder, at 2/3 af alle målinger i perioden 1979-1988 ligger mellem den blå og den røde linje. Røde mærker angiver ozonlagets tykkelse målt med ozonsonder.

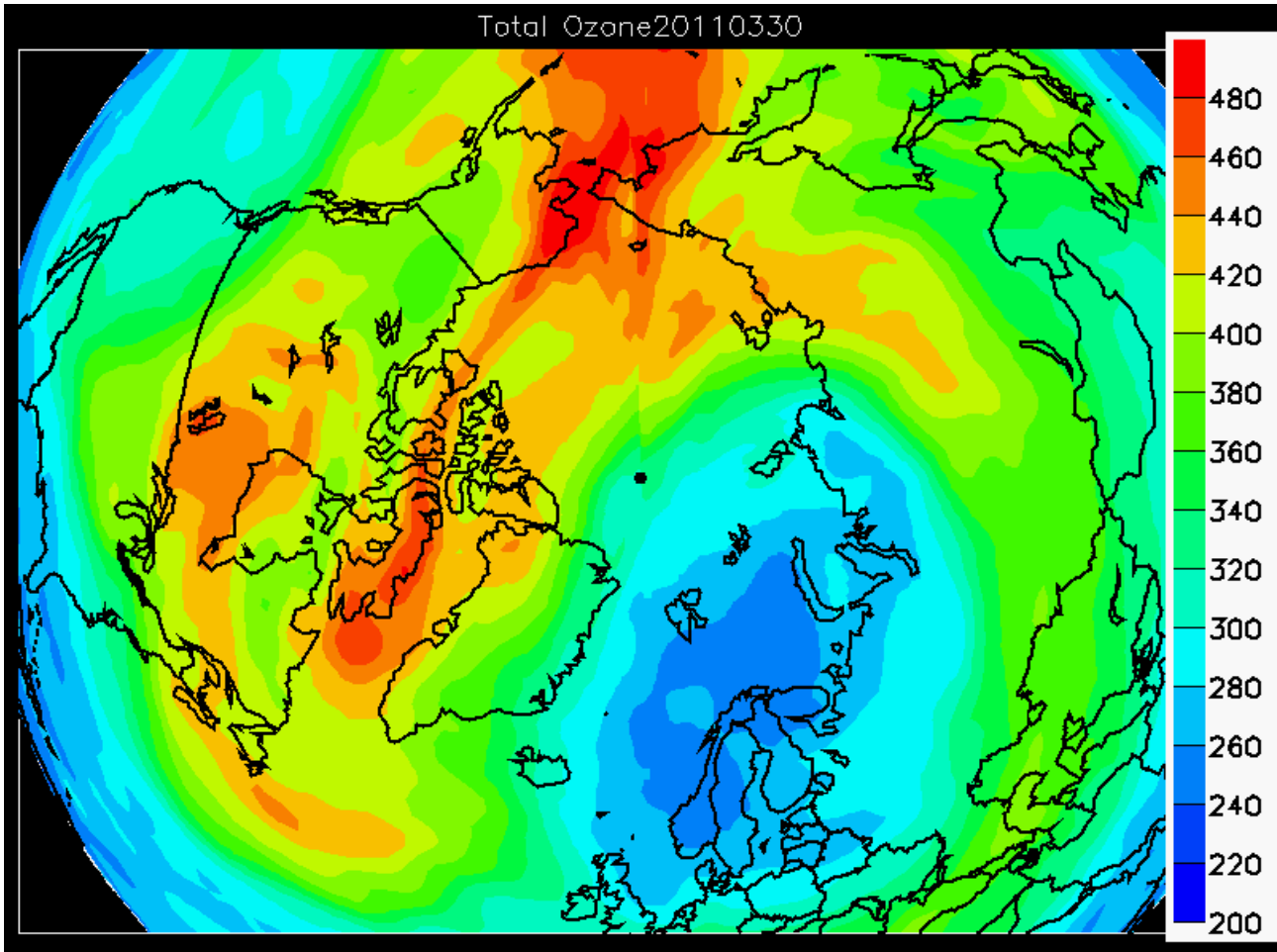
Figur E1 viser et eksempel på omfanget af ozonnedbrydningen inden for vorticitet i det tidlige forår 2011. I perioden 7. februar til 23 marts lå Pituffik i Nordvestgrønland centralt placeret i vorticitet. I denne periode målte kraftigt aftagende tykkelse af ozonlaget ned til værdier omkring 270 DU, hvilket skal sammenlignes med normale værdier for vintre uden ozonnedbrydning på omkring 460 DU, dvs. en formindskelse på 41%. En tilsvarende ozonnedbrydning er blevet målt fra andre SAOZ stationer, når disse har befundet sig inden for vorticitet. Analyser af satellitmålinger viser, at over store områder af Arktis var der nedbrudt mere en 150 DU, hvilket er sammenligneligt med forholdene i det antarktiske ozonhul, skønt den arktiske vortex er mindre i geografisk udstrækning (Manney et al., 2011). Kangerlussuaq befandt sig inden for vorticitet i slutningen af februar og frem til midten af marts, og målingerne viser ligeledes et tyndt ozonlag over stationen i denne periode (figur A12, 2011 i Appendix A).

Ballonmålinger af ozonens blandingsforhold viser, i hvilke højder ozonen bliver nedbrudt. Figur E2 viser en række successive ballonsonderinger fra Pituffik gennem februar-marts 2011, hvor stationen befandt sig inden for vorticet. Der konstateres en nedgang i ozonblandingsforholdet fra omkring 3,2 ppmv (parts per million by volume) til omkring 1,5 ppmv omkring 19 km højde i løbet af halvanden måned. Figuren viser ligeledes, at ozonnedbrydningen fandt sted i et bred højdeinterval mellem 15 og 22 km. DMI's ozonsonderinger indgår i det internationale Match-samarbejde om at overvåge den arktiske ozonnedbrydning i Arktis. Beregninger viser, at der i gennemsnit inden for vorticet blev nedbrudt op til 2,5 ppmv omkring 19 km højde, svarende til ca. 80%, hvilket er sammenligneligt med antarktiske forhold.



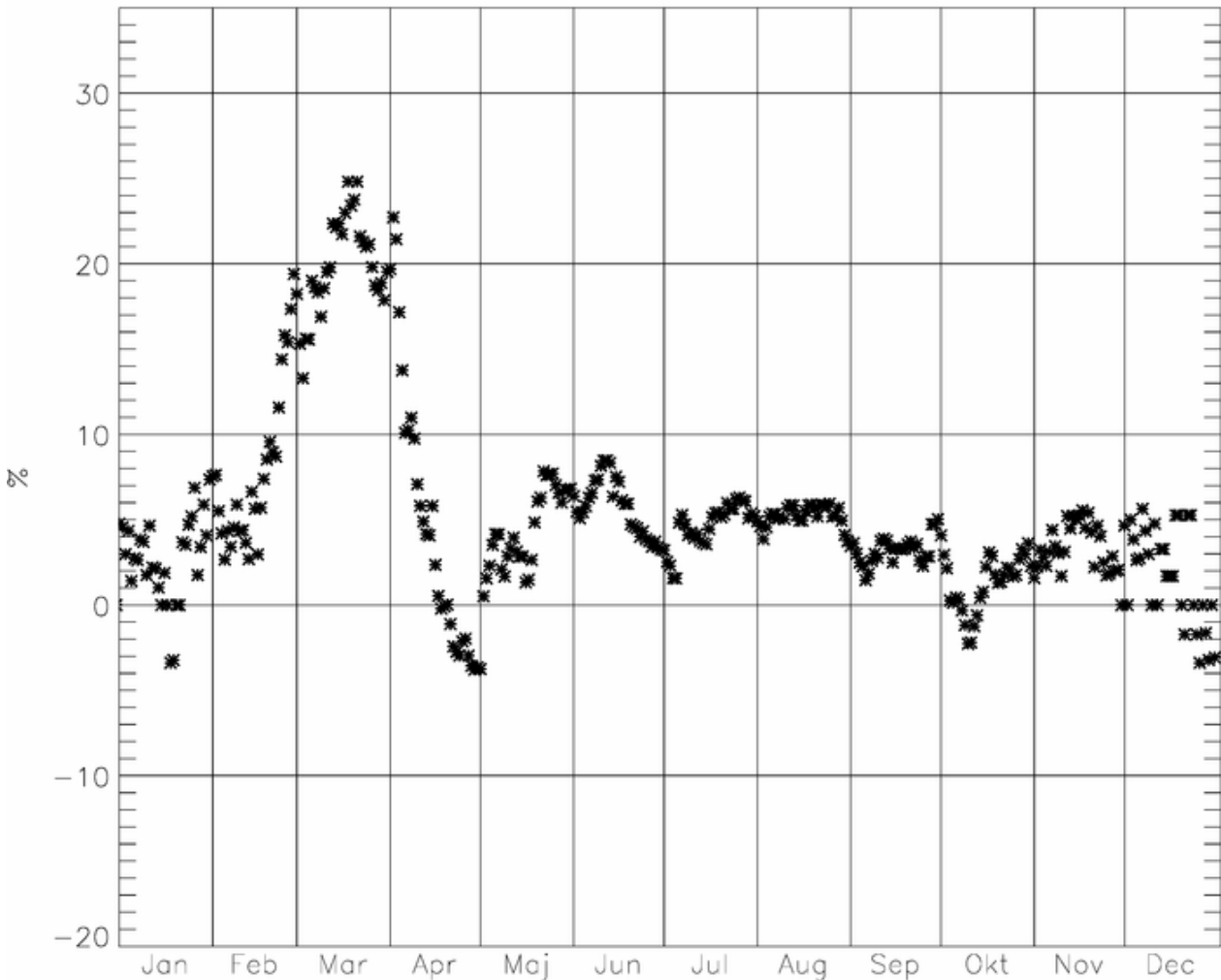
Figur E2. Ozonens blandingsforhold som funktion af højden fra foråret 2011 målt med ballonbårne ozonsonder fra Pituffik. En tydelig nedgang ses i ozonkoncentrationen mellem 15 og 22 km's højde, hvor ozonen mere end halveres i februar og marts.

Vorticitet svævede i slutningen af marts kortvarigt ind over Danmark, og i København målte ligeledes et usædvanligt tyndt ozonlag (figur A1f, 2011 i Appendix A). Figur E3 viser ozonfordelingen over store dele af den nordlige halvkugle den 30. marts 2011, hvor Skandinavien lå under et område, der kan betegnes som et arktisk ozonhul.



Figur E3. Ozonlagets tykkelse (DU) over den nordlige halvkugle 30. marts 2011, observeret fra Gome-2 instrument ombord på Eumetsat's MetOp satellit. Vorticitet er drejet ind over Skandinavien, og inden for vorticitet måles de lave tykkelser af ozonlaget ned til omkring 250 DU.

Figur E4 viser for hver dag i 2011 forskellen i % på gennemsnitsværdien af UV-indeks (skyfrit) for området nord for +60 grader i forhold til årene 2008-2010. Da det er beregnet for sky-fri himmel er det ikke et mål for den faktisk modtagne UV stråling, men ved samme (gennemsnitlige) skyforhold vil de arktiske områder have modtaget hudskadelig UV stråling i marts måned 2011, der er op til ca. 25% højere end 'normalt' (dvs uden den kraftige ozonnedbrydning). UV-indeks beregnet ud fra GOME total ozon.



Figur E4. Den daglige middelværdi af UV-indekset for skyfri himmel for det arktiske område (nord for 60 grader), beregnet for 2011 og sammenlignet med det tilsvarende for årene 2008-2010. Effekten af den kraftige ozonnedbrydning i starten af 2011 ses som en øgning af den hudskadelige UV-stråling på ca 25% i marts måned i forhold til tidligere år.



Referencer

- G. L. Manney, M. Santee, M. Rex, N.J. Livesey, M. C. Pitts, P. Veefkind, E. R. Nash, I. Wohltmann, R. Lehmann, L. Froidevaux, L. R. Poole, M. R. Schoeberl, D. P. Haffner, J. Davies, V. Dorokhov, H. Gernandt, B. Johnson, R. Kivi, E. Kyrö, N. Larsen, P. F. Levelt, A. Makshtas, C. T. McElroy, H. Nakajima, M. C. Parrondo, D. W. Tarasick, P. v. d. Gathen, K. A. Walker and N. S. Zinoviev., Unprecedented Arctic ozone loss in 2011, *Nature* 478, 469–475, 2011, doi:10.1038/nature10556.
- Rex, M. et al.: Arctic ozone loss and climate change, *Geophys. Res. Lett.*, Vol 31, L04116, 2004
- Rex, M. et al., Arctic winter 2005: Implications for stratospheric ozone loss and climate change, *Geophys. Res. Lett.* **33**, L23808, doi: 10.1029/2006GL026731, 2006.
- Steinbrecht, W., U. Köhler, H. Claude, M. Weber, J. P. Burrows, and R. J. van der A, Very high ozone columns at northern mid-latitudes at northern mid-latitudes in 2010, *Geophys Res. Lett.*, 38, L06803, doi: 10.1029/2010GL046634.
- Uppala, S. M. et al.: The ERA-40 reanalysis, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2961-3012, 2005
- WMO, Scientific Assessment of ozone depletion: 2002, World Meteorological Organisation Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 47, 498 pp, Geneva, 2003.
- WMO, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006, World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 50, Geneva, 2007.
- WMO, Assessment of Ozone Depletion: 2010, World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 52, Geneva, 2011.

Tidligere rapporter

Tidligere rapporter fra Danmarks Meteorologiske Institut kan findes på adressen:
<http://www.dmi.dk/laer-om/generelt/dmi-publikationer/>