



DMI

Ministry of Transport and Energy

Scientific Report 07-05

UV-stråling i Grønland

Tina Christensen, Helge Jønch-Sørensen,
Paul Eriksen, Bjørn Knudsen, Signe Bech Andersen



DMI's Brewer-spektrometer i Kangerlussuaq
til måling af ozonlagets tykkelse og den ultraviolette stråling



Colophon

Serial title:

Scientific Report 07-05

Title:

UV-stråling i Grønland

Subtitle:

Author(s):

Tina Christensen, Helge Jønch-Sørensen, Paul Eriksen, Bjørn Knudsen, Signe Bech Andersen

Other contributors:

Responsible institution:

Danish Meteorological Institute

Language:

Danish

Keywords:

Ozonlag, UV-stråling, Grønland

Url:

www.dmi.dk/dmi/sr07-05

Digital ISBN:

978-87-7478-551-4

ISSN:

1399-1949 (online)

Version:

1. september 2007

Website:

www.dmi.dk

Copyright:



Content:

Abstract	4
Resumé.....	4
UV-stråling over Grønland	5
Ozonedbrydning og UV-stråling gennem den efterfølgende sæson	15
Det fremtidige arktiske ozonlag.....	18
UV-varsling for Grønland.....	20
Konklusion.....	21
References.....	22
Previous reports.....	22



Abstract

Though the content of ozone depleting substances in the stratosphere is expected to decrease in the future, increased Arctic ozone depletion can be expected in the next two decades due to climate changes. In years where the ozone depletion is particularly strong and continues into April or even May, the population of Greenland may be exposed to an increased level of harmful UV radiation. Years with strong ozone depletion can give rise to an increase in UV radiation by more than 70% on certain days. After a spring season with ozone depletion, the effect of the thinner ozone layer is seen as increased UV radiation in the following months. From April to September the mean UV index for Greenland will be about 10% higher in years with strong ozone depletion (in excess of 100 DU), compared to years without ozone depletion.

This work was supported by the Danish Environmental Protection Agency and has resulted in a service level agreement between DMI and the Greenland Home Rule regarding a UV service for Greenland financed by ESA's GMES PROMOTE project in 2008 and 2009.

Resumé

På trods af det forventede fremtidige fald i mængden af ozonnedbrydende stoffer i stratosfæren kan forøget arktisk ozonnedbrydning forventes i de kommende ca. 20 år, pga. klimaforandringer. De år hvor den arktiske ozonnedbrydning er særlig kraftig og fortsætter ind i april eller endda maj måned, vil den grønlandske befolkning og natur kunne udsættes for forøget, skadelig UV-stråling. I år med kraftig ozonnedbrydning kan UV-strålingen på enkelte dage være forøget med mere end 70% i forhold til år med ringe ozonnedbrydning. Efter en forårssæson med ozonnedbrydning vil udtyndingen af ozonlaget være mærkbar i de efterfølgende måneder med forøget UV-stråling til følge. Fra april til september vil middel-UV-indexet for Grønland være omtrent 10% højere i år med meget kraftig ozonnedbrydning (over 100 DU) end i år hvor ozonnedbrydningen er tæt på nul.

Dette arbejde er finansieret af Miljøstyrelsen og har udmundet i en aftale mellem DMI og det grønlandske hjemmestyre om UV-varsling for Grønland finansieret af ESA's GMES PROMOTE-projekt i 2008 og 2009.

UV-stråling over Grønland

Arktis er særlig hårdt ramt af ozonlagets nedbrydning, fordi temperaturerne i ozonlaget her bliver så lave, at der kan dannes polar-stratosfæriske skyer. På overfladen af skyepartiklerne i disse skyer accelereres ozonnedbrydningen. Selv om solen står relativt lavt på himlen om foråret, når ozonnedbrydningen er værst, vil ozonnedbrydningen, sammen med refleksioner fra sne- og isdækkede landskaber forøge UV-strålingen så meget, at den kan være skadelig for mennesker, dyr og planter.

I vintre, hvor temperaturerne i ozonlaget er lave, er den arktiske ozonnedbrydning meget kraftig, mens den er ubetydelig i vintre, hvor temperaturerne i ozonlaget er relativt høje. Ozonnedbrydningen foregår især inden for den arktiske hvirvel (eng: polar vortex): en forholdsvis isoleret luftmasse i stratosfæren, hvor der kan blive tilstrækkelig koldt (under $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$) til, at der kan dannes polar-stratosfæriske skyer. Den arktiske hvirvel dannes i slutningen af efteråret og forsvinder igen hen på foråret, typisk i april, men nogle år dog først i maj. Hvirvlen, der har en stor geografiske udstrækning – arealmæssigt er den oftest større end Grønlands areal – er ikke stationær, men bevæger sig rundt over det arktiske område, og den kan komme så langt mod syd, at den dækker hele Skandinavien. Det skete f.eks. i 1996.

På grund af ozonnedbrydningen inden for den arktiske hvirvel og forårets tiltagende solhøjde, og dermed tiltagende UV-stråling, kan den skadelige UV-stråling ved jordoverfladen forøges ganske mærkbart i forårssæsoner med kraftig ozonnedbrydning. Det var f.eks. tilfældet i foråret 1996 og foråret 1997 (Knudsen et al., 2005). Endnu kraftigere ozonnedbrydning målte man i 2005, men her brød den arktiske hvirvel op allerede i midten af marts – endnu inden UV-strålingen ved jordoverfladen nåede kritiske niveauer.

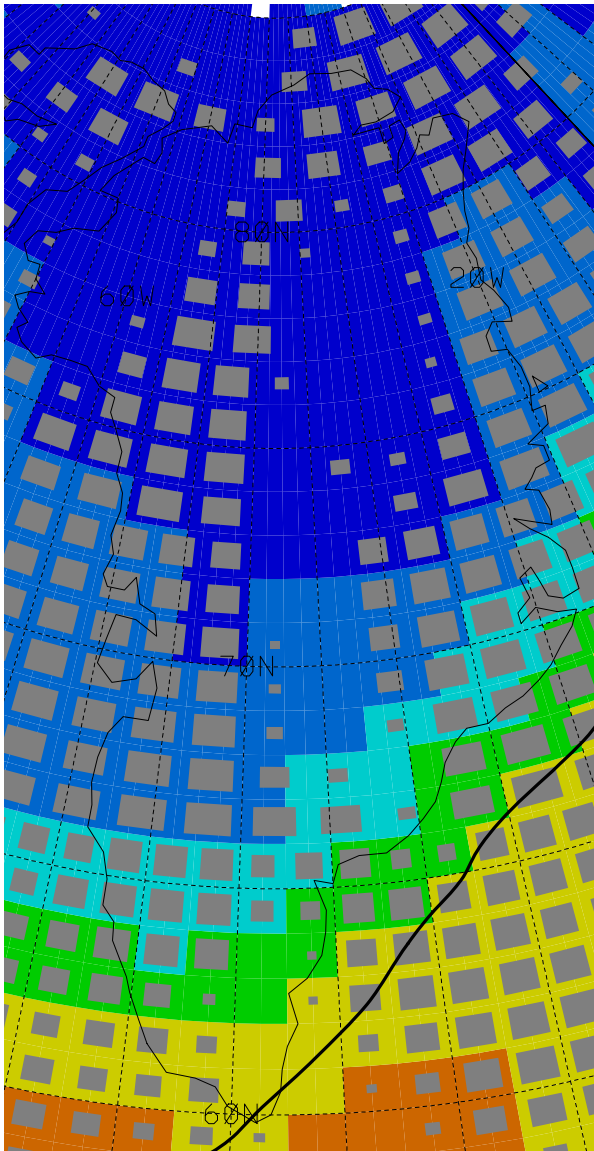
UV-strålingen ved jordens overflade afhænger både af solhøjde, skydække og ozonlagets tykkelse. Alle disse parametre skal tages i betragtning, når det skal vurderes, i hvilket omfang ozonnedbrydningen reelt påvirker UV-strålingen ved jordens overflade. Alt andet lige vil et tyndere ozonlag betyde en øget UV-stråling. Men en øget UV-stråling, der skyldes et tyndere ozonlag, kan f.eks. opvejes af et forøget skydække, fordi skyer svækker UV-strålingen.

Den (hud-) skadelige UV-stråling ved jordoverfladen er i det følgende udtrykt ved det såkaldte UV-indeks. Det anvendes internationalt og er reelt defineret som størrelsen af den skadelige UV-strålings momentane intensitet (irradians) i W/m^2 multipliceret med 40. UV-indeks er altså et mål for den skadelige UV-stråling. Denne måde at udtrykke UV-strålingens intensitet på betyder i praksis, at UV-indeks ved jordoverfladen – og midt på dagen når solen står højest på himlen – højst kan blive ca. 15 ved Ækvator ved havoverfladen, men op til ca. 20 i højtliggende bjergområder som f.eks. Himalaya. I Danmark kan UV-indeks højst blive 7 midt på sommeren. Med mindre andet er angivet, henviser et UV-indeks på en given lokalitet altid til lokal middag, altså når solen står højest på himlen, og UV-strålingens intensitet er maksimal. UV-indeks refererer til strålingens intensitet på en vandret flade, hvilket skyldes, at UV-stråling normalt måles som intensitet på en vandret flade. Dermed er det velegnet til vurdering af UV-bestråling af liggende personer, der solbader. Det er mindre velegnet til vurdering af UV-bestråling af opretstående personer, eller når solen står lavt på himlen. Der er imidlertid intet til hinder for, at UV-indeks kan refereres til f.eks. en lodret flade, hvilket er mere relevant for Grønlandske forhold: solen står lavt på himlen og sne- og isbelagte landskaber spiller en stor rolle med refleksion af UV-strålingen.

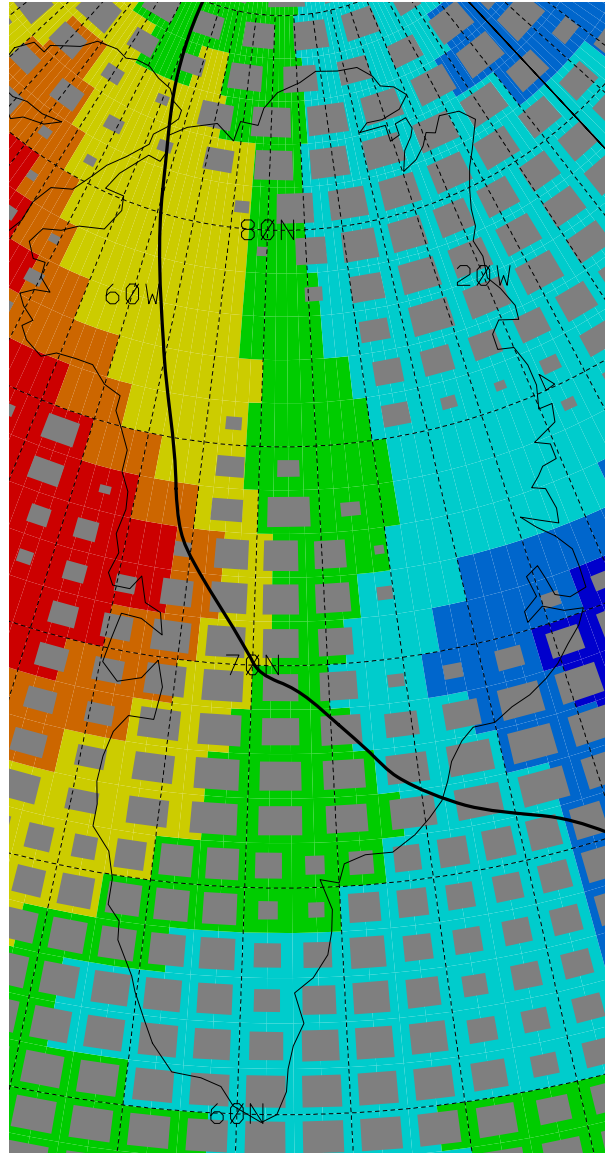
Total ozon (DU)

■ -280 ■ -310 ■ -340 ■ -370 ■ -400 ■ -430 ■ -460 ■ 460-

a) 26. marts 1997



b) 1. april 1996



Figur 1. Ozonlagets tykkelse den 26. marts 1997 (a) og den 1. april 1996 (b) vist ved en farveskala. De grå firkanter markerer skydækkets størrelse (se tekst). Den tykke sorte linie markerer kanten af den arktiske hvirvel: i panel (a) er næsten hele Grønland inde i hvirvlen, og hvirvlen er til venstre for den tykke sorte linie, mens det i panel (b) kun er den nordøstlige del af Grønland, der er inde i hvirvlen, hvirvlen er mod nordøst.

Vi har undersøgt hvorledes ozonnedbrydningen i den arktiske hvirvel har påvirket UV-strålingen ved jordoverfladen i to forår, hvor der var stor ozonnedbrydning, nemlig foråret 1996 og foråret 1997.

Figur 1 viser ozonlagets tykkelse på 2 dage, hhv. den 26. marts 1997 og den 1. april 1996. Ozonlagets tykkelse er angivet med en farveskala, der fra blå til rødt indikerer et tyndt til tykt ozonlag.

Farveskalaens gradueringer i Dobson enheder (DU) er vist separat. Samtidig viser figuren også skydækket med grå firkanter. For ikke at dække farven, der viser ozonlagets tykkelse for et givet område, når dette område er totalt overskyet, er (totalt) overskyet angivet med grå firkant, hvis areal kun er det halve af det farvede areal der angiver ozonlagets tykkelse. Herved kan man på figuren både aflæse ozonlagets tykkelse og skydækket. Et eksempel på et skydække på 100 % kan ses i figur 1 a) omkring 63 grader nordlig bredde ved overgangen mellem ozonlagstykkelserne angivet med grøn og lys blå. Et delvist overskyet område markeres med grå firkanter, der har proportionalt reducerede arealer. Hvis skydækket er mindre end 2/8 (25 %), er det ikke markeret med en grå firkant, fordi UV-strålingen ved jordens overflade næsten ikke reduceres af et tyndt skylag.

Skydækket vist i figur 1 er fra en vejrprognosemodel og repræsenterer naturligvis ikke virkeligheden perfekt (Knudsen et al., 2005). Det skyldes bl.a., at der kun er skydata for hver 6. time, hhv. kl. 00, 06, 12, og 18 GMT, og alle vore beregninger af UV-indeks gælder for kl. 12 lokal tid.

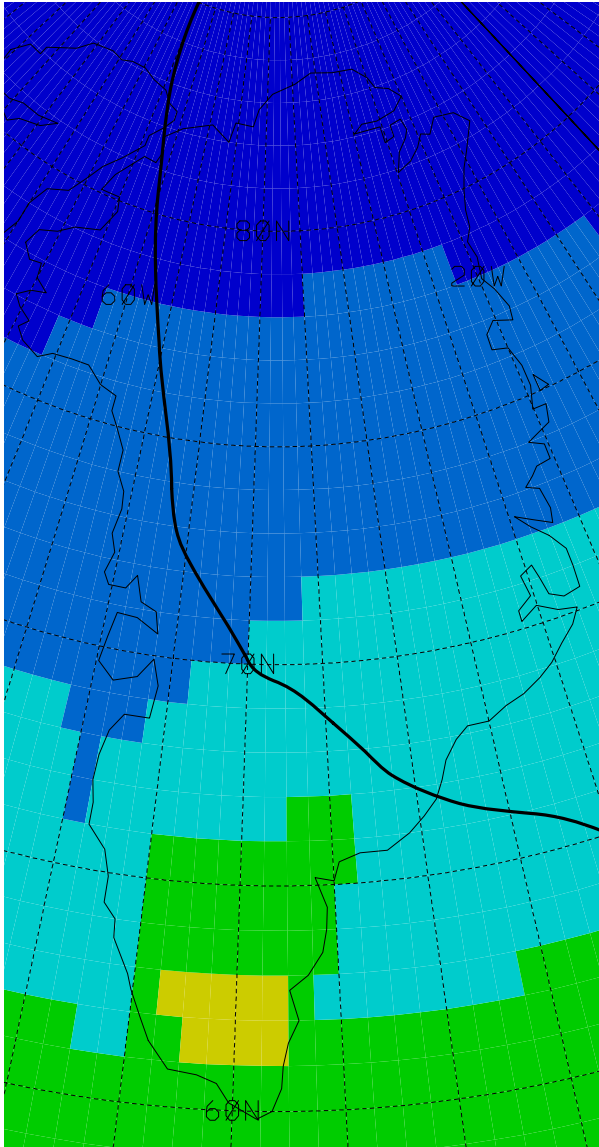
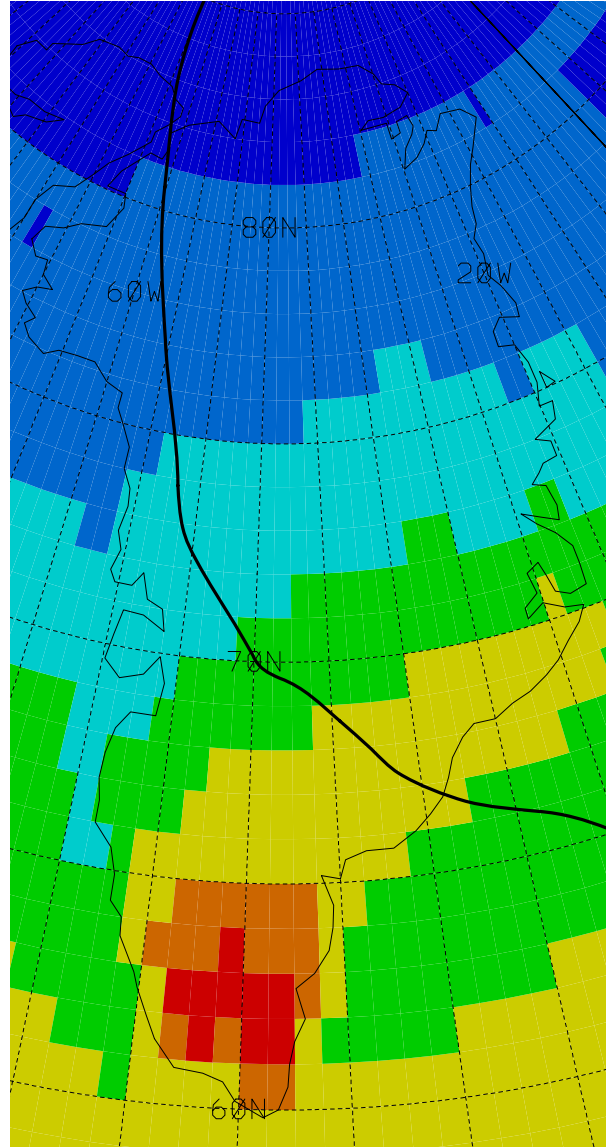
Endvidere er der i figur 1 – med fed sort kurve – vist ”kanten” af den arktiske hvirvel. Den 26. marts 1997 er arealet af hvirvlen meget stor. Den er (på større skala) aflang, dækker hele Grønland og strækker sig op over Nordpolen og ind over Canada med dens centrale område omkring Nordvestgrønland. Dens sydøstlige kant ligger langs den Østgrønlandske østkyst. Vi ser, at ozonlagets tykkelse er meget tyndt dybt inde i hvirvlen, med værdier på under 280 DU, eller knapt halvdelen af hvad der er normalt for årstiden. Det skyldes ozonnedbrydning i de centrale dele af hvirvlen, hvor temperaturerne i ozonlaget er lavest. Uden for hvirvlen, og langs kanten (i figurens nederste højre hjørne), er ozonlaget meget tykkere. Den 1. april 1996 ligger den arktiske hvirvel hen over Nordøstgrønland og strækker sig østover og dækker bl.a. Svalbard, Island og det nordlige Skandinavien. Vi ser et område med meget tyndt ozonlag omkring Scoresbysund.

Data, der er præsenteret i figur 1, danner baggrund for beregninger af UV-index, der er gennemført som beskrevet i Knudsen et al. (2005). I korte træk er beregningerne udført med en velgennemprøvet strålingstransportmodel (UVSPEC). Denne model kræver input i form af solhøjde, ozonlagets tykkelse samt aerosolkarakteristik, albedo og atmosfæreprofiler. Kun solhøjde og ozonlagstykkelse er taget direkte fra data i figur 1, mens der for andre input-data er anvendt klimatologiske værdier. Og skydækket er i første fase udeladt, dvs., at beregningerne i første fase er foretaget for skyfri himmel. Modellen beregner UV-indeks på en vandret flade. For bedre at vurdere forholdene for Grønland, hvor solen står lavt på himlen i foråret, og hvor jordoverfladen oftest er sne- og isdækket, er UV-indeks på en flade vinkelret på retningen til solen beregnet efter en empirisk model beskrevet af Philipona et al. (2001). Resultaterne af disse beregninger er vist i figur 2.

Verdenssundhedsorganisationen WHO anbefaler, at man beskytter sig mod skadelig UV-stråling når UV-indeks er større end 3. Som det fremgår af figur 2 a), hvor UV-indeks refererer til en vandret flade, er det således i den sydligste del af Grønland hvor dette er relevant. Hvis UV-indeks derimod refererer til en flade vinkelret på retningen til solen, som i figur 2 b), er beskyttelse mod den skadelige UV-stråling imidlertid relevant til nord for 70 grader nordlig bredde.

UV-indeks

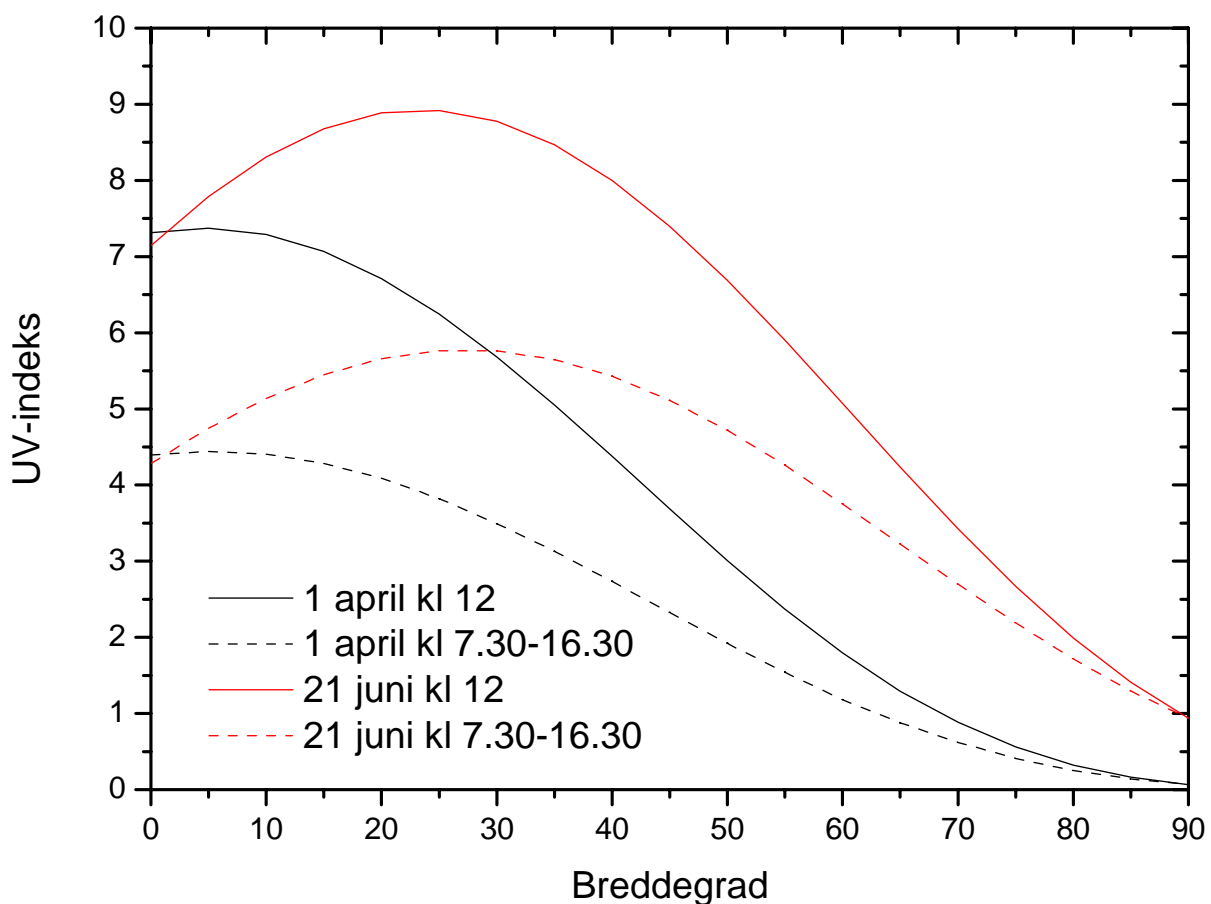
■ 0–0.8 ■ –1.6 ■ –2.4 ■ –3.2 ■ –4.0 ■ –4.8 ■ –5.6 ■ 5.6–

a) på en horisontal flade**b) på en flade vinkelret på solen**

Figur 2. UV-indeks beregnet på en horisontal flade (a) for den 1. april 1996 kl. 12 lokal tid, og på en flade vinkelret på retningen til solen samme dag og tidspunkt (b).

På breddegrader sydligere end 60 grader nordlig bredde (og tilsvarende på den sydlige halvkugle) er den dosis skadelig UV-stråling, man kan modtage dagen igennem, bestemt af solens bane på himlen (udover, naturligvis, ozonlagets tykkelse). Som tommelfingerregel gælder, at man modtager ca. det halve af den daglige (mulige) dosis i løbet af 3-4 timer omkring lokal middag. Længere mod nord (hhv. syd på den sydlige halvkugle) er solens bane på himlen imidlertid langt mere ”flad”, og denne tommelfingerregel er ikke længere god: her skal anvendes et større tidsinterval end 3-4 timer for at få en tilnærmet værdi for den halve dagsdosis.

Vi har derfor undersøgt den dosis UV-stråling man modtager i tidsrummet fra kl. 7.30 til kl. 16.30. Denne dosis er relativt større i de arktiske egne end på middelbreddegraderne. Det er vist i figur 3, hvor det horizontale UV-indeks kl. 12 og det gennemsnitlige UV-indeks i tidsrummet mellem kl. 7.30 og kl. 16.30 er vist for hhv. den 1. april og den 21. juni. Der er regnet med en konstant tykkelse af ozonlaget på 400 DU den 1. april og 340 DU den 21. juni, hvilket er repræsentativt for 60°N, mens albedo er sat til 0 (en anden albedo ville ikke ændre konklusionerne). Figuren viser, at det gennemsnitlige UV-indeks i de arktiske egne i tidsrummet 7.30-16.30 aftager relativt mindre med breddegraden end det "normale" UV-indeks. F.eks. gælder for Danmark (55°N) den 21. juni, at middel-UV-indeks fra 7.30-16.30 i gennemsnit er 28 % mindre end det "normale" UV-indeks kl. 12, mens det ved 65°N (Nuuk) og 75°N (lidt syd for f.eks. Thule) kun er henholdsvis 24 og 18 % mindre. Figur 2 giver således et lidt fortegnat billede af hvor meget UV-strålingen aftager mod nord: i praksis aftager det ikke så hurtigt mod nord.



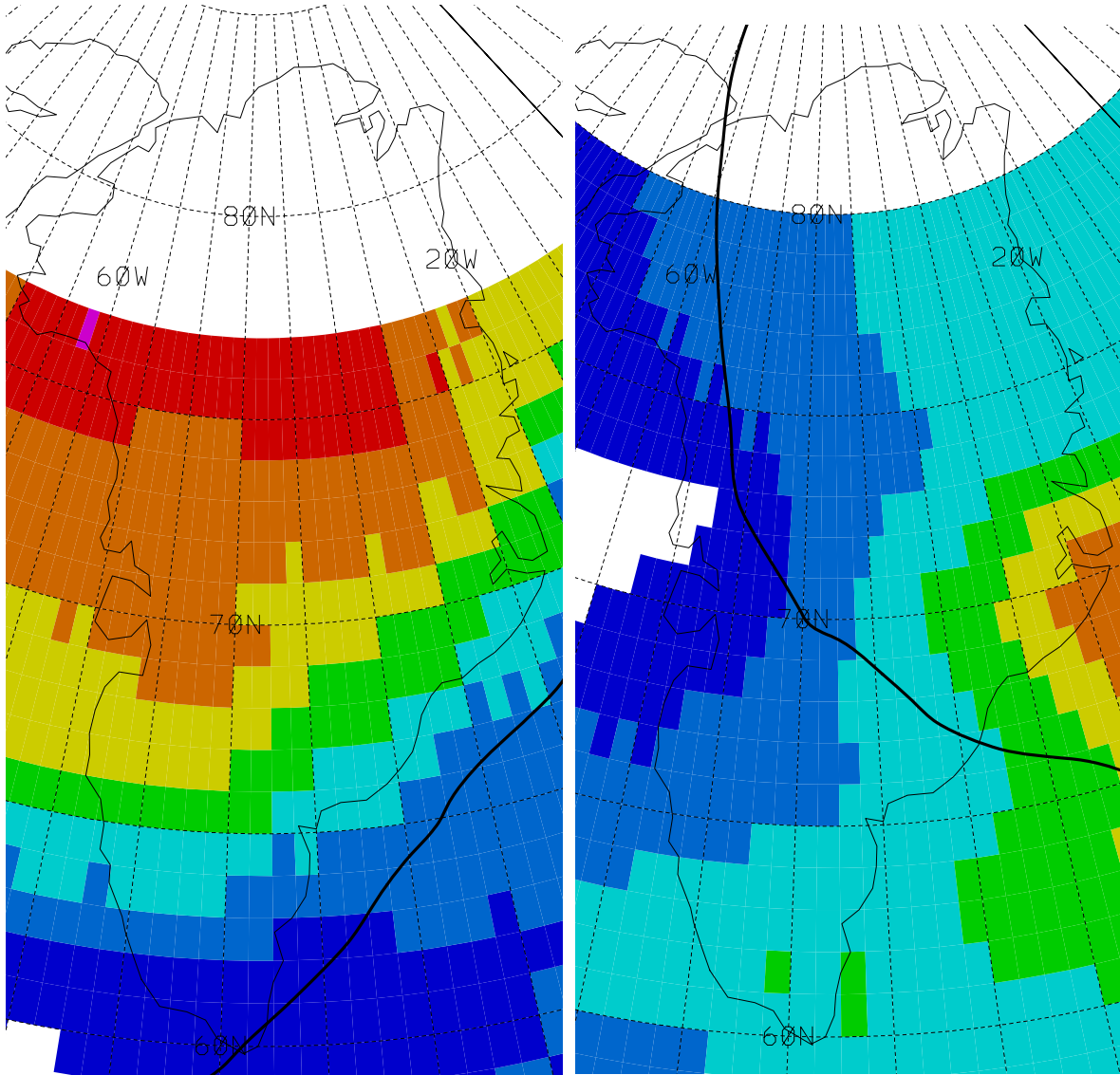
Figur 3. Normalt UV-indeks for kl. 12 lokal tid (fuldt optrukne linier) og middel-UV-indeks for tidsrummet fra kl. 7.30 til kl. 16.30 (stiplede linier) for henholdsvis den 1. april og den 21. juni. Til beregninger er anvendt en tykkelse af ozonlaget der er repræsentativ for 60°N, hhv. 400 DU for 1. april og 340 DU for 21. juni.

UV øgning siden 1979-1981

■ 0- 10 ■ 10- 20 ■ 20- 30 ■ 30- 40 ■ 40- 50 ■ 50- 60 ■ 60- 70 ■ 70-

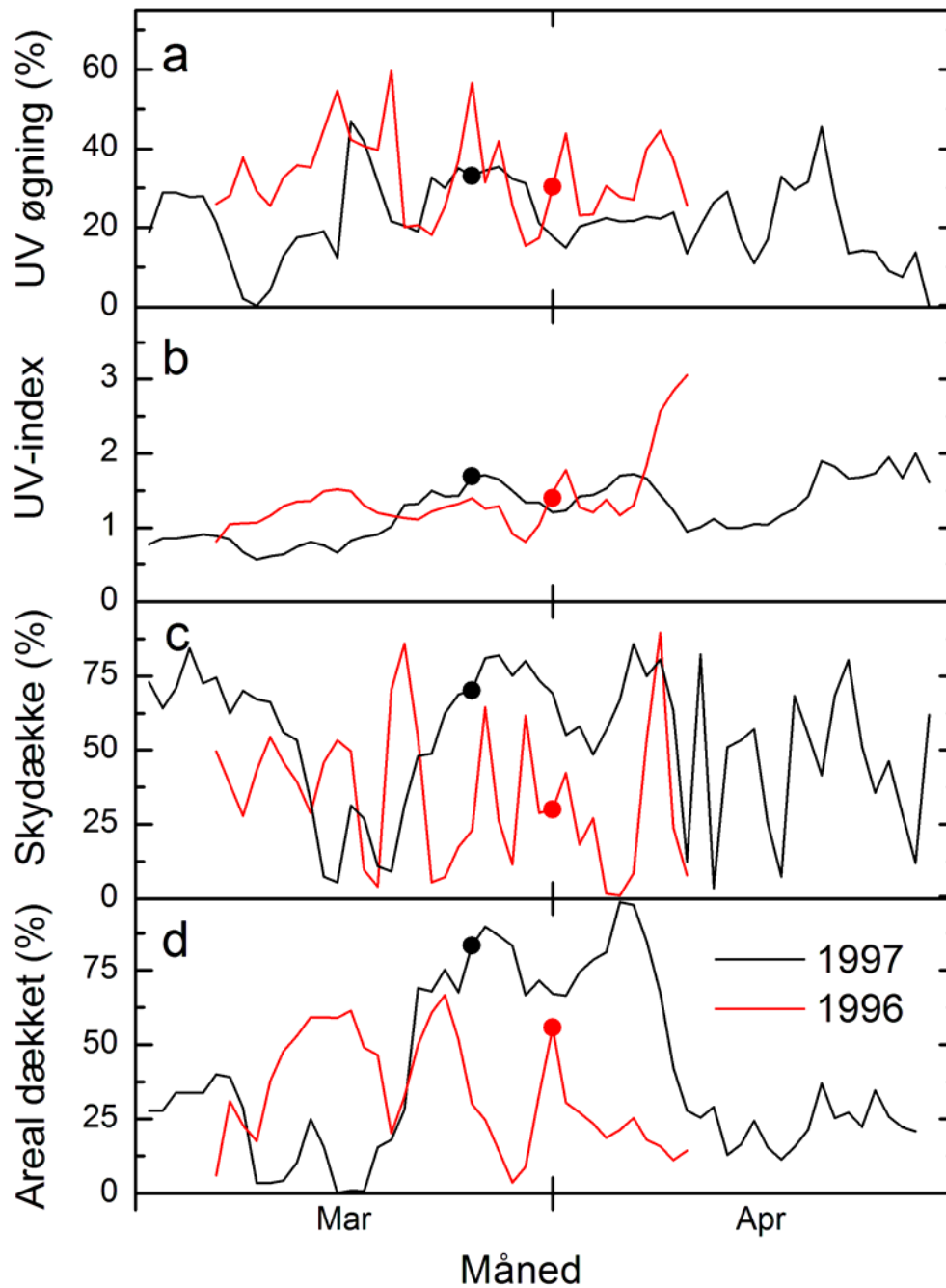
a) 26. marts 1997

b) 1. april 1996



Figur 4. Den procentvise UV øgning for den 26. marts 1997 (a) og den 1. april 1996 (b) i forhold til år med ingen eller ringe ozonnedbrydning (1979-1981).

Vi har dernæst undersøgt hvor meget UV-strålingen forøges i år med kraftig ozonnedbrydning – igen repræsenteret ved den 1. april 1996 og den 26. marts 1997 – i forhold til år med ringe eller ingen ozonnedbrydning – her repræsenteret med et 4-års middel for årene 1979-1981. Vi har kun beregnet UV-strålingen, når solhøjden er større end 15°, fordi UV-strålingen for lavere solhøjder normalt kan betragtes som uskadelig. Figur 4 viser resultaterne af beregningerne – igen for skyfri himmel. Det ses, at Diskobugten og Melvillebugten modtog stærkt forhøjede UV-doser den 26. marts 1997, mens det den 1. april 1996 var området ved Scoresbysund, der var udsat for en kraftigt øget UV-stråling. Man skal dog huske, at der i beregningerne ikke er medtaget skydækkets indflydelse således, at forøgelserne reelt kan have været mindre: værdierne i figur 4 – og i figur 5 – viser således den forøgelse, der potentielt er mulig.



Figur 5. For den del af Grønland, der er inde i den arktiske hvirvel er vist: Den procentvise forøgelse af UV-strålingen, set i forhold til år med ingen eller kun ringe ozonnedbrydning (1979-1981) (panel a), middelværdi af UV-indeks (panel b) middelværdi af skydækket (c), og den procentvise del af Grønland, som befinder sig inde i den arktiske hvirvel. Cirklerne viser de dage, der er omtalt i figur 1, 2 og 3.



For den del af Grønland, der befinder sig inden for den arktiske hvirvel, viser figur 5 sammenfattende den gennemsnitlige forøgelse af UV-strålingen (panel a), det gennemsnitlige (normale) UV-indeks (panel b), det gennemsnitlige skydække (panel c) samt hvor stor en procentdel af Grønland der er dækket af den arktiske hvirvel. Det fremgår af figur 5, at den arktiske hvirvel dækkede en langt større del af Grønland i 1997 end i 1996 (panel d). Til gengæld var skydækket mindre i 1996 end i 1997 (panel c). Når UV-indeks stiger så brat omkring den 9. april 1996 skyldes det, at den arktiske hvirvel bevægede sig mod syd (panel b), hvorved den større solhøjde fik en mærkbar indflydelse. Den gennemsnitlige UV-øgning (panel a) fra 15. marts til tidsserien slutter, er henholdsvis 33 % i 1996 og 26 % i 1997.

Endelig har vi undersøgt, hvor meget UV-strålingen kan være forøget i år med kraftig ozonnedbrydning i forhold til år med ringe ozonnedbrydning. Vi har atter set på foråret 1996 og foråret 1997. I 1996 brød den arktiske hvirvel op omkring 1. maj, mens den i 1997 brød op midt i april. Derfor har vi undersøgt perioden 15. marts til 14. april 1996 og perioden 15. marts til 30. april 1997 og beregnet den største UV-øgning i perioderne. Dels for skyfri eller næsten skyfri himmel (skydække mindre end 25 %) og dels når der helt ses bort fra skydække.

Figur 6 viser – for dage med skydække mindre end 25 % – den største UV øgning inde i den arktiske hvirvel i perioden fra 15. marts og indtil hvirvlen bryder op. Det fremgår af figuren, at der forekommer forøgelser af UV-strålingen på mere end 70 % i forhold til år med ingen eller ringe ozonnedbrydning (1979-1981).

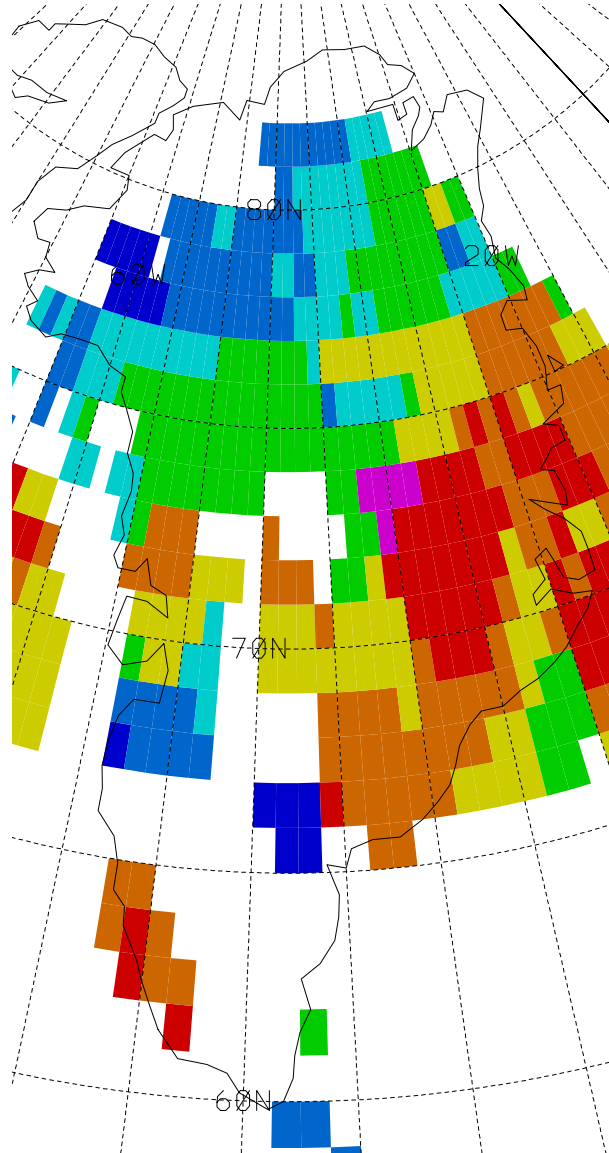
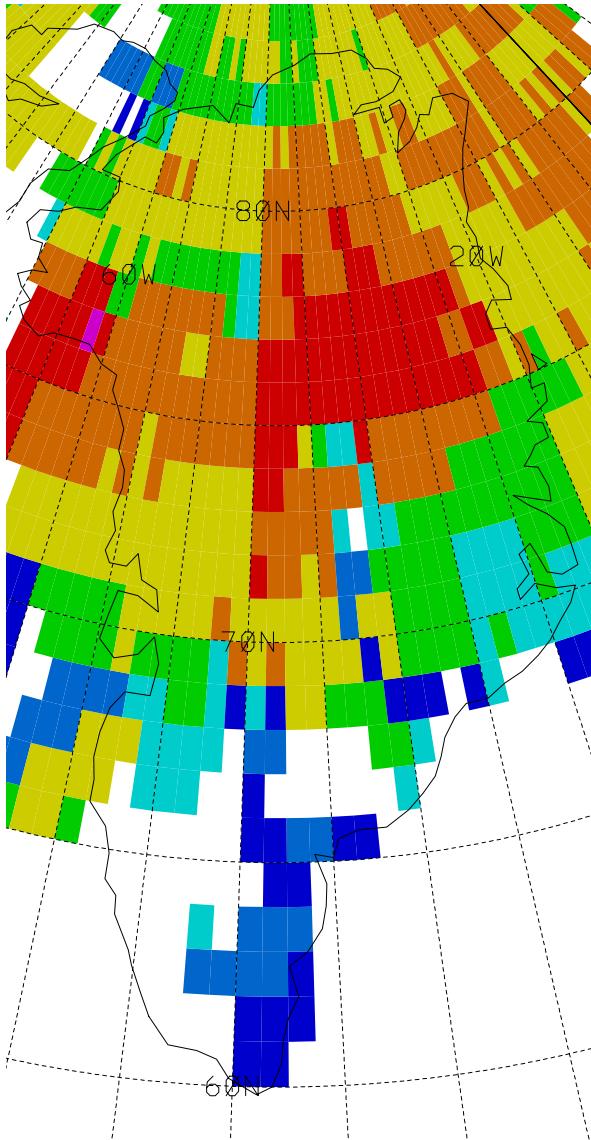
Figur 7 viser det samme som figur 6, blot med antagelsen af, at der er skyfri himmel. Det vil sige, at figuren viser den størst mulige forøgelse af UV-strålingen i de betragtede perioder. Det ses, at der såvel i 1997 som i 1996 var dage, hvor der potentielt var mulighed for en UV-stråling der var forøget med mere end 70 % i forhold til år med ringe ozonnedbrydning (1979-1981).

Maksimal UV øgning siden 1979-1981 (%)

■ 0–10 ■ 10–20 ■ 20–30 ■ 30–40 ■ 40–50 ■ 50–60 ■ 60–70 ■ 70–

a) 15. marts - 30. april 1997

b) 15. marts - 14. april 1996

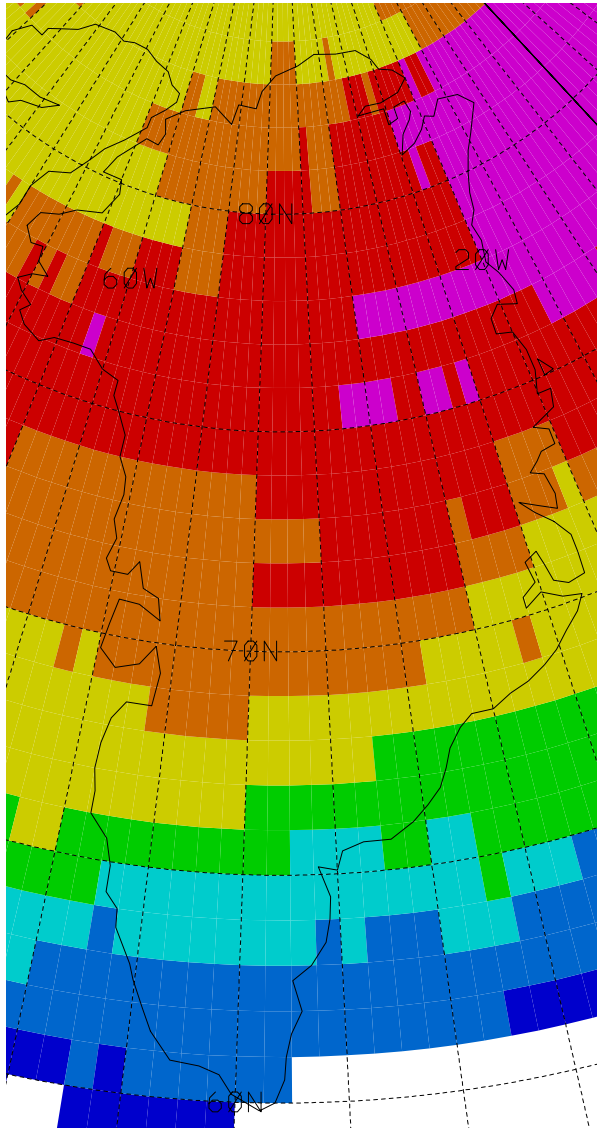


Figur 6. Den maksimale UV øgning i procent (i forhold til 1979-1981) inde i den arktiske hvirvel på skyfri eller næsten skyfri dage (skydække mindre end 25 %) fra 15. marts til hvirvlen bryder op i hhv. 1997 (a) og 1996 (b). Hvide felter indikerer således skydække på mere end 25 %.

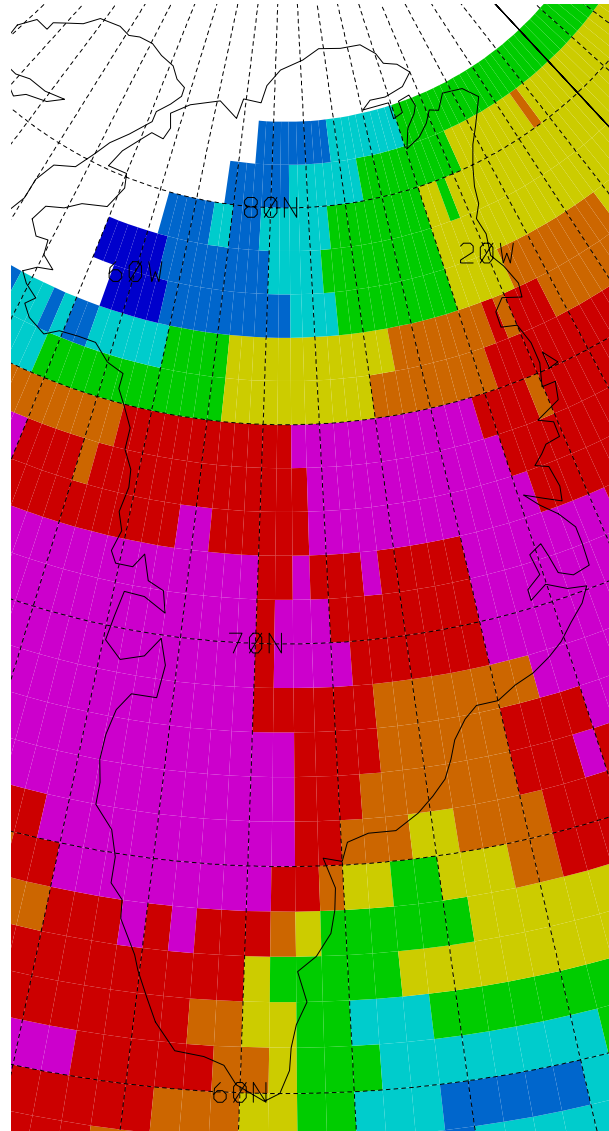
Maksimal UV øgning siden 1979-1981 (%), hvis skydækket negligeres

■ 0– 10 ■ 20– 30 ■ 30– 40 ■ 40– 50 ■ 50– 60 ■ 60– 70 ■ 70–

a) 15. marts - 30. april 1997



b) 15. marts - 14. april 1996



Figur 7. Som figur 6, men med antagelsen om at der er skyfrit overalt. Dermed viser figuren den maksimalt mulige forøgelse af UV-strålingen i de angivne perioder.



Ozonnedbrydning og UV-stråling gennem den efterfølgende sæson

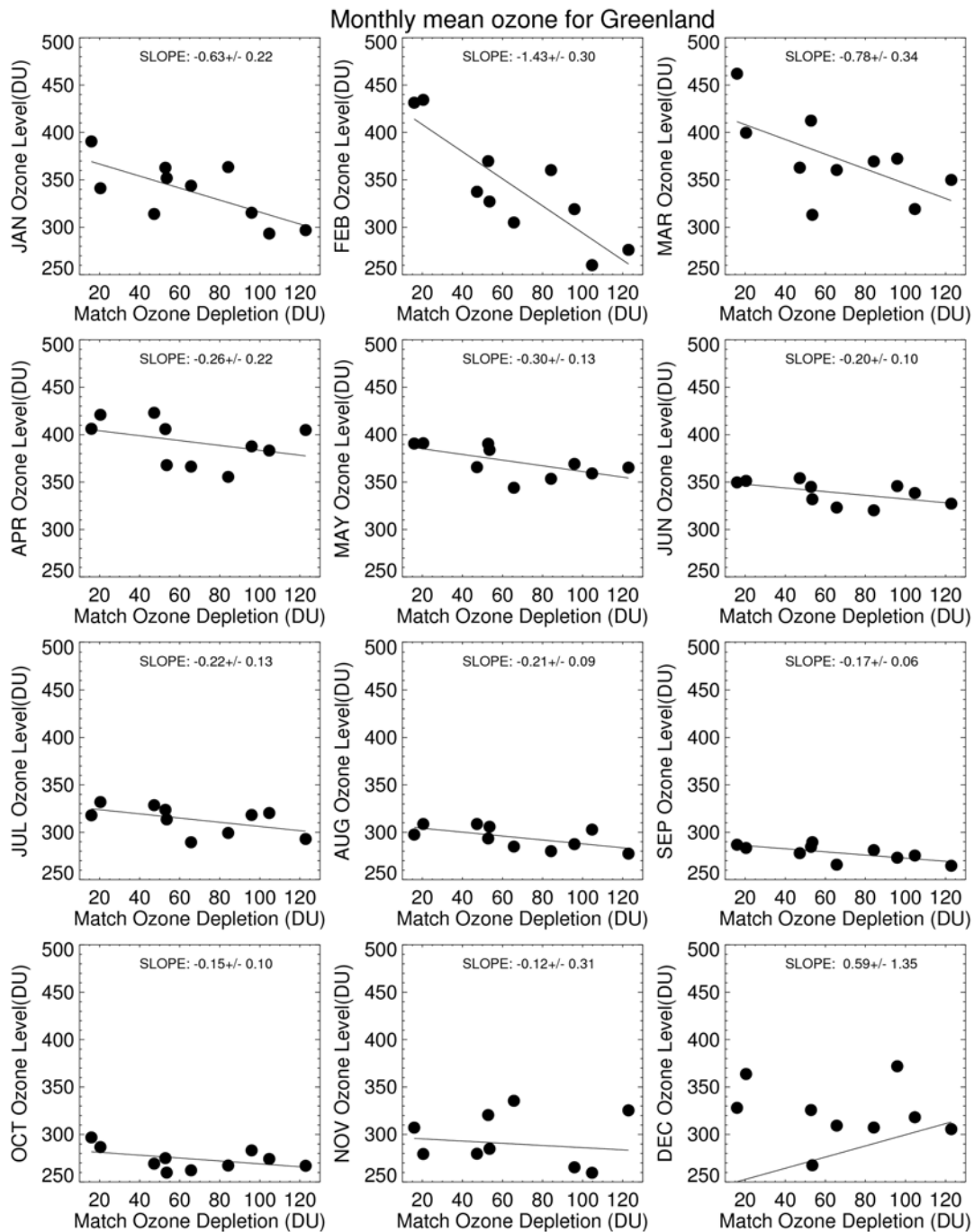
Efter en forårssæson med ozonnedbrydning vil udtyndingen af ozonlaget være mærkbar i de efterfølgende måneder med forøget UV-stråling til følge. Sammenhængen er undersøgt ved at sammenligne forårssæsonens ozonnedbrydning med ozon- og UV-niveauerne gennem hele året, måned for måned.

Ozonnedbrydningen i Arktis for de ti år: 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2003 og 2005 er velbestemt ved hjælp af Match-metoden (Rex et al. 2006), hvor beregninger af luftmassers bevægelser fra en dynamisk atmosfæremodel kombineres med målinger fra ozonsonder. Opsendelsen af ozonsonder koordineres, idet bevægelsen af de luftmasser, der er blevet probet med een ozonsonde, beregnes for at forudsige, hvornår de passerer hen over andre målestationer, hvor nye sonder kan opsendes, så samme luftmasse probes igen. Ved at se på forskellen i ozonkoncentrationer mellem ozonsonderingerne kan ozonnedbrydningen bestemmes. For disse ti år, hvor den arktiske ozonnedbrydning er bestemt ved Match-kampagner, er den største ozonnedbrydning set i 2005 (123 DU, svarende til ca. 33% af ozonkolonnen) og den mindste i 1999 (16 DU). Ozonnedbrydningen foregår i månederne januar til marts/april. Når der her tales om forårssæsonens ozonnedbrydning, menes der hele perioden januar-april. Den lidt misvisende betegnelse skyldes, at langt det meste af ozonnedbrydningen foregår sidst i marts og nogle år fortsætter helt ind i april.

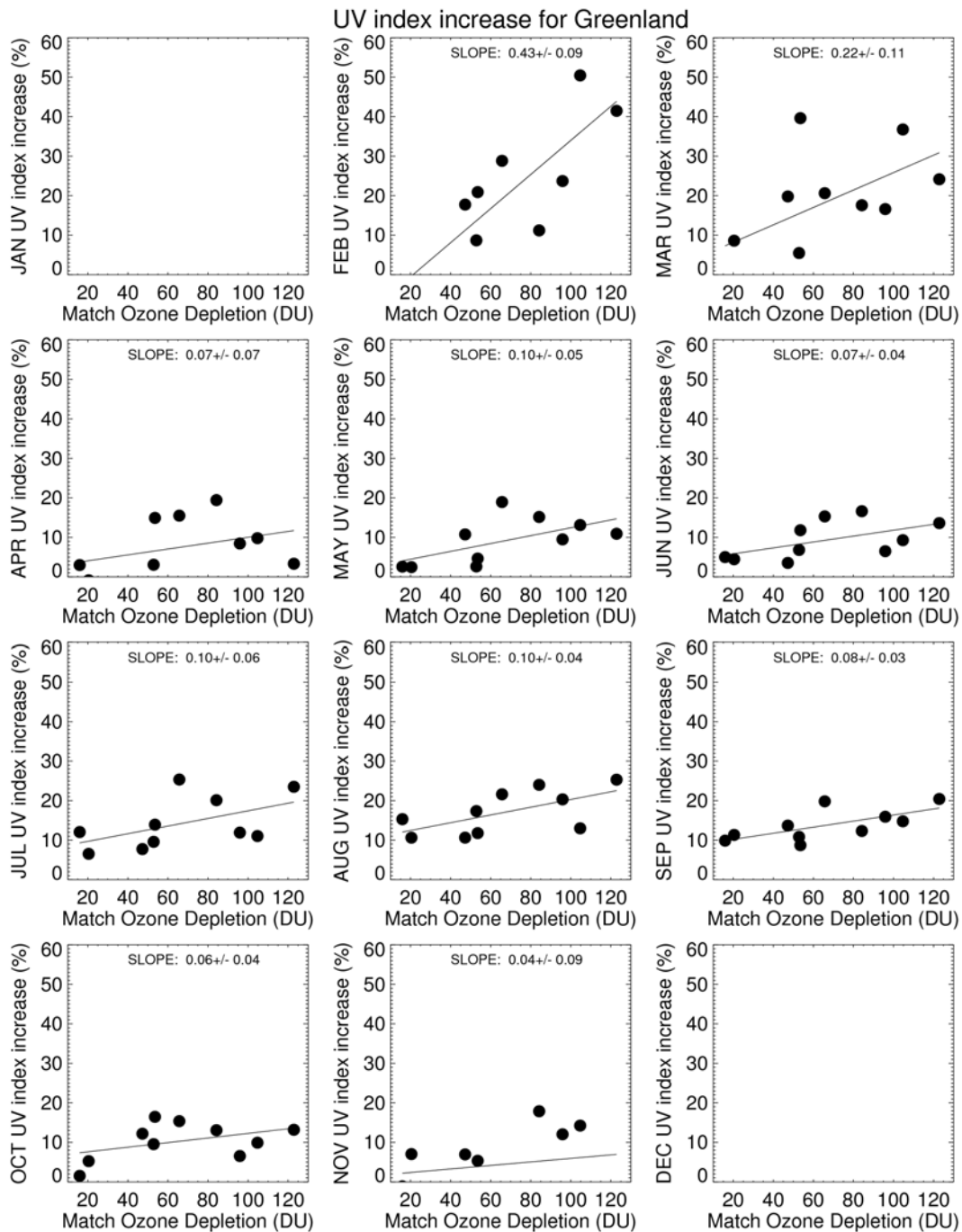
Ozonlagets middeltykkelse over Grønland for hver måned i de 10 ovennævnte år er beregnet ud fra tal fra NIWA-databasen fra National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA) i Lauder, New Zealand. Denne omfattende database kombinerer ozondata fra en række forskellige satellitter (se Bodecker et al., 2005), og giver globale data for 1978-2007 i geografiske udsnit af 1,25 længdegrader og 1,0 breddegrader.

Figur 8 viser månedsmidler af ozonlagets tykkelse over Grønland som funktion af forårssæsonens ozonnedbrydning i Arktis. I oktober, november og december er der ingen signifikant korrelation mellem forårssæsonens arktiske ozonnedbrydning og ozonlagets tykkelse over Grønland. I januar, februar og marts ses en korrelation der skyldes at såvel tilførslen af ozon fra lavere breddegrader som størrelsen af årets ozonnedbrydning er afhængig af styrken af stor-skala-cirkulationen i stratosfæren, Brewer-Dobson-cirkulationen. En kraftig Brewer-Dobson-cirkulation giver en relativt varm polar stratosfære og dermed en relativt lille ozonnedbrydning. Samtidig betyder en kraftig cirkulation at der tilføres relativt meget ozon fra lavere breddegrader. Cirkulationen varierer fra år til år, og i år med svagere cirkulation ses der omvendt en mindre tilførsel af ozon i vintermånederne og en kraftigere ozonnedbrydning i forårssæsonen. Der ses en signifikant korrelation mellem ozonlagets tykkelse og årets arktiske ozonnedbrydning i månederne april til september. Ozonnedbrydningen i foråret er altså mærkbar helt hen i september.

Månedsmidlerne for ozonlagets tykkelse over Grønland kan omregnes til et middel-UV-index, hvor solhøjden for Nuuk benyttes. Dette er en grov forsimpning, men giver stadig mulighed for at betragte det overordnede billede af, hvor langt ind i den efterfølgende sæson, man vil mærke virkningen af årets ozonnedbrydning.



Figur 8. Månedsmidler af ozonlagets tykkelse over Grønland som funktion af forårssæsonens ozonnedbrydning i Arktis. Hvert panel har 10 datapunkter, et for hvert af årene: 1999, 1998, 1994, 2003, 1997, 1993, 1995, 2000, 1996 og 2005. Det første panel viser månedsmidler for januar, det andet for februar osv. I hvert panel vises resultatet af en lineær regression gennem datapunkterne, og hældningen er angivet med en usikkerhed på 1 standardafvigelse.

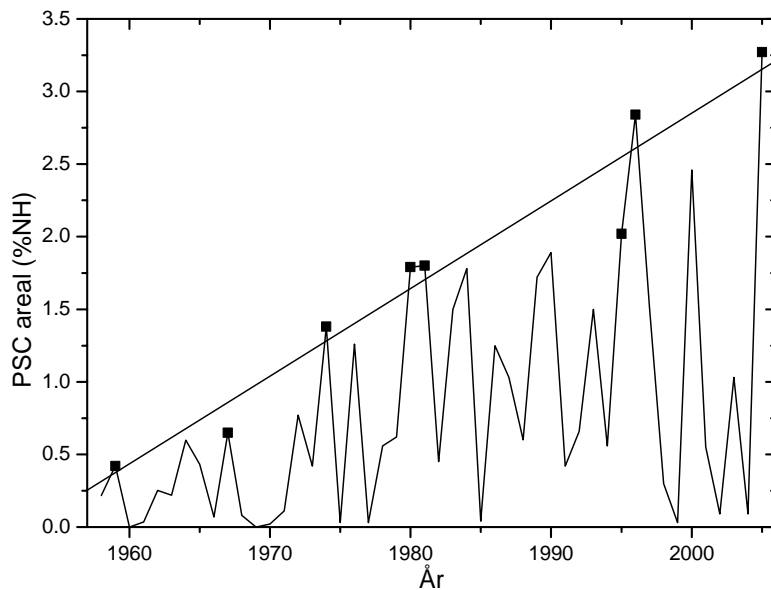


Figur 9. Forøgelsen i UV-indexet over Grønland som funktion af forårssæsonens ozonnedbrydning i Arktis, relativt til middel-UV-indexet for 1983-1999. UV-indexet er beregnet som et middel for Grønland, baseret på solhøjden i Nuuk. Det første panel viser månedsmidler for januar, det andet for februar osv. For januar og december er der intet UV-indeks, da solen står meget lavt eller under horisonten. I hvert panel vises resultatet af en lineær regression gennem datapunkterne, og hældningen er angivet med en usikkerhed på 1 standardafvigelse.

Figur 9 viser forøgelsen i UV-indexet over Grønland som funktion af forårssæsonens ozonnedbrydning i Arktis, relativt til middel-UV-indexet for 1983-1999. UV-indexet er beregnet som et middel for Grønland, baseret på solhøjden i Nuuk. For februar og marts ser forøgelsen drastisk ud, men da solen ikke kommer højt på himlen så tidligt på året, vil månedsmidlet for UV-indexet ikke overstige en værdi på 3, selv når ozonlagets middeltykkelse er helt nede på 250 DU. Fra april til september vil middel-UV-indexet være omtrent 10% højere i år med meget kraftig ozonnedbrydning (over 100 DU) end i år hvor ozonnedbrydningen er tæt på nul. Middelværdierne i Figur 9 giver en ide om den overordnede tendens, men der kan være regionale forskelle, f.eks. hvis den arktiske ozonnedbrydning har haft forskellig styrke over forskellige regioner i Grønland.

Det fremtidige arktiske ozonlag

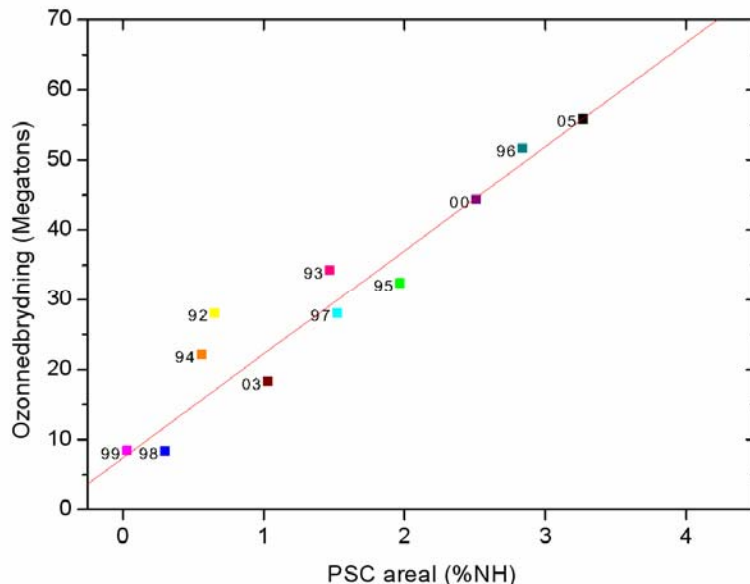
I den arktiske stratosfære sker der af og til en massiv tilførsel af varme fra lavere breddegrader. Det betyder, at der i nogle vintre kun dannes mindre mængder af polar-stratosfæriske skyer (forkortet PSC på engelsk). I figur 10 er vist vinterens gennemsnitlige PSC-areal ved i ca 19 km's højde siden 1958. Figuren viser, hvor stort et geografisk areal, der er dækket af lave temperaturer, hvor PSC's kan forekomme. PSC-arealet ses at variere kraftigt fra år til år og udviser en yderst signifikant stigende tendens. Det er med andre ord blevet koldere i den arktiske stratosfære, og det har – alt andet lige – ført til en forøget ozonnedbrydning. Denne afkøling kan bl.a. skyldes drivhuseffekten, der varmer op ved jordoverfladen, men afkøler ozonlaget. Der er dog ingen fyldestgørende videnskabelige forklaringer på den afkølede tendens.



Figur 10. Det gennemsnitlige areal af polar-stratosfæriske skyer i procent af den nordlige halvkugles areal siden 1958. Vintrene med de største PSC-arealer er markeret med kvadrater og danner grundlaget for regressionslinien.

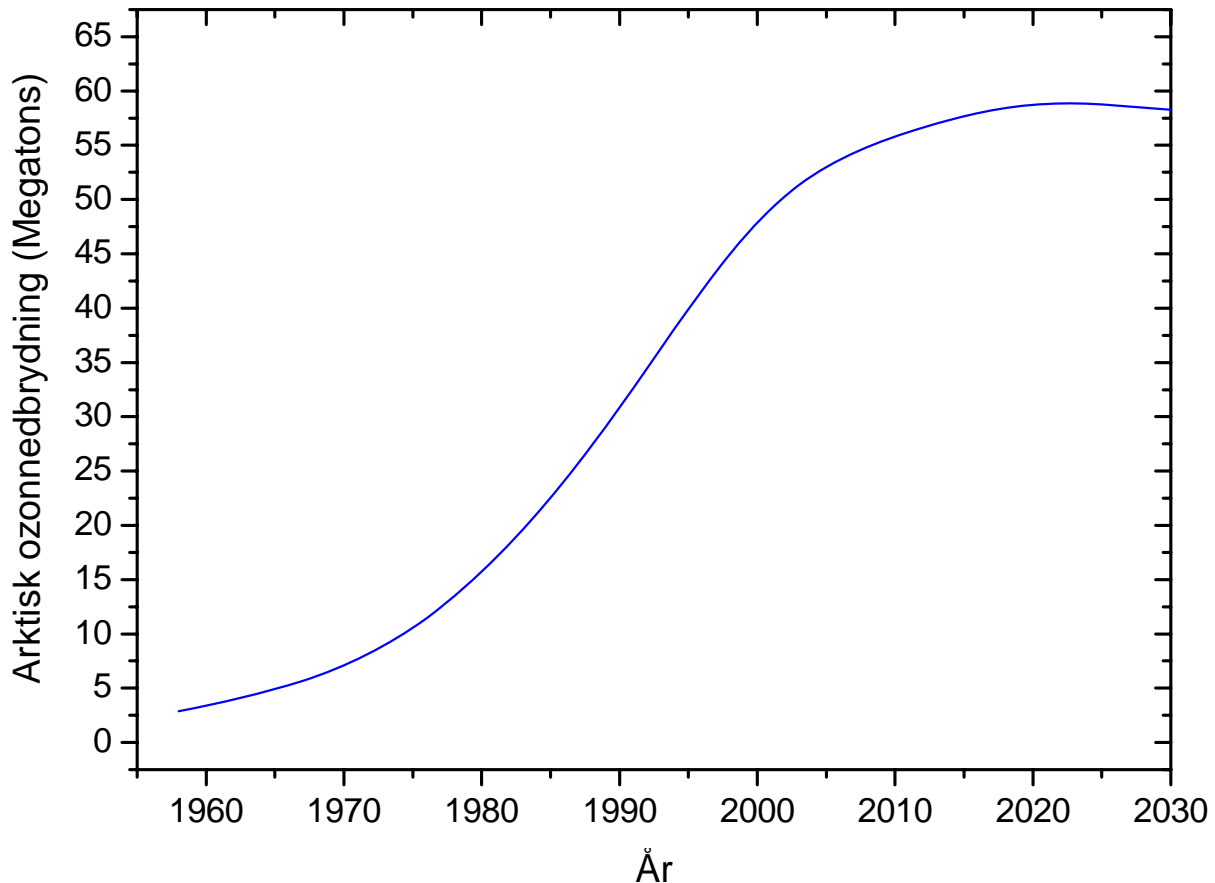
Mest interessante er måske de koldeste vintre, hvor der sker kraftig ozonnedbrydning. I figur 10 er de vintre, der i successive 5-års-intervaller har de største PSC-arealer, fremhævet, og regressionslinien er beregnet ud fra disse punkter.

Inden for den polare hvirvel nedbrydes ozonen kemisk i de tidlige forårs måneder. Når den polare hvirvelvind bryder sammen i slutningen af foråret, standser ozonnedbrydningen og den ozonfattige luft spredes til middelbreddegraderne. Figur 11 viser den omtrentlige maksimale ozonnedbrydning fra januar til marts i den arktiske hvirvel fra 1992-2000 samt 2003 og 2005 som funktion af vinterens gennemsnitlige PSC-areal. 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 pga. forholdsvis høje stratosfæretemperaturer).



Figur 11. Den maksimale ozonnedbrydning fra januar til marts i den arktiske hvirvel fra 1992-2000 samt 2003 og 2005 som funktion af vinterens gennemsnitlige PSC-areal. Punktet for 1992 er influeret af store mængder af aerosoller fra Pinatubo vulkanens udbrud i juni 1991.

Figur 11 viser, at ozonnedbrydningen i meget høj grad er korreleret med PSC-arealet. Da de koldeste vintre er blevet koldere de sidste 49 år (figur 10), kan det antages, at der også vil ske mere 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. Tager man hensyn til det forventede fremtidige fald i mængden af ozonnedbrydende stoffer, vil ozonnedbrydningen i de koldeste vintre øges frem til ca. 2020 for derefter at aftage langsomt som vist i figur 12 (opdatering af Knudsen et al., 2004). Kurven viser, at der i adskillige årtier frem i tiden i stratosfærisk kolde vintre antagelig vil kunne forekomme kraftig ozonnedbrydning af samme størrelsesorden som de kraftigste ozonnedbrydninger set op gennem 1990'erne.



Figur 12: Forudsigtelse af den arktiske ozonnedbrydning i de 20% koldeste vintre.

UV-varsling for Grønland

I juni 2006 blev der afholdt et seminar i Nuuk om UV i Grønland. Seminaret blev arrangeret i fællesskab af ASIAQ og DMI, og havde foruden disse institutioner deltagelse fra embedslægen fra Lægeklinikken i Nuuk, Naturinstituttet og Direktoratet for Sundhed. Der blev bl.a. talt om muligheden for at oprette et UV-varslingsystem for Grønland, hvilket Direktoratet for Sundhed udtrykte interesse for.

DMI gik i samarbejde med ASIAQ videre med ideen som er mundet ud i en succesfuld ansøgning om en serviceudvidelse til ESA's GMES PROMOTE-projekt. En *service level agreement* er underskrevet mellem DMI og det grønlandske hjemmestyres Direktorat for Sundhed.

Aftalen omfatter daglig UV-varsling i perioden marts til oktober i form af UV-index-kort over Grønland samt UV-index for udvalgte lokaliteter, plus en 5-dages UV-udsigt. Formidlingen vil ske via internettet, samt via målrettet sms- og email-service. Aftalen omfatter også data-arkivering. Produkterne baseres på en kombination af satellitdata og jordbaserede data fra Grønland. UV-varslingen for Grønland er via PROMOTE finansieret for 2008 og 2009.



Konklusion

De koldeste vintre i den arktiske stratosfære er over de sidste 40 år blevet signifikant koldere (Rex et. al. 2006), og det er i de kolde vintre at ozonnedbrydningen er størst, da forekomsten af de katalyserende polarstratosfæriske skyer er temperaturafhængig. Selv om den effektive stratosfæriske klorbelastning er aftagende som følge af Montreal-protokollen, kan forøget arktisk ozonnedbrydning forventes i de kommende ca. 20 år, og klimaforandringerne betyder at ozonlagets tykkelse i fremtiden næppe vil stabilisere sig på det niveau der observeredes før 1980 (Weatherhead & Andersen, 2006). Derfor må vi også de næste 10-20 år forvente forårssæsoner med kraftig UV-stråling i Grønland.

De år hvor den arktiske ozonnedbrydning er særlig kraftig og fortsætter ind i april eller endda maj måned, vil den grønlandske befolkning og natur udsættes for kraftigt forøget, skadelig UV-stråling. I år med kraftig ozonnedbrydning kan UV-strålingen være forøget med mere end 70% i forhold til år med ringe ozonnedbrydning.

Forholdene i Grønland gør at det er mere relevant at beregne UV-indeks på en flade vinkelret på solindstrålingen, fremfor den sædvanlige metode hvor en horisontal flade benyttes. Herved ses at beskyttelse mod UV-stråling er relevant på højere breddegrader end forventet fra almindelige UV-indeks-beregninger. I Grønland er solbanen også så anderledes end for lave breddegrader, at det er relevant at betragte hele dagsdosis og ikke blot middagssolens bidrag.

Efter en forårssæson med ozonnedbrydning vil udtyndingen af ozonlaget være mærkbar i de efterfølgende måneder med forøget UV-stråling til følge. Fra april til september vil middel-UV-indexet for Grønland være omtrent 10% højere i år med meget kraftig ozonnedbrydning (over 100 DU) end i år hvor ozonnedbrydningen er tæt på nul.

Dette arbejde er finansieret af Miljøstyrelsen og har udmundet i en aftale mellem DMI og det grønlandske hjemmestyre om UV-varsling for Grønland finansieret af ESA's GMES PROMOTE-projekt i 2008 og 2009.



References

Bodeker, G.E., Shiona, H., and Eskes, H., Indicators of Antarctic ozone depletion, *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 2603-2615, 2005.

Knudsen, B.M., Jønch-Sørensen, H., Eriksen, P., Johnsen, B.J., and Bodeker, G.E.: UV radiation below an Arctic vortex with severe ozone depletion. *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 2981-2987, 2005.

Philipona, R., Schilling, A., and Schmucki, D., Albedo-enhanced maximum UV-irradiance - measured on surfaces oriented normal to the sun, *Photochem. Photobiol.*, 366-269, 2001.

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.

Weatherhead, E.C. and Andersen, S.B., The search for signs of recovery of the ozone layer, *Nature*, **441**, 39-45, 2006

Previous reports

Previous reports from the Danish Meteorological Institute can be found on:

<http://www.dmi.dk/dmi/dmi-publikationer.htm>