

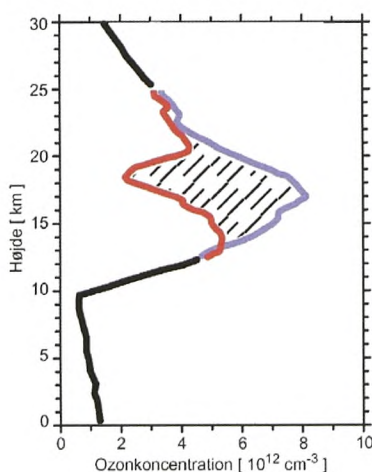
Arktisk ozonnedbrydning

Af Signe Bech Andersen, Synne Høyer Svendsen og Tina Christensen, Danmarks Meteorologiske Institut

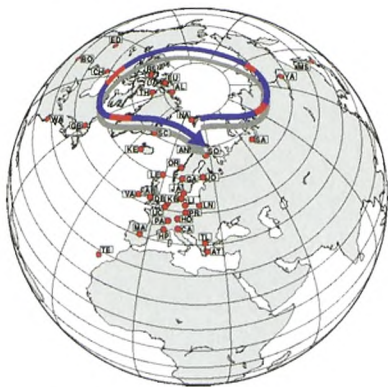
Ozonlaget er særligt udsat for nedbrydning i de arktiske områder på grund af tilstedeværelsen af polarstratosfæriske skyer. Mængden af disse skyer over Arktis er øget de seneste årtier, muligvis som følge af klimaændringer. Dette gør det sværere at forudsige fremtidige niveauer af ozon og UV-stråling.

Indledning

Ozonlaget beskytter det biologiske liv ved jordens overflade mod skadelig ultraviolet stråling fra Solen. Udledninger af CFC-gasser, som nedbryder ozonlaget, er aftaget væsentligt de senere år. Alligevel er det problematisk at forudsige gendannelsen af ozonlaget i de kommende år, ikke mindst på grund af den betydning klimaændringer kan have [1]. Det mest ekstreme eksempel på at ozonlaget nedbrydes, er det antarktiske ozonhul. Men også Arktis bliver hårdt ramt af ozonnedbrydning nogle år. Derfor har den nedre stratosfære, hvor ozonlaget befinder sig, været genstand for mange internationale videnskabelige undersøgelser med det formål at kvantificere ozonnedbrydningen og forstå de processer, der ligger bag.



Figur 1. Typiske ozonprofiler i begyndelsen af vinteren (blå) og slutningen af vinteren (rød) for en vinter med kraftig ozonnedbrydning.



Figur 2. Trajektorie for luftparcel som måles med ozonsonder fra Match-netværket for at bestemme den arktiske ozonnedbrydning.



Figur 3. Polarstratosfæriske skyer observeret over Illoqqortoormiut i December 2002. Foto: Tore Andreassen.



Figur 4. Polarstratosfæriske skyer observeret over Illoqqortoormiut i December 2004. Foto: Erik Pedersen.

Stratosfæren og ozonnedbrydning

I troposfæren, de nederste ca 10 km af atmosfæren, foregår der hele tiden en effektiv opblanding af luftmasserne ved hjælp af konvektion: luftmasser opvarmes ved jordoverfladen og stiger til vejrs. I stratosfæren stiger temperaturen med højden, hvilket sætter en effektiv stopper for en hurtig konvektiv opblanding af luftmasserne. I stratosfæren er typiske transporttidsskalaer uger og måneder, ikke timer og dage som i troposfæren.

Hver polarvinter dannes i stratosfæren over polarområdet en hvirvelstrøm med kraftige vinde, der blæser rundt om polen. Inden for hvirvelstrømmen er luften effektivt set isoleret mod opblanding af ozonrig luft fra lavere breddegrader, og i polarnatten vil der

ske en voldsom afkøling af luften. Når temperaturen kommer under -78°C , dannes der polarstratosfæriske skyer (PSC'er), som muliggør dannelsen af reaktive klor- og bromforbindelser og i løbet af vinteren opbygges et reservoir af reaktive forbindelser indenfor den polare hvirvelstrøm. Når sollyset vender tilbage til polegnene i det tidlige forår er scenen således sat: En isoleret luftmasse fyldt op med reaktive klor- og bromforbindelser der pludselig belyses med sollys giver anledning til en voldsom ozonnedbrydning indenfor den polare hvirvelstrøm.

Når den polare hvirvelstrøm ophører i slutningen af foråret, standser ozonnedbrydningen. Ozonrig luft tilføres fra lavere breddegrader og udfylder ozonhullet, og samtidig bevæger den ozonfattige luft fra Arktis sig mod syd og har en væsentlig indflydelse på ozonlagets tykkelse over mere befolkede egne som vore i løbet af foråret og sommeren [2].

Den arktiske hvirvelstrøm er på grund af især topografiske forhold væsentlig mere ustabil og varmere end hvirvelstrømmen over Antarktis. Derfor er ozonnedbrydningen ikke så kraftig som over Antarktis og varierer meget fra år til år.

Match

Den mest succesrige måde at kvantificere den arktiske ozonnedbrydning på har været Match-teknikken. Match kombinerer beregninger af luftmassers bevægelser fra en dynamisk atmosfæremodel med målinger med ozonsonder.

Ozonsonder er elektrokemiske celler, der hæftes på en ballon sammen med en radiosonde til måling af meteorologiske data. Med disse kan man måle højdeprofilen af ozonindholdet op til cirka 35 kilometers højde (se figur 1). Bevægelsen af de luftmasser, der er blevet probet med én ozonsonde, beregnes for at forudsige, hvornår de passerer over en station, hvor en ny ozonsonde kan opsendes. Ved at se på forskellen i ozonkoncentrationer mellem de to ozonsonderinger kan ozonnedbrydningen bestemmes. Der findes omkring 30 stationer, som opsender ozonsonder på høje nordlige breddegrader, heraf to i Grønland: Pittuffik og Illoqqortoormiut (se figur 2). Ved at koordinere ozonsondeopsendelserne gennem hele vinter- og forårsperioden indtil den polare hvirvelstrøm bryder op, kan den akkumulerede ozonnedbrydning bestemmes.

Med Match-teknikken har man været i stand til at bestemme den arktiske ozonnedbrydning i de fleste år siden starten af 1990'erne. Ozonnedbrydningen varierer fra nogle få procent til over 30 % af den totale ozonkolonne [3,4]. Den hidtil største ozonnedbrydning på cirka 33 % blev observeret i 2005. Den kraftige ozonnedbrydning, der er observeret nogle år, skyldes tilstedeværelsen af PSC'er.

Polarstratosfæriske skyer

Stratosfærens indhold af vanddamp er meget lavt (4-5 ppm), og der kræves ekstremt lave temperaturer førend så små vandmængder kan fortættes til skyer. De

nødvendige temperaturer (under -78°C) er så lave, at de kun nås over de polare egne i vintermånederne. Men bliver temperaturerne lave nok, dannes PSC'er. Der kan dannes forskellige typer PSC partikler i den polare stratosfære: ispartikler, flydende partikler bestående af en blanding af vand, salpetersyre (HNO_3) og svovlsyre (H_2SO_4) samt faste partikler af salpetersyre-trihydrat ($\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). På grund af den store højde, som PSC'erne dannes i, er de belyst af solen relativt længe efter at den er gået ned bag horisonten og PSC'erne kan da observeres som lysende skyer på en ellers mørk himmel, hvilket kan resultere i ganske imponerende scenerier (se figur 3 og figur 4).

Studierne af denne ret eksotiske skytype er motiveret af den store betydning, PSC'er har for nedbrydningen af ozon. Først og fremmest udgør PSC'er den krumtap, som dannelsen af de reaktive klor- og bromforbindelser, der er ansvarlige for ozonnedbrydning, drejer om. Disse klor- og bromforbindelser dannes ud fra CFC-forbindelser, der i mange år blev anvendt i stor stil i industrien. Disse stoffer er under langt de fleste forhold kemisk inaktive og var derfor meget anvendelige i f.eks. kølesystemer og som drivgasser i spraydåser. Men under særlige forhold kan CFC-forbindelser nedbrydes til reaktive komponenter. Dette foregår ved heterogene kemiske processer, altså processer, der kræver tilstedeværelsen af en overflade for at kunne forløbe. PSC'er bidrager netop med de nødvendige overflader til omdannelsen af inaktive CFC-forbindelser til reaktive klor- og bromforbindelser i stratosfæren.

PSC'er er altså direkte ansvarlige for dannelsen af de reaktive forbindelser, der nedbryder ozon. Men PSC'erne har også en indirekte virkning på ozonnedbrydningen, idet dannelsen af PSC'er binder vand og HNO_3 i skypartiklerne og derved fjerner dem fra gasfasen. Bliver PSC-partiklerne tilstrækkeligt store vil de under indvirkning af tyngdekraften sedimentere ud af stratosfæren. Dette vil have en forstærkende effekt på ozonnedbrydningen, idet vand og en række nitratforbindelser kan reagere med de skadelige klor- og bromforbindelser og binde dem i mindre reaktive reservoirformer.

Ønsker man at vurdere ozonnedbrydningen er det altså nødvendigt at have et godt estimat af dannelsen af PSC'er. Dette er imidlertid forbundet med en del udfordringer, idet dannelsesmekanismerne for PSC'er ikke er klarlagt. Dette er et emne, der forskes en del i og eksperimentelt studeres dannelsen af PSC'er både gennem observationer af faktiske PSC'er og gennem forsøg med PSC-dannelse i skykamre. PSC'er observeres dels ved hjælp af satellitter, dels ved hjælp af lidarmålinger, hvor man retter laserlys mod områder med PSC'er og studerer det tilbagespredte lys, der giver informationer om skypartiklernes beskaffenhed. Endelig studeres PSC'er gennem eksperimenter hvor man ved hjælp af udstyr anbragt på balloner eller fly laver direkte målinger af PSC'ernes sammensætning, temperaturer, luftens vanddampindhold etc. Alle disse målinger kan dernæst sammenlignes med fysiske mo-

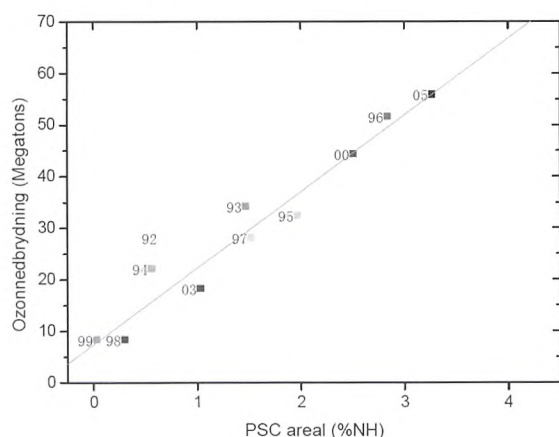
deller for dannelsen af PSC'er og dermed bruges til at be- eller afkræfte teorier om deres dannelse [5].

Sammenhæng mellem ozonnedbrydning og PSC'er

Ved hjælp af resultaterne fra Match og beregninger af hvor store arealer, der er kolde nok til dannelse af PSC'er, har man fundet en lineær sammenhæng mellem en vinters totale ozonnedbrydning og mængden af PSC'er gennem hele vinteren [6] (se figur 6).



Figur 5. Opsendelse af ballon til observationer af polarstratosfæriske skyer i Kiruna. Foto Niels Larsen.

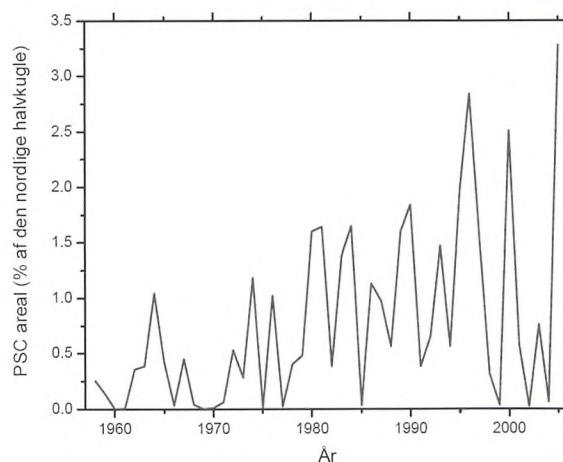


Figur 6. Den totale ozonnedbrydning gennem hver vinter som funktion af arealet af polar stratosfæriske skyer. Årstal for de enkelte punkter er angivet.

Sammenhængen er forbløffende tæt, idet andre faktorer såsom vulkanske aerosoler, denitrifikation og tid og sted for PSC'erne også har indflydelse på ozonnedbrydningen. Men den lille spredning tyder på at disse ting enten korrelerer med PSC-arealet eller ophæver hinanden. Som vi ved, har mængden af CFC'er (som i den studerede periode har været relativt konstant) også indflydelse på den arktiske ozonnedbrydning, men er med de nuværende værdier ikke den begrænsende faktor. Ved meget lavere CFC-mængder vil den lineære relation bryde sammen. Relationen viser dog, at i de kommede par årtier vil mængden af PSC'er være overordentlig vigtig for den arktiske ozonnedbrydning.

Som beskrevet ovenfor er det især stratosfærens temperatur og indhold af vanddamp, der er vigtige for PSC-dannelsen. Mængden af PSC'er er steget siden

1960'erne (se figur 7). Det kan skyldes blandt andet forøget drivhuseffekt. Når der stråles mere varme tilbage til Jorden, bliver stratosfæren koldere, hvilket fremmer dannelsen af polarstratosfæriske skyer. Mens de nederste lag af atmosfæren kan imødesee en øget opvarmning som følge af stigende mængder af drivhusgasser i atmosfæren, forventes stratosfæren at blive koldere, idet en del af den energi, der på nuværende tidspunkt er til rådighed for opvarmning af stratosfæren, fremover vil blive absorberet af drivhusgasser i de nedre lag af atmosfæren og opvarme denne i stedet. Desuden kan et ændret klima have indvirkning på stratosfærens indhold af vanddamp. For øjeblikket ses indikationer på en øget tilførsel af vand til stratosfæren, hvad der må forventes at accelerere PSC-dannelsen yderligere. De mekanismer, der er ansvarlige for tilførslen af vanddamp til stratosfæren, er endnu ikke klarlagt og der forskes i disse år intenst i at forstå disse mekanismer.



Figur 7. Størrelsen af arealet, hvor det er kolde nok til dannelse af polarstratosfæriske skyer som funktion af tiden.



Figur 8. Ballonopsendelser fra Brasilien.

Vanddamp

Transport af vanddamp til stratosfæren foregår i tropenerne hvor luftmasserne løftes fra troposfæren til stratosfæren, hvorefter en langsom cirkulation bringer luftmasserne mod polområderne hvor de atter synker ned. Dehydreringsprocesserne i forbindelse med luftens opstigning gennem det kolde tropiske tropopauselag, og den tilhørende dannelse af tynde cirrusskyer, er

kontrollerende for vanddamptilførslen til stratosfæren. Omfanget af, og detaljerne i, de processer der danner disse cirrusskyer, samt de mikrofysiske processer der foregår inden i skyerne, er nøglespørgsmål i stratosfæreforskningen som søges belyst ved at sammenholde in situ målinger i de højere tropiske luftlag med detaljerede mikrofysiske simuleringer. DMI har deltaget i store EU-koordinerede observationskampagner med ballonopsendelser fra Brasilien i 2004 og Vestafrika i 2006. Undersøgelserne tyder på at kraftige tropiske tordensystemer kan bringe vanddamp højt op i stratosfæren [7], men tilbage står en række ubesvarede spørgsmål om hvordan det foregår i detaljer samt hvor ofte det forekommer, og altså hvor stor en mængde vand det drejer sig om.

Fremtiden

Udledningen af de ozonnedbrydende CFC-forbindelser er i det store og hele stoppet som følge af det internationale samfunds indgreb. Indholdet af de skadelige stoffer i stratosfæren aftager svagt og forventes i løbet af de næste 50-100 år at falde til et før-industrielt niveau. Ikke desto mindre er det ikke uden problemer at forudsige gendannelsen af ozonlaget i de kommende årtier, ikke mindst på grund af den betydning, som PSC'erne har for de ozonnedbrydende processer.

Ozonlaget genoprettes i en atmosfære, som er påvirket af klimaforandringer, og dermed er der ingen sikkerhed for, at ozonlaget helbredes fuldstændigt, eller i givet fald hvornår. I de første par årtier vil konkurrencen mellem aftagende mængder af CFC'er og muligt stigende mængder af PSC'er være dominerende. Dette kan føre til år med stor arktisk ozonnedbrydning, muligvis større end vi hidtil har set. På længere sigt vil andre stoffer som methan, lattergas og vanddamp få større betydning. Endelig er også ændringer i atmosfærens cirkulation væsentlig.

Forståelse af de fysiske og kemiske processer i stratosfæren og deres effekt på ozonlaget og klimaændringer er nødvendige, hvis estimater af fremtidige niveauer af ozon og UV-stråling skal være troværdige. Foreløbig har forskningen ført os fra Arktis til Ækvator.

Litteratur

- [1] E. C. Weatherhead and S. B. Andersen (2006), "The search for signs of Recovery of the Ozone Layer", *Nature*, **441**, 39-45.
- [2] B. M. Knudsen and S. B. Andersen (2001), "Longitudinal variation of springtime ozone trends", *Nature*, **431**, 699-700.
- [3] M. Rex et al. (2006), "Arctic winter 2005: Implications for stratospheric ozone loss and climate change", *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L23808.
- [4] T. Christensen et al. (2005), "Vortex-averaged Ozone losses in the winter 2002/2003", *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 131-138.
- [5] S.H. Svendsen et al. (2005): "Influence of mountain waves and NAT nucleation mechanisms on polar stratospheric cloud formation at local and synoptic scales during the 1999-2000 Arctic winter". *Atmos. Chem. Phys.* vol **5** nr 3, 739-753.
- [6] M. Rex et al. (2004), "Arctic ozone loss and climate change", *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L04116, doi:10.1029/2003GL018844.
- [7] J. K. Nielsen et al. (2006), "Solid particles in the tropical lowest stratosphere", *Atmos. Chem. Phys. Diss.*, **6**, 9003-9032.



Signe Bech Andersen er forsker ved DMI's program for atmosfæreprocesser. Hun arbejder især med målinger af ozonlaget i Grønland samt tendensstudier af stratosfærisk ozon.



Synne Høyer Svendsen er forsker ved Danmarks Klimacenter på DMI. Hun har under sit ph.d. studium ved program for atmosfæreprocesser arbejdet med polarstratosfæriske skyer og deltaget i målekampagner i Kiruna.



Tina Christensen er forsker ved DMI's program for atmosfæreprocesser. Hun arbejder blandt andet med arktisk ozon og vanddamp i tropenerne. Var i sommeren 2006 i Niger i Afrika og måle cirrusskyer.

PFEIFFER VACUUM

NYHED

SENSATION:

**En og samme vacuumpumpe fra
1000 til 10⁻⁵ mbar**

**OnTool™
Booster**

Ring for yderligere information

Tlf. 4352 3800 Fax 4352 3850
efa@pfeiffer-vacuum.dk