

Ozon ved Villum Research Station

De seneste resultater fra forskning i de parametre, der kontrollerer ozonniveauerne i den arktiske troposfære.



Atmosfære-målehuset på Villum Research Station med specielle prøveindløb til aerosol-målinger og til gasser, samt skorstene for at fjerne luften, der suges ind i huset, så vi undgår kontaminering af vores egen prøveluft.

samt import fra stratosfæren. På trods af dens anerkendte vigtighed er forståelsen af den komplekse kemi af ozon stadig ufuldstændig. En hovedårsag til, at ozon i det høje Arktis er særligt svært at simulere ved atmosfærisk kemisk transportmodellering, er forekomsten af Ozon Nedbrydnings Episoder (engelsk; ozone depletion events - ODE'er) i forårsmånederne, hvor ozonkoncentrationerne reduceres drastisk på grund af kemiske reaktioner, der involverer halogener, især brom. Dette fænomen, som endnu ikke er fuldt forstået, er relateret til heterogene reaktioner på sne- og isoverflader samt vindblæst sne og aerosolpartikler. Under ODE'er forøges også aflejringen af kviksølv på grund af dets reaktion med halogenradikaler [1,2].

På Villum Research Station (Villum) blev ozonmålinger påbegyndt i 1996 og fortsætter stadig, med en afbrydelse fra 2002 til 2007. Ozonkoncentrationen bestemmes ud fra dets absorption

Af Jens Hjorth¹, Jakob Boyd Pernov² og Henrik Skov¹

¹ Institut for Miljøvidenskab, iClimate, Arctic Research Center, Aarhus Universitet

² Extreme Environments Research Laboratory, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Schweiz

I denne artikel opsummerer vi seneste resultater vedrørende ozonniveauer i den arktiske troposfære. Observerede tendenser og fænomenet Ozon Nedbrydnings Episoder præsenteres og diskuteres.

Introduktion

Ozon (O_3) i troposfæren er den tredje mest vigtige antropogene drivhusgas efter CO_2 og metan; det er kendt for at skade vegetation og udgøre en risiko for menneskers sundhed i områder med højt forureningsniveau. Det spiller også en vigtig rolle som reaktant i fotolytiske og andre kemiske reaktioner i atmosfæren. Kilderne til troposfærisk ozon er foto-kemiske reaktioner, der involverer både naturlige og antropogene emissioner,



Forskere og logistikere foran Villum Research Stations Forskerhus. Fra venstre: Henrik Skov, Christel Christoffersen, Stephan Ingeman Bernberg, Andreas Massling og Jørgen Skaffe.



Site	Annual trend (%)	P-value	Period
High Arctic:			
Alert	0.29	0.044	1999-2019
	0.24	0.038	1993-2019
Utqiagvik	0.53	0.129	1999-2019
	0.26	0.258	1993-2019
Villum	1.98	0.034	1999-2019
	0.68	0.162	1996-2019
Zeppelin	-0.19	0.497	1999-2019
	0.18	0.089	1993-2019
Summit	-0.28	0.142	2001-2019
European continental Arctic and near-Arctic:			
Esrange	0.08	0.697	1999-2019
	0.00	0.610	1993-2019
Pallas	-0.30	0.327	1998-2019
	-0.40	0.067	1995-2019
Tustervatn	-0.52	0.003	1999-2019
	-0.18	0.103	1994-2019

Figur 1. Venstre: Placering af overflade (fremhævet) og ozonsonde (kursiv) målestationer samt Polarcirklen (66.55°N). Højre: Tendenser i O₃-ændringer ved overfladestationer i ppbv per årti (venstre kolonne) og p-værdier for de årlige tendenser. Statistisk signifikante tendenser (>90% CL, p<=0.1) er fremhævede. Geografiske koordinater for alle steder er angivet i [4]. Figur fra [3].

ved 254 nm, og instrumentets stabilitet sikres ved generering af en intern ozonstandard, som kan spores til en primær standard. Den relativt lange tidsserie af observationer har gjort det muligt at undersøge tendenser samt studere de processer, der fører til de observerede koncentrationer. I 2023 blev analyser af observationerne ved arktiske målestationer, herunder Villum, offentliggjort i to artikler, én om tendenser [3] og en anden om nuværende viden og modelleres evne til at reproducere observerede ozonniveauer [4]. Nogle resultater af disse studier præsenteres i det følgende.

Årlig cyklus, tendenser og modelleres præstationsniveau

Ozon på steder tæt på Polarcirklen har en årlig cyklus med maksimale værdier om foråret, som det også ses i områder fjernt fra forureningskilder ved vores breddegrader. Dette forårsmaksimum skyldes påvirkning fra stratosfærisk indtrængning samt af højere bidrag i denne periode fra ozon dannet i troposfæren. Sammenligning mellem modelresultater (deres medianværdi) og observationer viste, at 12 "state of the art"-modeller kan reproducere dette maksimum. Også de relativt lave ozonkoncentrationer om sommeren, forklaret ved fotokemisk

nedbrydning af ozon, og de højere værdier om vinteren blev reproduceret af multimodelmedianen (MMM).

Imidlertid kunne det forårsminimum, der observeres på arktiske lokaliteter som Villum, forårsaget af ODE'er, ikke beskrives af modellerne, der generelt ikke havde en tilstrækkelig beskrivelse af halogenkemien. Der var stor variabilitet blandt modellerne, både med hensyn til overfladeozon og for ozon i den frie troposfære, som generelt kun blev reproduceret inden for ±50 procent. MMM-værdierne viste den bedste overensstemmelse med målingerne.

Tendensanalyserne (se figur 1), baseret på den ikke-parametriske Mann-Kendallmetode, viste en markant forskel mellem karakteristika for højarktiske stationer og for stationer tæt på Polarcirklen. Over den længste periode (alle år med tilgængelige data mellem 1993 og 2019) havde de højarktiske stationer generelt positive årlige tendenser, mens to ud af de tre skandinaviske og finske stationer havde negative tendenser (Tustervatn og Pallas). En analyse af de månedlige tendenser viste, at stigningerne i ozon på de højarktiske steder primært fandt sted i vintermånederne. Ved at se på en kortere periode (1999-2019) blev de positive tendenser ved Alert, Utqiagvik

og Villum mere markante, især på Villum, mens Zeppelin havde en svagt negativ tendens. Igen viser to ud af de tre stationer tæt på Polarcirklen negative tendenser. Tendenser i fri troposfærisk ozon blev også beregnet, baseret på data fra ozon-sonder fra de steder, der vises i figur 1: Vintertidsstigninger blev fundet på de fleste steder, mens tendenserne om foråret primært var negative; der er imidlertid stor variabilitet mellem stederne.

De stigende vintertidsoverflade- og fri troposfærisk ozonkoncentrationer på højarktiske lokaliteter samt nogle positive tendenser om sommeren blev reproduceret af modellerne, men modellerne har tendens til at overvurdere disse tendenser. Reducerede emissioner af NO_x menes at forårsage disse positive ozontendenser ved vores breddegrader på grund af reduceret titrering af ozon, og dette kan også være forklaringen på de arktiske tendenser. Denne forklaring bliver understøttet af, at kulilte, der udledes sammen med NO_x fra forbrændingskilder, havde stærkt negative vintertendenser ved to af de højarktiske stationer. Reducerede emissioner af de stoffer, der danner ozon ved fotokemiske processer (NO_x, kulilte og flygtige organiske forbindelser), kan også forklare

de negative tendenser observeret ved de nordlige skandinaviske steder om foråret og tidlig sommer; i denne periode er den negative påvirkning fra NO_x-emissioner på ozonkoncentrationen mindre vigtig end påvirkningen fra fotokemisk produktion.

Hvordan vil klimaforandringerne påvirke ODE'erne

Observerede tendenser er ikke fuldt forstået og kræver yderligere undersøgelser. Blandt de mulige forklaringer på de observerede tendenser, udover ændrede emissioner, er ændringer i tørdeposition af ozon eller ændringer i storskala meteorologiske transportmønstre. Hvad angår forårsperioden, har ODE'er en stærk indflydelse på ozonkoncentrationerne i Højarktis, og derfor har en ændring i ODE-hyppighed eller varighed sandsynligvis indvirkning på overflade- og fri troposfæriske ozonkoncentrationer. Derfor er det vigtigt at forstå, hvordan klimaændringer vil påvirke ODE'er i fremtiden.

Arbejdet med ozon på Villum fokuserer i øjeblikket på at undersøge tendenser i de observerede ODE'er og at forstå de processer, der påvirker dem. Forholdet mellem ODE'er og meteorologiske parametre og luftmassens historie undersøges. I retrospektive analyser undersøges forskellige overfladers (land uden sne, hav, havis eller sne på land) betydning for forekomsten af ODE'er.

I tendensanalysen viste ODE-varighed og -hyppighed positive tendenser i henholdsvis april og maj, men tendensen i ODE-hyppigheden er forbundet med stor usikkerhed. Positive tendenser i ODE-hyppigheden på andre arktiske stationer antyder dog, at dette er et panarktisk fænomen. Mulige årsager til stigningen i varighed og hyppigheden af ODE'er omfatter stigende arealer med ny havis, højere BrO-koncentrationer, stigende havsaltkoncentration i sne, ændrede transportmønstre og øget forekomst af genfrysning af våger (som kilde til Br-forbindelser i luften).

For at studere relationen mellem meteorologiske parametre og ODE'er anvendes en "machine learning"-model, som gør det muligt at studere de vigtig-

ste parametre for ODE-forekomst. Det vil forbedre muligheden for at forudsige virkningen af fremtidige klimaændringer på ODE'er.

Taksigelse

Energistyrelsen og Miljøstyrelsen takkes for finansiel støtte igennem årene til AMAP CORE Atmosphere fra midlerne i "Miljøstøtte til Arktis". Villum Fonden takkes for den store bevilling, der har gjort det muligt at bygge Villum Research Station. Artiklen er en lettere modificeret version af et engelsksproget bidrag til Villum-stationens årsrapport.

E-mail:

Henrik Skov: HSK@envs.au.dk

Referencer

1. Skov, H., Brooks, S., Goodsite, M.E., Lindberg, S.E., Meyers, T.P., Landis, M., . . . Christensen, J. (2006). The fluxes of Reactive Gaseous mercury measured with a newly developed method using relaxed eddy accumulation. *Atmospheric Environment*, 40, 5452-5463.
2. Skov, H., Hjorth, J., Nordstrom, C., Jensen, B., Christoffersen, C., Poulsen, M. B., . . . Christensen, J.H. (2020). Variability in gaseous elemental mercury at Villum Research Station, Station Nord, in North Greenland from 1999 to 2017. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(21), 13253-13265. doi:10.5194/acp-20-13253-2020.
3. Law, K.S., Hjorth, J.L., Pernov, J.B., Whaley, C.H., Skov, H., Collaud Coen, M., Langner, J., Arnold, S.R., Tarasick, D., Christensen, J., Deushi, M., Effertz, P., Faluvegi, G., Gauss, M., Im, U., Oshima, N., Petropavlovskikh, I., Plummer, D., Tsigaridis, K., Tsyro, S., Solberg, S., and Turnock, S.: Arctic Tropospheric Ozone Trends, *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL103096, <https://doi.org/10.1029/2023GL103096>, 2023.
4. Whaley, C.H., Law, K.S., Hjorth, J.L., Skov, H., Arnold, S.R., Langner, J., Pernov, J.B., Bergeron, G., Bourgeois, I., Christensen, J.H., Chien, R.-Y., Deushi, M., Dong, X., Effertz, P., Faluvegi, G., Flanner, M., Fu, J.S., Gauss, M., Huey, G., Im, U., Kivi, R., Marelle, L., Onishi, T., Oshima, N., Petropavlovskikh, I., Peischl, J., Plummer, D.A., Pozzoli, L., Raut, J.-C., Ryerson, T., Skeie, R., Solberg, S., Thomas, M.A., Thompson, C., Tsigaridis, K., Tsyro, S., Turnock, S.T., von Salzen, K., and Tarasick, D.W.: Arctic tropospheric ozone: assessment of current knowledge and model performance, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 637-661, <https://doi.org/10.5194/acp-23-637-2023>, 2023.

Eufori i M

Kemisk Forenings Nomenklaturudvalg opsamler systematiske navne for fødevareretilsetningsstoffer (stoffer med E-numre), godkendte aktive lægemiddelstoffer og pesticider samt forbudte euforiserende stoffer og præsenterer systematiske IUPAC-navne for disse forbindelser i databasen på udvalgets hjemmeside *Dansk Kemisk Nomenklatur* [1].

Siden 2010 har udvalget arbejdet med at oprette poster i databasen for de forbudte euforiserende stoffer nævnt i bekendtgørelserne over disse [2]. Der kommer flere til, efterhånden som markedet for ulovlige stoffer udvikler sig, og dette afspejles i nye bekendtgørelser. Der er nu omkring 500 sådanne poster i databasen.

Af de euforiserende stoffer har 177 også fundet anvendelse som lægemidler og er derfor blevet tildelt et INN (*International Nonproprietary Name*), som gives med det formål at standardisere lægemiddelnævngivningen for at minimere fejl ved brugen [3].

Euforiserende stoffer omtales jævnligt i dagspressen, oftest ved brug af "gadenavne" eller akronymer. Det er ikke altid klart, præcis hvilket stof der er tale om. For nylig var der omtale af GHB [4], et akronym, der både bruges om syreformenten 4-hydroxybutansyre og den korresponderende base, 'gamma-hydroxybutyrat' (altså 4-hydroxybutanoat). GHB er en CNS-depressant (gruppe 7 i oversigten nedenfor).

Det internationale arbejde med de illegale euforiserende stoffer koordineres af FN-organet UNODC, United Nations Office on Drugs and Crime. På deres hjemmeside er der en oversigt over de euforiserende materialer eller stoffer under international kontrol, som mest almindeligt fremstilles, forarbejdes og misbruges.

UNODC har valgt at inddele stofferne i otte grupper (se [5] for flere detaljer og forklaringer på betegnelserne):

1. Cannabis eller naturstoffer derfra

For eksempel THC [tetrahydrocannabinol, helsystematisk (6aR,10aR)-6,6,9-trimethyl-3-pentyl-6a,7,8,10a-tetrahydro-6H-dibenzo[b,d]pyran-1-ol].

■ Begrebet antropogen stammer fra sammensætningen af de to græske ord: anthropos, som betyder "menneske", og gen, som betyder "født". Udtrykket betyder derfor "født af mennesker" eller mere direkte: "menneskeskabt".