

NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE
UNIVERSITET

KONSENTRASJONSPÅVIRKENDE
EFFEKTER PÅ HYDROKSYL
UTSTRÅLING

Halvor Borge

21. desember 2017

Takk til

Jeg vil takke professor Patrick J. Espy og Christoph Franzen for all hjelpen og veiledningen de har gitt. Jeg vil også takke British Antarctic Survey og International Service of Geomagnetic Indices for dataene brukt i denne oppgaven.

Sammendrag

I denne oppgaven ble det sett på om elektroner som medfører auroraer kan føre til økt OH produksjon. IR stråling fra OH vil sees som støy for observatoriumer på Jorden som prøver å måle f. eks. stjerner i IR spekteret og som må se igjennom dette laget. Det hadde derfor vært fordelsaktig å vite om perioder med mye nordlys vil bli etterfulgt av perioder med ekstra mye støy.

Det ble brukt data fra observatoriet Rothera fra perioden 2002 til 2009. Her var det OH Meinel bånd (3,1) som ble analysert. Det ble korregert for årlige variasjoner av OH*, men ikke for solsykluser. For å finne relevante dager å studere ble det funnet dager hvor det var sikkert at det hadde forekommet auroraer ved hjelp av Ap indexen og D-dager. Disse dagene måtte også ha perioder med 10 dager før og 20 dager etter uten at en annen D-dag hadde forekommet for å kunne se etter effekter av auroraen uten forstyrrelser.

Etter å ha bearbeidet dataene kunne det ikke påvises noen sammenheng mellom dager med høy Ap og økt OH utstråling i dagene som fulgte.

Innhold

1	Introduksjon	1
1.1	Bruk av astronomiske måling i IR spekteret	1
1.2	Oppgavens oppbygging	2
2	Teori	3
2.1	OH produksjon	3
2.2	Ap indeks	4
3	Analyse og resultater	6
3.1	Data	6
3.2	Periodisitet av data	6
3.3	Bearbeiding av data	9
4	Diskusjon	11
4.1	Geografiske påvirkninger	11
4.2	Katalytisk nedbrytning av O ₃	12
4.3	Videre arbeid	14
5	Konklusjon	16
	Referanseliste	18

Figurer

2.1	Som kan sees i figuren består energitilstanden til atomet av rotasjons-, vibrasjons- og elektronbåndtilstander. Her går energiforskjellen i de forskjellige tilstandene fra rotasjon (minst) til elektronbånd (størst).	4
3.1	Figuren viser rådataene fra 01.01.2002 til og med 31.12.2009 for OH Meinel (3,1). Den røde linjen viser den periodemessige trenden som ble trukket fra rådataene.	8
3.2	Figuren viser de ferdig bearbejdede dataene med tilhørende usikkerhet 1σ . Den røde linjen viser dagen auroraen forekom.	10
4.1	Figuren viser hvordan vinden samler seg på forskjellige steder på den nordlige halvkule. Som man ser er det ikke en gjevn fordeling og tettheten vil variere stort fra et tidspunkt til et annet. Bildet til venstre er fra 8 dager før det til høyre.	12
4.2	Figuren viser hvordan temperaturen målt fra OH varierer med sesongen i hhv Rothera og Trondheim. Som man kan se varierer målingene fra Trondheim mye mer fra år til år enn det målingene fra Rothera gjør.	13
4.3	Figuren viser konsentrasjonen til O_3 , H og NO i forskjellige høyder. Det mørke båndet viser OH regionen.	14
4.4	Figuren viser hvilke høyder elektroner med forskjellig energi forventes å gi fra seg mesteparten av energien sin.	15

Tabeller

3.1	Koeffisientene til modellering av periodisiteten til OH.	7
-----	--	---

1 | Introduksjon

Motivasjonen til denne oppgaven er å undersøke om det finnes en sammenheng mellom geomagnetisk aktivitet og dannelsen av hydroksyl (OH) i det øvre laget i atmosfæren. Med andre ord skal denne oppgaven se om det er en korelasjon mellom solaktiviteten og dannelsen av OH ettersom at solen er den største eksterne påvirkningskilden til geomagnetiske stormer.

OH blir produsert naturlig om natten via reaksjonen:



Her er OH^* en ustabil tilstand av OH. Når OH går fra å være ustabil til stabil vil den sende ut stråling med energi lik energiforskjellen mellom startbåndet og sluttbåndet i samsvar med Planck-Einstein relasjonen [Hemmer 2005]:

$$\Delta E = h\nu \quad (1.2)$$

Det er denne strålingen som er blitt målt og vil bli analysert. Denne energien ligger i det infrarøde spekteret for reaksjonen i (1.1).

Det er gjort flere studier av infrarød stråling fra OH i atmosfæren. En av dem er [Baker og Stair 1988]. De gjorde 55 høydemålinger ved hjelp av 34 rakettopp-skytinger og fant at OH^* i hovedsak befinner seg i et ca 8 km tykt lag i ca 80-90 km høyde. Strålingen fra dette laget kan relativt enkelt bli observert fra bakken og kan forstyrre astronomiske målinger fra bakken som prøver å gjøre målinger i IR spekteret.

Dataene som blir brukt i denne oppgaven er rådataene fra observatoriet i Rothera, Antarktis i perioden 2002 til 2009.

1.1 Bruk av astronomiske måling i IR spekteret

En underliggende motivasjon for denne oppgaven er at analysen til slutt kan være med og løse noen av de problemene som oppstår når man prøver å foreta bakkebaserte astronomiske observasjoner. Hydroksyl utgjør den kraftigste bakgrunnstrålingen for landbaserte observatorier [Maihara et al. 1993]. Dette gjør også ideelt å måle OH ettersom at andre effekter bare kommer til å bidra med ca 5% til den målte intensiteten for disse bølgelengdene [Iwamuro et al. 1994]. Siden det infrarøde spekteret kan brukes til blant annet å se igjennom

interstellar støv og detektere kaldere objekter som f. eks. planeter er dette en gunstig bølgelengde å bruke [Li og Draine 2001]. Ved å se etter sammenhengen mellom geomagnetisk aktivitet og stråling fra OH kan man kunne optimalisere når man foretar målinger for å få best mulig resultat.

1.2 Oppgavens oppbygging

Oppgaven bygges opp på følgende måte. Først fremlegges teori om hvordan hvordan perioder som skulle analyseres ble valgt. Så vil det forklares hva som ble gjort med rådataene og hvorfor det ble gjort på denne måten. Etter det blir dataene analysert og resultater fremlegges før de til slutt diskuteres i diskusjonskapittelet. Til slutt kommer en konklusjon av resultatene.

2 | Teori

2.1 OH produksjon

Som nevnt over vil ustabile OH molekyler sende ut stråling med energi lik energiforskjellen mellom de to tilstanden og disse OH* dannes som et resultat av (1.1). Hydroksylen er ustabil som et resultat av at det finnes andre rotasjons- og vibrasjonstilstander som har lavere potensiell energi som gjør at hydroksylen etterhvert vil gi fra seg denne energien for å komme ned i en stabil tilstand med lavere potensiell energi. Dette er en eksotermisk reaksjon som vil føre til at OH*et vil sende ut stråling som kan registreres som varme. Som man kan se i (1.1) er det konsentrasjonen til H og O₃ som avgjør hvor mye OH* som dannes. Dette er gitt ved

$$P(OH^*) = k_{H+O_3}[H][O_3] \quad (2.1)$$

hvor k_{H+O_3} er likevektskonstanten.

Over 80 km vil konsentrasjonen til H være ganske konstant, mens konsentrasjonen til O₃ vil avhenge av forholdet mellom O og O₂.

Over dette nivået vil økende høyde føre til minkende konsentrasjon av O₂ og svakt økende konsentrasjon av O og man kan finne at rundt 87 km vil være hvor produktet av O og O₂ maksimeres [Baker og Stair 1988]. Dette kan også sees i Figur 4.3. Dette gir et relativt tynt lag på ca 6-8 km hvor ustabilt OH kan forekomme naturlig via (1.1) og man bruke strålingen fra dette laget til å analysere om polarlys kan endre på konsentrasjonen til O₃.

Som postulert i [Verronen og Lehmann 2015, samt tilhørende referanser] vil elektroner fra auroraer føre til en økning av konsentrasjonen til NO som igjen kan føre til en økning av konsentrasjonen $\frac{[O]}{[O_2]}$. Gjennom reaksjonen



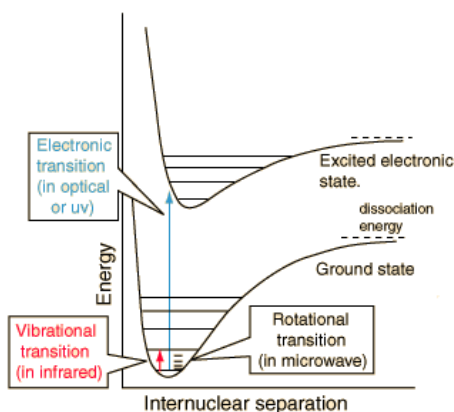
som fører til

$$P(O_3) = \frac{k_{O+O_2+M}[O][O_2][M]}{k_{H+O_3}[H]} \quad (2.3)$$

kan man se at dette vil føre til en økning av O₃. Videre kan man se fra (2.1) at dette vil føre til en økning av OH* som burde kunne måles ved strålingen den sender ut.

2.1.1 OH molekylets spektroskopi

Grunnen til at OH molekylet sender ut IR stråling er på grunn av at det ender opp i en høyere vibrasjonstilstand er som sagt et resultat av at $\text{H} + \text{O}_3$ er en eksoterm reaksjon.



Figur 2.1: Som kan sees i figuren består energitilstanden til atomet av rotasjons-, vibrasjons- og elektronbåndtilstander. Her går energiforskjellen i de forskjellige tilstandene fra rotasjon (minst) til elektronbånd (størst).

Det som bestemmer avstanden mellom energinivåene er rotasjonskonstanten. På grunn av den store masseforskjellen mellom et H- og et O-atom vil OH en høyere rotasjonskonstant enn andre diatomer. For eksempel har OH 10 ganger større rotasjonskonstant enn de andre vanlige atmosfæriske gassene NO og CO [Herman og Horbeck 1953][Rank et al. 1965]. Dette vil føre til 10 ganger så mange energinivåer er fylt opp. Dette medfører at NO og CO har 10 ganger så mange spektrallinjer som OH som igjen gjør at OH er enklere å måle fordi man trenger en lavere oppløsning.

2.2 Ap indeks

Når en studerer solens påvirkning på jordens geomagnetiske forhold er det ønskelig å ha et mål på hvor mye energi som overføres til jordens magnetosfære. Dette kan gjøres på flere forskjellige måter, men den som er relevant for denne oppgaven er Ap indeksen. Ap indeksering er et mål på hvor mye geomagnetisk forstyrrelse det er i jordens atmosfære ved å måle forskjellen i Birkelandstrømmer, som er elektriske strømmer i øvre atmosfære [Birkeland 1908]. Målingene varierer fra 0, ingen aktivitet, til 400, veldig stor aktivitet. Ap blir gitt som snittet til 8 ap verdier som blir målt over 3-timers intervaller og de numeriske ap verdiene kan relateres til hvor sterkt amplitudene til Birkelandstrømmene varierer ved en målestasjon som ligger på breddegrad mellom 30° og 60° [Rostoker

1972]. Hver målestasjon må derfor gjøre sine egne omregninger for å få det til ap standarden.

2.2.1 Q- og D-dager

Q- og D-dager er definisjoner som er lagd for å kunne hente ut hvilke 5 dager hver måned som har størst geomagnetisk forstyrrelse, D-dager, og hvilke 10 dager per måned som har minst geomagnetisk forstyrrelse, Q-dager. I denne oppgaven er det kun D-dager som er av interesse. Det finnes to typer D-dager. For måneder med lite geomagnetisk aktivitet, satt som definisjon ved at dagene målt har $A_p < 20$, vil dagene bli registrert som D*. Hvis de fem dagene med mest geomagnetisk forstyrrelse har $A_p > 20$ vil de bli registrert som D1 til D5 hvor D1 er dagen med mest forstyrrelse [ISGI 1]. For å finne disse dagene brukes snittet til A_p over en hel dag.

3 | Analyse og resultater

Formålet med denne oppgaven er å se om auroraer har en påvirkning på konsentrasjonen til O_3 og derfor en påvirkning på utstrålingen fra OH^* i laget som ligger i ca 87km høyde, som man kan se fra (2.1). I dette kapittelet skal det sees på hva som ble gjort med dataene, hvilke metoder som ble brukt, samt resultatene og analysen som ble gjort av dem.

3.1 Data

Som nevnt over er rådataene i denne oppgaven hentet fra interferometeret i Rothera (68°S, 68°V). Dataene er fra og med 2002 til og med 2009 og er i benevnningen Rayleigh(R). Rayleigh er en enhet som varierer med bølgelengden til det målte fotonet og antall fotener som treffer en enhet av areal. 1R for OH Meinel bånd (3,1), som ble brukt i denne oppgaven, er av størrelsen

$$1R = 1.05 \cdot 10^{-12} [\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}]. \quad (3.1)$$

Hver dag med data er funnet ved å ta snittet av målinger gjennom en hel natt og kommer med tilhørende usikkerhet. Grunnen til at det bare kan måles om natten er at når solen er oppe vil sollys med frekvens lik OH Meinel (3,1) gjøre det umulig å måle strålingen fra OH^* . Dette er også grunnen at det ikke finnes data for perioden Desember til midten av Februar hvert år ettersom dette vil være sommermånedene i Antarktis og solen vil aldri gå ned under horisonten. Det vil også mangle data fra andre dager enn denne perioden blant annet på grunn av overskyet vær eller nedetid på instrumentet.

3.2 Periodisitet av data

3.2.1 Årlig periodisitet

Alle trender i dataene antas å være periodiske og være en kombinasjon av den faktiske verdien og statistisk tilfeldig støy.

Som i oppgaven [Lund 2010] ble det estimert at periodisiteten kunne modelleres som en sum av cosinus funksjoner, et ledd som kun var avhengig av tid og et konstantledd:

$$f(t) = c + a \cdot t + b_1 \cos(2\pi f_1 t + \phi_1) + b_2 \cos(2\pi f_2 t + \phi_2) + b_3 \cos(2\pi f_3 t + \phi_3) + \dots \quad (3.2)$$

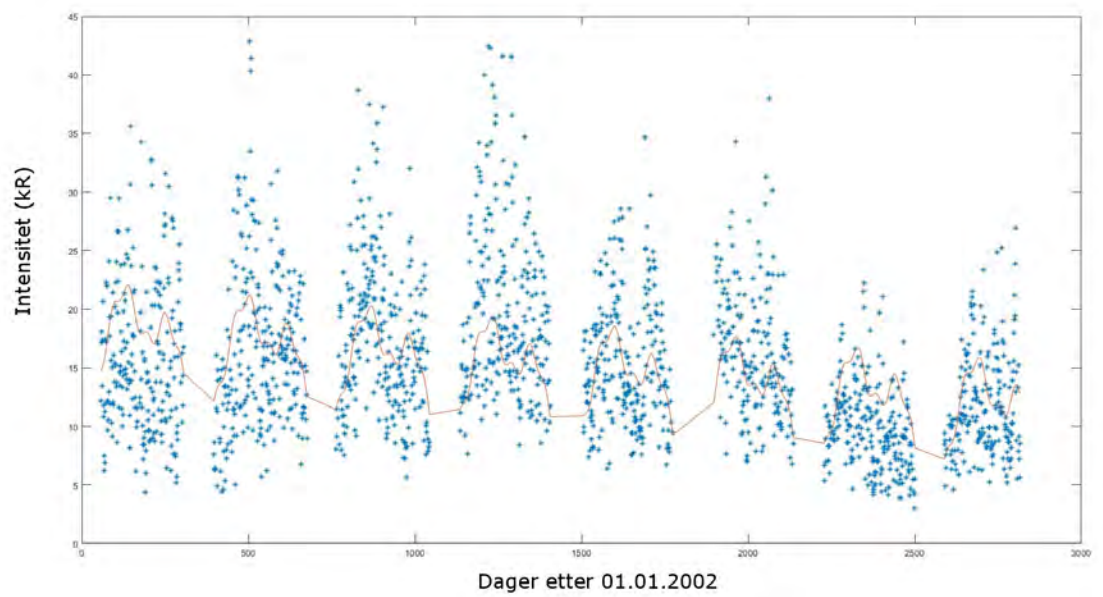
Her representerer f_i frekvensene, A_i representerer amplitudene og ϕ_i de tilhørende fasene. I oppgaven [Lund 2010] ble det funnet at de eneste signifikante frekvensene var $f_1 = \frac{1}{365}$, $f_2 = \frac{2}{365}$ og $f_3 = \frac{3}{365}$. Dette ga en $R^2 = 0.3$.

Metoden brukt til å finne den relevante årlige perioden var minste kvadraters metode for periodogram som beskrevet av [Marquardt 1963], også kalt Levenberg–Marquardt algoritme. Levenberg–Marquardt algoritme ble implimentert ved hjelp av verktøyet cftool i programmeringsspråket MATLAB R2017b. Det ga følgende resultater

Tabell 3.1: Koeffisientene til modellering av periodisiteten til OH.

c	16.870
a	-0.002
b1	0.211
b2	-3.362
b3	-0.822
ϕ_1	-4.427
ϕ_2	2.368
ϕ_3	0.768

Figur 3.1 viser alle rådataene fra perioden som ble brukt med dager etter 01.01.2002 på x-aksen og intensiteten i kR på y-aksen. Den røde linjen viser den modelerte periodisiteten.



Figur 3.1: Figuren viser rådataene fra 01.01.2002 til og med 31.12.2009 for OH Meinel (3,1). Den røde linjen viser den periodemessige trenden som ble trukket fra rådataene.

3.2.2 Andre mulige påvirkningsfaktorer

Andre mulige påvirkningsfaktorer kan være blant annet solsykluser [Schwabe 1844]. Disse har en periode på ca 11 år og ettersom dataene som ble analysert var over en kortere periode enn dette er det vanskelig å kompensere for dette. På en annen side varierer intensiteten som følge av solsykluser bare med 0.4-0.7 W/m² så det vilsannsynligvis ikke påvirke målingene veldig mye [Solanki og Fligge 1998].

3.3 Bearbeiding av data

Dataene ble som sagt funnet for en periode fra 10 dager før til 20 dager etter dagen med polarlys. Problemet her var at selv om det var delvis kompensert for periodisiten var det stor forskjell på de samme 30 dagene fra år til år. For å få dataene på en form som gjorde de enklere å analysere var den enkleste måten å trekke fra det vektete snittet av de 10 dagene før hendelsen fra alle de 30 dagene i settet. Det vektete snittet er gitt ved formelen

$$\langle A \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{(\delta a_i)^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(\delta a_i)^2}}. \quad (3.3)$$

Her er a_i rådataverdien til en gitt dag og δa_i er den tilhørende usikkerhet. Begge har benevnning kR. Dette resulterte i at dataene ville ligge stokastisk rundt null og man kunne se om dataene gikk betydelig opp i og etter dagen med aurora. Siden dette også ville påvirke usikkerheten til målingene måtte disse korregeres ved formelen

$$\delta a'_i = \sqrt{\delta a_i^2 + dr^2} \quad (3.4)$$

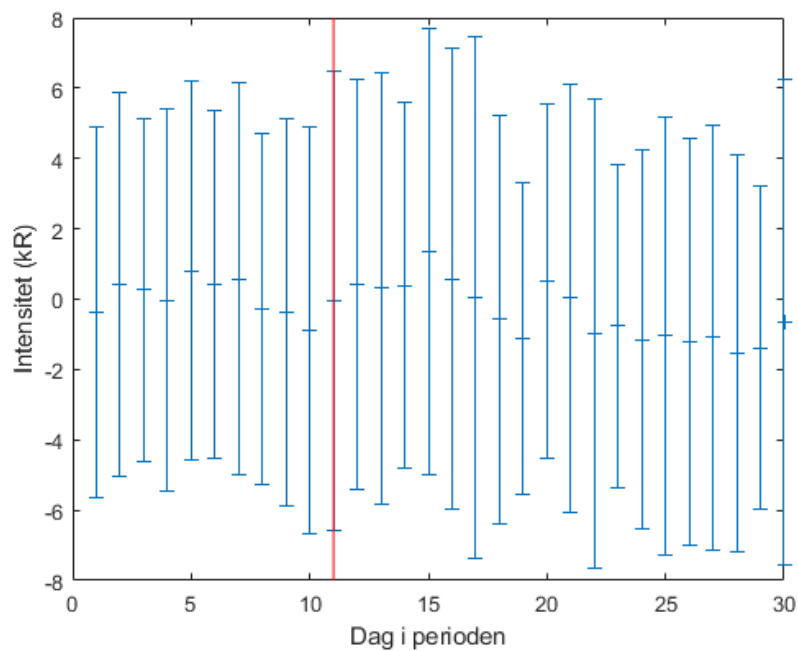
hvor dr var usikkerheten til hvert av gjennomsnittene som ble funnet av 10-dagersperiodene i settene som beskrevet over. dr ble funnet ved formelen

$$dr = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(\delta a_i)^2}} \quad (3.5)$$

hvor δa_i var usikkerheten til dagene som ble brukt til å finne snittet til perioden.

Det ble funnet 72 D-dager som hadde den nødvendige perioden før og etter uten en annen D-dag og det ble så utført samme metode på alle disse settene.

D-dagene ble funnet ved hjelp av International Service of Geomagnetic Indices [ISGI 2]. Da de 72 settene var redusert til å ligge rundt null ble (3.3) implimentert, men denne gangen for dager med samme posisjon i settene, altså alle dager som var 10 dager før hendelsen, alle dager som var 9 dager før hendelsen, osv. Her ble det brukt den nye usikkerheten. Dette resulterte i et vektet snitt for hver dag i perioden og det ble også funnet et tilhørende standardavvik. Figuren 3.2 viser resultatet med tilhørende usikkerhet gitt i 1σ .



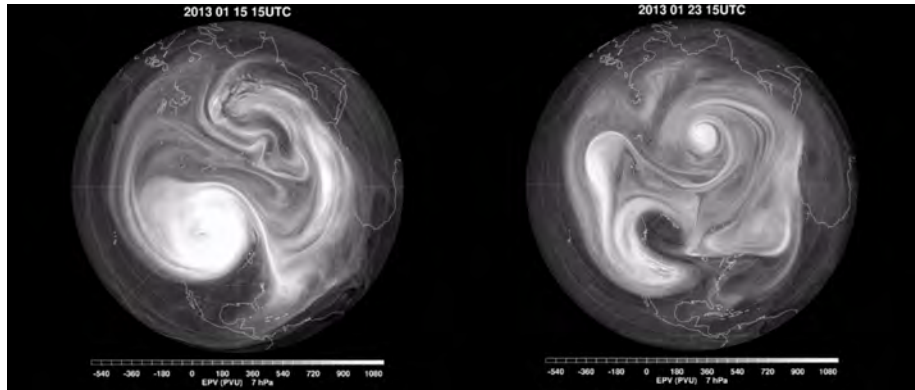
Figur 3.2: Figuren viser de ferdig bearbejdede dataene med tilhørende usikkerhet 1σ . Den røde linjen viser dagen auroraen forekom.

4 | Diskusjon

Som det kan sees i Figur 3.2 kan det se ut som det kanskje er en oppsving i utstråling dagene etter hendelsen, men som man også ser er usikkerheten altfor stor til å kunne påvise noe. Dette er spesielt med tanke på at usikkerheten bare er gitt i 1σ . Som nevnt tidligere ble det modelert årlige perioder, men ikke solsykluser og den årlige periodisiteten hadde bare en R^2 på 0.3. Dette betyr at hvis man kunne modelert både solsykluser og funnet en bedre tilpasset årlig periodisitet kunne man kanskje ha oppnådd resultater med lavere usikkerhet.

4.1 Geografiske påvirkninger

Flere har sett på sammenhengen mellom ap og auroraer. Dette er et intrikat tema siden det er mange faktorer som er med på å påvirke disse resultatene. Blant disse er klima, termiske effekter og bølger i atmosfæren blant de som muligens kan påvirke målingene av OH*. En mulig påvirkning er at når OH blir dannet vil det bli dratt med ved vinder som beveger seg i området. Dette vil kunne føre til at hvis vindene samler seg mot et punkt som man kan se i Figur 4.1 og det ikke er et observatorium under denne posisjonen vil det kunne se ut som det er mindre utstråling hvor observatoriumet faktisk ligger. Disse vindene påvirkes mye av hva som ligger under dem. Rundt nordpolen vil det vekslse mellom landmasser med forskjellige høyder og hav. Som man kan se av skjermdumpen av hvordan vindene beveger seg rundt nordpolen vil det til tider være områder hvor luften hopper seg opp. På en annen side vil man ikke ha dette problemet over sydpolen ettersom det ikke er samme endring i terreng. Som man kan se i Figur 4.2 vil det også være mer stabile OH nivåer over sydpolen enn nordpolen som igjen gjør den mer passende til å gjøre målinger enn den nordlige halvkule ettersom at man har mindre svingninger fra snittet.



Figur 4.1: Figuren viser hvordan vinden samler seg på forskjellige steder på den nordlige halvkule. Som man ser er det ikke en jevn fordeling og tettheten vil variere stort fra et tidspunkt til et annet. Bildet til venstre er fra 8 dager før det til høyre.

4.2 Katalytisk nedbrytning av O_3

En annen faktor som kan være med og påvirke utstålingen vil være hvis det er andre kjemiske og termiske reaksjoner som vil redusere konsentrasjonen av H eller O_3 som diskutert i blant annet [Verronen og Lehmann 2015] og [Turunen et al. 2009]. Dette vil komme av reaksjonene



hvor NO_2 vil rekombinere med O gitt ved

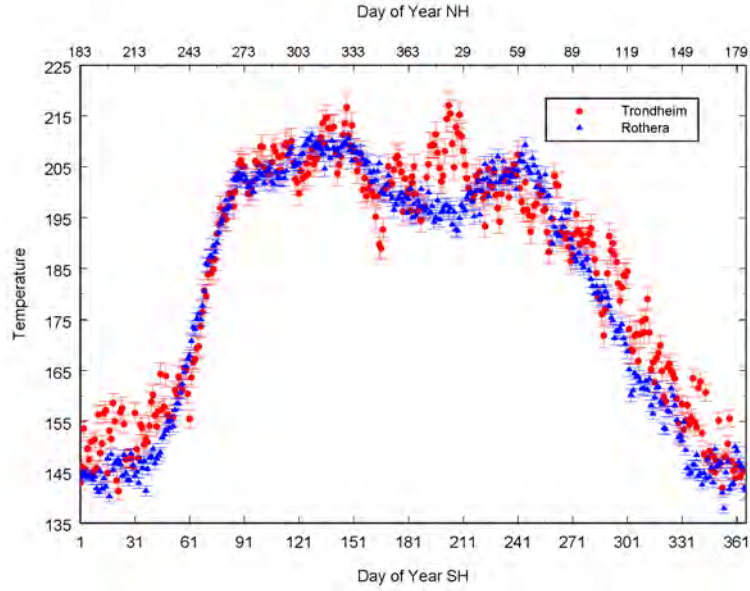


Dette vil gi en nettoreaksjon



Fra ligning (4.3) vil man kunne forvente at det vil føre til mindre O_3 for H å reagere med som vil føre til mindre OH. Her er det viktig å se på likevektskonstanten for å se om produksjonsraten til (4.1) er stor nok til å påvirke resultatet. For å se om dette kan påvirke noe kan man se hva konsentrasjonen til NO må være. Dette kan man gjøre ved sette produksjonen av de to reaksjonene mot hverandre. Dette vil gi

$$k_{NO+O_3}[NO][O_3] = k_{H+O_3}[H][O_3] \quad (4.4)$$

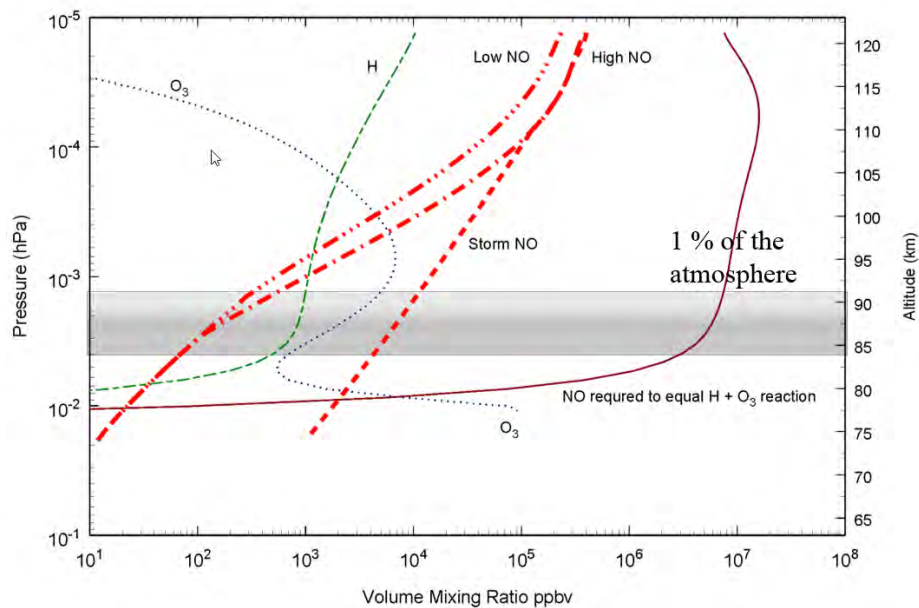


Figur 4.2: Figuren viser hvordan temperaturen målt fra OH varierer med sesongen i hhv Rothera og Trondheim. Som man kan se varierer målingene fra Trondheim mye mer fra år til år enn de målingene fra Rothera gjør.

som videre gir

$$[NO] = \frac{k_{H+O_3}}{k_{NO+O_3}}[H]. \quad (4.5)$$

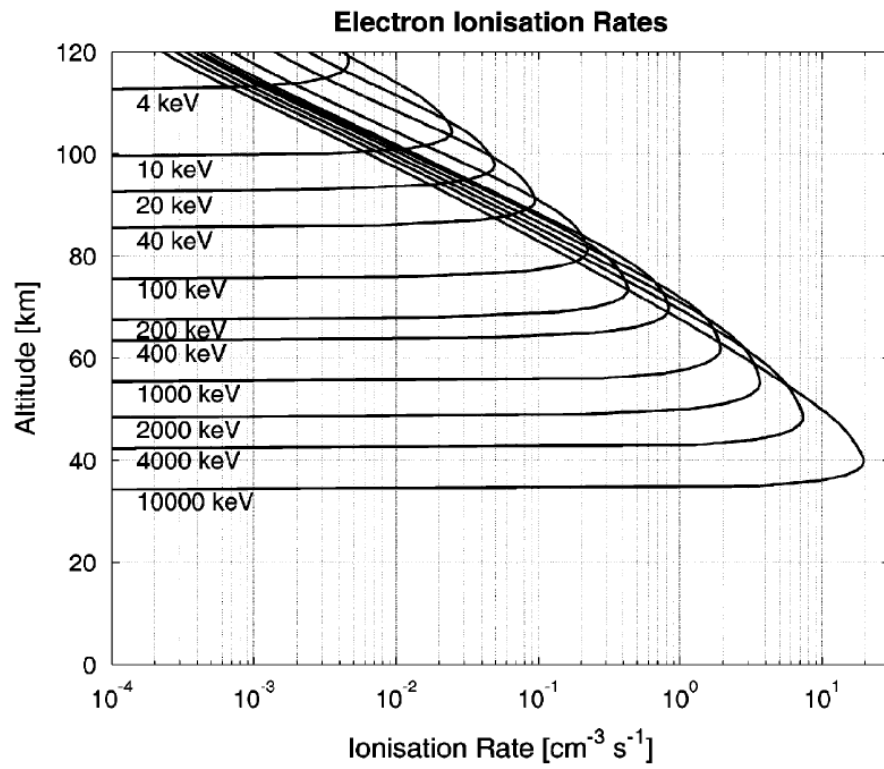
Hvis man slår opp likevektskonstanten k_{H+O_3} og k_{NO+O_3} og ser på typiske verdier for $[H]$ i OH regionen som er blitt analysert, finner man at $[NO]$ må være $\approx 1\%$ av atmosfæren. Dette er fordi $k_{H+O_3} \gg k_{NO+O_3}$. Hvis man sammenligner denne verdien med den faktiske verdien fra Figur 4.3 ser man at selv under geomagnetiske stormer vil NO konsentrasjonen aldri komme opp mot denne verdien.



Figur 4.3: Figuren viser konsentrasjonen til O_3 , H og NO i forskjellige høyder. Det mørke båndet viser OH regionen.

4.3 Videre arbeid

I denne oppgaven har det blitt brukt Ap indexen. Den relateres i hovedsak til elektroner med energi mellom 2keV og 20keV. Som kan sees i Figur 4.4 vil disse elektronene gi fra seg all sin energi i en høyde på ca 95-110 km. Dette er noe over den høyden som [Baker og Stair 1988] fant ut at OH^* ligger i. Et naturlig steg videre hvis man vil fortsette å se på OH^* produksjon vil være å se på elektroner som kommer inn med en energi på rundt 40 keV siden disse vil gi fra seg energien sin i en høyde på rundt 85km som kan sees i Figur 4.4 og i [Turunen et al. 2009]. Disse elektronene kommer fra rekombinasjonen av magnetliner rundt Jorden som gjør at elektronene her blir sendt tilbake mot jordens poler. Dette kan relateres mer til Dst indexen [Rostoker 1972].



Figur 4.4: Figuren viser hvilke høyder elektroner med forskjellig energi forventes å gi fra seg mesteparten av energien sin.

5 | Konklusjon

I denne oppgaven har det blitt analysert data fra Rothera for perioden 2002 til 2009. Ettersom OH* sender ut IR stråling og observatoriumet på Jorden må se igjennom dette laget har det vært av interesse å se om auroraer kan føre til økt utstråling. Dette ble gjort for å potensielt kunne finne perioder med mindre bakgrunnsstøy.

Det ble korrigert for årlige variasjoner av OH*, men ikke for solsykluser. For å finne relevante dager å studere ble det funnet dager hvor det var sikkert at det hadde forekommet auroraer ved hjelp av Ap indexen og D-dager. Disse dagene måtte også ha perioder med 10 dager før og 20 dager etter uten at en annen D-dag hadde forekommet for å kunne se etter effekter av auroraen uten forstyrrelser.

Etter å funnet det vektete snittet til de 10 dagene før hendelsen, trukket dette fra hele serien og så funnet det vektete snittet hver av dagene i 30-dagers perioden kunne det ikke påvises noen sammenheng mellom elektroner med energinivå som fører til auroraer og økt OH utstråling.

Referanseliste

[Baker og Stair 1988] Baker D.J. and Stair J.T. Rocket measurements of the altitude distributions of the hydroxyl airglow, *Physica Scripta.*, Vol. 37, s. 611-622, 1988.

[Birkeland 1908] Birkeland K. The Norwegian aurora polaris expedition, 1902-1903. Aschehoug, s. 2, 1908.

[Hemmer 2005] Hemmer, P.C. Kvantemekanikk. 5. Ug, s. 12: Trondheim: Tapir Akademiske Forlag, 2005.

[Herman og Horbeck 1953] Herman, R. C. og Horbeck, G. A., Vibration-Rotation Bands of OH*, *Astrophysical Journal*, vol. 118, s.214, 1953.

[ISGI 1] International Service of Geomagnetic Indices, side: http://www.isgi.unistra.fr/events_qdays.php[Sistne 31.10.2017]

[ISGI 2] International Service of Geomagnetic Indices, side:http://www.isgi.unistra.fr/data_download.php[Sistne 22.11.2017]

[Iwamuro et al. 1994] Iwamuro F., Maihara T., Oya S., Tsukamoto H., Hall D.N.B., Cowie L.L., Tokunaga A.T. og Pickles A.J. Development of an OH-airglow suppressor spectograph. *Astronomical Society of Japan*, Vol. 46, s.518, 1994.

[Li og Draine 2001] Li A. og Draine B. T. Infrared Emission from Interstellar Dust. II. The Diffuse Interstellar Medium. *The American Astronomical Society*, Vol. 554, 2001.

[Lund 2010] Lund, H., Variation of the hydroxyl near infrared airglow at Rothera, Antarctica. *NTNU*, s. 32, 2010.

[Maihara et al. 1993] Maihara T., Iwamuro F., Yamashita T., Hall D.N.B., Cowie L.L. Tokunga a.T. og Pickles A. Observations of the OH airglow emission. *Astronomical Society of the Pacific*, Vol. 105, s. 940-944, 1993.

[Marquardt 1963] Marquardt, D., An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics*. s. 431–441.

[Rank et al. 1965] Rank, D. H., Pierre, A. G. St. og Wiggins, T. A., Rotational and vibration constants of CO, *Journal of Molecular Spectroscopy*, Volume 18, s. 418-427, 1965.

[Rostoker 1972] Rostoker G., *Geomagnetic Indices. Reviews of Geophysics and Space Physics*, Vol. 10, s. 935-940, 1972.

[Scargle 1982] Scargle J.D. Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data, *The Astrophysical Journal*, 263:835-853, 1982.

[Schwabe 1844] Schwabe, H., *Sonnenbeobachtungen im Jahre 1843*. *Astronomische Nachrichten*, Vol. 21, s. 233-234, 1844.

[Solanki og Fligge 1998] Solanki S.K. og Fligge M., Solar irradiance since 1874 Revisited, *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, s. 341-344, 1998.

[Turunen et al. 2009] Turunen, E., Verronen, P. T., Seppala, A., Rodger, C. J., Clilverd, M. A., Tamminen, J., Enell, C. og Ulich, T., Impact of different energies of precipitating particles on NO_x generation in the middle and upper atmosphere during geomagnetic storms, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 71, s.1180, 2009.

[Verronen og Lehmann 2015] Verronen, P. T., and R. Lehmann, Enhancement of odd nitrogen modifies mesospheric ozone chemistry during polar winter, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 10,445–10,452, doi:10.1002/2015GL066703.

Figurer

Figur 2.1: <http://www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/molecule/rotrig.html> [Nedlastet: 25.11.2017]

Figur 4.2: Espy P. J., NTNU.

Figur 4.3: Espy P. J., NTNU, med data fra MSIS modell (Picone, J. M., A. E. Hedin, D. P. Drob, and A. C. Aikin, NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues, *J. Geophys. Res.*, 107(A12), 1468, doi:10.1029/2002JA009430, 2002.)

Figur 4.4: Turunen, E., Verronen, P. T., Seppala, A., Rodger, C. J., Clilverd, M. A., Tamminen, J., Enell, C. og Ulich, T., Impact of different energies of precipitating particles on NO_x generation in the middle and upper atmosphere during geomagnetic storms, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 71, s.1180, 2009.