

# Ionosfæriske scintillasjoner på GNSS-signaler over Dronning Maud Land, Antarktis: statistikk og kasusstudier

*Ionospheric Scintillations of GNSS Signals  
above Dronning Maud Land, Antarctica:  
Statistics and Case Studies*

Arnlaug Høgås Skjæveland



Oppgave for graden  
Master i romfysikk og -teknologi  
60 studiepoeng

Institutt for fysikk  
Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet

UNIVERSITETET I OSLO

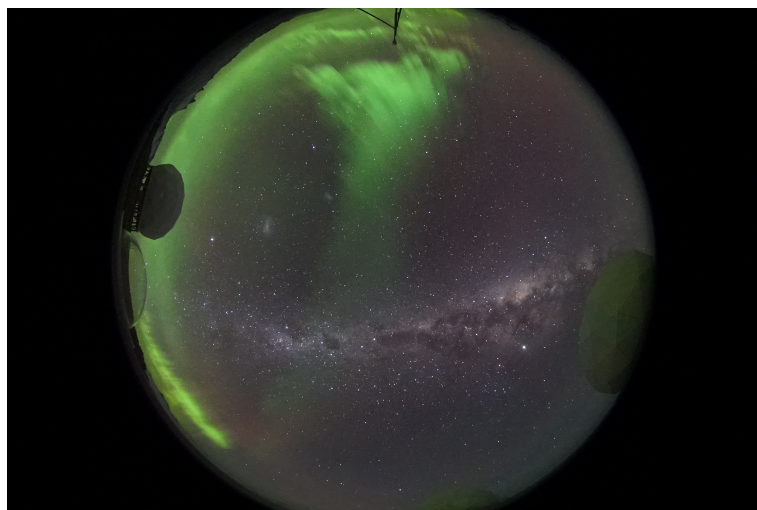
Våren 2020



# Ionosfæriske scintillasjoner på GNSS-signaler over Dronning Maud Land, Antarktis: statistikk og kasmusstudier

*Ionospheric Scintillations of GNSS Signals above  
Dronning Maud Land, Antarctica: Statistics and  
Case Studies*

Arnlaug Høgås Skjæveland



© 2020 Arnlaug Høgås Skjæveland

Ionosfæriske scintillasjoner på GNSS-signaler over Dronning Maud  
Land, Antarktis: statistikk og kasusstudier

<http://www.duo.uio.no/>

Trykk: Reprosentralen, Universitetet i Oslo



## Sammendrag

I denne oppgaven er forekomsten av fasescintillasjoner på GNSS-signaler over deler av Dronning Maud Land i Antarktis kartlagt, ved bruk av scintillasjonsmottakere på Troll stasjonen (geografiske koordinater:  $72.0^{\circ}\text{S}$ ,  $2.5^{\circ}\text{Ø}$ , magnetiske koordinater:  $62.8^{\circ}\text{S}$ ,  $47.8^{\circ}\text{Ø}$ ) og SANAE IV (geografiske koordinater:  $71.7^{\circ}\text{S}$ ,  $2.8^{\circ}\text{V}$ , magnetiske koordinater:  $62.0^{\circ}\text{S}$ ,  $45.0^{\circ}\text{Ø}$ ). Ionosfæren i dette området er lite studert tidligere, og dette er de første resultatene som presenteres fra det nylig etablerte Troll ionosfæriske observatoriet. Den første delen av oppgaven er en statistisk studie hvor forekomsten av scintillasjoner i 2018 er kartlagt. Hovedfunnet i denne studien er at høye fasescintillasjoner kun forekommer ved høy geomagnetisk aktivitet, forekomsten av scintillasjoner er høyere postmidnatt enn premidnatt og at scintillasjoner forekommer både innenfor og nord for den statistiske auroraovalen. I denne oppgaven er det også gjennomført to kasusstudier, en fra februar 2018 og en fra mars 2018. Kasusstudiene brukte satellittdata fra solvinden, Swarm, DMSP og bakkebaserte instrumenter: scintillasjonsmottakere, magnetometere og Superdarn, fra både den nordlige og sørlige halvkule. Hovedfunnene fra kasusstudiene er at scintillasjoner på Troll og Sanae kan assosieres med partikkelnedbør, sterke vestgående strømmer og høye konveksjonshastigheter. De viste også en hvis symmetri i forekomsten av scintillasjoner, men scintillasjonene var kraftigere og var til stede over en lengre tidsperiode i Antarktis enn på Færøyene.

## Abstract

In this thesis maps the occurrence of phase scintillations on GNSS-signals over parts of Dronning Maud Land in Antarctica, with the use of scintillation receivers at Troll Station (geographic coordinates: 72.0S, 2.5E, magnetic coordinates: 62.8S, 47.8E) and SANAE IV (geographic coordinates: 71.7S, 2.8W, magnetic coordinates: 62.0S, 45.0E). There are few previous studies of the ionosphere in this area; this is the first time results from the newly established Troll Ionospheric Observatory are presented. The first part of this thesis is a statistical study where the occurrence of phase scintillation in year 2018 is mapped. The main findings are that strong scintillations only occur during high geomagnetic activity, the occurrence is higher post-midnight than pre-midnight and that scintillations occur both in and north of the aurora oval. Two case studies are carried out in the thesis, one from February 2018 and one from March 2018. The case studies use satellite data from the solar wind, Swarm and DMSP, and ground based instruments: scintillations receiver, magnetometer and Superdarn, from both the northern and southern hemisphere. The main findings from the case studies are that scintillations at Troll and Sanae can be associated with particle precipitation, strong westbound currents and high convection velocities. They also show some symmetry in the occurrence of scintillations, although the scintillations were stronger and present for longer time periods in Antarctica than at the Faroe Islands.

---

# Forord

Da jeg gikk inn i dette masterprosjektet hadde jeg nylig stått på sidelinjen av mange venners skrekkopplevelser med masterlivet, og gikk inn med en tanke om at dette ville være ekstremt slitsomt, ensomt og frustrerende. Jeg skal ikke lyge og si at det ikke har vært tunge tider og at alt har vært en dans på roser, spesielt ikke akkurat nå – klokken 23 dagen før innlevering. Men alt i alt har det siste året vært veldig fint, jeg har helt ærlig kost meg med dette forskningsprosjektet. Det er mange som har gitt små og store bidrag til at jeg har klart å tatt en master og at dette ikke har blitt så ille som jeg forestilte meg, jeg skal prøve å takke alle her.

Først og fremst – tusen takk til Wojciech for at du har gitt meg så mye av din dyrebare tid, den gode oppfølgingen og den nøye gjennomlesingen. Thank you Daria for being a good co-supervisor, and for being a teammate, you made the work with this thesis less lonely. I also want to show my gratitude to the 4D-space group for being an helpful and including.

Og til alle dere fantastiske medstudentene jeg har fått dele kontor V303 med, dere har gjort masterlivet morsomt og gitt meg en grunn til å dra på kontoret hver dag (og beklager at jeg av og til snakker i ett sett). Takk til Veronica for å være den perfekte samarbeidspartner når en skal komme seg gjennom romfysikkfagene, og for å gi en lost tilbakevendende fysikkstudent en ny vennegjeng. En spesiell takk til Bjørn for å hjelpe meg med alt av tekniske og sørverrelaterte ting.

En stor takk til Mamma og Pappa for å ha støttet meg gjennom alle disse årene, og for å ha troen på meg når jeg ikke har hatt det selv.

I want to acknowledge everyone who has provided me with data, without access to a large variety of data I would not have gotten the broad perspective of the ionospheric conditions. SANSa provided scintillation data from SANAE IV, the Norwegian Mapping Authority provided the scintillation data from the Faroe Islands and Jan Mayen, Tromsø Geophysical Observatory at UiT the Arctic University of Norway provided magnetometer data from LYR, BJO and JAN, DTU Space provided the magnetometer data from Hov, University of Iceland Leirvogur Magnetic Observatory provided the magnetometer data from Leirvogur, Alfred Wegener Institute provided the magnetometer data from Neumayer, ESA provided the SWARM data, NASA provided the Omni data, NOAA's National Geophysical Data Center the DMSP data and Virginia Tech provided the SuperDARN data.



# Innhold

<b>1</b>	<b>Introduksjon</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Teoretisk bakgrunn</b>	<b>4</b>
2.1	Plasma . . . . .	4
2.1.1	Bevegelsen til enkeltpartikler . . . . .	5
2.1.2	Magnetohydrodynamikk (MHD) . . . . .	7
2.1.3	Innfryste magnetfelt . . . . .	9
2.1.4	Bølger i plasma . . . . .	9
2.1.5	Instabiliteter . . . . .	10
2.2	Solvind og jordens magnetfelt . . . . .	10
2.2.1	Solvind . . . . .	10
2.2.2	Solsyklus . . . . .	11
2.2.3	Jordens magnetfelt . . . . .	12
2.2.4	Magnetopausen . . . . .	15
2.2.5	Magnetisk fluksomkobling . . . . .	15
2.2.6	Aurora og auroraovalen . . . . .	16
2.3	Ionosfæren . . . . .	17
2.3.1	Ionosfærens lag . . . . .	17
2.3.2	Konveksjonsceller . . . . .	18
2.3.3	Ionosfæriske strømmer . . . . .	19

---

2.3.4	Substorm . . . . .	21
2.3.5	Ionosfærisk bølgedal . . . . .	22
2.3.6	Oppsummering . . . . .	23
2.4	Irregulariteter . . . . .	24
2.4.1	Kelvin-Helmholtz instabilitet . . . . .	24
2.4.2	Gradientdrift instabilitet . . . . .	24
2.5	Scintillasjoner . . . . .	25
2.5.1	GNSS . . . . .	25
2.5.2	Scintillasjoner . . . . .	26
2.5.3	Scintillasjonsindekser . . . . .	27
2.5.4	Totalt elektroninnhold (TEC) . . . . .	27
2.5.5	ROT og ROTI . . . . .	28
2.6	Tidligere arbeid . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Metode</b>	<b>33</b>
3.1	Instrumenter . . . . .	33
3.1.1	GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor (GISTM) . . . . .	33
3.1.2	Superdarn . . . . .	34
3.1.3	Magnetometer . . . . .	35
3.1.4	Omni . . . . .	36
3.1.5	Swarm . . . . .	36
3.1.6	DMSP . . . . .	37
3.2	Stasjoner . . . . .	37
3.3	Geomagnetiske indekser . . . . .	37
3.3.1	AE, AU og AL . . . . .	39
3.3.2	Disturbance Storm Time Index (Dst-indeks) . . . . .	39

3.3.3	Kp . . . . .	40
3.4	Utregninger og valg . . . . .	42
3.4.1	Feldstein-ovalen . . . . .	42
3.4.2	Magnetiske koordinater . . . . .	42
3.4.3	Ionosfærisk gjennomboringspunkt . . . . .	42
3.5	Støyanalyse . . . . .	43
3.5.1	Flerbane . . . . .	44
3.6	Valg av dager til kasusstudie . . . . .	48
3.7	Statistikk . . . . .	48
3.7.1	Antall dager med Kp . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Resultater</b>	<b>50</b>
4.1	Statisikk . . . . .	50
4.1.1	Lav aktivitet . . . . .	50
4.1.2	Kp=4 . . . . .	52
4.1.3	Kp=6 . . . . .	54
4.1.4	Swarm . . . . .	54
4.2	26.–27. februar . . . . .	55
4.2.1	Solvind og AE-indeks . . . . .	55
4.2.2	Magnetometer . . . . .	58
4.2.3	Scintillasjoner . . . . .	61
4.2.4	Superdarn . . . . .	63
4.2.5	DMSP . . . . .	65
4.2.6	Plassering av irregulariteter . . . . .	67
4.3	18.–19. mars . . . . .	72
4.3.1	Solvind . . . . .	72

4.3.2	Magnetometer . . . . .	75
4.3.3	Scintillasjoner . . . . .	77
4.3.4	Superdarn . . . . .	79
4.3.5	DMSF . . . . .	81
4.3.6	Plassering av irregulariteter . . . . .	83
<b>5</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>86</b>
5.1	Oppsummering . . . . .	86
5.1.1	26.–27. februar . . . . .	87
5.1.2	18.–19. mars . . . . .	87
5.2	Mottakerstøy . . . . .	88
5.3	Diskusjon . . . . .	88
5.3.1	Asymmetri kasusstudier . . . . .	88
5.3.2	Årsaker til scintillasjoner kasusstudier . . . . .	92
5.3.3	Statistikk . . . . .	93
<b>6</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>95</b>

# Kapittel 1

## Introduksjon

Globale satelittnavigasjonssystemer (GNSS) som GPS og Galileo er svært nyttig. Mye av vår infrastruktur er helt avhengig av stabile posisjonssystemer. Forholdene i solvinden kan gi variasjoner i romværet og skape irregulariteter i ionosfæren, som kan føre til scintillasjoner. Sterke scintillasjoner kan ødelegge eller forringe kvaliteten til GNSS-signaler. Spesielt i polare og ekvatoriale strøk er det mye scintillasjoner.

God kunnskap om dynamikken mellom solvinden og ionosfæren kan gjøre det enklere å forutsi og imøtegå disse problemene. Ionosfæren er kompleks og det er fremdeles mye vi ikke forstår. Mye av forskningen i polare strøk har blitt utført på den nordlige halvkulen. Det har vært lettere å bygge opp infrastruktur i Arktis enn i Antarktis. Jorden sitt magnetfelt er forskjellig på de to halvkulene, dette skaper forskjeller i dynamikken i ionosfæren. Kunnskap om ionosfæren i Arktis kan derfor ikke direkte overføres til Antarktis. Bedre forståelse av de sørlige polare strøkene er derfor viktig, og kan gi oss en helhetlig forståelse av interaksjonen mellom solvinden, magnetosfæren og ionosfæren.

I desember 2017 begynte oppbyggingen av et ionosfærisk observatorium på den allerede eksisterende Trollstasjonen i Dronning Mauds land. En scintillasjonsmottaker ble installert i slutten 2017 og i 2019 et himmelkamera. Dronning Mauds land er et interessant område for ionosfæreforskning fordi det befinner seg gjennomsnittlig like nord for auroraovalen, men ved mye geomagnetisk aktivitet strekker sørlyset seg opp dit. Det er også nær Weddellhavanomalien, et område hvor jordens magnetfelt er noe svakere.

---

Denne oppgaven har tatt utgangspunkt i scintillasjonsdata fra året 2018, både Troll og vår nabostasjon i Antarktis, SANAE IV (fra nå kalt Sanae). Dette er første gang data fra Troll ionosfæriske observatorium er presentert. En klimatologisk studie er utført for begge stasjonene, med fokus på sammenhengen mellom geomagnetisk aktivitet og scintillasjoner. For en dypere forståelse av årsakene til scintillasjoner er det også utført to kasusstudier, der flere datakilder er inkludert, både fra den norlige og sørlige halvkule, og in situ målinger fra solvinden.

Kapittel 2 gir en generell innføring i plasma og romfysikk. På slutten av dette kapitlet vil det også bli gitt en oversikt over tidligere arbeid. I kapittel 3 er det først en oversikt over instrumentene, stasjonene og geomagnetiske indeksene som er brukt. Deretter en forklaring på utregninger og en inngående analyse av støy og flerbane for scintillasjonsmottakerene på Troll og Sanae. Til slutt en forklaring på hvordan studiene er utført. Resultatene er presentert i kapittel 4 og diskutert i kapittel 5. Jeg avslutter med konklusjon og forslag til videre arbeid.

# Kapittel 2

## Teoretisk bakgrunn

Her er en kort innføring i plasma og romfysikk, med hensikt å gi en bakgrunn for å forstå resten av oppgaven. For interesserte lesere anbefales bøkene *Introduction to space physics* av Kivelson og Russell (1995), *Basic space plasma physics* av Baumjohann og Treumann (2006), *Physics of the upper polar atmosphere* av Brekke (2012) og *Waves and oscillations in plasmas* av Pécseli (2013).

Innledningsvis defineres plasma, og det vil gis en kort redegjørelse for dens egenskaper, og bølger i plasma blir introdusert. Deretter beskrives jordens magnetfelt og interaksjonen mellom solvind og magnetosfæren. Videre gis en innføring til ionosfæren, konveksjonsceller og ionosfæriske strømmer. I ionosfæren oppstår det instabiliteter som skaper scintillasjoner, og noen av dem er introdusert. Avslutningsvis blir tidligere arbeid presentert.

### 2.1 Plasma

Plasma er en av de fire fundamentale aggregattilstandene, de tre andre er faststoff, flytende og gassform (Gurnett og Bhattacharjee 2005). Omtrent 99% av den synlige materien i universet er plasma (Pécseli 2013), det forekommer lite av det på jorden. En av de få plassene på jorden vi finner plasma er i ionosfæren, den øvre delen av atmosfæren.

Plasma er en kvasinøytral gass bestående av elektrisk ladede og nøytrale partikler som utviser kollektiv oppførsel. (Chen 2015). At

plasma er kvasinøytralt betyr at det er ca. like mange positive og negative elektriske ladninger. Ulike tilnærminger kan brukes for å beskrive egenskapene til plasma. Her vil det fokuseres på to vanlige modeller som begge er nyttig for å beskrive ionosfærens fysikk, bevegelsen til enkeltpartikler og plasma som et fluid.

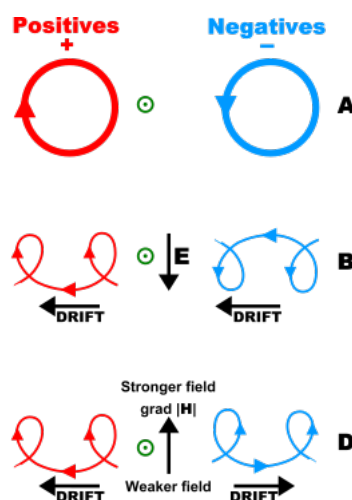
### 2.1.1 Bevegelsen til enkeltpartikkler

Å beskrive plasma ut ifra bevegelsen til enkeltpartikler er nyttig for å forklare prosesser i ionosfæren, men denne tilnærmingen krever visse forutsetninger. Baumjohann og Treumann (2006) lister opp følgende kriterier: Partiklene må ikke direkte interagere med hverandre og de må ikke signifikant påvirke det eksterne magnetfeltet. Denne modellen beskriver ikke de kollektive effektene, men kinetisk teori som beskriver evolusjonen til partiklene i faserommet tar hensyn til disse. Denne teorien skal ikke beskrives her, men kan finnes i Pécseli (2013).

De elektriske ladede partiklene vil oppleve en Lorentz-kraft:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.1)$$

der  $\mathbf{E}$  er det elektriske feltet,  $\mathbf{B}$  er magnetfeltet og  $\mathbf{v}$  er hastigheten til partikkelen. Ulike konfigurasjoner av E- og B-feltet vil gi forskjellige bevegelser. Noen av dem vil bli presentert her, banene til partiklene er illustrert i figur 2.1.



Figur 2.1: Illustrasjon av bevegelsen til enkeltpartikler i et magnetisk felt som står ut av papiret. Positive ioner til venstre og negative elektroner til høyre. Situasjon A er det kun et magnetisk felt, partiklene gyreer rundt et fast punkt, positive og negative ladninger gyreer i motsatt retning. I B er det lagt til et perpendikulært E-felt, partiklene drifter i samme retning uavhengig av ladning, i situasjon D blir magnetfeltet sterkere perpendikulært til magnetfeltet, motsatte ladninger drifter i motsatt retning. Fra *Guiding center* (2020)



**E=0**

Uten et elektrisk felt vil partiklene gyre perpendikulært på magnetfeltet som følge av ligning 2.1. Positive og negative ladninger vil gyre i motsatt retning. Fordi  $\mathbf{F}$  er perpendikulær til hastigheten, vil den kinetiske energien bli bevart.

**E $\perp$ B**

Når det er et elektrisk felt perpendikulært på magnetfeltet vil ladningene drifte i tillegg til å gyre. Driftshastigheten er

$$\mathbf{v}_d = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}. \quad (2.2)$$

Denne hastigheten er uavhengig av både ladning og masse. Ioner og elektroner vil drifte i samme retning og samme fart (Kivelson 1995a). Det vil dermed ikke oppstå en strøm. Gyrringen vil fremdeles være motsatt rettet. Denne situasjonen finnes vi blant annet i konveksjon over polhettene som blir forklart i delkapittel 2.3.2.

 **$\nabla B \parallel B$** 

Når gradienten er parallell med magnetfeltet får vi magnetisk speiling. Kraften vil være i motsatt retning av gradienten. Kraften i denne retningen kan bli aproksimert til

$$F_z = -\frac{1}{2} \frac{m v_{\perp}^2}{B} \frac{\partial B_z}{\partial z} \quad (2.3)$$

(Pécsele 2013), der  $z$  er retningen til magnetfeltet,  $m$  er massen til partikkelen,  $B$  er styrken til magnetfeltet og  $v_{\perp}$  er gyrringshastigheten. Siden et statisk magnetfelt ikke kan gjøre noe arbeid på partikkelen, vil den kinetiske energien til partikkelen være bevart,

$$\frac{1}{2} m (v_z^2 + v_{\perp}^2) = \text{konstant}. \quad (2.4)$$

En partikkel som beveger seg i  $z$ -retning mot et sterkere magnetfelt vil bli bremsset i parallell retning, men hastigheten til gyreringen vil øke. Ved sterkt nok magnetfelt vil partikkelen snu, derfor kalles denne kraften ofte for speilkraften.

Jordens magnetfelt har en  $\nabla B \parallel B$ -konfigurasjon. Magnetfeltet er sterkere ved polene enn ekvator. Partikkelens forhold mellom fart i perpendikulær- og  $z$ -retning vil avgjøre hvor den blir speilet (Baumjohann og Treumann 2006),

$$\sin \alpha = \left( \frac{B}{B_m} \right)^{1/2}, \quad (2.5)$$

hvor  $\alpha$  er vinkelen mellom  $v_{\perp}$  og  $v_z$ ,  $B$  er magnetfeltet og  $B_m$  er magnetfeltstyrken som behøves for å speile partikkelen. Partikler som har en lavere  $B_m$  enn feltstyrken ved den magnetiske polen vil være fanget mellom polene, mens partikler med lav nok vinkel vil slippe ned i atmosfæren (Baumjohann og Treumann 2006). Dette kan gi partikkelnedbør i polområdene.

### $\nabla B \perp B$

En magnetisk gradient perpendikulær til magnetfeltet gir drift av elektrisk ladede partikler. Driftshastigheten er

$$\mathbf{v}_D = \frac{1}{2} \frac{mv_{\perp}^2}{qB^3} \mathbf{B} \times \nabla_{\perp} B \quad (2.6)$$

(Prolss 2004). Denne driften er avhengig både av masse og ladning. Elektroner og ioner vil derfor bevege seg i forskjellig retning og med hastighet, og skaper dermed en strøm.

### 2.1.2 Magnetohydrodynamikk (MHD)

Vi kan beskrive plasma som et elektrisk ledende fluid og bruker da ligninger både fra fluidteori og elektromagnetisme (Gurnett og Bhattacharjee 2005). Her presenteres det en enfluid modell, hvor elektroner og ioner ses på som en del av samme fluid. I denne modellen blir det antatt at plasmaets konduktivitet går mot uendelig og kalles

derfor ideell MHD. Boken til Pécseli (2013) er brukt her som kilde og anbefaling til interesserte lesere. Variablene er som følger:  $\rho$  for massetetthet,  $\mathbf{u}$  for hastighet,  $p$  for trykk,  $\mathbf{J}$  er strømtetthet,  $\mu_0$  er den magnetiske permeabiliteten i vakuum og  $\mathbf{g}$  er gravitasjonsakselerasjon.

Ved å anta at ingen partikler skapes eller forsvinner bruker vi kontinuitetsligningen

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho + \nabla \cdot (\mathbf{u}\rho) = 0. \quad (2.7)$$

Vi bruker Navier-Stokes bevegelsesligning for å beskrive kreftene sin påvirkning på hastighet.

$$\rho\left(\frac{\partial}{\partial t}\mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla\mathbf{u}\right) = -\nabla p + \mathbf{J} \times \mathbf{B} + \rho\mathbf{g}, \quad (2.8)$$

krafttetthetene på høyre side av ligningen er henholdsvis trykkgradient-, Lorentz- og gravitasjonskraft-tettheten.

Fordi plasma er en ionisert må vi bruke Maxwells ligninger

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2.9)$$

Faradays lov

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\mathbf{B}, \quad (2.10)$$

Amperes lov hvor vi ser bort i fra Maxwells forskyvningsstrøm

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0\mathbf{J} \quad (2.11)$$

og for å få kobling mellom  $\mathbf{E}$  og  $\mathbf{B}$  bruker vi Ohmslov

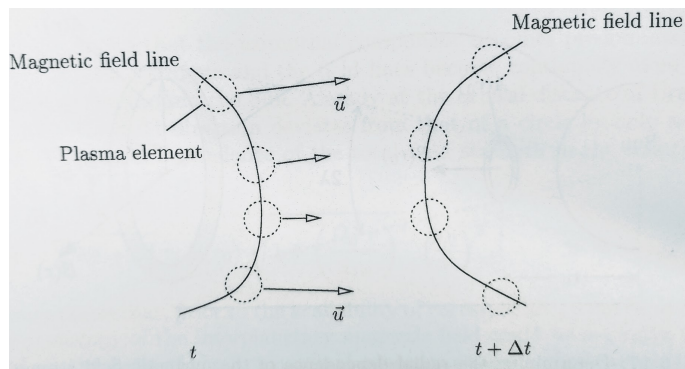
$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}). \quad (2.12)$$

For å fullføre ligningsettet trengs det en tilstandsligning, denne vil variere utifra forholdene. Hvis plasmaet er inkompresibelt er tilstandsligningen

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (2.13)$$

Dette ligningsettet kan vi bruke videre til å beskrive fenomener i plasma, slik som innfryste magnetfeltlinjer.

## 2.1. PLASMA



Figur 2.2: Illustrasjon av innfrost magnetfelt linje. Rundingene er plasmaelementer, linjen er en magnetfeltlinje og pilene er hastigheten. Til venstre ved tid  $t$  og til høyre tid  $t + \Delta t$ . Plasmaelementene beveger seg med forskjellig hastighet og magnetfeltlinjen følger med. Fra Prolss (2004).

### 2.1.3 Innfryste magnetfelt

En viktig konsekvens av ideel MHD er Alfvéns fryst inn teorem (Alfvén 1942, Pécseli 2013). Den magnetiske fluksen som går gjennom en lukket kurve er konstant. Denne kan sees på som en flukstube, plasmaet innenfor denne flukstuben vil følge denne. Et enklere bilde er å se på flukstuben som en magnetfeltlinje som plasma gyrerer rundt. Plasmaet er fryst inn i magnetfeltet, og magnetfeltet er fryst inn i plasmaet, de vil følge hverandre (Prolss 2004), som illustrert i figur 2.2. Dette teoremet kan bare anvendes om kriteriene for ideell MHD er oppfylt, det vil si uendelig ledningsevne, for eksempel i solvinden.

### 2.1.4 Bølger i plasma

Hvis plasma blir perturbert kan det oppstå bølger. Dette kan beskrives ved å legge til små pertubasjoner i ligningene til MHD,  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \tilde{\mathbf{B}}$  osv. der  $\tilde{\mathbf{B}}$  er et lite tall. Ligningene blir linearisert ved å la to små tall multiplisert med hverandre blir 0, ikke-linære termer blir dermed fjernet. Ved å Fourier-transforme kan parametrene skrives på bølgeform,

$$A(\mathbf{r}, t) = A(\mathbf{k}, \omega) \exp[i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - i\omega t], \quad (2.14)$$

$A$  er amplituden,  $\mathbf{k}$  er bølgetallsvektoren, omega er frekvensen,  $\mathbf{r}$  er posisjonsvektoren og  $t$  er tid. Hvis de nye ligningsettene for MHD

løses kan vi finne dispersjonsrelasjonen til bølgen  $\omega(\mathbf{k})$ . Fase- og gruppehastigheten er gitt av

$$\mathbf{v}_f = \omega \mathbf{k} / k^2 \quad (2.15)$$

$$\mathbf{v}_{gr} = \partial \omega / \partial \mathbf{k}. \quad (2.16)$$

Hvilke bølger som kan propagere i en plasma avhenger av egenskapene, slik som temperatur, orientering av felt, kollisjonsrate osv.

### 2.1.5 Instabiliteter

Hvis  $\omega$  i ligning 2.14 har en kompleks del, får eksponenten en reell komponent. Matematisk:

$$A(\mathbf{r}, t) = A(\mathbf{k}, \omega) \exp[i(\mathbf{k}\mathbf{r} - i\omega_r t) + \omega_i t]. \quad (2.17)$$

Hvis  $\omega_i > 0$  får vi en eksponentiell ikke-lineær vekst – en instabilitet. Er derimot  $\omega_i < 0$  vil bølgen dempes (Kivelson 1995b).  $\omega_i$  er vekstraten til instabiliteten. En instabilitet oppstår når bølgen får tilgang på nok fri energi, og dempes hvis energien i bølgen går over i andre former. Landaudemping er et eksempel på demping og forklares av kinetisk teori; energien til bølgen blir transformert til partiklers bevegelsesenergi. I ionosfæren kan instabiliteter skape irregulariteter, mer om dette i delkapittel 2.4.

## 2.2 Solvind og jordens magnetfelt

Denne delen handler om hvordan solvinden påvirker jordens magnetfelt. Dette er viktig for å forstå dynamikken som oppstår i ionosfæren.

### 2.2.1 Solvind

Solvinden er en kontinuerlig flyt av partikler med høy hastighet fra koronaen til solen via koronahull (Baumjohann og Treumann 2006).

Tabell 2.1: Typiske verdier for solvind (Prolss 2004)

Parameter	Verdi
Hastighet	470 km/s
Tetthet	6 n/cm <sup>3</sup>
Magnetisk feltstyrke	5 nT
Temperatur	10 <sup>5</sup> K

Plasma i solvinden består i hovedsak av H<sup>+</sup>-ioner, elektroner og rund 4% av He<sup>++</sup>-ioner (Prolss 2004).

Solvinden har veldig høy ledningsevne og lav kollisjonsrate, vi kan derfor bruke Alfvéns fryst inn teorem, beskrevet i delkapittel 2.1.3. Plasmaet og magnetfeltlinjene vil derfor følge hverandre (Brekke 2012). Magnetfeltet i solvinden kaller vi for det interplanetariske magnetfeltet (IMF).

Feltlinjene som følger solvinden vil bli bøyd på grunn av solens rotasjon. Resultatet er at feltlinjene blir strekt til en bue, og solvinden får en spiralform (Brekke 2012). Forskjellig aktivitet på solen vil føre til variasjon i parametre som tetthet, hastighet, magnetfeltstyrke og -orientering, og temperatur. Typiske verdier for solvinden er gitt i tabell 2.1

### 2.2.2 Solsyklus

Det kan observeres svarte flekker på Solen – solflekker. Det er områder med lav temperatur (Priest 1995). Ved å telle solflekkeene kan vi regne ut Wolfs solflekketall  $R_z$  definert som

$$R_z = k(10s + f). \quad (2.18)$$

$k$  er en normaliseringskonstant,  $s$  er antall solfleckgrupper og  $f$  er antall solflekker (Brekke 2012). Solflekketallet varierer med en syklus på omtrent 11 år i snitt, men kan variere fra 8.5 til 14 år (Brekke 2012). En solsyklus begynner med en økning i antall solflekker frem til kurvens topp punkt, solmaksimum. Deretter vil antall flekker reduseres og vi vil nå solminimum som er slutten på syklusen. Vi teller sykluser fra året 1755, og året 2018 er nær slutten av syklus nummer 24.

Hvor vi er i solsyklusen har stor betydning for solvinden og romværet

på jorden (McPherron 1995, Chapman og Bartels 1962). I perioder med høyt solflekketall er solen mer aktiv. Vi får flere solare bluss og koronale masseutkast (coronal mass ejections- CME). Denne oppgaven bruker data fra 2018 og det kan forventes lav aktivitet.

### 2.2.3 Jordens magnetfelt

Bevegelsen innerst i jorden skaper et magnetisk felt. Magnetfelt kan bli approksimert til et dipolfelt, som en stavmagnet litt på skrå. Polene i denne modellen kalles geomagnetiske og hadde i år 2018 koordinatene i nord  $80.5^\circ\text{N}$  og i sør  $73.0^\circ\text{V}$  og  $80.5^\circ\text{S}$ ,  $107.0^\circ\text{Ø}$  (WDC for Geomagnetism, Kyoto ). Denne modellen har flere svakheter, blant annet ignorerer den forskjellen på nordlige og sørlige halvkule.

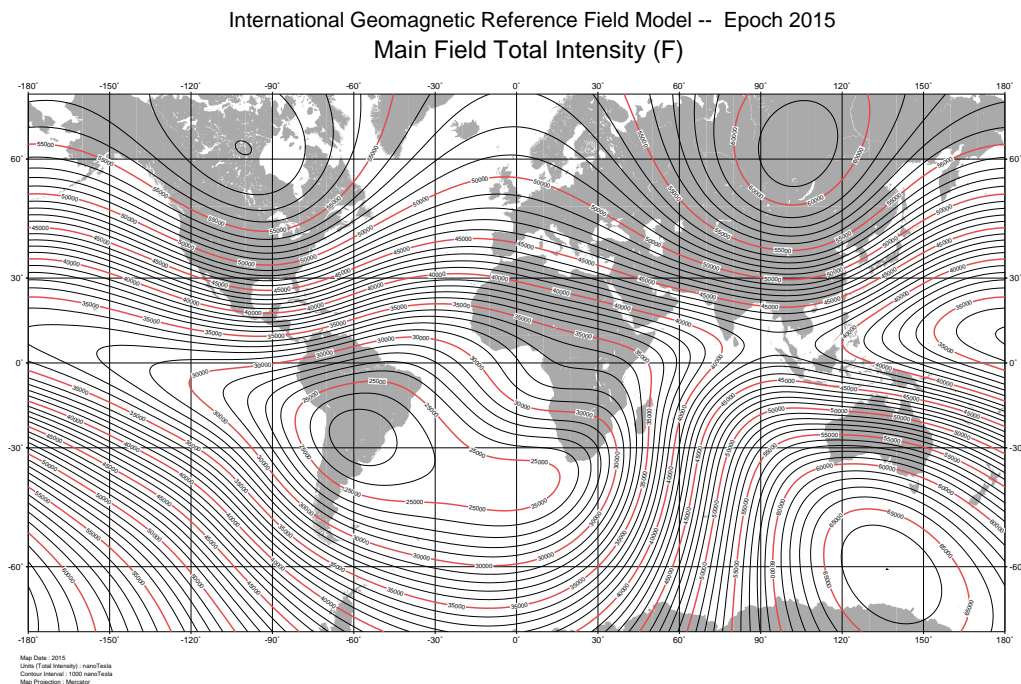
Å definere polene utifra hvor feltlinjene står  $90^\circ$  på jordoverflaten får med seg asymmetrien mellom halvkulene. Disse polene kalles magnetiske poler, og har i år 2018 koordinatene er  $86.5^\circ\text{N}$ ,  $178.8^\circ\text{V}$  i nord og  $64.2^\circ\text{S}$ ,  $136.1^\circ\text{Ø}$  i sør (WDC for Geomagnetism, Kyoto ). Både for de magnetiske og geomagnetiske polene er sørpolen på den nordlige halvkule og vice versa.

Magnetfeltet er ikke homogent. Som vist i figur 2.3 er det stor variasjon i magnetfeltstyrken. International Geomagnetic Reference Field (IGRF) er en modell som beskriver magnetfeltet som funksjon av geografiskekoordinater (Brekke 2012). Beskrivelsen er gitt ved :

$$V_M = R_e \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R_e}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n P_n^m(\cos \theta) [g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi)] \quad (2.19)$$

Der  $V_M$  er magnetisk potensiale,  $R_e$  er jordradiusen,  $\theta$  er geografisk kobreddegrad,  $\phi$  er lengdegrad,  $P_n^m(\cos \theta)$  er Legendre-funksjoner,  $g_n^m$  og  $h_n^m$  er Gaussiske koeffisienter. Disse koeffisientene er beskrevet i en tabell for IGRF. Magnetfeltet varierer litt fra år til år, derfor oppdateres disse koeffisientene hvert femte år. Kartet i figur 2.3 viser at magnetfeltstyrken er høy ved de magnetiske polene lokalisert i nord i Canada og sør for Australia, men veldig lav over Sør-Amerika og Sør-Atlanteren, på grunn av dette er området kalt Sør-Atlantiske anomalien.

## 2.2. SOLVIND OG JORDENS MAGNETFELT



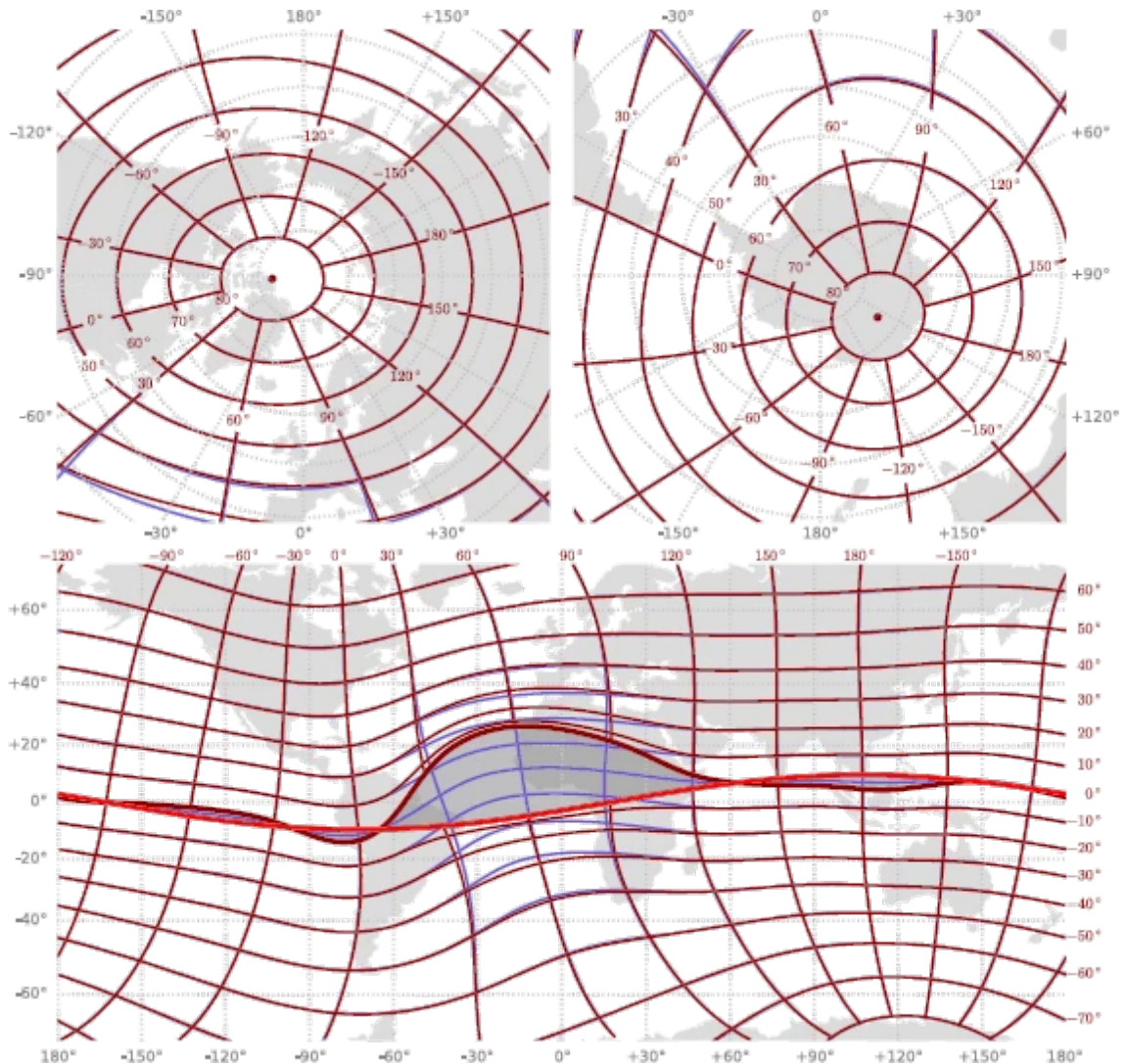
Figur 2.3: Kart over magnetfeltstyrken globalt i 2015. Fra “IGRF Geomagnetic Model Map Spreadsheet tool” 2019

Utifra modellene for magnetfeltet kan forskjellige koordinatsystem defineres. Et mye brukt system er Corrected Geomagnetic Coordinates (CGM) som tar utgangspunkt i IGRF-modellen. CGM er ikke definert i et område rundt ekvator (Laundal og Richmond 2017). Figur 2.4 viser et kart over CGM-koordinatene. Et annet magnetisk koordinatsystem er Altitude Adjustment Corrected Geomagnetic (AACGM). Dette er utledet fra CGM, men tar hensyn til høyden over havet. AACGM er beskrevet i delkapittel 3.4.2. I tillegg til magnetiske bredde- og lengdegrader er magnetisk lokaltid (MLT) også nyttig i fremstilling av data. En vanlig definisjon av MLT er

$$MLT = UT + (\phi + \Phi_N)/15, \quad (2.20)$$

her er  $\phi$  er magnetisk lengdegrad og  $\Phi_N$  er den geografiske lengdegraden til nordpolen i dipolmodellen. (REFERANSE!)





Figur 2.4: Kart over Corrected Geomagnetic Coordinates (CGM). De røde linjene og tallene er CGM bredde- og lengdegrader, mens de grå er geografiske koordinater. Innenfor det skraverte området er CGM ikke definert. Øverst til venstre er kart over den nordlige halvkule, og oppe til høyre er det tilsvarende for den sørlige halvkule. Begge polare kartene er tegnet med stereografiskprojeksjon. Det nederste bilde er et verdenskart der Miller sylindrerprojeksjon er brukt. Fra Laundal og Richmond (2017).

### 2.2.4 Magnetopausen

I grensen mellom magnetfeltet til jorden og IMF finner vi magnetopausen og magnetopausestrømmen. Magnetopausen er definert der trykket på grunn av jordens magnetfelt og det dynamiske trykket i solvinden balanseres. På dagsiden blir magnetopausen presset mot jorden og på nattsiden blir magnetfeltet strekt ut og kalles halen. Påfølgende utregning av lokasjonen til magnetopausen på dagsiden er basert på Brekke (2012). Det dynamiske trykket i solvinden er

$$P_{dyn} = \rho u^2 \quad (2.21)$$

Det magnetiske trykket på grunn av jordens sitt magnetfelt er gitt ved

$$P_m = \frac{B_{mp}^2}{2\mu_0}, \quad (2.22)$$

$B_{mp}$  er magnetfeltet ved magnetopausen, der

$$B_{mp} = 2B_0 \left( \frac{R_e}{r} \right)^3. \quad (2.23)$$

$B_0$  er magnetfeltstyrken på ekvator,  $R_e$  er jordradiusen og  $r$  er avstanden fra sentrum av jorden. På magnetopausen balanserer disse to trykkene hverandre og avstanden kan regnes ut

$$r = \left( \frac{B_0^2}{\mu_0 m n v^2} \right)^{1/6}. \quad (2.24)$$

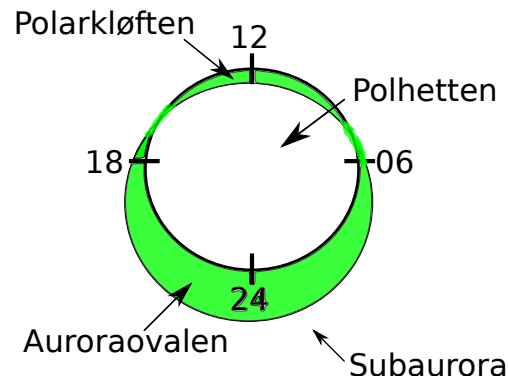
Siden solvindens trykk er avhengig av både massetetthet og hastighet vil avstanden mellom jorden og magnetopausen variere.

### 2.2.5 Magnetisk fluksomkobling

Når to magnetfelt presser mot hverandre og er antiparrallele kan magnetisk fluksomkobling skje. Da er ikke kriteriene for Alfvéns fryst inn teorem gyldig. Når IMF's nord-sør komponent peker sørover ( $B_z < 0$ ) er IMF antiparrallell til jordens magnetfelt som peker nordover. Jordens magnetfeltlinjer blir da delt i to og koblet sammen med feltlinjer fra solen (Dungey 1961). En feltlinje med begge fotpunktene på jorden kalles en lukket feltlinje og en med ett fotpunkt på jorden og

ett på solen kalles en åpen feltlinje. Polhetten er der feltlinjene er åpne, polarkløften er der feltlinjene åpner seg på dagsiden, se illustrasjon i figur 2.5. Grensen rundt polhetten kalles OCB (open-closed field line boundary).

Som følge av innfrysningsteoremet (se delkapittel 2.1.3) drar solvinden med seg den nå åpne feltlinjen over polhetten til nattsiden av jorden (Dungey 1961). Der blir feltlinjen lagret i halen. Etter hvert når mange feltlinjer er lagret i halen vil det skje fluksomkobling der, og feltlinjene vil lukke seg. Den jordlige lukkede feltlinjen forflytter seg til dagsiden, mens feltlinjen koblet til IMF fortsetter ut i rommet. Samtidig vil plasma fra feltlinjene bli akselerert mot jorden og skaper partikkelnedbør (Hughes 1995). Hvorfor magnetisk fluksomkobling skjer er ikke helt forstått. Satellittprosjektene Cluster og MMS har som oppdrag å finne mer ut av dette (REFERANSE!).



Figur 2.5: Illustrasjon av auroraovalen markert i grønt, gitt i magnetisk lokaltid. På dagsiden klokken 12:00 MLT er polarkløften og dagsnordlys og -sørlys. Polhetten er innenfor auroraovalen. På nattsiden er auroraovalen bred. Den ekvatorialske siden av auroraovalen betegnes som subauroralt.

## 2.2.6 Aurora og auroraovalen

De akselererte partiklene vil kolliderer med gasspartikler og ioner i atmosfæren og vil føre til dens eksitasjon. Et foton blir avgitt når partikkelen henfaller tilbake til sin grunntilstand. De vanligste fargene er på den synlige delen av det elektromagnetiske spekteret, og kan derfor observeres med det blotte øye. Eksitasjon av oksygen vil stort sett gi rødt (630.0 nm) eller grønt (557.7 nm) lys (Carlson og Egeland 1995).

Aurora vil oppstå langs de feltlinjene som blir omkoblet. Dette gir et smalt belte med aurora på dagsiden, dette er innenfor polhetten og

## 2.3. IONOSFÆREN

Tabell 2.2: Tabell over dominerende ioner og høyder til de forskjellige lagene i ionosfæren. Fra Prolss 2004

lag	høyde	ion
D-laget	$h \leq 90$ km	$\text{H}_3\text{O}^+$ , $\text{NO}_3^-$
E-laget	$90 \leq h \leq 170$ km	$\text{O}_2^+$ , $\text{NO}^+$
F-laget	$170 \leq h \leq 1000$ km	$\text{O}^+$

nærme den magnetiske polen. På nattsiden er det et bredt belte på utsiden av polhetten. Dette får formen som en oval, se figur 2.5. I denne oppgaven brukes den empiriske Feldstein-modellen for å anslå grensene for auroraovalen (Holzworth og Meng 1975). Denne modellen bruker Kp-indeksen for å modellere ovalen, se delkapittel 3.3.3.

## 2.3 Ionosfæren

I øvre del av atmosfæren finner vi plasma som er delvis ionisert. Denne delen kaller vi ionosfæren og den starter på omtrent 60 km (Brekke 2012).

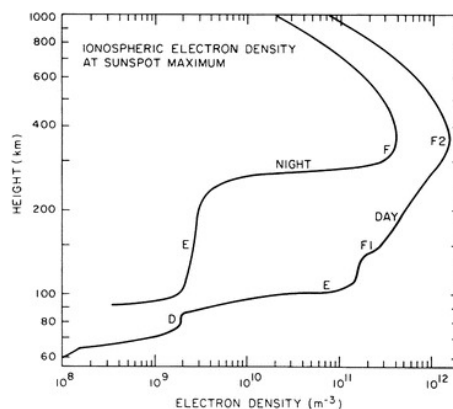
### 2.3.1 Ionosfærens lag

Vi kan dele ionosfæren inn i tre hovedlag. D-laget er det nederste og går opp til en høyde på ca 90km. E-laget er fra ca. 90km til 150km og F-laget over der igjen. F-laget kan igjen deles inn i  $F_1$  og  $F_2$ . Lagene er delt inn etter hvilke ioner som er dominerende som beskrevet i tabell 2.2 (Prolss 2004). Profil av elektrontetthet er vist i figur 2.6.

Tettheten av nøytrale partikler,  $n_n$ , er høydeavhengig og kan beskrives av

$$n_n(z) = n_0 \exp(-z/H) \quad (2.25)$$

$$H = k_B T_n / m_n g, \quad (2.26)$$



Figur 2.6: Profil av elektrontettheten som funksjon av høyde ved solmaksimum. For dag og natt. Fra Evans og Hagfors 1968.

$z$  er høyden over havet,  $k_B$  er Boltzmanns konstant,  $T_n$  og  $m_n$  henholdsvis temperaturen og massen til nøytrale partikler (Baumjohann og Treumann 2006). I de lavere lagene E og D vil tettheten av nøytrale partikler være vesentlig høyere enn i F-laget og vil føre til mer kollisjoner mellom ioner og nøytrale partikler.

En viktig parameter når ionosfæren beskrives er elektrontettheten. Det er forskjellige prosesser som ioniserer, men fotoionisering regnes som den viktigste i atmosfæren (Prolss 2004). Dette skjer ved at høyenergi solstråler treffer atomer eller molekyler. Et elektron kan bli løsrevet og et positivt ion og et negativt elektron gjenstår.



der  $X$  er et atom eller molekyl. Raten av ioniseringen er avhengig av breddegrad; Ekvator har mer innstråling og dermed høyere grad av fotoionisering. Partikkelnedbør vil også øke plasmakonsentrasjonen. Dette er en viktig kilde til ionisering i polare områder (Baumjohann og Treumann 2006). Asymetri i jordens magnetfelt påvirker også elektrontettheten (Xu med flere 2014).

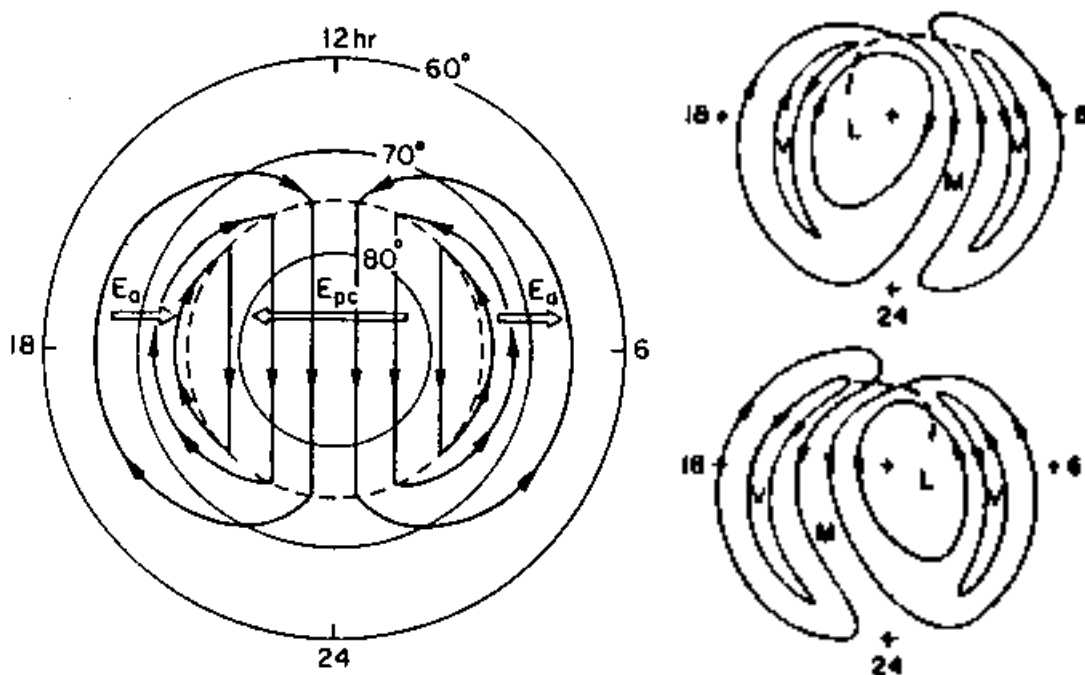
Det finnes mange tapsprosesser i ionosfæren. En enkel forklaring er at hvis et elektron og et ion kolliderer vil atomet/molekylet igjen være nøytralt.  $n_n$  er høyere lengre ned i ionosfæren. I nedre del av ionosfæren vil derfor tapsprosessene gå fortere enn i F-laget. Om natten når photoioniseringen stopper opp vil derfor E-laget bli svakere og D-laget forsvinne, som illustrert i figur 2.6 (Baumjohann og Treumann 2006).

### 2.3.2 Konveksjonsceller

I delkapittel 2.2.5 beskrives det at plasma beveger seg fra dagsiden over polhetten til nattsiden. Dette setter opp et elektrisk felt på grunn av Lorentz transformasjon

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.28)$$

(Dungey 1961). Fra nattsiden vil plasma bli transportert til dagsiden utenfor polhetten. Dette setter opp et konveksjonssystem med to celler vist i figur 2.7. Det elektriske feltet vil gå fra morgen til kveldsiden



Figur 2.7: Til venstre: Konveksjon over polhetten ved  $B_y=0$ .  $E_{pc}$  er det elektriske feltet, fra Kelley (1989). Oppe til høyre: konveksjonsceller ved  $B_y > 0$ . Nede til høyre: ved  $B_y < 0$ . Begge illustrasjonene til høyre er for den nordlige halvkule. Fra Reiff og Burch (1985).

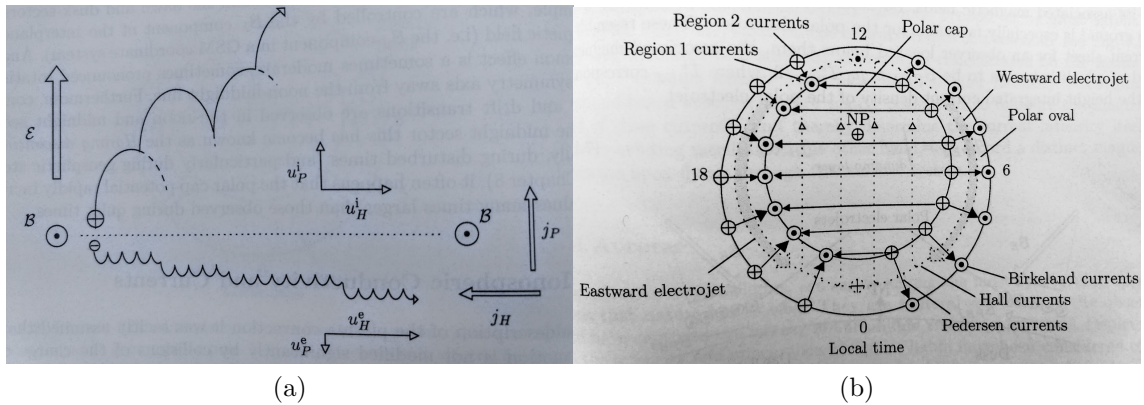
inni polhetten og fra kveld til dag på utsiden. Raten av fluksomkobling vil påvirke størrelsen til polhetten (Cowley og Lockwood 1992).

Disse to cellene vil ikke alltid være like.  $B_y$  komponenten til solvinden vil bestemme hvor fluksomkobling vil skje. På den nordlige halvkule, når  $B_y > 0$ , vestover, vil cellen på kveldssiden vokse, mens cellen på morgensiden vil krympe og få form som en banan. I det motsatte tilfellet der  $B_y$  er negativ vil cellen på morgensiden få form som en banan, mens den andre cellen vil vokse (Reiff og Burch 1985), se figur 2.7. På den sørlige halvkule er dette motsatt,  $B_y \neq 0$  gir dermed en asymmetri mellom halvkulene.

### 2.3.3 Ionosfæriske strømmer

En strøm er forskjellen i fluks til positive og negative elektriske ladninger,

$$\mathbf{j} = e(n_i \mathbf{v}_i - n_e \mathbf{v}_e), \quad (2.29)$$



Figur 2.8: (a) Illustrasjon av bevegelsen til ioner og elektroner som kolliderer med nøytrale partikler i et  $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$ -felt. (b) Illustrasjon av strømsystemet i ionosfæren. Hall-strøm er den stiplede linjen, Pedersen-strøm er pilene, Birkeland-strømmene er markert inn og ut av arket. Fra Prolss (2004).

$\mathbf{j}$  er strømtettheten,  $e$  er elementærladningen,  $n_i$  og  $n_e$  er tettheten av ioner og elektroner,  $\mathbf{v}_i$  og  $\mathbf{v}_e$  er drifhastigheten til ionene og elektronene. Hvis hastighetene eller tetthetene er forskjellig oppstår det en elektrisk strøm.

Konveksjon er i utgangspunktet en  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -drift, og som forklart i delkapittel 2.1.1 vil dette ikke gi strømmer. Dette stemmer bra i F-laget hvor tettheten er lav og dermed forekomme få kollisjoner. I de lavere D- og E-laget derimot er tettheten høyere og vi får en betydelig andel kollisjoner med nøytrale. Ionene vil kollidere mer enn elektronene, og få en hastighetskomponent i retningen til E-feltet se figur 2.8. Resultatet er en strøm perpendikulært på konveksjonen, Pedersen-strøm, og en strøm i motsatt retning som konveksjonen, Hall-strøm (Prolss 2004). På grunn av økt konduktivitet i auroraovalen får vi aurorale elektrojetter som er sterke (Baumjohann og Treumann 2006).

Det går også strømmer langs feltlinjene. Disse blir kalt birkelandstrømmer eller field aligned currents (FAC). På den polare siden av aurora ovalen blir kalt region 1 strømmer, mens på den ekvatoriale siden region 2. Disse strømmene lukker strømsystemet (Prolss 2004). Figur 2.8 illustrerer systemet, Hall-strøm fra midnatt til middag og rundt inni nordlysovalen. Pedersen-strømmer på tvers av polhetten, fra morgen til kveld. Elektronjetter inni nordlysovalen i samme retning som Hall-strømmen. Region 1

## 2.3. IONOSFÆREN

---

Birkelandstrømmer på grensen mellom polhetten og nordlysovalen, oppadgående på kveldssiden og nedadgående på morgenen. Region 2 Birkelandstrømmer på utsiden av nordlysovalen, oppadgående på dagsiden, og nedadgående på kveldssiden. Som nevnt i delkapittel 2.1.1 har vi en strøm rundt ekvator, ringstrømmen. Denne er vestgående.

Vi kan måle horisontale ionosfæriske strømmer med magnetometere på bakken. Amperes lov – ligning 2.11 beskriver at en strøm inducerer et magnetfelt rundt strømmen. Når strømmene i ionosfæren blir sterkere eller svakere kan vi måle endringen i magnetfeltet. Birkelandstrømmer kan måles fra satellitter som for eksempel gjøres på Iridiumsatellittene som leverer til Ampere.

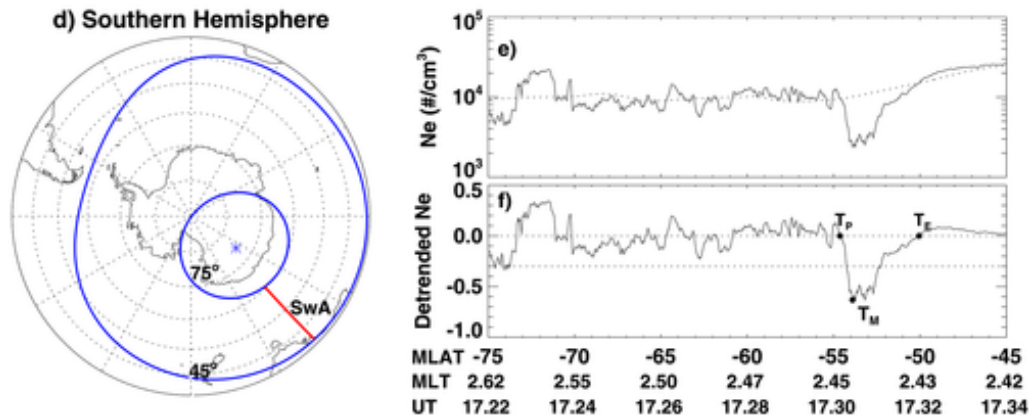
### 2.3.4 Substorm

En geomagnetisk substorm er en kort forstyrrelse i jordens magnetosfære som forårsaker frigjøring av energi fra den magnetosfæriske halen til ionosfæren ved høye breddegrader (Chang 2015). Ved høy rate av magnetisk fluksomkobling kan vi få substormer. Vi kan dele en substorm inn i tre faser, innledningsfasen, hovedfasen og gjenvinningsfasen.

I innledningsfasen har vi høy grad av fluksomkobling på dagsiden, som fører til en utvidelse av polarhetten og konveksjon i ionosfæren. Det vil ofte være litt omkobling på nattsiden som vil gi litt aurora og økning i auroralestrømmer, men de fleste feltlinjene vil bli lagret i halen (Baumjohann og Treumann 2006).

I hovedfasen er det høy rate av magnetisk fluksomkobling på nattsiden. Dette gir mye partikkelnedbør som fører til aurora, høyere elektrontetthet i ionosfæren og sterke aurorale strømmer, en konsekvens er endringer i lokalt magnetisk felt på bakken. Når fluksomkoblingsraten avtar går substormen inn i gjenvinningsfasen (Baumjohann og Treumann 2006). Strømmene i ionosfæren vil minske.



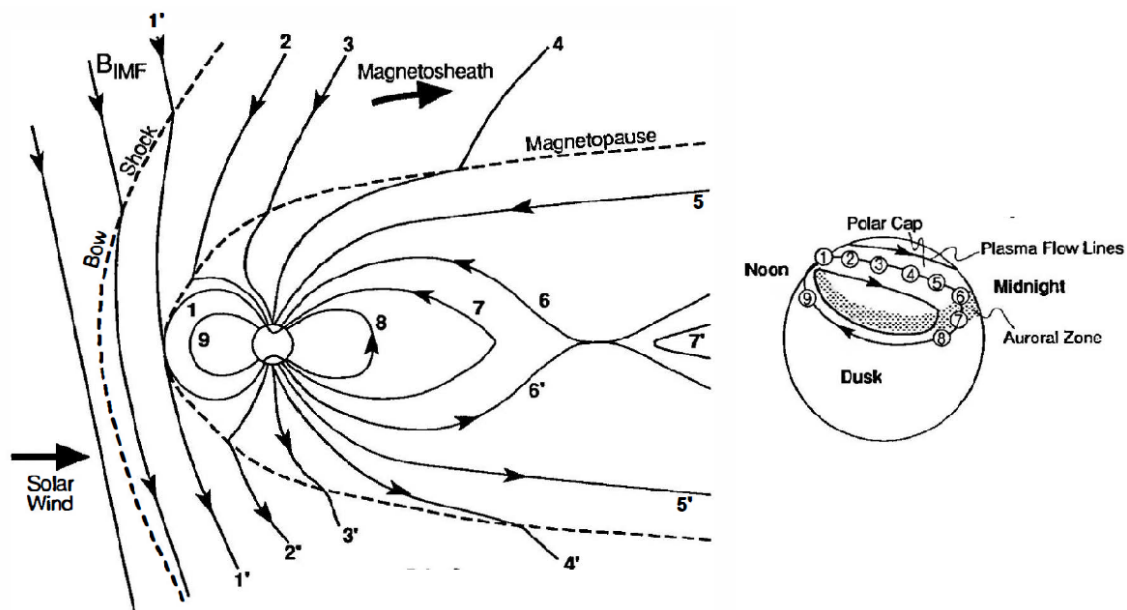


Figur 2.9: Eksempel på observasjon av ionosfærisk bølgedal in situ av Swarm. Kartet til venstre viser satellittens bane. Øverst til høyre er målt elektrontetthet, og nede til høyre er detrendet elektrontetthet. På  $x$ -aksen er magnetisk breddegrad, magnetisk lokaltid og universaltid.  $T_P$  markerer den polvise flanken,  $T_E$  den ekvatorialske flanken og  $T_M$  bølgedalens minimum. Fra Aa med flere (2020)

### 2.3.5 Ionosfærisk bølgedal

Ekvatorvis for auroraovalen kan en ionosfærisk bølgedal oppstå. Ionosfærisk bølgedal er et område med mindre plasmakonsentrasjon i F-laget. Posisjonen varierer iløpet av døgnet og er nærmest den magnetiske polen midt på dagen, mens rundt 03–04 MLT er det tidspunktet den er nærmest ekvator (Voiculescu, Virtanen og Nygrén 2006). Bølgedalen oppstår oftere på nattsiden enn på dagsiden. Eksempel på observasjon av ionosfærisk bølgedal med Swarm er vist i figur 2.9 og er fra artikkelen av Aa med flere (2020). Figuren viser en relativt jevn elektrontetthet frem til  $-55^\circ$  MLAT, hvor det er en rask nedgang i elektrontettheten, dette punktet er markert med  $T_P$  og er starten på den polvise flanken.  $T_M$  markerer bunnpunktet i bølgedalen, etter bunnen stiger elektrontettheten opp til omtrent samme nivå som tidligere. Den ekvatorvise flanken er markert med  $T_E$ .

Geomagnetisk aktivitet påvirker forekomsten og posisjonen til bølgedalen. Ved høy  $K_p$ -indeks flytter bølgedalen seg til lavere breddegrader, dybden blir større og forekomsten øker (Voiculescu, Virtanen og Nygrén 2006; Aa med flere 2020). Den ionosfæriske bølgedalen varierer med årstiden, det er økt forekomst ved lokal vinter og vår- og høstjevndøgn, årstidsvariasjonen er mer fremtredende på den nordlige enn sørlige halvkule (Aa med flere 2020).



Figur 2.10: Illustrasjon av Dungey-syklusen. Når IMF er negativ får vi magnetisk fluksomkobling på dagsiden, og magnetfeltlinjen åpner seg (1,2). Den nå åpne feltlinjen forflytter seg over polhetten (3,4). Feltlinjen lagres i halen (5). Dette fører til fluksomkobling på nattsiden (6). Feltlinjen til jorden er nå lukket, og IMF-feltlingen forstetter videre ut i rommet (7). Feltlinjen forflyttes tilbake til dagsiden (8,9).

### 2.3.6 Oppsummering

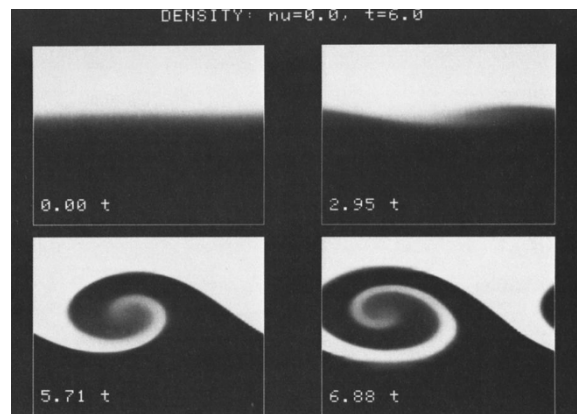
Alle elementene i dette delkapittelet kan oppsummeres som Dungey-syklusen, illustrert i figur 2.10 (Dungey 1961). Når IMF sin  $z$ -komponent er negativ får vi magnetisk fluksomkobling på dagsiden og en feltlinje åpner seg. Feltlinjen forflytter seg over polhetten til nattsiden, der den lagres i halen. Det skjer på nytt fluksomkobling, nå på nattsiden. IMF sin feltlinje fortsetter ut i rommet. Jordens feltlinje lukker seg og akselererer plasma, som beveger seg ned langs feltlinjen. En vakker konsekvens av dette er nordlys og sørllys, det øker også strømmene i ionosfæren. Den nå lukkede feltlinjen forflytter seg tilbake til dagsiden. Forflytting av feltlinjer setter opp et konveksjonssystem i og rundt polhetten.

## 2.4 Irregulariteter

Som forklart i delkapittel 2.1.5 kan plasma med tilgang på fri energi bli instabil. Dette kan føre til at amplituden på en bølge kan få en eksponentiell vekst, en instabilitet. Instabiliteter skaper irregulariteter. Her vil to typer instabiliteter som vi finner i ionosfæren presenteres, Kelvin-Helmholtz- og gradientdrift instabilitet. Flere instabiliteter finnes, men vil ikke bli redgjøres for her.

### 2.4.1 Kelvin-Helmholtz instabilitet

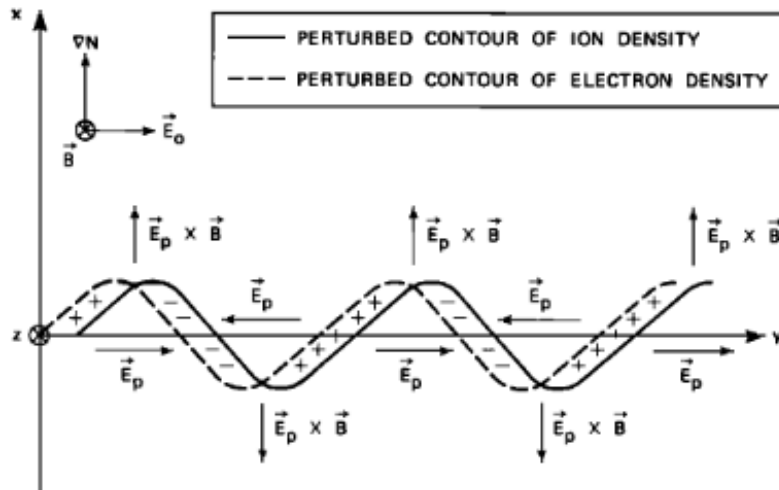
Når to fluider har forskjellig hastighet kan vi få Kelvin-Helmholtz instabilitet (KHI). Dette kan oppstå både i nøytrale gasser og i plasma. Energikilden er hastighetsskjæret som oppstår mellom de to fluidene (Pécsele 2013). Som illustrert i figur 2.11 gir KHI virvler. KHI kan oppstå i ionosfæren og er assosiert med aurora (Treumann og Baumjohann 2001).



Figur 2.11: Utviklingen av en KHI. Fra Keskinen med flere (1988).

### 2.4.2 Gradientdrift instabilitet

Når plasma har en tetthetsgradient i  $\mathbf{E}_0 \times \mathbf{B}$ -retning kan vi få en instabilitet. Dette er illustrert i figur 2.12. En liten pertubasjon på grensen mellom høy og lav tetthet vil ionene bevege seg i  $\mathbf{E}_0$ -retning. Dette gir en separasjon av ladningene og skaper elektriske felt  $\mathbf{E}_p$ . På den siden med høy tetthet vil  $\mathbf{E}_p$  være motsatt rettet av  $\mathbf{E}_0$ , men på andre siden vil de gå i samme retning.  $\mathbf{E}_p \times \mathbf{B}$ -drift vil bli slik at hvis  $\nabla N$  er positiv i  $\mathbf{E}_0 \times \mathbf{B}$ -retning vil pertubasjonen bli forsterket, hvis gradienten er negativ i  $\mathbf{E}_0 \times \mathbf{B}$ -retningen vil pertubasjonen bli dempet (Tsunoda 1988).



Figur 2.12: Illustrasjon av gradientdrift instabilitet. En pertubasjon gir en forskjellig tetthetsdistribusjon for ioner og elektroner. Dette setter opp nye elektriske felt  $\mathbf{E}_p$ . Fra Tsunoda (1988) .

## 2.5 Scintillasjoner

Scintillasjoner er hurtige fluktuasjoner i amplitude og fase til et radiosignal (Kintner, Ledvina og Paula 2007). Dette er et problem for nøyaktigheten og stabiliteten til GNSS-posisjonering, men gir mulighet til å studere irregulareteter. Irregulareteter i ionosfæren kan gi scintillasjoner.

### 2.5.1 GNSS

Global navigasjon satellitt system (GNSS) er samlebetegnelsen for systemer som amerikanske GPS, europeiske Galileo, russiske Glonass og kinesiske BeiDou. Det er konstellasjoner av satellitter som sender ut signaler med informasjon om tid og sted som mottageren bruker til å finne sin posisjon.

Ved å gange tiden det tok for signalet å komme seg fra satellitt til mottager med lyshastigheten kan vi finne pseudoavstanden. Denne avstanden fraviker den ekte avstanden på grunn av mange faktorer og kan beskrives av

$$R_p = \rho + c(dt_r - dt_s) + T + \alpha_f \text{STEC} + K_{P,r} - K_{P,s} + M_p + \epsilon_P. \quad (2.30)$$

$R_p$  er pseudoavstanden,  $\rho$  geometriske avstanden (den faktiske avstanden),  $c$  er lyshastigheten,  $dt_r$  og  $dt_s$  er klokkefeilen i mottaker og sender,  $T$  er troposfærisk forsinkelse,  $\alpha_f$  er en frekvensavhengig term og STEC er antall elektroner (nærmere beskrevet i delkapittel 2.5.4),  $K_{P,r}$ ,  $K_{P,s}$  er forsinkelser på grunn av selve senderen og mottageren,  $M_p$  er flerbane og  $\epsilon_P$  er mottakerstøy (Subirana, Zornoza og Hernández-Pajares 2011).

Enkel geometri viser at hvis avstanden og posisjonen til tre satellitter er kjent mottagerens posisjon kan beregnes. Siden alle signalene blir mottatt på samme mottager vil klokkefeilen være lik. Ved å inkludere en fjerde satellitt vil vi kunne eliminere klokkefeilen.

## 2.5.2 Scintillasjoner

Når en elektromagnetisk bølge går gjennom et medium blir det påvirket av mediumets brytningsindeks. Ionosfærens brytningsindeks er avhengig av elektrontettheten. Hvis det oppstår variasjoner i elektrontetthet vil bølgen utsettes for diffraksjon og refraksjon. Dette vil gi forstyrrelser i fase og amplitude.

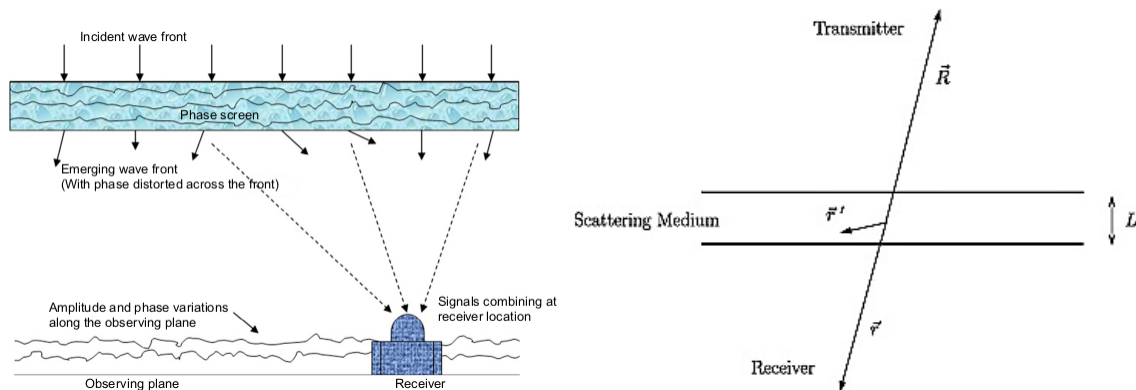
En vanlig modell for å forklare scintillasjoner på er fasenett-modellen (phase screen model). Denne antar at man har et tynt lag med irregulariteter som fungerer som et fasenett. Fasen blir forstyrret etter Huygens' prinsipp. Når bølgen da brer seg videre oppstår det scintillasjoner både i fase og amplitude (Kintner, Ledvina og Paula 2007), se figur 2.13.

Irregulariteter kan vi dele opp i små og store etter Fresnell-radiusen,

$$r_F = \sqrt{\lambda L}, \quad (2.31)$$

$\lambda$  er bølgelengden til signalet og  $L$  er tykkelsen på laget med irregularitet, se figur 2.13. Hvis størrelsen til irregularitetene er mindre enn  $r_F$  får vi både fase- og amplitudescintillasjoner, hvis den er større får vi bare forstyrrelse i fase (Petrovski og Tsujii 2012).

## 2.5. SCINTILLASJONER



Figur 2.13: Til venstre: Illustrasjon av effekten av et fasett. En plan bølge treffer laget med irregulareteter og blir bøyd. Resultatet er en tilfeldig faser hos mottakeren. Fra Acharya (2017). Til høyre: Illustrasjon av at  $L$  er tykkelsen til laget med irregulareteter. Fra Kintner, Ledvina og Paula (2007).

### 2.5.3 Scintillasjonsindekser

For å beskrive scintillasjoner i fase bruker vi indeksen  $\sigma_\phi$ .

$$\sigma_\phi = \sqrt{\langle \phi^2 \rangle - \langle \phi \rangle^2}. \quad (2.32)$$

Der  $\phi$  er detrendet bærefasen, som oftest over en periode på 60 sekunder.  $S_4$ -indeksen beskriver styrken på amplitudescintillasjoner.

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle P^2 \rangle - \langle P \rangle^2}{\langle P \rangle^2}} \quad (2.33)$$

Der  $P$  er styrken på signalet.  $S_4$  er standaraviket til  $P$ .

### 2.5.4 Totalt elektroninnhold (TEC)

Ionosfæren er et dispersivt medium, lyshastigheten derfor avhengi av bølgelengden. Totalt elektroninnhold (TEC) er definert som antall elektroner i en tube med en flate på  $1 \text{ m}^2$  mellom to punkt. Hvis to signaler med forskjellig frekvens sendes samtidig fra en satellitt vil de bli mottatt på forskjellig tidspunkt. Denne tidsforskjellen er avhengig

av elektroninnholdet, og man kan dermed regnet ut

$$TEC = \frac{R_1 - R_2}{40.3 \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)}, \quad (2.34)$$

her er  $R_1$  og  $R_2$  pseudoavstanden til hvert av signalene, og  $f_1$  og  $f_2$  frekvensen (Acharya 2017). Vi snakker ofte om STEC og VTEC. Der STEC er TEC for hele banen til signalet, mens VTEC er korigert for vinkelen. Totalt elektroninnhold måles i TECU, hvor 1 TECU er  $10^{16}$  elektroner.

### 2.5.5 ROT og ROTI

Rate of change of TEC (ROT) er et mål på hvor mye elektroninnholdet i ionosfæren endrer seg, ved irregularetter får vi høy ROT. Rate of TEC index (ROTI) er standard avviket til ROT og blir også brukt. TEC er beregnet av mottageren med metoden beskrevet i delkapittel 2.5.4. ROT(TECU/minutter) og ROTI er gitt ved (Jacobsen 2014):

$$R = R_1 - R_2 \quad (2.35)$$

$$ROT(i) = \frac{R(i) - R(i-1)}{\Delta t \times 40.3 \times 10^{16} \times \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)} \quad (2.36)$$

$$ROTI(i) = \sqrt{\left( \frac{1}{N} \sum_{j=i-N}^i (ROT(j) - \overline{ROT})^2 \right)}. \quad (2.37)$$

## 2.6 Tidligere arbeid

Det har vært flere klimatologiske studier av ionosfæren i Arktis, som har sett på forekomsten av fasescintillasjoner. Den etterhvert gode dekningen av scintillasjonsmottakere i arktiske strøk har gjort slike studier mulig.

Moen med flere (2013) brukte en scintillasjonsmottaker fra Ny-Ålesund på Svalbard (CGM 76.0°N, 112.3°Ø) som hadde en synsvinkel fra 70°N–83°N i magnetiske koordinater, dette området er i polhetten, polarkløften og den polvise grensen til auroraovalen.

## 2.6. TIDLIGERE ARBEID

---

Tidsserien var for oktober–desember 2003. De fant at det var oftest scintillasjoner i polarkløften og på grensen til auroraovalen rundt magnetisk midnatt, de fant også at det var oftere scintillasjoner når  $B_z$  var negativ.

Spogli med flere (2009) brukte fire scintillasjonsmottakere i Nord-Europa mellom Nottingham (CGM 54.8°N) i sør og Ny-Ålesund (76.0°N) i nord, med en tidsserie fra oktober–desember 2003. De fire mottakerene gav tilsammen en synsvinkel fra 45–83°N som tilsvarer polhetten, polarkløften, nordlysovalen og sør for nordlysovalen. De fant at det var høyere forekomst på dager med høy  $K_p$  enn med lav  $K_p$ . De områdene med mye scintillasjoner var polarkløften, inni auroraovalen før og etter midnatt og sør for auroraovalen eller midnatt.

Prikryl med flere (2015) brukte ti scintillasjonsmottakere i Nord-Amerika fordelt i polhetten, polkløften og auroraovalen, og en tidsserie fra 2008–2013. Polhetten og nattsiden av auroraovalen var de stedene de fant høyest forekomst av scintillasjoner. På dager med høy geomagnetisk aktivitet økte forekomsten lengre sør, etter midnatt var det høy forekomst av scintillasjoner sør for den statistiske auroraovalen. Solsyklusen påvirket forekomsten av scintillasjoner, i 2012 og 2013 var det vesentlig oftere scintillasjoner enn i 2010. Området med mye scintillasjoner var også større, og strakk seg lengre sør for den statistiske nordlysovalen. Studien viste sesongvariasjoner med høyest forekomst av scintillasjoner på nattsiden om vår og høst, og i polarkløften høyest forekomst om vinteren.

Jin, Moen og Miloch (2015) brukte scintillasjonsmottaker i Ny-Ålesund (CGM 76.0°N, 112.3°Ø) og tidsserie fra 2010–2013. De fant høyest forekomst av scintillasjoner i polkløften, deretter i auroraovalen rundt midnatt. Scintillasjonene var sterkest rundt midnatt.

For å oppsummere: Det er rapportert oftest scintillasjoner i polarkløften og i auroraovalen rundt midnatt. Etter postmidnatt forekommer det også scintillasjoner i subaurorale strøk. Ved  $B_z < 0$  eller med høy  $K_p$ -indeks øker forekomsten av scintillasjoner og utvider området med scintillasjoner i ekvatorialsk retning. Sesong gir en effekt i form av høyest forekomst av scintillasjoner på nattsiden vår og høst, og høyest forekomst i polarkløften om vinteren.



På den sørlige halvkule er det gjort færre klimatologiske studier med kortere tidsserier enn på den nordlige halvkule. Li med flere (2010) sammenlignet forekomsten av scintillasjoner i Ny-Ålesund på Svalbard (75.8°N CGM) og Larsemann Hills i Princess Elizabeth Land (74.6°S CGM), begge stasjonene varierer mellom å være i polarkløften og polhetten. Datagrunnlaget var august 2007-juli 2008 for Ny-Ålesund og mars til november 2007 for Larsemann Hills. De fant likhet i årstid, på begge plassene er det mest scintillasjoner om lokal vinter. Det var forskjell i når på døgnet det var høy forekomst av scintillasjoner, i Ny-Ålesund var det oftest i intervallene 08–13, 16–18 og 23–02 MLT, i Larsemann Hills forekom det oftest i tidsintervallene 05–12 og 18–23 MLT.

Alfonsi med flere (2011) sammenlignet forekomsten av scintillasjoner i Ny-Ålesund, Longyearbyen (CGM 74.7°N, 129.2°Ø) og Trondheim (CGM 63.0°N, 103.2°Ø) med Concordia Station (CGM 84.4°S, 222.6°Ø) og Mario Zucchelli Station (CGM 77.1°S, 275.9°Ø) i Antarktis. De tre stasjonene på den nordlige halvkule observerte tilsammen breddegrader innenfor polarkløften, polhetten, auroraovalen og subaurora, de to stasjonene i Antarktis observerte polarkløften og polhetten. Data fra år 2008 var brukt. De fant mye fasescintillasjoner i polarkløften på begge halvkulene.

Swarm satellittene er også blitt brukt til å sammenligne den polare ionosfæren på den nordlige og sørlige halvkule. Spicher med flere (2017) studerte forekomsten av polarskyer og brukte data fra desember 2013 til august 2016. De fant høyere forekomst av polarskyer i Antarktis enn i Arktis. På begge halvkulene var det mer polarskyer om vinteren enn om sommeren og sesong variasjonen var sterkere i Arktis. Ved  $B_y < 0$  var det på den nordlige halvkule flere polarskyer etter middag, ved  $B_y > 0$  var det flere før middag, denne effekten var motsatt på den sørlige halvkule.

Jin med flere (2019) brukte Swarm-satellitter til å studere elektrontetthet og dens variasjoner over Arktis og Antarktis, med en tidsserie fra 2014–2019. Denne studien viste at det er mest irregulareteter i polarkløften, polhetten og nattsiden av auroraovalen.  $B_y < 0$  gav i polarkløften og polhetten sterkere scintillasjoner før klokken 12 på den nordlige halvkule og etter klokken 12 på den sørlige halvkule, og vice versa. Det var sterkere og forskjellig sesongvariasjon i Antarktis enn i Arktis. I Antarktis var det sterkest irregulareteter i desember, i Arktis var irregularetetene sterkest fra april til september,

## 2.6. TIDLIGERE ARBEID

---

og svakest om sommeren. Studien fant også mer irregulariteter ved solmaksimum.

En kasusstudie (Prikryl med flere 2011) studerte flere konjugerte stasjoner under en geomagnetisk storm 5-7 April 2010, på denne tiden av året er det mer solinnstråling på den nordlige enn sørlige halvkule. De brukte DMSP-satellitter og scintillasjonsmottakere fra polarkløften, polhetten og auroraovalen. Det var partikkelnedbør inni polhetten på begge halvkulene samtidig, og dette førte til sterkere scintillasjoner i Antarktis enn i Arktis. I polarkløften og på nattsiden av auroraovalen observerte de scintillasjoner samtidig og av omtrent samme styrke.

Ngwira, McKinnell og Cilliers (2010) utførte tilsammen tre kasustudier i 2007 og 2008 hvor de studerte scintillasjoner på Sanae. De fant en sammenheng mellom scintillasjoner og partikkelnedbør som ble målt av DMSP. De fant også en sammenheng mellom substormer og scintillasjoner.

Satellittbilder av aurora har blitt brukt til å studere interhemisfæriske forskjeller. Østgaard med flere (2011) brukte bilder av aurora fra satellitter for å studere hvordan orienteringen til IMF påvirket plasseringen til nordlys og sørlys. De analyserte bilder fra mer enn 6600 substormer. Studien viser at  $B_y$ , og  $\theta_c$  (klokkevinkelen mellom  $B_z$  og  $B_y$ ) påvirker når på døgnet aurora oppstår, ved  $B_y < 0$  er substormen tidligere på kvelden på den nordlige halvkule enn på den sørlige og vice versa. Effekten til  $B_y$  er linjer frem til et vist styrke hvor den går i metning. Asymetrien mellom halvkulene er størst når  $\theta_c=90$  og  $\theta_c=270$ , altså når  $B_z = 0$ .

Laundal og Østgaard (2009) brukte bilder fra to satellitter som kunne observere plasseringen av aurora på begge halvkulene samtidig. De fant et tilfelle hvor plasseringen var helt asymmetrisk, i Arktis var det nordlys på morgensiden og over Antarktis på kveldssiden.

Denne gjennomgangen viser at det er vist både forskjeller og likheter mellom den nordlige og sørlige halvkule. Det meste av studiene på ionosfæren i Antarktis er enten fra bakke baserte instrumenter i polhetten og polarkløften, eller fra satellitter. I området rundt Troll og Sanae er det gjort en studie på ionosfæriske scintillasjoner som besto av kasusstudier, dette viser et behov for å ha flere studier av ionosfæren over Dronning Maud Land. Motivasjonen for denne oppgaven er å

få en statistisk kartlegging av forekomsten av scintillasjoner i dette området og forstå hva som er årsakene til irregulariteter i denne delen av ionosfæren.

# Kapittel 3

## Metode

I dette kapitlet vil jeg presentere metodene brukt i denne oppgaven. Først delen handler om instrumentene som er brukt og plasseringen av disse. Videre forklares det geomagnetiske indekser brukt i denne oppgaven, beregningen av auroraovalen og ionosfærisk gjennomboringspunkt. Scintillasjonsmottakerene på Troll og Sanae er de instrumentene jeg har brukt mest, støynivå og flerbaneeffekter for disse to instrumentene er derfor kartlagt. Til slutt kommer en forklaring på hvordan dager til kasusstudiene er valgt ut og fremgangsmåten for statistikkstudien.

### 3.1 Instrumenter

Flere forskjellige instrumenter er brukt i denne oppgaven, for å studere mengden scintillasjoner, hastighet på plasma, ionosfæriske strømmer og parametre i solvinden. Her er en kort presentasjon av instrumentene.

#### 3.1.1 GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor (GISTM)

GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor (GISTM), videre også kalt scintillasjonsmottakere, måler scintillasjoner på GNSS-signaler og TEC. I denne oppgaven er tre forskjellige

GISTM-modeller brukt: NovAtel GSV4004B, NovAtel GPStation-6 og Septentrio PolaRxS. Alle disse tre motakerene bruker 6. ordens Butterworth filtre for å etablere scintillasjonsindekser, høypassfilter for å beregne  $\sigma_\phi$  og lavpassfilter for å beregne  $S_4$ . Indeksene er beregnet over 60 sekunder.

GPStation-6 er brukt på Trollstasjonen og driftes av Universitetet i Oslo (UiO). Kartverket sine mottakere på Jan Mayen og Færøyene er av typen Septentrio PolaRxS. Mottakeren på Sanae som driftes av South African National Space Agency (SANSA) er GSV4004B. UiO og Kartverket sine mottakere kan motta GPS, Galileo og Glonass, mens den på Sanae tar kun inn GPS.

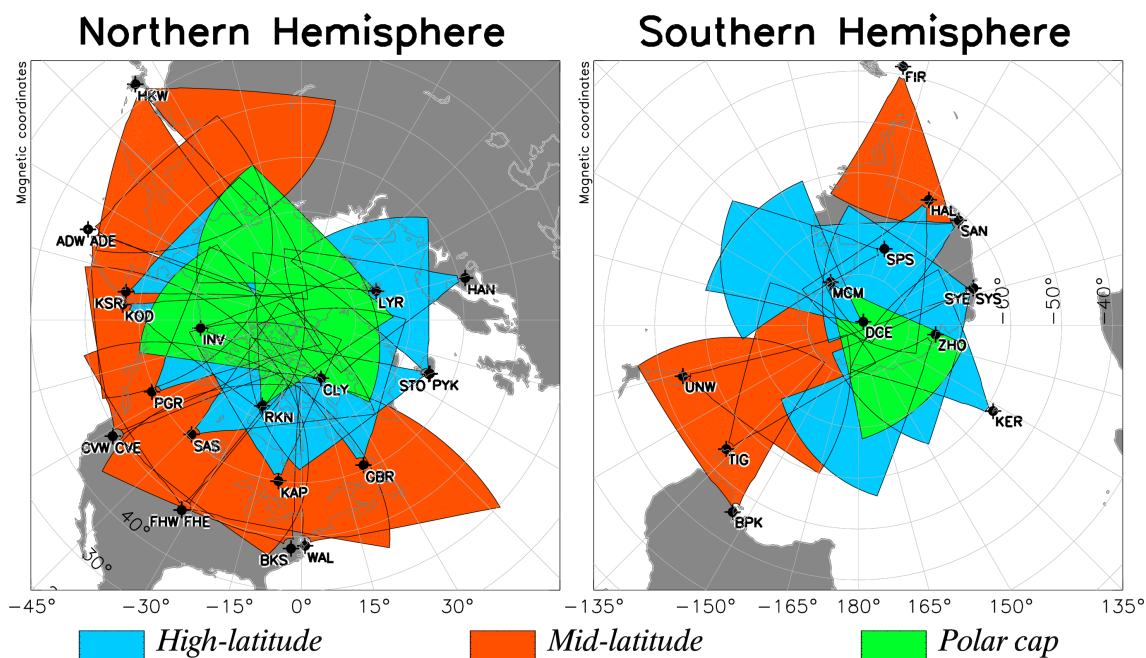
GNSS-systemene har flere frekvensbånd, i denne oppgaven er bare et bånd fra hvert system brukt: L1 fra GPS, E1 (1575.42 MHz) fra Galileo og L1 (1602 MHz). Ett bånd er nok for å studere scintillasjoner. De forskjellige båndene har forskjellige støynivå... Hva skal det brukes til?

### 3.1.2 Superdarn

Super Dual Auroral Radar Network (Superdarn) er et nettverk bestående av mer enn 30 høyfrekvensradarer fordelt på den nordlige- og sørlige halvkule. De er plassert på midlere breddegrader, høye breddegrader og inni polhetten. Figur 3.1 viser plassering og synsvinkel for radarene. Det er flere radarer og dermed bedre dekning i nord enn i sør.

Superdarn bruker Bragg-tilbakespredning og dopplerforskyvning av tilbakekommende signaler til å måle hastigheten til plasma i ionosfæren. For at signalet fra radaren skal motta tilbakespredning må det være ionosfæriske irregulariteter (Greenwald med flere 1995). Superdarn gir oss derfor indirekte informasjon om mengden av irregulariteter, av størreleseorden, i ionosfæren og hastigheten til disse. Mye tilbakespredning gir mange målinger og tilsier en irregulær ionosfære.

Ut fra Superdarn målingene kan det tilpasses konveksjonsceller og disse skal brukes til å analysere kasustudier. I tillegg vil hastighetsmålinger fra Superdarnradaren på Sanae bli brukt til å forstå den lokale dynamikken i kasustudiene.



Figur 3.1: Dekningskart for Superdarn for den nordlige og sørlige halvkule. Fargene på kartet viser hvilken breddegrad radaren befinner seg på. Blå er høye breddegrader, oransje midlere breddegrader og grønn er i polhetten. Fra Virginia Tech SuperDARN.

### 3.1.3 Magnetometer

Som beskrevet i delkapittel 2.3.3 genererer strømmer i ionosfæren et magnetfelt. Feltet til de horisontale strømmene kan man måle med et magnetometer på bakken.

Magnetometeret måler vanligvis magnetfeltet i tre akser: X-, Y- og Z-retting. X er nord, Y er øst og Z er vertikalt ned (Brekke 2012). Det brukes forskjellige koordinatsystemer, men jeg bruker H, D og Z. H er den horisontale komponenten, D er vinkelen mellom det målte magnetfeltet og retningen til geografisk nord. Forholdet mellom H, D og X, Y er:

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (3.1)$$

$$D = \arctan(Y/X). \quad (3.2)$$

Fordi endringen av magnetfeltet er av interesse er normalverdien trukket fra i de presenterte målingene. Dataene er levert uten målenøyaktighet. I denne studien er dette ikke et vesentlig problem

fordi det er de store utslagene jeg er interessert i for å identifisere geomagnetiske fenomener som foreksempel elektrojet økning.

### 3.1.4 Omni

Solvinddata brukt i denne oppgaven er fra NASA sin OMNIWeb Service (Omni). Satellittene ACE og Dscovr blir brukt til å levere solvinddata (“SPDF - OMNIWeb Service” 2020). De er plassert i nærheten av Lagrange-punkt 1 mellom solen og jorden. I dette punktet er en satellitt i likevekt mellom jorden og solen, og vil bli værende i dette punktet. Mellom jorden og Lagrange-punkt 1 er det en avstand på 1.5 millioner km, solvinden bruker omlag en time på denne distansen. Tidspunktet oppgitt i OMNI dataene er tidspunktet det antas at solvinden når magnetopausen (King og Papitashvili 2020).

Koordinatsystemet brukt er geocentric solar ecliptic (GSE). Dette har  $x$ -komponent rettet mot solen sett fra jorden,  $y$ -komponenten går fra vest til øst sett fra solen og  $z$ -komponenten nordover perpendikulært på det elliptiske planet (Russell, Luhmann og Strangeway 2016). I denne oppgaven er parametrene hastighet, tetthet, temperatur, magnetfelt og AE-indeks hentet fra Omni. Disse dataene skal brukes til å vise sammenhengen mellom solvinden og ionsosfæren i kasustudiene. Som forklart i teori (referanse) har forholdene i solvinden stor påvirkningskraft på dynamikken i ionosfæren.

### 3.1.5 Swarm

Swarm er en satellittkonstellasjon bestående av tre satellitter, Swarm A, B og C. De går i en nær polarbane. A og C har en initial banehøyde på 462 km, B har en initial banehøyde på 511 km. Dette er i F-laget til ionosfæren. A og C går i baner nær hverandre, mens B går i en perpendikulær bane til de to andre satellittene (ESA 2020b). Langmuir-sonder på Swarm-satellittene er brukt til å måle elektrontettheten, elektrontemperaturen og satellitten sitt elektriske potensial (ESA 2020a). I denne oppgaven er elektrontetthet fra Swarm brukt til å studere strukturer over i ionosfæren over Dronning Mauds Land.

### 3.1.6 DMSP

Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) er en satellittkonstellasjon med mange instrumenter både til meteorologisk og Special Sensor Ionospheric Plasma Drift/Scintillation Monitor (SSI/ES-2). Jeg har brukt data fra SSI/ES-instrumentet som består av en Langmuir-sonde og en ionesensor. SSI/ES gir informasjon om ione- og elektrontetthet, ione- og elektrontemperatur og molekylvekt (Kramer, udatert).

Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager (SSUSI) tar bilde av forskjellige UV-bølgelengder, disse er assosiert med aurora (Knight med flere 2008). I kasustudiene er SSUSI brukt til å identifisere plasseringen til auroraovalen og intensiteten til aurora.

## 3.2 Stasjoner

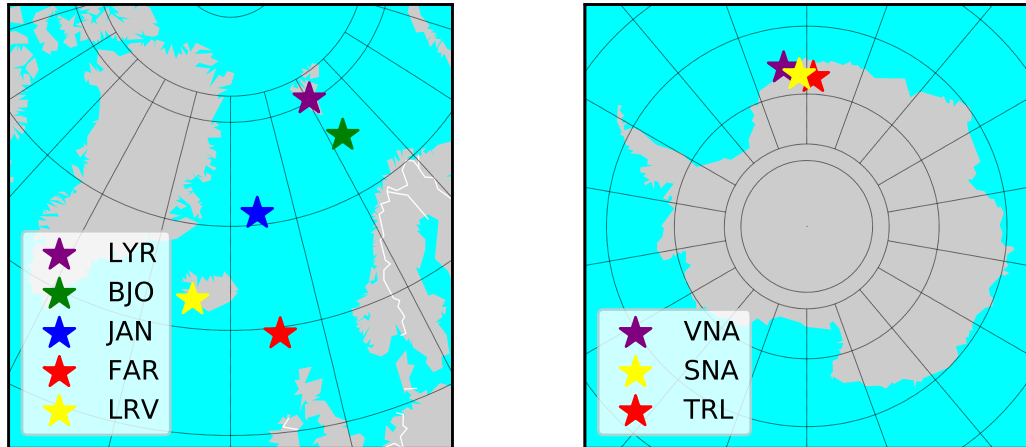
I denne oppgaven har jeg brukt instrumenter fra flere steder. Tabell 3.1 gir en oversikt over hvilke instrumenter som er brukt og deres magnetiske lokaltid (MLT), geografiske og magnetiske koordinater. Figur 3.2 er et kart over stasjonenes plassering.

Tilgang på data har vært en utfordring i arbeidet med oppgaven. Flere mottakere i polare strøk er avsidesliggende og har flere praktiske utfordringer ved henting av data. Mottakeren på Troll ble satt opp i desember 2017 og data hentes kun ut en gang i året. Derfor var bare data fra 2018 tilgjengelig. Jeg skulle gjerne hatt med stasjoner fra østsiden av Grønland, men der hentes også data sjeldent og kunne ikke inkluderes innenfor tidsrammen til denne oppgaven. Stasjonene fra den nordlige halvkule ligger derfor lengre magnetisk øst enn stasjonene fra den sørlige halvkule.

## 3.3 Geomagnetiske indekser

For å kvantifisere magnetiske forstyrrelser kan man bruke forskjellige indekser. Å bruke flere magnetometere gir et større bilde av de geomagnetiske forholdene. Jeg har brukt AE-, Dst- og Kp-indeks.





Figur 3.2: Kart over geografisk plassering av stasjoner. 3.2a viser nordlige stasjoner: Longyearbyen (LYR), Bjørnøya (BJO), Jan Mayen (JAN), Leirvogur (LRV) på Island og Færøyene (FAR). 3.2b viser Neumayer (VNA), Sanae (SNA) og Troll (TRL)

Tabell 3.1: Geografiske og magnetiske koordinater for stasjoner, de magnetiske koordinatene er gitt i AACGM med 0 i altitude. MLT er gitt utifra 00:00 UT. Stasjonene er Longyearbyen (LYR), Bjørnøya (BJN), Jan Mayen (JAN), Leirvogur (LRV) på Island, Færøyene (FAR), Hov på Færøyene (HOV), Neumayer (VNA) og Sanae (SNA).  $\phi$  og  $\lambda$  er bredde og lengdegrad for geografiske og magnetiske koordinater.

Stasjon	$\phi_g$	$\lambda_g$	$\phi_m$	$\lambda_m$	MLT	Instrumenter
LYR	78.2	15.83	75.6	108.4	2.2	Magnetometer
BJN	74.5	19.0	71.7	105.6	2.0	Magnetometer
JAN	70.9	-8.7	69.9	80.4	0.3	Magnetometer GISTM
LRV	64.2	-21.7	64.1	64.5	23.0	Magnetometer
FAR	61.8	-6.8	59.9	75.5	23.7	GISTM
HOV	61.5	-7.0	59.5	75.8	0.0	Magnetometer
VNA	-70.7	-8.3	-60.6	42.5	21.7	Magnetometer
SNA	-71.7	-2.8	-62.0	45.0	21.9	Magnetometer GISTM
TRL	-72.0	2.5	-62.8	47.8	22.1	Superdarn GISTM

### 3.3. GEOMAGNETISKE INDEKSER

---

Indeksene identifiserer ulike strømmer i ionosfæren, se mer om strømmene i delkapittel 2.3.3.

#### 3.3.1 AE, AU og AL

Auroral elektrojet-indeksen (AE) måler som navnet tilsier de aurorale elektrojetene. AU (auroral upper) måler de østgående og AL (auroral lower) de vestgående. Sterke elektrojetter gir høy AE-indeks.

AE-, AU- og AL-indeksen baserer seg på målinger fra 12 magnetometere plassert  $60^{\circ}$ - $71^{\circ}$  nord i magnetiske kordinater, med en avstand i lengdegrader mellom  $10^{\circ}$  og  $46^{\circ}$  (WDC for Geomagnetism, Kyoto). Man måler magnetfeltets H-komponent og tar differansen med  $H_0$  som er referanseverdien til stasjonen. AU er den øvre innhyllingskurven, feltstyrken hos den stasjonen som måler den høyeste verdien. AL er den nedre innhyllingskurven, den laveste feltstyrken. AE er differansen mellom AU og AL. Indeksene kan matematisk beskrives slik (Baumjohann og Treumann 2006):

$$AU(t) = \max_{i=1,12} \{H(t) - H_0(t)\}_i \quad (3.3)$$

$$AL(t) = \min_{i=1,12} \{H(t) - H_0(t)\}_i \quad (3.4)$$

$$AE(t) = AU(t) - AL(t) \quad (3.5)$$

Her er  $H(t)$  den målte feltstyrken og  $H_0(t)$  er stasjonens referanseverdi.

#### 3.3.2 Disturbance Storm Time Index (Dst-indeks)

Disturbance Storm Time Index (Dst-indeks) er brukt for å anslå styrken på ringstømmen, som er vestgående og svekker magnetfeltet rundt ekvator. Indeksen blir ofte brukt for å kvantifisere en geomagnetisk storm. Fire magnetometere rundt ekvator fra  $34.40^{\circ}$  sør til  $36.23^{\circ}$  nord blir brukt (Sugiura og Kamei 1991). Indeksen blir utregnet slik:

$$\text{Dst}(t) = \frac{1}{16} \left[ \sum_{i=1}^4 \cos \lambda_i \right] \left[ \sum_{i=1}^4 \{H(t) - H_0(t') - H_{sq}(t')\}_i \right] \quad (3.6)$$

(Baumjohann og Treumann 2006). Her er  $\lambda$  stasjonens breddegrad,  $H$  gjennomsnittlig  $H$ -komponent over en time,  $H_0$  referanseverdien,  $H_{sq}$  magnetfeltet til sq-strømmene skapt av tidebevegelsene til atmosfæren og  $t'$  er lokaltid.

Selv om Dst indeksen er ment for å måle ringstrømmen blir den også påvirket av magnetopausestrømmen, den delvise ringstrømmen, og substorm current wedge. Bidraget fra magnetopausestrømmen er positivt, derfor hender det at Dst-indeksen øker i forkant av en storm (Baumjohann og Treumann 2006).

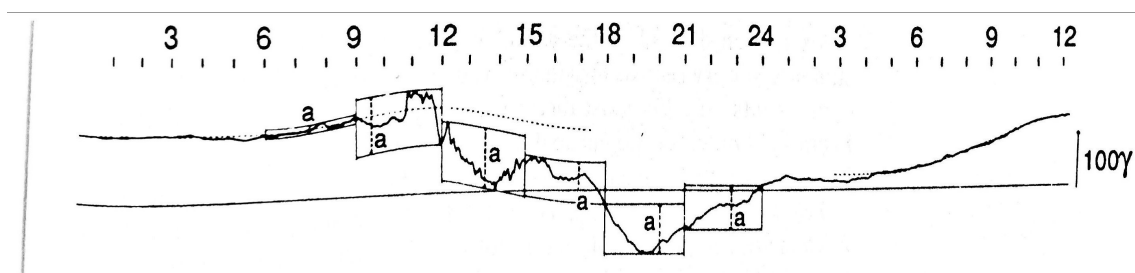
### 3.3.3 Kp

Kp-indeksen er designet for å måle partikkelstrålingen fra solen ved å se på endringer i magnetfeltet. I dag brukes den for å angi mengden energi overført fra solvinden til jorden (Geosciences, udatert).

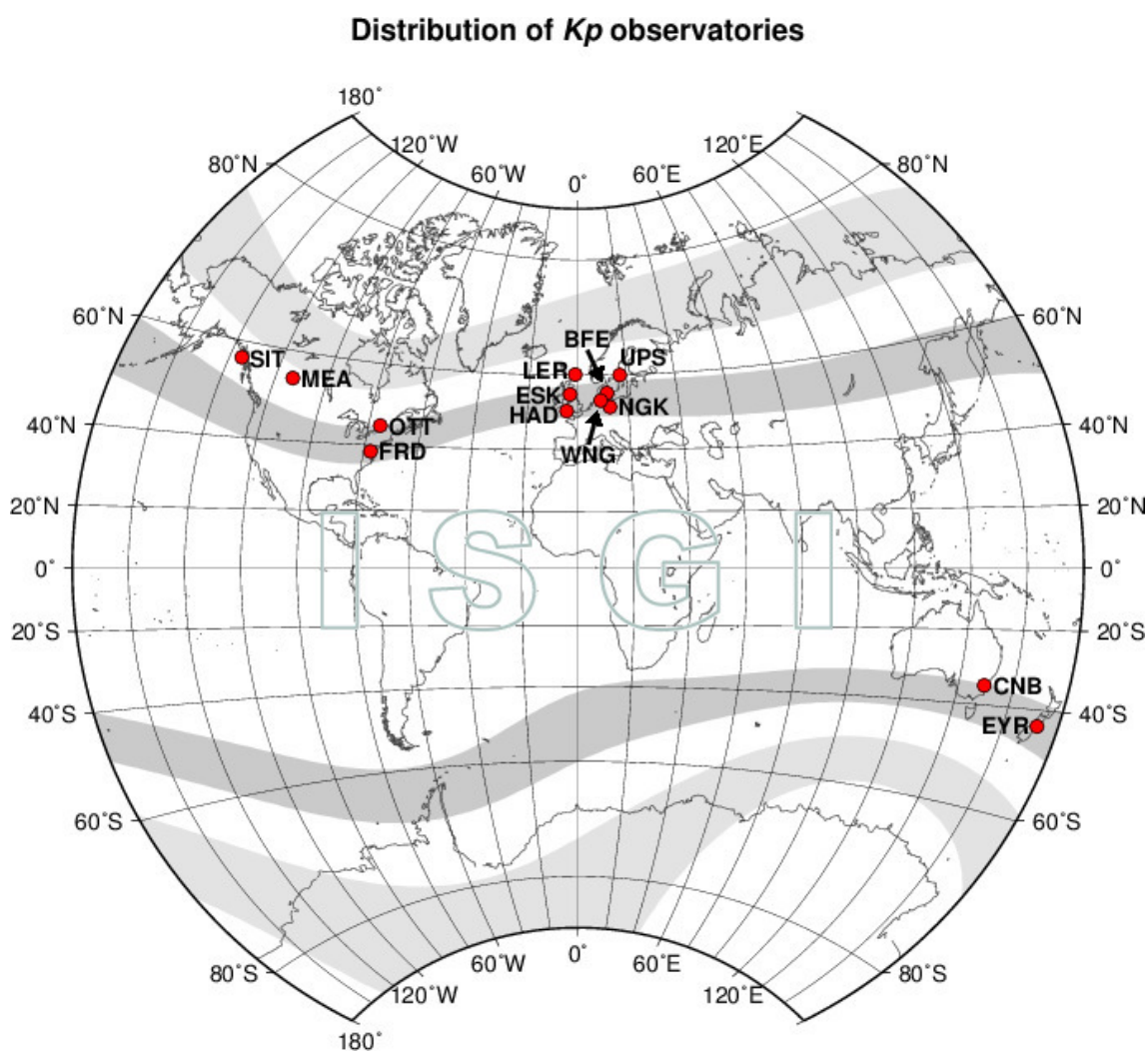
For å regne ut Kp-indeksen bruker man 13 stasjoner. Først fastsettes det K-indeksen for hver av stasjonene påfølgende måte: innfor et tretimersintervall blir den maksimale og minimale verdien til H- og D-komponenten plukket ut. For begge komponentene blir  $a = \max - \min$  regnet ut, se figur 3.3. Den av H og D som har størst  $a$  blir brukt videre. Utifra en kvasilogaritmisk tabell spesifikk for stasjonen blir K-indeksen satt (Bartels 1957). Kp-indeksen (planetary K index) blir beregnet utifra K-indeksen til de 13 stasjonene. Skalaen går fra 0–9, hvor 0 er veldig lav geomagnetisk aktivitet og 9 er veldig høy aktivitet.

En økt Kp er enten en økning i aurale elektrojetter eller at auroraovalen beveger seg mot ekvator (Rostoker 1972). Figur 3.4 viser stasjonenes plassering. Kun to stasjoner er plassert på den sørlige halvkule, resten er fordelt i Europa og Nord-Amerika. Indeksen er derfor mer sensitiv til aktivitet i de områdene i nord.

### 3.3. GEOMAGNETISKE INDEKSER



Figur 3.3: Illustrasjon av hvordan  $a$  som blir brukt i utregningen av  $K_p$ -indeksen er fastsettes. H-komponenten til magnetfeltet som funksjon av tid, som blir delt opp i tretimersintervaller.  $a$  er forskjellen på høyeste og laveste magnetfeltstyrke innenfor et slikt intervall. Fra McPherron (1995).



Figur 3.4: Kart over hvor stasjoner som blir brukt til utregning av  $K_p$ , markert med rød prikk. Fra "ISGI - International Service of Geomagnetic Indices" 2020.

## 3.4 Utregninger og valg

### 3.4.1 Feldstein-ovalen

For å beregne plasseringen til auroaovalen har jeg brukt Feldstein-ovalen (Holzworth og Meng 1975). Denne modellen bruker Kp-indeksen og magnetisk lokaltid for å anslå grensene for polar og ekvatorialske retning.

Modellen er basert på observasjoner på den nordlige halvkule. Bond og Thomas (1971) beskriver at Feldstein-ovalen passer også bra på den sørlige halvkule for lave Kp-verdier, men for verdier over Kp 5 er auroaovalen breiere i sør.

### 3.4.2 Magnetiske koordinater

For magnetiske koordinater har jeg brukt modellen Altitude Adjustment Corrected Geomagnetic (AACGM), utregnet med bruk av python biblioteket `aacgm2.py` (Burrell, Meeren og Laundal 2019). Ved en høyde på mer enn 0 vil AACGM følge feltlinjen ned til jordoverflaten (Shepherd 2014). Koeffisientene i modellen tar hensyn til endringer i jordens magnetfelt og blir derfor jevnlig oppdatert.

### 3.4.3 Ionosfærisk gjennomboringspunkt

Som forklart i delkapittel 2.5.2 er fasenett-modellen en vanlig forklaringsmodell på scintillasjoner; en antagelse om at et tynt lag med irregulariteter er årsaken til scintillasjoner. Ionosfærisk gjennomboringspunkt (IPP) er det punktet hvor signalet fra satellitten treffer dette laget. Høyden til fasenettet varierer, men det er vanlig å bruke 350 km for IPP (REFERANSE). I denne oppgaven er 350 km brukt, denne høyden er også brukt i utregning av AACGM.

Den geografiske breddegraden ( $\phi_{ip}$ ) og lengdegraden ( $\lambda_{ip}$ ) til IPP er

gitt ved:

$$\phi_{ip} = \sin^{-1} [\sin(\phi_r) \cos(\psi) + \cos(\phi_r) \sin(\psi) \cos(Az)] \quad (3.7)$$

$$\lambda_{ip} = \lambda_r + \sin^{-1} \left[ \frac{\sin(\psi) \sin(Az)}{\cos(\psi_{pi})} \right] \quad (3.8)$$

$$\psi = \frac{\pi}{2} - El - \sin^{-1} \left[ \frac{r_e}{r_e + h_{ip}} \cos(El) \right]. \quad (3.9)$$

Her er  $\phi_r$  og  $\lambda_r$  henholdsvis bredde- og lengdegraden til mottakeren.  $Az$  er asimut og  $El$  er elevasjonen mellom satellitt og mottaker.  $r_e$  er radiusen til jorden og  $h_{ip}$  er høyden til gjennomboringspunktet (Prol, Camargo og Muella 2017).

## 3.5 Støyanalyse

For å se hva som er støy fra mottakeren og hva som er scintillasjoner har jeg analysert forekomsten av forskjellige  $\sigma_\phi$ - og  $S_4$ -verdier. De er presentert som histogram i figur 3.5. For å se hvordan grensevinkelen påvirker verdien er analysen gjort for grensevinklene  $20^\circ$  og  $30^\circ$ , dvs. data er samlet henholdsvis for elevasjonsvinkel  $el_j 20^\circ$  og  $el_j 30^\circ$ . Tidspunkt med  $Kp \leq 1$  er fjernet slik at ikke geomagnetisk aktivitet skal påvirke resultatene.

For  $\sigma_\phi$  med en grensevinkel på  $30^\circ$  på Sanae er det flest målinger mellom 0.03 og 0.06 rad. Rundt 70% av målingene er i det intervallet. Ved å endre grensevinkelen til  $20^\circ$  blir grafen flatere, dette vil si at en større andel av målingene har høye verdier.  $S_4$  er litt spissere, nærmere 80% av målingene er mellom 0.03 og 0.06 med  $30^\circ$  som vinkel. Også for  $S_4$  er spredningen i verdier større ved å redusere vinkelen til  $20^\circ$ .

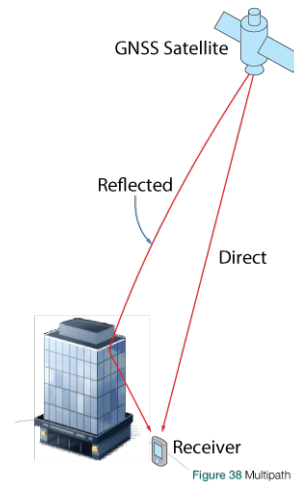
I figur 3.5b vises spredningen i scintillasjonsnivåer hos mottakeren på Troll. Over 90% av  $\sigma_\phi$ -målingene er mellom 0.11 og 0.13 rad, med en grensevinkel på  $30^\circ$ . Dette er en spissere topp enn tilsvarende for Sanae, men sentrert rundt en høyere scintillasjonsverdi. Også for Troll er det forskjell på en grensevinkel på  $20^\circ$  og  $30^\circ$ , for  $20^\circ$  er kurven er lavere og bredere.  $S_4$  har større spredning på målingene enn  $\sigma_\phi$ , og typetall på 0.06. Spredningen igjen øker ved å redusere grensevinkelen til  $20^\circ$ .

Utifra denne analyse ser vi at ved  $el_j 30$  reduseres støynivået,

grenseverdiene diskuteres nærmere i flerbane-kapittelet. Forskjellen i støynivået mellom Troll og Sanae kan knyttes til forskjellig mottakertype (REFERANSE). Verdier under 0.15 både for  $\sigma_\phi$  og  $S_4$  kan bli påvirket av støy.

### 3.5.1 Flerbane

Når signalet reflekteres av objekter i omgivelsene oppstår det interferens. Signalet får da flere baner mellom sender og mottaker (“Multipath - Navipedia” 2020), som illustrert i figur 3.6. Dette vil gi utslag på en scintillasjonsmottaker. Når man bruker scintillasjoner for å studere ionosfæren er det ønskelig å fjerne flerbaneeffekter. Dette gjøres ved å utelate lave elevasjonsvinkler. Her er det en avveining, man ønsker å unngå flerbane, men samtidig ha størst mulig synsvinkel for å kunne samle mye data.

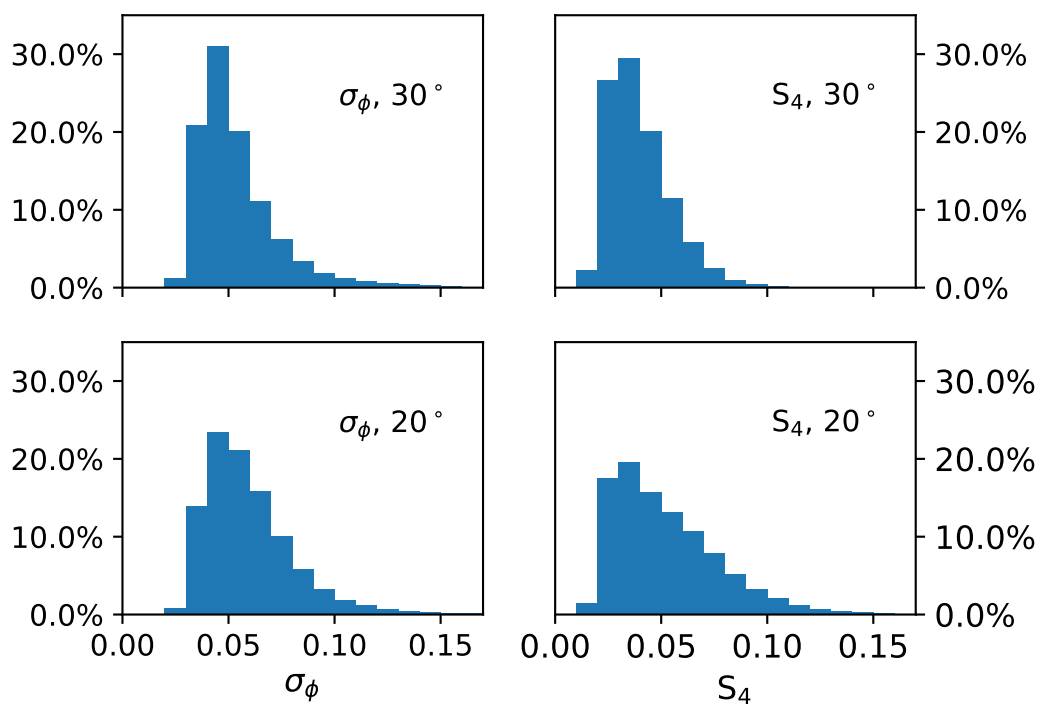


Figur 3.6: Illustrasjon av flerbane. Signalet fra satellitten har en direkte bane og en som reflekteres av bygningen. Fra Novatel.

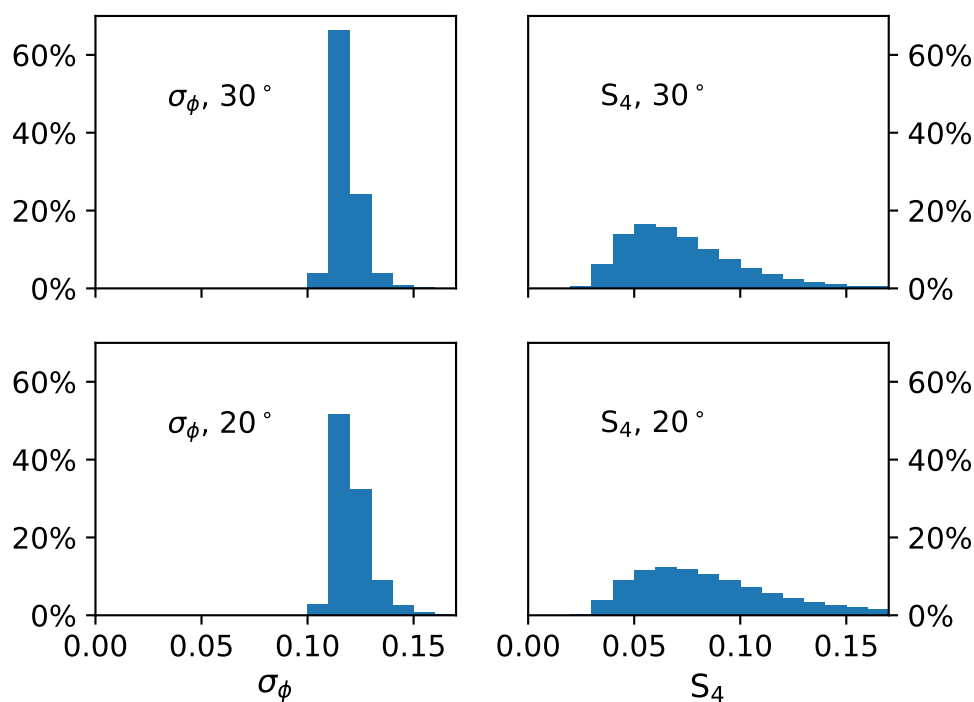
For å analysere flerbane over Troll og Sanae blir alle målingene plassert etter elevasjon og asimut i en matrise med størrelse  $90 \times 360$ . Innenfor hver rute er gjennomsnittsverdien regnet ut. Det er mer scintillasjoner når det er høy geomagnetisk aktivitet, jeg har derfor kun brukt målinger når  $K_p \leq 1$  for å redusere scintillasjoner grunnet irregulareteter i ionosfæren knyttet til større geomagnetisk aktivitet.

I fremstillingen av resultater er normale gjennomsnittsverdier fjernet for å tydeliggjøre områder med høy grad av forstyrrelse. Grensen for hva som er normalt er satt utifra støyanalysen i figur 3.5 presentert i delkapittel 3.5. For begge scintillasjonindekser på Troll var kun en liten prosentandel av målingene over 0.14 og for Sanae over 0.1.

Figur 3.7 viser resultatet for Troll. Omtrent alle asimutvinkler  $\alpha$ , har forstyrrelser opp til en elevasjon på  $20^\circ$ . Det er både amplitude- og



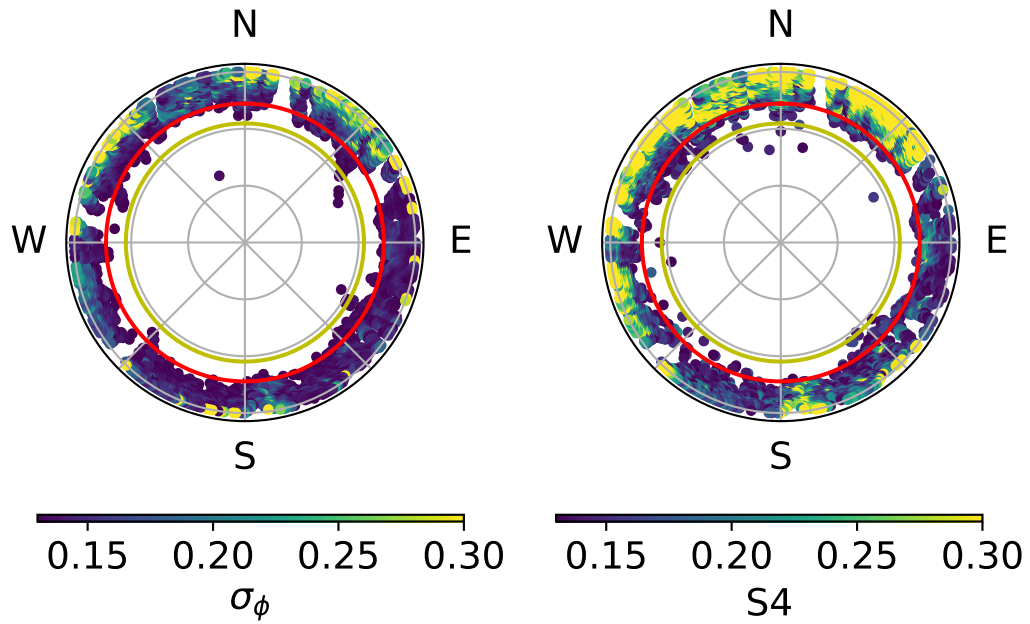
(a)



(b)

Figur 3.5: Histogram av  $\sigma_\phi$  til venstre og  $S_4$  til høyre for Sanae (a) og Troll (b). Kun data hvor  $K_p \leq 1$ . Gradene er grensevinkel brukt for analysen.





Figur 3.7: Gjennomsnittlige scintillasjonsnivå for mottageren på Troll. Fasescintillasjoner til venstre ( $\sigma_\phi$ ) og amplitudescintillasjoner (S4) til høyre. Den røde linjen viser  $20^\circ$  elevasjon og den gule linjen  $30^\circ$  elevasjon. Gjennomsnittsverdier under 0.14 rad og 0.14 S4 er fjernet.

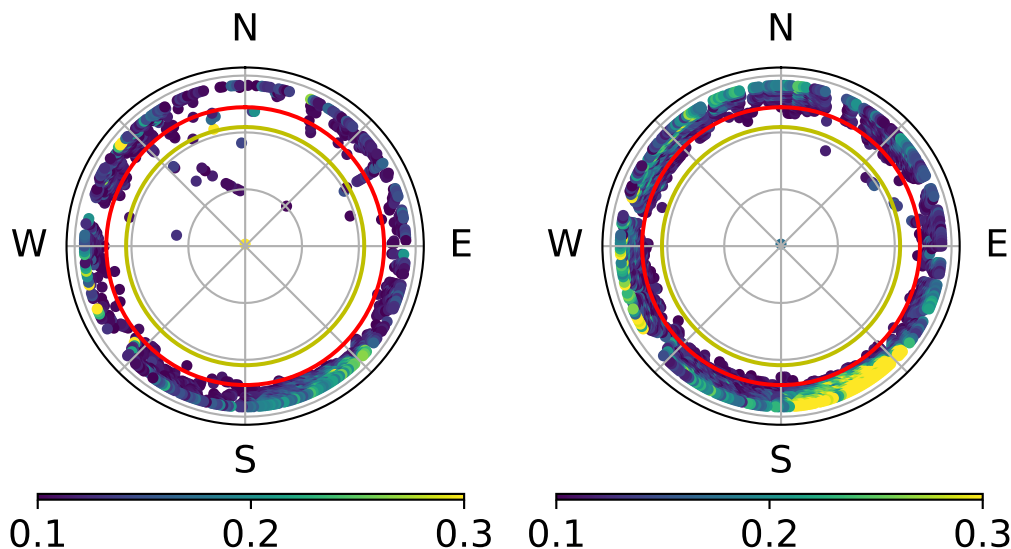


Figur 3.8: Panoramabilde tatt fra taket antennen til scintillasjonsmottakeren står på. Bildet er sentrert mot nord.

fasescintillasjoner helt opp til  $el=30^\circ$ , men det er få punkter over  $el=30^\circ$ . Det sterkere amplitudescintillasjoner enn fasescintillasjoner.  $\alpha \in (315^\circ, 360^\circ)$  og  $\alpha \in (0^\circ, 45^\circ)$  er det sterke forstyrrelser. I øst er det svake forstyrrelser. For  $\alpha \in (135^\circ, 180^\circ)$  er det en del amplitudescintillasjoner, men ikke fasescintillasjoner. Rett sør er det forstyrrelser på begge. For  $\alpha \in (180^\circ, 225^\circ)$  er det svake scintillasjoner og litt høyere for  $\alpha \in (225^\circ, 315^\circ)$ .

Et panoramabilde over omgivelsene til Trollmottakeren er vist i figur 3.7. Bildet er sentrert mot nord. I nordvest, vest og i sør-sørøst er det radomer. I øst er det en antenne. Disse objektene sine posisjoner stemmer overens med områdene med høye gjennomsnittsnivåer av scintillasjoner, og objektene skaper flerbanelforstyrrelser.

Scintillasjonene på Sanae er vist i figur 3.9. Det er generelt mindre



Figur 3.9: Gjennomsnittlig scintillasjonsnivåer for mottageren på Sanae. Fasescintillasjoner til venstre og amplitudescintillasjoner til høyre. Den røde linjen viser  $20^\circ$  elevasjon og den grønne linjen  $30^\circ$  elevasjon. Gjennomsnittsverdier under 0.1 rad og 0.1  $S_4$  er fjernet.

forstyrrelser på Sanae enn på Troll. Fasescintillasjonene går generelt opp til  $el=20^\circ$ . Noen punkter går litt over, men få opp mot  $el=30^\circ$ .  $el=30^\circ$  er det veldig få punkter.  $\alpha \in (135^\circ, 180^\circ)$  er de sterkeste forstyrrelsene. Amplitudescintillasjonene er generelt sterkere. Flere punkter krysser  $el=20^\circ$  linjen og flere nærmer seg  $30^\circ$  enn for fasescintillasjonene. Også for  $S_4$  er det sterke forstyrrelser for  $\alpha \in (135^\circ, 180^\circ)$ . Det er også noe forstyrrelser i vest. For en detaljert beskrivelse av kilder til flerbane på Sanae se Atilaw, Cilliers og Martinez (2017).

Som sagt er grenseelevasjon en avveining mellom å få mest mulig data og minst mulig ikke-ionosfærisk støy. Det er utfordrene å skille mellom ionosfærisk og ikke-ionosfærisk støy. Lave elevasjoner går gjennom mer ionosfære og kan få høyere gjennomsnittsnivåer uten at det skyldes flerbane. I metoden må man velge en grense for akseptable gjennomsnittsnivåer. Atilaw, Cilliers og Martinez (2017) valgte en grense på 0.2 rad som akseptable scintillasjonsnivåer, og valgte en varierende elevasjonsgrense utifra asimut. Jeg har valgt en konservativ tilnærming og ønsket at områdets gjennomsnittsnivå skulle være under 0.1 for Sanae og 0.14 for Troll, og bruker derfor  $el=30^\circ$  for begge stasjonene. Dette er for å forsikre meg at statistikken jeg senere presenterer ikke er forurenset av flerbane. Delkapittel 3.5 viser at fordelingen endrer seg ved valg av  $el=30^\circ$  kontra  $el=20^\circ$ .

## 3.6 Valg av dager til kasusstudie

Det flere faktorer som har spilt inn på valg av dager til kasustudier. Mottageren på Troll ble satt opp i slutten av desember 2017, og derfor kun dager fra 2018 var aktuelle. Grunnet sluttfasen av solsyklusen (beskrevet i delkapittel ref) var det få dager med mye geomagnetisk aktivitet dette året.

Utgangspunktet var scintillasjonsdata fra Troll og dager med mye fasesintillasjoner der. Videre ble dager med  $K_p \geq 4$  plukket ut. Ikke alle instrumentene har data tilgjengelig alle dager. Scintillasjonsmøtakerene på Troll, Sanae og Færøyene måtte være tilgjengelig, det samme med magnetometrene og Superdarn. Av de dagene som oppfylte disse kriteriene ble de to periodene 26.–27. februar og 18.–19. mars 2018 valgt for detaljert analyse.

## 3.7 Statistikk

Statistikkstudien har som målsetning å studere forekomsten av fasescintillasjoner på Troll og Sanae, og å se hvordan endring i geomagnetisk aktivitet påvirker forekomsten. Siden i tidligere arbeid var det brukt en grense på 0.25 rad for betydlige scintillasjoner, for eksempel Moen med flere (2013), Alfonsi med flere (2011) og Spogli med flere (2009), jeg valgt å bruke den samme grensen.

Jeg har sett på scintillasjoner på L1 GPS-signaler, i 2018. På grunn av lite amplitudescintillasjoner både i aurorale og subaurorale strøk er kun fasescintillasjoner presentert (Spogli med flere 2009). Mengden på scintillasjoner i amplitude er i mine data også betydelig mindre enn fasescintillasjoner. Målinger for  $el;30^\circ$  er fjernet for å unngå flerbane. Målinger med en gitt  $K_p$  er plukket ut. Ionosfærisk gjennomføringspunkt er kalkulert for alle målingene og er omregnet til magnetiske koordinater og MLT. De er så delt opp i en matrise etter lengdegrad og MLT. En rute er en lengdegrad høy og en time bred etter hele tall, for eksempel  $65.3^\circ$  blir 65 og 23.4 MLT blir 23. Antall målinger over 0.25 rad og målinger totalt blir telt opp for hver rute; og gjennomsnittet blir regnet ut.

Flere dager fra Sanae er fjernet på grunn av høye scintillasjonsverdier

### 3.7. STATISTIKK

---

Tabell 3.2: Tabell over antall dager med Kp 4 og Kp 6 i 2018. Øverste linje er tretimersintervallene for Kp-indeksen i UT. For Kp 4 er antall dager som tilsvarer disse tidsintervall. For Kp 6 er det skrevet dager som tilsvarer disse tidsintervall

Tid	00–03	03–06	06–09	09–12	12–15	15–18	18–21	21–00
Kp 4	25	26	7	8	12	11	16	24
Kp 6	06/5 26/8	5/11	20/4 11/9	20/4 11/9		26/8 27/8		18/3

på alle satellitter over en hel dag, disse høye målingene ble ikke observert på Troll. Dette ser ut til å være forstyrrelser grunnet midlertidige endringer i antennens omgivelser og ikke ionosfæriske irregulareteter. Det er ikke foretatt noe systematisk søk etter slike avvik, det kan derfor ikke garanteres at det er flere avvik som burde ha vært fjernet fra statistikken.

#### 3.7.1 Antall dager med Kp

Tabell 3.2 viser antall dager med Kp 4 og Kp 6 innenfor tretimersintervaller i 2018. For Kp 4 er bare antallet dager vist, mens for Kp 6 er datoer presentert. Det høyeste antall Kp 4 innenfor et tidsintervall er 26 dager, det er i intervallet 03–06 UT. Det laveste antallet er på morgenen klokken 06–09 UT med 7 dager. Totalt 129 tidsintervaller har Kp 4 totalt. Det er vesentlig færre dager med Kp 6 enn Kp 4. Det maksimale antallet dager med Kp 6 innenfor et tidsintervall er 2. Mellom 12 og 15 UT og 18–21 UT er det ingen dager med Kp 6. Totalt er det 10 intervaller med Kp 6, fordelt på 8 dager.

# Kapittel 4

## Resultater

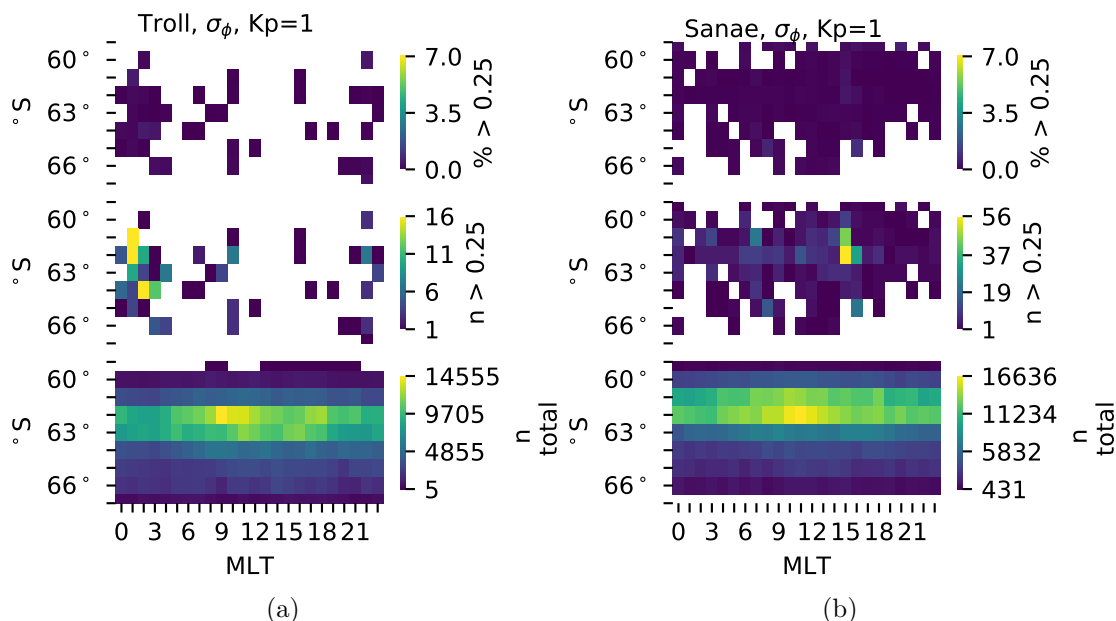
I første del av dette kapitlet handler om forekomsten av scintillasjonsnivåene på Troll og Sanae i 2018. Statistikken vil presenteres for flere Kp-verdier. For en mer detaljert forklaring på utregning av dette se delkapittel 3.7. I denne delen vil også elektrontetthet målt av Swarm-satellitter presenteres.

Videre presenteres det to kasusstudier av 26.–27. februar og 18.–19. mars 2018. Under begge periodene var det høy geomagnetisk aktivitet. 26.–27. februar var det en maksimal Kp-indeks på 5 og Dst-indeks minimal på -30 nT. Kp=6 var den høyeste Kp-indeksen for 18.–19. mars og minimal Dst-indeks var -50 nT. Innledningsvis vil målinger fra solvinden presenteres, deretter magnetometerdata og scintillasjonsnivåer fra flere stasjoner både på den nordlige og sørlige halvkule. Til slutt skal det brukes Superdarn og scintillasjonsmottakerene på Troll og Sanae til å studere bevegelsene til ionosfæriske irregulariteter.

### 4.1 Statisikk

#### 4.1.1 Lav aktivitet

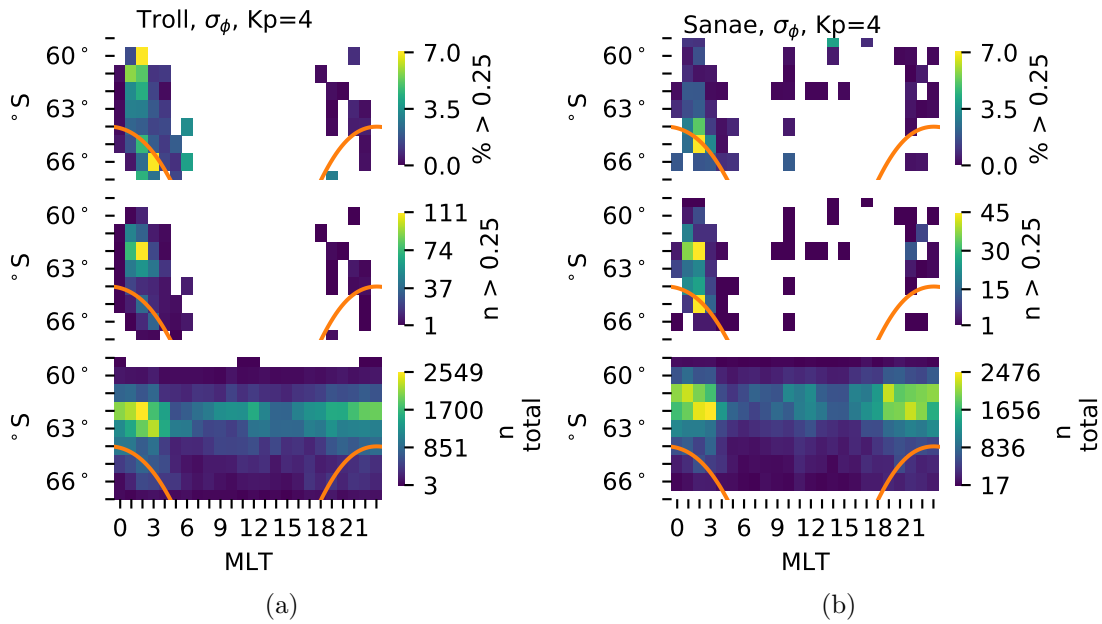
Kp=1 er den vanligste Kp-verdien og indikerer lav geomagnetisk aktivitet. Ved så lav Kp er auroraovalen langt unna mottakerne, det nordligste den statistiske auroraovalen kommer er  $67.4^\circ$  S, og



Figur 4.1: Statistikk for Kp 1 fra Troll (a) og Sanae (b).  $y$ -aksen er magnetiske breddegrader og  $x$ -aksen er tid i magnetisk lokaltid (MLT). Hver rute er en time bred og en breddegrad høy. Øverste panel er hvor stor andel av målingen har  $\sigma > 0.25$  rad, den midterste er antall målinger med  $\sigma > 0.25$  rad, og nederste er totalt antall målinger.

dette er utenfor synsvinkelen til mottakerne. Forekomsten av høye scintillasjoner (dvs.  $\sigma > 0.25$  rad) er vist i figur 4.1. Langs  $y$ -aksen er magnetisk breddegrad og langs  $x$ -aksen MLT. Høyden til IPP er satt til på 350 km. Mottakeren har større synsvinkel rundt sin egen breddegrad, målepunktene er derfor konsentrert rundt  $62^\circ$  og  $63^\circ$  sør for Troll, Sanae er  $0.8^\circ$  lengre nord og har derfor flest målinger rundt  $61^\circ$  og  $62^\circ$  sør. Som nevnt i delkapittel 3.3.3 er majoriteten av magnetometerene brukt til å fastsette Kp-indeksen i Europa og Nord-Amerika, Kp-indeksen vil derfor være høyere rundt deres magnetiske midnatt. Troll og Sanae sin magnetiske lokaltid er tidsmessig konjungert utenfor Øst-Grønland. Kp-indeksen vil derfor i snitt være høyere rundt magnetisk midnatt og lav midt på dagen. Det høyeste antallet målinger innenfor en rute er over  $n=14\ 500$  på Troll, dette er klokken 09 MLT og over  $n=16\ 000$  målinger på Sanae klokken 10 MLT.

I midterste panel i figur 4.1 er antall målinger over 0.25 rad vist og i det øverste panelet hvor mange prosent dette utgjør. På Troll er det opp mot 16 målinger over 0.25 rad rett etter midnatt. På Sanae er det opp mot 52 målinger over 0.25 rad på ettermiddagen. Det øverste



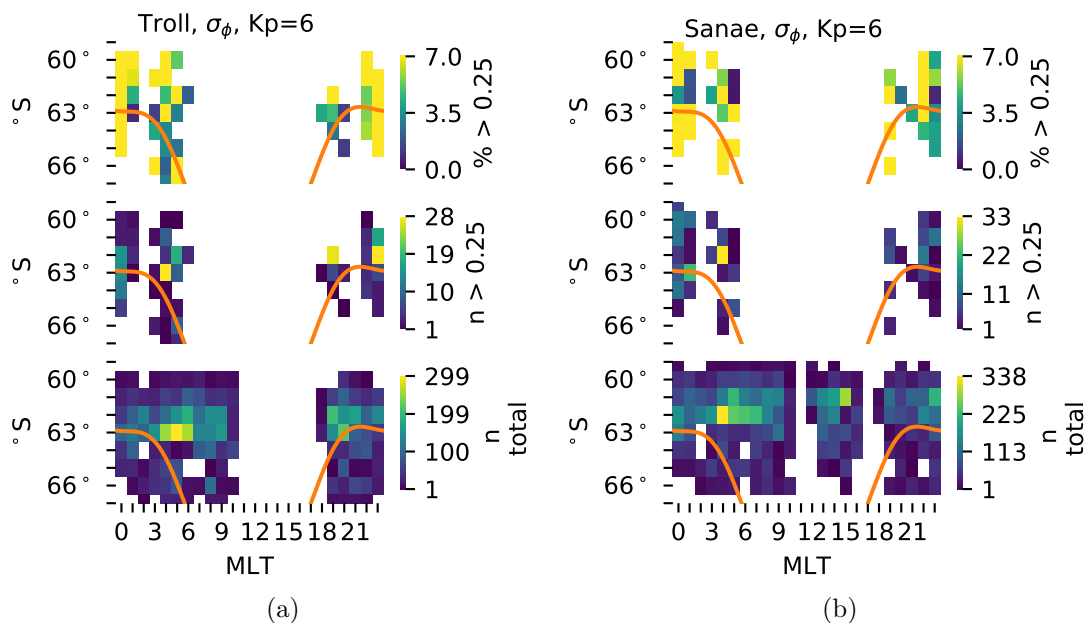
Figur 4.2: Statistikk for  $K_p=4$ . Troll (a) og Sanae (b).  $y$ -aksen er magnetiske breddegrader og  $x$ -aksen er tid i magnetisk lokaltid (MLT). Hver rute er en time bred og en breddegrad høy. Øverste panel er hvor stor andel av målingen som  $\sigma > 0.25$  rad, nummer to er antall målinger med  $\sigma > 0.25$  rad, nederste er totalt antall målinger. Den oransje linjen er grensen til auroraovalen i ekvatorialske retning.

panelet i figur 4.1 viser hvor stor prosentandel dette utgjør i forhold til antall målinger totalt. Både for Troll og Sanae er dette lite, under 1 %.

### 4.1.2 $K_p=4$

$K_p=4$  er vist i figur 4.2a og 4.2b. Det nederste panelet med antall målinger totalt viser at det er rundt 2500 målinger innenfor den ruten med mest målinger for begge mottakerne; dette er færre enn for  $K_p=1$ . Det er flest målinger mellom 19 MLT på kvelden og 04 MLT på morgenen. Dette viser at det er oftere  $K_p=4$  rundt midnatt enn midt på dagen.

Auroraovalen er lengre nord ved  $K_p=4$  enn  $K_p=1$ , og den kommer opp til 64 °S magnetisk breddegrad ved midnatt. I figur 4.2 er den oransje streken den ekvatorialske grensen for ovalen. Begge mottakerene er fremdeles nord for ovalen hele døgnet.



Figur 4.3: Som i figur 4.2, men for  $K_p=6$ .

Antall scintillasjoner over 0.25 rad er vist i det midterste panelet i figur 4.2. For Troll er den ruten med flest høye scintillasjoner  $n=111$ , klokken 02 MLT og  $62^\circ\text{S}$ . Det er generelt høyest forekomst av scintillasjoner fra klokken 01–03 MLT. Før midnatt er det noen målinger med høye scintillasjonsnivåer. I det øverste panelet er det vist prosentandelen dette utgjør. Forekomsten er 3–7 % i tidsrommet 01–06 MLT. Det er høyest forekomst av scintillasjoner i nord, rundt magnetisk breddegrad  $60^\circ\text{S}$  og på grensen til auroraovalen.

Målinger fra Sanae er presentert i figur 4.2b. I det midterste panelet er antall målinger med høye scintillasjonsnivåer vist, det er flest slike målinger klokken 02 MLT, på de magnetiske breddegradene  $62^\circ$  og  $65^\circ\text{S}$ . Det er noen få målinger midt på dagen, men dette er snakk om under 5 målinger per rute. I timene før midnatt er det rundt 15 målinger med høye scintillasjonsnivåer  $61^\circ$  og  $62^\circ\text{S}$ , og ellers noen få ruter med under 5 målinger. I det øverste panelet er prosentvis forekomst vist. tidsperioden 00–04 MLT har mellom 3 og 7 % av målingene et scintillasjonsnivå over 0.25. Den høyeste prosentvise forekomsten er på grensen til auroraovalen.



### 4.1.3 $K_p=6$

I figur 4.3a og 4.3b er statistikk for  $K_p=6$  vist for henholdsvis Troll og Sanae.  $62.7^\circ\text{S}$  magnetiske breddegrader er det norligste den modelerte auroraovalen strekker seg for  $K_p=6$ . Det nederste panelet viser antall målinger totalt. Maksimal antall målinger for Troll er klokken 05 MLT med  $n=299$  målinger og 04 MLT med  $n=338$  målinger for Sanae.

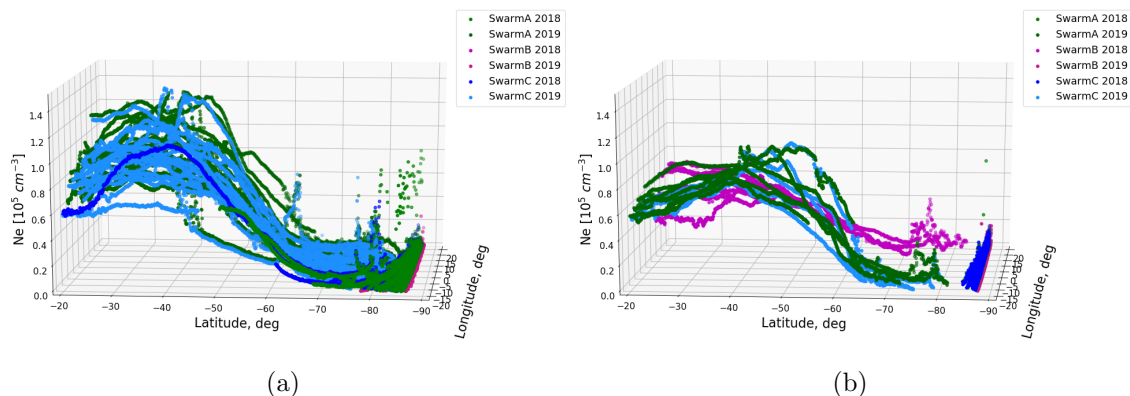
Antall målinger over 0.25 rad for Troll er vist i det midterste panelet i figur 4.3a. Det er målinger med høye scintillasjonsnivåer i følgende fem tidsintervaller: 18–20 MLT rundt auroraovalen på opp til  $n=28$  målinger per rute, Klokken 22–23 MLT fra  $60\text{--}65^\circ\text{S}$  med målinger opp til  $n=28$ , 00–01 MLT fra  $60\text{--}65^\circ\text{S}$  med målinger opp til  $n=19$ , og 03–06 MLT fra  $60\text{--}65^\circ\text{S}$  med målinger opp til  $n=28$ . Antall målinger med høye scintillasjonsnivåer blir ganske høyt i prosent. Det er mange ruter med minst 7 % forekomst av scintillasjoner på over 0.25.

Det midterste panelet i figur 4.3b viser antall målinger med  $\sigma > 0.25$  rad. Det er slike målinger mellom 19 og 23 MLT, fra 00 til 01 MLT og fra 03 til 05 MLT. Det maksimale antallet er 04 MLT  $62^\circ\text{S}$ . I det øverste panelet er prosentvis forekomst. Det er mange ruter med minst 7 %, både før og etter midnatt, og nord og sør for auroraovalen.

### 4.1.4 Swarm

For å få et større bilde av ionosfæren er målinger av elektrontetthet presentert i figur 4.4, alle passeringene er fra mai 2018 og mai 2019, i det geografiske området  $0^\circ\text{S}$  til  $90^\circ\text{S}$  og  $-20^\circ\text{Ø}$  til  $20^\circ\text{Ø}$ . Figur ?? viser passeringer fra 02:00–03:00 UT, figur 4.4b viser passeringer fra 04:00–05:00 UT, 02:00 UT tilsvarer omtrent 01:00 MLT. Fra klokken 02:00–03:00 UT vist i figur 4.4a er det en tydelig nedgang i elektrontetthet fra ca.  $40^\circ\text{S}$  til bunnpunktet på ca.  $72^\circ\text{S}$ , for å så stige igjen rundt  $80^\circ\text{S}$ . I figur 4.4b er elektrontettheten fra tidsintervallet 04:00–05:00 UT vist. Det er en nedgang i elektrontettheten fra  $50^\circ\text{S}$ , med et bunnpunkt på ca.  $70^\circ\text{S}$ , fra ca.  $71^\circ\text{S}$  stiger elektrontettheten.

Dette viser at det i hvertfall i mai var ofte en ionosfærisk bølgedal i nærheten av Troll og Sanae post midnatt. I tidsintervallet 02:00–03:00 UT er bunnen bredere og den ekvatorieveise flanken er lengre nord og den polvise flanken lengre sør enn i tidsintevallet 04:00–05:00 UT.



Figur 4.4: Elektrontetthet som funksjon av bredde- og lengdegrad i geografiske koordinater, fra ekvator til sørpolen. Målingene er fra mai 2018 og mai 2019. (a) viser alle målinger fra 02–03 UT, og (b) viser fra 04–05 UT.

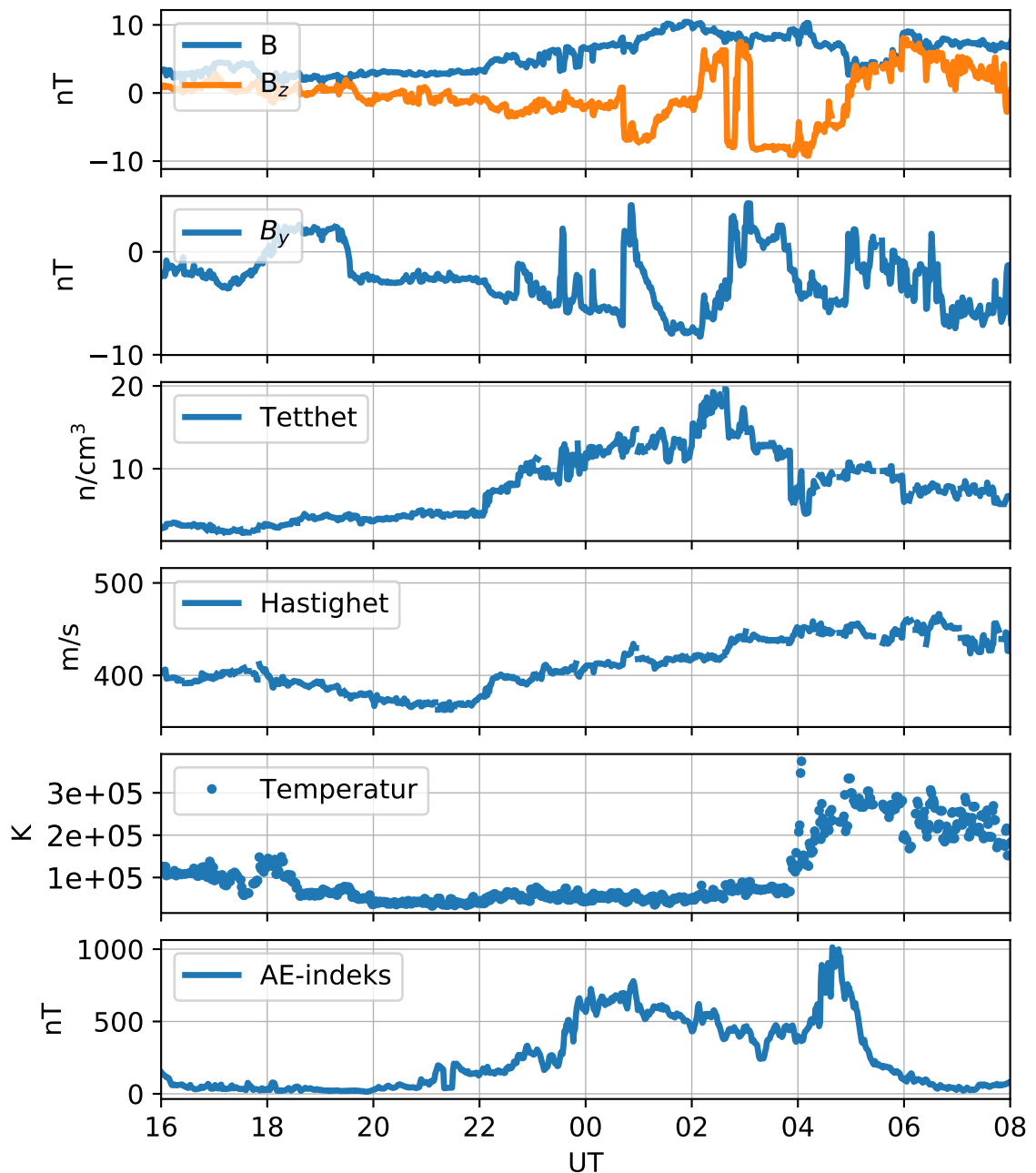
Toppunktet til den ekvatorialske flanken er også høyere i det første intervallet enn det andre, med  $1.2 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$  sammenlignet med  $0.8 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ .

## 4.2 Kasusstudie 26.-27. februar 2018

### 4.2.1 Solvind og AE-indeks

Som beskrevet i delkapittel 2.2.5 er egenskapene til solvinden viktig for forholdene i ionosfæren. Fluksomkobling på dagsiden gir mulighet for fluksomkobling på nattsiden. Tiden mellom omkobling på dagsiden og substormer på nattsiden vil avhenge av konveksjonstid og hvor lenge magnetosfæren sin hale lades opp med magnetfeltlinjer før fluksomkobling skjer. Dette vil sette igang bevegelse i ionosfæren og gi partikkelnedbør. Økte strømmer kan observeres med magnetometere og konveksjon kan måles med Superdarn. AE-indeksen vil øke når det er substormer.

Målingene fra solvinden mellom 16:00–08:00 UT 26.–27. februar er vist i figur 4.5. I øverste panel er det solvinden sitt totale magnetfelt ( $\mathbf{B}$ ) og nord-sørkomponenten ( $\mathbf{B}_z$ ). Før klokken 22:00 UT er  $\mathbf{B}$  rundt 3 nT og  $\mathbf{B}_z$  rundt null. Fra klokken 22:00 UT til 02:00 UT øker  $\mathbf{B}$  til 10 nT. Det holder seg høyt frem til 04:00 UT hvor det synker til 5 nT. 06:00



Figur 4.5: Parametre fra solvinden og AE-indeksen som funksjon av tid, tidsrommet er 16:00 UT 26. februar.– 08:00 UT 27. februar. Parametrene fra solvinden er tidsforskjøvet, tiden viser når en antar at solvinden når magnetopausen. Panelene viser fra øverst til nederst: Solvindens totale magnetfeltet  $\mathbf{B}$  og  $\mathbf{B}_z$ -komponenten til magnetfeltet i nT,  $\mathbf{B}_y$ -komponenten til magnetfeltet i nT, protontettheten i  $n/cm^3$ , solvindens totale hastighet i m/s, temperaturen i K. AE-indeksen i nT. Levert av Omni.

UT stiger det til 8 nT.  $\mathbf{B}_z$  er rundt -2 nT mellom 22:00 UT og 00:30 UT, for å så synke til -7 nT. Klokkeren 02:00 UT blir  $\mathbf{B}_z$ -komponenten positiv,  $\mathbf{B}_z=8$  nT. 02:35 UT er  $\mathbf{B}_z$  kortvarig negativ med en styrke på -8 nT, før det hurtig går tilbake til å være  $\mathbf{B}_z=8$  nT igjen. 03:00 UT blir  $\mathbf{B}_z$  igjen negativ,  $\mathbf{B}_z=-8$  nT og forblir negativ frem til 05:00 UT hvor  $\mathbf{B}_z$  blir positiv. Som beskrevet i delkapittel 2.2.5 gir negativ  $\mathbf{B}_z$  mulighet til magnetisk fluksomkobling på dagsiden. Siden det har vært mye negativ  $\mathbf{B}_z$  i denne perioden kan man forvente at fluksomkobling skjer og at Dungey-syklusen blir satt igang.

$\mathbf{B}_y$ -komponenten til IMF er vist i panel nummer to i figur 4.5.  $\mathbf{B}_y$  er for det meste negativ, med noen unntak.  $\mathbf{B}_y$  er positiv mellom 18:00 og 19:30 UT, i korte perioder klokken 23 UT og 00:30 UT.  $\mathbf{B}_y$  er også positiv mellom 03:00 UT og 04:00 UT. At  $\mathbf{B}_y$  er negativ det meste av perioden betyr at man vil få en asymmetri mellom konveksjonscellene, og en asymmetri mellom den nordlige og sørlige halvkule.

Det tredje panelet i figur 4.5 viser solvindens protontetthet. Før klokken 22:00 UT er tettheten lav, under 5 n/cm<sup>3</sup>. 22:00 UT begynner tettheten å øke, den øker frem til 02:30 UT til en tetthet på 20 n/cm<sup>3</sup>. Mellom 02:30 UT til 04:00 UT synker den til 5 n/cm<sup>3</sup>. 05:00 UT har protontettheten økt til 10 n/cm<sup>3</sup>.

Hastigheten til solvinden er vist i panel fire i figur 4.5. Mellom klokken 18:00 og 22:00 UT synker hastigheten fra 400 m/s til 350 m/s. Klokkeren 22:00 UT begynner hastigheten å øke frem til 04:00 UT til en hastighet på 450 m/s.

Figur 4.5 sitt femte panel viser solvindens temperatur. Mellom klokken 16:00 og 18:30 UT er  $T \approx 100\,000$  K. Mellom 18:30 og 04:00 UT er  $T \approx 40\,000$  K. Klokkeren 04:00 UT øker temperaturen hurtig til  $T \approx 300\,000$  K.

Tabell 2.1 viser typiske verdier for rolig solvind. Den oppgir 5 nT som en normal IMF-styrke, og i målingene for 26.-27. februar ble det målt en maksimal magnetisk feltstyrke på 10 nT. Solvindens magnetfelt var vesentlig høyere enn normalt. Tettheten var også høyere enn normalt, 20 n/cm<sup>3</sup> ble målt i forhold til 6 n/cm<sup>3</sup> som ansees som normalt. Hastigheten er litt lavere enn 470 km/s som er normalt. Temperaturen går fra å være normal på  $T \approx 100\,000$  til  $T \approx 300\,000$  K mot slutten av dagen.

AE-indeksen er vist i det nederste panelet i figur 4.5. Før klokken 20:00

UT er AE-indeksen omtrent 0. Mellom klokken 20:00 og 00:00 UT er det en stigende kurve som går opp 600 nT, økningen er raskest mellom 23:30 UT og 00:00 UT. Klokken 01:00 UT begynner AE-indeksen å sakte synke. Klokken 03:00 UT er AE-indeksen nede på 250 nT. Den øker opp til 500 nT klokken 03:30 UT og får en rask stigning 04:00 UT, med en maksimal verdi på 1000 nT klokken 04:30 UT. Etter maksimumet 04:30 UT avtar AE-indeksen og er nede på null 07:00 UT. AE-indeksen øker når strømmene i nordlysovalen øker. Hurtige økninger i AE-indeksen tyder på substormer. De kraftige økningene klokken 23:30 UT og 04:00 UT viser til substormer på disse tidspunktene.

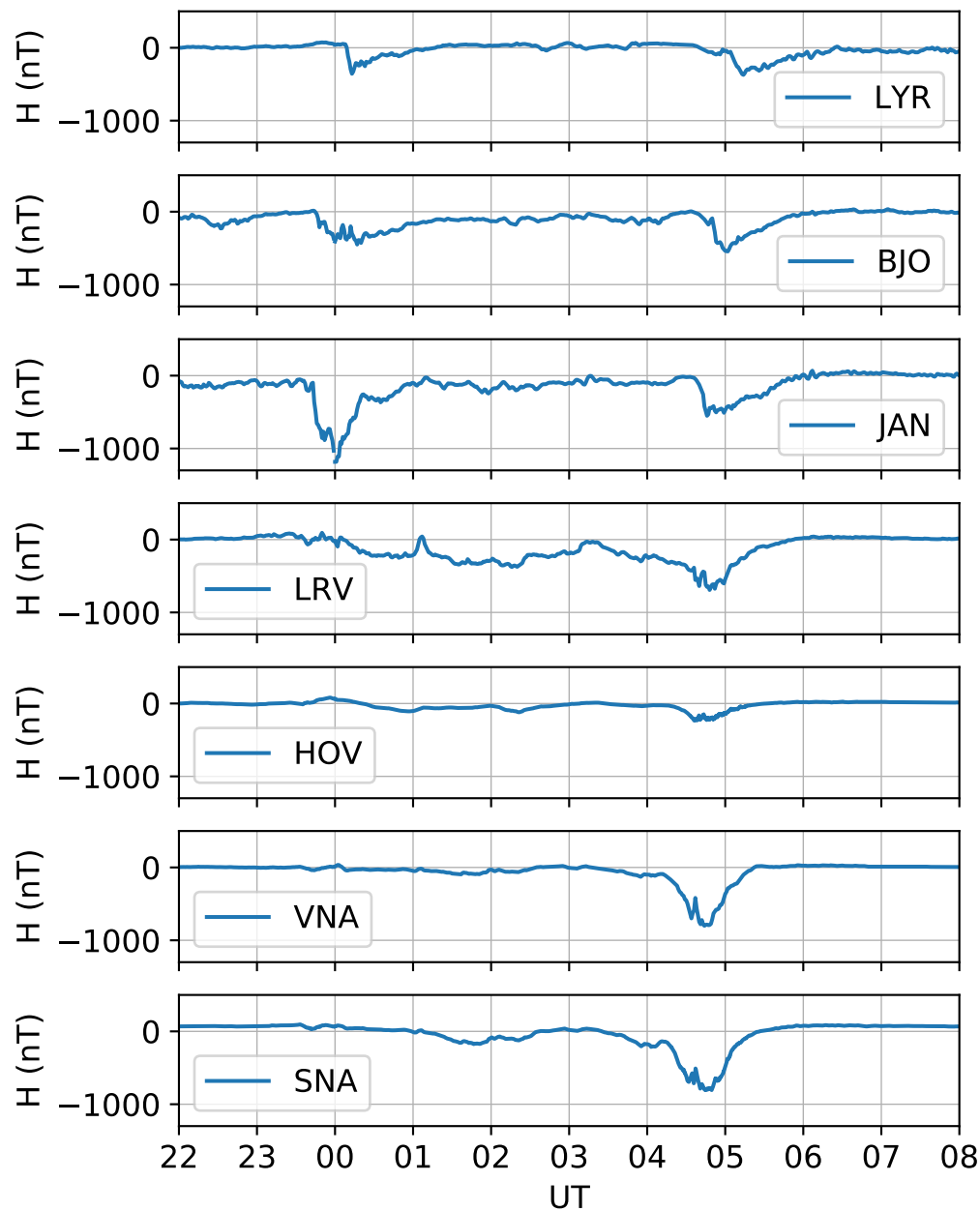
## 4.2.2 Magnetometer

Bakkebaserte magnetometere kan gi oss informasjon om horisontale strømmer i ionosfæren. Sterke endring i magnetfelt indikerer sterke strømmer. Jo lengre unna strømmen magnetometeret er jo svakere endring i magnetfeltet. Endringer i magnetfelt fra stasjonene Longyearbyen (LYR), Bjørnøya (BJO), Jan Mayen (JAN), Leirvogur på Island (LRV) og Hov på Færøyene (HOV) fra nord og fra Neumayer (VNA) og Sanae (SNA) i Antarktis er presentert i figur 4.6.

Rund midnatt er det en endring i magnetfeltet flere steder som kan knyttes til en substorm. Det er ingen endring i magnetfeltet i Longyearbyen før midnatt. Rett før midnatt er det en liten økning etterfulgt av en rask nedgang ned til -300 nT etter midnatt. Gjenvinningsfasen er slakere og klokken 01:00 UT er det tilbake på normale verdier.

På Bjørnøya er det en liten dip i magnetfeltet ca. 22:15 UT. Klokken 23:45 UT er det en fluktuerende nedgang ned til -400 nT med bunn noen minutter etter Longyearbyen. I ettiden er magnetfeltet litt lavere enn normalt, og med små fluktuasjoner.

Magnetometeret på Jan Mayen måler små fluktuasjoner i magnetfeltet mellom 22:00 og 23:45 UT. Samtidig som nedgangen på Bjørnøya er det også en nedgang på Jan Mayen. Reduksjonen er raskere og går ned til -1200 nT klokken 00:00 UT. Bunnpunktet i magnetometerdata fra Jan Maye er litt før både Longyearbyen og Bjørnøya. Gjenvinningsfasen er rask i starten, men får et lite plata ca.



Figur 4.6: Endringer i H-komponenten som funksjon av tid i tidsrommet 22 UT–08 UT 26.-27. februar. Stasjonene vist er Loneyarbyen (LYR), Bjørnøya (BJO), Jan Mayen (JAN), Leirvogur (LRV) og Hov (HOV) på den nordlige halvkule, Neumayer (VNA) og Sanae (SNA) i Antarktis. Det normale magnetfeltet til hver stasjon er trukket fra.

klokken 00:30 UT. I ettiden er også data fra Jan Mayen tilbake på et nivå litt lavere enn normalt, men med mer fluktuasjoner i magnetfeltet enn de to stasjonene lengre nord.

Det er noe fluktuasjoner på Island før midnatt. Etter midnatt er det en liten nedgang til omtrent  $-200$  nT. Klokken 01:00 UT er det en liten økning; etterfulgt av en langvarig periode på  $-200$  nT frem til 03:00.

På Færøyene er det helt stille frem til rett før midnatt. Fra midnatt observeres det et litt sterkere magnetfelt, etterfulgt av små variasjoner, men med lavere frekvens enn de andre stasjonene.

Stasjonene i Antarktis viser ingen aktivitet frem til rett før midnatt. Akkurat rundt midnatt er det en liten dip, med en påfølgende liten økning. Fra midnatt er det kun små bevegelser frem til 04:00 UT.

Endringen i de nordlige stasjonene rundt midnatt viser en substorm på den nordlige halvkulen. Dette stemmer også godt overens med økningen i AE-indeksen på dette tidspunktet, se figur 4.5.  $B_z$  komponenten til solvinden har også vært negativ i timene før og protontettheten ligger over normalt. Det er derfor naturlig at en substorm oppstår. At det største utslaget er på Jan Mayen viser at dette er den stasjonen som ligger nærmest den ionosfæriske strømmen. Færøyene er lengre unna. I sør ser er det bare et hint av endring rundt midnatt. Hvis det er strømmer på den sørlige halvkulen vil disse ligge langt unna Sanae og Neumayer.

Etter 04:00 UT er det igjen en substorm. På Sanae og Neumayer måles en rask nedgang i magnetfeltet til ca  $-800$  nT klokken 04:15 UT. Bunnpunktet er litt før på Neumayer enn på Sanae. Den raske nedgangen blir avløst av en oppgang, ca 05:30 UT er det tilbake på normale verdier.

I nord er nedgangen klokken 05:00 UT i Longyearbyen på  $-450$  nT. Det stabiliserer seg igjen klokken 06:15 UT. På Bjørnøya er det en reduksjon i magnetfeltet ned til  $-500$  nT litt før reduksjonen i Longyearbyen. På Jan Mayen er bunnpunktet enda litt tidligere og går også ned til  $-500$  nT. Etter en kort periode med normalt magnetfelt på Island i tre-tiden, blir magnetfeltet svakere ca. klokken 03:30 UT. Det når en bunn på ca.  $-700$  nT klokken 05:00 UT og er tilbake til normalt klokken 00:00 UT. På Færøyene er det en reduksjon på  $-250$  nT og er litt før de andre stasjonene. Bunnen til Færøyene er flat.

Siden Island har den høyeste påvirkningen i nord tyder dette på at strømmen ligger nærmest den. Endringen i magnetfeltet er sterkere for de sørlige enn de nordlige stasjonene. Dette passer godt med at Neumayer og Sanae er lengre øst enn stasjonene i nord. 05:00 UT er 02:48 MLT på Neumayer, 04:00 MLT på Island og 07:12 MLT i Longyearbyen.

$B_z$ -komponenten til solvinden var sterkt negativt over lengre tid i forkant av substormen. Det sammenfaller også med AE-indeksen vist i figur 4.5.

### 4.2.3 Scintillasjoner

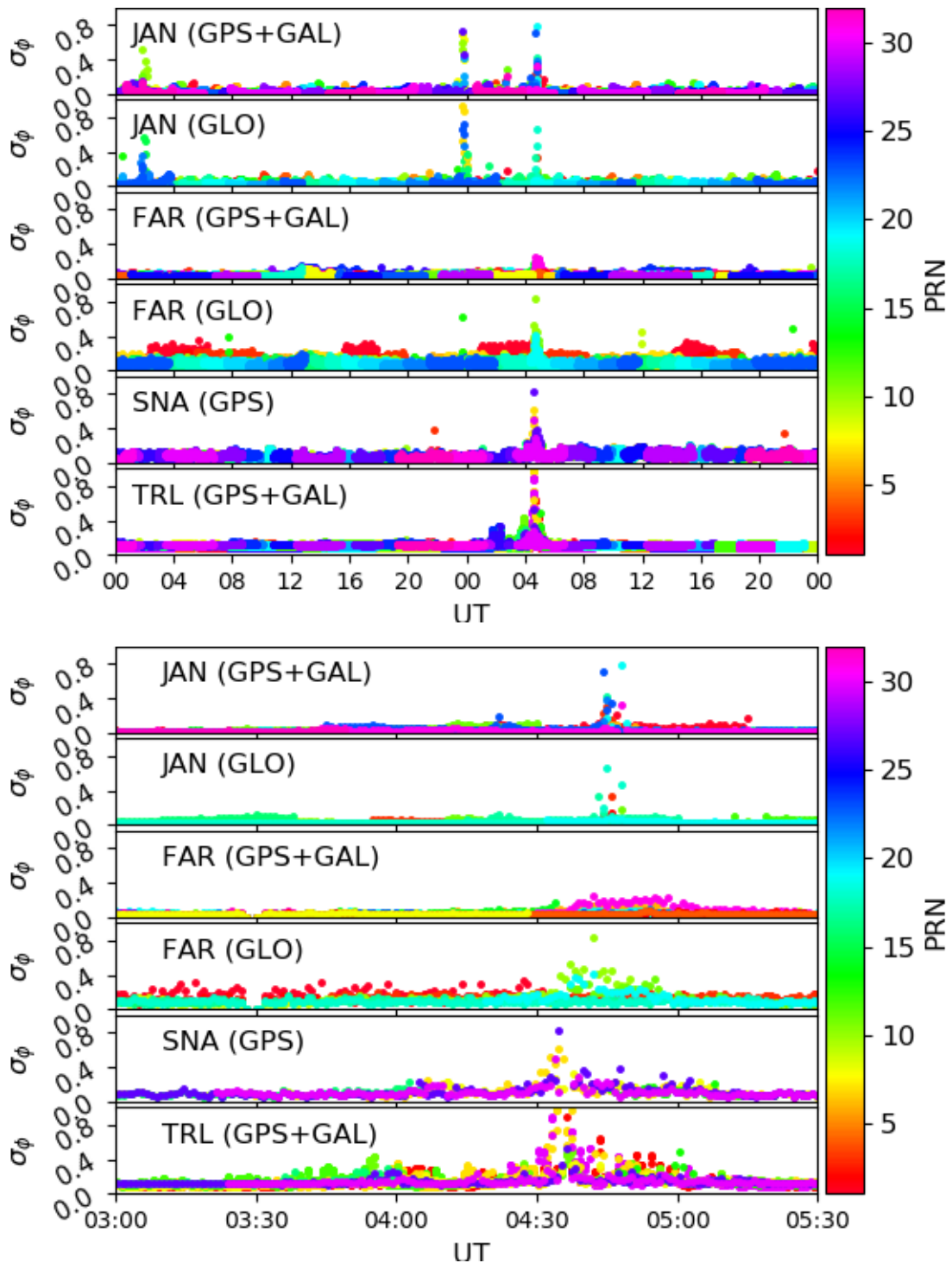
Scintillasjonsnivået for de fire stasjonene Jan Mayen, Færøyene, Sanae og Troll er vist i figur 4.7. Det er rolig det meste av disse to døgnene. Ved midnatt er det scintillasjoner over Jan Mayen for mange av satellittene, opp til 1 rad; og ingenting på stasjonene i Antarktis på dette tidspunktet. Klokkeren 02:00 UT er det scintillasjoner på 0.4 rad ved Troll og Jan Mayen.

Fra 03:25 UT er det på Troll scintillasjoner opp til 0.4 rad på en satellitt. Fra 04:00 UT er det scintillasjoner på flere satellitter på både Troll og Sanae, med nivåer opp til 0.4 rad. Klokkeren 04:30 er det en markant økning i mengden scintillasjoner på Sanae og Troll med nivåer opp til 1 rad. Det er forstyrrelser på flere satellitter sett fra Troll enn Sanae, men Troll tar inn både GPS og Galileo og ser dermed flere satellitter. 05:15 UT er det tilbake til lite scintillasjoner.

I nord er det også scintillasjoner. På Jan Mayen er det forstyrrelser i en kort periode rundt klokkeren 04:15 UT på 0.3 rad. 04:45 UT er det høye scintillasjonsnivåer opp til 0.8 rad. Mellom 04:40 og 05:00 UT er det scintillasjoner på Færøyene; som når verdier på 0.4 rad for GPS og GAL, og opp til 0.8 rad for GLO.

Substormen rundt midnatt gav liten endring i magnetfeltet på Færøyene og på Sanae, men var veldig sterk over Jan Mayen, dette reflekteres også i scintillasjonsnivåene. Det er tydelige ionosfæriske forstyrrelser over Jan Mayen og noe over Færøyene. I sør er det ikke tegn til forstyrrelser på dette tidspunktet. Scintillasjonene 02:00 UT på Troll og Sanae sammenfaller i tid med nedgang i magnetfeltet på





Figur 4.7: Fasescintillasjoner ( $\sigma_\phi$ ) fra de fire stasjonene Jan Mayen (JAN), Færøyene (FAR), Sanae (SNA) og Troll (TRL) som funksjon av tid. Fargene representerer hvilken satellitt det er og dens PRN-nummer. Figur 4.7a viser hele dagen den 26.–27. februar. Figur 4.7b er zoomet inn på det interessante tidsrommet 03:00–05:30 UT.

Jan Mayen, Island og Sanae. At forstyrrelser ikke observeres på Sanae, men kun på Troll kan bli knyttet til plasseringen av den ionosfæriske irregulariteten.

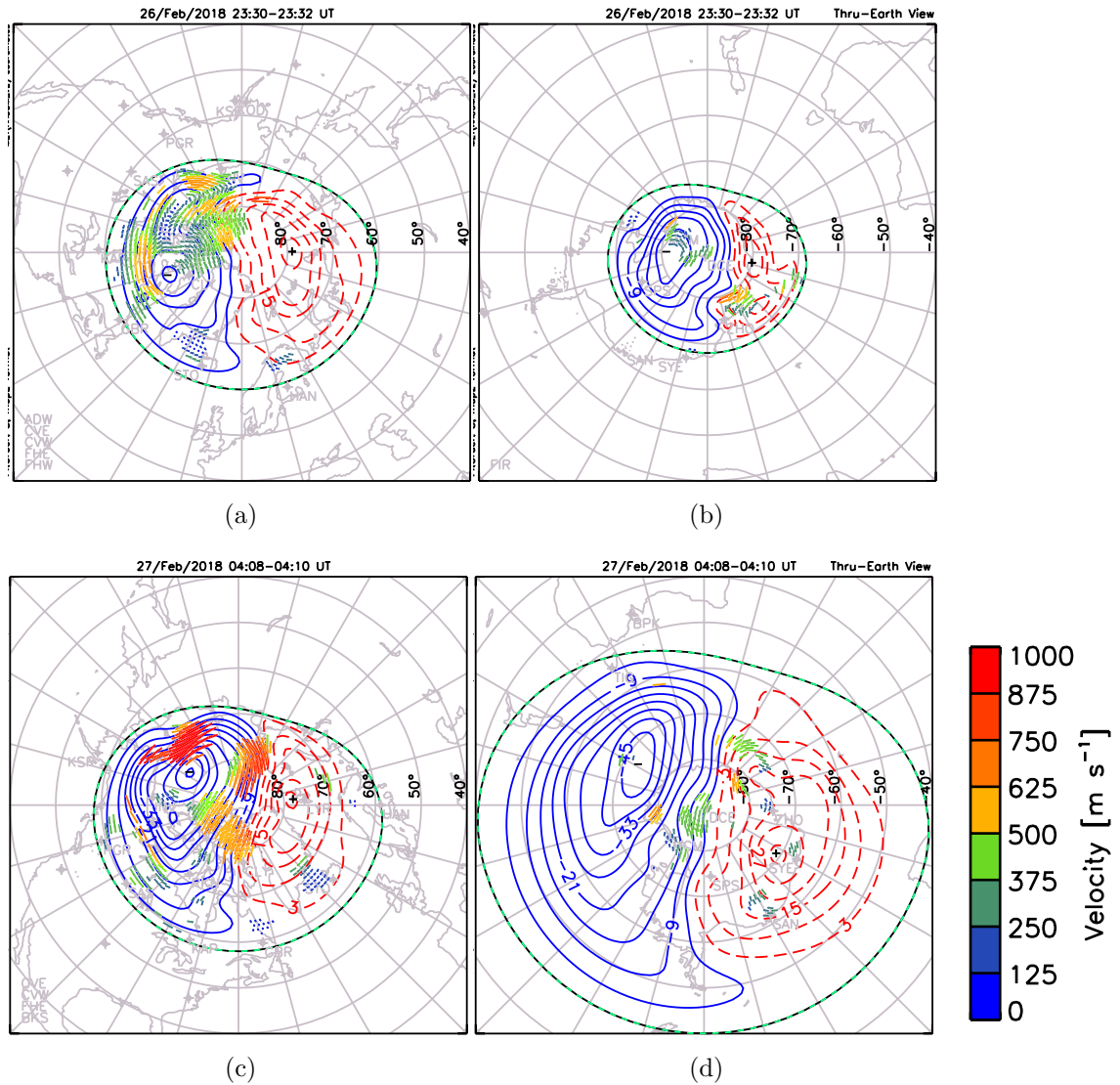
Samtidig med scintillasjonene i firetiden var det også endringer i magnetfeltet. Den lille reduksjonen i magnetfeltet klokken 03:45 UT sammenfaller med de små scintillasjonene rundt klokken 04:00 UT på Troll og Sanae. 04:30 UT er det en kraftig økning i scintillasjoner i sør, samtidig er det en substorm i magnetometermålingene fra Sanae og Neumayer. De magnetiske forstyrrelsene i nord kommer litt etter sør; det samme observeres på scintillasjonsnivået. Under denne substormen er det forstyrrelser både i magnetfelt og GNSS-signaler på Færøyene før de observeres på Jan Mayen. Både scintillasjonene og endringene i magnetfeltet er sterkere over Jan Mayen enn over Færøyene.

### 4.2.4 Superdarn

Superdarn gir et større bilde over plasmakonveksjonen i polområdene. Magnetometer- og scintillasjonsdataene viste et mer begrenset område enn det Superdarn gjør. Rundt midnatt observerte magnetometerene i Arktis en substorm, men bare et hint av denne ble observert i de to stasjonene i Antarktis. Figur 4.8a og 4.8b viser konveksjonen klokken 23:30 UT, for henholdsvis nordlige og sørlige halvkule. Kartet er orientert etter magnetisk lokaltid slik at klokken 12:00 MLT er opp, dette gjør at kartet over Antarktis er speilvendt. Pilens farge angir hastigheten og pilens retning er gitt ut fra prikken.

I Arktis er det målt hastigheter opp til 875 m/s og det er generelt mange målinger. På formiddagssiden er retningen på målingene kaotisk. Vest for Island er hastigheten lav, rundt 125 m/s. I Antarktis er det hastigheter opp til 750 m/s, det er færre målepunkter enn i nord, og Superdarn anslår mindre konveksjonsceller.

I firetiden ble en substorm observert både i Arktis og Antarktis, og mye scintillasjoner på Troll og Sanae. Målingene fra Superdarn klokken 04:10 UT er i figur 4.8c og 4.8d. De høyeste hastighetene i Arktis er rundt 1000 m/s, og befinner seg på formiddagssiden og i polhetten. Det er generelt mange målepunkter. Over Island, som befinner seg på morgensiden er det en konveksjonshastighet på rundt 250 m/s. På den sørlige halvkule er færre målepunkter enn i nord og hastighetene



Figur 4.8: Målinger fra Superdarn. Arktis (a, c) og Antarktis (b, d). Tidsintervallet 23:30–23:32 UT den 26. februar (a, b) og tidsintervallet 04:08–04:10 UT den 27. februar (c, d). Pilene viser rettingen på konveksjonen og fargen viser den målte hastigheten. Pilens retning er fra prikken. De røde og blå cellene viser anslag av størrelsen på konveksjonscellene. Kartet er orientert etter MLT. Øverst er 12 MLT. Denne orienteringen av kartet gjør at den sørlige halvkule er speilvent.

er generelt lavere. Høyest målte hastighet er 625 m/s og er målt inni polhetten. Den anslåtte størrelsen på konveksjonscellene er større i Antarktis enn Arktis.

Figur 4.9 viser Superdarn fra Sanae mellom klokken 03:44 og 04:10 UT. I samme tidsrom var det moderate scintillasjoner på Sanae og Troll. Disse plottene er i magnetiske koordinater og er ikke speilvent slik som figur 4.18. Superdarn-data var ikke tilgjengelig etter 04:10 UT.

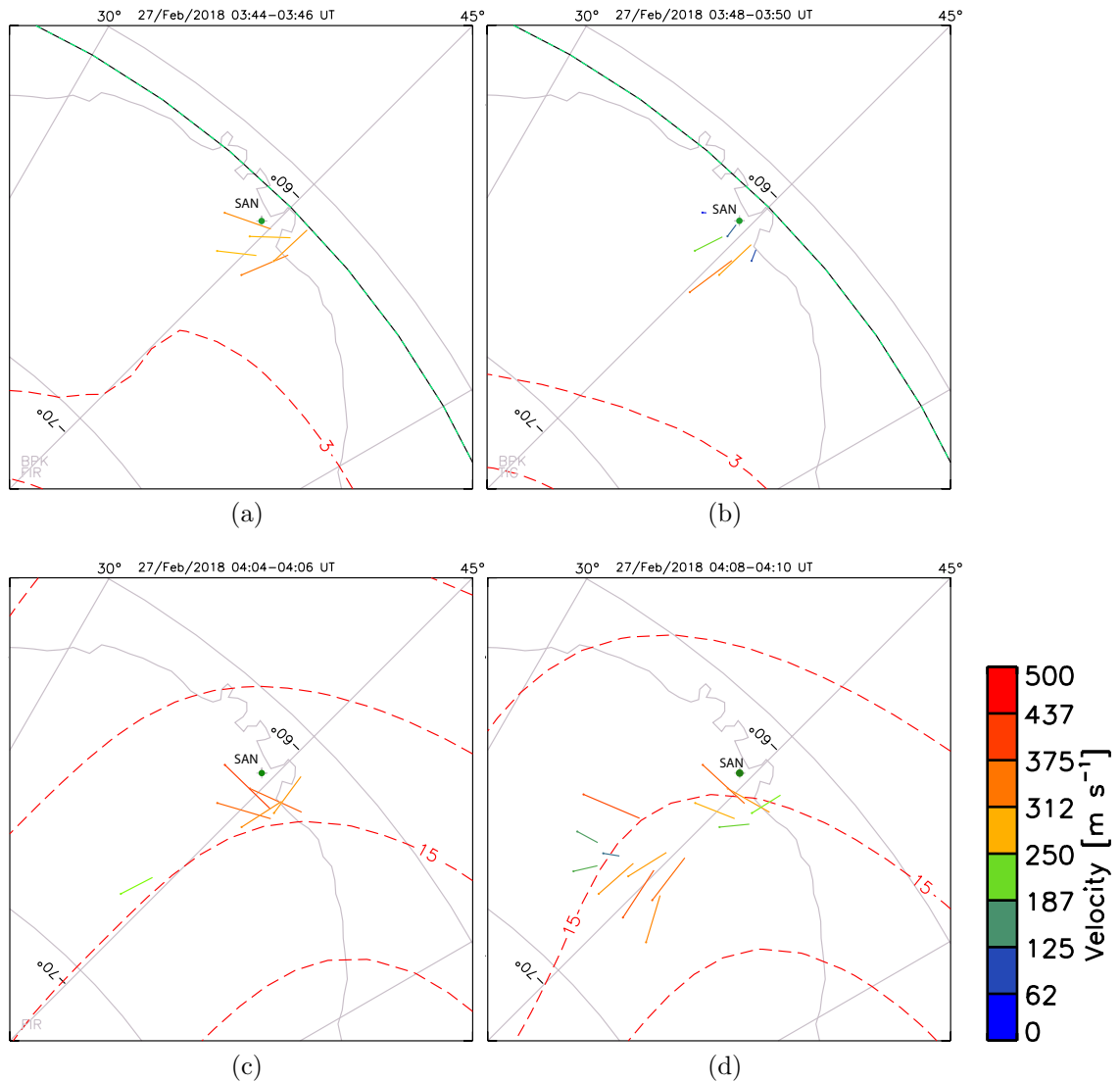
Klokken 03:44 UT er det en nordgående bevegelse øst for Sanae, og en østgående bevegelse vest for Sanae med en hastighet på mellom 250–375 m/s. Fire minutter senere beveger plasmaet seg mot nord. I øst er farten mellom 62–432 m/s og i vest mellom 62 og 250 m/s. Klokken 04:04 UT, 16 minutter senere er retting og fart lik som tidligere øst for Sanae, mens vest for har bevegelsen dreid mot øst igjen og farten har økt. Etter fire nye minutter er det betraktelig flere målepunkter. I sør-vest har bevegelsen i nordøstlig retting, med fart opp til 500 m/s. I nordvest er østlig rettet med fart opp til 375 m/s. I nordøst er rettingen nordover og farten lavere, opp til 250 m/s. Utifra dette kan en forvente at irregulariteter vil bevege seg fra sør til nord, i litt østlig retning.

### 4.2.5 DMSP

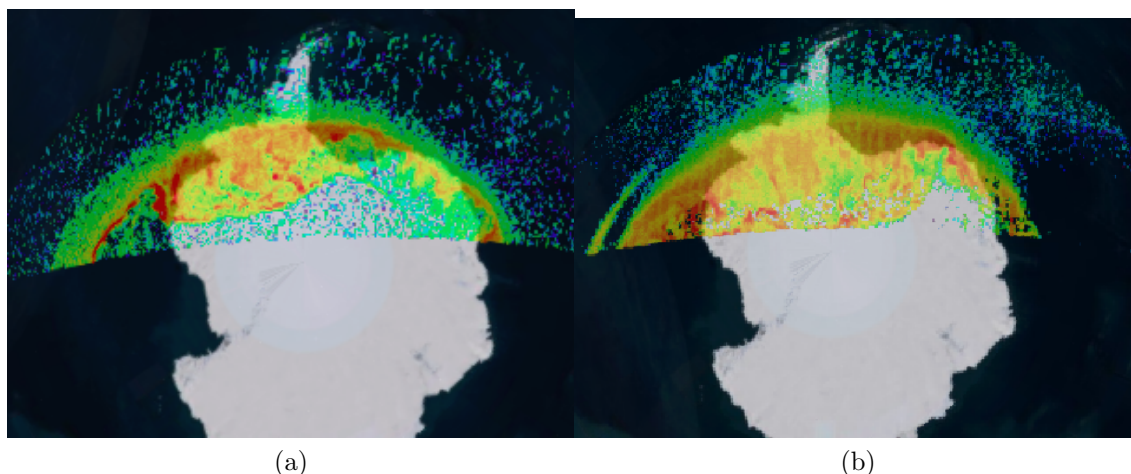
DMSP's SIS-instrument skanner UV-stråling sendt ut av aurora. I figur 4.19 er mengden UV-stråling plottet fra det omløpet til F17 som passerer Troll ca. 04:30 UT. Det er klart at auroraovalen strekker seg lengre nord enn Troll.

Målinger av ionetetthet og ione-hastighet gjort av DMSP er vist i figur 4.11, satellitt F18 og F17 er vist i henholdsvis figur 4.11a og 4.11b. Tidsrommet for F18 er 04:15–04:35 UT, og 04:25–04:45 UT for F17. Resultatene fra DMSP blir også beskrevet i neste delseksjon.

I det øverste panelet er ionetettheten vist. For DMSP F18 øker ionetettheten frem til klokken 04:19 UT hvor den brått faller fra  $2 \times 10^4 \text{cm}^{-3}$  til nesten null. Den stiger brått igjen til  $2 \times 10^4 \text{cm}^{-3}$  klokken 04:21 UT for å så falle til  $0.5 \times 10^4 \text{cm}^{-3}$ . Hastigheten til ionene er vist i det nederste panelet. Det viser for F18 at i tidsrommet 04:19



Figur 4.9: Superdarn målinger fra Sanae. Pilenes farge viser hastigheten til konveksjonen. Linjen utfra prikken angir retningen. Tidsintervallene: 03:44–03:46 UT (a), 03:48–03:50 UT (b), 04:04–04:06 UT (c), 04:08–04:10 UT (d).



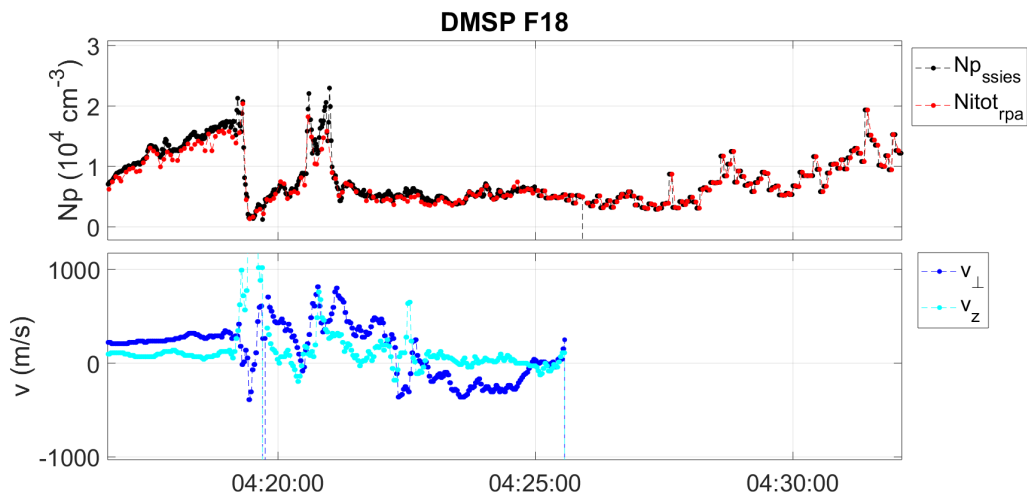
Figur 4.10: UV-stråling i LBH-L-spekteret målt av DMSP. Figur (a) viser data fra DMSP F18 som passerte over Dronning Mauds land 04:20 UT. Figur (b) viser F17 som passerte Dronning Mauds land rund 04:30 UT. Dataene er levert uten intensitetskala.

UT-04:23 UT er det store variasjoner i hastigheten.

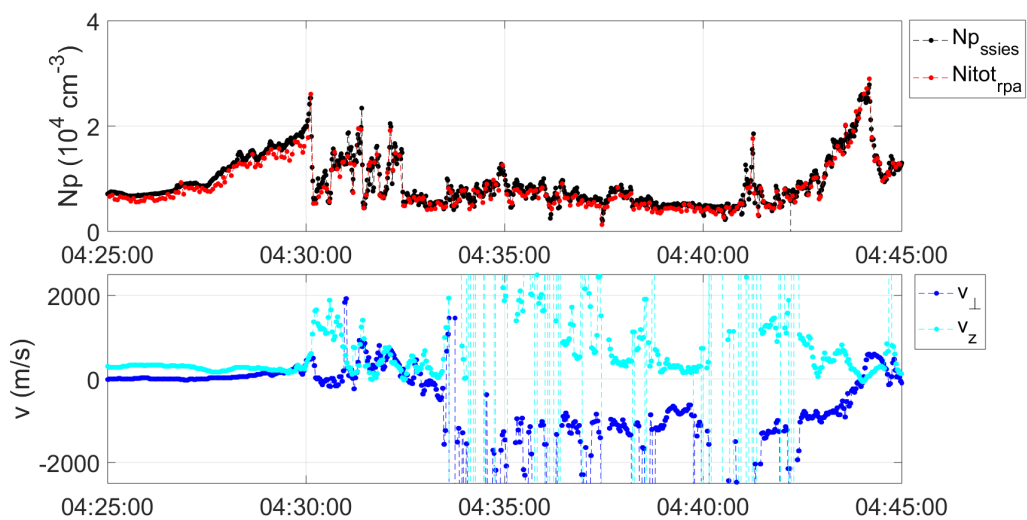
Ionetettheten til F17 som er presentert i 4.11b øker fra  $1 \times 10^4 \text{cm}^{-3}$  klokken 04:25 UT til  $2 \times 10^4 \text{cm}^{-3}$  klokken 04:30 UT, hvor den brått faller til  $1 \times 10^4 \text{cm}^{-3}$ , for å så fluktuere hurtig mellom  $1 \times 10^4 \text{cm}^{-3}$  og  $2 \times 10^4 \text{cm}^{-3}$  frem til klokken 04:33 UT. Etter dette er ionetettheten på  $1 \times 10^4 \text{cm}^{-3}$ . Ionehastigheten til F17 som er presentert i 4.11b viser lav hastighet frem til klokken 04:30 UT. Klokken 04:30 UT øker  $v_z$  til 2000 m/s, klokken 04:31 synker  $v_z$  til rundt 500 m/s og  $v_{\perp}$  øker til 500 m/s. Fra klokken 04:34 UT er det store fluktuasjoner i hastigheten.

#### 4.2.6 Plassering av irregulariteter

I denne delen ser jeg på hvor irregularitetene er plassert ved å se på signalenes IPP. IPP er forklart i delkapittel 3.4.3. Jeg ser på to tidsintervaller, fra klokken 04:18–04:24 UT vist i figur 4.12 og 04:30–04:36 UT vist i figur 4.13. Rundinger er målinger gjort på Troll og firkanter fra Sanae. Fargen viser scintillasjonsnivået for hver satellitt for det minuttet. Den røde rundingen og firkanten viser posisjonen til henholdsvis Troll og Sanae. Den blå linjen er banen til DMSP-satellittene iløpet av det gitte minuttet. Koordinatene er geografiske.

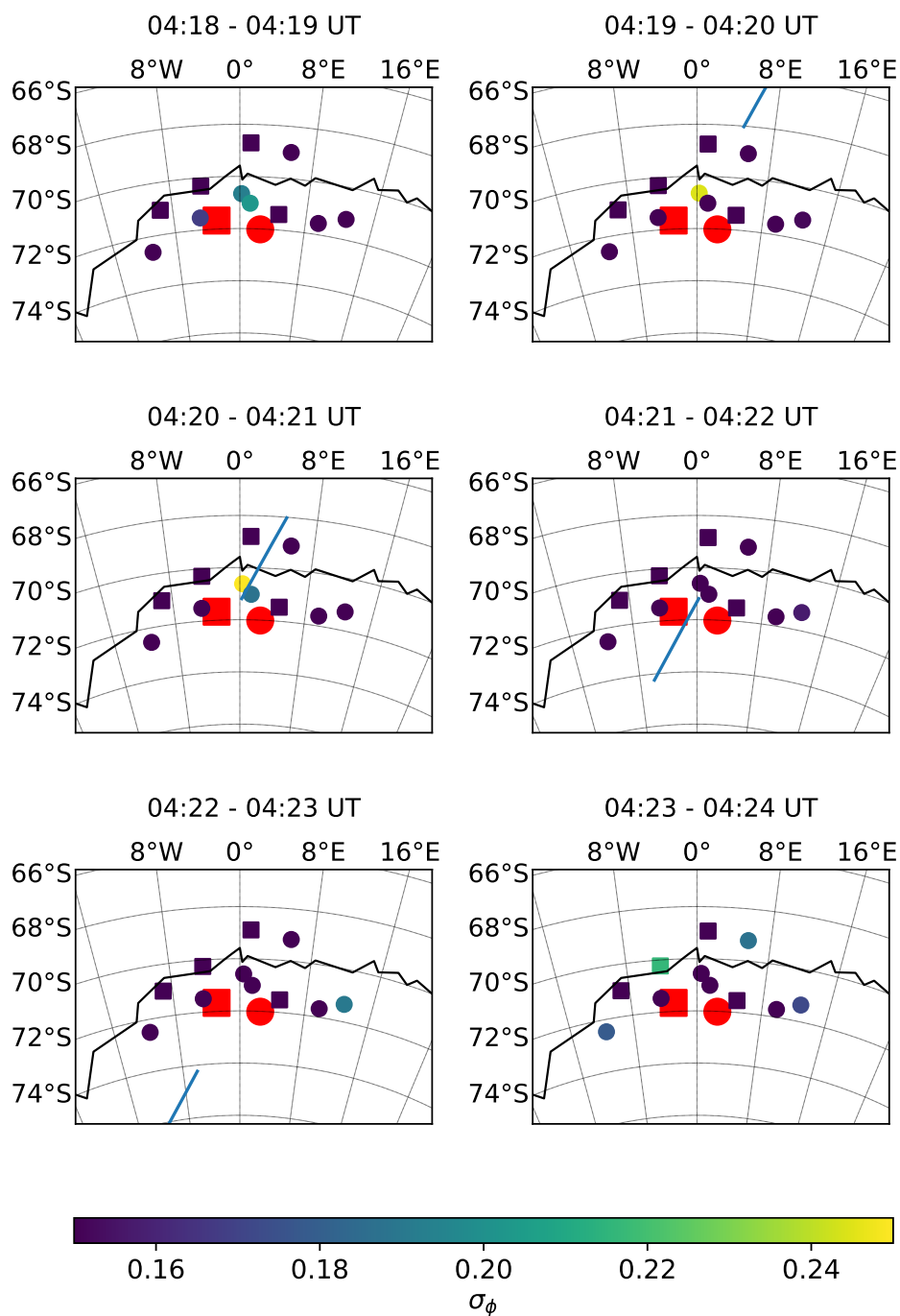


(a)



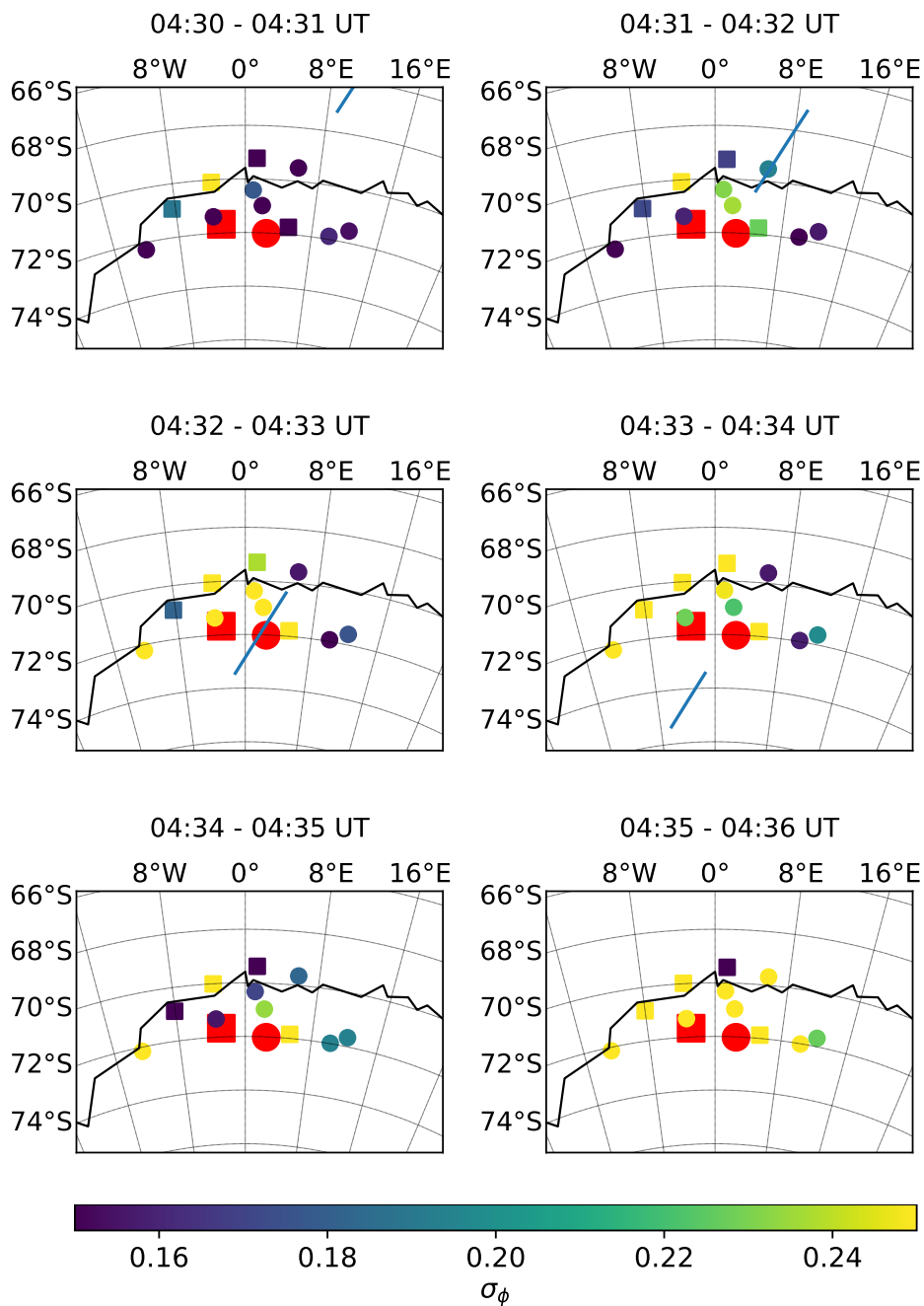
(b)

Figur 4.11: Data fra DMSP F18 (a) og F17 (b). Data fra DMSP f18 for tidsintervallet 04:15–04:35 UT. Data fra DMSP F17 for tidsintervallet 04:25–04:45 UT. Det øverste panelet viser ionetetthet, og det nederste viser ionehastighet i perpendikulær ( $v_{\perp}$ )- og vertikalretning ( $v_z$ ). Den perpendikulære retningen er omtrent parallell med bakken, og den vertikale er positiv vekk fra bakken. Banehøyden til satellittene er i underkant av 900 km.



Figur 4.12: Ionosfærisk gjennomføringspunkt for signalet fra satellittene i geografiske koordinater. Høyden til IPP er satt til 350 km. Rundinger er målinger fra Troll og firkanter fra Sanae. For Troll er både GPS og Galileo inkludert, men for Sanae er det kun GPS-satellitter. Røde firkanten er posisjonen til Sanae og den røde sirkelen til Troll. Den blå streken er banen til DMSP-satellitten i det gitte tidsintervallet, den går fra nord til sør. Det er tidsintervaller på 1 min fra 04:18–04:24 UT. Fargen viser styrken til scintillasjonene på signalet fra satellittene.





Figur 4.13: Ionosfærisk gjennomboringspunkt for signalet fra satellittene i geografiske koordinater. Høyden til IPP er satt til 350 km. Rundinger er målinger fra Troll og firkanter fra Sanae. For Troll er både GPS og Galileo inkludert, men for Sanae er det kun GPS-satellitter. Røde firkanten er posisjonen til Sanae og den røde sirkelen til Troll. Den blå streken er banen til DMSP-satellitten i det gitte tidsintervallet, den går fra nord til sør. Det er tidsintervaller på 1 min fra 04:30–04:36 UT. Fargen viser styrken til scintillasjonene på signalet fra satellittene.

Det første tidsintervallet er samtidig som DMSP F18 passerer over området rundt Troll og Sanae. Dette er rett før en kraftig nedgang i magnetfeltstyrken på Sanae og Neumayer, og rett etter det siste plottet fra Superdarn, klokken 04:10 UT som viste konveksjon fra sør og fra vest, med hastigheter på opp til 437 m/s.

Klokken 04:18 UT er det ingen scintillasjoner på signalet fra de fleste satellittene, kun svake scintillasjoner på de to satellittene med IPP på ca.  $71^{\circ}\text{S}$  og  $0^{\circ}\text{Ø}$ , scintillasjonsnivåene er på 0.20 rad. Ett minutt senere klokken 04:19 UT er scintillasjonsnivået på den østligste av denne satellitten blitt lavere, og sterkere på den vestligste. DMSP F18 kommer også inn i synsfeltet, men er ikke nær noen av GNSS-satellittene.

Klokken 04:20 UT går DMSP fra  $68^{\circ}\text{S}$ ,  $4^{\circ}\text{Ø}$  til  $71^{\circ}\text{S}$ ,  $0^{\circ}\text{Ø}$  og passerer mellom to GNSS-satellitter sine IPP som er plassert mellom Troll og Sanae; samtidig øker scintillasjonsnivået til disse satellittene til 0.25 og 0.19 rad. Mellom klokken 04:20:30 og 04:21:00 UT måler DMSP F18 en økning i og fluktuasjoner i ionetettheten. Det høye scintillasjonsnivået i dette området passer bra med en lokal økning i ionetetthet. Scintillasjoner knyttet til signalet til de andre GNSS-satellittene er fremdeles 0.15 rad eller mindre.

Klokken 04:22 UT er DMSP F18-satellitten lengre sør enn IPP til GNSS-satellittene. Det er ingen høye scintillasjoner untatt på den østligste GNSS-satellitten som har et scintillasjonsnivå på 0.19 rad. 04:23 UT er det litt scintillasjoner, mellom 0.18 og 0.21 rad, på signalet fra noen satellitter.

Det andre tidsintervallet 04:30–04:36 UT vist i figur 4.13 er i hovedfasen til substormen. DMSP F17 passerer i dette tidsrommet. 04:30 UT er det scintillasjonsnivåer på 0.25 rad på satellitten med IPP  $70^{\circ}\text{S}$  og  $4^{\circ}\text{Ø}$ . Det er også scintillasjoner på 0.19 rad på signalet fra to nærliggende satellitter. Ett minutt senere, klokken 04:31 UT er det høyere scintillasjonsnivåer på de nordligste satellittene. Nivået varierer fra 0.18 til over 0.25 rad. I løpet av dette minuttet forflytter DMSP-satellitten seg fra  $68^{\circ}\text{S}$ ,  $8^{\circ}\text{Ø}$  til  $70^{\circ}\text{S}$ ,  $4^{\circ}\text{Ø}$ . DMSP måler raske fluktuasjoner i ionetettheten, og hastigheter på ca. 1000 m/s i perpendikulær og vertikal retning. I tidsintervallet 04:32–04:33 MLT observeres det kraftige scintillasjoner fra flere satellitter. I dette tidsintervallet går DMSP sin bane over Troll. Første halve minuttet måler DMSP fluktuerende ionetetthet, fra 04:32:30 måler DMSP en

stabil ionetetthet på  $0.5 \times 10^4$ .

Kraftige scintillasjoner på minst 0.25 rad observeres på de vestligste satellittene, mens det er svakere scintillasjoner på de tre østligste. I tidsintervallet 03:34–03:35 UT er det scintillasjoner på noen av satellittene. Klokken 03:35 –04:36 UT er det kraftige scintillasjoner på minst 0.25 rad på nesten alle satellittene.

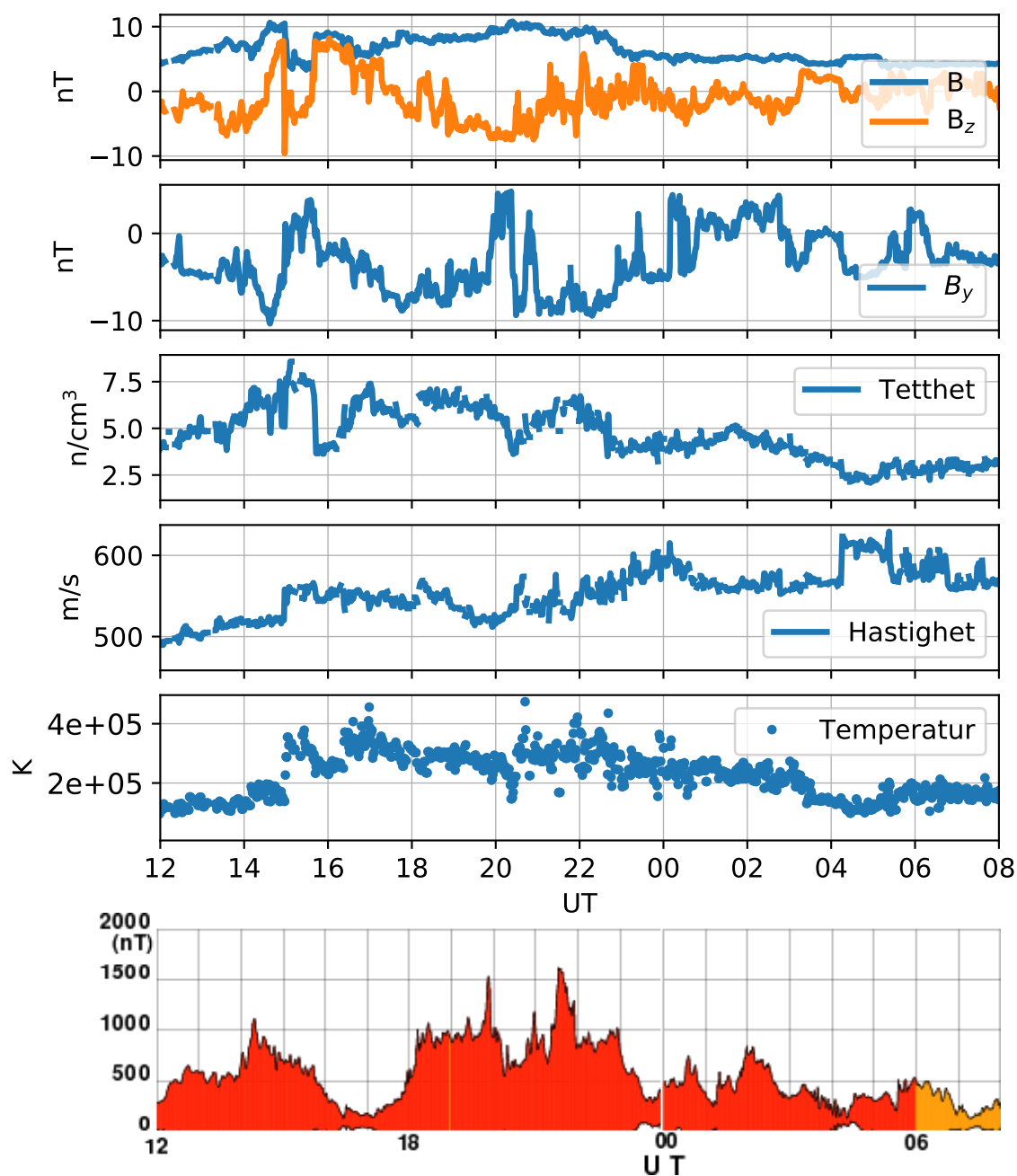
## 4.3 Kasusstudie 18.-19. mars

### 4.3.1 Solvind

Solvindmålinger fra 18. mars klokken 12:00– 19. mars 08:00 er vist i figur 4.14. Det øverste panelet er solvindens totale magnetfelt  $\mathbf{B}$  og nord-sør-komponenten til magnetfeltet  $\mathbf{B}_z$ . Før klokken 15:45 UT er  $\mathbf{B}_z$  for det meste negativ med en styrke på omtrent -5 nT, untatt en kort periode rundt klokken 15:00 UT. Klokken 15:45 UT blir  $z$ -komponenten positiv, med en styrke på 7 nT, for å så begynne å synke. Klokken 17:30 UT er  $\mathbf{B}_z$  negativ, og forblir negativ til klokken 21:00 UT, minimalstyrken i dette tidsrommet er -7 nT. Mellom 21:00 UT og og midnatt fluktuerer  $\mathbf{B}_z$  mellom 5 nT og -6 nT. I tidsrommet fra 00 UT til 03:00 UT varierer  $z$ -komponenten til  $\mathbf{B}$ -feltet mellom 1 nT og -5 nT, og er for det meste negativt. Fra 03:00 UT til 04:00 UT har  $\mathbf{B}_z$  en styrke på 3 nT. Etter 04:00 UT varierer  $\mathbf{B}_z$  mellom 2 nT og -3 nT, men er for det meste positiv. Det at  $z$ -komponentet er mye negativ gir gode forhold for magnetisk fluksomkobling og vil starte Dungeysyklusen, som forklart i delkapitlene 2.2.5 og 2.3.6.

Det totale magnetfeltet  $\mathbf{B}$  øker fra 5 nT til 10 nT mellom 12:00 og 15:00 UT. Klokken 15:00 UT synker  $\mathbf{B}$  raskt til 5 nT og forblir 5 nT frem til 15:30 UT, da øker magnetfeltet raskt til 8 nT. Klokken 16:30 synker feltstyrken til 6 nT. Mellom 16:30 og 20:30 UT øker  $\mathbf{B}$  sakte til 10 nT. Det holder seg på 10 nT frem til 22:00 UT, for å så synke til 5 nT klokken 23:00 UT. Det holder seg på 5 nT resten av natten. Tabell 2.1 viser at 5 nT er en normal verdi for  $\mathbf{B}$ . En magnetfeltstyrke på 10 nT som det er på kvelden den 18. mars er derfor å regne som sterkt.

Figur 4.14 sitt andre panel viser  $\mathbf{B}_y$ , IMF sin øst-vest-komponent. Øst



(b)

Figur 4.14: Parametre fra solvinden og AE-indeksen som funksjon av tid, tidsrommet er 12:00 – 08:00 UT 18.–19. mars. Parametrene fra solvinden er tidsforskjøvet, tiden viser når en antar at solvinden når magnetopausen. Panelene viser fra øverst til nederst: Solvindens totale magnetfeltet  $\mathbf{B}$  og  $B_z$ -komponenten til magnetfeltet i nT,  $B_y$ -komponenten til magnetfeltet i nT, protontettheten i  $\text{n/cm}^3$ , solvindens totale hastighet i m/s, temperaturen i K. AE-indeksen i nT. Solvindparametrene er levert av Omni og AE-indeksen av WDC for Geomagnetism, Kyoto.

er positiv.  $\mathbf{B}_y$  sin orientering påvirker hvor magnetisk fluksomkobling skjer og dermed hvordan konveksjonsmønsteret blir, som beskrevet i delkapittel 2.3.2. Før klokken 15:00 er  $\mathbf{B}_y$  negativ, mellom 15:00 og 16:00 UT er det positivt. 16:00 UT blir  $\mathbf{B}_y$  igjen negativ og forblir negativ frem til 20:00 UT, da er det positivt frem til klokken 20:30 UT. 20:30 UT blir  $\mathbf{B}_y$  først negativ en kort stund, så kortvarig positiv og tilbake til negativ klokken 21:00 UT. Fra 21:00 UT til midnatt er  $y$ -komponenten til IMF negativ, mellom midnatt og 03:00 UT er den stort sett positiv. I tidsrommet 03:00–06:00 UT er  $\mathbf{B}_y$  negativ eller null. Rundt 06:00 UT er  $\mathbf{B}_y$  kortvarig positiv før den blir negativ igjen. Siden  $\mathbf{B}_y$  er negativ det meste av dagen gjør at fluksomkoblingen på den nordlige halvkule vil skje på morgen siden og at konveksjonscellen på morgensiden vil være størst. På den sørlige halvkule vil dette være motsatt, fluksomkoblingen vil skje på ettermiddagsiden. Dette vil skape en asymetri mellom halvkulene.

Protontettheten til solvinden er vist i det tredje panelet i figur 4.14. Fra klokken 12:00 til 15:00 UT øker den fra 4–8  $\text{n/cm}^3$ . 15:30 UT faller den raskt til 4  $\text{n/cm}^3$ , for å så stige til 7  $\text{n/cm}^3$  klokken 16:30 UT. Klokken 20:00 UT synker protontettheten til 4, for å raskt stige til 6  $\text{n/cm}^3$ . 23:00 UT synker tettheten til 4  $\text{n/cm}^3$  og holder seg mellom 4 og 5  $\text{n/cm}^3$  frem til klokken 03:00 UT hvor den synker til 3  $\text{n/cm}^3$ . En normal tetthet er på 6  $\text{n/cm}^3$  i følge tabell 2.1. Dette vil si at på dagen og kvelden frem til rundt klokken 23:00 UT er tettheten normal, men at etter dette er tettheten lavere enn normalen.

Det fjerde panelet i figur 4.14 viser hastigheten til solvinden. Fra 12:00 UT til 15:00 UT øker hastigheten fra 500 km/s til 550 km/s. Hastigheten holder seg på 550 km/s frem til 19:00 UT, hvor den synker til 525 km/s. Hastigheten er 500 km/s mellom 20:30 UT og 22:00 UT. Fra klokken 22:00 UT øker hastigheten til 600 km/s frem til midnatt. Etter midnatt synker hastigheten til 525 km/s og holder seg på det nivået frem til 04:00 UT hvor hastigheten for øker til 625 km/s, for å så synke til 525 km/s. Tabell 2.1 oppgir 470 km/s som en normal hastighet. I denne perioden har hastigheten stort sett vært mellom 550 og 600 km/s, og her derfor en litt høyere hastighet enn normalen. En høy hastighet gir høyere dynamisk trykk fra solvinden på jordens magnetosfære.

Temperaturen til solvinden er vist i det femte panelet i figur 4.14. Før 15:00 er temperaturen på rundt  $10^5$  K. Mellom 15:00 og 00:00 UT fluktuerer temperaturen hurtig mellom  $2 \times 10^5$  K og  $4 \times 10^5$  K. Etter

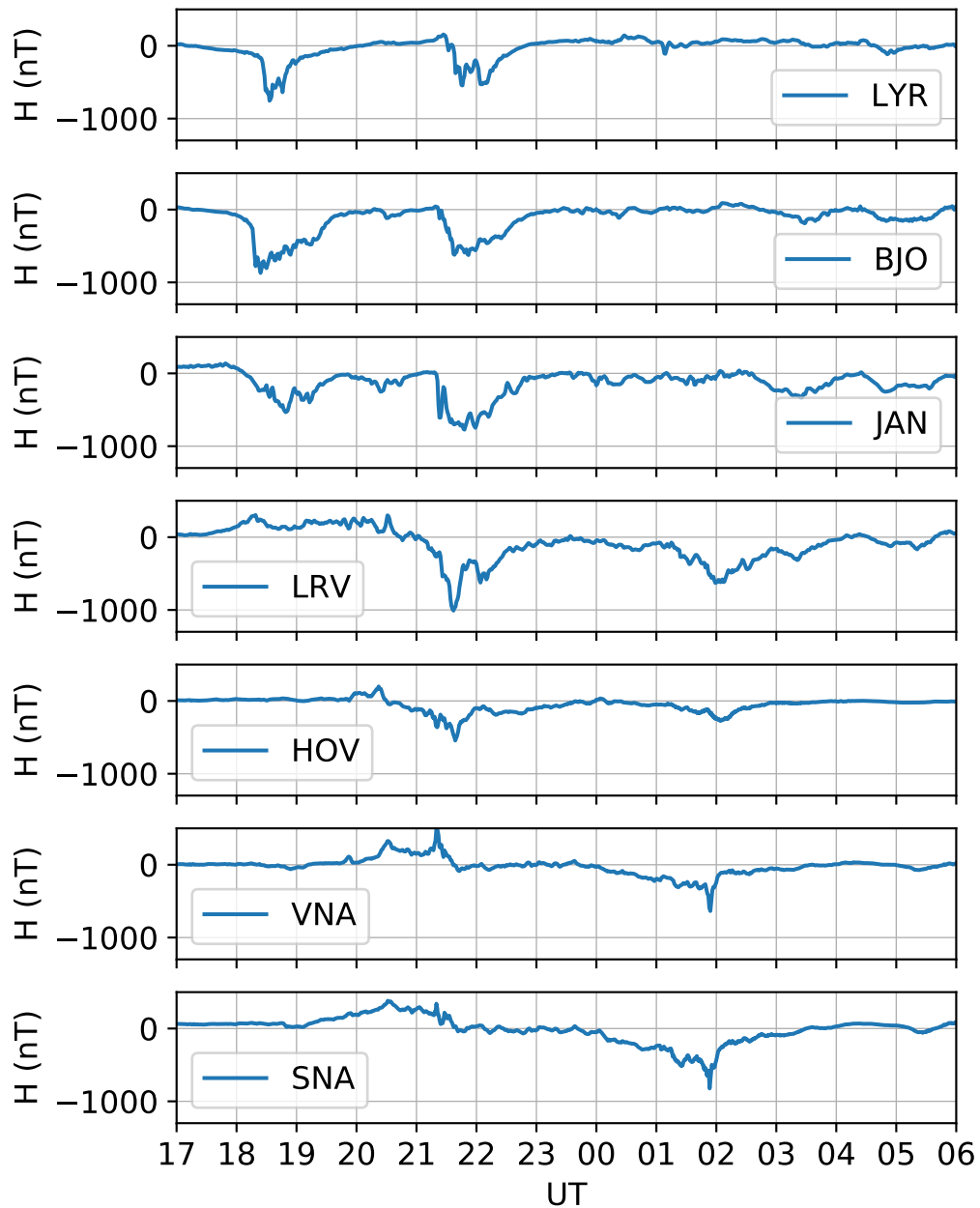
midnatt synker temperaturen først til  $2.5 \times 10^5$  K mellom 00:00 og 03:00 UT. 03:00 UT synker temperaturen til  $1 \times 10^5$  K, for å så øke til  $1.5 \times 10^5$  K klokken 05:00 UT.  $10^5$  er normal temperatur for solvinden ifølge tabell 2.1, temperaturen er over  $2 \times 10^5$  det meste av tiden den 18.-19. mars, dette er høyere enn normalen.

Det nederste panelet til figur 4.14 viser AE-indeksen. Frem til 14:00 UT er den på 500 nT, klokken 14:00 TU øker den til 1000 nT, for å så begynne å synke. Klokken 16:30 UT er den nesten nede på 0 nT. Klokken 18:00 UT stiger den raskt opp til 1000 nT. Den holder seg på 1000 nT frem til 20:00 UT hvor indeksen hurtig stiger til 1500 nT, for å så raskt synke 600 nT. Rundt 21:00 UT stiger AE-indeksen til 1100 nT og synker til 750 nT. 21:30 UT stiger indeksen raskt fra 750 nT til 1600 nT. Klokken 22:00 er den nede på 800 nT og holder seg der frem til klokken 23:00, da synker den til 300 nT. Mellom 00:00 og 01:00 UT er AE-indeksen 600 nT, og synker til 300 nT klokken 01:00 UT. Klokken 01:15 UT stiger indeksen igjen og når 800 nT klokken 02:00. Fra 02:30 UT begynner indeksen å synke og er 200 nT klokken 04:30 UT. Den øker så svakt frem til klokken 06:00 hvor den er 500 nT og faller etter dette. AE-indeksen gir informasjon om når man har sterke strømmer i nordlysovalen. Det er flere perioder med høy AE-indeks i dette tidsrommet, og dette tyder på sterke strømmer.

#### 4.3.2 Magnetometer

Den målte endringen i H-komponenten til magnetfeltet som funksjon av tid er vist i figur 4.15. I Longyearbyen er det en brå nedgang 18:15 UT ned til -600 nT, og en rask økning tilbake til normalt. Litt før nedgangen i Longyearbyen er det en brå nedgang på Bjørnøya ned til -800 nT; gjenvinningsfasen er litt lengre enn for Longyearbyen. På Jan Mayen er nedgangen tregere enn for de to foregående stasjonene. Den starter litt tidligere, 18:00 UT, men når bunnpunktet senere 18:45 UT. Minimumsverdien er på -500 nT. I Leirvogur er det en økning i magnetfeltet fra 17:30, det går opp til 300 nT. Det er ingen aktivitet på Færøyene.

I Longyerbyen er det en positiv endring i magnetfeltstyrken klokken 20:00 UT, og når toppunktet klokken 21:30, med en verdi på 100 nT. Etter toppunktet er det en brå nedgang til -500 nT. Gjenvinningsfasen varer til 22:45 UT. På Bjørnøya er det en liten dip rundt klokken



Figur 4.15: Endringer i H-komponenten som funksjon av tid i tidsrommet 17 UT–06 UT 18.–19. mars. Stasjonene vist er Loneyarbyen (LYR), Bjørnøya (BJO), Jan Mayen (JAN), Leirvogur (LRV) og Hov (HOV) på den nordlige halvkule, Neumayer (VNA) og Sanae (SNA) i Antarktis. Det normale magnetfeltet til hver stasjon er trukket fra.

20:30 UT. Klokken 21:30 UT er det en reduksjon i magnetfeltstyrken på -500 nT, med en påfølgende gjenvinningsfase. Klokken 23:00 UT er magnetfeltet tilbake til normalt. 20:00 UT på Jan Mayen er det en svak nedgang på 100 nT som stabiliserer seg klokken 21:00 UT. 21:30 UT er det i likhet med stasjonene lengre nord en kraftig reduksjon i magnetfeltet, bunnpunktet har en verdi på -800 nT. Magnetfeltet målt på Leirvogur reduseres raskt klokken 21:00 UT med -1000 nT; Klokken 23:00 UT er det tilbake til normalt. På Hov er det en liten økning klokken 20:00 UT på ca. 100 nT. 20:30 er det en reduksjon, denne er saktere enn på de nordligere stasjonene. Bunnpunktet er 21:30 og er på -500 nT. Færøyene har en lengre gjenvinningsfase og er tilbake til normalt rundt midnatt.

Fra klokken 19:00 UT er det en økning i magnetfeltet på Sanae til 450 nT. Den når toppen ca 20:30 UT og er tilbake på normalt nivå klokken 22:00 UT. Økningen på Neumayer begynner en time senere klokken 20:00 UT og når maksimum på 500 nT ca. klokken 21:00 UT. Magnetfeltet er tilbake på normalen samtidig som Sanae.

Etter 23:00 UT er det fluktuasjoner i de tre nordligste stasjonene Longyearbyen, Bjørnøya og Jan Mayen. Klokken 03:15 UT er det på Jan Mayen er dip i magnetfeltet på -300 nT.

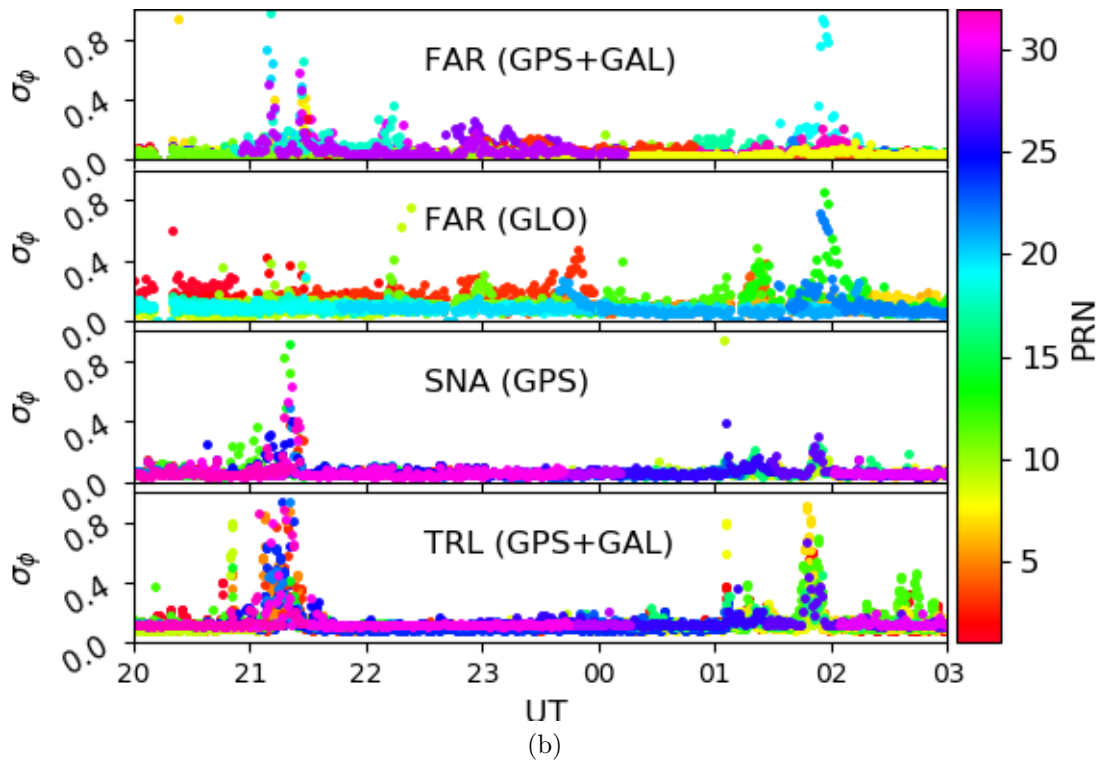
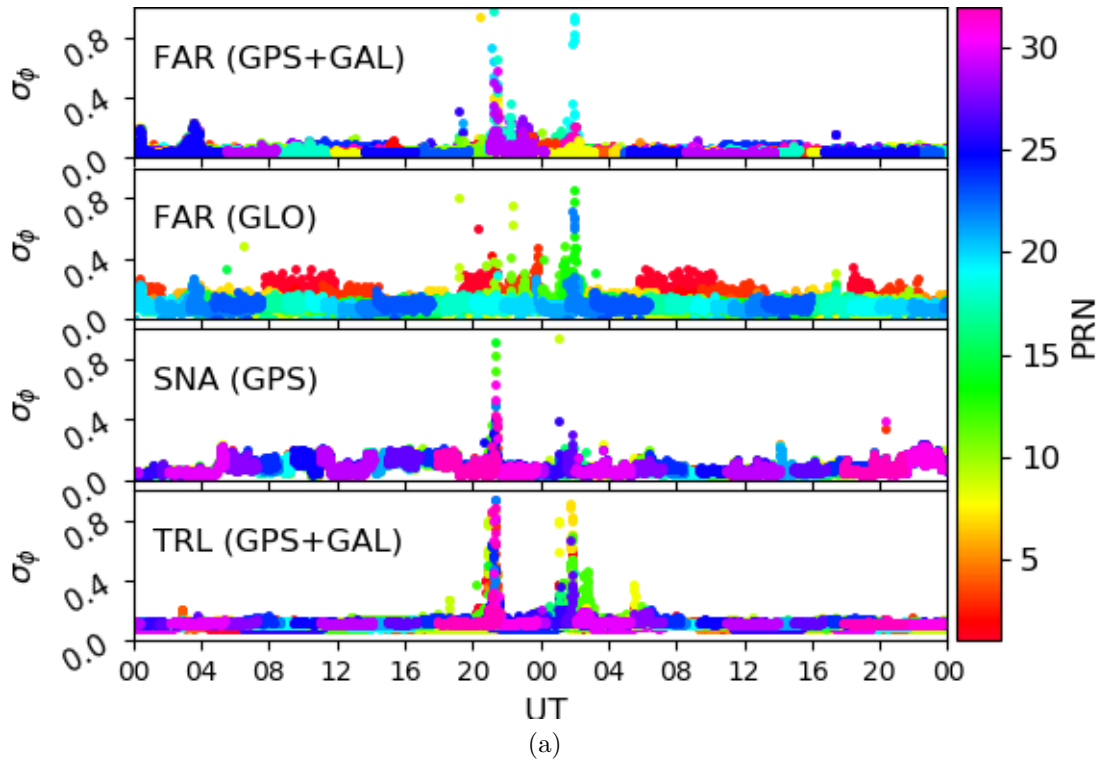
Fra midnatt blir magnetfeltet på Sanae og Neumayer redusert, med bunnpunkt klokken 02:00 UT. Reduksjonen er sterkest på Sanae, -800 nT. På Neumayer er reduksjonen -700 nT. Gjenvinningsfasen er først rask og så slak. ca. klokken 03:30 er magnetfeltet tilbake til normalt.

Den første substormen kan kun observeres på den nordlige halvkule og den var sterkest over Bjørnøya. 21:00 UT er ca. 23:00 MLT for Longyearbyen og Bjørnøya, men 19:00 MLT på Troll. Substorm nummer to var synlig på stasjonene i Dronning Maudland og i nord. Størst utslag på Island. Den siste substormen var bare over Isand, Færøyene og Dronning Maudland. Disse stasjonene ligger lengst vest.

### 4.3.3 Scintillasjoner

Figur 4.16 viser mengden scintillasjoner som funksjon av tid. De tre stasjonene Færøyene (FAR), Sanae (SNA) og Troll (TRL) er brukt. 19:30 UT er det scintillasjoner opp til 0.4 rad på Færøyene, 21:10 UT





Figur 4.16: Scintillasjoner fra de tre stasjonene Sanae (SNA), Troll (TRL), Færøyene (FAR). Tid på  $x$ -aksen, fasescintillasjoner på  $y$ -aksen. Fargene representerer hvilken satellitt det er og dens PRN-number. Panel (a) viser hele dagen den 18.–19. mars. Panel (b) er zoomet inn på det interessante tidsrommet 20:00–03:00 UT den 19. mars.

opp til 1 rad. 21:30 UT er det en ny topp med opp til 0.7 rad. På Troll når  $\sigma$  0.3 rad klokken 20:15 UT. Og det finnes en ny topp med 0.8 rad klokken 20:50 UT. På Sanae begynner scintillasjonene klokken 20:50 med nivåer på 0.4 rad. Klokken 21:05 UT er det en ny periode med høye verdier, med opp til 1 rad. De høye scintillasjonsnivåene kommer tidligere på Troll enn Sanae.

I perioden mellom 22:00 UT og 01:00 UT måles det scintillasjoner på Færøyene. 22:15 er det verdier opp til 0.8 rad. 23:00 UT er det opp til 0.3 rad, 23:50 UT 0.5 rad.

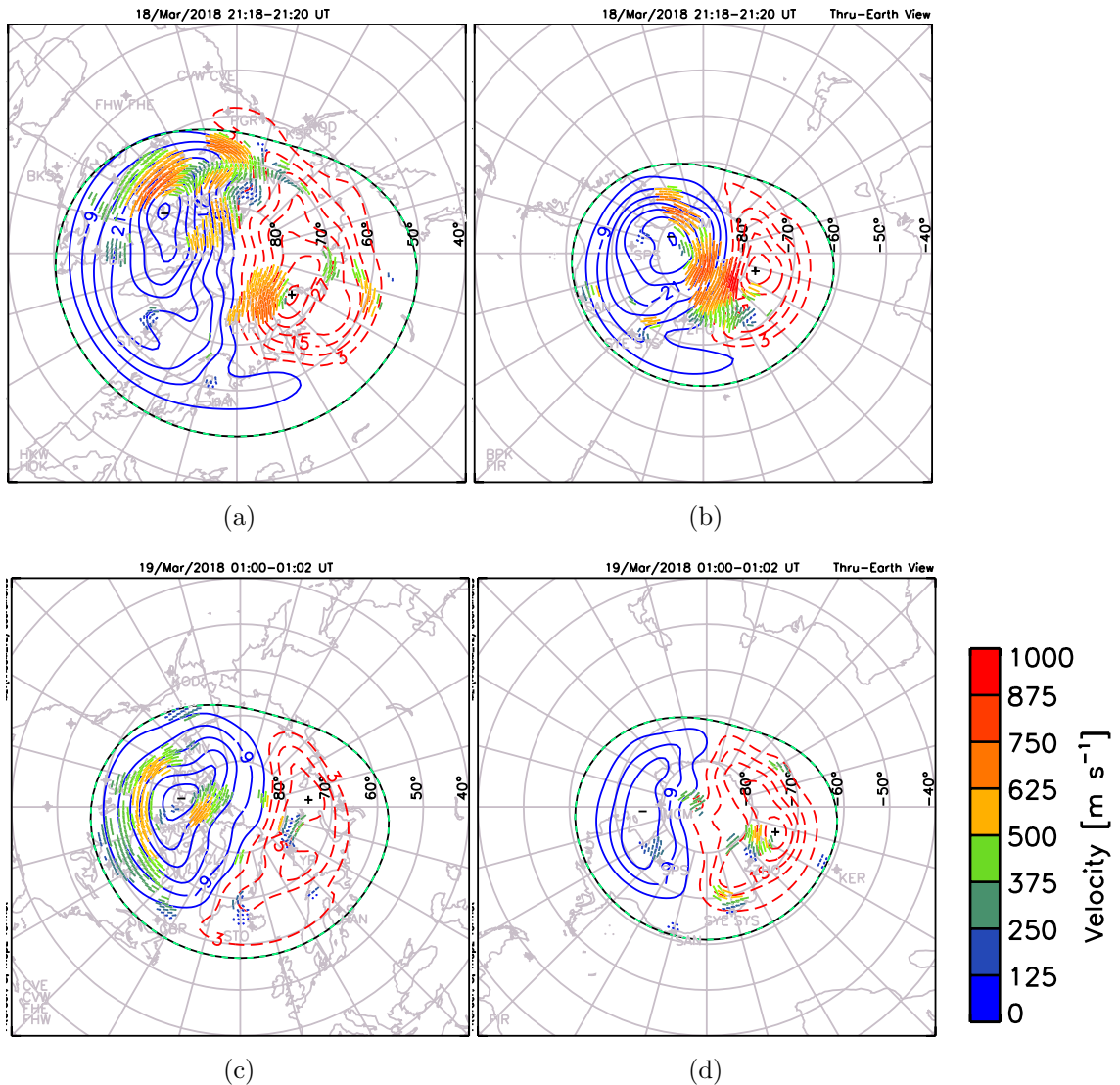
Mellom 01 og 02 UT er det scintillasjoner målt på alle de tre stasjonene. Først på Færøyene 00:55 UT, med en topp på 0.4 rad. Ca. 5 min senere er det en ny topp på 0.6 rad. 01:55 UT er det en høyere topp på 1 rad. På Sanae er det litt scintillasjoner på opp til 0.4 rad mellom 01:00 UT og 01:30 UT. 01:45 er det en topp på 0.4 rad. I halv tretiden er det noen små scintillasjoner på 0.2 rad.

Magnetometeret viste en substorm mellom 18 og 20 UT i nord. Denne gav ikke utslag på Færøyene og det ble ikke observert scintillasjoner. Klokken 19:30 UT var det et langvarig positivt utslag på magnetometeret på Sanae. Fra 20:15 UT er det scintillasjoner på Troll og Sanae. De høyeste utslagene på magnetometeret ble målt rundt klokken 21 UT, omtrent samtidig er det høye scintillasjonsverdier.

#### 4.3.4 Superdarn

Rundt 21 UT er det tydelige scintillasjoner på både den nordlige og sørlige halvkule. Det er også endringer i magnetfeltet. Figurene 4.17 og viser konveksjonen i polarhettene for Arktis (a) og Antarktis (b) klokken 21:18 UT. Kartet er orientert etter magnetisk lokaltid slik at 12:00 MLT er opp, dette gjør at kartet over Antarktis er speilvendt. Pilens farge angir hastigheten og pilens retning er gitt ut fra prikken.

I Arktis og Antarktis måles det høye hastigheter, de høyeste målt er over 1000 m/s. Det er mange målepunkter på begge halvkulene. Konveksjonscellene i nord er estimert til å være større enn i sør. Det er tilbakespredning på Island og på Sanae, men hastighetene på Sanae er høyere.



Figur 4.17: Målinger fra Superdarn. Resultatet fra Arktis er vist i figurene (a, c), og fra Antarktis (b,d). Tidsintervallet 21:18–21:20 UT den 18. mars (a,b), 01:00–01:02 UT den 19. mars (c,d). Pilene viser rettingen på konveksjonen og fargen viser den målte hastigheten. Pilens retning er fra prikken. De rød og blå cellene viser anslag av størrelsen på konveksjonscellene. Kartet er orientert etter MLT. Øverst er 12 MLT. Denne orienteringen av kartet gjør at den sørlige halvkule er speilvent.

Det ble observert scintillasjoner både i Antarktis og på Færøyene i ettiden på natten. I målingene fra magnetometeret derimot er det kun en klar substorm på Neumayer og Sanae. På de nordlige stasjonene kan vi se uroligheter i magnetfeltet. Figurene 4.17c og 4.17d viser målingene fra Superdarn klokken 01:00 UT. Både i Arktis og Antarktis er det generelt lavere hastigheter enn klokken 21. Det er målepunkter over Island og Sanae, men lavere hastigheter.

Begynnelse på ny tekst: Figur 4.17b viser målinger fra Superdarn klokken 21:18 og 01:00 UT for både Arktis og Antarktis. Pilenes viser retningen til strømmingen og fargen viser hastigheten. Kartet bruker magnetisk lokaltid og magnetiske breddegrader, 12:00 MLT er øverst. Bruken av MLT gjør at kartet over Antarktis er speilvendt.

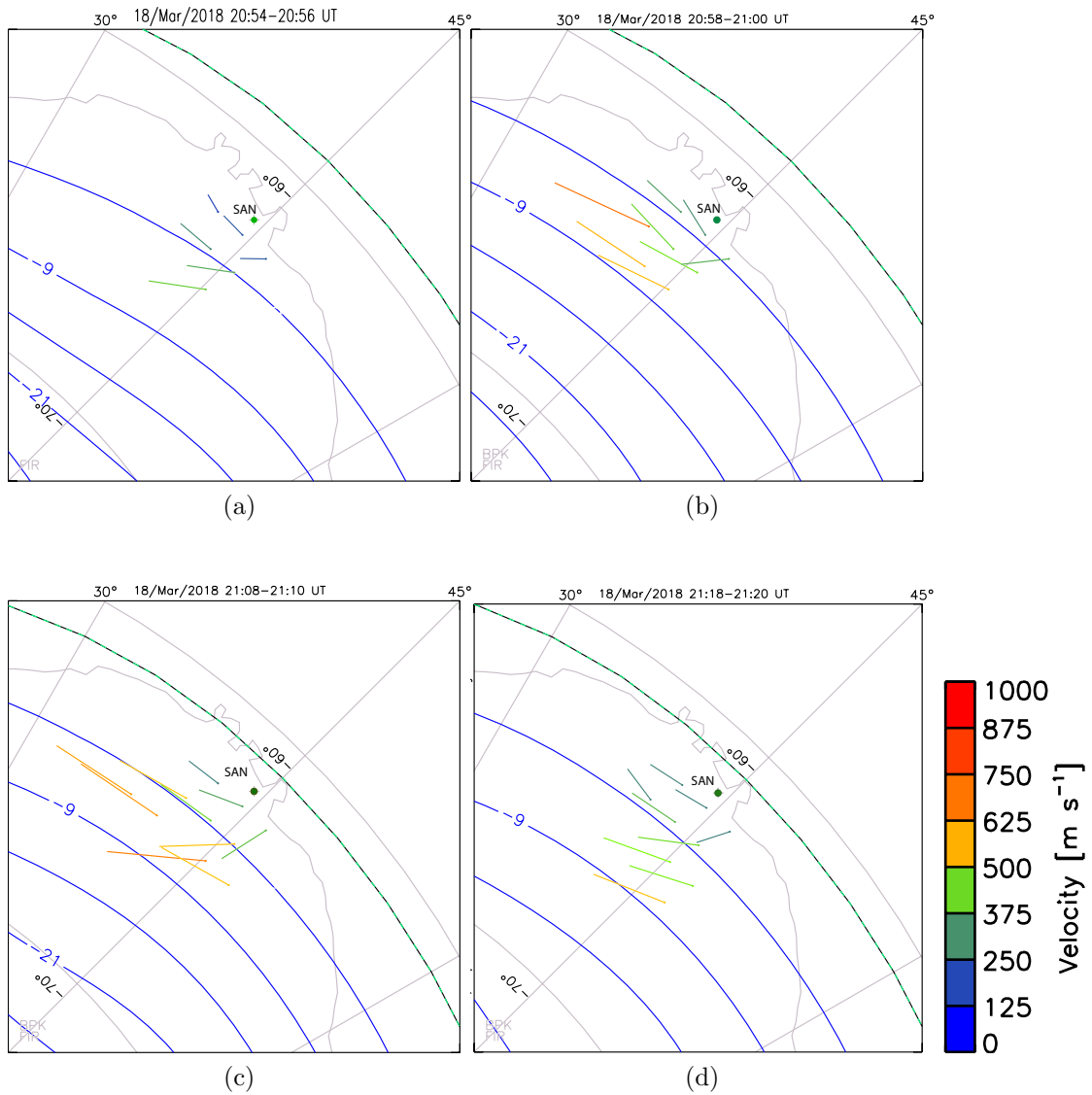
Målingene fra Arktis klokken 21:00 UT er vist i figur 4.17a. Det er mange målinger fra mange radarer, dette tyder på en irregulær ionosfære. Hastigheter opp til 1000 m/s er målt flere steder.

Figur 4.18 viser Superdarn-målinger i tidsrommet 20:54–21:20 UT. Disse plottene er i magnetiske koordinater og er ikke speilvent slik som figur 4.18. Klokken 20:54 UT er retningen vestlig og farten er lav. I øst er retningen dreiet litt mot sør. I nord er farten ca 125 m/s, og i sør ca 375 m/s. Farten har økt 20:58 UT, nærmest Sanae er den ca 250 m/s og opp til 875 m/s lengre sør. Retningen er fremdeles vestlig, bortsett fra øst for Sanea hvor den er sør-vestlig. 21:08 UT er det fremdeles en forskjell i fart mellom nord og sør. Farten i nord, nær Sanae, er ca 125 m/s, mens lengre sør er den ca. 625 m/s. Retningen er lik som før. Ti minutter senere 21:18 UT er farten redusert, ca. 125 m/s i nord og 500 m/s helt i sør.

I dette tidsrommet er det stor forskjell i hastighet på kort avstand. Dette kan gi Kelvin-Helmholtz-instabilitet som vil gi irregulariteter. Den store forskjellen i hastighet kan også tyde på at Sanae er på kanten av konveksjonen.

#### 4.3.5 DMSP

DMSP-satellitten F17 sin bane passerte 60.9°N, 59.6°V klokken 21:27 UT, dette er på Grønland. Troll og Sanae sine konjugerte punkt, som ligger øst for Grønland var da i synsfeltet. I figur



Figur 4.18: Superdarn hastighetsdata fra Sanae. Pilenes farge viser hastigheten til konveksjonen. Retningen er gitt fra retningen til linjen utifra pilens prikk. Tidsintervaller fra venstre til høyre: 20:54–20:56, 20:58–21:00, 21:08–21:10, 21:18–21:20 UT.

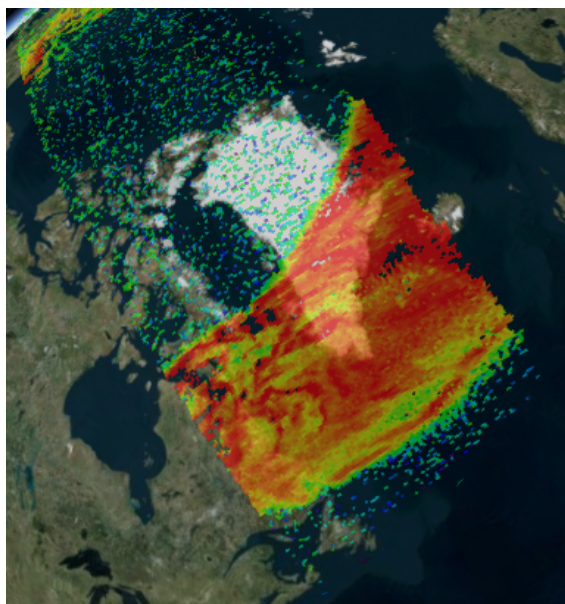
4.19 er mengden UV-stråler målt av satellitten vist. Det er en bred auroraoval som strekker seg langt sør for Grønland. Hvis auroraovalen er tilsvarende på den sørlige halvkule er det aurora over Troll og Sanae på dette tidspunktet, men det finnes ikke DMSP-data for den sørlige halvkule på dette tidspunktet.

### 4.3.6 Plassering av ir-regulariteter

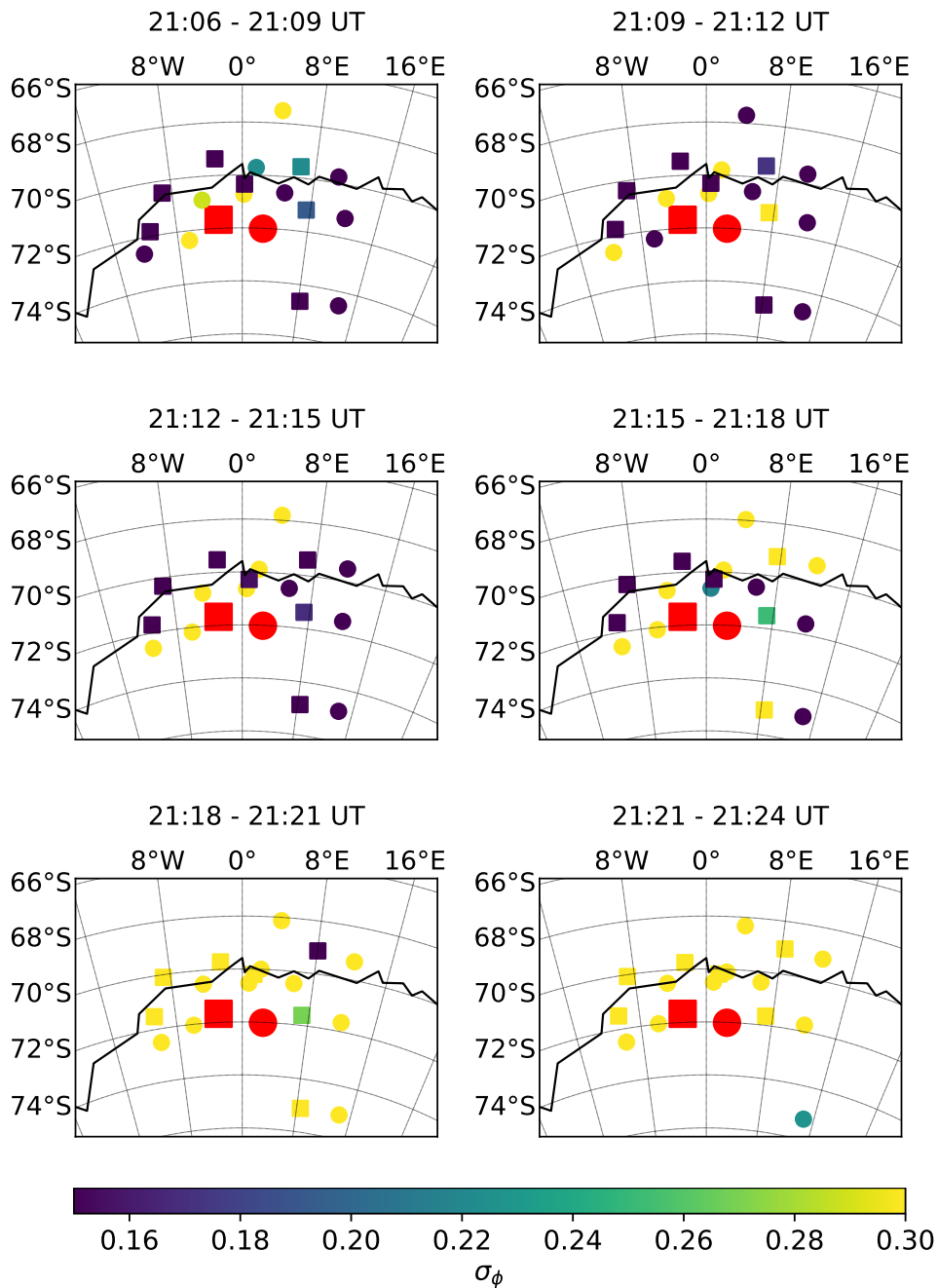
I figur 4.20 ser vi signalene fra satellittene sitt ionosfæriske gjennomboringspunkt i geografiske koordinater, og det høyest scintillasjonsnivået på signalet innenfor hvert tidsintervall – som er på tre minutt. Firkantene er målinger fra Sanae og rundinger fra Troll. Den røde sirkelen og firkanten markerer henholdsvis Troll og Sanaes posisjon.

Mellom klokken 21:06 UT og 21:09 UT er det scintillasjoner på signalet fra noen satellitter. De fleste av disse satellittene har IPP nær Troll og Sanae, og har maksimale scintillasjonsnivåer mellom 0.22 rad og minst 0.3 rad. Den nordligste satellitten med IPP på ca.  $67^\circ$  S, har et scintillasjonsnivå på minst 0.3 rad. I tidsintervallet 21:09–21:12 UT er det fremdeles bare noen satellitter sine signal som har scintillasjoner. Det er omtrent de samme som i forrige tidsintervall, og scintillasjonsnivået har økt til over 0.3 rad for alle satellittene. Den nordligste satellitten derimot har ikke noe scintillasjoner på dens signal.

I tidsintervallet 21:12–21:15 UT er de østligste satellittene ikke



Figur 4.19: UV-stråling i LBH-L-spekteret målt av DMSP F17. Strålingen er assosiert med mye partikkelnedbør. 21:27 passer banen til DMSP  $60.9^\circ$ N,  $59.6^\circ$ V. Dataene er levert uten intensitetskala.



Figur 4.20: Ionosfærisk gjennomboringspunkt for signalet fra satellittene i geografiske koordinater. Altituden er satt til 350 km. Rundinger er målinger fra Troll og firkanter fra Sanae. For Troll er både GPS og Galileo inkludert, men for Sanae er det kun GPS-satellitter. Rød firkant er posisjonen til Sanae og rød sirkel er posisjonen Troll. Det er tidsintervaller på 3 min fra 21:06–21:24 UT. Fargen viser styrken til scintillasjonene på signalet fra satellittene.

påvirket av scintillasjoner. Signalet fra de vestligste satellittene er kun påvirket når det observeres på Troll og ikke på Sanae, scintillasjonsnivået på målingene på Troll er minst 0.3 rad. Den nordligste satellittens signal har igjen scintillasjoner på minst 0.3 rad.

Det neste tidsintervallet 21:15–21:18 UT er det flere satellitter som har scintillasjoner på signalet. Den sørligste satellitten har scintillasjoner på målingen fra Sanae, med et scintillasjonsnivå på minst 0.3 rad. I vest er det fremdeles kun forstyrrelser på målingene til Troll. Flere av satellittene nord for 70°S har høye scintillasjonsnivåer.

I tidsrommet 21:18–21:21 UT har nesten alle satellittene et scintillasjonsnivå på minst 0.3 rad. Untaktet er Trollmålingen på satellitten med IPP på 69°S, 8°Ø som har et scintillasjonsnivå rundt 0.15 rad og Troll målingen til satellitten som er rett øst for Troll, dens scintillasjonsnivå er på 0.25 rad. I det siste tidsintervallet 21:21–21:24 UT som er vist i figur 4.20 er det scintillasjonsnivå på minst 0.3 rad på signalet fra nesten alle satellittene. Unntaket er den lengst sør som har et scintillasjonsnivå på 0.22 rad.

IPP til de aller fleste satellittene er nord for Troll og Sanae, og det er kun en satellitt som er langt sør. De høye hastighetene Superdarn på Sanae var langt sør. Nær Sanae var det lavere hastigheter.



# Kapittel 5

## Diskusjon

### 5.1 Oppsummering

Statistikkstudien viste at forekomsten av fasecintillasjoner økte med høyere Kp-indeks. Forekomsten ved Kp=1 var nærmest null. Da Kp-indeksen var 4 var det scintillasjoner på over 0.25 rad opp til 7% av målingene. Resultatene for Kp=6 viste høy forekomst av scintillasjoner, over 7%.

Scintillasjonene ved Kp=4 var konsentrert i tidsrommet 01–05 MLT, det var veldig få scintillasjoner før midnatt. I resultatene fra både Troll og Sanae var det høy forekomst på grensen til og innenfor Feldstein-ovalen; målingene fra Troll viser en høy forekomst også lengre nord mellom 60 og 63°. Disse scintillasjonene i subaurorale strøk er veldig interessante.

Det var veldig få dager med Kp=6 i 2018 – som vist i tabell 3.2 er det 10 tidsintervaller med Kp 6, fordelt på 8 dager. Antall målinger med Kp 6 er derfor lavt. I likhet med Kp 4 er det observert høy forekomst av scintillasjoner postmidnatt, men i motsetning til Kp 4 er også ofte scintillasjoner premidnatt. Med så svakt datagrunnlag er det vanskelig å trekke noen konklusjoner utifra statistikken.

Swarm viste at fra midnatt er Troll og Sanae ofte i den ionosfæriske bølge dalen sitt bunnpunkt, og at mellom klokken 02 og 03 UT er bølgedalen bredere enn mellom klokken 04 og 05 UT. Disse resultatene bør taes med forbehold, da de bare viser mai og er få målinger. Det er

kjent at bølgedalen varierer med årstid (Aa med flere 2020).

### 5.1.1 26.–27. februar

Den første kasusstudien i denne oppgaven fokuserte på 26.–27. februar. Solvinddataene viste flere perioder med negativ  $B_z$ , dette gav grunnlaget for en dag med mye ionosfærisk og geomagnetisk aktivitet. Målinger gjort av magnetometerene viste to distinkte substormer, en rundt midnatt og en fra firetiden UT. Den første substormen gav tydelig endring i magnetfeltet på de tre nordligste stasjonene Longyearbyen, Bjørnøya og Jan Mayen, men lite endring på Island, Færøyene, Neumayer og Sanae. Substormen i firetiden gav utslag på alle stasjonene. Den største endringen er på Sanae, der begynner også substormen først. Samtidig med substormen ved midnatt er det scintillasjoner på GNSS-signaler mottatt på Jan Mayen, men ikke på de andre stasjonene. I firetiden, samtidig med den andre substormen er det målt scintillasjoner på alle stasjonene.

For den første substormen har Superdarn mer tilbakespredning på den nordlige halvkule og anslår større konveksjonsceller. Klokken 04:00 UT måler Superdarn høyere hastigheter i Arktis enn Antarktis. På Sanae, der klokken er 02 MLT er hastighetene i nordlig og nord-østlig retning.

To DMSP- satellitter passerer Dronning Mauds land under den andre substormen. Den første (F18) passerer i innledningsfasen til substormen og observerer noe aurora i området. Satellitt F17 passerer under hovedfasen til substormen og observerer mer intens aurora. Det er mer og kraftigere scintillasjoner under passering av satellitten F17 enn F18.

### 5.1.2 18.–19. mars

Den høyeste Kp-indeksen under kasusstudien 18.–19. mars er Kp=6. Også i denne perioden er  $B_z$  og  $B_y$  mye negativt, dette gir opphav til fluksomkobling på dag- og nattsiden som fører til substormer. Det er tre substormer denne kveld/natten, i denne oppgaven fokuseres det på substormen som fant sted mellom 21 og 22 UT. Denne gir reduksjon i magnetfeltet på alle stasjonene på den nordlige halvkule

og en økning i magnetfeltet på Neymayer og Sanae er det en økning i magnetfeltet. Superdarn har mye tilbakespredning som viser en irregulær ionosfære, målingene viser høye hastigheter både i Arktis og Antarktis. Strømningene over Sanae kommer fra vest og har høye hastigheter. I dette tidsrommet er det også en økning i scintillasjoner på Troll, Sanae og Færøyene. Også her øker mengden scintillasjoner i hovedfasen av substormen.

## 5.2 Mottakerstøy

Siden dette er de første resultatene fra Troll har det vært fokusert på stabiliteten til scintillasjonsmottakeren. I metoddelen ble en kartlegging av omgivelsene til Troll presentert. Der ble det funnet at flere objekter i nærheten av antennen påvirker målingene ved lave elevasjoner. For å imøtegå dette problemet er elevasjoner under  $30^\circ$  fjernet. Støynivået i mottakeren på Troll er kartlagt og sammenlignet med mottakeren på Sanae. Troll hadde 0.11 rad som median fasescintillasjonsnivå relatert til støy, mens Sanae hadde 0.05 rad.

## 5.3 Diskusjon

### 5.3.1 Asymmetri kasusstudier

Det er flere effekter som gir asymmetri mellom den nordlige og sørlige halvkule. Større avstand mellom den geografiske og magnetiske polen i sør gir ulik solinnstråling og dermed forskjellig plasmakonsentrasjon. Forekomsten polarskyer er generelt høyere på den sørlige halvkule enn på den nordlige (Spicher med flere 2017). Det er vist sterkere irregulariteter i Antarktis enn Arktis (Jin med flere 2019). Årstidsvariasjon er også en viktig faktor. IMF sin  $B_y$ -komponent har mye å si for konveksjonsmønsteret og hvor irregulariteter og partikkelnedbør oppstår.

Nordlys og sørllys har vist seg å ikke alltid være symmetrisk både i styrke og plassering.  $B_y$  har påvirkning på når på døgnet i MLT

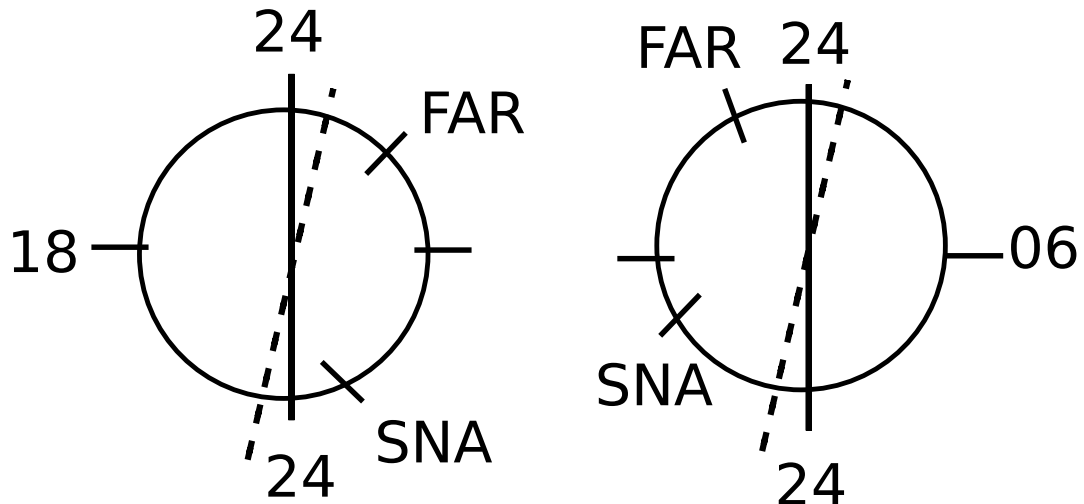
substormen er plassert; Østgaard med flere (2011) fant at ved  $B_y < 0$  er substormen tidligere på kvelden på den nordlige halvkule enn på den sørlige og vice versa. Denne forskjellen øker med  $B_y$ . Årstid påvirker styrken på aurora, om vinteren er energien til elektronnedbøren høyere enn om sommeren, men antall elektroner er lavere (Liou, Newell og Meng 2001).

Stasjonene i Antarktis brukt i denne oppgaven er i magnetiske lengdegrader lengre vest enn dem i Arktis, og dermed ikke helt konjugerte. LYR, BJO og JAN ligger lengre nord og lengre øst for LRV og HOV. Det konjugerte punktet til VAN, SNA og TRL ligger lengre vest for LRV og HOV, men på sammenlignbare magnetiske breddegrader.

Den første substormen 26.–27. februar viste kun utslag i de nord-østlige magnetometerene (LYR, BJO, JAN) og scintillasjoner kun på JAN. At hverken Færøyene eller stasjonene i Antarktis målte scintillasjoner tyder på en hvis symmetri. Superdarn viste flere målepunkter og større konveksjonsceller på den nordlige halvkule enn den sørlige.

Substormen i firetiden gav kraftigere og mer scintillasjoner på Troll og Sanae sammenlignet med Færøyene og Jan Mayen. Scintillasjonene på den sørlige halvkule begynte også tidligere og varte lengre. Plasseringen av IPP til signalene viser at det var de satellittene rundt Troll og Sanae og de satellittene vest for dem som var mest påvirket, og at de østligste satellittene kun ble påvirket utover i substormen. Hvis plasseringen av irregulariteter hadde vært helt speilet ville ikke mottakeren på Færøyene kunne observere disse irregularitetene. Alle magnetometerene målte reduksjon i magnetfeltet, de to stasjonene i Antarktis, og stasjonene på Island og Færøyene målte denne reduksjonen først. Superdarn anslår større konveksjonsceller på den sørlige halvkule, men måler høyere hastigheter i Arktis.

$B_y$ -komponenten til IMF er negativ i ca. en halvtime i forkant av substormen. Utifra de statistiske resultatene til Østgaard med flere (2011) kan en derfor forvente at aurora kommer tidligere på den sørlige enn den nordlige halvkule i MLT. Som illustrert i figur 5.1, figuren viser jorden sett fra nattsiden med klokken 18 MLT i vest og klokken 06 MLT i øst, den solide linjen viser medianen klokken 24:00 MLT, og den stiplede linjen viser hvor magnetfeltlinjen går hvis man har en sterk effekt av at  $B_y < 0$ . Siden Sanae som er nærmest magnetisk midnatt



Figur 5.1: Jorden sett fra nattsiden 24 MLT. Soloppgang (06 MLT) er til høyre og solnedgang (18 MLT) er til venstre. Den solide linjen viser meridianen klokken 24:00 MLT. Den stiplede linjen viser en nylig omkoblet magnetfeltlinje hvis  $B_y < 0$ , den er postmidnat på den nordlige halvkule, men premidnatt på den sørlige halvkule. Figuren til venstre viser situasjonen i kassstudien i februar, FAR viser plasseringen til Færøyene klokken 04:30 UT (ca. 04:12 MLT), SNA viser plasseringen til Sanae klokken 04:30 UT (ca. 02:24 MLT). Figuren til høyre viser situasjonen i kassstudien i mars: FAR viser plasseringen til Færøyene klokken 21:30 UT (ca. 21:12 MLT), SNA viser plasseringen til Sanae klokken 21:30 UT (ca. 19:24 MLT).

får en større avstand til fluksomkoblingsstedet, og Færøyene blir nærmere, kunne man forvente mer likheter mellom de to stasjonene siden øst-vest avstanden er redusert. Siden  $B_z$ -komponenten er mer negativ enn  $B_y$ -komponenten, kan det hende at denne effekten ikke blir betydelig. Siden det er likheter mellom magnetometermålingene til Sanae og Leirvogur, og det er noe likheter i scintillasjonsmålingene til Troll/Sanae i forhold til Færøyene, kan det tyde på at  $B_y$  har spilt en rolle.

Kassstudien 18.–19. mars fokuserer på nitiden på kvelden. Magnetometerene på den nordlige halvkule målte en reduksjon i magnetfeltet, reduksjonen var høyest på den vestligste stasjonen Leirvogur. Neumayer og Sanae har en økning i magnetfeltet i timen før hovedfasen til substormen observert på den nordlige halvkule. Omtrent

samtidig med hovedfasen reduserer magnetfeltet i Antarktis til sin normale styrke. Økningen i magnetfeltet tyder på østgående strømmer. Superdarn viser høye hastigheter på begge halvkulene og at formen på cellene er like, men at cellen på den nordlige halvkule er størst. Både Island og Sanae ligger på kveldssiden av konveksjonscellen, og Superdarn estimerer at Sanae ligger på kanten av cellen og at Island ligger inni. I denne tidsperioden er det scintillasjoner på Færøyene, Sanae og Troll. Scintillasjonene begynner tidligere på de sørlige stasjonene enn på Færøyene og signalet fra flere satellitter påvirkes.

IMF sin  $B_y$ -komponent er negativ i forkant og under denne substormen, og dette kan som forklart over gi partikkelnedbør lengre vest på den sørlige halvkule og lengre øst på den nordlige halvkule. Siden  $|B_y| > |B_z|$  kan denne effekten statistisk sett få større betydning i denne kasustudien enn studien i for februar. At det er svake østlige strømmer over Dronning Mauds Land og sterke vestgående strømmer over Island taler imot at forskjellen i MLT er lignet ut.

Scintillasjonene på Troll og Sanae starter tidligere, er sterkere og påvirker flere satellitter, men forskjellene er mindre i denne studien enn i februar. At mangetometerene måler veldig forskjellig endring i magnetfelt på Island og Færøyene sammenlignet med Neumayer og Sanae tyder på forskjeller i strømsystem mellom de to halvkulene.

I begge disse kasusstudiene er det mer og kraftigere scintillasjoner på Troll og Sanae sammenlignet med Færøyene, dette stemmer overens med funnene til Jin med flere (2019) som viste at det er mer irregulariteter i Antarktis enn Arktis, men Jin med flere (2019) viste også at det var mer irregulariteter på andre siden av Antarktis hvor det er mer solinnstråling enn over Dronning Mauds Land. Det er flere faktorer som gjør det vanskelig å trekke konklusjoner ut av min studie. For det første selv om stasjonene ligger på omtrent samme magnetiske breddegrad, ligger Færøyene lengre magnetisk vest. En annen faktor er at mottakermodellene er forskjellig, dette kan påvirke scintillasjonsverdien. Utvalget av dager i denne studien baserte seg på dager med mye scintillasjoner på Troll. Ved valg av dager med mye scintillasjoner på Færøyene kunne bildet ha sett anderledes ut. Her er det anbefalt å gjøre flere slike studier for å kunne diskutere mine resultater i en større kontekst.

Asymmetrien i jordens magnetfelt gjør at Troll ligger på høyere geografisk breddegrad enn sitt konjugerte punkt. Dette påvirker

mengden plasma produsert av solinnstråling, som igjen kan påvirke prosesser som skaper irregulariteter. Det er derfor et interessant spørsmål om det er mer eller mindre irregulariteter i disse områdene. Denne oppgaven har for svakt datagrunnlag til å kunne besvare dette spørsmålet, men vil være interessant for videre forskning.

### 5.3.2 Årsaker til scintillasjoner kasusstudier

Forskjellige mekanismer kan forårsake irregulariteter i ionosfæren på høye breddegrader. Blobber er områder med høyere plasmatetthet enn omgivelsene. Jin med flere (2016) definerer to typer blobber. BT-1 er polarskyer som entrer auroraovalen fra polhetten, BT-2 er blobber produsert lokalt i auroraovalen av partikkel nedbør. Videre viser studien at BT-1 blobber skaper mer scintillasjoner enn BT-2, og at BT-1 blobber skaper mest scintillasjoner om de kombineres med partikkelnedbør. Crowley med flere (2000) har vist at BT-1 kan bli transportert ned til den ekvatorialske grensen til auroraovalen og ned til subaurorale strøk, andre studier har også vist blobber i disse områdene og i den ionosfæriske bølgedalen (Tsunoda 1988). Polarskyer forekommer oftere på den sørlige enn nordlige halvkule (Spicher med flere 2017).

Partikkelnedbør er også assosiert med scintillasjoner og irregulariteter er vist i flere studier (Prikryl med flere 2016; Prikryl med flere 2010; Tsunoda 1988; Kinrade med flere 2013), men Jin med flere 2016 fant svak sammenheng mellom partikkelnedbør og scintillasjoner, men viste at partikkelnedbør kan forsterke allerede eksisterende strukturer. Sterke elektrojetter er vist å gi scintillasjoner, og sterkere scintillasjoner på polsiden av elektrojetten enn på ekvatorsiden (Jacobsen og Schafer 2012; Prikryl med flere 2016).

Kasusstudien i februar viser svake scintillasjoner på noen satellitter i substormens innledningsfase og kraftige scintillasjoner på alle satellittene i hovedfasen. Den sterke vestgående strømmen i hovedfasen kan være årsaken til scintillasjoner (Jacobsen og Schafer 2012; Prikryl med flere 2016). DMSP viser litt aurora i innledningsfasen og mye i hovedfasen. Dette kan tyde på at partikkelnedbør er en komponent i dannelsen av irregulariteter i dette tidsrommet.

I mars er det i denne oppgaven fokusert på substormen før midnatt.

Magnetometerene i Antarktis målte en liten økning i magnetfeltet som betyr en østgående strøm, om strømmen er svak eller om den er langt unna Sanae er ikke mulig å si uten flere magnetometere. Superdarn viste høye konveksjonshastigheter på begge halvkulene. Om dette kan ha gjort det mulig å transportere en BT-1 ned til kanten Troll/Sanae er usikkert, det er få studier som har studert hvor langt slike blobber kan transporteres, men Crowley med flere (2000) har vist at det er mulig. Om en blobb er årsaken til scintillasjonene er derimot umulig å si med data inkludert i denne studien. Superdarn viser hurtig bevegelse i plasmaet langt sør fra Sanae og saktere nær radaren. Dette kan tyde på at Sanae er på kanten av konveksjonscellen i dette tidsrommet. Forskjellen i hastigheter i dette området kan gi Kelvin-Helmholtz-insabiliteter som i tillegg kan strukturere plasma.

I området rundt det konjugerte punktet var det aurora, hvis det er en symmetri, var det også aurora over Troll i dette tidsrommet. På grunn av  $B_y < 0$  og forskjeller i magnetometerutslag på de to halvkulene er det usikkert å anta en slik symmetri i aurora. Hvis det er aurora også over Troll kan det både skape BT-2 og strukturere BT-1 som er kilder til scintillasjoner.

### 5.3.3 Statistikk

I mine funn øker forekomsten av scintillasjoner med høyere Kp og Kp måtte være minst 4 for å observere nevneverdig forekomst av scintillasjoner. Ved høy Kp-indeks utvider auroraovalen seg, og kommer nært Troll og Sanae. Troll og Sanae er relativt sett langt nord, at kun observerer scintillasjoner ved høy Kp kan forklares med en slik utvidelse av auroraovalen i ekvatorialsk retning. Dette stemmer overens med funnene til Spogli med flere (2009) og Prikryl med flere (2015), begge observerte at ved høy Kp-indeks utvider området med scintillasjoner på nattsiden, utvidelsen skjer både i polvis og ekvatorvis retning, ned til  $55^\circ\text{N}$ , som stort sett er subauroralt. Spogli med flere (2009) og Prikryl med flere (2015) fant i likhet med denne studien at forekomsten av scintillasjoner øker med Kp-indeksen.

Resultatene fra Troll og Sanae viser at det er høyest forekomst av scintillasjoner i postmidnatt sektoren, både i og nord for den statistiske auroraovalen. Både Spogli med flere (2009) og Prikryl med flere (2015) observerte at forekomsten av subaurorale scintillasjoner var vesentlig



høyere postmidnatt enn premidnatt. Et viktig spørsmål i forklaringen av de subaurorale scintillasjonene er om de virkelig er subaurorale. Auroraovalen sine grenser i statistikkstudien i denne oppgaven er basert på en statistisk modell. Som Holzworth og Meng (1975) beskrev vil ikke Feldstein-ovalen stemme like bra på den sørlige halvkule ved høye Kp-verdier som på den nordlige halvkule. Kasustudien i februar viser at de kraftigste scintillasjonene fant sted samtidig som DMSP observerte aurora, det samme fant Ngwira, McKinnell og Cilliers (2010), om dette er enkelttilfeller eller om dette også gjelder de andre periodene inkludert i statistikken kan ikke tolkes utifra dataene presentert her.

Flere forklaringsmodeller for subaurorale irregularitetene er foreslått. Prikryl med flere (2015) foreslår subauroral polarization stream (SAPS) som forklaring på subaurorale scintillasjoner som oppstår postmidnatt. SAPS er sterke strømminger som går fra omtrent midnatt i retning ettermiddagen. I en kasusstudie (Prikryl med flere 2013) er det vist at SAPS kan være assosiert med scintillasjoner. SAPS går i premidnatt-retning, og er sterkere premidnatt (Foster og Vo 2002, Clausen med flere 2012). Hvis SAPS var viktig for dannelsen av subaurorale irregulariteter, burde man observere mer scintillasjoner premidnatt enn postmidnatt i subaurorale områder. SAPS er derfor lite trolig årsaken til scintillasjonene postmidnatt subauroralt.

At de subaurorale scintillasjonene har sammenheng med ionosfærisk bølgedal er blitt foreslått av Spogli med flere (2009). Voiculescu, Virtanen og Nygrén (2006) viste at posisjonen og forekomsten til bølgedalen varierer med Kp-indeksen. Både Swarm-målingene i denne studien og Aa med flere (2020) viser at etter midnatt MLT er ionosfærisk bølgedal ofte i nærheten av Troll. Det ser ut som at det kan være en sammenheng mellom ionosfærisk bølgedal og utvidelse av auroraovalen. At den bratte gradienten i elektrontetthet og dynamikken Dungey-syklusen skaper gir strukturer. Det er også observert blobber i den ionsosfæriske bølgedalen som kan skape scintillasjoner (Tsunoda 1988; Crowley med flere 2000).

# Kapittel 6

## Konklusjon

Den statistiske studien fra Troll og Sanae viser at ved høy geomagnetisk aktivitet forekommer fasescintillasjoner på GNSS-signaler som mottaes på Troll og Sanae. Forekomsten er høyere etter midnatt og er tilstede både sør og nord for den statistiske sørlysovalen. Posisjonen til den ionosfæriske bølgedalen kan være årsak til de subaurorale scintillasjonene. At det er høyere forekomst av scintillasjoner postsmidnatt enn premidnatt i subaurorale strøk stemmer overens med observasjoner fra lignende områder på den nordlige halvkule, men jeg har ikke sammenligningsgrunnlag for frekvens og styrke på scintillasjoner i Droning Maud Land og den nordlige halvkule. Her trengs det flere studier med sammenlignbar tidsserie og konjugerte punkt.

Den første kasusstudien 26.–27. februar viser at scintillasjoner kan være forårsaket av sterke vestgående strømmer og partikkelnedbør. Sammenligningen med Færøyene viste at scintillasjoner var til stede samtidig, men at scintillasjonene var sterkere og varte lengre over Droning Maud Land. Kasusstudie nummer to viste at scintillasjoner på Troll og Sanae sammenfalt med en substorm vist i mangetometerdataene fra den nordlige halvkule, mens det i Droning Maud Land var målt en østgående strøm over en lengre periode. Det var høye konveksjonshastigheter samtidig med scintillasjonene. Også i denne studien var scintillasjonene sterkere og varte lengre på den sørlige enn den nordlige halvkule.

---

## Forslag til fremtidig arbeid

Denne oppgaven viser at det er mange uutforskede effekter i området og at det er mange spørsmål å bygge videre på. Denne oppgaven viser at det trengs høy geomagnetisk aktivitet for at scintillasjoner skal oppstå i området. Datagrunnlaget i denne oppgaven er fra solminimum, de kommende årene vil gi muligheten til bedre datagrunnlag for studier av irregulareteter ved høy geomagnetisk aktivitet. En lengre tidsserie vil også gi mulighet til å studere årstidsvariasjoner og  $B_y$ -komponenten til solvinden sin påvirkning.

Kasustudiene viser at bruk av flere instrumenter kan gi innsikt i årsakene til scintillasjoner i området. Satellitter som Swarm og DMSP til å studere forholdet mellom ionsfærisk bølgedal sin plassering og forekomsten av scintillasjoner; Det samme kan man med det nyoppsatte himmelkameraet på Troll og DMSP for å se på sammenhengen mellom scintillasjoner og partikkelnedbør. Sistnevnte kan også gi svar på om scintillasjonene observert sør for den statistiske sørlysovalen er subaurorale eller innenfor sørlysovalen.

Resultatet fra kasusstudiene reiser også et spørsmål om det er mer og sterkere scintillasjoner over Dronning Maud Land enn på Færøyene. Dette kan være tilfeldigheter, men det hadde vært interessant med en statistisk studie som undersøkte forskjellen i forekomst og styrke på scintillasjoner mellom Troll og dens konjugerte område.

I denne studien har jeg måtte tippe på høyden til ionosfærisk gjennomboringspunkt, dette kan ha gitt feile koordinater til IPP. En videre utbyggelse av observatoriet på Troll, for eksempel en digisonde vil kunne gi mulighet til å studere høyden til irregularetetene, og derfor å gi mer korrekt plassering av irregularetetene.

Denne studien viser at ionosfæriske observasjoner på Troll og Sanae er viktig for å øke vår forståelse av den polare ionosfæren på den sørlige halvkule. Videre forskning med flere år med data vil gi verdifull forståelse om forskjellen på den nordlige og sørlige halvkule som kan gi oss bedre forståelse av ionosfæren som helhet.

# Bibliografi

- Acharya, Rajat. 2017. *Satellite signal propagation, impairments and mitigation*. London, United Kingdom: Elsevier. ISBN: 978-0-12-809732-8.
- Alfonsi, Lucilla, Luca Spogli, Giorgiana De Franceschi, Vincenzo Romano, Marcio Aquino, Alan Dodson og Cathryn N. Mitchell. 2011. “Bipolar climatology of GPS ionospheric scintillation at solar minimum”. *Radio Science* 46, nr. 3 (1. juni). ISSN: 0048-6604, sjekket 17. januar 2019. doi:10.1029/2010RS004571. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2010RS004571>.
- Alfvén, H. 1942. “Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves”. *Nature* 150, nr. 3805 (oktober): 405–406. ISSN: 1476-4687, sjekket 30. januar 2020. doi:10.1038/150405d0. <https://www.nature.com/articles/150405d0>.
- Atilaw, Tsige Y., Pierre Cilliers og Peter Martinez. 2017. “Azimuth-dependent elevation threshold (ADET) masks to reduce multipath errors in ionospheric studies using GNSS”. *Advances in Space Research, High-rate GNSS: Theory, Methods, and Engineering/Geophysical Applications*, 59, nr. 11 (1. juni): 2726–2739. ISSN: 0273-1177, sjekket 21. januar 2020. doi:10.1016/j.asr.2016.10.021. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117716305993>.
- Bartels, Julius. 1957. “The technique of scaling indices K and Q of geomagnetic activity”. *Ann. Intern. Geophys.* 4:215–226.
- Baumjohann, Wolfgang, og Rudolf A. Treumann. 2006. *Basic space plasma physics*. Reprinted. OCLC: 253914511. London: Imperial College Press. ISBN: 978-1-86094-079-8.

- Bond, FR, og IL Thomas. 1971. "The southern auroral oval." *Australian Journal of Physics* 24:97–102.
- Brekke, Asgeir. 2012. *Physics of the upper polar atmosphere*. New York: Springer. ISBN: 978-3-642-27400-8.
- Carlson, H. C., og A. Egeland. 1995. "The Aurora and the Auroral Ionosphere". I *Introduction to space physics*, Kivelson, M. G. and Russell, C. T. Cambridge ; New York: Cambridge University Press. ISBN: 978-0-521-45104-8 978-0-521-45714-9.
- Chang, Tien Sun. 2015. *An introduction to space plasma complexity*. Cambridge atmospheric and space science series. New York NY: Cambridge University Press. ISBN: 978-0-521-64262-0.
- Chapman, S., og J. Bartels. 1962. "Geomagnetism, 2nd edn., vol. 1". *Clarendon, Oxford*.
- Chen, Francis. 2015. *Introduction to plasma physics and controlled fusion*. New York, NY: Springer Science+Business Media. ISBN: 978-3-319-22308-7.
- Clausen, L. B. N., J. B. H. Baker, J. M. Ruohoniemi, R. A. Greenwald, E. G. Thomas, S. G. Shepherd, E. R. Talaat med flere. 2012. "Large-scale observations of a subauroral polarization stream by midlatitude SuperDARN radars: Instantaneous longitudinal velocity variations". *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 117 (A5). ISSN: 2156-2202, sjekket 2. mars 2020. doi:10.1029/2011JA017232. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2011JA017232>.
- Cowley, S. W. H., og M. Lockwood. 1992. "Excitation and decay of solar wind-driven flows in the magnetosphere-ionosphere system". *Annales Geophysicae* 10 (1. februar): 103–115. ISSN: 0992-7689, sjekket 1. februar 2020. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1992AnGeo..10..103C>.

- Crowley, G., A. J. Ridley, D. Deist, S. Wing, D. J. Knipp, B. A. Emery, J. Foster, R. Heelis, M. Hairston og B. W. Reinisch. 2000. "Transformation of high-latitude ionospheric F region patches into blobs during the March 21, 1990, storm". *eprint*: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/1999JA900357>, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 105 (A3): 5215–5230. ISSN: 2156-2202, sjekket 27. april 2020. doi:10.1029/1999JA900357. <http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/1999JA900357>.
- Dungey, J. W. 1961. "Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones". *Physical Review Letters* 6, nr. 2 (15. januar): 47–48. ISSN: 0031-9007, sjekket 1. februar 2020. doi:10.1103/PhysRevLett.6.47. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.6.47>.
- ESA. 2020a. "Instruments Overview". Sjekket 5. april. <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-eo-missions/swarm/instruments-overview>.
- . 2020b. "Swarm Mission Overview". Sjekket 15. april. <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-eo-missions/swarm/mission-overview>.
- Evans, John V., og Tor Hagfors. 1968. "Radar astronomy". *New York: McGraw-Hill, 1968, edited by Evans, John V.; Hagfors, Tor*. Sjekket 1. februar 2020. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1968raas.book.....E>.
- Foster, J. C., og H. B. Vo. 2002. "Average characteristics and activity dependence of the subauroral polarization stream". *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 107 (A12): SIA 16–1–SIA 16–10. ISSN: 2156-2202, sjekket 2. mars 2020. doi:10.1029/2002JA009409. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2002JA009409>.
- Geosciences, GFZ German Research Centre for. Udatert. "Kp Index". Indices of Global Geomagnetic Activity. <https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>.

- Greenwald, R. A., K. B. Baker, J. R. Dudeney, M. Pinnock, T. B. Jones, E. C. Thomas, J. -P. Villain med flere. 1995. "DARN/SuperDARN: A global view of the dynamics of high-latitude convection". *Space Science Reviews* 71, nr. 1 (februar): 761–796. ISSN: 0038-6308, 1572-9672, sjekket 3. januar 2020. doi:10.1007/BF00751350. <http://link.springer.com/10.1007/BF00751350>.
- Guiding center*. 2020. I *Wikipedia*. Page Version ID: 947082085. 24. mars. Sjekket 5. mai 2020. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Guiding\\_center&oldid=947082085](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Guiding_center&oldid=947082085).
- Gurnett, Donald A., og A. Bhattacharjee. 2005. *Introduction to plasma physics: with space and laboratory applications*. OCLC: ocm53993021. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press. ISBN: 978-0-521-36483-6 978-0-521-36730-1.
- Holzworth, Robert, og C.-I. Meng. 1975. "Mathematical Representation of the Auroral Oval". *Geophysical Research Letters - GEOPHYS RES LETT* 2 (1. september): 377–380. doi:10.1029/GL002i009p00377.
- Hughes, W. J. 1995. "The Magnetopause, Magnetotail, and Magnetic Reconnection". I *Introduction to space physics*, Kivelson, M. G. and Russell, C. T. Cambridge ; New York: Cambridge University Press. ISBN: 978-0-521-45104-8 978-0-521-45714-9.
- "IGRF Geomagnetic Model Map Spreadsheet tool". 2019. Sjekket 11. juni. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/magfield-wist/>.
- "ISGI - International Service of Geomagnetic Indices". 2020. Sjekket 12. februar. [http://isgi.unistra.fr/indices\\_kp.php](http://isgi.unistra.fr/indices_kp.php).
- Jacobsen, Knut Stanley. 2014. "The impact of different sampling rates and calculation time intervals on ROTI values". *Journal of Space Weather and Space Climate* 4:A33. ISSN: 2115-7251, sjekket 4. februar 2020. doi:10.1051/swsc/2014031. <https://www.swsc-journal.org/articles/swsc/abs/2014/01/swsc130029/swsc130029.html>.

- Jacobsen, Knut Stanley, og Sebastian Schafer. 2012. “Observed effects of a geomagnetic storm on an RTK positioning network at high latitudes”. Place: Les Ulis Cedex A Publisher: Edp Sciences S A WOS:000325007800013, *Journal of Space Weather and Space Climate* 2:UNSP A13. ISSN: 2115-7251. doi:10.1051/swsc/2012013.
- Jin, Yaqi, Jøran I. Moen og Wojciech J. Miloch. 2015. “On the collocation of the cusp aurora and the GPS phase scintillation: A statistical study”. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 120 (10): 9176–9191. ISSN: 2169-9402, sjekket 1. mars 2020. doi:10.1002/2015JA021449. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2015JA021449>.
- Jin, Yaqi, Jøran I. Moen, Wojciech J. Miloch, Lasse B. N. Clausen og Kjellmar Oksavik. 2016. “Statistical study of the GNSS phase scintillation associated with two types of auroral blobs”. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 121 (5): 4679–4697. ISSN: 2169-9402, sjekket 14. januar 2019. doi:10.1002/2016JA022613. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2016JA022613>.
- Jin, Yaqi, Andres Spicher, Chao Xiong, Lasse B. N. Clausen, Guram Kervalishvili, Claudia Stolle og Wojciech J. Miloch. 2019. “Ionospheric Plasma Irregularities Characterized by the Swarm Satellites: Statistics at High Latitudes”. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 124 (2): 1262–1282. ISSN: 2169-9402, sjekket 27. februar 2020. doi:10.1029/2018JA026063. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018JA026063>.
- Kelley, M. C. 1989. “The Earth’s Ionosphere”. *Plasma Physics and Electrodynamics, Academic Press* 43.
- Keskinen, M. J., H. G. Mitchell, J. A. Fedder, P. Satyanarayana, S. T. Zalesak og J. D. Huba. 1988. “Nonlinear evolution of the Kelvin-Helmholtz instability in the high-latitude ionosphere”. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 93 (A1): 137–152. ISSN: 2156-2202, sjekket 2. februar 2020. doi:10.1029/JA093iA01p00137. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JA093iA01p00137>.



- King, J. H., og Natalia E. Papitashvili. 2020. "On Adding Wind and ACE Data to OMNI". Sjekket 6. februar. <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/addswe/addswe.html#2>.
- Kinrade, Joe, Cathryn N. Mitchell, Nathan D. Smith, Yusuke Ebihara, Allan T. Weatherwax og Gary S. Bust. 2013. "GPS phase scintillation associated with optical auroral emissions: First statistical results from the geographic South Pole". \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/jgra.50214>, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 118 (5): 2490–2502. ISSN: 2169-9402, sjekket 2. mai 2020. doi:10.1002/jgra.50214. <http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jgra.50214>.
- Kintner, P. M., B. M. Ledvina og E. R. de Paula. 2007. "GPS and ionospheric scintillations". *Space Weather* 5 (9). ISSN: 1542-7390, sjekket 14. januar 2019. doi:10.1029/2006SW000260. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2006SW000260>.
- Kivelson, M. G. 1995a. "Physics of Space Plasma". I *Introduction to space physics*, Kivelson, M. G. and Russell, C. T. Cambridge ; New York: Cambridge University Press. ISBN: 978-0-521-45104-8 978-0-521-45714-9.
- . 1995b. "Pulsations and Magnetohydrodynamic". I *Introduction to space physics*, Kivelson, M. G. and Russell, C. T. Cambridge ; New York: Cambridge University Press. ISBN: 978-0-521-45104-8 978-0-521-45714-9.
- Kivelson, M. G., og C. T. Russell, red. 1995. *Introduction to space physics*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press. ISBN: 978-0-521-45104-8 978-0-521-45714-9.
- Knight, H. K., D. J. Strickland, J. H. Hecht, P. R. Straus, D. Morrison, L. J. Paxton og D. S. Evans. 2008. "Evidence for significantly greater N2 Lyman-Birge-Hopfield emission efficiencies in proton versus electron aurora based on analysis of coincident DMSP SSUSI and SSJ/5 data". \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2007JA012728>, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 113 (A4). ISSN: 2156-2202, sjekket 16. april 2020. doi:10.1029/2007JA012728. <http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2007JA012728>.

- Kramer, Herbert J. Udatert. "DMSP Block 5D-3 Satellite Series". <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/d/dmsp-block-5d>.
- Laundal, K. M., og A. D. Richmond. 2017. "Magnetic Coordinate Systems". *Space Science Reviews* 206, nr. 1 (mars): 27–59. ISSN: 0038-6308, 1572-9672, sjekket 12. april 2020. doi:10.1007/s11214-016-0275-y. <http://link.springer.com/10.1007/s11214-016-0275-y>.
- Laundal, K. M., og N. Østgaard. 2009. "Asymmetric auroral intensities in the Earth's Northern and Southern hemispheres". *Nature* 460, nr. 7254 (juli): 491–493. ISSN: 1476-4687, sjekket 2. mars 2020. doi:10.1038/nature08154. <https://www.nature.com/articles/nature08154>.
- Li, Guozhu, Baiqi Ning, Zhipeng Ren og Lianhuan Hu. 2010. "Statistics of GPS ionospheric scintillation and irregularities over polar regions at solar minimum". *GPS Solutions* 14, nr. 4 (1. september): 331–341. ISSN: 1521-1886, sjekket 27. februar 2020. doi:10.1007/s10291-009-0156-x. <https://doi.org/10.1007/s10291-009-0156-x>.
- Liou, K., P. T. Newell og C.-I. Meng. 2001. "Seasonal effects on auroral particle acceleration and precipitation". \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/1999JA000391>, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 106 (A4): 5531–5542. ISSN: 2156-2202, sjekket 30. april 2020. doi:10.1029/1999JA000391. <http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/1999JA000391>.
- McPherron, R. L. 1995. "Magnetospheric Dynamics". I *Introduction to space physics*, Kivelson, M. G. and Russell, C. T. Cambridge ; New York: Cambridge University Press. ISBN: 978-0-521-45104-8 978-0-521-45714-9.
- Moen, Jøran, Kjellmar Oksavik, Lucilla Alfonsi, Yvonne Daabakk, Vineenzo Romano og Luca Spogli. 2013. "Space weather challenges of the polar cap ionosphere". *Journal of Space Weather and Space Climate* 3:A02. ISSN: 2115-7251, sjekket 13. februar 2020. doi:10.1051/swsc/2013025. <https://www.swsc-journal.org/articles/swsc/abs/2013/01/swsc120045/swsc120045.html>.

- “Multipath - Navipedia”. 2020. Sjekket 20. januar. <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Multipath>.
- Ngwira, Chigomezoyo M., Lee-Anne McKinnell og Pierre J. Cilliers. 2010. “GPS phase scintillation observed over a high-latitude Antarctic station during solar minimum”. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 72, nr. 9 (1. juni): 718–725. ISSN: 1364-6826, sjekket 29. august 2019. doi:10.1016/j.jastp.2010.03.014. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682610000957>.
- Novatel. Udatert. An Introduction to GNSS - Error Sources. <https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-4-gnss-error-sources/error-sources/>.
- Pécseli, Hans L. 2013. *Waves and oscillations in plasmas*. Series in plasma physics. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-4398-7848-4.
- Petrovski, Ivan G., og Toshiaki Tsujii. 2012. *Digital Satellite Navigation and Geophysics: A Practical Guide with GNSS Signal Simulator and Receiver Laboratory*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN: 978-0-511-65907-2, sjekket 4. februar 2020. doi:10.1017/CB09780511659072. <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CB09780511659072>.
- Priest, E. R. 1995. “The Sun and its Magnetohydrodynamics”. I *Introduction to space physics*, Kivelson, M. G. and Russell, C. T. Cambridge ; New York: Cambridge University Press. ISBN: 978-0-521-45104-8 978-0-521-45714-9.
- Prikryl, P., R. Ghoddousi-Fard, B. S. R. Kunduri, E. G. Thomas, A. J. Coster, P. T. Jayachandran, E. Spanswick og D. W. Danskin. 2013. “GPS phase scintillation and proxy index at high latitudes during a moderate geomagnetic storm”. *Annales Geophysicae* 31, nr. 5 (6. mai): 805–816. ISSN: 1432-0576, sjekket 2. mars 2020. doi:10.5194/angeo-31-805-2013. <https://www.ann-geophys.net/31/805/2013/>.

- Prikryl, P., R. Ghoddousi-Fard, J. M. Weygand, A. Viljanen, M. Connors, D. W. Danskin, P. T. Jayachandran med flere. 2016. "GPS phase scintillation at high latitudes during the geomagnetic storm of 17–18 March 2015". \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2016JA023171>, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 121 (10): 10, 448–10, 465. ISSN: 2169-9402, sjekket 28. april 2020. doi:10.1002/2016JA023171. <http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2016JA023171>.
- Prikryl, P., P. T. Jayachandran, R. Chadwick og T. D. Kelly. 2015. "Climatology of GPS phase scintillation at northern high latitudes for the period from 2008 to 2013". *Annales Geophysicae* 33, nr. 5 (13. mai): 531–545. ISSN: 0992-7689, sjekket 1. mars 2020. doi:<https://doi.org/10.5194/angeo-33-531-2015>. <https://www.ann-geophys.net/33/531/2015/>.
- Prikryl, P., P. T. Jayachandran, S. C. Mushini, D. Pokhotelov, J. W. MacDougall, E. Donovan, E. Spanswick og J.-P. St.-Maurice. 2010. "GPS TEC, scintillation and cycle slips observed at high latitudes during solar minimum". *Annales Geophysicae* 28, nr. 6 (21. juni): 1307–1316. ISSN: 1432-0576, sjekket 28. april 2020. doi:10.5194/angeo-28-1307-2010. <http://www.ann-geophys.net/28/1307/2010/>.
- Prikryl, P., L. Spogli, P. T. Jayachandran, J. Kinrade, C. N. Mitchell, B. Ning, G. Li med flere. 2011. "Interhemispheric comparison of GPS phase scintillation at high latitudes during the magnetic-cloud-induced geomagnetic storm of 5–7 April 2010". *Annales Geophysicae* 29, nr. 12 (21. desember): 2287–2304. ISSN: 0992-7689, sjekket 27. februar 2020. doi:<https://doi.org/10.5194/angeo-29-2287-2011>. <https://www.ann-geophys.net/29/2287/2011/>.
- Prol, Fabricio dos Santos, Paulo de Oliveira Camargo og Marcio Tadeu de Assis Honorato Muella. 2017. "COMPARATIVE STUDY OF METHODS FOR CALCULATING IONOSPHERIC POINTS AND DESCRIBING THE GNSS SIGNAL PATH". *Boletim de Ciências Geodésicas* 23, nr. 4 (desember): 669–683. ISSN: 1982-2170, 1413-4853, sjekket 13. februar 2020. doi:10.1590/s1982-21702017000400044. [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1982-21702017000400669&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-21702017000400669&lng=en&tlng=en).

- Prolss, Gerd W. 2004. *Physics of the Earth's space environment: an introduction*. Berlin ; New York: Springer. ISBN: 978-3-540-21426-7.
- “Radar Overview : Virginia Tech SuperDARN”. 2020. Sjekket 4. januar. <http://vt.superdarn.org/tiki-index.php?page=Radar+Overview>.
- Reiff, Patricia H., og J. L. Burch. 1985. “IMF By-dependent plasma flow and Birkeland currents in the dayside magnetosphere: 2. A global model for northward and southward IMF”. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 90 (A2): 1595–1609. ISSN: 2156-2202, sjekket 1. februar 2020. doi:10.1029/JA090iA02p01595. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JA090iA02p01595>.
- Rostoker, Gordon. 1972. “Geomagnetic indices”. *Reviews of Geophysics* 10 (4): 935–950. ISSN: 1944-9208, sjekket 12. februar 2020. doi:10.1029/RG010i004p00935. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/RG010i004p00935>.
- Russell, C. T., J. G. Luhmann og R. J. Strangeway. 2016. *Space physics*. New York, NY: Cambridge University Press. ISBN: 978-1-107-09882-4.
- Shepherd, S. G. 2014. “Altitude-adjusted corrected geomagnetic coordinates: Definition and functional approximations”. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 119 (9): 7501–7521. ISSN: 2169-9402, sjekket 17. februar 2020. doi:10.1002/2014JA020264. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014JA020264>.
- “SPDF - OMNIWeb Service”. 2020. Sjekket 6. februar. <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>.
- Spicher, A., L. B. N. Clausen, W. J. Miloch, V. Lofstad, Y. Jin og J. I. Moen. 2017. “Interhemispheric study of polar cap patch occurrence based on Swarm in situ data”. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 122 (3): 3837–3851. ISSN: 2169-9402, sjekket 27. februar 2020. doi:10.1002/2016JA023750. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2016JA023750>.

- Spogli, L., L. Alfonsi, G. De Franceschi, V. Romano, M. H. O. Aquino og A. Dodson. 2009. "Climatology of GPS ionospheric scintillations over high and mid-latitude European regions". *Annales Geophysicae* 27, nr. 9 (1. september): 3429–3437. ISSN: 1432-0576, sjekket 5. februar 2020. doi:10.5194/angeo-27-3429-2009. <https://www.ann-geophys.net/27/3429/2009/>.
- Subirana, J. Sanz, J.M. Juan Zornoza og M. Hernández-Pajares. 2011. "GNSS Basic Observables - Navipedia". Sjekket 3. februar 2020. [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS\\_Basic\\_Observables](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Basic_Observables).
- Sugiura, Masahisa, og Toyohisa Kamei. 1991. "1". Sjekket 12. februar 2020. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.html>.
- Treumann, Rudolf A., og Wolfgang Baumjohann. 2001. *Advanced space plasma physics*. Reprinted. OCLC: 552362916. London: Imperial College Press. ISBN: 978-1-86094-026-2.
- Tsunoda, Roland T. 1988. "High-latitude F region irregularities: A review and synthesis". *Reviews of Geophysics* 26 (4): 719–760. ISSN: 1944-9208, sjekket 2. februar 2020. doi:10.1029/RG026i004p00719. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/RG026i004p00719>.
- Voiculescu, M., I. Virtanen og T. Nygrén. 2006. "The F-region trough: seasonal morphology and relation to interplanetary magnetic field". *Annales Geophysicae* 24, nr. 1 (7. mars): 173–185. ISSN: 0992-7689, sjekket 4. mars 2020. doi:<https://doi.org/10.5194/angeo-24-173-2006>. <https://www.ann-geophys.net/24/173/2006/>.
- WDC for Geomagnetism, Kyoto. *Magnetic North, Geomagnetic and Magnetic Poles*. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>.
- Xu, Sheng, Bei-Chen Zhang, Rui-Yuan Liu, Li-Xin Guo og Ye-Wen Wu. 2014. "Comparative studies on ionospheric climatological features of NmF2 among the Arctic and Antarctic stations". *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 119 (1. november): 63–70. ISSN: 1364-6826, sjekket 1. februar 2020. doi:10.1016/j.jastp.2014.06.016. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682614001473>.

- Østgaard, N., K. M. Laundal, L. Juusola, A. Åsnes, S. E. Håland og J. M. Weygand. 2011. "Interhemispherical asymmetry of substorm onset locations and the interplanetary magnetic field". \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2011GL046767>, *Geophysical Research Letters* 38 (8). ISSN: 1944-8007, sjekket 30. april 2020. doi:10.1029/2011GL046767. <http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2011GL046767>.
- Aa, Ercha, Shasha Zou, Philip J. Erickson, Shun-Rong Zhang og Siqing Liu. 2020. "Statistical Analysis of the Main Ionospheric Trough Using Swarm in Situ Measurements". \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2019JA027583>, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 125 (3): e2019JA027583. ISSN: 2169-9402, sjekket 20. april 2020. doi:10.1029/2019JA027583. <http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019JA027583>.