

Kvantifisering av troposfæriske effekter
i satellittkommunikasjon
ved bruk av numeriske værprodukter

Masteroppgave i Måleteknologi og Instrumentering



av

Erik Wangen Alsaker

Institutt for fysikk og teknologi
Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet
Universitetet i Bergen

November 2019

Sammendrag

Hensikten med dette prosjektet er å undersøke om det er mulig å predikere troposfærisk demping på en satellittforbindelse ved bruk av numeriske værprodukter. De vesentligste dempingseffektene i troposfæren er gass-, og skydemping. Disse effektene blir simulert med beregningsmodeller tilgjengelig fra Den internasjonale telekommunikasjonsunionen (ITU), numeriske værdata fra værmodellen AROME Arctic i tillegg til lokale værobservasjoner. Prosjektet benytter en satellittforbindelse på relativt høy frekvens med en lav elevasjonsvinkel mellom satellitten Eutelsat Ka-sat og bakkestasjonen ved Isfjord Radio på Svalbard. Frekvensen for satellittsignalet er i Ka-båndet på 19,68 GHz og elevasjonsvinkelen er på 3,2 grader. Dette satellittsignalet benyttes for å undersøke korrelasjon mellom simulert og målt demping.

Bruk av satellittkommunikasjon utvikler seg til i større grad å benytte høyere frekvenser og lavere elevasjonsvinkler. Denne utviklingen medfører at effekten av gass-, og skydemping i troposfæren blir en betydelig del av satellittforbindelsens linkbudsjett, og en god forståelse for dempingens omfang og variabilitet blir dermed avgjørende for å optimalisere ressursutnyttelsen.

Prosjektets resultater viser at det med den ene av to ITU modeller er mulig å predikere troposfærisk sky-, og gassdemping med meget høy presisjon. Det benyttes værdata fra AROME Arctic for inntil 11 timer frem i tid. Sannsynligvis kan predikerte værdata enda lenger frem i tid også benyttes med gode resultater for å øke prediksjonshorisonten for satellittforholdene. Værforholdene langs signalbanen viser seg å ha stor variasjon både stedlig og i tid, og må følgelig inkluderes i beregningene for å klare å forutsi de troposfæriske dempingsforholdene på satellittsignalet i tilstrekkelig grad. Den forenklete ITU modellen, som kun tar høyde for været ved bakkestasjonen, viser seg å ikke være anvendbar til dette formålet. Prosjektets resultater viser også at varierende refraksjon ikke ser ut til å påvirke forbindelsen signifikant, men derimot at satellittens bevegelse er stor nok til å påvirke mottak av satellittsignalet.

Prosjektet viser også at varierende værforhold langs signalbanen over tid fører til at gassdemping ikke kan sees på som konstant for forbindelser på høye frekvenser og lave elevasjonsvinkler. For forbindelsen som undersøkes i dette prosjektet over en 8 måneders periode, fra februar til og med september 2016, har den modellerte gassdempingen et dynamisk område på 4,57 dB.

Muligheten til å predikere troposfæriske forhold som demonstreres i dette prosjektet kan anvendes ved design av satellittsystemer. Å predikere dempingsforhold gir også operatører av satellittsystemer mulighet til å prioritere og/eller omfordele systemets ressurser. Brukeren av satellittsystemet kan på sin side benytte prediksjon av satellittforhold for å planlegge bruk basert på forventet kapasitet, eller dimensjonere hensiktsmessig antennestørrelse og frekvensbånd.

Forord

Denne oppgaven er skrevet som avsluttende del av mitt mastergradsstudium ved Universitet i Bergen (UiB) for å oppnå graden Master of Science innen fysikk med studieretning måleteknologi og instrumentering. Masteroppgaven er skrevet i samarbeid fra Forsvarets forskningsinstitutt (FFI), som har bidratt med problemstilling, grunnlagsdata og veiledning for prosjektet. Masterprosjektets omfang er 60 studiepoeng.

Takk til mine veiledere, Bjørn Tore Hjertaker ved Institutt for fysikk og teknologi på UiB og Martin Rytir ved avdeling for Strategiske analyser og fellessystemer på FFI, for å sette meg i stand til å gjennomføre prosjektet og all lærdom på veien.

Takk til min arbeidsgiver, Forsvarsmateriell maritime kapasiteter, som har fristilt meg til å gjennomføre studiet for å opparbeide kompetanse slik at jeg kan gjøre en god jobb i fremtiden.

Takk til Statsmeteorolog Gunnar Livik, Forsker Eivind Støylen, Forsker Morten Køltzow og Forsker Anette Borg ved Metrologisk institutt for hjelp til forståelse av grunnlagsdataene for prosjektet. Denne hjelpen har vært avgjørende for at prosjektet har oppnådd så gode resultater.

En spesielt stor takk til mine fantastiske små gutter Sverre og Erling, for hjelp til å holde beina på jorden ved å sette studiene i perspektiv! Og til min kjæreste Sigrid, du har vært veldig god å ha i alle faser og vendinger av studieprosjektet, tusen takk!

Bergen 20. november 2019

Erik Wangen Alsaker

Innhold

SAMMENDRAG	II
FORORD	IV
INNHold	VI
FORKORTELSER	VIII
SYMBOLER	X
FIGURER	XIV
TABELLER	XVIII
1 INTRODUKSJON	1
1.1 INTRODUKSJON TIL SATELLITTKOMMUNIKASJON	1
1.2 MOTIVASJON	5
1.3 PROSJEKTETS MÅLSETNING	6
1.4 OVERSIKT OVER ARBEIDET	6
1.5 TILGRESENDE FORSKNING	7
1.6 PUBLISERING AV RESULTATER.....	8
2 TEORI	9
2.1 EGENSKAPENE TIL KLAR LUFT I TROPOSFÆREN	10
2.2 DEMPING SOM FØLGE AV ATMOSFÆRISKE GASSER	12
2.3 DEMPING SOM FØLGE AV HYDROMETEORER I SKYER.....	14
2.4 MODELLER FOR GASSDEMPING.....	15
2.4.1 <i>Modell A</i>	16
2.4.2 <i>Modell B</i>	20
2.4.3 <i>Usikkerhet i beregningsmodellen for gassdemping</i>	21
2.5 MODELL FOR SKYDEMPING.....	21
3 GRUNNLAGSDATA	23
3.1 NUMERISKE VÆRPRODUKTER FRA AROME ARCTIC.....	24
3.1.1 <i>Modellnivåer</i>	27
3.1.2 <i>Vertikale profiler for værdata</i>	28
3.1.3 <i>Geografisk dataområde</i>	31
3.1.4 <i>Vinklede AROME Arctic profiler</i>	36
3.1.5 <i>Refraksjon og antennens pekeretning</i>	42
3.1.6 <i>Usikkerhet i numeriske AROME Arctic værdata</i>	45
3.2 LOKALE VÆRPREDIKSJONER OG VÆROBSERVASJONER.....	48
3.3 ANS REFERANSE	51
3.4 RADIOSONDE.....	53

4	SIMULERINGER	55
4.1	GASDEMPING METODE A.....	55
4.1.1	<i>Verifikasjon av beregningsmodell.....</i>	<i>55</i>
4.1.2	<i>Gassdemping langs signalbanen.....</i>	<i>57</i>
4.1.3	<i>Variasjon i tilsynelatende elevasjon.....</i>	<i>59</i>
4.2	GASDEMPING METODE B.....	62
4.3	SKYDEMPING.....	65
4.4	KOMBINERT SKY-, OG GASDEMPING, SAMT FILTRERING.....	66
5	EKSPERIMENTELLE MÅLINGER.....	67
5.1	MÅLEOPPSETT.....	67
5.2	EUTELSAT KA-SAT OG LINKBUDSJETT.....	70
5.3	MÅLERESULTATER.....	72
5.4	KONSEKVENNS AV ANTENNENS STATISKE PEKERETNING.....	73
5.5	KONSEKVENNS AV SATELLITTENS BEVEGELSE.....	75
6	RESULTATER OG DISKUSJON.....	77
6.1	NIVÅJUSTERING.....	78
6.2	METODE A.....	81
6.2.1	<i>Tidsserie for gassdemping 6-11 timer frem i tid.....</i>	<i>81</i>
6.2.2	<i>Tidsserie for sky-, og gassdemping 6-11 timer frem i tid.....</i>	<i>85</i>
6.2.3	<i>Statistikk og nøyaktighet.....</i>	<i>89</i>
6.2.4	<i>Feil og presisjon.....</i>	<i>94</i>
6.2.5	<i>Modellert gassdemping 0-5 timer frem i tid.....</i>	<i>99</i>
6.3	METODE B.....	100
6.3.1	<i>Tidsserier for tilnærmet gassdemping.....</i>	<i>100</i>
6.3.2	<i>Statistikk og nøyaktighet.....</i>	<i>102</i>
6.3.3	<i>Feil.....</i>	<i>103</i>
6.3.4	<i>Tidligere versjoner av modell B.....</i>	<i>103</i>
6.4	USIKKERHET.....	105
7	KONKLUSJON.....	107
7.1	VIDERE ARBEID.....	109
7.1.1	<i>Prediksjonshorisont.....</i>	<i>109</i>
7.1.2	<i>Kvantifisere usikkerhet.....</i>	<i>109</i>
7.1.3	<i>Tilsvarende forbindelse lenger sør.....</i>	<i>109</i>
7.1.4	<i>Ikke-geostasjonære satellitter.....</i>	<i>110</i>
7.1.5	<i>Refraksjon ved ductingforhold.....</i>	<i>110</i>
8	REFERANSER.....	111
	VEDLEGG 1: KONFERANSEARTIKKEL.....	115

Forkortelser

ACM	Adaptive Coding and Modulation
ANS	Atmospheric Numerical Simulator
AROME	Application of Research to Operations at Mesoscale
DVB-S2	Digital Video Broadcasting – Satellite Second Generation
ECMWF	European Centre for Medium-range Weather Forecasts
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
ESA	European Space Agency
FFI	Forsvarets Forskningsinstitutt
GHz	Gigahertz
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R P.	ITU-R Radiowave Propagation
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector
MAE	Mean Absolute Error
MET	Metrologisk Institutt
MetCoOP	Metrological Cooperation on OPERational Numeric Weather Prediction
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NTNU	Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet
ONERA	Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (Fransk forskningsinstitusjon)
RMSE	Root Mean Square Error
SINTEF	Selskap for Industriell og Teknisk Forskning ved Norges Tekniske Høgskole
STK	System Tool Kit
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UiB	Universitetet i Bergen
UiO	Universitetet i Oslo
UTC	Coordinated Universal Time
WRF-ARW	Advanced Research Weather Research and Forecasting

Symboler

N	Refraktivitet
T	Temperatur
P	Barometrisk trykk
e	Vanndamptrykk
n	Brytningsindeks
α_i	Inngangsvinkel i atmosfærisk lag
β_i	Refraksjonsvinkel/utgangsvinkel i atmosfærisk lag
$E(r, t)$	Elektromagnetisk feltstyrke som funksjon av sted og tid
f	Frekvens
λ	Bølgelengde
ω	Vinkelhastighet
k_0	Bølgenummeret i vakuum
\Re	Reel del av komplekst tall
\Im	Imaginær del av komplekst tall
γ	Spesifikk demping
γ_o	Spesifikk demping som følge av oksygen
γ_w	Spesifikk demping som følge av vanndamp
N''_{Oksygen}	Den imaginære delen av refraktiviteten til oksygen
N''_{Vanndamp}	Den imaginære delen av refraktiviteten til vanndamp
N''_D	Det tørre kontinuumet som følge av trykkindusert nitrogen og Debye spektrum
S_i	Styrke til de individuelle resonanslinjene
F_i	Resonanslinjens formfaktor
Δf	Linjebredde
δ	Korreksjonsfaktor for interferens effekter i resonanslinjene for oksygen
d	Breddeparameter for Debye spektrumet
A_{gass}	Demping som følge av gass
δ_i	Lagtykkelse
r_n	Avstand fra jordens sentrum
A_o	Demping som følge av oksygen
A_w	Demping som følge av vanndamp
φ	Elevasjonsvinkel

γ_{sky}	Spesifikk demping som følge av skyer
K_l	Spesifikk dempingskoeffisient for skyer
M	Spesifikt vanninnhold i hydrometeorer (her skyer)
ε''	Den imaginære delen av den komplekse dielektriske permittiviteten
ε' ,	Den reelle delen av den komplekse dielektriske permittiviteten
ε_0	Permittiviteten i vakuum
f_p	Primær relaksasjonsfrekvens
f_s	Sekundær relaksasjonsfrekvens
A_{sky}	Demping som følge av skyer
ρ	Absolutt fuktighet
h	Geometrisk høyde
h'	Geopotensial høyde
R_d	Gasskonstant for tørr luft
ρ_i	Lufttetthet
ω_i	Massefraksjon for hydrometeorer i lag i
$\omega_{i_{sky-vann}}$	Massefraksjon for vann i skyer i lag i
$\omega_{i_{sky-i}}$	Massefraksjon for is i skyer i lag i
L_G	Distanse langs bakken
h_R	Høyde, definert i figur
h_s	Bakkestasjonens høyde
L_s	Distanse langs signalbanen
ρ_v	Tetthet vanndamp
e_w	Metningstrykket for vanndamp
RH	Relativ luftfuktighet
R_v	Gasskonstanten for vanndamp
$\frac{c}{N}$	Signal-støyforhold
$\frac{c}{N_0}$	Signalets forhold til den spektrale støytettheten
L	Tap
$\frac{G}{T}$	Forsterkning delt på støytemperatur, terminalens godhetsfaktor
k	Boltzman konstant
B_N	Støybåndbredde

$P_{M\ddot{a}lt}$	M\ddot{a}lt signaleffekt
$P_{Simulert}$	Simulert signaleffekt
$A_{M\ddot{a}lt}$	M\ddot{a}lt demping
y_i	Predikert verdi
x_i	M\ddot{a}lt verdi
n	Antall punkter

Figurer

Figur 1.1 Prinsippskisse for satellittkommunikasjon.	1
Figur 1.2 Linkbudsjett vist blokkskjematisk.	2
Figur 2.1 Prinsippskisse for antennens tilsynelatende elevasjonsvinkel og den geometriske elevasjonsvinkelen fra bakkestasjon.	11
Figur 2.2 Spesifikk demping med 1 GHz intervall ved standard atmosfæriske forhold.	12
Figur 2.3 Spredning av radiosignalet som følge av hydrometeorer inne i skyer [13].	14
Figur 2.4 Signalbanens avbøyning gjennom påfølgende lag i atmosfæren med ulike brytningsindeks [11].	19
Figur 3.1 Geografisk område som dekkes av værmodellen AROME Arctic [18].	24
Figur 3.2 Modellhøyder for AROME Arctic og Modell A.	27
Figur 3.3 Standard-, og AROME Arctic høydeprofiler for temperatur.	28
Figur 3.4 Standard-, og AROME Arctic høydeprofiler for trykk.	29
Figur 3.5 Standard-, og AROME Arctic høydeprofiler for absolutt fuktighet.	29
Figur 3.6 AROME Arctic rutenett med Isfjord Radio og signalbane inntegnet.	31
Figur 3.7 Hjelpesfigurer for sammenheng mellom signalbanes høyde og tilbakelagt distanse langs bakken.	32
Figur 3.8 Målt signalnivå fra Ka-sat, målt ved Isfjord Radio.	33
Figur 3.9 Topografi i AROME Arctic dataområde.	33
Figur 3.10 Stedlig variasjon i gassdemping ved tidspunkt 1, 0-30 km (a) og 10-30 km (b)...	34
Figur 3.11 Stedlig variasjon i gassdemping ved tidspunkt 2, 0-30 km (a) og 10-30 km (b)...	34
Figur 3.12 Stedlig variasjon i gassdemping ved tidspunkt 3, 0-30 km (a) og 10-30 km (b)...	35
Figur 3.13 Prinsipp for bruk av AROME Arctic data for å beskrive forhold langs signalbanen opptil 30 km.	36
Figur 3.14 Prinsipp for trinnvis barysentrisk horisontal-, og lineær vertikal interpolering.	37
Figur 3.15 Interpolert trykkprofil langs signalbanen, referanseprofiler og detaljutsnitt for tidspunkt 1.	38

Figur 3.16 Interpolert trykkprofil langs signalbanen og referanseprofiler for tidspunkt 2 (a) og 3 (b).	38
Figur 3.17 Interpolert temperaturprofil langs signalbanen, referanseprofiler samt detaljutsnitt for tidspunkt 1.	39
Figur 3.18 Interpolert temperaturprofil langs signalbanen, referanseprofiler samt detaljutsnitt for tidspunkt 2.	39
Figur 3.19 Interpolert temperaturprofil langs signalbanen, referanseprofiler samt detaljutsnitt for tidspunkt 3.	39
Figur 3.20 Interpolert profil for absolutt fuktighet langs signalbanen, referanseprofiler samt detaljutsnitt for tidspunkt 1.	40
Figur 3.21 Interpolert profil for absolutt fuktighet langs signalbanen, referanseprofiler samt detaljutsnitt for tidspunkt 2.	40
Figur 3.22 Interpolert profil for absolutt fuktighet langs signalbanen, referanseprofiler samt detaljutsnitt for tidspunkt 3.	40
Figur 3.23 Interpoleringsfeil ved signalbanens overgang fra å være over land til over havet.	42
Figur 3.24 Beregnet refraktivitet/brytningsindeks som funksjon av høyde.	43
Figur 3.25 Tilsynelatende elevasjonsvinkel i forhold til geometrisk elevasjonsvinkel, relativt til jordens overflate.	44
Figur 3.26 Prinsippskisse for tilsynelatende elevasjonsvinkelen langs signalbanen.	44
Figur 3.27 AROME Arctic feil som funksjon av trykkehøyde [24].	45
Figur 3.28 AROME Arctic feil v/trykkehøyde 850hPa v/ulik tid fra prediksjon [23].	46
Figur 3.29 Målt og predikert temperatur ved Isfjord Radio for perioden februar til oktober 2016, samt detaljutsnitt.	48
Figur 3.30 Målt og predikert trykk ved Isfjord Radio for perioden februar til oktober 2016, samt detaljutsnitt.	48
Figur 3.31 Målt relativ luftfuktighet ved Isfjord Radio for perioden februar til oktober 2016, samt detaljutsnitt.	49
Figur 3.32 Absolutt fuktighet ved Isfjord Radio i perioden februar til oktober 2016, samt detaljutsnitt.	50
Figur 3.33 ANS simuleringsresultater for gass-, og skydemping.	52

Figur 3.34 Radiosonde­stasjoner i AROME Arctic område [24].	53
Figur 4.1 Total gassdemping som funksjon av frekvens (a), og eksempel på individuelle dempingsbidrag fra vanndamp og oksygen (b).	56
Figur 4.2 Gassdemping som funksjon av elevasjonsvinkel for utvalgte standard atmosfærer.	56
Figur 4.3 Linje for linje beregning av gassdemping fra 08. februar til 30 september 2016.	58
Figur 4.4 Normalisert strålingsdiagram, forsterkning relativt til antennens pekeretning [26].	60
Figur 4.5 Prinsipp for søkealgoritme som beregner tilsynelatende elevasjonsvinkel.	60
Figur 4.6 Beregnet tilsynelatende elevasjonsvinkel i perioden fra februar til oktober 2016.	61
Figur 4.7 Tilnærmet gassdemping beregnet med observerte værdata.	63
Figur 4.8 Tilnærmet gassdemping beregnet med predikerte værdata for bakkestasjon.	64
Figur 4.9 Skydemping, beregnet linje for linje med AROME Arctic værprediksjoner.	65
Figur 4.10 Kombinert sky-, og gassdemping, før og etter filtrering.	66
Figur 4.11 Utsnitt av kombinert sky-, og gassdemping, før og etter filtrering.	66
Figur 5.1 Målestasjon på Isfjord Radio med plassering og pekeretning til antenne i kart [4].	68
Figur 5.2 Skjematisk fremstilling av måleoppsett for måling av peilesignal [4].	69
Figur 5.3 Dekningskart for Ka-sat (a) og kart over elevasjonsvinkel mot Ka-sat for ulike breddegrader (b) [4].	70
Figur 5.4 Målt peilesignal v/Isfjord Radio fra Ka-sat fra januar til november 2016.	72
Figur 5.5 Teoretisk strålingsdiagram med utsnitt av hovedstrålen som viser normalisert forsterkning.	73
Figur 5.6 Ka-sat sin posisjon i perioden januar til september 2016 (a) og den geometriske pekeretning fra Isfjord Radio til Ka-sat i samme periode (b).	75
Figur 6.1 Simuleringsresultatenes nøyaktighet og presisjon beskriver henholdsvis den systematiske og vilkårlige feilen relativt til den ikke kalibrerte referansemålingen.	77
Figur 6.2 Tilsynelatende skyfrie dager ved målestasjon på Isfjord Radio.	79
Figur 6.3 Simulert demping og nivåjustert målt demping ved tidspunkt for nivåjustering.	80
Figur 6.4 Tidsserie for beregnet gassdemping, sammenlignet med målt demping og ANS gassdempingsreferanse.	81

Figur 6.5 Tidsserier for beregnet gassdemping, sammenlignet med referansemålinger i periode 1.....	82
Figur 6.6 Tidsserier for beregnet gassdemping, sammenlignet med referansemålinger i periode 2.....	83
Figur 6.7 20. Tidsserier for beregnet gassdemping, sammenlignet med referansemålinger i periode 3.....	83
Figur 6.8 Tidsserie for beregnet sky-, og gassdemping i hele sammenligningsperioden, sammenlignet med målt demping og ANS sky-, og gassdempingsreferanse.	85
Figur 6.9 Tidsserier for beregnet sky-, og gassdemping sammenlignet med referansemålinger i periode 1.....	86
Figur 6.10 Målt demping og geometrisk azimuth fra Isfjord Radio til Ka-Sat.....	87
Figur 6.11 Tidsserier for beregnet sky-, og gassdemping sammenlignet med referansemålinger i periode 2.....	87
Figur 6.12 Tidsserier for beregnet sky-, og gassdemping sammenlignet med referansemålinger i periode 3.....	88
Figur 6.13 CCDF for målt demping og modellert gassdemping i perioden fra april til september 2016.....	91
Figur 6.14 CCDF for målt og modellert sky-, og gassdemping (filtrert) for perioden april til september 2016.	92
Figur 6.15 Sammenligning av CCDF for hele-, og utdrag av sammenligningsperioden i 2016.	93
Figur 6.16 Sammenligning av tidsserier for målt og beregnet totaldemping (filtrert), med tilhørende RMSE og MAE (per 24 t) for Metode A (a) og ANS (b).	96
Figur 6.17 CCDF for absolutt feil i simulert sky-, og gassdempings relativt til målt referanse.	97
Figur 6.18 Tidsseriesammenligning for Metode B (676-A2) og Metode A (676-A1).	100
Figur 6.19 Tidsserier for simulert gassdemping 08. juli til 24. august med Metode A og Metode B.	101
Figur 6.20 CCDF for gassdemping beregnet med Metode B og Metode A.....	102

Tabeller

Tabell 1.1 Typiske frekvensbånd for satellittkommunikasjon	2
Tabell 3.1 Gassdempingens dynamikk for 0-30 km høyde, og 10-30 km høyde for tidspunkt 1-3	35
Tabell 3.2 Gassdemping langs signalbanen med ulike inngangsverdier for tidspunktene 1-3	41
Tabell 3.3 Usikkerhet i AROME Arctic parametere, sammenlignet med ECMWF	46
Tabell 3.4 Konsekvens av usikkerhet i AROME Arctic på beregnet gassdemping	47
Tabell 3.5 Samplingsfrekvens (sf), sensitivitet (s) og usikkerhet (u) for værobservasjoner....	49
Tabell 4.1 Beregnet gassdemping [dB] for ned-, og opplinkfrekvenser ved elevasjonsvinkel 3,5 grader	57
Tabell 4.2 Sammenligning av beregnede og forventede verdier for gassdemping	59
Tabell 5.1 Linkbudsjett for satellittforbindelsen fra Ka-sat til Isfjord Radio [8].	71
Tabell 5.2 Konsekvens av antennens ikke-optimale pekeretning	73
Tabell 5.3 Forventet og beregnet variasjon for tilsynelatende elevasjonsvinkel	74
Tabell 5.4 Satellittens bevegelses påvirkning på tilsynelatende pekeretning	76
Tabell 6.1 Terskel [dB] for sammenligning av simulerte og målte verdier	79
Tabell 6.2 Statistisk sammenligning av tidsserier for gass-, og skydemping	90
Tabell 6.3 Feil for modellert gass-, og skydemping	95
Tabell 6.4 Presisjon med konfidensintervall for Metode A (6-11) for resultater i perioden fra februar til oktober	97
Tabell 6.5 Feil i simulert gassdemping relativt til målt demping for tidsseriene innenfor ulike prediksjonshorisont	99
Tabell 6.6 Statistikk for Metode A og Metode B beregninger av gassdemping	102
Tabell 6.7 Feil for Metode B resultater relativt til Metode A resultater	103
Tabell 6.8 Statistikk for beregninger med ulike versjoner av Modell B i Metode B.	103
Tabell 6.9 Feil knyttet til tilnærmet beregning av gassdemping med ulike modellversjoner	104
Tabell 6.10 Feil etter justering av tidsserienes middelnivå	104

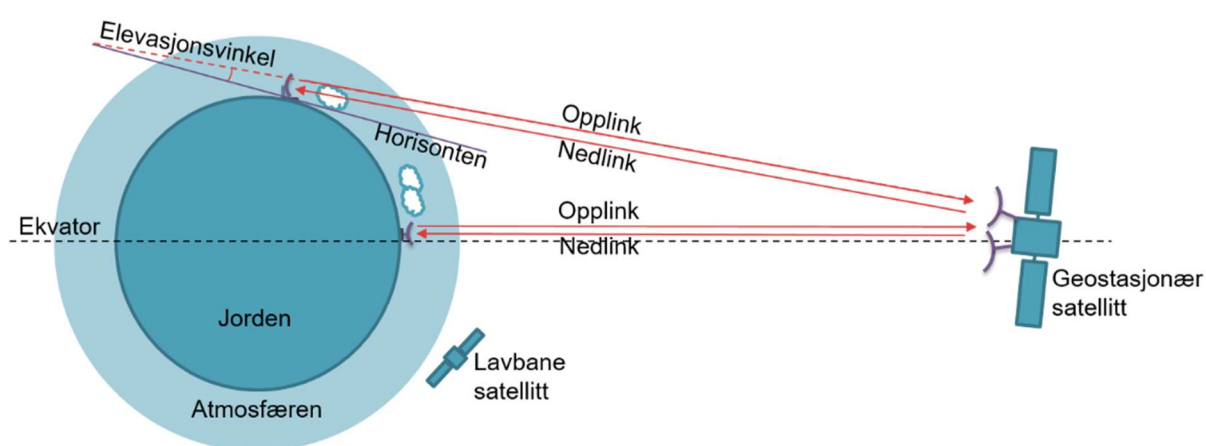
1 Introduksjon

I dette kapitlet blir det gitt en generell introduksjon til satellittkommunikasjon med spesiell vekt på noen sentrale begreper som er relevante for dette prosjektet. I tillegg klargjøres det rundt motivasjon og målsetning for prosjektet, samt en oversikt over prosjektets arbeid. Til slutt blir annen forskning som er relevant for prosjektet gjennomgått, samt hvordan dette prosjektet skal komplettere denne.

1.1 Introduksjon til satellittkommunikasjon

Samfunnet blir stadig mer avhengig av telekommunikasjonstjenester med høy kapasitet og det forventes at disse er tilgjengelige over alt og alltid. Satellittkommunikasjon tilbyr telekommunikasjonsløsninger med høy kapasitet og kan benyttes i områder uten stedlig infrastruktur, for eksempel på havet. Norsk fastland og norske interesse-, og ansvarsområder inkluderer områder langt mot nord, og Norge har søk og redningsansvar faktisk helt opp til Nordpolen [1].

Et satellittkommunikasjonssystem består av et antall satellitter samt infrastruktur på bakken for å kontrollere og administrere satellittene. En kommunikasjonssatellitt fungerer som et rele som mottar et radiosignal fra en bruker, forsterker det, og sender det videre til en annen bruker som vist i Figur 1.1.



Figur 1.1 Prinsippskisse for satellittkommunikasjon.

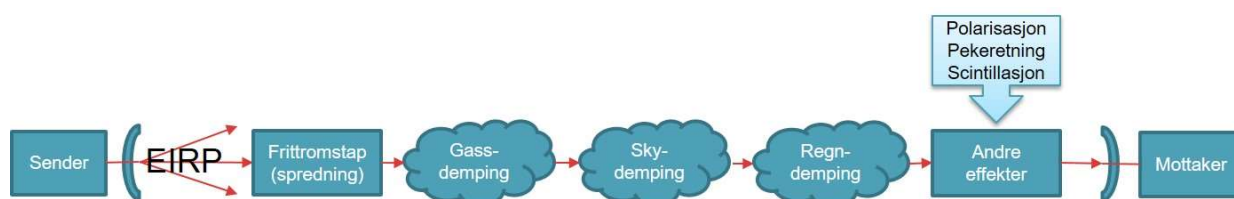
Kapasiteten til satellitten begrenses av satellittens frekvensbåndbredde og tilgjengelige effekt. Et **frekvensbånd** er enkelt forklart gitte kommunikasjonsfrekvenser for opp- og nedlink, for

eksempel i området rundt 30 GHz for opplink og 20 GHz for nedlink som kalles Ka-båndet. Brukeren av satellitten tildeles en andel av satellittens totale effekt, og en del av dens totale frekvensbåndbredde. Tabell 1.1 viser typiske frekvensbånd med tilhørende frekvensområder for satellittkommunikasjon [2].

Tabell 1.1 Typiske frekvensbånd for satellittkommunikasjon

Frekvensbånd	Opplink frekvens	Nedlink frekvens
C-bånd	6 GHz	4 GHz
X-bånd	8 GHz	7 GHz
Ku-bånd	14 GHz	11 GHz
Ka-bånd	30 GHz	20 GHz
V-bånd	50 GHz	40 GHz

For å avgjøre om man er i stand til å etablere eller opprettholde en kommunikasjonsforbindelse via en satellitt, settes det opp et **linkbudsjett**. Linkbudsjettet er en oversikt over utsendt effekt, forsterkning og tap av signalet mellom sender og mottaker, som vist i Figur 1.2. Linkbudsjettet kan illustreres slik enten det er sender på satellitt og mottaker på bakkestasjonen eller omvendt.



Figur 1.2 Linkbudsjett vist blokkskjematisk.

Utstrålt effekt fra sender angis som **EIRP** (Effektiv Isotropisk Utstrålt Effekt) og inkluderer senderradioens utgangseffekt og antennens forsterkning. EIRP er en standardbetegnelse som angir effekt i ønsket retning relativt til en isotropisk antenne. En isotropisk antenne stråler likt i alle retninger. De vesentligste tapene mellom sender og mottaker er frittromstap og tap som skyldes andre atmosfæriske dempingeffekter. Frittromstap er at signaltettheten/flukstettheten avtar på grunn av at signalet blir spredt. Frittromstapet øker med økt avstand mellom sender og mottaker. Atmosfæren strekker seg fra havnivå og opp til cirka 100 km der de 15 km nærmest havnivå utgjør troposfæren og de øverste 30 km utgjør ionosfæren. Dempingeffekter på satellittsignaler i atmosfæren foregår hovedsakelig i ionosfæren og troposfæren. På frekvenser som er over 10 GHz, er ionosfæriske effekter neglisjerbare [3].

For frekvenser i Ka-båndet gjenstår da de **troposfæriske dempingseffektene**, som inkluderer:

- Gasser i form av vanndamp og oksygen som fører til absorpsjon.
- Skyer i form av vanndråper og is som fører til absorpsjon og depolarisering.
- Nedbør i form av regn, sludd og snø som fører til absorpsjon og depolarisering.
- Scintillasjon, som er hurtige amplitudevariasjoner på mottatt satellittsignal som følge av flerveispropagasjon grunnet varierende brytningsindeks.

Dersom dempingseffektene som følge av absorpsjon overstiger marginen som er avsatt for disse i linkbudsjettet, kan det føre til at budsjettet «går i minus» og dermed at forbindelsen brytes eller degraderes. Derfor blir det viktig å kunne estimere dempingseffektene korrekt. Dempingseffektene varierer kontinuerlig som følge av varierende værforhold.

Linkbudsjettet settes opp med utgangspunkt i et **tilgjengelighetskrav**, det vil si hvor stor andel av tiden forbindelsen skal fungere uten degradering eller brudd. Tilgjengelighetskravet kan for eksempel være 99 % av tiden eller mer. Statistikk for de ulike dempingsmekanismene vil sammen med tilgjengelighetskravet definere hvor store marginer som må settes av i linkbudsjettet. For gassdemping er dette standard atmosfæriske forhold i kombinasjon med eksisterende beregningsmodeller.

Gassdemping har frem til nå som regel vært sett på som en relativt konstant del av linkbudsjettet som ikke varierer for ulike tidspunkter eller tilgjengelighetskrav ved satellittkommunikasjon med geostasjonære satellitter. For høye elevasjonsvinkler i kombinasjon med lave frekvenser under 10 GHz er dette en akseptabel forenkling [3] **Elevasjonsvinkelen** er vinkelen mellom horisonten og antennens pekeretning, som vist i Figur 1.1. Omfanget av troposfæriske effekter på satellittforbindelsen øker med lavere elevasjonsvinkel på bakkestasjonen. Dette fordi en lavere elevasjonsvinkel fører til at radiosignalet må propagere en lengre distanse gjennom troposfæren. En annen effekt av lang distanse gjennom atmosfæren er at signalbanen vil bøyes av ned mot jordoverflaten. Denne effekten kalles **refraksjon** og skyldes at brytningsindeksen avtar med økende høyde i atmosfæren.

En **geostasjonær satellitt** befinner seg om lag 36000 km over ekvator og har den egenskapen at den står tilnærmet i ro, relativt jordens overflate. Pekeretningen fra et fast punkt mot en geostasjonær satellitt er dermed tilnærmet statisk. Fra en geostasjonær satellitt er om lag en tredjedel av jordens overflate synlig, som utgjør satellittens maksimale **dekningsområde**. Den teoretiske grensen for å kommunisere med geostasjonære satellitter går ved cirka 80. breddegrad nord og sør. Fri sikt mellom bakkestasjonen og satellitten vil være hindret av

horisonten når man befinner seg nærmere polene enn dette. I Norge og norske interesseområder nord for fastlands-Norge er dermed antennens elevasjonsvinkel mot geostasjonære satellitter lav. Dette fører til at signalets distanse gjennom troposfæren øker sammenlignet med en forbindelse som benytter høyere elevasjonsvinkel, som vist i Figur 1.1.

Ikke-geostasjonære satellitter blir også i økende grad benyttet for kommunikasjonsformål. De har den egenskapen at de ikke befinner seg i ro i forhold til jordoverflaten, og ikke er avhengig av å befinne seg over ekvator. Det er tre faktorer som avgjør dekningsområdet til en slik satellitt. Avstanden fra satellitten til jorden avgjør hvor stor del av jorden satellitten teoretisk til enhver tid ser. Avstanden fra satellittens baneplan til bakkestasjonen avgjør hvor lenge satellitten er synlig over horisonten for hver passering. Og satellittsystemets krav til elevasjonsvinkel avgjør hvor nær horisonten bakkestasjonen kan kommunisere med satellitten. Et satellittsystems begrensning i elevasjonsvinkel er her et designkriterium som definerer hvor lenge en satellitt er «brukbar» og kan benyttes når den passerer over himmelen. Satellittens dekningsområde på bakken er på samme måte direkte avhengig av systemets krav til elevasjonsvinkel. For å kommunisere med slike satellitter må man enten ha rundtstrålende antenner eller direkte antenner som til enhver tid peker på satellitten som benyttes.

Forståelse for gassdemping i troposfæren vil også være nyttig ved kommunikasjon på høye frekvenser og lave elevasjonsvinkler mot andre flyvende plattformer enn satellitter, for eksempel droner eller fly. Droner og fly vil ha mange av de samme egenskapene som ikke-geostasjonære satellitter når det gjelder mulighetene for slik kommunikasjon.

De sentrale begrepene for dette prosjektet, som er introdusert i dette kapitlet, vil bli nærmere forklart i påfølgende kapitler.

1.2 Motivasjon

De lavere frekvensbåndene etterspørres og benyttes i stadig større grad innen satellittkommunikasjon. Dette fører til lavere tilgjengelighet og høyere kostnader for disse frekvensene, spesielt i Ku-bånd. Det er mindre konkurranse om høyere frekvenser i frekvensspekteret, som i Ka-båndet og høyere. Dermed er det en fordel å kunne benytte de høyere frekvensene, selv om disse er forbundet med større grad av atmosfærisk påvirkning.

Fremtidig norsk bruk av satellittkommunikasjon vil innebære en kombinasjonen av høyere frekvenser og lave elevasjonsvinkler. Å bruke denne kombinasjonen vil føre til betydelig gassdemping på satellittsignaler. Det er derfor et behov for å forstå hva dette innebærer og hvordan man kan tilpasse bruken av systemene for å optimalisere ressursutnyttelsen, både militært og sivilt.

Signalbanens lange distanse gjennom troposfæren fører til at variasjonene i været langs signalbanen får økende betydning. Det er derfor interessant å undersøke hvordan dette påvirker gassdemping på satellittsignalet, og i hvilken grad det er mulig å modellere variasjoner som forekommer over tid med ulike modeller. Det er i den sammenheng også interessant å undersøke i hvilken grad antagelsen i at gassdemping på satellittforbindelser er konstant stemmer.

Forståelsen for hva utviklingen mot bruk av høyere frekvenser på lave elevasjonsvinkler medfører vil øke ved å kvantifisere gassdempingens omfang og variasjon over tid på en slik forbindelse. Dette kan igjen brukes ved design og/eller bruk av satellittsystemer. Prediksjon av satellittforhold vil også muliggjøre justeringer i linkbudsjettberegninger, som kan benyttes til å øke dataratene ved nye eller eksisterende satellittforbindelser.

Det eksisterer detaljerte atmosfæriske modeller som benytter værobservasjoner for å beskrive og predikere været. Værdata fra disse modellene kan benyttes som inngangsverdier i matematiske modeller for å beregne troposfærisk gassdemping. Det er derfor av stor interesse å undersøke hvilken presisjon det er mulig å oppnå ved slike beregninger. Dersom presisjonen er god kan man, ved bruk av tilgjengelige modeller og predikert værinformasjon, altså forutsi den troposfæriske gassdempingen på en satellittforbindelse.

1.3 Prosjektets målsetning

Målsetningen for dette prosjektet er å undersøke om det er mulig å predikere troposfærisk gassdemping på en satellittforbindelse. For å gjøre dette skal det benyttes to tilgjengelige matematiske modeller for beregning av gassdemping, sammen med predikerte værdata for å simulere gassdemping. Prosjektet skal ta utgangspunkt i én enkelt satellittforbindelse hvor data for målt signalstyrke samt historisk predikerte værdata langs signalbanen foreligger for samme tidsperiode. I tillegg skal prosjektet bruke historiske værobservasjoner ved bakkestasjonen som er tilgjengelig for den samme perioden. På denne måten skal simuleringsresultatene kunne sammenlignes med referansemålinger for å vurdere hvilken presisjon som er mulig å oppnå. Dersom simuleringsresultatene er gode nok vil det dermed være mulig å beregne dempingsforholdene på satellittforbindelsen frem i tid, basert på numeriske værprodukter.

Prosjektet vil vurdere anvendbarheten til valgte beregningsmetoder, og kvantifisere forskjeller mellom disse. Med bakgrunn i dette vil det være mulig å avklare hvilke beregningsmodell som er den «beste» for beregning av gassdemping på det aktuelle satellittsignalet.

1.4 Oversikt over arbeidet

Prosjektet benytter to modeller som er gitt ut av seksjon for radiokommunikasjon i Den internasjonale telekommunikasjonsunionen (ITU-R) for å beregne gassdemping. Satellittsignalet som gassdemping skal modelleres for, er fra den geostasjonære satellitten Eutelsat Ka-sat til bakkestasjonen ved Isfjord Radio på Svalbard. Signalets frekvens er i Ka-båndet på 19,68 GHz og elevasjonsvinkelen til antennen på bakkestasjonen er ned mot 3,2 grader.

I prosjektet blir et datasett som er innsamlet av Forsvarets forskningsinstitutt (FFI) i samarbeid med Telenor og SINTEF benyttet [4]. Datasettet inneholder værprodukter fra værmodellen AROME Arctic i form av predikerte værforhold og målinger av det aktuelle satellittsignalet for samme 8 måneders periode i 2016.

Det målte satellittsignalet inneholder imidlertid betydelige effekter av skydemping, i tillegg til effektene av gassdemping. For å kunne sammenligne simuleringsresultatene og referansemålingene på en god måte, ble prosjektet underveis utvidet til også å modellere skydemping på satellittsignalet. For å beregne skydemping benyttes AROME Arctic data, og

en tilgjengelig matematisk modell gitt ut av ITU-R. Utvidelsen medfører dermed en mulighet til å vurdere simuleringsmetodens anvendbarhet for også å predikere skydemping.

1.5 Tilgrensende forskning

Målet for prosjektet er å oppnå en bedre forståelse av hvorledes troposfærisk gassdemping virker inn på kommunikasjonskanalen mellom satellitt og bakkestasjon. Annen publisert forskning har undersøkt lignende problemstillinger med metoder og resultater som er relevant for prosjektarbeidet.

Den franske forskningsinstitusjonen ONERA har tidligere utviklet en metode for å modellere propagasjonsforhold for satellittforbindelser i Ka-båndet. Motivasjonen for utarbeidelse av metoden var å oppnå høyere datarate ved å gjøre bruk av høyere frekvenser i kommunikasjon med observasjonssatellitter som ikke er i geostasjonære baner [5]. En god forståelse av troposfæriske effekter var da avgjørende for evaluering og design av kommunikasjonskanalen. ONERA har derfor utviklet en simulator, ANS (Atmospheric Numerical Simulator), som beskriver atmosfæriske effekter på kommunikasjonskanalen. Denne simulatoren prosesserer værprediksjoner og værobservasjoner for å øke dataenes oppløsning, og modellere atmosfæriske tilstander tilbake i tid [6]. Simulatorene er ikke tilgjengelig for bruk av FFI. Simulatorene er imidlertid benyttet på samme satellittforbindelse, og i samme tidsrom, som er benyttet i dette prosjektet. Disse simuleringsresultatene viser god overenstemmelse mellom simulerte og målte verdier, og vil være en referanse for resultatene i dette prosjektet [7].

Det finnes også flere eksempler på implementering av forenklete metoder for å benytte numeriske værprodukter til å beregne atmosfæriske effekter, deriblant gassdemping på satellittforbindelser i frekvensområdet 20-30 GHz. Flere av disse viser god overenstemmelse mellom simulerte og målte verdier for gassdemping [8] [9] [10]. Felles for disse metodene er at det er høyere elevasjonsvinkler enn de som er relevante i dette prosjektet, samt at implementasjonene har begrenset anvendbarhet ettersom verifikasjon er knyttet til spesifikke geografiske lokasjoner med dertil gjeldende atmosfæriske forhold.

Dette prosjektet kompletterer eksisterende forskning ved at arbeidet fokuserer på bruk av lave elevasjonsvinkler på høye breddegrader. Dette gjør resultatene spesielt relevante for norsk anvendelse. Prosjektet tar også i bruk en værmodell og en oppdatert beregningsmetode som ikke har vært benyttet tidligere. Prosjektet undersøker videre muligheten for å estimere gassdemping og gassdempingens variasjon med høy presisjon frem i tid. For å heve kvaliteten

på resultatene inkluderer prosjektet kvantifisering av satellittsignalets varierende avbøyning/refraksjon. Effekten av radiosignalets avbøyning i atmosfæren er spesielt relevant på lave elevasjonsvinkler [9].

1.6 Publisering av resultater

Resultatene fra dette masterprosjektet er innsendt for presentasjon på konferansen EuCAP 2020 (European Conference on Antennas and Propagation). Konferansen finner sted i København 15.-20. mars 2020. Den innsendte konferanseartikkelen er vedlagt rapporten som vedlegg 1.

2 Teori

I dette kapitlet presenteres relevant bakgrunnsteori for prosjektet. Teorien omhandler hvordan skyer og gasser i atmosfæren vekselvirker med radiosignaler. Teorien blir videre anvendt for å simulere atmosfærisk demping som følge av skyer og gasskomposisjonen i atmosfæren på satellittsignalet mellom bakkestasjonen på Isfjord Radio og satellitten Eutelsat Ka-sat. Teorikapitlet inkluderer også en beskrivelse av tilgjengelige modeller for beregning av atmosfærisk demping som følge av gasser og skyer. Denne teorien er basert på rekommandasjoner for beskrivelse av propagasjon, publisert av ITU-R. For gassdemping gjelder dette ITU-R P. 676 [11], og for skydemping ITU-R P. 840 [12].

I hovedsak er det to tilgjengelige modeller for beregning av gassdemping. En modell som baserer seg på værdata som beskriver forholdene langs signalbanen og en modell som beregner tilnærmet gassdemping og baserer seg på værdata som beskriver forhold ved bakkestasjonen. Modellene baseres på en parameterisering av spektroskopiske data som gir spesifikk demping som funksjon av atmosfæriske forhold og radiosignalets frekvens. Modellene er beskrevet i henholdsvis annex 1 og 2 av ITU-R P. 676. For å beregne skydemping for signalbanen benyttes en modell fra ITU-R P. 840 annex 1.

Det finnes flere versjoner av ITU-R P. 676. Ved oppstart av prosjektet var versjon 11 gjeldende. Den tilnærmet modellen for beregning av gassdemping i henhold til ITU-R P. 676-11 er imidlertid omdiskutert, og kan ha systematiske feil sammenlignet med tidligere versjoner [10]. Den tilnærmede modellen basert på ITU-R P. 676-10 er derfor også benyttet i prosjektets simuleringer for sammenligning. Mot slutten av prosjektperioden ble ITU-R P. 676-12 publisert med oppdaterte beregningsmodeller. Disse oppdaterte modellene er primært benyttet i prosjektet.

Teorikapitlet beskriver videre teori som er relevant for drøfting av beregnet gassdemping og sammenligning med målte verdier. Dette omfatter blant annet en enkel beskrivelse av radiosignalets refraksjon/avbøyning i atmosfæren.

2.1 Egenskapene til klar luft i troposfæren

Troposfæren er den laveste delen av atmosfæren, og der mesteparten av skyer og andre vær fenomener forekommer. Troposfæren er området fra bakken opptil 7-17 km høyde avhengig av hvor man befinner seg, og er lavere ved høye breddegrader. Egenskapene til klar luft impliserer at det ikke blir tatt hensyn til effekten av kondensert vann i form av regn og skyer. Gassdemping og avbøyning/refraksjon er av de viktigste mekanismene for radiobølgeforplantning i klar luft for frekvenser i Ka-båndet. Varierende refraktivitet/brytningsindeks fører til spredning og avbøyning av radiosignaler. Formel 2.1 viser uttrykk for refraktivitet, N [N-enheter] og avhenger av trykk, P [hPa], temperatur, T [K] og partielltrykket til vanndamp, e [hPa].

$$N = 77,6 \left(\frac{P}{T} \right) + 3,73 * 10^5 \left(\frac{e}{T^2} \right) \quad 2.1$$

Uttrykket for refraktivitet er utledet av Debye-modellens sammenheng mellom polarisering av polare og ikke-polare molekyler. Det første leddet beskriver effekten av tørr luft og effekten av de ikke polare nitrogen og oksygenmolekylene. Effekten av fuktighet i luften er beskrevet i andre ledd og er effekten av polare vanndamp-molekyler [13]. Forholdet mellom refraktivitet, N , og brytningsindeks, n , er gitt i Formel 2.2. Refraktivitet benyttes ofte istedenfor brytningsindeks, ettersom verdien for brytningsindeks ofte ligger veldig nært 1.

$$n = \frac{N}{10^6} + 1 \quad 2.2$$

Strukturen i troposfæren varierer mye raskere vertikalt enn horisontalt og er stratifisert i horisontale lag som følge av effekten av jordens gravitasjon. Variasjoner vil likevel eksistere horisontalt både for tid og sted. En standard atmosfære har følgende egenskaper:

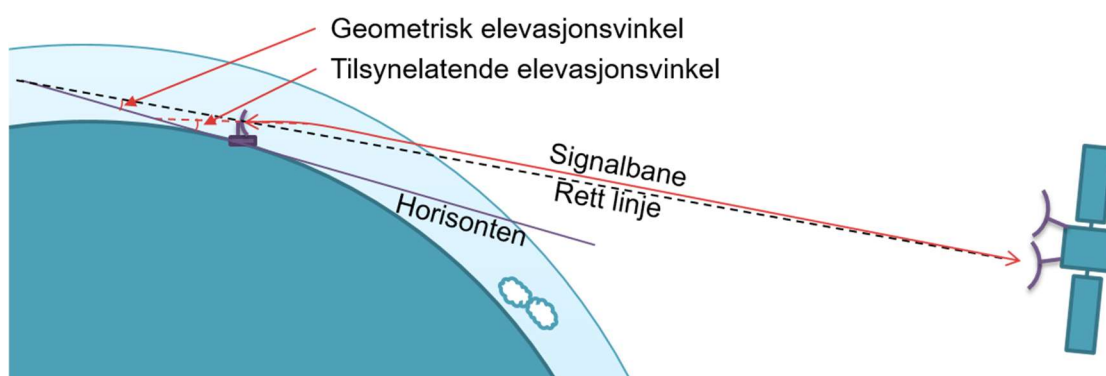
- Trykket avtar eksponentielt
- Temperaturen avtar til troposfærens slutt ved om lag 10 km

Luftens metningstrykk, som er evnen til å holde på vann, avtar med avtagende temperatur og medfører at vanndampinnholdet i atmosfæren blir lavere med økende høyde. Vanninnhold over metningstrykket fører til kondensering og danner skyer. Skyer sees bort fra ved beregning av luftens refraktivitet. Hovedregelen for luftens refraktivitet er dermed at den avtar med økende høyde [13].

Dersom refraktiviteten var konstant ville radiobølger propagert i rett linje. Med varierende refraktivitet vil et radiosignal bli avbøyd, som beskrevet av Snells lov i Formel 2.3, og vist i Figur 2.4 i Avsnitt 2.4.1. Når radiosignalet sendes skrått oppover i atmosfæren, med avtakende refraktivitet, vil det avbøyes nedover mot bakken.

$$n_1 \sin(\alpha_1) = n_2 \sin(\beta_2) \quad 2.3$$

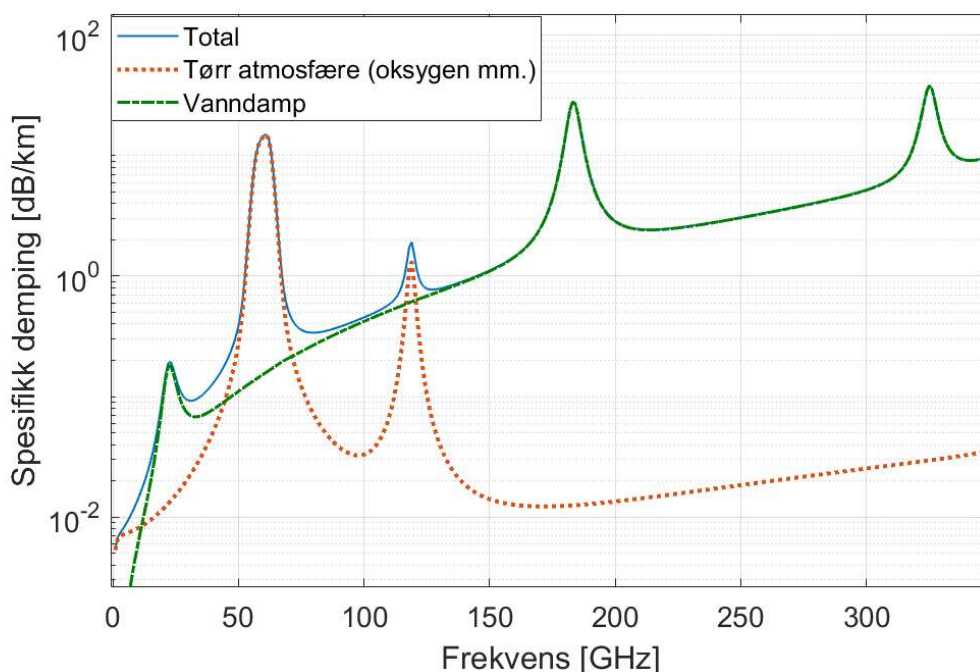
Den tilsynelatende elevasjonsvinkelen er vinkelen mellom horisonten og pekeretningen til antennen. Denne vil ta høyde for refraksjon og vil normalt være større enn den faktiske geometriske elevasjonsvinkelen fra bakkestasjonen til satellitten. Det betyr at et radiosignalets bane normalt er lengre enn den geometriske distansen mellom bakkestasjonen og satellitten, som vist i Figur 2.1. Prosjektets simuleringer inkluderer effekten av varierende refraksjon.



Figur 2.1 Prinsippskisse for antennen tilsynelatende elevasjonsvinkel og den geometriske elevasjonsvinkelen fra bakkestasjon.

2.2 Demping som følge av atmosfæriske gasser

Gassdemping i troposfæren ved frekvenser under 350 GHz skyldes i all hovedsak oksygen og vanndamp. Oksygenmolekylet er paramagnetisk og har et permanent magnetisk dipolmoment i jordens magnetfelt. Det magnetiske dipolmomentet kommer av parallell elektronspinn som oppstår når to oksygenatomer bindes sammen til oksygenmolekylet i en spinn-triplet. Forandringer i den kombinerte spinnorienteringen til oksygenets elektroner relativt til vinkelmomentet gir svært tette spinn-flipp overganger nært oksygenmolekylets resonansfrekvenser. Vannmolekylet på sin side har et permanent elektrisk dipolmoment som følge av molekylets geometri. Spinn-flipp overganger for oksygen, og molekylrotasjoner for vanndamp henger sammen med det påtrykte radiosignalets frekvens, som i denne prosessen overfører energi ved absorpsjon og i praksis blir dempet. Ved spektroskopi vises oksygenets resonanslinjer ved 60 og 119 GHz, mens vannmolekylet vil ha tydelige spektrallinjer ved 22, 183 og 325 GHz. Figur 2.2 viser hvordan den spesifikke gassdempingen er høyere ved frekvenser i nærheten av oksygenets resonansfrekvenser og vannmolekylets spektrallinjer. Ved tørr atmosfære er effekten av oksygen, trykkindusert nitrogen og ikke-resonant Debye-demping hensynstatt og total standard atmosfære inkluderer effekten av vanndamp.



Figur 2.2 Spesifikk demping med 1 GHz intervall ved standard atmosfæriske forhold.

Elektromagnetiske bølger blir også avbøyd og spredt ved varierende refraktivitet. Uttrykket for det elektromagnetiske feltet fra en elektromagnetisk bølge, E , med rett bølgefront i et medium

med konstant brytningsindeks, n er vist i Formel 2.4, der r og t representerer sted og tid. Bølgenummeret i vakuum, k_0 er, som er en funksjon av frekvensen, f , og bølgelengden, λ .

$$E(r, t) = E_0 e^{i(nk_0 r - \omega t)}$$

$$\omega = 2\pi f \quad 2.4$$

$$k_0 = 2\pi f / \lambda$$

Refraktiviteten i troposfæren er imidlertid ikke konstant. For radiosignaler i mikrobølgeområdet er likevel endringen i refraktivitet langsomm sammenlignet med bølgelengden. Med bakgrunn i dette kan derfor uttrykket i Formel 2.5 benyttes.

$$E(r, t) \approx E_0 e^{i(n(r)k_0 r - \omega t)} \quad 2.5$$

Brytningsindeksen kan så beskrives som et komplekst tall som igjen gjør det mulig å beskrive hvordan det elektriske feltet avtar som følge av distanse og absorpsjon. Formel 2.6 viser det komplekse uttrykket for brytningsindeks og det elektriske feltet, med en reell del, \Re , og en imaginær del, \Im . Det er også vist hvordan dette relateres til radiosignalet.

$$n = \Re[n] + i\Im[n] \quad 2.6$$

$$E(r, t) \approx E_0 e^{i(\Re[n(r)]k_0 r - \omega t)} e^{-\Im[n(r)]k_0 r}$$

Den imaginære delen av brytningsindeksen er relatert til feltstyrkens eksponentielle demping som funksjon av distanse, som er karakteristisk ved absorpsjon. I et medium med brytningsindeks n , blir signalets feltstyrke redusert tilsvarende $e^{-2\pi\Im[n]}$ per distanse lik bølgelengden som blir tilbakelagt. Den frekvensavhengige spesifikke dempingen, γ [dB/km], som følge av atmosfæriske gasser, uttrykkes som i Formel 2.7.

$$\gamma = 0,182 * 10^6 f \Im[n] \quad 2.7$$

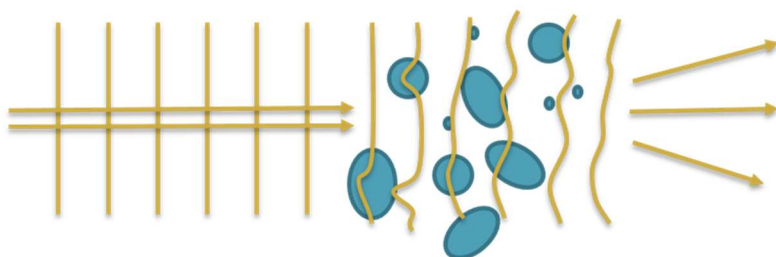
Den reelle delen av refraktiviteten er relatert til spredning av signalet. Spredning av signalet er frekvensavhengig og skjer som funksjon av både tid og sted, som medfører både forsinkelse og faseendring. Disse effektene er spesielt store rundt resonansfrekvensene til oksygen og spektrallinjene til vanndamp [11]. Slike spredningsmekanismer gir raske variasjoner i form av kortsiktig signaldemping og er utenfor det som modelleres i dette prosjektet.

2.3 Demping som følge av hydrometeorer i skyer

Propagering gjennom skyer medfører at radiosignalet passerer gjennom hydrometeorer i form av vanndråper og is inne i skyene. Effekten av hydrometeorene på radiosignalet er knyttet til antall og størrelse, relativt til radiosignalets bølgelengde. Effekten av hydrometeorer på radiosignalet inkluderer spredning, depolarisering og demping.

Den største dempingeffekten som følge av skyer på radiosignalet er knyttet til høy brytningsindeks for regndråper og smeltepartikler. Dempingen er en følge av absorpsjon og spredning. Absorpsjon er dielektrisk tap som er relatert til den imaginære delen av brytningsindeksen til det mediet som radiosignalet propagerer i. Spredning skjer ved at radiosignalet opplever en faseendring ved gjennomgang av hydrometeoren, som grunnet hydrometeorens form ikke er symmetrisk som vist i Figur 2.3. Is har mye lavere brytningsindeks enn vann og fører i mindre grad til demping, men is kan medføre signifikant depolarisasjon av radiosignalet.

I skyer er vanndråpene mye mindre enn radiosignalets bølgelengde, dermed er faseendringen lav og effekten av hydrometeorene kan beskrives med Rayleighs spredningsteori. Rayleighs tilnærming viser at dempingen og spredningen av radiosignalet er avhengig av radiosignalets frekvens, samt proporsjonal med det totale partikkelvolumet av hydrometeorer.



Figur 2.3 Spredning av radiosignalet som følge av hydrometeorer inne i skyer [13].

2.4 Modeller for gassdemping

ITU-R beskriver beregning av gassdemping på radiosignaler i rekommandasjonen ITU-R P. 676-12. To ulike modeller beskrives avhengig av hvilken informasjon om temperatur, trykk og fuktighet som er tilgjengelig. I tillegg beskrives anvendelsen ved ulike former for radiokommunikasjon, deriblant vinklede forbindelser fra bakken til verdensrommet. I dette prosjektet vil modellene omtales som Modell A og Modell B og disse benyttes i prosjektets simuleringsmetoder A og B, som også inkluderer anvendelsesmetoden for tilgjengelige inngangsverdier.

Modell A er beskrevet i ITU-R P. 676-12 annex 1. Modellen baserer seg på linje for linje beregning av gassdemping, der linje peker på spektrallinjer for oksygen og vanndamp. Atmosfæren deles opp i horisontale lag og lagvis gassdemping beregnes. Gassdempingen på radiosignalet i ett lag beregnes ved å multiplisere lagets spesifikke demping med radiosignalets distanse gjennom laget. Beregning av gassdemping med denne modellen er avhengig av detaljert informasjon om trykk, temperatur og fuktighet langs signalbanen oppover i atmosfæren [11]. Modellen kan brukes fra 0 til 1000 GHz og for alle elevasjonsvinkler.

Modell B er beskrevet i ITU-R P. 676-12 annex 2. Modellen er en tilnærming for beregning av gassdemping der informasjonen som er nødvendig for Modell A ikke foreligger eller nøyaktigheten og presisjonen til Modell A ikke er påkrevd. Tilnærmingen består i å beregne demping for oksygen og vanndamp basert på værdata på bakken. Summen av den spesifikke dempingen for oksygen og vanndamp multiplisert med ekvivalente atmosfære-høyder utgjør total beregnet demping i senit. Dempingen blir så skalert opp i forhold til elevasjonsvinkelen. Modellen kan benyttes for frekvenser i området 1-350 GHz og for elevasjonsvinkler 5-90 grader [11].

Beregning av gassdemping kan gjøres med utgangspunkt i målte, simulerte eller standardverdier for temperatur, trykk og fuktighet. Beregningsmodellene som beskrives i dette kapitlet er implementert i MATLAB og verifisert ved bruk av verifikasjonseksempler fra ITU-R [14].

2.4.1 Modell A

Den spesifikke gassdempingen er som tidligere vist relatert til den imaginære delen av den komplekse refraktiviteten i utbredelsesmediet. Den spesifikke gassdempingen γ er gitt av uttrykket i Formel 2.8, som er summen av den spesifikke dempingen i tørr luft, γ_o og i vanndamp, γ_w .

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0,1820f \left(N''_{\text{oksygen}}(f) + N''_{\text{vanndamp}}(f) \right) \quad [dB/km] \quad 2.8$$

$N''_{\text{oksygen}}(f)$ og $N''_{\text{vanndamp}}(f)$ er den imaginære delen av den frekvensavhengige komplekse refraktiviteten for henholdsvis oksygen og vanndamp og kan utvides som vist i Formel 2.9. $N''_D(f)$ er det tørre kontinuumet som følge av trykkindusert nitrogen-absorpsjon og Debye-spekteret.

$$N''_{\text{oksygen}}(f) = \sum_{i(\text{oksygen})} S_i F_i + N''_D(f) \quad 2.9$$

$$N''_{\text{vanndamp}}(f) = \sum_{i(\text{vanndamp})} S_i F_i$$

Styrken til de individuelle spektrallinjene er beregnet ved bruk av spektroskopisk data for demping som følge av oksygen og vanndamp. Styrken på linjen, S_i , er gitt av uttrykket i Formel 2.10 og avhenger av temperaturen T [K], partielltrykket for tørr luft, p [hPa], partielltrykket for vanndamp, e [hPa] og spektroskopiske data for henholdsvis oksygen, a_i , og vanndamp b_i [11]. Det barometriske trykket er summen av partialtrykk for vanndamp og tørr luft.

$$S_i = a_1 * 10^{-7} p \theta^3 \exp [a_2(1 - \theta)] \text{ for oksygen}$$

$$S_i = b_1 * 10^{-1} e \theta^{3,5} \exp [b_2(1 - \theta)] \text{ for vanndamp} \quad 2.10$$

$$\theta = 300/T$$

Partielltrykket for vanndamp, e , kan beregnes med kjennskap til absolutt fuktighet/vanndamp tettheten, ρ [$\frac{g}{m^3}$] og temperatur som vist i Formel 2.11.

$$e = \frac{\rho T}{216,7} \quad 2.11$$

Hver resonanslinje vil også ha en form faktor, F_i , som beskriver den i frekvensspekteret, som vist i Formel 2.12. Formfaktoren er avhengig av hvilken frekvens, f [GHz], refraktiviteten

beregnes for. Spektrallinjens formfaktor er også avhengig av frekvensen for oksygen-, eller vanddamp-linjen f_i , og linjebredden Δf . δ er korreksjonsfaktor for interferenseffekter i oksygenlinjene.

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right]$$

$$\Delta f = a_3 * 10^{-4} (p \theta^{0.8-a_4} + 1,1e\theta) \text{ for oksygen}$$

$$\Delta f = b_3 * 10^{-4} (p \theta^{b_4} + b_5 e \theta^{b_6}) \text{ for vanddamp}$$

$$\delta = (a_5 + a_6 \theta) * 10^{-4} (p + e) \theta^{0,8} \text{ for oksygen}$$

$$\delta = 0 \text{ for vanddamp}$$
2.12

Vanddampmolekylenes termiske bevegelse fører til at molekyler vil ha ulik hastighet i forhold til radiosignalet, som videre fører Doppler-effekten ved at spektrallinjefrekvensen forskyves. Ettersom forskyvningen vil skje både oppover og nedover i frekvens resulterer det i praksis i en utvidelse av spektrallinjefrekvensen. Ettersom dipolmomentet til oksygenmolekylet kommer fra parallell elektronspinn vil dette vekselvirke med det eksterne magnetiske feltet fra jorden. Denne vekselvirkningen fører til at det originale energinivået splittes opp. Oksygenmolekylets resonanslinjer deles opp over et frekvensområde rundt resonansfrekvensen i størrelsesorden MHz, og kalles Zeeman-splitting [15]. Dette påvirker resonanslinjene og beregning av spesifikk demping over 10 km høyde [11]. For å kompensere for Zeeman-splitting av oksygenlinjene og Doppler-utvidelsen av vanddamp-linjene benyttes en justering av linjebredden som vist i Formel 2.13.

$$\Delta f = \sqrt{\Delta f^2 + 2,25 * 10^{-6}} \text{ for oksygen}$$

$$\Delta f = 0,535 \Delta f + \sqrt{0,217 \Delta f^2 \frac{2,1316 * 10^{-12} f_i^2}{\theta}} \text{ for vanddamp}$$
2.13

Formel 2.14 viser uttrykket for N''_D , som er det tørre luft-kontinuumet fra Debye-spekteret. Dette inkluderer oksygen utenfor resonans under 10 GHz, samt trykkindusert nitrogendemping over 100 GHz. Breddeparameter for Debye-spekteret er gitt av d . Kontinuumet er også signifikant mellom 10 GHz og 100 GHz.

$$N''_D(f) = fp \theta^2 \left[\frac{6.14 * 10^{-5}}{d \left[1 + \left(\frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1,4 * 10^{-12} p \theta^{1,5}}{1 + 1,9 * 10^{-5} f^{1,5}} \right] \quad 2.14$$

$$d = 5,6 * 10^{-4} (p + e) \theta^{0,8}$$

Linje for linje beregning av gassdemping krever tilgang på lokale høydeprofiler for temperatur, trykk og fuktighet som kan innhentes ved radiosondemålinger. Dersom radiosondemålinger ikke foreligger kan beregningene gjøres for eksempel ved å benytte standard atmosfærer som beskrevet i rekommandasjon ITU-R P. 835 [16], eller andre værprodukter.

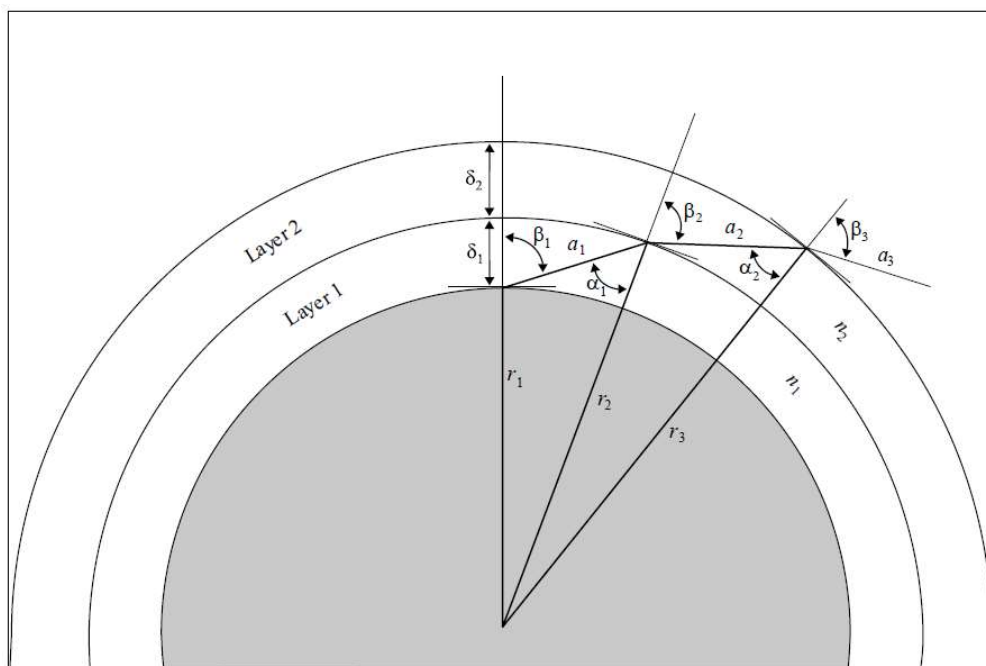
Nøyaktig beregnet gassdemping gjennom atmosfæren oppnås ved kontinuerlig refraksjon og beregning av uendelig mange verdier av spesifikk demping som integreres for uendelig tynne lag. I praksis må atmosfæren deles opp i diskrete lag der lagenes spesifikke demping multiplisert med lagtykkelsen summeres, som vist i Formel 2.15. Gassdemping langs signalbanen, spesifikk demping og signalbanens lengde i lag n er henholdsvis A_{gass} , γ_0 og a_n .

$$A_{gass} = \sum_{n=1}^k a_n \gamma_0 \quad [dB] \quad 2.15$$

Ettersom den største dempingen foregår nærmest bakken gjøres dette for eksponentielt tykkere lag oppover i atmosfæren. Lagdelingen er gitt av Formel 2.16. Lagdelingen består i 922 lag for atmosfærens høyde opptil 100 km. Lagtykkelsen for laveste lag er 10 cm og for øverste lag 1 km. Atmosfærens laveste 30 km er inkludert i de 800 laveste lagene.

$$\delta_i = 0,0001 \exp \left\{ \frac{i-1}{100} \right\} \quad [km] \quad 2.16$$

For vinklede forbindelser fra bakken til verdensrommet, som ved satellittkommunikasjon, bør gassdemping inntil 30 km over havet inkluderes i beregningene. Dersom frekvensen som nyttes sammenfaller med senter av resonanslinjer for oksygen bør dette utvides til 100 km [11]. For vinklede forbindelser er signalbanens lengde i lag n , a_n , større enn lagtykkelsen gitt i Formel 2.17, som vist i Figur 2.4, hvor δ_n er lagtykkelsen, r_n er radius fra jordens sentrum til begynnelsen av laget i km, og β_n er utgangsvinkelen i laget.



Figur 2.4 Signalbanens avbøyning gjennom påfølgende lag i atmosfæren med ulike brytningsindeks [11].

$$a_n = -r_n \cos \beta_n + \frac{1}{2} \sqrt{4r_n^2 \cos^2 \beta_n + 8r_n \delta_n + 4\delta_n^2} \quad [km] \quad 2.17$$

β_1 er 90 grader minus antennens tilsynelatende elevasjonsvinkel. Snells lov benyttes til å finne inngangsvinkelen α_n og refraksjonsvinkel/utgangsvinkel, β_n , til de påfølgende lagene vist i Formel 2.18. Vinkelen avhenger av brytningsindeksen til laget, n_n , tilstøtende lag, n_{n+1} , lagets tykkelse, δ_n , og avstanden fra jordens sentrum, r_n .

$$\beta_{n+1} = \sin^{-1} \left(\frac{n_n}{n_{n+1}} \sin \alpha_n \right) \quad 2.18$$

$$\alpha_n = \pi - \cos^{-1} \left(\frac{-a_n^2 - 2r_n \delta_n - \delta_n^2}{2a_n r_n + 2a_n \delta_n} \right)$$

Ved svært lave elevasjonsvinkler, i.e. under 1 grad, og værdata som gir negativ refraksjon, kan ducting forekomme ved at radiosignalet avbøyning blir større enn jordens krumning. Da vil Formel 2.18 gi et komplekst resultat og ikke lenger være gyldig [11].

2.4.2 Modell B

En tilnærmet modell for beregning av gassdemping kan benyttes hvor bakkestasjonen har en maksimal høyde på 10 km og radiosignalet frekvens er i området fra 1- 350 GHz. Modellen er ment å kunne benyttes for elevasjonsvinkler ned til 5 grader. I dette prosjektet benyttes modellen for sammenligning med Modell A for å undersøke om modellen er anvendbar, selv om elevasjonsvinkelen som modelleres geometrisk er ned til 3,2 grader. Forskning har vist at modellen kan benyttes for elevasjonsvinkler under 5 grader, og viser også god korrelasjon med stokastiske modeller for elevasjonsvinkler ned mot 3 grader ved frekvensen 19,5 GHz [9].

Modellen skal heller ikke brukes dersom frekvensen ligger nærmere enn 0,5 GHz fra senter av en resonanslinje. Vanndamp har en spektrallinje ved 22 GHz, og oksygen har en resonanslinje ved 60 GHz, ingen er nærmere 0,5 GHz for normale opp-, og nedlinkfrekvenser i Ka-båndet.

Ved tilnærmet beregning av gassdemping beregnes en spesifikk gassdemping, γ , med hensyn til værforhold ved forbindelsens bakkestasjon. Så beregnes atmosfærens ekvivalente høyde for demping som følge av oksygen, h_o , og vanndamp, h_w , som summert i Formel 2.19 gir samlet gassdemping i senit. Nøyaktigheten for en slik tilnærmet beregning er oppgitt å være $\pm 10\%$ for oksygendemping, A_o , og $\pm 5\%$ for vanndampdemping, A_w [11]. For vinklede forbindelser med elevasjonsvinkel, φ , benyttes så en skalering i Formel 2.20.

$$A_{Gass} = A_o + A_w = \gamma_o h_o + \gamma_w h_w \quad [dB] \quad 2.19$$

$$A_{Gass} = \frac{A_o + A_w}{\sin \varphi} \quad [dB] \quad 2.20$$

Den spesifikke dempingen beregnes for værddata ved bakkestasjon på tilnærmet samme måte som for nederste lag i Modell A. Tilnærmingen består i å ikke inkludere Zeeman-splitting av oksygenlinjer og Doppler-spredning av vanndamplinjer. Formel 2.8 til 2.12 beskriver metoden for beregning av spesifikk demping ved bruk av Modell B.

2.4.3 Usikkerhet i beregningsmodellen for gassdemping

Modellen for beregning av gassdemping i ITU-R P. 676-12 består av en parameterisering av spektroskopiske linjer. Modellens anvendelsesområde spenner over store variasjoner i inngangsverdier, blant annet frekvenser fra 1 til 1000 GHz. Det er derfor ønskelig å kvantifisere usikkerhet i beregningene som følge av unøyaktighet i beregningsmodellen ved å sammenligne spektroskopiske måleresultater med resultater fra beregningsmodellen. Et eventuelt relativt avvik antas å kunne benyttes generelt for modellen og som en systematisk feil i prosjektets beregninger. I dette prosjektet er sammenligningsgrunnlaget naturligvis bedre jo nærmere modellen representerer faktiske spektroskopiske resultatene rundt 20 GHz. Sammenlignbare spektroskopiske målinger er dessverre ikke funnet. Modellen antas likevel å ha en høy grad av presisjon og nøyaktighet og er også benyttet i annen forskning uten at hensyn til usikkerhet er beskrevet [9] [17].

2.5 Modell for skydemping

ITU-R beskriver også metoder for å beregne demping av radiosignaler som følge av skyer og tåke i rekommandasjonen ITU-R P. 840-8. Rekommandasjonen beskriver to modeller for beregning av demping som følge av skyer avhengig av hvorvidt informasjon om vanninnholdet langs signalbanen er tilgjengelig [12]. Modellene baserer seg på en Rayleigh tilnærming som er gyldig for frekvenser opptil 200 GHz, samt ved skyer eller tåke med partikkelstørrelse opptil 0,01 cm.

Skyenes demping av radiosignalet beregnes for de samme lagene som ligger til grunn for beregning av gassdemping med Modell A, og summeres langs signalbanen. Spesifikk skydemping, γ_{sky} [dB/km], beregnes som en funksjon av temperatur, T [K], spesifikt vanninnhold i skyene, M [g/m³], og radiosignalets frekvens, f [GHz], som vist i Formel 2.21.

$$\gamma_{sky}(f, T) = K_l(f, T)M \quad 2.21$$

Skyenes spesifikke dempingskoeffisient som følge av ekvivalent flytende vanninnhold, K_l , [(dB/km)/(g/m³)], beregnes som funksjon av frekvens og temperatur som vist i Formel 2.22.

$$K_l(f, T) = \frac{0.819f}{\varepsilon''(1 + \eta^2)} \quad 2.22$$

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''}$$

Dempingskoeffisienten er avhengig av vannets komplekse dielektriske permittiviteten. De imaginære og reelle dele, ε'' og ε' , av vannets permittivitet er gitt ved uttrykk i Formel 2.23 og er avhengig av det påtrykte feltets frekvens og temperatur.

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p \left[1 + \left(\frac{f}{f_p} \right)^2 \right]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s \left[1 + \left(\frac{f}{f_s} \right)^2 \right]}$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{1 + \left(\frac{f}{f_p} \right)^2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{1 + \left(\frac{f}{f_s} \right)^2} + \varepsilon_2 \quad 2.23$$

$$\varepsilon_0 = 77.66 + 103.3(\theta - 1)$$

$$\varepsilon_1 = 0.00671\varepsilon_0$$

$$\varepsilon_2 = 3.52$$

$$\theta = 300/T$$

Uttrykk for de viktigste relaksasjonsfrekvensene, den primære, f_p , og sekundære, f_s , er vist i Formel 2.24.

$$f_p = 20.20 - 146(\theta - 1) + 316(\theta - 1)^2 \text{ [GHz]} \quad 2.24$$

$$f_s = 39.8f_p \text{ [GHz]}$$

Total skydemping beregnes ved å summere skydemping lagvis etter samme prinsipp som for beregning av total gassdemping. Skydemping i ett lag beregnes som produktet av den spesifikke dempingen, $\gamma_{sk \ i}$ [db/km], og signalbanens distanse i laget, a_i [km]. Formel 2.25 viser uttrykket for total skydemping langs signalbanen, A_{sky} .

$$A_{sky} = \sum_{i=1}^n a_i \gamma_{sk \ i} \quad 2.25$$

For bruk i prosjektet er skydempingsmodellen implementert i MATLAB og verifisert ved bruk av verifikasjonseksempler fra ITU-R [14].

3 Grunnlagsdata

I dette kapitlet presenteres data som er gjort tilgjengelig som grunnlag for simulering av gass-, og skydemping. Dette inkluderer predikerte værdata og observerte værdata. Datasettet som brukes i prosjektet er innhentet i forbindelse med et ESA-prosjekt med Telenor, SINTEF, NTNU og FFI som studerte effekten av regn og scintillasjon på forbindelsen mellom Ka-sat og Isfjord Radio på Svalbard [4]. Datasettet inneholder også målinger av signalstyrke fra satellitten, som presenteres i Kapittel 5.

Den opprinnelige hensikten med datasettet medførte ikke behov for samme geografiske utstrekning som i dette prosjektet. Datasettets oppløsning og vertikale utstrekning er i tillegg begrenset av værmodellen AROME Arctic, som ligger til grunn for de predikerte værdataene. AROME Arctic er en værmodell med høy oppløsning. Imidlertid, sammenlignet med Modell A for beregning av gassdemping, er oppløsningen lav. Datasettet må derfor undersøkes og preprosesserer for å kunne benyttes i prosjektets simuleringer.

Kapitlet inneholder en beskrivelse av vurderinger, tilpasning og prosessering som er gjennomført på tilgjengelige grunnlagsdata, samt hvilke konsekvens dette antas å ha på prosjektets resultater.

Sammenligning av målte og beregnede verdier for gassdemping forutsetter at både AROME Arctic data og målinger av satellittsignalet er tilgjengelig i samme tidsperiode, fortrinnsvis en lengst mulig periode. Sammenligningsperiodens start er avgrenset av NASA/ONERA startet lagring av AROME Arctic data i Februar 2016, da Metrologisk institutt først gjorde disse offentlig tilgjengelig i full oppløsning. Sammenligningsperiodens slutt er begrenset av tilgang på målinger av satellittsignalet, som ble innhentet av ESA-prosjektet frem til oktober 2016 [4]. Perioden for sammenligning av beregnede og målte verdier for gassdemping er derfor fra februar til og med september 2016.

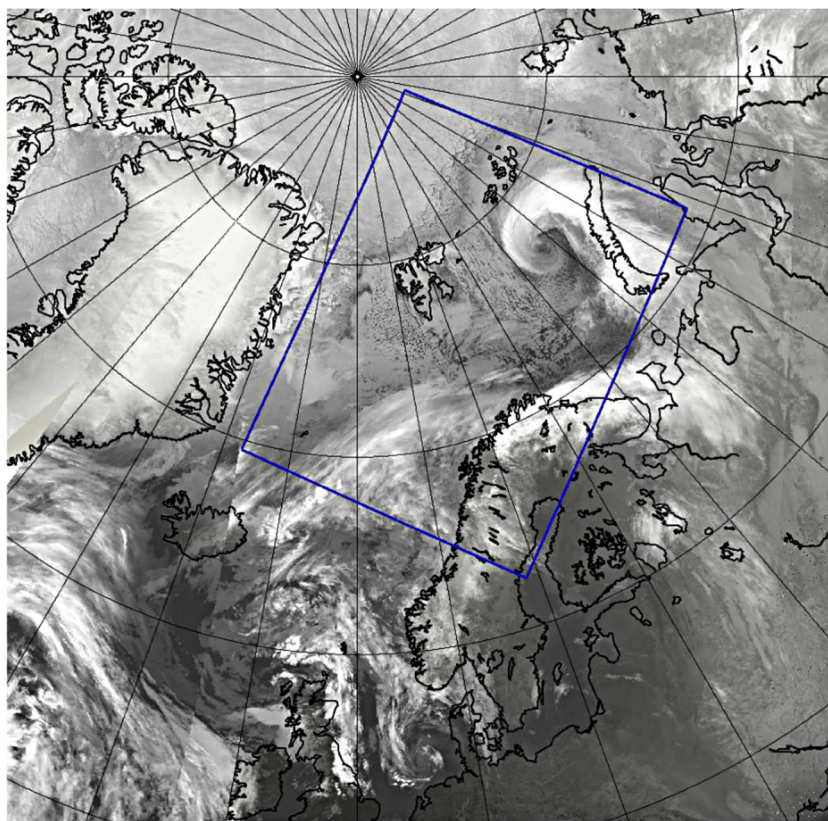
Kapitlet beskriver også tilgjengelige værobservasjoner ved Isfjord Radio i sammenligningsperioden, samt simuleringsresultater fra ANS som er benyttet som referanse.

3.1 Numeriske værprodukter fra AROME Arctic

AROME Arctic (Application of Research to Operations at Mesoscale Arctic) er værmodellen som benyttes av metrologisk institutt for værprediksjon i Arktis. Modellen gir 4 datasett i døgnet ved modellkjøring hver 6. time, 00, 06, 12, og 18 UTC. Hver modellkjøring gir 66 timers prediksjon av været i området vist i Figur 3.1 og har tidsoppløsning 1 time [18]. Den geografisk oppløsningen for modellen er 2,5 km, som er lik den for værmodellen som benyttes for fastlands-Norge. Atmosfæren beskrives fra bakken til 30 km høyde i 65 modellnivåer. Modellnivåene er tettest nærmest bakken der de største værforholdene varierer mest.

AROME Arctic dekker et område hvor det finnes få værobservasjoner. Derfor er satellittobservasjoner viktig for modellen, og vektlagt i større grad enn for andre værmodeller. Området skiller seg også fra andre områder ved unike værforhold i det høye nord, inkludert polare lavtrykk, turbulens og effekter av hav-is.

Modellens værprodukter i form av predikerte værforhold benyttes blant annet av skipsfart, luftfart og til å melde været på Svalbard via yr.no. Utviklingen av modellen er et internasjonalt samarbeid med flere prosjektpartnere og institusjoner. Modellen ligner på Nordic setup MetCoOp som er en annen modell for værprediksjon i samme område [19].



Figur 3.1 Geografisk område som dekkes av værmodellen AROME Arctic [18].

AROME Arctic data har grovere oppløsning enn det som benyttes til beregning av gassdemping i Modell A. For å kunne beregne gassdemping ved bruk av numerisk AROME Arctic data med Metode A må tilpasning av dataene gjennomføres. Det må også gjøres en vurdering om hvorvidt dataene beskriver de påkrevde parameterne detaljert nok, herunder trykk, temperatur og fuktighet.

For beregning av gassdemping krever Modell A høydeprofiler, og Modell B krever bakke-data for følgende parametere:

- Geometrisk høyde [kmoh]
- Temperatur [K]
- Barometrisk totaltrykk [hPa]
- Absolutt fuktighet [g/m^3]

Disse verdiene er tilgjengelig i 65 geometriske høyder over middel havnivå fra AROME Arctic etter å ha prosessert tilgjengelige AROME Arctic rådata i form av:

- Geopotensial høyde [km]
- Temperatur i Kelvin [K]
- Barometrisk totaltrykk [Pa]
- Partielt vanndamptrykk [Pa].

De ikke-trivielle omregningene gjøres for høyde og fuktighet er vist i Formel 3.1. Absolutt fuktighet ρ beregnes fra partielt vanndamptrykk e og temperatur T . Geometrisk høyde h beregnes fra geopotensial høyde, h' [16].

$$e = \frac{\rho T}{216,7} \rightarrow \rho = \frac{216,7 * e}{T} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad 3.1$$

$$h = \frac{6356,766 * h'}{6356,766 - h'}$$

For å beregne spesifikk skydemping iht. ITU-R P. 840-8 annex 1, som blir benyttet i Metode A, kreves det i tillegg tidsbestemte høydeprofiler for:

- Spesifikt vanninnhold i skyer [g/m^3]
- Skyenes temperatur [K]

AROME Arctic predikerer innholdet av hydrometeorene sky-vann og sky-is for 2016, i variablene:

- Atmosphere cloud condensed water content ml
- Atmosphere cloud ice content ml

Metadata i Metrologisk institutts internettarkiv beskriver disse skyvariablene med enheten trykk [kg/m^2] [20]. Etter å ha studert tilgjengelige verdier, samt korrespondanse med Metrologisk institutt, er det klarlagt at verdiene som er tilgjengelig for 2016 er oppgitt i massefraksjon, ω_i [kg/kg] av lufttettheten, og at parameterbeskrivelsen i internettarkivet er feil [21].

Inngangsparameter for beregning av spesifikk skydemping er det spesifikke vanninnholdet. Det spesifikke vanninnhold, M_i [g/m^3] for skyer i ett modellnivå finnes ved å multiplisere massefraksjon for hydrometeorer i skyer ω_i [kg/kg] med lufttettheten ρ_i [kg/m^3]. Lufttettheten til modellnivået beregnes med hjelp av trykk P [Pa], temperatur, T [K], og den spesifikke gasskonstanten for tørr luft $R_d=287 \text{ J}/(\text{kgK})$. Fremgangsmåten for beregning av skyenes totale vanninnhold er basert på AROME Arctic data er vist i Formel 3.2.

$$M_i = \omega_i * \rho_i$$

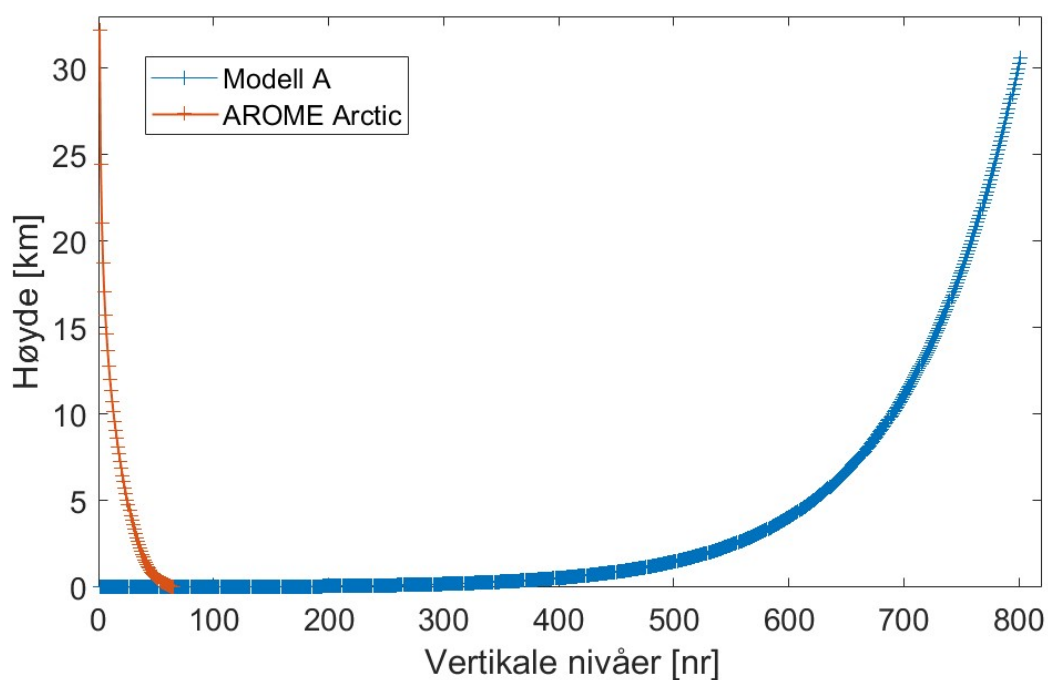
$$\omega_i = \omega_{i_{sky-vann}} + \omega_{i_{sky-is}} \quad 3.2$$

$$\rho_i = \frac{P}{T * R_d}$$

3.1.1 Modellnivåer

AROME Arctic data brukes til å produsere høydeprofiler for trykk, temperatur og fuktighet for beregning av gassdemping. Dataene fra AROME Arctic har grovere stedlig og vertikal oppløsning enn beregningsmetoden, og interpolering av data er derfor påkrevd for å øke oppløsningen.

Modell A beregner gassdemping opptil 30 km beregnes ved å summere 800 vertikale nivåer. AROME Arctic har 65 modellnivåer som dekker samme høyde. Figur 3.2 viser en sammenligning mellom vertikale nivåer som benyttes i beregning av gassdemping (Modell A) og nivåer som finnes for AROME Arctic parametere. Høydeprofiler for nødvendige inngangsparametere for Metode A fremskaffes ved å interpolere mellom AROME Arctic nivåer og punkter.

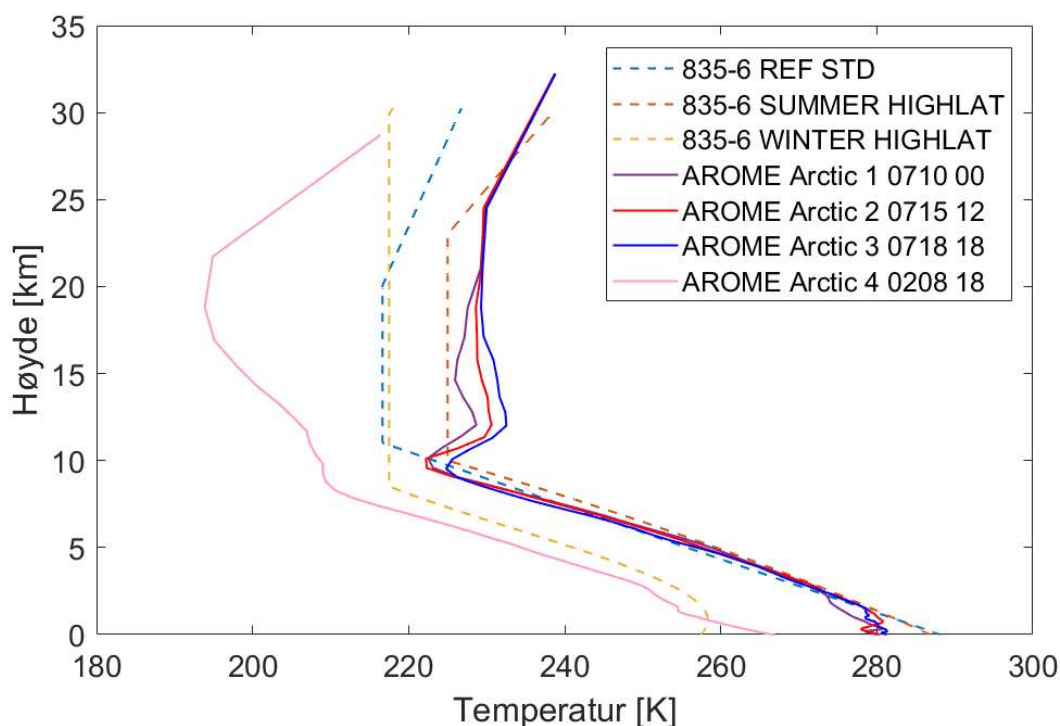


Figur 3.2 Modellhøyder for AROME Arctic og Modell A.

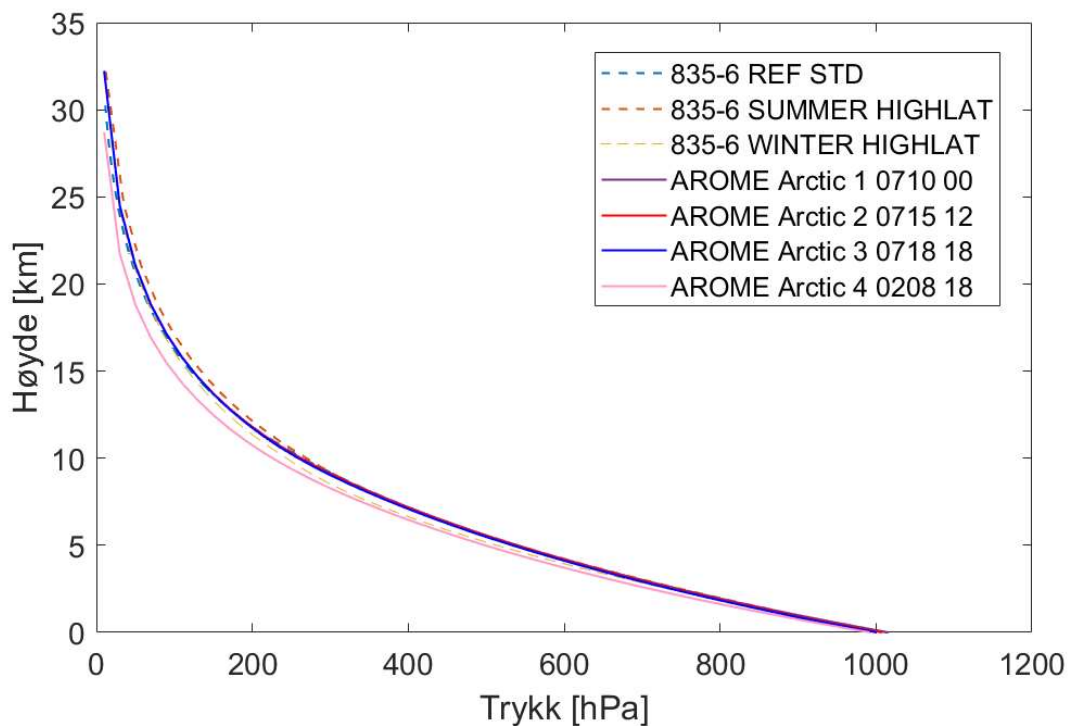
3.1.2 Vertikale profiler for værdata

AROME Arctic værdata som skal brukes for beregning av gassdemping sammenlignes med standard atmosfæriske forhold ved å se på vertikale høydeprofiler for trykk, temperatur og fuktighet opptil 30 km over havet. Formålet med sammenligningen er å forsikre at AROME Arctic data er i henhold til forventning og å se ulikheter til standardforhold. Standard atmosfæriske forhold er beskrevet i rekommandasjonen ITU-R P. 835-6, og deles i seks ulike atmosfærer, basert på breddegrad og årstid. Standard atmosfæriske forhold over 45. breddegrad og global gjennomsnittsatmosfære sammenlignes med AROME Arctic data.

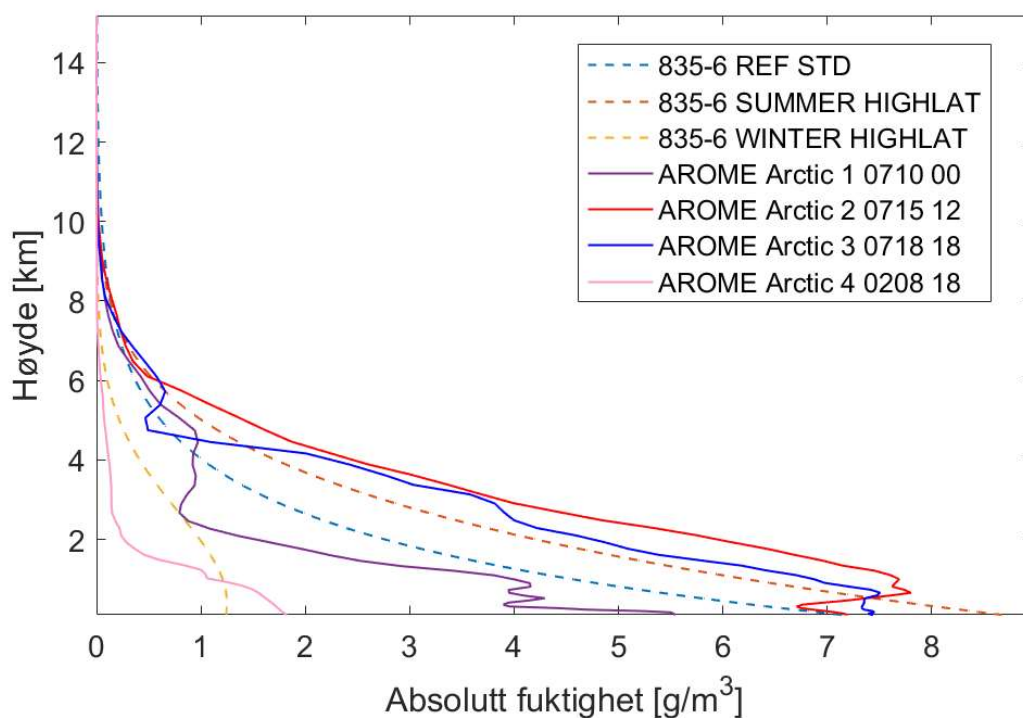
Figur 3.3, Figur 3.4 og Figur 3.5 viser sammenligning av høydeprofiler for henholdsvis temperatur, trykk og absolutt fuktighet. Parametere fra AROME Arctic er hentet fra tre ulike dager i juli 2016 vertikalt over Isfjord Radio, samt en dag i februar 2016 for å beskrive eventuelle forskjeller mellom sommer og vinterforhold. Arctic profiler 1-4 beskriver predikerte forhold vertikalt over Isfjord Radio i 2016 for tidspunktene 10.juli klokken 00, 15. juli klokken 12, 18. juli klokken 18 og 08. februar klokken 18. Tidspunktene sammenfaller med referansetidene beskrevet som tidspunkt 1-3 i punkt 3.1.3, som også benyttes for andre formål i prosjektet.



Figur 3.3 Standard-, og AROME Arctic høydeprofiler for temperatur.



Figur 3.4 Standard-, og AROME Arctic høydeprofiler for trykk.



Figur 3.5 Standard-, og AROME Arctic høydeprofiler for absolutt fuktighet.

Høydeprofilene viser at AROME Arctic data fremstilles som forventet, i nærheten av standardforhold, det betyr at rådataene hentes ut, konverteres og benyttes korrekt. Profilene for temperatur og fuktighet viser likevel at ulikhetene oppover i atmosfæren er relativt store mellom

standard atmosfæriske forhold og forhold beskrevet av AROME Arctic. Det er også relativt store ulikheter for AROME Arctic data fra tidspunkt til tidspunkt. Det forventes dermed også store stedlige variasjoner i predikerte værdata. De største variasjonene er som forventet nærmest bakken, både for temperatur og fuktighet. Selv om avstanden mellom modellhøydene i dette området er mindre for bedre å beskrive variasjoner, innebærer interpolering mellom modellnivåer usikkerhet.

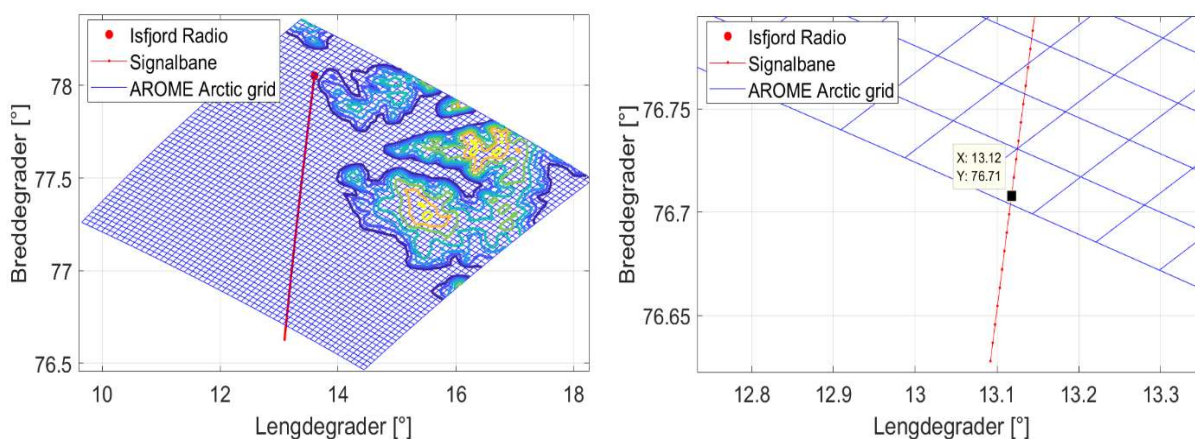
Det at høydeprofilene fra AROME Arctic viser ulikheter i forhold til standard atmosfæriske forhold, kan indikere at metrologiske forhold i Arktis skiller seg fra normale forhold. Det kan videre indikere at det vil være utfordringer knyttet til beregningene i Modell B siden disse legger feil høydeutvikling til grunn når den kun benytter værdata for bakkestasjonen som inngangsvariabler til modellen.

For skyer er det ikke naturlig å beskrive en standard på samme måte. Uten beskrivelse av lokale forhold beregnes skydemping ved bruk av statistikk. Statistikken består av kart som beskriver totalt vertikalt vanninnhold basert på sannsynlighet for ulike områder. For dager i prosjektets sammenligningsperiode hvor det forekommer høy skydemping er AROME Arctic data verifisert ved å bekrefte at vanninnholdet som beskrives er i henhold til normale skyverdier [12].

3.1.3 Geografisk dataområde

Datasettet som er benyttet i prosjektet ble samlet inn av Telenor med FFI og flere for å studere regn og scintillasjon. Regn og scintillasjon foregår i de laveste 2-3 km av atmosfæren. AROME Arctic data fra Telenor og FFIs regn og scintillasjonsprosjekt er geografisk avgrenset grunnet at behovet for data i høyden ikke var det samme som i dette prosjektet, samt datamengden som er forbundet med et større utvalg. Det medfører at værdata langs signalbanen ikke er tilgjengelig opptil 30 km som er ønskelig i dette prosjektet. Konsekvensen av det geografisk begrensede datasettet er at høydeprofiler for temperatur, trykk og fuktighet kun vil eksistere for signalbanen inntil denne forlater dataområdet.

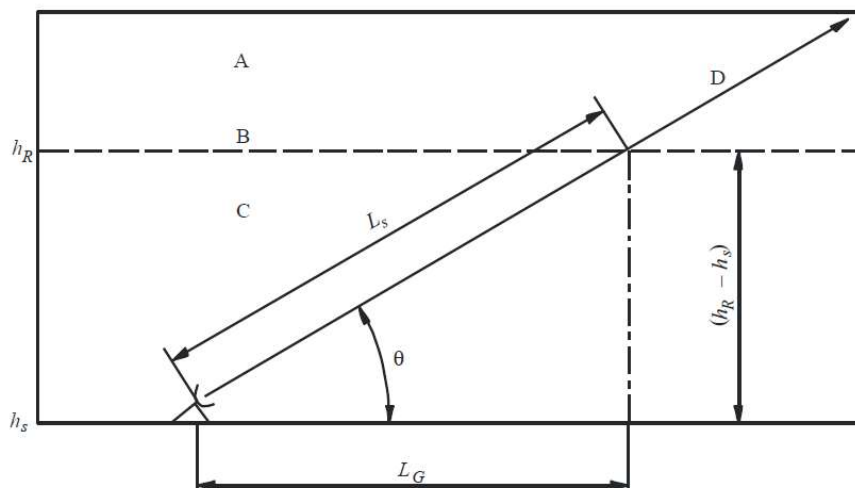
Dataområdet måler 150 km både i lengde og bredde og har en oppløsning på 2,5km i et 61x61 rutenett. Plasseringen av Isfjord Radio og signalbanen i dataområdet er vist i Figur 3.6.



Figur 3.6 AROME Arctic rutenett med Isfjord Radio og signalbane inntegnet.

Antennens pekeretning er 184,72 grader og antennens teoretiske elevasjonsvinkel er 3,499 grader. Ved å lese ut posisjonen der signalbanen forlater rutenettet, som vist i Figur 3.6 beregnes signalbanens distanse langs bakken lik storsirkeldistansen mellom koordinatene for Isfjord Radio (78,06 °N 13,62 °E) og punktet hvor signalbanen forlater dataområdet (76,71 °N 13,12 °E) til 150,6 km.

Geometrisk forhold mellom signalbanens distanse langs bakken og høyde over bakken er vist i Figur 3.7. Beregningen av høyden for signalbanens utgang av dataområdet h_R , beregnes med kjennskap til signalbanens distanse langs bakken, L_G , bakkestasjonens høyde over havet, h_s og elevasjonsvinkelen θ som er 3,5 grader som vist i Formel 3.3. Effektiv jordradius, R_e er 8500 km og bakkestasjonens høyde settes til 0 km. Ved signalbanens utgang av dataområdet beregnes høyde, h_R til 10,7 km. Denne høyden er beregnet med standard refraksjon [3].



Figur 3.7 Hjelpefigur for sammenheng mellom signalbanes høyde og tilbakelagt distanse langs bakken.

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left(\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e}\right)^{\frac{1}{2}} + \sin \theta}$$

$$L_G = L_s \cos \theta$$

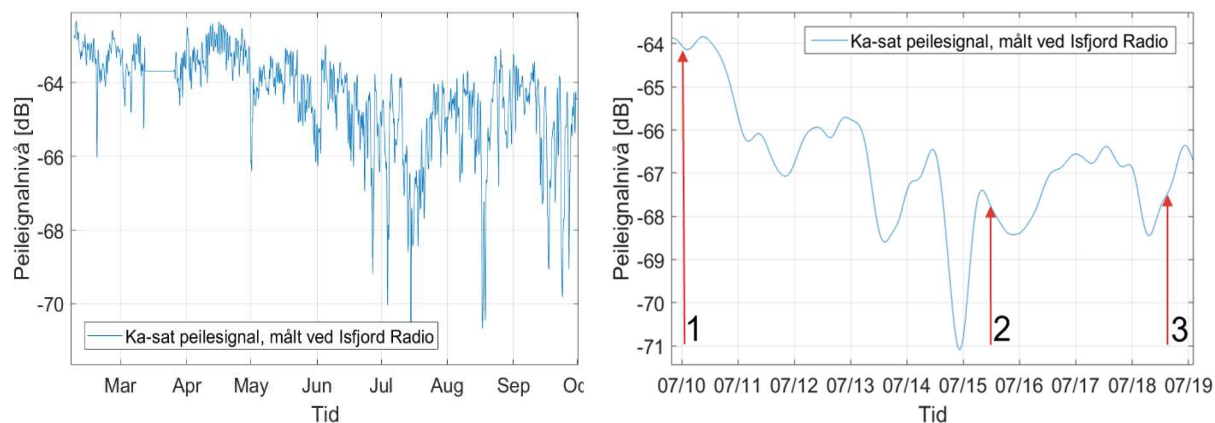
$$\rightarrow h_R = h_s + \frac{L_G^2 + 2R_e \cos \theta * \sin \theta * L_G}{2R_e \cos^2 \theta}$$

3.3

Beregningene viser at AROME Arctic data eksisterer for den vinklede signalbanen opp til en høyde på 10,7 km. Variasjoner i refraksjon og tilsynelatende elevasjon kan føre til mindre variasjoner for dette resultatet for ulike tidspunkter.

Den vesentligste gassdempingen samt stedlig variasjon i gassdemping antas å forekomme under 10 km ettersom det er under denne høyden signifikant vanndamp er til stede, og temperatur, trykk og fuktighet i atmosfæren varierer mest. Det forventes derfor at AROME Arctic data for å beskrive forholdene langs signalbanen over 10 km kan hentes vertikalt over signalbanens posisjon ved 10 km høyde. Konsekvensene av en slik forenkling undersøkes ved å beregne variasjon i gassdemping fra 10 til 30 km basert på vertikale data punkt for punkt i AROME Arctic rutenett, sett i sammenheng med total gassdemping langs signalbanen.

Den posisjonsavhengige variasjonen i gassdemping fra 10 til 30 km undersøkes for tre tidspunkter der målingene tilsier ulike forhold, og sammenlignes med total beregnet gassdemping fra bakken til 30 km. Figur 3.8 viser målt satellittsignal.

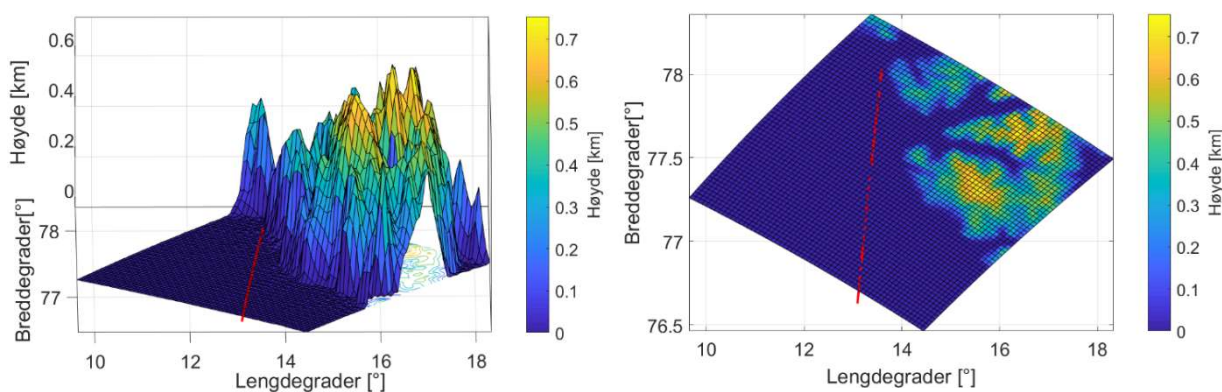


Figur 3.8 Målt signalnivå fra Ka-sat, målt ved Isfjord Radio.

- Tidspunkt 1 velges med bakgrunn i målt lav demping 10.07.16 klokken 0000 UTC.
- Tidspunkt 2 velges med bakgrunn i målt høy demping 15.07.16 klokken 1200 UTC.
- Tidspunkt 3 velges med bakgrunn i hurtig variasjon i målt demping 18.07.16 klokken 1800 UTC.

Gassdempingen er beregnet for 20 GHz og med punktvis vertikale AROME Arctic data for alle punkter i rutenettet. Signalbanelengden i hvert lag som benyttes i beregningen tilsvarer en elevasjonsvinkel på 3,5 grader, slik at dempingsverdiene som beregnes skal være representative for forbindelsen fra Ka-sat til Isfjord Radio.

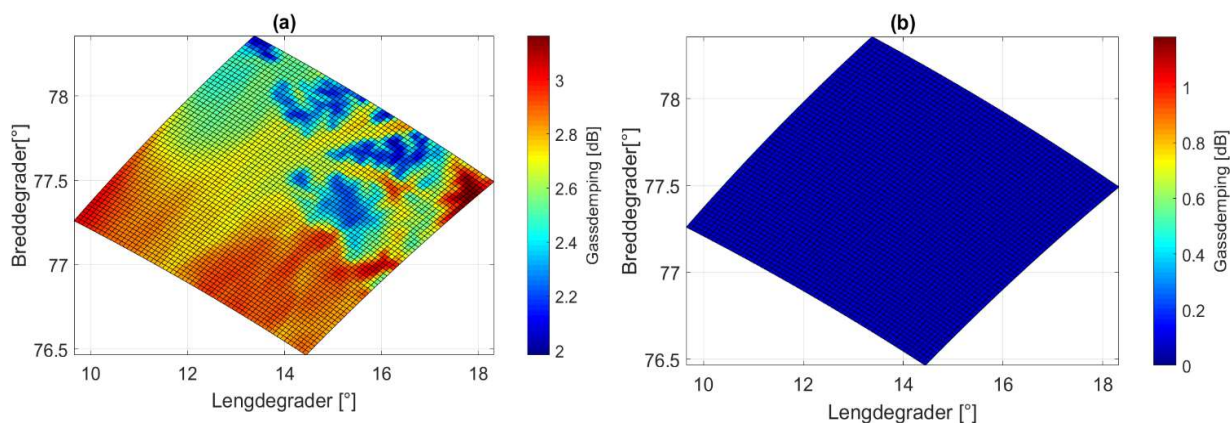
Figur 3.9 viser et plot av laveste AROME Arctic nivå og representerer topografien i dataområdet, signalbanen langs bakken er inntegret. Topografien i AROME Arctic rutenett inkluderer terreng opptil om lag 600 meter over havet. Det er dermed variasjoner i gassdempingen som er beregnet over havet i vest som gir best vurderingsgrunnlag for konsekvensen av forenklingen.



Figur 3.9 Topografi i AROME Arctic dataområde.

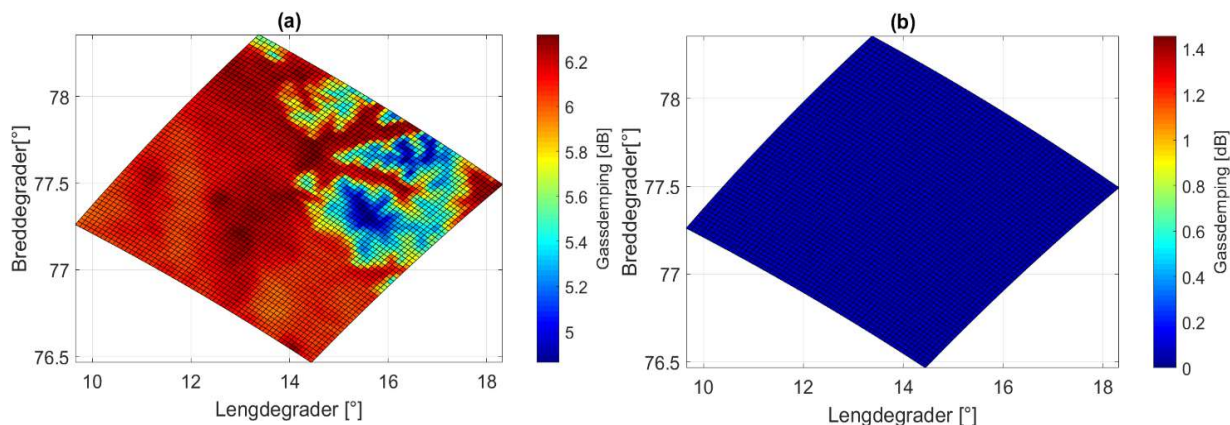
Overflateplot i Figur 3.10 viser gassdemping for en vinklet signalbane med en tilsvarende elevasjonsvinkel på 3,5 grader inkludert bruk av punktvis vertikale AROME Arctic data for alle

posisjoner i rutenettet ved tidspunkt 1. Plottene beskriver dempingen og dens variasjon fra bakken til 30 km og fra 10 til 30 km og viser hvor stor andel av variasjonen som skjer over 10 km. Z-aksen i plottene som viser gassdempingen og har like stort utfallsområde i hver sammenligningsfigur for at gassdempingens variasjonen fra 0 til 30 km skal kunne sammenlignes med variasjonen mellom 10 og 30 km.



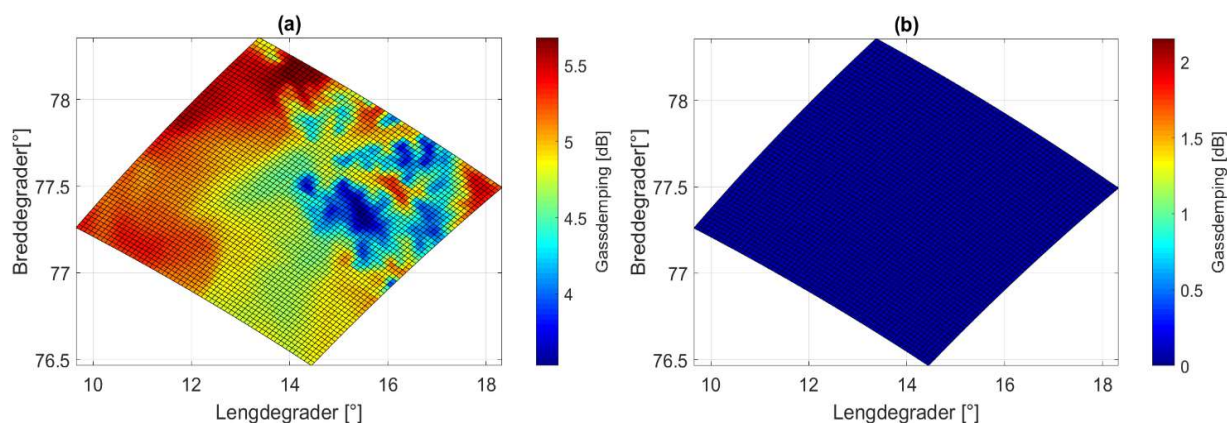
Figur 3.10 Stedlig variasjon i gassdemping ved tidspunkt 1, 0-30 km (a) og 10-30 km (b).

Overflateplot i Figur 3.11 viser gassdemping for en vinklet signalbane med en tilsvarende elevasjonsvinkel på 3,5 grader og bruk av punktvis vertikale AROME Arctic data for alle posisjoner i rutenettet ved tidspunkt 2.



Figur 3.11 Stedlig variasjon i gassdemping ved tidspunkt 2, 0-30 km (a) og 10-30 km (b).

Overflateplot i Figur 3.12 viser gassdemping for en vinklet signalbane med en tilsvarende elevasjonsvinkel på 3,5 grader og bruk av punktvis vertikale AROME Arctic data for alle posisjoner i rutenettet ved tidspunkt 3.



Figur 3.12 Stedlig variasjon i gassdemping ved tidspunkt 3, 0-30 km (a) og 10-30 km (b).

Plottene av gassdemping i ulike punkter med stasjonshøyde henholdsvis 0 km og 10 km viser at variasjonene i gassdemping i all hovedsak skjer under 10 km. Variasjon som vises under 10 km er også knyttet til topografi, som vist i Figur 3.9. Det er imidlertid stor variasjon også over havet i vest. Tabell 3.1 viser hvor stor andel variasjonen over 10 km utgjør av den lavest beregnede totaldempingen i rutenettet for det aktuelle tidspunktet.

Tabell 3.1 Gassdempingens dynamikk for 0-30 km høyde, og 10-30 km høyde for tidspunkt 1-3

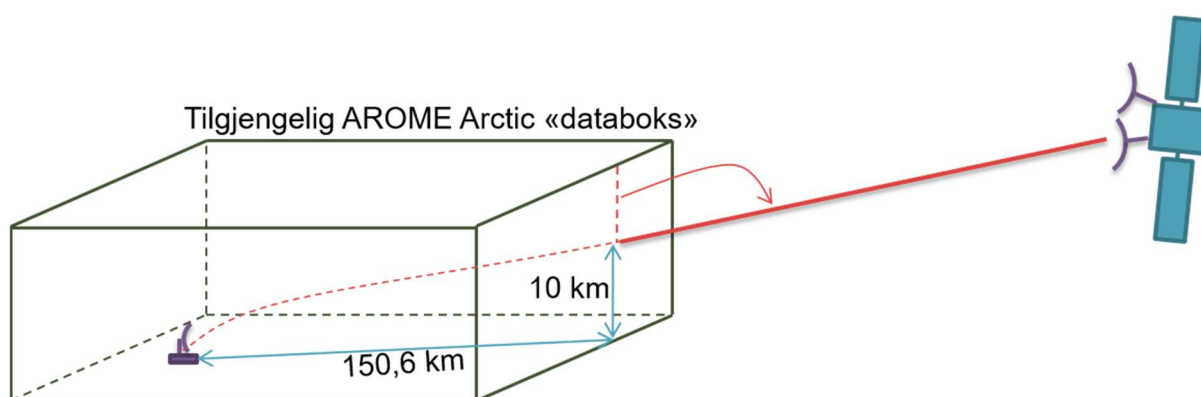
Tidspunkt.	0-30 km min	0-30 km maks	10-30 km min	10-30 km maks	Variasjon 10-30km	Variasjon 10-30km av 0-30km (min) [%]
1	1,98	3,16	0,078	0,080	0,0016	0,081
2	4,86	6,32	0,076	0,077	0,0006	0,012
3	3,53	5,68	0,072	0,075	0,0033	0,094

Tabell 3.1 viser at variasjonen over 10 km representerer en neglisjerbar del av den totale gassdempingen, i.e. under 0,1 % av den minste beregnede gassdemping for hvert tidspunkt. Det kan derfor konkluderes at det er en akseptabel forenkling å benytte vertikale data fra signalbanens siste punkt i dataområdet for å beskrive forholdene langs signalbanen i høydeområdet fra 10 til 30 km.

Skydempingsberegningene som er gjennomført i dette prosjektet viser at 99,98 % av det totale vanninnholdet i skyene som predikeres langs signalbanen forekommer under 10 km høyde. Med bakgrunn i dette er forenklingen ovenfor også akseptabel når det gjelder skydemping i dette prosjektet. Denne testen knyttes imidlertid bare til ett punkt i AROME Arctic rutenettet over 10 km. Det er også områder hvor det er vanligere med høyere skydekke enn det som er typisk i det høye nord. Dette betyr at det bør gjennomføres grundigere tester før denne forenklingen eventuelt anvendes i andre sammenhenger.

3.1.4 Vinklede AROME Arctic profiler

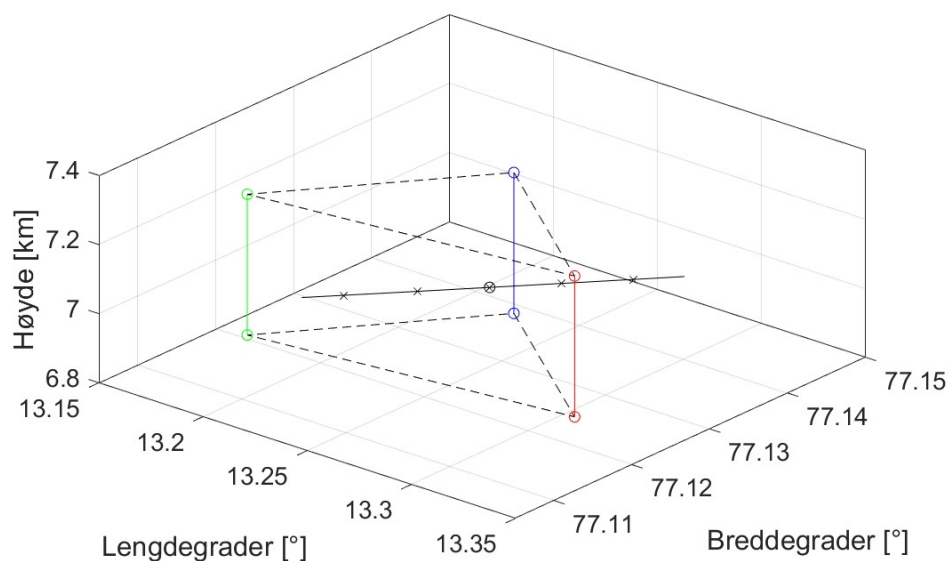
For å beregne gassdemping fra bakken til 30 km over havnivå må det fremskaffes vinklede høydeprofiler for trykk, temperatur og fuktighet langs signalbanen. Disse profilene dannes ved å interpolere mellom eksisterende AROME Arctic data. Figur 3.13 viser at værdata hentes fra AROME Arctic langs signalbanen opptil 10 km, hvor signalbanen forlater dataområdet. Deretter benyttes vertikale data for å beskrive forholdene langs signalbanen opptil signalbanen når en høyde på 30 km. Over 30 km er gassdempingen neglisjerbar, som nevnt tidligere.



Figur 3.13 Prinsipp for bruk av AROME Arctic data for å beskrive forhold langs signalbanen opptil 30 km.

Atmosfæren har teoretisk sett en vertikal lagstruktur med mindre horisontale variasjoner. Det vurderes derfor hensiktsmessig å først gjennomføre interpolering horisontalt og deretter vertikalt.

Interpolering skjer for hvert punkt i signalbanen, definert av krysningpunktet mellom signalbanen og de 800 modellhøydene i Modell A. De tre horisontalt nærmeste AROME Arctic punktene vektet i henhold til horisontal avstand fra det aktuelle signalbanepunktet. Deretter skjer interpolering trinnvis, først barysentrisk vektet interpolering horisontalt og så lineær interpolering vertikalt. Figur 3.14 viser utsnitt av signalbanen med punkter hvor signalbanen passerer flere beregningsnivåer. Signalbanen passerer mellom to AROME Arctic modellnivåer, hvor data fra de nærmeste tre punktene i hvert modellnivå benyttes.

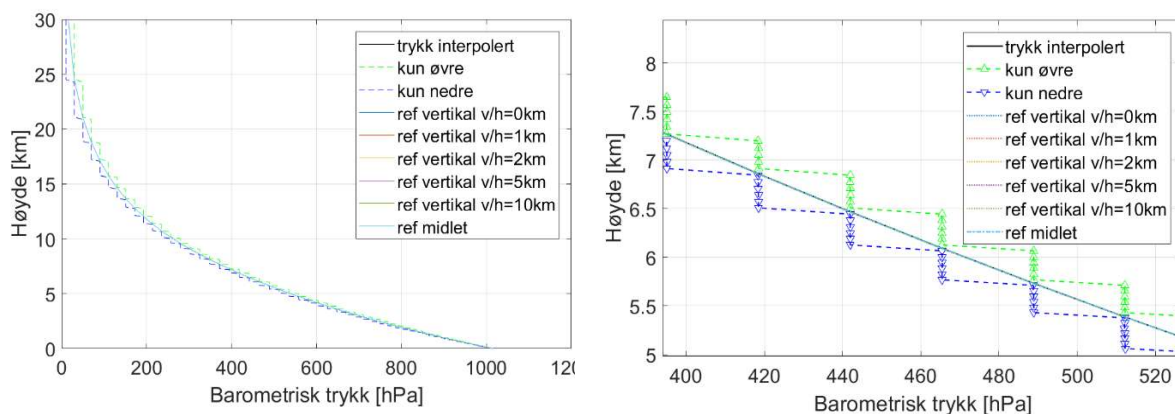


Figur 3.14 Prinsipp for trinnvis barysentrisk horisontal-, og lineær vertikal interpolering.

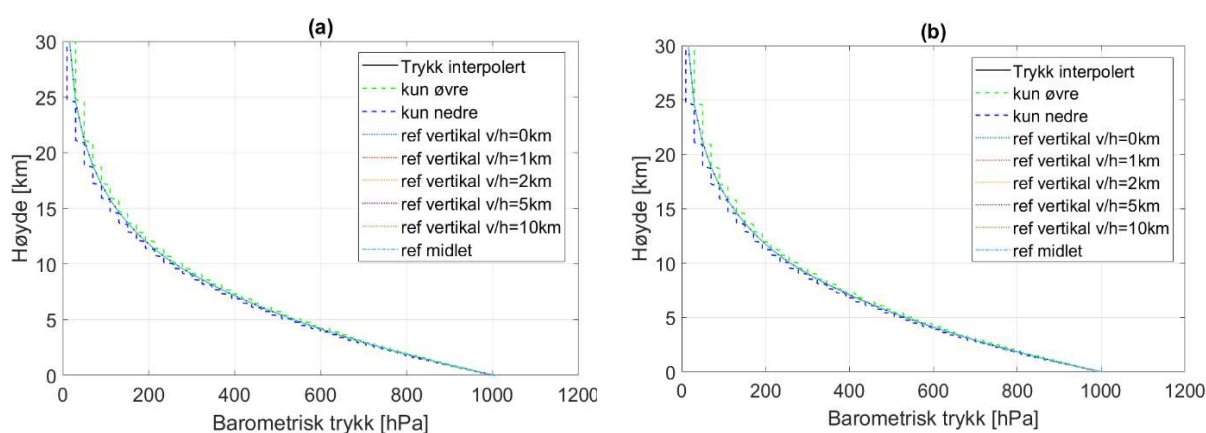
Interpoleringsmetoden er utviklet av Terje Tjelta ved UiO, og tilhørende MATLAB implementasjon er tilgjengeliggjort av FFI. Interpoleringsmetoden er også benyttet ved andre lignende prosjekter [22].

Interpoleringens kvalitet vurderes grafisk. De interpolerte høydeprofilene sammenlignes med profiler som kun har gjennomført første interpoleringstrinn, og representerer interpolering lagvis i AROME Arctic nivåene over og under signalbanen. Ved å utelate den lineære interpoleringen mellom lagene, vil resultatet bli en «trapp», der interpolert verdi kommer fra nærmeste AROME Arctic lag over og under signalbanen. Hensikten med den lineære interpoleringen mellom disse «trappetrinnene» er å øke oppløsningen og skape en mer kontinuerlig profil. Interpolerte profiler sammenlignes også med vertikale profiler langs signalbanen ved geografiske punkter der signalbanens høyde tilsvarer 1 km, 2 km, 5 km og 10 km, samt en midlet profil av disse referanseprofilene.

Figur 3.15 og Figur 3.16 viser interpolert trykkprofil for tidspunktene 1-3. Det observeres at de interpolerte profilene fremstår kontinuerlig. Den interpolerte profilen faller også innenfor «trappetrinnene» som definerer grensene for «kun øvre» og «kun nedre» AROME Arctic lag, over og under hvert punkt i signalbanen. Det fremgår at variasjonen i trykkprofilene er liten og at målte profiler er forutsigbare relativt til verdi ved bakkestasjonen. Den vinklede profilen langs signalbanen for trykk er tilnærmet lik de vertikale referanseprofilene langs signalbanen.

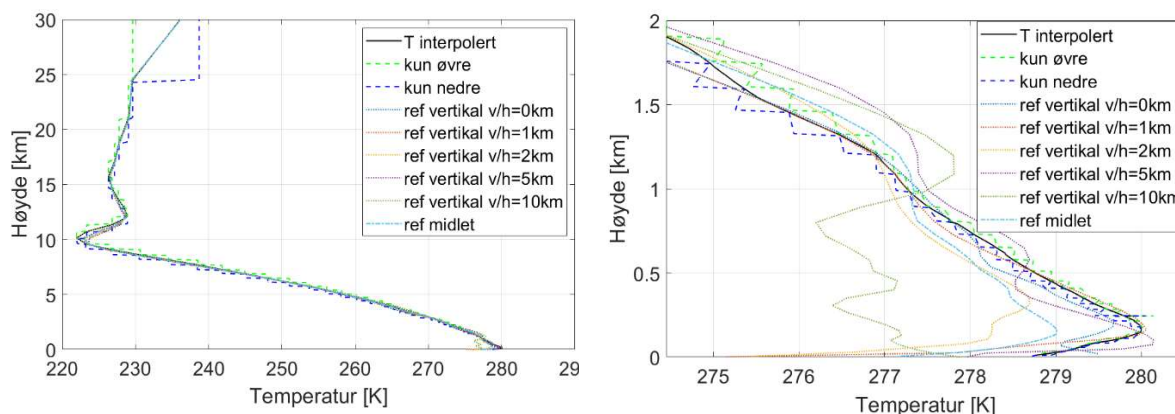


Figur 3.15 Interpolert trykkprofil langs signalbanen, referanseprofiler og detaljutsnitt for tidspunkt 1.

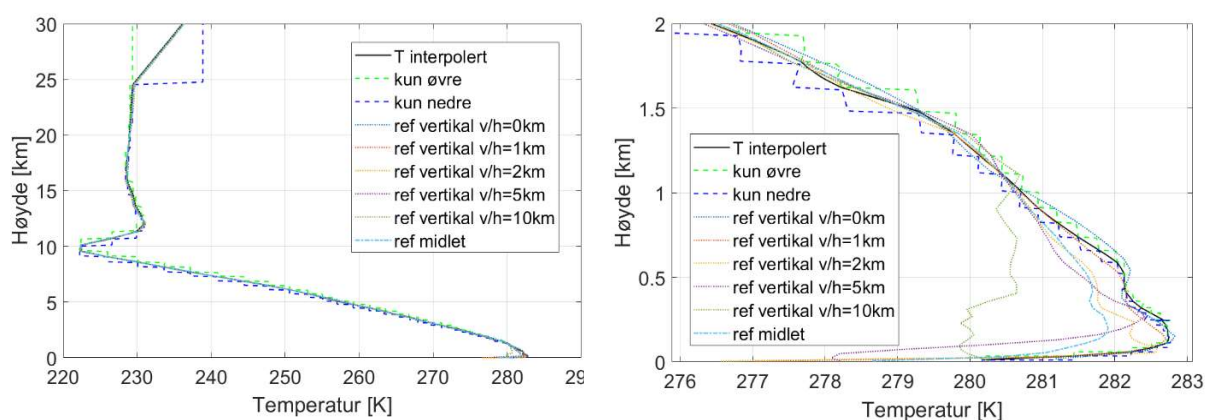


Figur 3.16 Interpolert trykkprofil langs signalbanen og referanseprofiler for tidspunkt 2 (a) og 3 (b).

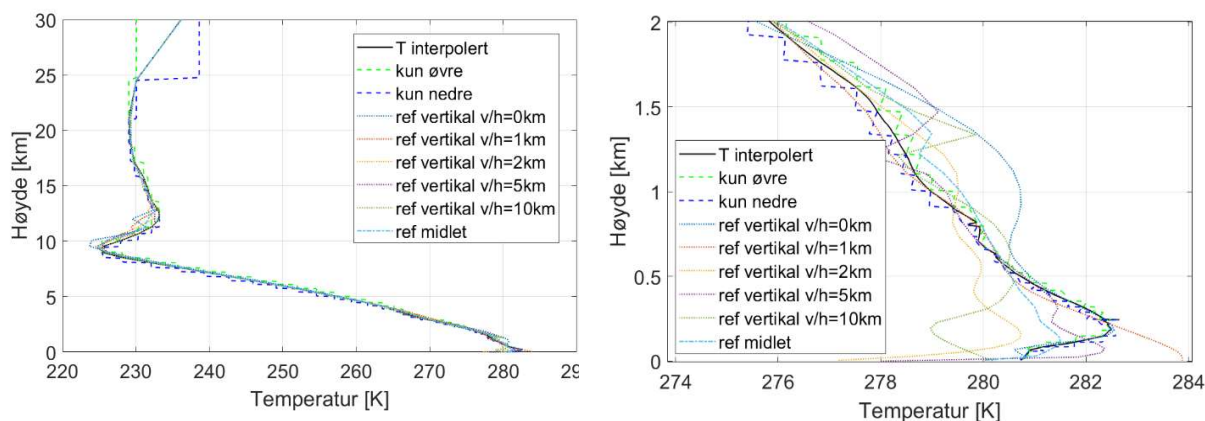
Figur 3.17, Figur 3.18 og Figur 3.19 viser temperaturprofiler for tidspunktene 1-3. Også for temperaturprofilene fungerer interpoleringen. Som det fremkommer i disse figurene er variasjonen langs temperaturprofilene signifikante. Den vinklede profilen langs signalbanen for temperatur avviker også fra de vertikale referanseprofilene langs signalbanen. Det er dermed stedlige temperaturvariasjoner langs signalbanen, som ikke kan predikeres med bakgrunn i standard høydeutvikling og kjente temperatur ved bakkestasjonen. Det er også relativt store endringer fra tidspunkt til tidspunkt. Variasjonene som opptrer over 10 km fører, som nevnt tidligere, ikke til signifikante variasjoner i beregningene av gassdemping.



Figur 3.17 Interpolert temperaturprofil langs signalbanen, referanseprofiler samt detaljutsnitt for tidspunkt 1.

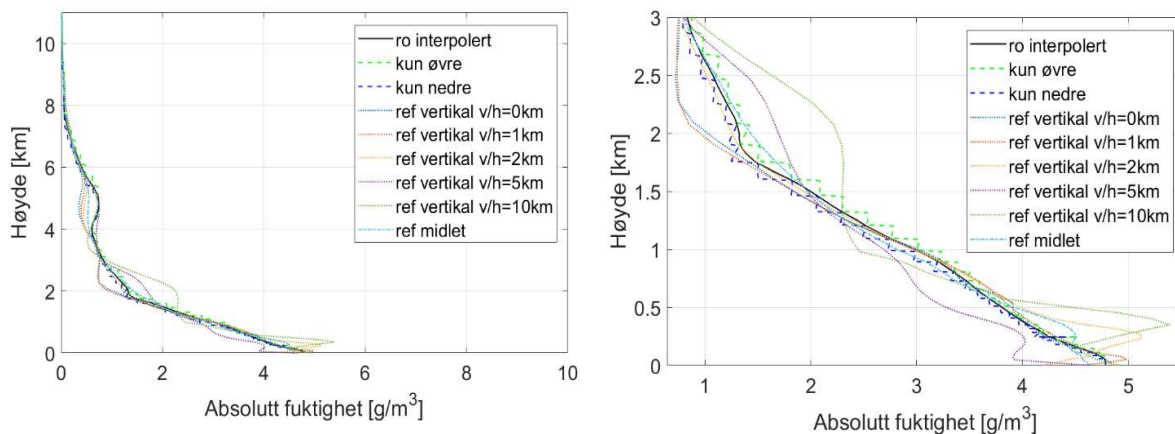


Figur 3.18 Interpolert temperaturprofil langs signalbanen, referanseprofiler samt detaljutsnitt for tidspunkt 2.

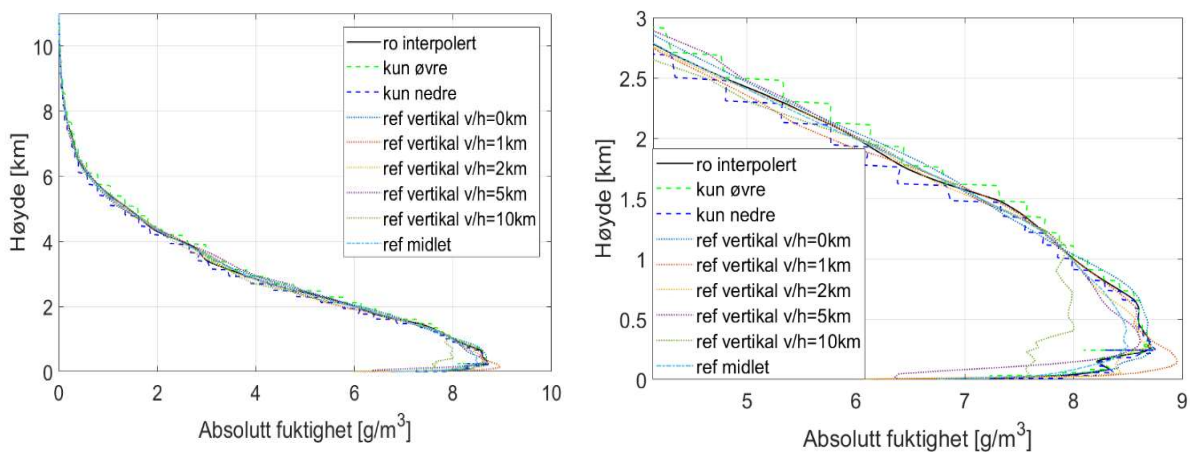


Figur 3.19 Interpolert temperaturprofil langs signalbanen, referanseprofiler samt detaljutsnitt for tidspunkt 3.

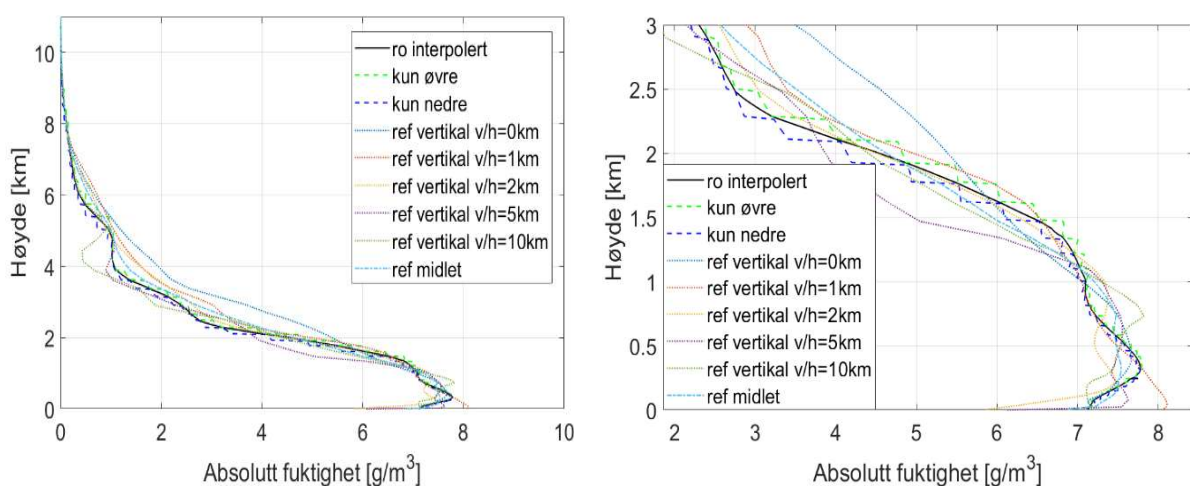
Figur 3.20, Figur 3.21 og Figur 3.22 viser høydeprofilene for absolutt luftfuktighet for tidspunkt 1-3. Også for fuktighetsprofilene fungerer interpoleringen. Som det fremkommer er variasjonene i fuktighetsprofilene relativt store, og det konkluderes med at profilene ikke er forutsigbare basert på verdier ved bakkenivå. Plottene viser relativt stor variasjon i absolutt fuktighet, både stedlig og i tid. Absolutt fuktighet er den inngangsverdien som har størst sensitivitet i beregninger av gassdemping.



Figur 3.20 Interpolert profil for absolutt fuktighet langs signalbanen, referanseprofiler samt detaljutsnitt for tidspunkt 1.



Figur 3.21 Interpolert profil for absolutt fuktighet langs signalbanen, referanseprofiler samt detaljutsnitt for tidspunkt 2.



Figur 3.22 Interpolert profil for absolutt fuktighet langs signalbanen, referanseprofiler samt detaljutsnitt for tidspunkt 3.

Effekten av stedlige variasjoner i værforhold undersøkes ved å beregne gassdemping basert på værdata langs signalbanen for tidspunkt 1-3. Gassdemping beregnes også med vertikale referanseprofiler som er hentet fra bakken til 30 km i posisjoner langs signalbanen der signalbanen har høyde på 0, 1, 2, 5, og 10 km. Tabell 3.2 viser beregnet gassdemping basert på trykk, temperatur og fuktighetsprofiler. Tabellen beskriver også den relative differansen mellom de ulike referanseprofilene og gassdemping beregnet langs signalbanen.

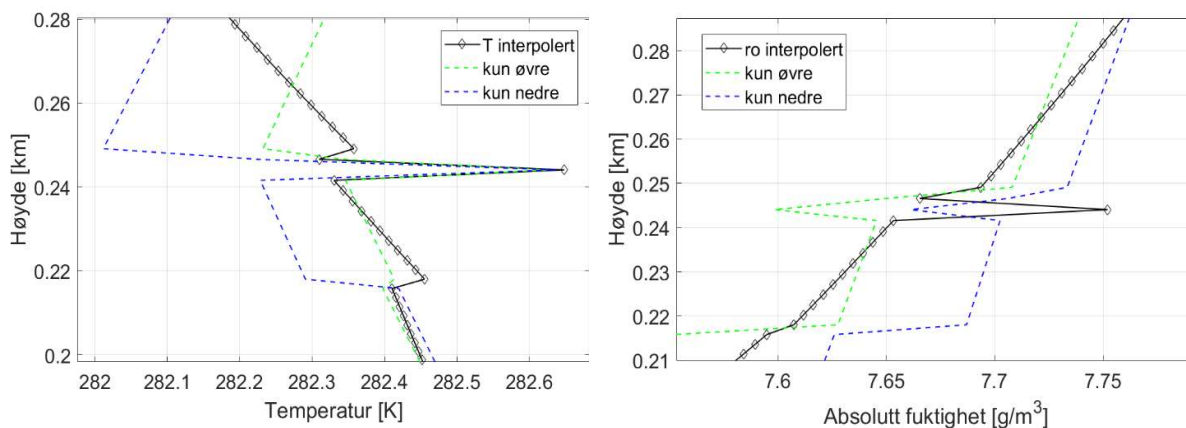
Tabell 3.2 Gassdemping langs signalbanen med ulike inngangsverdier for tidspunktene 1-3

Tidspunkt		1	2	3
Interpolert værdata langs signalbanen		2,72	6,24	4,95
Vertikale værdata i punkt med signalbanehøyde, h	h=0km [dB]	2,55	6,28	5,60
	rel. diff. [%]	6,12	0,71	13,20
	h=1km [dB]	2,57	6,24	5,37
	rel. diff. [%]	5,41	0,10	8,44
	h=2km [dB]	2,68	6,20	5,11
	rel. diff. [%]	1,26	0,58	3,36
	h=5km [dB]	2,69	6,26	4,77
	rel. diff. [%]	1,05	0,34	3,66
	h=10km [dB]	2,92	6,08	4,78
	rel. diff. [%]	7,44	2,52	3,37
Midlede referansedata	alle h [dB]	2,68	6,21	5,12
	rel. diff. [%]	1,30	0,40	3,56

Tabell 3.2 viser at gassdempingen beregnet med værdata langs signalbanen skiller seg fra gassdemping beregnet med vertikale værdata for posisjoner langs signalbanen med relativt stor differanse, i dette utvalget over 13 %. Det største relative avviket forekommer ved tidspunkt 3, og det henger sammen med store posisjonsavhengige variasjoner i værdataprofiler ved dette tidspunktet. Variasjonen som fremgår i beregnet gassdemping mellom tidspunktene 1-3 viser også at det er stor variasjon i gassdemping over tid. Beregnet gassdemping mer enn dobles fra tidspunkt 1 til 2, og forskjellen utgjør 3,52 dB som er betydelig. Beregninger av gassdemping utført med værdata fra referanseprofilene viser også at stedlig variasjon for samme tidspunkt gir signifikante utslag. Dette sannsynliggjør at bruk av værdata langs signalbanen opp til 10 km kreves for høy presisjon i beregning av gassdemping.

I interpolerte værdataprofiler for trykk, temperatur og absolutt fuktighet er det observert en feil. Det forekommer en forandring i høyden for AROME Arctic modellnivåer i skillet mellom hav og land. Dette henger sammen med at rådata er oppgitt i geopotensial høyde. Ved signalbanens overgang til å være over land til hav er avstanden mellom beregningsnivåene kort, som introduserer en feil i interpoleringsmetodens valg av AROME Arctic nivåer. Det medfører at interpolerte verdier kommer utenfor grensene som er satt av AROME Arctic nivåene det

interpoleres mellom. Denne feilen forekommer for temperatur og fuktighet i de ulike tidspunktene. Feilen er relativt liten og strekker seg over et høydeområde på inntil 60 meter. Et eksempel på feilen for interpolerte verdier av absolutt fuktighet og temperatur for tidspunkt 3 er vist i Figur 3.23. Figurene viser også at feilen ved interpolering er relativt liten sammenlignet med variasjoner mellom de ulike høydeprofilene.



Figur 3.23 Interpoleringsfeil ved signalbanens overgang fra å være over land til over havet.

Feilen får ikke konsekvenser for trykk, der profilene er så uniforme. For temperatur og fuktighet kvantifiseres feilen ved tidspunkt 3 til henholdsvis maksimalt 0,2 K temperatur og 0,12 g/m³ vanndamp. For beregning av spesifikk demping utgjør dette et maksimalt samlet avvik på 0,0016 dB/km. Feilen strekker seg over et høydeområde på 60 meters. Ved å legge maksimalt avvik til grunn, og summere feilen over nevnte 60 meter utgjør dette $9,6 \cdot 10^{-5}$ dB. Dette tilsvarer $3 \cdot 10^{-7}$ % av total gassdemping ved tidspunkt 3. Med bakgrunn i dette vurderes denne interpoleringsfeilen som neglisjerbar. Dersom interpoleringsmetoden skal benyttes over land med varierende topografi, må denne feilen undersøkes nærmere.

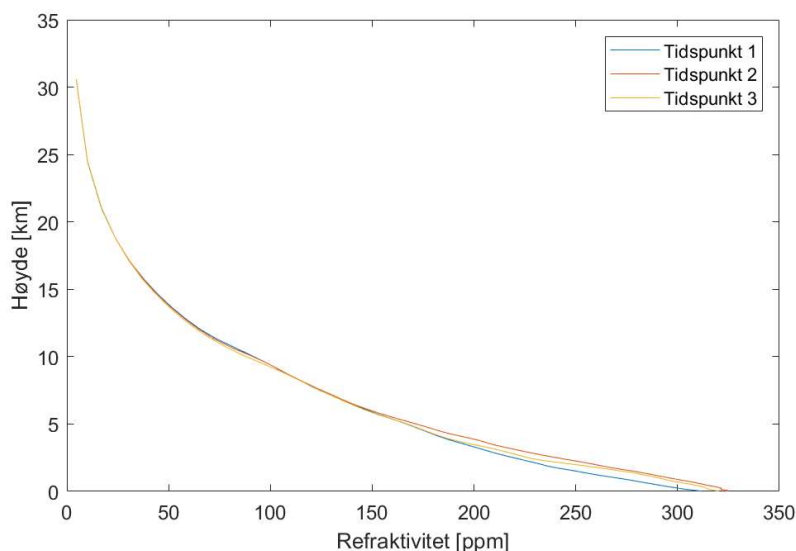
3.1.5 Refraksjon og antennens pekeretning

Ved normal oppkobling av en satellittforbindelse mot geostasjonære satellitter beregnes tilsynelatende elevasjonsvinkel i forhold til en standard atmosfære før selve oppkoblingen. Ved oppkobling foretas det så en optimalisering av pekeretning slik at forbindelsen på oppkoblingstidspunktet er optimal med tanke på mottatt signalstyrke, og dermed også refraksjon. For en mindre fastmontert antenne endres ikke pekeretningen systematisk etter oppkoblingstidspunktet for å korrigere for varierende refraksjon.

Atmosfæriske variasjoner gir ulik brytningsindeks langs signalbanen over tid, og dermed varierende avbøyning av signalbanen. Det er derfor interessant å undersøke hvordan signalbanens geometri påvirkes og hvilken effekt dette har for en radioforbindelse mellom en bakkestasjon og en satellitt. Konsekvensen av varierende avbøyning av satellittsignalet over tid er at det ikke treffer mottakerantennen optimalt. Dette medfører en feilkilde/usikkerhet ved målt signalstyrke fra satellitt til mottaker i form av at antennens forsterkning ved mottak av signalet varierer.

Effekten av varierende avbøyning kvantifiseres ved å beregne variasjonen til den tilsynelatende elevasjonsvinkelen i prosjektets sammenligningsperiode og sette dette i sammenheng med antennens egenskaper. Simuleringer av tilsynelatende elevasjonsvinkel presenteres i kapittel 4, og settes i sammenheng med de eksperimentelle målingene i kapittel 5. I den sammenheng er presenteres her konsekvensen av at beregningen kun kan gjennomføres opptil høyeste AROME Arctic datahøyde på 30 km.

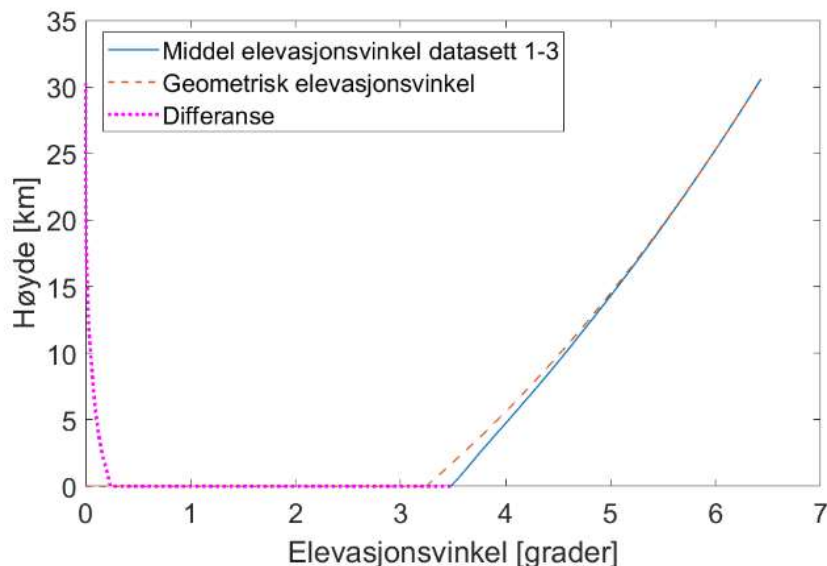
I en standard atmosfære vil refraksjonen i høyden fra 25-30 km tilsvare refraksjon fra 30 km til 50 km høyde [23]. Over 50 km går refraktiviteten mot null. Figur 3.24 viser refraktivitet som funksjon av høyde for de samme tre tidspunktene som det er vist til tidligere. Det fremgår at den største variasjonene i refraktivitet mellom tidspunktene skjer under 10 km.



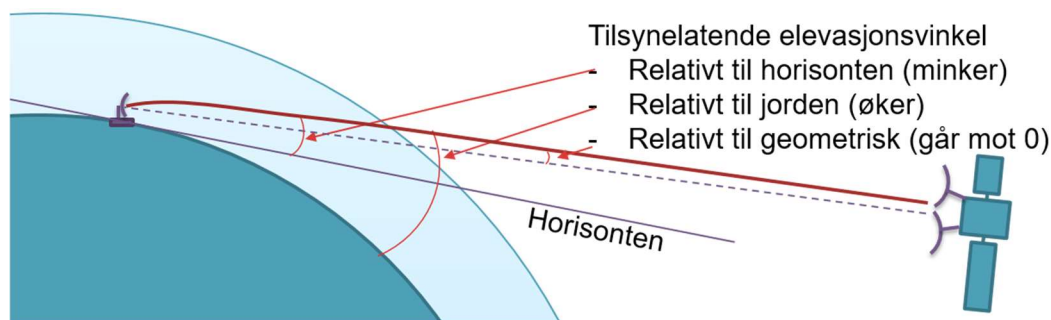
Figur 3.24 Beregnet refraktivitet/brytningsindeks som funksjon av høyde.

I Modell A inkluderes beregning av refraktivitet/brytningsindeks, samt beregning av avbøyning som en del av gassdempingsberegningen. Selv om refraksjon fører til en avbøyning av signalbanen ned mot jordoverflaten, vil signalbanens elevasjonsvinkel i forhold til den lagvise tangenten til jordens overflate øke som en konsekvens av jordkrumningen. Dette tilsvarer

vinkelen 90 grader minus β_n , som vist i Figur 2.4. Det er utfordrende å fremstille dette grafisk, men et forsøk på dette er vist i Figur 3.25 som viser at differansen mellom geometrisk og tilsynelatende elevasjonsvinkler for signalbanen er tilnærmet konstant fra 25 til 30 km høyde.



Figur 3.25 Tilsynelatende elevasjonsvinkel i forhold til geometrisk elevasjonsvinkel, relativt til jordens overflate. Hvordan den tilsynelatende elevasjonsvinkelen øker i forhold til jordens overflate er vist prinsipielt i Figur 3.26. Der vises det også at signalbanens avbøyning ned mot horisonten fører til at differansen mellom den tilsynelatende-, og geometriske elevasjonsvinkelen går mot null.

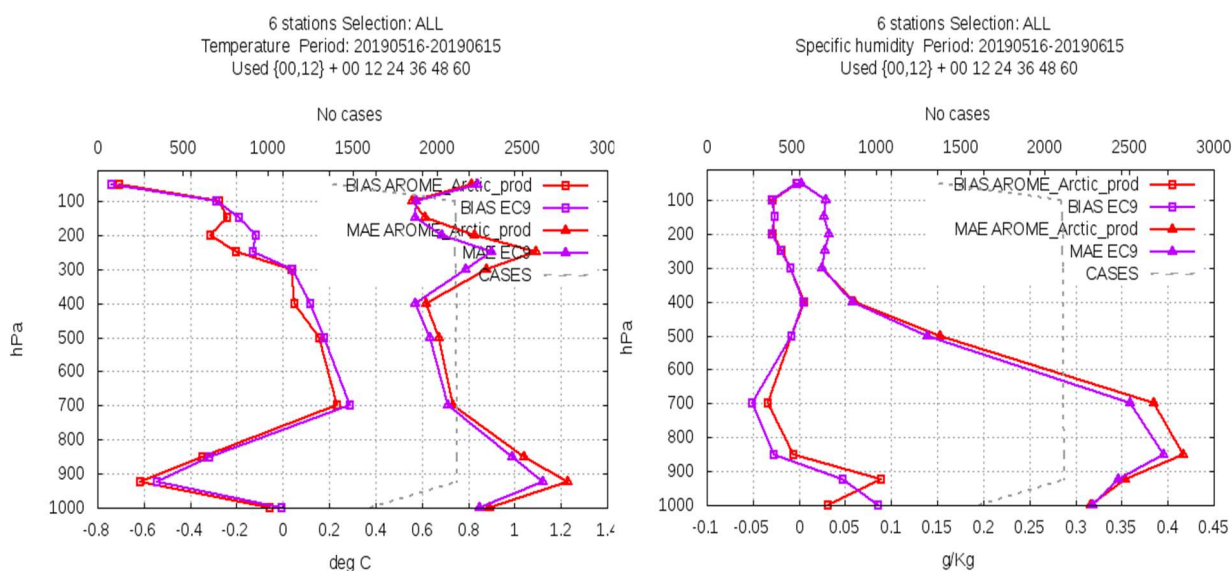


Figur 3.26 Prinsippskisse for tilsynelatende elevasjonsvinkelen langs signalbanen.

Elevasjonsvinklenes differanse mellom 25 til 30 km varierer mindre enn $0,001$ grader og vurderes som neglisjerbar. Variasjonen i refraktivitet har dermed neglisjerbar effekt på signalbanens avbøyning i høydeområdet fra 25 - 30 km. Dette vil da også være gjeldende fra 30 - 50 km. Forenklingen ved å se bort fra refraksjon over 30 km er derfor akseptabel siden den totale variasjonen i refraktivitet over 30 km utgjør mindre enn $0,001$ grader.

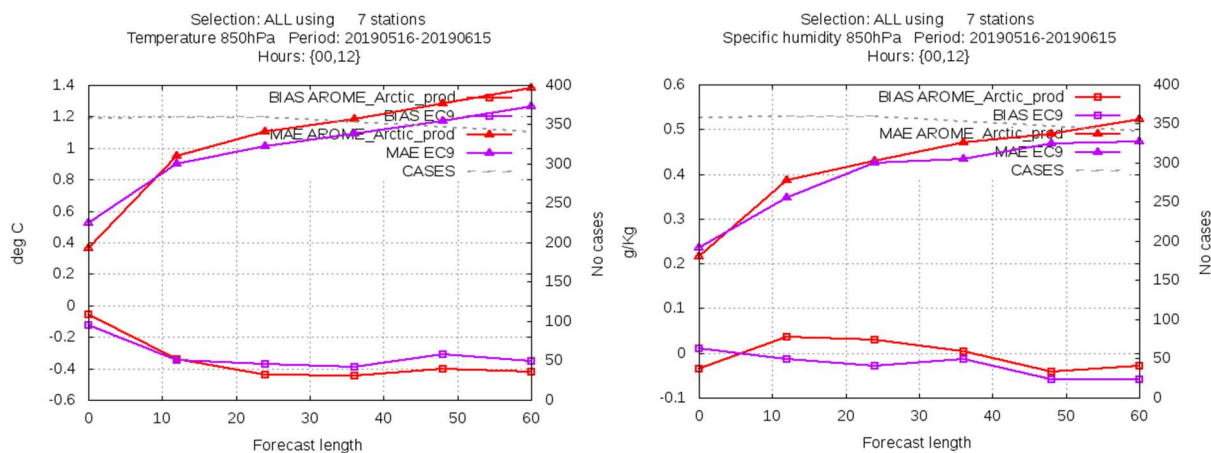
3.1.6 Usikkerhet i numeriske AROME Arctic værdata

Metrologisk institutt gjennomfører kvartalsvis verifikasjon av modellen mot bakkeobservasjoner og radiosondedata. Data verifiseres hovedsakelig for bakkenivå, men også for ulike trykkhøyder. De vertikale koordinatene som benyttes er trykk istedenfor meter. Figur 3.27 og Figur 3.28 viser eksempel på tilsendt verifikasjonsplot for perioden mai til juni 2019. Plottene viser geopotensial, temperatur og spesifikk fuktighet som kan benyttes som inngangsverdier for beregning av gassdemping. Plottene viser middel absolutt feil (MAE), og BIAS. Midling av feilens størrelse er gjennomført for ulike høyder og ulike tider etter prediksjon. Resultatene er sammenlignet med værmodellen for global prediksjon, ECMWF, som Metrologisk institutt benytter som referanse og som er vist som EC9 i figurene. ECMWF har grovere oppløsning enn AROME Arctic med henholdsvis 9 km mot 2,5 km [24].



Figur 3.27 AROME Arctic feil som funksjon av trykkhøyde [24].

Figur 3.28 viser at usikkerhet og feil øker som funksjon av tid etter modellkjøring/prediksjon for en modellhøyde tilsvarende 850 hPa .



Figur 3.28 AROME Arctic feil v/trykkehøyde 850hPa v/ulik tid fra prediksjon [23].

Metrologisk institutt kunne ikke tilby mer detaljert informasjon om feil i AROME Arctic data enn det som er vist her. Basert på erfaring opplyste Metrologisk institutt om at plottene er representative for feil utover perioden statistikken er produsert for. Det ble også opplyst at feilen som er plottet har en spredning som er mindre enn feilen i seg selv ved et konfidensintervall større enn 95 % [24].

Tabell 3.3 viser konservativt avleste verdier fra verifikasjonsplot som gir indikasjon på forventet feil. Avlesning er gjort for størst avvik innen 12 timers prediksjonslengde ved trykkehøyde 850 hPa. Disse verdiene benyttes for å undersøke konsekvensen av usikkerheten i AROME Arctic prediksjonene.

Tabell 3.3 Usikkerhet i AROME Arctic parametere, sammenlignet med ECMWF

	AROME Arctic BIAS	ECMWF BIAS	AROME Arctic MAE	ECMWF MAE
Høyde [m]	1	-1,8	6	6
Temperatur [C]	-0,35	-0,35	0,95	0,9
Spesifikk fuktighet [g/kg]	0,05	0,01	0,39	0,35

For å kvantifisere konsekvensen av usikkerheten knyttet til AROME Arctic parametere i beregningen av gassdemping omgjøres MAE verdier til samme enhet som inngangsvariablene i Modell A. Usikkerhet knyttet til høyde og dermed trykk er liten i forhold til de ulike modellhøydene og kan derfor neglisjeres. Spesifikk fuktighet gjøres om fra massefraksjon, x [g/kg], til tetthet, ρ_v [kg/m³]. En MAE på 0,39 g/kg for luftfuktighet kan tolkes på to måter. Første tolkning som andel av total gass tetthet som gir store variasjoner for spesifikk

luftfuktighet og som derfor antas å være feil. Andre tolkning er som andel av spesifikk fuktighet. Denne er benyttet og vist i Formel 3.4.

$$\rho_v = \rho_v \pm u(\rho_v) = \rho_v \pm x = \rho_v \pm \frac{0,39}{1000} \rho_v \quad 3.4$$

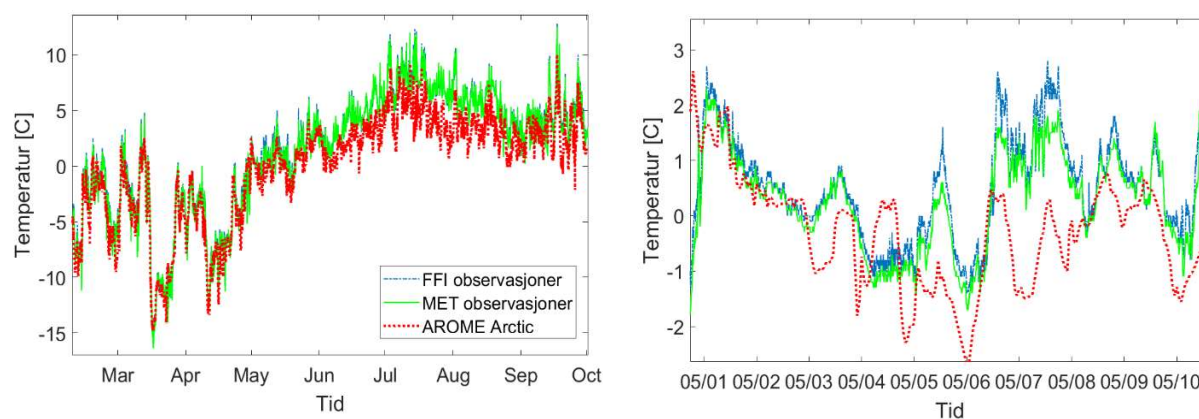
Usikkerhetens påvirkning på beregning av gassdemping undersøkes for tidspunktene 1-3. Inngangsvariablene temperatur og spesifikk fuktighet endres enkeltvis i henhold til Tabell 3.3 for der usikkerhet legges til alle datapunkter langs signalbanen. Kvantifisering av usikkerhet i beregningen av gassdemping er gjort numerisk på grunn av kompleksiteten i denne beregningen. Resultatet er vist i Tabell 3.4. Denne noe ufullstendige vurderingen av usikkerheten knyttet til AROME Arctic data viser at denne har relativt liten påvirkning på gassdempingsresultatene, i.e. ~0,48 % for temperatur og ~0,03 % for fuktighet.

Tabell 3.4 Konsekvens av usikkerhet i AROME Arctic på beregnet gassdemping

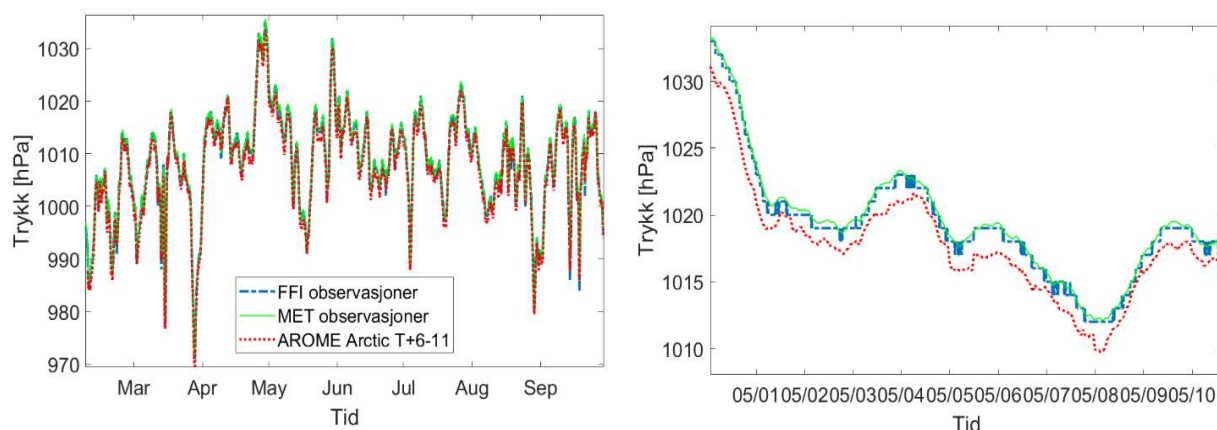
	Demping v/T+u(T) [dB]	Demping v/T+u(T) [dB]	Absolutt differanse [dB]	Relativ differanse [%]	Demping v/ro+u(ro) [dB]	Absolutt differanse [dB]	Relativ differanse [%]
Tidspunkt. 1	2,72	2,71	0,01	0,45	2,72	0,00	0,03
Tidspunkt. 2	6,24	6,21	0,02	0,33	6,24	0,00	0,03
Tidspunkt. 3	4,95	4,93	0,02	0,35	4,95	0,00	0,03
Tidspunkt. 4	1,39	1,38	0,01	0,81	1,39	0,00	0,01
Middelverdi			0,02	0,48		0,00	0,03

3.2 Lokale værprediksjoner og værobservasjoner

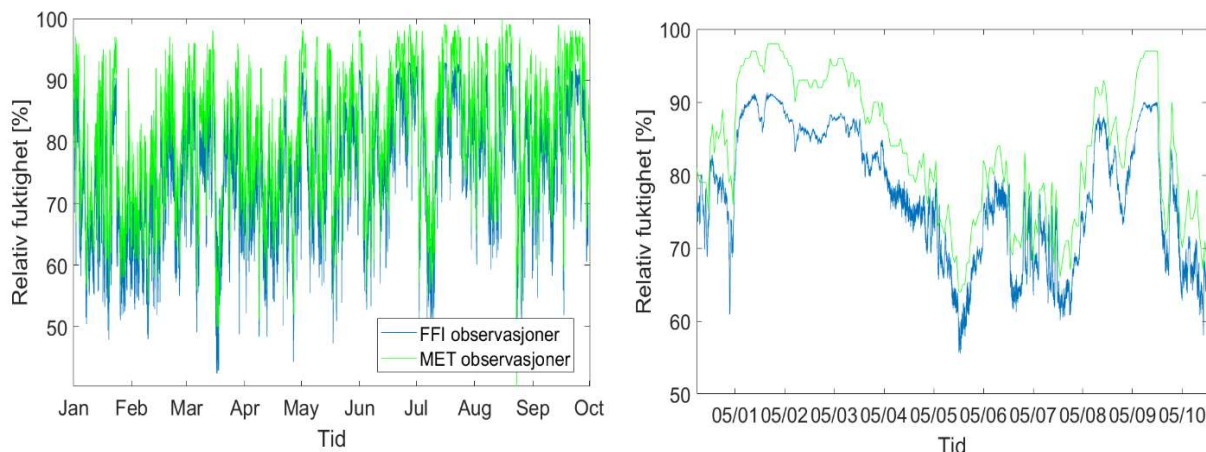
Beregning av gassdemping basert på Modell B krever værdata som beskriver forhold ved bakkestasjon. Det kan være AROME Arctic verdier for bakkenivå, eller observert vær ved Isfjord Radio. I sammenheng med målinger av satellittsignalet, har FFI observert været ved satellittforbindelsens bakkestasjon. Metrologisk institutt observerer også været ved Isfjord Radio. Målte værdata fra Metrologisk institutt (MET) og FFI sitt utstyr, samt predikerte verdier fra AROME Arctic sammenlignes i Figur 3.29 og Figur 3.30 for henholdsvis temperatur og luftfuktighet. Figur 3.31 viser observert relativ luftfuktighet som er beregningsgrunnlag for observert absolutt luftfuktighet i Figur 3.32, hvor observasjoner også blir sammenlignet med prediksjoner fra AROME Arctic. AROME Arctic verdier for 6-11 timer etter prediksjonstidspunkt er benyttet.



Figur 3.29 Målt og predikert temperatur ved Isfjord Radio for perioden februar til oktober 2016, samt detaljutsnitt.



Figur 3.30 Målt og predikert trykk ved Isfjord Radio for perioden februar til oktober 2016, samt detaljutsnitt.



Figur 3.31 Målt relativ luftfuktighet ved Isfjord Radio for perioden februar til oktober 2016, samt detaljutsnitt.

Plottene viser nært identiske observasjoner fra Metrologisk institutt og FFI sine måleinstrumenter, bortsett fra i plottet for relativ luftfuktighet hvor det forekommer noe større avvik.

For observasjonsdata er oppløsningen ulik for FFI sine og Metrologisk institutt sine målinger. Tabell 3.5 viser tids og enhetsoppløsning (sensitivitet) for observasjonsdata og tilgjengelig informasjon om usikkerhet fra instrumentenes datablad. Måleusikkerheten er avlest i datablad for aktuelle instrumenter ved aktuelle operasjonstemperaturer. For dataene fra Metrologisk institutt er usikkerheten oppgitt med et konfidensintervall tilsvarende to standardavvik, mens for flerbruks-instrumentet som FFI har benyttet er det ikke oppgitt noe konfidensintervall. Alle instrumenter er produsert av Vaisala.

Tabell 3.5 Samplingsfrekvens (sf), sensitivitet (s) og usikkerhet (u) for værobservasjoner

Målestasjon	FFI	MET		FFI		MET	
Parameter	sf	sf	s	u	Instrument	s	u (2 σ)
Temperatur	10sek	10min	0,1 C	$\pm 0,3$ C	WXT520	0,1	$\pm(0,176-0,0028^*$ avlesning)
Trykk	10sek	60min	1 hPa	± 1 hPa	WXT521	0,1	$\pm 0,15$
Relativ luftfuktighet	10sek	60min	0,10 %	± 3 %	WXT522	1	$\pm(1+0,008^*$ avlesning)

Tidsoppløsningen reduseres til 60 minutter for alle verdier for videre beregninger, det vil si tilsvarende tidsoppløsning som for AROME Arctic. Måledata fra Metrologisk institutt har finere enhetsoppløsning og gir dermed bedre grunnlag for beregning av gassdemping.

Inngangsverdier for beregning av gassdemping for Modell B er temperatur i Kelvin, trykk i hektoPascal og absolutt fuktighet i gram per kubikkmeter. De metrologiske observasjonene er

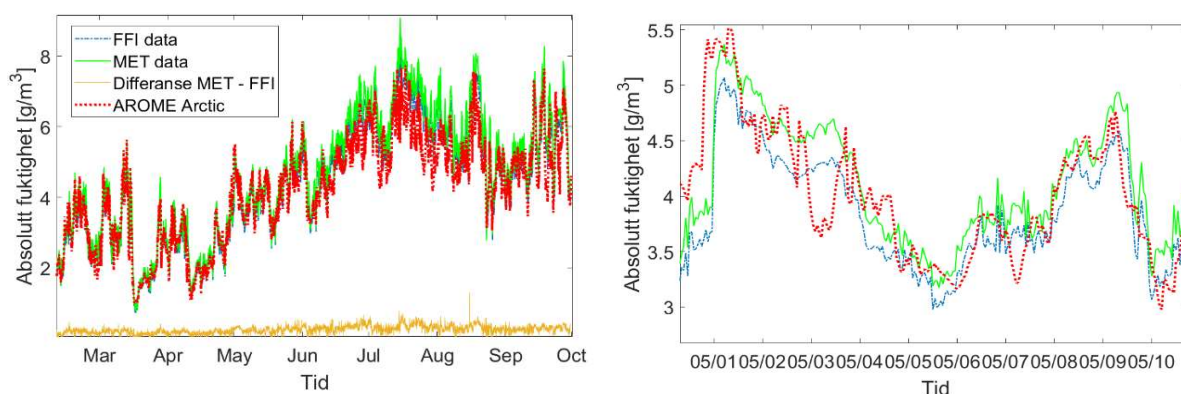
i formatene Celsius, hektoPascal og relativ luftfuktighet for henholdsvis temperatur, trykk og fuktighet og omgjøres til riktig format før bruk. For konvertering til absolutt fuktighet benyttes metode som gjengitt i Formel 3.5. Absolutt fuktighet, ρ_v [$\frac{g}{m^3}$] beregnes fra vanndamptrykket, e [hPa]/ e' [Pa], metningstrykket for vanndamp, e_w [hPa], relativ luftfuktighet, RH [%],temperatur, T_C [C] / T [K] og gasskonstanten for vanndamp, R_v , på 461,5 J/KgK.

$$e_w = 6,112 * e^{\frac{17,62T_C}{243,12+T_C}}, [hPa]$$

$$e = e_w * \left(\frac{RH}{100}\right), [hPa] \quad 3.5$$

$$\rho_v = \frac{e'}{R_v * T}, \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

Figur 3.32 viser absolutt fuktighet i måleperioden for Metrologisk institutt sine data og sammenlignes med AROME Arctic data. Data for absolutt fuktighet er også spesielt interessant ettersom vanndamp gir største bidrag til gassdemping på radiosignalet.



Figur 3.32 Absolutt fuktighet ved Isfjord Radio i perioden februar til oktober 2016, samt detaljutsnitt.

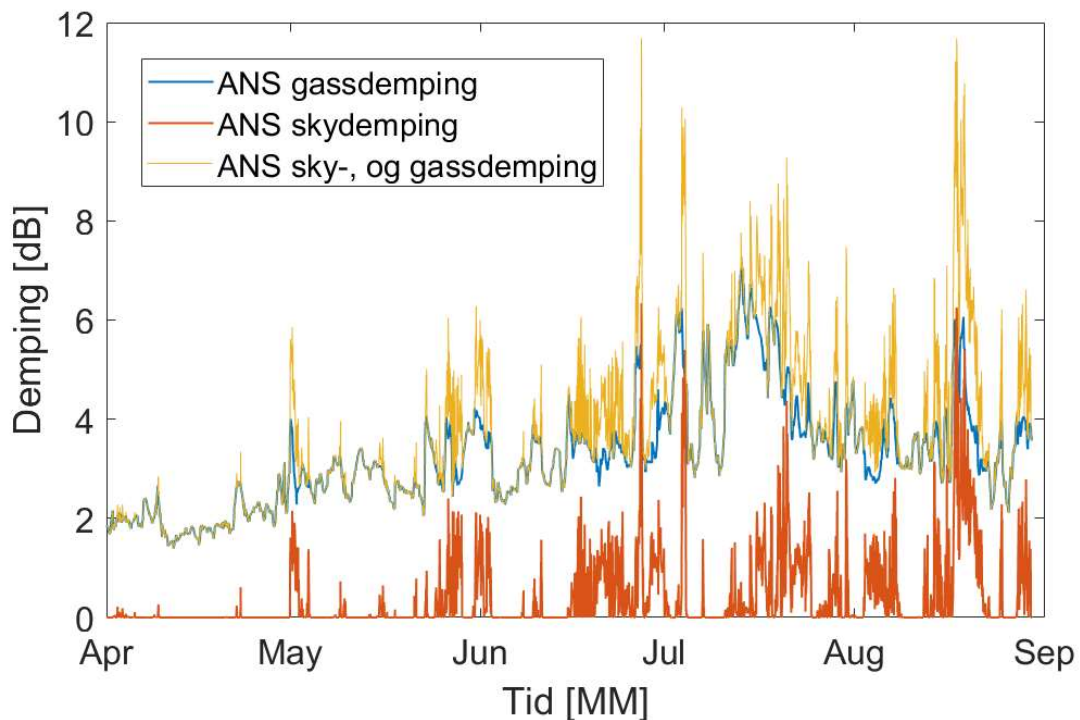
FFI sine måledata for relativ luftfuktighet har finere enhetsoppløsning, men måleutstyret for målingen av relativ luftfuktighet var imidlertid upålitelig rundt 0 grader, som er et måleområde som forekommer hyppig i testperioden. Plot av absolutt fuktighet i Figur 3.32 viser også at det forekommer avvik mellom målinger fra FFI og Metrologisk institutt. Metrologisk institutt sine målinger for fuktighet vurderes derfor som mer pålitelig. I beregningene i Modell B basert på værobservasjoner benyttes måleresultatene fra Metrologisk institutt. Det fremgår også avvik mellom AROME Arctic prediksjoner og observerte værforhold, som vil gi utslag i beregning av gassdemping med Modell B.

3.3 ANS referanse

Som beskrevet i kapittel 1 har ONERA utviklet ANS. ANS er blant annet er brukt til å modellere gassdemping på forbindelsen fra Ka-sat til Isfjord Radio, fra april til og med august 2016 [5]. Dette dekker delvis sammenligningsperioden i dette prosjektet. Simuleringsresultater fra ANS er tilgjengeliggjort av ONERA, som også har godkjent bruken av ANS resultatene i dette prosjektet, samt ved publisering av prosjektets resultater. ANS resultatene viser god korrelasjon med målte verdier og vil derfor være en referanse for resultatene i dette prosjektet [7].

ANS benytter høyoppløste værdata fra værmodellen Advanced Research Weather Research and Forecasting Model (WRF-ARW). Denne modellen er tar utgangspunkt i reanalyserte værdata fra European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), som inkluderer værprediksjoner og værobservasjoner. Resultatet er datasett som beskriver historiske data tilbake i tid med stedlig oppløsning på 2 km, 36 vertikale modellnivåer og tidsoppløsning på 5 minutter. Modellen kjøres hver 6. time og gir data som beskriver de atmosfæriske forholdene for de 12 foregående timene. For beregning av gass og skydemping basert på disse dataene, er det de samme modellene benyttet i ANS som er benyttet i dette prosjektet. ANS modellering riktignok basert på ITU-R P. 676-11 og ITU-R P. 840-7 som er forrige versjon av ITU rekommandasjonene som beskriver beregning av gass og skydemping [6]. Ettersom implementasjonen av dempingsmodellene og tilpasning av værdata ikke er tilgjengelig, er det ikke mulig å identifisere eventuelle forskjeller til løsningen i ANS og dette prosjektet.

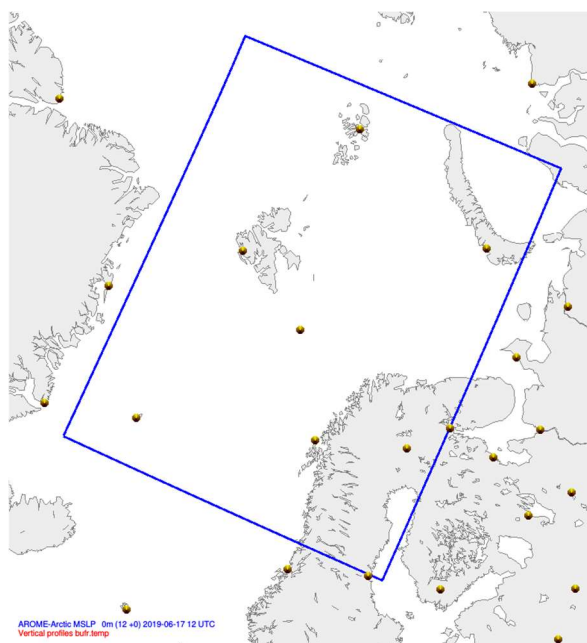
Figur 3.33 viser ANS resultatene som beskriver simulert gassdemping, skydemping og summen av disse. Den totale dempingen som er beregnet av ANS som følge av skyer og er inntil 12 dB. ANS resultater for hver hele time benyttes som referanse. Utvalget med tidsoppløsning 1 time er gjennomført for å ha samme tidsoppløsning som AROME Arctic data.



Figur 3.33 ANS simuleringsresultater for gass-, og skydemping.

3.4 Radiosonde

Beskrivelse av værforhold i atmosfæren kan også innhentes fra radiosonde i værballong som observerer værparametere oppover i atmosfæren. Aktuelle radiosondestasjoner i AROME Arctic område er Bjørnøya, Ny-Ålesund, Andøya og Jan Mayen med flere. Radiosondemålinger gjøres ved disse stasjonene to til fire ganger per døgn, og henter inn data til værballongen sprekker på 20-30 km høyde. Observasjonene gjøres med 1-2 sekunders mellomrom. Med en vertikal hastighet for værballongen på om lag 5 meter per sekund tilsvarer dette observasjonene gjøres hver 10. meter. Radiosonden Vaisala RS92 er eksempel på instrument som brukes og har relativt lav usikkerhet forbundet med målinger. Radiosondeobservasjoner er åpent tilgjengelig fra Metrologisk institutt. Figur 3.34 viser eksempel på radiosondestasjoner i AROME Arctic område [24].



Figur 3.34 Radiosondestasjoner i AROME Arctic område [24].

En sammenligning av værdataprofiler og resultater for gassdempingsberegninger basert på radiosondedata kan med fordel sammenlignes med tilsvarende basert på AROME Arctic. Dette kan gi nyttig statistikk og fungere som en verifikasjon for resultatene i dette prosjektet. Spesielt gjelder dette beregning av refraksjon, som med fordel kan ha bedre oppløsning. En radiosonde vil ha om lag 3000 målinger fra bakkenivå opp til 30 km. Til sammenligning har AROME Arctic 65 modellnivåer i samme høydeområde. Det er imidlertid en utfordring knyttet ved geografisk posisjon til en værballong. Selv om denne er kjent er det vanskelig å sette geografisk spredte radiosondedata i et system for anvendelsesområdet til dette prosjektet. Radiosondedata benyttes som inngangsverdier i værmodeller, deriblant AROME Arctic.

4 Simuleringer

Resultater fra simulering av gassdemping på satellittforbindelsen fra Eutelsat Ka-sat til bakkestasjonen på Isfjord Radio blir presentert i dette kapittelet. Simuleringsresultatene danner et grunnlag for vurdering av de ulike beregningsmodellenes anvendbarhet for prediksjon av satellittforhold. Beregningsmodellene som blir benyttet er:

- Modell A, linje for linje modell fra ITU-R P. 676 annex 1 versjon 12.
- Modell B, tilnærmet modell fra ITU-R P. 676 annex 2 versjon 10,11 og 12.

Modell A og B sammen med hvordan inngangsdata er preprosessert og benyttet, danner Metode A og Metode B. Inngangsdata som benyttes for de ulike beregningsmodellene er hovedsakelig predikerte værdata fra AROME Arctic. For Modell B benyttes også værobservasjoner fra Metrologisk institutt sin målestasjon på Isfjord radio.

I tillegg til simuleringer av gassdemping beskriver kapittelet simulert skydemping på satellittforbindelsen. Modellen fra ITU-R P-840-8 annex 1 anvendes på tilsvarende måte som Modell A i Metode A, og benytter også AROME Arctic inngangsverdier.

Simuleringene inneholder også beregning av refraktivitet og signalbanens refraksjon, som er avhengig av værforholdene langs signalbanen.

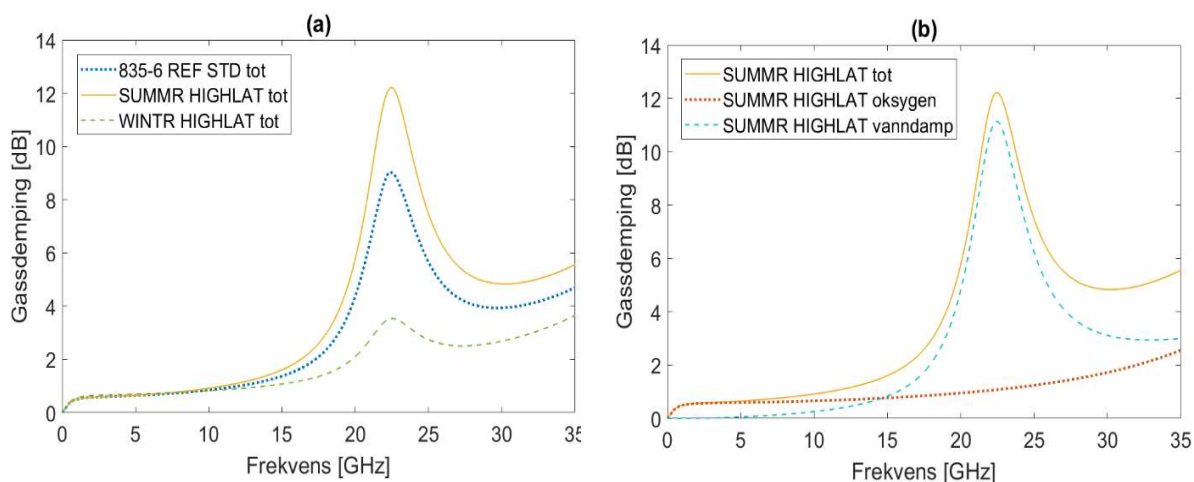
4.1 Gassdemping Metode A

Simulering av gassdemping med Metode A benytter Modell A med tilpassede AROME Arctic værdata som beskrevet i kapittel 3. Beregning av gassdemping består i å summere 800 påfølgende lag med tilhørende absolutt demping fra bakken opp til 30 km høyde. Den absolutte dempingen er produktet av signalbanens distanse gjennom laget og lagets spesifikke demping.

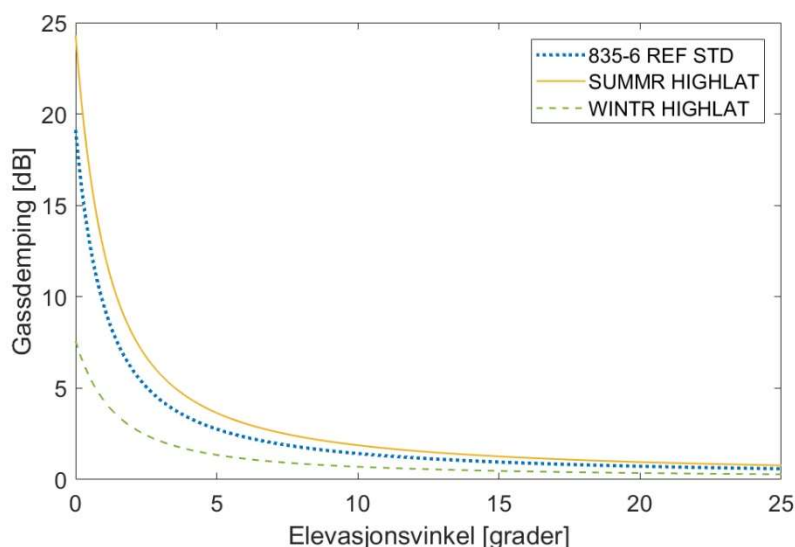
4.1.1 Verifikasjon av beregningsmodell

Modell A er som nevnt tidligere implementert i MATLAB og verifisert i henhold til verifikasjonseksempler utgitt av ITU-R [14]. Total gassdemping ved elevasjonsvinkel 3,5 grader, beregnet linje for linje som funksjon av frekvens er vist i Figur 4.1, for standard atmosfæriske forhold. Standard atmosfæriske forhold som er tatt med i sammenligningen er en global middel atmosfære, samt standard atmosfæriske forhold over 45 grader nord for henholdsvis sommer og vinter [16]. Figuren viser også individuelle dempingsbidrag fra

oksygen og vanddamp ved standard sommerforhold over 45 grader nord. Det fremgår at vanddamp er den desidert største bidragsyteren til den totale gassdempingen, og at forholdene om sommeren og vinteren forventes å ha store ulikheter. Total gassdemping som funksjon av elevasjonsvinkel ved 20 GHz er vist i Figur 4.2.



Figur 4.1 Total gassdemping som funksjon av frekvens (a), og eksempel på individuelle dempingsbidrag fra vanddamp og oksygen (b).



Figur 4.2 Gassdemping som funksjon av elevasjonsvinkel for utvalgte standard atmosfærer.

Det er tydelig at omfanget av gassdemping i atmosfæren er tett knyttet til frekvens og elevasjonsvinkel. Lavere elevasjonsvinkel fører til lengre distanse gjennom atmosfæren som akkumulerer absorpsjon og dempning av satellittsignalet. Som en referanse for videre arbeid beregnes gassdemping ved elevasjonsvinkel 3,5 grader for frekvens på 20 og 30 GHz for ulike standardatmosfærer [16], Tabell 4.1 viser dempingsverdiene. Beregning av gassdemping ved bruk av standard atmosfæriske forhold er alternativet til beregning med målte eller predikerte værdata.

Tabell 4.1 Beregnet gassdemping [dB] for ned-, og opplinkfrekvenser ved elevasjonsvinkel 3,5 grader

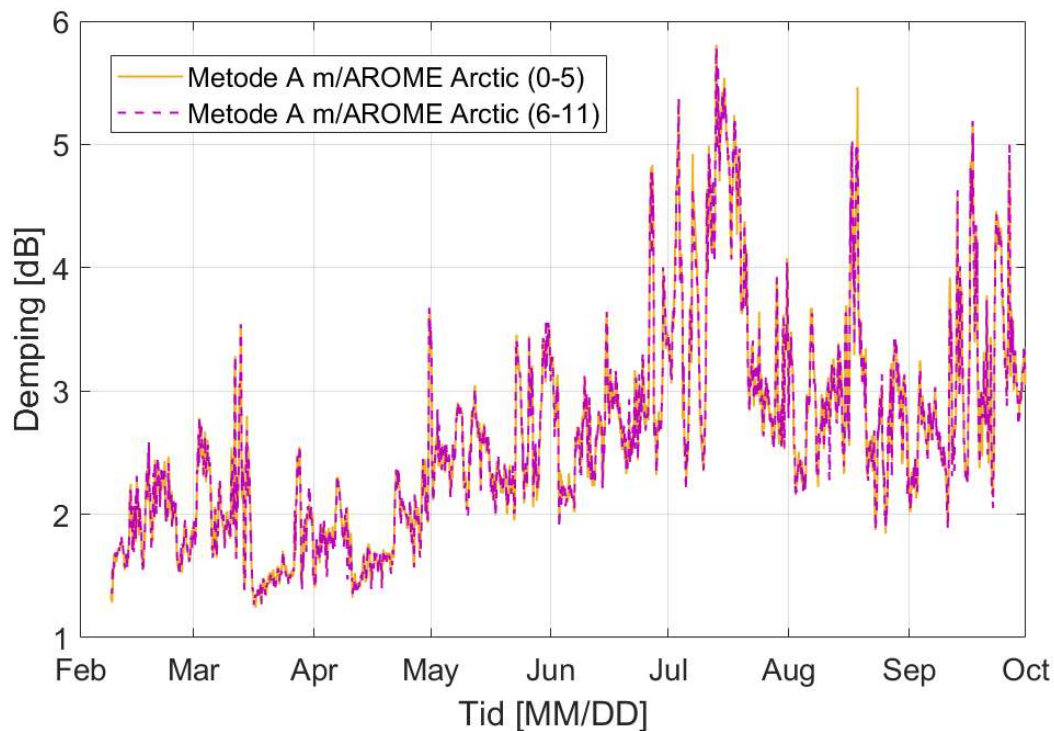
Atmosfære	Anvendelsesområde	Frekvens	
		20 GHz	30 GHz
REF STD	Global middel	3,82	3,45
ANNUAL LOWLAT	Under 22. breddegrad	9,34	7,13
SUMMER MIDLAT	22.-45. breddegrad	6,68	5,27
WINTER MIDLAT	22.-45. breddegrad	2,63	2,78
SUMMER HIGHLAT	Over 45. breddegrad	5,04	4,24
WINTER HIGHLAT	Over 45. breddegrad	1,85	2,36

Frekvenser rundt 20 GHz er en typiske nedlinkfrekvenser i Ka-båndet og benyttes fra satellitten til jordstasjonen. Tabell 4.1 og Figur 4.1 viser at gassdempingsberegninger gjennomført for 20 GHz også gir en indikasjon på gassdemping som vil forekomme for opplinkfrekvenser i Ka-båndet rundt 30 GHz. Dempingsverdiene for de ulike standardatmosfærene viser at forventet omfang av gassdemping har store geografiske variasjoner.

4.1.2 Gassdemping langs signalbanen

Ved hvert av AROME Arctic modellkjøringspunkter ved 00, 06, 12 og 18 UTC gjøres det tilgjengelig værprediksjoner for 66 timer frem i tid, som nevnt tidligere. Datasettet som dette prosjektet baseres på inkluderer værprediksjoner inntil 11 timer frem for hvert av disse prediksjonstidspunktene. Den intuitive forventningen til prediksjonens presisjon er høyest i den første perioden etter modellkjøring. Metrologisk institutt opplyser imidlertid at data de første 3-6 timene etter prediksjonstidspunkt kan ha en større usikkerhet enn timene etter 3-6 timer fra prediksjonstidspunktet [25]. Gassdemping for hver hele time beregnes for forbindelsen mellom Ka-sat og Isfjord Radio på 19,68 GHz i perioden 8. februar til 30. september 2016, vist i Figur 4.3. Beregningene er gjennomført i to tidsserier, hver av disse inneholder simuleringsresultater for hele sammenligningsperioden. Basert på ulik tillitt til værprediksjonene fra AROME Arctic for ulike tidspunkter etter modellkjøringene er beregningsresultatene delt slik:

- Gassdemping med AROME Arctic data 0-5 timer frem i tid.
- Gassdemping med AROME Arctic data 6-11 timer frem i tid.



Figur 4.3 Linje for linje beregning av gassdemping fra 08. februar til 30 september 2016.

Hver tidsserie inneholder 5670 timer/beregningstidspunkter. I beregningsperioden er data for 132 timer utilgjengelig eller korrupt. Ved beregninger med Metode A blir aktuell refraksjon inkludert i beregningen slik at antennens tilsynelatende elevasjon og signalbanens lengde og geometri er riktig i forhold til aktuelle AROME Arctic værprediksjoner for beregningstidspunktet.

Tidsseriene for beregnet gassdemping langs signalbanen viser store og hurtige variasjoner, med opptil 3dB variasjon innenfor et titalls timer. Overenstemmelsen mellom de to tidsseriene er svært god, det observeres kun få mindre avvik mellom de to. Med bakgrunn i forventet høyere tillitt til tidsserie som benytter værdata for 6-11 timer frem i tid, er det denne som hovedsakelig benyttes videre i prosjektet ved sammenligning med målinger og resultat fra andre beregningsmetoder.

Dynamikk i beregnet gassdemping for de to tidsseriene er sammenlignet med forventede verdier i Tabell 4.2. Forventningsverdiene er basert på beregninger utført med standard atmosfæriske forhold ved høye breddegrader for henholdsvis sommer og vinter

Tabell 4.2 Sammenligning av beregnede og forventede verdier for gassdemping

	Maks	Min	Maks-Min	Middel	Std.avvik
0-5 timer frem i tid	5,81	1,24	4,57	2,60	0,83
6-11 timer frem i tid	5,78	1,27	4,52	2,60	0,83
Forventet	5,04	1,85	3,64	3,45	

Av Tabell 4.2 og Figur 4.3 fremgår det at bruk av standard atmosfæriske forhold som utgangspunkt for et linkbudsjett vil estimere lavere demping om sommeren, og høyere demping om vinteren enn beregninger basert på AROME Arctic data viser. Dette betyr at beregningene viser at gassdemping på satellittsignalet har et større dynamisk område enn det som er forventet basert på standardforhold. Det dynamiske området beskriver forskjellen på maksimal og minimal verdi i simuleringene og er for simuleringsresultatene inntil 5,72 dB. Manglende beskrivelse av gassdempingens dynamikk vil gjøre det utfordrende å planlegge i forhold til tilgjengelighetskrav. ITU-R P. 835 som beskriver standard atmosfæriske forhold definerer ikke skillet mellom sommer og vinter, og det antas at året deles i to med sommer fra april til og med september.

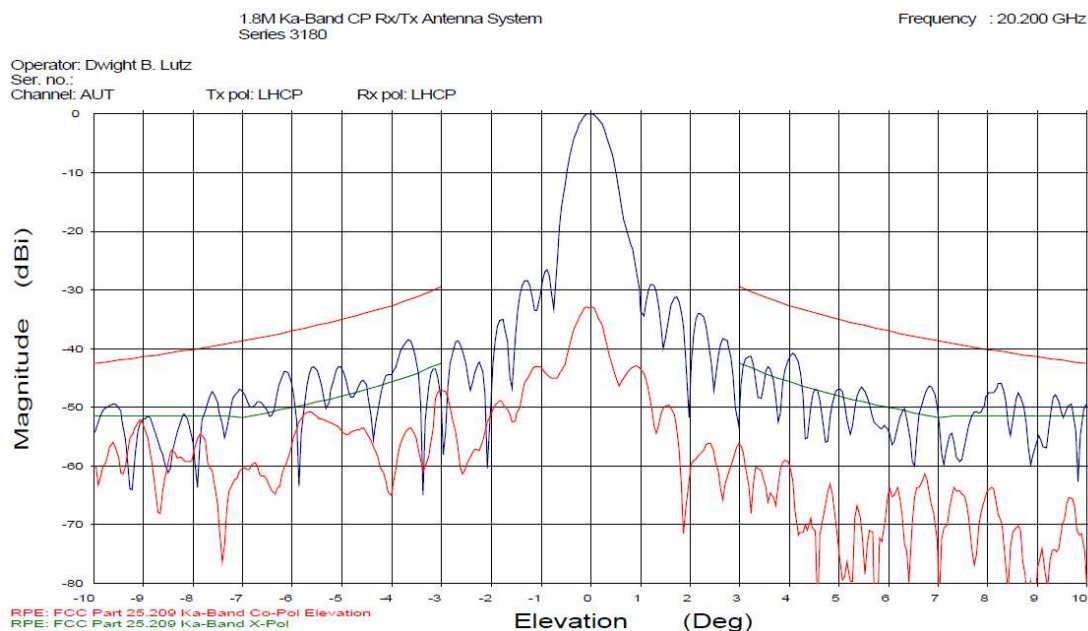
Ideelt ville sammenligningsperioden strekt seg over alle årstider, og aller helst over flere år for å oppnå et best mulig sammenligningsgrunnlag. I prosjektet er sammenligningsperioden begrenset til 8 måneder i 2016. Perioden strekker seg fra februar til september, og inkluderer både den kalde og den varme delene av året på Svalbard. Det gjør at resultatene antas å være representative for de ulike værforholdene som forekommer ved Isfjord Radio for hele året. At inngangsdata for disse simuleringene av gassdemping er predikerte og ikke observerte fører til økt usikkerhet når simuleringsresultater skal sammenlignes med målt satellittsignal.

4.1.3 Variasjon i tilsynelatende elevasjon

En mulig feilkilde ved sammenligning av målt signalstyrke og beregnet demping er manglende hensyn til den varierende refraksjonens effekt på mottakerantennens egenskaper. Derfor beregnes antennens optimale pekeretning med tidsoppløsning 1 time i sammenligningsperioden, som viser effekten av varierende refraksjon på forbindelsen.

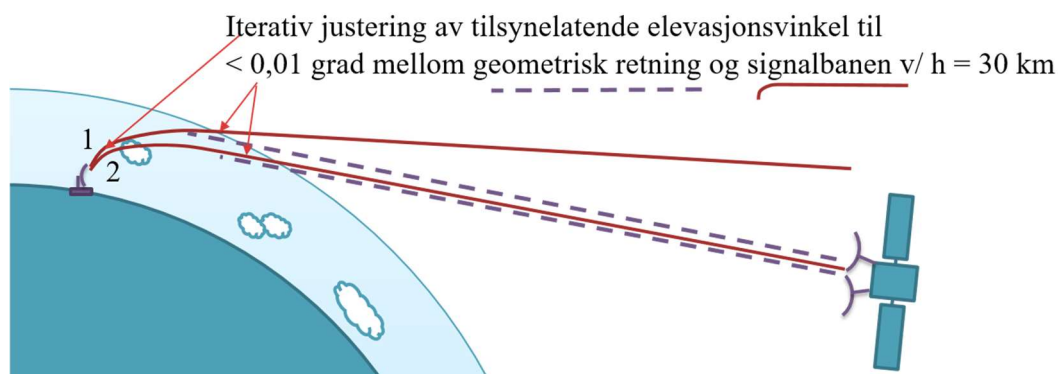
Dersom antennens pekeretning ikke er optimal vil antennens effektive forsterkning reduseres, og føre til tilsvarende reduksjon i målt signalstyrke. For større antenner er direktiviteten større, noe som fører til mindre åpningsvinkel og større tap ved dårlig treff. Strålingsdiagram for antennen som er brukt på bakkestasjonen med diameter 1,8 meter er vist i Figur 4.4 for frekvens

20,2 GHz, med sirkulær polarisering. Strålingsdiagrammet viser forsterkning relativt til antennens pekeretning. Det antas at antennen har samme egenskaper som er vist i strålingsdiagrammet ved bruk av antennen ved 19,68 GHz og horisontal polarisering, som er benyttet i dette prosjektet.



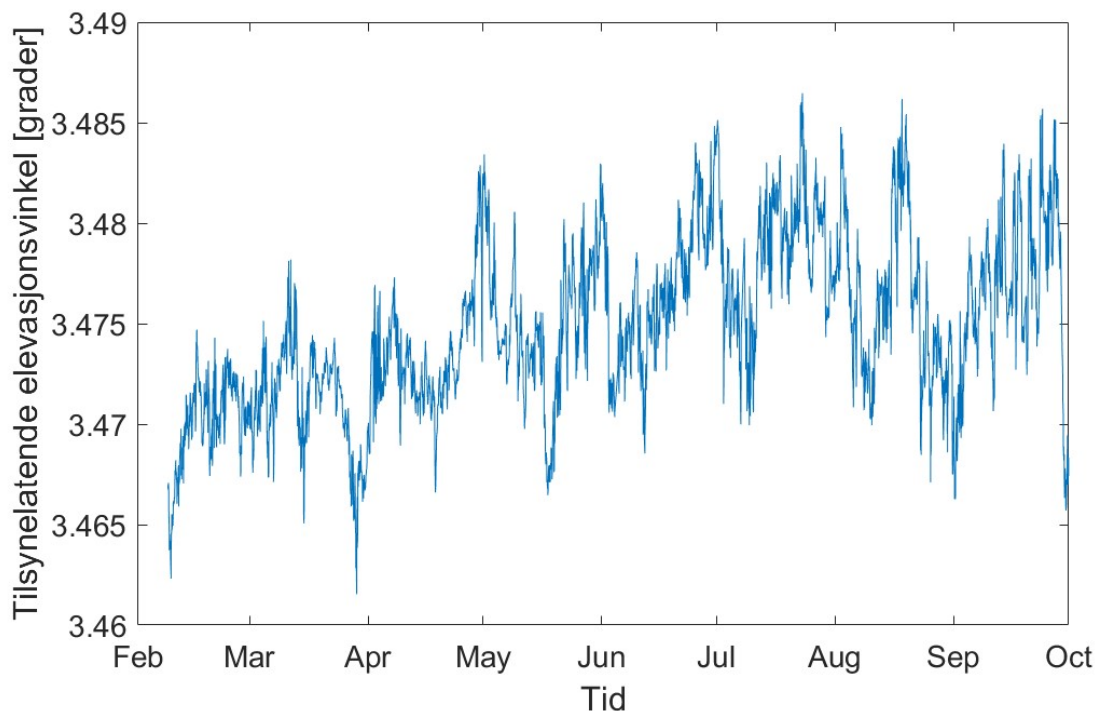
Figur 4.4 Normalisert strålingsdiagram, forsterkning relativt til antennens pekeretning [26].

Signalbanens geometri beregnes med avbøyning i henhold til AROME Arctic data, gjennom tidligere omtalte 800 lag opptil en høyde på 30 km. En søkealgoritme benyttes for å justere tilsynelatende elevasjon iterativt til signalbanen mellom bakkestasjonen og satellitten er optimal, innenfor et satt kriterium. Dersom differansen er mindre enn 0,01 grader stopper søket. I signalbanens punkt ved høyde 30 km undersøkes differansen mellom signalbanens elevasjonsvinkel og den geometriske elevasjonsvinkelen fra punktet til satellitten. Figur 4.5 viser prinsipp for søkealgoritme, der tilsynelatende elevasjon justeres til signalbanen treffer satellitten.



Figur 4.5 Prinsipp for søkealgoritme som beregner tilsynelatende elevasjonsvinkel.

Treffkriteriet på $\pm 0,01$ grad for elevasjonsvinkel vurderes til å ha neglisjerbar effekt på antennens forsterkning basert på strålingsdiagrammet for antennen. Kriteriet er også konservativt sammenlignet med antennens åpningsvinkel på 0,6 grader innenfor -3 dB båndbredde. Som beskrevet tidligere er signalbanens avbøyning neglisjerbar over 30 km. Variasjon i tilsynelatende elevasjonsvinkel for antenne på bakkestasjon som følge av varierende refraksjon er vist i Figur 4.6 fra februar til oktober 2016.



Figur 4.6 Beregnet tilsynelatende elevasjonsvinkel i perioden fra februar til oktober 2016.

Beregnet tilsynelatende elevasjon i perioden 8. februar til og med 30. september viser at varierende refraksjon fører til at den tilsynelatende elevasjonen varierer med 0,0250 grader, fra 3,4615 til 3,4865 grader. Middelerdi er i måleperioden 3,4748 grader med et standardavvik på 0,0042 grader. Dette kan sammenlignes med en forventet teoretisk tilsynelatende elevasjonsvinkel på 3.499 grader, basert på en geometrisk elevasjonsvinkel på 3,2 grader og standard refraksjon [23]. I kapittel 5 vil disse resultatet settes i sammenheng med antennens egenskaper, og effekten på det målte satellittsignalet vil bli kvantifisert.

4.2 Gassdemping Metode B

Simulering av gassdemping med Metode B benytter predikerte AROME Arctic værdata for bakkenivå ved Isfjord Radio, og observerte værdata fra Metrologisk institutt sin målestasjon ved Isfjord Radio. Bruk av disse to datakildene gir et godt sammenligningsgrunnlag for å vurdere Modell B som tilnærming for Modell A, og hvordan bruk av predikerte og observerte værdata sammenlignes.

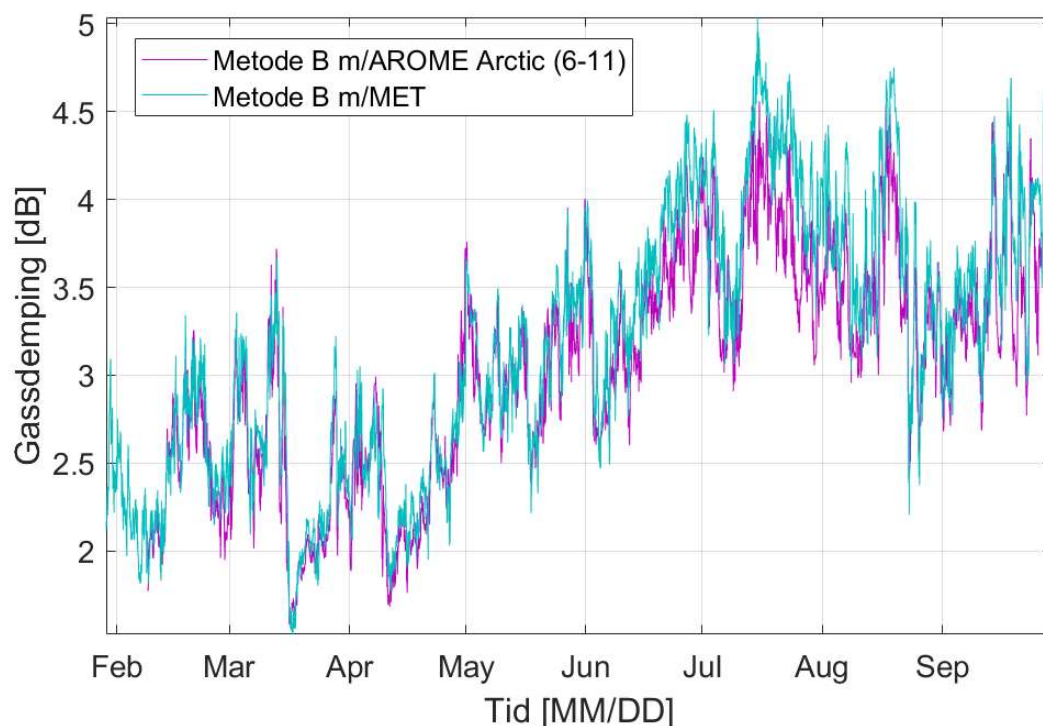
For å sammenligne beregninger og målinger av gassdemping er det intuitivt best å benytte observerte værdata som inngangsverdier i beregningsmodellen. For å vurdere modellens anvendbarhet som en tilnærmet modell for Modell A, sammenlignes Modell B med Modell A ved bruk av predikerte AROME Arctic værdata i Modell B. Dette er også grunnlaget for å vurdere om Metode B er anvendbar for å predikere gassdempingsforhold for forbindelsen i dette prosjektet.

I tillegg til versjon 12, som er siste versjon av tilnærmet modellen for beregning av gassdemping, benyttes de to foregående versjonene. Bakgrunnen for dette er at versjon 11 introduserer en systematisk feil som underestimerer omfanget av gassdemping i forhold til versjon 10 [10], og at versjon 12 nylig er publisert. For versjon 10 og 11 presenteres kun beregninger utført med AROME Arctic data, som gir tilstrekkelig sammenligningsgrunnlag for de ulike modellversjonene som tilnærming for Modell A.

Der det er aktuelt å benytte Modell B til beregning av gassdemping er det ikke normalt å ha informasjon om aktuell refraksjon og dermed beste tilsynelatende elevasjonsvinkel. Det er derfor naturlig å legge forventet beste tilsynelatende elevasjonsvinkel til grunn for beregningene med Modell B. Antatt beste tilsynelatende elevasjonsvinkelen med standard refraktivitet er 3,5 grader for forbindelsen og blir benyttet [27].

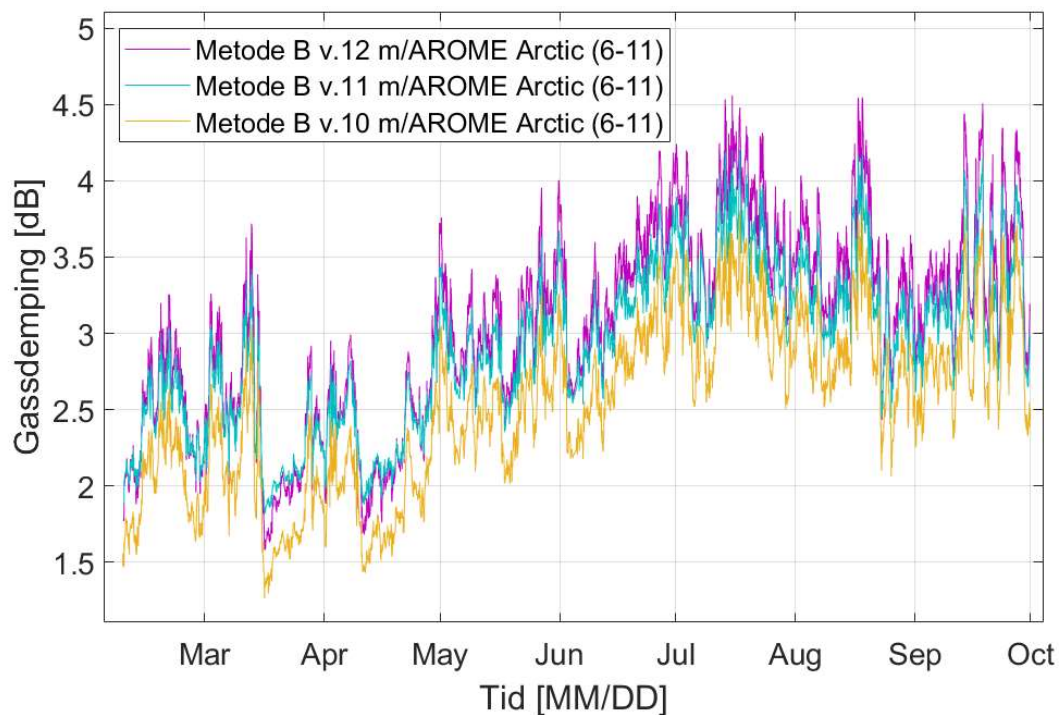
Som tidligere nevnt er aktuell elevasjonsvinkel i dette prosjektet utenfor gyldighetsområdet til beregningsmodellen, hvor nedre grense er oppgitt til 5 grader. Det er imidlertid vist god korrelasjon mellom målt og beregnet gassdemping helt ned til 3 grader [9]. Det finnes også fremgangsmåter for å ta høyde for økte effekter av refraksjon ved lave elevasjonsvinkler, som gjør det mulig å benytte tilnærmet modell for beregning av gassdemping også under 5 grader [28].

Gassdemping beregnes på forbindelsen med frekvens på 19,68 GHz mellom Ka-sat og Isfjord radio med versjon 12 av Metode B. Beregningene er gjennomført værdata som beskriver værforholdene ved bakkestasjonen på Isfjord radio. Dette er værprediksjoner fra AROME Arctic, og værobservasjoner fra Metrologisk institutt sin målestasjon. AROME Arctic data som benyttes er 6-11 timer frem fra prediksjonstidspunkt .Beregnet gassdemping for sammenligningsperioden fra februar til oktober 2016 er vist i Figur 4.7.



Figur 4.7 Tilnærmet gassdemping beregnet med observerte værdata.

Videre benyttes versjon 10 og 11 av Modell B sammen med de samme predikerte værdataene fra AROME Arctic, ved bakkestasjonen på Isfjord Radio. Tilnærmet gassdemping basert på Metode B for versjon 10,11 og 12 er vist i Figur 4.8.



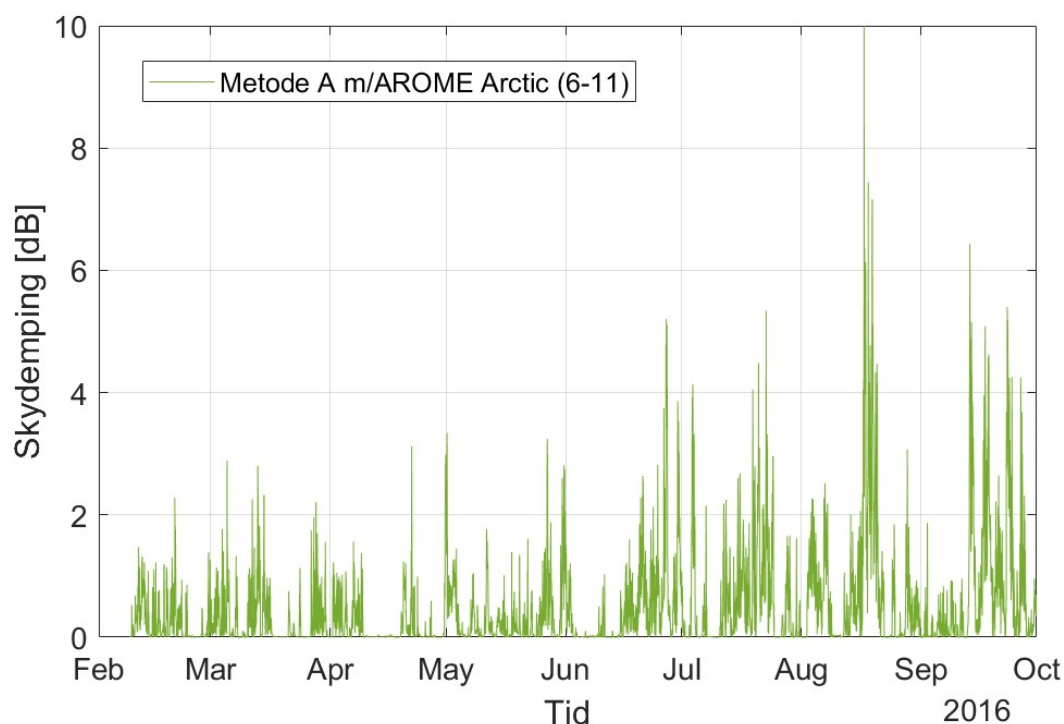
Figur 4.8 Tilnærmet gassdemping beregnet med predikerte værdata for bakkestasjon.

Det fremgår av sammenligningen at det er en systematisk nivåforskyvning i beregnet gassdemping ved bruk av de ulike versjonene av modell B. Det kan også se ut som versjon 12 gir noe mer dynamikk i beregningsresultatene ved at den ved enkelte tidspunkter beregner mer demping enn versjon 11 og i andre tidspunkter beregner mindre demping.

4.3 Skydemping

Målet i dette prosjektet har vært å kvantifisere gassdempingens variabilitet med bakgrunn i numeriske værdata for å vurdere evne til å predikere gassdempingsforhold på en satellittforbindelse over tid. I løpet av prosjektet har det vist seg å være et behov for å kvantifisere skydemping for å bedre sammenligningsgrunnlaget for simulert gassdemping og målt demping i troposfæren. Prosjektet er derfor utvidet underveis til å også beskrive skydemping med bakgrunn i numeriske AROME Arctic data. Skydempingsresultatene vil komplettere linje for linje beregninger av gassdemping.

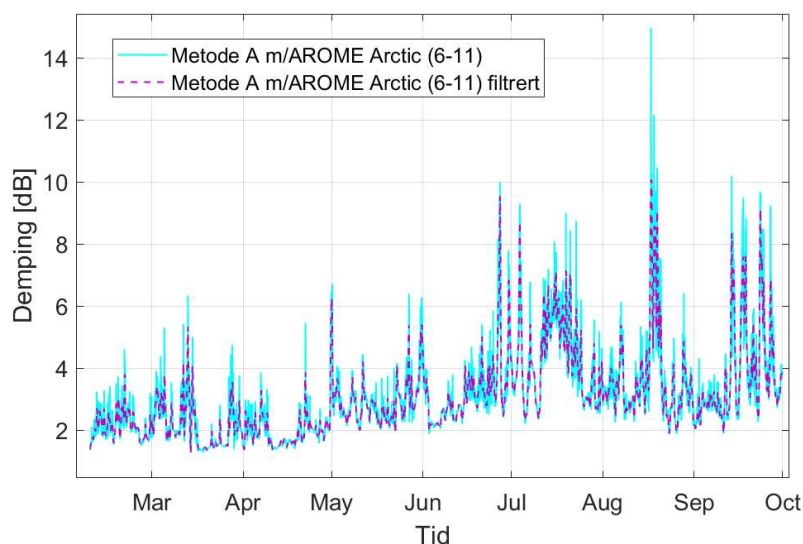
Beregning av skydemping er gjort linje for linje, som i Metode A for gassdemping, ved å summere absolutt skydemping for til sammen 800 påfølgende lag langs signalbanen. Beregningene tar utgangspunkt i frekvens 19,68 GHz og beste tilsynelatende elevasjonsvinkel, beregnet for hvert beregningstidspunkt. Simulert skydemping for forbindelsen i sammenligningsperioden er vist i Figur 4.9. Skydemping beregnes med AROME Arctic data 6-11 timer frem i tid for prediksjonstidspunkt.



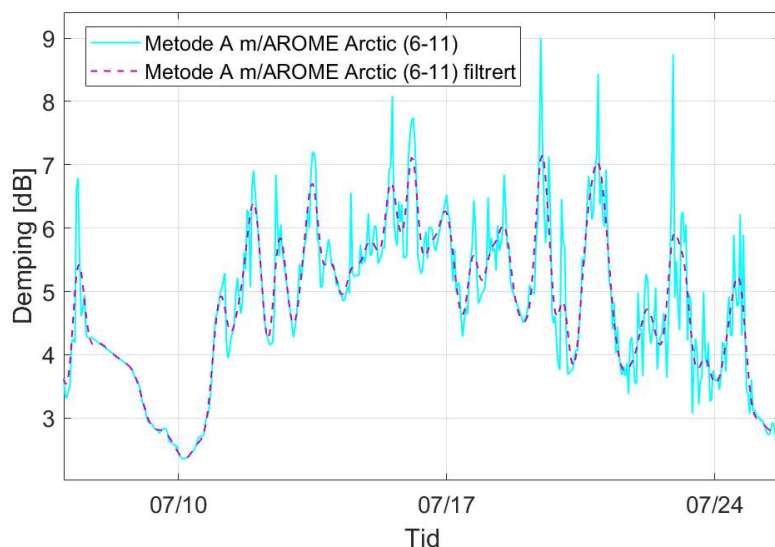
Figur 4.9 Skydemping, beregnet linje for linje med AROME Arctic værprediksjoner.

4.4 Kombinert sky-, og gassdemping, samt filtrering

Beste sammenligningsgrunnlag for sammenligning med målt demping oppnås ved å benytte sky-, og gassdemping, som er filtrert på samme måte som det målte signalet fra Ka-sat til Isfjord Radio. Filteret som brukes på tidsserien for total demping er et lavpassfilter som i praksis tilsvarer en glidende midling på 6 timer. Total demping som følge av skyer og gass, før og etter filtrering er vist i Figur 4.10. For å få et bedre inntrykk av midlingen er et utsnitt vist i Figur 4.11. Filteret tar bort raske variasjoner i dempingsresultatene, filterets opprinnelige hensikt i å ta bort raske dempingsfenomener som skyldes andre effekter enn gassdemping på det målte signalet. De filtrerte resultatene viser dynamisk område på om lag 9 dB.



Figur 4.10 Kombinert sky-, og gassdemping, før og etter filtrering.



Figur 4.11 Utsnitt av kombinert sky-, og gassdemping, før og etter filtrering.

5 Eksperimentelle målinger

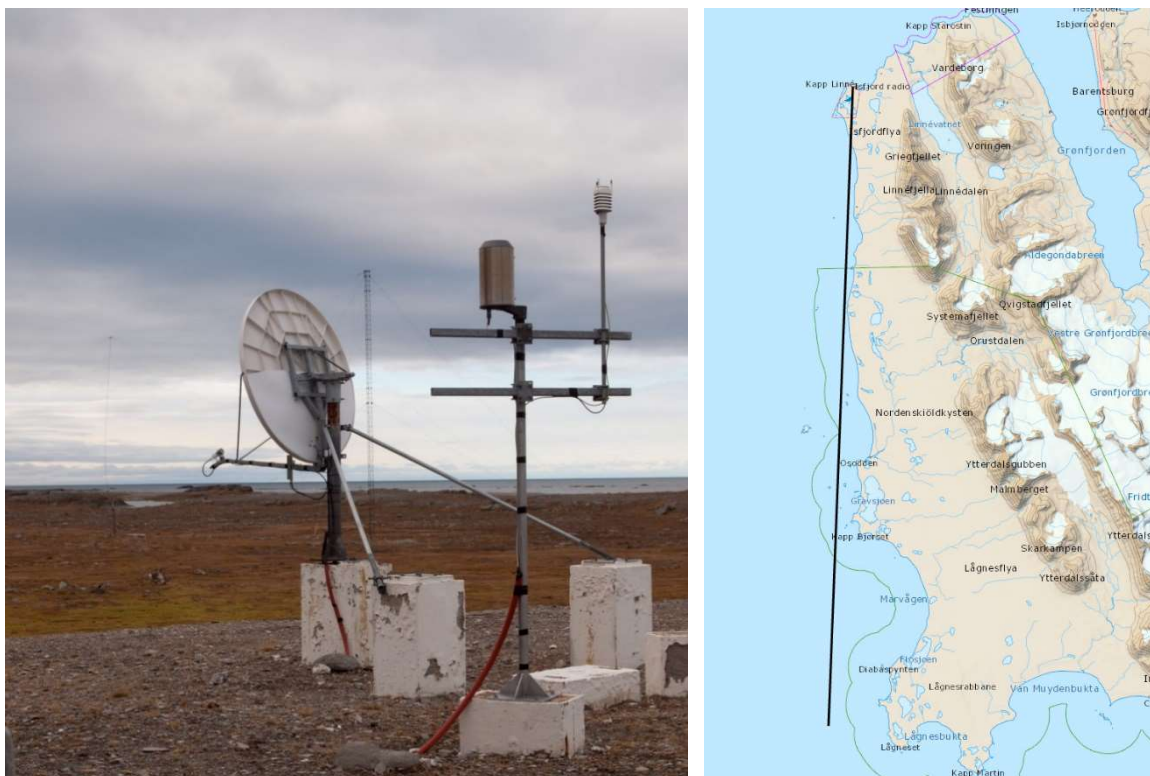
I dette kapitlet presenteres det eksperimentelle måleoppsett for bakkestasjonen ved Isfjord Radio og målinger som er gjort der av satellittsignalet fra satellitten Eutelsat Ka-sat. I tillegg beskrives det hvordan målingene er prosessert for å fjerne effekten av hurtige dempingsmekanismer som scintillasjon og regn. Måleresultatene danner så en referanse for vurdering av muligheten til å predikere troposfæriske effekter på satellittforbindelsen ved å sammenligne disse med simuleringsresultatene fra kapittel 4.

Forhold som er relevant for tolkning av målingene vil også bli presentert og kvantifisert. Presisjonen på målte data være påvirket av at antennen på bakkestasjonens har statisk pekeretning. Derfor kvantifiseres effekten av varierende refraksjon og at satellittens beveger seg.

5.1 Måleoppsett

Eksperimentelle måledata som benyttes i dette prosjektet er innhentet fra målestasjon ved Isfjord Radio på Svalbard. Måledata er innhentet i forbindelse med ESA prosjekt med Telenor, SINTEF, NTNU og FFI som studerte effekten av regn og scintillasjon på satellittsignalet fra Ka-sat [4]. Måledata er tilgjengelig for perioden fra februar til september 2016. Målestasjonens posisjon er 78,1 °N 13,6 °E med en høyde på 5 meter over havet. Dette prosjektet benytter to typer målinger som er utført ved Isfjord Radio, signalstyrke fra satellitt og lokalt vær [4].

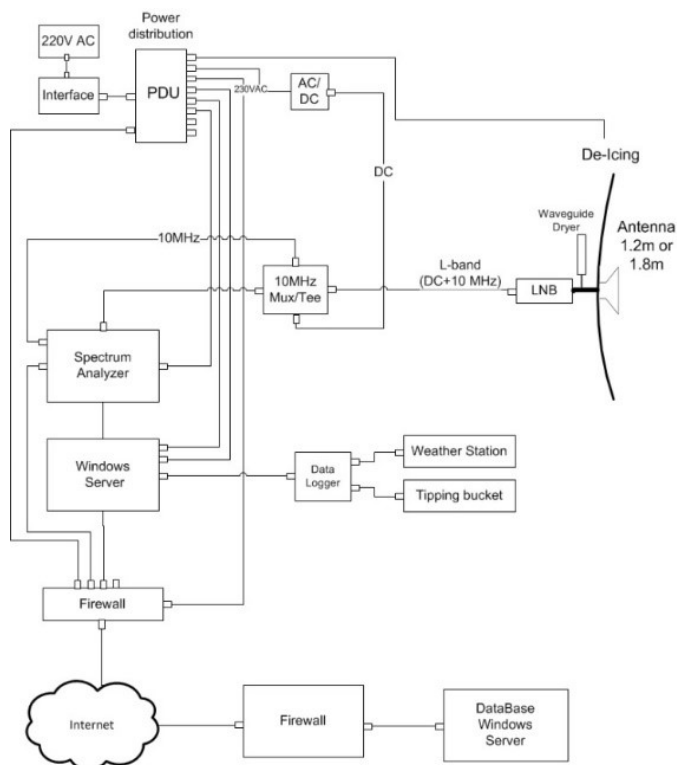
I denne sammenheng er peilesignalet fra satellitten Eutelsat Ka-sat målt. Peilesignalet er en kontinuerlig bølge med konstant amplitude som sendes ut i enden av satellittradioens frekvensområde. De langsomme variasjonene i mottatt peilesignal antas å representere gass-, og skydemping. Figur 5.1 viser bilde av målestasjon og kartutsnitt rundt Isfjord Radio med inntegning av de første 35 kilometerne av siktelinjen til antennen.



Figur 5.1 Målestasjon på Isfjord Radio med plassering og pekeretning til antenne i kart [4].

Målestasjonens antenne peker i retning 184,7 grader azimuth og geometrisk elevasjonsvinkel er 3,2 grader. Azimuth er antennens pekeretning relativt til nord. Forbindelsen går hovedsakelig over havet, men går over noe fuktig land ved start.

Figur 5.2 viser en skjematisk fremstilling av måleutstyret som ble benyttet. Komponentene som hovedsakelig påvirker måleusikkerheten er antennen, lavstøysforsterkeren (LNB) og 10 MHz referanse/multiplekser. Peilesignalet måles i watt med en samplingsfrekvens på 10 Hz (10 målinger i sekundet), og presisjon på 0,48 dB RMS absolutt feil [4]. Presisjonen er ikke oppgitt for kontinuerlig måling, og er sannsynligvis mye bedre. Antennen er oppvarmet for å unngå snø og is på antenneflaten og bølgeledere holdes tørre med dehydratorer. Målinger og lagring av målte verdier ble gjort automatisk.



Figur 5.2 Skjematisk fremstilling av måleoppsett for måling av peilesignal [4].

Antennen som ble benyttet var en Prodelin 3180 antenne med diameter 1,8 meter for bruk i Ka-båndet. Antennen har forsterkning på 49,2 dB i mottak. Åpningsvinkelen til antennen ved mottak er 0,58 grader.

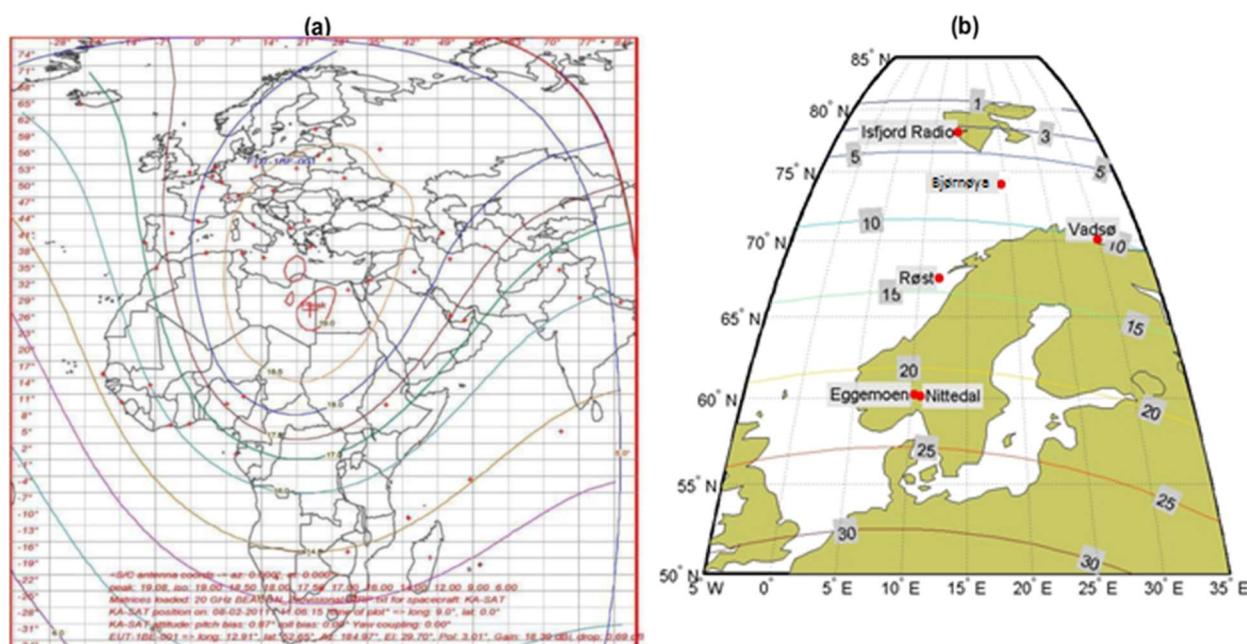
En Orbital Research lavstøysforsterker som oppfyller FFI sine krav til nordisk klima ble benyttet. Forsterkeren hadde en stabilitet på maksimalt $\pm 0,5$ dB i operasjonstemperaturer fra -35 til +55 grader celsius. I konfigurasjon på Isfjord radio er stabiliteten for operasjonsforsterkeren $\pm 0,3$ dB i temperaturområdet -15 til 20 grader celsius. Forsterkeren og peilesignalmottakeren ble matet med referansefrekvens fra en dobbel ovn stabilisert krystall oscillator med operasjonsområde og høy presisjon ned til -30 grader celsius. Peilesignalmottakeren var en Agilent EXA spektrumsanalysator.

Spektrumsanalysatoren var satt opp til å måle signaldemping, signalscintillasjon og relativ støytemperatur fra skyer på samme frekvens og samme antenne. Automatisk frekvensjustering ble utført for alltid å måle maksimal signalverdi. Målesikkerhet for spektrumsanalysatoren er 0,5 dB innenfor 95 % og målestasjonens totale absolutte standardavvik er som tidligere beskrevet maksimalt 0,48 dB med forventning om bedre presisjon.

Målingene var ikke kalibrerte. En kalibrering med kjente dempingsforhold ville gjort det mulig å måle absoluttverdier for demping. Målingenes primærverdi ligger derfor i peilesignalets, og dermed dempingens variabilitet.

5.2 Eutelsat Ka-sat og linkbudsjett

Satellitten Eutelsat Ka-sat er lokalisert i geostasjonær bane over ekvator ved 9,1 grad øst og høyde 35786 km over havnivå. Satellitten har peilefrekvenser både i frekvensbånd for opp-, og nedlink. Nedlinkfrekvensbåndets peilesignal til Ka-sat er benyttet for propagasjonsmålingene i dette prosjektet. Figur 5.3 viser satellittens dekningskart med inntegnede grenser for effektiv isotropisk utstrålt effekt, EIRP. Figur 5.3 viser geometriske elevasjonsvinkler mot satellitten basert på posisjoner i kartet. Kartet har også inntegnet markering av målestasjon på Isfjord Radio. Peilesignalet har en frekvens på 19,68 GHz, er horisontalpolarisert og utstrålt effekt i retning av bakketerminalen, EIRP er 17,5 dBW.



Figur 5.3 Dekningskart for Ka-sat (a) og kart over elevasjonsvinkel mot Ka-sat for ulike breddegrader (b) [4].

Beregnet linkbudsjett for forbindelsen er vist i Tabell 5.1 for tilgjengelighetskrav på henholdsvis 99,9 % og 80 % av tiden [4]. Dette er linkbudsjettet er hentet fra ESA-prosjektet som også datasettet som er benyttet i dette prosjektet stammer fra. ITU-R anbefaling er benyttet for å beregne gassdemping og anslått denne til å være konstant 2,2 dB. Det opprinnelige linkbudsjettet inneholdt ikke signal til støy forhold, Formel 5.1 viser overgangen fra signalstyrke relativt til den spektrale støytettheten, C/N_0 til signalstyrke relativt til støyeffekten C/N ved inngangen til peilesignalmottakeren [2]. Ved å kompensere for støybåndbredden til mottakeren som her er 30 Hz finnes forholdet mellom signal-, og støyeffekt, C/N . L representerer total demping/tap, G/T er terminalens godhetfaktor (forsterkning delt på støytemperatur) og k er Boltzman konstant.

$$\frac{C}{N} = \frac{C}{N_0} * \frac{1}{B_N} = EIRP * \frac{1}{L} * \frac{G}{T} * \frac{1}{k} * \frac{1}{B_N} \quad 5.1$$

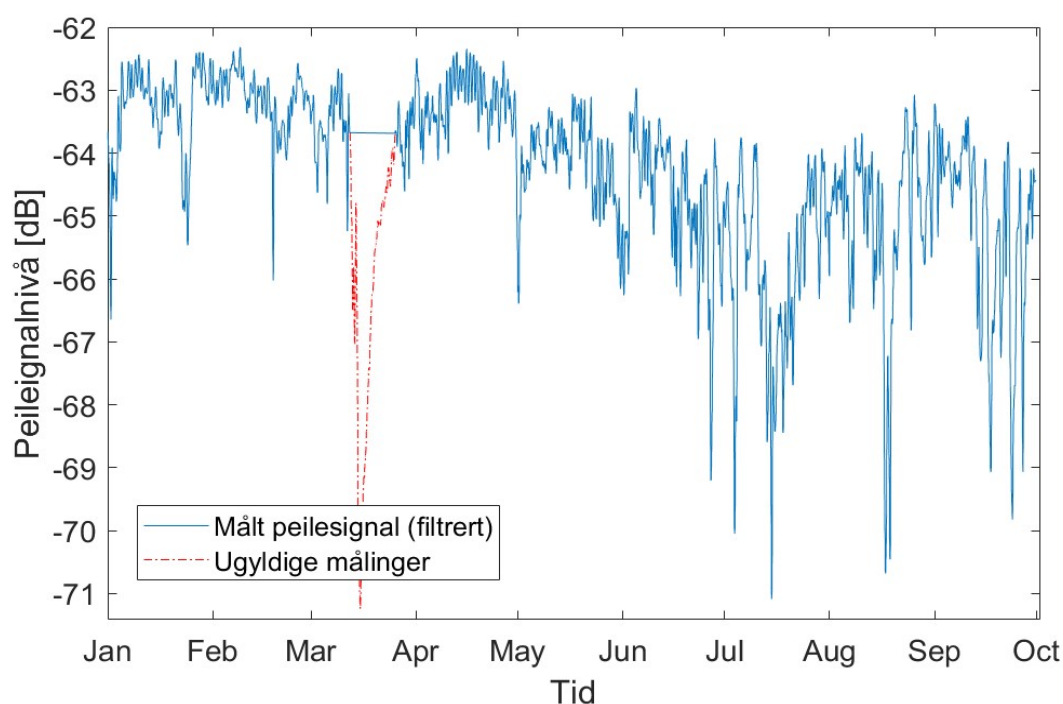
Tabell 5.1 Linkbudsjett for satellittforbindelsen fra Ka-sat til Isfjord Radio [8].

Tilgjengelighet	%	99,9	80,0
EIRP	dBW	17,5	17,5
Frittromstap	dB	210,6	210,6
Gassdemping	dB	2,2	2,2
Regndemping	dB	7,0	0,0
Skydemping	dB	2,4	2,4
Scintillasjon	dB	4,5	0,7
Total demping	dB	223,3	215,3
Terminal G/T	dB/K	20,3	21,8
C/N0	dB/Hz	43,2	52,6
C/N	dB	28,2	37,6

I dette linkbudsjettet fremgår det at signal til støyforholdet er 28,2 dB ved tilgjengelighetskrav 99,9 % av tiden med listede avsetninger til tap, deriblant gass-, og skydemping. Avsetningen til gass-, og skydemping er betydelig lavere enn beregnet gass og skydemping med AROME Arctic data i Kapittel 4, og ettersom Kapittel 6 viser at beregningene stemmer godt med den målte referansen vil det i praksis si at signal til støyforholdet vil være betydelig lavere enn forventet i dette linkbudsjettet. Av linkbudsjettet her kan det synes å være en antagelse at gassdemping ansees som et konstant tap ved at margin for gassdemping er likt ved tilgjengelighetskrav på både 99,9 % og 80 %. Statistikk i dette prosjektet viser at gassdemping ikke er konstant, og utnyttelse av denne kunnskapen vil kunne bedre en planleggingsprosess.

5.3 Måleresultater

Måleresultatene beskriver peilesignalet fra Ka-sat, målt med måleoppsettet på Isfjord Radio. Måleresultatene er filtrert for å ta bort effekten av regn og snø på ved å ta bort raske variasjoner i det målte signalet. Dette gjøres manuelt ved å fjerne dempingshendelser med varighet under noen få timer. Målingene blir så midlet glidende over 6 timer. Dette tar bort hurtige variasjoner i målingene som følge av scintillasjon og gjenværende regneffekter [4]. Variasjoner som følge av gassdemping er langsomme og vil fortsatt være synlige i måledata etter prosessering. Grunnet forbindelsens lange strekning gjennom atmosfæren er det vanskelig å isolere effekten av dempingeffektene fra skyer og gass. Flere av dempingsfenomenene strekker seg over lang tid, og det er ikke mulig å definere begynnelse og slutt for effekten av disse. Isfjord radio har skydekke om lag 67-88 % av året basert på satellittbilder og numeriske værdata. Dette medfører at skyeffekter ikke vil inngå i de korte dempingshendelsene som filtreres bort, og vil være betydelige i måleserien [29]. Målt peilesignal fra Ka-sat er vist i Figur 5.4.



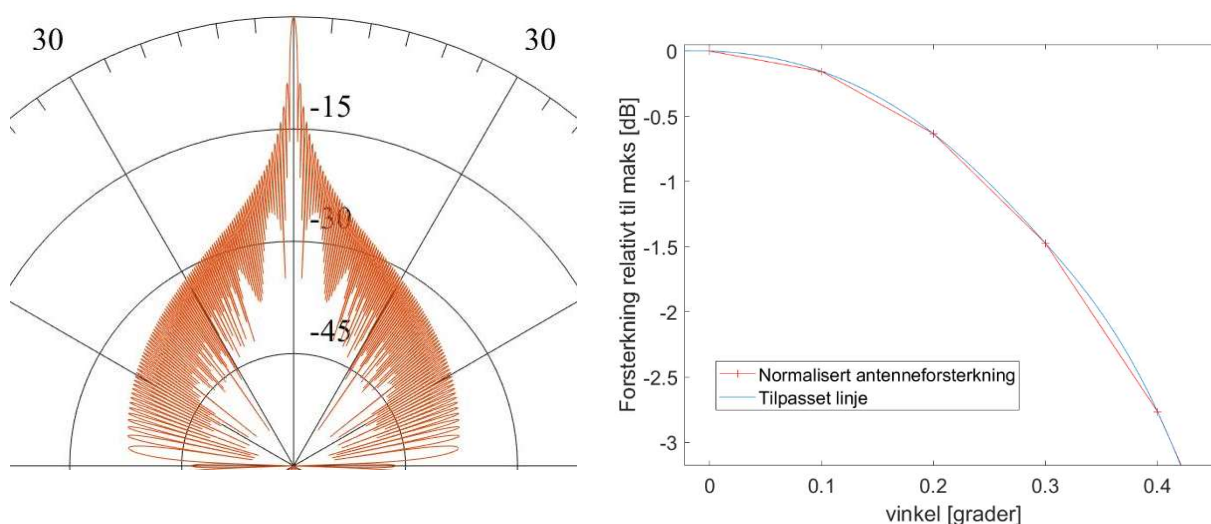
Figur 5.4 Målt peilesignal v/Isfjord Radio fra Ka-sat fra januar til november 2016.

Is på antenne forårsaker høy demping i perioden fra 12. mars klokken 12 til 25. mars klokken 18 og utelates derfor fra sammenligningsgrunnlaget. Målinger før og etter denne hendelsen benyttes. Målingene viser til dels stor variabilitet med et dynamisk område på om lag 9 dB, som følge av det som antas å være gass, og skydemping. Variabiliteten til måleresultatene er stor innenfor få dager og viser ulike middelnivå for kaldere og varmere perioder/måneder.

5.4 Konsekvens av antennens statiske pekeretning

Som omtalt i Punkt 4.1.3 er en mulig feilkilde ved sammenligning av målt signalstyrke og beregnet demping manglende hensyn til effekten av varierende refraksjon på peilesignalet. Konsekvensen av at antennen peker statisk og ikke tar hensyn til varierende refraksjon kvantifiseres ved å se variasjon i beregnet tilsynelatende elevasjonsvinkel i sammenheng med antennens egenskaper.

Teoretisk strålingsdiagram som tilsvarende antennen som er benyttet er vist i Figur 5.5 med normaliserte verdier. Antennens forsterkning er direkte knyttet til direktivitet som avhenger av pekeretning relativt til motstående antenne, og signalbanen mellom disse. Den teoretiske antennen benyttes for å kvantifisere konsekvens av varierende refraksjon.



Figur 5.5 Teoretisk strålingsdiagram med utsnitt av hovedstrålen som viser normalisert forsterkning.

Tabell 5.2 viser beregnet reduksjon i forsterkning på grunn av ikke-optimal pekeretning.

Tabell 5.2 Konsekvens av antennens ikke-optimale pekeretning

Avvik pekeretning [grader]	Konsekvens forsterkning [dB]	Forklaring
0,0249	-0,014	Variasjon tilsynelatende elevasjon
0,01245	-0,005	Variasjon tilsynelatende elevasjon/2
0,01	-0,004	Presisjon v/beregning tilsynelatende elev

Antennens nøyaktige pekeretning ved siste pekeoptimalisering er ikke kjent og kan befinne seg i ytterkant av variasjonsintervallet for tilsynelatende elevasjon. Konservativt vurderes derfor konsekvens av den maksimale variasjonen i måleperioden, som teoretisk tilsvarende en endring i forsterkning på -0,014 dB. Denne forringelsen tilsvarende en reduksjon i antenneforsterkning på

0,023 % fra nominell verdi på 49,2 dB Varierende refraksjon vurderes derfor til å ha neglisjerbar effekt på antenneforsterkningen og målt peilesignalnivå.

At treffkriterium ved beregning av beste tilsynelatende elevasjon er definert til 0,01 grader medfører at beregninger for beste tilsynelatende elevasjonsvinkel har høy relativ usikkerhet. Dette er en konsekvens av at variasjonen i tilsynelatende elevasjon er mindre enn først antatt. Ettersom variasjonen og konsekvensen er så liten, kan høy relativ usikkerhet aksepteres.

Beregnet variasjon i refraksjon i dette prosjektet er lavere enn tilgjengelig forventningsverdi for en elevasjonsvinkel på 10 grader, som vist i Tabell 5.3 [23]. Forventningsverdi er hentet fra ITU-R rekommandasjon 834, som beskriver effekter knyttet til troposfærisk refraksjon på radiosignaler [23]. Tabellen viser beregnet variasjon i tilsynelatende elevasjonsvinkel innenfor 24 timer, samt maks, middel og RMS verdi i beregningsperioden.

Tabell 5.3 Forventet og beregnet variasjon for tilsynelatende elevasjonsvinkel

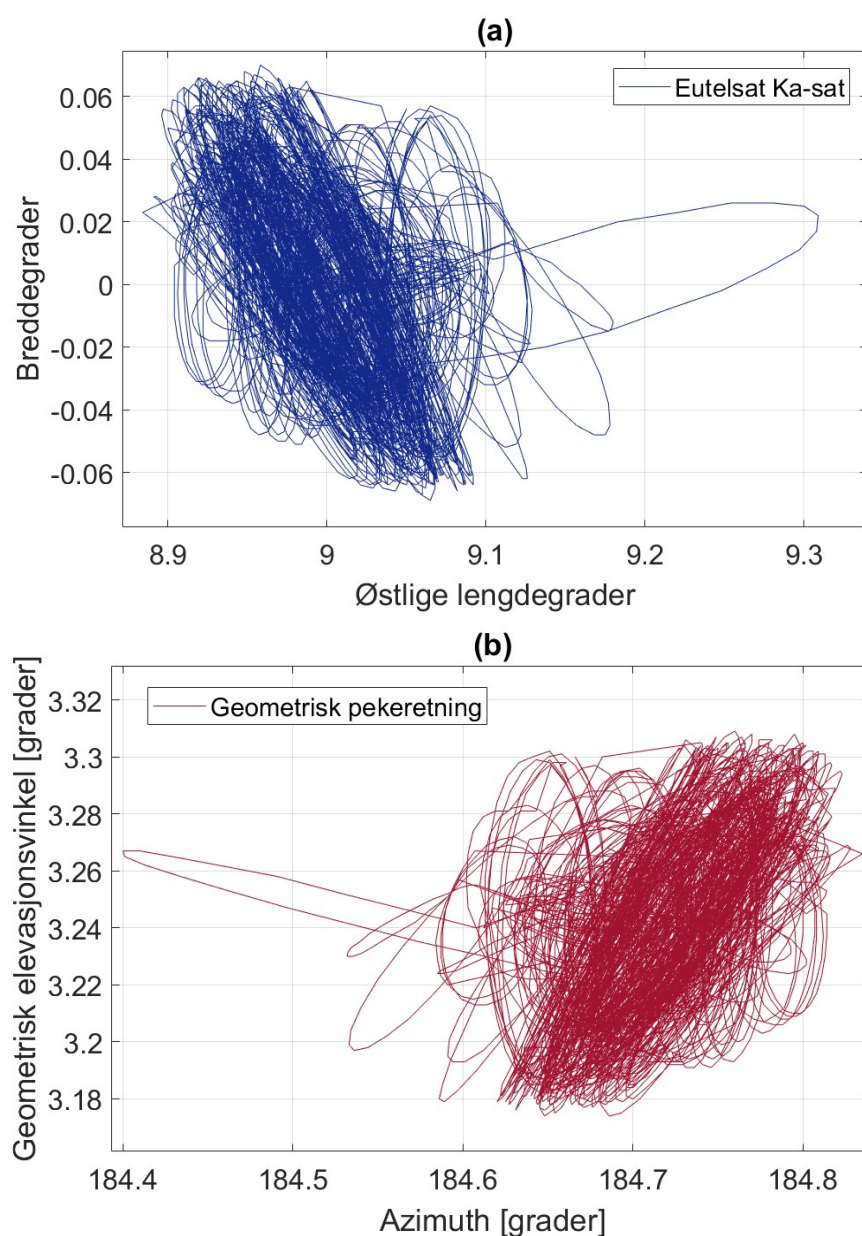
Beskrivelse	Variasjon [grader]	Merknad
Forventet daglig variasjon RMS	0,0070	Elevasjonsvinkel 10 grader
Beregnet daglig variasjon RMS	0,0051	
Maksimal beregnet daglig variasjon	0,0133	
Middel beregnet daglig variasjon	0,0046	

Variasjon i tilsynelatende elevasjon i beregningsperioden er innen det forventede omfanget. Sett i retrospekt kunne beregning av tilsynelatende elevasjonsvinkel med fordel vært utført med smalere treffkriterium. Hensikten med å beskrive variasjon av tilsynelatende elevasjon er likevel oppnådd ved at effekten av dette er neglisjerbar i målte verdier av gassdemping med aktuelt måleoppsett. Variasjoner i målt peilesignal kan derfor ikke forklares med varierende refraksjon.

Varierende refraksjons effekt på satellittforbindelsen kan inneha større konsekvenser enn det som fremgår her ved ductingforhold. Merk også at konsekvensen av varierende refraksjon henger sammen med antennestørrelse, større antenner har mindre åpningsvinkel.

5.5 Konsekvens av satellittens bevegelse

Analyse av satellittens bevegelse er gjennomført med System Toolkit, STK. STK er en programvare for firedimensjonal analyse av blant annet satellittbevegelse. Eutelsat Ka-sat sine bevegelser og den geometriske pekeretningen fra bakkestasjonen mot Ka-sat er vist i Figur 5.6 for perioden 1. januar til 30. september 2016. Satellittens bevegelsesmønster er gjentakende over et mindre område, i perioden er det ett større unntak der satellitten har vært 0,3 grader lenger øst.



Figur 5.6 Ka-sat sin posisjon i perioden januar til september 2016 (a) og den geometriske pekeretning fra Isfjord Radio til Ka-sat i samme periode (b).

Maksimale utslag for optimal tilsynelatende pekeretning som følge av satellittens bevegelse er vist i Tabell 5.4. Standard refraksjon i henhold til ITU-R P. 834 er lagt til grunn for verdiene i tabellen ved omregning fra geometrisk til tilsynelatende elevasjonsvinkel.

Tabell 5.4 Satellittens bevegelses påvirkning på tilsynelatende pekeretning

	Tid (UTC)	Azimuth [grader]	Elevasjon [grader]	Avstand [km]
Min elevasjon	24.04.2016 21:34	184,688	3,435	41312,5
Maks elevasjon	22.05.2016 09:00	184,76	3,564	41302,1
Middel elevasjon			3,499	
Min azimuth	12.07.2016 12:00	184,4	3,524	41306,8
Maks azimuth	07.08.2016 02:00	184,835	3,523	41327,1
Min avstand	12.07.2016 06:33	184,547	3,507	41258,5
Maks avstand	12.07.2016 18:31	184,557	3,496	41371,0
Middel avstand				41315,6

Variasjon i tilsynelatende elevasjon i perioden tilsvarer maksimalt 0,129 grader som tilsvarer 0,26 dB reduksjon i antenneforsterkning (2,9 %). I tillegg varierer azimuth med 0,435 grader som tilsvarer cirka 3,45 dB reduksjon i antenneforsterkning (27,4 %), forutsatt en hovedstråle som er symmetrisk i for elevasjonsvinkel og azimuth. Disse beregningene inkluderer en kort periode hvor satellitten har større bevegelse enn normalt.

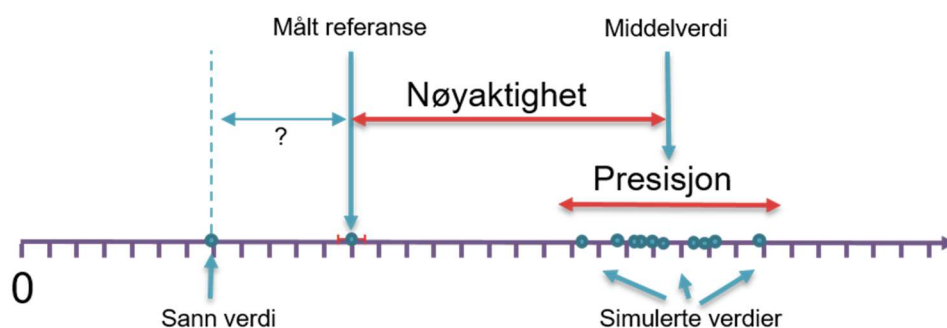
Ved å ekskludere satellittens bevegelse over 9,1 grader østlig lengde vil variasjon av mottatt signalstyrke grunnet variasjon i azimuth være lavere. Om man legger til grunn det bevegelsesområdet som dominerer for azimuth, fra 184,65 til 184,85 grader utgjør dette fortsatt signifikant svekkelse av antennens forsterkning på 0,63dB (7 %). Dette kan summeres til en reduksjon i antenneforsterkning på 0,89 dB som følge av satellittens påvirkning på antennens optimale pekeretning. Denne effekten er overraskende, intuitivt skal ikke satellittens bevegelse ha så stor, om i det hele tatt signifikant, effekt på en antenne med 1,8 meter diameter og åpningsvinkel 0,6 grader som benyttes i Ka-båndet.

6 Resultater og diskusjon

I dette kapitlet sammenlignes simuleringsresultater og måleresultater for å vurdere korrelasjonen mellom disse. Hensikten ved sammenligningen er å avgjøre om det er mulig å predikere satellittforhold med bruk av numeriske værprodukter. I dette prosjektet gjelder dette hovedsakelig gassdemping og dens variasjon ved bruk av værdata fra AROME Arctic.

Ettersom målingene av satellittens peilesignal ikke er kalibrert er det ikke mulig å avgjøre det absolute omfanget gassdempingen som forekommer på satellittsignalet. Referansemålingene av peilesignalet inneholder også betydelige effekter av skydemping, ettersom skyer forekommer om lag 67-88 % av tiden på Svalbard [29]. Simuleringsresultater for skydemping benyttes derfor for å komplettere sammenligningen av simulert gassdemping og målt demping på satellittsignalet.

At referansemålingene ikke er kalibrert betyr at det vil være en systematisk feil mellom referansemålingene og de sanne verdiene for den troposfæriske gass-, og skydempingen på satellittsignalet. Nøyaktigheten og presisjonen til simuleringsresultatene kan kun angis relativt til referansemålingene, og ikke til de sanne verdiene. Sammenligningen av målt og modellert demping viser likevel grad av samvariasjon og hvordan de modellerte resultatene er i stand til å gjenskape variasjoner i dempingen over tid. Det er informasjon om denne variabiliteten som kreves for å kunne tilpasse satellittforbindelsen fra ett tidspunkt til et annet. Ved å vurdere simuleringsresultatenes nøyaktighet og presisjon relativt til referansemålingene beskrives muligheten til å modellere dempingens variasjon. Figur 6.1 viser denne sammenhengen. Nøyaktigheten beskriver den systematiske feilen som kan kalibreres for, og presisjonen er den vilkårlige feilen som også relateres til simuleringenes repeterbarhet.



Figur 6.1 Simuleringsresultatenes nøyaktighet og presisjon beskriver henholdsvis den systematiske og vilkårlige feilen relativt til den ikke kalibrerte referansemålingen.

Resultater fra Metode A blir sammenlignet med målt demping og resultater fra ANS. Ettersom Metode B er en tilnærmet metode for Metode A, blir denne hovedsakelig sammenlignet med Metode A. Resultatene blir gjennomgått metode for metode, med følgende underpunkter:

- Metode A med Modell A fra ITU-R P. 676 annex 1, linje for linje simuleringer
 - o Tidsserie for gassdemping 6-11 timer frem i tid
 - o Tidsserie for gass-, og skydemping (filtrert) 6-11 timer frem i tid
 - o Statistikk og nøyaktighet
 - o Feil og presisjon
 - o Simulert gassdemping 0-5 timer frem i tid
- Metode B med Modell B fra ITU-R P. 676 annex 2, tilnærmede simuleringer
 - o Tidsserier for tilnærmet gassdemping
 - o Statistikk og nøyaktighet
 - o Feil og presisjon
 - o Simulert gassdemping ved bruk av tidligere versjoner av Modell B

6.1 Nivåjustering

Ettersom målingene av peilesignalet fra satellitten ikke er kalibrerte er det ikke mulig å identifisere den målte sky-, og gassdemping direkte. Det er heller ikke mulig å fastslå absoluttverdien for denne dempingen. For å sammenligne målt peilesignal og beregnet demping er det derfor nødvendig å gjøre antagelser om hvor målt og simulert peilesignalnivå forventes å være like. En slik antagelse gir mulighet til å justere beregninger av demping til et simulert signalnivå som kan sammenlignes med målte resultater eller vice versa.

Målt signalstyrken etter filtrering for korttidseffekter er hovedsakelig påvirket av atmosfæriske effekter i skyer og gass. For å minimere usikkerheten til nivåjusteringen av målingene gjøres dette når kun gassdemping påvirker sammenligningen av målte og beregnede verdier. Til å vurdere når skyfrie tidspunkter forekommer er følgende kilder tilgjengelig:

- Webkamerabilder fra målestasjonen på Isfjord Radio.
- Historiske værobservasjoner fra værstasjon på Longyearbyen lufthavn, om lag 48 km nord-nordøst for Isfjord Radio og signalbanen.
- Simuleringsresultater for skydemping på satellittforbindelsen.

Av 57 tilgjengelige webkamerabilder som er lagret i sammenligningsperioden viser kun to tilsynelatende skyfrie forhold ved tidspunktene 8. mars 2016 klokken 12 og 2. august 2016 klokken 13, som vist henholdsvis til venstre og høyre i Figur 6.2. Kameraet peker imidlertid motsatt vei av antennen og bildene får derfor begrenset verdi.



Figur 6.2 Tilsynelatende skyfrie dager ved målestasjon på Isfjord Radio.

Historiske værobservasjoner viser at det der var stabilt skyfritt ved Longyearbyen lufthavn 6-9. mars, det finnes også en skyfri periode 30 mars til 1 april. 2. august forekommer det imidlertid skyer ved flyplassen [30]. Tilgjengelige simuleringsresultater basert på AROME Arctic data, samt ANS resultater viser også at det ikke forekommer skydemping på disse tidspunktene, uten observerte skyer ved Longyearbyen lufthavn.

Tidspunktene 8. mars klokken 12 og 31. mars klokken 12 er midt i de skyfrie periodene og benyttes som nullpunkt for sammenligning av målt peilesignal og beregnet demping. Ved nullpunktet antas det at peilesignalmålinger ikke er utsatt for stor atmosfærisk påvirkning annet enn fra gassdemping. Terskelverdi for nivåjustering beregnes ved å subtrahere beregnet gassdemping, A_{gass} , fra målt peilesignal, $P_{Simulert}$, som vist Formel 6.1 Beregningen tar utgangspunkt i målt peilesignalnivå, $P_{Målt}$, ved de skyfrie tidspunktene.

$$P_{Målt(skyfritt)} = P_{Simulert(skyfritt)} \quad 6.1$$

$$Terskel = -P_{Målt(skyfritt)} - A_{gass}$$

Tabell 6.1 viser beregnede terskelverdier for at simulert, og målt signal skal ha samme nivå ved nullpunktene. Terskelverdi er beregnet for tidsseriene der AROME Arctic data er benyttet inntil 5 timer fra prediksjonstidspunkt og fra 6-11 timer fra prediksjonstidspunkt.

Tabell 6.1 Terskel [dB] for sammenligning av simulerte og målte verdier

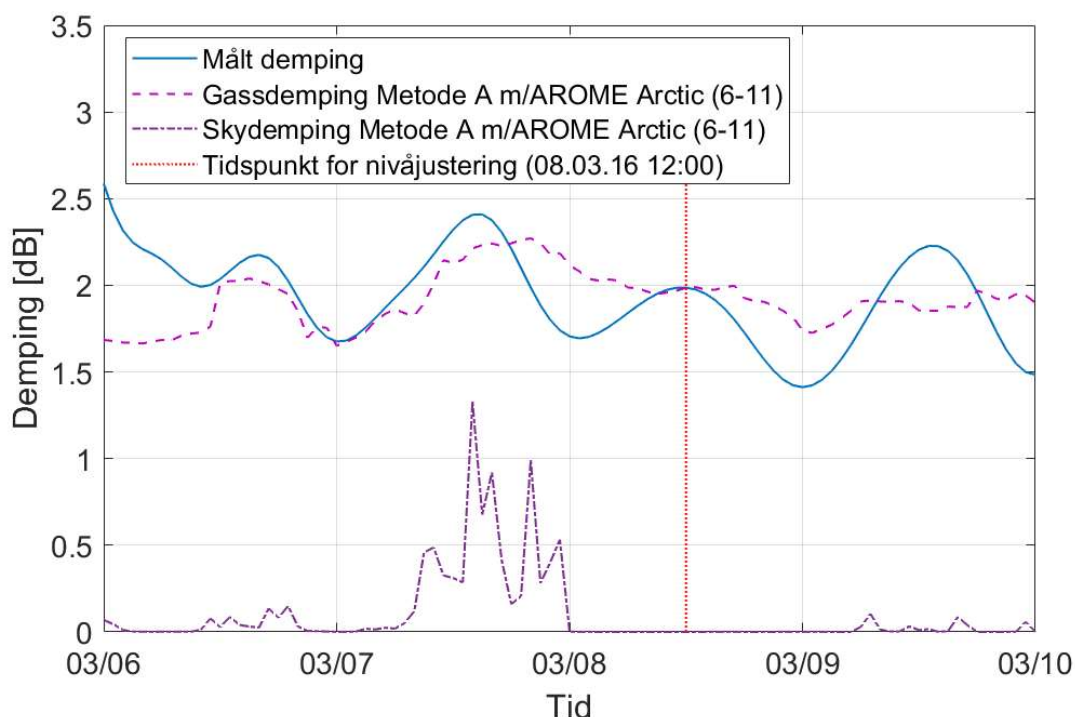
	08.03.2016 12:00	31.03.2016 12:00
AROME Arctic 0-5	61,3328	61,5652
AROME Arctic 6-11	61,2440	61,5600
Middelverdi	61,2884	61,5626

Tabellen viser at beregnede terskelnivåer varierer. Det er utfordrende å velge objektivt beste nivåjustering ettersom det ikke foreligger en kalibrert referanse. En mindre unøyaktighet i valg av nivåjusteringsterskel påvirker imidlertid sammenligningen som skal gjøres i liten grad. Med ønske om å primært benytte simuleringresultater basert på AROME Arctic data 6-11 timer frem, velges terskelverdi 61,244 dB ved nivåjusteringstidspunkt til 08.03.16 klokken 12.

Ved sammenligning av tidsserier er det enklere å forholde seg til sammenligning av målt og simulert dempingsnivå, enn målt og simulert signalnivå. Målt demping, $A_{M\grave{a}lt}$, beregnes med utgangspunkt i peilesignalmålinger og terskel for nivåjustering som vist i Formel 6.2. Målt dempingsnivå vil representere summen av gass-, og skydemping.

$$A_{M\grave{a}lt} = -P_{M\grave{a}lt} - T_{erskel} \quad 6.2$$

Figur 6.3 viser utsnitt av de målte og simulert tidsseriene relativt til hverandre ved nullpunktet etter nivåjustering på 61,244 dB. Det vises også at det er modellert skyfrie forhold langs signalbanen for nivåjusteringstidspunktet.



Figur 6.3 Simulert demping og nivåjustert målt demping ved tidspunkt for nivåjustering.

Plot rundt nivåjusteringstidspunktet viser også at nivåjustering ikke fremstår entydig i perioden uten skyer. Valg av terskel er også vurdert ved å gjøre små variasjoner i terskelverdi for så å undersøke tidsseriens systematiske feil etter tilsvarende variasjoner i nivåjustering, uten at dette fører til signifikant forbedring.

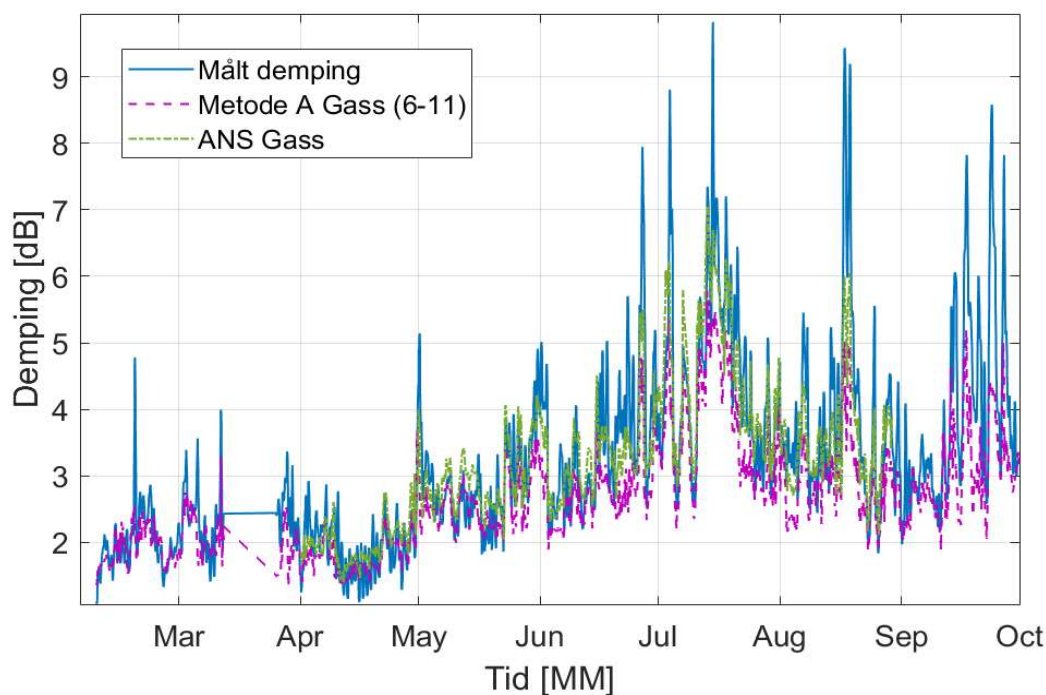
6.2 Metode A

Resultatene fra beregning av demping med Metode A og AROME Arctic inngangsdata sammenlignes her med referansemålingene. Hensikten med sammenligningen er å vurdere om simuleringene er i stand til å gjenskape, og dermed forutsi, propagasjonsforhold i troposfæren. ONERA har allerede vist at det er mulig å gjenskape troposfæriske forhold tilbake i tid ved reanalyse av værprediksjoner og værobservasjoner og bruk av ANS. Simuleringsresultater fra ANS på samme forbindelse i samme periode benyttes derfor også som referanse.

Delkapittelet deler opp sammenligningen av simuleringsresultatene og den målte dempingen. Først benyttes resultater fra Metode A basert på AROME Arctic data for 6-11 timer frem i tid, som har størst tillit. Deretter benyttes resultater fra Metode A basert på AROME Arctic data for 0-5 timer frem i tid.

6.2.1 Tidsserie for gassdemping 6-11 timer frem i tid

Gassdempingsresultater 6-11 timer frem i tid fra Metode A og fra gassdempingsresultater fra ANS sammenlignes med nivåjusterte referansemålinger i Figur 6.4. Merk at nivåjustering fra målt peilesignal til målt demping er gjennomført med resultater fra Metode A, og at tidsserien som er tilgjengelig for ANS resultatene kun strekker fra april til september. Perioden i mars hvor is på antennen ødela peilesignalmålingene er tatt ut av sammenligningen.

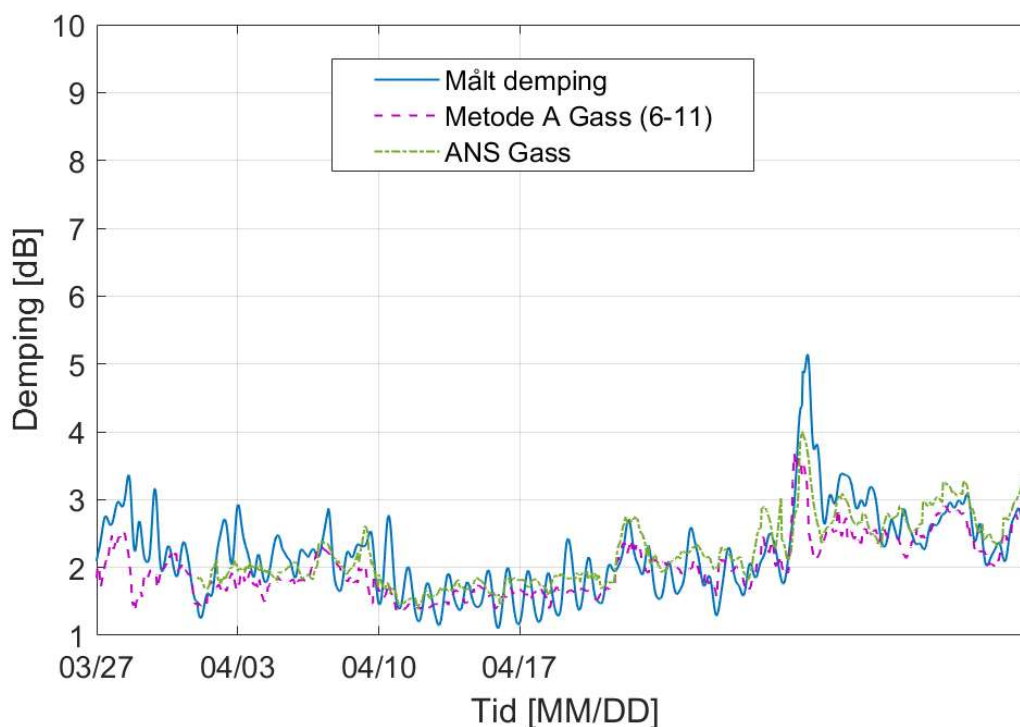


Figur 6.4 Tidsserie for beregnet gassdemping, sammenlignet med målt demping og ANS gassdempingsreferanse.

For å få et bedre inntrykk av korrelasjonen mellom de ulike tidsseriene velges tre utsnitt som eksempelperioder med følgende egenskaper og utstrekning:

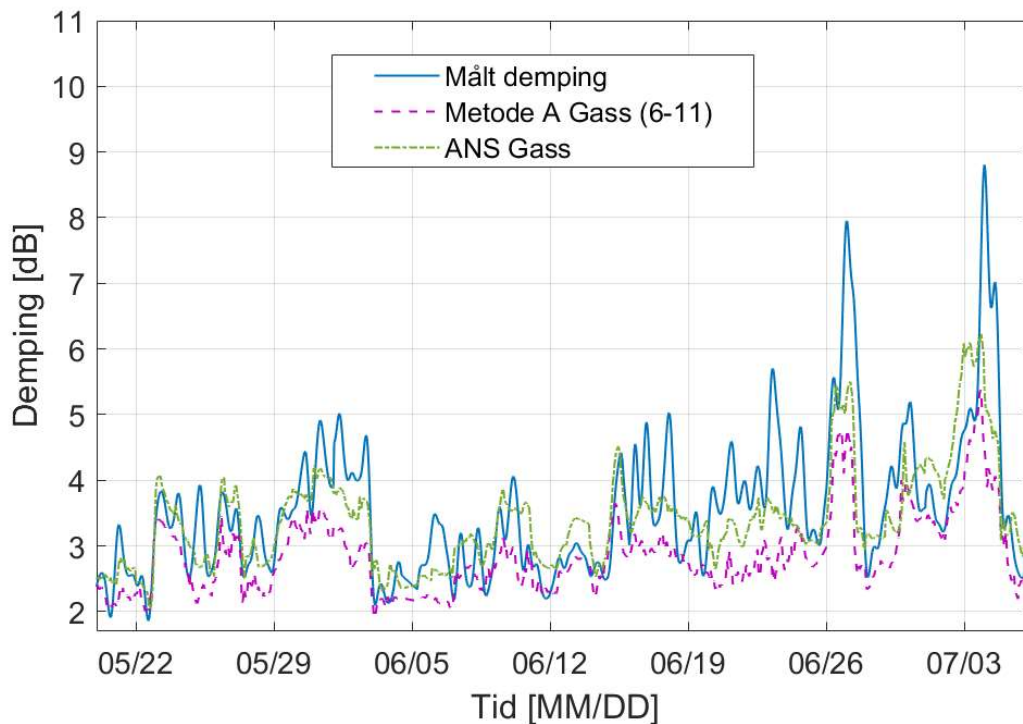
- Periode 1 med lav demping, 27. mars – 12. mai
- Periode 2 med hurtige variasjoner, 20. mai til 6. juli.
- Periode 3 med hurtige variasjoner og høy demping, 8. juli til 24. august.

Figur 6.5, Figur 6.6 og Figur 6.7 viser tidsseriene for målt demping og simulert gassdemping i utvalgte perioder der variasjonene i målingene er store.



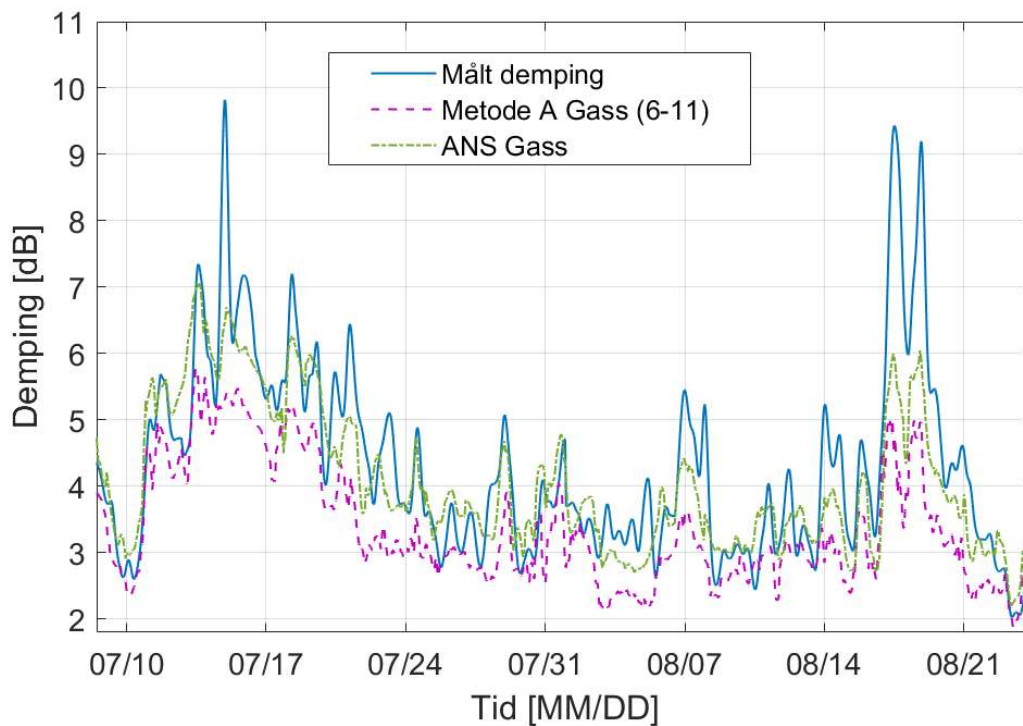
Figur 6.5 Tidsserier for beregnet gassdemping, sammenlignet med referansemålinger i periode 1.

For utdrag av tidsserie i periode 1 med generelt lav demping fremgår det at simulerte resultater for gassdemping følger variasjonene i tidsserien godt. Enkelte av de større variasjonene i tidsserien blir underestimert i Metode A simuleringene. Periodiske variasjoner i målt signal rundt 17. april kan ikke forklares med modellert gassdemping.



Figur 6.6 Tidsserier for beregnet gassdemping, sammenlignet med referansemålinger i periode 2.

For utdrag av tidsseriene i periode 2 med hurtige variasjoner i målt demping fremgår også at simulerte resultater korrelerer godt med målinger ved at det modellerte middelnivået følger de langsomme variasjonene i det målte signalet, men at variasjonenes omfang ikke gjenskapes.



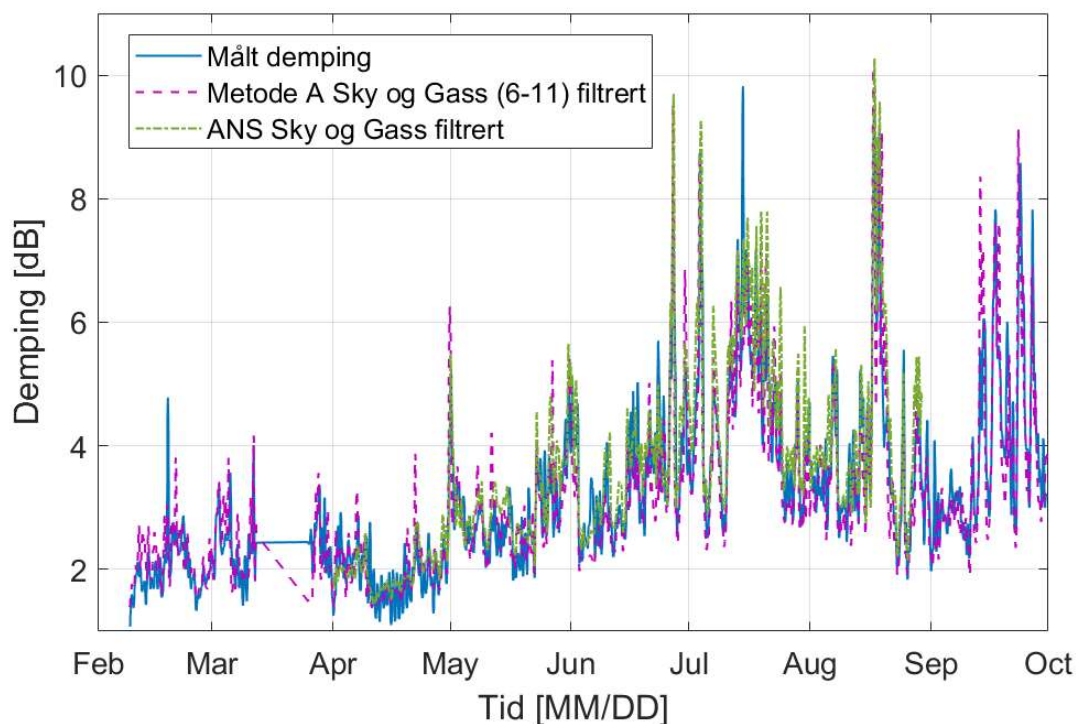
Figur 6.7 20. Tidsserier for beregnet gassdemping, sammenlignet med referansemålinger i periode 3.

Utdrag av tidsseriene i periode 3 med høyt dempingsnivå og hurtige variasjoner i målt demping viser også høy grad av korrelasjon mellom målte og simulerte resultater. Simulert gassdemping indikerer at gassdempingen varierer opptil så mye som 3 dB innen få dager. En økning av demping på 3 dB tilsvarer at signalstyrken som når bakkestasjon halveres. For det målte signalet er variasjonene så store som 7 dB over kun få dager.

Kompensasjon for varierende demping for å unngå brudd i forbindelsen kan enten gjøres ved en statisk margin i linkbudsjettet eller fortløpende tilpasning av forbindelsen som tillater høyere utnyttelse i perioder med lavere demping. Det finnes automatisk funksjonalitet for satellittkommunikasjon som kan kompensere for endrede propagasjonsforhold, for eksempel adaptiv koding og modulasjon (ACM) av signalet. Ved bruk av ACM vil mer robust koding og modulasjon bli benyttet dersom signal til støyforholdet minker, konsekvensen av dette er at dataraten reduseres. Kjennskap til dempingsfenomenene og mulighet til simulering frem i tid vil gi mulighet til å forutsi kapasiteten på forbindelsen. Ved mulighet for å modellere større variasjoner med tilstrekkelig presisjon er potensialet stort. Over er det vist at gassdempingen kan variere så mye som 3 dB innenfor relativt kort tid. Å tilpasse forbindelsen for en reduksjon i demping på 3 dB vil i praksis bety en potensiell økning i datarate på opptil 50 % i henhold til satellittkringkastingsstandarden DVB-S2 [31].

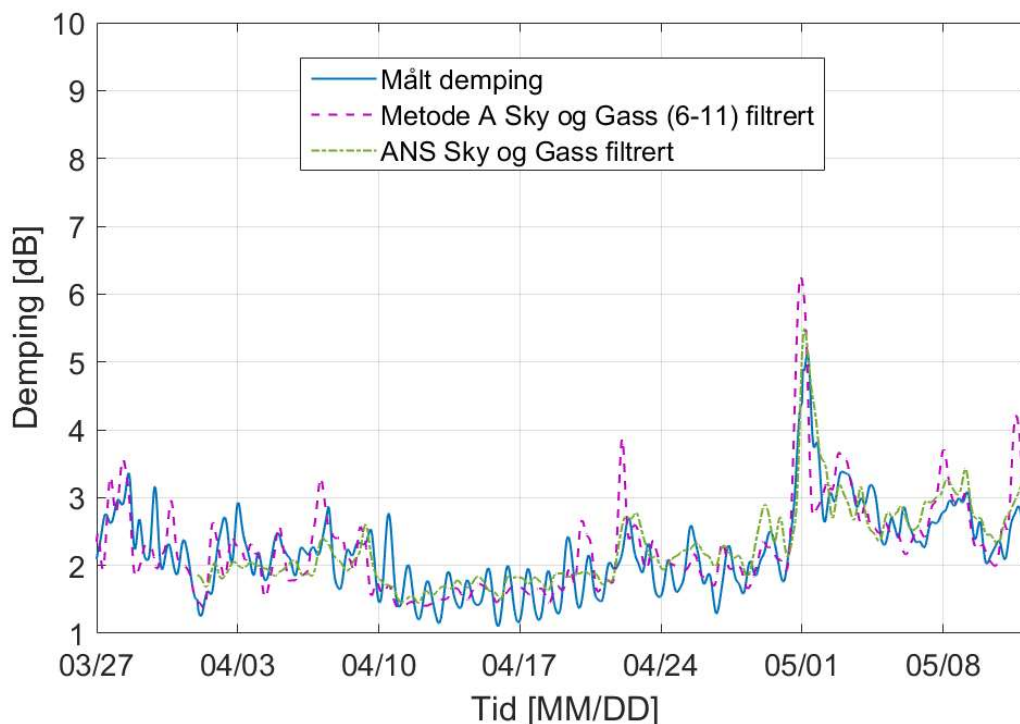
6.2.2 Tidsserie for sky-, og gassdemping 6-11 timer frem i tid

For å komplettere sammenligningen av gassdemping og målt demping blir skydemping modellert og lagt til den modellerte gassdempingen i Metode A. Tidsserier for total demping som følge av skyer og gass fra Metode A og ANS filtreres på samme måte som de eksperimentelle målingene for å gi en best mulig sammenligning med den målte dempingen. Figur 6.8 viser tidsseriene for hele sammenligningsperioden som beskriver total modellert demping, sammenlignet med samme nivåjusterte dempingsmålinger som i kapittel 6.2.1.



Figur 6.8 Tidsserie for beregnet sky-, og gassdemping i hele sammenligningsperioden, sammenlignet med målt demping og ANS sky-, og gassdempingsreferanse.

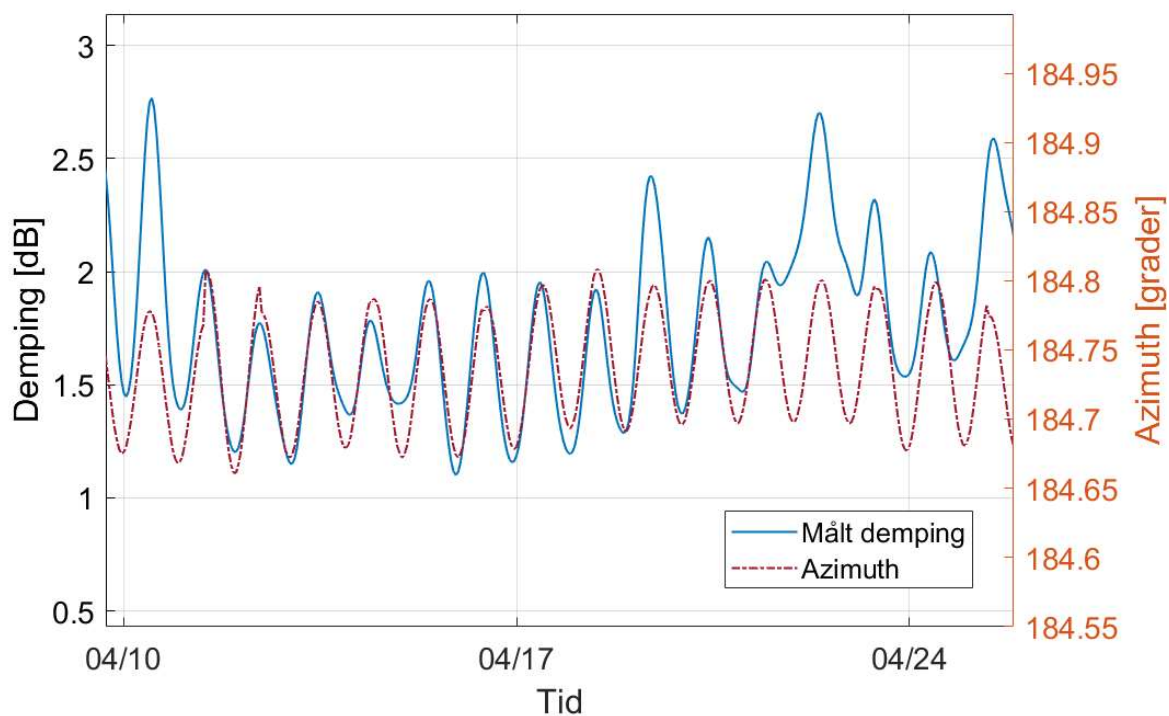
Ved å se på plottet av hele sammenligningsperioden dannes et helhetsinntrykk av svært god korrelasjonen mellom målt og simulert demping, både i tid og i omfang. For å få et bedre inntrykk av detaljene undersøkes samme utsnitt som i punkt 6.2.1, i Figur 6.9, Figur 6.11 og Figur 6.12.



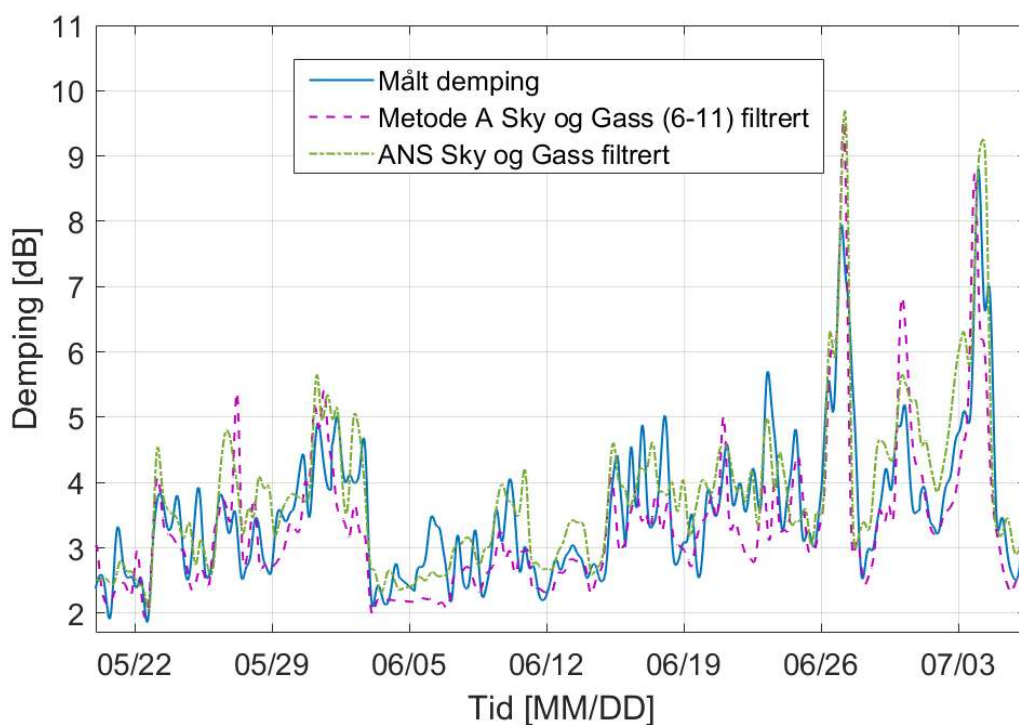
Figur 6.9 Tidsserier for beregnet sky-, og gassdemping sammenlignet med referansemålinger i periode 1.

For utsnitt for periode 1 med generelt lav demping fremgår det at simulerte resultater for simulert demping følger variasjonene i den målte tidsserien godt. Enkelte av de større variasjonene i tidsserien blir nå overestimert i Metode A simuleringene.

Periodiske variasjoner i målinger rundt 17. april, uten tilsvarende variasjon i beregnet sky-, og gassdemping bemerkes å ikke kunne forklares med dempingsfenomener langs signalbanen. Etter å ha sett at satellittens bevegelse var stor nok til å gi signifikant utslag på antennens forsterkning, undersøkes det om det kan være en sammenheng. Beregnet konsekvens av satellittbevegelsen har samme størrelsesorden som de hittil uforklarlige signalvariasjoner som observeres her. Figur 6.10 viser at de periodiske variasjonene i målt demping har samme frekvens og fase som variasjonene for geometrisk pekeretning fra Isfjord Radio til Ka-sat. Pekeretningens periodiske variasjon er vist som variasjoner i azimuth, som er representative for variasjonens frekvens og fase. Den geometriske pekeretningen fra antenne til satellitt varierer som en konsekvens av satellittens bevegelse, og ettersom antennens pekeretning er statisk kan dette derfor være en forklaring på målte variasjoner. Det er ikke funnet annen forklaring for periodiske variasjoner i målinger rundt 17/4, og oppsiktsvekkende mange variasjoner ellers i måleserien har samme periode og fase som satellittens bevegelse. Dette gjelder også variasjoner rundt nivåjusteringstidspunkt i Figur 6.3.

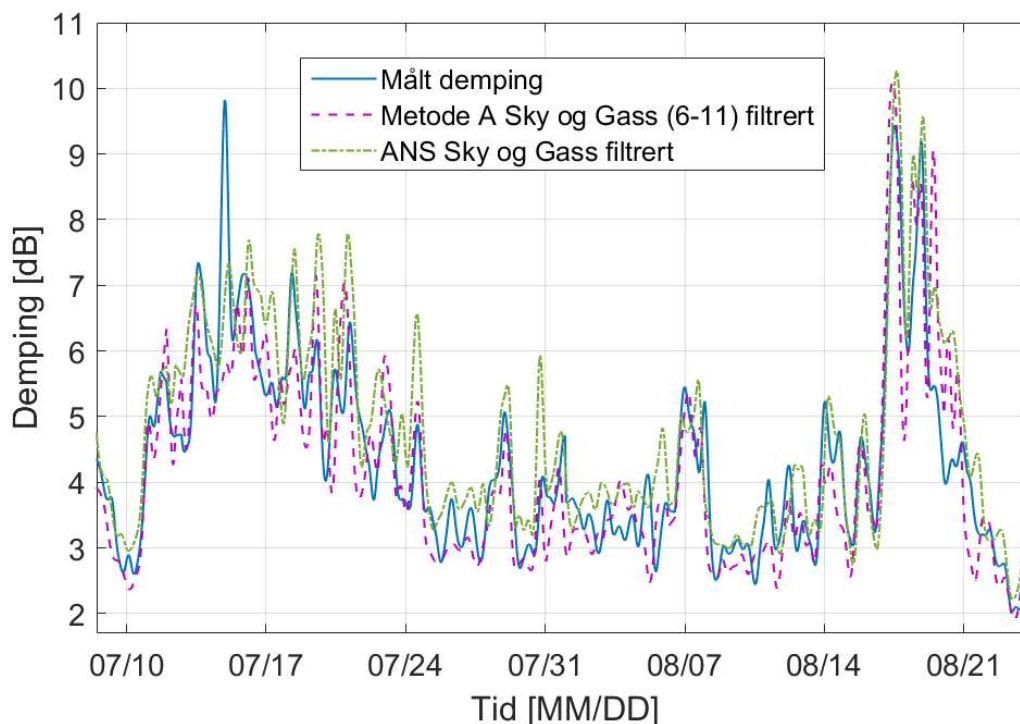


Figur 6.10 Målt demping og geometrisk azimuth fra Isfjord Radio til Ka-Sat.



Figur 6.11 Tidsserier for beregnet sky-, og gassdemping sammenlignet med referansemålinger i periode 2.

Utsnitt for periode 2 med hurtige variasjoner i målt demping viser også at simulerte resultater korrelerer svært godt med målinger og at variasjonenes omfang modelleres godt, men at det forekommer enkelte avvik.



Figur 6.12 Tidsserier for beregnet sky-, og gassdemping sammenlignet med referansemålinger i periode 3.

Utsnitt for periode 3 med høyt nivå og hurtige variasjoner i de målte dempingsresultatene viser også svært høy grad av korrelasjon mellom målte og simulerte resultater. Ved simulering av sky-, og gassdemping er det generelt små forskjeller fra referansemålingene. Simuleringene er i stand til å fange opp de relativt store målte variasjonene med meget høy nøyaktighet og presisjon, både i tid og omfang. Simuleringsresultatene gjenskaper variasjoner på inntil 7 dB med en feil på under 1 dB.

Overenstemmelsen mellom modellert sky-, og gassdemping og det målte dempingsnivået er svært god. Det er en god indikator på at gassdempingskomponenten i den modellerte totaldempingen også gjenskaper virkeligheten svært godt. Kombinasjonen av to simuleringsresultater vil skape en større usikkerhet ved sammenligning med en enkelt referanse enn det som ville vært tilfelle dersom det var mulig å isolere gassdemping i målte verdier og sammenligne dette direkte med simulerte gassdemping.

Metode A synes også å modellere dempingsforholdene frem i tid med like høy presisjon som ANS har klart å gjenskape tilbake i tid. Tatt i betraktning at ANS benytter reanalyserte værmodell-, og værobservasjonsdata, og at Metode A benytter predikerte værdata for 6-11 timer frem i tid, er dette oppsiktsvekkende.

Systematisk tidsforskyvning mellom målt og modellert demping var i utgangspunktet forventet ved bruk av predikerte værdata. Bakgrunnen for dette er at oppløsningen og nøyaktigheten til

AROME Arctic kunne medføre en systematisk forskyvning mellom tidspunkt for predikerte værforhold og tidspunktet for når de meldte forholdene inntreffer. Overenstemmelsen i tid mellom modellerte og målte resultater er imidlertid så god at det ikke synes hensiktsmessig å undersøke en krysskorrelasjonen for å finne en eventuell systematisk tidsforskyvning. Av tidsserieplottene vises kun mindre feil i tid, der modellerte variasjoner både forekommer noe før og noe etter målte variasjoner. Det verdt å merke at oppløsningen til målinger og simuleringer i sammenligningen er 1 time, som i denne sammenhengen er relativt grov.

6.2.3 Statistikk og nøyaktighet

Statistikk for tidsseriene brukes for å vurdere simuleringsmetodene i prosjektet sin anvendbarhet for å modellere virkeligheten, representert av målt demping. Det er som nevnt den modellerte variabilitetens nøyaktighet og presisjon som primært kan vurderes. Statistikken består av:

- Maksimal-, minimal-, og middelvei, samt standardavvik som beskriver målt og modellert demping og deres variasjon.
- Komplementær kumulativ distribusjonsfunksjon, CCDF, som beskriver hvordan simuleringer fanger opp gassdempingens dynamikk, ved å se på andel forekomster for ulike dempingsnivåer.

Sannsynlighetsfordelingens middelvei og standardavvik for gassdemping viser forventning til omfang og spredning av beregnede og målte verdier. Differansen mellom middelveien for måleresultatene og simuleringsresultatene danner nøyaktigheten for simuleringsresultatene i forhold til måleresultatene. Denne nøyaktigheten beskriver simuleringsresultatenes systematiske avvik fra referansemålingene.

Statistikken er utarbeidet for sammenligningsperioden som er tilgjengelig fra februar til oktober 2016. Denne kunne med fordel vært lengre, helst over ett helt år og gjerne flere år. Sammenligningsperioden inneholder likevel både varm og kald periode på Svalbard og forventes å være representativ for sesongvariasjoner og årlige variasjoner. Sammenligningene som er gjennomført i delkapittelet er delt i to perioder, hele sammenligningsperioden og et utdrag hvor det finnes ANS referanserresultater, fra april til september 2016. Sistnevnte periode er benyttet der hvor ANS resultater er inkludert i sammenligningene, om ikke annet er spesifisert.

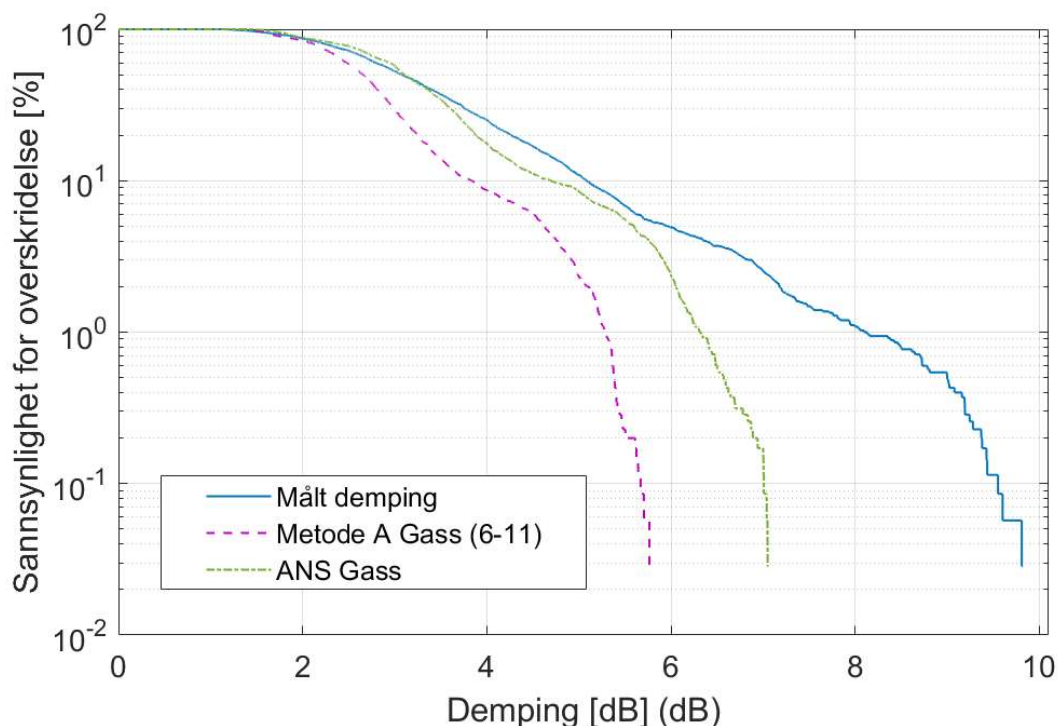
Tabell 6.2 Statistisk sammenligning av tidsserier for gass-, og skydemping

Tidsserie	Periode	Middel [dB]	Std [dB]	Maks [dB]	Min [dB]	Maks-Min
Målt demping	apr-sep	3,35	1,38	9,82	1,10	8,72
Metode A Gass	apr-sep	2,75	0,83	5,78	1,35	4,43
ANS Gass	apr-sep	3,25	1,07	7,06	1,40	5,66
Metode A Sky og Gass f.	apr-sep	3,24	1,35	10,09	1,37	8,72
ANS Sky og Gass f.	apr-sep	3,63	1,51	10,28	1,45	8,83
Målt demping	feb-okt	3,22	1,38	9,82	1,07	8,75
Metode A Gass	feb-okt	2,66	0,81	5,78	1,35	4,43
Metode A Sky og Gass f.	feb-okt	3,15	1,36	10,09	1,37	8,72

Tidsseriesammenligningen viser en svært god korrelasjon i både tid og omfang for variasjoner av sky-, og gassdemping, både for resultater fra Metode A og ANS. Tabell 6.2 viser at middelverdiene fra Metode A har en nøyaktighet på -0,07 dB, relativt til middelverdien for de målte referanseverdiene i hele sammenligningsperioden fra februar til oktober. Nøyaktigheten for ANS referansen som inkluderer sky-, og gassdemping er +0,28 dB for den forkortede perioden fra april til september. Metode A har nøyaktigheten -0,11 dB i tilsvarende periode. Nivåjusteringen av referansemålingene er riktignok utført i forhold til Metode A.

Det dynamiske området til den modellerte sky-, og gassdempingen er tilnærmet likt det dynamiske området for det målte signalet. Samtidig er det ulikheter for det dynamiske området for gassdemping mellom Metode A og ANS resultater, og følgelig vil dette også gjelde for skydempingsresultater fra Metode A og ANS. Det dynamiske område for gassdemping er størst i ANS resultater og for skydempingsresultater er det størst i resultatene fra Metode A. Intuitivt synes tillitten til den samlede variabiliteten for sky og gassdemping fra Metode A å være høy, ettersom disse resultatene kombinerer to uavhengige dempingsmodeller for sky-, og gassdemping og har så god korrelasjon med referansemålingene. En forklaring på ulikhetene mellom resultatene fra Metode A og ANS kan være at værmodellen WRF-ARW og de represserte dataene som benyttes i ANS gir en annen fordeling av fuktigheten mellom luftfuktigheten og det kondenserte vannet i skyene, enn det som AROME Arctic predikerer.

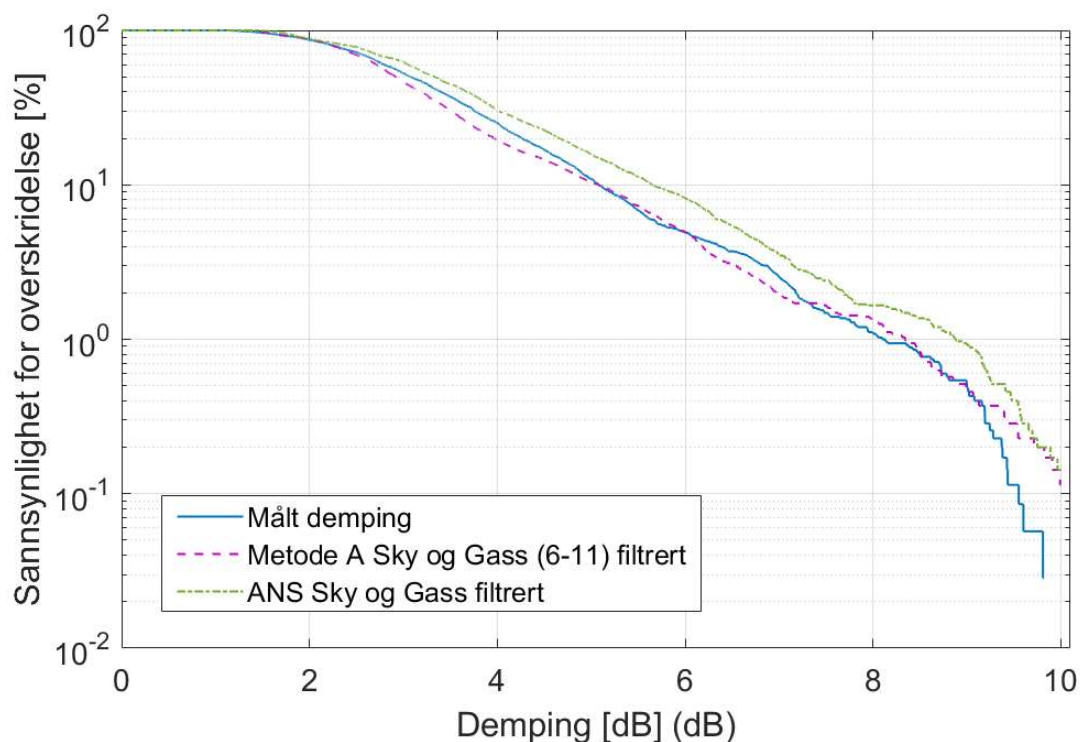
Komplementær kumulativ distribusjons funksjon, CCDF, beskriver sannsynlighet for at gassdempingen er mindre eller lik et gitt nivå. CCDF benyttes her for å vise andel forekomster av gassdemping på et gitt nivå eller høyere, med oppløsning 0,01 dB. CCDF er et godt verktøy for objektiv statistisk sammenligning av tidsserier. Figur 6.13 sammenligner CCDF for målt demping og beregnede gassdempingsresultater fra Metode A og ANS.



Figur 6.13 CCDF for målt demping og modellert gassdemping i perioden fra april til september 2016.

CCDF som beskriver gassdemping viser et betydelig sprik i modellerte gassdempingsnivåer relativt til referansemålingene. Denne inverskumulative fremstillingen av modellert gassdemping og målt demping viser overenstemmelse inntil 20 % av tiden. Dette vises ved at sannsynligheten for overskridelse av dempingsnivåene som forekommer fra 80 til 100 % av tiden er tilnærmet like. Utover dette blir differansen større, som kan forklares med forekomst av skyer.

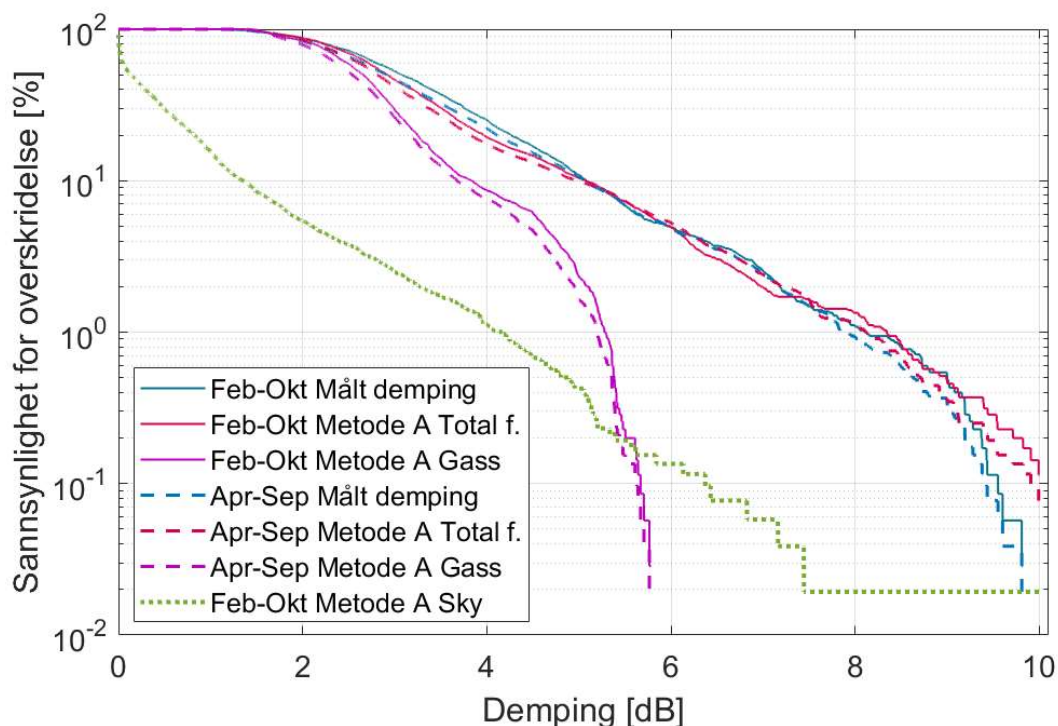
Det var ved analyse av overenstemmelsen mellom modellert gassdemping og målt referanse, og spesielt ved forsøk på å forklare CCDF i Figur 6.13 behovet for å utvide prosjektet til å inkludere modellering av skydemping ble tydelig. Som nevnt tidligere er skyer tilstede inntil 88 % av tiden på Svalbard. CCDF for modellert total sky-, og gassdemping sammenlignes med CCDF for målt demping i Figur 6.14. CCDF for simuleringsresultater som inkluderer både sky-, og gassdemping og har en særdeles god treff i forhold til CCDF for målt demping. Det er derfor tydelig at forskjellen mellom simulert gassdemping og målt demping består i skyeffekter. Dette understøtter også konklusjonen fra tidsseriesammenligningen i at den predikerte dempingen som følge av skyer og gass forutsier variasjonene i forholdene som faktisk forekommer med høy nøyaktighet og presisjon. Det betyr at Metode A er i stand til å predikere dempingsforholdene som følge av gass og skyer 6-11 timer frem i tid.



Figur 6.14 CCDF for målt og modellert sky-, og gassdemping (filtrert) for perioden april til september 2016.

Sammenlignende statistikk har hittil inkludert ANS resultater som foreligger for perioden april til september 2016. Det har derfor vært hensiktsmessig å benytte resultater fra Metode A og målinger fra samme periode. Statistikk for den totale sammenligningsperioden fra februar til oktober 2016 sammenlignes med perioden med ANS resultater, fra april til september i Figur 6.15. Denne sammenligningen viser at resonnementene som beskriver perioden fra april til september også er representative for den totale perioden fra februar til oktober.

Figur 6.15 viser også CCDF for skydempingsresultatene og viser forekomst av skyer på forbindelsen. At det er 67-88 % skydekke på Svalbard som tidligere beskrevet er basert på henholdsvis satellittdata for 2014 og AROME Arctic prediksjoner for 2018. Det tilhørende kriteriet for når det forekommer skyer er at himmelen har mer enn 0 % skydekke [29]. Av CCDF for skydemping fremgår det at det er skyer til stede langs signalbanen om lag 80 % av sammenligningsperioden. Skyenes omfang og dertil skyenes demping på satellittsignalet varierer utover dette, for ulike andeler av tiden.



Figur 6.15 Sammenligning av CCDF for hele-, og utdrag av sammenligningsperioden i 2016.

Prosjektet har demonstrert muligheten til å utarbeide statistikk for historiske satellittforhold og predikere fremtidige satellittforhold basert på numeriske værprediksjoner fra AROME Arctic. Denne muligheten representerer et tydelig fremskritt innen planleggingsmuligheter for satellittforbindelser i Arktis. Det er også forventet at prosjektets resultater er overførbart til satellittsystemer som ikke nødvendigvis er langt nord eller benytter satellitter i geostasjonær bane.

På lang sikt kan satellittsystemer bruke denne muligheten til å skalere effektbehovet på satellittene i systemet. På kortere sikt, representerer dette muligheten til å øke den operasjonelle utnyttelsen av satellittsystemer ved å prioritere satellittens effekt i dekningsområdet basert på varierende forhold innen dekningsområdet. På kort sikt kan også brukere av satellittsystemer planlegge bruk av frekvensbånd og terminalstørrelser der dette er relevant. Militært kan dette for eksempel benyttes til å skalere nødvendig terminalstørrelse og frekvensbånd for et oppdrag, og vurdere om satellittkommunikasjon er mulig og/eller hensiktsmessig.

6.2.4 Feil og presisjon

Simulerte tidsserier og statistikk har vist svært god korrelasjon mellom simuleringsresultater fra Metode A og målte referanseverdier. I denne sammenheng er det vist at simuleringsresultatenees nøyaktighet er svært god. Resultatenees presisjon består av simuleringsresultatenees vilkårlige feil sammenlignet med referansemålingene. Simuleringsresultatenees nøyaktighet og presisjon vil sammen beskrive hvor godt de gjenskaper variasjonene som forekommer i referansemålingene. Det er derfor avgjørende å ha en forståelse av feil knyttet til predikerte dempingsforhold og feilens spredning. Ved å forstå hvor stor spredning feilen som forekommer i simuleringsresultatene har, basert på sannsynlighet er det mulig å planlegge i forhold til et tilgjengelighetskrav. Dette forutsetter en forståelse av den tilhørende nøyaktigheten, og aller helst korreksjon for den systematiske feilen som nøyaktigheten representerer.

Totalfeil beregnes for hvert tidspunkt og angis i relativ og absolutt RMS feil (RMSE), og middel absolutt feil (MAE). I tillegg angis korrelasjonskoeffisient som angir de simulerte tidsserienees samvariasjon relativt til referansemålingene.

Relativ RMS feil beregnes for å sammenligne predikerte og målte verdier for demping. Ved RMSE lik 0 er predikerte og målte signaler like. RMSE er følsomt for enkelte store avvik mellom tidsserienees som sammenlignes ettersom effekten av hver feil i RMSE er proporsjonal med roten av den aktuelle feilen. RMSE beregnes som vist i Formel 6.3 der y_i er predikert verdi, og x_i er målt referanseverdi i n punkter.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - x_i}{x_i}\right)^2}{n}} * 100 \text{ [%]} \quad 6.3$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \text{ [dB]}$$

Midlere absolutt feil beskriver ulikheten mellom predikert og målt verdi som gjennomsnittet av den punktvisse absolutte differansen. MAE beregnes som vist i Formel 6.4 der y_i er predikert verdi, og x_i er målt referanseverdi i n punkter.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \text{ [dB]} \quad 6.4$$

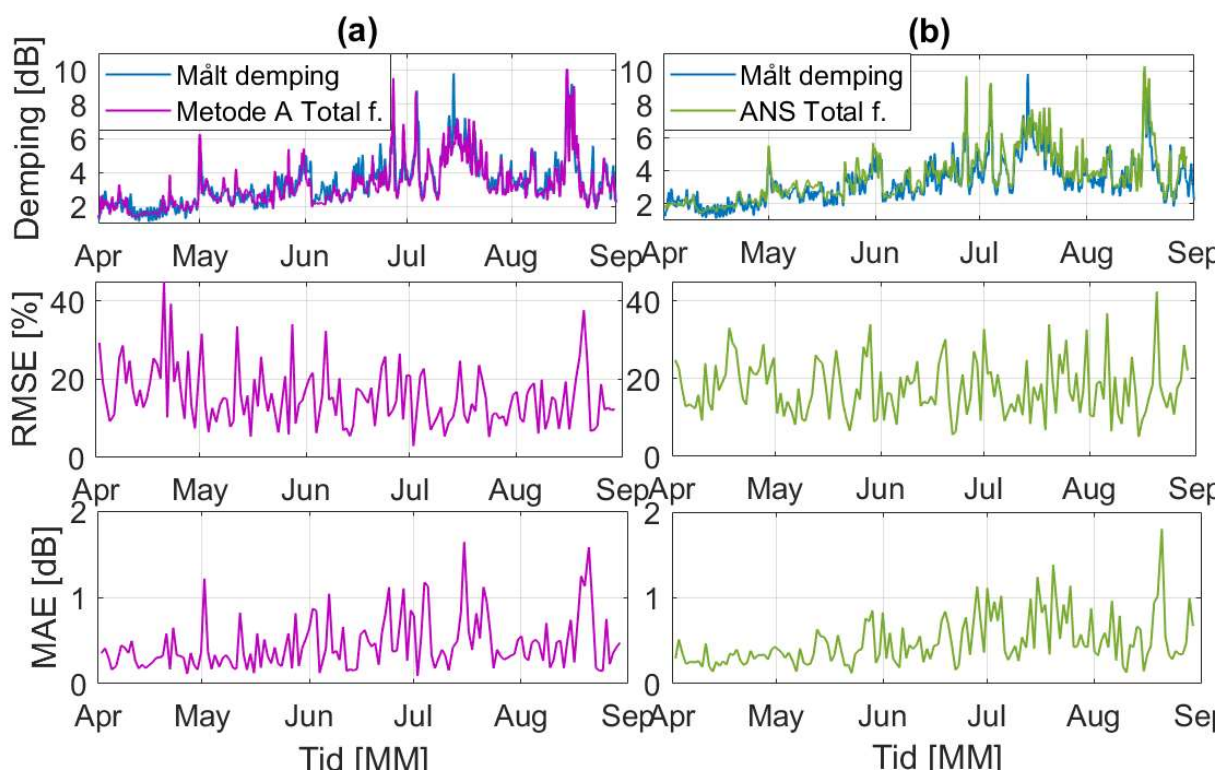
Tabell 6.3 beskriver RMSE, MAE og korrelasjonskoeffisient for de ulike simulerte tidsseriene, og for de ulike periodene det foreligger data for. Det fremgår at alle tidsseriene samvarierer i svært stor grad, med en korrelasjonskoeffisient på 0,86-0,92. Feilen tilknyttet tidsseriene som kun beskriver gassdemping har mindre differanse til feilen som er knyttet til tidsseriene som beskriver total sky-, og gassdemping enn forventet. Denne forventingen kommer av observasjoner i tidsseriene og i forhold til nøyaktighet. Begge disse viser at simuleringresultatene som inkluderer både sky-, og gassdemping ligger mye nærmere den målte referansen enn simuleringresultatene som kun tar høyde for gassdemping.

Tabell 6.3 Feil for modellert gass-, og skydemping

Tidsserie	Periode	RMSE [%]	RMSE [dB]	MAE (dB)	Korrelasjon
Metode A Gass	apr-sep	20,88	0,97	0,66	0,87
ANS Gass	apr-sep	17,23	0,67	0,48	0,88
Metode A Sky og Gass f.	apr-sep	17,29	0,65	0,45	0,89
ANS Gass og Sky	apr-sep	19,10	0,65	0,49	0,92
Metode A Gass	feb-okt	20,60	0,96	0,63	0,88
Metode A Sky og Gass f.	feb-okt	20,02	0,74	0,50	0,86

Det fremgår i tabellen at relativ feil i perioden fra april til september er lavere enn i perioden fra februar til oktober. Den absolutte feilen, og samvariasjonen er tilnærmet lik for de to periodene. Det viser at sammenligningen som er gjort for den kortere perioden, for å kunne inkludere ANS resultatene, også er representativ for den forlengede perioden. Det forventes i forlengelsen av dette at prosjektets resultater er representative for perioden etter sammenligningsperioden og for fremtidig bruk. Ved bruk av resultatene er det likevel verdt å se på værstatistikk for sammenligningsperioden i 2016 relativt til normale middelerverdier og utvikling i regionen, samt relativt til andre geografiske steder dersom det er aktuelt.

For å få et bedre inntrykk av feilen i tidsserien er det i Figur 6.16 plottet tidsserier for målt og simulert demping samt relativ RMSE og MAE, beregnet per 24 timer for resultatene fra Metode A og ANS. Figuren viser at den absolutte feilen til sky-, og gassdempingsberegningene utført med Metode A er konsistente og at presisjonen er sammenlignbar gjennom hele perioden. For ANS fremgår det at den relative feilen er større i perioder med lav demping, noe som kan settes i sammenheng med høye estimer for gassdemping som ble nevnt tidligere.



Figur 6.16 Sammenligning av tidsserier for målt og beregnet totaldemping (filtrert), med tilhørende RMSE og MAE (per 24 t) for Metode A (a) og ANS (b).

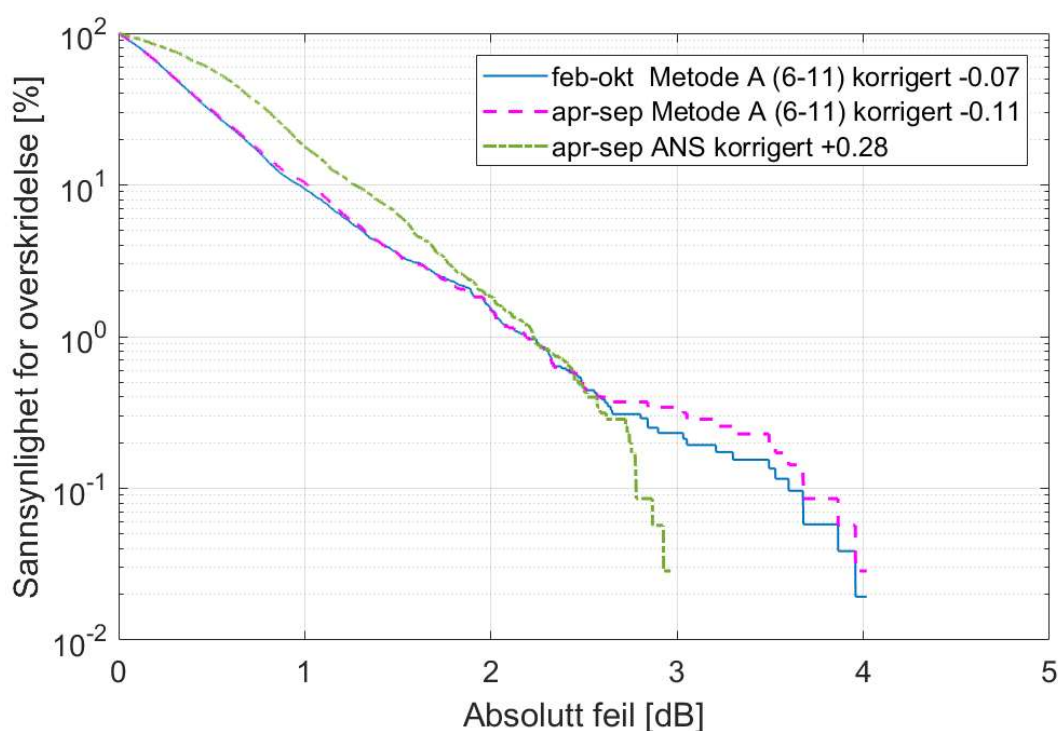
Det er avgjørende å ha et forhold til den forventede vilkårlige feilen i de predikerte satellittforholdene dersom disse skal benyttes for dynamisk tilpasning av satellittforbindelsen. Ved å ha et forhold til sannsynligheten for den vilkårlige feilens størrelse, kan satellittforbindelsen tilpasses forventet feil basert på tilgjengelighetskravet.

For å få et forhold til simuleringenes spredning og presisjon korrigeres simuleringsresultatene punktvis for den systematiske feilen (nøyaktigheten) som statistikken har vist. Deretter fremstilles CCDF for den punktvis absolutte differansen mellom simuleringsresultatene og referansemålingene. Figur 6.17 viser CCDF for absolutt feil knyttet til simulert sky-, og gassdemping, og beskriver sannsynlighet for ulike differanse mellom simulert og målt demping. Dette vil da være det samme som resultatenes vilkårlig feil eller presisjon i forhold til referansemålingene.

For å kunne angi simuleringsresultatenes presisjon må dette gjøres sammen med et konfidensintervall. Figur 6.17 benyttes for å definere presisjon for simuleringsresultatene fra Metode A innenfor sannsynligheten tilsvarende opptil 3 standardavvik, som er vist i Tabell 6.4.

Tabell 6.4 Presisjon med konfidensintervall for Metode A (6-11) for resultater i perioden fra februar til oktober

Sannsynlighet/ konfidensintervall [%]	Presisjon (absolutt feil \leq) [dB]	Tilsvarende antall standardavvik
68,27	0,48	1
95,45	1,34	2
99,73	2,84	3



Figur 6.17 CCDF for absolutt feil i simulert sky-, og gassdempings relativt til målt referanse.

Det fremgår av Figur 6.17 at Metode A har bedre presisjon enn ANS for inntil 99 % av tiden, mellom 99 og 99,5 % er presisjonen tilnærmet lik og over 99,5 % er presisjonen til ANS bedre. Det betyr at Metode A i de aller fleste tilfeller beregner sky-, og gassdemping nærmere den målte dempingen enn ANS. Ved tilgjengelighetskrav over 99,95 % ville imidlertid ANS beregningene vært foretrukket dersom disse hadde vært tilgjengelig frem i tid. At Metode A har bedre presisjon enn ANS er oppsiktsvekkende, tatt i betraktning at Metode A predikerer forholdene og ANS gjenskaper historiske forhold. I denne sammenhengen er det viktig å huske at referansen for simuleringsresultatenes presisjon er målinger med tilhørende usikkerhet, og ikke sanne verdier.

Figur 6.17 kan også settes i sammenheng med tilgjengelighetskrav, for eksempel 99 % som da gir behov for en margin på 2,19 dB. Det er under 1 % sannsynlighet for at den absolutte feilen overstiger dette nivået i sammenligningsperioden fra februar til oktober 2016 for simuleringsresultatene fra Metode A.

Å skalere margin i forhold til sannsynlighet for feil i de predikerte dempingsforholdene istedenfor sannsynlighet for den total dempingen vil føre til betydelig bedre utnyttelse av satellittforbindelsens ressurser. Resultater i CCDF for Metode A beregninger av sky-, og gassdemping i Figur 6.14 viser at det er 1 % sannsynlig at det er dempingen vil overstige 8,1 dB. Det er samtidig slik at dempingen ikke vil være mindre enn 2 dB for 20 % av tiden. Den vilkårlige feilen vil ikke overstige 2,1 dB for mer enn 1 % av tiden. Ved å utnytte denne forskjellen og kjennskap til at den vilkårlige feilens størrelse er det mulig å frigjøre 3,9 dB (8,1-2-2,2 dB) i form av mindre marginbehov for 20 % av tiden. Dette forutsetter en dynamisk tilpasning av forbindelsen når forholdene tilsier det for å innfri tilgjengelighetskravet. Denne forskjellen på 3,9 dB tilsvarer inntil 70 % økt datarate for 20 % av tiden i henhold til DVB-S2 [31].

6.2.5 Modellert gassdemping 0-5 timer frem i tid

Det er vist at simuleringene med Metode A er i stand til å forutsi prediksjonsforhold for satellittforbindelsen ved å gjenskape målte dempingsverdier med bruk av predikerte værdata for 6 til 11 timer frem i tid. Intuitivt er tillitten til værdata nærmere prediksjonstidspunktet høyere, men Metrologisk institutt opplyser om at det kan forekomme feil i predikert vanninnhold de første tre timene etter AROME Arctic dataene blir produsert, derfor har prosjektets hovedsakelig benyttet data lenger frem i tid enn dette. Det er dermed relevant å sammenligne simuleringresultatene for demping 0-5 timer frem i tid, med simuleringresultatene som beskriver demping 6-11 timer frem i tid.

Tidsserier, og CCDF er benyttet i sammenligningen og viser tilsynelatende lik nøyaktighet og presisjon for simuleringresultatene for 0-5, og 6-11 timer frem i tid. Etter å ha undersøkt nivåjusteringstidspunktet, går det frem at nivåjustering på 61,244 dB er ok for begge disse tidsseriene som er simulert med Metode A. Tabell 6.5 viser tilnærmet lik feil for gassdempingsresultatene med ulik prediksjonshorisont på inngangsdataene som er brukt. Det foreligger ikke skydempingsresultater for simuleringene 0-5 timer frem i tid, med bakgrunn i at prosjektet ble utvidet til å inkludere skydemping sent i prosjektperioden og at denne beregningsjobben er omfattende.

Tabell 6.5 Feil i simulert gassdemping relativt til målt demping for tidsseriene innenfor ulik prediksjonshorisont

Inngangsdata	Periode	RMSE [%]	RMSE [dB]	MAE (dB)	Korrelasjon
+6-11 timer	feb-okt	20,599	0,960	0,634	0,877
+0-5 timer	feb-okt	20,422	0,957	0,628	0,876

Sammenligningen av tidsseriene sannsynliggjør at data nærmere prediksjonstidspunkter har lik eller høyere presisjon. Dette er i henhold til den intuitive forventningen. Samvariasjonen er tilnærmet lik, samtidig som det er en marginalt mindre feil knyttet til simuleringene som er nærmere prediksjonstidspunktet. I undersøkelsene som er gjennomført finnes det ikke indikasjon på systematisk større feil i prediksjonsdata benyttet nærmere prediksjonstidspunktene. Med bakgrunn i dette konkluderes det med at det er mulig å predikere gassdemping fra prediksjonstidspunktet og minst 11 timer frem i tid med høy presisjon.

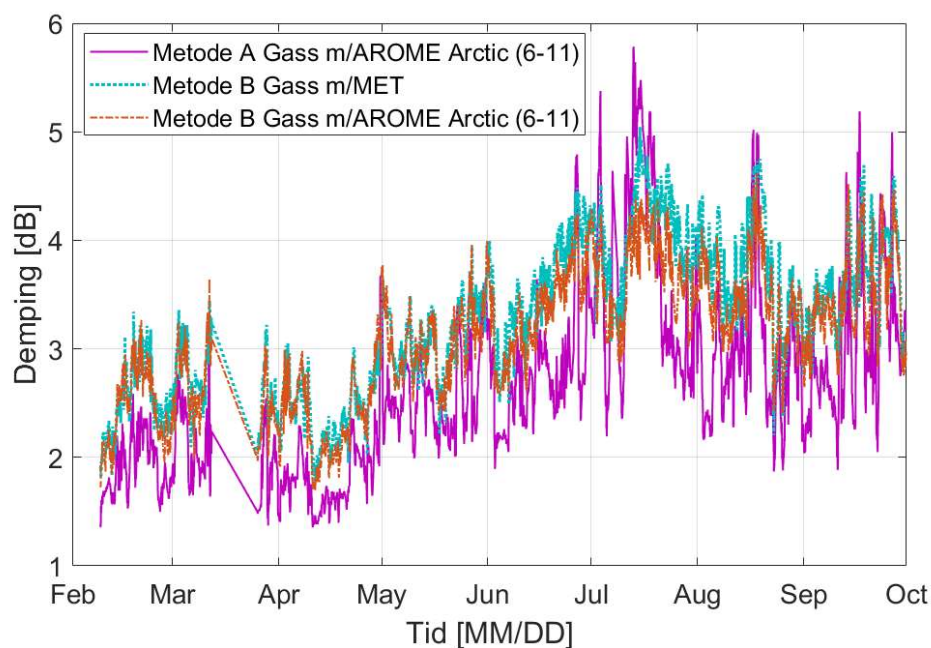
Som videre arbeid anbefales gjennomføre tilsvarende simuleringer av troposfærisk demping basert på AROME Arctic data frem til prediksjonshorisonten for AROME Arctic som er 66 timer frem i tid. Ved å gjøre dette kan det fastslås hvor langt frem det er mulig å modellere variabiliteten i dempingsmekanismene knyttet til gass og skyer med tilstrekkelig kvalitet.

6.3 Metode B

Ettersom Modell B er en tilnærmet beregningsmodell og er ment å være et mindre komplekst alternativ til Modell A er det naturlig å sammenligne simuleringsresultatene fra Modell B med simuleringsresultatene fra Modell A. Resultatene fra Metode A viser også svært god overenstemmelse med referansemålingene, som gjør disse Metode A resultatene spesielt godt egnet som referanse for Metode B. Forbindelsen som simuleringene i prosjektet skal modellere har elevasjonsvinkel 3,2 grader (geometrisk), Metode B er som nevnt ikke gyldig for elevasjonsvinkler under 5 grader. Det er imidlertid, som tidligere nevnt vist god korrelasjon ned til 3 grader på 19,5 GHz [9]. En beregning med Metode B er svært mye mindre kompleks og krever inngangsdata som er lettere tilgjengelig enn for Metode A. Det er derfor stor interesse for å undersøke hvorvidt Metode B gjenskaper resultatene fra Metode A.

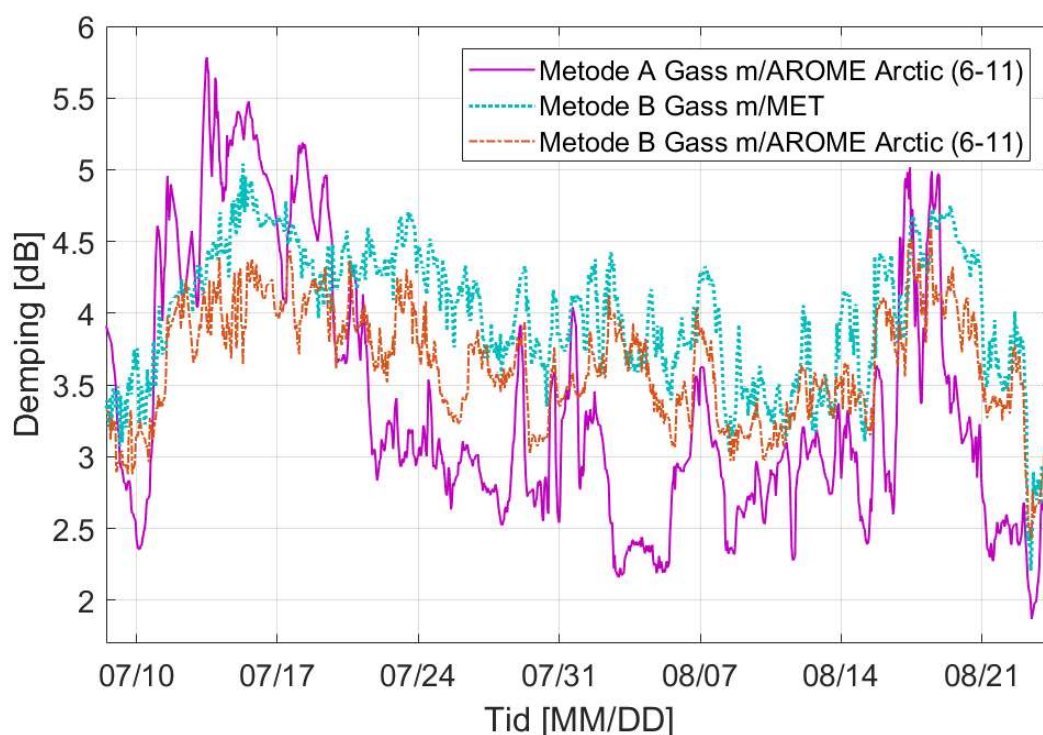
6.3.1 Tidsserier for tilnærmet gassdemping

Simuleringsresultater fra Metode A 6-11 timer frem i tid er sammenlignet med simuleringsresultater fra Metode B i Figur 6.18. Resultatene fra Metode B er basert på AROME Arctic data for bakkenivå ved Isfjord Radio for 6-11 timer frem i tid, i tillegg til Metrologisk institutt sine værobservasjoner ved Isfjord Radio.



Figur 6.18 Tidsseriesammenligning for Metode B (676-A2) og Metode A (676-A1).

Resultatene fra Metode B og Metode A viser tydelige forskjeller. Resultatene fra Metode B gir en tilsynelatende generell nivåforskjell og det mangler dynamikk i forhold til resultatene fra Metode A. Utdrag som ble valgt for periode med bakgrunn i høy demping og store variasjoner (periode 3) benyttes for å undersøke tidsserien nærmere, og er vist i Figur 6.19. Det fremgår at nivåforskjellen er betydelig, inntil mer enn 2 dB, og at variabiliteten til Metode A simuleringene ikke gjenskapes med Metode B. Dette kan forklares med at en betydelig andel av gassdempingens omfang og variasjon skyldes variasjoner i vanndampinnholdet langs signalbanen. Metode B vil ikke fange opp disse variasjonene ved kun å bruke værdata ved bakkestasjonen som grunnlag for simuleringene.



Figur 6.19 Tidsserier for simulert gassdemping 08. juli til 24. august med Metode A og Metode B.

Tidsseriene hvor både Metode A og Metode B beregninger er utført med AROME Arctic data gir best sammenligningsgrunnlag. Betragtninger rundt beregninger utført med værobservasjoner som inngangsdata bør ses i sammenheng med differansen mellom værobservasjoner og værprediksjoner som omtalt i kapittel 3, eller ved å sammenligne simuleringresultatene med referansemålingene. Selv om muligheten for beregning av gassdemping på forbindelsen med observerte bakke­data er interessant å undersøke, beskrives Metode B sin nøyaktighet og presisjon tilstrekkelig i sammenligningen basert på de predikerte værdataene.

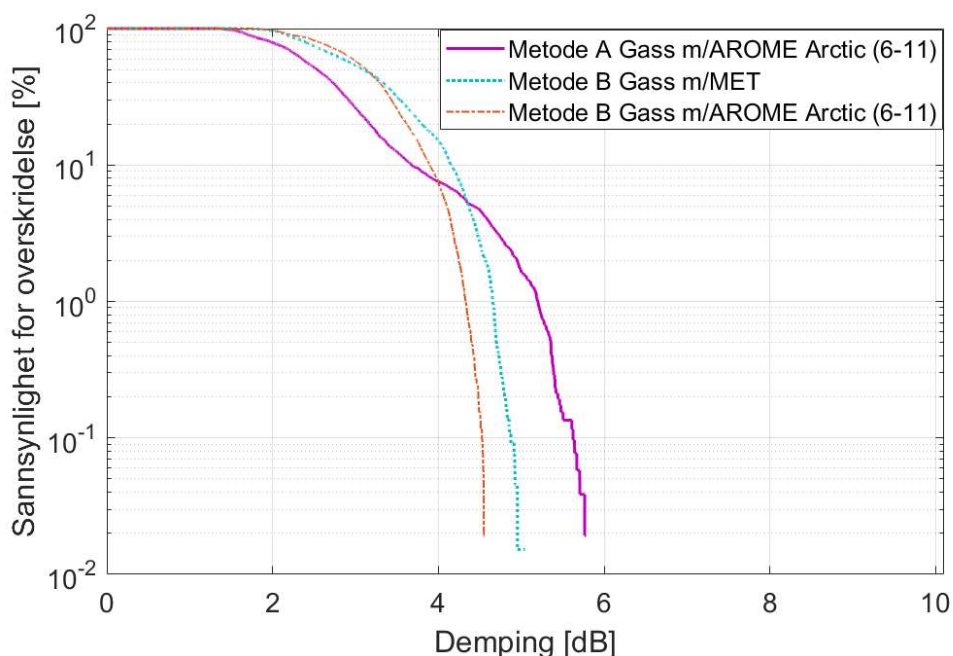
6.3.2 Statistikk og nøyaktighet

Statistikk for resultater basert på Metode B utarbeides ved sammenligning med resultater basert på Metode A. Middelverdi, standardavvik, maksimal-, minimalverdier og dynamisk område for modellert demping er vist i Tabell 6.6. Tabellen underbygger funnet av systematiske nivåforskjeller og at Metode B har et betydelig lavere, nært halvert, dynamisk område i forhold til Metode A. Metode B har likevel god nøyaktighet for gassdempingsresultatene på +0,2 dB.

Tabell 6.6 Statistikk for Metode A og Metode B beregninger av gassdemping

Tidsserie	Inngangsdata	Middel [dB]	Std. [dB]	Maks [dB]	Min [dB]	Maks-Min
Metode A	AROME	2,75	0,83	5,78	1,35	4,43
Metode B	AROME	2,9542	0,4992	4,2037	1,8761	2,33
Metode B	MET	3,2738	0,6956	5,0439	1,7716	3,27

CCDF viser den inverskumulative fordelingen for den beregnede gassdempingsens omfang i Figur 6.20. Det er tydelig at dynamikken i resultatene fra Metode A ikke gjenskapes ved bruk av Metode B, og at Metode B beregninger vil medføre stor vilkårlige feil uavhengig av eventuell nivåjustering av resultatene. Presisjonen til Metode B vil derfor være for dårlig til å benyttes for å predikere gassdemping



Figur 6.20 CCDF for gassdemping beregnet med Metode B og Metode A.

CCDF for Metode B resultater kan forklare antagelse om konstant gassdemping, ved at et tenkt tilgjengelighetskrav på over 90 % medfører mindre enn 0,5 dB variasjon og man som regel benytter tilgjengelighetskrav som overstiger 99 %, som gir endra mindre dynamikk.

6.3.3 Feil

Feil i form av RMSE og MAE, samt korrelasjonskoeffisient for resultatene fra Metode B, relativt til Metode A er vist i Tabell 6.7. Statistikken viser høy grad av samvariasjon med Metode A. Feilen knyttet til simuleringsresultatene fra Metode B er imidlertid for stor til at resultatet kan anvendes for prosjektets mål, som er å kunne modellere gassdemping med nøyaktighet og presisjon som er tilstrekkelig for operasjonell bruk. RMSE på 26,96 % er også mye høyere enn oppgitt usikkerhet for beregninger med modellen, som er ± 10 % for oksygendemping og ± 5 % for demping som følge av vanndamp i senit [11]. Denne usikkerheten forventes riktignok å øke ved skalering av dempingsnivå i forhold til lavere elevasjonsvinkel. I denne sammenhengen er det også verdt å gjenta gyldighetsområde for Modell B, som er for elevasjonsvinkler ned til 5 grader. Den absolutte feilen, både som RMSE og MAE, er også betydelig sett i sammenheng med det dynamiske område som er beskrevet i Tabell 6.6.

Tabell 6.7 Feil for Metode B resultater relativt til Metode A resultater

Inngangsdata	RMSE [%]	RMSE [dB]	MAE [dB]	Korrelasjon
MET	33,22	0,79	0,70	0,80
AROME Arctic (6-11).	26,96	0,64	0,57	0,83

6.3.4 Tidligere versjoner av modell B

Det er, som nevnt, stilt spørsmål til hvorvidt siste versjon av ITU-R P. 676 innehar den beste modellen for tilnærmet beregning av gassdemping, i forhold til tidligere versjoner. Tabell 6.8 viser statistikk for simuleringsresultater fra de ulike versjonene.

Tabell 6.8 Statistikk for beregninger med ulike versjoner av Modell B i Metode B.

Versjon	Inngangsdata	Middel [dB]	Std [dB]	Maks [dB]	Min [dB]	Maks-Min
12	AROME	3,10	0,60	4,56	1,68	2,88
11	AROME	2,95	0,50	4,20	1,88	2,33
10	AROME	2,57	0,51	3,83	1,42	2,41

Til dels store forskjeller i middelerverdi for resultatene basert på de forskjellige versjonene av Modell B tilsier systematiske avvik mellom versjonene. Det er også forskjeller i dynamisk område, der siste versjon modellerer større variasjoner. Tabell 6.9 viser feil knyttet til tilnærmet beregning av gassdemping med de ulike modellversjonene, relativt til gassdempingsresultater basert på Metode A. Samvariasjonen, evnen til å fange opp endringer er tilnærmet lik for versjon 10, 11 og 12. Den største feilen er, noe overaskende, knyttet til nyeste versjon, men det

er også nyeste versjon som har det største avviket i forhold til Metode A når det gjelder tidsseriens middelvei.

Tabell 6.9 Feil knyttet til tilnærmet beregning av gassdemping med ulike modellversjoner

Modellversjon	Inngangsdata	RMSE [%]	RMSE [dB]	MAE [dB]	Korrelasjon
12	AROME	26,96	0,64	0,57	0,83
11	AROME	23,54	0,56	0,49	0,84
10	AROME	13,76	0,48	0,31	0,84

Ved anvendelse av modellen er det mulig å kompensere for en eventuell lav nøyaktighet, i form av systematisk nivåfeil. For å bedre sammenligne de ulike modellversjonenes presisjon justeres tidsseriene slik at middelnivået blir likt som for gassdempingsresultatene fra Metode A, 2,75 dB. Tabell 6.10 viser nødvendig justering som gjennomføres for beregnet gassdemping i alle beregningstidspunktene for å oppnå middelvei lik 2,75 dB. Tabellen viser så simuleringresultatene feil etter denne justeringen er gjennomført.

Tabell 6.10 Feil etter justering av tidsseriens middelnivå

Modellversjon	Justering	RMSE [%]	RMSE [dB]	MAE [dB]	Korrelasjon
12	-0,3501	16,07	0,47	0,34	0,83
11	-0,2042	17,24	0,49	0,37	0,84
10	+0,1833	16,95	0,48	0,36	0,84

Etter nivåjustering fremstår modellversjon 12 som best egnet til å gjenskape resultatene fra Metode A, men presisjonen er fortsatt for lav for anvendelsesformålet. Versjon 12 skiller seg fra de andre, blant annet ved at den innfører metode for å beregne ekvivalent høyde basert på flere lokale værparametere enn de tidligere versjonene. Det fremgår også at versjon 11 modellerer gassdemping dårligere enn versjon 10. Dette er i henhold til forventning basert på andre publiserte arbeider som har omtalt at versjon 11 introduserer økt feil i modellen [10].

6.4 Usikkerhet

Det knyttes usikkerhet til alle delene av prosjektet, fra inngangsverdier i form av predikerte og observerte værdata, prosessering av disse, til de matematiske modellene som brukes, og implementasjonen av disse i MATLAB. Det knyttes også usikkerhet til måleoppsettet for referansemålinger og i prosessering og filtrering av disse. Gjennom prosjektet er tilgjengelig informasjon om, og antatt effekt av usikkerheten presentert sammen med de aktuelle delene av prosjektet og ved drøfting av resultatene.

Å få en fullstendig oversikt over, og kvantifisere prosjektets usikkerhet vil være svært arbeidskrevende og faller utenfor omfanget av dette masterprosjektet. Prosjektet representerer imidlertid en form for verifikasjon av metodene som er benyttet i seg selv, ved at de simulerte resultatene sammenlignes med en målt referanse for om lag 5500 sammenligningspunkter. At dette knytter seg til væråret 2016 representerer selvsagt også en usikkerhet til denne verifikasjonen, i tillegg til usikkerheten som er knyttet til referansemålingene.

Prosjektet er gjennomført under veiledning av Forsvarets forskningsinstitutt, som har oversett og kvalitetssikret arbeidsmetode og databehandling. Det er ingen kjente forhold som tilsier at tillitten til resultatene ikke skal være høy.

7 Konklusjon

Hensikten med dette prosjektet har vært å undersøke om det er mulig å gjenskape troposfæriske dempingeffekter på et satellittsignal ved bruk av numeriske værprodukter. Satellittsignalet har vært fra Eutelsat Ka-sat til Isfjord Radio på Svalbard, og værproduktene er predikert av værmodellen AROME Arctic. Ved å gjenskape historiske forhold basert på historisk predikerte data, kan også fremtidige forhold predikeres med samme metode. Prosjektet har simulert gass-, og skydemping på peilesignalet med frekvens 19,68 GHz ved en geometrisk elevasjonsvinkel ned til 3,2 grader. To ulike modeller ble benyttet for simulering av gassdemping og en modell er benyttet for å simulere skydemping. Disse modellene er utgitt av seksjon for radiokommunikasjon i Den internasjonale telekommunikasjonsunionen (ITU-R), i rekommandasjonene 676-12 og 840-8. Simuleringsresultatene har blitt sammenlignet med målinger av satellittsignalet. Sammenligningen har blitt gjennomført med historiske data for perioden fra februar til og med september 2016.

Resultatene har vist at det er svært god korrelasjon mellom målte og simulerte data. De predikerte resultatene har meget høy presisjon, både i tid og i forhold til signaldempingens variasjon. Dette betyr at det er mulig å gjenskape gass-, og skydempingeffekter på satellittsignalet mellom Ka-Sat og Isfjord Radio ved å bruke historisk predikerte værdata fra AROME Arctic. Dette betyr videre at det dermed er mulig å modellere troposfærisk demping fremover i tid ved å benytte predikerte værprodukter. Det er også funnet svært godt samsvar med tilsvarende resultater for simulert sky-, og gassdemping fra Atmospheric Numerical Simulator (ANS). ANS baserer disse gassdempingsberegningene på omfattende reanalyse av værdata som gjensker atmosfæriske forhold tilbake i tid. Den simulerte gassdempingen har ellers tydelig vist at dempingeffekten av gass, spesielt i form av vanndamp, varierer mye og at den ikke kan betraktes som konstant. Gassdempingens dynamiske område i sammenligningsperioden (fra februar til og med september 2016) er 4,57 dB og det har blitt observert variasjoner opptil 3 dB innenfor noen titalls timer. For kombinert sky-, og gassdemping er det dynamiske området på 8,72 dB.

Prosjektet har vist at det er mulig å predikere fremtidige satellittforhold ved bruk av numeriske værprodukter. Dette innebærer et tydelig fremskritt relatert til planleggingsmuligheter for satellittforbindelser i Arktis, og for satellittforbindelser på høye frekvenser og med lave elevasjonsvinkler. Metoden som har blitt benyttet i prosjektet kan også brukes til å utarbeide statistikk basert på tilgjengelige værprodukter, som for eksempel kan komme til nytte ved

design av fremtidige satellittsystemer. Gassdempingens betydelige endring over tid bør også inkluderes ved utarbeidelse av linkbudsjett for satellittforbindelser.

På lengre sikt kan denne muligheten brukes til å skalere effektbehovet på satellittene i et satellittsystem. På kortere sikt representerer dette en operasjonell mulighet for å planlegge utnyttelsen av satellittsystemer innenfor prediksjonshorizonten, e.g. ved å omfordele effekt til deler av et dekningsområde med høy demping. Brukere av satellittsystemer kan på sin side planlegge bruk av frekvensbånd og terminalstørrelser basert på predikerte satellittforhold. Militært kan dette også benyttes for eksempel ved å skalere nødvendig terminalstørrelse og/eller frekvensbånd for et oppdrag som foregår innenfor prediksjonshorizonten, samt vurdere om satellittkommunikasjon er mulig og hensiktsmessig.

Av de to modellene som er benyttet for å beregne gassdemping, er det kun Modell A som tar høyde for værforholdene langs hele signalbanen og som tilstrekkelig fanger opp dempingens dynamikk. Modell B, som kun benytter værinformasjon ved satellittforbindelsens bakkestasjon vurderes noe overraskende til å ikke være spesielt anvendbar for formålet å kunne predikere gassdempingsforholdene i troposfæren, selv ved bruk av observert vær ved modelleringstidspunktene. Dette kan forklares ved at det er relativt stor stedlig variasjon i værforholdene langs signalbanen. Modell A er beskrevet i ITU-R P. 676-12 annex 1, og Modell B er beskrevet i ITU-R P. 676-12 annex 2.

Ved undersøkelser av potensielle feilkilder i prosjektet har det fremgått at variasjon i signalbanens refraksjon i sammenligningsperioden ikke påvirker signalets treff på antennen signifikant, selv med så lav geometriske elevasjonsvinkel som 3,2 grader.

En annen feilkilde som har blitt undersøkt har vært om satellittens bevegelse kan påvirke signalets treff på antennen. Det har det blitt avdekket at satellittens bevegelse er stor nok til å påvirke antennens signalmottak signifikant. Effekter av dette har også blitt identifisert i målinger av satellittsignalet. Dette funnet er uventet ved bruk av en antenne på 1,8 meter i Ka-båndet.

7.1 Videre arbeid

I dette delkapittelet presenteres forslag til hvordan masterprosjektet kan kompletteres, og hva det videre arbeidet med fordel kan inkludere når det gjelder prediksjon av troposfæriske effekter på satellittkommunikasjon ved bruk av numeriske værprodukter.

7.1.1 Prediksjonshorisont

Prosjektet har vist at forhold knyttet til gassdemping og skydemping kan predikeres med stor nøyaktighet inntil 11 timer frem i tid, basert på numeriske AROME Arctic værdata. AROME Arctic predikerer imidlertid værforhold 66 timer frem i tid, og det er derfor interessant å undersøke hvor langt frem de troposfæriske effektene kan predikeres ved bruk av disse dataene og fortsatt oppnå tilstrekkelig god presisjon til å ha verdi.

7.1.2 Kvantifisere usikkerhet

Prosjektet har omtalt usikkerhet i beregningene, målinger og sammenligningene som er utført. Å få en fullstendig oversikt over usikkerheten knyttet til predikerte dempingsforhold er imidlertid utenfor omfanget av dette masterprosjektet. Det er likevel en stor fordel å ha et mer nøyaktig forhold til hvor stor den faktiske usikkerheten knyttet til dempingsprediksjonene er. Dette vil muliggjøre enda bedre utnyttelse av muligheten til å predikere dempingsforhold.

7.1.3 Tilsvarende forbindelse lenger sør

Prosjektet er orientert rundt en satellittforbindelse til Svalbard, som er svært langt nord, med dertil spesielle værforhold sammenlignet med fastlands-Norge, og andre steder. For at resultatene skal kunne anvendes i vesentlig ulike forhold, bør prosjektet gjentas for en satellittforbindelse lenger sør. Det finnes tilsvarende datagrunnlag som er benyttet i dette prosjektet for en satellittforbindelse med bakkestasjon på Kjeller som med fordel kan brukes for å undersøke dette. Satellittsignalet som er målt på Kjeller benytter tilsvarende elevasjonsvinkel som for forbindelsen i dette prosjektet.

7.1.4 Ikke-geostasjonære satellitter

Dette prosjektet beviser konseptet ved prediksjon av troposfæriske dempingseffekter, men er knyttet til en satellittforbindelse med bruk av geostasjonær bane. Metoden kan med fordel utvikles for å kunne predikere troposfærisk demping for satellittforbindelser til satellitter i ikke-geostasjonære baner, som medfører at satellitten beveger seg i forhold til jordoverflaten. Dette inkluderer å ta høyde for satellittens posisjon, og satellittsignalets forventede bane når prediksjonene gjennomføres.

7.1.5 Refraksjon ved ductingforhold

Refraksjon har vært omtalt i dette prosjektet som neglisjerbar med tanke på å forstyrre signalbanens geometri tilstrekkelig til å svekke mottak av satellittsignalet. Refraksjonsberegninger er imidlertid utført med det som i denne sammenheng er relativt grovt oppløste AROME Arctic data. En test som gjennomføres ved tidspunkter med kjente ductingforhold langs signalbanen bør gjøres for å påpeke eventuelle begrensinger til beregningsmetoden for refraksjon som er brukt i dette prosjektet. For eksempel ved å se hvor lav elevasjonsvinkel som skal til for at ductingforhold fører til refraksjon som leder satellittsignalet bort fra mottaker ved bruk av høyoppløste inngangsdata fra radiosondeobservasjoner, samt undersøke hvordan dette gjenskapes ved bruk av AROME Arctic data.

8 Referanser

- [1] «Ansvarsområde,» Hovedredningsentralen, [Internett]. Available: <https://www.hovedredningsentralen.no/om-hovedredningsentralen/ansvarsomrade/>. [Funnet 10 07 2019].
- [2] G. Maral og M. Bousquet, *Satellite Communication Systems* 5th edition, John Wiley & Sons Ltd., 2009.
- [3] ITU, «Recommendation ITU-R P.618-13 Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-Space telecommunication systems,» Geneva, Switzerland, 2017.
- [4] T. Tjelta, L. E. Bråten, J. E. Håkegård, P. A. Grotthing, M. Rytir, M. Cheffena og K. Grythe, «Ka-band Radio characterisation for SatCom services in arctic and high latitude regions,» Final report: ESA Contract No. 4000106010/12/NL/CLP, 2017.
- [5] N. Jeanin, M. Outerlial, L. Castanet, C. Pereira, D. Vanhoenanacker-Javier, C. Riva, C. Capsoni, L. Luini, M. Cossu og A. Martellucci, «Atmospheric Channel Simulator for the Simulation of Propagation Impairments for Ka Band Data Downlink,» i *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Hague, Netherlands, 2014.
- [6] J. Queyrel, X. Boulanger, L. Castanet, J. Nessel, M. Zemba, T. Prytz og A. Martellucci, «Preliminary Results of the THOR7 Propagation Experiment in the North Pole Region,» ONERA, Toulouse, France, 2018.
- [7] M. Rytir, «Comparison between ANS and measured data at Isfjord Radio 04-08/2016,» Forsvarets forskningsinstitutt, FFI, Kjeller, Norge, 2017.
- [8] L. Luini og C. G. Riva, «A Simplified Model to Predict Oxygen Attenuation on Earth-Space Links,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, nr. 12, pp. 7217-7223, 2017.

- [9] L. M. Tomaz, L. Luini og C. Capsoni, «Impact of Water Vapor Attenuation on Low Elevation SatCom Links,» i *13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2019)*, 2019.
- [10] L. Luini, C. Riva og C. Capsoni, «On the Accuracy of Simplified Models for Water Vapour Attenuation Prediction at Ka band and Q band,» i *URSI AP-RASC*, New Delhi, India, 2019.
- [11] ITU, «Recommendation ITU-R P.676-12 Attenuation by atmospheric gases,» Geneva, Switzerland, 2019.
- [12] ITU, «Recommendation ITU-R P.840-8 Attenuation due to clouds and fog,» Geneva, Switzerland, 2019.
- [13] L. Barclay, *Propagation of Radiowaves*, London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2013.
- [14] ITU, «Validation examples for Study Group 3 Earth-Space propagation prediction methods version 5.0,» Study Group 3, Geneva, Switzerland, 2019.
- [15] F. Navas-Guzmán, N. Kämpfer, A. Murk, R. Larsson, S. A. Buehler og P. Eriksson, «Zeeman effect in atmospheric O₂ measured by ground based microwave radiometry,» *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 8, pp. 1863-1874, 2015.
- [16] ITU, «Recommendation ITU-R P.835-6 Reference standard atmospheres,» Geneva, Switzerland, 2017.
- [17] Y. Gataullin og R. Kozolowski, «Implementation of Rain and Gaseous Attenuation Models For 26-30GHz Ka-Band Communication,» i *6th IASTED International Conference Antennas, Radar, and Wave Propagation*, Banff, Alberta, Canada, 2009.
- [18] «The AROME-Arctic weather model,» Meteorologisk Institutt, [Internett]. Available: <https://www.met.no/en/projects/The-weather-model-AROME-Arctic>. [Funnet 08 02 2019].

- [19 «About AROME-Arctic,» Metrologisk Institutt, 11 06 2019. [Internett]. Available:
] <https://www.met.no/en/projects/The-weather-model-AROME-Arctic/about>. [Funnet 14
06 2019].
- [20 «MET Norway Thredds Service,» Metrologisk Institutt, 02-09 2016. [Internett].
] Available: <https://thredds.met.no/thredds/catalog/aromearcticarchive/2016/catalog.html>.
[Funnet 15 09 2019].
- [21 E. Støylen, «AROME Arctic - skyer,» Epostkorrespondanse mellom undertegnede og
] Metrologisk Institutt v/Eivind Støylen m.fl., 1. oktober 2019.
- [22 M. Rytir, C. Riva, D. Vanhoeanacker-Janvier og T. Tjelta, «Tropospheric scintillation
] spectra and transversal wind speed for satellite links at very low elevation angles,» i *Proc. 11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCap)*, Paris, 2017.
- [23 ITU, «Recommendation ITU-R P834-9 Effects of tropospheric refraction on radiowave
] propagation,» Geneva, Switzerland, 2017.
- [24 G. Livik, E. Støylen, M. Køltzow og A. L. Borg, «AROME Arctic Usikkerhet,»
] Epostkorrespondanse mellom undertegnede og Metrologisk Institutt, 18. juni 2019.
- [25 J. K. Suld, «AROME Arctic data on thredds,» Epostkorrespondanse mellom FFI v/M.
] Rytir og Metrologisk Institutt v/J. K. Suld, 2. august 2016.
- [26 «1,8m Ka-Band CP Rx/Tx Antenna System Series 3180 2244 Test Report,» General
] Dynamics Satcom Technologies, Maiden, North Carolina.
- [27 M. Rytir, *System Toolkit analyse av posisjon for Eutelsat Ka-sat og pekeretning fra Isfjord*
] *Radio*, Kjeller, Norge: FFI, 2019.
- [28 P. Bouchard, «Approximate Method for Estimating Gaseous Loss at Very Low Angles
] Along Paths of Finite Length and Earth-Space Paths,» *IEEE Transactions On Antennas and Propagation*, vol. 64, nr. 2, pp. 687-699, 2016.

- [29 L. E. Bråten og M. Rytir, «FFI-Rapport 19/00635 High latitude optical satellite
] communications - cloud coverage in Norway,» Forsvarets Forskningsinstitut, Kjeller,
Norge, 2019.
- [30 «yr.no,» Metrologisk Institutt, 01 04 2016. [Internett]. Available:
] https://www.yr.no/place/Norway/Svalbard/Svalbard_lufthavn/almanakk.html?dato=2016-04-01. [Funnet 01 07 2019].
- [31 JTC EBU og ETSI, «Digital Video Broadcasting (DVB) Implementation guidelines for
] the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and
other broadband satellite applications; Part 2 - S2 Extensions (DVB-S2X),» Geneva,
Switzerland, 2015.
- [32 ITU, «Recommendation ITU-R P.676-11 Attenuation by atmospheric gases,» Geneva,
] Switzerland, 2016.
- [33 ITU, «Recommendation ITU-R P.676-10 Attenuation by atmospheric gases,» Geneva,
] Switzerland, 2013.

Vedlegg 1: Konferanseartikkel

Resultatene fra dette masterprosjektet er innsendt for presentasjon på konferansen EuCAP 2020 (European Conference on Antennas and Propagation). Konferansen finner sted i København 15.-20. mars 2020. Den innsendte konferanseartikkelen er vedlagt her.

Variability of Gaseous Attenuation at Very Low Elevation Angle Slant Paths; Measurements and Modelling

Erik Wangen Alsaker¹, Martin Rytir²

¹ University of Bergen, Bergen, Norway, eal019@student.uib.no

² Norwegian Defence Research Establishment (FFI), Kjeller, Norway, Martin.Rytir@ffi.no

Abstract—Gaseous attenuation variability for a 3.2° elevation angle satellite link operating at 20 GHz in the Norwegian Arctic is analyzed and compared with different models. At a very low elevation link like this one, gaseous attenuation reaches high values and has significant temporal variation over short periods of time. 5 months of measured data are compared with a model based on measured ground meteorological data and two different numerical weather prediction (NWP) models. The simplified model based on ground data gives lower values than the measured levels and is unable to model the observed fast variations. Both the NWP model based on predictions and the one based on re-analysis of past data are able to model most of the fast variations. When cloud attenuation is included in the NWP models both show excellent agreement with the measured data, without a clear difference in accuracy between them.

Index Terms—propagation, measurement, satellite, Numerical Weather Prediction.

I. INTRODUCTION

Frequencies over 15 GHz are increasingly being used for satellite as well as aeronautical communications. The trend is dictated by congestion at the lower frequency bands used for satellite communications, both from satellite systems and also from terrestrial networks. Higher frequencies offer larger available bandwidth and therefore capacity, as well as higher antenna directivity. However, electromagnetic waves at higher frequencies are increasingly affected by atmospheric propagation impairments [1].

While attenuation due to precipitation is usually the most significant impairment, it occurs only during limited periods of time and has limited spatial extent. Due to this short term character it can be partly compensated for by fade mitigation techniques such as adaptive coding and modulation (ACM) [1]. Clear-air impairments such as gaseous attenuation and scintillation are, on the other hand, always present on the links. Some level of cloud attenuation can also be present at the links for long periods of time.

Slant paths at low elevation angles occur for geostationary satellites from locations at high latitudes, for low/medium earth orbit satellites or for airborne vehicles. The path length through the troposphere can be quite long, leading to significant gaseous attenuation [2]. High levels of non-rainy attenuation were also recently measured at a very low elevation angle link at Isfjord Radio on Svalbard, Norway over the course of three years [3]. While gaseous

attenuation is often regarded as relatively constant and only slowly changing, the values measured in [3] were changing relatively fast over the course of a few hours, prompting an investigation of the cause. Recently, high resolution numerical weather prediction (NWP) data are becoming available for general use and have been demonstrated to relatively accurately predict non-rainy attenuation at moderate elevation angle [4].

In this paper, multiple methods are used to model gaseous attenuation for a very low elevation angle link at Isfjord Radio and results compared with measured data. Both simplified methods using ground meteorological measurements as well as models using high resolution NWPs are used. The comparison is complemented by modelling of cloud attenuation. Sections II and III describe the measurement and gas attenuation models used, Section IV compares the obtained results from gaseous attenuation models, Section V investigates the additional effect of cloud attenuation, and finally Section VI draws conclusions.

II. MEASUREMENT

A. Location and Setup

A satellite beacon transmitted at 19.68 GHz from the Eutelsat KaSat satellite was measured at Isfjord Radio (78.1°N 13.6°E) on the Svalbard archipelago which is part of Norway. The 1.8 m diameter antenna was located on the coastline about 5 m above the sea level and the geometric elevation angle towards the satellite was 3.2°. The main lobe (-3 dB) beamwidth was 0.6°. Beacon data was collected using a spectrum analyzer controlled by beacon receiver software at a rate of 10 samples per second. The measurement setup had a dynamic range of about 40 dB. Meteorological data was collected using Vaisala WXT520 weather station and Lambrecht 1518 H3 tipping bucket. In addition surface meteorological data from an independent meteorological station operated by the Norwegian Meteorological Institute located at the same site were also used. More details about the measurement setup can be found in [5].

B. Data Processing

For the purpose of analyzing gaseous attenuation, short term attenuation events caused by rain and heavy clouds

Measurement funded by ESA Contract No. 4000106010/12/NL/CLP "Ka-band radio characterisation for SatCom services in arctic and high latitude regions".

were first removed from the beacon time series and replaced by linear interpolation. Clouds are, however, present at Svalbard about 67–88% of the time and some effects from clouds will remain in the time series [6]. The resulting data were filtered using a low pass filter with a cut off frequency of $2.3 \cdot 10^{-5}$ Hz, which corresponds to a moving average filter of approximately 320 minutes. Finally the data were downsampled to 1 sample every 30 minutes. The resulting data is not calibrated and hence cannot give total attenuation values, but it gives information about time-varying gaseous and cloud attenuation.

III. GAS ATTENUATION MODELLING

Three different models were used for calculation of gaseous attenuation for the purpose of comparison with measurement data. All models originated from ITU-R Rec. P. 676-12 [7] but differed both in complexity and type of input data.

A. Simplified Method Based on Surface Measurement

Approximate estimate of gaseous attenuation was calculated using the method described in Annex 2 of Rec. P. 676-12 that used actual meteorological data measured at the site. Since the humidity data measured by the WXT520 weather station showed incorrect values around the freezing point, the data measured by the meteorological institute was used instead. Nevertheless the observed difference between mean results from these two datasets was approximately 0.13 dB. Note that the method is not recommended for elevation angles below 5° , but a comparison with a stochastic model of water vapor in [2] did not show large errors even for 3° at 19.5 GHz.

B. AROME Arctic

High resolution NWP data from the AROME Arctic prediction model by the Norwegian Meteorological Institute were used as input to the line-by-line method from Annex 1 of [7]. AROME Arctic has a resolution of 2.5 km and uses 65 vertical model levels for the first 30 km of the atmosphere. The model is calculated every 6 hours with predictions for the next 66 hours. In this work data predicted from 6 to 11 hours ahead were used. The temporal resolution is 1 hour. The model covers high-latitude areas around Svalbard, for more details see [8]. The data is freely available for noncommercial use utilizing a web advanced programming interface (API). Figure 1 shows the grid around Isfjord Radio as well as the path towards the satellite in relation to the model grid.

The actual apparent elevation angle towards the satellite was found by calculating the ray bending due to refraction through 800 thin layers of the first 30 km of the atmosphere as given in [7] and then adjusting the starting angle until the resulting ray hit the satellite. The mean result was 3.4748° which is close to the value of 3.499° calculated by the approximate formula from [9]. The variation of the apparent elevation angle over the period of available data was

$\pm 0.0013^\circ$ which is much smaller than the antenna beamwidth. Refraction above 30 km of altitude was tested as insignificant.

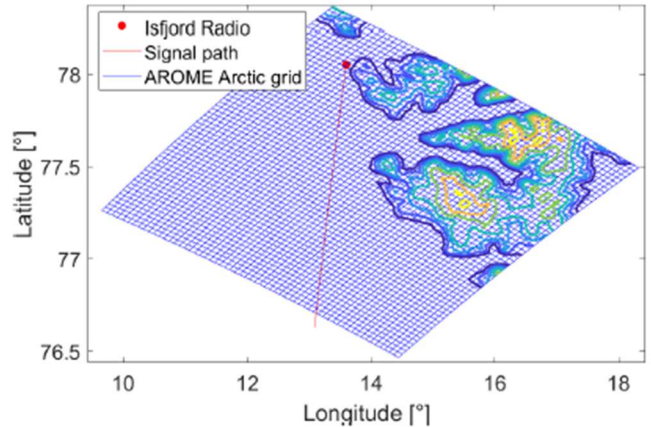


Fig. 1. Path towards the satellite and the part of AROME Arctic grid around Isfjord Radio that was used in the study.

To obtain values along the path for each point crossing the 800 layers defined by [7], the AROME Arctic data were interpolated by using Barycentric interpolation of the 3 nearest points at the model level above and below the point and then linear interpolation between these two values, repeating the procedure used in [10].

The used AROME Arctic grid was limited to the first 150 km of the signal path, corresponding to an altitude of 10 km. Vertical data from the last point of the signal path within the used AROME Arctic grid were utilized to further describe the signal path above 10 km. The variety of modelled gas attenuation above 10 km altitude was negligible within the grid, which made the simplification acceptable.

C. Atmospheric Numerical Simulator (ANS)

The French Aerospace Lab (ONERA) provided gaseous and cloud attenuation data from the Atmospheric Numerical Simulator (ANS). The ANS uses data from European Center for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) ERA-Interim re-analysis database for input and for boundary conditions of NWP model WRF-ARW [11]. ERA-Interim provides meteorological parameters every 6 hours with a 0.75° resolution. The WRF model then uses three nested domains to increase the resolution down to 2 km and 5 minutes. For more details see [12] and the references within. Successively the gas attenuation is calculated using the same line-by-line method of Annex 1 of [7].

IV. GAS ATTENUATION RESULTS

Full resolution AROME Arctic data was first available from February 2016 giving 8 months of overlap with the measurement data until the measurement period stopped at the end of September. Crucially, this period covers both a period of cold months as well as the warm summer period. ANS data was obtained for comparison for the period from April to September resulting in 5 months overlap.

A. Reference Level Setting

Since the measured beacon data is not calibrated it is not possible to retrieve total attenuation time series, but rather an estimate of the varying component of gaseous attenuation. The comparison with model data therefore suffers some level of inaccuracy, but is nevertheless interesting for analyzing the temporal variation. The reference level for gaseous attenuation is set using a reference period without clouds and adjusting the measured time series to the modelled one in this period. Available web camera-pictures from Isfjord Radio, weather observations and cloud coverage predicted by NWP were used to ensure cloud free conditions at the reference time of 08. March 2016 12:00 UTC.

B. Temporal Variation and Comparison

As can be seen from the time series comparison shown in Figure 2, there is quite a good agreement between the measured attenuation and the gaseous attenuation predicted by the high-resolution AROME Arctic and ANS models. Some discrepancy is to be expected since the measured time series also include some cloud attenuation. The ANS values of gaseous attenuation are consistently higher than those predicted using the AROME Arctic model. Note that the reference level for the measured data was set using AROME Arctic values.

Somewhat surprising, the values modelled using actual measured surface meteorological data and the simplified method from Annex 2 of [7] do not follow the measured fast changes of attenuation observed by the beacon.

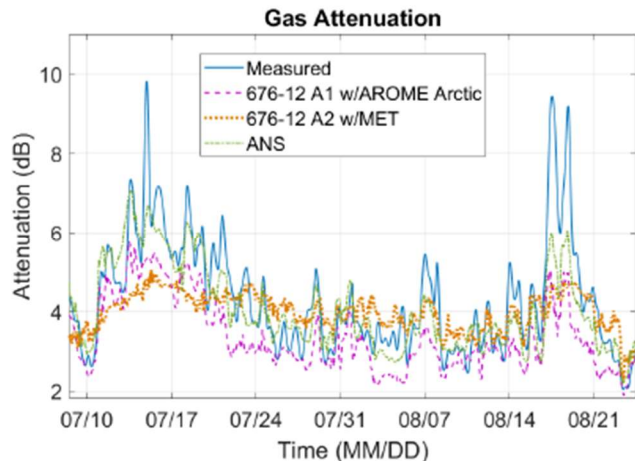


Fig. 2. Example comparison of the measured attenuation with time series from the three gas attenuation models.

C. Long-term Statistics

Comparison complementary cumulative distribution functions (CCDFs) of the measured data and the three different models are shown in Figure 3. As noted before ANS values are higher than those using AROME Arctic. Both NWP models deviate significantly from the simplified model based on actual on site ground meteorological parameters already from the 10 % exceedance level,

reaching a difference of between 1 and 2 dB at the 1 % level. All gaseous attenuation models show values that are much lower than the measured time series that includes some cloud attenuation.

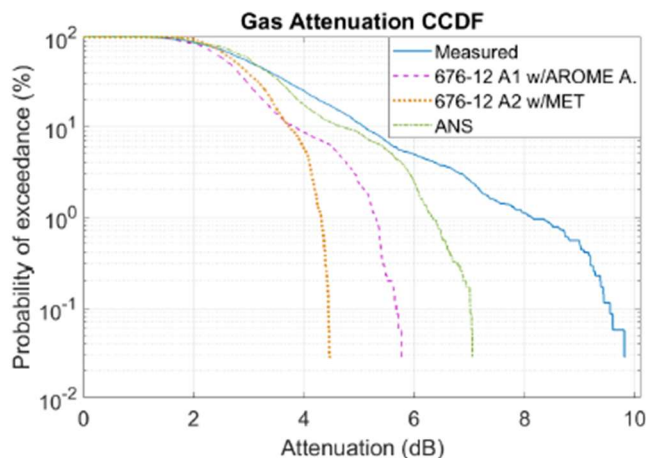


Fig. 3. CCDF of modelled gas attenuation compared with measured attenuation for 5 months (April–August 2016).

Mean absolute error (MAE), relative mean square error (RMSE), and correlation for the gas attenuation models relative to the measured data for the 5 month period are shown in Table 1. Correlation is high for all models, with highest values for the line by line methods. The measured time series include some cloud effects which are reflected in the high RMSE values. Although the simplified model (Annex 2) has lower absolute RMSE, the line by line method (used by Annex 1 and ANS) describes the variations better, shown both in the relative RMSE and correlation values.

TABLE I GASEOUS ATTENUATION ERROR

	MAE (dB)	RMSE (dB) [%]	Corr.
676-12 A1 w/AROME	0.66	0.97 [20.88]	0.87
676-12 A2 w/MET	0.65	0.91 [25.52]	0.81
ANS Gas	0.48	0.67 [17.23]	0.88

V. CLOUD ATTENUATION

Results from the previous chapter indicate that data processing and filtering of the measured beacon level time series did not remove a significant part of long-term cloud attenuation. Cloud attenuation model data were therefore added to the gaseous attenuation values for comparison.

A. Cloud Attenuation Modelling

For both AROME Arctic and ANS data cloud attenuation was modelled using the Rayleigh scattering approximation (1) from Annex 1 of ITU-R Rec P. 840-8 [13] to calculate specific attenuation within the cloud. The respective high resolution NWP data of each model were used to directly give the water content of the cloud. The resulting modelled

time series were filtered using the same low-pass filter as the measured attenuation time series.

B. Combined Gaseous and Cloud Attenuation Results

An example of the resulting (filtered) combined gaseous and cloud attenuation time series is given in Figure 4, showing excellent agreement with the measured data for both models. The same excellent agreement is also present in the CCDF in Figure 5, with the ANS values being slightly higher than the measured ones as well as those modelled by AROME Arctic. Again it is worth noting that the reference level for the measured data was set using the AROME Arctic model. The difference between ANS and AROME Arctic is much lower than for the gaseous-only attenuation in the previous chapter. Therefore it seems that while ANS predicts higher gaseous attenuation than AROME Arctic, ANS also predicts lower levels of cloud attenuation.

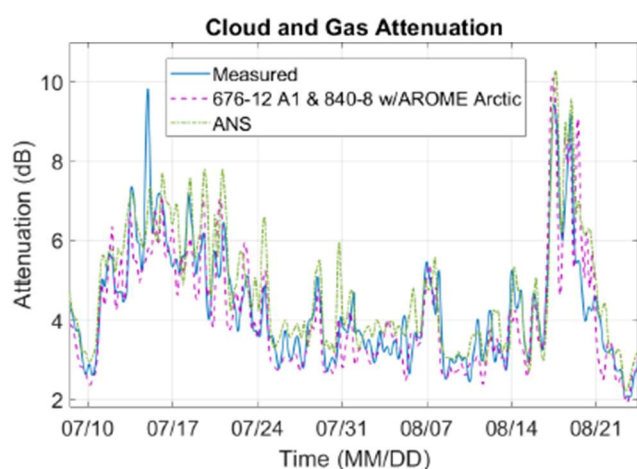


Fig. 4. Example comparison of the measured attenuation with time series of gas and cloud attenuation from the AROME Arctic and ANS models.

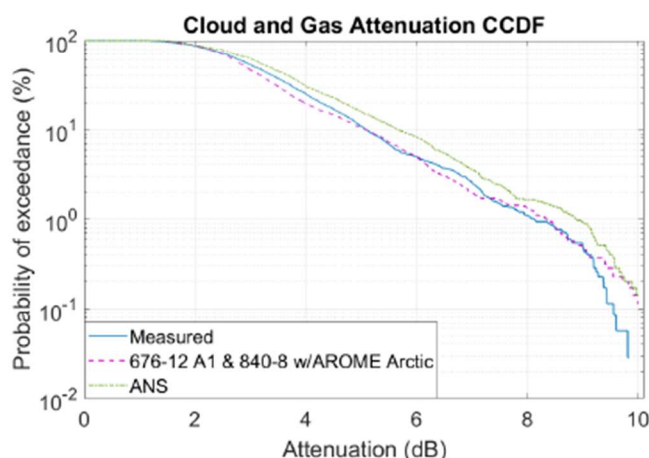


Fig. 5. CCDF of modelled gaseous and cloud attenuation compared with measured attenuation for 5 months (April–August 2016).

For the combined cloud and gas attenuation modelling, MAE, RMSE, and correlation are shown in Table 2. The

RMSE of the ANS results, that are based on re-analysis data, and the results using AROME predictions, confirm that both models are able to reproduce the actual tropospheric conditions with similar accuracy.

TABLE II CLOUD AND GASEOUS ATTENUATION ERROR

	MAE (dB)	RMSE (dB) [%]	Corr.
676-12 A1 & 840-8 w/AROME	0.45	0.65 [17.29]	0.89
ANS Gas & Cloud	0.49	0.65 [19.10]	0.92

As can be seen from the full time series comparison shown in Figure 6, both the results from the AROME Arctic predictions and the ANS re-analysis methods show a very good match with the measurements. Figure 6 also shows the RMSE, calculated for every 24 hours. The RMSE of the combined attenuation predicted by the AROME Arctic model decreases in the warm summer months when the predicted attenuation is higher. This corresponds to MAE being similar through the 5 month period. The likely explanation is that the measured values during the summer months are less affected by variations and inaccuracies of the measurement setup. For the ANS results the RMSE is similar through the 5 month period, while MAE is larger during the high attenuation period in the summer. This might be related to ANS giving much higher gaseous attenuation values during the summer months. As explained before this is compensated by lower cloud attenuation values, which are less likely to closely match the measured data in time.

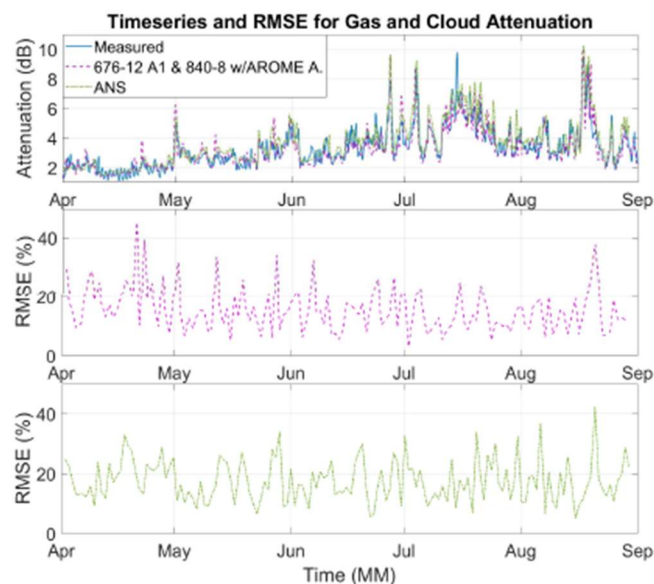


Fig. 6. Time series of measured and modelled attenuation (top) with RMS relative error for gaseous and cloud attenuation relative to measured attenuation for AROME Arctic (center) and ANS (bottom).

VI. CONCLUSIONS

Five months of measured 19.68 GHz satellite beacon data at a (geometric) elevation angle of 3.2° from Isfjord Radio, Svalbard, Norway, were compared with gaseous and cloud attenuation models with the goal of assessing the temporal variability of gaseous attenuation as well as the accuracy of three different models. The measured time series showed large variation of up to 8 dB over the course of a few tens of hours.

Comparison with the gaseous attenuation models revealed that changes in water vapor content along the path were responsible for large part of the observed variation. Somewhat surprisingly the simplified model based on meteorological data measurement at the site was unable to predict not only the absolute value but also the (relatively) fast variation of gaseous attenuation.

After cloud attenuation contribution was added to the NWP-based models, both the AROME Arctic and the ANS models showed excellent agreement with the measurements. Note that while ANS is based on re-analysis data that require additional simulation for increased resolution, AROME Arctic results are based on openly available prediction data for 6–11 hours ahead of the prediction time.

The results show that for very low elevation angle slant paths gaseous attenuation cannot be regarded as being nearly constant. Instead it shows significant temporal variability that should be taken into account in system design and link budget calculation using appropriate modelling.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Norwegian Meteorological Institute for providing the AROME Arctic meteorological model data, and ONERA France with Nicolas Jeannin and Laurent Castanet for the ANS data. Terje Tjelta at the University of Oslo is to be thanked for the method for spatial interpolation of the model data and Laurent Quibus from UCL Belgium for the initial software for model data retrieval. Last but not least the authors thank all the people involved in the ESA project for the collected measurement data. These were Terje Tjelta, Per Arne Grotthing, Michal Ciecko and Terje Medby at Telenor; and Lars E. Bråten, Jostein Sander and Terje Mjelde at FFI.

REFERENCES

- [1] A. D. Pangopoulos, P-D M. Arapoglou and P. G. Cottis, "Satellite Communications at Ku, Ka and V bands: Propagation Impairments and Mitigation Techniques," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 6, No. 3, Third Quarter 2004.
- [2] L. M. Tomaz, L. Luini and C. Capsoni, "Impact of Water Vapor Attenuation on Low Elevation SatCom Links," *In Proc. 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCap)*, Krakow, March 2019.
- [3] T. Tjelta, M. Rytir, L. E. Bråten, P. A. Grotthing, M. Cheffena and J. E. Håkegård, "Results of a Ka band campaign for the characterisation of propagation conditions for SatCom systems at high latitudes," *In Proc. 11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCap)*, Paris, pp. 1481-1485, March 2017.
- [4] L. Quibus, L. Luini, C. Riva and D. Vanhoenacker-Janvier, "Use and Accuracy of Numerical Weather Predictions to Support EM Wave Propagation Experiments," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, No. 8, pp. 5544-5554, August 2019.
- [5] T. Tjelta, J. Sander, M. Rytir, P. A. Grotthing, J. Noll, K. Grythe, T. H. Johansen, M. Ciecko, M. Cheffena and T. M. Mjelde, "Experimental Campaign with First Results for Determining High North 20 GHz Satellite Links Propagation Conditions," *In Proc. 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCap)*, Lisbon, April 2015.
- [6] L. E. Bråten og M. Rytir, «FFI-Rapport 19/00635 High latitude optical satellite communications - cloud coverage in Norway,» Forsvarets forskningsinstitutt, Kjeller, Norway, 2019.
- [7] ITU-R Recommendation P. 676-12, "Attenuation by atmospheric gases and related effects," International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, 2019.
- [8] The AROME-Arctic weather model, Norwegian Meteorological Institute, <http://met-xpprod.customer.enonic.io/en/projects/The-weather-model-AROME-Arctic>, retrieved 9/2019.
- [9] ITU-R Recommendation P. 834-9, "Effects of tropospheric refraction on radiowave propagation," International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, 2017.
- [10] M. Rytir, C. Riva, D. Vanhoenacker-Janvier and T. Tjelta "Tropospheric scintillation spectra and transversal wind speed for satellite links at very low elevation angles," *In Proc. 11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCap)*, Paris, March 2017.
- [11] W. C. Skamarock et al., "A Description of the Advanced Research WRF Version 3," NCAR, Boulder, CO, USA, Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 2008.
- [12] J. Queyrel, X. Boulanger, L. Castanet, J. Nessel, M. Zemba, T. Prytz and A. Martellucci, "Preliminary Results of the THOR7 Propagation Experiment in the North Pole Region," *In Proc. 25th Ka and Broadband Communications Conference*, Sorrento, September 2019.
- [13] ITU-R Recommendation P.840-8, "Attenuation due to clouds and fog," International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, 2019.