

Radardekning med ulike refraktivetsprofiler i et maritimt miljø

Petter Østenstad

Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)

8. april 2008

FFI-rapport 2008/00562

1062-METOC II

ISBN 978-82-464-1375-4

Emneord

Radar

Meteorologi

Ducting

Godkjent av

Atle Ommundsen

Prosjektleder

Elling Tveit

Forskningsjef

John-Mikal Størdal

Avdelingsjef

Sammendrag

Sjøforsvaret har anskaffet nye fregatter og missiltorpedobåter med avanserte radarsystemer. For å kunne utnytte disse sensorene optimalt, er meteorologisk informasjon en avgjørende faktor. Per i dag gjøres det ikke målinger av refraktivetsprofiler i Forsvaret, og man kan dermed ikke predikere radarytelsen på en tilfredsstillende måte.

Målet med arbeidet er å vise betydningen av meteorologiens påvirkning på radarpropagasjon og hvordan man kan måle refraktiviteten best mulig. I denne rapporten er det brukt to metoder for å måle/beregne refraktivitet. Den ene baserer seg på å beregne refraktivetsprofilen med Paulus-Jeske-modellen (PJ). Modellen bruker måling av temperatur, fuktighet og vindstyrke i ett punkt i en kjent høyde over havet, samt overflatetemperaturen i sjøen som input. Den andre metoden er å måle temperatur, relativ fuktighet og trykk oppover i atmosfæren med radiosonde. Refraktiviteten kan da beregnes. Målingene er gjort i Bjørnafjorden i oktober 2007 fra KV Andenes.

Å bruke PJ-modellen (eller tilsvarende modeller) er en enklere, men mindre nøyaktig metode enn å bruke radiosonde for å måle refraktiviteten.

Mikroklimaet rundt skipet kan påvirke målingene i de første meterne når radiosonden stiger. Derfor er det også gjort målinger når radiosonden daler ned i en fallskjerm et stykke unna båten.

Det er gjort radarberegninger med refraktivetsprofiler målt med de to metodene, samt beregninger med standard atmosfære. Rapporten viser at miljøinformasjon er viktig input i beregninger av radarrekkevidde. Propagasjonsberegninger gjort med radiosonedatagir tildels betydelig lenger radarrekkevidde i noen av tilfellene, enn beregninger gjort med standard atmosfære og profiler beregnet med PJ-modellen. Tilgang på god miljøinformasjon vil derfor være viktig for den operative bruker for å kunne beregne propagasjonen til radarstrålene og kunne si noe om forventede deteksjonsavstander.

English summary

The Royal Norwegian Navy has procured new frigates and fast patrol boats with advanced radar systems. To use the sensors optimally, meteorological information is a crucial factor. Today refractivity is not measured, and radar range predictions can not be done in a satisfactory way.

The aim of this work is to demonstrate the importance of meteorology's impact on radar propagation and how refractivity can be measured in the best possible way. In this report, two different methods to measure/calculate refractivity are used. The first method calculates the refractivity by the Paulus-Jeske (PJ) model. The model uses temperature, relative humidity and wind speed measured at a fixed height and the sea surface temperature as input.

The latter method measures vertical distribution of temperature, relative humidity and pressure using a radiosonde and calculates the refractivity. The measurements took place in the Bjørnafjord October 2007.

Using the PJ model (or other corresponding models) is easier, but less accurate than using radiosondes.

The micro climate enveloping the ship can affect the first samplings when the radiosonde ascends. Trying to avoid this effect, measurements were also done when the sonde was descending in a parachute in some distance from the ship.

Radar range calculations are done using refractivity profiles from the two methods and a standard atmosphere profile. The result indicates that environmental information is an important input to radar range predictions. Calculated propagation ranges based on radiosonde data show considerably extended ranges for some of the cases compared to standard atmosphere and PJ model profiles. Access to environmental information for the operative user is very important to calculate the propagation of the radar waves and expected detection ranges.

Innhold

1	Innledning	7
2	Teori	8
3	Advanced Refractive Effects Prediction System (AREPS)	10
4	Målinger	10
4.1	Gjennomføring av radiosonderingene	10
4.2	Beregning av fordampningsduct	11
5	Resultater	11
5.1	Måling 24_1_opp	12
5.2	Måling 24_2_opp	15
5.3	Måling 24_2_ned	18
5.4	Måling 25_1_opp	20
5.5	Måling 25_2_opp	22
5.6	Måling 25_2_ned	24
5.7	Sammenlikning mellom målingene	26
5.8	Glatting av profiler	28
6	Konklusjon og oppsummering	30
	Referanser	32
	Appendix A	33
A.1	Propagasjonsfaktor for 6 GHz	33
A.2	Propagasjonsfaktor for 3 GHz	40

1 Innledning

Å ha kontroll på miljøet man opererer i er alltid en utfordring. Tilgang på gode refraktivitetsdata for å beregne radarrekkevidde har vært etterspurt av Sjøforsvaret. Refraktiviteten sier noe om hvordan en radarstråle avbøyes i atmosfæren. Dette har kommet enda mer i søkelyset etter anskaffelsen av Fridtjof Nansen-klasse fregattene og Skjold-klasse MTBene som begge har avanserte radarer ombord. Slike målinger er viktig for å kunne si noe om yteevnen til egen radar til en hver tid, samtidig som man også kan estimere fiendens radarrekkevidde.

I dette dokumentet vil det være fokus på beregnet radarrekkevidde for et maritimt miljø og deteksjon av mål på eller nær overflaten. Refraktiviteten bestemmes ut fra trykket, temperaturen og vandamptrykket oppover i atmosfæren. Disse parametrene kan måles ved hjelp av en radiosonde som festes til en heliumfylt ballong og slippes fra skipet.

Ducting er refraktive forhold som fører til at en radarstråle bøyer ned mot bakken, noe som kan gi lange deteksjonsavstander ved og nær bakken.

Over sjøen vil det alltid være en fordampningsduct tilstede. Høyden og styrken av ducten vil være avhengig av varierende meteorologiske forhold (lufttemperatur, trykk, vandamptrykk, vindhastighet og sjøtemperatur).

Fordampningsduct kan bestemmes ved radiosondemålinger. Dette er en litt omstendelig måte å måle på i en operasjonell sammenheng. Samtidig kan ducten være så lav at en ikke klarer å måle den med radiosonde, eller at skipets mikroklima påvirker målingen. Derfor er det utviklet enklere metoder som benytter seg av målinger av lufttemperatur, luftfuktighet, vindstyrke og trykk i en kjent høyde og sjøtemperaturen i overflaten. Ved hjelp av ulike modeller kan man da beregne høyden og styrken på fordampningsducten. Noen av modellene er nevnt i [1]. I denne rapporten er Paulus Jeske modellen brukt [2].

Skipets mikroklima kan også påvirke radiosondemålingene i de nederste meterne. Det er derfor også sett på forskjeller når sonden slippes fra et skip og når den daler ned i fallskjerm et stykke unna skipet.

Målet med rapporten er å belyse hvilke forskjeller i radarrekkevidde man kan få mellom ulike måter å måle/beregne refraktiviteten på. I noen sammenhenger er det ikke nødvendig å vite nøyaktig hvordan radarstrålene forplanter seg i atmosfæren, mens i andre operasjoner kan 3 kilometer lenger deteksjonsavstand være avgjørende. Eksempelvis kan 3 kilometer lenger deteksjonsavstand gi deg tid til å skyte to istedenfor ett missil mot et innkommende supersonisk missil i lav høyde.

2 Teori

Radarstrålens avbøying, også kalt refraksjon, i atmosfæren er avhengig av brytningsindeksen. Brytningsindeksen er definert som forholdet mellom propagasjonshastigheten i vakuum og propagasjonshastigheten i atmosfæren. Dette forholdet varierer lite i atmosfæren, og typiske verdier spenner fra 1,000250 til 1,000400. Derfor er det praktisk å innføre begrepet refraktivitet

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad (2.1)$$

Hvor n er brytningsindeksen. N er dimensjonsløs, men benevnes ofte i N-enheter. Refraktiviteten N kan beskrives ved likning (2.2) beskrevet i [3]

$$N = 77.6 \left(\frac{P}{T} \right) + 3.73 \cdot 10^5 \left(\frac{e}{T^2} \right) \quad (2.2)$$

hvor P er lufttrykk (hPa), T lufttemperatur (K) og e er vanndamptrykket (hPa).

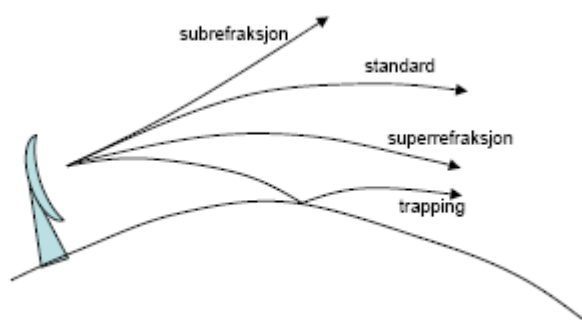
Siden jorda krummer, er det hensiktsmessig å ta hensyn til det i beregningen av refraktivitet. En bruker derfor en modifisert refraktivitet M gitt ved

$$M = N + 0.157z \quad (2.3)$$

hvor z er høyde over bakken i meter. M benevnes i M-enheter og er dimensjonsløs. For radarpropagasjon i atmosfæren det ikke er absoluttverdien av M , men vertikalgradienten dM/dz som er viktig [4].

En skiller gjerne mellom fire ulike propageringsforhold etter verdien på dM/dz , nemlig subrefraksjon, normal/standard, superrefraksjon og trapping (Figur 2.1 og Tabell 2.1). Med standard atmosfære menes $dM/dz = 118$ M-units/km [5]. For $dM/dz < 0$ vil en radarstråle bøyes ned mot jordoverflaten. Strålen vil reflekteres fra jordoverflaten og bli "fanget" (trapped) i et luftlag nær bakken. Fenomenet kalles trapping og luftlaget der radarstrålen fanges kalles en duct. Slike tilfeller kan gi lange radarrekkevidde nær bakken.

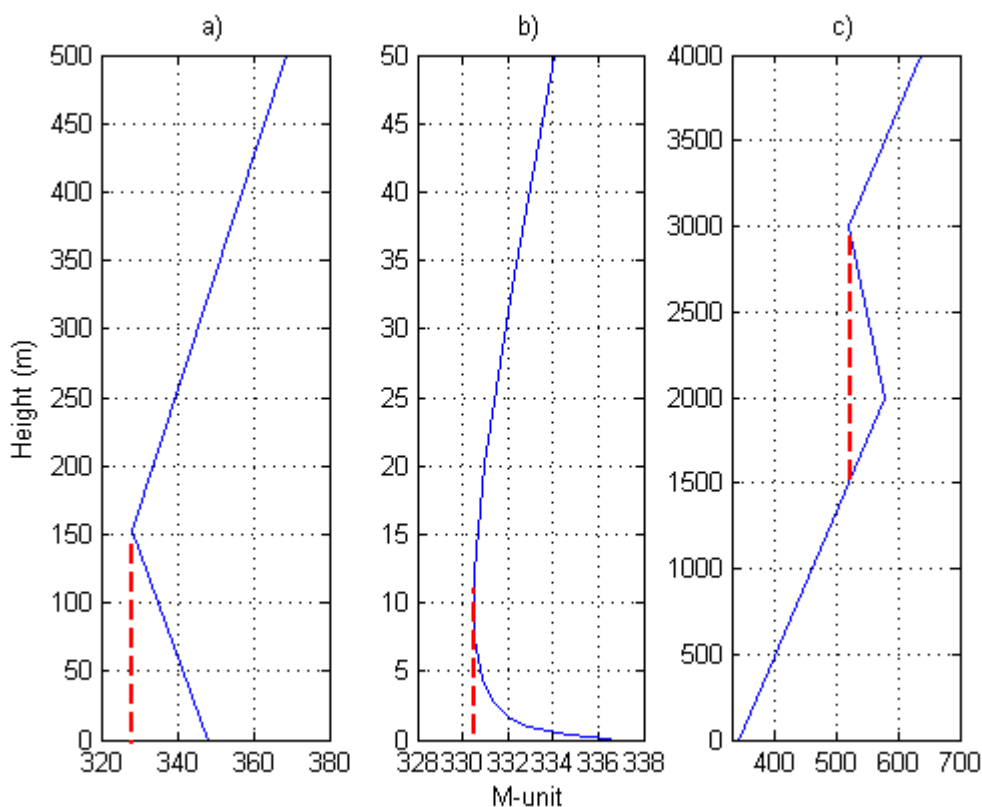
En deler gjerne opp ducter i ulike kategorier etter hvordan de dannes og hvor de opptrer (Figur 2.2). For nærmere beskrivelser, se for eksempel [6].



Figur 2.1 Refraktive forhold

Forhold	dM/dz (M-unit pr kilometer)
Trapping	$-\infty - 0$
Superrefraktiv	0 – 78
Normal	78 – 157
Subrefraktiv	157 - ∞

Tabell 2.1 Ulike refraktive forhold



Figur 2.2 Ulike ducttyper. a) bakke duct, b) fordampnings duct og c) høyde duct. Rød stiple linje viser høyden på ducten.

Fordampnings duct forekommer stort sett alltid over sjø og i kystnære områder hvor luftfuktigheten er høy som følge av fordampning fra havet. Dette er derfor av stor interesse og betydning for maritime operasjoner. Ducten oppstår fordi luftfuktigheten avtar raskt med høyden over en havoverflate. Høyden på en slik duct varierer fra et par meter på høye breddegrader til rundt 40 meter i tropiske strøk, men det kan også være store døgnlige og geografiske variasjoner innenfor et område.

Siden en fordampnings duct er som en bølgeleder som er ”åpen/uttett” i toppen, vil den også kunne påvirke en radar som er plassert over ducten [7].

Trapping i fordampnings ducten er frekvensavhengig. Ifølge [7] er Tabell 2.2 en enkel tilnærming for hvilke frekvenser som fanges fullstendig og høyden til ducten. Merk at tilnærmingen er gjort for en fast dM/dz. Ved kraftigere negative gradienter vil ducthøyden i Tabell 2.2 kunne være mindre.

Frekvens (GHz)	Ducthøyde (m)
3	25
7	14
10	10
18	6

Tabell 2.2 Ducthøyde som gir fullstendig trapping for ulike frekvenser.

Men ifølge [8] viser flere forsøk at en slik "cut-off"-effekt forekommer over et intervall av frekvenser istedenfor som en absolutt grense. For å fange en radarstråle effektivt i en duct, bør innfallsvinkelen mellom radarstrålen og ducten ikke være mer enn 1° [9].

3 Advanced Refractive Effects Prediction System (AREPS)

AREPS er et verktøy utviklet av Space and Naval Warfare System Center i San Diego for beregning av blant annet radardekning og kommunikasjonsforhold. I bunn ligger propagasjonsmodellen Advanced Propagation Model (APM) som er en hybrid strålegang- og bølgelikningsmodell. For detaljer, se [10].

Verktøyet brukes av bl.a. den amerikanske marinen. Programmet er også implementert i HMETOC (Hydrographic Meteorological and Oceanographic Capability). HMETOC er et system utviklet av NATO for å visualisere og analysere miljødata, samt hvordan miljøet påvirker sensorer, våpen og plattformer.

4 Målinger

Det ble gjennomført en måleserie med radiosonder ombord på KV Andenes i Bjørnafjorden den 24. og den 25. oktober 2007. Sondene ble sluppet fra helikopterdekket ombord på KV Andenes, 7 meter over havet. For beskrivelse av utstyret, se [11].

4.1 Gjennomføring av radiosonderingene

Målingene ble utført med radiosonder av type RS92 fra Vaisala. Sondene ble sendt opp med ballong, ble løst fra ballongen i en viss høyde og dalte ned med fallskjerm. Dette ble gjort for å kunne måle to ganger. Målingen på vei ned blir ikke påvirket av skipets mikroklima og andre faktorer i slippøyeblikket. Samtidig kan man eventuelt måle fordampningsduct ved at man får målinger helt ned til havoverflaten. I Bjørnafjorden er det brukt data fra fire ballongslipp, hvor to av de også har tilhørende målinger på vei ned. Det vil i rapporten legges det mest vekt på dataene fra KV Andenes. Målingene er heretter omtalt som f.eks. "24_1_opp" som indikerer dato, nummer på målingen den aktuelle datoen og om målingen er gjort på vei opp eller ned.



Figur 4.1 Kart som viser Bjørnafjorden.

4.2 Beregning av fordampningsduct

Det finnes ulike modeller for beregning av fordampningsduct. I denne rapporten er Paulus-Jeske-modellen [2;12] brukt, siden den er implementert i AREPS. Paulus-Jeske-modellen (PJ) bruker lufttemperatur, vindstyrke og luftfuktighet målt 6 meter over havoverflaten, samt sjøtemperaturen på overflaten. Som en forenkling antar modellen konstant trykk på 1000 hPa, og ikke trykket målt i 6 meter.

På KV Andenes er første måling i radiosondeoppstigningene, som er i 7 meter over havet, brukt som inputverdier. Ved målingene som er gjort med nedsynkende sonde er siste verdi før havoverflaten brukt. Disse høydene var 5 og 9 meter for de to målingene.

5 Resultater

Propagasjonstapberegninger er gjort i AREPS. Siden sonderingene mangler data helt ned til havoverflaten, er dette løst på to ulike måter ved å ekstrapolere ned til havnivå. I de nederste sju meterne er det brukt beregnet fordampningsduct eller standard atmosfære.

Det er gjort beregninger av radarrekkevidde for fire ulike profiler for hver måling.

- 1) Radiosonedata med beregnet fordampningsduct i de nederste 7 meterne. (omtales som SMD, Sonde Med Duct). For de to profilene med nedstigende sonde er det beregnet fra 8 og 9 meters høyde.
- 2) Radiosonedata med standard atmosfære i de nederste 7 meterne (omtales som SUD, Sodedata Uten Duct). For de to profilene med nedstigende sonde er det beregnet fra 8 og 9 meters høyde.
- 3) Bruke kun beregnet fordampningsduct (omtales som RBD, Ren Beregnet Duct)
- 4) Standard atmosfære med $dM/dz = 118$ M-units/km.

Radarinnstillingene som er brukt i AREPS for å beregne propagasjonstapet er gitt i Tabell 5.1. Radar cross section (RCS) til målet som er brukt, er 12 m².

Det er valgt å se på propagasjonstapet (PL) når sannsynligheten for deteksjon er 55 %. AREPS beregnet PL ved 55 % deteksjonssannsynlighet til 136 dB for 6 GHz og 133 dB for 3 GHz. Det er valgt å se på propagasjonstapet i 2, 10 og 20 meter over havflaten.

Figurer som viser propagasjonsfaktor er vist i 6Appendix A, en figur for hver profil. Plottene illustrerer hvordan energien påvirkes av ulike refraktive lag i atmosfæren.

Oscillasjonen i de første 2 til 15 kilometerne i plottene (f. eks. Figur 5.2) som viser PL skyldes interferens mellom radarstråler. Jamfør med mønsteret i f.eks. Figur 6.1.

Polarisasjon	Horisontal
Frekvens	3 og 6 GHz
Maks effekt	192 kW
Antenne gain	26 dBi
Radarens rotasjonshastighet	45 RPM
Høyde til antennen over havet	20 m
Horisontal strålebredde	2°
Vertikal strålebredde	2°
Pulslengde	0,25 µs
Receiver noise figure	5 dB
System loss	2 dB
Pulsrate	67 Hz
Antenneelevasjon	0°

Tabell 5.1 Radarparametere som er brukt i beregningene

5.1 Måling 24_1_opp

Figur 5.1 viser M-profiler fra måling 24_1_opp. SMD og SUD har en negativ gradient mellom 19 og 29 meter og en kraftig positiv gradient mellom 7 og 10 meter.

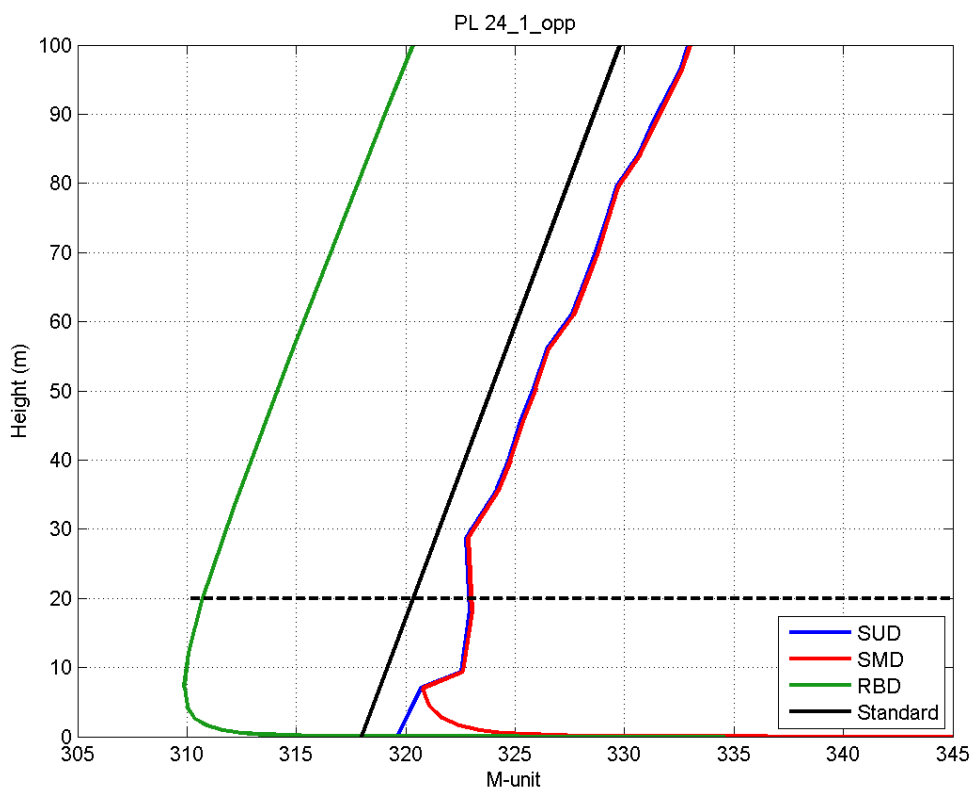
Figur 5.2 og Figur 5.3 viser PL i 2, 10 og 20 meter for henholdsvis 6 og 3 GHz. I 20 meters høyde gir SUD og SMD betydelig lengre beregnet radarrekkevidde enn RBD og standard for begge frekvensene. Dette skyldes ducten fra 19 til 29 meter som fanger energi rundt 20 meters høyde.

I 2 og 10 meters høyde gir RBD lenger beregnet radarrekkevidde enn SUD og SMD for 6 GHz. Årsaken er at den kraftige positive gradienten i 7-10 meter i SUD og SMD, som ikke er tilstede i RBD. Gradienten vil bøye radarstrålene oppover og hindre energi å nå ned under 10 meters høyde. Samtidig vil RBD fange energi i nær havoverflaten.

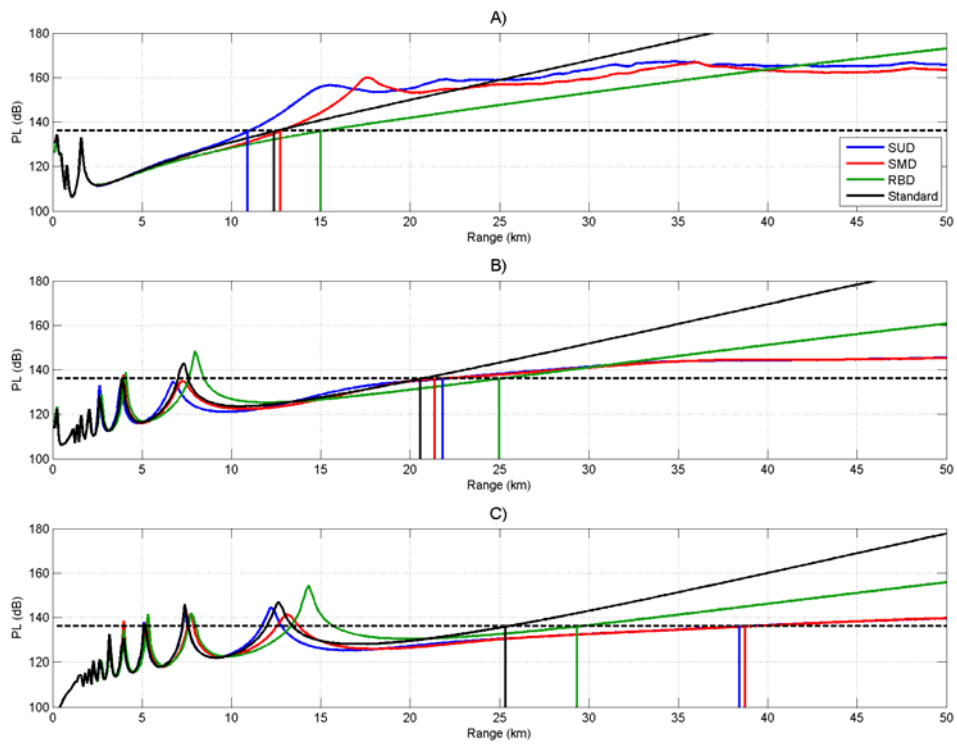
For 3 GHz i 10 meters høyde (Figur 5.3) gir SUD og SMD gir bedre rekkevidde enn RBD. Det kommer av fordampningsducten i RBD ikke er kraftig eller dyp nok til å påvirke radarstrålene på 3 GHz like mye som de på 6 GHz.

I 2 meter vil SMD gi lenger radarrekkevidde enn SUD, fordi fordampningsducten vil fange mer av energien mellom 0 og 7 meters høyde. Dette går igjen for alle målingene som følger.

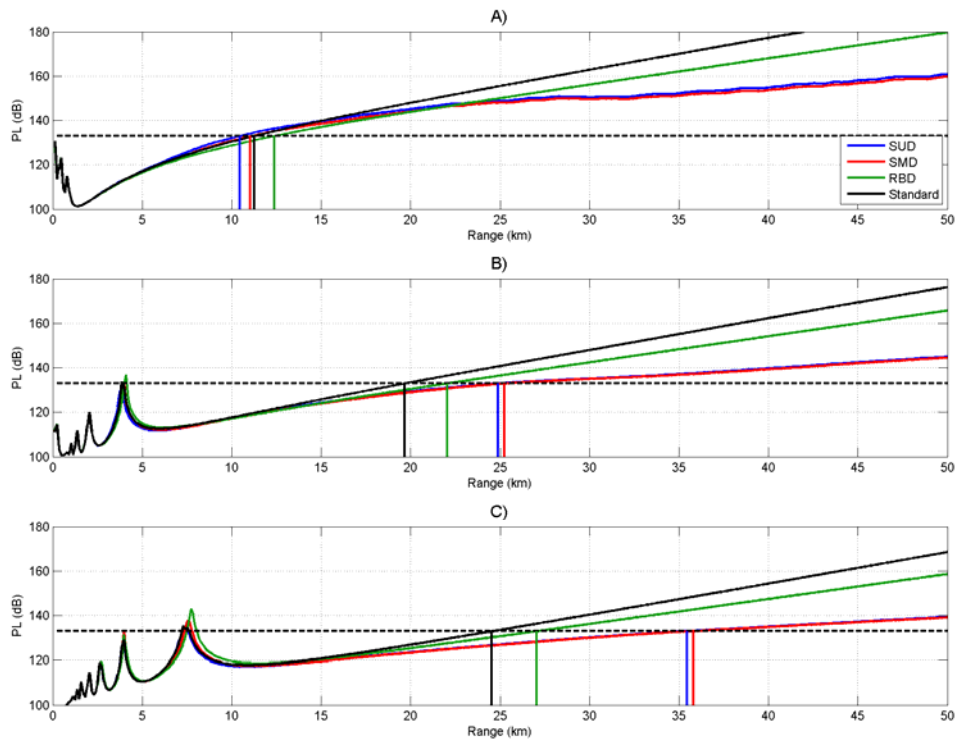
Propagasjonsfaktor for de ulike profilene i måling 24_1_opp er vist i Figur 6.2 - Figur 6.4 og Figur 6.21 - Figur 6.23.



Figur 5.1 M-profiler fra måling 24_1_opp. Stiplet linje viser radarhøyde på 20m



Figur 5.2 PL i høyde A) 2m, B) 10m og C) 20m for 24_1_opp. Frekvens 6 GHz. Stiplet linje viser grensen for dB-nivå som gir 55 % deteksjonssannsynlighet.



Figur 5.3 PL i høyde A) 2m, B) 10m og C) 20m for 24_1_opp. Frekvens 3 GHz. Stiplet linje viser grensen for dB-nivå som gir 55 % deteksjonssannsynlighet.

5.2 Måling 24_2_opp

For denne radiosondeoppstigningen ble det målt negativ refraktivitesgradient opp til 19 meter (Figur 5.4). Dette fører til at mer energi når ned til 2 meters høyde, og dermed gir større deteksjonsavstand enn når en bruker RBD (Figur 5.5 A og Figur 5.6 A). Deteksjonsavstandene for SMD og SUD er på hele 17 og 19 kilometer i denne høyden for 6 GHz og ca 15 kilometer for 3 GHz.

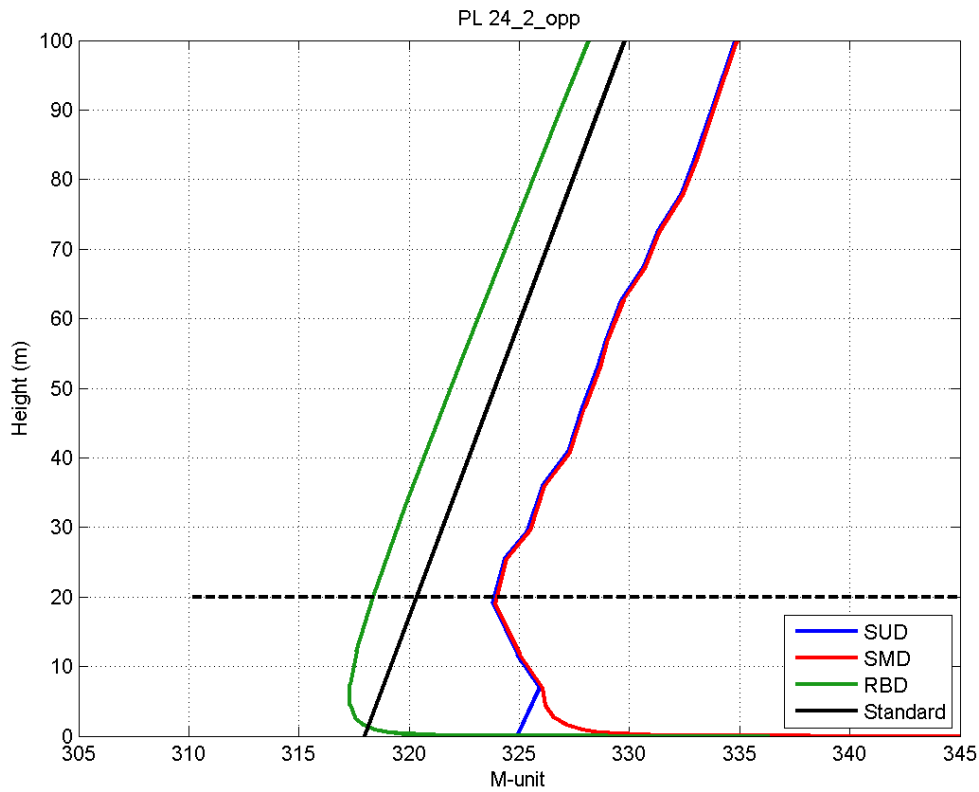
I 10 meter gir SUD størst deteksjonsavstand for 6 GHz. SUD har en positiv gradient fra 0-7 meter og bøyer radarstrålene tidligere oppover igjen enn SMD. Dermed når mindre energi ned mot havoverflaten (Figur 5.5 B) når SUD brukes.

I 20 meter er det en snau kilometers forskjell i deteksjonsavstand mellom RBD, SUD og SMD (Figur 5.5 C), mens standard atmosfære gir deteksjonsavstand som er 3-4 kilometer kortere enn de tre andre.

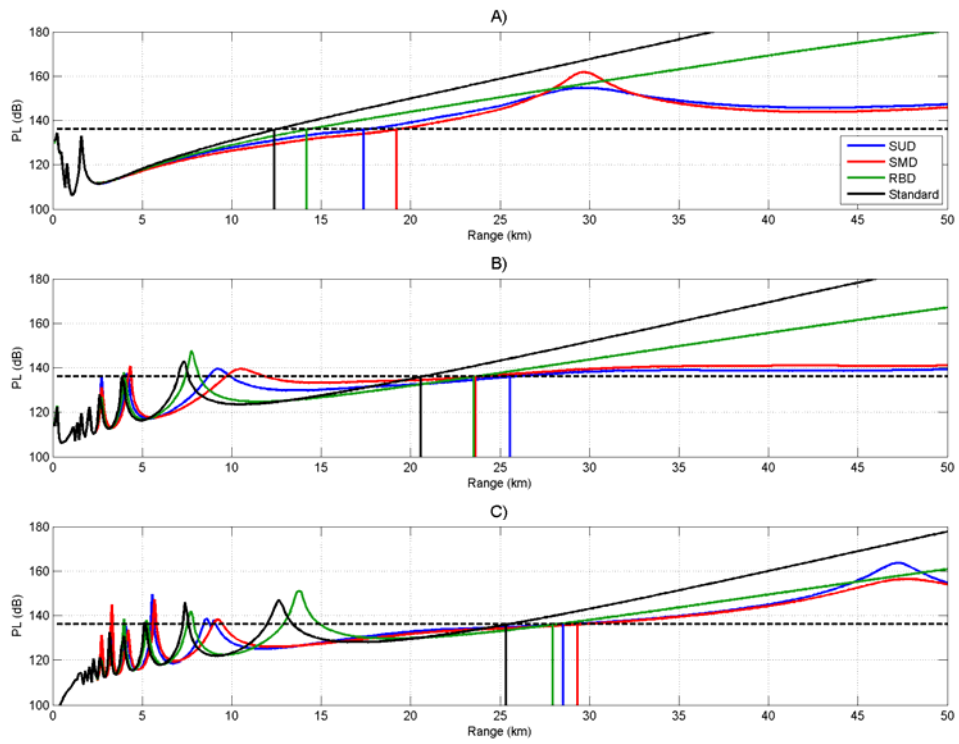
For 3 GHz er bildet annerledes (Figur 5.6 B og C). Her er deteksjonsavstanden vesentlig lenger for SMD og SUD enn RBD og standard, rundt 20 kilometer i 10 meter og 15 kilometer i 20 meter.

Forklaringen er at 6 GHz bøyes mer ned mot havoverflaten enn 3 GHz, slik at mindre energi er igjen i 10 og 20 meter for 6 GHz.

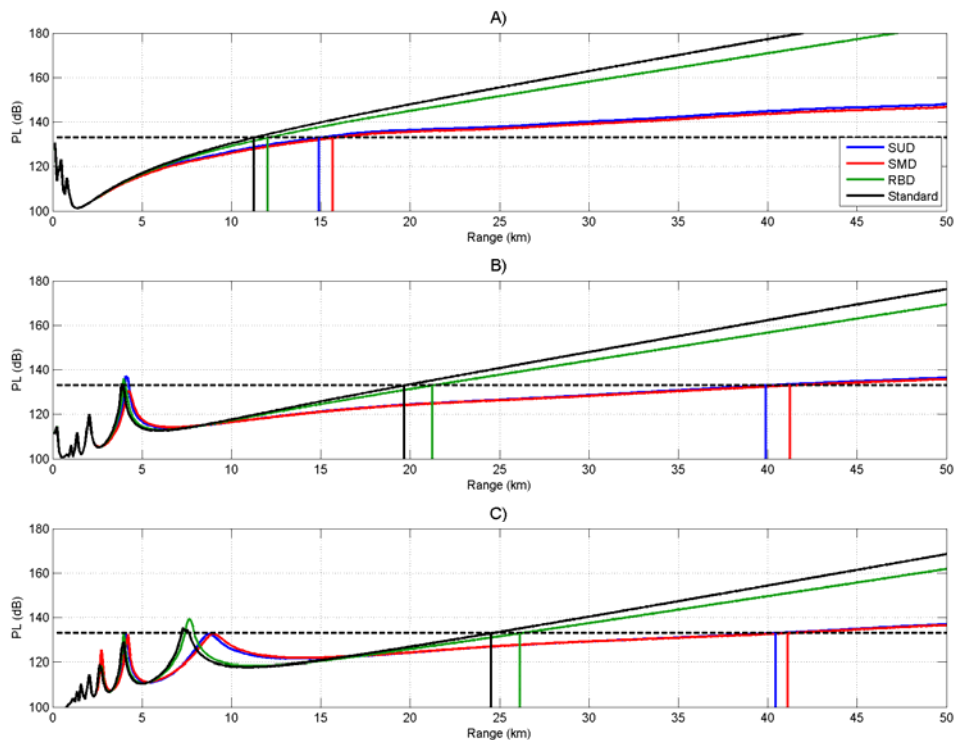
Simulert radarrekkevidde beregnet med standard atmosfære er kortest for alle simuleringene siden den ikke har noen negativ gradient som bøyer radarstrålene nedover mot havoverflaten.



Figur 5.4 M-profiler fra måling 24_2_opp. Stiplet linje viser radarhøyde på 20m



Figur 5.5 PL i høyde A) 2m, B) 10m og C) 20m for 24_2_opp. Frekvens 6 GHz. Stiplet linje viser grensen for dB-nivå som gir 55 % deteksjonssannsynlighet.



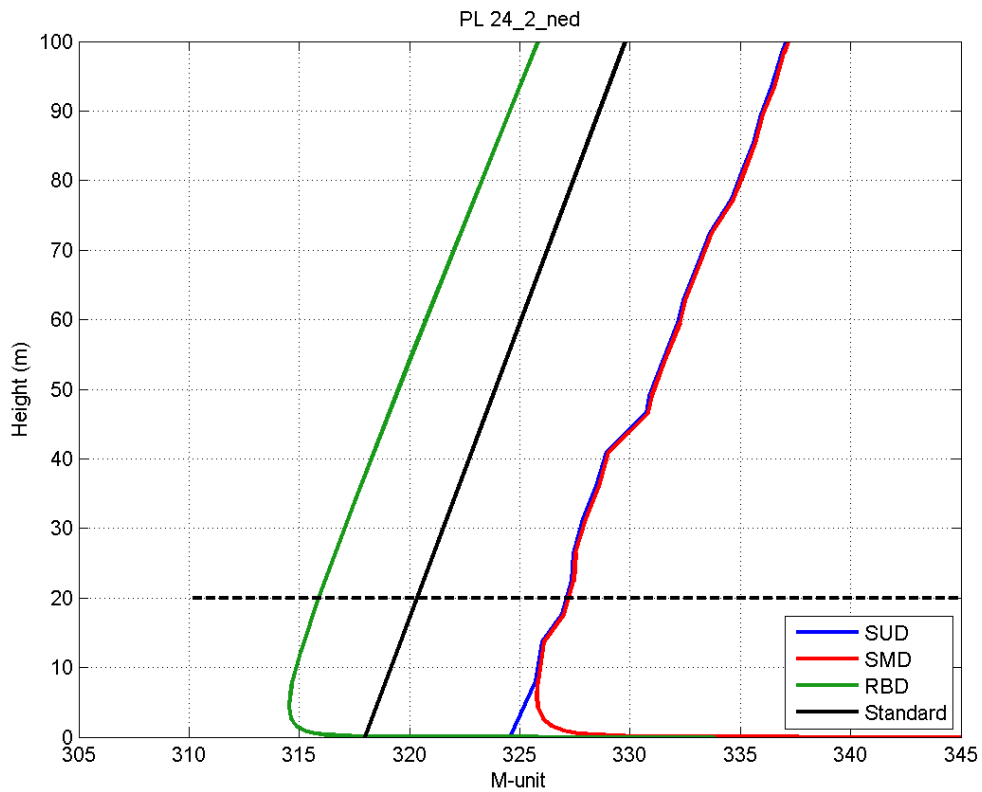
Figur 5.6 PL i høyde A) 2m, B) 10m og C) 20m for 24_2_opp. Frekvens 3 GHz. Stiplet linje viser grensen for dB-nivå som gir 55 % deteksjonssannsynlighet.

5.3 Måling 24_2_ned

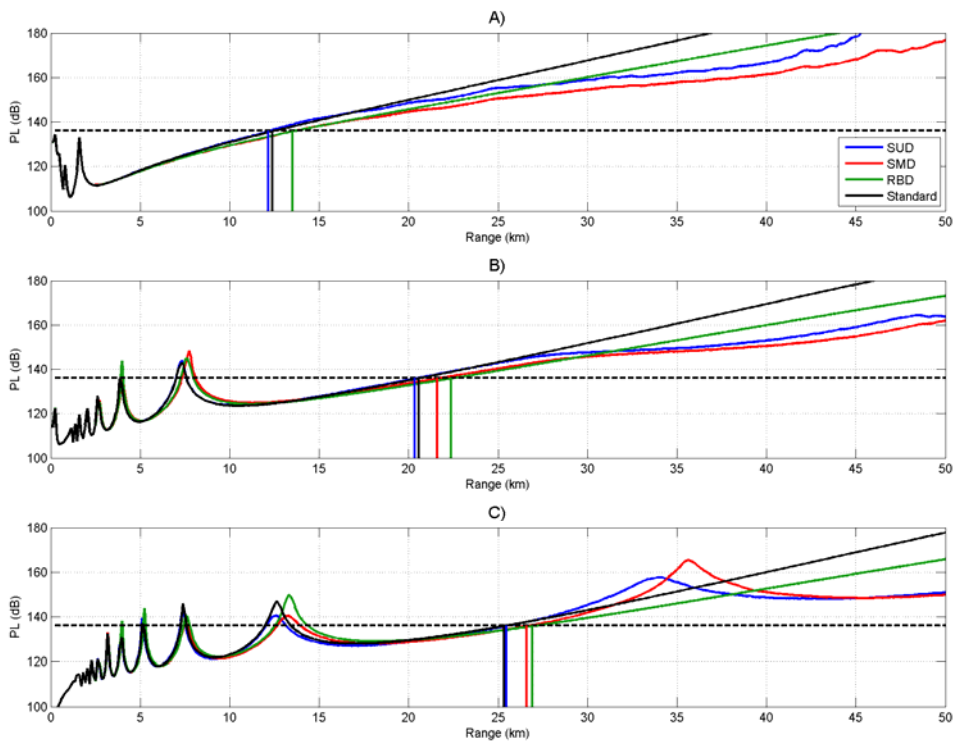
Figur 5.8 og Figur 5.9 viser liten forskjell i deteksjonsavstand beregnet med de ulike M-profilene vist i Figur 5.7, spesielt for 3 GHz. For 6 GHz ser en at SUD og standard gir omtrent samme radarrekkevidde for alle høydene. Det samme gjelder også for SMD og RBD. Forklaringen ligger i at M-profilene til SUD og standard svært lik form (Figur 5.7). Det samme gjelder for SMD og RBD. Forskjellen mellom SMD/RBD og SUD/standard er på et par hundre meter for alle de tre høydene.

For 3 GHz er forskjellene i deteksjonsavstand mellom de ulike profilene enda mindre. Forklaringen ligger i at 3 GHz påvirkes mindre av de små variasjonene i SMD og SUD.

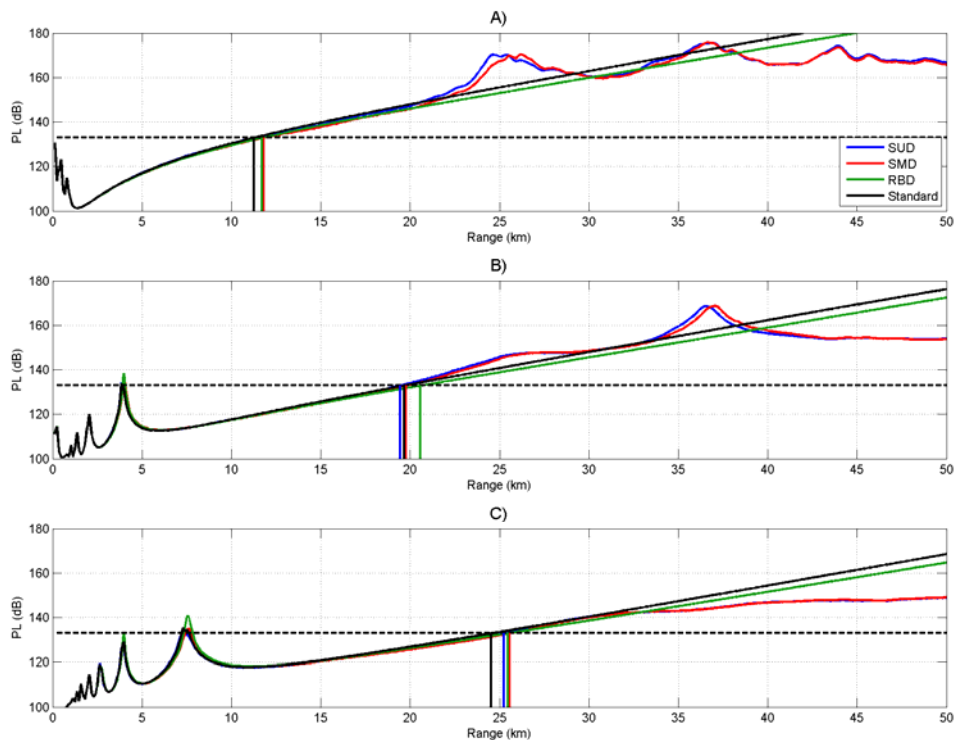
Grunnen til de små forskjellene kan være at målingen er gjort mens sonden daler ned i fallskjerm et stykke unna skipet, og dermed ikke er påvirket av skipets mikroklima. Forskjell mellom måling på vei opp og ned omtales mer senere.



Figur 5.7 M-profiler fra måling 24_2_ned. Stiplet linje viser radarhøyde på 20m



Figur 5.8 PL i høyde A) 2m, B) 10m og C) 20m for 24_2_ned. Frekvens 6 GHz. Stiplet linje viser grensen for dB-nivå som gir 55 % deteksjonssannsynlighet.



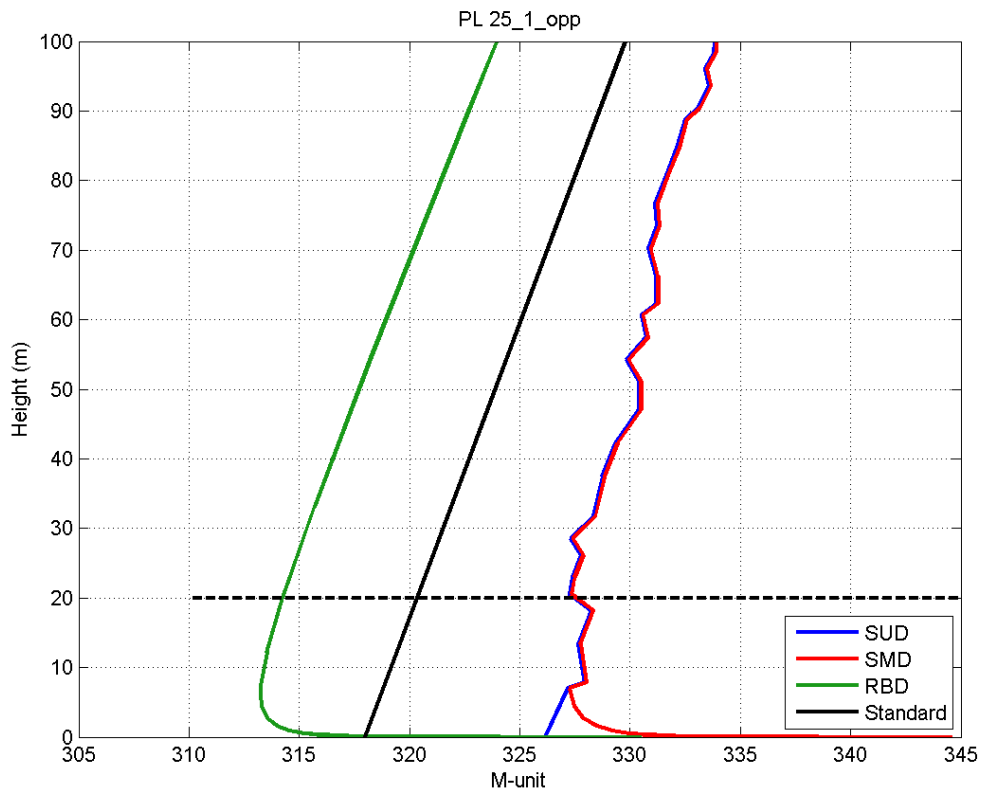
Figur 5.9 PL i høyde A) 2m, B) 10m og C) 20m for 24_2_ned. Frekvens 3 GHz. Stiplet linje viser grensen for dB-nivå som gir 55 % deteksjonssannsynlighet.

5.4 Måling 25_1_opp

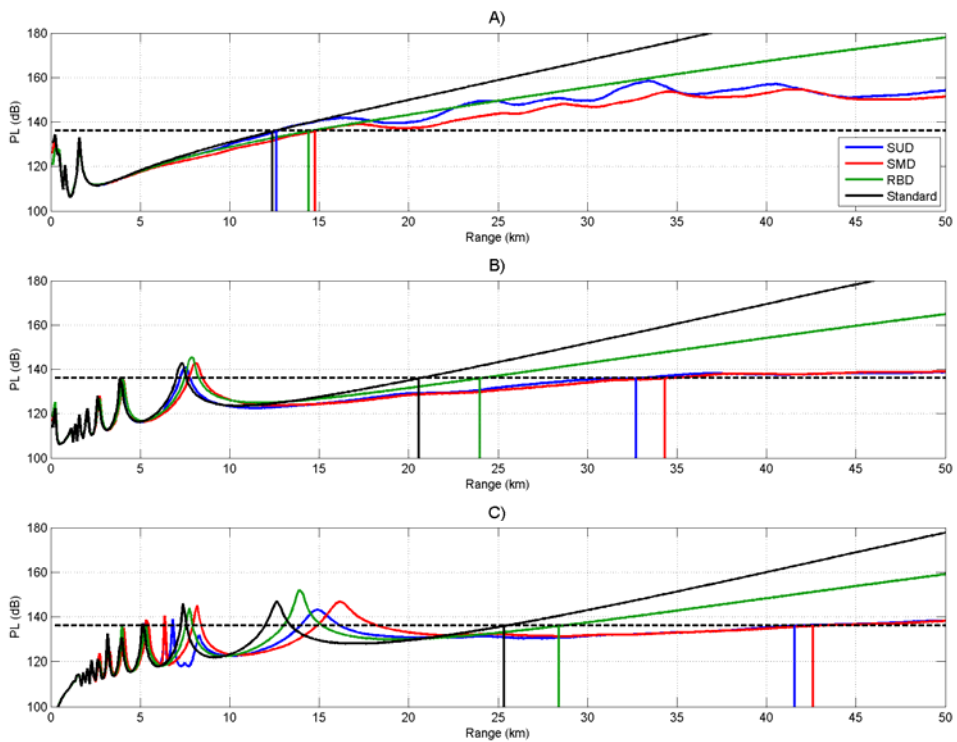
Figur 5.10 viser noe mer hakkete kurver for SMD og SUD enn de tidligere profilene. Kurvene har en del små områder med negativ refraktivitetsgradient. I 2 meter for 6 GHz gir SMD og RBD litt over 2 kilometer lenger rekkevidde enn SUD og standard (Figur 5.11 A), så det er tydelig at fordampningsducten fanger mer energi i lav høyde. Forskjellen i deteksjonsavstand mellom SMD og RBD er rundt 200 meter. Det samme gjelder for SUD og standard. For 3GHz (Figur 5.12 A) er det ikke et slikt skille mellom profilene med og uten fordampningsduct.

I 10 og 20 meters høyde er bildet annerledes (Figur 5.11 og Figur 5.12). Her gir SUD og SMD vesentlig lengre radarrekkevidder enn RBD og standard. De lange rekkeviddene for SUD og SMD skyldes at radarstrålene blir fanget mellom den kraftige positive gradienten mellom 7 og 8 meter og den kraftige negative gradienten mellom 18 og 21 meter. Gradientene er så kraftige at både 3 og 6 GHz refrakteres i disse lagene.

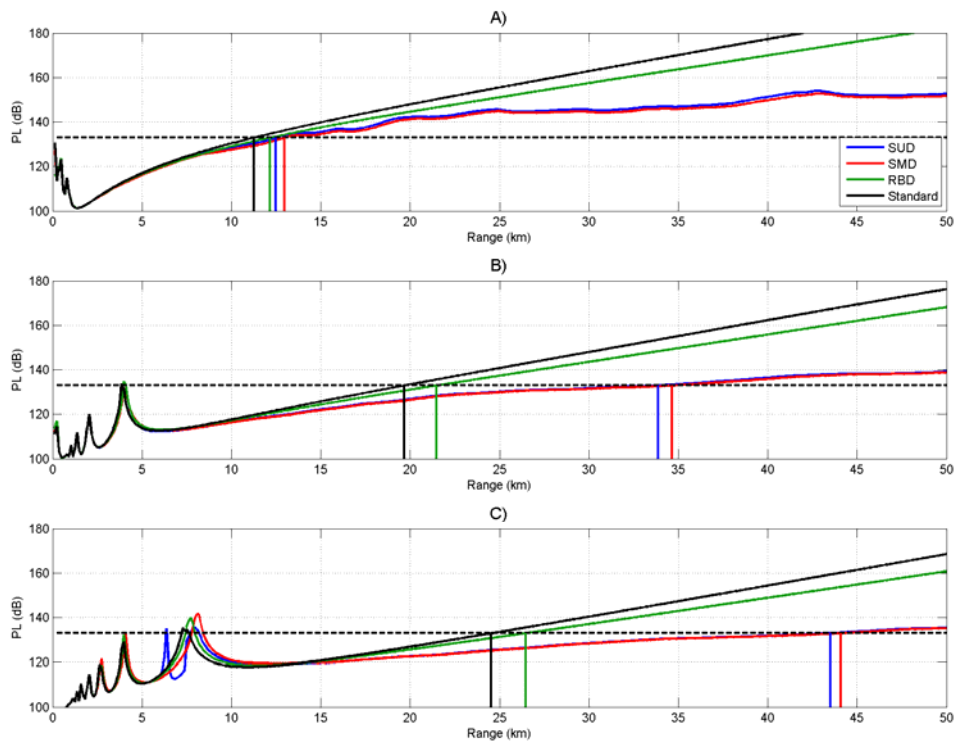
Forskjellen mellom standard og RBD er større for 6 GHz enn 3 GHz som igjen skyldes at høyere frekvenser refrakteres lettere enn lave. Det samme finner en igjen for SMD og SUD.



Figur 5.10 M-profiler fra måling 25_1_opp. Stiplet linje viser radarhøyde på 20m



Figur 5.11 PL i høyde A) 2m, B) 10m og C) 20m for 25_1_opp. Frekvens 6 GHz. Stiplet linje viser grensen for dB-nivå som gir 55 % deteksjonssannsynlighet.

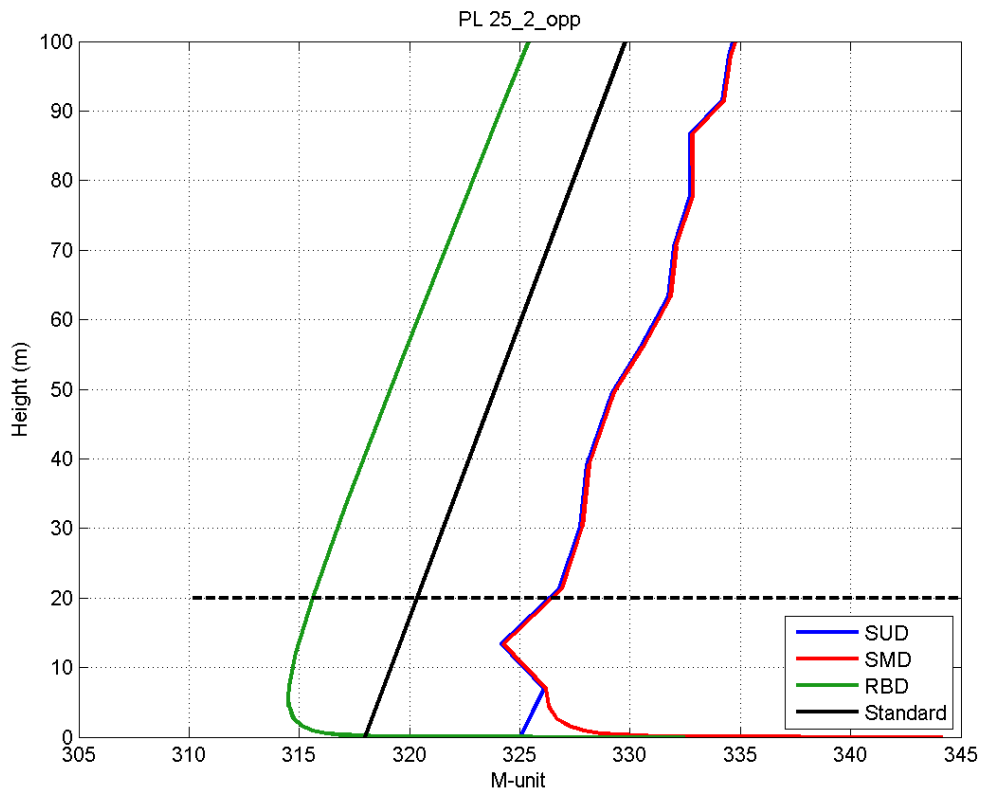


Figur 5.12 PL i høyde A) 2m, B) 10m og C) 20m for 25_1_opp. Frekvens 3 GHz. Stiplet linje viser grensen for dB-nivå som gir 55 % deteksjonssannsynlighet.

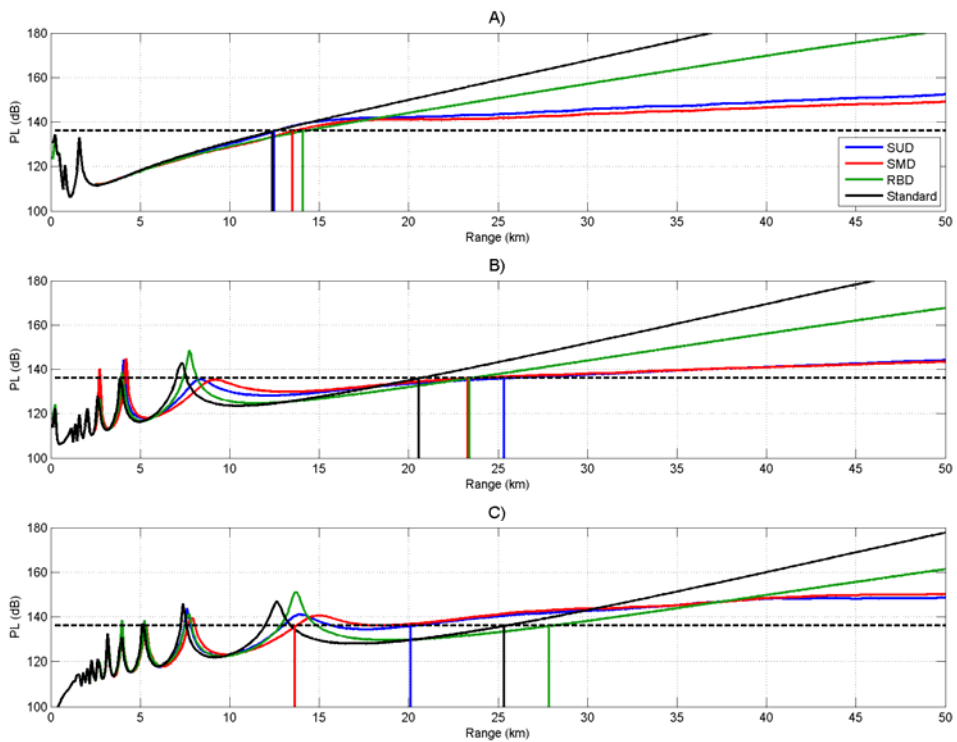
5.5 Måling 25_2_opp

Figur 5.13 viser en negativ refraktivetsgradient mellom 7 og 13 meter for SUD og SMD etterfulgt av en subrefraktiv gradient fra 13 til 21 meter. I 20 meters høyde for 6 GHz (Figur 5.14 C) ser en at både SUD og spesielt SMD beregner betydelig kortere radarrekkevidder enn RBD og standard. Årsaken er at den kraftige negative gradienten fanger mye energi mellom 5 og 10 meter over havet (se Figur 6.14 og Figur 6.15 i A.1). Dermed er det lite energi igjen i 20 meters høyde.

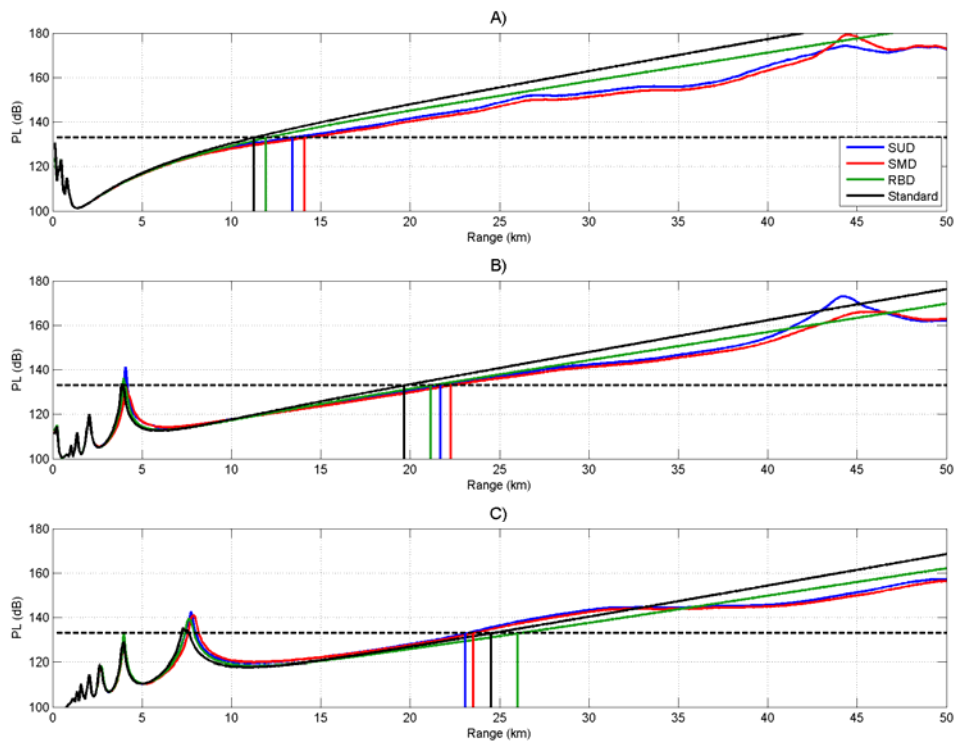
For 3 GHz er variasjonen i beregnet radarrekkevidde mellom de fire profilene mindre (Figur 5.18). Det viser at ducten mellom 7 og 13 meter ikke påvirker 3 GHz i nevneverdig grad (se også Figur 6.33 og Figur 6.34 i A.2).



Figur 5.13 M-profiler fra måling 25_2_opp. Stiplet linje viser radarhøyde på 20m



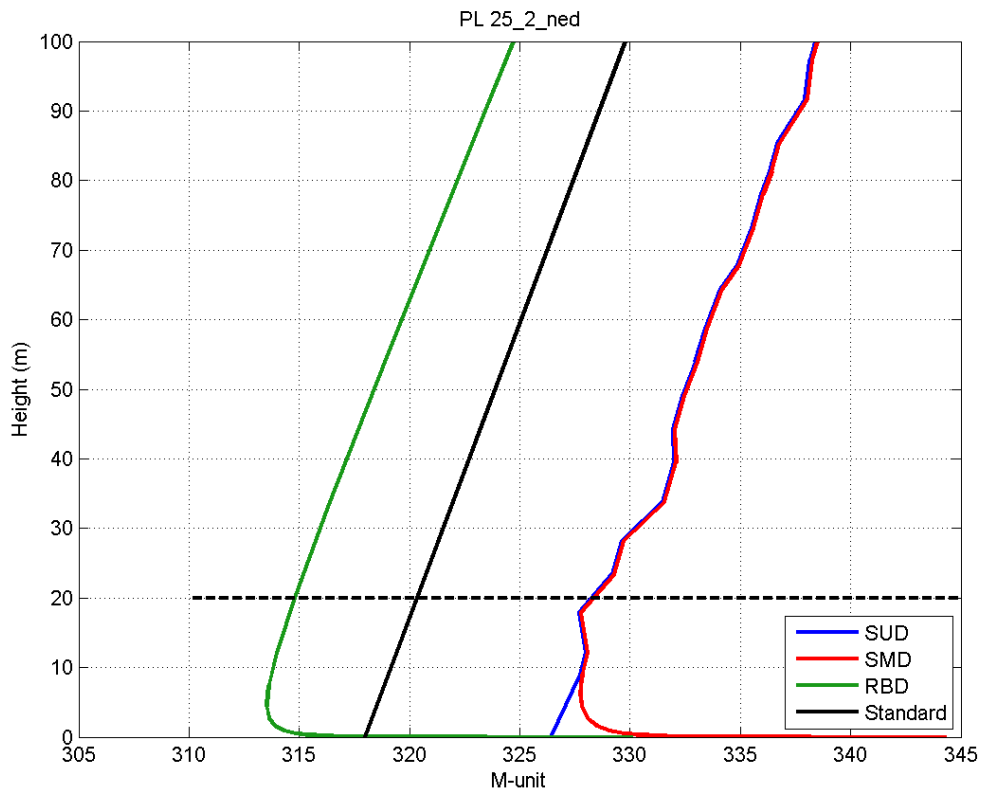
Figur 5.14 PL i høyde A) 2m, B) 10m og C) 20m for 25_2_opp. Frekvens 6 GHz. Stiplet linje viser grensen for dB-nivå som gir 55 % deteksjonssannsynlighet.



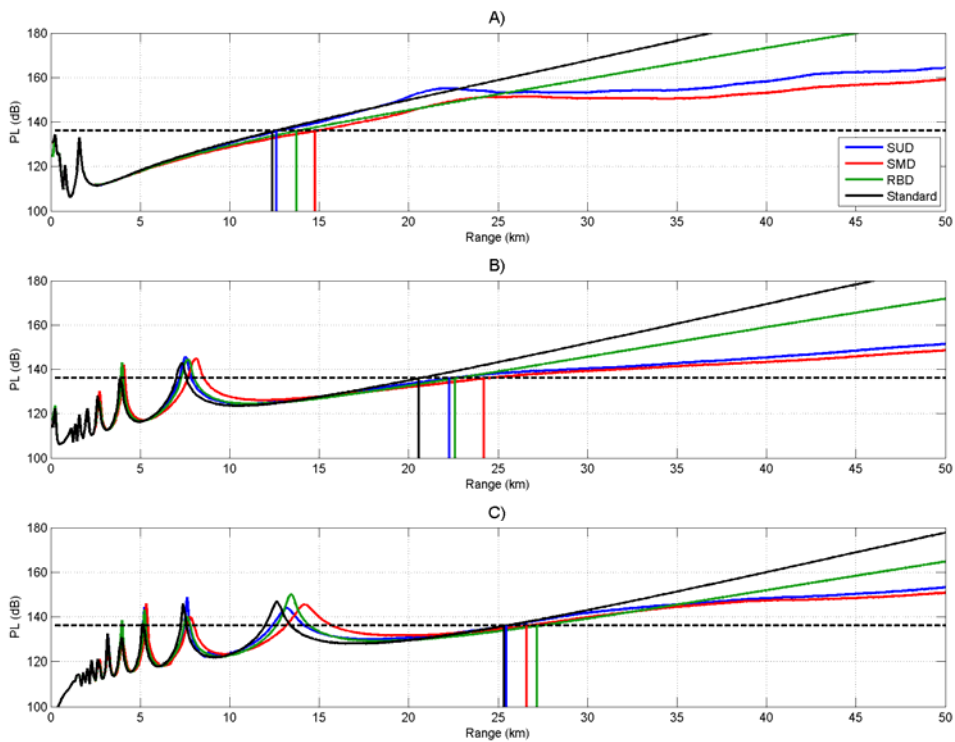
Figur 5.15 PL i høyde A) 2m, B) 10m og C) 20m for 25_2_opp. Frekvens 3 GHz. Stiplet linje viser grensen for dB-nivå som gir 55 % deteksjonssannsynlighet.

5.6 Måling 25_2_ned

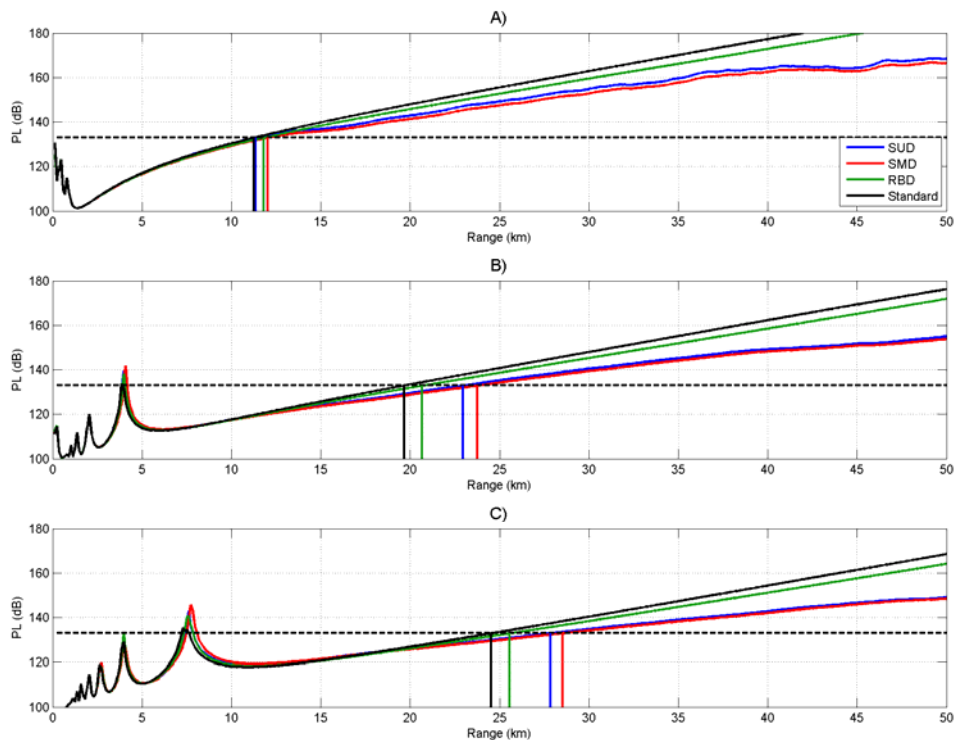
Figur 5.16 viser en superrefraktiv gradient mellom 7 og 12 meter og en svak negativ gradient mellom 12 og 18 meter for SMD og SUD. Mellom 18 og 21 meter er det en subrefraktiv gradient. For 3 GHz ser det ut til at gradientene fra 7 til 18 meter har mest og si for deteksjonsavstanden, mens fordampningsducten har mindre betydning. I 10 og 20 meter forskjellen 3-4 kilometer mellom SMD/SUD og RBD/standard. (Figur 5.18 B og C). For 6 GHz er forskjellene mellom de fire beregnede rekkeviddene ca 2 kilometer, bortsett fra i 10 meter der differansen mellom SMD og standard er noe mer (Figur 5.17).



Figur 5.16 M-profiler fra måling 25_2_ned. Stiplet linje viser radarhøyde på 20m



Figur 5.17 PL i høyde A) 2m, B) 10m og C) 20m for 25_2_ned. Frekvens 6 GHz. Stiplet linje viser grensen for dB-nivå som gir 55 % deteksjonssannsynlighet.



Figur 5.18 PL i høyde A) 2m, B) 10m og C) 20m for 25_2_ned. Frekvens 3 GHz. Stiplet linje viser grensen for dB-nivå som gir 55 % deteksjonssannsynlighet.

5.7 Sammenlikning mellom målingene

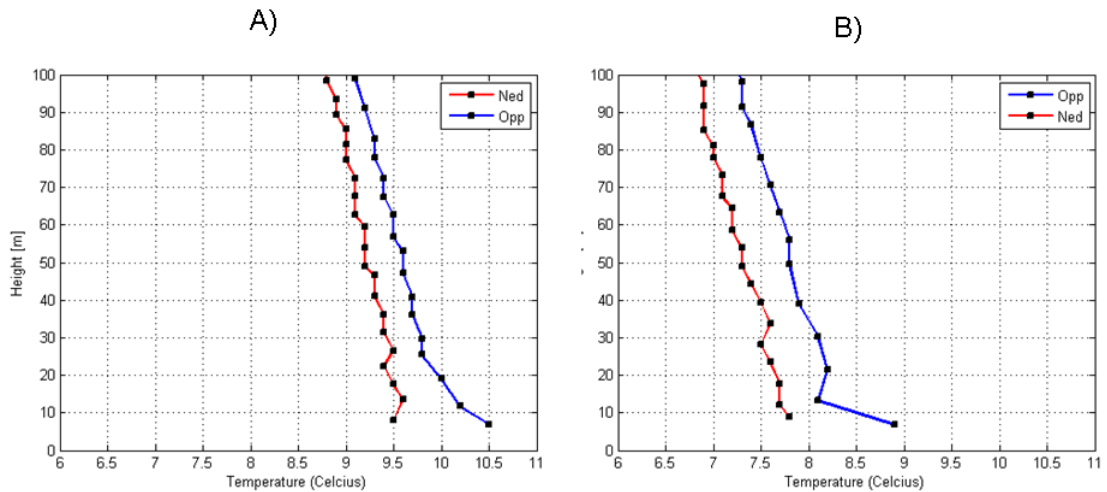
Simuleringene i kapittel 5.1- 5.6 viser at variasjonene i beregnet deteksjonsavstand er minst mellom de ulike profilene (SMD, SUD, RBD og standard) når radiosonden har målt på vei ned (Figur 5.8, Figur 5.9, Figur 5.17 og Figur 5.18). Største differanse er aldri over 4 kilometer (Figur 5.18).

Figur 5.19 og Figur 5.20 viser temperatur og fuktighet for 24_2_opp og 25_2_opp med tilhørende måling gjort med nedstigende radiosonde. Forskjellen i absoluttverdi mellom oppstigende og nedstigende sonde skyldes at sonden ikke måler på samme sted når den stiger som når den daler ned i fallskjerm. For 24_2-målingene treffer sonden sjøen ca 7 kilometer fra slippstedet. For 25_2-målingene er samme distanse 2,5 kilometer. I de nederste 20 meterne for måling 24_2 er forskjellene størst. (Figur 5.19 A) og Figur 5.20 A)). Fuktigheten dropper med 5 % fra 7 til 20 meter for oppstigende sonde, mens variasjonene er bare på 1 % for nedstigende sonde. I måling 24_2 synker temperaturen med 0,5 grader fra 7 til 20 meter for oppstigende sonde. Når sonden daler i fallskjerm er variasjonen bare 0,1 grad i samme høydeintervall.

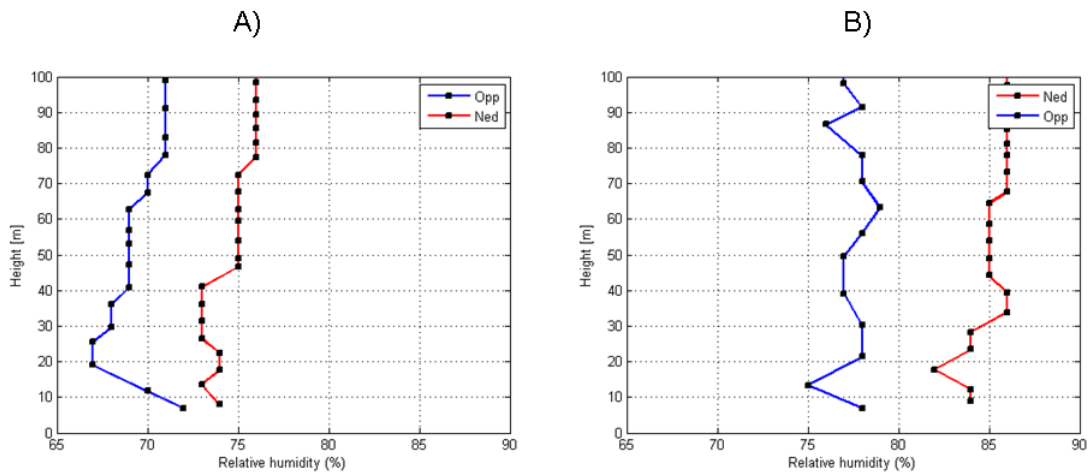
For måling 25_2 (Figur 5.19 B) og Figur 5.20 B)) er variasjonene mindre mellom oppstigende og nedstigende sonde enn for 24_2. Det eneste er det kraftige temperaturspranget på 0,8 grader fra 7 til 13 meter og et sprang på 3 % i fuktighet.

Sprangene i fuktighet og temperatur de første meterne når sonden stiger gir indikasjon på at skipets mikroklima påvirker målingene.

6 GHz gir mer spredning i deteksjonsavstand innefor hver enkelt måling enn 3 GHz, noe som er forventet. Spredningen øker også med økende målhøyde. For de ulike RBD-profilene varierer deteksjonsavstanden på det meste med 3 kilometer for 6 GHz, mens forskjellene er mindre for 3 GHz. For profilene fra radiosondedataene er differansen på det meste opp mot 20 kilometer på grunn av variasjonene i de nederste lagene som sonde fanger opp. Avstandene er størst i 10 og 20 meter.



Figur 5.19 A) Temperatur fra måling 24_2_opp og 24_2_ned. B) Temperatur for måling 25_2_opp og 25_2_ned.



Figur 5.20 A) Relativ fuktighet fra måling 24_2_opp og 24_2_ned. B) Relativ fuktighet for måling 25_2_opp og 25_2_ned.

5.8 Glatting av profiler

Det er gjort forsøk på å glatte SMD-profilene 24_1_opp, 24_2_opp, 25_1_opp og 25_2_opp siden disse har størst variasjon i M-enhet i de nederste meterne. (Figur 5.21), en variasjon som kan skyldes påvirkning fra skipet. Glattingen er gjort ved manuell tilpasning av M-profilene for 24_1_opp og 25_1_opp. For 24_2_opp og 25_2_opp er kurvene for temperatur og fuktighet i Figur 5.19 og Figur 5.20 glattet og nye M-profiler beregnet.

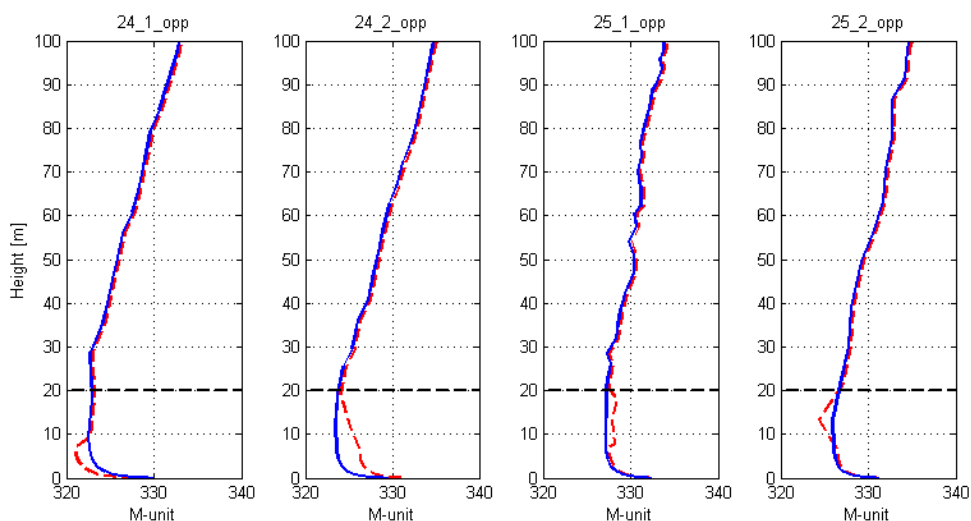
For 24_1_opp (Tabell 5.2) ser en at deteksjonsavstanden økes betraktelig med glattet kurve for 6 GHz. Økningen skyldes at den kraftige positive gradienten mellom 7 og 10 meter fjernes, noe som forårsaker at energien ikke bøyes oppover igjen i like stor grad. For 3 GHz (Tabell 5.3) er økningen mindre, siden den positive gradienten ikke har like stor innvirkning på lavere frekvenser.

Når måling 24_2_opp glattes (Figur 5.21), reduseres deteksjonsavstanden i 2 meter noe, mens den øker i 10 og 20 meters høyde for 6 GHz (Tabell 5.2). Grunnen er at i den glattede profilen for 24_2_opp er gradienten svakere enn originalprofilen. Dermed fanges ikke like mye energi i 2 meters høyde, mens det nå blir mer energi igjen 10 og 20 meters høyde. Sammenlikner en resultatet med deteksjonsavstandene i måling 24_2_ned (Figur 5.8), ser en at glattet profil gir avstander som gir dårligere samsvar i 10 og 20 meter enn om originalmålingen er brukt.

For 3 GHz reduseres deteksjonsavstanden i alle høydene (Tabell 5.3). Siden gradienten er svakere i den glattede profilen, fanges ikke 3 GHz-frekvensen like mye i ducten. Dermed reduseres deteksjonsavstandene. Dette gir et resultat som ligger en god del nærmere 24_2_ned (Figur 5.9).

I måling 25_1_opp (Tabell 5.2) er forskjellene mindre for 6 GHz mellom glattet og original måling enn tilsvarende for 3 GHz (Tabell 5.3). Der originalmålingen har to kraftig refrakterende lag i 7-8 meter (positiv) og 18-21 meter (negativ), har den glattede målingen en superrefrakterende gradient fra 7 til 21 meter (Figur 5.21). Denne superrefrakterende gradienten kan det se ut som er for svak til å bøye av 3 GHz i like stor grad som 6 GHz. Rekkevidden for 3 GHz reduseres med ca 10 kilometer i 10 og 20 meter, men gir likevel rundt 4-6 kilometer lenger rekkevidde enn RBD og standard.

For måling 25_2_opp er forskjellen mellom glattet profil og rådata liten for 3 GHz (Tabell 5.3), noe som viser at 3 GHz ikke påvirkes i særlig grad av den negative gradienten mellom 7 og 13 meter. For 6 GHz (Tabell 5.2) har deteksjonsavstanden i 20 meter økt betraktelig for glattet profil, siden den negative gradienten i 7-13 meter nå er fjernet, og mindre energi fanges nær havoverflaten, og gir bare ca 2 kilometer større deteksjonsavstand enn RBD. Sammenlikner en med rekkeviddene beregnet med 25_2_ned (Figur 5.14 og Figur 5.15), ligger disse nærmere rekkeviddene beregnet med glattet profil enn originalprofil. Unntaket er i 10 meters høyde for begge frekvensene. For 3 GHz er forskjellen i 10 meter bare 300 meter mellom original og glattet, mens den er 2 kilometer for 6 GHz.



Figur 5.21 Glattede profiler (blå), originale profiler (rød stiplet)

Måling	Målhøyde (m)	Deteksjonsavstand original (km)	Deteksjonsavstand glattet (km)
24_1_opp	2	12,7	17,4
	10	21,4	35,0
	20	38,7	47,3
24_2_opp	2	19,2	17,0
	10	23,6	31,7
	20	29,3	32,5
25_1_opp	2	14,8	16
	10	34,3	32,3
	20	42,6	40,5
25_2_opp	2	13,5	15,5
	10	23,3	27,3
	20	13,6	29,8

Tabell 5.2 Forskjeller i deteksjonsavstand mellom original og glattet måling for 6 GHz

Måling	Målhøyde (m)	Deteksjonsavstand original (km)	Deteksjonsavstand glattet (km)
24_1_opp	2	11,0	14,0
	10	25,2	29,4
	20	35,8	38,5
24_2_opp	2	15,7	13,3
	10	41,2	25,2
	20	41,8	29,1
25_1_opp	2	13,0	13,0
	10	34,7	25,8
	20	44,1	33,1
25_2_opp	2	14,0	13,0
	10	22,3	22,0
	20	23,5	26,1

Tabell 5.3 Forskjeller i deteksjonsavstand mellom original og glattet måling for 3 GHz

6 Konklusjon og oppsummering

Å ha kontroll på miljøet man opererer i og hvordan det påvirker operasjonen er alltid en utfordring. Den enkleste metoden er å beregne fordampningsducten ved å måle temperatur, vindhastighet og luftfuktighet i et bestemt nivå over havoverflaten, samt måle overflatetemperaturen i sjøen. Forskjellene i deteksjonsavstand mellom ren beregnet fordampningsduct (RBD) og standard atmosfære viser for 6 GHz er mellom 2 og 5 kilometer for alle profilene. Til sammenlikning er den samme differansen for 3 GHz mellom 1 og 2 kilometer.

Radarrekkevidde beregnet med profilene målt med radiosonde viser stor variasjon i forhold til RBD og standard atmosfære. Særlig gjelder dette for profiler som er målt når sonden stiger. Nedstigende sonde viser profiler som ligner mer på standard atmosfære profil og som dermed gir radarrekkevidder som avviker mindre fra rekkeviddene beregnet med RBD og standard atmosfære enn det oppstigende sonde gjør. Dette kan skyldes at målingene med oppstigende sonde er påvirket av skipets mikroklima de første samplingene av målingene. Samtidig viser forsøket med å glatte noen av profilene at i tre av fire tilfeller ble deteksjonsavstandene lengre for 6 GHz med glattet profil, mens den ble litt kortere for den ene. For 3 GHz ble resultatet ca 3 kilometer lenger rekkevidde for en profil, betydelig kortere for to og liten forandring for den siste profilen.

Å trekke en entydig konklusjon over hvilken metode som er best for å måle refraktiviteten bør en være forsiktig med. I rapporten er det bare benyttet seks ulike profiler. En bør nok gjøre forsøk der en benytter seg av en god del flere målinger før man kan trekke en klar konklusjon. Men det som arbeidet viser er at forholdene varierer mye og at en bør være forsiktig med å beregne

radarrekkevidde med standard atmosfære. Ved å bruke ren beregnet fordampningsduct vil en ikke få med variasjoner i atmosfæren som en vil kunne måle med en radiosonde.

Et annet element som burde gjøres i et videre arbeid er å sammenlikne beregnede deteksjonsavstander med de deteksjonsavstander som radaren gir.

Det er ulike sammenhenger hvor det er viktig å kunne si noe om forventet deteksjonsavstand. For eksempel kan et par kilometer lenger deteksjonsavstand være av meget stor betydning ved forsvar mot innkommende missiler i lav høyde.

Studiet er gjort under forhold på høye breddegrader hvor gjennomsnittlig høyde på fordampningsduct er mellom 5 og 10 meter gjennom året. Jo nærmere en beveger seg ekvator, jo høyere er fordampningsducten. I Middelhavet er den til eksempel 12 – 15 meter og har større innvirkning enn i norske farvann.

En annen ting som bør nevnes er at det meste av arbeid med ducting over sjø som er gjort, er gjort i åpent hav langt unna påvirkning fra land. I åpent hav kan man anta at forholdene varierer lite horisontalt, mens i kyststrøk er de horisontale variasjonene mye større.

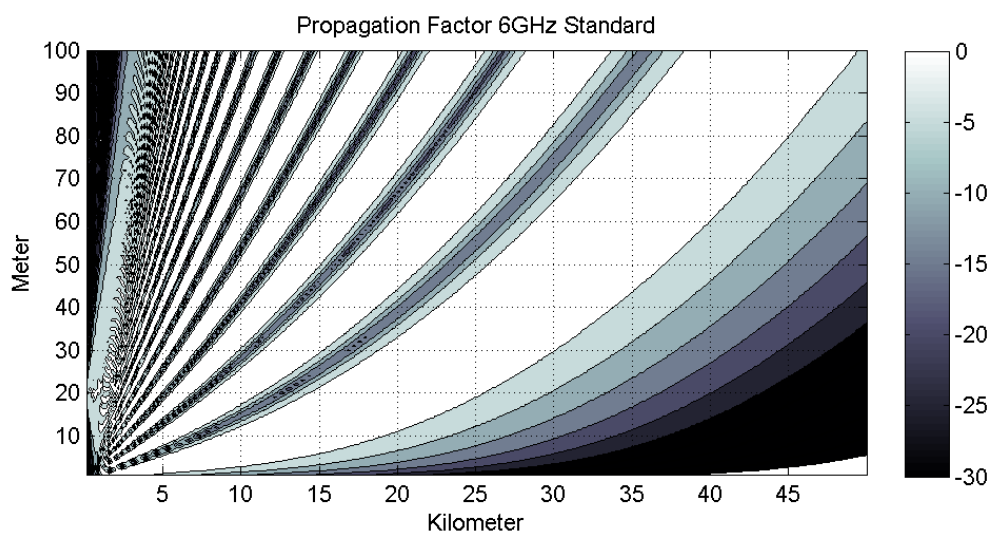
Referanser

- [1] Steven M.Babin, George S.Young, and James A.Carton, "A new model of the oceanic evaporation duct," *Journal of applied meteorology*, vol. 36 1997.
- [2] R. A. Paulus, "Practical application of an evaporation duct model," *Radio Science*, vol. 20, pp. 887-896, 1985.
- [3] B.R.Bean and E.J.Dutton, *Radio meteorology* Dover publications, 1968, p. 435.
- [4] G.D.Dockery, "Modeling electromagnetic wave propagation in the troposphere using the parabolic equation," *IEEE Trans. antennas propagation*, vol. 36, pp. 1464-1470, 1988.
- [5] "AREPS User's manual," July 2007.
- [6] Sofus L.Lystad, "Brytningsindeks, refraktivitet," www.met.no/met/met_lex/a_f/Brytningsindeks.doc ed 2007.
- [7] Herbert V.Hitney, "Refractive effects from VHF to EHF. Part A: Propagation mechanisms," *Propagation modelling and decision aids for communications, radar and navigation systems*, pp. 156-180, 1994.
- [8] H.T.Dougherty and E.J.Dutton, "The role of elevated ducting for radio service and interference fields.," 1981.
- [9] Gaspare Galati, *Advanced radar techniques and systems* 1993.
- [10] Amalia E.Barrios, "Considerations in the development of the Advanced Propagation Model (APM) for U.S. Navy applications," Proceedings of the international radar conference ed 2003, pp. 77-82.
- [11] Petter Østenstad, "Test av radiosonde- og tethersondeutstyr anskaffet i 2007. Et samarbeid mellom KNM Tordenskjold og FFI," Mar.2008.
- [12] H. Jeske, "State and limits of prediction methods of radar wave propagation conditions over the sea," *Modern topics in microwave propagation and air-sea interaction*, pp. 130-148, 1973.

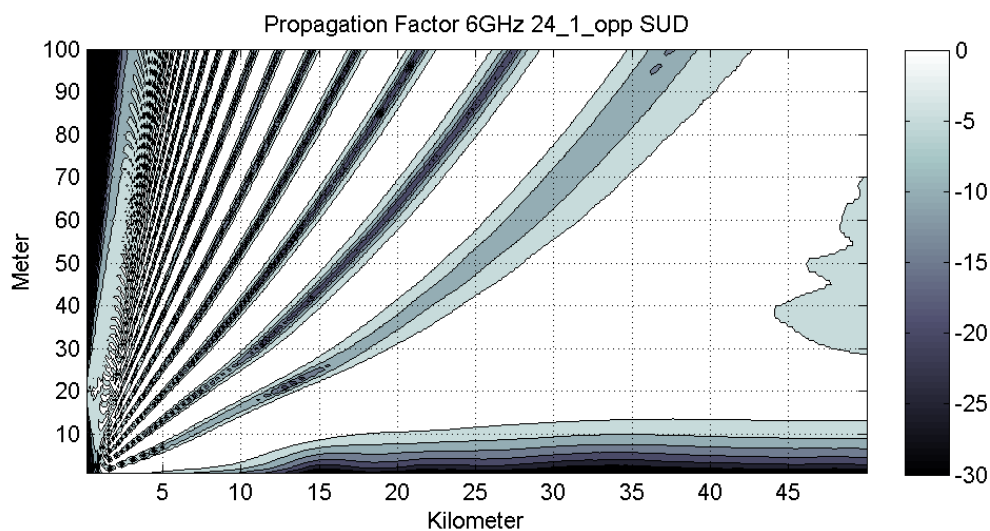
Appendix A

Plottene under viser propagasjonsfaktor for de ulike M-profilene som er brukt i denne rapporten. Propagasjonsfaktor er forholdet mellom den aktuelle feltstyrken i et punkt og feltstyrken i samme punkt ved free-space utbredelse. Skalaen er i desibel, og i de hvite området i figurene er propagasjonsfaktoren 0 eller høyere.

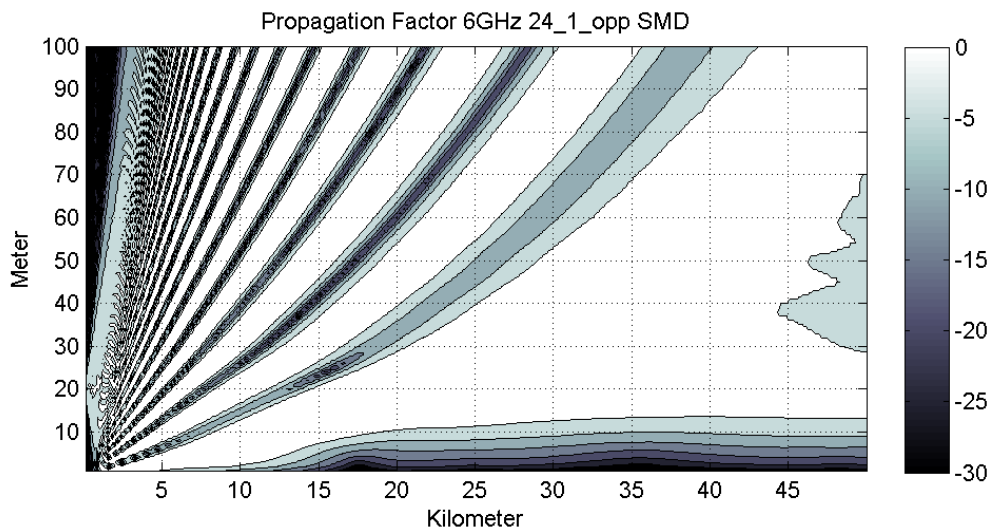
A.1 Propagasjonsfaktor for 6 GHz



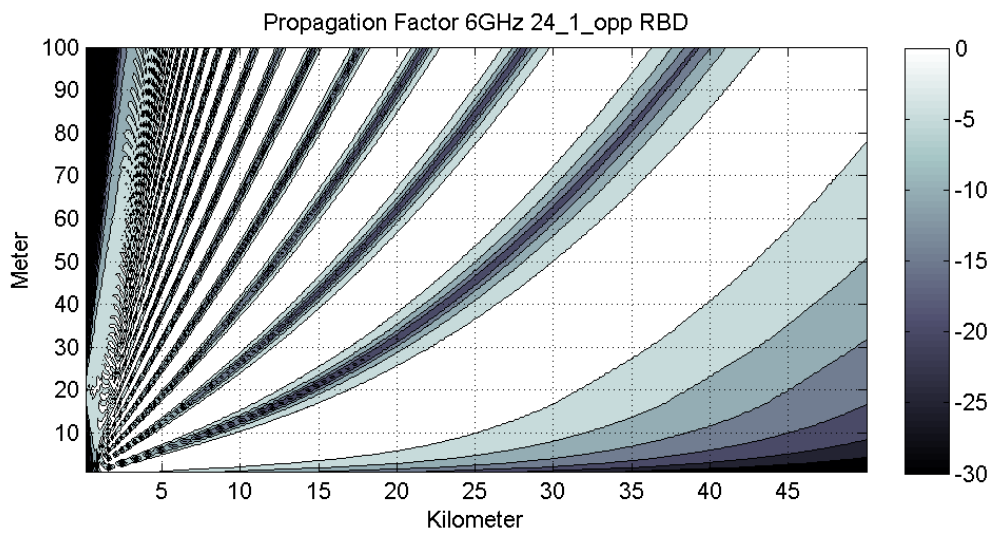
Figur 6.1 Propagasjonsfaktor for standard atmosfære, 6 GHz



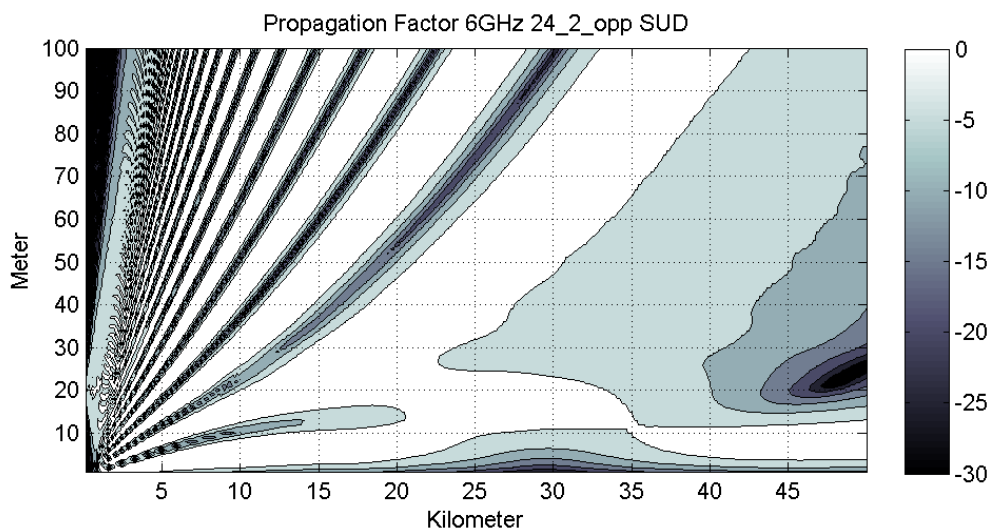
Figur 6.2 Propagasjonsfaktor for måling 24_1_opp SUD, 6 GHz



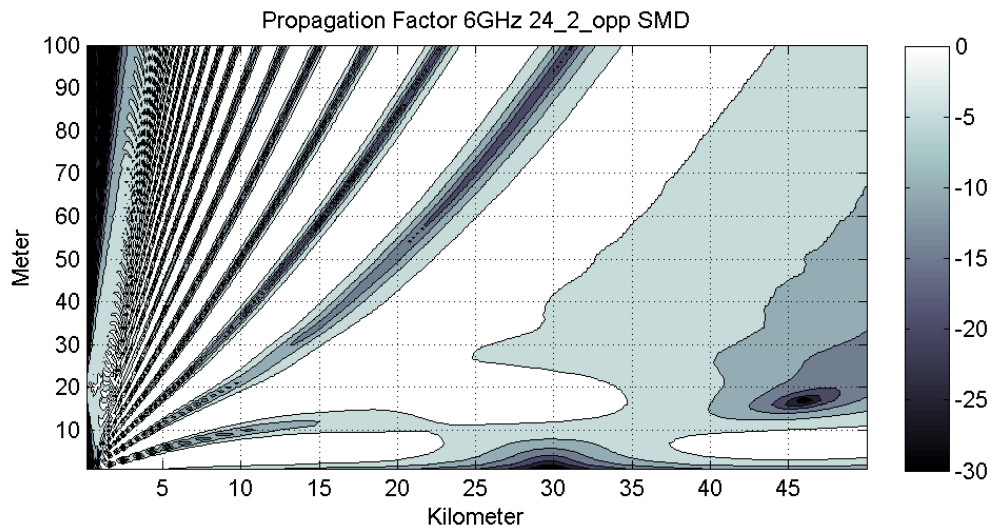
Figur 6.3 Propagasjonsfaktor for måling 24_1_opp SMD, 6 GHz



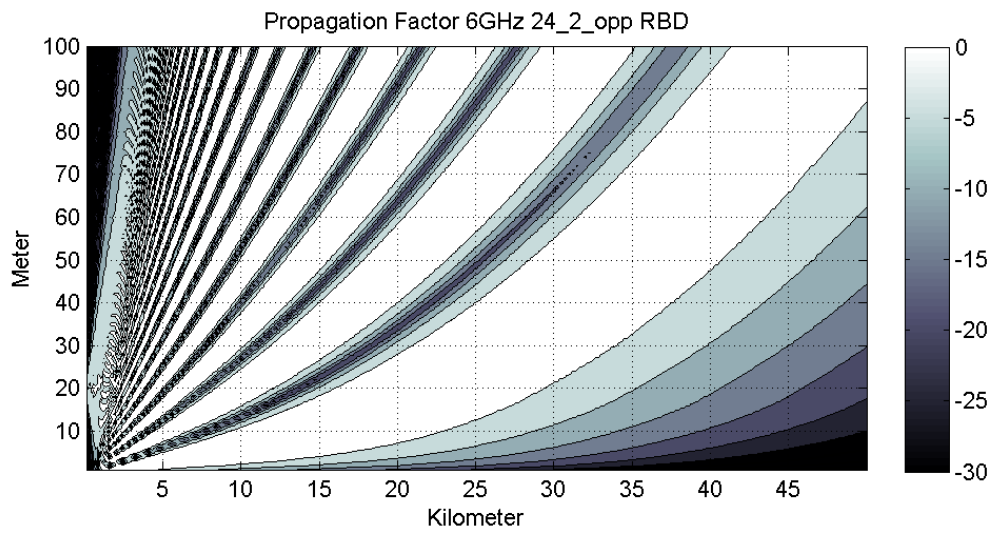
Figur 6.4 Propagasjonsfaktor for måling 24_1_opp RBD, 6 GHz



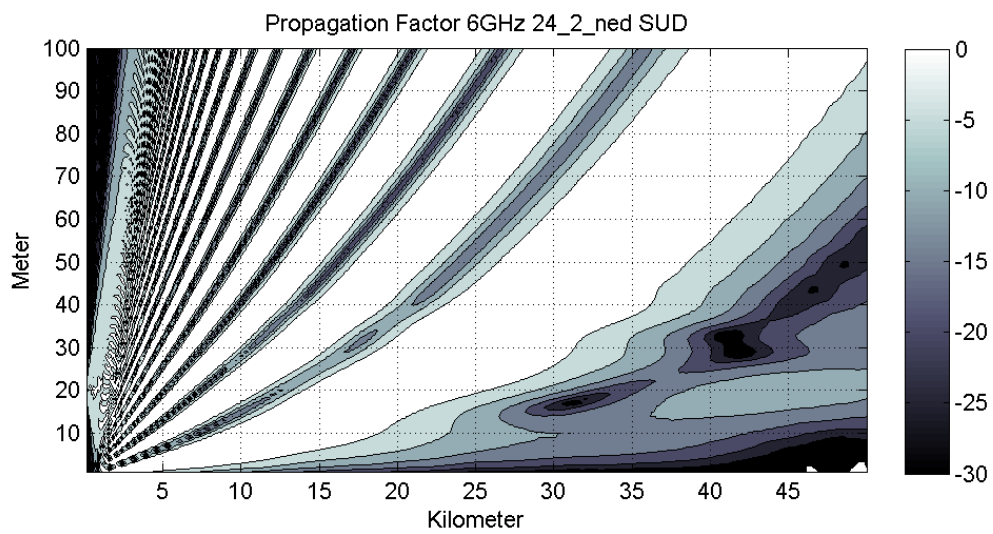
Figur 6.5 Propagasjonsfaktor for måling 24_2_opp SUD, 6 GHz



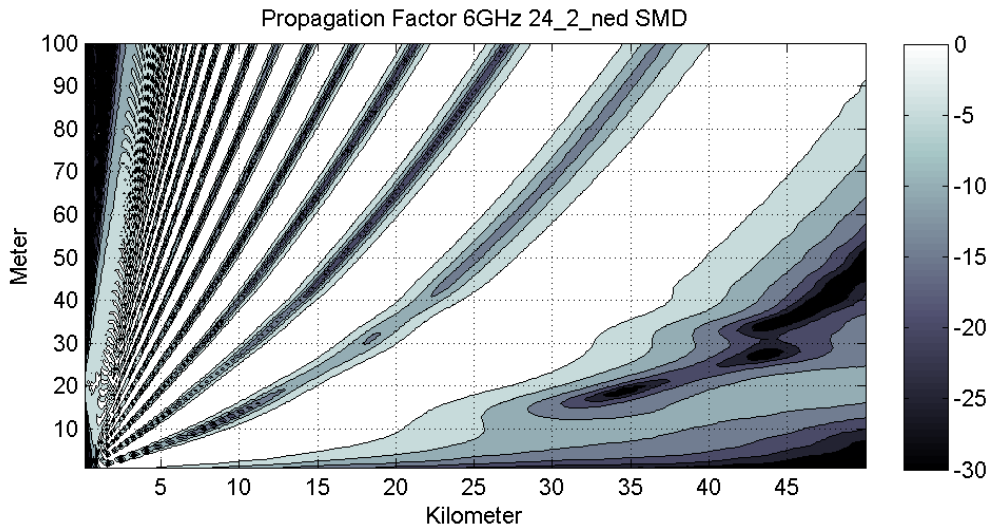
Figur 6.6 Propagasjonsfaktor for måling 24_2_opp SMD, 6 GHz



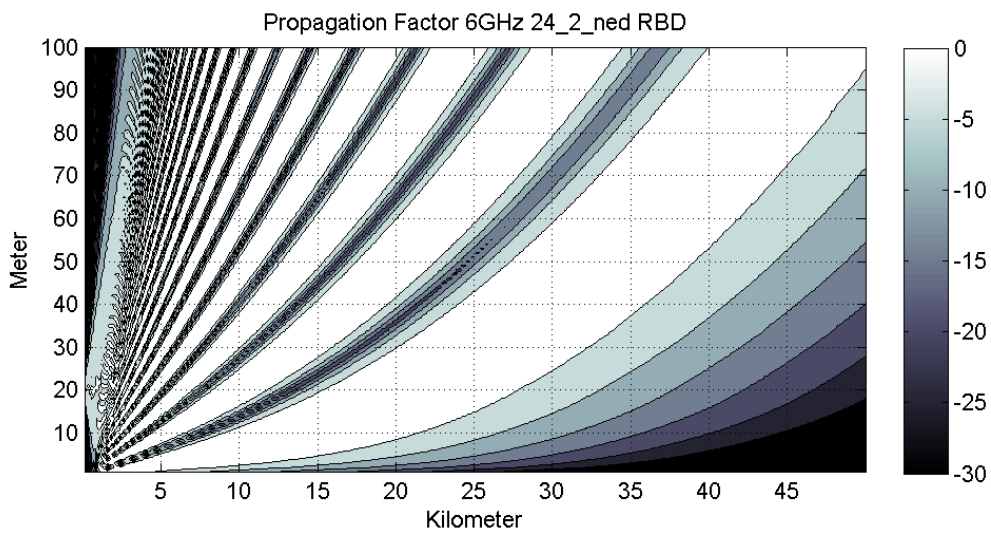
Figur 6.7 Propagasjonsfaktor for måling 24_2_opp RBD, 6 GHz



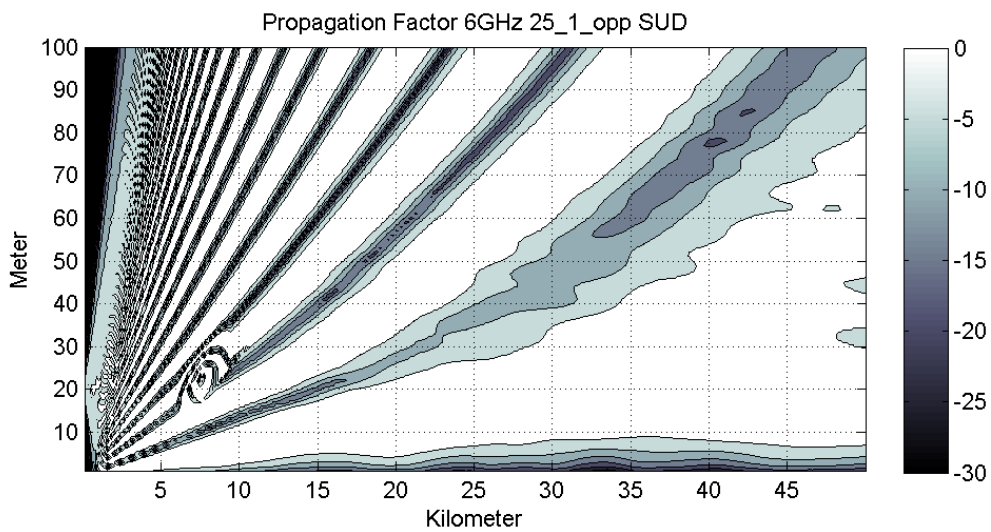
Figur 6.8 Propagasjonsfaktor for måling 24_2_ned SUD, 6 GHz



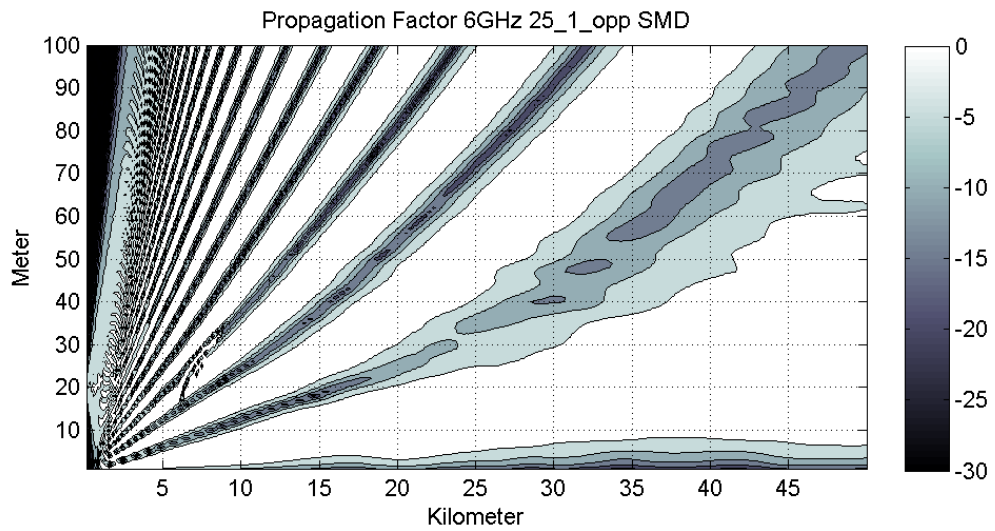
Figur 6.9 Propagasjonsfaktor for måling 24_2_ned SMD, 6 GHz



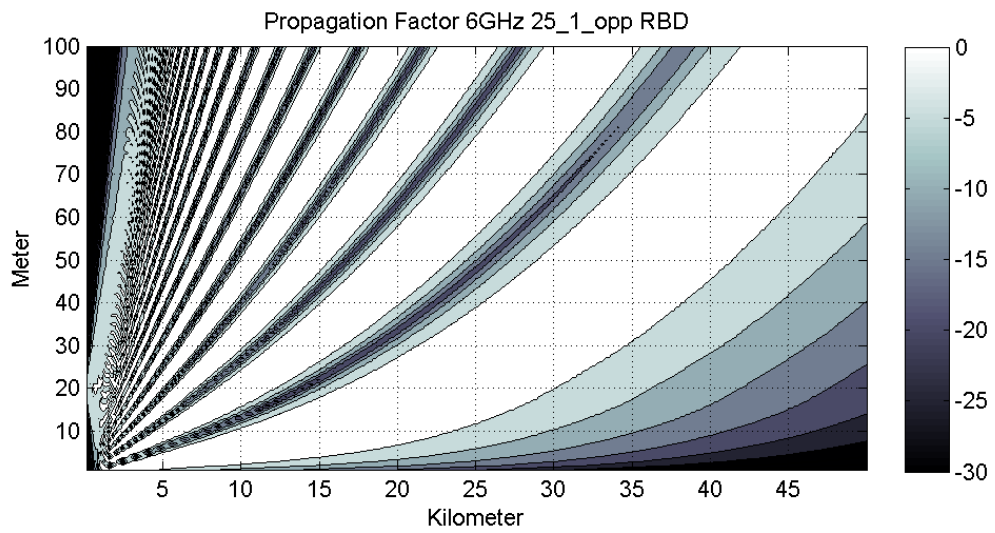
Figur 6.10 Propagasjonsfaktor for måling 24_2_ned RBD, 6 GHz



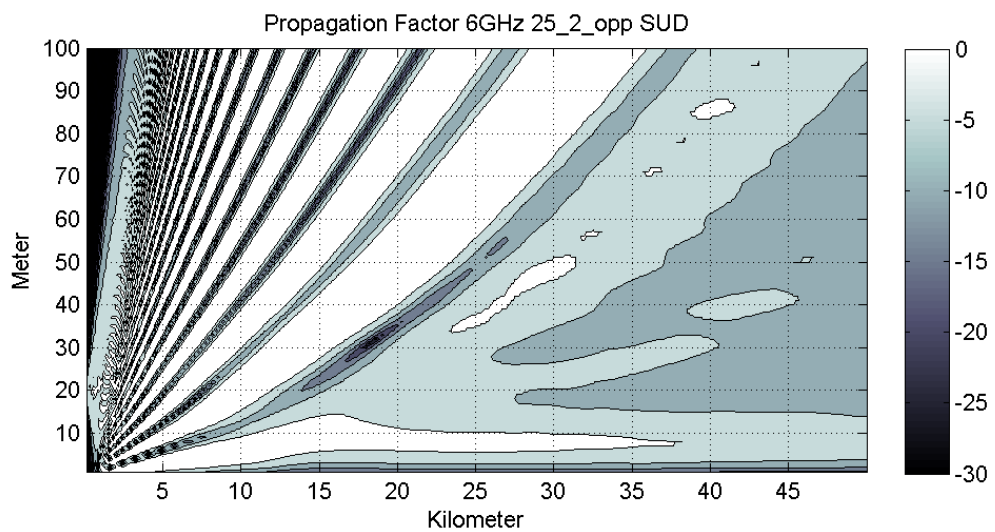
Figur 6.11 Propagasjonsfaktor for måling 25_1_opp SUD, 6 GHz



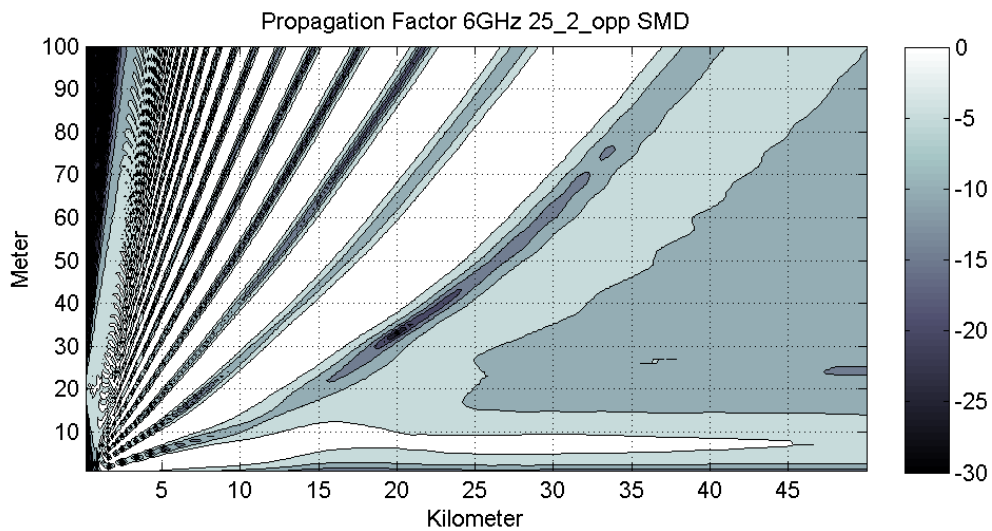
Figur 6.12 Propagasjonsfaktor for måling 25_1_opp SMD, 6 GHz



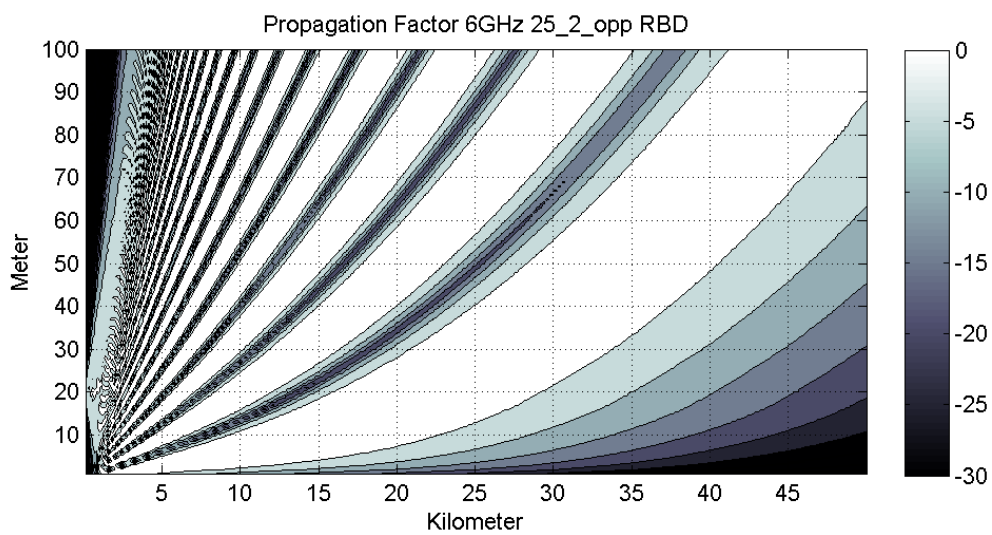
Figur 6.13 Propagasjonsfaktor for måling 25_1_opp RBD, 6 GHz



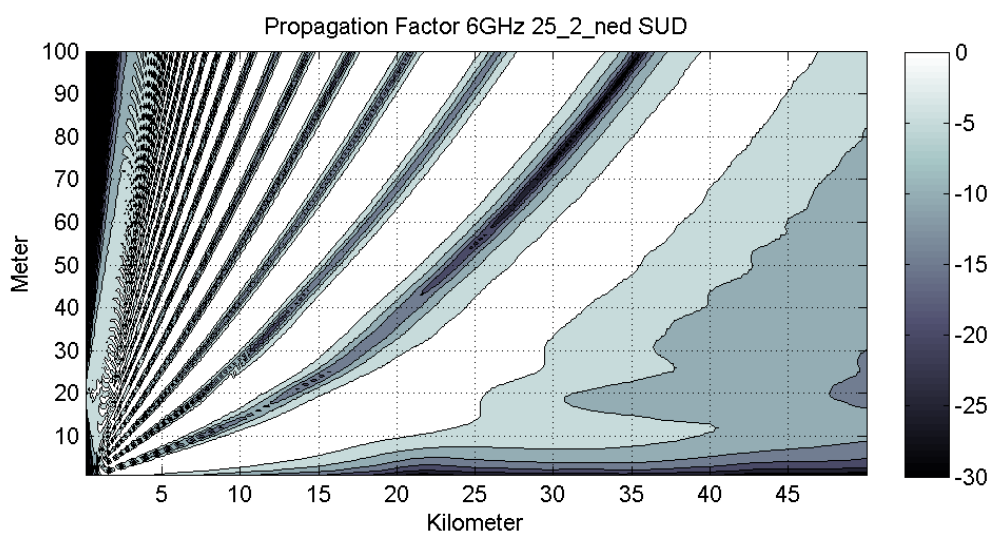
Figur 6.14 Propagasjonsfaktor for måling 25_2_opp SUD, 6 GHz



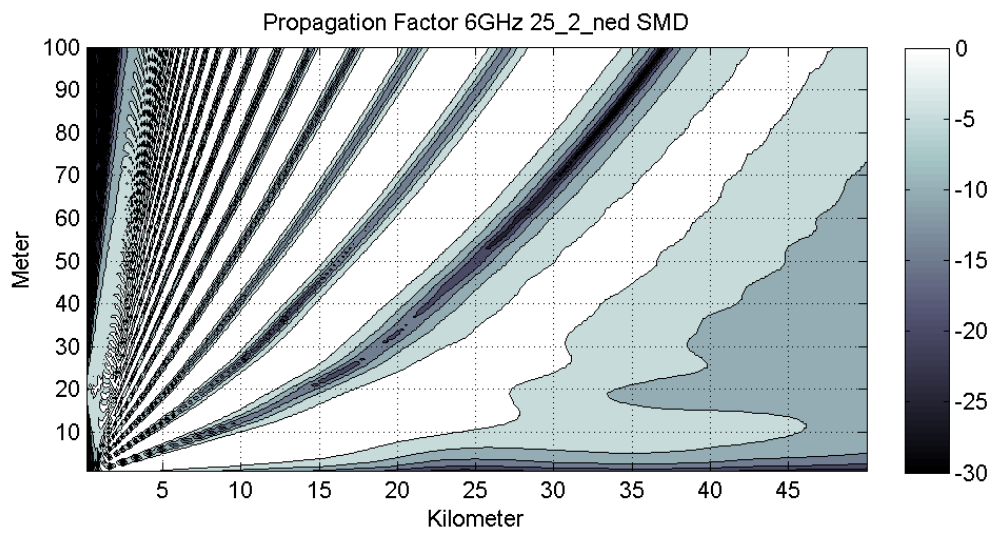
Figur 6.15 Propagasjonsfaktor for måling 25_2_opp SMD, 6 GHz



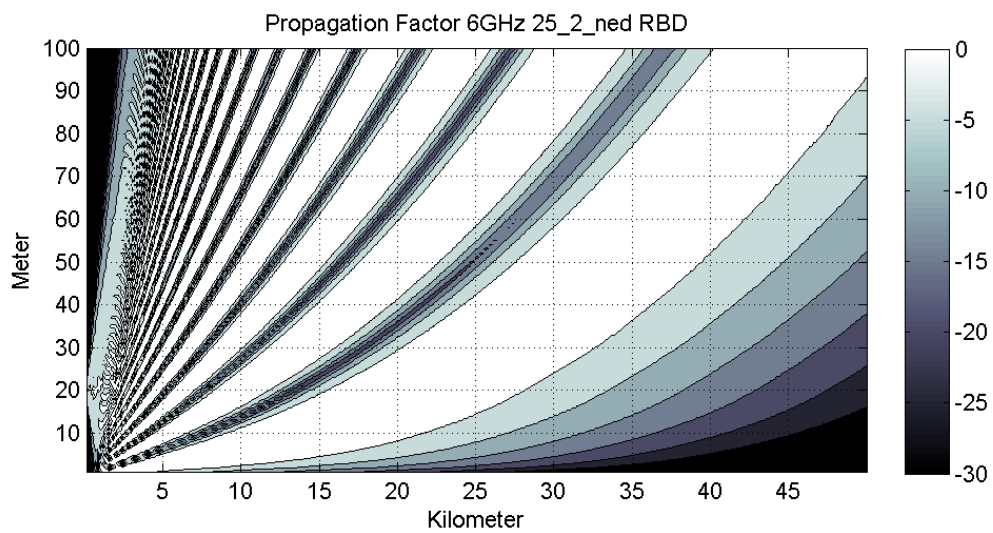
Figur 6.16 Propagasjonsfaktor for måling 25_2_opp RBD, 6 GHz



Figur 6.17 Propagasjonsfaktor for måling 25_2_ned SUD, 6 GHz

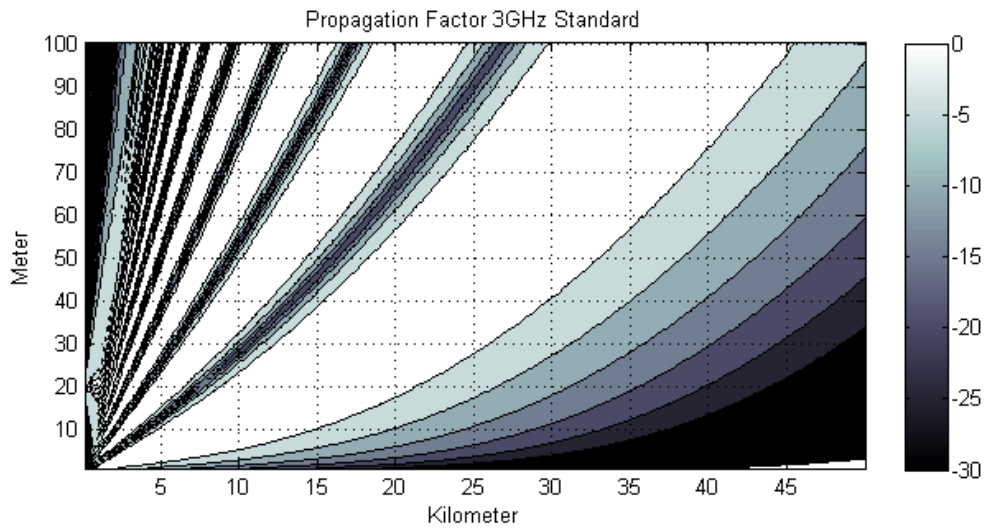


Figur 6.18 Propagasjonsfaktor for måling 25_2_ned SMD, 6 GHz

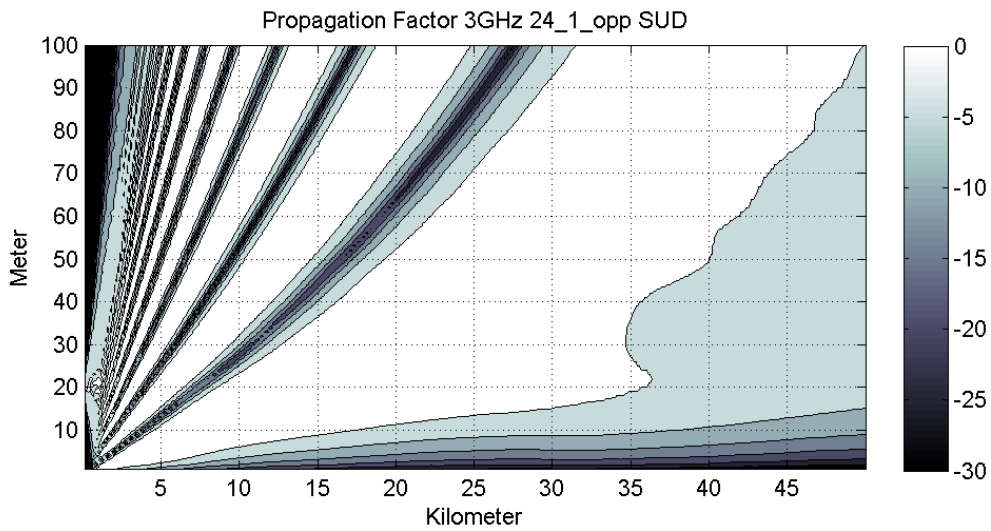


Figur 6.19 Propagasjonsfaktor for måling 25_2_ned RBD, 6 GHz

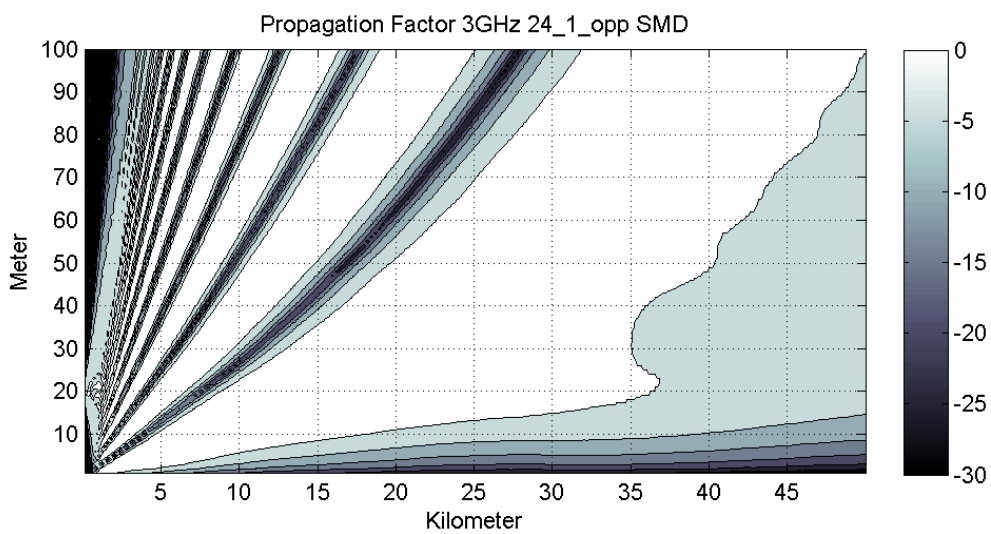
A.2 Propagasjonsfaktor for 3 GHz



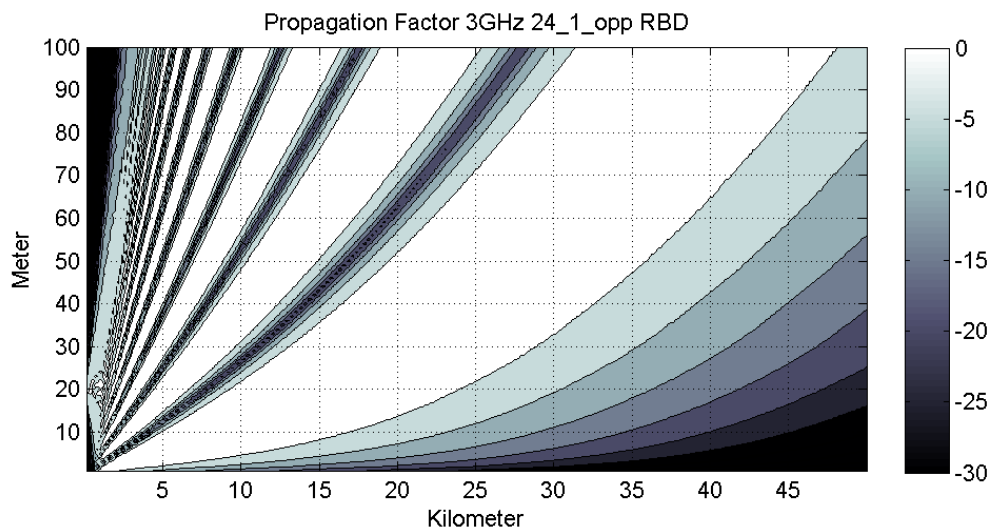
Figur 6.20 Propagasjonsfaktor for måling 24_1_opp standard atmosfære, 3 GHz



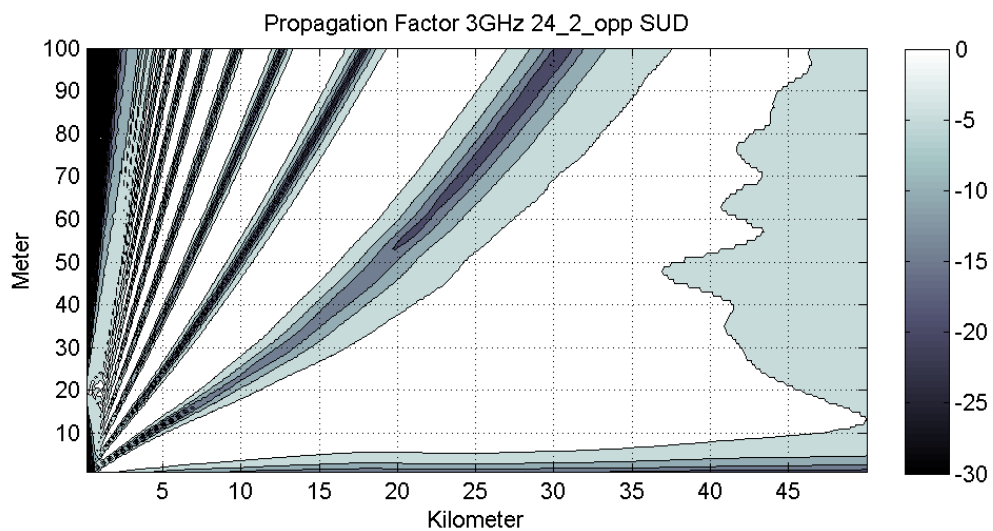
Figur 6.21 Propagasjonsfaktor for måling 24_1_opp SUD, 3 GHz



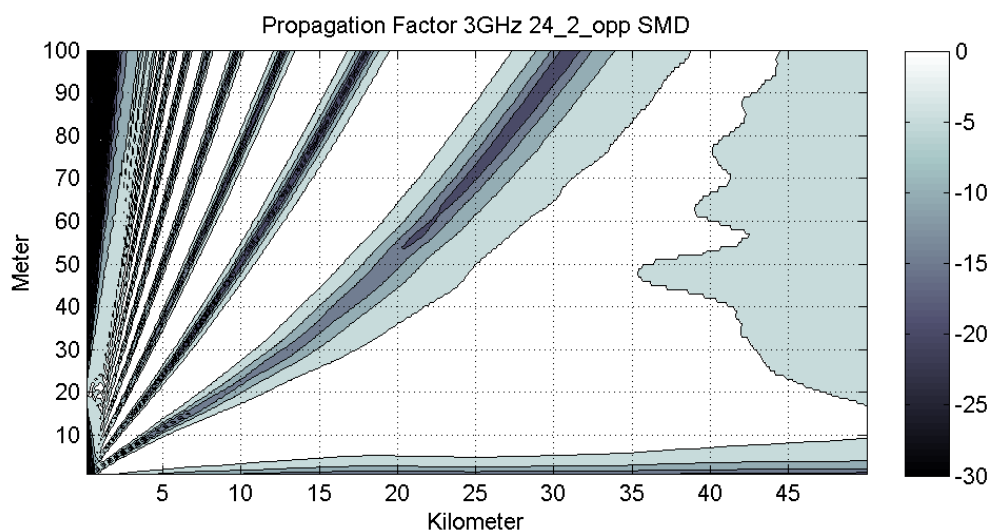
Figur 6.22 Propagasjonsfaktor for måling 24_1_opp SMD, 3 GHz



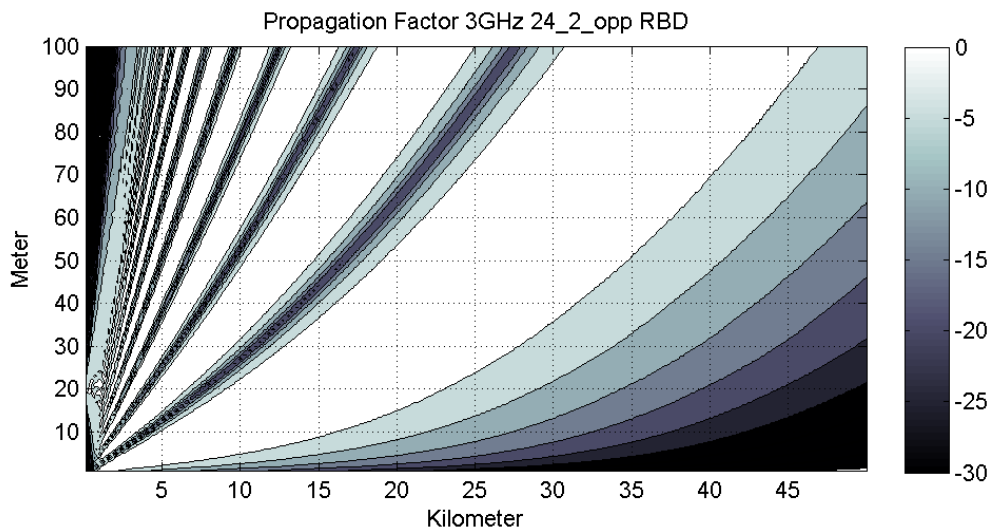
Figur 6.23 Propagasjonsfaktor for måling 24_1_opp RBD, 3 GHz



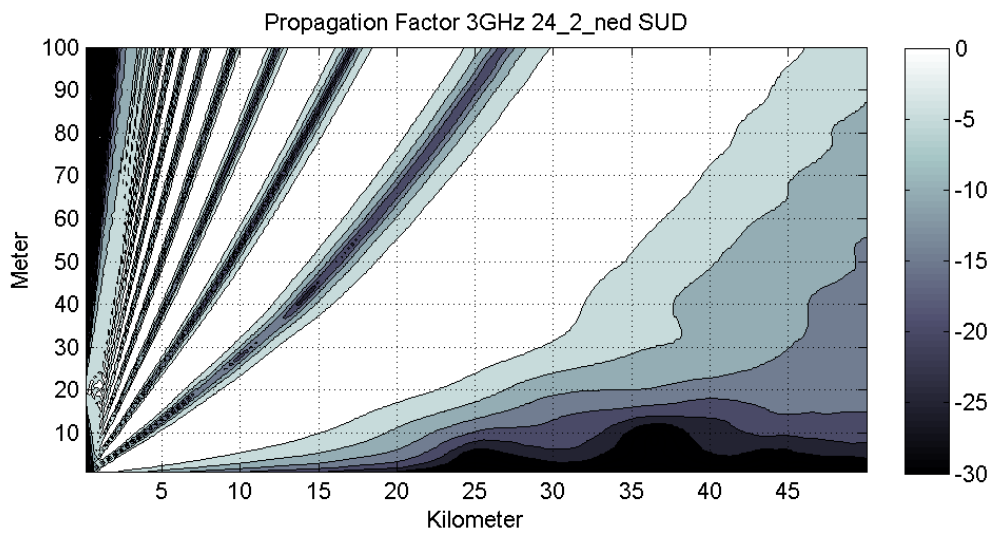
Figur 6.24 Propagasjonsfaktor for måling 24_2_opp SUD, 3 GHz



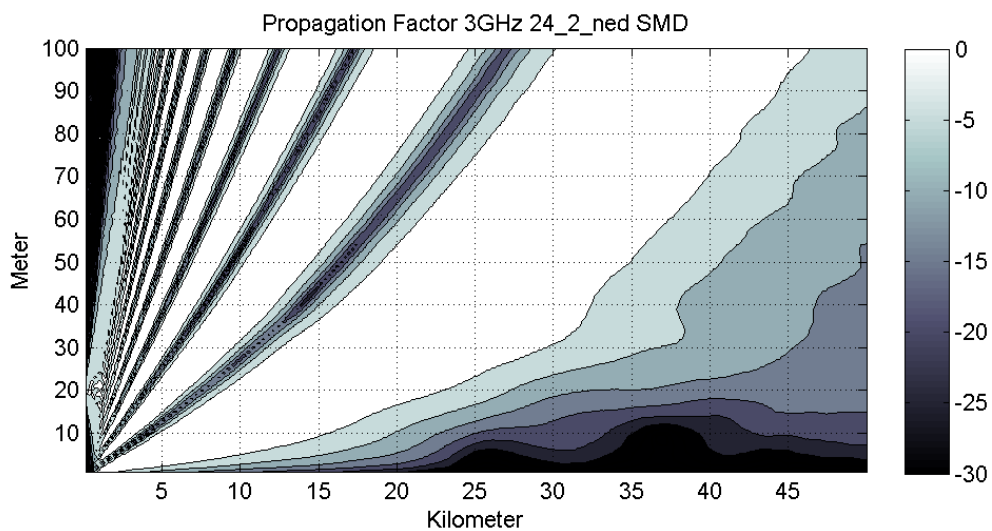
Figur 6.25 Propagasjonsfaktor for måling 24_2_opp SMD, 3 GHz



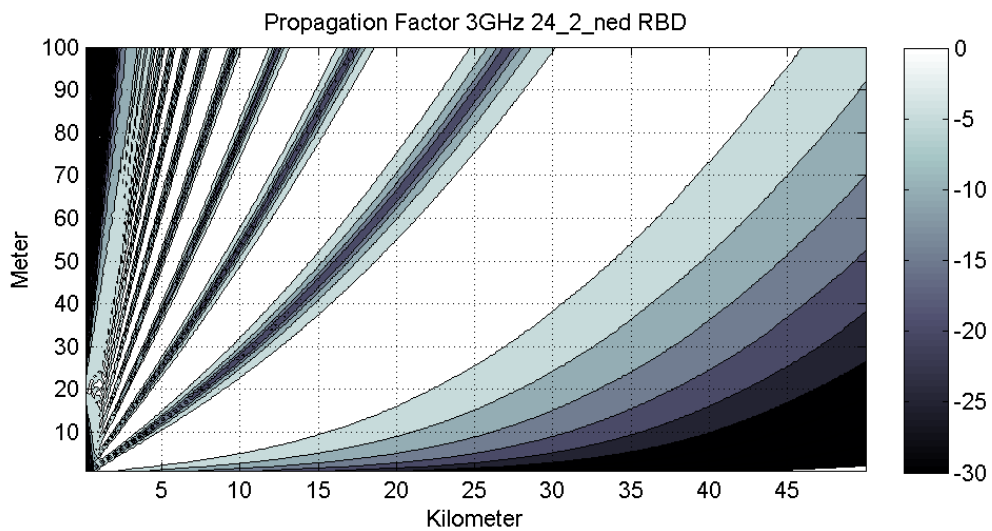
Figur 6.26 Propagasjonsfaktor for måling 24_2_opp RBD, 3 GHz



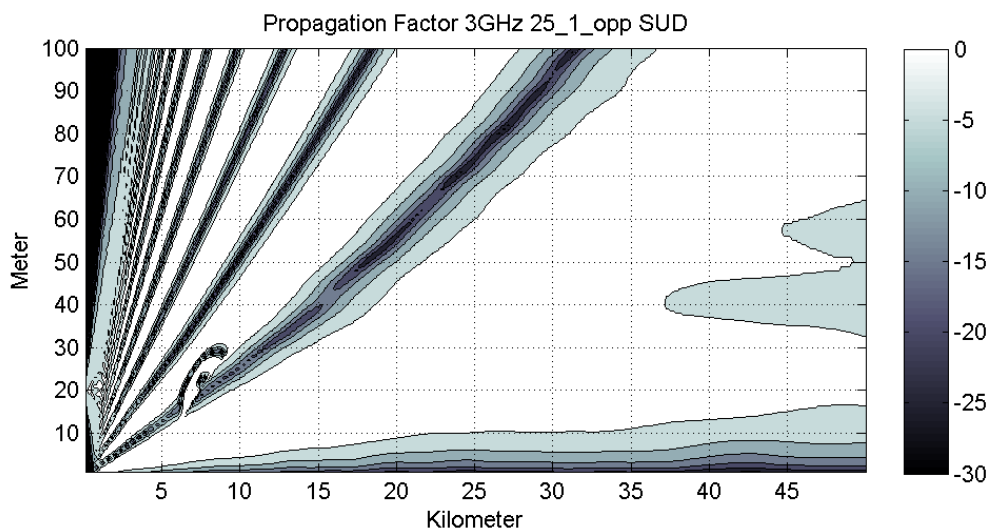
Figur 6.27 Propagasjonsfaktor for måling 24_2_ned SUD, 3 GHz



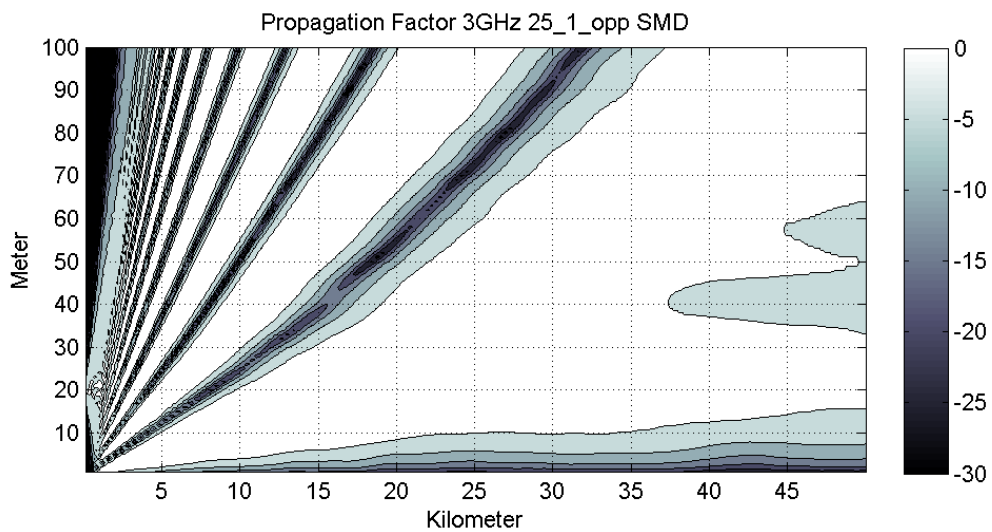
Figur 6.28 Propagasjonsfaktor for måling 24_2_ned SMD, 3 GHz



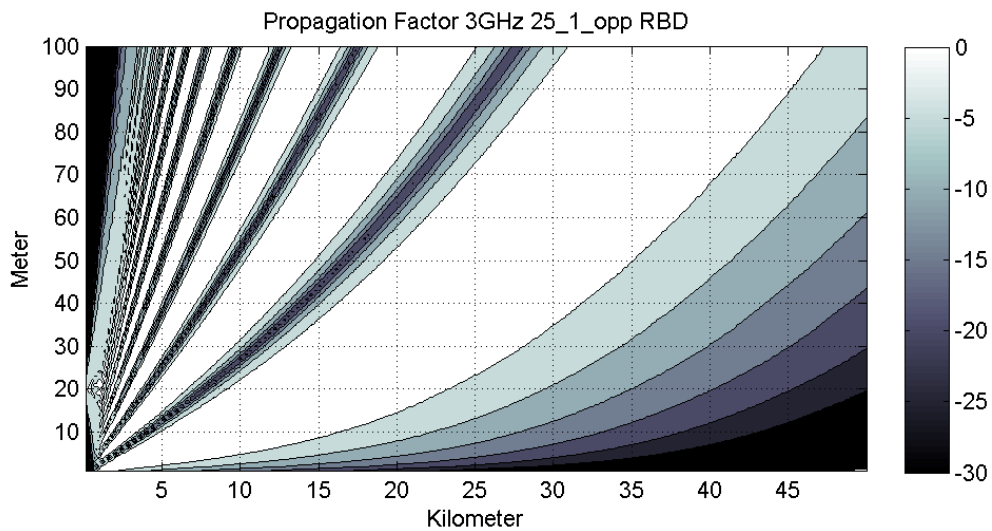
Figur 6.29 Propagasjonsfaktor for måling 24_2_ned RBD, 3 GHz



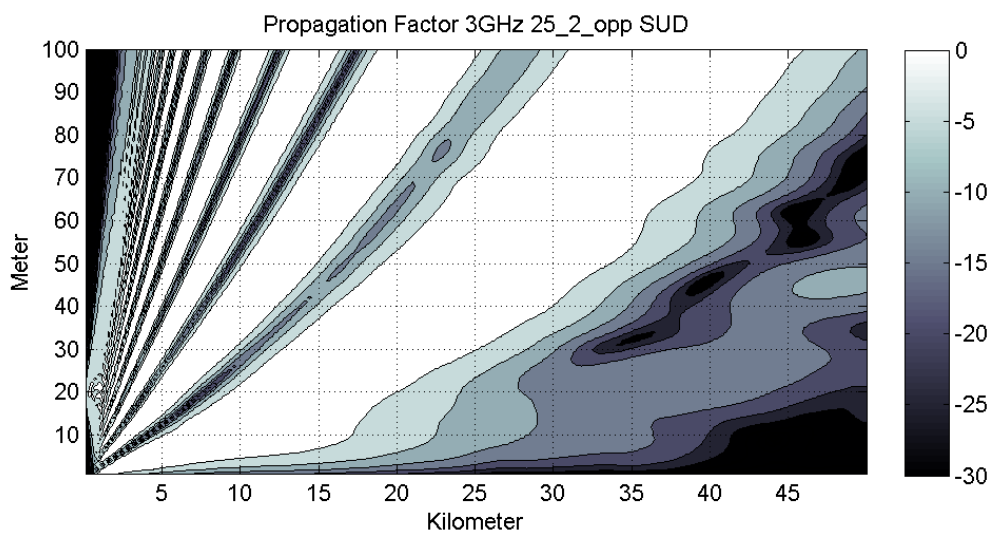
Figur 6.30 Propagasjonsfaktor for måling 25_1_opp SUD, 3 GHz



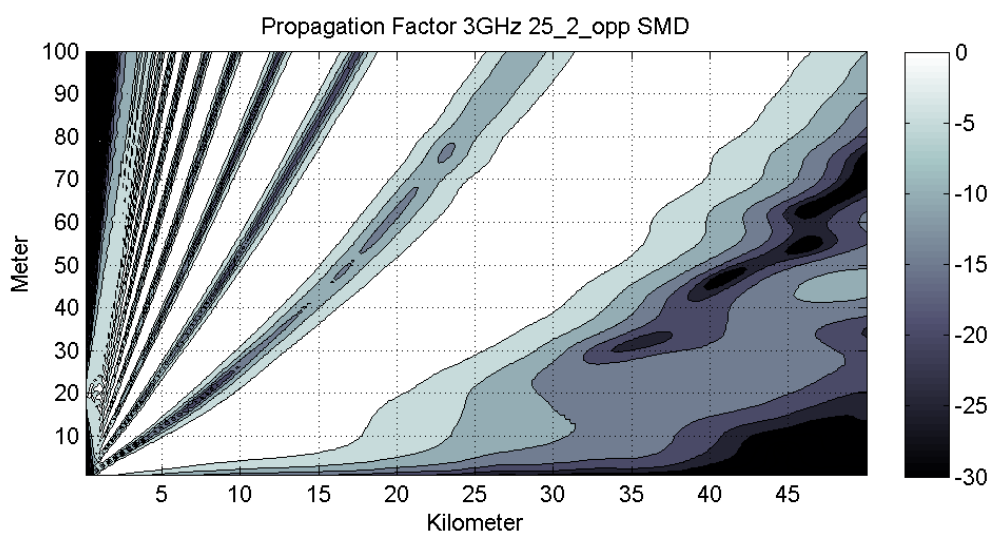
Figur 6.31 Propagasjonsfaktor for måling 25_1_opp SMD, 3 GH



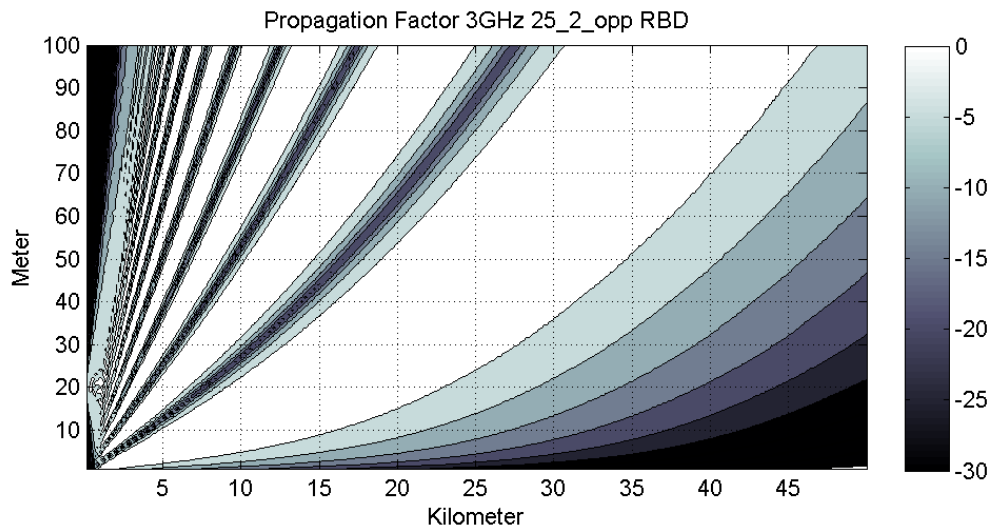
Figur 6.32 Propagasjonsfaktor for måling 25_1_opp RBD, 3 GH



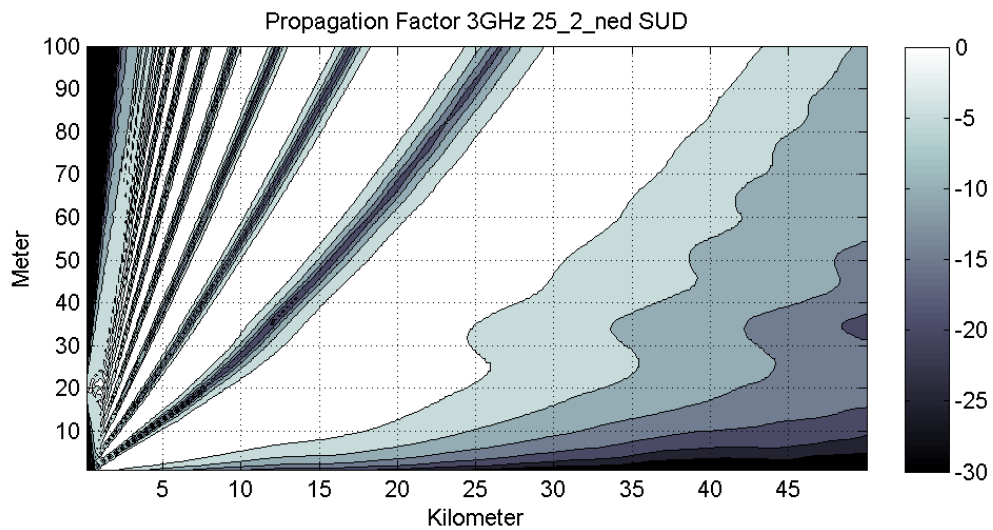
Figur 6.33 Propagasjonsfaktor for måling 25_2_opp SUD, 3 GH



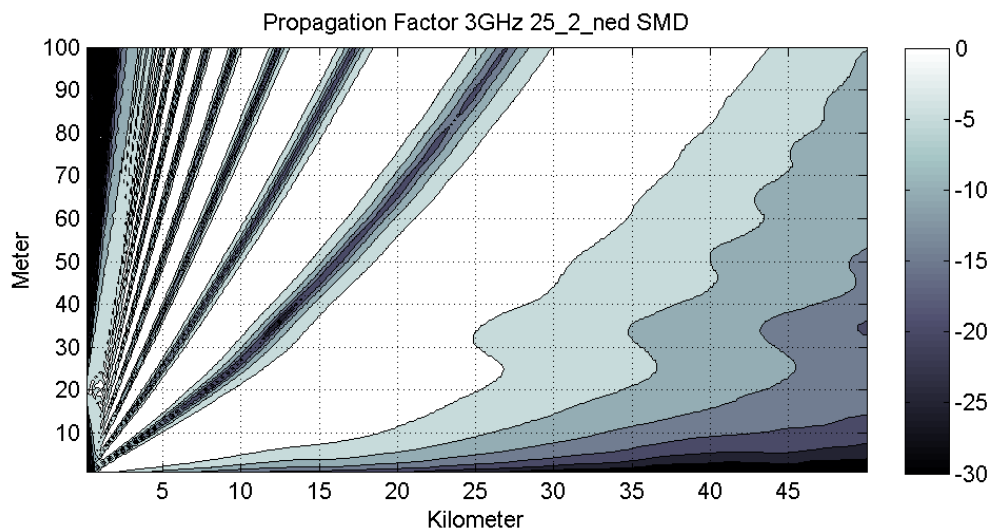
Figur 6.34 Propagasjonsfaktor for måling 25_2_opp SMD, 3 GH



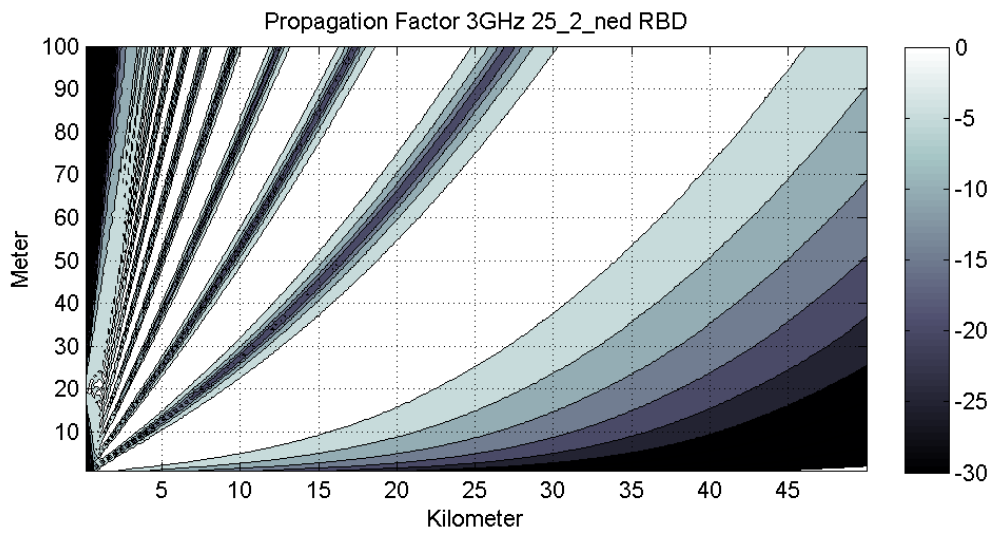
Figur 6.35 Propagasjonsfaktor for måling 25_2_opp RBD, 3 GH



Figur 6.36 Propagasjonsfaktor for måling 25_2_ned SUD, 3 GH



Figur 6.37 Propagasjonsfaktor for måling 25_2_ned SMD, 3 GH



Figur 6.38 Propagasjonsfaktor for måling 25_2_ned RBD, 3 GH