

Godkjent
Kjeller 10 februar 1997



Bjarne Haugstad
Forskningsjef

**PROPAGERINGSFAKTORENS BETYDNING FOR
RADAR DETEKSJON AV MÅL I SJØBAKGRUNN**

NORLAND Richard

FFI/RAPPORT-97/00754

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25, 2007 Kjeller, Norge

FORSVARETS FORSKNING SINSTITUTT (FFI)

Norwegian Defence Research Establishment


P O BOX 25

N-2007 KJELLER, NORWAY

UNCLASSIFIED

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
(when data entered)

REPORT DOCUMENTATION PAGE

1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-97/00754 1a) PROJECT REFERENCE FFIVM/666/003	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED 2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE	3) NUMBER OF PAGES 37					
4) TITLE PROPAGERINGSFAKTORENS BETYDNING FOR RADAR DETEKSJON AV MÅL I SJØBAKGRUNN (THE INFLUENCE OF THE PROPAGATION FACTOR ON DETECTION OF TARGETS IN SEABACK- GROUND)							
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) NORLAND Richard							
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited (Offentlig tilgjengelig)							
7) INDEXING TERMS IN ENGLISH: <table data-bbox="311 1019 766 1299"> <tr><td>a) Propagation factor</td></tr> <tr><td>b) Radar</td></tr> <tr><td>c) Diffuse reflection</td></tr> <tr><td>d) Multipath propagation</td></tr> <tr><td>e) Complex targets</td></tr> </table>			a) Propagation factor	b) Radar	c) Diffuse reflection	d) Multipath propagation	e) Complex targets
a) Propagation factor							
b) Radar							
c) Diffuse reflection							
d) Multipath propagation							
e) Complex targets							
IN NORWEGIAN: <table data-bbox="922 1019 1385 1299"> <tr><td>a) Propageringsfaktor</td></tr> <tr><td>b) Radar</td></tr> <tr><td>c) Diffus refleksjon</td></tr> <tr><td>d) Flerveis bølgeutbredelse</td></tr> <tr><td>e) Komplekse mål</td></tr> </table>			a) Propageringsfaktor	b) Radar	c) Diffus refleksjon	d) Flerveis bølgeutbredelse	e) Komplekse mål
a) Propageringsfaktor							
b) Radar							
c) Diffus refleksjon							
d) Flerveis bølgeutbredelse							
e) Komplekse mål							
THESAURUS REFERENCE: 8) ABSTRACT <p>The report presents the different approximations to the multipath contribution to radar detection and application to complex and simple targets, with special attention to simple targets in high seastates.</p> <p>It is shown that the most commonly used approximation only is applicable for point targets and that the propagation factor is approximately equal to one for complex targets such as ships.</p>							
9) DATE 10 February 1997	AUTHORIZED BY This page only  Bjarne Haugstad	POSITION Director of Research					

ISBN 82-464-0202-1

UNCLASSIFIED

INNHOOLD

		Side
1	BAKGRUNN	4
2	DETEKSJON AV MÅL I SJØBAKGRUNN	5
3	BEREGNING AV PROPAGERINGSFAKTOREN	9
4	PROPAGERINGSFAKTOREN I VARIERENDE SJØTILSTAND	14
5	MÅLETS INNVIRKNING PÅ PROPAGERINGSFAKTOREN	21
6	KONKLUSJON	29
	Litteratur	30
APPENDIKS		
A	MIDLERE PROPAGERINGSFORHOLD LANGS NORSKEKYSTEN	31
B	MIDLERE REFLEKSJON FRA KOMPLEKSE MÅL I NÆRVÆR AV EN OVERFLATE	33
C	DEFINISJON AV SJØTILSTAND	35
	Fordelingsliste	37

PROPAGERINGSFAKTORENS BETYDNING FOR RADAR DETEKSJON AV MÅL I SJØBAKGRUNN

1 BAKGRUNN

Propageringsfaktoren, dvs konstruktiv – destruktiv interferens av henholdsvis det utsendte og reflekterte signalet, kan ved radardeteksjon av mål enten forbedre et deteksjonsscenario eller vanskeliggjøre deteksjon.

Propageringsfaktoren har betydning for deteksjon av mål over både sjø og land, men fordi sjøens relative variasjoner er små i forhold til normale landskapsvariasjoner, kan propageringsfaktoren påvirke deteksjonen betydelig i ett maritimt operasjonsmiljø i forhold til et tilsvarende landbasert scenario. I denne rapporten er derfor kun propageringsfaktoren for sjøen vurdert, men dette utelukker ikke anvendelsen av de grunnleggende forutsetningene i et scenario over land. Forskjellen er hovedsakelig at pga de store landskapsvariasjonene vil det kunne være vanskeligere å generalisere resultatene.

Ettersom propageringsfaktoren avhenger av den aktuelle geometrien mellom radar og mål, kan utfallet av en vurdering variere avhengig av radarantennens og målets høyder og avstanden mellom dem. Det er f eks slik at produktet av høyden til henholdsvis radarens antenne og målet er proporsjonal med propageringsfaktorens maksimum. En korrekt plassert antenne i forhold til et mål i en bestemt høyde kan derfor gi deteksjon på meget lang avstand.

I aktuelle lærebøker om radar er propageringsfaktoren presentert med endel forholdsvis viktige forutsetninger som f eks at målet består av kun en reflektor, punktmål, samt at målet er i konstant høyde både stasjonært og som funksjon av avstand. Dette er ikke alltid tilfelle og i det følgende blir betydningen av de enkelte parametere som influerer effekten av propageringsfaktoren vurdert. Aktuelt målsenario er deteksjon av missiler i lav høyde (sea-skimmere) og fartøy. Avslutningsvis presenteres den kombinerte effekten av aktuelle parametere sammen med enkelte måleresultater.

2 DETEKSJON AV MÅL I SJØBAKGRUNN

Generelt er deteksjon av mål i sjøbakgrunn et kontrastproblem der en stor kontrast normalt fører til deteksjon.

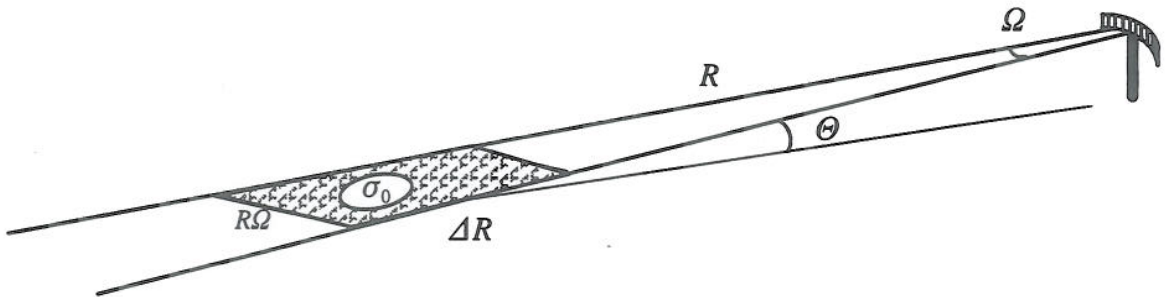
Kontrasten er gitt ved ligningen for signal – clutter forholdet (S/C). Det kan vises at denne er gitt ved

$$\frac{S}{C} = \frac{\sigma}{\sigma_0 \Omega R \Delta R} \quad (2.1)$$

der σ er målets radartverrsnitt og R er avstanden fra radar til mål. Ω er radarens antenneåpning i radianer og σ_0 er sjøclutterets spesifikke radartverrsnitt. σ_0 er en dimensjonsløs funksjon av sjøtilstand, vindretning, radarens bestrykningsvinkel, polarisasjon og frekvens som kan tolkes som sjøclutterets forsterkning. ΔR er radarens oppløsning i avstand og er en funksjon av pulslengden τ gitt ved

$$\Delta R = \frac{\tau c}{2 \cos(\Theta)} \quad (2.2)$$

der c er lyshastigheten og Θ er bestrykningsvinkel i forhold til målet, se figur 2.1.



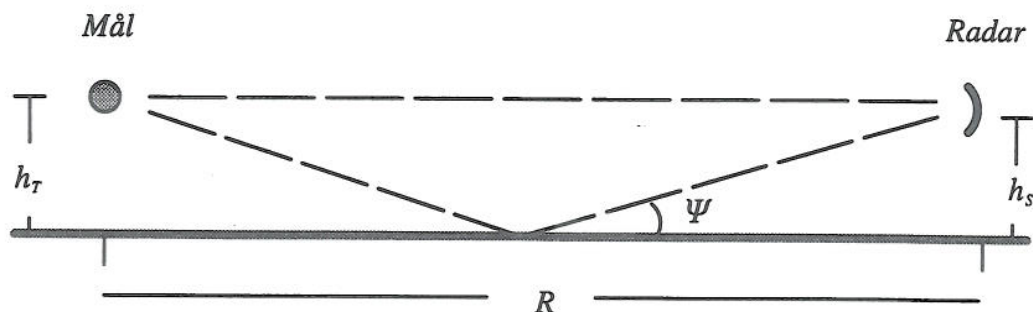
Figur 2.1 Definisjon av belyst område

Produktet $\Omega R \Delta R$ i ligning 2.1 er således radarens belyste område.

Signal – clutter forholdet kan forbedres dersom det er store forskjeller i hastigheten mellom sjøbølger og mål. Dette vil typisk være tilfelle for fly eller sea-skimmere som flyr med en radiell komponent av hastigheten i forhold til sensoren. Målet kan under bestemte forutsetninger da detekteres selv om målet er 20 – 30 dB lavere enn sjøbakgrunnen ved dopplerfiltrering. Grensen for deteksjon er gitt ved kontrasten basert på signal – støy forholdet, der støyen er termisk støy i radarens mottager.

For en radar i høyde h_s som observerer et mål i høyde h_t vil det på grunn av refleksjoner av det elektromagnetiske feltet i overflaten oppstå en interferens mellom det reflekterte og

det direkte feltet, se figur 2.2. Vinkelen Ψ er bestrykningsvinkelen i forhold til refleksjonspunktet på overflaten.



Figur 2.2 Interferens pga refleksjoner i overflaten

Ved geometriske betraktninger kan det vises at differansen i avstand mellom det direkte feltet og feltet som er reflektert i overflaten kan uttrykkes ved

$$\delta R \approx \frac{2 h_S h_T}{R} \quad , R \gg h_S + h_T \quad (2.3)$$

Faseskiftet som tilsvareer differansen i avstand er

$$\delta \phi = \frac{2\pi \delta R}{\lambda} \quad (2.4)$$

der λ er radarens bæreølge ($\lambda = c/f$, c er lyshastigheten og f radarens frekvens). Det totale faseskiftet er gitt ved

$$\phi = \phi_0 + \frac{4\pi h_S h_T}{\lambda R} \quad (2.5)$$

der ϕ_0 er refleksjonskoeffisientens faseskift. For refleksjon av horisontalt polariserte bølger i sjøvann er denne ca 180 grader, dvs $\phi_0 \approx \pi$.

Interferensen uttrykkes ved propageringsfaktoren som er definert ved en kompleks faktor (F). F beskriver forholdet mellom det totale og direkte feltet ved målet

$$F = 1 + \rho e^{(-i\phi)} \quad (2.6)$$

der ρ er refleksjonskoeffisienten i overflaten.

Interferensen ved målet beskrives ved en-veis propageringsfaktoren (F^2). F^2 er effektforholdet i nærvær av en overflate,

$$|F|^2 = 1 + \rho^2 + 2\rho \cos(\phi) \quad (2.7)$$

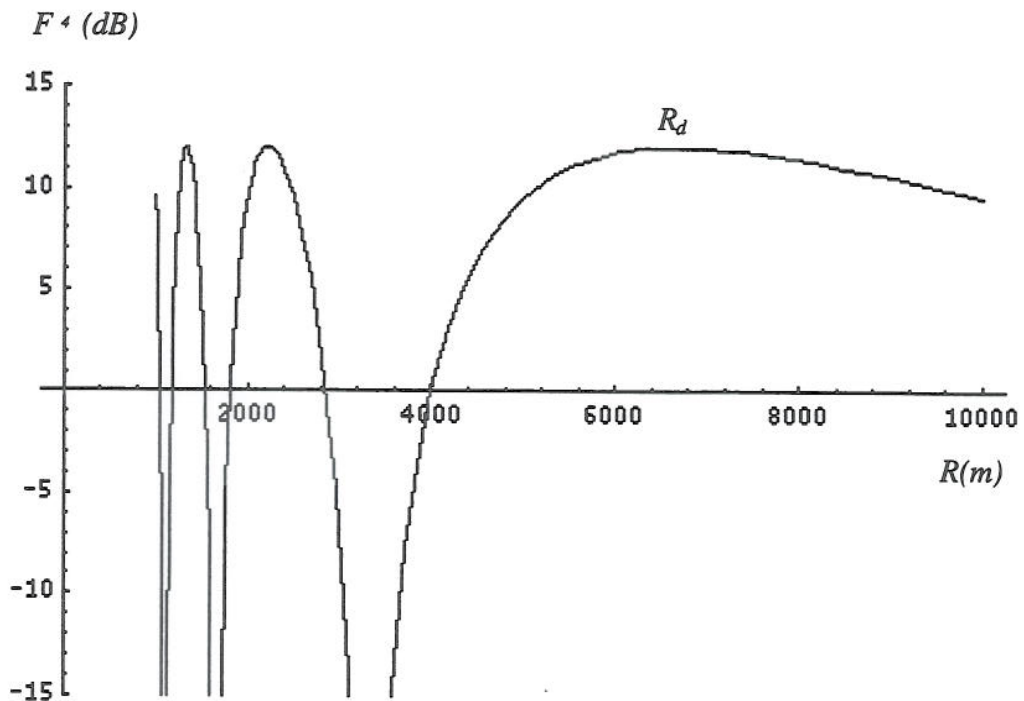
Interferensen ved radaren beskrives ved to-veis propageringsfaktor

$$|F|^4 = (1 + \rho^2 + 2\rho \cos(\phi))^2 \quad (2.8)$$

For små bestrykningsvinkeler, dvs $\Psi \approx 0$ og $\rho \approx 1$, kan effekten av to-veis propageringsfaktor (F^4) for ett refleksjonspunkt i høyde h_T tilnærmes med

$$|F|^4 = 16 \sin^4\left(\frac{2\pi h_T h_S}{\lambda R}\right) \quad (2.9)$$

Ligning 2.9 er plottet i figur 2.3 for antennehøyde 10 m, målhøyde 5 m og radarfrekvens 10 GHz. Plottet viser typisk utvikling av propageringsfaktorens variasjoner og størrelse som funksjon av avstanden.



Figur 2.3 Propageringsfaktoren som funksjon av avstand

Tilnærmelsen fører til at propageringsfaktoren får store maksimale og minimale utslag pga konstruktiv/destruktiv interferens. I normale tilfeller vil ikke denne interferensen bli så stor fordi fasen vil variere og således ikke gi ideell kansellering / forsterkning.

Når propageringsfaktoren antar denne formen forutsettes bl a at radarens antenneåpning belyser sjøen samtidig som målet belyses. Tilsvarende forutsettes at målet er et punkt i konstant høyde som reflekterer strålingen både bistatisk og monostatisk med samme styrke som den direkte refleksjonen.

Dette er forutsetninger som ofte ikke er gyldige. Det vil f eks ikke være naturlig at en sea-skimmer med et dynamisk bevegelses – mønster flyr i konstant høyde eller at et fartøy beskrives med kun ett punkt. Kombinert med antagelsen om spekulær refleksjon og ingen anomale propageringsforhold som f eks fordampningssjikt, kan således ukritisk bruk av propageringsfaktoren gi store utslag i beregnet deteksjonsavstand.

Dersom signal – clutter forholdet (S/C) skal beregnes iht ligning 2.1 og propageringsfaktoren skal inkluderes, kan dette skrives som

$$\frac{S}{C} = \frac{\sigma |F|^4}{\sigma_o \Omega R \Delta R} \quad (2.10)$$

Dette forutsetter at målets fysiske størrelse er slik at propageringsfaktoren kan betraktes som identisk lik for alle målets refleksjonspunkter, dvs et punkt.

Som det går frem av figur 2.3 har propageringsfaktoren et stort maksimum før faktoren går mot null for store avstander. Avstanden til dette maksimum er gitt ved

$$R_d = 4 \frac{h_S h_T}{\lambda} \quad (2.11)$$

En optimalisert geometri mellom radar og mål vil kunne gi en forsterkning på inntil 12 dB ved dette maksimum. For avstander utover R_d går propageringsfaktoren mot null. Ved en avstand som tilsvarer ca $3 R_d$ er propageringsfaktoren tilnærmet lik 1. Dette angir avstanden der propageringsfaktoren ikke lengre bidrar til å forbedre sannsynligheten for deteksjon.

For avstander mindre enn R_d fluktuerer propageringsfaktoren. Dersom radarens høyde tilpasses deteksjon ut mot radarhorisonten fører dette til at disse fluktuasjonene i propageringsfaktoren øker. Dette kan gi problemer både for deteksjon og følgende av mål på kortere avstander. Generelt bør derfor antennens høyde tilpasses et balansert konsept der målsettingen er å detektere mål på en tilstrekkelig stor avstand og samtidig være i stand til å følge / detektere mål på kortere avstand.

3 BEREGNING AV PROPAGERINGSFAKTOREN

3.1 Generelle forutsetninger

Ligningen for propageringsfaktoren, ligning 2.9, forutsatte at refleksjonskoeffisienten $\rho \approx 1$, samt at faseskiftet pga refleksjonen i overflaten kunne tilnærmes med 180 grader ($\varphi_0 \approx \pi$). Dette er en gyldig antagelse for horisontal polarisasjon og liten sjøtilstand, men kan gi forholdsvis store avvik dersom polarisasjonen forandres eller bestrykningsvinkelen øker. Tilsvarende kan også valg av frekvens påvirke refleksjonskoeffisienten, spesielt fordi refleksjonene fra sjøbølger avhenger av radarens bølgelengde.

I det følgende skal disse effektene betydning for refleksjonskoeffisienten og resulterende påvirkning på propageringsfaktoren vurderes nærmere.

3.2 Refleksjonskoeffisienten

Refleksjonskoeffisienten er en kompleks variabel som avhenger av flere parametere som f eks frekvens, polarisasjon, bestrykningsvinkel og materialets dielektriske konstant. Ligningen for den komplekse Fresnel refleksjonskoeffisienten er gitt ved

$$\rho_V e^{-i\varphi_V} = \frac{\varepsilon \sin(\Psi) - \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\Psi)}}{\varepsilon \sin(\Psi) + \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\Psi)}} \quad (3.1)$$

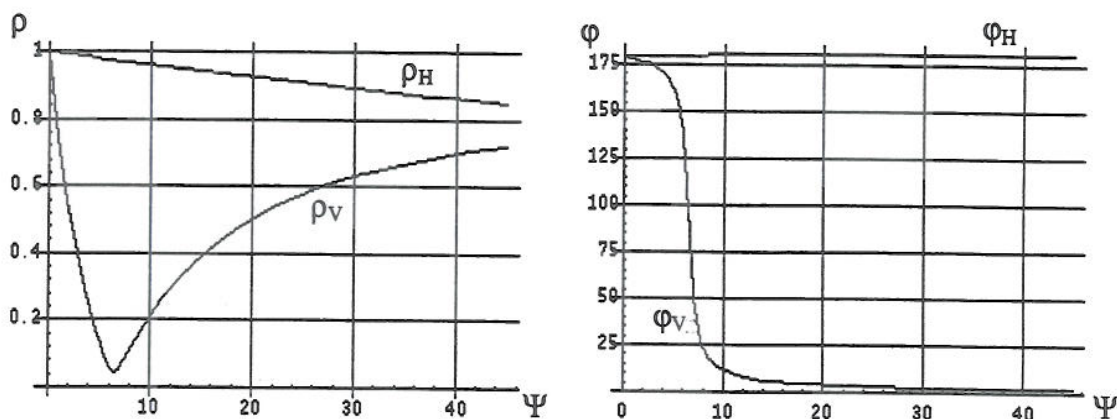
$$\rho_H e^{-i\varphi_H} = \frac{\sin(\Psi) - \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\Psi)}}{\sin(\Psi) + \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\Psi)}} \quad (3.2)$$

der ρ_H og ρ_V er refleksjonskoeffisienten og φ_H , φ_V er faseskiftet for henholdsvis horisontal og vertikal polarisasjon. Den komplekse dielektriske konstant ε er uttrykt ved

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \approx \frac{K}{\varepsilon_0} - i60\lambda\sigma_c \quad (3.3)$$

der ε_0 er dielektrisk konstant for fritt rom, σ_c er konduktiviteten (S/m) og K er permittiviteten. For beregning av refleksjonskoeffisienten forutsetter dette kjennskap til vannets temperatur og saltmengde. Det er likevel kun marginale forskjeller i refleksjonskoeffisienten ved varierende temperatur eller saltmengde. Refleksjonskoeffisienten kan således forutsettes å være identisk lik ved henholdsvis sommer og vinter vanntemperatur.

Amplitude og fase for typisk sjø er plottet i figur 3.1.



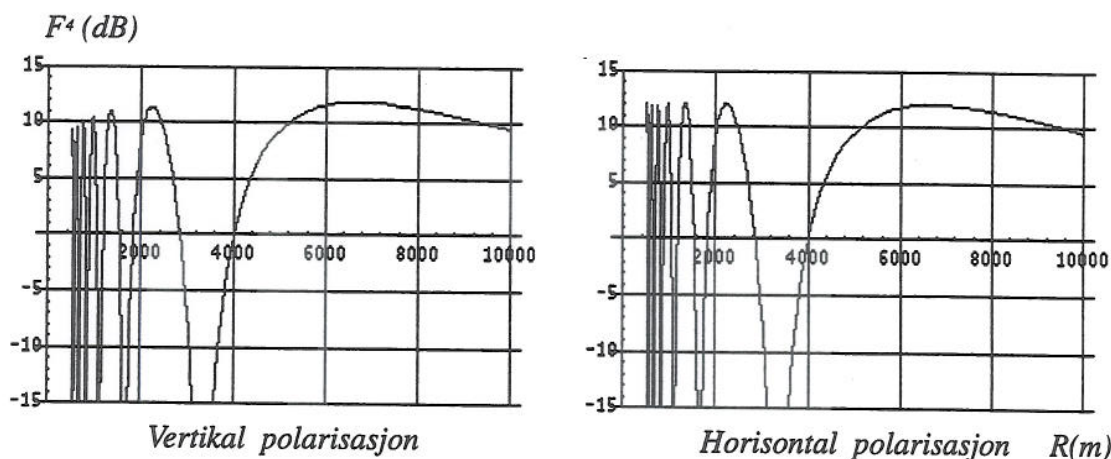
Figur 3.1 Refleksjonskoeffisienten og faseskift for sjø, frekvens 10 GHz, 10° C.

Figur 3.1 viser at approksimasjonen for horisontal polarisasjon, dvs $\rho \approx 1$ og $\phi_0 \approx \pi$, er gyldig. For vertikal polarisasjon ser man derimot at refleksjonskoeffisienten går mot null og i prinsippet vil et mål derfor kunne gi monostatisk refleksjon ved denne bestrykningsvinkelen (Brewster vinkelen). Dette tilsvarer fritt roms deteksjon. Det er likevel verdt å merke seg at vinkelen er forholdsvis stor for overflatebaserte radarer. Dette er illustrert ved følgende plott, figur 3.2, der samme geometriske scenario er presentert for henholdsvis horisontal og vertikal polarisasjon og der propageringsfaktoren er gitt ved

$$|F|^4 = |1 + \rho e^{-i\phi}|^4 \quad (3.4)$$

Refleksjonskoeffisientene for vertikal og horisontal polarisasjon er gitt ved

$$\rho = \rho_V e^{-i\phi_V} \text{ og } \rho = \rho_H e^{-i\phi_H}.$$



Figur 3.2 Propagasjonsfaktoren for henholdsvis vertikal og horisontal polarisasjon som funksjon av avstanden. Frekvens 10 GHz, radarhøyde 10 m og målhøyde 5 m.

Som det fremgår er forskjellen mellom de to polarisasjoner delvis observerbar for korte avstander, dvs bestrykningsvinkler større enn 0.5 grader. Det er således ingen grunn til å anvende vertikal polarisasjon ved små bestrykningsvinkler dersom målsettingen er å redusere effekten av propageringsfaktoren.

3.3 Spekulær refleksjonskoeffisient

Sjøen er kun sjelden helt i ro og i de fleste tilfeller vil bølger kunne observeres på overflaten. Så lenge bølgene er små, eventuelt radarens bølgelengde stor, vil refleksjonen fra overflaten kunne betraktes som spekulær. (1) Betingelsen for spekulær refleksjon er gitt ved Rayleigh kriteriet (2)

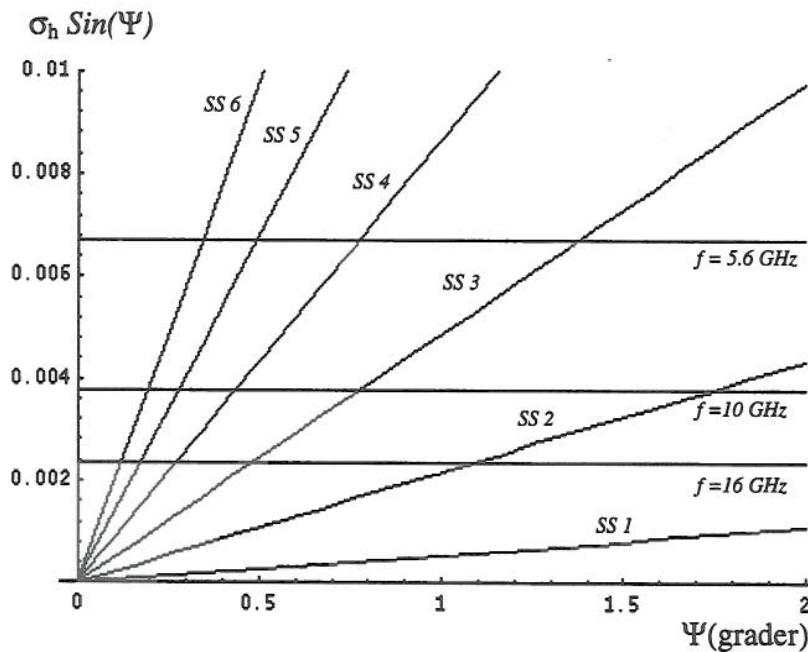
$$\sigma_h \sin(\Psi) < \lambda/8 \quad (3.5)$$

σ_h er standardavviket for bølgehøyden og Ψ bestrykningsvinkelen. Kriteriet angir grensen for den spekulære refleksjonskoeffisienten (ρ_s). σ_h er samtidig et uttrykk for sjøtilstanden, der sjøtilstanden er definert på bakgrunn av bl a bølgehøyden og vindhastighet, se appendiks C. I appendiks C er bølgehøyden angitt med den karakteristiske bølgehøyden, som tilnærmet er $4 \sigma_h$. Dersom Rayleigh kriteriet er oppfylt er den spekulære refleksjonskoeffisienten ρ_s gitt ved (3)

$$\rho_s = e^{-2 \left(\frac{2\pi \sigma_h \sin(\Psi)}{\lambda} \right)^2} \quad (3.6)$$

og refleksjonskoeffisienten ρ som inngår i propageringsfaktoren kan da skrives som produktet $\rho = \rho_0 \rho_s$. ρ_0 er nå enten vertikal eller horisontal polarisasjons refleksjonskoeffisient. Den spekulære refleksjonskoeffisienten modifierer således refleksjonskoeffisienten ρ_0 .

I figur 3.3 er grensen for spekulær refleksjon angitt for forskjellige sjøtilstander som funksjon av bestrykningsvinkel og frekvens. F eks for 5.6 GHz og sjøtilstanden 3, må bestrykningsvinkelen være større enn 1.5 grader for at refleksjonen ikke lenger skal kunne betraktes som spekulær.



Figur 3.3 Rayleigh kriteriet som funksjon av bestrykningsvinkel og sjøtilstand

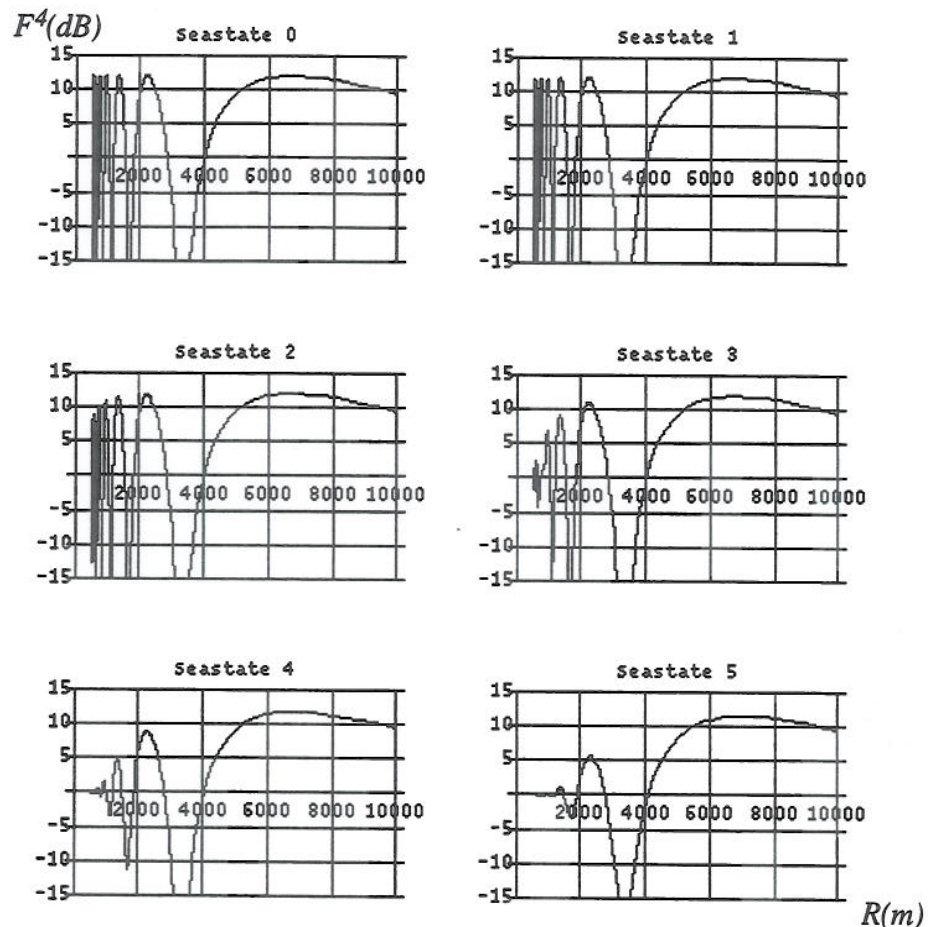
Som det fremgår av figur 3.3 begrenser altså Rayleigh kriteriet antagelsen om spekulær refleksjon til lave frekvenser, eventuelt små bestrykningsvinkler, spesielt dersom sjøtilstanden er større enn 2.

Inkluderes den spekulære refleksjonskoeffisienten kan propageringsfaktoren da skrives

$$|F|^4 = |1 + \rho_0 \rho_s e^{(-i\phi)}|^4 \quad (3.7)$$

Propageringsfaktoren fluktuerer således mellom $(1 + \rho_0 \rho_s)^4$ og $(1 - \rho_0 \rho_s)^4$. Ettersom ρ_s reduseres når sjøtilstanden øker, reduseres også propageringsfaktorens fluktuasjoner.

Propageringsfaktoren for 10 GHz, antennehøyde 10 m og mål i høyde 5 m er vist i figur 3.4 som funksjon av sjøtilstand. At effekten av den spekulære refleksjonskoeffisienten er størst for korte avstander er å forvente pga økningen i bestrykningsvinkelen.



Figur 3.4 Propageringsfaktoren med spekulær refleksjonskoeffisient som funksjon av sjøtilstand. Frekvens 10 GHz, antennehøyde 10 m, mål høyde 5 m.

3.4 Diffus refleksjonskoeffisient

Som beskrevet i forrige avsnitt består refleksjonen fra sjøen av henholdsvis et koherent og et ikke koherent ledd, avhengig av sjøtilstand, bestrykningsvinkel og frekvens, ref Rayleigh kriteriet ligning 3.5. For refleksjon der Rayleigh kriteriet ikke gjelder, introduseres

den diffuse refleksjonskoeffisient ρ_d . Den diffuse refleksjonen er en konsekvens av at refleksjonen ikke er koherent og at både amplituden og fasen da er stokastisk (4). Det adderes derfor et ekstra ledd inn i propageringsfaktoren. Propageringsfaktoren kan da uttrykkes som

$$|F|^4 = |1 + \rho_0 \rho_s e^{-i\phi} + \rho_d e^{-i\psi}|^4 \quad (3.8)$$

der ζ er faseforandringen pga diffus spredning. ζ kan betraktes som uniform fordelt mellom 0 og 2π . ρ_d er amplituden og beregnes på bakgrunn av følgende tilnærming (5)

$$\rho_d = \begin{cases} 3.64 X & X \leq 0.04 \\ 0.01 + 3.63 X & 0.04 < X \leq 0.1 \\ 0.4 & X > 0.1 \end{cases}$$

$$\text{der } X = \frac{\sigma_h \sin(\Psi)}{\lambda} \quad (3.9)$$

Effekten av den diffuse refleksjonskoeffisienten på propageringsfaktoren er presentert i neste kapittel.

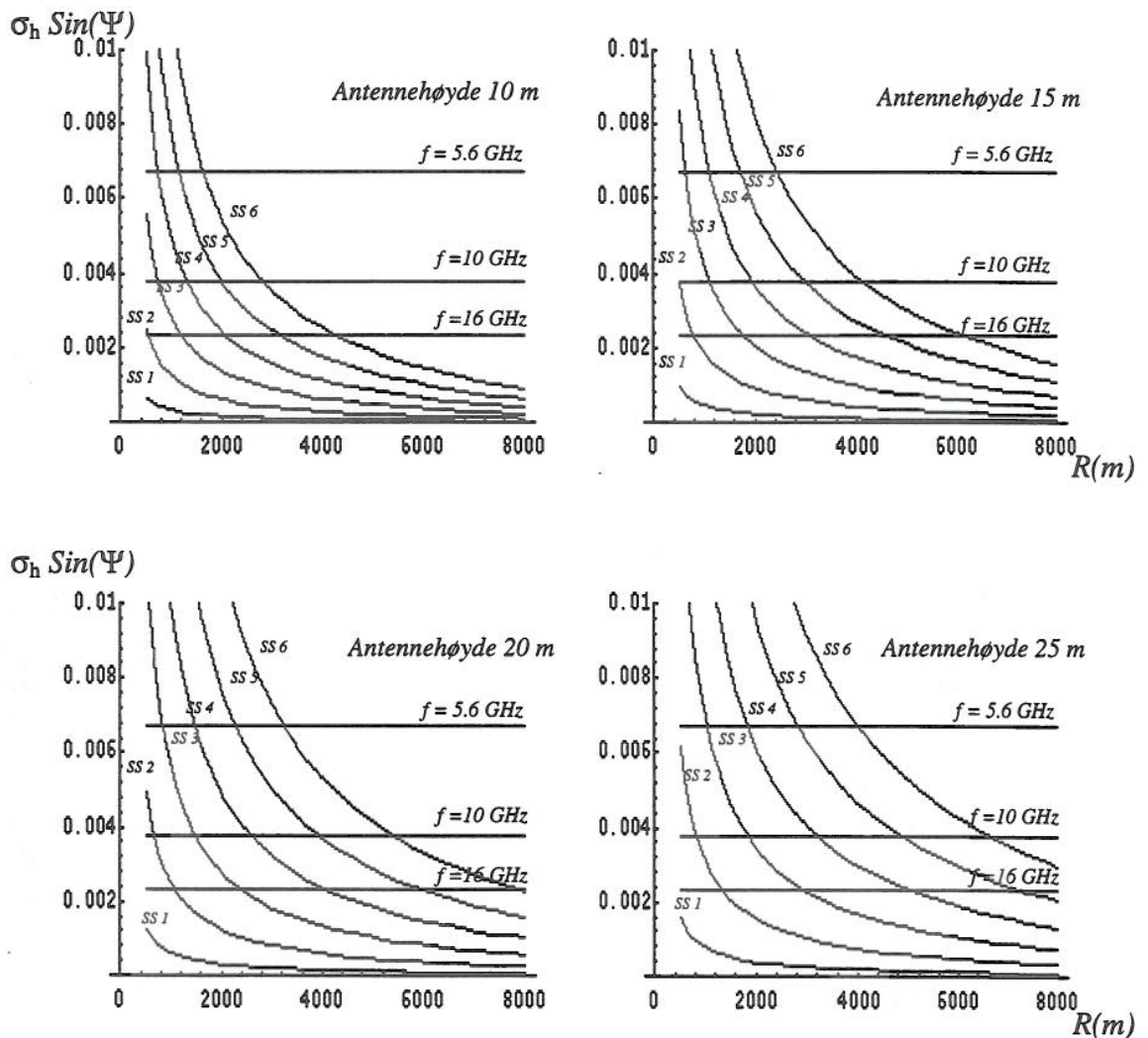
4 PROPAGERINGSFAKTOREN I VARIERENDE SJØTILSTAND

Som nevnt i kap 3 er grensen for koherent refleksjon gitt ved Rayleigh kriteriet for spekulær refleksjon

$$\sigma_h \sin(\Psi) < \frac{\lambda}{8}$$

Dersom betingelsen er oppfylt er refleksjonskoeffisienten gitt ved den spekulære refleksjonskoeffisienten ρ_s . I motsatt fall skal den diffuse refleksjonskoeffisienten ρ_d inkluderes i propageringsfaktoren. Det er således nødvendig å ha en formening om i hvilke tilfeller antagelsen om spekulær refleksjon ikke lengere gjelder.

Figur 4.1 viser nivået for betingelsen for Rayleigh kriteriet som funksjon av antennehøyde, sjøtilstand og avstand. Nivået for typiske frekvenser (5.6, 10 og 16 GHz) er markert med en horisontal linje.



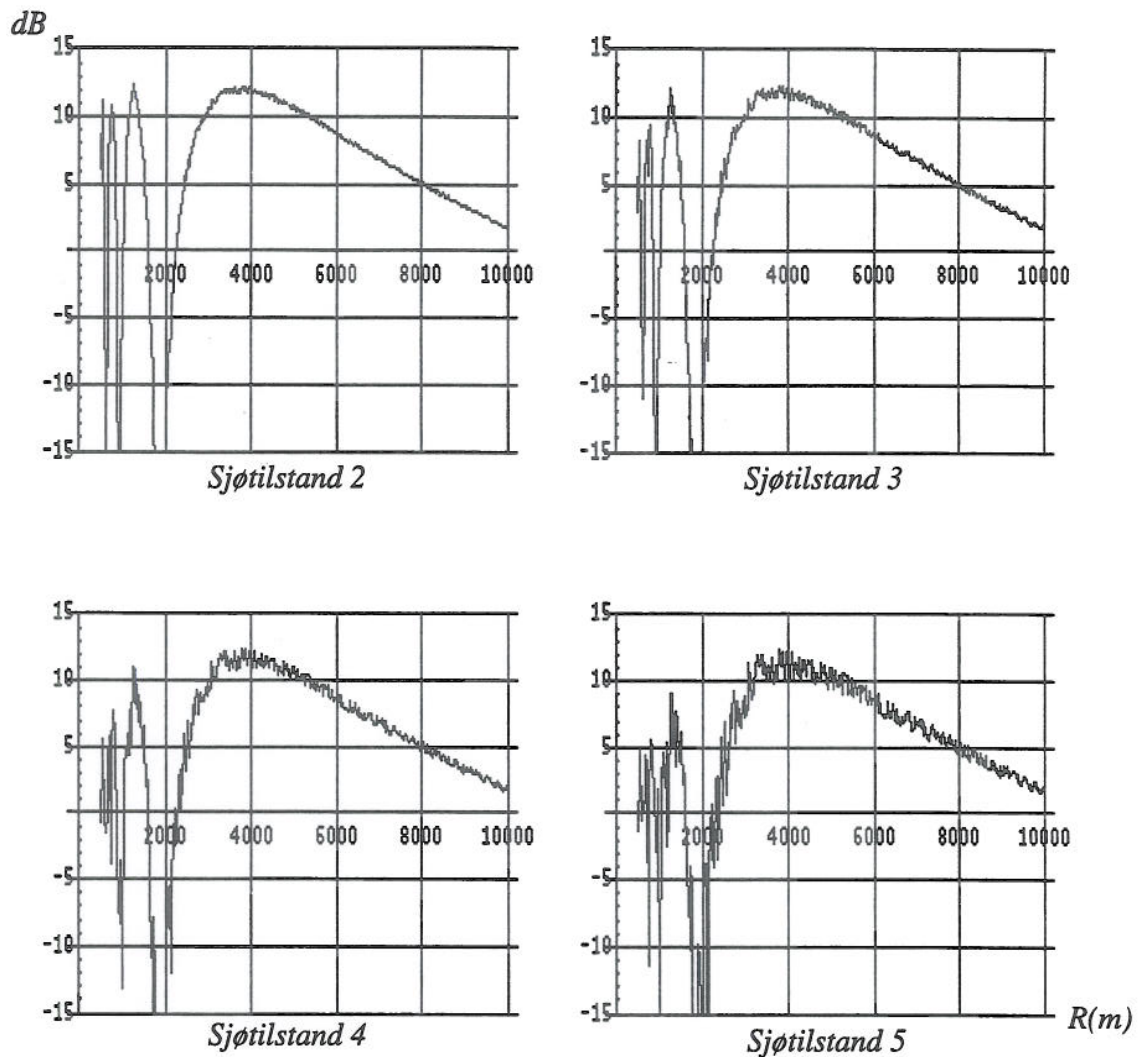
Figur 4.1 Rayleigh kriteriet som funksjon av avstand og sjøtilstand for varierende antennehøyde.

I appendiks A er angitt gjennomsnittlig sjøtilstand som funksjon av årstiden for tre geografisk adskilte steder. Som det fremgår er sjøtilstanden 3 eller høyere i mer enn 50 % av observasjonene. Samholdes dette med figur 4.1 er det åpenbart at den diffuse refleksjonskoeffisienten bør inkluderes, spesielt dersom deteksjon eller følgning på kortere avstander er viktige.

Hvorledes den diffuse refleksjonskoeffisienten påvirker signalet er vist i de følgende plottene. Den vesentlige forandringen er at den spekulære refleksjonen er modulert med et relativt sterkt stokastisk signal.

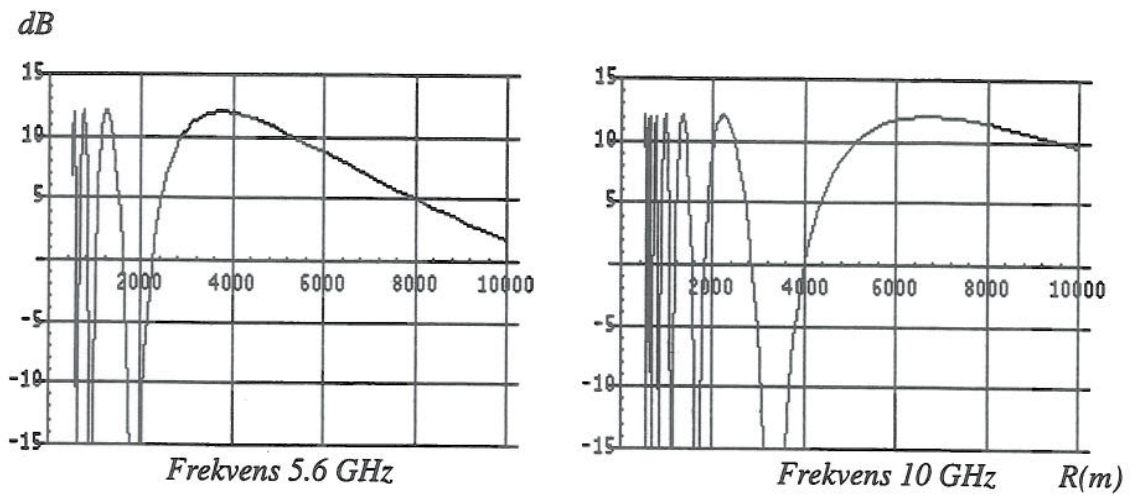
Propageringsfaktoren for henholdsvis sjøtilstand 2, 3, 4 og 5 er plottet for en radar med antennehøyde 10 meter og mål i høyde 5 meter. Dette er således ikke en ekstrem geometri sett i forhold til figur 4.1, men kan være representativ for plassering av en navigasjonsradar. Frekvensen er henholdsvis 5.6, 10 og 16 GHz. Dette tilsvarer henholdsvis søke, navigasjons og følgeradar.

Dersom plottene vurderes i sammenheng med appendiks A, (sjøtilstand som funksjon av geografi og årstid) indikerer plottene variasjonen i propageringsfaktoren som funksjon av både geografi og årstid.

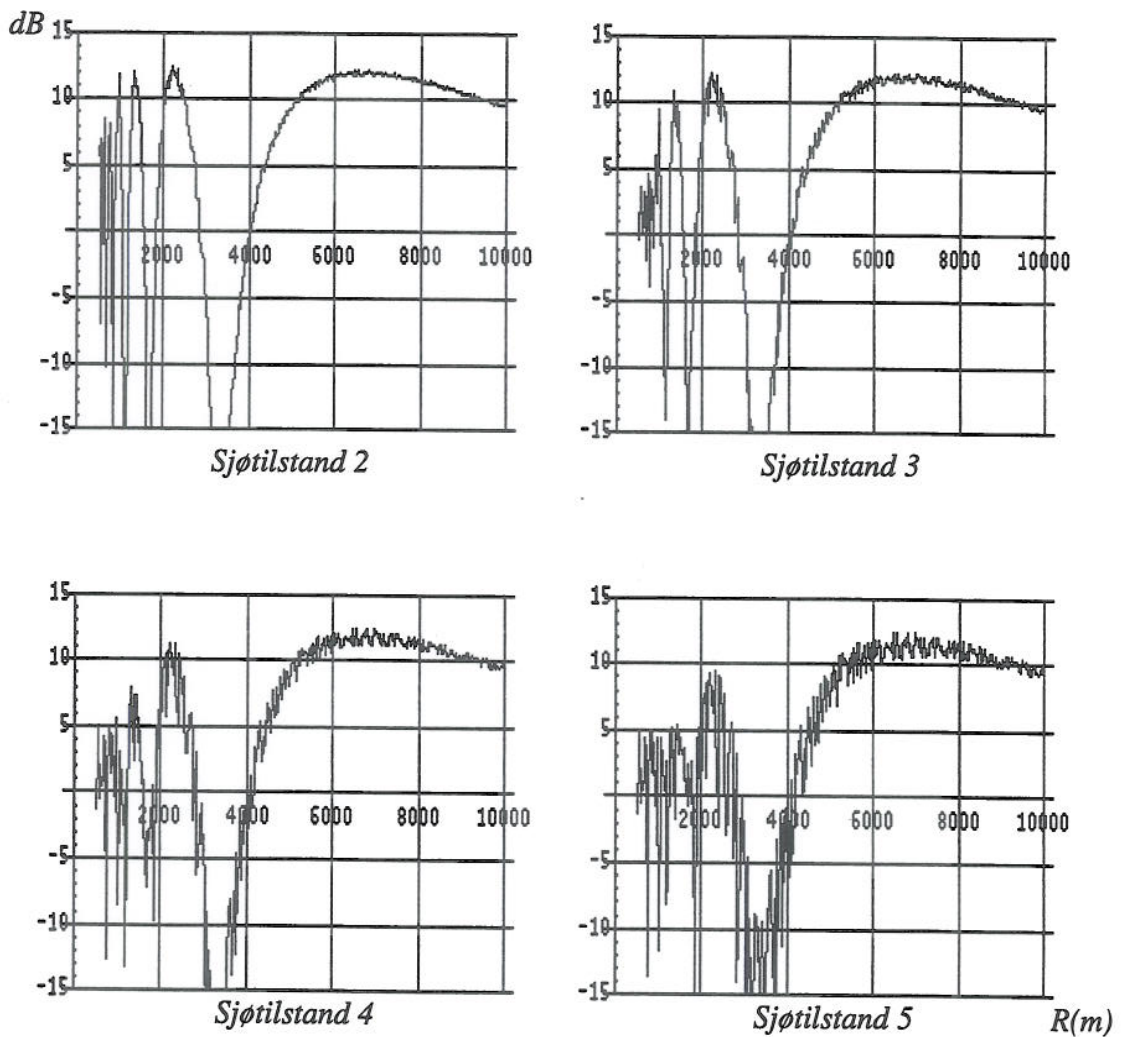


Figur 4.2 Propageringsfaktoren for varierende sjøtilstand, frekvens 5.6 GHz. Radarhøyde 10 , målhøyde 5 m.

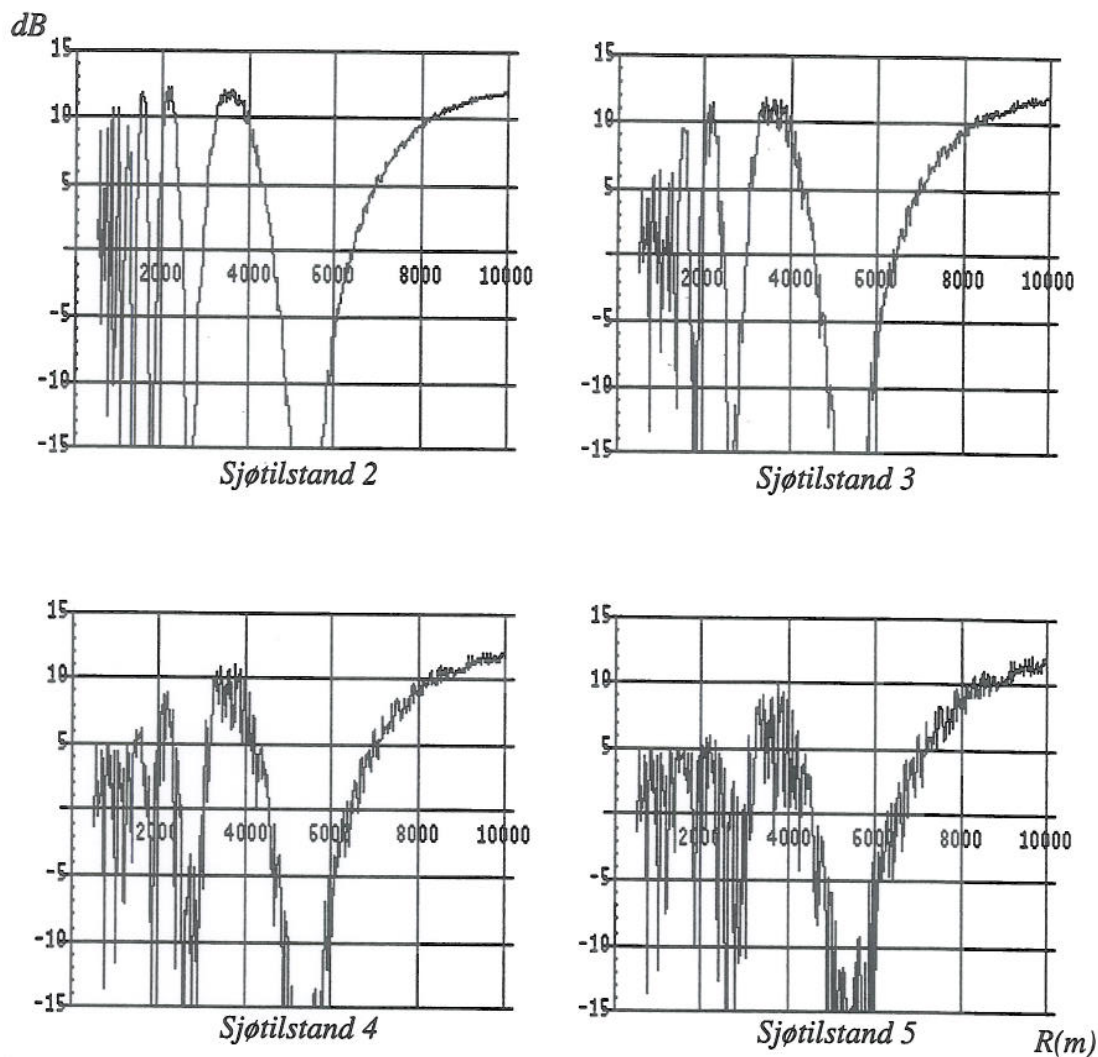
Dersom figur 4.4 sammenlignes med figur 4.3, der den idealiserte propageringsfaktoren er plottet, sees den vesentlige forskjellen i propageringsfaktorens amplitude på korte avstander pga økning i bestrykningsvinkelen, ligning 3.6. Videre fører den diffuse refleksjonskoeffisienten til at spredningen i refleksjonen øker for korte avstander fordi bestrykningsvinkelen øker. Et mål vil således være utsatt for høyfrekvente fluktasjoner som kan vanskeliggjøre deteksjon og følging. Dette vil være tilfelle for mål som opptrer på avstander kortere enn avstanden til maksimalpunktet R_d , ligning 2.11. En maksimering av avstanden R_d , kan således føre til en uønsket økning i propageringsfaktorens fluktasjoner på kortere avstander.



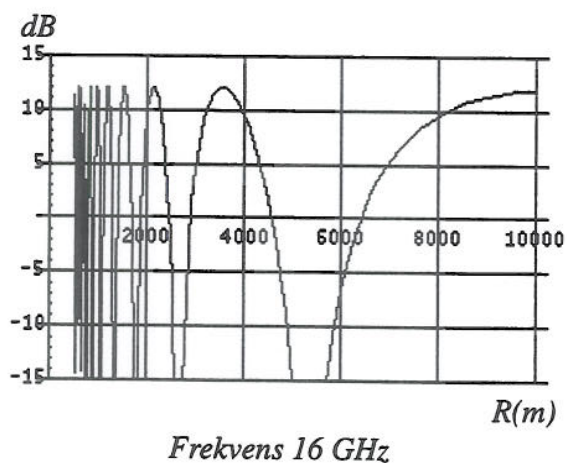
Figur 4.3 Idealisert propageringsfaktor. Radarhøyde 10 m, målhøyde 5 m.



Figur 4.4 Propageringsfaktoren for varierende sjøtilstand, frekvens 10 GHz. Radarhøyde 10 m, målhøyde 5 m.



Figur 4.5 Propageringsfaktoren for varierende sjøtilstand, frekvens 16 GHz. Radarhøyde 10 m, målhøyde 5 m.



Figur 4.6 Idealisert propageringsfaktor. Radarhøyde 10 m, målhøyde 5 m.

Som der fremgår av ovenstående er det ikke tilfredsstillende å kun forholde seg til clutterets nivå i signal-clutter ligningen. Det er nødvendig også å inkorporere effekten av sjøtil-

standen på propageringsfaktoren for å få et korrekt bilde av deteksjonsscenarioet. Spesielt dersom deteksjon på korte avstander, dvs store bestrykningsvinkler og / eller høye frekvenser, skal vurderes.

Den integrerte forsterkningen, dvs

$$\frac{1}{(R_2 - R_1)} \int_{R_1}^{R_2} |F|^4 dR \quad (4.1)$$

over avstandsintervallet 500 – 10.000 m er presentert i tabell 4.1.

$R_d = 4 h_S h_T / \lambda$	3733 m	6666 m	10666 m
	5.6 GHz	10.0 GHz	16.0 GHz
Sjøtilstand 0	6.9	9.2	6.5
Sjøtilstand 1	6.9	9.1	6.4
Sjøtilstand 2	6.8	8.9	6.0
Sjøtilstand 3	6.5	8.4	5.2
Sjøtilstand 4	6.0	7.7	4.5
Sjøtilstand 5	5.5	7.0	3.8

Tabell 4.1 Integrert forsterkning som funksjon av sjøtilstand med radarhøyde 10 m og målhøyde 5 m.

Dersom den integrerte forsterkningen brukes som grunnlag for en vurdering av gyldighet for approksimasjonen til propageringsfaktoren, ligning 2.9, kan dette gjøres ved å ta utgangspunkt i sjøtilstand 0. Integrert forsterkning ved sjøtilstand 0 tilsvarer ligning 2.9. Den relative differansen i integrert forsterkning mellom sjøtilstand 0 og sjøtilstand 1 – 2 kan da anvendes som norm for approksimasjonen. På bakgrunn av tabell 4.1 kan det antas at ligning 2.9 er gyldig for 5.6 GHz opp til sjøtilstand 2 og opp til sjøtilstand 1 for 10 og 16 GHz. Approksimasjonen er i utgangspunktet kun gyldig for avstandsintervall 500 – 10000 m, antennehøyde 10 m og målhøyde 5 m, men er sannsynligvis representativ for anvendelsen av ligning 2.9. Dette gjelder spesielt dersom produktet i argumentet til ligning 2.9 er sammenlignbar med ovenstående.

Tabell 4.1 viser at forsterkningen er en funksjon av sjøtilstand og frekvens. I tillegg gir geometrien utslag ved at i dette scenario har 10 GHz størst og 16 GHz lavest integrert forsterkning over alle sjøtilstander. Grunnen til dette er at avstanden til maksimal punkt R_d varierer for de enkelte frekvenser, mens avstandsintervallet for integrasjon fortsatt er 500 – 10.000 m. F eks fører dette til at den integrerte forsterkningen for 16 GHz er for avstander mindre enn R_d og således influeres av fluktuasjonene i propagasjonsfaktoren.

At differansen i integrert forsterkning mellom sjøtilstand 0 og 5 øker med frekvensen er pga økende diffus refleksjon. Ettersom diffus refleksjon avhenger av frekvens og bestryk-

ningvinkel, er det grunn til å anta at tilsvarende forskjeller kan identifiseres dersom tabell 4.1 hadde vært som funksjon av bestrykningsvinkelen. Dette bekreftes ved at den diffuse refleksjonskoeffisienten avhenger av produktet frekvens, sjøtilstand og bestrykningsvinkel. En økning i en av disse parameterene vil således øke den diffuse refleksjonen.

5 MÅLETS INNVIRKNING PÅ PROPAGERINGSFAKTOREN

I det følgende skal effekten av koherent summasjon over varierende antall refleksjonspunkter og varierende refleksjonsstyrke presenteres som funksjon av avstand og høyde. Hovedsakelig er det to grunner til avvik i refleksjonsmønsteret. Enten er ikke målet en isotrop reflektor, dvs målets radartverrsnitt er ikke konstant som funksjon av aspektvinkel, eller så er refleksjonen i overflaten redusert pga refleksjonskoeffisienten.

Generelt er refleksjonen fra et mål som består av flere reflektorer gitt ved den koherente summasjonen av de enkelte refleksjonenes amplitude

$$\sigma = \left| \sum_{n=1}^N \sqrt{\sigma_n} e^{i\psi_n} \right|^2 \quad (5.1)$$

σ_n representerer radartverrsnittet til de enkelte delmål. Fasen ψ er gitt ved

$$\psi_n = 2 \frac{2\pi R_n}{\lambda} \quad (5.2)$$

der R_n er avstanden til reflektoren n . Målets radartverrsnitt vil således kunne fluktuere mellom en maksimal- og minimal-verdi for radartverrsnittet avhengig av fasen.

Den koherente summasjonen for radartverrsnittet må videre ta hensyn til refleksjonen fra overflaten ved å inkorporere propageringsfaktoren i ligning 5.1.

$$\sigma = \left| \sum_{n=1}^N \sqrt{\sigma_n} e^{i\psi_n} F_n^2 \right|^2 \quad (5.3)$$

Som det fremgår må propageringsfaktoren beregnes for hvert refleksjonspunkt og deretter summeres koherent dersom målet består av flere refleksjonspunkter. Som vi skal se i kap 5.2, har den vertikale fordelingen av refleksjonspunkter større betydning enn den horisontale.

5.1 Punktmål

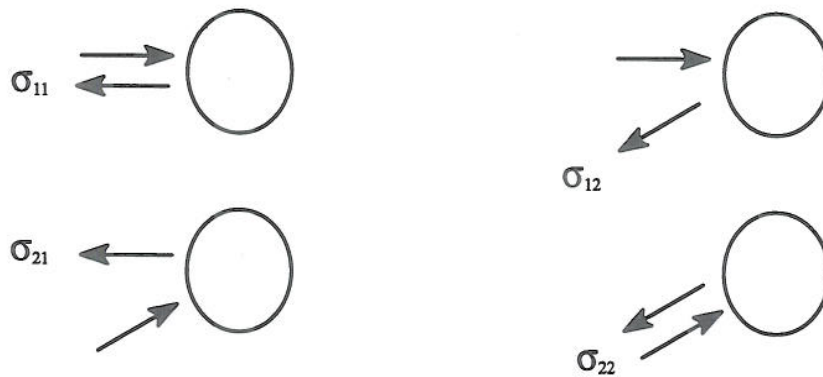
Som vist i ligning 2.10 er det mulig å multiplisere radartverrsnittet med propageringsfaktoren. Dette forutsetter at målet kan betraktes som et punktmål. Med et punktmål menes at målets dimensjoner er slik at alle refleksjoner fra målet er i fase og kan betraktes som ett punkt. Dette er en forutsetning som kan være gyldig dersom målet har ett refleksjonspunkt som er betydelig større enn de øvrige refleksjonene. F eks kan refleksjonen fra et missil tildels tilnærmes et punkt dersom den største refleksjonen kommer fra missilets søker.

Som vist i kapittel 2 kan radartverrsnittet for et punktmål i nærvær av en overflate beskrives ved følgende 4 refleksjoner.

Den primære refleksjonen er ordinær monostatisk refleksjon. Dette tilsvarer fritt roms radartverrsnittet som om målet ikke var belyst i nærvær av en flate. I figur 5.1 tilsvarer dette σ_{11} .

σ_{12} og σ_{21} angir bistatiske refleksjon enten pga det direkte eller det reflekterte feltet. I begge tilfeller reflekterer feltet 1 gang i sjøoverflaten.

Den siste refleksjonen er monostatisk med en aspektvinkel som tilsvarer bestrykningsvinkelen (σ_{22}). Fordi feltet reflekteres 2 ganger i sjøoverflaten er dette den refleksjonen som dempes mest.



Figur 5.1 Refleksjoner som bidrar til propageringsfaktoren

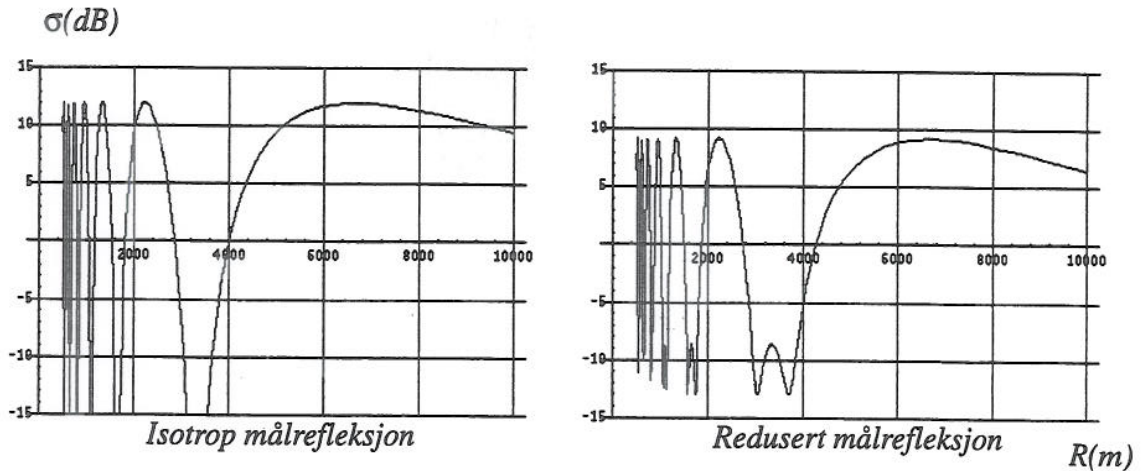
Det er altså 4 refleksjoner som summert gir bidrag til radartverrsnittet dersom målet belyses i nærvær av en overflate. Dersom refleksjonskoeffisienten tilnærmes med 1 og faseskiftet med 180 grader, tilsvarer dette den koherente integrasjonen for $N = 4$ i ligning 5.1. I de tilfeller der reflektorene bidrar konstruktivt og er like store, kan det totale radartverrsnittet således forsterkes inntil 16 ganger.

For å vurdere forskjellen i mono og bistatisk refleksjon på propageringsfaktoren er radartverrsnittet, ligning 5.3, skrevet ut. I dette tilfellet er målet kun ett punkt slik at $N = 1$.

$$\sigma = \left| \sqrt{\sigma_{11}} + (\sqrt{\sigma_{12}} + \sqrt{\sigma_{21}})\rho e^{(-i\phi)} + \sqrt{\sigma_{22}}\rho^2 e^{(-i2\phi)} \right|^2 \quad (5.4)$$

der fasen ϕ er gitt ved ligning 2.5.

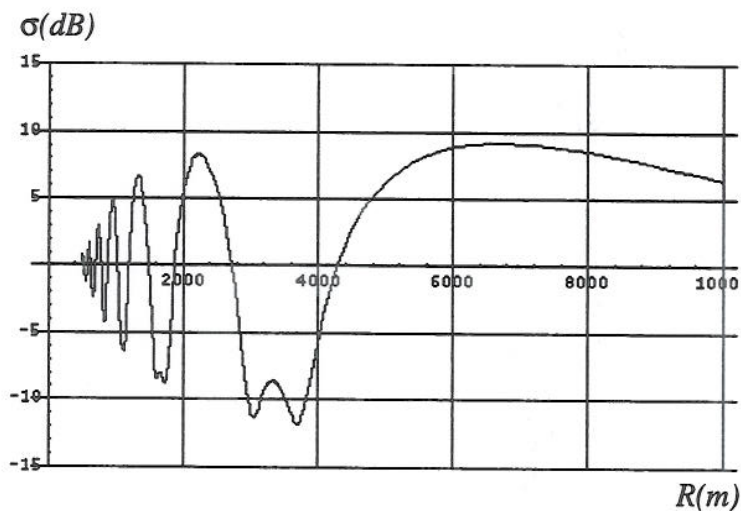
I figur 5.2 (venstre) er ligning 5.4 plottet for en reflektor med ideelt refleksjonsmønster, dvs $\sigma_{11} = \sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma_{22}$, ($\sigma_{11} = 1.0 \text{ m}^2$), med følgende parametere; Refleksjonskoeffisienten er satt lik 1, antennehøyde 10 m, målhøyde 5m og frekvensen er 10 GHz. Som det fremkommer tilsvarer dette tilnærmingen til den ordinære propagasjonsfaktoren, se figur 2.3.



Figur 5.2 Betydningen av redusert refleksjon i overflaten

Dersom refleksjonen fra σ_{12} , σ_{21} eller σ_{22} reduseres enten pga redusert bistatisk refleksjon, (σ_{12} , σ_{21}) eller pga reduksjon i refleksjonskoeffisienten, fås ikke full konstruktiv / destruktiv interferens, se høyre plott i figur 5.2. I dette tilfellet er det antatt at den bistatiske refleksjonen er redusert med 2 dB i forhold til monostatisk refleksjon. I tillegg er den monostatisk refleksjonen pga overflaten (σ_{22}) redusert med 2 dB. Disse reduksjonene er realistiske og kan sannsynligvis gjøres gjeldende for reelle mål ettersom det er kjent at refleksjoner i sjøoverflate gir depolarisering av feltet. Et annet eksempel på redusert refleksjon fra overflaten er dersom polarisasjonen er vertikal. I dette tilfelle kan, som beskrevet i kapittel 3, refleksjonskoeffisienten gå mot null.

Som det fremgår påvirkes fluktuasjonenes amplitude, ettersom koherent integrasjon ikke lenger gir 16 gangers forsterkning av radartverrsnittet. Det er viktig å være klar over at konsekvensen av redusert refleksjon fra overflaten er at propageringsfaktoren går mot 1, dvs fritt roms deteksjon.

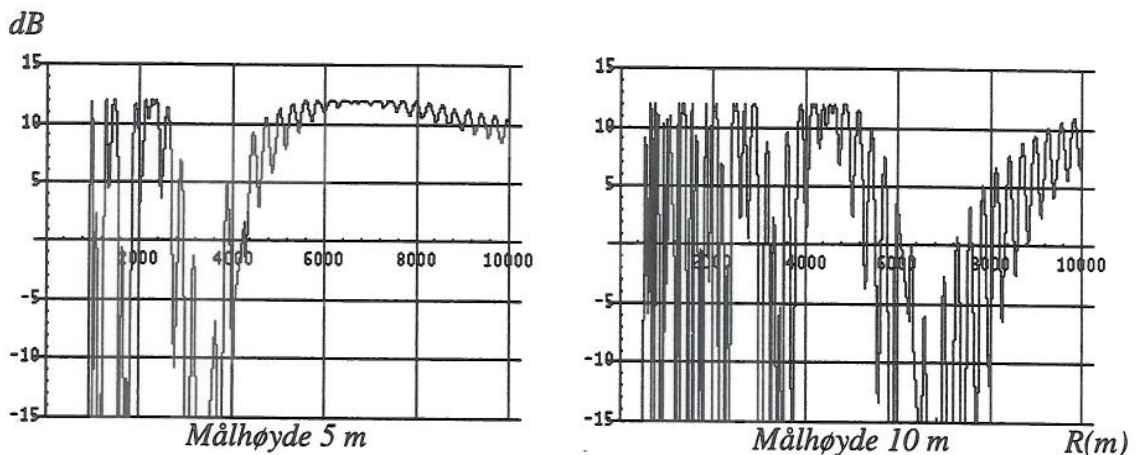


Figur 5.3 Redusert overflaterreflektert refleksjon med spekulær refleksjonskoeffisient

Dersom i tillegg den spekulære refleksjonskoeffisienten inkorporeres for sjøtilstand 3, som vist i figur 5.3, er det åpenbart at resultatet avviker fra den ideelle propagasjonsfaktoren.

Som nevnt forutsetter tilnærmingen til propageringsfaktoren konstant høyde for refleksjonspunktet. Dersom man ønsker å foreta en analyse av en radars sannsynlighet for deteksjon mot f eks et missil kan resultatet bli meget geometriavhengig. Generelt gir en avstand tilsvarende R_d , ref ligning 2.11, en forsterkning på ca 12 dB pga propageringsfaktoren. Derved økes sannsynligheten for deteksjon pga forutsetninger om bl a målhøyde.

I figur 5.4 er vist et scenario der høyden varierer med 10 % av målhøyden under fremføringsfasen. F eks varierer høyden mellom 4.5 og 5.5 m dersom høyden i utgangspunktet er 5 m. Radarens frekvens er 10 GHz og antennehøyden 10 m. Det er forutsatt horisontal polarisasjon og refleksjonskoeffisienten er tilnærmet med 1, samt at sjøtilstanden er satt til 0. Det er åpenbart at propageringsfaktoren ikke gir et entydig positivt bidrag til sannsynligheten for deteksjon dersom målhøyden varierer. Dette til tross for at sjøtilstanden er satt lik 0.



Figur 5.4 Propageringsfaktoren for mål med $\pm 10\%$ varierende høyde som funksjon av avstanden

Et scenario som ikke tar hensyn til varierende høyde av henholdsvis antenne og mål kan således gi store forskjeller i deteksjonsavstand dersom målet har et dynamisk bevegelsesmønster også i vertikal retning. I analyser der punktmål inngår, bør derfor varierende høyde inkorporeres for å unngå fokusering på en enkelt geometri.

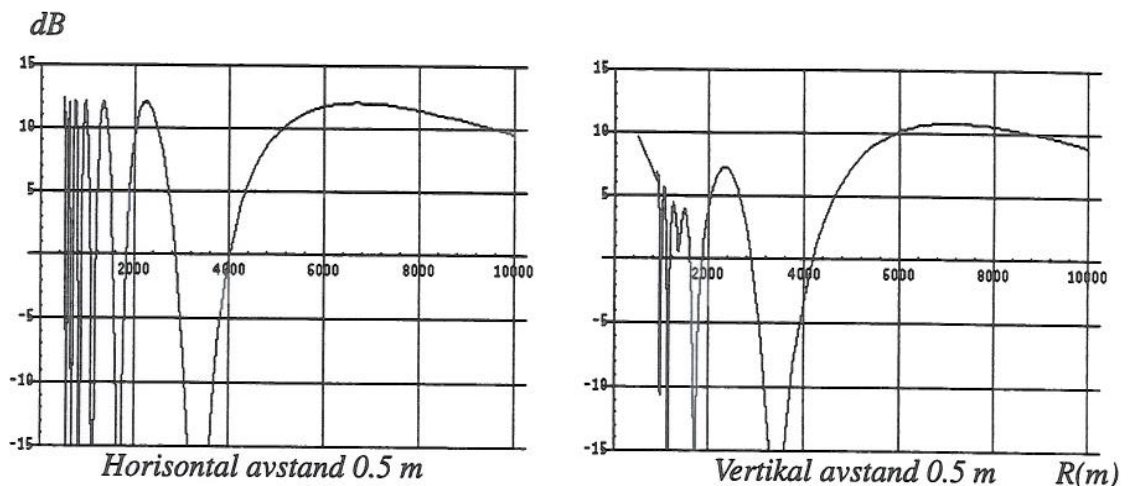
5.2 Komplekse mål

Et fartøys radartverrsnitt kan beskrives ved den koherente summasjonen over flere delreflektorer med respektive radartverrsnitt σ_n , ref ligning 5.1.

For et mål som består av flere delreflektorer må således de enkelte reflektorers propageringsfaktor beregnes og adderes i fase iht ligning 5.3 for å gi det totale radartverrsnittet. Resultatet blir at propageringsfaktorens distinkte maksima og minima for enkeltreflektorer tildels integreres ut. Dette fører til en redusert variasjon i det reflekterte signalet.

Denne effekten er spesielt markant ved refleksjoner som funksjon av høyden som f eks refleksjoner fra et fartøy. Tilsvarende for f eks et lavt flygende missil vil en integrasjon av delreflektorer kombinert med et dynamisk bevegelsesmønster kunne gi en vanskelig predikterbar propageringsfaktor. Dette er vist i kapittel 5.1 der små variasjoner i høyden gir store utslag i propageringsfaktoren.

For å illustrere effekten av plassering av refleksjonspunkter kan eksempelvis plasseringen av to refleksjonspunkter på et vilkårlig missil benyttes. Et missil med et likt radartverrsnitt for to refleksjonspunkter er vist i figur 5.5. Den innbyrdes avstanden er antatt å være 50 cm og radarens frekvens er 10 GHz. Radarens antennehøyde er 10 meter og missilets flyvehøyde 5 m. Det er antatt at missilet holder konstant høyde under hele fremføringsfasen.

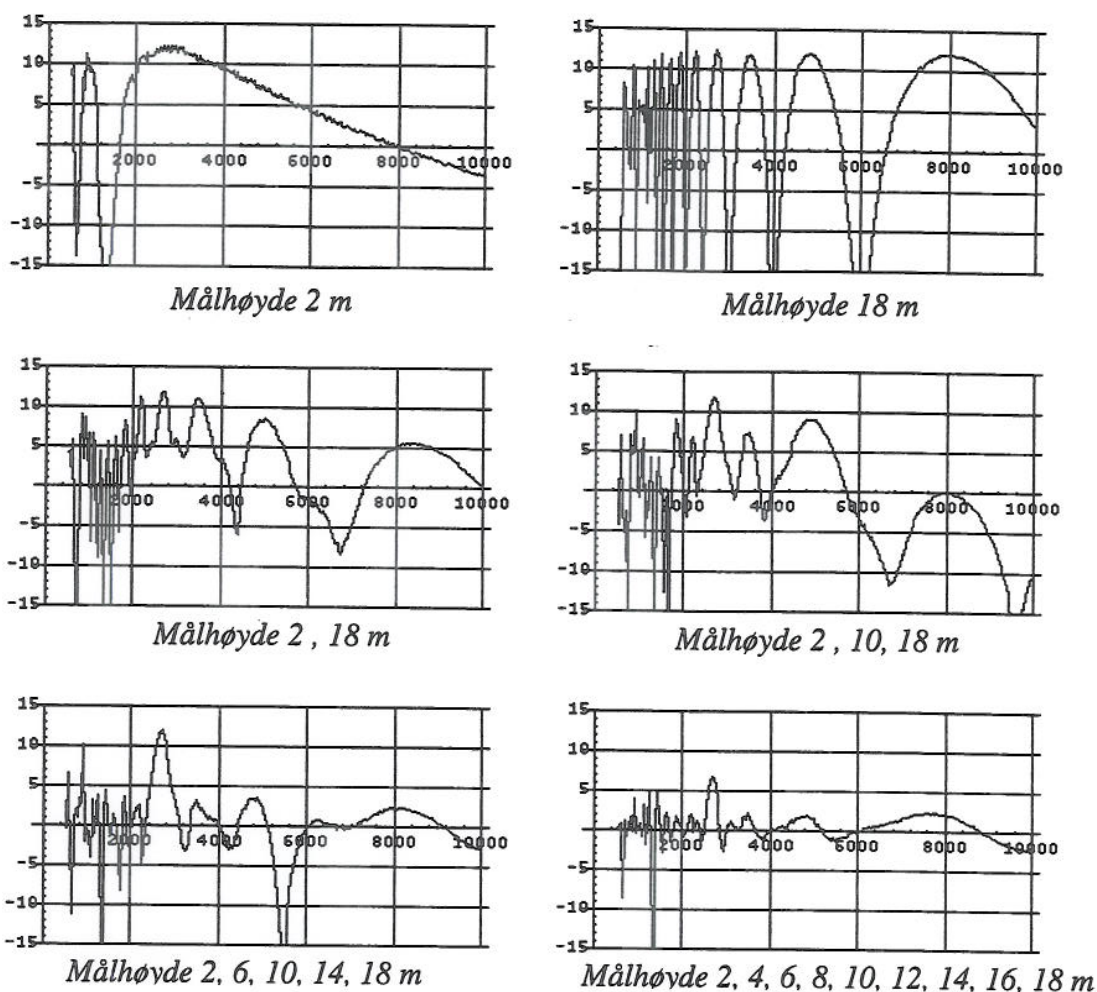


Figur 5.5 Koherent summasjon av 2 refleksjonspunkter med forskjellig plassering

Når man ser bort fra fasefluktuasjoner på radartverrsnittet, gir horisontalt plasserte reflektorer, i en innbyrdes avstand av 50 cm, maksimalt et differensielt faseskift på 2.5 grader i dette scenarionet. Som det fremgår av figur 5.5 påvirker ikke dette propageringsfaktoren.

Tilsvarende plott er vist for en vertikal plassering av samme refleksjonspunkter, høyre plott i figur 5.5. Det maksimale differensielle faseskiftet i dette tilfellet er 250 grader. Ved en avstand på ca 650 m er faseskiftet 180 grader og som det fremgår av figur 5.5 fører dette til destruktiv interferens.

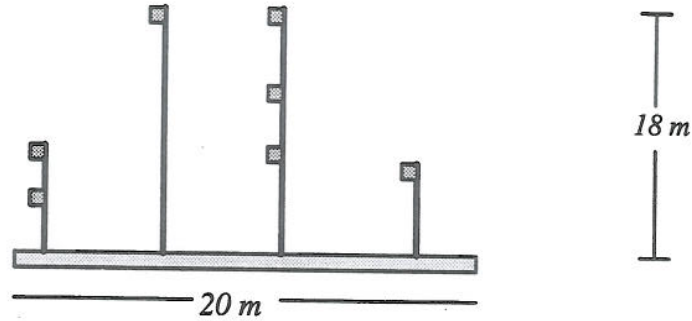
Det er således klart at vertikalt plasserte refleksjonspunkt i større grad enn horisontalt plasserte refleksjonspunkt påvirker propagasjonsfaktoren. Spesielt for fartøy er dette en aktuell problemstilling. Hvordan propageringsfaktoren varierer som funksjon av antallet vertikale refleksjonspunkter for et komplekst mål er vist i appendiks B. Som det fremgår går propageringsfaktoren i gjennomsnitt mot 1 dersom antallet refleksjonspunkter er stort. Dersom målet derimot består av en dominerende reflektor gjelder tilnærmingen for et punktmål. I figur 5.6 er vist effekten av varierende antall reflektorer i varierende høyde. Det er antatt at alle refleksjonspunkt har samme horisontale avstand og som det fremgår i appendiks B, har variasjoner i avstanden liten innvirkning på propageringsfaktoren og påvirker derfor ikke resultatet.



Figur 5.6 Propageringsfaktoren for fartøy med varierende antall refleksjonspunkter

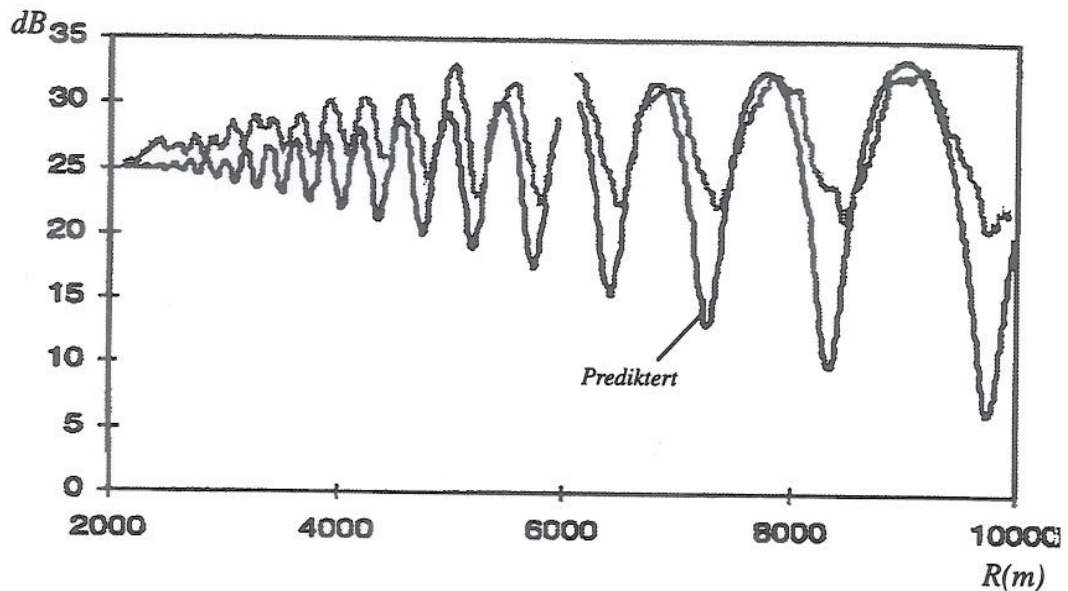
Beregningene er utført for frekvens 10 GHz, antennehøyde 10 m og sjøtilstand 2. Det er antatt at radartverrsnittet er konstant for de enkelte refleksjonspunkter. Som det fremgår går propageringsfaktoren relativt raskt mot 1 for komplekse mål. At dette virker rimelig kan sees ut fra at en måling i prinsippet er en avbildning fra 3D til 1D, der alle reflektorer både i avstand, horisontalt og vertikalt summeres koherent.

Dette er tildels vist i følgende målinger utført av Defence Research Establishment (DRA), UK, (6) der henholdsvis 1, 3 og 7 hjørnereflektorer med respektive samme radartverrsnitt (ca 316 m²) er målt som funksjon av avstand. Målingene er gjort på 10 GHz og radarens høyde var 44 m. Flåtens oppsett er vist i figur 5.7.



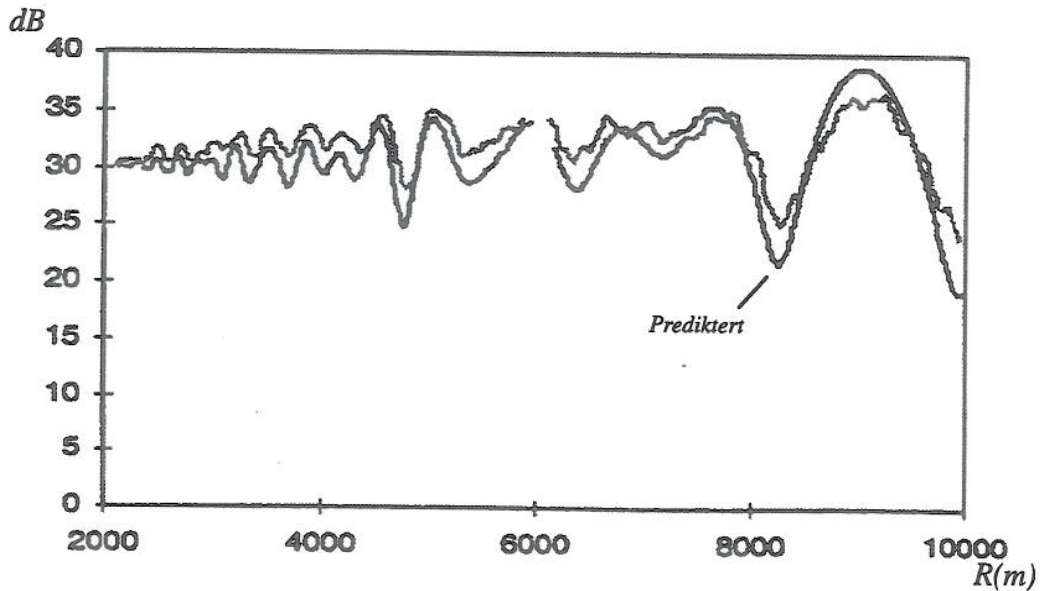
Figur 5.7 Flåte med hjørnereflektorer

Figur 5.8 viser måling av en hjørnereflektor i høyde 18 m, sjøtilstand 2. Som målingen viser er propageringsfaktorens maksima og minima mindre distinkte enn tilsvarende beregninger. Dette kan ha sammenheng med at full destruktiv interferens kan være vanskelig å oppnå i reelle situasjoner.



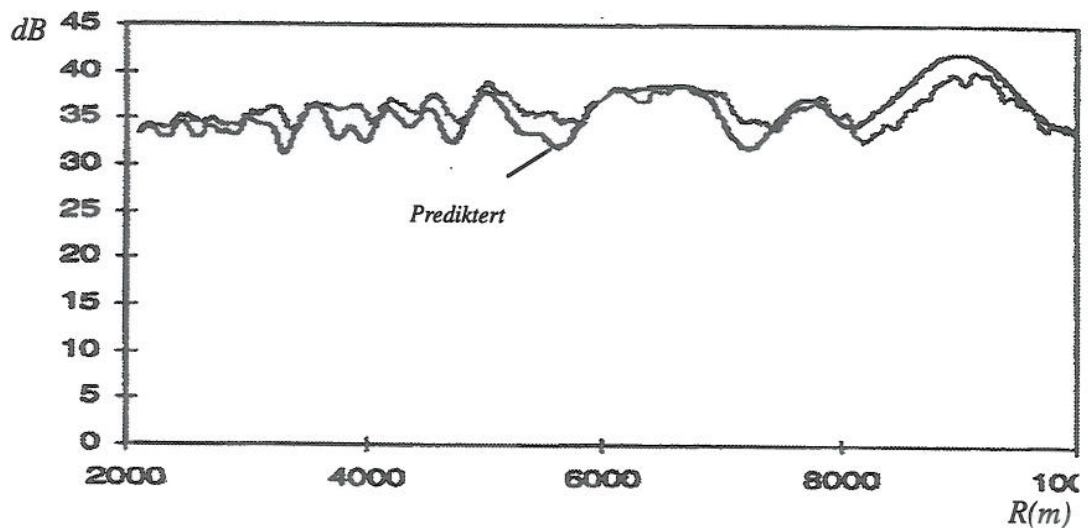
Figur 5.8 Måling og prediksjon av 1 hjørnereflektor på flåte (6)

Figur 5.9 viser henholdsvis prediksjon og måling av 3 hjørnereflektorer i samme avstand og varierende høyde. Som målingene indikerer, blir propageringsfaktorens maksima og minima mindre distinkte og målets reflekterte radartverrsnitt tilnærmes de tre hjørnereflektorens integrerte verdi.



Figur 5.9 Måling og prediksjon av 3 vertikale plasserte hjørnereflektorer på flåte (6)

Propageringsfaktoren blir ytterligere diffus dersom antallet hjørnereflektorer øker både horisontalt og vertikalt. Dette er vist i figur 5.10 der ytterligere 4 hjørnereflektorer er plassert på samme flåte. Dette tilsvarer full konfigurasjon på flåten, se figur 5.7. Det er åpenbart at propageringsfaktoren har blitt mindre og kun gir marginal effekt for deteksjon på lengre avstander. Den koherente summasjonen av 7 hjørnereflektorer med samme radartverrsnitt (ca 25 dBsm) gir i snitt 33.5 dBsm eksklusive propageringseffekter. Dersom propageringsfaktoren inkluderes burde målingen gi større fluktuasjoner enn vist i figur 5.10. Det er således åpenbart at selv for små sjøtilstander (sjøtilstand 2) går propageringsfaktoren mot 1 for komplekse mål som f.eks. et fartøy.



Figur 5.10 Måling og prediksjon av 7 hjørnereflektorer på flåte (6)

I beregninger der komplekse mål inngår, bør således propageringsfaktoren inkluderes for de enkelte delreflektorer dersom resultatet av beregningen skal være gyldig.

6 KONKLUSJON

Propageringsfaktorens betydning for deteksjon i varierende sjøtilstand mot henholdsvis punktmål og komplekse mål er undersøkt.

Generelt kan man anta at propageringsfaktoren er gyldig for punktmål, mens for komplekse mål som f eks fartøy kan propageringsfaktoren approksimeres med 1 selv i liten sjøtilstand. Spesielt gjelder dette dersom fartøyet har flere refleksjonspunkt i varierende høyde.

I de tilfeller der målet kan betraktes som et punktmål enten fordi målets dimensjoner er små eller fordi målet har ett vesentlig refleksjonspunkt, bør både spekulær og diffus refleksjonskoeffisient inkluderes i propageringsfaktoren. Ettersom propageringsfaktoren i hovedsak fluktuerer mellom $(1 + \rho)^4$ og $(1 - \rho)^4$ er det åpenbart at dersom refleksjonskoeffisienten tilnærmes med 1, fåes store utslag i sannsynligheten for deteksjon mot punktmål. Gyldigheten av den velkjente approksimasjonen, ligning 2.9, er således begrenset til punktmål i sjøtilstand 0 og 1 for høyere frekvenser.

Avslutningsvis bør det bemerkes at man generelt bør være forsiktig med scenarier der høyden til radarantennen og målet er avgjørende for deteksjon på en gitt avstand. For landbaserte radarer der målet er fartøyer er geometrien forholdsvis enkel. Om radaren er fartøybasert og målet missiler eller fly i lav høyde bør man i tillegg vurdere kombinasjoner av både avstander og høyder for å få et korrekt bilde av situasjonen. Det kan f eks være slik at missilet ikke kommer i forutsatt høyde eller at fartøyet opererer i et kystscenario der lange deteksjonsavstander ut til radarhorisonten ikke er mulig. En høyt plassert antenne kan i et sådan scenario forverre situasjonen ved at signalet fluktuerer kraftig pga propageringsfaktoren.

Litteratur

- (1) Nathanson F E (1969) : Radar Design Principles, McGraw-Hill, New York.
- (2) Beckman P, Spizzichino A (1963) : The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces, Macmillian, New York.
- (3) Ament, W S (1953) : Toward a Theory of Reflection by a Rough Surface, Proc. IRE, vol. 41, January 1953
- (4) Beard, C I, Katz, I and Spetner, L M (1956) : Phenomenological Vector Model of Microwave Reflection from the Ocean, IRE Trans., vol. AP-4, April 1956
- (5) Barton, D K (1974) : Low-Angle Radar Tracking, Proc. IEEE, No.6, June 1974.
- (6) Talbot F M, Beeney P, Basset J F (1996) : The Effect of the Sea Surface on The Measured Radar Signature of Ships and Simple Targets Close to the Sea Surface, Symposium on "Radar Signature Analysis & Imaging of Military Targets", Ankara, Tyrkia.

APPENDIKS

A MIDLERE PROPAGERINGSFORHOLD LANGS NORSKEKYSTEN

I det følgende er meteorologiske data fra tre kystnære og geografisk adskilte områder presentert som funksjon av årstidene. Dataene representerer henholdsvis fordampningssjikt og vindhastighet. Dataene fra områdene er midlet over dag/natt og over en periode av tre måneder. De presenterte data representerer median, dvs 50 %, tilstand.

Vindhastigheten er videre brukt som utgangspunkt for en vurdering av median sjøtilstand for området. En sådan vurdering er selvfølgelig belagt med en grad av usikkerhet ettersom en sjøtilstand indikerer bølgehøyde. Det er likevel en korrelasjon mellom bølgehøyde og vindhastighet som gjør at sjøtilstanden kan estimeres på bakgrunn av vindhastighet.

Som kjent influerer fordampningssjiktet både på propagerings-faktoren og sjøclutter. Denne er derfor presentert for å komplettere en beregning av propageringen i norske områder. Det er likevel ikke sikkert at det er en sammenheng mellom vindhastighet og fordampningssjiktet slik som denne sammenstillingen viser. Er f eks en kombinasjon av et sjikt på 5.6 m og vindhastighet 9.6 m/s mulig? Når det til tross for dette presenteres sammen er det fordi det er grunn til å anta en viss korrelasjon mellom målt vindhastighet og sjikthøyde.

Generelt avhenger fordampningssjiktet av den relative differansen i temperatur mellom luft og sjø. Sjiktets høyde er til en viss grad invers med den relative luftfuktigheten og proporsjonal med vindhastigheten.

		Fordampningssjikt	Vindhastighet	Sjøtilstand
Stavanger				
	Vinter	5.6 m	9.6 m/s	4
	Vår	4.4 m	6.9 m/s	3
	Sommer	6.5 m	6.2 m/s	3
	Høst	8.1 m	9.1 m/s	4
Ørlandet				
	Vinter	7.1 m	11.0 m/s	5
	Vår	5.8 m	8.0 m/s	4
	Sommer	5.9 m	6.7 m/s	3
	Høst	7.4 m	9.5 m/s	4
Bodø				
	Vinter	4.3 m	7.0 m/s	3
	Vår	3.9 m	5.3 m/s	2
	Sommer	4.9 m	4.0 m/s	2
	Høst	5.7 m	6.7 m/s	3

Den ovenstående inndelingen er basert på følgende

Vinter desember/januar/februar

Vår mars/april/mai

Sommer juni/juli/august

Høst september/oktober/november

Data er hentet fra Ducting Climatology Summary (DCS) Program, der dataene er innsamlet fra nevnte norske steder i samarbeide med National Climatic Data Center, USA, og presentert i "EREPS, Engineer's Refraction Effects Prediction System Software".

APPENDIKS

B MIDLERE REFLEKSJON FRA KOMPLEKSE MÅL I NÆRVÆR AV EN OVERFLATE

Som vist i kapittel 5 kan radartverrsnittet for ett punktmål k skrives

$$\sigma_k = |\sqrt{\sigma_{1,k}} + 2\rho\sqrt{\sigma_{2,k}} e^{-i\phi_k} + \rho^2\sqrt{\sigma_{3,k}} e^{-i2\phi_k}|^2 \quad (6.1)$$

der fasen pga differansen i avstand mellom det direkte og det reflekterte feltet er gitt ved

$$\phi_k = \varphi_0 + \frac{4\pi h_S h_{T_k}}{\lambda R_k} \quad (6.2)$$

I (6.1) er de bistatiske refleksjonene antatt å være like ($\sigma_{12} = \sigma_{21}$). Den koherente summen for radartverrsnittet for et kompleks mål er

$$\sigma = \left| \sum_{n=1}^N \sqrt{\sigma_n} e^{i\psi_n} \right|^2 \quad (6.3)$$

der fasen er gitt ved avstanden til refleksjonspunktene

$$\psi_n = \frac{4\pi R_n}{\lambda} \quad (6.4)$$

Ettersom summasjonen utføres på amplitude, må radartverrsnittet som er uttrykk for effekt konverteres til

$$\sqrt{\sigma_k} = \sqrt{\sigma_{1,k}} + 2\rho\sqrt{\sigma_{2,k}} e^{-i\phi_k} + \rho^2\sqrt{\sigma_{3,k}} e^{-i2\phi_k} \quad (6.5)$$

Ved å kombinere (6.3) og (6.5) kan radartverrsnittet skrives

$$\sigma = |A + 2\rho B + \rho^2 C|^2 \quad (6.6)$$

der

$$A = \sqrt{\sigma_{1,1}} e^{i\psi_1} + \dots + \sqrt{\sigma_{1,k}} e^{i\psi_k} + \dots + \sqrt{\sigma_{1,N}} e^{i\psi_N} \quad (6.7)$$

$$B = \sqrt{\sigma_{2,1}} e^{-i\phi_1} + \dots + \sqrt{\sigma_{2,k}} e^{-i\phi_k} + \dots + \sqrt{\sigma_{2,N}} e^{-i\phi_N} \quad (6.8)$$

$$C = \sqrt{\sigma_{3,1}} e^{-i2\phi_1} + \dots + \sqrt{\sigma_{3,k}} e^{-i2\phi_k} + \dots + \sqrt{\sigma_{3,N}} e^{-i2\phi_N} \quad (6.9)$$

A tilsvarer frittroms refleksjon. Som det fremgår av faseavhengigheten pga avstanden, varierer A meget ved små variasjoner i den innbyrdes avstanden mellom reflektorene. A integreres normalt over henholdsvis romvinkel og avstand slik at A kan betraktes som en ikke-koherent integrasjon av refleksjonspunktene.

Både B og C varierer derimot mer med høyden enn avstanden. Dette sees ved å se på henholdsvis

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial R_k} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{h_S h_{T_k}}{R_k^2} \quad (6.10)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial h_T} = \frac{4\pi h_S}{\lambda R_k} \quad (6.11)$$

Ettersom variasjonene i fasen pga høyden er meget større enn tilsvarende variasjoner i avstand, dvs

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial h_T} \gg \frac{\partial \phi_k}{R_k} \quad (6.12)$$

kan integrasjonen begrenses til å høyden.

Siden både B og C er periodiske innenfor integrasjonsgrensene, gir integrasjonen av refleksjonspunktene som funksjon av høyden ved varierende avstand, at både B og C i gjennomsnitt går mot null. Radartverrsnittet kan derfor tilnærmes med

$$\sigma = |A|^2 \quad (6.13)$$

dersom målet består av mange reflektorer. Propageringsfaktoren går således mot 1 for komplekse mål.

APPENDIKS**C DEFINISJON AV SJØTILSTAND**

Definisjonen av sjøtilstanden er vist på neste side.

Sjøtilstand	1	2	3	4	5	6	7	8
Beaufort skala	0-2	3	4	5	6	7	8-9	10
Karakteristisk bølgehøyde (m)	0-0.5	0.5-0.7	0.7-1.3	1.3-2.7	2.7-4.3	4.3-5.1	5.1-6.7	6.7-10.0
Vindhastighet (m/s)	0-3.3	3.4-5.4	5.5-7.9	8.0-10.7	10.8-13.8	13.9-17.1	17.2-24.4	24.5-28.4

Definisjon av sjøtilstand. (1)