

FFI RAPPORT

VINDKRAFTVERKS KONSEKVENSER FOR FORSVARETS INSTALLASJONER - INNLEDENDE STUDIE FOR RADAR

ØHRA Hans

FFI/RAPPORT-2003/02784

FFIE/327501/113

Godkjent
Kjeller 19. juli 2003

Torleiv Maseng
Forskningsjef

**VINDKRAFTVERKS KONSEKVENSER FOR
FORSVARETS INSTALLASJONER - INNLEDENDE
STUDIE FOR RADAR**

ØHRA Hans

FFI/RAPPORT-2003/02784

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge

INNHold

| | Side | |
|-------|-------------------------------------|----|
| 1 | INNLEDNING | 7 |
| 2 | VINDKRAFTVERKET | 8 |
| 2.1 | Vindkraftverkets radartverrsnitt | 8 |
| 3 | MÅLENE | 15 |
| 4 | RADAREN | 16 |
| 4.1 | Signalutbredelse | 17 |
| 5 | VINDKRAFTVERKS INNVIRKNING PÅ RADAR | 18 |
| 5.1 | Refleksjoner mot radaren | 19 |
| 5.1.1 | Metning av radarmottakeren | 19 |
| 5.1.2 | Pulskomprimering | 19 |
| 5.1.3 | Dopplerprosessering | 20 |
| 5.1.4 | Konstant falsk alarmrate | 20 |
| 5.2 | Refleksjoner via vindkraftverket | 20 |
| 5.2.1 | Falske måldeteksjoner | 21 |
| 5.2.2 | Refleksjon av jamming | 26 |
| 5.2.3 | Refleksjon av clutter | 28 |
| 5.3 | Skyggevirkning | 29 |
| 5.4 | Radarantennens nærfelt | 29 |
| 5.5 | Elektromagnetisk støy | 30 |
| 6 | MULIGE TILTAK | 30 |
| 6.1 | Interne problem i radaren | 30 |
| 6.2 | Refleksjoner via vindkraftverket | 33 |
| 6.3 | Skyggevirkning | 34 |
| 6.4 | Radarantennens nærfelt | 34 |
| 6.5 | Elektromagnetisk støy | 34 |
| 7 | ERFARINGER FRA ANDRE LAND | 34 |
| 7.1 | Sverige | 34 |
| 7.2 | Danmark | 35 |
| 7.3 | Tyskland | 36 |
| 7.4 | Storbritannia | 36 |
| 7.5 | Nederland | 38 |
| 7.6 | Spania | 38 |

| | | |
|-----|------------------------------------|----|
| 8 | VIDERE ARBEID | 38 |
| 8.1 | Internasjonalt samarbeide | 39 |
| 8.2 | Modellering | 39 |
| 8.3 | Feltnmålinger | 39 |
| 8.4 | Detaljert studie av norske radarer | 39 |
| 8.5 | Krav til utbygger | 40 |
| 8.6 | Operative vurderinger | 40 |
| 9 | KOSTNADER | 40 |
| 10 | ANBEFALINGER | 41 |
| 11 | OPPSUMMERING | 42 |
| | APPENDIKS | 43 |
| A | FORKORTELSER | 43 |
| | Litteratur | 44 |
| | FORDELINGSLISTE | 45 |

VINDKRAFTVERKS KONSEKVENSER FOR FORSVARETS INSTALLASJONER - INNLEDENDE STUDIE FOR RADAR

1 INNLEDNING

Regjeringen har en målsetting om en betydelig utbygning av vindkraft i Norge. Dette har medført en omfattende utredning av vindressurser i Norge, og det er fremmet flere titalls vindkraftprosjekter. Prosjektene som skal realiseres må gjennomgå en konsekvensutredning hvor forskjellige samfunnsinteresser blir vurdert. Forsvaret er høringsinstans og det er stedvis påvist mulige konflikter mellom Forsvarets sambands- og radarinstallasjoner og vindkraftverk.

Forsvarsbygg (FB), Forsvarets Logistikkorganisasjon (FLO) og Forsvarets Overkommando/Etterretningstjenesten (FO/E) har gjennomført vurderinger av konsekvensene ved plassering av vindkraftanlegg nær Forsvarets installasjoner.

Forsvarsdepartementet ved FB har finansiert en oppdrag hvor FFI skal gjennomføre en innledende studie som kan underbygge eller forbedre den praksisen som gjennomføres når Forsvaret vurderer en vindkraftutbyggings konsekvenser for Forsvarets radarinstallasjoner. Studien omfatter en gjennomgang av tidligere arbeider som er gjennomført, en forklaring av mekanismene som kan forårsake uheldige innvirkninger og utvikling av en modell som viser uheldige konsekvenser.

Kapitlene 2, 3 og 4 er ment som teknisk bakgrunnsmateriale for å gi leseren en viss forståelse av kapitel 5's vurderinger og beregninger av vindkraftverkets påvirkning av radarene. Tiltak for å redusere uheldige virkninger av vindkraftverket blir diskutert i kapitel 5.5.

Kapitel 6.5 er en gjennomgang av arbeid og erfaring fra andre land. Dette materialet ble gjennomgått i forkant og i parallell med de tekniske arbeidene, for å gi leseren et bedre grunnlag for å forstå de konsekvenser som er påvist i andre land.

Rapporten er en innledende studie og kapitel 8 foreslår hvilke arbeider som bør gjennomføres før vindkraftverk blir plassert nær radarer. Kostnader, basert på en engelsk studie, for å gjennomføre tiltak for å redusere uheldige konsekvenser av vindkraftverk er gitt i kapitel 9.

De tekniske analysene i denne rapporten samt erfaringer og arbeider fra andre land, blir i kapitel 10 sammenfattet til et forslag om hva som bør gjennomføres før man aksepterer utplassering av vindmøller nær radaranlegg.

De som er involvert i saksbehandling av vindkraftutbygning, men ikke teknisk interessert, bør kunne få utbytte av å lese oppsummeringen i kapitel 11 og noen flere detaljer i kapitlene 8, 9 og 10.

2 VINDKRAFTVERKET

Radar er basert på utsendelse og mottak av radiobølger (elektromagnetiske bølger). Det er vel kjent at alle typer objekter vil påvirke radiobølgene som passerer eller treffer objektet.

Vindkraftverkene er store konstruksjoner, de plasseres ofte høyt i terrenget, de har store bevegelige deler, og det plasseres ofte et stort antall vindmøller i et område. Det er vanskelig å finne tilsvarende konstruksjoner i terrenget. De store FM og TV senderne er det nærmeste vi kommer, men da disse mangler roterende deler og utplasseres enkeltvis, er sammenligningen bare delvis relevant.

For å behandle vindkraftverkets betydning for radar er det ønskelige å finne en metode som i størst mulig grad er i overensstemmelse med vanlige beregninger for radarytelse. Disse modellene karakteriserer eksterne objekt basert på deres radartverrsnitt (RCS).

2.1 Vindkraftverkets radartverrsnitt

Radartverrsnittet forteller hvor mye og hvordan den energien som treffer objektet blir sendt ut igjen. Radartverrsnitt er behandlet grundig i litteraturen (1), (2) og (3).

Radartverrsnitt er i (3) definert som

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E^{scat}|^2}{|E^{inc}|^2} \quad (2.1)$$

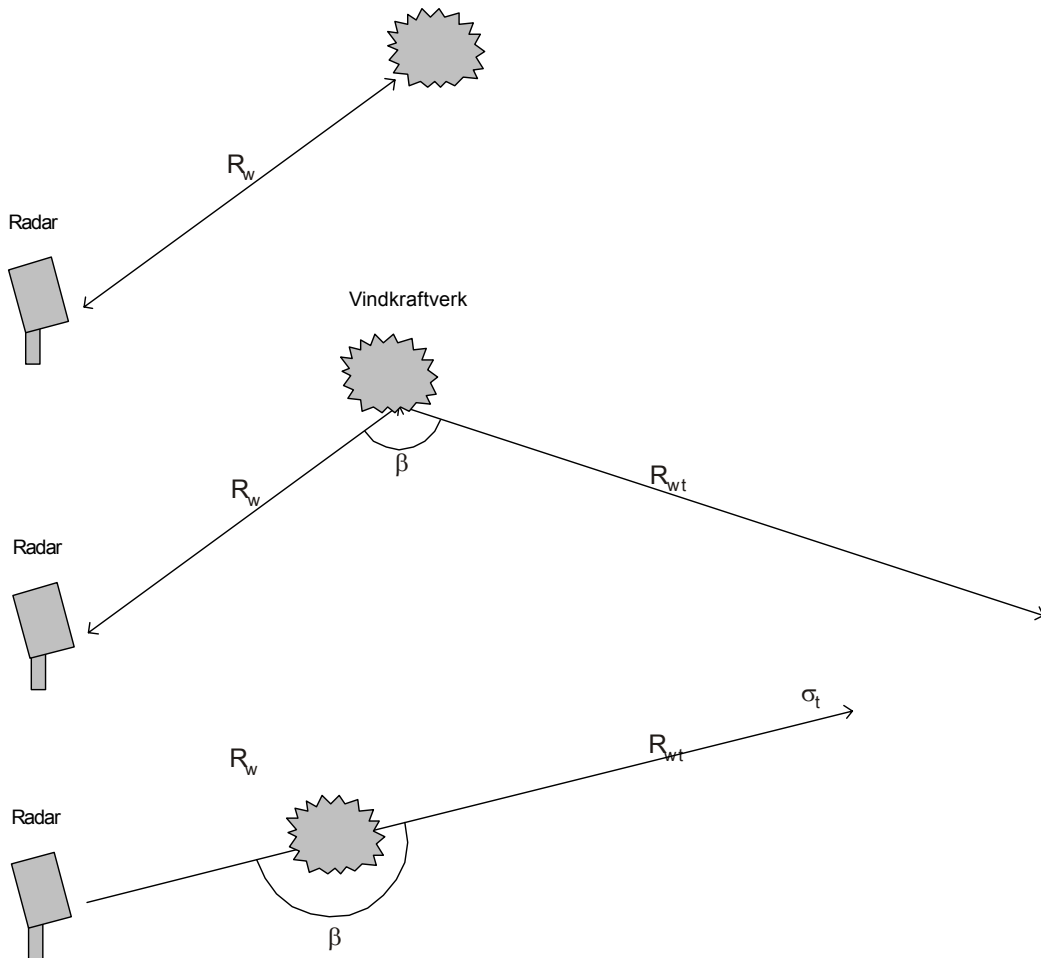
som kan skrives som

$$\sigma = 4\pi R_r^2 \frac{P_r}{P_\sigma} \quad (2.2)$$

når effekten P_σ er den som fanges opp av objektet og objektets reradierte effekt, P_r , observeres på avstanden R_r , som er stor nok til at den danner en planbølge (fjernfeltet).

Radartverrsnittet er avhengig av orienteringen til objektet i forhold til det innkommende signalet og retningen man observerer det reflekterte signalet fra. Tre spesielle tilfeller skal nevnes:

- Tilbakespredning (backscatter, monostatisk RCS) omfatter det tilfellet hvor reflektert energi observeres fra samme retning som innkommende energi
- Bistatisk spredning omfatter de tilfeller hvor reflektert energi observeres fra en annen retning enn den innkommende energi
- Foroverspredning omfatter det tilfellet hvor det reflekterende objektet er nær den rette linjen mellom sender og mottaker



Figur 2.1 Skisse av tilbakespredt-, bistatisk- og forroverspredt radartversnitt

Sender, objekt og mottaker kan ha et stort antall konfigurasjoner og radartversnitt må derfor beregnes i tre dimensjoner i tillegg til at objektets orientering kan variere. Det totale bilde av objektets radartversnitt blir derfor svært komplisert og bare en del spesialtilfeller blir behandlet. På grunn av forskjellige spredemekanismer vil bistatisk og forroverspredt radartversnitt bli behandlet hver for seg.

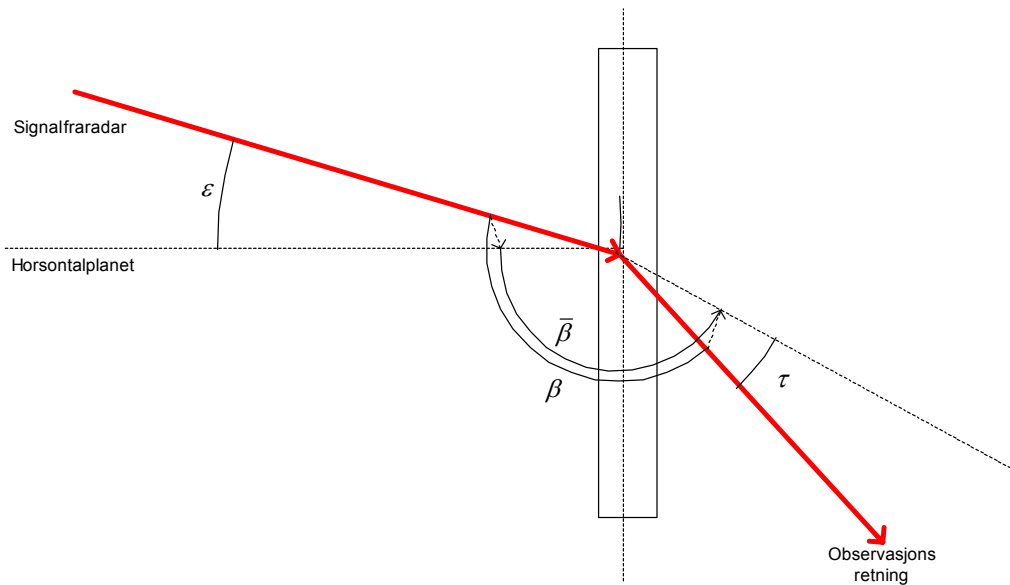
Når det gjelder radartvernnittet til menneskeskapt objekt (f eks fartøy, fly osv) er det utforming og materialvalg som bestemmer radartverrsnittet, mens det for omgivelsene (f eks bakken, sjø, skyer osv) er objektets beskaffenhet som bestemmer radartverrsnittet.

For vindkraftverket er det hensiktsmessig å dele dette i tre separate deler: Tårnet, generatorhus og vinger. Basert på en antatt geometrisk utforming er radartverrsnitt for disse i (4) beregnet i to dimensjoner, i (5) er modellen utvidet til tre dimensjoner og i (6) er mer komplisert modellering utført med programmet 'Epsilon' fra Roke Manor Research.

Tårnet er fysisk sett den største delen av vindkraftverket og det kan modelleres med en sylinder. De bistatiske radartverrsnittet fra en sylinder er

$$\sigma(\bar{\beta}, \varepsilon, \tau) = k_0 h^2 r \cos\left(\frac{\bar{\beta}}{2}\right) \frac{\cos^2(\tau)}{\cos(\varepsilon)} \left[\frac{\sin\{k_0 h (\sin(\varepsilon) + \sin(\tau))\}}{k_0 h (\sin(\varepsilon) + \sin(\tau))} \right]^2 \quad (2.3)$$

hvor $k_0 = 2\pi/\lambda$ er bølgetallet, h og r er tårnets høyde og radius. Figur 2.2 viser geometrien for innfalls- og observasjonsvinkel, ε og τ ; målt i forhold til tårnsidens normal og $\bar{\beta}$ som er den bistatistiske vinkelen projisert på horisontalplanet. Direkte tilbakespredning (monostatisk radartverrsnitt) er representert ved $\bar{\beta} = \varepsilon = \tau = 0$.



Figur 2.2 Geometri (vertikalplanet) for å beregne bistatisk radartverrsnitt til vindkraftverkets tårn

Ligning (2.3) forutsetter at tårnet er en sylinder og at avstanden til radaren er så stor at objektet befinner seg i fjernfeltet til en antenne med samme dimensjon som objektets utstrekninger (se avsnitt 5.4 for beregning av nærfeltets utstrekning). Korreksjon for konsisteten kan gjøres ved å benytte tårnets midlere diameter. Korreksjon for at tårnet befinner seg i nærfeltet kan utføres ved å dele tårnet i N mindre deler og senere kombinere radartverrsnittet fra hver enkelt del med følgende metode

$$\sigma = \left| \sum_{n=1}^N \sqrt{\sigma_n} e^{ik_0(r_n^i + r_n^o)} \right|^2 \quad (2.4)$$

hvor σ_n er radartverrsnittet til hver enkelt del og r_n^i og r_n^o er avstanden fra radaren til hver enkelt del av vindkraftverket og videre til observasjonspunktet.

For små innfalls- og observasjonsvinkler og når avstanden fra tårnet til sender og mottaker er betydelig større enn tårnets høyde vil innfalls- og observasjonsvinkel være konstant og

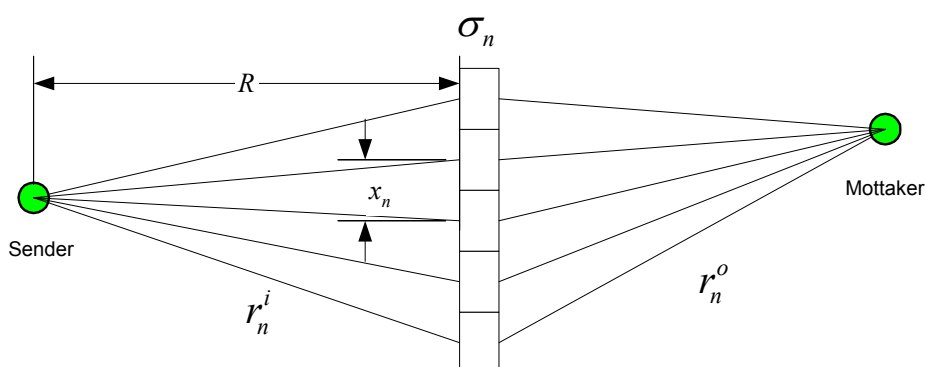
avstandene kan da finnes som

$$r_n = \sqrt{(R - x_n \sin(\gamma))^2 + (x_n \cos(\gamma))^2} \quad (2.5)$$

hvor γ representerer innfalls- og observasjonsvinkel, ε og τ , og

$$x_n = \frac{h}{N} \left(n - \frac{N+1}{2} \right) \quad (2.6)$$

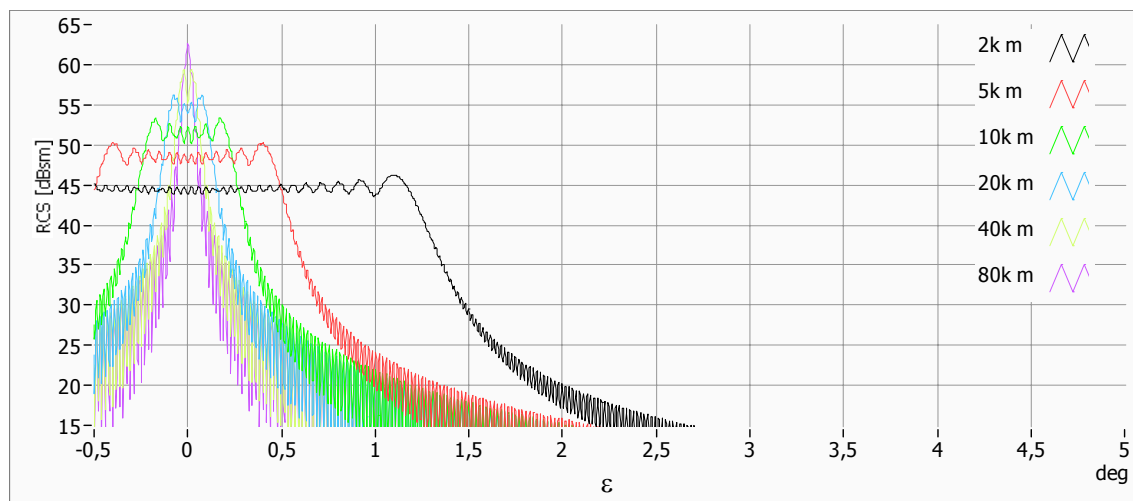
hvor h er tårnets høyde.



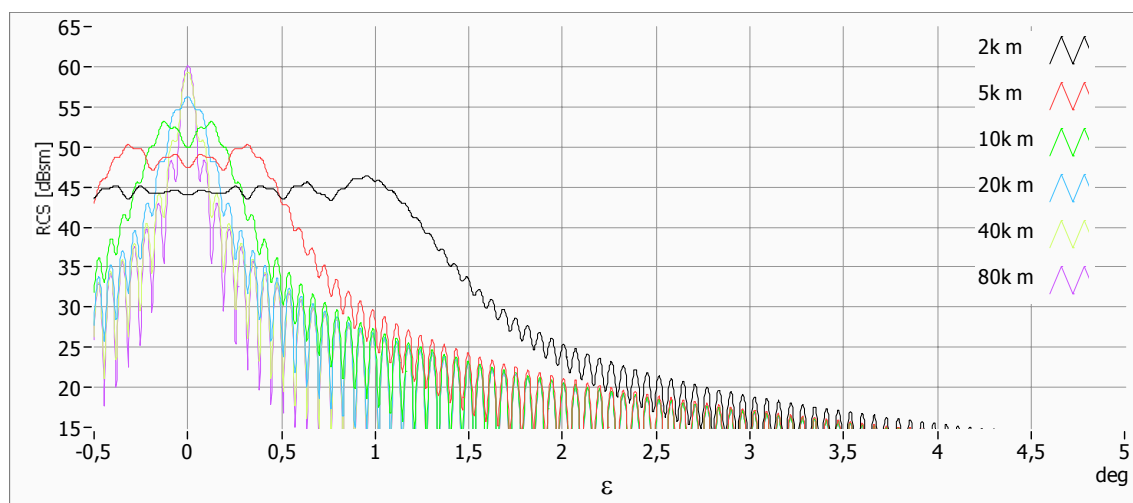
Figur 2.3 Prinsipp for oppdeling av vindkraftverkets tårn i mindre deler for å beregne radartverrsnittet i nærfeltet

I påfølgende figurer er det gitt noen eksempler på radartverrsnitt til et vindkraftverks tårn med en høyde på 90 m, og nedre og øvre diameter på henholdsvis 5 m og 3,5 m.

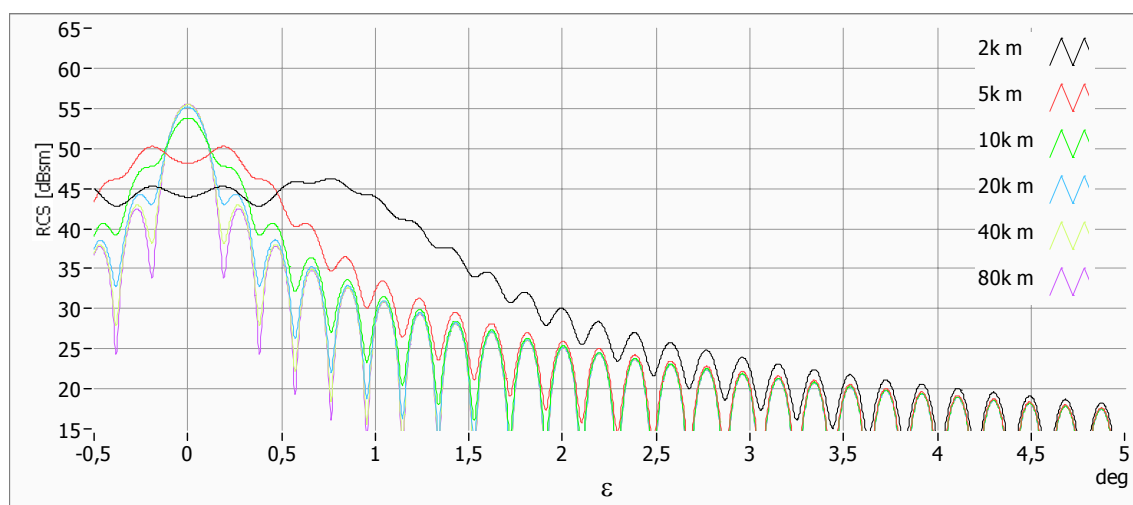
I Figur 2.4 til Figur 2.6 er det for de vanligste radarfrekvensene gjort nærfeltsberegninger som viser at tårnets radartverrsnittet i tillegg til innfallsvinkelen er avhengig av avstanden til tårnet. For store avstander (fjernfelt) gir tårnet som ventet et økende radartverrsnitt med frekvensen. Når tårnet er i nærfeltet vil det maksimale radartverrsnittet synke, men det vil holde seg konstant over en større innfallsvinkel. Nær radaren (<10 km) er radartverrsnittets størrelse og grensen for innfallsvinkelen hvor radartverrsnittet starter å avta konstant.



Figur 2.4 Nærfeltsberegninger av tårnets tilbakespredte (monostatisk) radartverrsnitt på I-bånd for angitte avstander mellom tårn og radar, og innfallsvinkelen til tårnet varieres.

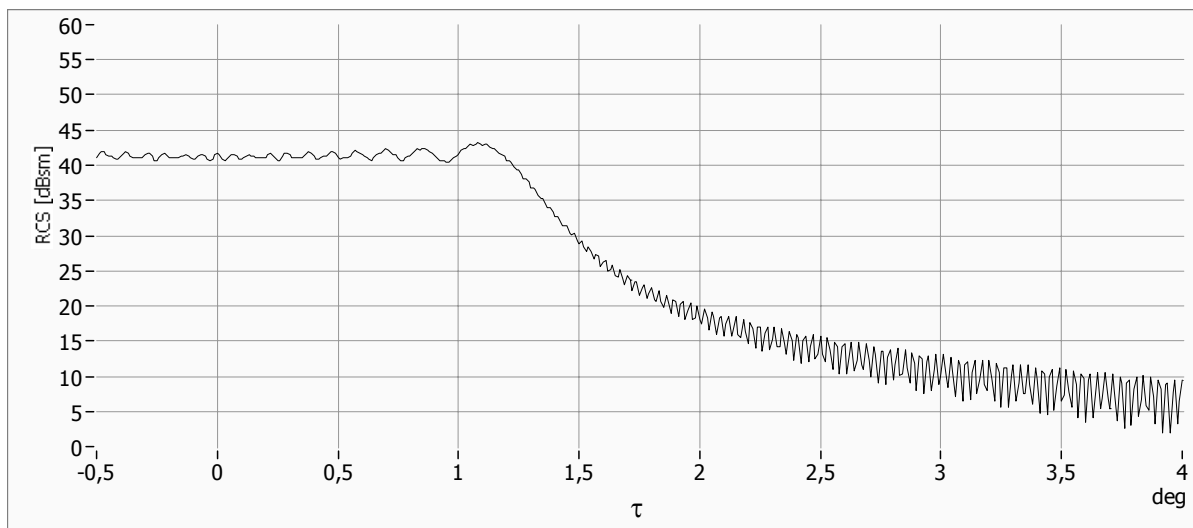


Figur 2.5 Som Figur 2.4, men for E/F-bånd.



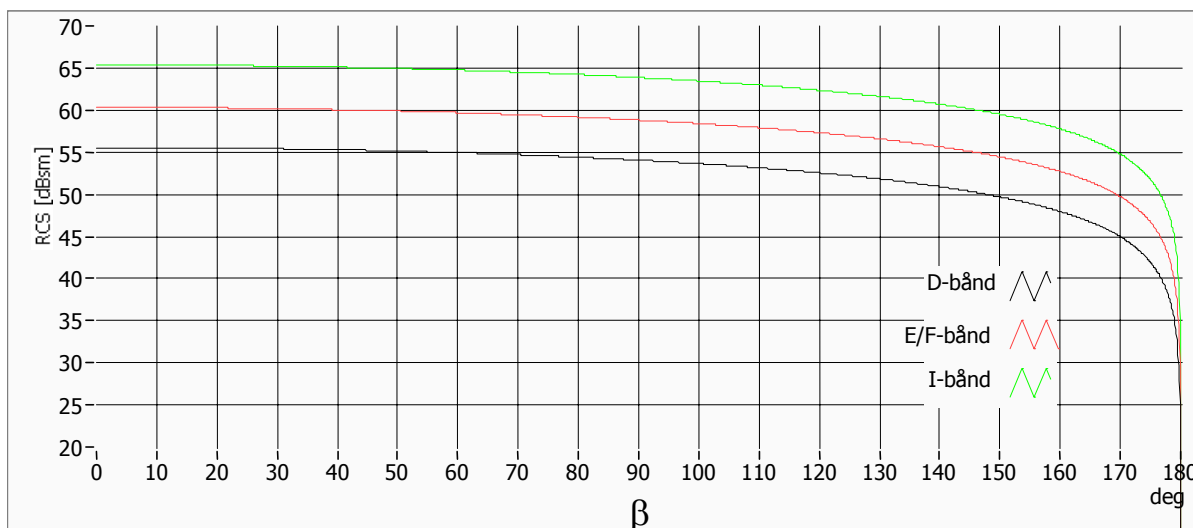
Figur 2.6 Som Figur 2.4, men for D-bånd.

Figur 2.7 viser bistatisk radartverrsnitt med lang avstand (60 km) fra radar til tårnet, men observasjonspunktet er nå bare 2 km fra tårnet og dette gir samme effekt som om tårnet er nært radaren.



Figur 2.7 Bistatisk radartverrsnitt for E/F-bånd når avstanden radar - tårn er 60 km og tårn – observasjonspunkt er 2 km

Figur 2.8 viser at det bistatiske radartverrsnittet (ligning (2.3)) til tårnet er lite avhengig av den bistatiske vinkelen. Det er bare når den bistatiske vinkelen nærmer seg 180° at radartverrsnittet synker dramatisk.



Figur 2.8 Bistatisk radartverrsnitt til tårnet når det er i fjernfeltet og den bistatiske vinkelen varierer. Innfalls- og observasjonsvinkel er 0 (faller sammen med normalen på tårnets ide) og dette gir maksimalt radartverrsnitt.

Når den bistatiske vinkelen er nær 180° oppstår det foroverspredning på grunn av at tårnet 'stopper' det elektromagnetiske feltet. Foroverspredning blir vanligvis beregnet ut fra det areal

objektet har, og det er også gjort i (5) ved hjelp av likningen

$$\beta_f(\varphi, \theta) = \frac{4\pi(rh \cos(\varepsilon))^2}{\lambda^2} \cos(\theta) \left[\frac{\sin(k_0 r \sin(\theta) \cos(\varphi))}{k_0 r \sin(\theta) \cos(\varphi)} \right]^2 \left[\frac{\sin(k_0 h \sin(\theta) \sin(\varphi))}{k_0 h \sin(\theta) \sin(\varphi)} \right]^2 \quad (2.7)$$

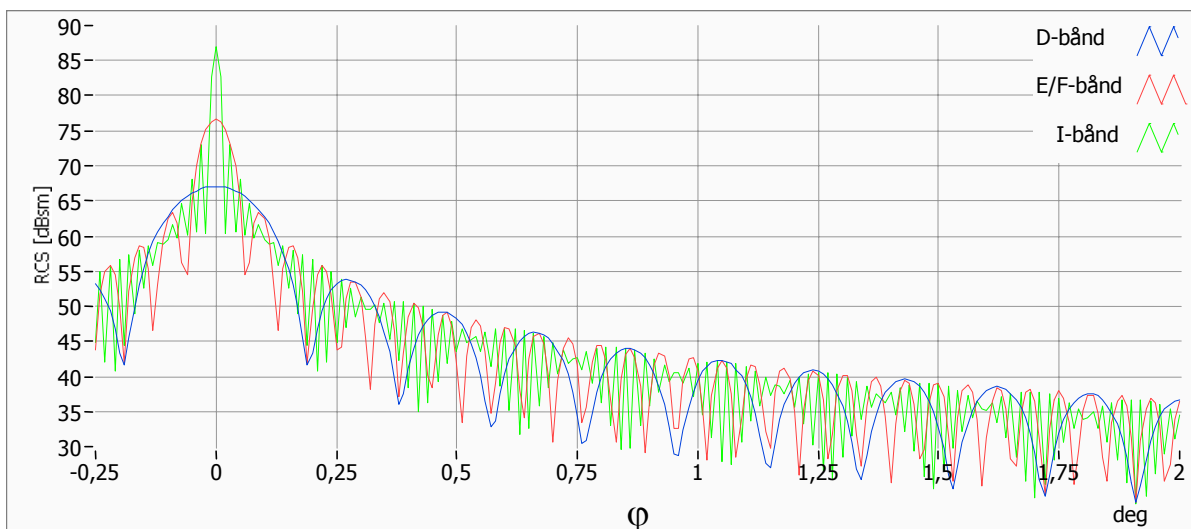
som gjelder i fjernfeltet. Vinkelforskjellen mellom forlengelsen av retningen til det innkommende signal og observasjonsretningen betegnes φ , og observasjonsretning orientering sammenlignet med horisontalplanet betegnes θ . Tårnets radius og høyde er gitt av r og h .

I Figur 2.9 er foroverspredning vist i vertikalplanet og det oppstår et meget kraftig radartverrsnitt som har liten vinkelutstrekning.

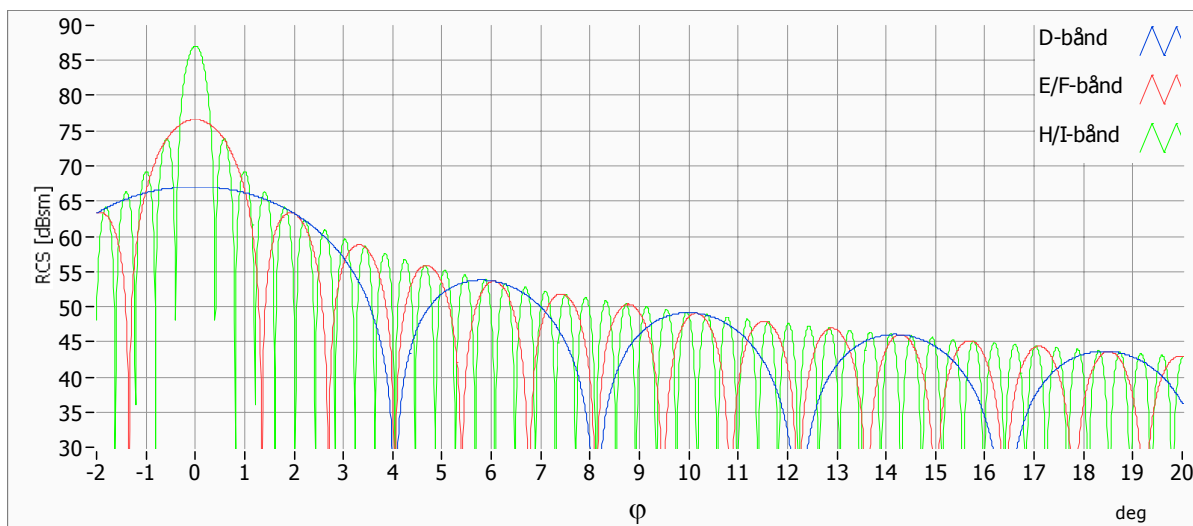
Foroverspredning i horisontalplanet er vist i Figur 2.10 og den viser at vinkelutstrekning her er mye større.

Modellen for foroverspredning som er benyttet er basert på at både radar og observasjonssted befinner seg i radarens fjernfelt, men denne antagelsen vil i mange tilfeller ikke være oppfylt. Det er ikke utviklet en egen modell for nærfeltsberegning av foroverspredning.

Modellen for foroverspredning er basert på at objektet som stopper det elektromagnetiske feltet befinner seg i fritt rom. Vindkraftverket står på bakken slik at stråling ikke kan slippe forbi på undersiden, og dette vil forandre foroverspredningen sammenlignet med beregningene som er gjort over.



Figur 2.9 Radartverrsnittet fra foroverspredning i vertikalplanet for vanlige radarfrekvenser

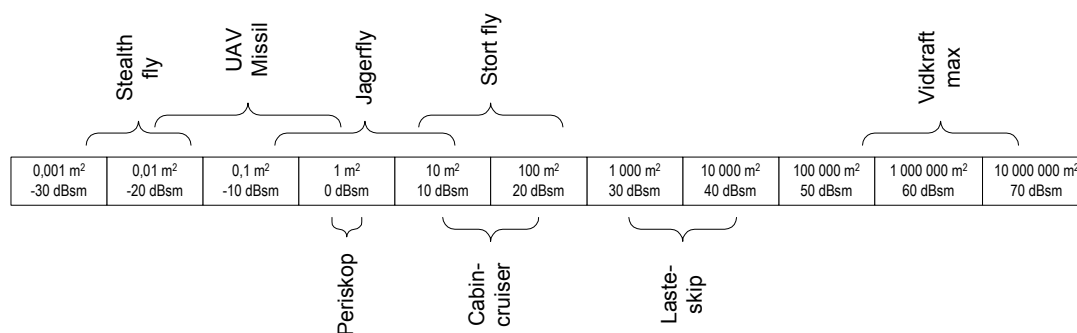


Figur 2.10 Radartverrsnittet fra foroverspredning i horisontalplanet for vanlige radarfrekvenser

Generatorhus og vinger har en mer komplisert geometri enn tårnet og disse delenes orientering i forhold til radar og mål vil stadig variere på grunn av vinden. I andre arbeider (5) og (6) er det benyttet enkle geometriske modeller for disse basert på antatt utforming. Konklusjonene er at maksimalt radartverrsnitt blir av samme størrelsesorden som for tårnet, men at typiske verdier ligger 20 – 30 dB lavere.

3 MÅLENE

Radarer skal vanligvis utføre en gitt oppgave og Forsvarets stasjonære radarer utfører primært oppgaver som omfatter deteksjon og posisjonering av luftmål og sjømål. I Figur 3.1 er det angitt radartverrsnitt til en del vanlig måltypen. Det maksimale radartverrsnittet til vindkraftverket er svært mye høyere enn de radartverrsnittene en radar er beregnet på å håndtere.

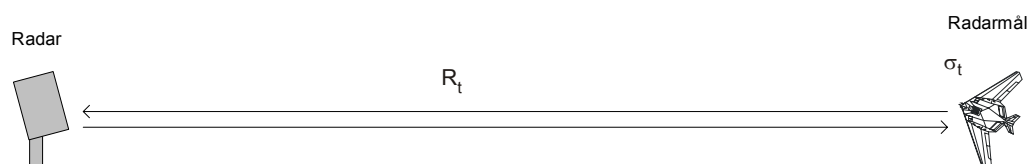


Figur 3.1 Radartverrsnittet til en del forskjellige objekt

4 RADAREN

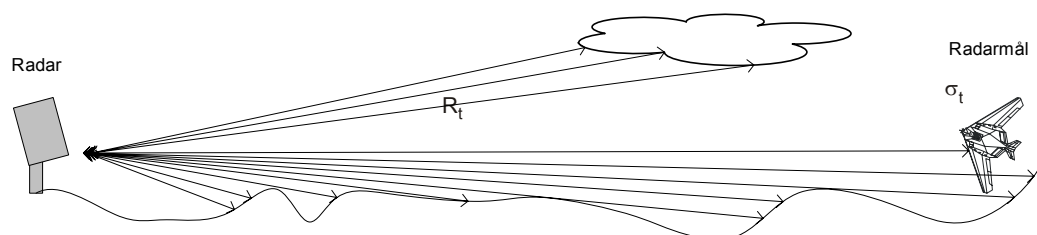
Radar blir benyttet til en rekke forskjellige formål, men den type radar som har størst interesse i forbindelse med utplassering av vindmøllerparker er luft- og havovervåkningsradarer. Hensikten med denne type radar er å oppdage interessante objekt (fly, fartøy ol.) og bestemme objektets posisjon og hastighet. I Forsvaret benyttes denne type radar både fast montert, flyttbare og mobile. I tillegg har NATO radarer som kan forsterke den totale radarkapasiteten ved behov.

Den enkleste geometri for en radar betegnes monostatisk, se Figur 4.1, og er basert på at radarsender og -mottaker er plassert på samme sted, og at målene befinner seg i en gitt avstand, R_t , fra radaren. Radaren sender ut et kraftig signal som ofte er fokusert i en retning, og når det treffer målet vil en del av dette signalet reflekteres mot radaren og radaren vil måle signalet. Posisjonen til objektet blir bestemt ved å måle retningen til objektet og avstanden blir bestemt ved å måle hvor lang tid signalet benytter til objektet og tilbake.



Figur 4.1 Prinsipp for en radar

Når en radar blir utplassert i terrenget vil den i tillegg til den reflekterte energien den mottar fra de interessante objektene, også motta reflektert energi fra omgivelsene (terreng, skyer, regnvær, menneskeskapte objekt ol), se Figur 4.2. De objekt vi ønsker å oppdage (f eks fly og fartøy) blir betegnet mål, mens effekt fra forstyrrende objekt vi ikke ønsker å oppdage (f eks skyer) blir betegnet clutter. Clutter vil generelt redusere radarens evne til å utføre sine primær oppgaver, og vindkraftverk vil være opphav til slike uønskede refleksjoner.



Figur 4.2 En radar vil motta signal reflektert fra omgivelsene

Når radarens utsendte signal treffer et mål i bevegelse vil dette medføre en liten forandring av signalets frekvens (dopplerskift) i det signalet som sendes tilbake til radarmottakeren. Dette dopplerskiftet er det viktigste fenomen som gjør moderne radarer i stand til å skille mellom virkelige mål og clutter. Vindkraftverk har store bevegelige deler og de vil kunne registreres som bevegelige mål.

4.1 Signalutbredelse

Beregning av styrken til signalene som reflekteres tilbake til radaren er avgjørende for å bestemme hvilke mål radaren kan oppdage. Reflektert signalstyrke er også avgjørende for å vurdere vindkraftverkets innvirkning på radaren.

Et elektromagnetisk signal med effekt P_t sendt ut fra en antenne med forsterkning G_t vil i avstanden R_t fra senderen ha effekttettheten

$$S_t = P_t G_t \frac{1}{4\pi R_t^2} \quad (W/m^2) \quad (4.1)$$

Når signalet treffer et objekt vil den mottatte effekten sendes ut i flere retninger. Den utsendte effekten er

$$P_\sigma = S_t \sigma \quad (W) \quad (4.2)$$

når σ er målets radartverrsnitt.

I avstanden R_r fra objektet vil effekttettheten av den reradierte effekten, P_σ , finnes på lignende måte som i (4.1)

$$S_\sigma = P_\sigma \frac{1}{4\pi R_r^2} \quad (W/m^2) \quad (4.3)$$

Hvis en mottaker med en antenne med et effektivt areal, A_e , fanger opp dette signalet vil mottakeren motta en signaleffekt lik

$$P_r = S_\sigma A_e \quad (W) \quad (4.4)$$

Mottakerantennens effektive areal kan uttrykkes ved antennens forsterkning, G_r , som

$$A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (4.5)$$

hvor λ er signalets bølgelengde. Ved å kombinere ligningene (4.2), (4.3), (4.4) og (4.5) kan effekten i mottakeren skrives som

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2} \quad (W) \quad (4.6)$$

For å detektere objektet kan vi, noe forenklet, si at effekten, P_r , må tilfredstille følgende hypotese

$$\begin{aligned}
 H_0: & \quad P_r < P_D && \text{objektet blir IKKE detektert} \\
 H_1: & \quad P_r \geq P_D && \text{objektet blir detektert}
 \end{aligned}
 \tag{4.7}$$

hvor P_D er den nødvendige effekten for å detektere et mål.

Ved anskaffelse av et monostatisk radarsystem blir det vanligvis angitt en minimum deteksjonsavstand, R_0 , for et gitt radartverrsnitt, σ_0 (ofte 1 m^2), og den mottatte effekten i en monostatisk radar vil da være

$$P_D = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_0}{(4\pi)^3 R_0^4} \quad (W) \tag{4.8}$$

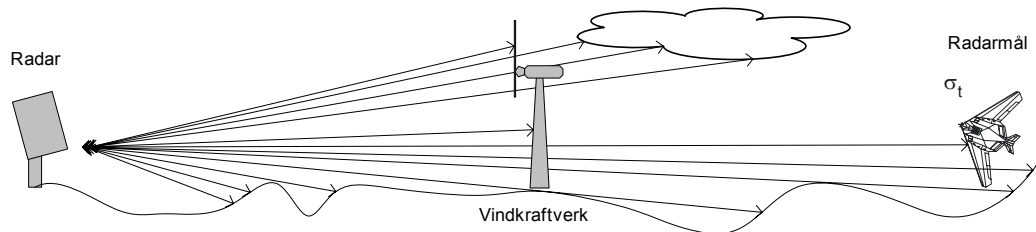
For en monostatisk radar kan da den maksimale avstanden radaren kan detektere objektet på skrives som

$$R = \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_D} \right)^{1/4} \quad (m) \tag{4.9}$$

I denne ligningen har radardesigneren kontroll over alle parametere unntatt radartverrsnittet σ .

5 VINDKRAFTVERKS INNVIRKNING PÅ RADAR

Et vindkraftverk som er plassert slik at en radar kan observere det vil påvirke radaren. Dette kapittelet vil gi eksempler på forhold som kan skape uheldige konsekvenser.



Figur 5.1 Vindkraftverk vil påvirke radaren på forskjellige måter

Behandlingen av de potensielle uheldige innvirkning på radaren kan deles i forskjellige problemstillinger:

- Uheldige virkninger i radaren på grunn av den kraftige refleksjonen fra vindkraftverket
- Uheldige virkninger som har opphav i interaksjon mellom vindkraftverket og andre objekt
- Uheldige virkninger på grunn av skyggeeffekter bak vindkraftverket
- Uheldige virkninger i radaren på grunn av vindkraftverk i antennens nærfelt

I det følgende vil disse bli behandlet hver for seg.

5.1 Refleksjoner mot radaren

En del av den energien radaren sender ut vil treffe vindkraftverket og reflekteres tilbake mot radaren. Hvis signalstyrken på de reflekterte signalet overstiger det radaren er beregnet for kan dette skape interne problem i radaren. Disse kraftige ekkoene vil normalt ikke medføre fare for permanente skader på radaren, men de kan fremstå som svært kraftige ekko (punkt mål).

Disse forholdene er på generelt grunnlag vurdert i (6). En analyse av hva dette innebærer for hver enkelt radartype krever svært detaljert informasjon om radartypen, og den vil kreve et betydelig arbeid.

En slik analyse av de enkelte radartypene er ikke gjennomført, men en gjennomgang av problemmekanismene er gjengitt nedenfor.

Vurderingene i (6) konkluderer med at et radartverrsnitt på 1 000 m² vil ligge omkring det nivået en radar kan få problem. Det er derfor viktig å hindre at radaren observerer vindkraftverket i de retningene radartverrsnittet er størst (100 000 – 1 000 000 m²).

5.1.1 Metning av radarmottakeren

En radar er bygd for å håndtere mottatte signal mellom en minimums- og maksimumsverdi. Minimumsverdien er vanligvis satt til det minste radarmålet man ønsker å se, pluss en liten margin. Det minste målet er vanligvis satt til omkring 1 - 0,1 m², og ved hjelp av såkalt Sensitivity Time Control (STC) forsøker man å opprettholde en konstant signalstyrke tilsvarende denne målstyrken for alle avstander. En radar har en effektiv dynamikk på 50 – 60 dB, og dette tilsvarer et maksimalt mål uten at mottakeren blir mettet på 10 000 – 100 000 m². Refleksjonen fra en vindmølle kan under uheldige omstendigheter bli så store som 1 000 000 m², og dette vil medføre metning av radaren.

5.1.2 Pulskomprimering

Radarens evne til å detektere mål på lang avstand er blant annet gitt av energien radaren sender ut. Energi er igjen produktet av pulsens effekt og varighet i tid. Imidlertid er den korteste avstand radaren kan skille mellom to mål gitt av pulsens varighet i tid; kort puls gir god evne til å skille mål. Kravet til høy energi og kort puls er motstridene, men for å oppnå begge fordelene er det tatt i bruk en teknikk som betegnes pulskomprimering. Det vil si at man tar en kort puls, strekker den ut i tid med en bestemt koding før den sendes ut, og når signalet blir mottatt komprimerer man pulsen ved hjelp av en dekode. Kodingen og dekodingen er imidlertid ikke perfekte operasjoner og dette medfører at det blir et restsignal som blir betegnet tidssidelober, som for en radar betyr avstandssidelober. For radarer som benytter pulskomprimering betyr dette at et meget kraftig ekko vil redusere radarens følsomhet i et betydelig større område (flere kilometer) enn radarens normale avstandsoppløsning (50 – 300 m). Redusert følsomhet betyr at radarens evne til å oppdage små mål blir redusert.

Flere av Forsvarets luft- og sjøovervåkningsradarer pulskomprimering av en tidlig utgave hvor det er relativt store tidssidelober og effekten fra vindmøller kan bli stor. Radarene er i ferd med

å bli oppgradert og dette vil redusere problemet noe. Ingen av de sivile luftovervåkingsradarene benytter pulskomprimering.

Bruk av pulskomprimering blir mer og mer vanlig, og noen radarer som er under utvikling benytter kontinuerlige signaler med betydelig grad av pulskomprimering. (Det er mange som mener pulskomprimering vil bli tatt i bruk i neste generasjons navigasjonsradarer for skip, og da kan vindkraftverkene også medføre et problem for navigering langs kysten.)

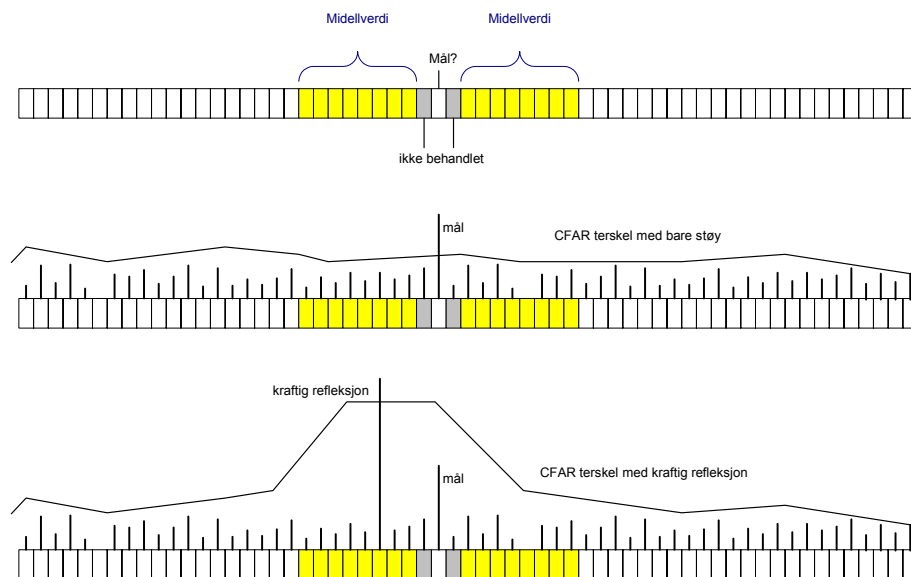
5.1.3 Dopplerprosessering

En radarer for luftovervåkning benytter dopplerprosessering for å skille mellom bevegelige og stillestående mål. Vanligvis forsøker den å fjerne alle mål som ikke er i bevegelse.

Selv om vindmøllene står stille har de roterende deler som kan introdusere bevegelse i det tilbakespredte signalet og dette medfører at vindmøllen kan introdusere falske mål.

5.1.4 Konstant falsk alarmrate

Automatisk deteksjon av mål krever en metode for å skille mellom virkelige mål og støy radaren mottar. Den vanligste metoden for å gjøre dette betegnes konstant falsk alarmrate (Constant False Alarm Rate (CFAR)). I sin enkleste form fungerer dette som skissert i Figur 5.2. Hver oppløsningscelle i avstand skal testes for mål ved at man hopper over en celle foran og bak testcellen og så danner middellverdi av et antall celler foran og bak disse. Man antar at et mål er tilstede hvis testcellens signalstyrke overstiger den beregnede middellverdien pluss en gitt terskel. Hvis radaren mottar et svært kraftig signal i de cellene som blir benyttet til å beregne middellverdi, vil dette drive middellverdien oppover og i verste fall kan dette hindre radaren i å detektere mål slik som illustrert nederst i Figur 5.2.

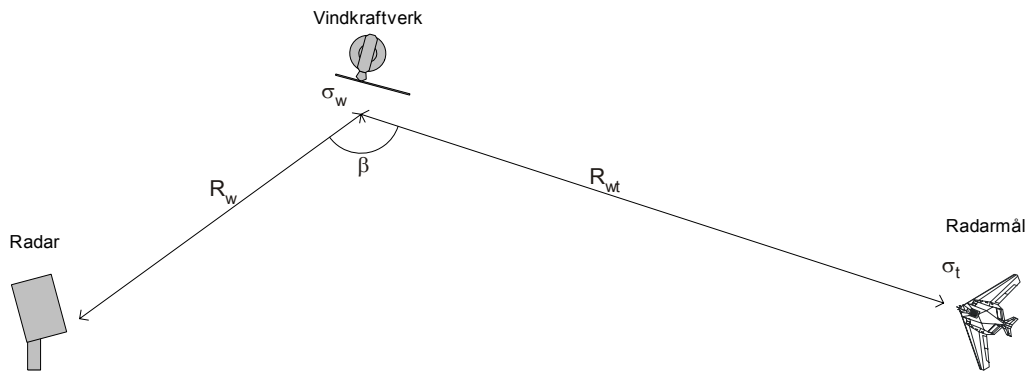


Figur 5.2 Konstant Falsk alarmrate (CFAR); prinsippkisse (øverst), terskel med bare støy (midten) og terskel med sterk refleksjon (nederst)

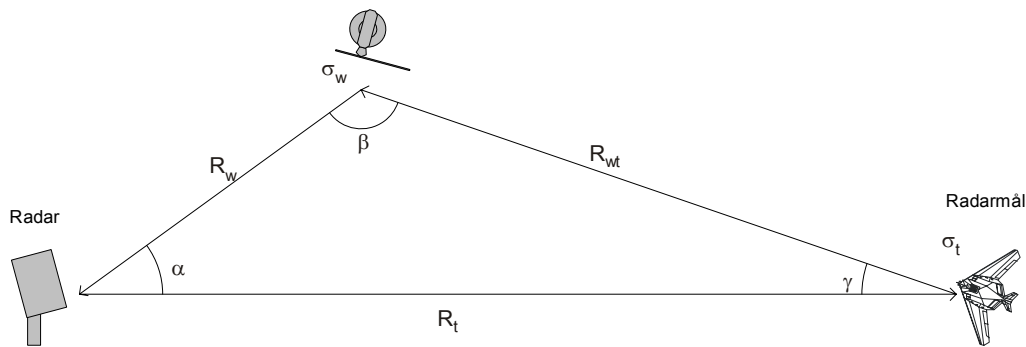
5.2 Refleksjoner via vindkraftverket

Signaler som sendes fra radaren vil kunne reflekteres i vindkraftverket, videre til målet, og den samme veien tilbake slik som vist i Figur 5.3, eller direkte tilbake til radaren som vist i Figur

5.4. Begge disse signalutbredelsene vil gi opphav til feilmåling av virkelige måls posisjon (retning og avstand).



Figur 5.3 Flerbaneutbredelse via vindkraftverket



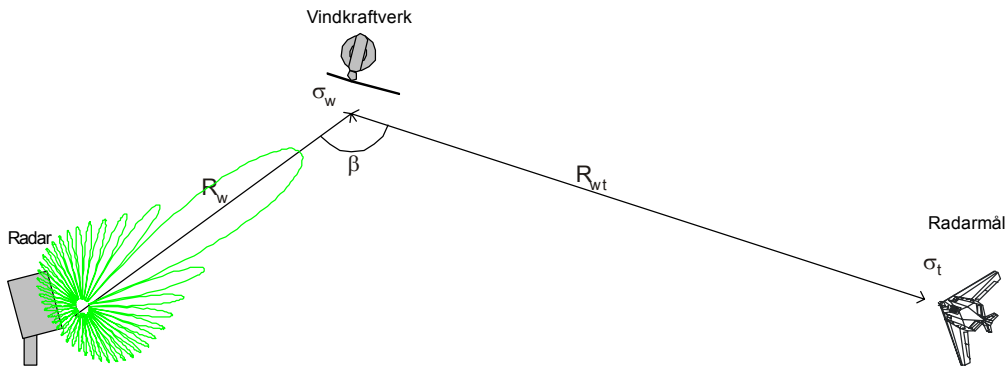
Figur 5.4 Flerbaneutbredelse via vindkraftverket

Analyse av denne type refleksjoner kan deles i ulike problemstillinger, og som eksempler har studien sett på: Falske/feil måldeteksjoner fra primærradar, elektronisk krigføring (jamming) og ved clutter.

Deteksjon av mål som er reflektert via vindkraftverket vil både for primær- og sekundærradar forårsake feilmålinger i retning og avstand. Målt retning vil da kunne indikeres i retningen til vindkraftverket selv om målet er i en annen retning.

5.2.1 Falske måldeteksjoner

En falsk måldeteksjon (målets posisjon er feil) oppstår hvis radaren peker mot vindkraftverket, signalet reflekteres i målet og tilbake via vindkraftverket slik som vist i Figur 5.5.



Figur 5.5 Feilrapportering av mål i retningen til vindkraftverket

Signalstyrken på et signal som reflekteres via vindkraftverket kan finnes ved å benytte samme fremgangsmåte som i kapittel 4.1

$$P_r = P_t G_t \frac{1}{4\pi R_w^2} \sigma_w \frac{1}{4\pi R_{wt}^2} \sigma_t \frac{1}{4\pi R_{wt}^2} \sigma_w \frac{1}{4\pi R_w^2} A_r \quad (5.1)$$

og trukket sammen kan den mottatte effekten skrives som

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_w^2 \sigma_t}{(4\pi)^5 R_w^4 R_{wt}^4} \quad (W) \quad (5.2)$$

Og hvis radaren skal detektere dette signalet som et mål må det overstige deteksjonsterskelen slik at $P_t > P_0$. Ved å kombinere ligningene (4.6) og (5.2) vil et falskt mål rapporteres i retning mot vindkraftverket hvis

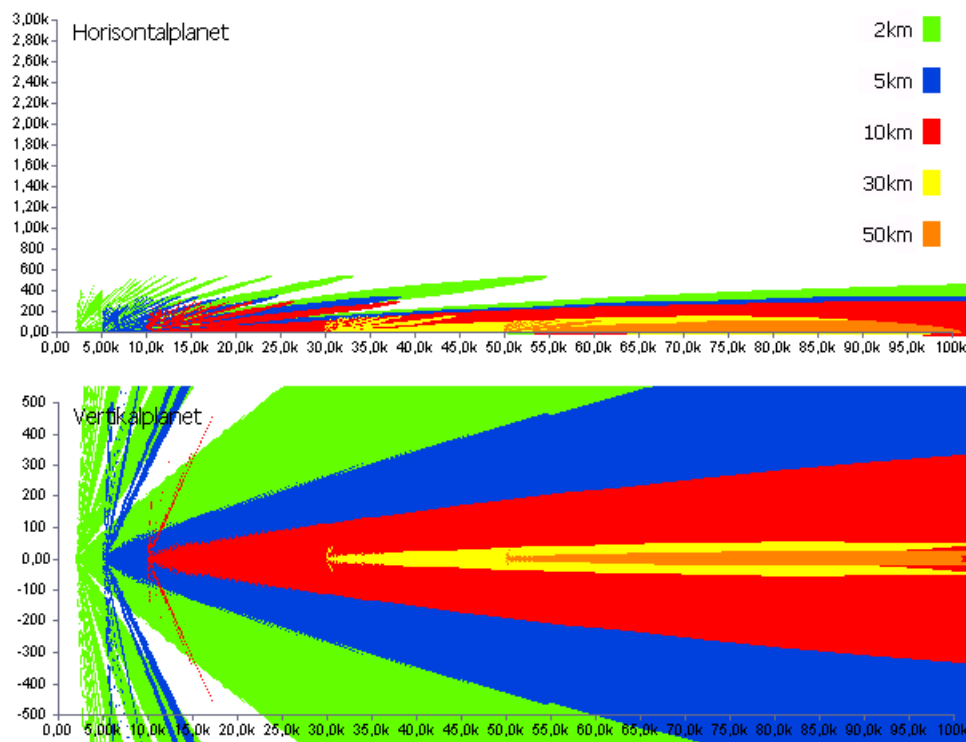
$$R_{wt} < \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{R_0}{R_w} \sqrt[4]{\frac{\sigma_t}{\sigma_0}} \sqrt{\sigma_w} \quad (5.3)$$

Det er utviklet programvare for å illustrere i hvilken grad denne type feilmålinger vil by på praktiske problem for radarsystemet. Det blir vist et noen eksempler på resultat fra dette programmet og det er viktig å være klar over en del forutsetninger:

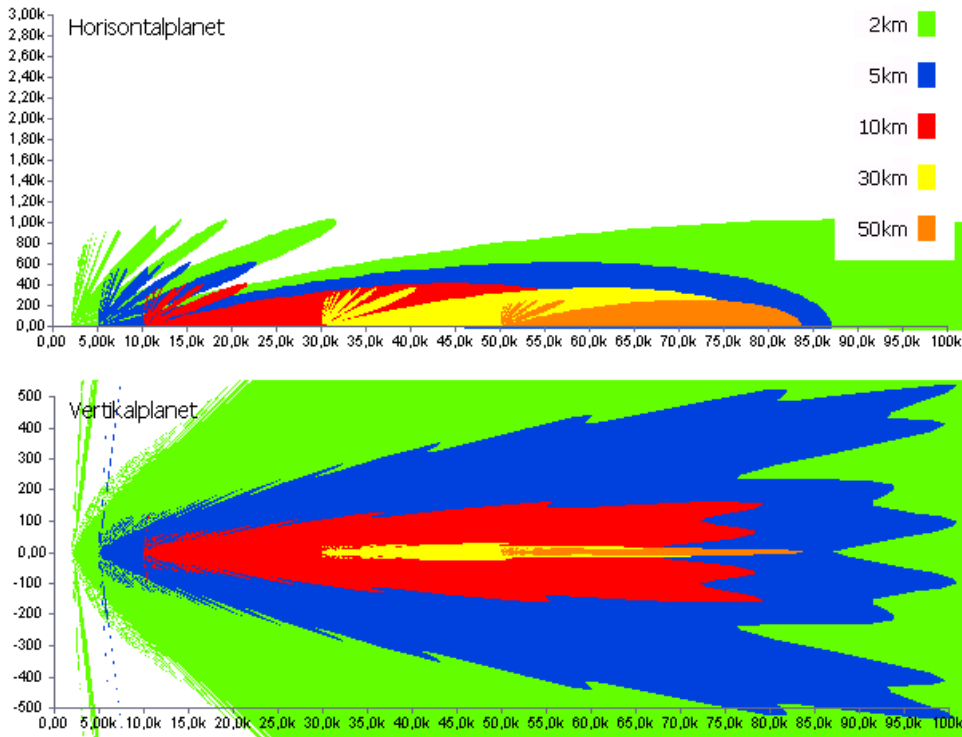
- Radar og vindkraftverk står på samme høyde slik at høydeskiktene i figurene i vertikalplanet alltid ligger horisontalt
- Vindmøllen har samme størrelse som i kapittel 2.1 (tårn med en høyde på 90 m, og nedre og øvre diameter på henholdsvis 5 m og 3,5 m).
- I horisontalplanet er figuren symmetrisk om x-aksen
- Alle akser er i meter
- Objektet må befinne seg innenfor farget område både i horisontal- og vertikalplanet
- Det er antatt at radaren kan detektere et 1 m^2 mål på avstanden 300 km og at maksimal refleksjonsflate i flyet er 100 m^2

Foroverspredning fra vindkraftverket forårsaker det største radartverrsnittet. I Figur 5.6 til Figur 5.8 er det vist hvordan foroverspredning forårsaker områder med fare for denne type feilmålinger. I horisontalplanet er området noen hundre meter, mens det i vertikalplanet omfatter et høydeskikt på noen hundre meter for avstander opp til 10 km og bare noen få meter fra 30 km.

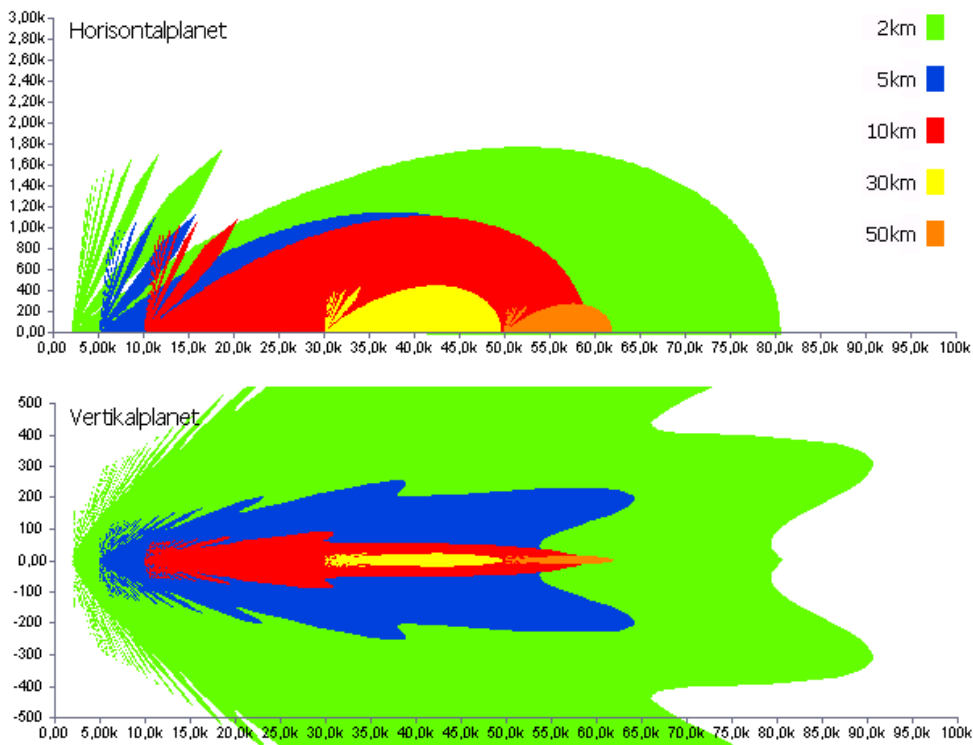
Tilsvarende beregninger kan gjennomføres basert på bistatisk refleksjon, og dette er vist i Figur 5.9 til Figur 5.11. Hvis tårnet befinner seg 2 km fra radaren blir det et område på omkring 20 km i horisontalplanet og noen hundre meter i vertikalplanet hvor målene kan finne seg for å gi opphav til feilmålinger. Områdene er også betydelige for 5 og 10 km, mens området for 30 og 50 km er neglisjerbart.



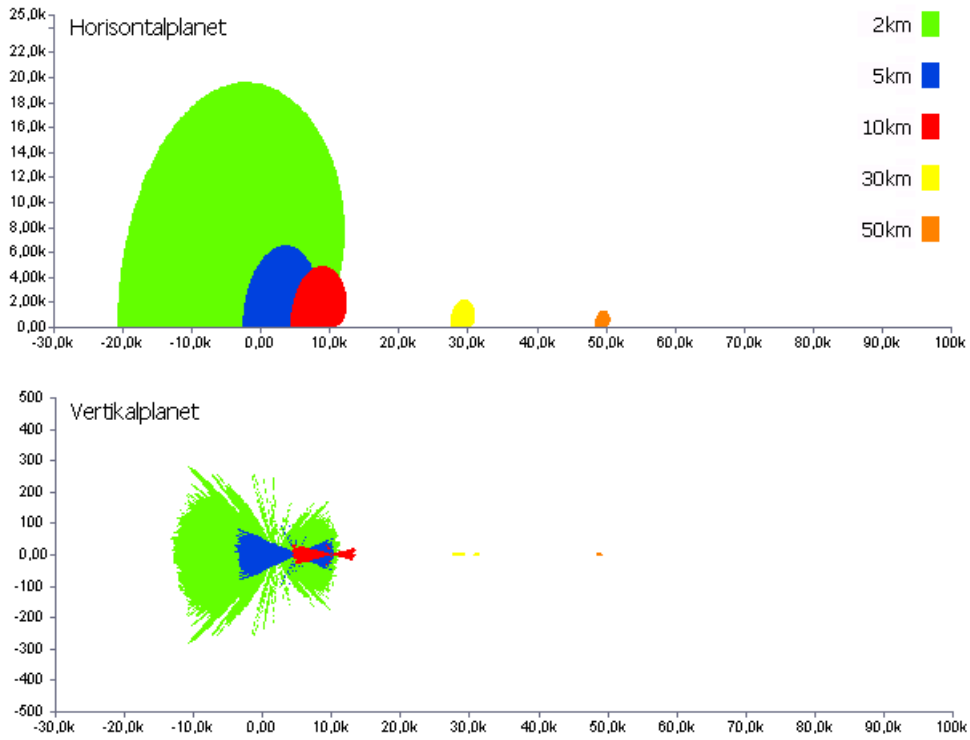
Figur 5.6 Mål som befinner seg innenfor farget område vil på grunn av foroverspredning kunne initiere et falskt mål med retning mot vindkraftverket. Figuren gjelder en I-bånd radar og fargene indikerer avstand fra radar til vindkraftverk.



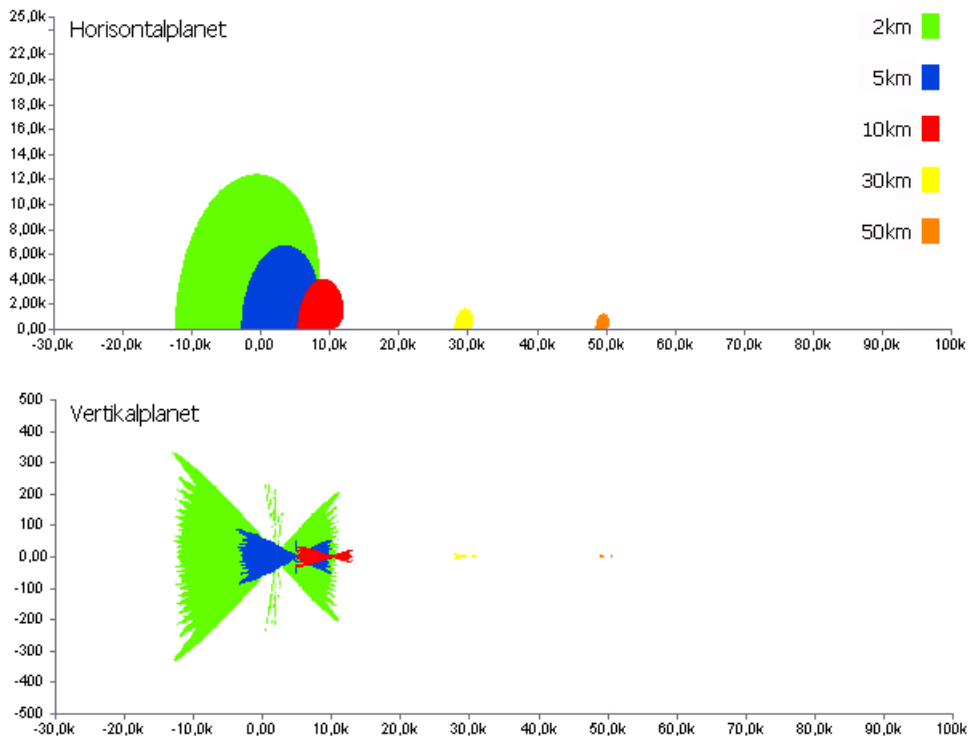
Figur 5.7 Samme som Figur 5.6, men E/F-bånd



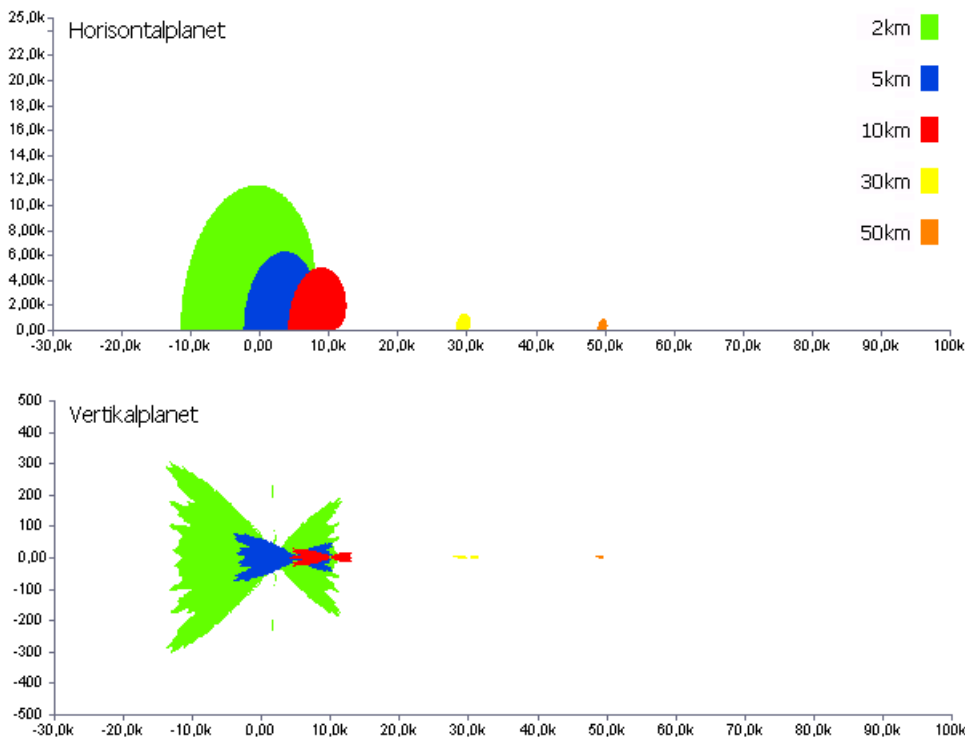
Figur 5.8 Samme som Figur 5.6, men D-bånd



Figur 5.9 Mål som befinner seg innenfor farget område vil på grunn av bistatisk spredning kunne initiere et falskt mål med retning mot vindkraftverket. Figuren gjelder en I-bånd radar og fargene indikerer avstand fra radar til vindkraftverk.



Figur 5.10 Samme som Figur 5.9, men E/F-bånd



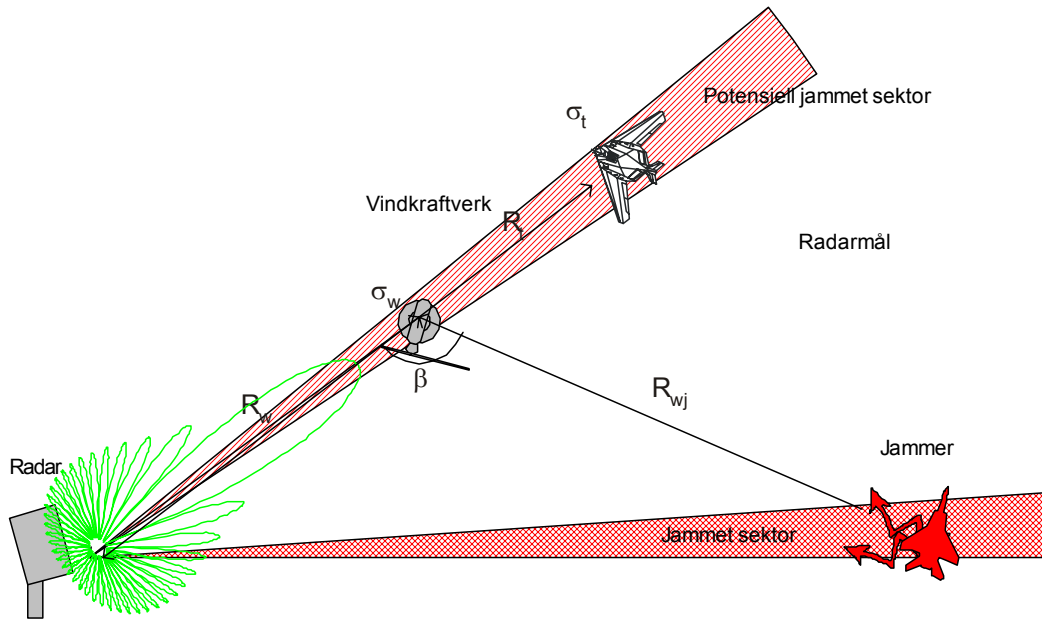
Figur 5.11 Samme som Figur 5.9, men D-bånd

5.2.2 Refleksjon av jamming

Jamming er motmiddel som blir benyttet til å redusere radarens evne til å oppdage og posisjonere målene. Det blir lagt betydelige vekt på å redusere de militære radarenes sårbarhet mot jamming, og dette er en vesentlig årsak til at de har betydelig høyere kostnad enn sivile radarer.

Analyse av radarers ytelse i forbindelse med jamming er gradert. Konkret ytelse av Forsvarets radarer når vindkraftverk plasseres i nærheten kan ikke gjøres her, men noen generelle betraktninger er gjort.

I Figur 5.12 er det tenkt en jammer som forsøker å forstyrre radaren. Det vil alltid oppstå en jammet sektor i retningen mot jammeren, men i tillegg vil en del av jammesignalet treffe vindkraftverket og reflekteres mot radaren, og her kan det oppstå en ny jammet sektor hvis signalet er kraftig nok.



Figur 5.12 Prinsippskisse for vurdering av jammet sektor i retning mot vindkraftverket på grunn av refleksjoner i vindkraftverket

Ved å benytte fremgangsmåten i kapittel 4.1 kan mottatt effekt fra målet beregnes som

$$P_{rt} = P_t G_t \frac{1}{4\pi R_t^2} \sigma_t \frac{1}{4\pi R_t^2} A_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_t}{(4\pi)^3 R_t^4} \quad (5.4)$$

og fra jammeren

$$P_{rj} = P_j G_j \frac{1}{4\pi R_{wj}^2} \sigma_w \frac{1}{4\pi R_w^2} A_r = \frac{P_j G_j G_r \lambda^2 \sigma_w}{(4\pi)^3 R_w^2 R_{wj}^2} \quad (5.5)$$

For å detektere målet må

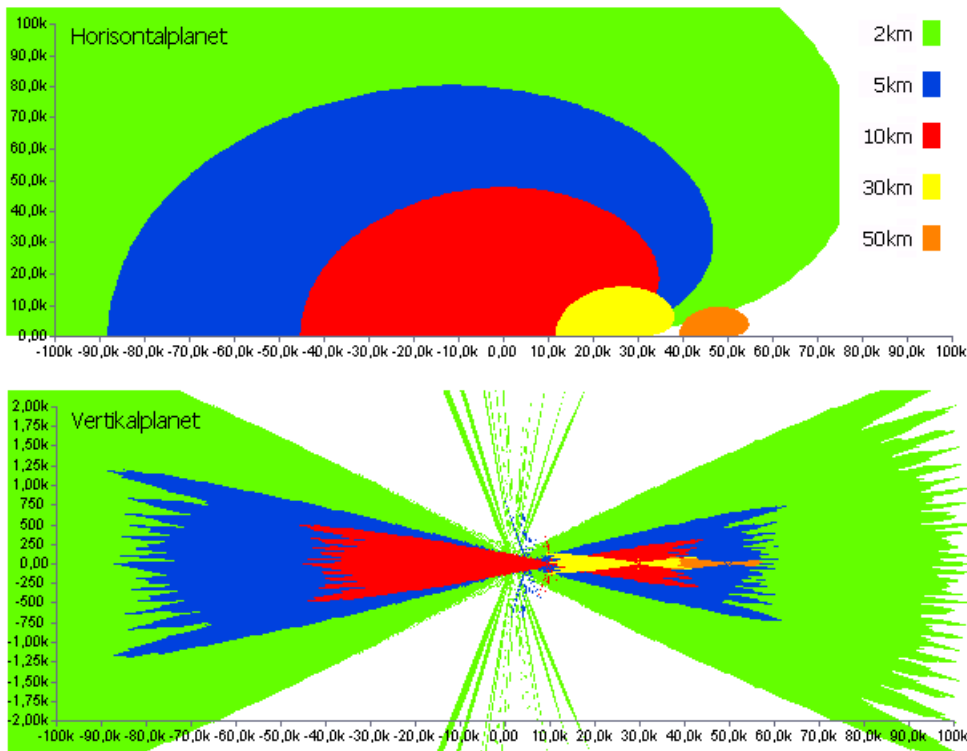
$$P_{rt} > DP_{rj} \quad (5.6)$$

hvor D er deteksjonsterskelen.

Ved å kombinere disse ligningene kan man finne at jammeren vil forårsake en falsk jammet sektor i retning av vindkraftverket hvis avstanden fra jammeren til vindkraftverket er

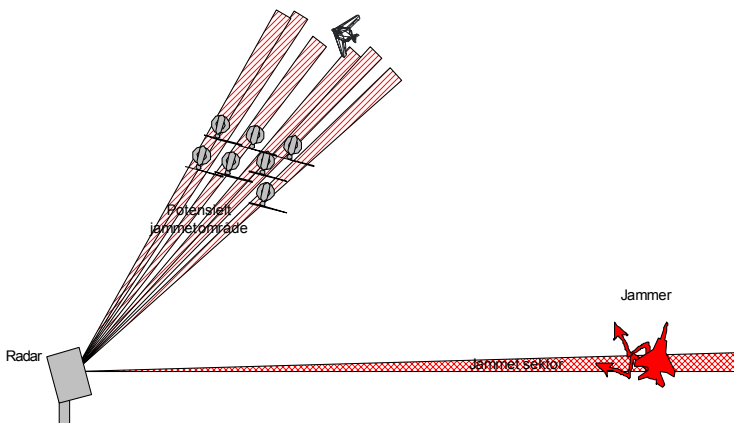
$$R_{wj} < \frac{R_t^2}{R_w} \sqrt{\frac{DP_j G_j \sigma_w}{P_t G_t \sigma_t}} \quad (5.7)$$

Med typiske verdier for en radars sendereffekt, målstørrelse på 1 m^2 og en jammer på 100 W vil det bli en jammet sektor i retning av vindkraftverket hvor målene ikke oppdages før på 100 km når jammeren er innenfor de fargede områdene i Figur 5.13. Igjen ser vi at den uheldige vikningen er størst når avstanden mellom radar og vindmølle er liten.



Figur 5.13 En jammer som befinner seg innenfor de fargede området vil forårsake betydelig reduksjon av radarens ytelse i retningen mot vindkraftverket. Beregningen er for E/F-bånd.

Hvis det er flere vindkraftverk i et område, se Figur 5.14, vil hvert enkelt tårn kunne gi opphav til en jammet sektor og det totale området som jammes kan bli like stort som vinkelutstrekningen til vindkraftverksområdet sett fra radaren.

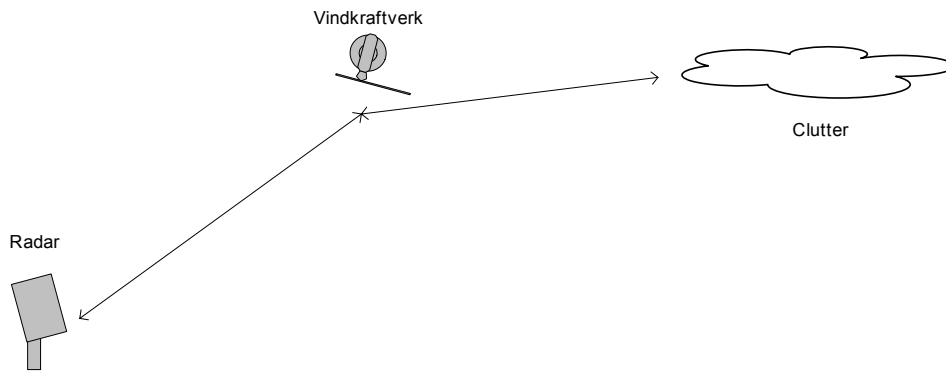


Figur 5.14 Flere vindmøller vil forårsake et stort jammestørrelse.

I tillegg til at jammeren kan redusere deteksjon i sektorene hvor vindkraftverket er, vil det også initiere et stort antall falske jammeindikasjoner (jam strobes) som vil gjøre det svært vanskelig å utføre triangulering av jamming.

5.2.3 Refleksjon av clutter

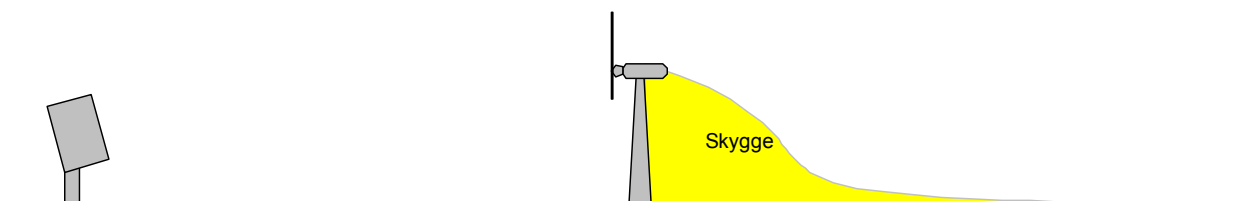
Flerbaneutbredelse kan også forekomme mellom radar, vindkraftverk og clutter (terreng, skyer, regnvær, menneskeskapt objekt ol), se Figur 5.15. Spesielt uheldig blir denne type refleksjoner hvis refleksjonene skjer via vindkraftverkets bevegelige deler slik at radaren oppfatter stillestående clutter som bevegelig. Dette vil medføre et komplekst bilde for vindkraftverkets innflytelse på radarens ytelse.



Figur 5.15 Flerbaneutbredelse via vindkraftverket

5.3 Skyggevirkning

Vindkraftverket vil stoppe den elektromagnetiske strålingen som treffer den. Imidlertid vil det elektromagnetiske feltet gå sammen og fylle ut 'tomrommet' bak vindkraftverket. På korte avstander vil det være en mulighet for skyggevirkning, men på lange avstander vil det på grunn av foroverspredning eksistere et forsterket elektromagnetiskfelt.



Figur 5.16 Skyggevirkning bak vindkraftverk

Verktøy for å beregne denne skyggevirkningen har dessverre ikke vært tilgjengelig.

For luftmål som opererer i en viss høyde over bakken vil denne skyggen neppe by på problem, men for fartøy på havoverflaten kan denne virkningen være noe større. Tatt i betraktning tårnets lille utstrekning i bredde kan det antas at det bare er i et lite område det er mulig å 'gjemme' seg i en slik skygge.

5.4 Radarantennens nærfelt

En viktig del av radaren er antennen. Spesielt for militære radarer som kan bli utsatt for elektronisk krigføring (EK) i form av forstyrrende signaler (jamming) utgjør antennen den viktigste beskyttelsen. Objekt som er nær antennen vil påvirke antennens strålingsdiagram ved bla å øke antennens sidelobenivå og dette vil redusere radarens motstandsdyktighet ovenfor jamming.

Nærfeltet utstrekning kan beregnes fra

$$R_{ff} \geq \frac{N_{nf} 2l^2}{\lambda} \quad (5.8)$$

hvor l er antennens største utstrekning, λ er radarens bølgelengde og N_{nf} er en sikkerhetsfaktor. Når $N_{nf} = 1$ tilsvarer det avstanden hvor avstandsforskjellen mellom en stråle fra senter og ytterkant av antenna er 45° elektriske grader, men i (7) blir det foreslått å benytte $N_{nf} = 3$ for opprettelse av en nærfeltssone for radiolinker. Med $N_{nf} = 3$ vil vi for en D-bånd radar hvor bølgelengden er 23 cm og med en antenne på 15 m eller en E/F-bånd radar med bølgelengde 10 cm og med en antenne på 10 m få et nærfelt som strekker seg ut til 6 km. Ideelt sett bør ingen store objekt befinne seg innenfor radarantennens nærfelt.

5.5 Elektromagnetisk støy

Radarmottakeren er svært følsom og all støy i radarens frekvensbånd ut over støy som oppstår på grunn av elektronbevegelse i radarens komponenter og termisk støy fra den romvinkelen radaren observerer vil redusere radarens rekkevidde.

Utstyr som behandler store strømmer og høye spenninger kan forårsake elektromagnetisk støy over et stort frekvensområde. Vindkraftverkets generator og elektroniske komponenter kan være årsak til slik støy.

Støyeffekten i radarmottakeren kan beregnes ved hjelp av

$$P_T = kTB_r \quad (5.9)$$

hvor $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ (Boltzmanns konstant), T er systemstøyen og B_r er radarens signalbåndbredde.

Hvis vi antar at radaren har en signalbåndbredde på 1 MHz og et totalt støybidrag tilsvarende en støytemperatur, T , på 400 Kelvin blir støyeffekten lik $5,5 \cdot 10^{-15} \text{ W}$.

Vindkraftverkets bidrag til støyen i radarmottakeren finnes ved å kombinere ligningene (4.1), (4.4) og (4.5) og la $P_i G_i$ representere støyen vindkraftverkets elektromagnetiske støy i retningen mot radaren

$$P_N = \frac{(P_i G_i) G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2} \quad (5.10)$$

Vindkraftverkets bidrag til støyen ved radaren bør være betydelig mindre (-6 til -10dB) enn radarens egne termiske støy.

6 MULIGE TILTAK

6.1 Interne problem i radaren

Det viktigste tiltak for å redusere interne problem i radaren på grunn av direkte tilbakespredning fra vindkraftverkene vil være en konstruksjon og plassering slik at de sterkeste refleksjonene

ikke skjer i retningen mot radaren.

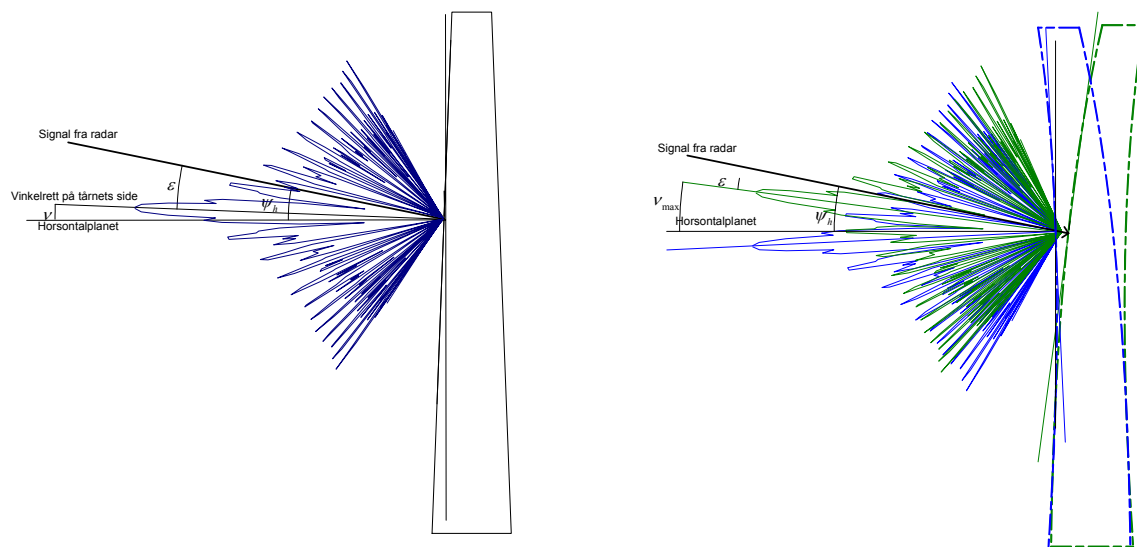
Tallene som er benyttet i eksemplet nedenfor er ment for å illustrere en mulig metode for beregning av hvordan man kan redusere direkte tilbakespredning mot radaren. Betydelig informasjon om vindkraftverkene og deres plassering er nødvendig for en konkret analyse av problemstillingen.

Vindkraftverkets tårn er den sterkeste bidragsyter for refleksjoner tilbake mot radaren. Beregningen av tårnets radartverrsnitt er svært avhengig av tårnets størrelse og vinkelen radarsignalet treffer tårnet med. De kraftigste refleksjonene oppstår når radarsignalet treffer vinkelrett på en stor rett flate. Geometrien i vertikalplanet for beregning av vindkraftverkets radartverrsnittet i retning mot radaren er vist i Figur 6.1. Vinkelen, ν , er tårnets helningsvinkel, innfallsvinkelen, ε , er definert som vinkelen mellom radarsignalets utbredelsesretning og vertikalen til den reflekterende flaten, og vinkelen ψ_h er radarstrålens innfallsvinkel i forhold til horisontalplanet ('grazing angle').

Tårnets helningsvinkel kan finnes av

$$\nu = \sin^{-1} \frac{d_{bunn} - d_{topp}}{2h} \quad (6.1)$$

hvor d er tårnets diameter og h er tårnets høyde. Et tårn med høyde 90 m, basediameter på 5 m og toppdiameter på 3,5 m vil ha en helningsvinkel på $0,5^\circ$.



Figur 6.1 Definerings av retning for maksimal refleksjon mot radaren. (Vinklene i elevasjonsplanet er sterkt overdrevet for illustrasjonen skyld.)

I følge (6) vil tårnet på grunn av oppvarming fra solen og vindtrykk mot turbinene kunne bøyes med opp til $0,2^\circ$ for hver av disse påvirkningene. Tårnets helningsvinkel vil for disse antagelsene maksimalt bli $\nu_{\max} = 0,9^\circ$ og $\nu_{\min} = 0,1^\circ$.

Refleksjonene fra tårnet er beregnet i kapittel 2.1 og Figur 2.4 til Figur 2.6 viser tårnets radartverrsnitt for varierende innfallsvinkel, ε , og avstand mellom radar og tårn. Ved å sette

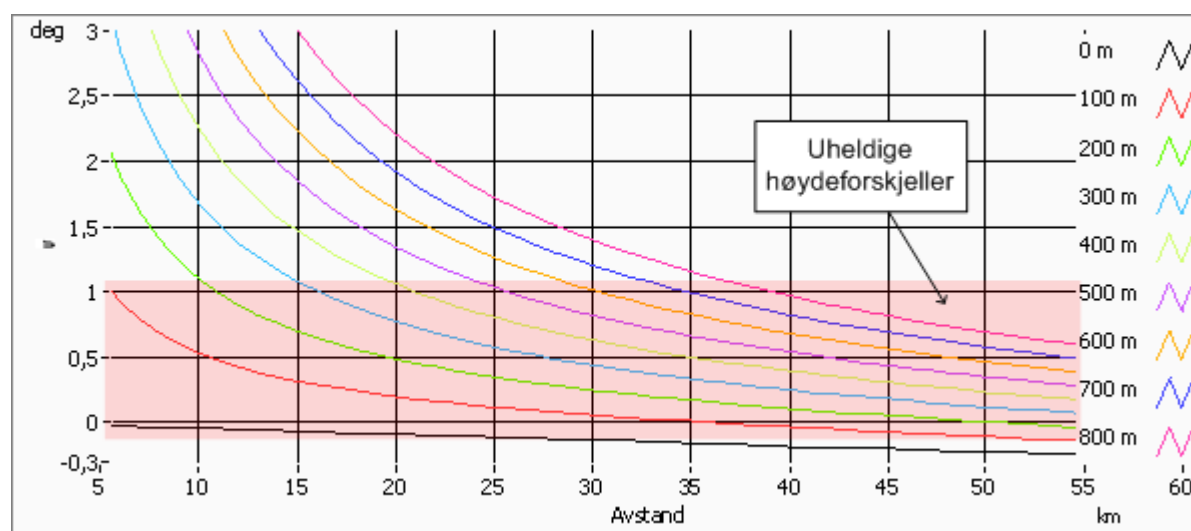
grensen for en E/F-bånd radar til $\varepsilon_{\min} > 0,2^\circ$ for store avstander og $\varepsilon_{\min} = 0,5^\circ$ for korte avstander (<20 km) vil radartverrsnittet være betydelig redusert (> 20 dB).

Man oppnår en betydelig reduksjon av radartverrsnittet hvis radaren plasseres slik at

$$\begin{aligned} \psi_h &> \nu_{\max} + \varepsilon_{\min} \\ \psi_l &< \nu_{\min} - \varepsilon_{\min} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Ved å benytte verdiene for en E/F-bånd radar for en avstand på større enn 30 km, vil en innfallsvinkel større enn $1,1^\circ$ ($0,9^\circ + 0,2^\circ$) eller mindre enn $-0,1^\circ$ ($0,1^\circ - 0,2^\circ$) hindret tilbakespredning av de kraftigste refleksjonene. Figur 6.2 viser radarsignalets innfallsvinkel mot horisonten, ψ_h , og den viser at en høydeforskjell på mer enn 600 m eller mindre enn 0 m er nødvendig for å oppnå dette.

For store avstander vil det med de gitte inngangsverdiene være en fordel at høydeforskjellen mellom radar og vindkraftverk er liten.



Figur 6.2 Radarsignalets innfallsvinkels, ψ_h , avhengighet av høydeforskjell mellom radar og vindkraftverk og avstanden mellom disse.

I samarbeid med vindkraftutbyggerne bør det vurderes om konstruksjonen av tårnet kan utføres slik at radarsignalets innfallsvinkel, ψ_h , ligger utenfor området ν_{\min} til ν_{\max} . Videre bør konsekvensene på radarytelsen vurderes for den aktuelle radartypen.

Beregningen har ikke inkludert motorhus eller de roterende bladene. Disse delenes orientering i forhold til radaren vil være avhengig av vindretningen og for de aller fleste orienteringer er radartverrsnittet til disse mindre enn for tårnet. Imidlertid kan de roterende delene introdusere dopplermodulasjon på signalet som reflekteres tilbake, og radaren er betydelig mer sårbar for slike signal.

Beregning av radartverrsnittet til motorhus og vinger er avhengig av en CAD-modell som beskriver overflaten. To utbyggere ble forespurt om slike modeller, men det ble ikke levert.

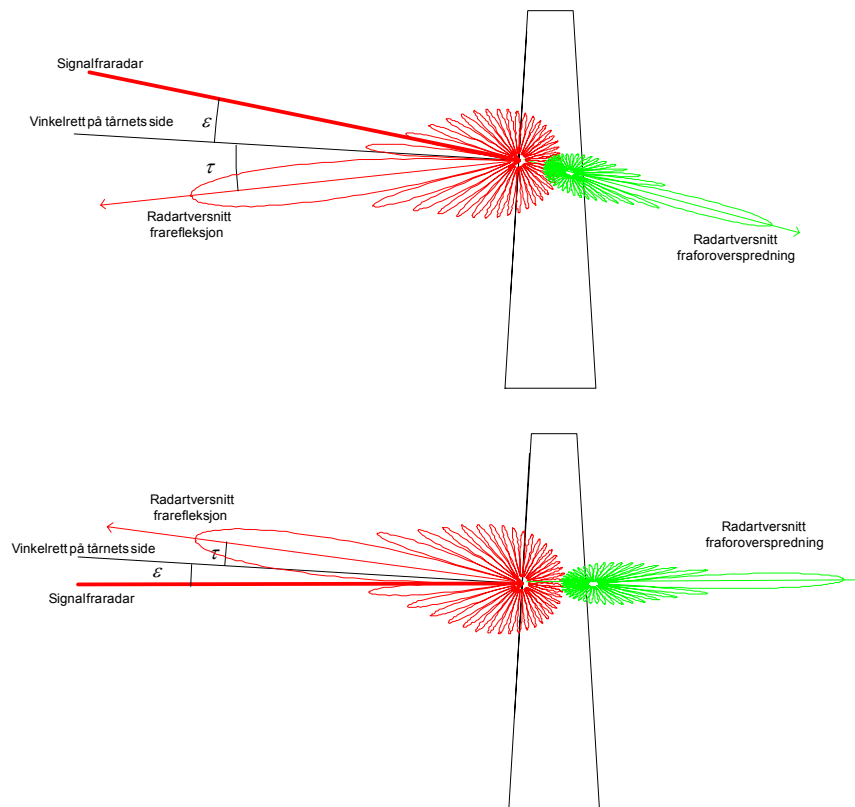
6.2 Refleksjoner via vindkraftverket

Årsaken til refleksjonene via vindkraftverket er det store radartverrsnittet det representerer. Den beste metoden å redusere disse effektene på er å redusere radartverrsnittet til vindkraftverket.

En metode for å redusere radartverrsnittet er å benytte radarabsorberende materiale. Det er antydnet i (6) at et radarabsorberende materiale med 15 mm tykkelse vil redusere refleksjonen med 25 dB, og det vil gi en betydelig forbedring. Denne type materiale kan benyttes som kledning på tårnet, men vindkraftverkets vinger kan neppe benytte denne type radarabsorberende materiale.

I kapittel 6.1 ble det vurdert hvordan man kunne unngå det sterke tilbakespredte signalet fra tårnet.

For bistatisk- og foroverspredt radartverrsnitt er ikke denne metoden like enkel fordi det alltid vil finnes en refleksjonsvinkel som representerer maksimalt reflektert signal. Ved foroverspredning er dette forlengelsen av linjen mellom radar og vindkraftverk, og for bistatisk refleksjon vil det innfallende signal speiles om normalen til den reflekterende flaten. Figur 6.3 viser hvordan den kraftigste refleksjonen varierer avhengig av signalets innfallsvinkel. Når radaren ligger så mye høyere at innfallsvinkelen er større enn normalen på tårnets side vil det maksimale radartverrsnittet tendere til å treffe bakken.



Figur 6.3 Retning for maksimalt bistatisk og foroverspredt radartverrsnitt

Utformingen av tårnet kan sammen med høydeforskjell på radar og vindkraftverk være med på å redusere det bistatiske radartverrsnittet. For en luftovervåkningsradar kan det være en fordel at mest mulig av det bistatiske radartverrsnittet peker mot bakken og da bør tårnets konisitet være

så liten som mulig (helst bør det være tykkest øverst). Spesielt bør man gjennomføre mer nøyaktige analyser hvis det foregår spesiell flyaktivitet i gitte høydeskikt (f eks i forbindelse med flyplasser, luftkorridorer eller øvingsområder). For en havovervåkningsradar er det imidlertid best at minst mulig av det bistatiske radartverrsnittet treffer havoverflaten.

Ovennevnte forslag er meget generelle, men forståelsen av problemstillingen kan benyttes til å analysere konkrete utplasseringer.

Når det gjelder refleksjon via vindkraftverkets andre deler gjelder samme vurderinger som i 6.1.

6.3 Skyggevirkning

Skyggevirkning vil være forårsaket av objektets (vindkraftverkets) fysiske størrelse; tildekking med radarabsorberende materiale vil ikke redusere problemet

6.4 Radarantennens nærfelt

Alle objekt i radarens nærfelt vil påvirke antennens strålingsdiagram, tildekking med radarabsorberende materiale vil ikke være en tilfredstillende løsning.

6.5 Elektromagnetisk støy

Det potensielle problem med elektromagnetisk støy løses ved at vindkraftverkets elektriske deler konstrueres slik at utstrålingen av elektromagnetisk støy blir lav.

7 ERFARINGER FRA ANDRE LAND

I løpet av studien har det vært mulig å finne en god del informasjon om andre lands arbeider innenfor problemstillingen. Disse kan deles i de som omhandler konkrete rapporterte problemer og tekniske analyser av mulige problem. Storbritannia synes å være det landet som setter inn størst ressurser på å forstå problemstillingene. De har blant annet utarbeidet en rapport (8) som vurderer andre europeiske lands (Storbritannia, Danmark, Tyskland, Nederland, Sverige og Norge) behandling av disse problemene, og informasjon fra denne er benyttet i omtalen av de enkelte land.

7.1 Sverige

Sverige har arbeidet med vindkrafts innvirkning på sensorer og kommunikasjonssystemer siden slutten av 1980-tallet. Dette arbeidet var en del av en svensk offentlig utredning (SOU 1988:32). Senere har det foregått flere arbeider for å forbedre modellene og utrede flere aspekt rundt innvirkningen av vindkraftverk. Dokumentene har i stor grad teknisk karakter og dette er benyttet som underlagsmateriale i våre tekniske analyser av problemstillingene.

I underlagsmaterialet til SOU 1988:32 inngår (4) som er en teknisk vurdering av vindkraftverkens innvirkning på radar og radiolinker. Rapporten etablerer et grunnlag for hvordan vindkraftverk kan modelleres og analyser som viser hvordan innvirkningen kan bli. Rapporten inneholder ingen konkrete anbefalinger med hensyn til avstander mellom vindkraftverk og Forsvarets installasjoner. Modellene er forbedret i (5), med bla 3D-modellering

av refleksjonsfenomenene fra vindkraftverket. Resultatet av dette arbeidet konkluderer med at den forstyrrelsesfrie sonen i den eksisterende modellen Försvarets Materiellverk (FMV) benytter kan reduseres, men den sier ikke hvor mye og den sier også at i noen tilfeller vil forstyrrelser av samme størrelse forekomme. Området som vindkraftverk vil forstyrre radaren er i (5) angitt som 15 km i de retninger radaren overvåker og 7 km i retninger radaren ikke overvåker.

I 1999 gjennomførte Försvarets Forskningsanstalt en måleserie hvor en mobil radar ble plassert nær et vindkraftverk og deretter gjennomførte prøveflygninger. Dette viste at man i området med vindkraftverk fikk flere deteksjoner av målet, og det gjør automatiskfølging av målet vanskeligere. Når man fløy bak vindkraftverket fikk man også spredning av målingene. Det hadde liten betydning om vingene på vindmøllen sto stille eller roterte.

I følge (8) har Sverige ingen fastlagt prosess som utbyggerne skal følge ved igangsettelse av vindkraftutbygning. Men i praksis informerer utbyggerne sivile og militære luftfartsmyndigheter før utbygningene, og for byggverk høyere enn 40 m skal sivile luftfartsmyndigheter varsles på fastlagt skjema. Videre har Sverige et lovverk som hindrer utbygning i områder hvor totalforsvaret blir redusert, og dette skal ha vært benyttet for å stoppe vindkraftutbygning. I Sverige (8) skal det ikke utplasseres vindkraftverk nærmere enn 50 km til sidene for en etterretningsstasjon og det skal ikke plasseres noen i lytterretningen.

7.2 Danmark

Danmark har hatt et stort antall vindkraftverk i mange år. Det skal være nesten 2000 vindmøller innenfor 30 km av sivile luftradarer og over 500 vindmøller nærmere enn 30 km av militære luftovervåkningsradarer. Til tross for dette er det i liten grad meldt om at dette forårsaker problem forbundet med bruk av radarer.

Våre henvendelser mot sivile og militære aktører i Danmark tyder på at de i liten grad har vurdert hvilke konsekvenser utbygning av vindkraft vil få for forsvarets systemer.

I Danmark er behandling av vindkraftutbygning overlatt til regionale myndigheter, men alle bygg over 8,5 m skal rapporteres til sivile luftfartsmyndigheter som igjen rapporterer disse til militære myndigheter. Det synes som om Danmark har etablert områder hvor det er akseptert utbygning av vindkraft.

Vindkraftverkene i Danmark har generelt vært lave, men det er nå søkt om å bygge vindkraftverk med en tårnhøyde på omkring 100 m. I sjøen 5 km nord for Kastrup ligger vindkraftverket Middelgrunden som består av 20 tårn spredt over et område på 3,4 km. Høyden på tårnet er 64 m og diameteren er på rotoren er 76 m. I dansk sammenheng blir dette ansett for å være et stort kraftverk. Helt fra starten ble det rapportert problem i forbindelse med initiering av falske mål i området rundt vindkraftverk, men dette har blitt redusert ved i programmere radarsystemet til ikke å etablere måldeteksjoner i det problematiske området. Videre er det også initiert plot fra sekundærradar omkring 50 km nord for vindkraftverket som stammer fra en flypass i Sverige. For sivile luftfartsmyndigheter som i stor grad benytter sekundærradar som en viktig del av flysikkerheten kan dette være et problem. Sivil luftfart følger bestemte korridorer og det har derfor vært mulig å forandre programvaren som behandler radarinformasjonen til å ta hensyn til disse problemene. Det kan også bemerkes at et vindkraftverk med mindre tårn (20 –

25 m) som ligger nærmere Kastrup ikke skaper tilsvarende problem, og at to store piper på omkring 5 km avstand skaper minst like store problem.

7.3 Tyskland

Tyskland har den største utbygde vindkraftenergien i Europa. Det er klare regler for saksgangen ved behandling av vindkraftverksøknader som gjennomføres av sivile myndigheter som koordinerer dette med militære interesser. Det meste av vindkraftutbygningen har funnet sted utenfor fjellområdene i Syd-Tyskland.

Fra sivil luftfart er det rapportert få uheldige innvirkninger på vindkraftverk, men militære myndigheter har forsøkt å stoppe utbygninger i spesielle områder. En utbygning i nærheten av radaren ved Auenhausen har i følge (8) blitt tatt ned på utbyggers bekostning.

Firmaet Aeronautic Defence and Space Company (EADS) har gjennomført en studie for det tyske luftforsvaret, men vi har ikke hatt tilgang til den.

Det tyske luftforsvar har satt en grense på 5 km hvor ingen utbygning skal finne sted, og en sikkerhetssone på 20 km hvor sakene skal gjennomgå en spesiell vurdering.

7.4 Storbritannia

Storbritannia hadde omkring 70 operative landbaserte og det var planlagt 13 offshore vindkraftverk i august 2002 (9). I Storbritannia har man innsett at det finnes potensielle konflikter mellom vindkraften og sivil og militær luftfart samt forsvarets andre installasjoner og de legger ned betydelige arbeider for å kartlegge og redusere problemene. De har opprettet gruppen Wind Energy, Defence & Civil Aviation Interests Working Group som bla består av representanter fra berørte departementer, sivile luftfartsmyndigheter og vindkraft utbyggerne. Gruppen har sørget for at det er gjennomført betydelige arbeider innenfor området og flere arbeider er på gang.

I dokumentet Wind Energy and Aviation Interest – Interim Guidelines (9) tar de for seg alle forhold i forbindelse med bruk og overvåkning av luftrommet både for sivile og militære formål og de sier at bakkebaserte radarer sannsynligvis vil bli påvirket av vindkraftverk innenfor deres synsfelt. Videre studier av dette er i gang, men de er ikke ferdig. Vindkraftverk skal ikke plasseres nærmere enn 74 km fra radarene uten at utbygger viser at dette ikke får innvirkning på radaren. Bevisbyrden er her overlatt til utbygger. Disse strenge kravene er basert på behov for skjerpet overvåkning etter hendelsene 11 september 2001. Man håper at dette strenge kravet kan reduseres i framtiden, særlig hvis tekniske løsninger gjør dette mulig. De hevder at luftbårne overvåkningsradarer i mindre grad vil bli påvirket av vindkraftverk, men det har til nå ikke vært mulig å bestemme deres innvirkning på disse systemene og hvordan det vil påvirke forsvarsoppgavene. De mener at påvirkning av radarene med stor sannsynlighet vil påvirke det overordnede kommando og kontrollsystemet og at det er på dette nivået innvirkningen av vindkraftverkene blir kritisk. Imidlertid kan det vise seg at noen av problemene på hver enkelt radar kan kompenseres ved viderebehandling i kommando og kontrollsystemet. Vindmøllenes effekt på radarene er meget kompleks, tiltakene for å redusere problemene vil være komplekse og de er fortsatt ikke fullt forstått. Konkrete tiltak som nevnes er at utbygger besørger flytting av

radar eller investering i tilleggsensorer. Dokumentet sier også noe om påvirkning av meteorologiske radarer.

Anneks D i (9) er en gjennomgang av radarers funksjoner og antatt innvirkning fra vindkraftverk. Den nevner områdene maskering av områder, radar deteksjon av vindkraftverkene og uheldige virkning basert på at vindkraftverkene reradierer radarsignalene. Mulige avhjelpende tiltak, operative konsekvenser og framtidig utvikling blir nevnt. De tekniske betraktningene er svært generelle og dette er behandlet nærmere i (9). Avslutningsvis nevnes det at Forsvarsdepartementet i den nåværende sikkerhetssituasjon er uvillig til å redusere sin luftovervåkningskapasitet – spesielt for lave høyder.

Storbritannia er svært opptatt av at utbygning av vindkraftverk ikke skal redusere sivil og militær flysikkerhet, og at evnen til å overvåke luftrommet, spesielt for lave høyder, er meget viktig for å landets sikkerhet. Kravene til utbygning av vindkraftverk nær luftforsvarsradarer er derfor meget strenge (9), og følgende regler praktiseres for bygging av vindkraftverk:

- vindkraftverk kan bygges når avstanden til meteorologiske radarer er større enn 10 km
- vindkraftverk kan bygges når avstanden til en sivil lufttrafikkradar er større enn 30 km, for avstander under dette skal det gjennomføres en evaluering av de konkrete forholdene
- vindkraftverk kan IKKE bygges når avstanden til militære luftovervåkningsradarer er mindre enn 74 km uten at utbygger viser at vindkraftverket ikke vil påvirke radaren

Forsvarsdepartementet stoppet i 2002 utbygningen av fem sjøbaserte vindkraftverk fordi de mente det ville skape problem for forsvaret (11).

Det er utarbeidet en rapport (10) som har studert vindkraftproblem i UK, Nederland, Danmark og USA. For Storbritannia nevner den følgende forhold:

- Ved Leeds-Bradford lufthavn har en vindmøllepark i avstanden 20 km produsert falske mål i forbindelse med innflygningstraseer.
- Ved Prestwick lufthavn har to vindmølleparker i avstandene 32 og 35 km produsert falske mål i et område på 3 x 3 km rundt vindmølleparkene. Problemene oppsto først etter at den gamle radaren ble skiftet ut med en ny. En mer detaljert beskrivelse av disse forholdene finnes i (12).
- Ved Aberdeen lufthavn har en enkelt delvis synlig vindmølle i avstanden 7 km fra radaren ikke forårsaket problem etter vanlig radarprosessering.
- Ved Newcastle lufthavn har en vindmøllepark i avstanden 18 km produsert faste mål.
- Ved Cardiff lufthavn har en vindmøllepark i avstanden 20 km produsert faste mål under spesielle værforhold.
- Ved Glasgow lufthavn er en forsøkspark for vindmøller operert i avstanden 22 km. Man tror vindmøllene er innenfor line-of-sight, men de har ikke forårsaket problem.
- Ved Norwich lufthavn har en enkelt vindmølle i avstanden 21 km fra radaren forårsaket mål som hopper rundt i et område på 1 km.

- Ved Belfast lufthavn har en vindmøllepark i avstanden 18 km fra radaren ikke forårsaket problem, men her er radarstrålen hevet 1,5° oppover
- Ved RAF Marham militære flyplass har en enkelt vindmølle forårsaket deteksjoner av vindmøllen.
- Ved RNAS Culdrose militære flyplass har en vindmøllepark i avstanden 6 km produsert faste mål og vanskeligheter med å initiere mål rundt vindkraftverket.
- Ved RAF St Mawgan militære flyplass har to vindmølleparker i avstandene 10 og 15 km produsert falske mål som ikke blir fjernet med dopplerprosesseringen på en ny radar.
- Ved RAF Coltishall radar har en vindmøllepark og en enkelt vindmølle i avstanden 20 km produsert falske mål.

Et stort flertall av rapportene bekrefter at vindkraftverkene detekterer selve vindkraftverket og at falske mål blir produsert i området rundt. De tilfellene som er analysert dreier seg om sivil luftromskontroll og det synes som om man har kommet fram til løsninger som gjør det mulig å leve med problemene. En viktig årsak til dette er at man i stor grad har faste og kjente flymønstre. For militær luftovervåkning må man ta i betraktning at de som utgjør en trussel forsøker å utnytte svakheter i systemet og det er da betydelig vanskeligere å finne tilfredstillende løsninger. Videre er det ikke vurdert om radarens evne til å oppdage små mål blir redusert.

7.5 Nederland

Vi har ikke mottatt informasjon direkte fra Nederland, men en del forhold er omtalt i (8) og (10).

I Nederland er det foretatt en studie av FEL-TNO som undersøker skyggeeffekten bak vindkraftverk, rapporten er på nederlandsk og den er ikke studert.

Samtidig med oppgraderingen av sekundærradaren ved Leerdam ble de foreslått å bygge et vindkraftverk hvor den nærmeste vindmøllen ville være bare 1,1 km fra radaren. Dette ble forelagt radarleverandøren som konkluderte med at dette kunne gi store feilmålinger (mer enn 3°).

Ved Schiphol lufthavn er det fire vindmølleparker i avstandene 10, 15, 20 og 25 km, men disse skal ikke ha medført problem for sivil luftkontroll i området.

7.6 Spania

Spania er Europas nest største vindkraftprodusent, men vi har ikke funnet relevant informasjon om vindkraftverk.

8 VIDERE ARBEID

Denne studien har vært et innledende arbeid for å kartlegge omfanget av de problemene som kan oppstå når vindkraftverk blir bygd nær en radar. Videre arbeider bør deles i mindre oppgaver på

spesifikke områder, og basert på den kjennskap til problemstillingene som er opparbeidet blir følgende videre arbeider anbefalt.

8.1 Internasjonalt samarbeide

Flere land har lagt ned betydelige midler i å utrede vindkraftverkens innvirkning på radar. Det er uhensiktsmessig å bygge opp videre norsk kompetanse innenfor området uten å kunne utnytte kompetanse fra andre land. Detaljert kunnskap om kompetansen i utlandet er ikke kjent, men en undersøkelse av dette vil være avgjørende for fastsettelse av samarbeidsformen. Samarbeid kan omfatte

- Utveksling av erfaring og teknisk informasjon
- Kjøp av tjenester fra kompetente firma
- Utvikling av felles modeller og analyseverktøy

Et samarbeid vil kreve innsats fra norsk side, og det forutsetter en viss forutsigbarhet av innsatsen på norsk side. Initiativ til et samarbeid bør derfor foretas av riktig norsk myndighet etter en vurdering av hvilke midler vi skal benytte på området.

Det bør inngås et samarbeide med de land som har utført mest arbeid innenfor området. Etter min mening er det primært Storbritannia, men også Tyskland og Sverige kan være interessante.

8.2 Modellering

Arbeidet med å modellere vindkraftverkens innvirkning på radar bør fortsette. Målsetningen må være å utvikle en modell som kan benyttes til å prediktere konsekvensene når radar og vindkraftverk er utplassert i terrenget. Arbeidet bør foregå i samarbeid med andre land som arbeider med tilsvarende problemstillinger.

På følgende områder er det identifisert at det er nødvendig med en bedre modell:

- Degradering av radarens sidelover når vindkraftverket befinner seg i radarantennes nærfelt.
- Nærfeltberegning av bistatisk refleksjon og foroverspredning når radar og/eller mål er i nærfeltet (sammenlignet med vindkraftverkets størrelse).
- Modell for beregning av radartverrsnittet til generatorhus og vinger.

8.3 Feltnmålinger

Det bør gjennomføres feltnmålinger for å verifisere teoretiske beregninger.

8.4 Detaljert studie av norske radarer

De potensielle problem som er omtalt i kapittel 5.1 er avhengig av hver enkelt radars tekniske løsninger. Det bør gjennomføres en detaljert studie av en utvalgt radars reaksjon på svært sterke

refleksjoner fra vindkraftverk. Noen av de planlagte vindkraftverkutbygninger synes å påvirke enkelte radarer i stor grad og slike konkrete tilfeller synes godt egnet for en slik studie.

Studien krever detaljer informasjon om radaren og må derfor bli gradert Konfidensiell for den generelle delen og Hemmelig for de deler som omhandler elektronisk krigføring (EK).

8.5 Krav til utbygger

Informasjonen som utbygger leverer til Forsvarets vurdering av konsekvensene for radarsystemene er ikke tilstrekkelig for en grundig evalueringene av problemstillingene. Spesielt detaljert informasjon må leveres for utbygningene som ligger nær radarene eller av andre grunner anses problematiske. Dette kan gjennomføres i to etapper hvor den første består av tilsvarende informasjonen som er stilt til rådighet for Forsvaret i dag, og at Forsvaret vurderer om tilleggsinformasjon er nødvendig.

Informasjon som er nødvendig for en detaljert analyse av vindkraftverk vil omfatte:

- Elektromagnetisk støy fra vindkraftverket
- Posisjonen til hver enkelt vindmølle
- Tårnets utforming (høyde, diameter opp/nede) og konstruksjonsmaterialer
- CAD-modell og konstruksjonsmaterialer for vinger og generatorhus
- Bøyning av tårn og vinger underpåvirkning av vind og soloppvarming
- Rotasjonshastighet
- Fordeling av vindretninger

8.6 Operative vurderinger

Når forståelsen av de tekniske problemstillingene blir bedre vil sikkerheten i å fastslå konsekvensene for hver enkelt utbygning bli bedre. I de tilfeller negative konsekvenser blir påvist fra teknisk side må det være en operativ vurdering som avgjør hvor alvorlige disse konsekvensene er for Forsvarets virksomhet. Personell fra operativ side bør derfor trekkes inn i totalvurderingen av vindkraftutbygningen.

9 KOSTNADER

I arbeidet med å finne ut vindkraftverkernes innvirkning på radar er det i noen land lagt ned betydelig arbeid og kostnader innen dette området. I Norge har arbeid så vidt startet og vesentlig mer arbeid bør utføres (se Kapittel 8) for å få oversikt over problemstillingene.

I (10) blir det gjort en vurdering av kostnader for å utføre tiltak for å redusere de uheldige konsekvenser vindkraftverkene kan få på radarsystemene. Kostnadsberegningene er svært grove fordi man ennå ikke fullt forstår problemstillingene, omfanget av tiltak og kompleksiteten av tiltakene. De har delt tiltakene i små og store:

- Små tiltak består i tilpasninger av radarparametere og mindre programvareendringer, og er antatt å koste omkring 1,3 Mkr for hver radartype.
- Store tiltak som omfatter utstyrforandringer og/eller store programvareforandringer er antatt å koste mellom 3,2 og 7,8 Mkr for hver radar.

I tillegg til dette vil jeg anta det må legges til en kostnad for å kartlegge problemstillingene og en initialkostnad for modifikasjon av hver radartype.

Kostnadene til å kartlegge problemstillingene, redusere usikkerheten og utbedre uheldige virkninger er liten sammenlignet med anskaffelseskostnaden til Forsvarets store radarinstallasjoner.

10 ANBEFALINGER

Informasjon fra andre lands praksis med hvor nært et vindkraftverk kan bygges en militær radar varierer fra 74 km i Storbritannia til ingen spesifikke krav i andre land. Egne beregninger som er gjennomført i forbindelse med dette arbeidet gir heller ingen klar grense for en minimumsavstand mellom radar og vindkraftverk.

Gjennomføring av analysene krever at utbygger levere en detaljert beskrivelse av utbygningen og om vindkraftverkets konstruksjon (se avsnitt 8.5).

Alle rapporter tyder på at et vindkraftverk som er synlig for radaren vil produsere falske mål i området det er plassert uansett hvor stor avstanden til radaren er. I de fleste tilfeller synes det som om man kan gjennomføre tiltak som begrenser dette problemet hvis det er operativt akseptabelt med redusert evne til deteksjon og initiering av mål i disse områdene. Man bør derfor alltid være forberedt på de kostnader slike tiltak kan medføre.

For andre problem som kan oppstå med Forsvarets radarer blir, basert på arbeidene i studien, følgende retningslinjer foreslått:

- Innenfor 10 km er det betydelige problem på grunn av direkte tilbakespredt signal mot radaren, mulighet for initiering av falske plot på grunn av refleksjoner og stor påvirkning av jamming. Man bør derfor være svært restriktiv med utbygning av vindkraftverk innenfor 10 km. Før en utbygning finner sted bør man gjennomføre en detaljert analyse basert på geometriske betraktninger (plassering av radar og vindkraftverk), og en detaljert analyse av vindkraftverkets innvirkning på den aktuelle radartypen.
- Fra 10 til 30 km viser analysene at problemene reduseres med hensyn til initiering av falske mål og sårbarhet for jamming. En operativ vurdering av konsekvensene ved uheldige innvirkninger bør avgjøre om disse tilfellene skal behandles i henhold til punktet over eller punktet under.
- Utenfor 30 km synes de uheldige virkningene primært å være den direkte tilbakespredte refleksjonen og problemene bør bli små hvis en geometriske betraktning (plassering av

radar og vindkraftverk) viser at man unngår at hovedrefleksjonen fra tårn og rotorer treffer radaren. Hvis hovedrefleksjonen fra vindmøllen treffer radaren bør innvirkningen på den aktuelle radaren analyseres.

Vurdering over er basert på bygging av store vindmøller (beregningene er gjort for en navhøyde på 90 m), og for betydelig mindre vindkraftverk bør grensene kunne reduseres.

De foreslåtte grensene må vurderes fortløpende etter hvert som ny kunnskap blir opparbeidet.

11 OPPSUMMERING

Vindkraftverk som blir utplassert slik at det blir belyst av en radar vil påvirke radarens funksjon. Det er rapportert et stort antall tilfeller hvor radaren detekterer vindmøllene som mål og produserer falske mål i området med vindmøller, men ved å innføre riktige tiltak kan man vanligvis unngå de mest uheldige virkningene av dette.

Hvis vindmøllene plasseres nær radaren kan det blant annet få følgende virkninger som det er vanskelig å kompensere for: Mål kan rapporteres på feil posisjon, evnen til å oppdage mål blir redusert og det oppstår økt sårbarhet for elektronisk krigføring.

Det er gjennomført flere arbeid i utlandet for å bestemme de uheldige konsekvensene. Studiene har ingen konklusjoner eller begrunnelser for hvor stor avstanden mellom radar og vindkraftverk bør være. Arbeidene omhandler primært problemstillingene med radarer for sivil luftromskontroll. Kravene til militære radarer for sjø- og luftovervåkning er betydelig strengere, men en operativ vurdering av konsekvensene er nødvendig.

Studien anbefaler at videre arbeid bør omfatte internasjonalt samarbeide, utvikling av bedre modeller, etterprøving av teoretiske arbeider med målinger, analyse av radarenes respons på svært sterke signal, krav om bedre informasjon fra utbygger, og gjennomføring av operative vurderinger av de uheldige virkningene.

En engelsk studie antar at kostnader på 1,3 til 7,8 Mkr for hver radar vil være nødvendig for å utføre tiltak som begrenser uheldige virkningene på sivile radarer.

Studien anbefaler at man bør være svært restriktiv med utplassering av vindkraftverk når avstanden til en militær radar er mindre enn 10 km, og at kravene til evaluering og dokumentasjon i forbindelse med utplassering kan reduseres når avstanden øker. Utbygningen av vindkraft nærmere enn 30 – 50 km fra Forsvarets radarer vil kreve ekstra kostnader i forbindelse med analyse av konsekvensene og eventuelle tiltak for å redusere uheldige virkninger.

APPENDIKS

A FORKORTELSER

EADS Aeronautic Defence and Space Company

EK elektronisk krigføring

FB Forsvarsbygg

FD Forsvarsdepartementet

FLO Forsvarets Logistikkorganisasjon

FO/E Overkommando/Etterretningstjenesten

OED Olje- og energidepartementet

RCS Radartverrsnitt

STC Sensitivity Time Control

TWh Terra wattimer

Litteratur

- (1) David K Barton (1976): Radar System Analysis, Artech House.
- (2) Eugene F. Knott et al (1992): Radar Cross Section Second Edition, Artech House.
- (3) IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, ANSI/IEEE Std 100-1984 (1984): (Eds Jaay, F.), IEEE Press, New York.
- (4) Ousbäck Jan-Olof (1988): Elektromagnetiska störningar på radar- och radiolänk-system orsakade av stora vindkraftverk In: *Vindkraft Telestörningar*, Bostadsdepartementet, Stockholm.
- (5) Ousbäck Jan-Olof (1999): Forsvaret och Vindkraften - Hovudstudie radar Sluttrapport, Forsvarets forskningsanstalt, Lindköping.
- (6) Butler M M, Johnson D A (2003): Feasibility of mitigating the effects of windfarms on primary radar, Alenia Marconi Systems Limited, ETSU W/14/00623/REP.
- (7) Beacon D F (2002): A proposed method for establishing an exclusion zone around a terrestrial fixed radio link outside of which a wind turbine will cause negligible degradation of the radio link performance.
- (8) Jago P, Taylor N (2002): Wind Turbines and Aviation Interests - European Experience and Practice, Department of Trade and Industry (UK), URN No 03/515.
- (9) Wind Energy, Defence & Civil Aviation Interests Working Group (2002): Wind Energy and Aviation Interests - Interim Guidelines, ETSU W/14/00626/REP, England.
- (10) Wind Turbines and Radar: Operational Experience and Mitigation Measures (2001), Spaven Consulting.
- (11) Randerson J (2002): Defence of the realm - Could enemy aircraft really hide behind a wind turbine?, *New Scientist*, 27 April 2002, p 8.
- (12) Summers E (2001): The Operational Effects of Wind Farm Developments on ATC procedures For Glasgow Prestwick International Airport, *Memo*.

FORDELINGSLISTE

FFIE

Dato: 19. juli 2003

| | | | | | |
|---|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------|---------------|
| RAPPORTTYPE (KRYSS AV) | | RAPPORT NR. | REFERANSE | RAPPORTENS DATO | |
| <input checked="" type="checkbox"/> RAPP | <input type="checkbox"/> NOTAT | <input type="checkbox"/> RR | 2003/02784 | FFIE/327501/113 | 19. juli 2003 |
| RAPPORTENS BESKYTTELSESGRAD | | | ANTALL EKS UTSTEDT | ANTALL SIDER | |
| UGRADERT | | | 61 | 46 | |
| RAPPORTENS TITTEL | | | FORFATTER(E) | | |
| VINDKRAFTVERKS KONSEKVENSER FOR FORSVARETS INSTALLASJONER - INNLEDENDE STUDIE FOR RADAR | | | ØHRA Hans | | |
| FORDELING GODKJENT AV FORSKNINGSSJEF | | | FORDELING GODKJENT AV AVDELINGSSJEF: | | |
| Torleiv Maseng | | | Johnny Bardal | | |

EKSTERN FORDELING

INTERN FORDELING

| ANTALL | EKS NR | TIL | ANTALL | EKS NR | TIL |
|--------|--------|--|--------|--------|-------------------------------|
| 2 | | Forsvarsdepartementet, avd V – 5 | 9 | | FFI-Bibl |
| 1 | | Olje- og energidepartementet | 1 | | Adm direktør/stabssjef |
| 1 | | Miljøverndepartementet, Planavdelingen | 1 | | FFIE |
| 1 | | Forsvarsbygg, EU fagsenter plan | 1 | | FFISYS |
| 1 | | v/Senark Kjell-Peder Midttun | 1 | | FFIBM |
| 1 | | v/Senark Bjørn Bergesen | 1 | | FFIN |
| 1 | | v/Senark Arne Lutnæs | 1 | | Forfattereksemplar(er) |
| 1 | | FST/LST | 3 | | Restopplag til Biblioteket |
| 1 | | FST/SST | | | Elektronisk fordeling: |
| 1 | | FST/HST | | | Torleiv Maseng (TMa) |
| 1 | | LUKS/LOI | | | Tore Smestad (TSm) |
| 1 | | v/Ob John Krogstad | | | Arne Cato Jensen (ACJ) |
| 1 | | v/Oblt Vidar Gunnberg | | | Walther Åsen (WAs) |
| 1 | | Etterretningstjenesten | | | Halvor Bjordal (HBj) |
| 1 | | v/Ktrsj Nils Isaksen | | | Ivar Tansem (IvT) |
| 1 | | v/Rådg Tore Belsnes | | | Elling Tveit (ETv) |
| 1 | | v/Oing Kari Høydal | | | Hans Olav Sundfør (HOS) |
| 1 | | FLO/K | | | Tore Nyhamar (TNy) |
| 1 | | v/Komkapt Trygve Pedersen | | | |
| 1 | | FLO/Luft | | | |
| 1 | | v/Maj Nils Aage Østbye | | | |
| 1 | | FLO/Sjø | | | |
| 1 | | v/Avding Roger Geir Pedersen | | | |

FFI-K1

Retningslinjer for fordeling og forsendelse er gitt i Oraklet, Bind I, Bestemmelser om publikasjoner for Forsvarets forskningsinstitutt, pkt 2 og 5. Benytt ny side om nødvendig.

EKSTERN FORDELING

INTERN FORDELING

| ANTALL | EKS NR | TIL | ANTALL | EKS NR | TIL |
|--------|--------|--|--------|--------|-----|
| 1 | | FLO/Land | | | |
| 1 | | FLO/IKT | | | |
| 1 | | v/Oblt Jon Tiller | | | |
| 1 | | v/Kapt H C Haugen | | | |
| 1 | | FEKS/717 | | | |
| 1 | | LSK-LEDSK | | | |
| 1 | | v/Svein Ole Mikkelsen | | | |
| 2 | | LKVS/Mågerø | | | |
| 1 | | Norges Vassdrags- og Energidirektorat | | | |
| 1 | | v/Senrådg Asle Selfors | | | |
| 1 | | v/Seksjonssjef Arne Olsen | | | |
| 1 | | v/Oing Tormod Eggan | | | |
| 1 | | v/Oing Nils Henrik Johnsen | | | |
| 1 | | Avinor | | | |
| 1 | | v/Sjefing Ole Ragnar Tandberg | | | |
| 1 | | Luftfartstilsynet | | | |
| 1 | | SINTEF | | | |
| 1 | | v/Yngve Steinheim | | | |
| | | Elektronisk fordeling: | | | |
| | | www.ffi.no | | | |