

## **Prosjekt 1013 Vindkraftutbyggingens påvirkning på Forsvarets elektromagnetiske systemer (VINDKRAFT) – sluttrapport**

Bente Jensløkken Meland, Hans Øhra, Gudrun Høye, Eivind Bergh Nilssen,  
Morten Søderblom, Morten Mjanger, Roald Otnes, Stein Kristoffersen, Trygve Sparr,  
Steffen Tollisen og Aanund Storhaug

Forsvarets forskningsinstitutt/Norwegian Defence Research Establishment (FFI)

22. mai 2007

FFI-rapport 2007/01344

1013

ISBN 978-82-464-1168-2

## **Emneord**

Vindkraft

Vindmøller

Radar

Radiolinjer

HF-radio

## **Godkjent av**

Bente Jensløykken Meland

Prosjektleder

Jon Skjervold

Forskningssjef

Vidar S. Andersen

Avdelingssjef

## Sammendrag

Vindkraftutbyggingen er i full gang – også i Norge. Det har gjennom studier og feltforsøk i flere land vist seg at vindmøller har innvirkning på ulike elektromagnetiske systemer. Dette kommer av at vindmøllene er store, laget av radarreflekterende materialer og i tillegg har bevegelige deler.

Prosjektet har sett på innvirkningen på radar, sekundær radar, radiolinje og passive sensorer. Hovedleveransen fra prosjektet har vært støtteverktøyet WTES. Dette er utviklet for å støtte Forsvarets saksbehandling av konsesjoner om vindkraftutbygging. Prosjektet har i tillegg utgitt åtte rapporter, deltatt i internasjonale fora og arrangert to vindkraftseminarer med deltagelse fra vindkraftindustrien og Forsvaret.

## English summary

The wind energy developments are increasing – in Norway as well. Studies and experiments in different countries show that wind turbines are having impact on different electromagnetic systems. This is caused by the size of the wind turbines, the radar reflecting material used and the moving parts of the wind turbines.

Our project has studied the impact from wind turbines on radar, secondary radar, radio link and passive sensors. The main delivery has been the software supporting tool WTES. This is developed to support the Defence in their treatment of applications for a concession on wind energy development. The project has published eight reports, participated in international forums and has arranged two seminars on wind energy. The seminars had participants from the wind energy developers, public authorities and the Defence.

## Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>7</b>
1.1	Formål	7
1.2	Bakgrunn	7
1.3	Målsetting	7
<b>2</b>	<b>Bemanning</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Arbeidsgruppe for detaljerte studier av påvirkningen på radar fra vindkraftverk</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Wind turbines IMPact on electromagnetic systems – WIMP</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Wind Turbines and Electromagnetic Systems – WTES</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Radar</b>	<b>9</b>
6.1	Falske mål	9
6.2	Constant False Alarm Rate (CFAR)	12
6.3	Clutter Maps	12
6.4	Skyggevirkning	13
<b>7</b>	<b>Radartverrsnitt (RCS)</b>	<b>14</b>
<b>8</b>	<b>Sekundærradar (SSR)</b>	<b>15</b>
<b>9</b>	<b>Passiv sensor</b>	<b>15</b>
<b>10</b>	<b>Radiolinje</b>	<b>16</b>
<b>11</b>	<b>HF spredningseffekter</b>	<b>17</b>
<b>12</b>	<b>Elektromagnetisk utstråling (EMI)</b>	<b>17</b>
<b>13</b>	<b>Feltforsøk</b>	<b>17</b>
13.1	Feltforsøk Smøla	18
13.2	Feltforsøk Nordkapp	18
<b>14</b>	<b>Avbøtende tiltak</b>	<b>19</b>
14.1	Avbøtende tiltak i vindmøller og vindparker	19
14.2	Avbøtende tiltak i radar	20
<b>15</b>	<b>Vindkraftseminar</b>	<b>20</b>
<b>16</b>	<b>EUROCONTROL - Wind Turbine Task Force</b>	<b>20</b>

17	International Energy Assosiation	21
18	NATO	21
19	Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI) og Försvarets materielverk (FMV) - Sverige	22
20	QinetiQ	22
21	BAE	22
22	Rapporter	23
23	Oppsummering	24
	Referanser	25
	Appendix A Akronymer og forkortelser	27
	Appendix B Agenda for vindkraftseminaret 24.11.2005	28
	Appendix C Agenda for Vindkraftseminaret 16.05.2007	29
	Appendix D Radar Cross Section (RCS)	30

## 1 Innledning

Prosjektet startet opp i november 2004 og ble avsluttet 31. mars 2007. De tre påfølgende avsnitt er hentet fra prosjektavtalen.

### 1.1 Formål

Prosjektets formål er å bidra til å fastslå omfanget av og redusere antall konflikter som oppstår mellom utbygning av vindkraft og Forsvarets system som benytter elektromagnetisk stråling (radiobølger).

### 1.2 Bakgrunn

Utbyggingen av vindkraftverk er i full gang i Norge. Dette er en viktig del av satsingen på fornybare energikilder og det er en politisk målsetning at en betydelig utbygging skal finne sted. Imidlertid har det i andre land vist seg at utbyggingen av vindkraft har fått negative konsekvenser for operasjon av system som benytter radiobølger. For Forsvaret omfatter dette blant annet radiolinje, radar og passive system, og det har ført til at forsvaret i flere land har satt strenge restriksjoner for utbygning av vindkraft nær slike anlegg. Denne praksis er også fulgt i Norge, og det har medført at Forsvaret har anbefalt at noen vindkraftprosjekt ikke bør bygges.

### 1.3 Målsetting

For å oppnå prosjektets formål med å redusere antall konflikter som oppstår mellom utbygning av vindkraft og Forsvarets interesser har prosjektet følgende målsetninger:

- Utarbeide modeller som beskriver årsakene til problemene
- Verifisere teoretiske beregninger med feltmålinger
- Foreslå tiltak for å redusere problemene
- Utarbeide et databasert verktøy for å støtte saksbehandlingen

## 2 Bemanning

I løpet av prosjektet har 12 personer arbeidet hel- eller deltid i følgende perioder:

<i>Hans Øhra</i> –	Prosjektleder fra oppstart til 1. oktober 2006, prosjektmedarbeider 1. oktober 2006 – 1. desember 2006.
<i>Bente Jensløkken Meland</i> –	Har jobbet med utviklingen av støtteverktøyene WIMP og WTES fra august 2005, og overtok i tillegg som prosjektleder fra 1. oktober 2006.
<i>Morten Söderblom</i> –	Har jobbet med beregninger av RCS gjennom hele prosjektet.
<i>Jan Hammerstad</i> –	Startet arbeidet med EMI i perioden november 2004 til februar 2005.
<i>Knut Inge Hvidsten</i> –	Jobbet med HF fra prosjektstart og fram til august 2005.

<i>Gudrun Høye</i> –	Har jobbet med studie av skyggevirksomhet og utvikling av modeller til støtteverktøyet WTES fra september 2005 og ut prosjektet.
<i>Eivind Bergh Nilssen</i> –	Har jobbet med implementasjonen av støtteverktøyet WTES i to perioder, juni – august 2006 og januar - mars 2007.
<i>Roald Otnes</i> –	Har jobbet med HF for prosjektet i to perioder, april – august 2006 og oktober – desember 2006.
<i>Bjørn Skeie</i> –	Har jobbet med måleoppsett og praktisk gjennomføring av HF målekampanje mai - juni 2006.
<i>Morten Mjanger</i> –	Har jobbet med implementasjon av støtteverktøyet WTES januar – mars 2007.
<i>Trond Bergh Nilssen</i> –	Sommerstudent 2006.
<i>Guro Svendsen</i> –	Sommerstudent 2006.
<i>Martin Sollien</i> –	Sommerstudent 2006.

### **3 Arbeidsgruppe for detaljerte studier av påvirkningen på radar fra vindkraftverk**

Det ble høsten 2006 klart at det stod igjen en oppfattende oppgave innen detaljerte studier av påvirkningen på ulike radartyper fra vindkraftverk. Det ble klart at denne oppgaven ikke var mulig å løse innen prosjektet i tillegg til de andre oppgavene. Det ble derfor sendt en forespørsel til Sintef. Da heller ikke Sintef hadde kapasitet til å løse denne oppgaven, ble det besluttet å samle en gruppe forskere fra instituttet i et ”Tiger Team”. Gruppen ble sammensatt av seks forskere fra to avdelinger og fire ulike prosjekter, der alle bidro med sin spesialkompetanse. Dette var Stein Kristoffersen, Svein-Erik Hamran, Steffen Tollisen, Trygve Sparr, Aanund Storhaug og Terje Johnsen.

Gruppen har bidratt med studier av tilgjengelig dokumentasjon på kystradar og Sindre II og utviklet modeller av noen av effektene som vil påvirke disse radartypene. Disse modellene er implementert i støtteverktøyet WTES (10) og beskrevet i kapittel 6.

Aanund Storhaug og Steffen Tollisen gjennomførte i februar 2007 et feltforsøk på Nordkapp, for å måle påvirkning fra vindparken Havøygavlen på kystradar Magerøy og Sindre II. Feltforsøket er dokumentert i rapporten (9) og oppsummert i avsnitt 13.2.

### **4 Wind turbines IMPact on electromagnetic systems – WIMP**

Utviklingen av WIMP ble satt ut som oppdrag til Teleplan høsten 2005. WIMP er en tilleggsmodule til MARIA, et kartsystem Teleplan har utviklet for det norske Forsvaret. Programmene MARIA/WIMP benyttes til å plassere vindmøller, vindparker, radarer, radiolinjesystemer og passive systemer i kartet og gir samtidig mulighet til å tilordne parametere til disse objektene. Disse objektene med sine koordinater og parametere blir så lagret som en xml-fil for videre bruk i WTES (kapittel 5). Programmet er beskrevet i rapporten (1).



## 5 Wind Turbines and Electromagnetic Systems – WTES

Programmet WTES er utviklet i prosjektet og implementert i LabVIEW 8.2. WTES er beskrevet i rapporten (10). WTES er et støtteverktøy til bruk av Forsvaret ved saksbehandling av konsesjonssøknader for vindkraftutbygging. Verktøyet gir ingen endelige svar på konsesjonssøknaden, men skal hjelpe saksbehandleren i prosessen fram til et endelig svar. Spesielt må operative vurderinger komme i tillegg. WTES utfører beregninger for fem ulike typer elektromagnetiske systemer:

- Radar
- Sekundærradar (SSR)
- Passive sensorer
- Radiolinje
- HF

Grunnlagsarbeidet for programmet finnes i det innledende studiet fra 2003 (5). Det arbeidet som er utført i prosjektet på de ulike områdene er beskrevet i kapitlene nedenfor og i egne rapporter.

## 6 Radar

Den innledende studien (5) la et godt grunnlag for arbeidet med radar. Det videre arbeidet med problemstillingene i prosjektet er beskrevet i de følgende kapitlene. Teorien er også i stor grad beskrevet i appendiks A-H i WTES-rapporten (10).

Vindmøller kan påvirke radar på flere måter. Denne rapporten ser på fire effekter:

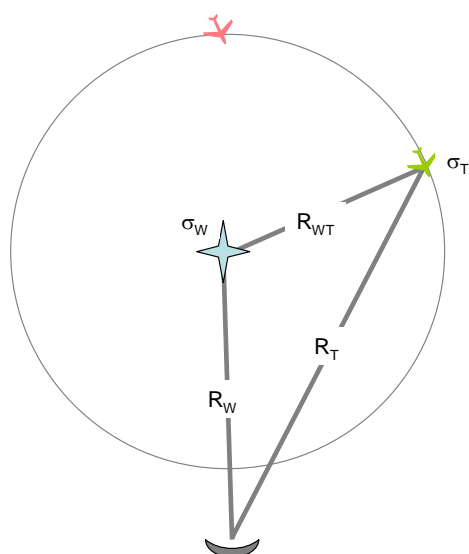
- Falske mål som kan opptre pga direkte tilbakespredning fra vindmøllene eller refleksjoner fra ekte mål via vindmøllene.
- Påvirkning på radarens måldeteksjonsevne fordi vindmøllene resulterer i økt clutternivå i CFAR-prosessering
- Påvirkning på radarens måldeteksjonsevne fordi vindmøllene resulterer i økt clutternivå i cluttermap-prosessering
- Skyggeeffekter fra vindmøllene

### 6.1 Falske mål

Falske mål som skyldes direkte tilbakespredning fra vindmøllene er et vanlig fenomen for radarer som har vindmøller i synsfeltet sitt. Disse målene opptre typisk i området over eller nær vindmølleparken, og skyldes refleksjoner fra de roterende delene på vindmøllene.

Falske mål som skyldes refleksjoner via vindmøllene kunne i teorien opptre over et større område, og dermed resultere i et større problem for radaren. Dette er illustrert i Figur 6.1. Denne situasjonen opptre når radaren ser mot vindmøllene og radarsignalet spres via vindmøllene (blå stjerne,  $\sigma_w$ ) mot et ekte mål (grønt mål,  $\sigma_T$ ), og reflekteres tilbake via vindmøllene mot radaren.

Resultatet blir da et falskt mål i posisjonen til det rosa målet i figuren, hvis refleksjonen via vindmøllene er sterk nok.



$$P_{RT} = \frac{ERP}{(4\pi R_T^2)^2} \sigma_T$$

$$P_{RWT} = \frac{ERP}{4\pi R_W^2} \sigma_W \frac{1}{4\pi R_{WT}^2} \sigma_T \frac{1}{4\pi R_{TW}^2} \sigma_{TW} \frac{1}{4\pi R_W^2}$$

$$= \frac{ERP \cdot \sigma_T \sigma_{WT}^2}{(4\pi)^4 R_W^4 R_{WT}^4}$$

$$\frac{P_{RWT}}{P_{RT}} = \frac{R_T^4}{(4\pi)^2 R_W^4 R_{WT}^4} \sigma_{WT}^2 = \frac{R_T^4}{R_{WT}^4} \frac{\sigma_{WT}^2}{(4\pi)^2 R_W^4}$$

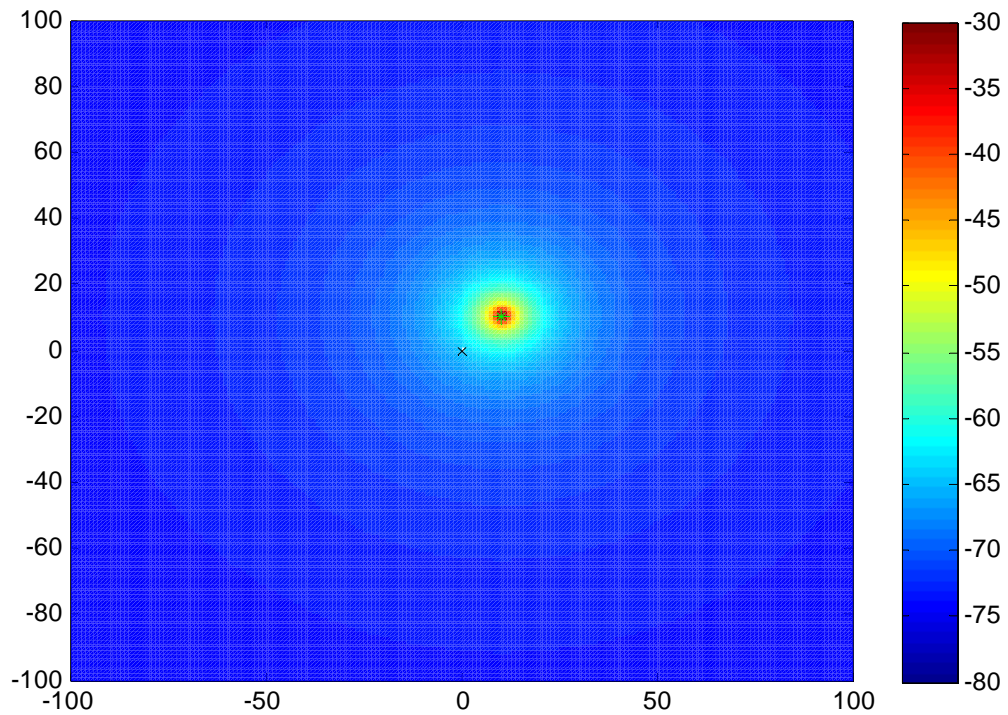
Figur 6.1 Geometri og likninger ved falske mål grunnet dobbeltrefleksjon.

Figur 6.1 inneholder også likningene som regner ut den mottatte effekten fra dobbeltrefleksjoner via vindmøllene relativt til den mottatte effekten fra det ekte målet når radaren ser rett på det,  $P_{RWT}/P_{RT}$ . Dette gir et mål på hvor sterkt et falsk mål kan bli fra et gitt ekte mål.

$P_{RWT}/P_{RT} = -30$  dB betyr at et ekte mål med radartverrsnitt på 30 dBsm ville resultere i et falskt mål bak vindmøllene på 0 dBsm. En fornuftig terskel for  $P_{RWT}/P_{RT}$  kunne være -50 dB, noe som betyr at et ekte mål med radartverrsnitt på 10.000 m<sup>2</sup> ville resultere i et falskt mål på 0,1 m<sup>2</sup> i en annen posisjon.

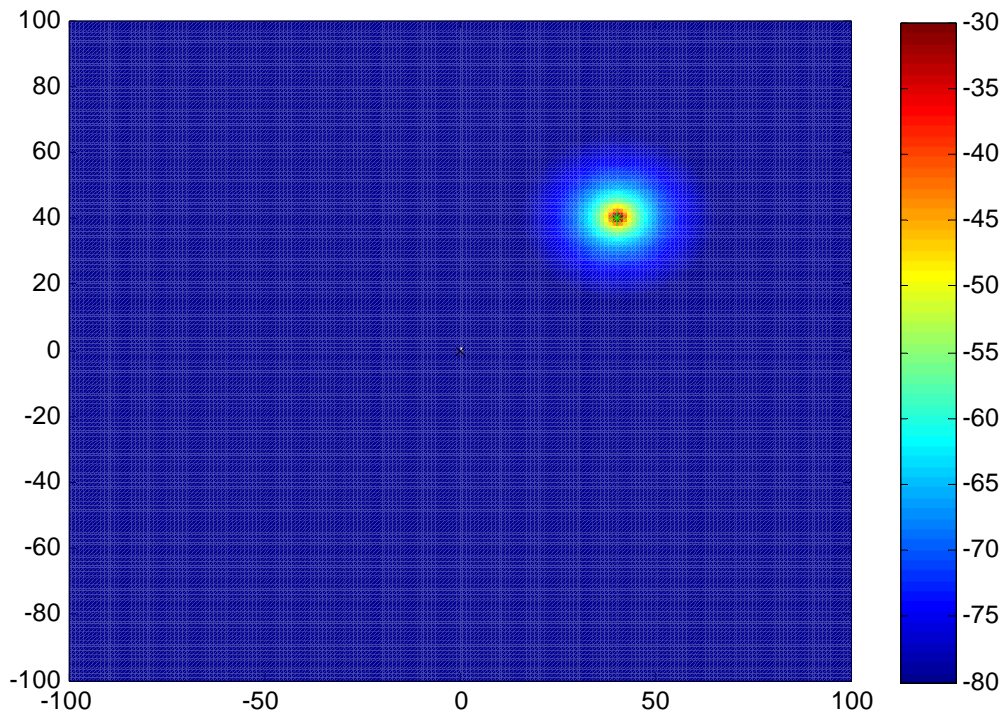
Likningene over tar ikke hensyn til at radarer ofte justerer følsomheten sin som funksjon av avstand til målet, såkalt sensitivity time control (STC). Avstanden til det falske målet som genereres er alltid større enn avstanden til det ekte målet som er opphav til det falske målet, så effektforholdet i figuren bør justeres med en passende faktor. Hvis vi antar perfekt  $R^4$  STC, så må  $P_{RWT}/P_{RT}$  multipliseres med  $(R_W + R_{WT})^4/R_T^4$ .

Figur 6.2 viser beregninger for likningene over med  $\sigma_w = 50$  dBsm. Radarposisjonen er i (0,0) og vindmølleparken er i posisjon (10, 10) km. Figur 6.2 viser at bare mål innenfor noen få kilometer fra vindmøllene kan generere falske mål over terskelen på -50 dB.



Figur 6.2 Relativ mottatt effekt fra dobbeltrefleksjon via vindmølleparken, 16 ikke-koherent summerte vindmøller med 50 dBsm radartverrsnitt på 14,1 km avstand fra radaren.

Figur 6.3 viser den samme situasjonen, men nå med vindmøllene på lenger avstand; (50, 50) km. Som vi ser er området med nivå over -50 dB terskelen av tilsvarende størrelse. Den lave avhengigheten av avstand skyldes STC.



Figur 6.3 Relativ mottatt effekt fra dobbeltrefleksjon via vindmølleparken, 16 ikke-koherent summerte vindmøller med 50 dBsm radartverrsnitt på 70 km avstand fra radaren.

De ovenstående beregningene indikerer at falske mål som opptrer pga dobbeltrefleksjoner via vindmøllene vil ha begrenset omfang. Kun svært store ekte mål vil resultere i falske mål som er store nok til å gi deteksjoner, og de falske målene vil alltid opptre i nærheten av vindmøllene.

## 6.2 Constant False Alarm Rate (CFAR)

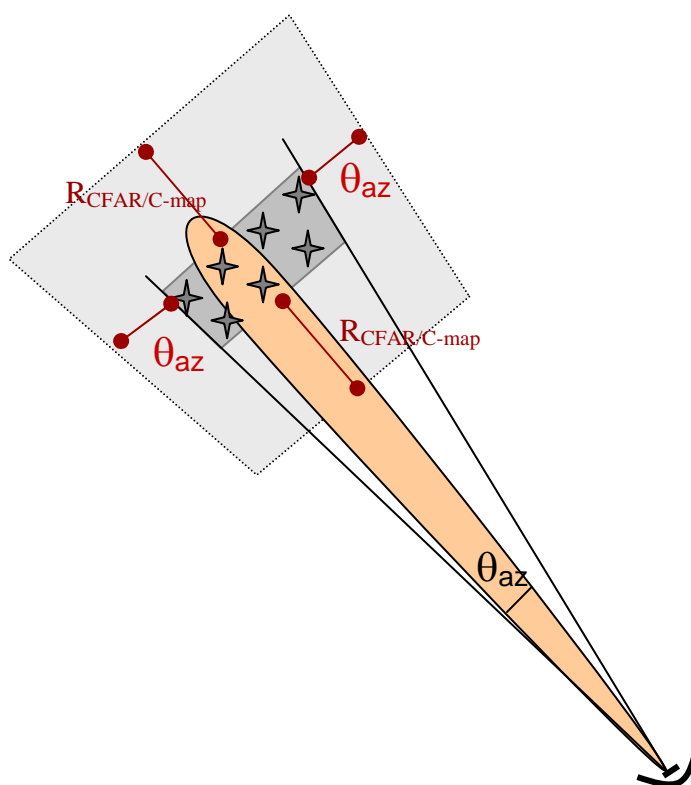
Constant False Alarm Rate (CFAR) deteksjon er en vanlig måte å plukke ut mål på for en radar. Enkelt forklart, så benytter en CFAR-detektor en rekke oppløsningsceller rundt en gitt testcelle (der det skal avgjøres om det er et mål eller ikke) til å estimere bakgrunnsnivået. Testcella (og muligens noen "guardceller") er ikke med i bakgrunnsestimaten. Detektoren benytter en terskel som ligger en passende avstand over bakgrunnsnivået i effekt til å detektere et mål. Dersom verdien i testcella overstiger terskelen, så deklarerer en deteksjon. Denne deteksjonen inngår i videre prosessering.

En vindmølle påvirker denne prosessen ved å øke bakgrunnsnivået i detektoren dersom refleksjonen fra mølla er sterkere enn clutterbakgrunnen forøvrig. Dette reduserer radarens deteksjonsevne i et område. Hvor stort dette området er, avhenger av den konkrete implementasjonen av CFAR-detektoren.

## 6.3 Clutter Maps

Clutter Map er en metode som radarer benytter for å undertrykke kraftige refleksjoner fra clutter som befinner seg på kjente steder. Typiske eksempler er fjellsider, byer eller veier. Slike

clutterkilder er ofte kraftige, og kan trenge gjennom radarens normale deteksjonsprosessering. Men siden kildene er på kjente steder kan man ta hensyn til dem ved å sette deteksjonsterskelen i de relevante oppløsningscellene, eller rett og slett ignorere deteksjoner fra akkurat disse stedene. Et slikt kart kan bygges opp automatisk (gjennom integrasjon over lang tid) eller settes manuelt. En vindmøllepark er et typisk eksempel på clutter som kan utløse behov for clutter map funksjonalitet. Vanligvis vil dette kartet benytte celler som er større enn oppløsningscellene til radaren. På lignende vis som for CFAR, blir effekten at radarens følsomhet går ned i et område som svarer til de clutter map cellene som har vindmøller i seg, igjen forutsatt at disse er sterkere enn clutterbakgrunnen forøvrig. Denne minskede deteksjonsevnen vil være merkbar i et område som svarer til cellene som brukes i clutter map funksjonaliteten. Figur 6.4 viser hvordan størrelsen på det påvirkede området kan estimeres.



Figur 6.4 Illustrasjon av området rundt en vindmøllepark der deteksjonsevnen går ned. CFAR og clutter map gjør at området strekker seg et stykke utenfor parken.

Både CFAR og clutter map medfører følgelig at radarens deteksjonsevne går ned i et område i og rundt vindmølleparken. Akkurat hvor mye deteksjonsevnen svekkes er avhengig av radarens systemparametere og forskjellen mellom clutternivå med og uten vindmøller.

## 6.4 Skyggevirkning

Effekten av skyggevirkning bak vindmøller er behandlet i en separat rapport (3).

Vindmølla modelleres som en uendelig lang ledende sylinder med radius lik vindmølletårnets maksimale radius. Det antas at vindmølla befinner seg i stor avstand fra radaren. Sammenlikning med andre arbeider viser at denne modellen kan brukes som en god tilnærming.

Beregningene har vist at vi vil få dannet en skygge rett bak vindmølla som er smal (ca 10 m bred) og ikke særlig dyp. Ved lave frekvenser (100 MHz) vil skyggen være bredere og mindre dyp; 28 m bred og 3 dBV/m dyp ved en avstand på 100 m bak vindmølla, mens for høyere frekvenser (15 GHz) vil skyggen være smalere og dypere; 7 m bred og 19 dBV/m dyp ved samme avstand. Skyggen blir generelt bredere og mindre dyp med økende avstand fra vindmølla. Når avstanden er større enn 10 km vil skyggen være mindre enn 3 dBV/m for alle relevante frekvenser.

Dersom flere vindmøller står etter hverandre på en rekke parallelt med radarens synsretning, så vil den resulterende totalskyggen være smal, men dypere enn skyggen fra en enkelt vindmølle. Dersom vinkelen mellom vindmøllerekka og radarens synsretning øker vil skyggen bli bredere og mindre dyp. Generelt kan skyggevirksomhet bak en vindmølle behandles uavhengig av andre vindmøller i området, så lenge vindmøllene ikke står langs en linje som går tilnærmet parallelt med radarens synsretning.

Beregningene basert på den uendelig lange ledende sylindremodellen kan være svært tidkrevende, spesielt for høye frekvenser. For å redusere beregningstiden ble derfor et nytt sett med likninger utledet. Analysene bekrefter at det nye likningssettet vil kunne benyttes som en god tilnærming til å beregne bredden og dybden til skyggen bak vindmølla, og at beregningstiden med dette vil bli vesentlig redusert.

## 7 Radartverrsnitt (RCS)

WTES trenger data om radarsignaturen til vindmøller for å kunne analysere hvordan de påvirker radarstasjoner. En måte å karakterisere radarsignatur på er såkalt radartverrsnitt (RCS) som er et mål for hvordan radarbølger spres i en gitt retning. RCS er definert som en spredningskoeffisient beregnet i fjernfeltet til belyst radar (dvs plane innkommende bølgefronter). RCS avhenger således både av målets (møllens) form, størrelse og konstruksjonsmateriale så vel som radarbølgelengde, polarisasjon mm.

I tilknytning til WTES er det generert en database med simulerte RCS-verdier for ulike modeller av møller. Simuleringene er utført med verktøyet SPECTRE som er FFIs standardverktøy for RCS simulering. Det er generert monostatisk RCS for to ulike modeller.

Beregningene er basert på fysikalsk optikk med tillegg av multiple refleksjoner mellom ulike deler av modellen. For å kartlegge radarsignaturen, er det for et stort antall elevasjonsvinkler beregnet RCS som funksjon av asimutvinkel og frekvens. I tillegg har prosjektet startet oppbygging av en database med bistatiske RCS verdier for de samme modellene.

I dette prosjektet er det lagt vekt på å fremstille realistiske modeller av møller i form av fasetterte flatenett som tar med både tårn, nacelle og en detaljert gjengivelse av vingenes dobbeltkrumme form. Prosjektet har samarbeidet med QinetiQ som har stor kompetanse på møllemodellering. På oppdrag fra Vindkraftprosjektet har QinetiQ levert et verktøy, *Windmesh*, som genererer møllemodeller basert på valg av ytre dimensjoner på møllene (se også kapittel 20).

Ved å angi den høyeste radarfrekvensen som møllen skal simuleres for, kan man optimalisere egenskapene til nettet av fasetter som representerer møllens ytterflate. Det er fremstilt to ulike generiske møllemodeller som er utgangspunkt for RCS beregningene (se appendiks F i WTES rapporten (10)).

Modellene representerer generiske møller uavhengig av spesifikke industrielle løsninger. De ansees å være representative i utforming. Ved å simulere hele møllen som en metallisk, reflekterende flate, ser en bort fra bidrag fra indre spredningskilder i f eks nacellen. Beregningene gir derfor et konservativt estimat for radarsignaturen. Resultatene av RCS beregningene er i seg selv interessante. De viser at bidrag fra tårnet dominerer fullstendig for visse elevasjonsvinkler, mens vingene gir lavere, men signifikant, bidrag for de fleste innsynsvinkler. Som ventet er det ubetydelig forskjell på HH og VV polarisasjoner.

RCS simuleringene er beskrevet i egen rapport (4).

## 8 Sekundærradar (SSR)

Prosjektet har tatt utgangspunkt i en rapport fra Sintef (2). I WTES beregnes signalstyrken ved et mål som resultat av en interrogering fra SSR via vindkraftverket. Dersom denne er større enn sensitiviteten i transponderen, legges det til grunn at denne vil svare. Dermed vil sekundærradar få et svar som vil være opphav til et falskt mål. Dette er beskrevet i kapittel 8 og appendiks I i (10).

I første versjon av WTES ble det for beregning av bistatisk RCS benyttet en kjegle som modell for møllen. Dersom man befant seg i nærfeltet til møllen, ble kjeglene delt opp i biter som så tilfredstilte krav til fjernfelt. Dette er beskrevet i appendiks I i WTES rapporten (10).

Ved en første sammenligning av disse RCS verdiene med verdier simulert i SPECTRE (kapittel 7) ble de teoretiske verdiene ikke verifisert. Da det ikke var tid igjen i prosjektet til en nærmere studie av hvordan denne modellen kunne forbedres, ble det valgt å benytte en sylinder istedenfor kon. Nærfeltsberegningene ble erstattet av bare fjernfeltberegninger. Ligningen som nå blir benyttet er beskrevet i Appendix D i denne rapporten.

## 9 Passiv sensor

Passiv sensor benyttes her om passive mottakere på frekvenser over HF området. Eksempel på en slik sensor kan være en ESM-sensor (Electronic Support Measures). I WTES beregnes signalstyrken på et signal sendt fra en kilde når det mottas i sensoren via en vindpark. Dette er beskrevet i kapittel 9 og appendiks K i (10). Beregning av bistatisk RCS ble basert på samme modell som for SSR. Også her har vi byttet til sylindermodell som beskrevet i kapittel 8. Passive sensorer i HF området er beskrevet i kapittel 11 og rapportene (7) og (8).

## 10 Radiolinje

Prosjektet har selv ikke gjennomført studier på radiolinje, men vi har basert oss på arbeider gjort av andre. De land som i hovedsak har arbeidet med radiolinje er Sverige og Storbritannia. I Sverige er det utført studier og omfattende målinger, som bl a viser at avbruddstiden for en radiolinje øker vesentlig ved utplassering av vindmøller i eller i nærheten av en radiolinje. Målingene foretatt av Försvarets materielverk viser at avbruddtider i størrelsesorden minutter uten vindkraftverk, vil øke til størrelsesorden timer med vindkraftverk (21).

Storbritannia har gjennomført studier, som bl a er oppsummert i et paper av D F Bacon (14). Han redegjør i sitt paper for hvordan man kan beregne eksklusjonssoner rundt en radiolinje for å unngå avbrudd og korrupsjon av signalet ved overføringen på linjen. D F Bacon deler eksklusjonssonen inn i tre deler:

- Nærfelt
- Diffraksjon
- Refleksjon/spredning

Nærfeltet beregnes som et kuleformet område rundt sender og mottaker. Diffraksjon beregnes som en 2. Fresnel-soner rundt radiolinjestrøket. Utenfor Fresnel-sonen unngås korrupsjon av signalet ved at forskjellen i gangveien direkte mellom radiolinjestasjonene og gangveien via vindmøllen er større enn bølgelengden på signalet. Refleksjon/spredning er avhengig av krav til carrier-to-interference forhold for radiolinjen, og vil ha størst betydning i nærheten av sender og mottaker.

I rapportene QinetiQ har utarbeidet for EUROCONTROL (12)(13) ser man også på hvilke mulige løsninger man har ved en eventuell konflikt mellom vindmøller og radiolinjer:

Endringer for vindmøllene:

- Omklassere vindmølle
- Redusere RCS for vindmøllene

Endringer i radiolinjen:

- Øke sendereffekt
- Forbedre direktiviteten på radiolinjen
- Omklassere en eller begge radiolinjestasjonene
- "Dog-legging" av radiolinjen forbi vindmøllen(e)

Konklusjonen er at når det står en vindmølle i en radiolinjestråke vil dette øke tiden hvor forbindelsen er brutt. Området rundt radiolinjestasjonen og radiolinjestråken utgjør imidlertid et relativt lite område, slik at radiolinjeproblemene lar seg ofte løse.



Prosjektet har tatt utgangspunkt i artikkelen til D F Bacon (14) i støtteverktøyet WTES. Dette er beskrevet i kapittel 10 og appendiks J i (10).

## 11 HF spredningseffekter

Prosjektet har undersøkt spredningseffekter fra vindkraftverk på HF-frekvenser (under 30 MHz). På dette området eksisterer det lite åpen litteratur, det eneste som har framkommet er en rapport fra FOI (Totalförsvarets Forskningsinstitut, Sverige) som *modellerer* spredningseffekter i HF-området (22). Såvidt vi vet har det ikke tidligere blitt utført målinger av dette.

I juni 2006 ble det gjennomført en målekampanje ved vindkraftverket på Smøla for å få erfaring med HF spredningseffekter. Dette arbeidet ble gjort i samarbeid med professor Jens Hjelmsstad ved NTNU, som var engasjert av utbyggersiden v/Statkraft AS. Arbeidet er oppsummert i (8). De observerte spredningseffektene var kraftigere enn man hadde ventet på forhånd. Se forøvrig avsnitt 13.1

Det ble etter dette utviklet en matematisk prediksjonsmodell for HF spredningseffekter, som er beskrevet i (7). Denne modellen er inkludert i WTES. Det er stor usikkerhet forbundet med en viktig inngangsparameter til modellene, nemlig RCS ved HF-frekvenser for en enkelt vindturbin. Verdier ekstrapolert fra målekampanjen på Smøla er opptil 30 dB høyere enn det numeriske modeller fra FOI tilsier. Det kan imidlertid ikke konkluderes endelig om dette uten å utføre flere målinger, da mengden måledata fra Smøla er relativt begrenset.

Arbeidet innen HF spredningseffekter er også oppsummert i en artikkel som vil bli presentert ved Nordic HF Conference 2007 (15).

## 12 Elektromagnetisk utstråling (EMI)

Det er også utført en studie innen utstrålt EMI fra vindkraftverk i frekvensområdet under 30 MHz. Dette arbeidet er også beskrevet i (7). Det er utviklet en prediksjonsmodell som tar utgangspunkt i maksimalt tillatt elektromagnetisk utstråling fra en enkelt vindturbin, og beregner total feltstyrke forårsaket av et antall vindturbiner ("kumulativ effekt") i en posisjon et antall km fra vindparken.

Prosjektet har ikke klart å identifisere noen relevante standarder for tillatt elektromagnetisk utstråling fra vindturbiner ved frekvenser under 30 MHz, men prediksjonsmodellen utviklet i prosjektet kan brukes til å bli enige om utstrålingsgrenser i spesifikke tilfeller.

## 13 Feltforsøk

Prosjektet har gjennomført tre feltforsøk:

- Flytest av jamming våren 2006 (11)
- Feltforsøk HF sommeren 2006 (avsnitt 13.1 og (8))
- Flytest radar vinteren 2007 (avsnitt 13.2 og (9))

Disse feltforsøkene er beskrevet i egne rapporter ((8), (9) og (11)), og to blir kort oppsummert i avsnittene nedenfor.

### **13.1 Feltforsøk Smøla**

Det ble gjennomført en målekampanje på Smøla for å få erfaring med HF spredningseffekter fra vindkraftverk (se også kapittel 11). Arbeidet ble gjort i samarbeid med professor Jens Hjelmsstad ved NTNU, og måleresultatene ble analysert og oppsummert i (8). Executive summary fra denne rapporten, som FFI og Hjelmsstad ble enige om, er som følger:

”A large number of onshore and offshore wind farms are currently being planned and commissioned. Many countries have well established procedures for assessing the impact of wind farms on society and natural environments. Some aspects regarding their influence on direction finding and communication systems have however not been studied extensively and guidelines are not in place.

This report considers the influence by scattering effects of wind farms on HF radio communication and direction finding systems. Theoretical studies have been performed, as well as a measurement campaign at the Smøla wind farm (with 68 wind turbines installed). The transmitter was located on a boat in order to traverse different transmitter positions, and the receiver was a two-element interferometer with high-quality measurement equipment. The measurement frequencies were in the range 2-10 MHz where the scattering effects by theoretical considerations are expected to be maximal.

When the transmitter-receiver path passes over or near the wind farm, the experiments have uncovered larger than expected phase fluctuations for certain locations. When the transmitter-receiver path is outside the wind farm (2-15 degrees away from wind farm boundary) no effects likely to be attributed to the wind farm were observed in the experiments.

The overall conclusion of this study is that specific care and consideration should be taken when wind farms are positioned near the line of sight of HF communication and direction finding services utilizing potential ground wave paths (up to 50 km range over land and 500 km over sea). To quantify and confirm the observed effects, further measurements would be required. For non-line of sight (sky wave) arrangements influences are expected to be weaker, but further studies would be required in order to identify possible sky wave effects, in particular for transmitters behind the wind farm.”

### **13.2 Feltforsøk Nordkapp**

Som en del av FFI-prosjekt 1013 ”Vindkraft” ble det besluttet å gjennomføre et lite eksperiment

ved SINDRE II radaren i Honningsvåg og kystradaren ved SSTN Magerøy. Dette eksperimentet bestod av overflygninger av Havøygavlen vindpark med P-3C Orion maritimt overvåkningsfly (MPA). Havøygavlen ligger 40-50 km vest for de to radarstasjonene. I tillegg ble det utført simuleringer ved SINDRE II radaren ved bruk av programvare fra produsenten. Alt i alt så ble det gjennom eksperimentet ikke avdekket noen store effekter fra vindparken på radarene. Feltforsøket er beskrevet i (9).

## 14 Avbøtende tiltak

De avbøtende tiltakene kan deles inn i to hovedgrupper; de som går på endringer i vindmøller/-parker og de som går på endringer i annet utstyr som radar.

### 14.1 Avbøtende tiltak i vindmøller og vindparker

- Plassering
- Størrelse
- Formgiving (Stealth)

#### Plassering:

Det enkleste vil være der det er tilstrekkelig å flytte en eller flere av møllene i parken. Dette er likevel ikke rett fram, fordi de ulike effektene på det elektromagnetiske utstyret stiller ulike krav til optimal plassering. For effekter på HF vil det være en fordel med tilfeldig plassering av møllene innen vindparken, mens det for jamming vil være en fordel om møllene plasseres radielt ut fra radaren. Det vil derfor være nødvendig å først analysere hvilke(t) system(er) som påvirkes i størst grad, for deretter å se på plasseringen i forhold til dette. Terrengets beskaffenhet spiller selvfølgelig også en stor rolle her. Det vil derfor ikke være mulig å gi en generell anbefaling på plassering av møllene.

#### Størrelse:

Reduksjon av størrelsen på en eller flere av møllene i en vindpark kan bidra til reduksjon i effektene på Forsvarets elektromagnetiske systemer. Redusert fysisk størrelse vil også kunne føre til redusert RCS og en mindre vindmølle vil eventuelt kunne skjules bedre av terrenget sett fra radar.

#### Formgiving (Stealth):

Vindmøllenes RCS (se kapittel 7) har avgjørende betydning for påvirkningen på Forsvarets elektromagnetiske systemer, og en reduksjon av denne vil være en fordel. En mulig løsning for å redusere RCS for møllene er å kle disse med radarabsorberende materialer. Det vil nok likevel i de fleste tilfeller ikke være mulig å redusere RCS nok til å redusere problemene signifikant. Det er gjort en del arbeider på dette, bl a vist i referanse 20, 29 og 36 i (12). Prosjektet har ikke gått nærmere inn på denne problemstillingen, utover det som er beskrevet i (4).

## 14.2 Avbøtende tiltak i radar

- Plassering
- ”Gap filler”
- Signalbehandling

### Flytting eller Gap filler:

Reduksjon av problemene kan i noen tilfeller oppnås ved flytting av eksisterende radar. Et alternativ er en tilleggsradar – gap filler – plassert slik at den utfyller eksisterende radar der denne påvirkes av vindparken.

### Signalbehandling:

Et alternativ til flytting eller ny radar er oppgradering av eksisterende radar. To av aktørene på dette markedet leverer systemer med ulik teknologisk løsning av problemet.

BAE Systems leverer en Advanced Digital Tracker som er en tilleggsmodul som plasseres etter radarens egen signalprosessering (se kapittel 21 og (17)).

Sensis baserer seg derimot på å bytte ut den eksisterende signalprosesseringen i radaren med sin egen signalbehandling (18). Denne løsningen ble nylig presentert på IEEE Radar 2007 (19).

## 15 Vindkraftseminar

Prosjektet arrangerte 24. november 2005 et FFI-seminar ”Vindkraft og Forsvarets elektromagnetiske systemer”. Seminaret hadde 35 eksterne deltagere og 15 utbyggere var representert. I tillegg deltok NVE, Olje- og energidepartementet og Forsvaret. Agenda finnes i Appendix B.

Prosjektet arrangerte et nytt seminar 16. mai 2007 - ”Vindkraft og Forsvarets elektromagnetiske systemer”. Seminaret hadde denne gang 23 eksterne deltagere. Av disse var 8 utbyggere, 3 konsulenter samt NVE og Forsvaret. Agenda finnes i Appendix C.

## 16 EUROCONTROL - Wind Turbine Task Force

EUROCONTROL er en stor organisasjon med 35 medlemsland som er ansvarlig for Safety of Air Operations i Europa. Organisasjonen dekker både sivil og militær luftfart og leverer en mengde tjenester som sørger for effektiv og sikker utførelse av luftfart. I et mindre område i Europa utfører de også den praktiske luftromskontrollen for store høyder, dette området skal utvikles til også å dekke sentral-Europa.

Selv om EUROCONTROL tok opp problemstillingene med vindmøllers innvirkning på radar på et møte 31 mars 2004, var det først i desember 2005 det ble igangsatt et grundigere arbeide for å komme fram til harmoniserte retningslinjer for sikre at sikkerheten til sivil luftfart blir ivaretatt.

Arbeidsgruppen Wind Turbine Task Force (WTTF) ble opprettet under Surveillance Teams. Prosjektet har deltatt på 5 møter i WTTF.

QinetiQ vant anbudsutlysning fra WTTF om utarbeidelsen av to dokumenter basert på fire arbeidspakker. Den første rapporten, "Wind farm impact assessment techniques and mitigation measures" eller D1 (12), ble levert i desember 2006. Denne rapporten dekker to av arbeidspakkene og beskriver de ulike problemstillingene og hva som finnes av litteratur på området pr i dag. Den andre rapporten, "Assessment Methodology to Determine the Impact of Wind Turbines on ATC Surveillance Systems" eller D2 (13), ble levert i februar 2007. Denne rapporten dekker de to siste arbeidspakkene og beskriver metoder for å avbøte de ulike problemstillingene og gir også en oversikt over de dataverktøyene som finnes pr i dag.

Prosjektet har gitt to presentasjoner i WTTF, Hans Øhra presenterte prosjektet i første møte og Bente Jensløyken Meland presenterte støtteverktøyet WTES i tredje møte. Gjennom deltagelsen i WTTF har vi fått innsikt i mye av det som foregår i de ulike europeiske landene i forbindelse med vindkraftutbygging. Det har også gitt tilgang til mye dokumenter og rapporter gjennom et felles internettarkiv for gruppen.

## 17 International Energy Assosiation

FFI deltok 18.-19. mars 2005 på en konferanse i regi av International Energy Assosiation. Deltagere fra flere land la fram sine erfaringer og synspunkt på problemstillingene. Det var bred enighet om at et bredt internasjonalt samarbeid er viktig å avklare og at problemene må løses.

IEA arrangerte en ny konferanse i mars 2007, men denne gang uten deltagelse fra prosjektet.

## 18 NATO

UK MOD arrangerte 30. november – 1. desember 2005 et møte i London om vindkraft-problemstillingen for NATO + PfP nasjoner.

Storbritannia har lenge hatt Europas strengeste regler for vurdering av vindkraftverkernes innvirkning på radar. Det er også Storbritannia som har utført flest arbeider for å forstå problemstillingen og finne løsninger på problemene.

Dette møtet var en oppfølging til et tilsvarende møte arrangert av International Energy Assosiation (IEA) i mars 2005 (se kapittel 17). Følgende nasjoner var representert: NATO, Storbritannia, USA, Tyskland, Nederland, Østerrike, Hellas og Norge. USA, Hellas og Østerrike var nye deltagere, og det var interessant hvordan USA nå tar dette på alvor. Alle landene (uten Hellas) gav en oversikt over hvordan vindmøllesøknadene ble behandlet i hvert land, hvilke problemer man så, militære erfaringer med problemstillingen og de arbeidene som ble utført.

Møtet gav en god oppdatering på status og arbeider som er gjennomført. Spesielt var det interessant å diskutere framgangene i Storbritannia.

I NATO er det nå igangsatt en RTO SET-128 RTG "Impact of wind Turbines on Radar", med første møte i juni 2007. FFI deltok initielt, men pga avsluttet prosjekt vil andre i Forsvaret følge opp denne gruppen.

## **19 Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI) og Försvarets materielverk (FMV) - Sverige**

Prosjektet hadde et utstrakt samarbeid med Sverige i oppstartfasen. Denne kontakten ble tatt noe opp igjen høsten 2006.

Prosjektet og medlemmer av Forsvarets vindkraftgruppe besøkte Sverige (FOI og FMV) 12. mai 2005. Det blir vist stor åpenhet fra svensk side, og de stilte både rapporter og programvare til disposisjon for oss (20)(21)(22).

Prosjektet hadde 20. oktober 2006 et nytt møte med FOI og FMV, hvor status for begge nasjoner ble lagt fram. I Sverige er arbeidet med vindkraft igjen trappet opp, og de planlegger nye studier og feltmålinger i 2007.

## **20 QinetiQ**

QinetiQ utfører arbeider innen vindkraft og radar både for myndighetene og vindkraftutbyggerne i Storbritannia. De har sett spesielt på radartverrsnittet til vindmøllene og gjennom simuleringer og målinger har de opparbeidet god forståelse på radartverrsnittet til vindmøllenes tårn, nacelle og vinger. QinetiQ arbeider også med utvikling av vinger med lavt radartverrsnitt.

QinetiQ har også modellert hvordan radarens Moving Target Indicator (MTI) fungerer, og det viser seg, som forventet, at vindmøllens vinger (når de roterer) vil slippe gjennom MTI filteret. I tillegg har QinetiQ også studert innvirkningen på Sekundærradar (SSR/IFF).

Prosjektet hadde møte med QinetiQ 29. september 2005 i Great Malvern, UK. QinetiQ har utarbeidet et verktøy, Windmesh, som prosjektet har benyttet i sine modelleringer av radartverrsnittet til vindmøllen (se også kapittel 7).

## **21 BAE**

BAE Systems (tidligere AMS og Marconi) er ett av firmaene i Storbritannia som har arbeidet for å løse interessekonfliktene mellom vindkraftutbygging og radar. De har spesielt sett på radartverrsnittet til vindmøllene og hvordan radarsystemene reagerer på det tilbakespredte signalet.

Prosjektet hadde møte med BAE 2. desember 2005 i Cowes, Isle of Wight, UK.

Møtet gav et godt innblikk i de arbeidene som er gjort for å forstå tilbakespredning fra vindmøllenes tårn, nacelle og vinger. Basert på målinger har de utviklet en forståelse av hvordan refleksjonene påvirker signalbehandlingen i radaren, og de har ved hjelp av testflygninger vist flere effekter som oppstår i radarens signalbehandling. Dette er i overensstemmelse med de antagelser prosjektet har hatt.

Radarene er ikke perfekte instrumenter; et stort antall teknikker (antenner med lave sidelover, Side lobe blanking (SLB), Sensitivity Time Control (STC), Doppler prosessering (MTI, RGPD), Constant False Alarm Rate (CFAR), Clutter Map (CM) og tracking) er tatt i bruk for å forbedre radarens evne til å detektere mål uten at operatørene ser for mange falske mål. Selv om disse teknikkene normalt hjelper operatørene kan de under visse omstendigheter også produsere uheldige effekter. Vindmøllene representerer større mål enn vanlige luftmål og det har vist seg at teknikkene ikke er tilstrekkelig for å fjerne falske mål og at noen av teknikkene skjuler de svakeste målene. BAE Systems har sett på mulighetene til å forbedre teknikkene og de har nå to løsninger: Forandre signalbehandling, deteksjon og tracking i radaren (hvis mulig) eller å benytte en nyutviklet Advanced Digital Tracker (ADT) som settes inn etter radarens signalbehandling. BAE anslår kostnadene for å gjennomføre disse teknikkene til å være over de 20Mkr som Forsvaret har anslått.

BAE Systems nye militære radar AR327 Commander SL og -SM har innebygd teknikker som i stor grad skal redusere problemene med vindmøller.

## 22 Rapporter

Prosjektet har gitt ut 7 rapporter og et notat:

1. *Otnes Roald, Hjelmstad Jens (2006):* Observability at HF direction finding sites of scattering from wind farms - measurements at Smøla 2006, FFI/RAPPORT-2006/02701
2. *Otnes, Roald (2007):* Modelling of Electromagnetic Influence from Wind Farms at Frequencies below 30 MHz - Interference and scattering, FFI/RAPPORT-2007/00086
3. *Meland B J, Nilssen E B, Høye G, Mjanger M, Kristoffersen S (2007):* Wind Turbines and Electromagnetic Systems (WTES) - Software documentation, FFI/RAPPORT-2007/00833, Unclassified
4. *Bente Jensløyken Meland, Hans Øhra (2007):* Windfarm Impact on Electromagnetic Systems (WIMP) – Software Documentation, FFI/RAPPORT-2007/00832
5. *Steffen Tollisen, Aanund Storhaug (2007):* Wind farm impact assessment on radars in the North-Cape area, FFI/NOTAT-2007/00793, Confidential
6. *Gudrun Høye (2007):* Electromagnetic shadow effects behind wind turbines, FFI/RAPPORT-2007/00842
7. *Morten Søderblom (2007):* RCS simulation of wind turbines, FFI/RAPPORT-2007/00896

8. *Hans Øhra (2007): Wind farm Influence on Air Defense Radar – Flight Trial at Vågsøy, FFI/RAPPORT-2007/01414, Confidential*

## 23 Oppsummering

Modeller vil aldri være et eksakt bilde av virkeligheten, man vil alltid måtte gjøre tilnærminger og forenklinger. Det vil derfor også ofte være mulig å forbedre og videreutvikle modellene, men ikke alltid innenfor rammen av et prosjekt.

Prosjektet har gjennomført 7 prosjektrådmøter, alle med godt oppmøte fra Forsvaret. Dette har vært nyttig for prosjektet, og forhåpentligvis også til nytte for deltagerne i prosjektrådet. I tillegg til disse møtene har prosjektet arrangert to vindkraftseminarer, med deltagelse fra vindkraftindustrien med deres konsulenter, NVE, departementer og Forsvaret. Seminarene har blitt godt mottatt, og det har vært interessante diskusjoner på tvers av fagmiljøer.

Prosjektet har skrevet 7 rapporter og et notat. Noen av disse beskriver også de tre feltforsøkene som er gjennomført i prosjektet. Prosjektet har deltatt aktivt i internasjonalt samarbeid gjennom Eurocontrol, NATO og IEA. Vi har også hatt et nært samarbeid med Forsvaret i Sverige og hatt kontakt med industri i Storbritannia.

Vindkraftprosjektet har hatt god erfaring med ”Tiger Team” hvor prosjektet samlet en arbeidsgruppe med eksperter som til vanlig arbeider med ulike vinklinger av problemstillinger rundt radar. Disse satte seg raskt inn i problemstillingen og gav gode bidrag. Til tross for kort tid ble det også gjennomført et feltforsøk. Med mer tid til rådighet hadde det for noen områder vært mulig å gå videre med studier og feltforsøk.



## Referanser

- (1) Bente Jensløyken Meland, Hans Øhra (2007): Windfarm Impact on Electromagnetic Systems (WIMP) – Software Documentation, FFI/RAPPORT-2007/00832
- (2) Yngve Steinheim, Stig Petersen (2004): Analysis of possible consequences of collocating Avinors Monopulse Secondary Surveillance Radar and wind turbines at Urdalsnipa, Sintef report STF90 F04035 (Confidential)
- (3) Gudrun Høyve (2007): Electromagnetic shadow effects behind wind turbines, FFI/RAPPORT-2007/00842
- (4) Morten Sjøderblom (2007): RCS simulation of wind turbines, FFI/RAPPORT-2007/00896
- (5) Hans Øhra (2003): Vindkraftverks konsekvenser for Forsvarets installasjoner - Innledende studie for radar, FFI/RAPPORT-2003/02784
- (6) (APM): <http://www.spawar.navy.mil/sti/publications/pubs/td/3145/td3145.pdf>.
- (7) Otnes, Roald (2007): Modelling of Electromagnetic Influence from Wind Farms at Frequencies below 30 MHz - Interference and scattering, FFI/RAPPORT-2007/00086
- (8) Otnes Roald, Hjelmstad Jens (2006): Observability at HF direction finding sites of scattering from wind farms - measurements at Smøla 2006, FFI/RAPPORT-2006/02701
- (9) Steffen Tollisen, Aanund Storhaug (2007): Wind farm impact assessment on radars in the North-Cape area, FFI/NOTAT-2007/00793, Confidential
- (10) Meland B J, Nilssen E B, Høyve G, Mjanger M, Kristoffersen S (2007): Wind Turbines and Electromagnetic Systems (WTES) - Software documentation, FFI/RAPPORT-2007/00833, Unclassified
- (11) Hans Øhra (2007): Wind farm Influence on Air Defense Radar – Flight Trial at Vågsøy, FFI/RAPPORT-2007/01414, Confidential
- (12) EUROCONTROL (2006): Wind farm impact assessment techniques and mitigation measures, D1
- (13) EUROCONTROL (2007): Assessment Methodology to Determine the Impact of Wind Turbines on ATC Surveillance Systems, D2
- (14) D F Bacon (2002): Fixed-link wind-turbine exclusion zone method, version 1.1, released 28 Oct '02
- (15) Roald Otnes and Jens Hjelmstad (2007): Measurements and modelling of scattering effects from wind farms at HF frequencies, Proc. Nordic HF Conference, HF 07, Fårö, Sverige, 14-17 august 2007.

- (16) Ruck, G.T., Barrick, D.E., Stuart, W.D. and Krichbaum, C. K. (1970): Radar Cross Section Handbook, Vol. 1, 1970.
- (17) [www.baesystems.com](http://www.baesystems.com)
- (18) [www.sensis.com](http://www.sensis.com)
- (19) Perry J, Biss A (2007): Wind farm clutter mitigation in air surveillance radar, Proceedings IEEE Radar 2007, Boston, USA, 17-20 april 2007
- (20) Försvarmakten (2004): Dokumentation av Sg Vinds arbete, Försvarmakten, Högkvarteret, 23 mars 2004
- (21) Kjell-Åke Eriksson (2004): Rapport avseende huvudstudie radiolänk i vindkraftsprojektet, Försvarets materielverk, 17 april 2004
- (22) Boman T, Petterson L (2000): Direction Finding Error Due to Scattering from Wind Mills, Analysis and Computations. Scientific report FOA-R-00-01522-616-SE, FOI, Linköping, Sweden

## Appendix A Akronymer og forkortelser

<b>Akronym</b>	<b>Beskrivelse</b>
ADT	Advanced Digital Tracker
CFAR	Constant False Alarm Rate
CM	Clutter Map
EMI	Electro Magnetic Interference
ESM	Electronic Support Measures
FFI	Forsvarets forskningsinstitutt
FMV	Försvarets materielverk
FOI	Totalförsvarets forskningsinstitut
HF	High Frequency
IEA	International Energy Association
IFF	Identify Friend or Foe
MOD	Ministry of Defense
MPA	Maritime Patrol Aircraft
MTI	Moving Target Indicator
NTNU	Norges teknisk naturvitenskapelige universitet
NVE	Noregs vassdrags- og energidirektorat
RCS	Radar Cross Section
RGPD	Range Gated Pulse Doppler
SLB	Side Lobe Blanking
SSR	Secondary Surveillance Radar
STC	Sensitivity Time Control
WIMP	Wind turbines IMPact on electromagnetic systems
WTES	Wind Turbines and Electromagnetic Systems
WTTF	Wind Turbine Task Force
XML	Extensible Markup Language

## Appendix B      Agenda for vindkraftseminaret 24.11.2005

09:30 Registrering, FFI

09:45 Velkommen, Avdelingssjef V S Andersen, FFI

09:55 Innledning, H Øhra, FFI

10:15 Vindkraftkonsesjoner, NVE

10:35 Forsvarets saksbehandling, N Aa Østbye, FLO/I

*10:55 Kaffe*

11:10 Radartverrsnitt, M Söderblom, FFI

11:30 Radar, H. Øhra, FFI

*12:25 Lunch*

13:20 Radiolinje, H Øhra, FFI

13:35 Lave frekvenser, H Øhra, FFI

13:50 EMI, H Øhra, FFI

14:05 Støtteverktøy, B J Meland, FFI

14:35 Operative vurderinger, Maj G I Bakke, LUKS/LOI

*15:05 Kaffe*

15:20 Diskusjon

15:50 Oppsummering

## Appendix C      Agenda for Vindkraftseminaret 16.05.2007

08:45 Registrering, FFI

09:00 Velkommen, Avdelingssjef V S Andersen, FFI

09:10 Innledning, B J Meland, FFI

09:30 Vindkraftkonsesjoner, N H Johnsson, NVE

09:50 Forsvarets saksbehandling, A Lutnæs, FB

*10:20 Kaffe*

10:35 Radartverrsnitt, M Søderblom, FFI

10:55 Radar, T Sparr, FFI

11:25 Radar skyggevirkning, G Høye, FFI

*11:40 Lunch*

12:40 Radiolinje, B J Meland, FFI

12:55 Spredningseffekter under 30 MHz, R Otnes, FFI

13:20 EMI, hovedsakelig under 30 MHz, R Otnes, FFI

13:30 Støtteverktøy, B J Meland, FFI

*14:00 Kaffe*

14:05 Diskusjon

14:30 Oppsummering

## Appendix D Radar Cross Section (RCS)

Bistatic scattering from the windmills is calculated using the equation

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

$\bar{\beta}$  is the bistatic angle projected down in the horizontal plane,  $\varepsilon$  and  $\tau$  are the angle of incidence and the scattering angle relative to the horizontal plane (16).

This equation is a simple physical-optics approximation for bistatic scattering from a cylinder near the specular direction ( $\pm 45^\circ$ ). The specular direction is defined to have a scattering angle  $\tau = -\varepsilon$ , but arbitrary  $\bar{\beta}$ .