

# Prosjektnotat

## Radarforstyrrelser fra vindmøller

**VERSJON**

1.0

**DATO**

2017-11-22

**FORFATTER(E)**

Karsten Husby

**OPPDRAGSGIVER(E)**

Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)

**GRADERING**

Restricted

**OPPDRAGSGIVERS REF.**

Hilde Aass

**ANTALL SIDER OG VEDLEGG:**

12

**ABSTRACT**

Dette notat beskriver de fysiske mekanismene som gjør at vindturbiner kan påvirke radarer for sivil og militær luftfart samt radarer brukt for meteorologiske undersøkelser.

Relevant vitenskapelig litteratur er vurdert. Noe av litteraturen peker på et behov for å innhente mer kunnskap på området.

**UTARBEIDET AV**

Karsten Husby

**GODKJENT AV**

HANS SWENDGAARD

Dokumentet har gjennomgått SINTEFs godkjenningsprosedyre og er sikret digitalt

# Historikk

---

VERSJON	DATO	VERSJONSBESKRIVELSE
1.0	2017-11-22	

---

# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Innledning</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Radar virkemåte</b> .....	<b>4</b>
2.1	Oppløsning og signaleffekt .....	4
2.2	Doppler radar .....	5
<b>3</b>	<b>Radartverrsnitt</b> .....	<b>6</b>
3.1	Grunnleggende faktorer .....	6
3.2	Tidligere utførte målinger .....	7
<b>4</b>	<b>Betraktninger om radartyper og anvendelser</b> .....	<b>7</b>
4.1	Sivil luftfart .....	7
4.2	Militære radarer .....	8
4.3	Sjøfart .....	8
4.4	Utfordringer for værradarer .....	9
<b>5</b>	<b>Hvordan redusere påvirkningen fra radar</b> .....	<b>10</b>
<b>6</b>	<b>Videre undersøkelser</b> .....	<b>11</b>
<b>7</b>	<b>Referanser</b> .....	<b>12</b>

## BILAG/VEDLEGG

---

---

## 1 Innledning

Norge ønsker å satse på miljøvennlig energi og man ser behov for å styre hvor det søkes om konsesjon for vindkraft ut ifra en helhetlig vurdering. Det er mange hensyn å ta. NVE har fått i oppdrag å utarbeide planer for en nasjonal ramme for vindkraft. Dette dokument gir en oversikt over hvordan vindmøller kan forstyrre radarsystemer. Det er basert på to grunnleggende faktorer som må foreligge før interferens fra vindmøller er et problem:

- Vindmøllen må stå innenfor radarens operative virkeområde.
- Radaren må ha til hensikt å detektere objekter eller nedbør som beveger seg innenfor radarskyggene som vindmøllen lager.

Fysikken som ligger bak interferens mot radar er tilsvarende den som gir forstyrrelser i forbindelse med overføring av radiosignaler.

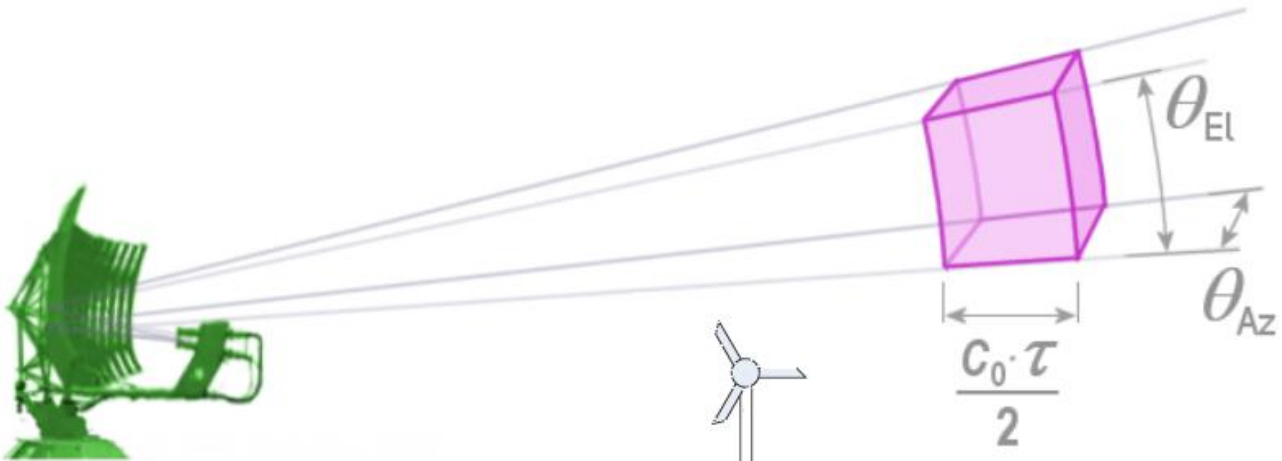
## 2 Radar virkemåte

### 2.1 Oppløsning og signaleffekt

Ordet RADAR står for "Radio Detection And Ranging". Tilsvarende finnes det også LIDAR der det benyttes lys. Siden både radiobølger og lys er elektromagnetiske bølger er det ikke så stor forskjell mellom bruk av radar eller lys for å se i mørket. Synlig lys har en bølgelengde på omtrent  $0.5 \mu\text{m}$ . Radarer benytter bølgelengder fra 25 cm (militær L-bånd radar) og nedover til 5mm (adaptiv fartsholder på biler).

Bølgelengden  $\lambda$  er knyttet til frekvensen på radaren slik at  $\lambda = \frac{c}{f}$  der  $f$  er frekvensen og  $c$  er

lyshastigheten. Ideelt sett vil en avansert 3D radar kunne observere i alle retninger i rommet, og den vil kunne skille mellom nære og fjerne refleksjoner i en gitt sektor ved hjelp av tidsmålinger. Dette er illustrert i Figur 1. Man kan tenke seg skillelinjer mellom forskjellige oppløsningsceller i rommet både i avstand og vinkel. Radaren måler reflektivitet fra disse cellene.



**Figur 1** En radar kan observere reflekser fra spesifikke oppløsningsceller som markert, og kan da undertrykke reflekser fra andre celler som for eksempel fra en vindmølle lavere på horisonten.

Fundamentalt for en radar står radarlikningen [1]. Den uttrykker hvor mye signaleffekt  $S$  som reflekteres tilbake til radarmottakeren fra en oppløsningscelle.

$$S = \frac{PG^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1.1)$$

der  $P$  er utsendt effekt,  $G$  er antenneforsterkning,  $R$  er avstand til objekt og  $\sigma$  er størrelse på objektet som skal detekteres (se 3 Radartverrsnitt). En oppløsningscelle er et område i rommet som en radar kan detektere reflekser fra. Oppløsningscellen til radaren spennes ut av avstandsopløsningen  $\frac{c_0\tau}{2}$  og bredden av antennestrålen i elevasjon  $\theta_{EL}$  og i asimut  $\theta_{AZ}$  som skissert i Figur 1. Jo større antennen er, jo mindre er oppløsningscellen og jo mer nøyaktig kan radaren bli. Avstandsopløsningen påvirkes av pulsbredden  $\tau$  til radaren.

Inne i cella kan det befinne seg et reflekterende objekt med en gitt RCS. Om det i en nærliggende celle befinner seg et tilsvarende stort objekt skal radaren kunne "oppløse" objektene som to forskjellige objekter. Dette blir vanskelig om det store objektet er en vindmølle og det mindre objektet er en drone eller kanskje en regnbyge. Dette er tydelig visualisert i Figur 4 der det virker som det alltid er et kraftig nedbør i vindmølleparken.

Legg merke til at radarlikningen viser at effekt  $S$  ved radarens mottaker reduseres med fjerde potens av avstanden  $R$ . Dette er en kraftig reduksjon som medfører at et objekt på dobbel avstand (altså  $2R$ ) genererer en signaleffekt som er redusert  $2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 16$  ganger i forhold til samme objekt i avstand  $R$ . Dette er en iboende egenskap ved vanlige radarer der radarsender og radarmottaker er plassert på samme sted. Slike radarer kalles for en monostatisk radar.

For en værradar blir dette litt annerledes fordi det antas at værradarens objekter som for eksempel en regnbyge er så store at de normalt ikke får plass inne i en oppløsningscelle som vist i Figur 1. Dermed vil antall vanndråper inne i cellen og dens totale  $\sigma$  øke når  $R$  øker. Som en konsekvens faller signalstyrken for en værradar bare med andre potens av  $R$ . Værradarer har derfor ofte en rekkevidde som man velger å avgrense på grunn av jordkrumningen slik at de kan observere værsystemer i en kontrollert høyde over havet.

Det finnes også værradarer som kan detektere snø samt tilsvarende radarer som kan detektere fugler [15]. En fugleradar er nå i bruk ved Værnes lufthavn Trondheim for å øke sikkerheten for fly ved landing og takeoff. Ved Alta lufthavn er det plassert en tilsvarende radar for å detektere snøbyger. Begge opererer på 9.41GHz.

## 2.2 Doppler radar

Kraftige reflekser i en celle kan overskygge svakere reflekser fra en celle i nærheten (se Figur 1). Uønskede refleksjoner fra bakken (såkalt bakkeclutter) kan være mange ganger sterkere enn reflekser fra et lite mål. Utfordringen til mange radarer er å filtrere bort alle former for clutter som kan genereres av fjellsider, hus, kjøretøy, vindmøller og vegetasjon. Dette kan utføres ved hjelp av doppler prosessering som gir en radar mulighet til å måle hastighet. Dopplerprosessering har den store fordel at radaren blir i stand til å skille mellom store stillestående objekter som fjell og små men bevegelige objekter som fugler, vanndråper, fly, droner og raketter. Metoden som benyttes kalles ofte for MTI (moving target indication). Siden de største reflektorene ofte står i ro kan de fjernes i MTI filteret.

En værradar er normalt alltid en dopplerradar som kan måle vindhastighet gjennom å detektere bevegelse av vanndråper. I tillegg kan en følsom værradar også måle vindhastigheter i tørr luft innenfor en begrenset rekkevidde i følge [2]. Det finnes en rekke værradarer operert av meteorologisk institutt i Norge.

En roterende vindmølle genererer mye dopplerstøy fordi møllebladene roterer med sterkt varierende hastigheter sett fra radaren. Det må nevnes at tilsvarende støy også genereres av rotoren til et helikopter. Variasjonen er kompleks fordi den skyldes både variasjon i vindhastighet og vinkelvariasjon mellom vindmøllen og et bevegelig objekt.

### 3 Radartverrsnitt

#### 3.1 Grunnleggende faktorer

En radar detekterer reflekterte elektromagnetiske signaler fra objekter. Signalstyrken på refleksene henger sammen med størrelsen på objektene og deres radartverrsnitt. Radartverrsnittet (radar cross section – RCS) er definert som tvverrsnittet på en metallisert kule. Radartverrsnittet blir da:  $\sigma = \pi r_k^2$  forutsatt at kulas omkrets er stor i forhold til bølgelengden til radarsignalet. For andre objekter med andre fasonger som for eksempel et fly, en vindmølle eller en stor mengde vanndråper blir beregningen av RCS mye mere komplisert. Maksimal RCS for noen andre fasonger er gitt i Tabell 1. Det er to effekter av RCS for roterende vindmøller. Den ene er interferensen som følge av rotasjon, den andre er hvordan mølle bladene lager skygger i radarens deteksjonsområde.

International Telecommunication Union (ITU) har valgt å modellere vindmøllerotorer som en flat metallplate i forhold til interferens mot radiosystemer. Dette er en konservativ verst tenkelig betraktning som bør modereres for å være nyttig i forhold til radar. Faktorer som taler mot en slik betraktning er at bladene på en vindmølle er ikke helt flate samt at radar pulsrepetisjons frekvensen normalt er meget høy sammenlignet med møllens "rotasjonsfrekvens". Derfor blir den faktiske maksimale RCS noe mindre. I tillegg reduseres RCS mye når orienteringen mot radaren endres.

Vindmøller består også av et tårn som kan modelleres som en sylinder eller en kjegle [14]. Dette tårnet har ofte større radartverrsnitt enn selve rotoren. I tillegg kan rotoren periodevis skygge for refleksjonen fra tårnet. En slik skygging genererer periodisk clutter.

**Tabell 1 Noen kjente objekter og deres radartverrsnitt**

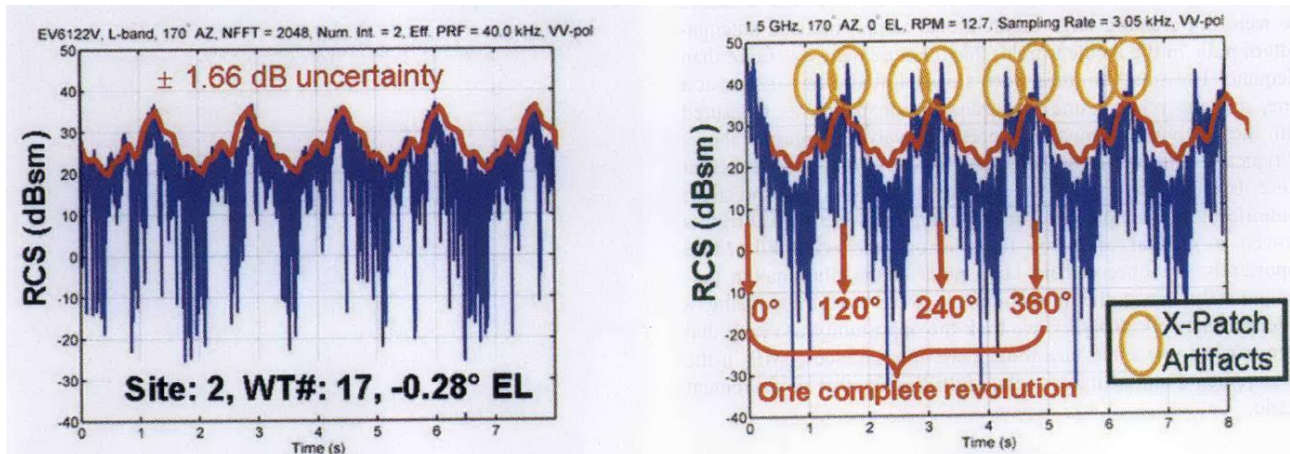
Objekt	Maksimal RCS i antall kvadratmeter	
Kule	$\pi r_k^2$	$r_k$ er radius av kule $2\pi r_k \gg \lambda$
Sylinder	$\frac{2\pi R h^2}{\lambda}$	$h$ er høyde
Flat plate	$\frac{4\pi W^2 h^2}{\lambda^2}$	$W$ er bredde

RCS uttrykker hvor stor en reflektor er eller spesielt hvor sterkt signal den genererer i en gitt retning. For interferens mot radiosystemer ble det fokusert spesielt på refleksjoner som endrer seg hurtig dvs. refleksjoner fra selve rotoren. Radarer kan like godt bli påvirket av stillestående objekter inkludert alt høyt terreng rundt radaren.

Vindmøllenes RCS og interferens effekt varierer mye med møllens størrelse, posisjon, vindretning, frekvens, materialbruk og som funksjon av tiden. I [20] er det presentert beregninger av maksimal RCS opp til typisk 60 dBsm (tilsvarende 1 million kvadratmeter) for en rotordiameter på 90 meter ved de verst tenkelige orienteringer når ett av bladene peker rett opp. Utenfor disse verst tenkelige orienteringer reduseres RCS til typisk 40 dBsm (tilsvarende 10 tusen kvadratmeter).

### 3.2 Tidligere utførte målinger

I [17] er det utført målinger og beregninger på møller med 70 meter diameter. Beregningene viser pulser med speilende reflekser 6 ganger per omdreining (se Figur 2). Disse kraftige pulsene ble ikke observert på målingene, som tyder på at modellen som ble brukt ikke er nøyaktig nok. Om man ser bort fra disse pulsene som er omtrent 15 dB sterkere har denne studien samsvar mellom målte og beregnede reflekser innenfor +/- 1.7 dB på 1.5GHz. Tilsvarende samsvar ble også funnet på 3.6 GHz. Studien viser maksimalverdier på omtrent 35dBsm (tilsvarende omtrent 3000 kvadratmeter)



**Figur 2** RCS verdier for roterende vindmøller som funksjon av tid. Meget bra overenstemmelse mellom målte verdier til venstre og beregnede til høyre på 1.5GHz bortsett fra 6 artefakter per omdreining som ikke viste seg på målte resultater.

I [18] benyttes en type turbin som har en ring rundt turbinen for å øke effektiviteten. I tillegg plasseres et metallnett over ringen for hindre radiobølgene "innsyn" til selve turbinen. Nettet vil da gi en statisk refleksjon, mens dopplerstøy fra den bevegelige rotoren skal bli borte. Studien viste at dopplerstøyen ble noe redusert. Slike nett kan i prinsippet monteres hvor som helst for å skjerme i enkelte retninger.

## 4 Betraktninger om radartyper og anvendelser

### 4.1 Sivil luftfart

For luftfart benyttes to forskjellige typer radar. Den ene typen detekterer passive refleksjoner fra et fly slik radarer normalt gjør. Dette kalles en primærradar. Den andre typen kalles sekundærradar og detekterer aktivt genererte svar fra flyet tilsvarende deteksjon av en Autopass brikke når man kjører bil gjennom en bomring. "Brikken" ombord i flyet kalles en transponder. Transponderen sender sin informasjon til bakken når den blir "belyst" av et spørresignal. Dette medfører at luftfartsmyndighetene ser ID og annen informasjon som transponderen sender ut. Spørresignalet sveipes rundt 360 grader sammen med og på tilsvarende måte som signalet til primærradaren (se Figur 3). Legg merke til at antenna for sekundærradaren har spesielt liten utstrekning i høyde. Derfor skiller ikke denne antenna mellom signaler som går direkte til flyet eller via refleksjoner fra bakken.

Kraftige reflekser fra fjellsider eller fra vindmølletårn kan avlede eller reflektere spørresignalet for sekundærradaren til fly som egentlig befinner seg utenfor pekeretningen til radarantenna. Om dette avviker signalet når flyet og er sterkt nok vil transponderen trigges til å svare på feil tidspunkt slik at flyet dukker opp på radarskjermen i feil posisjon. Et slikt fly omtales som et "spøkelse". Det er likevel usannsynlig at dette er problematisk for fly som er over horisonten og som dermed er klart synlige også i riktig sektor. Disse

utfordringene er vurdert av Avinor og SINTEF i tidligere arbeider [12] [13] [14] . Arbeidene konkluderte med at reflekser fra vindmølletårnene kunne tolereres for visse høyder og avstander.



**Figur 3 Luftfartsradar med den mindre antenna for sekundærradaren montert oppe på den større antenna for primærradaren (bilde Wikipedia)**

## 4.2 Militære radarer

Militært benyttes også transpondere i fly og fartøyer, men nå for å identifisere venn eller fiende. Systemet kalles IFF (Identification Friend or Foe), og det er selvfølgelig underlagt streng kryptering. Primærradarer har en vesentlig betydning for flere typer militære styrker. Lavtflygingsoperasjoner, sjøoperasjoner og enkelte typer landoperasjoner foregår under estimert radarhorisont. Store konstruksjoner som vindmøller eller andre bygninger på fjelltopper kan løfte radarhorisonten sett fra radaren. På den annen side vil det ha mindre betydning om radaren er plassert tilstrekkelig høyt i forhold til omkringliggende obstruksjoner [13] . Militært benyttes også mobile radarer som krever spesielle vurderinger om utplassering før operasjon. Vindmøller med tilhørende infrastruktur påvirker operative vurderinger av posisjon for både stasjonære og mobile radarsystemer. Men så langt vi vet, er Forsvaret inkludert som høringsinstans på slike saker for å unngå at vindmølleanlegg plasseres på en måte som kan redusere effekten av militære operasjoner.

## 4.3 Sjøfart

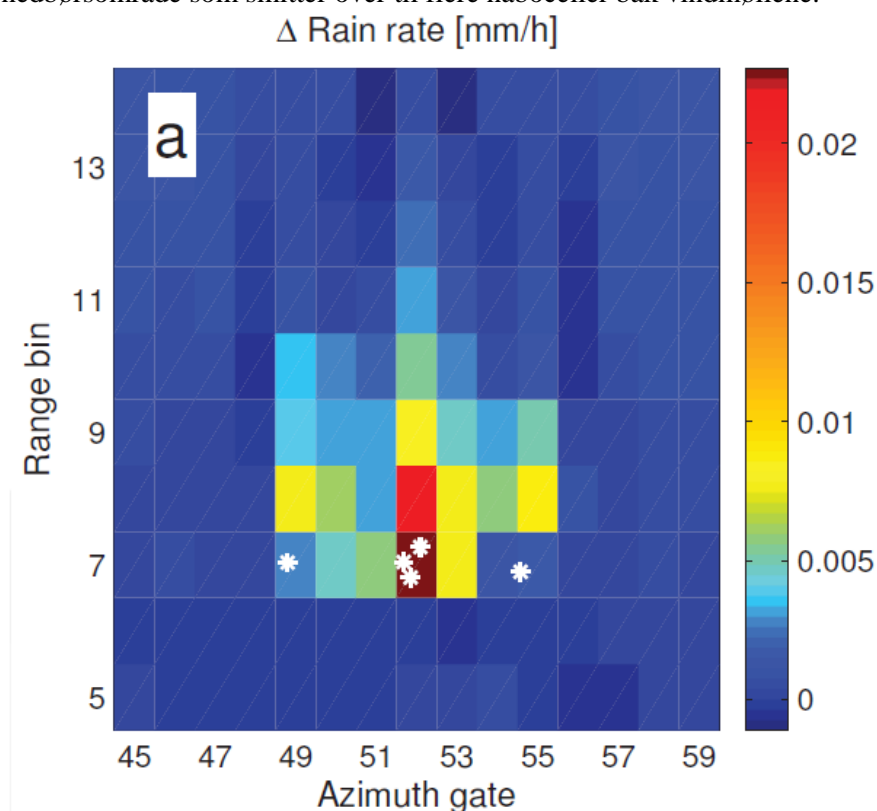
Maritime radarer er ofte lavkost radarer uten dopplerprosessering. For disse radarer representerer landområder og installasjoner på land nesten alltid yttergrensen for interesseområdet. Det er få ting som tyder på at konstruksjoner på land vil ødelegge for deteksjon av objekter mellom den maritime radar og den landbaserte vindmølle.



Kystverket har likevel radarer plassert på land som skal overvåke skipstrafikk. Slike radarer kan også være dopplerradarer. Slike radarer bør ikke plasseres bak vindmøller i forhold til operativt område.

#### 4.4 Utfordringer for værradarer

Værradarer er en type radar som har som mål å observere værphenomener som nedbør og vind rundt radaren hele tiden. Dette er noe annet enn å først detektere og deretter følge et objekt som en luft eller kystradar gjør. I [2] er det beskrevet hvordan vindturbiner kan påvirke en værradar gjennom maskering og støy. Studier i felt har illustrert at WTC (wind turbine clutter) kan påvirke radarens evne til å detektere reflektivitet fra fuktig vær over flere 10 talls grader i azimuth. Det nevnes også at radarens evne til å skille stillestående objekter som terreng fra bevegelige objekter som regndråper påvirkes spesielt negativt om vindmøllene er nære radaren. Da kan alle retninger, altså 360 grader rundt radaren, bli forstyrret hevdes det. Figur 4 fra Karlskrona er ikke fullt så dramatisk, men illustrerer problemet greit [3] . Her er radaren lokalisert 13 km fra 5 vindmøller som vises som hvite stjerner i avstandscelle 7. Det er tydelig å se at radaren estimerer et nedbørsområde som smitter over til flere naboceller bak vindmøllene.

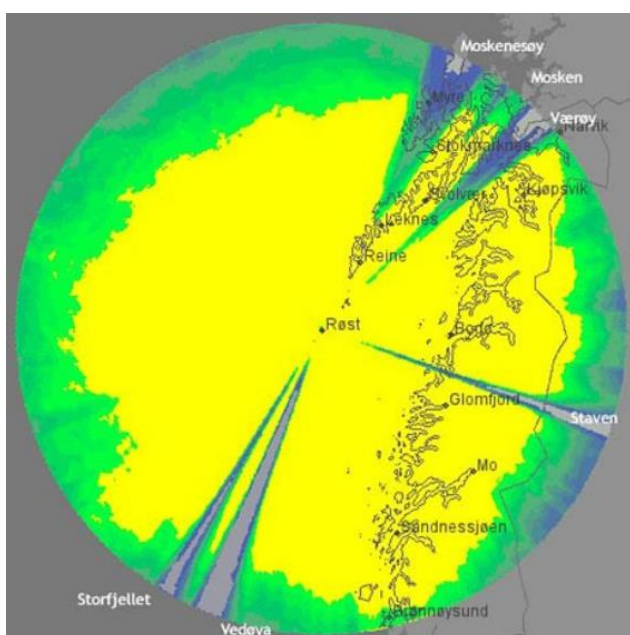


**Figur 4** Data fra en svensk værradar som viser feilberegnert nedbør grunnet 5 vindmøller 13 km fra radaren. Støyen fra møllene genererer også et tilsynelatende "regnvær" bakenfor der møllene er plassert.

En værradar kan bli skygget av store objekter som for eksempel fjell. Dette er tydelig illustrert ved et panoramabilde ( Figur 5 ) fra radaren på Røst med en del fjell på andre øyer i nærheten. Disse fjellene genererer radarskygger som sprer seg utover. Dette er vist i Figur 6. Radaren produserer derfor måleresultater med dårligere kvalitet rundt disse skyggeområdene. Dette kan også observeres på yr.no.



**Figur 5** Bilde av værradaren på Røst som delvis blir skygget av små øyer med høye fjell i nærheten. Foto: meteorologisk institutt.



**Figur 6** Fra værradaren på Røst er det mulig å identifisere forskjellige sektorer med radarskygge fra høye fjell.

Det er flere av værradarene i Norge som har obstruksjoner i form av fjell i enkelte sektorer. Det reduserer dekningsområdet for radaren men ødelegger ikke nytten fullstendig. Mange av radarene har også overlappende dekningsområder som gjør at dårlige data fra en gitt sektor for en radar kan forbedres med data fra naboradaren.

## 5 Hvordan redusere påvirkningen fra radar

En god del litteratur [2] [3] [4] [12] [13] [14] [16] [19] fokuserer på hva man kan gjøre for å redusere den negative påvirkning fra vindmøller på radarsystemer. Gitt at den ideelle plasseringen av en vindmølleinstallasjon ikke lar seg realisere, så bør interferens reduserende tiltak vurderes langs disse anbefalingene. Det finnes ingen columbi egg som løser problemet enkelt. Litteraturen peker på noen muligheter. Noen av metodene gjelder også i forhold til å redusere påvirkning mot radiokommunikasjon.

Mer bruk av direkte antenner kunne avhjelpe problem i forbindelse med interferens mot radio. For de fleste radarer er en direktiv antenne allerede en integrert del av systemet. En radar som observerer i en retning, for eksempel høyt over horisonten blir derfor i mindre grad påvirket av refleksjoner fra bakken eller horisonten. Likevel er ingen antenner perfekte. De vil fange opp signaler fra retninger de ideelt ikke skal fordi alle

antenner i praksis har såkalte sidelover. Derfor vil en radar med antenne som peker til siden eller over en vindmølle likevel kunne bli forstyrret. Selv om bedre antenner i prinsippet kan hjelpe er radarer ofte spesielt optimalisert for en gitt operasjonsmodi som i praksis ikke tillater bruk av en mer direktiv antenne.

Vindmølleblad kan produseres på en måte som gir lavere RCS uten at det går ut over kraftproduksjon og levetid. Glassfibervinger reflekterer kanskje bare 10% av hva metallvinger gjør, men de kan også være utstyrt med en metallisk lynavleder som vil bidra til å øke RCS. Karbonfiber er et annet komposittmateriale som også vil påvirke refleksjonen. Det kan ha sine fordeler at karbon i utgangspunktet er et ledende materiale. Svakt ledende materialer som Carbon Black kan også benyttes til å lage absorberende strukturer i komposittmaterialer. I [5] [6] [7] [8] [9] nevnes "stealth" turbinblad som er slik at de er mindre synlige på radar. Noen selskap som det danske Vestas, det franske EDF Energies Nouvelles og QinetiQ bygger vindturbiner som er mindre synlig på radar. Avhengig av frekvensområde som benyttes vil "stealth" turbiner være nyttige også for radiosystemer.

Her er en liste over mulige avhjelpende tiltak som kan vurderes:

- Etabler en minsteavstand og samtidig en høydebegrensning for vindmøller i form av en vertikal konus plassert ved radaren som vindmøller må være under.
- Plasser turbiner og radarer ute av syne for hverandre.
- Reduser turbinenes radartvernsnitt ved hjelp av "stealth" teknologi.
- Bruk "stealth" teknologi på tårn og generatorhus.
- Bruk lave vindmøllertårn og gjerne med spesiell form for å avlede reflektert signal bort fra radarene.
- Utnytt vindmøllers evne til å endre rotorens RCS inkludert faseforholdet mellom naborotorers turbinakslinger.
- Skjerm vindparken i retning radar.
- Benytt nye og bedre algoritmer i radaren som kan redusere støy.
- Etabler samarbeidende radarer.
- Adapter radarens søkestrategi til omgivelser og eventuelle vindmøller.

Det må dog nevnes at en vurderingen av mulige interferensreducerende tiltak bør gjøres basert på mest mulig konkrete data om den aktuelle installasjonen, omkringliggende landskap og karakteristikken for berørte radarer.

## 6 Videre undersøkelser

Som nevnt i en god del litteratur og gjentatt i dette dokument er det knyttet en del usikkerheter til hvor stor påvirkningen fra vindmøllene vil være. Det vil kreve ekstra studier å redusere disse usikkerheter. Nedenfor følger en liste med noen momenter eksplisitt uttalt i litteraturen på dette området.

- Det er usikkert hvordan støyen fra mange vindmøller i en park skal summeres både i forhold til radar og telekommunikasjon. Mere forskning på dette er anbefalt [21] [22] .
- Det nevnes at det er nødvendig å gjennomføre beregninger eller målinger av RCS for vindmøllene som tar hensyn til faktisk frekvens [20] for den spesielle radar. Det er også nevnt at beregninger for RCS som også er gyldige i nærfeltet (nærmere enn 2 km) bør gjennomføres [13] .
- Det er uttalt at tilgjengelig ekspertise bør benyttes for å løse gjenstående problemer [12] .
- I [2] og [23] er det lansert planer for framtidige tester av meteorologiske radarer der rådata fra radaren spilles inn på disk for deretter å bli manipulert med ekstra støy før data igjen mates tilbake i radaren. En slik fremgangsmåte er komplisert men kan lede fram til økt ytelse for radarene.

## 7 Referanser

- [1] David K. Barton, "Modern radar system analysis", Artech house inc., 1988
- [2] Report ITU-R M.1849-1 (09/2015) Technical and operational aspects of ground-based meteorological radars
- [3] Lars Norin, Günther Haase, "Doppler Weather Radars and Wind Turbines", ISBN 978-953-51-0496-4, Intech 2012, Open Access.
- [4] David de la Vega, James C. G. Matthews, Lars Norin and Itziar Angulo, "Mitigation Techniques to Reduce the Impact of Wind Turbines on Radar Services", *Energies* 2013, 6, 2859-2873; doi:10.3390/en6062859
- [5] Hong-Kyu Jang, Won-Ho Choi, Chun-Gon Kim, Jin-Bong Kim, Do-Wan Lim, "Manufacture and characterization of stealth wind turbine blade with periodic pattern surface for reducing radar interference", *Composites Part B: Engineering*, Volume 56, January 2014, Pages 178-183
- [6] Kim J, Lim D., "Reduction of radar interference - Stealth wind blade structure with carbon nanocomposite sheets", Volume 17, Issue 3, March 2014, Pages 451-460
- [7] Li W., Chen M., Zeng Z., Jin H., Pei Y., "Broadband composite radar absorbing structures with resistive frequency selective surface: Optimal design, manufacturing and characterization", Volume 145, 16 June 2017, Pages 10-14, *Composites Science and Technology*
- [8] <http://www.telegraph.co.uk/business/2017/01/01/blown-qinetiq-baffles-radar-stealth-wind-turbines/>
- [9] <http://www.windpowermonthly.com/article/1311132/vestas-installs-first-radar-friendly-blade>
- [10] <http://broadcastwind.com/>
- [11] <https://tslstorage.blob.core.windows.net/papers/WindFarmsandPtPLinks.pdf>
- [12] Eldar Aarholt, "Ulvarudla En vurdering av planlagt MSSR og vindpark", Teleplan mai 2006.
- [13] Yngve Steinheim, Stig Petersen, "Analysis of possible consequences of collocating Avinors Monopulse Secondary Surveillance Radar and wind turbines at Urdalsnipa", AVINOR, SINTEF report STF90 F04035, Mai 2004.
- [14] Yngve Steinheim, "Investigation of possible interference between Avinors MSSR site at Urdalsnipa and wind turbines in the wind parks at Ulvarudla, Stigafjellet and Brusali-Karten", AVINOR, SINTEF memo 90F269/M1/YS, april 2008.
- [15] <http://radian.no/nyheter/>
- [16] <http://www.atdi.com/keeping-radars-and-turbines-turning/>
- [17] Brian M. Kent, Kueichien C. Hill, Alan Buterba ugh, Greg Zelinskil, Robert Hawley, Lisa Cravens. Tni-Van, Christopher Vogege, and Thomas Coveyou, "Dynamic Radar Cross Section and Radar Doppler Measurements of Commercial General Electric Windmill Power Turbines Part 1: Predicted and Measured Radar Signatures", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 50, No. 2, April 2008
- [18] Balleri, A., Al-Armaghany, A., Griffiths, H., Tong, K., Matsuura, T., Karasudani, T., Ohya, Y. "Measurements and analysis of the radar signature of a new wind turbine design at X-band", 2013 *IET Radar, Sonar and Navigation*, 7 (2), pp. 170-177. DOI: 10.1049/iet-rsn.2012.0026
- [19] Nagel, D., Neumann, C. "Tracking airborne targets through windmill areas and rain clutter with ground based radar", 2016 *Proceedings International Radar Symposium*, 2016-June, art. no. 7497348, . DOI: 10.1109/IRS.2016.7497348
- [20] I. Angulo, O. Grande, D. Jenn, D. Guerra, and D. de la Vega, "Estimating reflectivity values from wind turbines for analyzing the potential impact on weather radar services", *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 2183–2193, 2015 [www.atmos-meas-tech.net/8/2183/2015/](http://www.atmos-meas-tech.net/8/2183/2015/) doi:10.5194/amt-8-2183-2015
- [21] I. Angulo, D. de la Vega, I. Cascón, J. Cañizo, Y. Wub, D. Guerra, P. Angueira, "Impact analysis of windfarms on telecommunication services", Elsevier, Jan. 2014
- [22] Lemmon JJ, Carroll JE, Sanders FH, Turner D. Assessment of the effects of wind turbines on air traffic control radars, NTIA technical report TR-08-454; 2008.
- [23] Report ITU-R M.2136, "Theoretical analysis and testing results pertaining to the determination of relevant interference protection criteria of ground-based meteorological radars"



Teknologi for et bedre samfunn

[www.sintef.no](http://www.sintef.no)