

Prosjektnotat

Radiostøy fra vindmøller

VERSJON

2.0

DATO

2017-10-24

FORFATTER(E)

Karsten Husby

OPPDRAGSGIVER(E)

Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)

GRADERING

Restricted

OPPDRAGSGIVERS REF.

Lars Hagvaag Seim

ANTALL SIDER OG VEDLEGG:

11

ABSTRACT

Dette notat beskriver de fysiske mekanismene som gjør seg gjeldene når vindturbiner påvirker og forstyrrer elektroniske kommunikasjonssignaler. I tillegg er relevant publisert vitenskapelig litteratur kartlagt med støtte av NVE.



UTARBEIDET AV
Karsten Husby

GODKJENT AV
HANS SWENDGAARD

Dokumentet har gjennomgått SINTEFs godkjenningsprosedyre og er sikret digitalt

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBESKRIVELSE
1.0	2017-10-24	

Innholdsfortegnelse

1	Innledning	4
2	Sammendrag	4
3	Fysiske mekanismer for interferens fra vindmøller	4
	3.1 Forenklet verst tenkelig betraktning	6
4	Litteraturstudium	7
5	Referanser	8
6	Appendix: Interferens fra mange vindmøller	9

BILAG/VEDLEGG

1 Innledning

Norge ønsker å satse på miljøvennlig energi og man ser behov for å ha kontroll over hvor det søkes om konsesjon for vindkraft ut ifra en helhetlig vurdering. NVE har fått i oppdrag å utarbeide planer for en nasjonal ramme for utbygging av vindkraft. Det er mange hensyn å ta. Dette dokument gir en oversikt over hva som gjør at vindmøller kan virke forstyrrende på radiokommunikasjon og hvordan dette potensielle problem kan håndteres.

2 Sammendrag

Vindmøllene kan forstyrre radiosamband enten de er nære senderen eller mottakeren.

Det er tydelig at bruk av direktive antenner avhjelper problemet i mange tilfeller både ut ifra teoretiske beregninger og gjennom empiriske målinger. Et spørsmål å avklare er å bruke sektoriserede antenner som avhjelpende tiltak, i den grad de ikke allerede er i bruk som for eksempel på basestasjoner.

Verktøy for planlegging av interferens fra vindparker er i ferd med å bli kommersielt tilgjengelig.

RiksTV godkjenner DVB-T mottakere for det Norske marked, men likevel vil det kunne være forskjellig hvordan mottakerne takler krevende forhold grunnet vindmøller. Selv om de beste mottakerne ikke vil eliminere problemet fullstendig vil en kvalitetsheving komme flere brukere til gode enn bare de som bor i nærheten av vindmøller.

Vindmølleblad kan produseres på en måte som gir lavere refleksjonsfaktor uten at det går ut over kraftproduksjon og levetid. Dette kan redusere interferens.

Basert på tilgjengelig informasjon og antagelser om verst tenkelig orientering av en gitt type møller er det i dette notat presentert enkle beregninger av minste avstand til sender og mottaker når antall møller, deres radartverrsnitt RCS og akseptabelt interferensnivå er kjent.

En verst tenkelig situasjon er der det er fri sikt til minst en og samme mølle både fra sender og mottaker og der det eksisterer et brukbart samband mellom sender og mottaker selv uten fri sikt mellom dem. Det må avklares hvordan og hvor mye slike situasjoner skal være dimensjonerende.

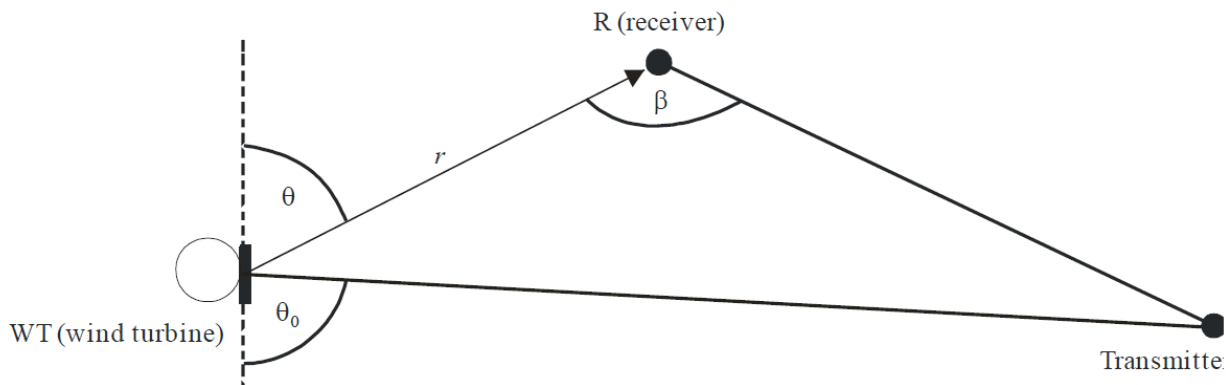
Radiopeiling i flate landskap i Tyskland er følsomt for vindmøller. Det er usikkert om tilsvarende problem gjelder for kupert norsk terreng.

3 Fysiske mekanismer for interferens fra vindmøller

Vindmøller kan påvirke radiokommunikasjonssystemer. Med radio menes alle systemer som sender ut og mottar elektromagnetiske bølger for å overføre analog eller digital informasjon. Det kan typisk være kringkasting, mobiltelefoni eller også radiolinje via parabler som er plassert i kommunikasjonsstårn. I tillegg viser studier utført av ITU [9] at peilesystemer for å finne retning til en radiosender er spesielt sårbare når terrenget i utgangspunktet er flatt og uten naturlige refleksjonspunkter.

Grunnen til at møllene kan påvirke er at alle objekter reflekterer radiobølger mer eller mindre. Man skiller ofte mellom speilende (specular) refleksjon eller diffus refleksjon. I tillegg kan radiobølgene absorberes av objektet. Metalloverflater er reflekterende og utgangspunktet for en del modeller presentert i ITU [5] [6] og [7] Her antas det også at vingene er plane slik at de kan generere kraftig spekulære refleksjoner når de innfallende og reflekterte vinklene er like eller nesten like som vist i Figur 1. For de fleste vindretninger er likevel θ_0 og θ forskjellige med redusert styrke på refleksjonen. Istedet viser da noen beregninger og

målinger at hvert blad på møllen genererer en relativt kort puls med støy for hver halve omdreining av rotoren. En treblads propell genererer derfor 6 pulser med økt interferens for hver omdreining av turbinakslingen. I tillegg, som beskrevet i [13], tillegges dopplershift av det reflekterte signal en del vekt i forhold til degraderingen som finner sted. Følsomhet for doppler påvirkes også av hvilket modulasjonsformat som benyttes. For eksempel så nevnes det at DVB-T (2k) er fire ganger mere robust mot doppler enn DVB-T (8k).



Figur 1 Innfallende vinkel θ_0 og reflektert vinkel θ mot et plant vindturbinblad

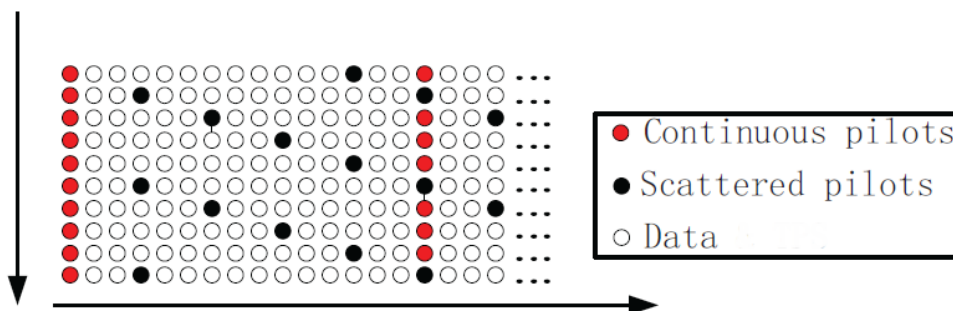
Glassfibervinger reflekterer kanskje bare 10% av hva metallvinger gjør, men de kan være utstyrt med en metallisk lynavleder. Om ingenting er gjort for å skjerme lynavlederen elektromagnetisk, kan rotoren selv om den er laget av ikke ledende materiale reflektere radiobølger godt. Karbonfiber er et annet 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 [17] 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 både i forhold til radar- og radiosystemer [14] [15] [16].

Alle radiosystem tilpasser seg radiokanalen for å overføre informasjon så stabilt og effektivt som mulig. En god radiokanal har tradisjonelt direkte sikt mellom en sender og en mottaker. Likevel vil man selv i slike tilfeller være utsatt for reflekser fra store objekter i nærheten. Det kan være fra hus, fjellsider og kjøretøy. Mange objekter er stasjonære eller beveger seg med moderat hastighet. De fleste radiosystem har ingen problemer med å tilpasse seg reflekser fra slike objekter fordi systemene i utgangspunktet er dimensjonert for denne type påvirkning. Til og med når direktesignalet mellom sender og mottaker er skjermet av en åskam eller et hus kan radiosystemet likevel fungere ved at refleksene utnyttes konstruktivt.

Radiosystemer har måttet tilpasse seg hurtig varierende kanaler lenge før utfordringen med vindmøller dukket opp. Et eksempel er mobiltelefoni og bilkjøring i høye hastigheter der sambandet blir påvirket av varierende refleksjoner fra store gjenstander. Den relative hastighet mellom hus og kjøretøy eller mellom to kjøretøy kan komme opp flere hundre kilometer i timen. Mobiltelefoni som GSM (2G, 3G og 4G) og LTE er selvfølgelig dimensjonert for å tåle slike høye hastigheter. Noen moderne radiosystemer benytter MIMO (Multiple Input Multiple Output) teknikker der sender og mottaker benytter multiple antenner. MIMO er spesielt fundert på å utnytte reflekser for å redusere interferens, øke stabilitet og øke dataraten i nettet [8]. Vingetippene på vindmøller vil bevege seg hurtigere og med mye større akselerasjon enn kjøretøy og representerer derfor en ny utfordring for de fleste radiosamband.

Radiokanalen kan likevel endre seg hurtigere enn hva radiomottakeren tolererer. Om dette skjer rekker ikke mottakeren å tilpasse seg. I stedet vil da hurtige reflekser summeres opp som et bakenforliggende teppe av ekstra støy som medfører at dataraten kan gå ned og feilraten opp. En DVB-T TV mottaker benytter såkalte

piloter sendt ut av senderen for å tilpasse seg kanalen flere hundre ganger per sekund. Piloter er små datapakker med kjente data som sendes ut i et forutbestemt mønster (se Figur 2). Disse pilotene setter mottakeren i stand til å finne ut hvordan kanalen faktisk er på gitte tider og frekvenser. Imellom disse tider og frekvenser estimeres kanalen ved hjelp av matematisk interpolasjon for dekodning av data til brukeren. Noen mottakere benytter enkleste type interpolasjon for å redusere kompleksitet og kostnader. Slike mottakere er derfor mere sårbare for hurtige endringer i kanalen [19] [20] .



Figur 2 Data og piloter for DVB-T sendes på forskjellige tider i den vertikale akse og på forskjellige frekvenser i den horisontale akse. Ved å benytte matematisk interpolasjon av piloter både langs tidsaksen og frekvensaksen vil avanserte mottakere tolerere hurtig variable reflekser.

Selv en DVB-T mottaker med rundstråelende antenne kan tåle at det kjører en bil forbi i nærheten så lenge bilen ikke sperrer for fri sikt til sender. Det er likevel forskjell på kvalitet. Enkle mottakere som benytter enkle interpolatorer trenger derfor en direktiv antenne plassert høyt over veien for å fungere stabilt. Slike mottakere vil på tilsvarende måte lettere bli forstyrret av vindmøller også. Selv om en mottaker følger standarden og som regel fungerer feilfritt er det ikke gitt at den benytter gode nok algoritmer for håndtering av pilotene om forholdene blir krevende.

3.1 Forenklet verst tenkelig betraktning

Det er mulig å gjøre en forenklet betraktning som tar utgangspunkt i at radiosystemet ikke lykkes med å tilpasse seg den varierende radiokanal grunnet hurtig roterende vindmøller. Under slike forhold kan det beregnes et interferensnivå som omtales som en "scattering coefficient" [6] . Denne verdi uttrykker forholdet i amplitude mellom interferens og nyttesignal ved radiomottakeren når en reflekterende vindmølle med metallblad befinner seg nære senderen eller mottakeren i en avstand r . Koeffisienten framkommer ved at turbinen modelleres som et flatt rektangulært areal som reflekterer radiosignalet. Koeffisienten er:

$$\rho = \frac{A}{\lambda r} g(\theta) \quad (1.1)$$

der A er arealet, λ er bølgelengden på radiosignalet og $g(\theta)$ er:

$$g(\theta) = \left(\frac{\sin\left(\frac{W}{\lambda}(\cos\theta - \cos\theta_0)\right)}{\left(\frac{W}{\lambda}(\cos\theta - \cos\theta_0)\right)} \right)^2 \sin\theta \quad (1.2)$$

der W er midlere bredde av bladene og θ_0 er innfallende vinkel på bladene og θ er reflektert vinkel fra bladene. Den verst tenkelige verdi på $g(\theta)$ blir 1 når vinden blåser langs aksene mellom sender og mottaker og mølla er plassert på forlengelsen av denne aksene. I dette tilfellet blir $\theta = \theta_0 = 90$ grader.

Et radiosystem trenger normalt et gitt signal til støyforhold eller C/I for å fungere bra. C/I kan beregnes til:

$$C/I = \frac{1}{\rho^2} \quad (1.3)$$

som fra ITU rekommendasjonen kan uttrykkes i dB skala på denne måten $C/I \text{ dB} = -20 \log(\rho)$.

Forskjellige radiosystem har forskjellige toleranser. I [6] er det tatt fram et numerisk eksempel der $C/I=10$ slik at 10 ganger mere energi ligger i nyttesignalet C enn i støysignalet I for en mølle på 160 kvadratmeter i en avstand på $r=1000\text{m}$.

Det er gjort en god del antagelser forut for disse beregninger. Overslagene er derfor ikke eksakte uttrykk for interferensnivået. Beregningene kan i stedet peke på hvordan gode estimater og analyser kan utføres forut for en konsesjonsbehandling.

Følgende momenter understrekes:

- Beregningene forutsetter at radiosystemet ikke utnytter noen teknikker for å eliminere eller utnytte refleksene. Siden de fleste radiosystemer faktisk benytter slike teknikker er overslagene derfor konservative. Det er nødvendig å vurdere detaljert hvilke standardiserte teknikker hvert enkelt radiosystem forventes å benytte og hvilket C/I nivå som dermed vil være dimensjonerende. Det er også nødvendig å se på de mest moderne teknikkene inkludert MIMO som nå er tatt i bruk.
- Antagelsen om rundtstrålende antenner er også konservativ. For en DVB-T sender eller mobil radioenhet kan dette være en grei første antagelse. Bruk av direktive antenner enten på sender eller på mottaker vil redusere interferensen.
- Vindmøllenes "scattering parameter" varierer mye med møllens størrelse, posisjon, vindretning, frekvens, materialbruk og som funksjon av tiden. Det er vanskelig å komme fram til gode estimater av denne parameter. Verst tenkelig betraktninger kan benyttes for en gitt geometri og vindretning, men dette vil kunne lede fram til et unødvendig konservativt overslag spesielt for parker med mange vindmøller der det er usannsynlig at alle møllene alltid orienteres i verst tenkelig retning. Det finnes noen målte empiriske data på dette området [4] [22]. Statistiske modeller kan også vurderes for å aggregere effekten fra mange møller.
- En forverret situasjon oppstår om det ikke er fri sikt mellom sender og mottaker men sikt til flere av vindmøllene fra både sender og mottaker. Bruk av kartdata og propagasjonsmodeller over terreng bør benyttes for å kontrollere dette. For å utføre slike beregninger er det en forutsetning å ha eller få tilgang til faktiske posisjoner av planlagt og eksisterende infrastruktur.

Noen flere talleksempler finnes i Appendix: Interferens fra mange vindmøller.

4 Litteraturstudium

Det finnes en del litteratur som direkte omtaler hvordan radiosignaler blir påvirket av vindmøller. ITU har laget en del rapporter på området. Det nevnes påvirkning på analog TV [5], digital TV [6] og [7] og radiopeiling [9]. En av disse tar for seg digital TV som DVB-T og refererer til annet arbeid som er utført i Australia og Spania [10]. Følgende konklusjoner kan trekkes fram fra disse arbeidene. Noen av konklusjonene er motstridende, men de empiriske målingene gir likevel tall som man kan forholde seg til.

- Den kraftigste interferensen oppstår i "backscatter" retning altså når vindmøllene ikke befinner seg mellom sender og mottaker, men bak en av dem. Likevel ved bruk av en direktiv antenne med gain 13 dB fikk man aldri problemer. Denne antenne må benyttes nærmest mølla for å ha best effekt.
- Vindmøllene reflekterer mindre energi framover, men om de er plassert for nære eller på siktelinjen mellom sender og mottaker kan påvirkningen bli tydelig.
- Det nevnes at ytelsen til DVB-T mottakere kan variere i forhold til hvordan de adapterer seg til kanalen.

- Geometrien inkludert høyde mellom sender, mottaker og vindmølle påvirker resultatene.
- Masta til vindmøllene kan også påvirke radioforholdene da den er større enn vingene.

I det spanske arbeidet er det fra 2013 tatt frem en forenklet empirisk beregningsmodell som omtales som bedre enn de tunge matematiske beregningene som er gjort tidligere [11].

I en publisering fra NASA fra 2001 [12] beregnes interferensen og det gjøres et poeng av hvordan interferensen fra flere vindmøller summeres. Dette kan gjøres enten på energibasis eller koherent på amplitudebasis der det siste faktisk medfører at 2 vindmøller i nærheten av hverandre kan fremstå som flere enn 2. Samtidig vil det være slik at med en felles vindretning vil det nesten ikke være mulig at alle møller har en verst tenkelig orientering mot sender og mottaker. I tillegg er det flere studier som viser at den kraftigste refleksjonen bare skjer innenfor et kort tidsrom (typisk 30 ms varighet) når ett av vindmøllas (tre) blad står vinkelrett på planet dannet av de tre punktene sender, mottaker og mølle. Dette skjer to ganger per omdreining for hvert blad. Om man antar at alle turbiner roterer asynkront vil disse kraftige refleksjonstoppene komme til litt variable tider og derfor vil de kunne summeres på energibasis.

Det er i ferd med å dukke opp selskaper som med kunnskap om radiopropagasjon kan tilby forskjellige tjenester. Det amerikanske BroadcastWind [18] og det engelske Transfinite [21] ser ut til å kunne beregne interferens fra vindmøller.

5 Referanser

- [1] Kaveh Pahlavan, Allen H. Levesque, "Wiley series in telecommunications and signal processing, Wireless Information Networks", 1995.
- [2] David K. Barton, "Modern radar system analysis", Artech house inc., 1988
- [3] CEPT ECC Report 260, "Description of methodologies to estimate the technical impact of wind turbines on Fixed Radio Links", January 2017.
- [4] I. Angulo et al, "Empirical Evaluation of the Impact of Wind Turbines on DVB-T Reception Quality", BTS-11-119.
- [5] ITU-R, Recommendation ITU-R BT.805 (03/1992) Assessment of impairment caused to analogue television reception by a wind turbine.
- [6] ITU-R, Recommendation ITU-R BT.1893-1 (10/2015) Assessment methods of impairment caused to digital television reception by wind turbines
- [7] Report ITU-R BT.2142-1 (10/2010) The effect of the scattering of digital television signals from a wind turbine
- [8] Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker, "LTE The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice", Wiley, 2009.
- [9] Report ITU-R SM.2391-0 (06/2016) The effects of wind turbines on fixed radio direction finders
- [10] I. Angulo et al, "Methodology for the Empirical Analysis of the Scattering Signals from a Wind Turbine", 2009 Loughborough Antennas and Propagation Conference.
- [11] I. Angulo et al, "A Measurement-Based Multipath Channel Model for Signal Propagation in Presence of Wind Farms in the UHF Band", IEEE transactions on communications, vol. 61, no. 11, nov. 2013.
- [12] NASA, "Equations for Estimating the Strength of TV Signals Scattered by Wind Turbines", 2001
- [13] Ahmet Faruk Coskun et al, "Wind Farms' Interference Effects on the Error Performance of Wireless Line-of-Sight Communications Using Binary Digital Modulations", IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS VOL. 51, NO. 4 OCTOBER 2015
- [14] 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

- [15] 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
- [16] <http://www.telegraph.co.uk/business/2017/01/01/blown-qinetiq-baffles-radar-stealth-wind-turbines/>
- [17] <http://www.windpowermonthly.com/article/1311132/vestas-installs-first-radar-friendly-blade>
- [18] <http://broadcastwind.com/>
- [19] Ting-An Lin, Chen-Yi Lee, "Predictive equalizer design for DVB-T system", Department of Electronics Engineering, National Chiao Tung University.
- [20] Frank Eory, "Comparison of adaptive equalization methods for the ATSC and DVB-T digital television broadcast systems", Proceedings of the 2000 Third IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems (Cat. No.00TH8474).
- [21] <https://tslstorage.blob.core.windows.net/papers/WindFarmsandPtPLinks.pdf>
- [22] Brian M. Kent, Kueichien C. Hill, Alan Buterba ugh, Greg Zelinskil, Robert Hawley, Lisa Cravens. Tni-Van, .Christopher Vogee, 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

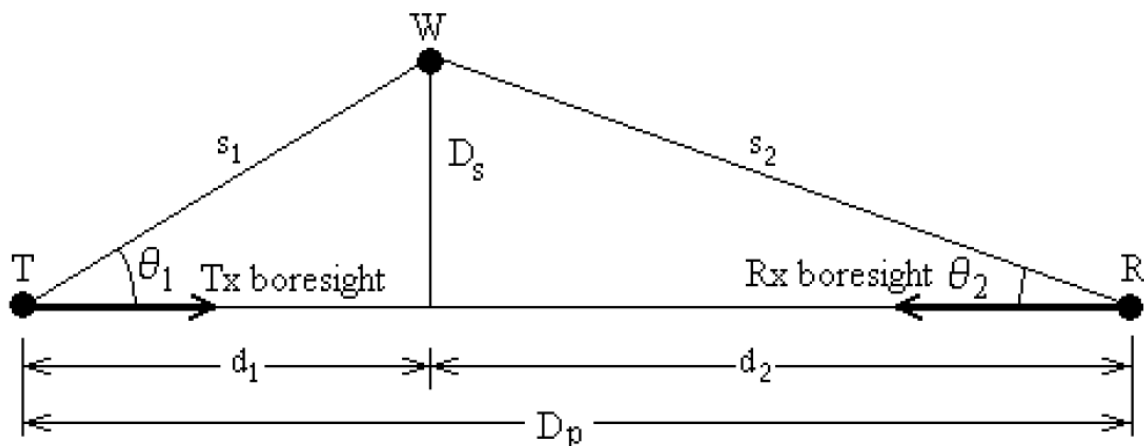
6 Appendix: Interferens fra mange vindmøller

I ITU's rekommandasjoner lanseres en "scattering parameter". I dette appendix beregnes faktisk støy ved mottakerne ved å gjøre noen forenklinger, og det fremgår at systemet med radiosendere og mottakere betraktes på samme måte som et bistatisk radarsystem som utilsiktet detekterer vindmøller.

Det antas fri sikt mellom sender og mottaker. Fra frittromsdempningen [1] kan mottakerens mottatte signalnivå eller nyttesignal beregnes til:

$$C = \frac{P G_T(0) G_R(0) \lambda^2}{(4\pi)^2 D_p^2} \quad (1.4)$$

der P er sendereffekten, G er antenneforsterkning på henholdsvis transmitter T og receiver R, λ er bølgelengden og D_p er avstand mellom sender og mottaker som vist i Figur 3 [3]. Her vises en radiosender T, en radiomottaker R og et antall turbiner W. Under denne antagelse må mottakeren operere med et carrier til interferensnivå C/I som skyldes reflekser fra W.



Figur 3 Forenklet beregning av støy fra vindmøller i avstand s_1 fra sender og s_2 fra motrtaker.

Det antas at de N møllene reflekterer radiosignalene og roterer hurtigere enn hva algoritmene til radiosystemets mottakere tåler. Rotorene vil derfor generere et signal som framstår som støy for mottakeren. Fra likningen for bistatisk radar [2] kan mottakerens mottatte støysignal eller interferens beregnes:

$$I = \frac{P G_T(\theta_1) G_R(\theta_2) \lambda^2 N \sigma}{(4\pi)^3 s_1^2 s_2^2} \quad (1.5)$$

der σ er midlere *radar cross section* RCS for hver vindmølle uttrykt i antall kvadratmeter.

Et forholdstall C/I kan nå beregnes [3]. Det uttrykker carrier-til-interferens nivået som er et måltall på hvor bra signalkvaliteten er på mottakeren. Det blir da tydelig at utsendt effekt ikke spiller noen rolle.

$$\frac{C}{I} = \frac{G_T(0) G_R(0) 4\pi s_1^2 s_2^2}{G_T(\theta_1) G_R(\theta_2) D_p^2 N \sigma} \quad (1.6)$$

Dersom rundstrålende antenner benyttes med samme antenneforsterkning i alle retninger spiller heller ikke antenneforsterkningen noen rolle og C/I kan forenkles til:

$$\frac{C}{I} = \frac{4\pi s_1^2 s_2^2}{D_p^2 N \sigma} \quad (1.7)$$

Videre, fra dette uttrykk ser en at de dårligste forhold med lavest C/I oppstår når møllene er nære senderen (s_1 er liten) og når møllene er nære mottakeren (s_2 er liten). Om man antar det verst tenkelige: at alle møller er plassert nære sender og/eller mottaker i en avstand $r \ll D_p$ spiller heller ikke avstanden mellom sender og mottaker D_p noen rolle. Et tilnærmet uttrykk for C/I blir da:

$$\frac{C}{I} \approx \frac{4\pi r^2}{N \sigma} \quad (1.8)$$

Om man sammenligner interferensnivået beregnet av ITU med denne likning, kan møllens maksimale RCS uttrykkes ved det verst tenkelige vinkelrette innfall.

$$\sigma = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} \quad (1.9)$$

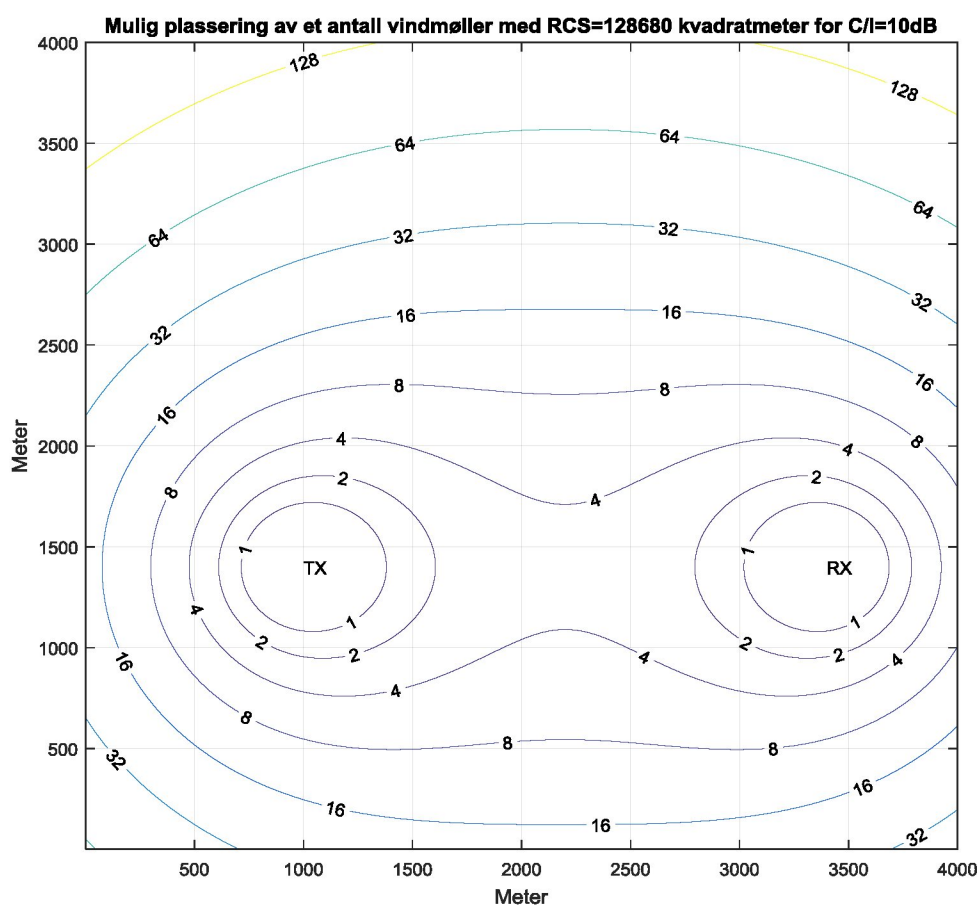
der A er vingeearealet. Dette uttrykk gjenkjennes som det teoretisk maksimale radartverrsnitt fra et flatt rektangel (se Tabell 1). Vingene er ikke flate men formet som en flyvinge med variabel innfallsvinkel. Derfor blir den faktiske maksimale RCS noe mindre og ikke konstant som i dette enkle overslag. I tillegg reduseres RCS mye når orienteringen endres. Det er bare kula som er uavhengig av orientering. Den er også uavhengig av bølgelengden så lenge bølgelengden er mindre enn omkretsen til kula.

Tabell 1 Noen kjente objekter og deres radartverrsnitt

Objekt	Maksimal RCS i antall kvadratmeter	
Kule	πR^2	R er radius
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

I ITU rekommandasjonen består mølla av 3 metallblad hver med lengde 33 meter som er 3.3 meter brede inne ved navet. A blir da 160m^2 og bølgelengden λ ved 600MHz blir 0.5m. σ kan beregnes av likning (1.9) til 1286800m^2 og C/I blir 10 ved $r=1\text{km}$ avstand. Samtidig nevnes det at RCS for et glassfiberblad kan være

10 ganger mindre enn et metallblad. Ved å anta at et statistisk mål på interferensen fra hver mølle kan summeres på energibasis på samme måte som i [11] kan 10 vindmøller være minst 1 km fra senderen. Færre vindmøller kan komme nærmere mens flere vindmøller enn 10 må plasseres lengre bort enn 1 km. Med disse tallverdier fra ITU og bruk av likning 1.7 kan Figur 4 presenteres der hver kote er navngitt med et tall som angir hvor mange møller som kan plasseres på denne kote for et gitt interferensnivå C/I . Her er det foreløpig ikke tatt hensyn til at møllene ikke kan befinne seg midt mellom sender og mottaker. Vindretningen kan spille en rolle i å redusere interferensen når antall møller øker fordi det må antas at vinden sørger for at alle vindmøller orienterer seg noenlunde parallelt og dermed ikke kan fokusere maksimal interferens fra en nær sender eller mot en nær mottaker.



Figur 4 Mulig plassering av et antall vindmøller i kartet i forhold til sender TX og mottaker RX for en gitt signalkvalitet i dB. For å oppnå den beregnede C/I må det totale antall vindmøller avbalanseres. Om det for eksempel plasseres 8 møller ved kote 8 er interferensnivået på kanten av det tolererbare. Om det bare plasseres 8 møller ved kote 16 er interferensnivået bare halvveis oppfylt.



Teknologi for et bedre samfunn

www.sintef.no