



Verkenning naar de mogelijke invloed van windturbines op de ontvangst van omroepsignalen

Colofon

Aan	
Van	Huub Nagel
Nummer	1.1
Datum	30 maart 2015
Leden	

Inhoud

Samenvatting 3

Inleiding 5

1 Theoretische achtergrond 6

1.1 Berekening van de RCS (σ) 7

1.2 Bepaling van ΔL 8

2 Benodigde aanvullende informatie 9

2.1 Protectiewaarde 9

2.1.1 FM radio 9

2.1.2 DVB-T 9

2.1.3 DAB 11

2.2 De Radar Cross Sectie van een windturbine 11

3 Voorlopige bevindingen 13

3.1 FM radio 14

3.2 DAB 15

3.3 DVB-T 17

4 Afscherming door windturbines 19

5 Voorlopige bevindingen 20

Samenvatting

Grote objecten, zoals windturbines, kunnen invloed hebben op de ontvangst van omroepsignalen. Dit kan in principe op twee verschillende manieren gebeuren, namelijk door reflecties en afscherming. Deze verkenning tracht de mogelijke invloed van windturbines op de ontvangst van FM radio, DAB en DVB-T signalen weer te geven¹. Gelet op de aard van deze verkenning wordt niet gepretendeerd om volledig te zijn. Om diepgaander inzicht te kunnen verschaffen in deze problematiek, zou een (praktijk)onderzoek kunnen worden overwogen.

Bij Agentschap Telecom zijn er tot op heden geen (aangetoonde) ontvangstproblemen bekend als gevolg van windturbines. Echter als gevolg van het plaatsen van steeds grotere windturbines en de zorgen bij operators en vergunninghouders voor de ontvangst van hun radio en TV programma, tracht deze verkenning een eerste orde van inschatting te maken van de invloed van dergelijke windturbines op de ontvangst van omroep signalen.

Tot op heden is er voor zover bekend erg weinig onderzoek gedaan naar het mogelijke effect van windturbines op de ontvangst van FM radio signalen. In een enkel onderzoek is het alleen zijdelings meegenomen. Bekend is dat met name de ontvangst van analoge TV, welke nu niet meer in de ether voorkomt, in het verleden gevoelig was voor de reflecties van windturbines. FM radio signalen zijn hier echter veel minder gevoelig voor.

Er zijn in het buitenland wel metingen verricht aan de mate waarin DVB-T ontvangst hinder kan ondervinden van windturbines. De resultaten van deze metingen zullen in deze verkenning gebruikt worden. Zover bekend, zijn er geen metingen verricht aan het effect van windmolens op DAB.

Aan de hand van de mate van reflectie van radiosignalen door de windturbines, wordt getracht in deze verkenning een inschatting te maken van de mogelijke interferentie afstanden voor FM radio, digitale radio (DAB) en digitale televisie (DVB-T). Omdat niet bekend is welke windturbines daadwerkelijk geplaatst gaan worden, en hierdoor de mate van reflectie van radiosignalen onzeker is, is ook getracht de invloed hiervan in kaart te brengen. Daarnaast zijn er geen metingen bekend aan de mate van reflectie van radiosignalen door windturbines op de frequenties waarop omroep signalen worden uitgezonden. Hierdoor ontstaat een zekere mate van onzekerheid. Alleen nader onderzoek in de vorm van metingen zou hier mogelijk meer duidelijkheid over kunnen geven. Vanwege deze onzekerheid is in deze verkenning getracht ook het effect van windturbines weer te geven als deze een hogere of lagere mate van reflectie van radiosignalen mochten hebben dan verwacht.

Door het vervangen van windturbines in de Wieringermeerpolder door hogere windturbines, zal de afstand waarop de ontvangst van omroepsignalen hinder kan ondervinden als gevolg van reflecties naar verwachting drie tot vier keer zo groot kunnen worden. Echter uit de geschatte afstand waarop hinder ondervonden kan worden, is de verwachting dat de impact hiervan beperkt blijft tot twee kilometer. In onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de mogelijke afstanden waarop

¹ Bij FM radio zal dit zich uiten in een verhoogde ruisvloer, bij DAB radio in het wegvallen van het geluid en bij DVB-T in het optreden van blokken of bevroren van het beeld.

hinder bij de ontvangst van omroepsignalen ondervonden kan worden. Het effect is sterk afhankelijk van de afstand tussen de omroepzender en de windturbine. Daarom zijn er twee situaties weergegeven. De getoonde afstanden moeten, vanwege de diverse onzekerheden en aannames als indicatief beschouwd worden. Het gaat hier om de afstand van een windturbine die reflectie geeft tot een ontvanger.

	FM radio	DAB	DVB-T
<i>Omroepzender ver van windturbine (meer dan 20 km)</i>			
Geschatte interferentieafstand in km	1,5	1,1	1,9
<i>Omroepzender dicht bij windturbine (minder dan 5 km)</i>			
Geschatte interferentieafstand in meters	140	30	140

De mate van reflectie van een radiosignaal door een object is afhankelijk van de frequentie van het (omroep) signaal. Echter gezien de grote spreiding in resultaten van diverse onderzoeken, is er in deze verkenning voor gekozen om een voor iedere frequentie constante relatief grote waarde aan te nemen. Dit laat onverlet dat er in een kleine hoek gezien vanuit een windturbine een nog hogere mate van reflectie van radiosignalen kan optreden, zodat in incidentele situaties van waarschijnlijk korte duur er beduidend grotere afstanden kunnen optreden waar hinder ondervonden kan worden bij de ontvangst van omroepsignalen.

De invloed van windturbines door afscherming op de ontvangst van omroep signalen is lastig rekenkundig te bepalen. Door aan te nemen dat het totale oppervlak van de windturbine het omroep signaal volledig blokkeert is een eerste orde inschatting te maken. Gezien het relatief frequenties van omroepsignalen mag verwacht worden dat dit alleen een lokaal effect zal hebben. Dit wordt bevestigd door de berekening.

Inleiding

Grote objecten, zoals windturbines, kunnen invloed hebben op de ontvangst van omroepsignalen. Dit kan in principe op twee verschillende manieren gebeuren, namelijk door reflecties en schaduwwerking. Deze verkenning tracht de mogelijke invloed van windturbines op de ontvangst van FM radio, DAB en DVB-T signalen weer te geven². Gelet op de aard van deze verkenning wordt niet gepretendeerd om volledig te zijn. Om diepgaander inzicht te kunnen verschaffen in deze problematiek, zou een (praktijk)onderzoek kunnen worden overwogen.

Bij Agentschap Telecom zijn er tot op heden geen (aangetoonde) ontvangst problemen bekend als gevolg van windturbines.³ Echter als gevolg van het plaatsen van steeds grotere windturbines en de zorgen bij operators en vergunninghouders voor de ontvangst van hun radio en TV programma, tracht deze verkenning een eerste orde van grootte analyse te maken van de mogelijke invloed van dergelijke windturbines op de ontvangst van omroep signalen.

Tot op heden is er voor zover bekend erg weinig onderzoek gedaan naar het mogelijke effect van windturbines op de ontvangst van FM radio signalen. In een enkel onderzoek⁴ is het alleen zijdelings meegenomen. Bekend is dat met name de ontvangst van analoge TV, welke nu niet meer in de ether voorkomt, in het verleden gevoelig was voor de reflecties van windturbines. De reden hiervoor is dat het beeldsignaal amplitude gemoduleerd is, hierdoor hebben amplitude variaties als gevolg van reflecties direct invloed op de beeldkwaliteit. Bij FM radio wordt echter de informatie in het signaal weergegeven door frequentie variatie⁵. Reflecties hebben geen of vrijwel geen invloed op de frequentiemodulatie, waardoor FM radio hier veel minder hinder van ondervindt.

Er zijn wel in het buitenland metingen verricht aan de mate waarin DVB-T ontvangst hinder kan ondervinden van windturbines. Een resultaat hiervan is onder andere opgenomen in ITU report BT.2142-1. De resultaten van deze metingen zullen in deze verkenning gebruikt worden.

Aan de hand van de radar cross section (RCS: de mate reflectie van radiosignalen) van de windturbines, wordt getracht in deze verkenning een voorlopige inschatting te maken van de mogelijke interferentie afstanden voor FM radio, DAB en DVB-T. Omdat niet bekend is welke windturbines daadwerkelijk geplaatst gaan worden, en hierdoor de radar cross section onzeker is, is ook getracht de invloed hiervan in kaart te brengen. Daarnaast zijn er geen metingen bekend aan de RCS van windturbines op de frequenties waarop omroep signalen worden uitgezonden. Dit maakt dat er ten aanzien van de inschatting van de RCS van windturbines op deze frequenties een zekere mate van onzekerheid bestaat. Alleen nader onderzoek in de vorm van metingen zou hier mogelijk meer duidelijkheid over kunnen geven. Vanwege deze onzekerheid is in deze verkenning getracht ook het effect van windturbines weer te geven als deze een hogere RCS waarde mochten hebben dan verwacht.

² Bij FM radio zal dit zich uiten in een verhoogde ruisvloer, bij DAB radio in het wegvallen van het geluid en bij DVB-T in het optreden van blokken of bevrozen van het beeld.

³ Ontvangstproblemen kunnen niet volledig worden uitgesloten. Daar waar ze optreden zijn veelal (eenvoudige) mitigatietechnieken mogelijk.

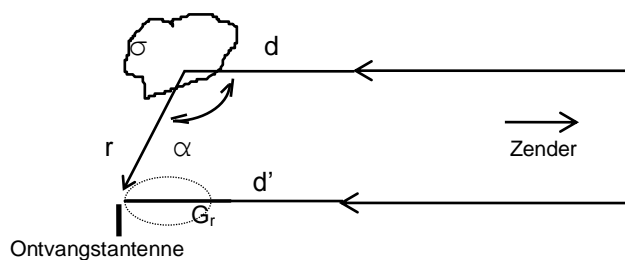
⁴ Een voorbeeld hiervan is: "Tall structures and their impact on broadcast and other wireless services", augustus 2009, Ofcom

⁵ Vandaar Frequentie Modulatie radio

1 Theoretische achtergrond

Het rapport "Radio storing door windturbine reflecties" uit 1984 van de toenmalige PTT, geschreven door J.W. Aitink⁶, geeft een goede theoretische basis om de mogelijke invloed van reflecties op de ontvangst van omroep signalen te berekenen.⁷

In dit rapport wordt het probleem van reflecties van windturbines benaderd, zoals weergegeven in onderstaande afbeelding. Daarbij wordt de windturbine weergegeven als een wolk.



Bij de berekening van het effect van de reflecties door windturbines mogen we bij omroepzenders die relatief ver weg gelegen zijn aannemen dat de afstand van de omroepzender tot de windturbine (d) en de afstand van de omroepzender tot de ontvangstantenne (d') ongeveer gelijk zijn. Daarnaast gaan we bij de analyse uit van het Modified Hata model voor open area volgens ERC rapport 68 met een 70% waarschijnlijkheid⁸. Ter vergelijking is ook het Line Of Sight (LOS) model gebruikt. Het LOS model geeft echter voor afstanden groter dan enkele km een overschatting van de interferentie⁹.

Het rapport geeft uitgaande van deze aannames de volgende formule¹⁰ om de benodigde C/I uit te rekenen¹¹.

$$\frac{C}{I} = \Delta L - 10 \log \frac{4\pi\sigma}{\lambda^2} + L_r$$

⁶ heruitgave PTT rapport RS 84002A door de Rijksdienst voor Radiocommunicatie in 1998.

⁷ ITU recomandatie BT.1893-0 geeft ook een methode om de invloed van windturbines te berekenen. Deze recomandatie geeft echter een eerste benadering die leidt tot zeer grote coördinatie afstanden. Deze resultaten kunnen het best beschouwd worden als een eerste inschatting van een gebied waar nader onderzoek plaats zou kunnen vinden.

⁸ D.w.z. 70% van de tijd is de invloed van een windturbine minder dan berekend. De verzorging van FM radio zenders wordt met een 50% tijd en 50% plaats waarschijnlijkheid gepland. Aangezien we reeds uit gaan van een RCS van de windturbine onder relatieve worst case reflectie condities lijkt 70% een redelijke aanname. Overigens zal blijken dat het Modified Hata model voor open area begrensd wordt door het LOS propagatie model. In dat geval is de hoogte van dit percentage niet meer relevant.

⁹ Bij een masthoogte van 120 meter en een rotordiameter van 116 meter, is het hoogste punt van de windturbine ongeveer 180 meter. Bij drie km afstand is de hoek waaronder dit wordt waargenomen nog 3,4 graden.

¹⁰ De formule is iets aangepast, omdat in deze verkenning er niet uitgegaan wordt van richtingsgevoeligheid van ontvangstantenne, maar wel van een verschil in paddemping tussen omroepzender en windturbine en omroepzender en ontvangstantenne. Dit als gevolg van het hoogteverschil.

¹¹ Als de benodigde C/I bekend is kan ook andersom de benodigde afstand (r) tussen windturbine en ontvangstantenne worden uitgerekend.

Waarbij:

σ : Radar cross section van de windturbine;

λ : golflengte

ΔL : Verschil in paddemping tussen omroepzender en windturbine en omroepzender en ontvangstantenne.

L_r : Verlies tussen windturbine en ontvangstantenne.

C/I: carrier / interference; gewenste gedeeld door het interfererende signaal

1.1 Berekening van de RCS (σ)

Om de mogelijke invloed van de reflecties van windturbines op de ontvangst van omroep signalen te kunnen bepalen is het noodzakelijk de radar cross sectie (RCS) te kennen. Metingen aan de RCS van windturbines zijn echter uitgevoerd op frequenties waar radarsystemen opereren¹². De vraag daarbij is dan of deze metingen gebruikt kunnen worden om een inschatting te maken van de RCS van een windturbine voor de frequenties waarop omroepsystemen functioneren. Deze omrekening is echter niet eenduidig, maar sterk afhankelijk van de vorm van het object. In eerste orde benadering kunnen we echter de mast van een windturbine modelleren als een cilinder, er vanuit gaande dat de mast de dominante bron van reflecties is.¹³ De omrekening van de RCS kan dan, voor verschillende golflengte en grootte van windturbine, met behulp van de volgende formule plaatsvinden.¹⁴

$$\sigma_{\max} = \frac{2\pi R H^2}{\lambda} \text{ Waarbij: H: hoogte mast; R: straal mast}$$

De rotorbladen van een windturbine kunnen ook in eerste orde gezien worden als een plat vlak. De maximale RCS kan dan met de volgende formule berekend worden¹⁵.

$$\sigma_{\max} = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} \text{ Waarbij: A: oppervlakte van rotorblad.}$$

Aangezien de verhoudingen van de mast van een windturbine min of meer onafhankelijk zijn van de grootte van de windturbine, zal de maximale RCS evenredig met de derde macht van de hoogte van de mast variëren. De maximale RCS die met deze formule berekend wordt (voor een windturbine zoals voorzien in de Wieringermeerpolder, ongeveer 65 dBm² bij 694 MHz) komt overigens alleen voor in een zeer kleine hoek (zie ook de meet- en simulatieresultaten verder op). Het hanteren van deze maximale RCS voor de analyse van de mogelijke invloed van windturbines op de ontvangst van omroepsignalen lijkt dan ook niet reëel. Doordat dit soort hoge waarden van RCS voor kunnen komen, is iedere vorm van verstoring echter niet volledig uit te sluiten.

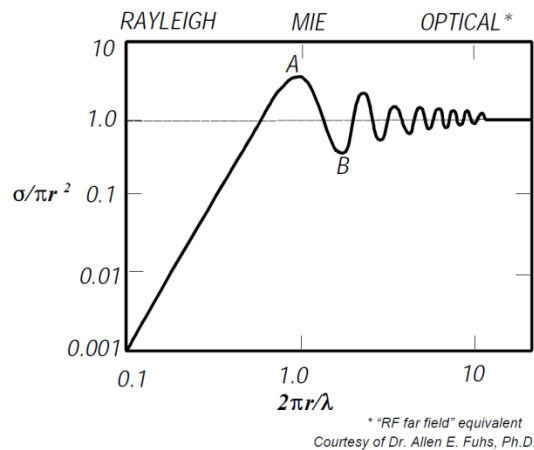
¹² Met name radarsystemen kunnen veel hinder ondervinden van windturbines. Vandaar dat daar relatief veel onderzoek naar gedaan is.

¹³ Uit diverse metingen blijkt dit ook het geval te zijn. De turbinebladen kunnen in eerste benadering ook als een cilinder gezien worden, hoewel hun vorm feitelijk complex is. Zie ook "A Measurement-Based Multipath Channel Model for Signal Propagation in Presence of Wind Farms in the UHF Band", I. Angulo e.a, IEEE Transactions on communications, vol 61, p 4788-4798.

¹⁴ De maximum waarde van de RCS treedt alleen op bij een zeer kleine hoek. In andere richtingen is de RCS aanmerkelijk lager.

¹⁵ Zie b.v. ITU recomandatatie BT.1893-0.

De RCS wordt altijd gerelateerd aan een bol met een oppervlakte van de doorsnede van 1 m^2 .¹⁶ Dit is echter alleen geldig als $2\pi R/\lambda > 10$. Bij $2\pi R/\lambda < 1$ neemt de RCS sterk af. Zie onderstaande afbeelding.



Hoewel deze afbeelding geldt voor een bol is hiermee een redelijke inschatting te maken of de omrekening van de RCS naar omroepfrequenties gerechtvaardigd is. Bij FM radio, voor deze berekening het meest kritisch, is de golflengte van het signaal ongeveer 3 meter. Dit betekent dat bij een straal van de mast van de windturbine groter dan 0,5 meter er voldaan wordt aan $2\pi R/\lambda > 1$, waardoor verwacht mag worden dat de hiervoor vermelde formule voor de omrekening van de RCS een redelijke benadering zal zijn.¹⁷

1.2 Bepaling van ΔL

ΔL wordt voornamelijk bepaald door het hoogte verschil tussen ontvanger en reflecterende windturbine en de afstand tot een omroepzender. Als we uitgaan van een omroepzender, welke relatief ver weg staat van de windturbine dan kunnen we met behulp van ITU recommanatie P. 1546-5¹⁸ ΔL berekenen¹⁹. Als de omroepzender en de ontvangstantenne dicht bij de windturbine staat, zal ΔL klein zijn, hierdoor neemt het effect van de reflecties van windturbines op de kwaliteit van het ontvangen signaal sterk af. Voor de inschatting van de impact van windturbines op de ontvangst van omroepsignalen is deze situatie daarom minder relevant.²⁰

In dit onderzoek gaan we uit van de windturbines, zoals die voorzien worden in de Wieringermeerpolder. Deze hebben een masthoogte van 120 meter en een rotordiameter van 117 meter²¹. Met behulp van de formules in de vorige paragraaf voor de maximale RCS en de ITU recommanatie P. 1546-5 kan de effectieve hoogte berekend worden van de windturbine. Bij FM radio en DAB gaan we daarbij uit van een ontvangstantenne hoogte van 1,5 meter. Bij DVB-T in de omgeving van de Wieringermeerpolder is het van belang dat in ieder geval de dak ontvangst beschermd

¹⁶ De diameter van de bol is dan ongeveer 1,13 meter. Een bol wordt als referentie genomen, omdat de RCS van een bol onafhankelijk is van de frequentie ($RCS = \pi R^2$).

¹⁷ Een deel van de wieken zal waarschijnlijk niet voldoen aan deze eis, waardoor er mogelijk een overschatting van de RCS plaatsvindt bij met name FM radio. Vanuit voorzichtigheidsoverwegingen is dit echter geen probleem.

¹⁸ Voor landelijke gebieden moet hiervoor vergelijking 28b uit de recommanatie worden gebruikt.

¹⁹ Voor een omroep zender die vlakbij staat zal voor zowel de windturbine als de ontvangstantenne een min of meer LOS conditie gelden. Hierdoor zal ΔL klein zijn. Bij de berekening van de interferentie afstand gaan we in dit geval uit van $\Delta L=0$ dB.

²⁰ Dit mede ook omdat het een relatief lokaal effect is.

²¹ Voor meer details over de windturbine zie hoofdstuk 2

wordt²². In dat geval gaan we uit van een ontvangsthogte van 10 meter. Dit levert de volgende resultaten op²³:

- FM radio: effectieve hoogte windturbine: 74 meter; ΔL : 26,5 dB.
- DAB: effectieve hoogte windturbine: 88 meter; ΔL : 31,5 dB.
- DVB-T: effectieve hoogte windturbine: 120 meter; ΔL : 22,5 dB.²⁴

2 Benodigde aanvullende informatie

Om te kunnen berekenen wat het potentiële interferentiegebied is voor omroep signalen als gevolg van reflecties van een windturbine is aanvullende informatie nodig. Het is noodzakelijk om de benodigde protectiewaarde, ofwel C/I, te weten en de RCS van een windturbine.

2.1 Protectiewaarde

2.1.1 FM radio

Om de planning van FM radiosignalen uit te kunnen voeren met (near) Single Frequency netwerken, is het noodzakelijk de benodigde protectieverhouding te kennen. Daarom zijn, mede in het kader van het zero base onderzoek waarop de huidige FM omroep planning is gebaseerd, deze protectieverhoudingen vastgesteld. In onderstaande tabel zijn protectieverhoudingen waarmee het agentschap in zijn planningsprogramma Chirplus rekent weergegeven.

TABLE 1d Same Program, synchronized time delay (same SFNID, OffsetType synchronized):

		Radio-frequency protection ratio (dB) using a maximum frequency deviation of +/- 75 kHz										
								Time delay (µsec)				
		0	5	20	100	200	250					
Frequency spacing (kHz)	0	2,0	14,0	17,0	21,0	25,0						
	100	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0						
	114	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0						
	200	-5,0	-5,0	-5,0	-5,0	-5,0						
	209	-9,0	-9,0	-9,0	-9,0	-9,0						
	400	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0						

Bij een afstand van 900 meter, is de tijdvertraging tussen het directe signaal van de omroepzender en het gereflecteerde signaal van de windturbine 6 µsec. Het lijkt daarom redelijk om voor de benodigde protectieverhouding (C/I) een waarde van 14 dB te kiezen, zeker gezien de voorlopige bevindingen zoals vermeld in paragraaf 3.1.

2.1.2 DVB-T

In ITU report BT.2142-1²⁵ zijn metingen verricht aan het effect van reflecties van windturbines op de ontvangst van DVB-T signalen²⁶. Het rapport geeft daarbij het volgende resultaat²⁷.

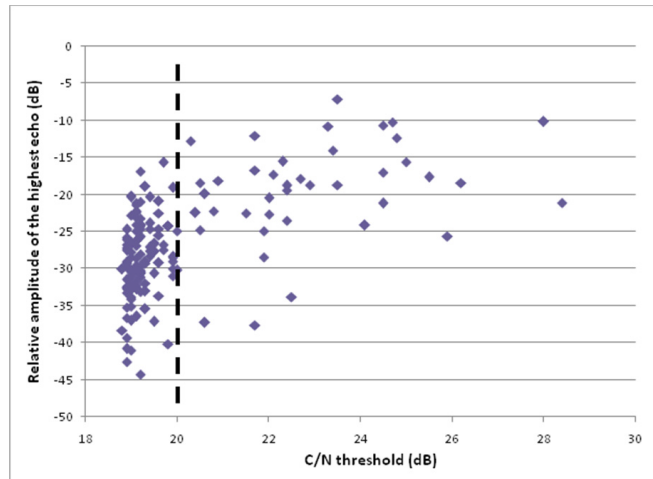
²² Dit komt overeen met de verzorging van het huidige DVB-T netwerk in deze omgeving. De zendmast in de Wieringermeerpolder bevat geen DVB-T zenders.

²³ De effectieve hoogte stijgt met de frequentie, omdat de invloed van de RCS van de rotorbladen op de totale RCS toeneemt met de frequentie. Voor FM radio, DAB en DVB-T is gerekend met respectievelijk 100, 230 en 694 MHz.

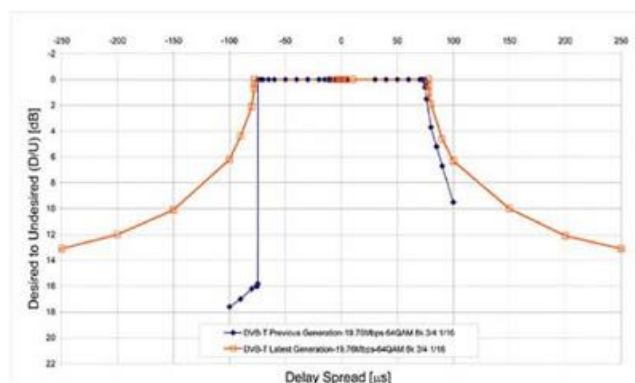
²⁴ Verderop in deze verkenning zal worden gesteld dat bij DVB-T alleen elementen met een hoge snelheid bijdragen aan interferentie. Hierdoor tellen alleen delen van de rotorbladen mee. De mast van de windturbine heeft hierdoor geen invloed op de effectieve hoogte.

²⁵ Zie ook: "Emperical Evaluation of the Impact of Wind Turbines on DVB-T Reception Quality", I. Angulo e.a., IEEE Transactions on broadcasting, vol. 58, p 1-9.

²⁶ QAM64, 8 MHz, 8K mode, 2/3 code rate.

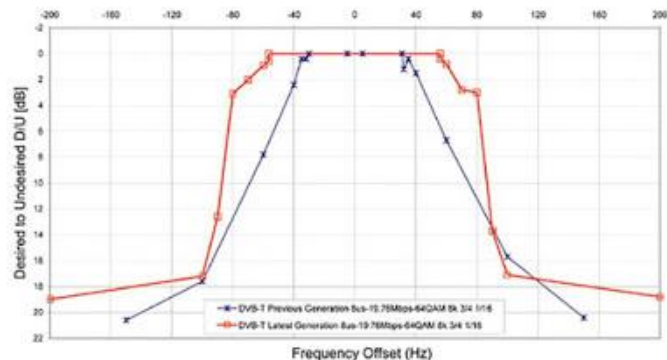


Uit de metingen is niet een eenduidige relatie af te leiden tussen de relatieve amplitude van het reflecterende signaal en de benodigde C/N. Het rapport concludeert dat de meeste metingen die een C/N van meer dan 20 dB laten zien een relatieve amplitude van meer dan -25 dB hebben. De reden dat er uit deze metingen geen eenduidige relatie lijkt te komen, is mogelijk gelegen in de gevoeligheid van DVB-T voor doppler. Het Amerikaanse bedrijf Broadcast Wind, die in opdracht (vrijwel niet gepubliceerd) onderzoek doet naar het effect van windturbines op omroepsignalen, heeft op zijn site²⁸ de volgende twee afbeeldingen geplaatst.



²⁷ Dit alleen bij backward scattering. Forward scattering heeft vrijwel geen effect. Dit omdat de tijdvertraging tussen het directe pad signaal en het gereflecteerde signaal dan zeer gering is.

²⁸ In het artikel "Robustness of Broadcast Systems to Multipath Intereferance from Wind Turbines", januari 2012, Charles W. Rhodes; <http://broadcastwind.com/broadcast-wind/robustness-of-broadcast-systems-to-multipath-interference-from-wind-turbines/>



De eerste afbeelding geeft aan binnen welke tijdvertraging DVB-T ontvangers relatief ongevoelig zijn voor reflecties (het betreft hier feitelijke metingen aan ontvangers). Binnen een tijdvertraging van 80 μ sec zijn DVB-T ontvangers relatief ongevoelig voor reflecties. Dit komt in de situatie van windturbine reflecties overeen met een afstand van 13 km. Dit ligt ver buiten de berekende stoorafstanden in deze verkenning.

De tweede afbeelding geeft de gevoeligheid van DVB-T ontvangers weer voor doppler verschuiving. Dit kan onder andere optreden doordat het omroep signaal reflecteert tegen een snel bewegend object, zoals de rotorbladen van een windturbine. Bij nieuwe DVB-T ontvangers (rode curve) treedt er pas een aanmerkelijke verslechtering op in de benodigde protectie verhouding bij een frequentieverschuiving van 80 Hz als gevolg van doppler. Dit komt bij een maximale DVB-T zendfrequentie van 694 MHz²⁹ overeen met een snelheid van 125 km per uur. Een groot deel van de rotorbladen zal, bij voldoende wind, daardoor bij kunnen dragen aan hinderlijke reflecties (ongeveer 70% van het oppervlak). De mast van een windturbine heeft daarentegen nagenoeg geen invloed. Het hinderlijke deel RCS van de windturbine is hierdoor kleiner dan de in dit rapport berekende RCS. Een conservatieve/voorzichtige inschatting is om hier een reductie op de RCS van 5dB te nemen.

In het ITU report, wordt het effect van doppler niet nader onderzocht. Dit kan een verklaring zijn voor de niet eenduidige meetresultaten. Op basis van de metingen van het bedrijf Broadcast Wind, zoals hierboven weergegeven, lijkt een te hanteren protectiemarge van 19 dB een redelijke waarde.

2.1.3 DAB

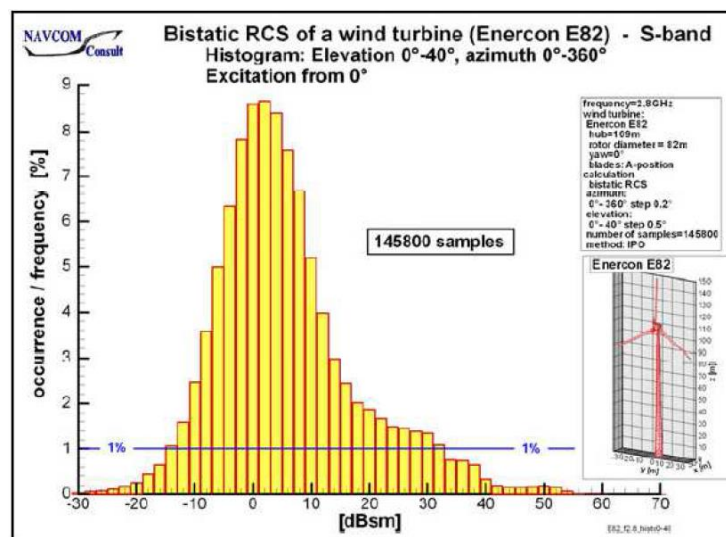
Voor zover bekend zijn er geen metingen verricht aan het effect van windturbines op de ontvangst van DAB signalen. DAB signalen zijn echter vergelijkbaar met DVB-T, echter met een veel robuustere modulatie en een lagere zendfrequentie (maximaal 230 MHz). Hierdoor heeft DAB pas hinder van het doppler effect bij snelheden hoger dan 375 km/uur. Bij een windturbines met bladen van 58 meter kan de buitenste tip van de rotor bladen net een dergelijke snelheid halen. Een protectiewaarde van 0 dB voor DAB lijkt daarom een redelijke keuze.

2.2 De Radar Cross Sectie van een windturbine

²⁹ Na het vrijmaken van de 700 MHz band is dit de hoogste DVB-T frequentie, waarbij het storende effect van doppler verschuiving als eerste optreedt.

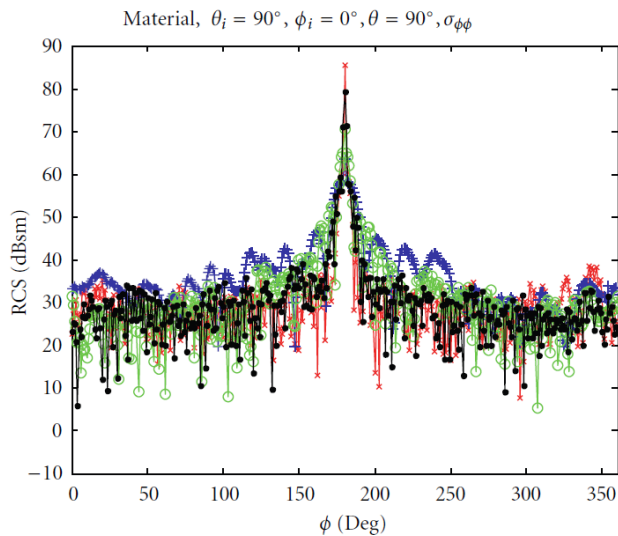
Het bepalen van de RCS van een windturbine is sterk afhankelijk van het type en de specifieke uitvoering en kan eigenlijk alleen goed gedaan worden door middel van metingen. Echter aangezien het verrichten van metingen aan de RCS van een windturbine op relatief lage frequenties in de praktijk lastig is, zal ook getracht worden simulatieresultaten mee te nemen in de inschatting van de RCS. In het kader van deze verkenning kan daarom alleen een globale inschatting gemaakt worden van de te verwachte RCS in relatieve worst case reflectieomstandigheden. Om hier een inschatting van te kunnen maken kan een drietal rapporten als basis gebruikt worden.

- IEEE: "Wind Turbine Radar Signature Characterization by Laboratory Measurements", 2011, Fanxing Kong1 e.a.:
Dit rapport geeft voor een meting aan een schaalmodel een worst case waarde voor de RCS van -25dBm^2 . De masthoogte van dit schaalmodel bedroeg 1,2 meter.
- "Studie omtrent de mogelijke invloed van een windturbinepark "Wind op Zee - Schouwen" met betrekking tot: de SRK-radarinstallaties de scheepsradar en de marifone communicatie", december 2013, Prof.dr.ir.J.Catrysse.³⁰
Dit rapport bevat een berekening aan een Enercon E82 windturbine. Deze windturbine heeft een masthoogte van 109 meter. In onderstaande afbeelding is de RCS weergegeven.



- Research Article: "Wind Turbine Radar Cross Section", David Jenn, Cuong Ton, Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Antennas and Propagation, Volume 2012. Dit artikel bevat berekeningen aan de RCS van een windturbine (masthoogte 60 meter, rotor diameter 80 meter) voor verschillende frequenties. In onderstaande afbeelding is dit weergegeven (blauw: 400 MHz, groen: 900 MHz, zwart: 2400 MHz, rood: 5000 MHz). Voor hoeken anders dan de hoek waarop de maximale RCS optreedt lijkt de frequentieafhankelijkheid van de RCS beperkt.

³⁰ <http://www.rijksoverheid.nl/documenten-en-publicaties/rapporten/2014/09/26/studie-omtrent-de-mogelijke-invloed-van-een-windturbinepark-wind-op-zee-schouwen-met-betrekking-tot-de-srk-radarinstallaties-de-scheepsradar-en-de-marifone-communicatie.html>



De eerste twee bronnen geven vergelijkbare resultaten als we bij het tweede rapport uitgaan van een (worst case) RCS van $29,3 \text{ dBm}^2$.³¹ Dit komt, gezien de afbeelding met de berekening voor de Enercon E82 windtrubine, ongeveer overeen met de 95% slechtste waarde. De laatste bron geeft echter eerder een RCS waarde van rond de 40 dBm^2 onafhankelijk van de frequentie. Vanuit voorzichtigheidsoverwegingen lijkt het daarom verstandig deze hoge waarde als referentie te gebruiken, waarbij voor DVB-T een reductie van 5 dB vanwege het doppler effect toegepast wordt. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat de gemiddelde waarde van de RCS ongeveer 10 dBm^2 lager ligt en het ontwerp van de feitelijk te plaatsen windturbines inclusief het gebruik van RAM³² coating de RCS aanzienlijk kan verminderen³³.

3 Voorlopige bevindingen

In onderstaande paragrafen zijn voor FM radio, DAB en DVB-T de te verwachten interferentieafstanden berekend, uitgaande van een omroepzender die relatief ver weg staat³⁴. Met name de RCS van een windturbine is, zonder nadere metingen, bij een bepaalde frequentie onzeker. Daarom is bij alle berekeningen de afhankelijkheid van de interferentieafstand met de RCS grafisch weergegeven.³⁵ Daarnaast is onderzocht wat de mogelijke invloed is van een rij van windturbines op de ontvangst van omroepsignalen. Tenslotte is ook getracht een inschatting te maken

³¹ Dit bij een windturbine masthoogte van 120 meter en een frequentie van 2,8 GHz. De windturbine in de afbeelding heeft een masthoogte van 109 meter. De hier vermelde RCS is hiervoor gecorrigeerd.

³² Radar Absorbing Material

³³ Tussen de 10 en 25 dBm^2 . Het effect van RAM coating is echter frequentieafhankelijk en kostbaar.

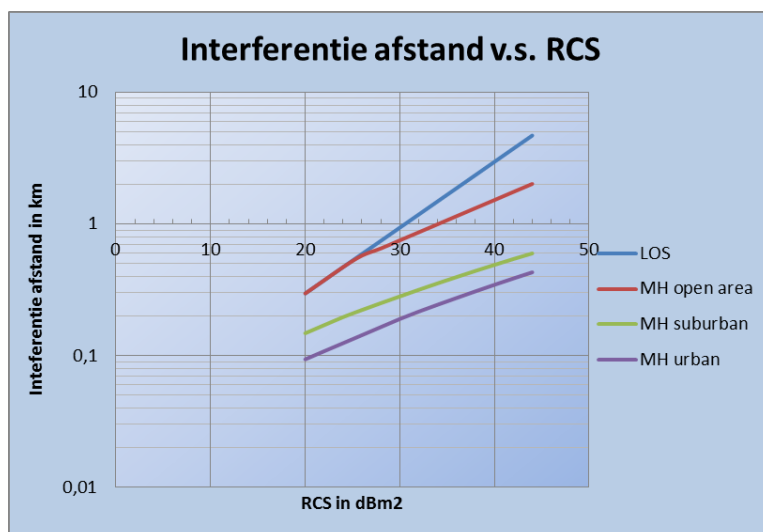
³⁴ Doordat bij een verafgelegen omroepzender het signaal niveau van de omroepzender op de hoogte van de windturbine veel sterker is dan op de hoogte van de ontvangstantenne is dit de worst case situatie. Als de omroepzender dichtbij is, zal dit verschil veel minder zijn.

³⁵ De RCS van een object is afhankelijk van de frequentie van het signaal waarmee gemeten wordt. De mate waarin is echter afhankelijk van de vorm van het object. Hoe lager de frequentie hoe lager de RCS. Alleen als het object de vorm van een bol heeft is de RCS onafhankelijk van de frequentie. Verwacht mag worden dat de RCS van een windmolen op omroep frequenties daarom niet hoger zal zijn dan de gemeten RCS op 2,8 GHz. In de afbeeldingen met de titel "Interferentie afstand v.s. RCS" is ook bij andere RCS waarden dan 40 dBm^2 af te lezen wat de potentiële interferentie afstanden zijn.

van de invloed van de hoogte van een windturbine op de interferentieafstanden van omroepsignalen. Dit omdat in de Wieringermeerpolder bestaande windturbines met een masthoogte van 70 meter vervangen worden door windturbines met een masthoogte van 120 meter.

3.1 FM radio

Uitgaande van de voorgaande theorie en gegevens en een FM radio zendfrequentie van 100 MHz en een RCS van 40 dBm², is de geschatte interferentie afstand voor landelijke gebieden bij een omroepzender op relatief grote afstand (20 km of meer)³⁶ 1,5 km, uitgaande van het Modified Hata model voor open area. Zie onderstaande afbeelding. Als de omroepzender relatief dichtbij (5 km of minder) staat is de interferentieafstand ongeveer 140 meter. Ook bij veel grotere waarden van de RCS dan verwacht, blijft de interferentie afstand voor FM radio beperkt.



Mogelijk effect van een rij van windturbines

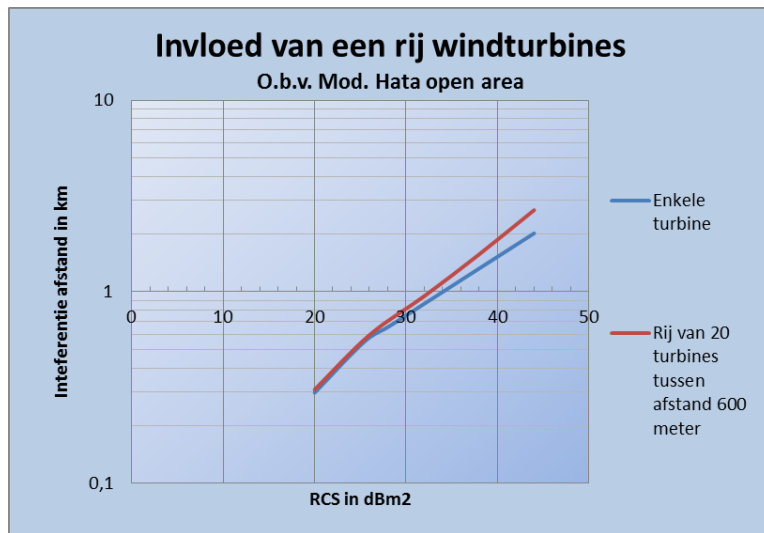
In onderstaande grafiek is het mogelijke effect van een rij van twintig windturbines met ieder een gelijke RCS³⁷ en een tussenafstand van 600 meter³⁸ weergegeven. Het mogelijke effect van meerdere windturbines is voor FM radio, door de korte interferentieafstanden, gering.³⁹

³⁶ Dit is indicatieve afstand.

³⁷ Bij hoge waarde van de RCS geeft dit waarschijnlijk een overschatting ten opzichte van de praktijk, aangezien deze waarden zich alleen in een kleine hoek ten opzichte van de windturbine voordoen.

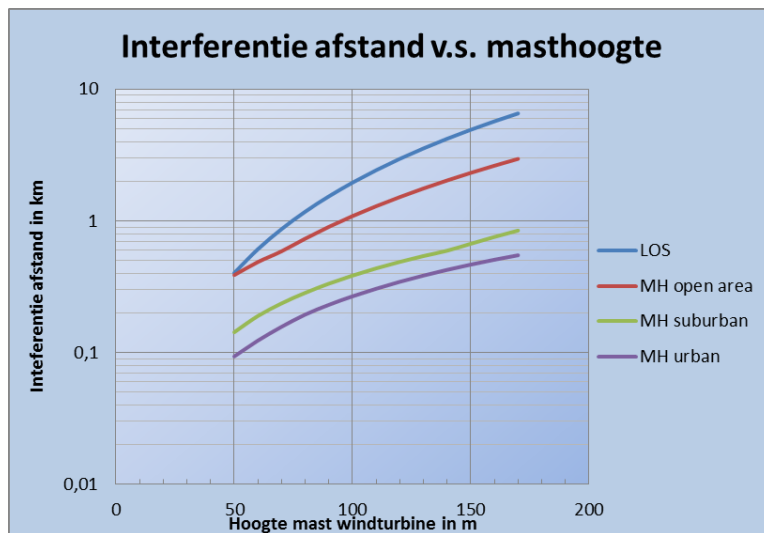
³⁸ Ongeveer vijf keer de rotordiameter.

³⁹ Vanwege de aanname van een relatief hoge RCS waarde, is er bij de berekening vanuit gegaan dat de windturbines nagenoeg op een lijn staan ten opzichte van de ontvangstantenne. Dit omdat een hoge RCS zich slechts in een kleine hoek ten opzichte van de windturbine voordoet. Indien de rij met windturbines dwars op de ontvangstantenne staat is het, vanwege de grote hoekvariatie, reëler om uit te gaan van een windturbine met een hoge RCS waarde en de overige windturbines met een gemiddelde RCS waarde. In dat geval is alleen de turbine met hoge RCS waarde dominant.



Mogelijke invloed van masthoogte windturbine

In de Wieringermeerpolder staat reeds een groot aantal kleinere windturbines met een masthoogte van 70 meter. Deze worden vervangen door grotere turbines met een masthoogte van 120 meter. In onderstaande afbeelding is het mogelijke effect hiervan op FM radio ontvangst weergegeven.



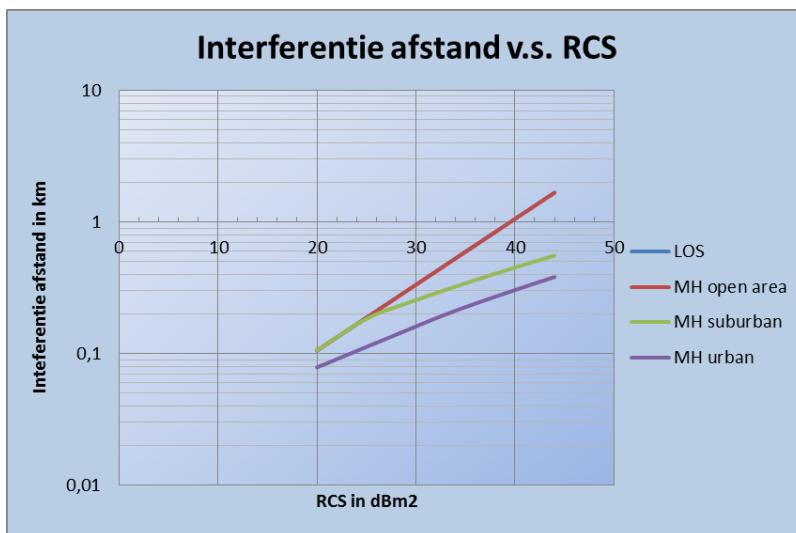
3.2

DAB

Uitgaande van de voorgaande theorie en gegevens en een DAB zendfrequentie van 225 MHz en een RCS van 40 dBm², is de geschatte interferentieafstand voor landelijke gebieden bij een omroepzender op relatief grote afstand (20 km of meer)⁴⁰ 1,1 km, uitgaande van het Modified Hata model voor open area. Zie onderstaande afbeelding. Als de omroepzender relatief dichtbij (5 km of minder) staat is de interferentieafstand ongeveer 30 meter.⁴¹

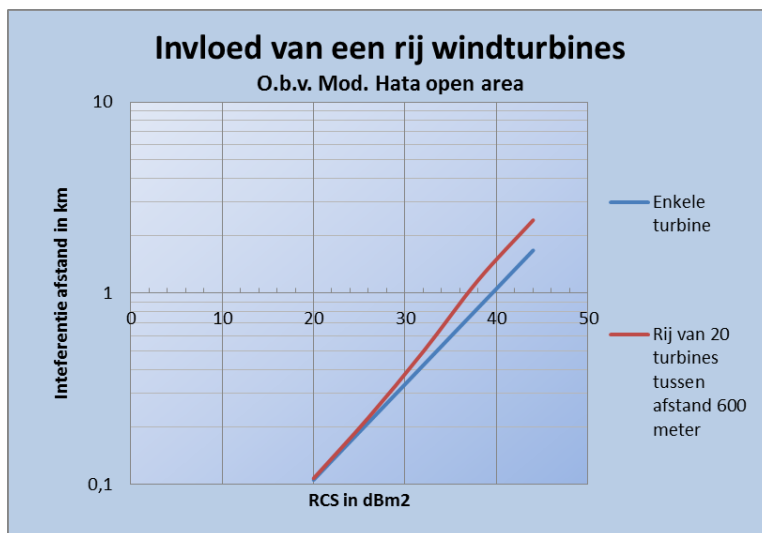
⁴⁰ Dit is indicatieve afstand.

⁴¹ Door de zeer korte afstand van de ontvangstantenne tot de windturbine is dit slechts een indicatief getal.



Mogelijke effect van een rij van windturbines

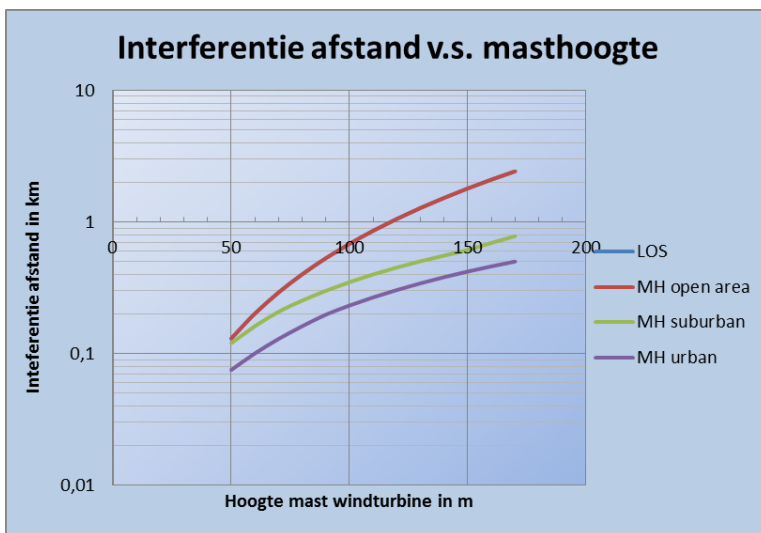
In onderstaande grafiek is het mogelijke effect van een rij van twintig windturbines met ieder een gelijke RCS en een tussenafstand van 600 meter weergegeven. Het mogelijke effect van meerdere windturbines is voor DAB, door de korte interferentieafstanden, gering.⁴²



Mogelijke invloed van masthoogte windturbine

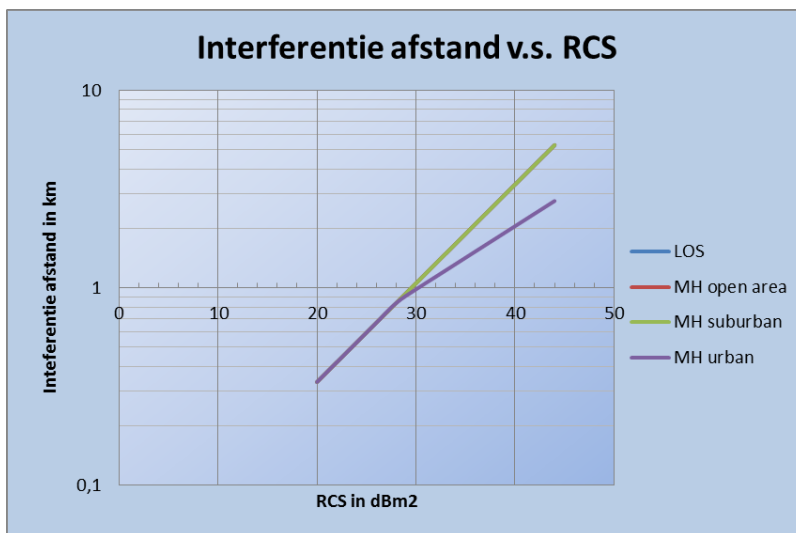
In de Wieringermeerpolder staat reeds een groot aantal kleinere windturbines met een masthoogte van 70 meter. Deze worden vervangen door grotere turbines met een masthoogte van 120 meter. In onderstaande afbeelding is het mogelijke effect hiervan op DAB ontvangst weergegeven.

⁴² De eigenschappen van de rij windturbines is gelijk aan de FM radio case.



3.3 DVB-T

Uitgaande van de voorgaande theorie en gegevens en een DVB-T zendfrequentie van 694 MHz en een RCS van 35 dBm², is de geschatte interferentieafstand voor landelijke gebieden bij een omroepzender op relatief grote afstand (20 km of meer)⁴³ 1,9 km, uitgaande van het Modified Hata model voor open area. Zie onderstaande afbeelding. Bij deze berekening is de versterking van een dakantenne niet meegenomen. Aangezien problemen met reflectie zich met name voordoen in het geval van backscatter⁴⁴ heeft deze gain grote invloed op de interferentie afstand. Bij een antenne gain van 12 dB is de interferentie afstand nog 470 meter. Als de omroepzender relatief dichtbij (5 km of minder) staat is de interferentieafstand ongeveer 140 meter.

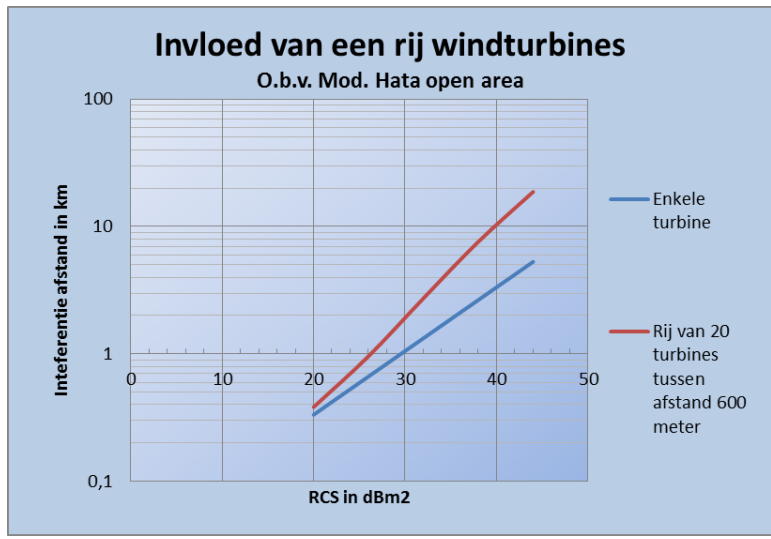


Mogelijke effect van een rij van windturbines

⁴³ Dit is indicatieve afstand.

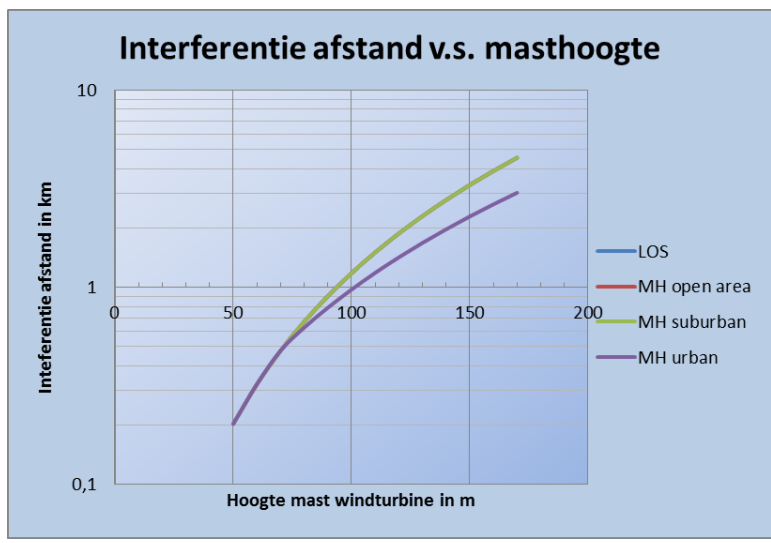
⁴⁴ In dat geval bevinden de windturbines zich (nagenoeg) achter de ontvangstantenne ten opzichte van de omroepzender.

In onderstaande grafiek is het mogelijke effect van een rij van twintig windturbines met ieder een gelijke RCS en een tussenafstand van 600 meter weergegeven. Het mogelijke effect van meerdere windturbines is voor DVB-T, door de korte interferentieafstanden, gering.⁴⁵



Mogelijke invloed van masthoogte windturbine

In de Wieringermeerpolder staat reeds een groot aantal kleinere windturbines met een masthoogte van 70 meter. Deze worden vervangen door grotere turbines met een masthoogte van 120 meter. In onderstaande afbeelding is het mogelijke effect hiervan op DVB-T ontvangst weergegeven.



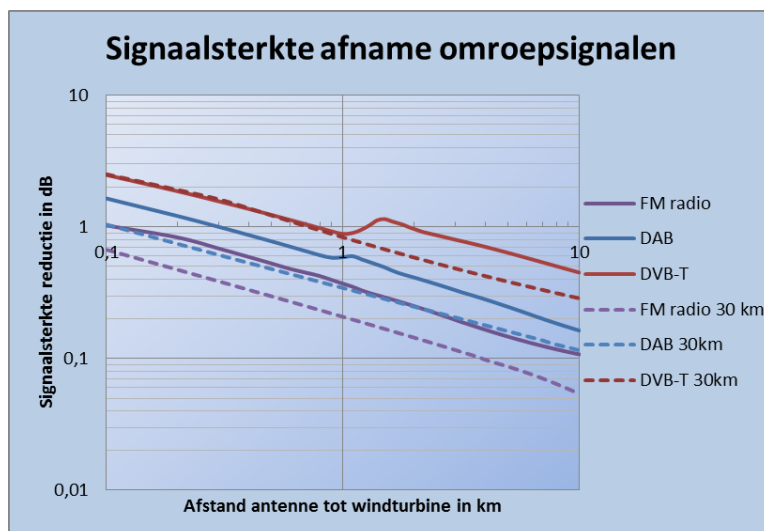
⁴⁵ De eigenschappen van de rij windturbines is gelijk aan de FM radio case.

4 Afscherming door windturbines

Door de relatief smalle breedte van de windturbinemast (op ontvangsthoogte), mag verwacht worden dat signaalsterkteafname van een omroepzender op enige afstand door afscherming alleen plaats zal vinden in de nabijheid van de windturbine. Hierdoor zal naar verwachting alleen de mast van invloed zijn op afschermen van het omroepsignaal. De windturbine heeft hierdoor een vergelijkbare afscherming als een willekeurig ander gebouw met een dergelijke breedte. Het lijkt daarom niet redelijk om speciaal voor windturbines rekening te houden met dit mogelijke effect voor de ontvangst van omroepsignalen.

Als de windturbine in de buurt van een mast met omroepzenders staat, wat in de Wieringermeerpolder het geval is, dan zal ook de rest van de constructie van de windturbine enige afscherming kunnen veroorzaken. Bij de Wieringermeerpolder staat de dichtstbijzijnde windturbine op een afstand van 1,4 km van de zendmast. Voor omroepsignalen is dit in het verre veld van de zender. Het is lastig in te schatten wat het mogelijke effect hiervan op grote afstand van de windturbine zal zijn. Echter gezien de beperkte breedte van de windturbine elementen in relatie tot de afstand tot de zender, zal dit waarschijnlijk gering zijn.

De exacte omvang hiervan is echter zonder nadere metingen lastig te bepalen. Echter als we uitgaan van het deel van de eerste Fresnel zone die afgeschermd wordt door de windturbine dan levert dit naar verwachting het volgende resultaat.⁴⁶ Verwacht mag worden dat in de praktijk het veronderstelde effect minder is onder andere door het heruitzenden van het signaal door geleidende delen van de windturbine.



⁴⁶ Er is uitgegaan van de worst case situatie waarbij de windturbine alle energie absorbeert en de volgende dimensies heeft: mashoogte 120 meter, mastbreedte basis 8,5 meter, mastbreedte top 4 meter, vorm toelopende cilinder; rotor lengte 58 meter, rotorbreedte basis 4,5 meter, hoogte maximale breedte rotor 10% van rotor lengte vorm rotor driehoek top deel, basis deel vierkant met gemiddelde breedte van 3 meter. Hoogte FM zenders op mast Wieringermeer 172 meter.

In de grafiek geven de ononderbroken lijnen de worst case verwachte signaaldemping weer voor een windturbine welke op 1,4 km van een omroepzender staat. Dit is de kortste afstand tussen een windturbine en zendmast in de Wieringermeerpolder. Gezien de hoge signaalniveaus op deze afstand zal dit naar verwachting geen ontvangstproblemen opleveren. De gestippelde lijn geeft de worst case afscherming weer bij een afstand tussen omroepzender en windmolen van 30 km.⁴⁷ FM zenders in de Wieringermeertoren zullen, gezien de uitkomsten van deze berekening, op grote afstand naar verwachting slechts een zeer beperkte reductie in effectief uitgestraald vermogen ervaren.

5 Voorlopige bevindingen

Door het vervangen van windturbines in de Wieringermeerpolder door hogere windturbines, zal de interferentie afstand als gevolg van reflecties van omroepsignalen drie tot vier keer zo groot kunnen worden. Echter, uit de geschatte afstand waarop interferentie ondervonden kan worden, is de voorlopige inschatting dat de impact hiervan op de ontvangst van omroepsignalen beperkt blijft tot twee kilometer. In onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de mogelijke interferentieafstanden. Het effect is sterk afhankelijk van de afstand tussen de omroepzender en de windturbine. Daarom zijn er twee situaties weergegeven. De getoonde afstanden moeten, vanwege de diverse onzekerheden en aannames als indicatief beschouwd worden. Het gaat hier om de afstand van een windturbine die reflectie geeft tot een ontvanger.

	FM radio	DAB	DVB-T
<i>Omroepzender ver van windturbine (meer dan 20 km)</i>			
Geschatte interferentieafstand in km	1,5	1,1	1,9
<i>Omroepzender dicht bij windturbine (minder dan 5 km)</i>			
Geschatte interferentieafstand in meters	140	30	140

De RCS van een object is afhankelijk van de frequentie van het (omroep) signaal. Echter gezien de grote spreiding in resultaten ten aanzien van de RCS van een windturbine is er in deze verkenning voor gekozen om een voor iedere frequentie constante grote waarde van de RCS van 40 dBm² aan te nemen. Dit laat onverlet dat er in een kleine hoek ten opzichte van een windturbine zich nog grotere waarden van de RCS kunnen voordoen, zodat in incidentele situaties van waarschijnlijk korte duur er beduidend grotere interferentieafstanden kunnen optreden.

De invloed van windturbines door afscherming op de ontvangst van omroep signalen is lastig rekenkundig te bepalen. Door aan te nemen dat het totale oppervlak van de windturbine in de eerste Fresnel zone het omroep signaal volledig blokkeert, is een eerste orde inschatting te maken. Gezien het relatief geringe oppervlak van windturbines (in vergelijking met de omvang van de eerste Fresnel zone) mag verwacht worden dat dit alleen een lokaal effect zal hebben.

⁴⁷ Bij korte afstanden is dit niet geheel juist aangezien de afscherming dan met name veroorzaakt wordt door de basis van de mast en niet door de top van de mast en rotors.