Agentschap Telecom
Ministerie van Economische Zaken

Verstoring van het elektromagnetische milieu ter plaatse van de LOFAR kern door het windturbinepark Drentse Monden en Oostermoer

Effecten op het Astronomie ontvangsysteem LOFAR

Colofon

Aan	Dir. Energie en Omgeving Drs J.M.C. Smallenbroek
	Dir. Telecommarkt Drs. J.C. de Groot
Van	Plv. Dir. Agentschap Telecom Drs. M.G.H. Verhagen
Nummer	2016-0919-001
Datum	19 september 2016

Copyright Agentschap Telecom ©2016

ADDENDUM bij Onderzoek "Verstoring van het elektromagnetisch milieu ter plaatse van de LOFAR kern door het windturbinepark Drentse Monden en Oostermoer".

Agentschap Telecom, Groningen, 19 september 2016

Agentschap Telecom (AT) heeft in de zomer van 2016 in opdracht van het ministerie van EZ onderzoek gedaan naar de mogelijke storing van het geplande windturbinepark Drentse Monden en Oostermoer op LOFAR. Naar aanleiding van de rapportage hierover is door het ministerie van EZ aan AT gevraagd om op het punt van de mitigerende maatregelen aanvullend onderzoek te doen, met name naar de mitigatie die te bereiken is door het windturbine ontwerp te verbeteren. De inschatting van AT op basis van toen beschikbare informatie was dat hiermee mogelijk 15 dB aan reductie in elektromagnetische stoorstraling richting LOFAR kern bereikt zou kunnen worden. In het tijdsbestek van het onderzoek was tot dan geen rechtstreeks contact geweest met fabrikanten van windturbines.

Het verzoek van EZ heeft er toe geleid dat er bilaterale gesprekken zijn gevoerd met 5 verschillende fabrikanten van windturbines. De resultaten hiervan kunnen vanwege het bedrijfsvertrouwelijk karakter ervan niet in detail gerapporteerd worden. In deze gesprekken is gebleken dat de fabrikanten mogelijkheden zien met extra aanpassingen aan turbines te komen tot verdere reductie van elektromagnetische stoorstraling van de turbine richting LOFAR dan de 15dB die AT veiligheidshalve had aangenomen. In de gevoerde gesprekken en toezonden informatie is door de fabrikanten aangegeven hoe verdere reductie volgens hen zou kunnen worden gerealiseerd en aan welke concrete maatregelen ze denken. De reductiemogelijkheden liggen volgens de fabrikanten beduidend hoger dan de in het rapport van AT opgenomen inschatting. Ook hebben de gesprekken duidelijk gemaakt dat de fabrikanten zich daadwerkelijk willen inspannen om tot een hogere reductie dan in het AT rapport genoemde inschatting te komen. In de gesprekken is echter ook gebleken dat een verdere reductie gepaard gaat met aanzienlijke onzekerheden omdat relevante meetgegevens en praktijkervaringen hiertoe nog ontbreken. Ook de meetmethode om verantwoorde uitspraken te kunnen doen over het effect van windturbines op LOFAR dient nog te worden vastgesteld. Voor reflecties door windturbines van elektromagnetische stoorstraling is dit nog meer ontgonnen terrein dan voor directe elektromagnetische straling door windturbines. De turbinefabrikanten hebben wel AT aangeboden hierbij te willen helpen, onder meer door beschikbaar stellen van metingen bij testmolens en op locaties. Door AT is reeds een begin gemaakt met het bepalen van een betrouwbare meetmethode en het verrichten van metingen die hieraan bijdragen. Deze inspanningen zullen in de komende maanden worden vervolgd met als doel een betrouwbare methode te kunnen vaststellen. Gelet op de complexiteit en innovatieve karakter van metingen van elektromagnetische straling bij beoogde lage niveau's, is voorzien dat hier 6 á 9 maanden voor nodig zijn. Medewerking door ASTRON, initiatiefnemers en fabrikanten van windturbines is toegezegd.

Inhoud

1 Inleiding—10
1.1 Aanleiding en kader—10
1.2 Onderzoeksvraag co-existentie LOFAR en windturbines—10

2 Het radioastronomie ontvangsysteem LOFAR—12
2.1 Algemene beschrijving—12
2.2 Wetenschappelijke doelen van LOFAR—12

3 Het geplande windturbinepark Drentse Monden en Oostermoer—15
3.1 Beschrijving geplande windturbinepark—15

4 Verstoring van het elektromagnetische milieu door windturbines.—16
4.1 EMC uitstraling van windturbines—17
4.2 Reflecteren van stoorsignalen van buiten het windturbinepark—19
4.3 Reflecteren van ongewenste uitstralingen vanuit het windturbinepark zelf—22
4.4 Reflecteren van omroepsignalen—22
4.5 Blokkeren en afbuigen van gewenste signalen—23
4.6 Reflecteren van signalen uit de ruimte—25
4.7 Ontlading door wrijvingsverschijnselen—25
4.8 Stoorsignalen die zich verspreiden over het elektriciteitsnet—26
4.9 Overzicht stoormechanismen en hun individuele bijdragen aan EM milieu—26

5 Robuustheid van LOFAR voor verstoring van het EM milieu—28
5.1 Het ontvangen door LOFAR van zwakke bedoelde signalen uit de ruimte—28
5.2 Storing-onderdrukking door LOFAR zelf—30
5.3 Huidige EM milieu ter plaatse van LOFAR (zonder windturbines)—32
5.4 Te verwachten EM milieu ter plaatse van LOFAR (met windturbines)—33
5.5 LOFAR en mitigatie mogelijkheden—35

6 Aanvullende maatregelen ter onderdrukking van stoorsignalen—36
6.1 Mitigatie mogelijkheden en oplossingen—36
6.1.1 Windturbines fysiek afschermen—36
6.1.2 Het windturbine ontwerp—36
6.1.3 Coördinatie tussen ASTRON en de exploitanten van het windturbinepark—36
6.1.4 Veranderen van de configuratie van het windturbine park—37

7 Conclusies—39

8 Aanbeveling t.a.v. effect van wijziging configuratie windmolenpark—40

Samenvatting

Aanleiding onderzoek
Het gebied Drentse Monden en Oostermoer is aangemerkt als bestemming voor een windturbinepark [1]. De windturbines op deze locatie kunnen mogelijk verstorend werken op de ontvangstmogelijkheden van de LOFAR [2] radio-astronomie antennes die daar in de nabijheid staan opgesteld. Eerder onderzoek naar deze effecten in het kader van de Milieu Effect Rapportage (MER) in 2015 leidde niet tot consensus over de te verwachten effecten van het windturbinepark op LOFAR. Dit was aanleiding voor de minister van Economische Zaken om Agentschap Telecom de opdracht te geven hier nader onderzoek naar te laten doen. Dit rapport is hier de weerslag van.

Probleemstelling
De aanwezigheid van windturbines in de nabijheid van LOFAR zorgt voor veranderingen in het elektromagnetische milieu ter plaatse. Het LOFAR systeem heeft een zekere mate van weerbaarheid voor deze veranderingen, maar als deze veranderingen te groot worden zal zich dat manifesteren als storing in het LOFAR ontvangsysteem met een degradatie van het ontvangstpotentieel tot gevolg.

Onderzoeksopdracht
Agentschap Telecom heeft in opdracht van DGETM onderzoek uitgevoerd naar de gevolgen van de voorgenomen plaatsing van het windturbinepark Drentse Monden en Oostermoer voor het ontvangstation LOFAR van ASTRON. De onderzoeksopdracht luidde:

1. Welke verstoringen door het windpark De Drentse Monden en Oostermoer kunnen optreden bij LOFAR en wat is de waarschijnlijkheid daarvan?
2. Wat zijn oplossings- en mitigatie[1] mogelijkheden?

Ter beantwoording van deze onderzoeksopdracht heeft agentschap het volgende onderzocht:

1. Wat is de te verwachten verstoring van het elektromagnetische milieu ter plaatse van de LOFAR kern uitgaande van het voorgenomen windturbinepark Drentse Monden en Oostermoer?
2. Wat is het effect van deze verstoring op het LOFAR ontvangsysteem? en
3. Wat zijn de mogelijke mitigatie maatregelen.

Verstoring elektromagnetisch milieu
Ten aanzien van de eerste onderzoeksvraag is een kwantitatieve analyse uitgevoerd van de te verwachten verandering van het elektromagnetische milieu bij de LOFAR kern als gevolg van de windturbines in het windpark Drentse Monden. Hiertoe zijn verschillende (stoor)mechanismen geïdentificeerd. De stoormechanismen met het hoogste niveau van verstoring van het elektromagnetische milieu blijken de *EMC uitstraling van de windturbines* en de *reflecties via de windturbines* te zijn.

De "EMC uitstraling" betreft hierbij de elektromagnetische stoorstraling die wordt veroorzaakt door de elektrische/elektronische onderdelen in de windturbines en bijbehorende elektrische installaties die in de richting van de LOFAR kern worden gestraald. Voor deze uitstraling gelden wettelijke maximale niveaus waaraan

[1] Storingonderdrukkende maatregelen

windturbines moeten voldoen[2].
Met "reflectie via de windturbines" wordt het mechanisme bedoeld waarbij de elektromagnetische stoorstraling die buiten het windturbinepark (zoals in de nabij gelegen agglomeratie Stadskanaal door elektrische apparaten en installaties maar ook door omroepzenders) wordt opgewekt en door de windturbines worden gereflecteerd in de richting van de LOFAR kern. Metingen die door het agentschap zijn uitgevoerd aan windturbines bevestigen dat beide stoormechanismen in de praktijk daadwerkelijk optreden.

Om de verstoring van het elektromagnetische milieu te kwantificeren was het nodig om inzicht te krijgen in de (EMC) uitstralings- en reflectie eigenschappen van individuele windturbines. Voor de EMC-uitstralings-eigenschappen is uitgegaan van de limieten die in de Europese geharmoniseerde norm EN55011 [3] ten behoeve van industriële apparaten/installaties, waaronder windturbines, is vastgelegd. Om duidelijkheid te krijgen over de reflectie-eigenschappen van windturbines zijn naast metingen, ook theoretische en modelmatige berekeningen uitgevoerd en is naar literatuur gezocht. Voor de door LOFAR gebruikte frequenties is er echter in de literatuur nauwelijks passende informatie beschikbaar over de reflectie-eigenschappen van windturbines.
De door het agentschap berekende stoorniveaus zijn per frequentiegebied grafisch weergegeven. Tevens zijn in deze grafieken, ter vergelijking, de volgens de ITU te verwachten ruisniveaus in landelijke gebieden (ITU-R P 372-12 [4]) opgenomen.

De conclusie is dat het totale effect van het windturbinepark op het EM milieu ter plaatse van het LOFAR systeem wordt gedomineerd door het mechanisme "EMC uitstraling van windturbines", en (na een correctie van 20 dB zoals onder is toegelicht) berekend is op **-62 dBµV/(m.Hz)**.

Hierbij moet worden opgemerkt dat de berekende eindwaarden in dit rapport geen honderd procent exactheid suggereren. Deze berekende waarden zijn tot stand gekomen als resultante van verschillende onderdelen die allen een zekere marge hebben. Bij de vaststelling van deze onderdelen zijn expertmatige inschattingen gemaakt ten aanzien van deze marges en onzekerheden. Dit heeft uiteindelijk geresulteerd in de eindwaarden zoals gepresenteerd in dit rapport.
Met de correctie van 20 dB wordt een praktijkvertaling gemaakt die de actuele situatie nauwkeuriger weerspiegelt. De correctie is als volgt opgebouwd:

- Ten aanzien van de *methodologie* stellen wij dat toepassing van een realistischer propagatiemodel (Modified Hata) er toe leidt dat de verstorende effecten op het EM milieu 10 dB lager kunnen worden gesteld dan de oorspronkelijk berekende waarden met het zogenaamde 'vrije ruimte' model.
- Daarnaast is het aannemelijk dat het EMC uitstralingsniveau van een windturbine niet op alle frequenties, richtingen en tijdintervallen *precies* aan de wettelijke maximale EMC eisen voldoet. Deze kunnen, en mogen namelijk ook lager zijn. Dit is in rekening gebracht door de verstorende effecten op het EM milieu met 10 dB te verminderen.

De bijdrage van het mechanisme "reflectie van stoorstraling uit de omgeving *via* de windturbines" is berekend[3] op een niveau van **-124 dBµV/(m.Hz)**. Dat is 62 dB lager dan het mechanisme "EMC uitstraling van de windturbine".

[2] Europese EMC richtlijn: 2014/30/EU
[3] Hier is de 10 dB correctie voor het realistischere propagatiemodel inbegrepen voor 2paden (van stoorbron naar turbine en van turbine naar LOFAR). De 10 dB correctie voor het EMC uitstralingsniveau is ook inbegrepen.

De stoorstraling ten gevolge van beide mechanismen bevat zowel in de tijd continue als tijd variërende componenten (door de wiekrotatie) en is deels afhankelijk van het ontwerp van de windturbine. Voor metingen aan pulsars is met name de tijd variërende stoorstraling van belang. Voor andere metingen zijn juist de continue stoorsignalen storend. Door een goed EMC ontwerp van de windturbine is het mogelijk het tijd variërende gedrag van de stoorstraling t.g.v het stoormechanisme 'EMC van windturbines' te beperken. Tijd variërende stoorstraling is daarentegen veel lastiger te voorkomen bij het mechanisme "reflectie van stoorstraling uit de omgeving via de windturbines". De reflecties via de roterende wieken spelen hier een belangrijke rol.

Verstoring van het LOFAR systeem?
Om een inschatting te kunnen maken van de 'robuustheid' van het LOFAR systeem voor deze EM instraling heeft het agentschap zich moeten verdiepen in het LOFAR ontvangsysteem [5-7]. De exacte kennis van het systeem ligt bij ASTRON. Aan de hand van literatuurstudie, gegevens van ASTRON en eigen doorrekeningen daarvan, is door het agentschap zo goed als mogelijk de gevoeligheid van het LOFAR meetsysteem voor gewenste signalen en stoorsignalen uit alle informatie gedestilleerd voor de verschillende soorten van waarnemingen die met LOFAR plaatsvinden. Deze verkregen niveaus zijn door ASTRON geverifieerd en door het agentschap omgezet naar dezelfde eenheid als de (eerder uitgerekende) te verwachten verstoring van het EM milieu. Op deze manier kan de gevoeligheid van LOFAR voor stoorsignalen (robuustheid) vergeleken worden met de EM stoorniveaus die ontstaan na plaatsing van de windturbines. Bij deze inventarisatie bleek dat er verschillende methodes zijn om gewenste signalen uit de ruis te filteren en de gewenste gevoeligheid te krijgen voor bedoelde signalen uit de ruimte. Die methodes kunnen betrekking hebben op de directe ontvangst met de individuele LOFAR antennes en voorversterkers, maar ook op de digitale bewerkingen die later plaats vinden (post-processing). Afhankelijk van het onderzoeksgebied kan op deze manier het gewenste signaal verkregen worden door de ongewenste ruis zoveel mogelijk te onderdrukken.

Als het EM milieu zodanig verandert dat de minimale niveaus van robuustheid worden overschreden die horen bij verschillende typen van ruimte-onderzoek op dit moment, zal dit als gevolg schadelijk zijn voor het uitvoeren van onderzoek in deze waarnemingsmodi. Ook zal extra verstoring (verhoging EM milieu) de mogelijkheden beperken om ook in de toekomst nog dieper in de ruisvloer te kunnen 'luisteren' naar nieuwe typen van ruimteonderzoek.

Bij de meest gevoelige LOFAR waarnemingen (zoals Pulsars en 'Epoch of Reionization') die momenteel door ASTRON worden uitgevoerd bereikt het LOFAR systeem een gevoeligheid van -164 dBµV/(m.Hz). Bij een gegenereerd EM niveau boven of vergelijkbaar met deze waarde zullen waarnemingen hier hinder van ondervinden en gaat wetenschappelijke waarde verloren.

Beoordeling van de verstoring
Omdat de stooremissies van de windturbines onder een lage hoek bij de LOFAR antennes binnenkomen (de windturbines staan vanuit LOFAR gezien aan de horizon) dringt slechts een beperkt deel van deze stoorstraling in het LOFAR systeem binnen. De LOFAR antennestations dempen namelijk signalen die invallen onder een lage hoek gemiddeld met 35 dB. Daarnaast kan er door een langere waarnemingstijd nog een onderdrukking van 10 dB van storende signalen worden bereikt als gevolg van de manier waarop LOFAR de metingen verwerkt.

Door het doen van langere waarnemingen kan een bepaalde ruisonderdrukking worden verkregen. Hieraan zitten echter wel grenzen. Een ruwe middeling, want het is afhankelijk van de gebruikte frequentieband en basislijn lengte, levert bij een aaneengesloten waarnemingstijd van 10 uur een correctie van de ruis op van 10 dB. Aangezien deze onderdrukking een gevolg is van de versmering van de point spread functie tijdens een lange waarneming speelt deze correctie geen rol bij pulsar metingen.[4]

Ten aanzien van het uiteindelijke stooreffect van de berekende waarde van de verstoring van het EM milieu als gevolg van de windturbines wordt daarom 45 dB in mindering gebracht.

Dit betekent dat de daadwerkelijke betekenis van het veranderde effect van het EM milieu als gevolg van het windturbinepark voor het LOFAR systeem als volgt is bepaald:

Verstoring EM milieu	-62 dBµV/(m.Hz)
Demping door lage invalshoek	35 dB
Ruisonderdrukking door langere waarnemingen:	10 dB
Totaal:	-107 dBµV/(m.Hz)

Het daadwerkelijke gegeneerde EM effect voor LOFAR als gevolg van de windturbines wordt hiermee bepaald op **-107 dBµV/(m.Hz)**. Eerder hadden we gezien dat de gevoeligheid van het LOFAR systeem voor de meest gevoelige waarnemingsmodi –164 dBµV/(m.Hz) bedraagt. Het EM stoorniveau van -107 dBµV/(m.Hz) dat ter plekke gegeneerd wordt overschrijdt daarmee het niveau van de meest gevoelige waarnemingsmodi met 57 dB.[5]

Als de bijdrage van het mechanisme "reflectie van stoorstraling uit de omgeving via de windturbines" op soortgelijke wijze wordt gecorrigeerd wordt het effect van dit mechanisme[6] berekend op: -124 -35-10 = **-169 dBµV/(m.Hz)**, 62 dB lager dan het mechanisme "EMC uitstraling van de windturbines".

Mitigatiemaatregelen
Er is een aantal mitigatiemaatregelen denkbaar die de verstoring van het EM milieu als gevolg van de windturbines zouden kunnen verminderen. De meeste winst valt te behalen met het reduceren van de EMC emissies van de windturbines zelf. Hier zou mogelijk 15 dB aan reductie bereikt kunnen worden. Nog 5 dB extra reductie valt te behalen als totaal van de andere denkbare mitigatiemaatregelen. Aangezien de ongewenste effecten op het EM milieu de minimale robuustheid van LOFAR met 57 dB overschrijdt, zal ook deze extra 20 dB aan reductie niet voldoende zijn om de effecten van de windturbines teniet te doen.

In het proefschrift "Algorithms for Radio Interference Detection and Removal" van A.R Offringa [6] van 22 juni 2012 wordt verondersteld dat onder bepaalde randvoorwaarden RFI signalen gemiddeld kunnen worden over de meetbandbreedte. In welke mate EMC signalen van windturbines voldoen aan de randvoorwaarden

[4] Voor pulsar metingen zal de overschrijding van de meest gevoelige ondergrenzen door het in dit rapport afgeleide verstoring van het EM milieu dus 10 dB groter zijn.
[5] Voor pulsarmetingen is dat dus 67 dB.
[6] Het effect waarbij stoorstraling die wordt opgewekt door de windturbines zelf, en wordt gereflecteerd door andere windmolens in de richting van LOFAR is bij deze berekening niet inbegrepen. Als dit effect wordt meegenomen stijgt het stoorniveau maar blijft ruim onder het stoorniveau van -107 dBµV/(m.Hz) dat hoort bij het dominante mechanisme van 'EMC uitstraling van de windturbine'.

zoals gesteld in het proefschrift is nog niet direct duidelijk. Mogelijk valt hier een mitigatiewinst uit te behalen.

Configuratie windmolenpark
De configuratie van het windturbinepark is van invloed op het niveau van de stoorstraling die op de LOFAR locatie wordt opgewekt. In het algemeen geldt dat naarmate de afstand wordt vergroot en het aantal windturbines wordt verkleind de storing geringer wordt. Naarmate de invalshoek van de stoorstraling (ten opzichte van de aarde) geringer wordt zullen de LOFAR antennes de stoorstraling meer dempen. Deze lagere invalshoek kan met name worden bereikt door de windturbines in hoogte te verlagen of door de afstand te vergroten. Ook valt aanzienlijke winst te behalen door bij het ontwerp van de windturbine de potentiële stoorbronnen laag in de voet van de mast te plaatsen (indien mogelijk). Dit zou ook een positief effect kunnen hebben op de directe EMC uitstraling van de windturbine zelf op LOFAR. Opgemerkt moet worden dat er geen contact is geweest gedurende het onderzoek met initiatiefnemers van het geplande windpark of fabrikanten van windturbines. Dit kan leiden tot aanvullende inzichten.

Er is door het agentschap geen onderzoek gedaan naar de afstand die minimaal moet worden aangehouden tussen windturbines en LOFAR om onacceptabele verstoring van het LOFAR systeem te voorkomen. Er van uitgaande dat reeds bestaande windturbineparken momenteel geen storing veroorzaken op LOFAR, mag verondersteld worden dat deze parken op een “veilige” afstand staan. Momenteel staan er in Rütenmoor en Heede, (D) windmolenparken op ongeveer 20 en 30 km afstand van LOFAR. De minimale afstand waarbij LOFAR geen verstoring meer ondervindt van windturbines zou dan ergens moeten liggen in het afstandsbereik van ca. 15 km tot 30 km. (belangrijke input is de dimensie windmolens)
Een gezamenlijk met ASTRON uitgevoerde meetcampagne zou meer informatie kunnen geven over een aan te houden “veilige” afstand.

<u>Conclusie co-existentie LOFAR en windturbinepark Drentse Monden</u>
De te verwachten veranderingen in het ‘EM milieu’ overschrijden voor een aantal voor LOFAR belangwekkende typen van onderzoek, de niveaus, die volgens ASTRON maximaal in LOFAR kunnen worden getolereerd. Hieruit kan de volgende conclusie worden getrokken:

> *Verschillende stoormechanismen zijn door het agentschap onderzocht. De typen verstoring "EMC straling van de windturbines" en "reflecties via windturbines" hebben een belangrijk verstorend effect tot gevolg. Het niveau van dit eerstgenoemde effect is zodanig dat dit zelfs met mitigerende maatregelen tot degradatie zal leiden voor bepaalde typen observaties zoals die aan pulsars en "epoch of reionization". Voor de andere onderzochte mechanismen is het aannemelijk dat het effect ervan gering is en/of door LOFAR kan worden opgelost.*

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en kader

De mogelijke verstoring door het geplande windturbinepark in Drentse Monden en Oostermoer [1] op LOFAR was al reeds onderdeel van de Milieu Effect Rapportage (MER) [8] in 2015. Het Engelse onderzoeksbureau Pager Power heeft toen onderzoek gedaan naar deze mogelijke verstoring [9]. De conclusie was dat de gevolgen voor LOFAR in de MER 'aanvaardbaar' geacht werden. Met de definitieve vaststelling van de geografische planning van het windpark is hier toen ook zo veel mogelijk rekening mee gehouden. Echter, ASTRON, de beheerder van de LOFAR telescoop, had grote bedenkingen en fundamentele kritiek op de onderzoeksmethodiek en conclusies van het onderzoek van Pager Power. Dit heeft er uiteindelijk toe geleid dat de minister van Economische Zaken, Agentschap Telecom alsnog verzocht heeft om extra onderzoek te doen naar de mogelijke verstoring van het geplande windpark op LOFAR.[7] Dit rapport is hier de weerslag van.

Er zijn verschillende stoormechanismen denkbaar waarmee verstoring van LOFAR door het geplande windpark kan worden veroorzaakt. In dit rapport is onderzocht in welke mate deze mechanismen de observaties verricht met LOFAR zouden kunnen beïnvloeden. Daarnaast zijn diverse mogelijkheden voor mitigatie geïnventariseerd.

1.2 Onderzoeksvraag co-existentie LOFAR en windturbines

De centrale onderzoeksvragen van dit rapport zijn:

1. Welke verstoringen door het windpark De Drentse Monden en Oostermoer kunnen optreden bij LOFAR?
2. Wat zijn oplossings- en mitigatie mogelijkheden?

Om deze onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden heeft Agentschap Telecom het volgende onderzocht:

1. Wat is de te verwachten verstoring van het elektromagnetische milieu ter plaatse van de LOFAR kern?
2. Wat is het effect van deze verstoring op het LOFAR ontvangsysteem?
3. Wat zijn de mogelijke mitigatie maatregelen?

Om te kunnen bepalen in hoeverre LOFAR zou kunnen worden gestoord was het noodzakelijk om inzichtelijk te krijgen in welke mate het geplande windturbinepark De Drentse Monden en Oostermoer het elektromagnetische milieu van LOFAR beïnvloedt, en anderzijds was het nodig om inzicht te krijgen welke metingen en observaties met LOFAR uitgevoerd worden en onder welke omstandigheden (mate van verstoring) deze metingen niet meer mogelijk waren. Op basis hiervan kan beoordeeld worden in hoeverre co-existentie van LOFAR en het geplande windturbinepark nog mogelijk is. Vervolgens is een inventarisatie gemaakt van mogelijke mitigatiemogelijkheden.

[7] Zie ook Gewijzigde motie van het lid Agnes Mulder c.s. (t.v.v. 30196, nr. 414) over rekening houden met het onderzoek van LOFAR bij het plaatsen van windmolens [j].
https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/detail?id=2016Z04543&did=2016D09370

Tijdens het onderzoek is gebruik gemaakt van eigen onafhankelijke metingen, wetenschappelijke bronnen en gegevens die zijn verstrekt door ASTRON de beheerder en eigenaar van de LOFAR radiotelescoop. Om traceerbaarheid en transparantie te waarborgen is van alle basisgegevens zo veel mogelijk de bron vermeld.

Hoofdstuk 2 betreft een algemene inleiding over LOFAR. Er wordt ook ingegaan op de verschillende soorten van wetenschappelijk ruimteonderzoek waarvoor met LOFAR 'geluisterd' wordt naar elektromagnetisch golven uit de ruimte. Hoofdstuk 3 beschrijft het geplande windturbinepark De Drentse Monden en Oostermoer. In hoofdstuk 4 wordt de verwachte invloed van het geplande windturbinepark op het elektromagnetische milieu ter plaatse van de LOFAR kern geanalyseerd. In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de vraag in hoeverre deze verandering van het elektromagnetische milieu de ontvangstmogelijkheden of ontvangstkwaliteit van LOFAR beïnvloedt of beperkt.

In hoofdstuk 6 worden de mitigatiemogelijkheden ('oplossingsrichtingen') behandeld.

Het rapport wordt in Hoofdstuk 7 en 8 afgesloten met respectievelijk een conclusie en aanbevelingen.

De bibliografie waarnaar in de tekst wordt gerefereerd vindt u in Annex F.

2 Het radioastronomie ontvangsysteem LOFAR

2.1 Algemene beschrijving

Het LOFAR [2] systeem is een ontvangsysteem voor radioastronomie bestaande uit 7000 antennes die verspreid staan over een groot deel van West Europa. Het systeem is erop gericht signalen uit de ruimte te ontvangen en te verwerken. Deze signalen zijn over het algemeen zeer zwak. Met het LOFAR systeem kunnen metingen worden uitgevoerd ten behoeve van verschillende wetenschappelijke onderzoeken op het gebied van radioastronomie. Een unieke eigenschap (ook internationaal gezien) van LOFAR is de mogelijkheid om met een hoog oplossend vermogen ruimtefenomenen te onderzoeken in het relatief lage frequentiegebied van 10 MHz tot 240 MHz. De hoge gevoeligheid van LOFAR wordt vooral bereikt in de centraal gelegen kern die nabij Exloo is gelokaliseerd. Deze omgeving kenmerkt zich door lage EM (elektromagnetische) omgevingsruis vanwege de geringe bevolkingsdichtheid en het ontbreken van nabije industriële activiteiten. Dit was voor ASTRON (de beheerder van LOFAR) een belangrijke reden om deze locatie voor de LOFAR kern te kiezen. ASTRON is eigenaar en beheerder van LOFAR en heeft het zelf grotendeels ontwikkeld.

LOFAR is modulair opgebouwd uit stations met elk een groot aantal antennes voor de hoge en de lage band met daarbij benodigde ontvangers en verwerkingsapparatuur. De centraal liggende kern (de LOFAR kern) bestaat uit 24 bij elkaar liggende stations (groepen van laag opgestelde antennes). De stations die tot de kern horen hebben elk 96 lage band antennes in een quasi willekeurig cirkelpatroon en 2 arrays van elk 24 hoge band ‘tiles’. Zes van deze kern-stations zijn gegroepeerd binnen een cirkel van 250 meter, de zogenaamde super-terp. Zie **Figuur 1**. Voor de (afstands)-berekeningen in het rapport wordt de locatie van deze superterp als referentie gebruikt. Er liggen dus ook stations van de LOFAR kern ruim een kilometer dichterbij en een kilometer verder verwijderd van het geplande windpark.

Verder liggen er nog 14 stations, ruwweg op spiraal armen over Noord Nederland verspreid en 12 stations verder in Europa, met een aantal nog in aanbouw of in concept. Al deze stations vormen samen één radiotelescoop. Door de grote afmetingen (van Zweden tot Frankrijk) kunnen waarnemingen met zeer hoge resolutie(kleiner dan 0,001 graad) worden gedaan [2].

Door het grote aantal antennes in de kern wordt de gewenste hoge gevoeligheid bereikt. De kern ligt in Drenthe, vlak bij het dorp Exloo, een locatie die is geselecteerd vanwege de lage bevolkingsdichtheid en het lage niveau van storing uit de directe omgeving. Een uitgebreide systeembeschrijving van LOFAR is te vinden in het wetenschappelijke artikel LOFAR: “The Low-Frequency Array” [2]. De LOFAR website [11] geeft een populair wetenschappelijke uitleg.

2.2 Wetenschappelijke doelen van LOFAR

Met het LOFAR systeem kunnen diverse metingen worden uitgevoerd ter ondersteuning van verschillende wetenschappelijke onderzoeken op het gebied van

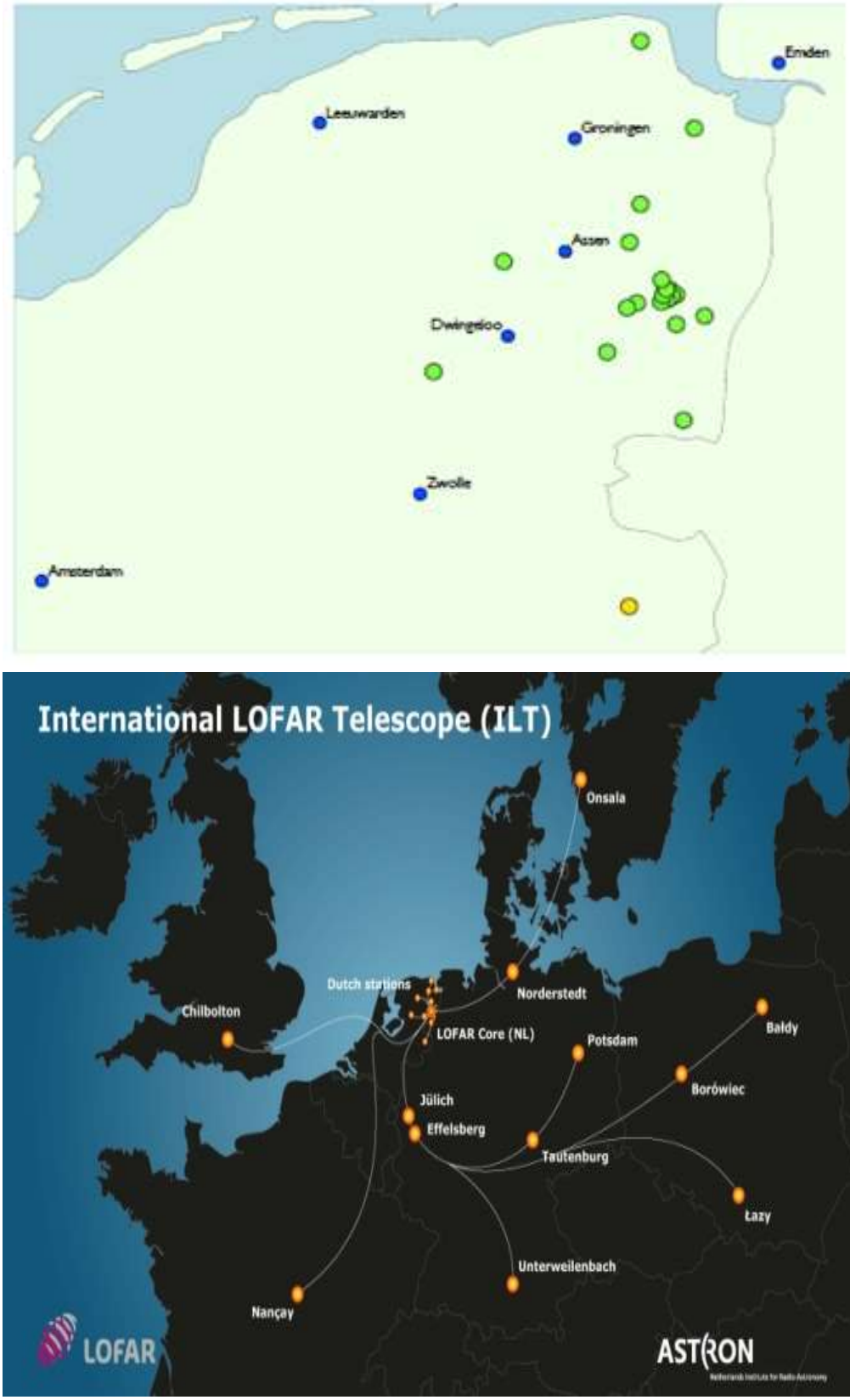
radioastronomie.om een indruk te krijgen van het onderzoek van LOFAR worden hieronder een aantal belangrijke onderzoeksgebieden genoemd[8]:

1. Epoch of reionization (periode van her-ionisatie van waterstof);
2. Survey of the low-frequency sky (onderzoek van het heelal op lage frequenties);
3. Transient radio sky (kort durende gebeurtenissen in de ruimte);
4. Pulsar studies and surveys (onderzoek naar pulsars);
5. Astro particle physics (onderzoek naar hoog energetische deeltjes);
6. Magnetic fields in the universe (magnetisch velden in de ruimte);
7. Solar physics and space weather (fysica van de zon en ruimteweer).



Figuur 1: Boven-links: *LOFAR superterp;* boven-rechts: *de LOFAR kern ('core'), de cirkel geeft de superterp weer met daaromheen nog een aantal stations.* Onder-links: *antenne voor de 'lage band' (30-80 MHz) en* onder-rechts: *voor de 'hoge' band (120-250 MHz). Bron: LOFAR website [11].*

[8] In dit rapport worden alleen de verschillende onderzoeken genoemd. Een nadere beschrijving valt buiten de scope van dit rapport. Zie ook tabel 2 op pagina 28.

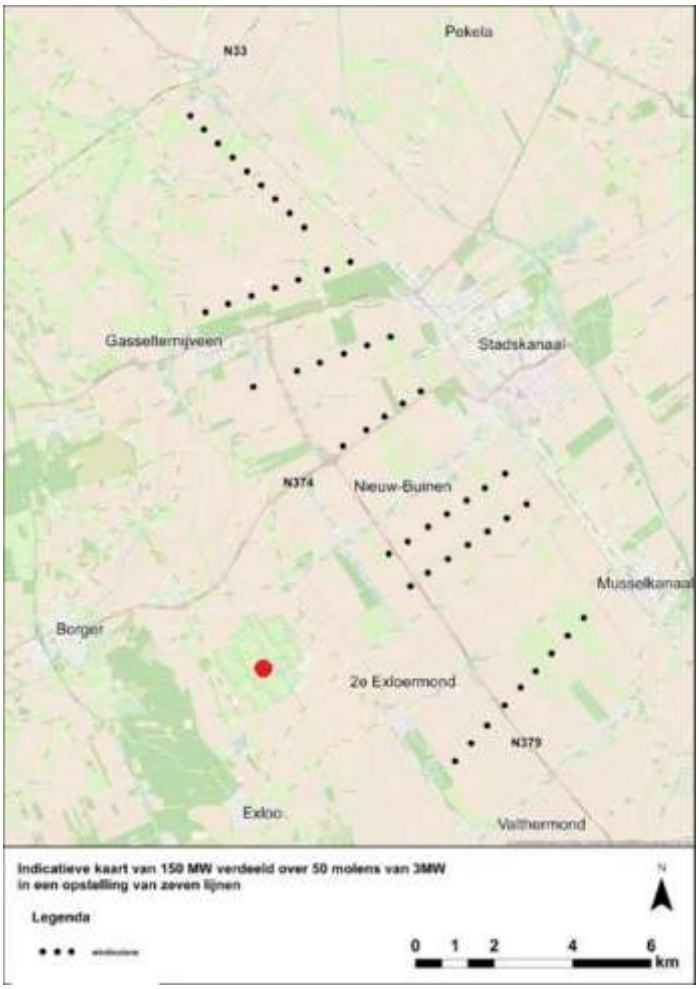


Figuur 2: *LOFAR stations in Nederland en West Europa. Bron: LOFAR website [11].*

3 Het geplande windturbinepark Drentse Monden en Oostermoer

3.1 Beschrijving geplande windturbinepark

Het windturbinepark De Drentse Monden en Oostermoer is gepland nabij Stadskanaal [1]. De planning gaat uit van 50 turbines van ieder circa 3 MW. De dichtstbijzijnde turbines zijn gepland op circa 5 kilometer vanaf de LOFAR super terp. Er is tijdens het schrijven van dit rapport nog geen type keuze gemaakt. Er zouden as-hoogten kunnen worden verwacht met hoogtes tot 135 meter en bladlengtes van circa 60 m. Diameters van de masten van windturbines variëren en zijn in de orde van grootte van enkele meters.



Figuur 3: *Geplande turbine opstelling [12].*
NB. Precies halverwege Borger en 2e Exloërmond is de LOFAR kern te zien (rode stip). Voor een uitgebreide beschrijving van de geografische planning en de afwegingen hierin zie het milieueffectrapport, 'Windpark De Drentse Monden en Oostermoer' [8]

4 Verstoring van het elektromagnetische milieu door windturbines.

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste verstoringen van het elektromagnetisch milieu door het geplande winturbinepark gekwantificeerd. In hoofdstuk 5 wordt ingeschat in hoeverre het aannemelijk is dat de performance van het LOFAR ontvangsysteem hierdoor negatief wordt beïnvloed.

Het LOFAR ontvangsysteem is ontworpen om extreem zwakke (elektromagnetische) signalen uit de ruimte te ontvangen. LOFAR is daarom bewust geplaatst in een omgeving met een elektromagnetisch omgevingsruisniveau dat relatief laag is vanwege de geringe bevolkingsdichtheid en het ontbreken van nabije industriële activiteiten. Een dergelijke omgeving met een laag omgevingsruisniveau wordt door de International Telecommmunication Union (ITU) omschreven als "Quiet Rural" [4].

De plaatsing van windturbines in de nabijheid van LOFAR zullen veranderingen veroorzaken in het elektromagnetische milieu ter plaatse. Het LOFAR systeem heeft een zekere mate van robuustheid voor deze veranderingen, maar als deze veranderingen te groot worden zal zich dat manifesteren als storing in het LOFAR ontvangsysteem met een degradatie in de performance als gevolg.

Hieronder zijn de door het agentschap geïdentificeerde relevante verstoringen weergegeven van windturbines die het EM milieu ter plaatse van de LOFAR kern kunnen beïnvloeden.

1. Stoorstraling die (onbedoeld) wordt veroorzaakt door de elektrische/elektronische onderdelen in de windturbines en bijbehorende elektrische installaties. Verder in het rapport wordt dit fenomeen EMC (elektromagnetische compatibiliteit) uitstraling van windturbines genoemd.

2. Stoorstraling die buiten het windturbinepark onbedoeld wordt opgewekt (door elektrische apparaten en installaties) en door de windturbines worden gereflecteerd in de richting van de LOFAR kern.

3. Reflecteren van ongewenste uitstralingen afkomstig van het windturbinepark zelf.

4. Reflecteren van omroepsignalen (DAB +).

5. Blokkeren en afbuigen van te observeren radioastronomie-signalen uit de ruimte die vlak over de horizon komen waarbij een windturbine in het verloop staat.

6. Reflecteren, verstrooien en afbuigen van te observeren radioastronomie signalen uit de ruimte (gewenste signalen).

7. Ontladingen van door wrijvingsverschijnselen opgeladen rotorbladen.

8. Stoorsignalen die zich verspreiden over het elektriciteitsnet. De verbinding met het elektriciteitsnet maakt de windturbine als stoorbron als het ware veel groter, waardoor verstoringen veel verder merkbaar zijn.

In dit hoofdstuk is voor elk van deze verstoringen een paragraaf opgenomen waarin het stoormechanisme wordt beschreven en waarin de stoorstraling ter plaatse van de LOFAR kern wordt gekwantificeerd. Het hoofdstuk sluit af met een overzicht van de bijdrage van elk van die verstoringen.

4.1 EMC uitstraling van windturbines

In deze paragraaf wordt een analyse gemaakt van het te verwachten niveau van de stoorstraling op de locatie van LOFAR, veroorzaakt door elektrische/elektronische onderdelen in de windturbines en bijbehorende elektrische installaties.

In Europa gelden wettelijke bepalingen ten aanzien van het niveau van de stoorstraling die mag worden veroorzaakt door elektrische apparaten en installaties. Het regelgevend kader hiervoor is de EMC richtlijn [13] die ten doel heeft om storingen op radiodiensten te voorkomen. [9]

De geharmoniseerde EMC norm EN55011 [3] schrijft in het frequentiegebied van 30 MHz tot 230 MHz voor metingen op locatie een in-situ veldsterktelimiet[10] voor van 30 dBµV/m in een bandbreedte van 120 kHz en op 30 m afstand[11]. Een bron met een uitgestraald vermogen van $2{,}5*10^{-13}$ W/Hz e.i.r.p. voldoet precies aan deze limiet. Voor metingen die in een laboratorium situatie worden uitgevoerd geldt de limiet van 50 dBµV/m in een bandbreedte van 120 kHz op 10 m afstand. Dit komt overeen met een uitgestraald vermogen van $2{,}8*10^{-12}$ W/Hz e.i.r.p. [12] In het rapport wordt er van uitgegaan dat windturbines dit laatstgenoemde vermogen daadwerkelijk uitstralen op alle frequenties en in alle richtingen.

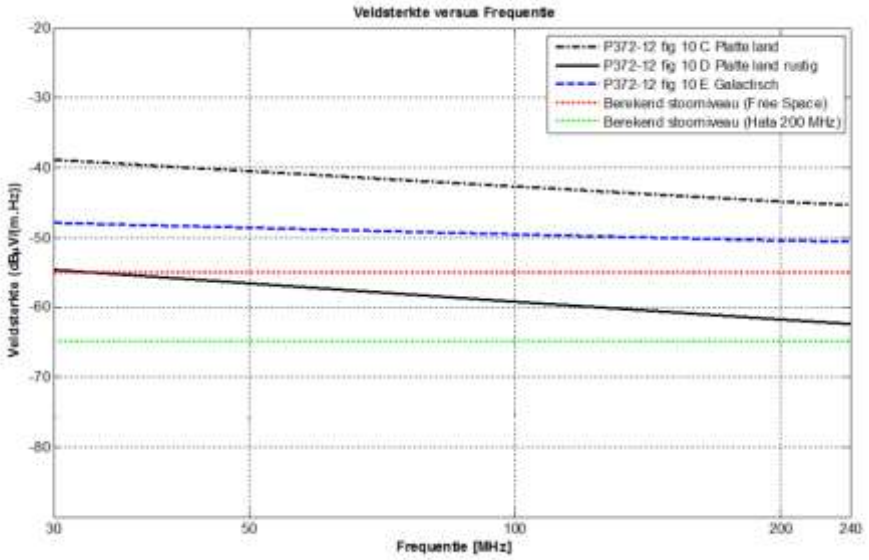
Uitgaande van dit maximum uitgestraald vermogen kan worden berekend hoe groot de veldsterkte van de stoorstraling is aan de rand van de LOFAR terp. Bij de berekening is uitgegaan van twee verschillende propagatiemodellen: het 'free space' model en het 'Modified Hata model' [14]. Beide modellen zijn beschreven in Annex A.

In onderstaande figuur is de elektrische veldsterkte weergegeven die één zo'n bron (lees windturbine) op een hoogte van 100 m kan veroorzaken ter plaatse van de LOFAR kern, bij een afstand tussen de LOFAR kern en windturbine van 5 km.[13] Om een indruk te geven hoe deze waarde zich verhoudt met een omgeving zonder deze stoorbron, is deze veldsterkte vergeleken met het verwachte ruisniveau in een landelijke omgeving, zoals verwacht volgens de ITU [4]. Daartoe is het niveau van de berekende stoorveldsterkte van één windturbine in één figuur weergegeven. Ter referentie zijn de te verwachten omgevingsruisniveaus volgens de ITU [4] horend bij twee verschillende referentieomgevingen toegevoegd: "Rural" en "Quiet Rural". In de "Quiet Rural" omgeving is het omgevingsruisniveau lager dan de Galactische ruis; deze curve is ook toegevoegd.

Het is moeilijk te voorspellen of dit stoorsignaal constant van aard zal zijn of door invloed van de draaiende rotorbladen gemoduleerd (in sterkte variërend) zal worden.

[9] EMC richtlijn: EMC Directive 2014/30/EU
[10] Op basis van een in-situ meting, klasse A (bedoeld voor industriële omgevingen) en groep 1 (apparaten die geen gebruik maken van het radiospectrum)
[11] waarbij met een Quasi Peak detector moet worden gemeten. Het filter dat wordt voorgeschreven is Gaussisch met een impulsbandbreedte van 120kHz, de ruisbandbreedte zal iets groter zijn dit is in de berekening niet meegenomen.
[12] Op basis van een laboratorium meting, klasse A (bedoeld voor industriële omgevingen) en groep 1 (apparaten die geen gebruik maken van het radiospectrum)
[13] Zoals te zien in figuur 1 (boven, rechts) bevinden zich ook nog antennestations rondom de LOFAR superterp tot op ruim 1 km afstand.

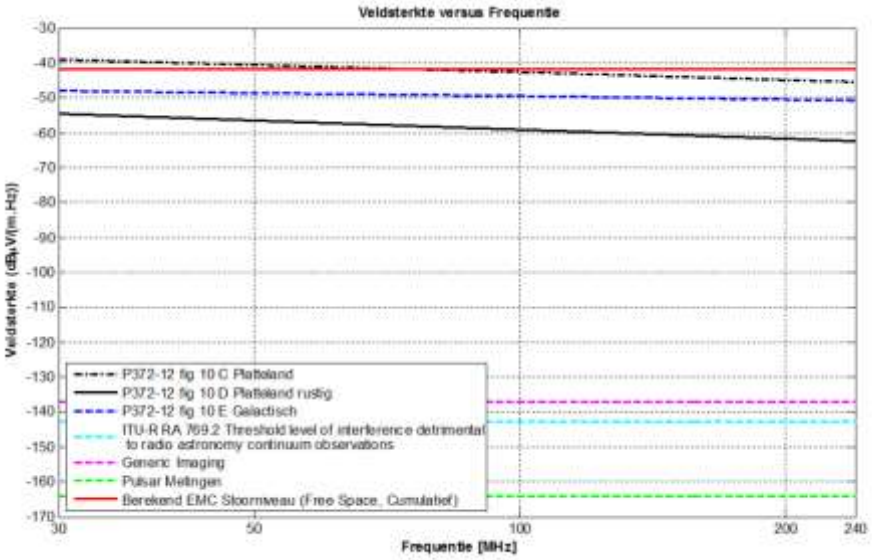
Dit hangt geheel af van het ontwerp en de realisatie van de technische installatie van de windturbine.



Figuur 4*: Elektrische veldsterkte in dBµV/(m.Hz) ten gevolge van één windturbine op een afstand van 5 km die voldoet aan EN55011 klasse A limieten [3] overeenkomend met een bronsterkte van* 2,8*10^{-12} W/Hz*. Berekeningen zijn uitgevoerd met het 'free space' model en het 'Modified Hata model' [14].*

Vervolgens is de cumulatieve stoorveldsterkte van het totale windturbinepark ter plaatse van de LOFAR kern berekend. De gebruikte methodiek wordt beschreven in Annex A. De resultaten van deze berekening zijn grafisch weergegeven in **Figuur 5**. In de berekeningen bij **Figuur 4** en **Figuur 5** is de windturbine beschouwd als een elektromagnetische bron die op alle frequenties en richtingen precies tot aan de toegestane limiet stoorstraling uitzendt. In de praktijk is dit uitstralingsniveau vaak sterk frequentie afhankelijk en zal niet over de hele band waarin LOFAR metingen verricht even hoog zijn. Enkele emissiemetingen door Agentschap Telecom aan windturbines, die nu opgesteld staan bij Eemshaven, laten zien dat er stoorsignalen meetbaar waren in de frequentiebanden die LOFAR ook gebruikt. Ze waren meetbaar door op enkele meters afstand van de turbinevoet te gaan staan met de meetapparatuur van het agentschap.

Er is ook een standaard EMC meting uitgevoerd conform EN55011. Vanwege de daarbij behorende, relatief grote meetbandbreedte van 120 kHz en het daarmee gepaard gaande ruisniveau van het meetsysteem zijn emissies uitgezonden vanuit de gondel (100 m hoogte) niet of nauwelijks detecteerbaar. De standaard EMC meetmethoden en apparatuur zijn daarom niet geschikt voor het vaststellen van het effect van windturbines op het EM milieu op grotere afstand. De aanwezigheid van emissies is overigens wel aangetoond.
Vanwege de grote afmetingen van een windturbine kan met een meting op korte afstand (3 m of 10 m) tot de windturbine op de grond niet worden voorspeld wat er op grotere afstanden aan stoorvelden ontstaat.
De beperktheid van de EMC meetprocedure voor grote installaties (zoals windturbines) wordt internationaal onderkend en momenteel is de normalisatiegroep IEC TC 88 PT 61400-40 bezig met het definiëren van EMC eisen en meetmethodes voor windturbines.



Figuur 5: *Elektrische veldsterkte in* dBµV/(m.Hz) *ten gevolge van alle windturbines gezamenlijk die elk voldoen aan EN55011 klasse A limieten [3] overeenkomend met een bronsterkte van* $2{,}8*10^{-12}$ W/Hz*. Berekeningen zijn hier alleen uitgevoerd met het 'free space' model.*

4.2 Reflecteren van stoorsignalen van buiten het windturbinepark

In deze paragraaf wordt ingegaan op stoorstraling die buiten het windturbinepark onbedoeld wordt opgewekt (door elektrische apparaten en installaties) en die vervolgens door de windturbines wordt gereflecteerd in de richting van de LOFAR kern.

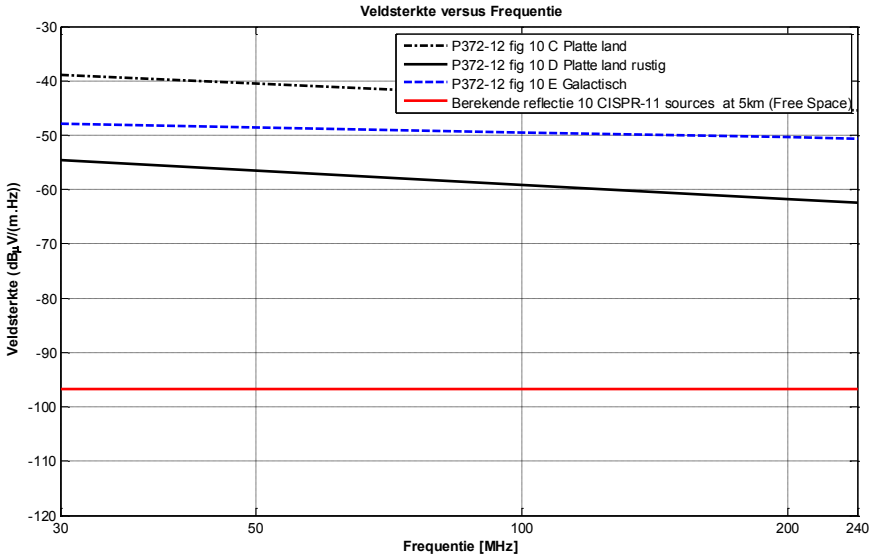
De windturbines zijn gepland aan de rand van de agglomeratie Stadskanaal. De gezamenlijke elektromagnetische stooremissies van alle elektrische en elektronische apparaten en installaties in en rond Stadskanaal vormen samen een breedbandige bron van elektromagnetische storing. De windturbines worden hierdoor aangestraald en vormen daarmee zelf stoorbronnen die hoog boven de horizon uitsteken en daarmee in direct zicht komen van de LOFAR kern. De door de windturbines "heruitgezonden" storing is breedbandig (een sommatie van de emissies van alle stoorbronnen) en wordt door de ronddraaiende bladen van de windturbine in sterkte gemoduleerd. Het ritme van die modulatie wordt bepaald door de omwentelingssnelheid en het aantal rotorbladen wieken, zie de door Agentschap Telecom uitgevoerde metingen in Annex D.
Om te bepalen hoeveel van die stoorstraling door de windturbine in de richting van de LOFAR kern wordt gereflecteerd moet de mate van reflectiviteit van de windturbine bekend zijn. Een maat voor de reflectiviteit van de windturbine is de Radar Cross Section (RCS), een getal dat aangeeft hoe groot het schijnbare oppervlak is dat radiogolven weerkaatst. Een lagere RCS waarde betekent minder reflectie van de windturbine. Dit wordt verder uitgelegd in Annex D.
In de literatuur zijn geen of vrijwel geen metingen en/of berekeningen te vinden over de reflectiviteit van windturbines in het frequentiebereik waarbinnen met LOFAR waarnemingen verricht worden. Agentschap Telecom heeft daarom zelf metingen (zie Annex D) en berekeningen (zie Annex E) verricht aan een windturbine om hier meer inzicht in te krijgen [15]. Op basis van deze metingen en

berekeningen is er gekozen om uit te gaan van een RCS van 2000 m^2 voor alle frequenties binnen het LOFAR frequentiegebied. Uitgaande van deze RCS-waarde, kan nu de stoorstraling in de LOFAR kern ten gevolge van het bovengenoemde stoorfenomeen worden berekend.

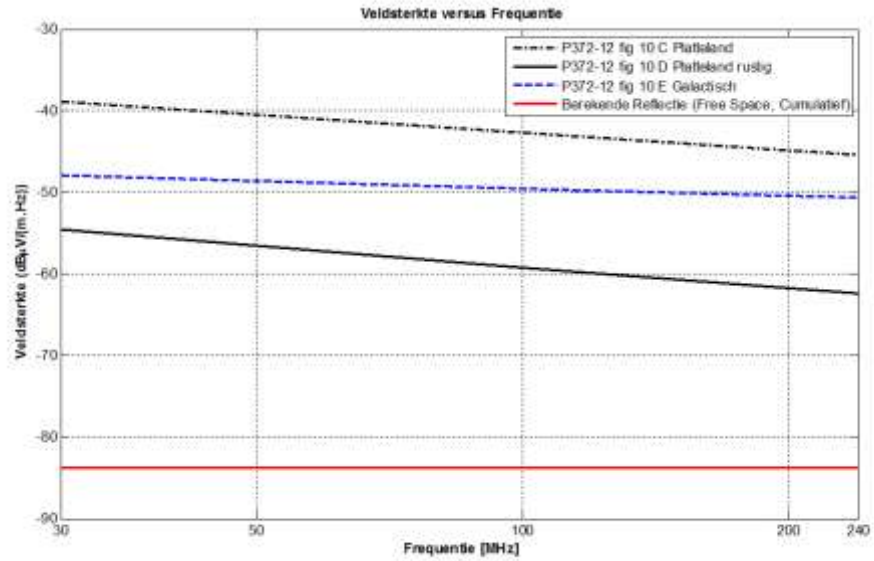
Voor de totale stoorstraling van agglomeratie Stadskanaal richting het windturbinepark is, net als in paragraaf 4.1, uitgegaan van de eisen aan ongewenste uitstralingen van apparaten zoals omschreven in de geharmoniseerde EMC norm EN55011 [3]. Echter, het stoorsignaal dat vanuit Stadskanaal en omgeving naar de windturbine wordt uitgestraald is afkomstig van een groot aantal individuele bronnen, waarvoor de cumulatieve stoorveldsterkte moet worden bepaald.

Voor een inschatting van die cumulatieve veldsterkte is uitgegaan van het volgende: De stoorbronnen zijn niet allemaal even sterk: de stoorsignalen van consumentenapparaten zijn minder sterk dan die van industriële installaties. De stoorsignalen van apparatuur die binnenshuis staat opgesteld worden verzwakt door de demping van de gebouwen waarin ze staan. Verder zijn de emissies van de apparaten vaak op specifieke frequenties tot aan de limiet en op andere frequenties zwakker, en zullen de velden van alle bronnen niet coherent optellen.
Voor de berekening is uitgegaan van één cumulatieve veldsterkte die ontstaat door een 10 maal zo sterke bron als een bron die de grenswaarde van EN55011 opwekt. Dit geeft een bronsterkte van $2{,}8*10^{-12}$ W/Hz * 10 = $2{,}8*10^{-11}$ W/Hz.

De gemiddelde afstand tussen agglomeraat Stadskanaal en het windturbinepark bedraagt 5 km. In werkelijkheid is er een variatie in de afstanden die effectief tot een hogere uitkomst zal leiden. Voor de afstanden tussen windturbine en LOFAR zijn wel de individuele waarden genomen, zodat overall geen groot verschil door deze vereenvoudiging geïntroduceerd wordt. Uitgaande van deze afstand rekenen we de vermogensdichtheid [W/ m^2] ter plaatse van een windturbine uit en vermenigvuldigen we deze met de RCS waarde van de windturbine (RCS = 2000 m^2). Op die manier wordt een bronvermogen verkregen waarmee de bijdrage van één individuele windturbine als reflector van stoorsignalen uit Stadskanaal en omgeving aan de stoorveldsterkte op de LOFAR locatie kan worden bepaald. Deze waarde is weergegeven in **Figuur 6**.
Voor de berekening van de paddemping tussen stoorbron en windturbines, alsmede tussen windturbines en LOFAR is het 'free space' propagatiemodel gehanteerd.
Ter referentie zijn de te verwachten omgevingsruisniveaus volgens de ITU [4] horend bij twee verschillende referentieomgevingen toegevoegd: "Rural" en "Quiet Rural". In de "Quiet Rural" omgeving is het omgevingsruisniveau lager dan de Galactische ruis; deze curve is ook toegevoegd.
Het cumulatieve effect van alle windturbines samen wordt op dezelfde manier berekend als in paragraaf 4.1 en is grafisch weergegeven in **Figuur 7**.



Figuur 6: *Elektrische veldsterkte in*[dBµV/(m.Hz) *op een afstand van 5 km van 1 windturbine die de cumulatieve stoorsignalen van het agglomeraat Stadskanaal reflecteert. Dit is gesimuleerd door 10 industriële bronnen volgens EN55011 klasse A, met een totale bronsterkte van* 2,8*10^{-11} W/Hz en *RCS= 2000 m^2. Voor de berekening van de paddemping tussen stoorbron en windturbines, alsmede tussen windturbines en LOFAR is het 'free space' propagatiemodel gehanteerd.*



Figuur 7:
Elektrische veldsterkte in dBµV/(m.Hz) *ter plaatse van de LOFAR kern ten gevolge van de cumulatie van alle windturbinereflecties door aanstraling van alle windturbines met de cumulatieve stoorsignalen van het agglomeraat Stadskanaal. Dit is gesimuleerd door 10 industriële bronnen volgens EN55011, klasse A [3] (op 5 km van de windturbines) met een totale bronsterkte van* 2,8*10^{-11} W/Hz en *RCS= 2000 m^2. Voor de berekening van de paddemping tussen stoorbron en windturbines, alsmede tussen windturbines en LOFAR is het 'free space' propagatiemodel gehanteerd.*

De stoorveldsterkte in de LOFAR kern, afkomstig van 1 windturbine veroorzaakt door het hier beschreven fenomeen is -96 dBµV/(m.Hz), en dat is 42 dB lager dan de waarde die gevonden werd in 4.1 ten gevolge van de EMC uitstraling van een windturbine. Daar staat wel tegenover dat deze stoorsignalen in sterkte gemoduleerd zijn door de ronddraaiende bladen van de windturbine. Het ritme van die modulatie wordt bepaald door de omwentelingssnelheid en het aantal rotorbladen, zie de door Agentschap Telecom uitgevoerde metingen in Annex D.

4.3 Reflecteren van ongewenste uitstralingen vanuit het windturbinepark zelf

In 4.1 is alleen uitgegaan van EMC uitstralingen rechtsreeks van de windturbine naar de LOFAR kern. Reflectie van EMC uitstralingen afkomstig van een andere windturbine is natuurlijk eveneens mogelijk. Die reflectie zal fors lager liggen dan de rechtstreekse uitstraling, als gevolg van de verliezen die optreden tijdens de reflectie die is beschreven in paragraaf 4.2 en Annex D en E.
Daar staat wel tegenover dat deze stoorsignalen in sterkte gemoduleerd zijn door de ronddraaiende bladen van de windturbine. Het ritme van die modulatie wordt bepaald door de omwentelingssnelheid en het aantal rotorbladen, zie de door Agentschap Telecom uitgevoerde metingen in Annex D.
Als de windturbines een EMC niveau hebben vergelijkbaar met de norm, dan zal de reflectie van deze EMC signalen via de wieken van andere turbines dominant zijn ten opzichte van de EMC signalen van andere bronnen in de omgeving. Dit vanwege de onderlinge nabijheid van de windturbines en het directe pad hiertussen. Wel ligt hier uiteraard een relatie met het niveau van de directe uitstraling vanuit de windturbine. Indien deze directe uitstraling lager gemaakt wordt, zal de reflectie hiervan ook lager worden. Het kan zijn dat dan de EMC reflectie van andere bronnen weer belangrijker wordt.

4.4 Reflecteren van omroepsignalen

Bij de ontwikkeling van LOFAR is rekening gehouden met de aanwezigheid van omroep signalen. De lage en hoge band van LOFAR lopen van resp. 10 MHz-80 MHz en van 110 MHz-240 MHz [2, p.7]. De tussenliggende FM omroepband wordt niet gebruikt voor observaties vanwege de sterke omroepsignalen in dat frequentiegebied. Echter, ten tijde van het schrijven van dit rapport wordt digitale radio DAB+ uitgerold in het frequentiegebied van ongeveer 183-228 MHz. Deze ontwikkeling was voorzien in de periode waarin LOFAR werd ontworpen en gebouwd maar gezien de ontbrekende belangstelling voor DAB is de waarschijnlijkheid van deze uitrol vermoedelijk zeer laag ingeschat.

DAB+ wordt uitgezonden als een 1,6 MHz brede OFDM multiplex waarin een aantal audio programma's zijn gecodeerd. Deze uitzending vindt plaats vanuit een kleiner of groter aantal synchrone zenders, een zogenaamd single frequency network. In de omgeving van LOFAR zijn 4 DAB+ kanalen in gebruik. In Annex C is weergegeven welke DAB+ zenders in de buurt van LOFAR gebruik maken van deze frequenties. Zie daarnaast ook de website van Agentschap Telecom [16] met een overzicht van digitale omroepzenders.

Deze signalen van deze DAB+ zullen nu ook al door LOFAR kunnen worden waargenomen. Dat zal iets sterker worden doordat de windturbines die in vol zicht van de zenders staan het signaal weer reflecteren in de richting van de LOFAR kern. Het gereflecteerde signaal zal echter in sterkte gemoduleerd zijn door de

ronddraaiende bladen van de windturbine. Het ritme van die modulatie wordt bepaald door de omwentelingssnelheid en het aantal rotorbladen, zie de door Agentschap Telecom uitgevoerde metingen in Annex D. Met name deze modulatie wordt in zijn algemeenheid door de astronomen als problematisch ervaren.

Met behulp van de afstand van elke individuele DAB zender uit annex C tot het centrum van het geplande windturbinepark is de veldsterkte voor elke DAB zender ter plaatse van dit centrum bepaald.
Met de RCS van een individuele windturbine is daarna bepaald welke veldsterkte dit ter plaatse van de LOFAR kern produceert. De afstand van één windturbine tot de LOFAR kern is op 5 km gesteld. Voor de berekeningen is het free space propagatiemodel gebruikt.

De totale veldsterkte veroorzaakt door één reflecterende windturbine bedraagt 40,8 dBµV/m, voor DAB is dat -21,2 dBµV/(m.Hz) volgens de free space berekening. Uit de berekeningen blijkt verder dat de zender in Stadskanaal de dominante bron is. Voor deze afstanden is het free-space model echter niet realistisch en zullen de resulterende waarden veel lager uitvallen. Zonder een uitgebreide analyse met propagatietools is het stoorniveau op dit moment niet exact te kwantificeren. Aangezien de DAB frequenties door LOFAR worden vermeden vanwege de hoge signaalniveaus en de veldsterkte van het gereflecteerde signaal berekend met het free space model zich reeds onder het direct ontvangen signaal bevindt, zal dit gereflecteerde signaal ondanks de sterkte geen problemen opleveren.

4.5 Blokkeren en afbuigen van gewenste signalen

Het blokkeren en afbuigen van gewenste signalen ontstaat wanneer een geobserveerd hemellichaam vanuit de LOFAR kern gezien achter of bijna achter een windturbine zit. Dit gebeurt niet alleen in een directe lijn, maar ook wanneer de rotorbladen de Fresnel-zones doorsnijden [17]. De periodieke onderbrekingen door de turbinebladen zijn slecht te onderscheiden van verschijnselen die moeten worden waargenomen. Daardoor kunnen observaties in het tijddomein onbruikbaar worden bij metingen aan een hemellichaam die zich achter de windturbine bevinden, onder een lage hoek met de horizon.
De energie van een waar te nemen object bevindt zich niet alleen in een rechte lijn tussen LOFAR en het object. Deze energie verplaatst zich binnen zogenaamde Fresnel zones. De straal van deze zones is afhankelijk van de frequentie en kan als volgt berekend worden.

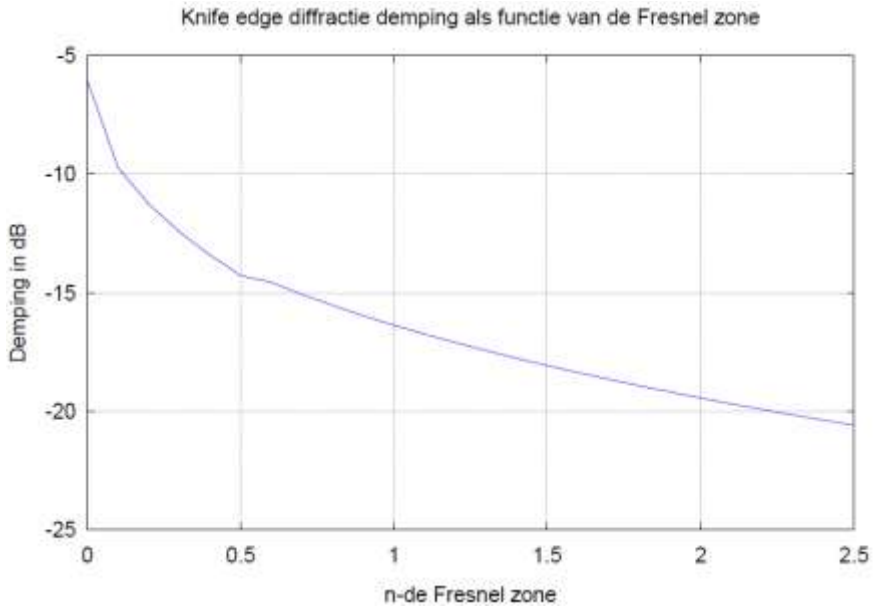
$$F_n = \sqrt{n\lambda d}$$

Waarbij n het nummer van de Fresnel zone is, λ de golflengte en d de afstand tussen de LOFAR superterp en de dichtstbijzijnde windturbine. Met het Knife edge diffractie model is te berekenen welke extra demping die ontstaat als van diffractie. Bij dit model wordt er vanuit gegaan dat een wand die extreem dun is, echter met een oneindige breedte zich (gedeeltelijk) in het zichtpad bevindt. In **Figuur 8** is benadering van deze diffractie demping volgen Lee [18], pagina 123 en 124 formules 4-12 tot 4-24, weergeven als functie van de Fresnel zone. De berekeningsmethode bestaat uit een aantal formules waarbij loss is gebaseerd op de klassieke knife edge diffraction methode. Lee heeft de berekeningsmethode vereenvoudigd door een grafiek op te nemen (4-7) waaruit deze loss eenvoudig af te lezen is.

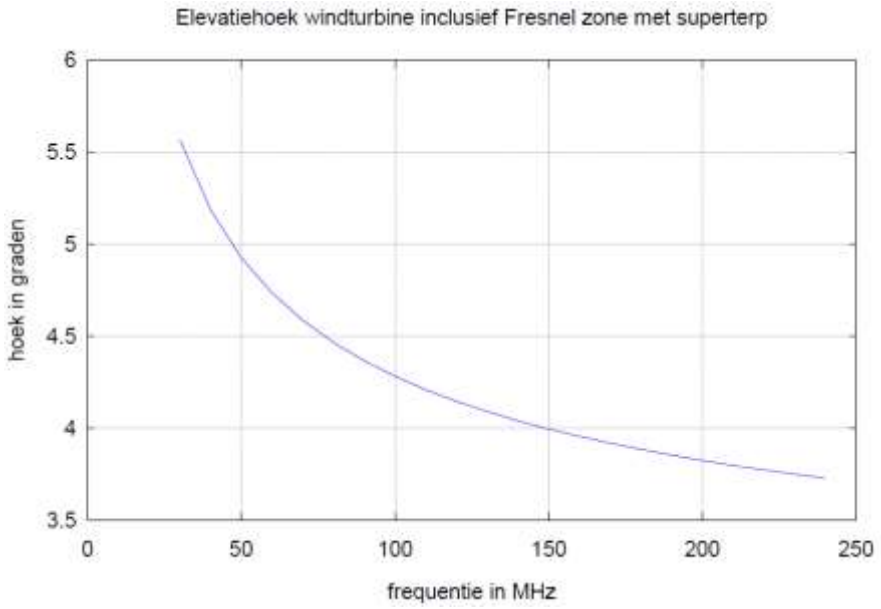
De wiek van een windturbine is in zekere mate vergelijkbaar met een dergelijke wand, met dat verschil dat deze zeer smal is. Als we een breedte aannemen van 1

meter voor de winturbine wiek tip en vaststellen dat bij de hoogste frequentie waarop met LOFAR metingen gedaan kunnen worden de diameter van de eerste Fresnel zone zo'n 140 meter is, dan mag in redelijkheid aangenomen worden dat de demping als gevolg van de windturbine tip 20 dB lager of meer ligt, dan op basis van het knife edge diffractie model is uitgerekend. Het lijkt daarom een conservatieve aanname dat als de eerste Fresnel zone vrij blijft (n=1) de windturbines geen hinderlijke obstructie vormen.

De gevoeligheid LOFAR neemt af naarmate de te meten objecten zich dichter bij de horizon bevinden. Metingen onder de 5 graden ten opzichte van de horizon zijn daarom voor ASTRON van minder belang. Uitgaande van dit gegeven en dat de tip van een windturbine wiek maximaal 190 meter hoog is, kan bepaald worden tot welke meethoogte windturbines invloed kunnen hebben op de metingen met LOFAR. In **Figuur 9** wordt dit weergegeven.



Figuur 8: *Knife edge diffractie als functie van de Fresnel zone [18]*



Figuur 9: *Observatiehoek (ten opzichte van het aardvlak) waaronder geen blokkeer en afbuigeffecten te verwachten zijn, dit als functie van de frequentie.*

Op basis van figuur 8 mag verwacht worden dat blokkering of afbuiging van het gewenste signaal door windturbines niet of nauwelijks op zal treden.

ASTRON heeft het plan om dit effect nader te onderzoeken door een experiment te doen met het neven-ontvangststation RS 508 dat zich bevindt bij Nieuwolda naast het Hondshaltermeer. Vanuit daar gezien staat ongeveer in het Noorden een groep windturbines, en elke dag beweegt de sterke ster en radio bron Cygnus A er ongeveer achterlangs. Daarmee kan dan bepaald worden of de eerste, de tweede of nog hogere Fresnel zones zodanig worden beïnvloed door windturbines dat ze vrij zouden moeten blijven. Deze experimenten zijn op dit moment nog niet uitgevoerd. Vooralsnog wordt er in dit rapport aangenomen dat uitgaan van de tweede Fresnel zone voldoende is.

4.6 Reflecteren van signalen uit de ruimte

Het reflecteren en verstrooien van signalen uit de ruimte door windturbines zou kunnen leiden tot het in beeld komen van een aantal sterren, gespiegeld in de windturbines. Het "spiegelbeeld" van de sterren bevindt zich vanuit LOFAR gezien dus op een vast punt op de horizon en vormt alleen een probleem als hoofdbundel of zijlobben daarop gericht zijn. Bovendien zijn deze gereflecteerde sterren verzwakt ten opzichte van de feitelijke sterren. Deze gespiegelde sterren hebben echter wel een amplitudemodulatie meegekregen met de turbine blad frequentie. Door ASTRON wordt dit effect niet gezien als een te verwachten probleem. Nader onderzoek door Agentschap Telecom heeft daarom niet plaats gevonden.
Ook is nog geen aandacht gegeven aan mogelijke effecten van door windturbines gereflecteerde signalen die worden uitgezonden door satellieten.

4.7 Ontlading door wrijvingsverschijnselen

De mate waarin ontlading door wrijvingsverschijnselen optreedt is direct gerelateerd aan het ontwerp van de windturbine en is waarschijnlijk sterk afhankelijk van de

weersomstandigheden. Hier zal dan specifieke aandacht voor nodig zijn bij een eventuele type-keuze. Het is niet mogelijk gebleken nadere gegevens te verkrijgen over de omvang van dit effect. Geadviseerd wordt dat, indien er besloten wordt tot plaatsing van windturbines, er nader onderzoek gedaan wordt naar dit effect door fabrikanten van windturbines. De omvang van de ontladingen, indien deze zich regelmatig blijken voor te doen. Elektrostatische ontladingen zijn zeer kort en hebben een hoog energieniveau. Exacte acceptabele limieten zijn daarom moeilijk in te schatten. Een eerste aanzet kan een limiet zijn waarbij de maximale puls niet boven het gemiddelde EMC niveau van de windturbine uitkomt.

4.8 Stoorsignalen die zich verspreiden over het elektriciteitsnet

Het ontwerp en de methode van installatie van de windturbines zal er op gericht moeten zijn om stoorsignalen die zich kunnen voordoen op het elektriciteitsnet zo veel mogelijk te onderdrukken. Deze stoorsignalen worden opgewekt door de generator en geïnjecteerd in de bekabeling die daarbij als ongewenste antenne gaat functioneren Het totale uitstralingsniveau van alle windturbines inclusief deze stralende bekabeling zal onder het EMC niveau moeten blijven. Het agentschap verwacht dat dit geen fundamentele technische problemen op hoeft te leveren.

4.9 Overzicht stoormechanismen en hun individuele bijdragen aan EM milieu

De stoormechanismen zoals besproken in de paragrafen 4.1 tot en met 4.8 zijn hieronder in tabelvormig overzicht samengevat:

Tabel 1: *overzicht van de bijdrage van elk van de stoormechanismen aan de verstoring van het elektromagnetische milieu van de LOFAR kern.*
ad1) -42 dBµV/(m.Hz) is bepaald op basis van 'free space' propagatie
ad2) -84[dBµV/(m.Hz) is bepaald op basis van 'free space' propagatie
ad3) verwaarloosbaar t.o.v. de EMC uitstraling (1), maar volledig gemoduleerd

Bijdrage verstoring EM-milieu per stoormechanisme Veldsterkte in dBµV/(m.Hz)	par.	LOFAR frequenties				Ge-modu-leerd*
		"Low Band"		"High Band"		
		30 MHz	80 MHz	110 MHz	240 MHz	
Referentie omgeving (ITU "Quiet Rural")		-55	-61	-67	-62	Nee
Galactische ruis (ITU)		-48	-51	-56	-51	Nee
1. EMC uitstraling (alle windmolens samen)	4.1	-42				Ja
2. Reflecteren stoorsignalen uit de omgeving (door alle windmolens)	4.2	-84				Ja
3. Reflecteren van ongewenste uitstralingen vanuit het windturbinepark zelf	4.3	verwaarloosbaar t.o.v. 1.				Ja
4. Reflecteren van DAB+ omroepsignalen	4.4	n.v.t.		n.v.t.		Ja
5. Blokkeren en afbuigen van gewenste signalen	4.5	verwaarloosbaar				Ja
6. Reflecteren van signalen uit de ruimte	4.6	niet gekwantificeerd				Ja
7. Ontlading door wrijvingsverschijnselen	4.7	niet onderzocht				Nee
8. Stoorsignalen die zich verspreiden over het elektriciteitsnet	4.8	niet gekwantificeerd				Nee

* gemoduleerd door de rotatie van de rotorbladen van de windturbines

De berekende waarden onder punt 1 en punt 2 van **Tabel 1** zijn uitgevoerd op basis van het 'free space' propagatiemodel dat een 'worst case' uitkomst geeft. In Hoofdstuk 5 van dit rapport wordt hiervoor gecorrigeerd door berekening met het modified Hata propagatiemodel [14].

In hoofdstuk 5 wordt ingeschat in hoeverre het aannemelijk is dat de performance van het LOFAR ontvangsysteem hierdoor negatief wordt beïnvloed.

5 Robuustheid van LOFAR voor verstoring van het EM milieu

Via de verschillende stoormechanismen uit Hoofdstuk 4 kunnen windturbines een verandering van het EM niveau introduceren ter plaatse van de LOFAR kern. In dit hoofdstuk worden de gevolgen van deze verandering van het EM milieu voor de 'performance' van LOFAR bij verschillende waarnemingsmodi in kaart gebracht.

Om een inschatting te kunnen maken van de 'robuustheid' van het LOFAR systeem voor deze EM instraling heeft het agentschap zich moeten verdiepen in het LOFAR ontvangsysteem. Aan de hand van literatuurstudie, gegevens van ASTRON en eigen doorrekeningen daarvan, is zo goed als mogelijk de gevoeligheid van het LOFAR meetsysteem en de robuustheid voor stoorsignalen gedestilleerd voor de verschillende soorten van waarnemingen die met LOFAR plaatsvinden. Deze berekende niveaus van robuustheid zijn door ASTRON geverifieerd en door het agentschap geconverteerd naar dezelfde eenheid dBµV/(m.Hz) als de in Hoofdstuk 4 te verwachten verstoring van het EM milieu. Op deze manier kan de minimale gevoeligheid van LOFAR vergeleken worden met de door windturbines veroorzaakte stoorsignalen. Bij het beoordelen van de co-existentie van LOFAR met het geplande windturbinepark gaat het agentschap uit van de resultaten uit Hoofdstuk 4 (te verwachten verandering van het EM milieu) en de LOFAR robuustheidsniveaus voor stoorstraling uit **Tabel 2** van dit hoofdstuk.

5.1 Het ontvangen door LOFAR van zwakke bedoelde signalen uit de ruimte

LOFAR is een bijzonder radio ontvangst systeem dat erop gericht is signalen uit de ruimte te ontvangen en te verwerken. Deze signalen zijn over het algemeen zeer zwak. De hoge gevoeligheid van LOFAR wordt vooral bereikt met de kern. De omgeving waar de LOFAR kern zich bevindt kenmerkt zich door een laag omgevingsruisniveau. Dit is van groot belang geweest bij de keuze van de locatie voor de LOFAR kern.

In de banden waarin LOFAR werkt (van 10 MHz tot 90 MHz (lage band) en 110 MHz tot 240 MHz (hoge band)) wordt de omgevingsruis van de kern gedomineerd door de galactische ruis (zie ook **Figuur 10**). De galactische ruis komt ook uit de ruimte, met name uit de Melkweg, en is in veel gevallen ook veel sterker dan de signalen waarin men is geïnteresseerd.

LOFAR past verschillende methodes toe om gewenste signalen uit de ruis te filteren. Die methodes kunnen betrekking hebben op de directe ontvangst met de antennes en voorversterkers, maar ook op de digitale bewerkingen die later plaats vinden. Afhankelijk van het onderzoeksgebied wordt de ontvangst-techniek en bewerking zo ingesteld dat het gewenste signaal overblijft en de ruis zoveel mogelijk wegvalt. Zo kan de galactische ruis, die over de hemel een hele uitgestrekte geleidelijke bron vormt, middels kruiscorrelatiemethodieken worden weg gefilterd bij het maken van hemelkaarten met een lange basislijn. Die lange basislijn ontstaat door ver uit elkaar liggende antennes in te zetten. Kleine details komen zo naar voren in de hemelkaarten. Het selecteren van een korte basislijn maakt dat uitgestrekte structuren zichtbaar worden en kleine details wegvallen.
De objecten in de ruimte waarnaar door ASTRON onderzoek wordt gedaan zullen, door de draaiing van de aarde, een baan volgen zoals de zon. Opkomen in het oosten, en ondergaan in het westen. Bij metingen met LOFAR worden deze

structuren gevolgd door steeds kleine tijdverschillen in te zetten in de ontvangen signalen per antenne en daarmee een waarnemingsbundel te richten en de baan van het object te volgen. Zo kunnen langdurig metingen worden gedaan aan een object zodat onbedoelde signalen zo goed mogelijk uitgemiddeld kunnen worden in de tijd.

De performance van LOFAR is zodanig dat bedoelde signalen met niveaus in de orde van grootte van -164 dBµV/(m.Hz) kunnen worden gedetecteerd. Dit wordt bereikt door de zogenaamde 'thermische ruis' terug te brengen tot een niveau lager dan dat van de waar te nemen emissies. De thermische ruis ontstaat door ruis in het LOFAR systeem zelf maar bevat ook de niet weg gefilterde (stoor)emissies.
De verschillende mogelijke thermische ruisniveaus van LOFAR zijn door ASTRON verstrekt en weergegeven in **Tabel 2**.
Zij zijn ruwweg te berekenen uit de omgevingsruis te delen door het aantal fysieke antennes per LOFAR station. Dan ontstaat de ruis per station. De ruis van de waarneming kan weer worden bepaald door de ruis per station te delen door het aantal stations betrokken bij meting, en de wortel uit het product van tijd en bandbreedte. De deling door deze wortel vorm effectief een middeling. Zeker bij lange integratietijden kan de thermische ruis bijzonder lage waardes krijgen.

In het kader van het Epoch of Reionization (EoR) onderzoek kunnen er in blokken van 1000 uur metingen op een frequentie van 150 MHz plaatsvinden in een bandbreedte van 10 MHz met de gehele kern. Hier kan een thermisch ruisniveau van -164 dBµV/(m.Hz) voor worden afgeleid. Voor het maken van hemelkaarten wordt over het algemeen de gehele kern ingezet met 2 MHz bandbreedte. Op een frequentie van 50 MHz betekent dat een thermische ruis van -137 dBµV/(m.Hz). Om geen last te hebben zou het stoorniveau daar 10 dB onder moeten blijven. Als ze van dezelfde orde van grootte worden gaat er wetenschappelijke waarde verloren.

Tabel 2: De kritische ruisvloer voor verschillende metingen.

Soort meting	**Typering**	**Onderzoeksgebieden** (zie 2.2)	**Tijd** [uren]	**Kritische ruisvloer** (dBµV/(m.Hz))
Generiek imaging	Imaging	- Survey of the low-frequency sky - Transient radio sky - Magnetic fields in the universe - Solar physics and space weather	10	-137
EoR	Imaging met lange integratietijd	- Epoch of reionization	1000	-164
Buffer board dump	Imaging met korte integratietijd, uitwerking achteraf	- Transient radio sky - Astro particle physics	enkele seconden	n.v.t.
Pulsar meten	Onderzoek gedrag roterende sterren: fluctuerende signalen detecteren.	- pulsar studies and surveys - Solar physics and space weather	10	-164

De superterp bevat een vierde deel van het aantal stations van de kern, 6 van de 24, en metingen daarmee hebben dan ook een 6 dB hoger thermisch ruisniveau. Echter, de kortere basislijnen geven de super terp metingen weer meer gevoeligheid voor storingen.

Voor metingen aan pulsars geldt voor stoorbronnen met een amplitude-modulatie en een periodiciteit vergelijkbaar met de pulsar waaraan gemeten wordt een vergelijkbare eis als voor EoR onderzoek. Dit omdat volgens opgave van ASTRON deze signalen een factor 10 onder de ruis moeten blijven. Echter, als een stoorbron geen amplitude-modulatie bevat, kan het signaal gewoon in de omgevingsruis worden gerekend.

5.2 Storing-onderdrukking door LOFAR zelf

De mogelijke inzet van de beschikbare 'ingebouwde' storing-onderdrukkende maatregelen in LOFAR hangen af van het 'type' waarneming.

Het phased array concept (waarbij gebruik gemaakt wordt van meerdere individuele antennes) maakt het mogelijk om een 'kijk-' of hoofdbundel naar een plaats in de ruimte te richten zonder een antenne fysiek aan te passen. Het te observeren object aan de hemel beschrijft een soortgelijke baan als de zon. Als men langere tijd daarop gericht blijft verdwijnt de horizon uit de hoofdbundel. De meeste aardse stoorbronnen en ook windturbines, die per definitie op de horizon staan, verdwijnen dan ook uit beeld van de hoofdbundel. Echter, het antennerichtingsdiagram van LOFAR antenne bevat naast de hoofdbundel ook zogenaamde zij-lobben. Een deel van deze zij-lobben kunnen bij metingen op de horizon gericht zijn. Het stoorsignaal beïnvloedt op deze wijze, weliswaar verzwakt, de meting. Deze verzwakking bedraagt volgens ASTRON minimaal circa 15 dB. Een gemiddelde schatting is 25 dB. De elevatiehoeken van de zij-lobben zijn frequentieafhankelijk en o.a. afhankelijk van de golflengte en positionering van de afzonderlijke antennes. Het totale resultaat is complex en moeilijk te voorspellen. Er treedt ook nog 10 dB verzwakking op ten gevolge van het gedrag van de individuele antennes [19]. Signalen vanaf de horizon komen onder een kleine hoek met het aardoppervlak binnen en krijgen daardoor deze extra verzwakking. Dit betekent een gemiddelde totale demping voor de van de zijkant binnenkomende signalen van 35 dB.

Ook kunnen problemen ontstaan met EM verstoring via windturbines als de waarneming met LOFAR in een beperkte tijd moet plaatsvinden terwijl de hoofdbundel ongeveer naar de horizon gericht blijft. Naarmate de waarnemingstijden korter zijn wordt uitmiddelen van de stoorsignalen moeilijker.

Daarnaast is bij tijddomeinmetingen, zoals dat bijvoorbeeld bij metingen aan pulsars gedaan wordt, ook de amplitude-modulatie van het stoorsignaal van belang. Door reflecties tegen de draaiende wieken van een windturbine ontstaat een dergelijk stoorsignaal dat als functie van de tijd in amplitude varieert. Indien deze modulatie vergelijkbaar is met de pulsfrequentie van een pulsar, dan is er moeilijk onderscheid te maken tussen het gewenste pulsar signaal[14] en het gemoduleerde stoorsignaal. Dergelijke signalen moeten dan ook een zeer laag niveau hebben, willen ze geen invloed hebben op de meting. Bij het maken van afbeeldingen van de hemel, waar het gewenste signaal constant is, is vooral de gemiddelde sterkte van het stoorsignaal van belang.

Afhankelijk van de aard van het stoorsignaal en van het soort meting (zie **Tabel 2**) kan een stoorsignaal globaal gesproken op 2 verschillende manieren doorwerken in de meetresultaten.

[14] Dit geldt voor ongeveer 30% van de pulsars.

- In het eerste geval vormt het stoorsignaal alleen een extra bijdrage aan de (omgeving)ruis. Dat vertaalt zich uiteindelijk in een hogere ruisachtergrond in de meting en bijvoorbeeld meer wazige plaatjes of kaarten van de hemel. Door langer te meten kan deze ruisbijdrage dan meestal relatief lager worden gemaakt.
- In het tweede geval is het stoorsignaal niet op voorhand te onderscheiden van het gewenste te meten signaal. Het komt dan gewoonlijk weliswaar binnen door een zij-lob van het antennesysteem, waardoor er sterke verzwakking ontstaat, maar de invloed is dan niet als ruis te verminderen door langer te meten of meer antennevelden te gebruiken.

Langere waarnemingen
De meeste metingen komen neer op het maken van een hemelkaart, het maken van een afbeelding ("imaging" in de **Tabel 2**) van een kleinere of grotere structuur in het heelal in een bepaalde frequentieband. De gevoeligheid voor stoorsignalen valt dan in de eerste categorie. Om er geen last van te hebben zou het niveau 10 dB onder de bestaande thermische ruis moeten blijven. Als ze van dezelfde orde van grootte worden gaat er wetenschappelijke waarde verloren.

Aan het relatief lager maken van de ruisbijdrage van stoorbronnen door langer te meten zitten echter wel grenzen. Een ruwe middeling, want het is afhankelijk van de gebruikte frequentieband en basislijn lengte, zorgt als gevolg hiervan voor een 10 dB onderdrukking bij een aaneengesloten waarnemingstijd van 10 uur.

Daarom rekenen we met een extra correctie van 10 dB storingsonderdrukking voor de lange waarnemingstijd.

Aangezien deze onderdrukking een gevolg is van de versmering van de point spread functie tijdens een lange waarneming speelt deze onderdrukking geen rol bij pulsar metingen. Voor pulsar metingen zal de overschrijding van de benodigde ondergrenzen door de in dit rapport afgeleide verstoring van het EM milieu dus 10 dB groter zijn.

Pulsar metingen
Bij pulsar metingen wordt niet met interferometrie gewerkt, maar een "total power measurement" uitgevoerd met een groep stations die relatief dicht bij elkaar ligt, zoals de super terp of de gehele kern. Typische integratietijden zijn 1 tot 10 uur. Maar als een stoorsignaal een amplitude modulatie heeft, zoals bij een windturbine op kan treden moet voor een 10 uurs meting aan een pulsar een soortgelijke gevoeligheid als een 1000 uurs imaging meting worden geschat met een bijbehorende lage ruisvloer.
Als een verstoring geen amplitude modulatie bevat, of de frequentie genoeg verschilt van de pulsar frequentie, kan het signaal gewoon als verhoging van de omgevingsruis worden gerekend. Deze meting valt dan in de eerste categorie.

In de verdere digitale verwerking is het in veel gevallen mogelijk om sterke stoorsignalen die zijn afgebakend in tijd of in frequentie uit de meetgegevens te verwijderen. Dit kan eventueel met de hand, maar er zijn ook algoritmes voor. Een verlies van 8 à 10 % van de meetgegevens komt volgens ASTRON zo nu en dan voor.

5.3 Huidige EM milieu ter plaatse van LOFAR (zonder windturbines)

LOFAR functioneert momenteel als een instrument van internationale topklasse [20], ondanks dat de omgeving nu niet storingsvrij is. Op een aantal nu al optredende stoormogelijkheden wordt hier ingegaan.

Huidige EMC uitstraling in de omgeving van LOFAR
Vlakbij de LOFAR kern ligt op 2,8 km het dorp Buinen. Elk elektrisch apparaat dat op een verdieping of zolder werkt kan de LOFAR kern aanstralen (mogelijk met demping indien gebruikt in gebouwen). Binnen 5 km van de LOFAR kern zijn er meer woonkernen, waarin er apparaten moeten staan op een verdieping of zolder. Hier schijnt LOFAR geen bovenmatige problemen mee te hebben voor de werking van hun systeem. Dat betekent dat LOFAR er blijkbaar in slaagt deze storingen in de regel goed weg te rekenen [6] Dit komt met name door de eigenschappen van het LOFAR systeem dat luistert in een breed spectrum over langere periodes. Maar ook adequate detectiemethoden, sterke filters, hoge ontvangstlineariteit en de lage hoogte van de antennes, dragen daar aan bij [7]. Toch treedt er regelmatig wel EMC verstoring op en kan dit een ruisverhoging veroorzaken in de waarnemingen. Reguliere EMC storing is geen ruimtelijk coherente bron doordat hij te dichtbij staat en in die zin uit focus is. In geval van de gevoeligste metingen geeft ASTRON aan daardoor voor die gevallen waarnemingen te moeten weggooien. Dit suggereert dat er nu en dan apparaten in de buurt aanwezig zijn die minder dan één tot enkele MHz verstoring rond de limiet produceren. De exacte oorzaak hiervan is echter vanwege de complexiteit van de benodigde analyses door ASTRON nog niet geheel in kaart gebracht.

Windturbineparken op 20-30 Km (Rütenmoor en Heede, Duitsland)
Er staan bijvoorbeeld achter Ter Apel en Stadskanaal in Duitsland op afstanden van circa 20 tot 30 km van LOFAR al windturbineparken. Deze windturbines veroorzaken nu al een (theoretisch) effect op het EM milieu ter plaatse van LOFAR. ASTRON schijnt van deze windturbines echter geen last te ondervinden. Hoe valt dit te verklaren?[15]
Bij de bepaling van de verandering van het EM milieu ter plaatse van LOFAR ten gevolge van windmolenparken op grotere afstanden lopen we tegen de volgende onzekerheden op: De toepassing van gangbare propagatiemodellen (zoals Hata [14] en ITU-R Recommendation P.1546-5 [21]) bij de bepaling van de demping van een stoorsignaal vanuit een windturbine dat op een afstand groter dan ca. 10 à 15 km onder een zeer lage hoek (t.o.v. het aardvlak) invalt op de LOFAR antennes gaat gepaard met onzekerheden. De propagatiemodellen blijken niet nog niet gevalideerd te zijn voor berekening van veldsterktewaarden op lage hoogte boven een specifiek grondoppervlak (waar de LOFAR antennes zijn gepositioneerd) en voor langere afstanden. Dit in combinatie met de onzekerheid over de dempende werking van de LOFAR antennes voor het ontvangen van storing bij zeer laag invallende hoeken (< 5 graden, en op langere afstanden), maakt een theoretische voorspelling onbetrouwbaar. Metingen zoals aangegeven in paragraaf 6.1.4 zouden meer duidelijkheid kunnen geven over de daadwerkelijke stoorveldsterkte die ontstaat op de LOFAR locatie ten gevolge van windturbineparken op langere afstanden.

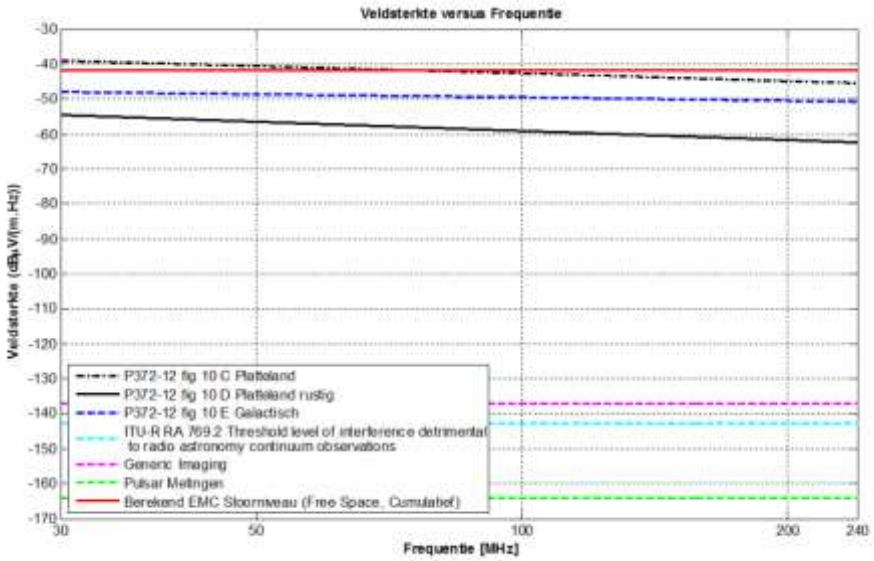
[15]Dit suggereert niet dat deze bestaande windparken of windturbines in die omgeving dezelfde karakteristieken zouden hebben als het geplande windpark in Drentse Monden en Oostermoer. Daar is door Agentschap Telecom geen onderzoek naar gedaan.

5.4 Te verwachten EM milieu ter plaatse van LOFAR (met windturbines)

De elektromagnetische omgeving kan worden voorgesteld met de waarden zoals aangegeven in **Figuur 10**. verschillende genoemde niveaus zijn aangegeven. Daar zitten een aantal bekende niveaus in, die rechtstreeks uit ITU aanbevelingen zijn overgenomen en enkele niveaus (uit **Tabel 2**) die volgens opgave van ASTRON voor de co-existentie van LOFAR en de Drentse Monden van belang zijn.

ITU-R Recommendation P 372-12 [4] geeft de te verwachten mediane ruisniveaus voor een aantal omgevingen.

Daarnaast geeft ITU-R Recommendation RA 769-2 [22] protectiecriteria voor radio astronomie metingen. Het is opmerkelijk dat sedert het vaststellen van deze criteria er de nodige technologieverbeteringen hebben plaatsgevonden, zodat LOFAR in zijn frequentiebanden dieper meet dan deze criteria. De protectiecriteria volgens ITU-R RA 769-2 zijn daarom niet meer voldoende voor LOFAR.



Figuur 10: *Overzicht van het stoorniveau ten gevolge van de EMC uitstraling van windturbines (rode lijn) en de verschillende kritische niveaus voor het uitvoeren van radioastronomiemetingen [22].*

Er zijn verschillende effecten beschouwd die een vermindering van het signaal op de LOFAR kern veroorzaken. De volgende calculatie kan worden gemaakt op basis van Figuur 10:

Een gecumuleerd stoorsignaal op de LOFAR kern op basis van free space berekening volgens par. 4.2:	- 42 dBuV/(m.Hz)
Realistischer propagatiemodel in plaats van Free space: Zie Annex A.	- 10dB
Correctie voor de praktisch uitgestraalde EMC storing van de turbine , zie 4.1:[16]	- 10 dB

[16] Er zijn verschillende omstandigheden die tot een lager en gunstiger stoorsignaal kunnen leiden. Ze treden soms op maar kunnen maar beperkt in rekening worden gebracht. Men moet denken aan een turbine die niet over gehele

Demping door lage zij instraling in LOFAR antennes, zie 5.2		- 35 dB
Ruisonderdrukking door langere waarnemingen, zie 5.2	-	- 10 dB
Nog nodig om geen LOFAR verslechtering te veroorzaken van -164 dBuV/(m.Hz)	**-**	**57 dB**

Ten opzichte van de gevoeligste ondergrenzen die LOFAR nodig heeft voor zijn waarnemingen betekent 57 dB (en voor pulsars 67 dB) een aanzienlijke overschrijding. Dit maakt een redelijke co-existentie onwaarschijnlijk.

band stoort maar in een beperkte band en niet tegen de limiet. Een turbine loopt niet altijd in die omstandigheid waarin hij de meeste verstoring veroorzaakt en staat soms stil.

5.5 LOFAR en mitigatie mogelijkheden

LOFAR is vanaf het begin ontworpen met een aantal ingebouwde mitigatietechnieken voor de toen bekende ruis- en stoorbronnen in gedachten. Daarbij is geen rekening gehouden met windturbines die in het zicht van de LOFAR kern geplaatst worden. Dit is onder andere beschreven in Boonstra [5] waarin beschreven wordt hoe reeds in de ontwerpfase bepaalde mitigatie methoden zijn onderzocht. Dit omvat naast het hierboven reeds beschreven principe van bundel-vorming met ruimtelijk uitmiddelen, ook het kiezen van de meest storingsvrije frequentie (sub)bandjes, lange integratietijden en ruismiddeling.

In proefschrift "Algorithms for Radio Interference Detection and Removal" van A.R Offringa van 22 juni 2012 [6] wordt verondersteld dat onder bepaalde randvoorwaarden RFI signalen gemiddeld kunnen worden over de meetbandbreedte. In welke mate EMC signalen van windturbines voldoen aan de randvoorwaarden zoals gesteld in het proefschrift is niet direct duidelijk.

LOFAR is een software telescoop. Dat wil zeggen dat het instrument voor een belangrijk deel gebaseerd is op het, na digitalisatie, met behulp van computers en software verwerken van alle ontvangen signalen tot iets astronomisch bruikbaars.

Met die softwarematige bewerking is veel mogelijk, maar dat gebeurt al. Voor het inschatten van verdere mitigatiemogelijkheden in LOFAR zelf, door het toepassen van verbeterde algoritmes is een diepgaande kennis van het systeem nodig.

ASTRON is de enige organisatie die over de kennis en mogelijkheden beschikt om hier nader onderzoek naar te doen. Een inschatting maken over de mogelijkheden van verdere mitigaties aan de kant van LOFAR is derhalve in het kader van dit onderzoek niet mogelijk.

6 Aanvullende maatregelen ter onderdrukking van stoorsignalen

6.1 Mitigatie mogelijkheden en oplossingen

Zoals gezien in hoofdstuk 5 is er nog minstens 57 dB aan mitigatiemaatregelen nodig om voor LOFAR verslechtering te voorkomen voor bepaalde typen van onderzoek. In dit hoofdstuk zal gekeken worden in hoeverre er hiervoor mitigatiemaatregelen beschikbaar zijn.

Er zijn diverse mitigatietechnieken denkbaar om de gevolgen van de plaatsing van windturbines in de omgeving van LOFAR te verminderen. Gezien de gevoeligheid van LOFAR voor verstoringen zal waarschijnlijk alleen een combinatie van mitigatietechnieken mogelijk een oplossing kunnen bieden. In de volgende sub-paragrafen worden diverse mogelijkheden weergegeven.

6.1.1 Windturbines fysiek afschermen

Een mitigatietechniek is het zoveel mogelijk fysiek afschermen van de windturbines voor stoorsignalen gezien vanuit de LOFAR kern, zonder daarbij een scherpe rand te maken. Hierbij kan gedacht worden aan een begroeide wal. Hoe dichter een dergelijke wal geplaatst wordt bij de LOFAR kern, des te lager kan hij zijn. Maar hij moet ook de verder weg geplaatste delen van de kern buiten zicht brengen. De demping van een aarden wal met begroeiing is bij de frequentiebanden van LOFAR is onvoldoende bekend. Rond 3,5 GHz (ver buiten de LOFAR band) is er meer bekend en meer onderzoek gedaan maar dat heeft nog niet tot praktische implementatie geleid. Omdat de te meten golflengten tussen de 1 en 10 meter liggen zal een aarden wal al snel enkele tientallen meters hoog moeten worden.

6.1.2 Het windturbine ontwerp

Ten aanzien van het windturbine ontwerp zijn drie aspecten van groot belang. Een laag uitgestraald EMC niveau, een niet periodiek fluctuerend EMC niveau en een lage reflectiviteit.

Een laag uitgestraald EMC niveau kan onder andere bereikt worden door de converter elektronica zoveel mogelijk in de voet van de windturbine mast te plaatsen. EMC experts uit de windturbine industrie geven aan dat stoorniveaus substantieel onder de limiet haalbaar zijn. Genoemd is 25 dB.

Door een goed EMC ontwerp van de windturbine kan de fluctuatie van stoorstraling in de tijd ten gevolge van de wiekrotatie worden geminimaliseerd.

De reflectiviteit laat zich uitdrukken als radar cross section, RCS. Metingen laten zien dat de RCS een bepalende factor is bij de storingen met een periodiek karakter. In algemene zin zorgen kleinere en lagere turbines voor een lagere RCS. Hiermee zou bij een specificatie rekening gehouden kunnen worden.

6.1.3 Coördinatie tussen ASTRON en de exploitanten van het windturbinepark

Door coördinatie tussen ASTRON en de exploitanten van het windturbinepark kan er geoptimaliseerd worden. Goede weersvoorspellingen kunnen hierbij helpen. Een van de mitigatie mogelijkheden voor de co-existentie van de windturbines en LOFAR is de uitwisseling van informatie en afstemming van het gebruik. In de praktijk werkt de turbine voornamelijk niet op vol vermogen en staat ook regelmatig stil. Naast stilstand door weinig wind is er ook een beperkte stilstand voor gepland en

ongepland onderhoud. Gedurende deze periodes worden de mogelijkheden verbeterd om metingen te verrichten aan pulsars welke een periodiciteit hebben in de range van de rotatie tijd van de wieken van de windturbines als deze in bedrijf zijn. Dit betekent niet dat alle verstorende effecten van de windturbines verdwenen zijn.

Informatie uitwisseling tussen ASTRON en de exploitanten van het windturbinepark kan helpen om een beeld te vormen van verwachte stilstand op basis van turbine specificaties en weersvoorspellingen. Moderne turbines hebben ook sensoren waarmee actuele productie cijfers beschikbaar zijn. Dat kan vrij gedetailleerde data zijn van sensoren op de turbine, bijvoorbeeld met welke frequentie de bladen draaien en vanuit welke richting de wind komt. Mogelijk kan deze data helpen bij de softwarematige ruisfiltering welke in LOFAR plaatsvindt.

6.1.4 Veranderen van de configuratie van het windturbine park

De configuratie van het windturbinepark is van invloed op het niveau van de stoorstraling die op de LOFAR locatie wordt opgewekt. In het algemeen geldt dat naarmate de afstand wordt vergroot en het aantal windturbines wordt verkleind de storing geringer wordt. Naarmate de invalshoek van de stoorstraling (ten opzichte van de aarde) geringer wordt zullen de LOFAR antennes de stoorstraling meer dempen. Deze lagere invalshoek kan worden bereikt door de windturbines in hoogte te verlagen of de afstand te vergroten. Ook helpt het om bij het ontwerp van de windturbine de potentiële stoorbronnen laag in de voet van de mast te plaatsen.

Indien de windturbines op een grotere afstand worden geplaatst zal het stooreffect afnemen. Er is door het agentschap geen onderzoek gedaan naar de afstand die minimaal moet worden aangehouden tussen windturbines en LOFAR om onacceptabele verstoring van het LOFAR systeem te voorkomen.
Als echter aangenomen wordt dat LOFAR geen last ondervindt van windparken die momenteel operationeel zijn zou de bijbehorende afstand tussen LOFAR en de betreffende windturbineparken kunnen worden gebruikt als indicatieve ‘veilige’ afstand. De minimale afstand waarbij LOFAR geen verstoring meer ondervindt van windturbines zou dan ergens moeten liggen in het afstandsbereik van 15 km tot 30 km. Om deze ‘veilige afstand’ binnen dit afstandsbereik nader te bepalen is het essentieel dat meer duidelijkheid wordt verkregen over de volgende aspecten:

- de propagatie-eigenschappen (demping) van stoorsignalen binnen dit afstandsbereik, uitgaande van een realistische grondsoort en morfologie, gecombineerd met
- informatie over de extra demping die ontstaat doordat deze stoorsignalen, onder een zeer lage hoek (ten opzichte van het aardvlak) bij de laag opgestelde LOFAR antennes binnenkomen.
- kwantitatieve informatie over de daadwerkelijke directe EMC uitstralings karakteristieken vanuit windturbines.
- kwantitatieve informatie over de reflectie eigenschappen van windturbines

De toepassing van gangbare propagatiemodellen (zoals Hata [14] en ITU Recommendation P.1546-5 [21]) bij de bepaling van de demping van een stoorsignaal vanuit een windturbine dat op een afstand groter dan ca. 10 à 15 km onder een zeer lage hoek (t.o.v. het aardvlak) invalt op de LOFAR antennes gaat gepaard met onzekerheden. Zelfs bij de omstandigheden waarvoor deze predictie modellen ontworpen zijn, dient rekening gehouden te worden met een standaarddeviatie van rond de 10 dB. De propagatiemodellen op deze afstanden zijn niet gevalideerd voor berekening van veldsterktewaarden op lage hoogte boven een

specifiek grondoppervlak (waar de LOFAR antennes zijn gepositioneerd). Dit in combinatie met de onzekerheid over de dempende werking van de LOFAR antennes voor het ontvangen van storing bij zeer laag invallende hoeken (< 5 graden) maken een theoretische voorspelling te onnauwkeurig.

Een gezamenlijk met ASTRON uitgevoerde meetcampagne zal naar verwachting meer betrouwbare informatie kunnen geven over de bovengenoemde aspecten en daarmee kunnen leiden tot meer duidelijkheid en (mogelijk) consensus over een aan te houden "veilige" afstand.

6.2: Conclusies over mitigatiemaatregelen

Bovenstaand is een overzicht gegeven van mogelijke mitigatiemaatregelen. De vraag is nu hoeveel deze maatregelen in totaal zouden kunnen opleveren om de ongewenste effecten op het EM milieu van de windturbines teniet te doen. Een expertmatige beoordeling van het totaal aan maatregelen ziet er als volgt uit.

Ten aanzien van de aarden wal zijn de onzekerheden te groot om hiervan een positief effect in rekening te brengen.

Ten aanzien van het windturbine ontwerp ten aanzien van EMC aspecten geeft de windturbine-industrie aan dat 25 dB onder de limiet mogelijk zou moeten zijn. Voor de midden/korte termijn is een inschatting van 15 dB een veilige inschatting. Indien echter in de windturbine zelf, en de bijbehorende installatie innovatie oplossingen gevonden kunnen worden, bijvoorbeeld door de elektronica in de voet van de mast te kunnen plaatsen, valt wellicht meer winst te behalen. Dat zou in samenspraak met de windturbine- industrie nader onderzocht moeten worden.

Ten aanzien van de coördinatie van LOFAR met het windturbinepark ziet het agentschap de effecten niet als substantieel. Het betreft slechts een gedeelte van een oplossing voor een gedeelte van de metingen.

Geconcludeerd wordt dat op dit moment een veilige inschatting zou zijn dat in totaal 20 dB bereikt kan worden met mitigatiemaatregelen waarvan de EMC verbetering van de windturbines de belangrijkste bijdrage levert.

7 Conclusies

Agentschap Telecom heeft in opdracht van DGETM onderzoek uitgevoerd naar de gevolgen van de voorgenomen plaatsing van het windturbinepark Drentse Monden en Oostermoer voor het radioastronomie ontvangstation LOFAR van ASTRON.
De aanwezigheid van windturbines in de nabijheid van LOFAR zorgt voor veranderingen in het elektromagnetische milieu ter plaatse. Het LOFAR systeem heeft een zekere mate van weerbaarheid voor deze veranderingen, maar als deze veranderingen te groot worden zal zich dat manifesteren als storing in het LOFAR ontvangsysteem met een degradatie van het ontvangstpotentieel tot gevolg.

De belangrijkste stoormechanismen blijken de '*EMC uitstraling van de windturbines zelf'* en de '*reflecties van andere stoorbronnen via de windturbines'* te zijn.

De onderzoeken naar Pulsars en 'Epoch of Reionization' vergen een gevoeligheid van het LOFAR systeem van -164 dBµV/(m.Hz). Bij een gegenereerd EM stoorniveau boven of vergelijkbaar met deze waarde zullen waarnemingen hier hinder van ondervinden en gaat wetenschappelijke waarde verloren. Het niveau van de elektromagnetische storing veroorzaakt door het windturbine park overschrijdt dit niveau ter plaatse van LOFAR met 57 dB (en voor pulsar metingen met 67 dB).

Er is een aantal mitigatiemaatregelen denkbaar die de verstoring van het EM milieu als gevolg van de windturbines zouden kunnen verminderen. De meeste winst valt te behalen met het reduceren van de EMC emissies van de windturbines zelf. Echter, het totale effect van deze maatregelen, die we beoordelen op 20 dB, is niet toereikend om de 57 dB overschrijding op te heffen.

Ook het interne mitigatiepotentieel van LOFAR zelf schiet te kort om dergelijke stooremissies weg te kunnen rekenen omdat aannemelijk is dat dit potentieel al volledig wordt ingezet.

<u>Conclusie:</u>

Verschillende stoormechanismen zijn door het agentschap onderzocht. De typen verstoring *'EMC straling van de windturbines'* en *'reflecties via windturbines'* hebben een belangrijk verstorend effect tot gevolg. Het niveau van dit eerstgenoemde effect is zodanig dat dit zelfs met mitigerende maatregelen tot degradatie zal leiden voor bepaalde typen observaties zoals die aan pulsars en "epoch of reionization". Voor de andere onderzochte mechanismen is het aannemelijk dat het effect ervan gering is en/of door LOFAR kan worden opgelost.

8 Aanbeveling t.a.v. effect van wijziging configuratie windmolenpark

De configuratie van het windturbinepark is van invloed op het niveau van de stoorstraling die op de LOFAR locatie wordt opgewekt. In het algemeen geldt dat naarmate de afstand wordt vergroot en het aantal windturbines wordt verkleind de storing geringer wordt. Naarmate de invalshoek van de stoorstraling (ten opzichte van de aarde) geringer wordt zullen de LOFAR antennes de stoorstraling meer dempen. Deze lagere invalshoek kan met name worden bereikt door de windturbines in hoogte te verlagen of door de afstand te vergroten. Ook helpt het om bij het ontwerp van de windturbine de potentiële stoorbronnen laag in de voet van de mast te plaatsen. Dit laatste zou ook nog een extra gunstig effect kunnen hebben op een vermindering van de directe EMC effecten vanuit de windturbine.

Indien de windturbines op een grotere afstand worden geplaatst zal het stooreffect afnemen. Er is door het agentschap geen onderzoek gedaan naar de afstand die minimaal moet worden aangehouden tussen windturbines en LOFAR om onacceptabele verstoring van het LOFAR systeem te voorkomen.
Als echter aangenomen wordt dat LOFAR geen last ondervindt van windmolenparken die momenteel operationeel zijn zou de bijbehorende afstand tussen LOFAR en de betreffende windturbineparken kunnen worden gebruikt als indicatieve 'veilige' afstand.

Uit Hoofdstuk 7 van dit rapport blijkt dat het plan Drentse Monden en Oostermoer, uitgaande van de geplande constellatie uit **Figuur 3**, tot storing zal leiden. De geplande windturbines liggen op afstanden tussen 4,5 km en ca. 15 km van de LOFAR superterp. De bestaande windparken vlak over de grens bij Ter Apel en Bourtange bevinden zich op afstanden van circa 20 - 30 km vanaf LOFAR. Het betreft parken van ongeveer 30 windturbines.
Er van uitgaande dat reeds bestaande windturbineparken momenteel geen storing veroorzaken op LOFAR, mag verondersteld worden dat deze parken op een "veilige" afstand staan. De minimale afstand waarbij LOFAR geen verstoring meer ondervindt van windturbines zou dan ergens moeten liggen in het afstandsbereik van 15 km tot 30 km. Hierbij moet worden opgemerkt dat AT geen onderzoek heeft gedaan heeft naar de exacte EMC uitstraling (direct en indirect) van dit park en omgeving. Daarnaast is heeft deze groep van windturbines andere karakteristieken dan het geplande windpark in Drentse Monden en Oostermoer. Om deze 'veilige afstand' binnen dit afstandsbereik nader te bepalen is het essentieel dat meer duidelijkheid wordt verkregen over de volgende aspecten:

- de propagatie-eigenschappen (demping) van stoorsignalen binnen dit afstandsbereik, uitgaande van een realistische grondsoort en morfologie, gecombineerd met
- informatie over de extra demping die ontstaat doordat deze stoorsignalen, onder een zeer lage hoek (ten opzichte van het aardvlak) bij de laag opgestelde LOFAR antennes binnenkomen.
- kwantitatieve informatie over de daadwerkelijke directe EMC uitstralings karakteristieken vanuit windturbines.
- kwantitatieve informatie over de reflectie eigenschappen van windturbines

De toepassing van gangbare propagatiemodellen (zoals Hata en ITU recommandatie P-1546-4) bij de bepaling van de demping van een stoorsignaal vanuit een

windturbine dat op een afstand groter dan ca. 10 à 15 km onder een zeer lage hoek (t.o.v. het aardvlak) invalt op de LOFAR antennes gaat gepaard met onzekerheden. De propagatiemodellen zijn mogelijk niet geschikt of zijn niet gevalideerd voor berekening van veldsterktewaarden op lage hoogte boven een specifiek grondoppervlak (waar de LOFAR antennes zijn gepositioneerd). Dit in combinatie met de onzekerheid over de dempende werking van de LOFAR antennes voor het ontvangen van storing bij zeer laag invallende hoeken (< 5 graden) maken een theoretische voorspelling te onnauwkeurig.

Een gezamenlijk met ASTRON uitgevoerde meetcampagne zal naar verwachting meer betrouwbare informatie kunnen geven over bovengenoemde aspecten en daarmee kunnen leiden tot duidelijkheid en (mogelijk) consensus over een aan te houden "veilige" afstand. Ten aanzien van de EMC eigenschappen van windturbines wordt uitwisseling van kennis met de initiatiefnemers/beheerders van windturbines wenselijk geacht.

Agentschap Telecom
Ministerie van Economische Zaken

BIJLAGEN

A. Modified Hata model & free space model

De gebruikte propagatiemodellen in dit rapport zijn free space, Hata en modified Hata.

Het free space model is een model waarin factoren zoals reflecties, "shadowing", "multipath" en andere topologie gerelateerde effecten niet zijn meegenomen.

De berekening is erg eenvoudig $\boxed{E = 5{,}48 \cdot \frac{\sqrt{P_{e.i.r.p}}}{R}}$ waarbij E de veldsterkte in V/m, P het uitgestraald vermogen in W e.i.r.p. en R de afstand in m is.

Het Okumura Hata model is een model ontwikkeld door de Japanners Okomura en Hata Dit is het oorspronkelijke model wat vaak gewoon Hata model wordt genoemd [23]
Het Okumura Hata model is een verbetering van het Okumura model maar heeft een beperkter frequentiebereik en werkt niet met afstanden kleiner dan 1000m. Middels een 'excess loss' en een hoogtecorrectie voor de zender is eenvoudig de extra demping t.o.v. het free space model te berekenen. In dit rapport is deze methode veelvuldig gebruikt.
Overigens moet men ook bij deze voor van toepassing zijnde situaties realistischer predictie modellen, rekening houden met een standaarddeviatie van rond de 10 dB.

Om een voorbeeld te geven bij een antennehoogte van 100m een frequentie van 200MHz en een afstand van 5 km bedraagt de "excess loss" 23 dB en de hoogtecorrectie 2dB op het uitgestraald vermogen.
Dit resulteert in een ongeveer 10 dB lagere veldsterkte dan berekend met het free space model.

Voor een groter frequentiebereik is het 'modified Hata' of 'extended Hata' model ontwikkeld waarbij verschillende versies in omloop zijn. Hier is de variant uit ERC report 68 gebruikt [14].

B. Schatting van actuele stoor- en ruisniveau

LOFAR [2] is ontwikkeld voor de omgeving waar het nu staat en goed functioneert. De kern staat tussen Buinen en Exloo op een geselecteerde locatie. Voor de lage LOFAR band blijkt voor deze locatie galactische ruis dominant te zijn. Voor de hoge band geldt dat de ruis voor de helft systeemruis is en voor de helft galactisch.

De tabel geeft een aantal waardes voor galactische ruis volgens ITU-R 372-12 [4]

Frequentie [MHz] mediaan	dBµV/(m.Hz)
10	-49,9
30	-51,3
100	-52,9
300	-54,3

C. Overzicht van DAB+ zenders in de buurt van LOFAR

In de buurt van LOFAR kunnen de volgende DAB+ kanalen worden waargenomen.

locatie	Hoogte [m]	P erp [kW]		NPO
Smilde	210	1		Kanaal 12C
Stadskanaal	79	0,7		226,592 – 228,128 [MHz]
Emmen	60	8		
Groningen	132	0,3		
Dedemsvaart	51	6,5		
Winschoten	58	4		

locatie	Hoogte [m]	P erp [kW]		Landelijk commercieel
Smilde	255	10		Kanaal 11C
Emmen	55	0,4		219,584– 221,120 [MHz]
Hoogezand	90	2		

locatie	Hoogte [m]	P erp [kW]		Niet landelijk commercieel + regionaal publiek
Smilde	253	3,5		Kanaal 6B
Hoogezand	82	25		182,880– 184,416 [MHz]

locatie	Hoogte [m]	P erp [kW]		MTV NL
Smilde	70	0,01		Kanaal 7C
Emmen	55	0,8		191,584– 193,120 [MHz]

D. Meting van de reflectiviteit

In de literatuur zijn geen of vrijwel geen metingen te vinden aan de reflectiviteit van windturbines in het frequentie bereik waarbinnen met LOFAR metingen verricht worden. lagentschap Telecom heeft daarom zelf metingen verricht aan een windturbine om hier meer inzicht in te krijgen. Als maat voor de reflectiviteit van de windturbine is de Radar Cross Section (RCS) gekozen, een getal dat aangeeft hoe groot het schijnbare oppervlak is dat radiogolven weerkaatst. Een lagere RCS waarde betekent minder reflectie van de windturbine.

Er is gemeten aan een windturbine met een ashoogte van 136 meter en een wieklengte van 50 meter in de buurt van Lelystad [15]. De resultaten van die metingen kunnen worden gebruikt om de te verwachten reflectiviteit van een enkele windturbine in Exloërveen te schatten.

De RCS van de windturbine werd bepaald op frequenties tussen 50 en 60 MHz, tussen 200 en 280 MHz en rond 600 MHz. Daartoe werd een pulsvormig signaal met precieze kenmerken uitgezonden op de gekozen frequentie en de door de windturbine gereflecteerde puls op een andere locatie ontvangen en gemeten. In het gebied waren meerdere windturbines aanwezig, maar de beoogde windturbine kon gescheiden worden gemeten door gebruik te maken van de looptijd van het uitgezonden signaal naar de windturbine toe en van de windturbine naar de meetontvanger.

Er is een groot aantal metingen uitgevoerd gedurende drie meetsessies in april, mei en juni 2016. Daarmee is voorkomen dat de gemeten waarden afhankelijk zijn van een specifieke meetafstand, een specifieke positie in het landschap of een specifieke oriëntatie van de windturbine als gevolg van de momentane windrichting. De gemeten waarden zijn te vinden in onderstaande tabel.

Gemeten RCS waarden		
50-60 MHz*	11-12 dBm^2	12-16 m^2
200-280 MHz	24-33 dBm^2	250-2000 m^2
600 MHz	28-29 dBm^2	600-800 m^2

Tabel E.1: Door Agentschap Telecom gemeten reflectiviteit van een windturbine [15].

Zoals te zien is, is de gemeten RCS niet constant: deze varieert wanneer de oriëntatie van de windturbine veranderd en ook wanneer een andere positie in het veld wordt gekozen. De variatie van de RCS waarden is veel groter dan de meetonzekerheid.

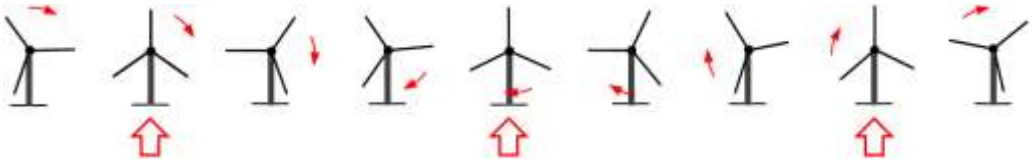
De RCS metingen die op 50-60 MHz zijn gedaan, aangeduid met een asterix (*), maken gebruik van een voor dit onderzoek gefabriceerde antenne die dicht bij de grond is opgesteld. Voor deze antenne is nog geen externe kalibratie voorhanden, en wordt uitgegaan van door simulatie verkregen waarden. De waarde voor 50 MHz-60 MHz kan dus nog een systematisch fout bevatten.

Rekening houdend met de bovenstaande observaties is er in dit onderzoek voor gekozen om aanvullende informatie te verkrijgen op basis van literatuur en eigen berekeningen (zie Annex E). Uiteindelijk is er voor gekozen om voor dit onderzoek een RCS waarde aan te houden van 2000 m^2.

Periodieke variatie van de reflectiviteit

De metingen laten zien dat de reflectiviteit van de windturbine afhankelijk is van de positie van de rotorbladen. Als gevolg daarvan zal een constant radiosignaal uit de omgeving van de windturbine – of dat nu een stoorsignaal betreft of het signaal van een geplande zender – worden gereflecteerd en daarbij de periodiciteit van de rotorbladen meekrijgen.

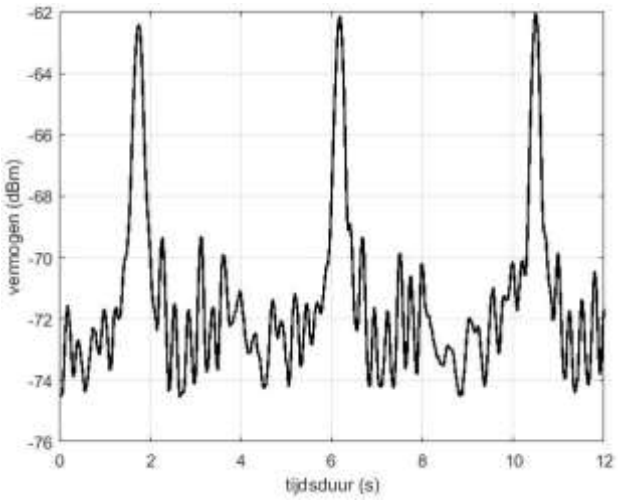
De windturbine met drie bladen, waaraan gemeten is, maakte tijdens de metingen elke 15 seconde één omwenteling. Hierdoor trad er elke 5 seconde een reflectie op. Dit is in onderstaande afbeelding gelustreerd, waarbij als voorbeeld de maximale reflectie optreedt bij een wiek in de hoogste stand.



De reflectiviteit van de windturbine is afhankelijk van de positie van de rotorbladen. De hier getekende positie van de rotorbladen waarbij reflectie optreedt is slechts een voorbeeld. Het komt ook voor dat een andere (terugkerende) rotorstand maximale reflectie geeft.

In de meeste gevallen trad de reflectie op wanneer één van de rotorbladen zich op de hoogste positie bevond, maar op sommige momenten trad de reflectie juist in een andere stand van de rotorbladen op. De oriëntatie van de windturbine als gevolg van de momentane windrichting speelt daarbij een rol. Dus zowel windrichting als windsnelheid bepalen de periodieke variatie van het gereflecteerde (mogelijk storende) signaal.

De waarden inde tabel in de vorige paragraaf zijn tijdens de kortdurende maxima opgetreden. Daar tussenin is de waarde van het gereflecteerde signaal tenminste 10 dB lager, d.w.z. een factor 10 in vermogen. De grootte van dit minimum kon met de gebruikte apparatuur niet preciezer worden gemeten. De reflecties laten een korte duty cycle zien, dat wil zeggen de pieken in het signaal zijn kortdurend ten opzichte van de periodiciteit. De windturbines in een windturbine park zullen daarom niet allemaal tegelijk een maximale reflectie vertonen.



Een detail van één van de reflectiemetingen aan een windturbine, zoals beschreven in [15]. De periodieke reflectie is duidelijk te zien. De herhalingsfrequentie van de reflectie is afhankelijk van het aantal rotorbladen en hun omwentelingssnelheid. De reflectie is van korte duur en treedt telkens op bij een heel specifieke stand van de rotorbladen.

De herhalingsfrequentie van de reflectie is afhankelijk van het aantal rotorbladen en de omwentelingssnelheid van de rotor. De omwentelingssnelheid is afhankelijk van de beschikbare windsnelheid, maar wordt ook gereguleerd door de windturbine zelf.

Moderne windturbines met een vermogen tussen 1 en 5 MW hebben een maximale omwentelingssnelheid ca. 16 omwentelingen per minuut. Voor windturbines met 3 rotorbladen is de tijd tussen twee reflecties 1,25 seconde of langer.

Radar Cross Section (RCS) is een technische factor die aangeeft hoe sterk een object radiogolven reflecteert. De eenheid van deze factor is vierkante meter (m^2).

Het is belangrijk te beseffen dat deze oppervlaktemaat geen directe relatie heeft met de fysieke afmetingen van het object dat reflecteert. Een klein voorwerp kan een grote RCS hebben, indien het radiogolven goed reflecteert. En een groot voorwerp kan een kleine RCS hebben, wanneer het radiogolven slecht reflecteert. Ter vergelijking: een klein spiegeltje zal veel meer licht reflecteren dan een grote matzwarte wand.

De RCS van de rotorbladen van een windturbine blijkt sterk afhankelijk van de stand van de rotorbladen. Vergelijk dit met een ronddraaiend spiegeltje waarop zonlicht valt: we zien de reflectie van het licht alleen wanneer de stand van het spiegeltje precies goed is.

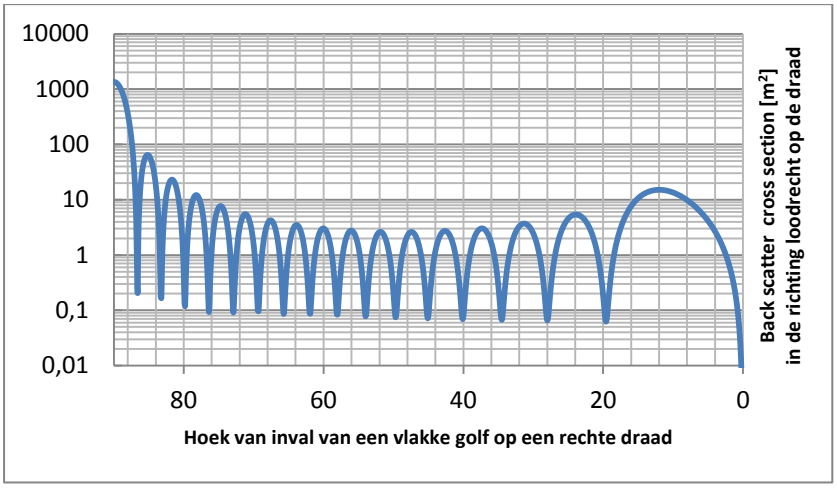
E. Berekening van de reflectiviteit

Teneinde aanvullende (indicatieve) informatie te krijgen over de Radar Cross Section van (de wieken) van windturbines zijn met de Numerical Electromagnetic Code berekeningen [24] uitgevoerd aan een vereenvoudigde structuur waarbij een verticale draad gelijk aan 2 x een aangenomen wieklengte van 50 m wordt beschouwd in de vrije ruimte. (De rotorbladen van windturbines bevatten een geleidende draad die fungeert als bliksemafleider en vormt daarmee een potentiële reflector).

De Radar Cross Section (in de richting loodrecht op de draad) van de volgende configuratie is onderzocht bij de frequenties 50 MHz, 100 MHz, 150 MHz en 200 MHz: Rechte verticale draad in de vrije ruime met een lengte van 100 meter en een straal van 0,01 cm die aangestraald wordt met een vlakke golf (E veld component parallel aan de draad). De resultaten van de simulatie zijn:

Frequentie MHz	RCS in [m2]
50,00	1347
100,00	1676
150,00	2056
200,00	2389

In figuur E1 is de back scatter cross section, in de reflectierichting loodrecht op de draad, voor verschillende hoeken van inval van een vlakke golf op de draad weergegeven bij 50 MHz bij de boven omschreven configuratie. Bij 90 graden is de Back scatter cross section gelijk aan de radar cross section en wel 1347 m^2.



Figuur E1: Back scatter cross section [m^2] voor de reflectierichting loodrecht op de draad, voor verschillende hoeken van inval van een vlakke golf met de draad @ 50 MHz, draadlengte 100 m, diameter 0,02 m, in 'free space'.

F. Bibliografie

[1] "*Windpark De Drentse Monden en Oostermoer"*, http://www.drentsemondenoostermoer.nl (weblink van 2016-05-02).

[2] M. P. van Haarlem, et al., "LOFAR: The low-frequency array", *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 556, A2, pp. 1-53, 2013.

[3] "*Industrial, scientific and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement*", NEN-EN 55011:2016, NEN, Delft, 2016.

[4] "*Radio Noise*", ITU-R Recommendation P.372-12, International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector, Genève, Zwitserland, 2015.

[5] A. J. Boonstra, "*Radio Frequency Interference Mitigation in Radio Astronomy*", doctoral thesis, Universiteit Delft, Delft, 2005.

[6] A. R. Offringa, "*Algorithms for Radio Interference Detection and Removal*", proefsschrijft, Rijksuniversiteit Groningen, 2012.

[7] A.R. Offringa, e.a., "The LOFAR radio environment", *Astronomy & Astiophysics* , Vol. 549, januari 2013. http://www.aanda.org/articles/aa/abs/2013/01/aa20293-12/aa20293-12.html

[8] "*Windpark De Drentse Monden en Oostermoer – Milieu-Effect Rapport*", Pondera Consult, Hengelo, 8 september 2015. https://www.rvo.nl/sites/default/files/2015/09/2015%2009%2011%20MER%20Hoofdrapport%20DDM-OM%20-versie%2008%2009%202015%20definitief-%20versie%20website.pdf

[9] K. Frolic, M. Watson, "Drentse Monden Wind Development - LOFAR Technical Impact Assessment", Pager Power, Sudbury, Verenigd Koninkrijk [in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken], april 2015.

[10] A. Mulder, C. Dik-Faber, E. M. A. Smaling, "*Gewijzigde motie van het lid Agnes Mulder c.s. (t.v.v. 30196, nr. 414) over rekening houden met het onderzoek van LOFAR bij het plaatsen van windmolens*", Duurzame ontwikkeling en beleid, Tweede Kamer der Staten-Generaal, Kamerstuk 30196, Nr. 429, Den Haag, 8 maart 2016.

[11] LOFAR website, http://www.lofar.org (weblink van 2016-05-02).

[12] Website van het plan De Drentse Monden en Oostermoer, http://www.drentsemondenoostermoer.nl/ (link van 2016-05-02).

[13] "Richtlijn 2014/30/EU van het Europees Parlement en de Raad van 26 februari 2014 betreffende de harmonisatie van de wetgevingen van de lidstaten inzake elektromagnetische compatibiliteit", *Official Journal of the European*, L96/79, 29 maart 2014.

[14] *"Monte-Carlo Radio Simulation Methodology for the use in sharing and compatibility studies between different radio services or systems",* ERC Report 68, European Radiocommunications Committee (ERC), European

Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT), Baden, June 2002.

[15] L. Colussi, "*Bepaling van de radardoorsnede van windturbines – Fase 1*," concept rapport versie 0.6, Agentschap Telecom, Amersfoort, 8 juni 2016.

[16] Website Agentschap Telecom, overzicht van de digitale omroepzenders die in de lucht zijn of binnenkort gaan, http://appl.agentschaptelecom.nl/dav/index.html (link van 2016-06-21).

[17] A. Fresnel, "Auszug aus einer Abhandlung über die Reflexion des Lichts," *Annalen der Physik*, Vol. 1, Nr. 1, pp. 255-261, 1833.

[18] W. C. Lee, *Mobile Communications Engineering*, McGraw-Hill, 1982.

[19] M. Krause, "*Calibration of the LOFAR Antennas*", Master's thesis, Radboud University Nijmegen, The Netherlands, 2013.

[20] R.C. Vermeulen, "*De impact van het geplande Windmolenpark Drentse Monden op het wetenschappelijke rendement van LOFAR (Wetenschappelijk Rapport)*", Director Radio Observatory at ASTRON en Director International LOFAR Telescope.

[21] "*Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz*", ITU-R Recommendation P.1546-5, International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector, Genève, Zwitserland, 2013.

[22] "*Protection criteria used for radio astronomical measurements*", ITU-R Recommendation RA.769-2, International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector, Genève, Zwitserland, 2003.

[23] Y. Okumura, "Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service," *Electrical Communication Laboratory*, Vol. 16, Nr. 9-10, 1968.

[24] G. Burke, A. Poggio, J. Logan, J. Rockway, J. " NEC-Numerical electromagnetics code for antennas and scattering", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 17, 1979, pp. 147-150).