

**VALIDATIE MEETMETHODIEK EN
VERWERKEN MEETDATA VAN
ANTENNEDIAGRAMMETINGEN IN
DE FM-OMROEPBAND**

24 NOVEMBER 2017

DR. IR. MARK BENTUM

DR. IR. ROEL SCHIPHORST

Opdrachtgever:



Agentschap Telecom
*Ministerie van Economische Zaken
en Klimaat*

SAMENVATTING

Dit rapport beschrijft de uitkomsten van het validatieonderzoek over de FM-omroep antennediagrammetingen en is uitgevoerd door de Universiteit Twente. Agentschap Telecom voert dergelijke metingen uit in het kader van toezicht op naleving van FM-omroepvergunningen. De algemene conclusie uit dit onderzoek is dat de gehanteerde methodiek valide en reproduceerbaar is. Wel zijn er aandachtspunten die gericht zijn op het verbeteren van de nauwkeurigheid.

Allereerst is in het onderzoek de gebruikte methodiek vergeleken met andere methodes om antennediagrammen te meten. De gevalideerde meetmethode is gebaseerd op het ITU-R SM2056 rapport en wordt als zodanig toegepast door het agentschap. Het antennediagram wordt gemeten door een antennesysteem welke gemonteerd is onder een helikopter. Alternatieve methodes zijn metingen vanaf de grond met een meetauto of in de lucht door middel van een drone. Voordeel van de huidige meetmethode is de hogere nauwkeurigheid ten opzichte van andere methodes. Ook kan met de huidige meetmethode snel een antennediagram worden gemeten. De meetmethode is een bewezen methode die 15 jaar geleden is ontwikkeld. De technologie ontwikkelt zich gedurende deze jaren natuurlijk verder. Vooral de opkomst van drones biedt nieuwe mogelijkheden.

Naast vergelijking met andere meetmethodes zijn ook de individuele componenten van het meetsysteem onderzocht. Dit betreft het RF meetsysteem, de analyse door de RadiMation software en Matlab scripts. De algemene uitkomst is dat het meetsysteem correct is geïmplementeerd. Wel zijn er verbeterpunten om de nauwkeurigheid te verhogen. Allereerst sluit het ingestelde meetbereik van de Rohde & Schwarz meetontvanger niet optimaal aan op de verwachte signaalniveaus; dit geldt voor relatief zwakke omroepsignalen. Ook vertoont de meetontvanger bij signalen minder dan 10 dB vanaf de ruisvloer een lichte niet-lineariteit, waardoor het uitgestraalde vermogen van zwakkere omroepsignalen ongeveer tot 1 dB hoger kan worden ingeschat dan het daadwerkelijk is. Een aanbeveling is om te kiezen voor minder verzwakking zodat signalen sterker door de meetontvanger worden ontvangen. Een tweede verbeterpunt is de middeling van de ruwe meetwaarden. In de huidige implementatie worden ruwe meetwaarden in het lineaire domein gemiddeld. Uit dit onderzoek blijkt dat de distributie van de ruwe meetwaarden niet kan worden beschouwd als een (log-)normale distributie. Om deze reden is het beter om te kiezen voor de mediane waarde als middelingsmethode. De huidige keuze voor middeling bevoordeelt licht sterke meetwaarden. Ten slotte is een derde verbeterpunt de meetnauwkeurigheid. In dit rapport wordt een alternatieve methode gepresenteerd voor het bepalen van de meetnauwkeurigheid. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen foutbronnen die één waarde hebben gedurende een vlucht versus foutbronnen die elke meetwaarde veranderen. De onzekerheid veroorzaakt door de laatste categorie kunnen met behulp van middeling worden gereduceerd.

In september 2017 heeft een verificatievlucht plaatsgevonden om het systeem te valideren, maar ook om een aantal experimenten uit te voeren. De metingen hebben plaatsgevonden in Rotterdam. De Waalhaventoren is uitgekozen, omdat dit – vanwege omringende hoogbouw en daardoor grotere reflecties – als een worst-case locatie kan worden beschouwd. Uit de metingen blijkt dat de meetmethodiek reproduceerbaar is; onafhankelijke metingen van hetzelfde antennediagram leveren dezelfde meetwaarden op. Daarnaast blijkt dat de signaalvariaties aan de ‘achterkant’ van de antenne groter zijn dan in de hoofdbundel. In deze gevallen neemt de meetonzekerheid toe. Voor de hoofdbundel is deze kleiner dan 1 dB, aan de achterkant neemt deze toe tot 1,5 dB met een betrouwbaarheidsinterval van 95%.

Voor de antennediagrammetingen die in het verleden zijn uitgevoerd, hebben de uitkomsten van dit rapport de volgende invloed. Voor metingen in de hoofdbundel van de antenne zijn

de uitkomsten onveranderd. Voor metingen aan de 'achterkant' van een antenne is het uitgestraalde vermogen te hoog gemeten. De exacte afwijking is afhankelijk van een aantal factoren en in dit rapport zijn individuele metingen uit het verleden niet specifiek onderzocht. De inschatting van de universiteit is dat bij de gemeten directionele antennediagrammen de daadwerkelijke afwijking aan de 'achterkant' van de antenne in de meeste gevallen kleiner is dan 1 dB.

SUMMARY

This report describes the results of the validation research about the FM broadcasting antenna pattern measurements which have been carried out by the University of Twente. The Radiocommunications Agency of the Netherlands executes this type of measurements for supervision on compliance with the FM broadcast licenses. The general conclusion from this research is that the used measurement methodology is valid. However, a number of topics have been identified which can improve in particular the accuracy. Also in a number of situations, the specified accuracy of the measurement system is exceeded.

First of all, in this study, the used methodology is compared to other methods for measuring antenna diagrams. The used measurement method is based on the ITU-R SM2056 report and is applied by the agency as such. The antenna diagram is measured by a helicopter on which a measuring system has been mounted. Alternative methods are ground measurements with a measuring car or airborne by means of a drone. Advantages of the current measurement design are the higher accuracy over other methods. Also the antenna diagram can be measured fast with the current set up. The measurement method is a proven method developed 15 years ago. The technology naturally evolves during these years. Especially the rise of drones offers new possibilities.

In addition to the comparison with other measurement methods, the individual components of the measurement system have also been investigated. This concerns the RF measurement system, the analysis of the RadiMation software and Matlab scripts. The overall outcome is that the measurement system has been properly implemented. However, there are a number of improvement points to increase accuracy. First of all, the specified measurement range of the Rohde & Schwarz receiver does not fully match the expected signal levels; this is especially true for weaker broadcast signals. Also, it turned out that the receiver has a weak nonlinearity for signals less than 10 dB from the noise floor, which overestimates the power of weaker signals up to 1 dB. One recommendation is to choose less attenuation, so that signals are received more strongly by the receiver. A second improvement point is the averaging of the raw measurements. In the current implementation, raw measurements are averaged in the linear domain. This research shows that the distribution of raw measurements cannot be considered as a (log) normal distribution. For this reason, it is better to choose the median value as an averaging method. The current implementation for averaging favors large measurements values. Finally, a third improvement point is the measurement accuracy. This report presents an alternative method for determining measurement accuracy. It distinguishes between uncertainty sources that have one realization during a flight versus uncertainty sources that change each measurement value. Uncertainty due the last category can be reduced by means of averaging.

In September 2017 a verification flight took place to validate the general system, but also to carry out a number of experiments. The measurements took place in Rotterdam. The Waalhaven Tower has been chosen because this can be regarded as a worst-case location - due to surrounding high-rise buildings and therefore larger reflections. The measurements show that the measurement method is reciprocal (repeatable); independent measurements of the same antenna diagram yield the same measured values. In addition, it appears that the signal variations on the back of the antenna are larger than in the main beam. In these cases, measurement uncertainty increases. For the main beam, this is less than 1 dB, at the back of the antenna it increases to 1.5 dB with an accuracy of 95%.

For antenna diagram measurements performed in the past, the results of this report have the following effect. For measurements in the main beam of the antenna, the results are unchanged. For measurements at the back of an antenna, the power is measured too high. The exact deviation depends on a number of factors. In this report, individual measurements

from the past have not been specifically investigated. The university estimates that the actual deviation at the 'back' of the directional antenna diagrams is in most cases less than 1 dB.

INHOUDSOPGAVE

Samenvatting	2
Summary	4
1. Inleiding	8
1.1 Achtergrond.....	8
1.2 Onderzoeksvragen	9
1.3 Onderzoeksmethodiek.....	10
1.4 Team.....	10
1.5 Indeling rapport.....	11
2. ITU-R SM20156 meetprocedure	12
2.1 Beschrijving meetprocedure	12
2.2 Implementatie door Agentschap Telecom.....	16
2.3 Vergelijking met andere meetmethodes.....	17
2.4 Commerciële oplossingen	21
3. Validatie	23
3.1 Analyse meetsysteem.....	23
3.2 Controlemetingen	29
3.3 Kalibratierapporten meetapparatuur	35
3.4 Verwerking RadiMation.....	38
3.5 Verwerking Matlab.....	39
4. Meetonzekerheid	41
4.1 Kalibratierapporten meetapparatuur	41
4.2 Meetonzekerheidsanalyse	43
4.3 Alternatieve samengestelde meetonzekerheidsanalyse	46
5. Verificatievlucht	50
5.1 Doelen.....	50
5.2 Validatie en reciprociteit van het gehele systeem	51
5.3 Beoordeling procedure gedurende meetvluchten.....	59
5.4 Bepalen optimale afstandsmetingen uit verschillende aanvliegeroutes.....	59
5.5 Antennediagram meten op verschillende afstanden	62

5.6 Meten van zwakke uitgestraalde FM vermogens van 1 kW of minder.....	65
5.7 Meten van het antennediagram van de meetantenne	68
5.8 Invloed verschillende middelingsmethodes op het antennediagram.....	69
5.9 Invloed middelingsventer op antennediagram.....	72
6. Conclusies en aanbevelingen.....	78
6.1 Conclusies.....	78
6.2 Aanbevelingen.....	79
7. Geraadpleegde bronnen.....	81
8. Begrippenlijst.....	82

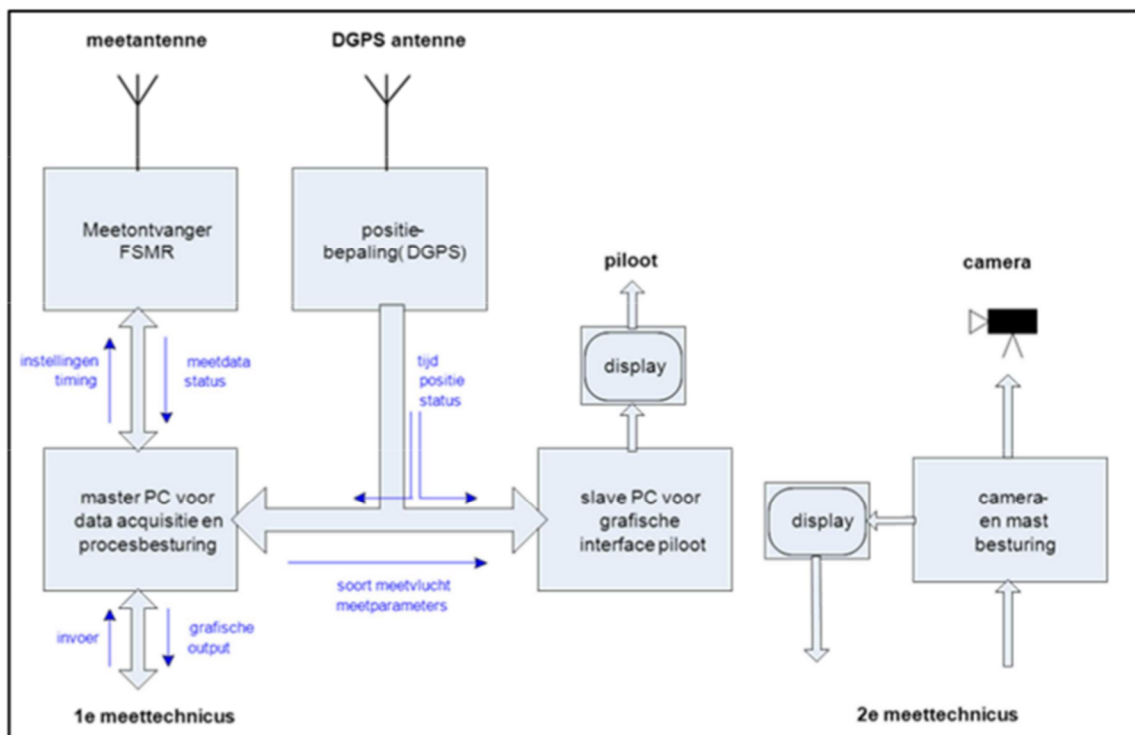
1 INLEIDING

1.1 ACHTERGROND

In het vierde kwartaal van 2012 zijn antennediagrammetingen uitgevoerd door Agentschap Telecom in het kader van toezicht op FM-omroepvergunningen. Naar aanleiding van de resultaten is er een discussie ontstaan. De minister van Economische Zaken heeft tijdens het Algemeen Overleg Telecommunicatie op 24 mei 2016 toegezegd om de meetmethode door een onafhankelijke partij te laten valideren. In dit rapport wordt het onafhankelijk onderzoek over de meetmethode en de verwerking van de meetdata van antennediagrammetingen in de FM-omroepband gepresenteerd. Het onderzoek is uitgevoerd door de Universiteit Twente¹.

De antennediagrammetingen worden uitgevoerd door middel van een meetmethodiek die Agentschap Telecom ontwikkeld heeft. Het antennediagram van FM omroepzenders op zendertorens en andere hoge antennemasten wordt door middel van een onder een helikopter gemonteerd meetsysteem gemeten. De gebruikte methodiek is beschreven in het ITU-R² SM2056 rapport en wordt als zodanig toegepast door het agentschap. Het schema van het meetsysteem dat door Agentschap Telecom is ontwikkeld, staat in figuur 1.1.1 weergegeven.

In de volgende sectie wordt een leeswijzer gepresenteerd waarin de specifieke onderzoeksvragen en de desbetreffende antwoorden uit de offerteaanvraag zijn beschreven.



Figuur 1.1.1: Schema van het antennediagrammeetsysteem

¹ Dit betreft een consortium bestaande uit de Universiteit Twente en BlueMark Holding BV

² ITU is de afkorting voor International Telecommunication Union, een internationaal orgaan op het gebied van telecommunicatie. Het onderdeel ITU-R houdt zich bezig met communicatie via de ether (radio).

1.2 ONDERZOEKSVRAGEN

In de offerteaanvraag van 26 oktober 2016 met de titel “Validatie meetmethodiek en verwerken meetdata van antennediagrammetingen in de FM-omroepband” worden de onderstaande hoofdvragen en bijbehorende subvragen beschreven. Het doel van deze paragraaf is tweeledig. Allereerst wordt een leeswijzer gegeven waarin te zien is waar elke onderzoeksvraag wordt beantwoord in het rapport. Daarnaast geeft dit overzicht aan of alle vragen uit de offerteaanvraag volledig zijn beantwoord.

- 1) Is de keuze om de ITU-R SM2056 “Airborne verification of antenna patterns of broadcasting stations” voor de antennediagrammetingen te gebruiken valide?
 - a) In hoeverre is deze methodiek geschikt als methode om antennediagrammetingen uit te voeren?
 - b) Hoe verhoudt deze methodiek zich tot andere methodes om antennediagrammen te meten?

Deze vraag en subvragen worden beantwoord in hoofdstuk 2 – ITU-R SM2056 meetprocedure.

- 2) Is de keuze van verwerking van de ruwe meetdata in meetresultaten valide?
 - a) De ruwe meetdata uit de meetontvanger, wordt tijdens de meetvlucht verwerkt door de RadiMation³ software. Vindt deze verwerking op de juiste wijze plaats? Indien verwerking niet op de juiste wijze plaatsvindt, op welke punten zijn verbeteringen mogelijk?
 - b) De verwerkte meetdata wordt naderhand middels Matlab⁴ bewerkt tot het uiteindelijke meetresultaat. Hierbij wordt een middeling uitgevoerd op de meetdata om het uiteindelijke resultaat per tien graden weer te geven. Doet de gekozen methode van middelen voldoende recht aan de fluctuatie van de gemeten veldsterkte en de nauwkeurigheid van de helikopter positie? Vindt de bewerking van de meetdata door Matlab op de juiste wijze plaats? Indien bewerking niet op de juiste wijze plaatsvindt, op welke punten zijn verbeteringen mogelijk?

Deze vraag en subvragen worden beantwoord in hoofdstuk 3, sectie 3.4 en 3.5.

- 3) Is de vaststelling van de totale meetonzekerheid valide?
 - a) Is de meetonzekerheid, zoals deze nu bepaald is, valide voor elke richting waarin gemeten wordt? Indien dit niet het geval is, geef aan wat de beste methode is om de totale meetonzekerheid te bepalen. Geef ook aan wat het juiste waarschijnlijkheidspercentage is bij dit type metingen.
 - b) Geef ook aan in hoeverre de uitvoering van de meting (meetmethodiek) consequenties heeft voor de meetonzekerheid. Kan of moet er een onderscheid gemaakt worden in toegestane meetonzekerheid, afhankelijk van de gemeten fluctuaties in onderlinge metingen van de FM signalen? Moet rekening gehouden worden met het aantal ronden dat gevolgen is?

Deze vraag en subvragen worden beantwoord in hoofdstuk 4 - Meetonzekerheid

- 4) Leiden de antwoorden op bovenstaande vragen tot de conclusie dat de meetmethodiek als geheel valide en reproduceerbaar is?

³RadiMation® is EMC software van Dare!! Instruments

⁴ Matlab® is een technische softwareomgeving van the Mathworks

- a) Licht per onderdeel toe wat de bevindingen zijn, wat mogelijke alternatieven zijn om te berekenen, wat de alternatieve resultaten zouden zijn en in hoeverre deze afwijken van de oorspronkelijke meetmethodiek.
- b) Geef zo nodig aan of er aanvullende zaken zijn waar geen rekening mee is gehouden maar die wel van wezenlijk belang zijn ter verbetering van de meetmethodiek.

Deze vraag en subvragen worden door het gehele rapport beantwoord, met name in hoofdstuk 2, 3, 4 en 5. In hoofdstuk 6 - Conclusies worden de belangrijkste bevindingen gepresenteerd.

- 5) Is beantwoording van bovenstaande vragen mogelijk aan de hand van een analyse van de bestaande ruwe meetdata of moet nog een “dummy”vlucht worden uitgevoerd?
 - a) Als de analyse daar aanleiding voor geeft kan een “dummy”vlucht uitgevoerd worden, waarbij vooraf duidelijk moet zijn wat het doel van deze vlucht is en welke invloed dit kan hebben op het meetresultaat.

Bij de start van het onderzoek is naar voren gekomen dat een verificatievlucht noodzakelijk was. De uitkomsten van deze vlucht worden beschreven in hoofdstuk 5 - Verificatievlucht.

1.3 ONDERZOEKSMETHODIEK

De onderzoeksvragen en de daaraan gerelateerde deelvragen zijn via onderstaande methodes beantwoord:

- Toepassing van eigen kennis
- Literatuuronderzoek in relevante bronnen, zoals internationale telecommunicatie-organisaties (ITU, CEPT⁵), maar ook wetenschappelijke bronnen (IEEE⁶, Google Scholar)
- Bestuderen van de broncode voor verwerking en acquisitie meetgegevens
- Interactieve teamsessies
- Interviews met technische experts van het agentschap
- Verificatievlucht voor validatie en het uitvoeren van aanvullende experimenten

1.4 TEAM

Dit project is uitgevoerd door stafleden van de Telecommunication Engineering (TE) leerstoel verbonden aan de faculteit Electrotechniek, Wiskunde en Informatica van de Universiteit Twente. De groep wordt geleid door dr. ir. Mark Bentum⁷. De Universiteit Twente heeft in het verleden meerdere projecten uitgevoerd voor Agentschap Telecom o.a. een T-DAB pilot in Amsterdam waar verschillende zendertopologieën zijn onderzocht. Daarnaast

⁵ The European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT) is opgericht op 26 juni 1959 als een Europees coördinatielichaam tussen de verschillende nationale overheidsorganisaties op het gebied van telecom en post.

⁶ IEEE staat voor Institute of Electrical and Electronics Engineers. Binnen de IEEE gemeenschap worden onder andere allerlei wetenschappelijke tijdschriften uitgegeven. Het IEEE marktaandeel van publicaties op het gebied van draadloze communicatie is erg groot. De meeste relevante artikelen worden via dit platform gepubliceerd.

⁷ Per 1 september 2017 is dhr. Bentum verbonden aan de Technische Universiteit Eindhoven (TUE) als professor Radio Science.

heeft de universiteit meegewerkt aan het digitaal dividend (“kabelstoring”) onderzoek waarin de storing door LTE/4G signalen op kabel TV is onderzocht.

De onderzoekers zijn:

Dr. ir. Roel Schiphorst (projectleider)

Dhr. Schiphorst is senior onderzoeker. Hij was projectleider van verschillende projecten voor de nationale overheid met de nadruk op onderzoek om technische randvoorwaarden te bepalen in beleidsvraagstukken. Belangrijke projecten waren de T-DAB pilot (digitale etherradio) [9], technologieneutraal gebruik van de 800, 900 & 1800 MHz frequentieband en het Digitaal Dividend onderzoek waarin een model is ontwikkeld om het aantal stoorgevallen te bepalen op kabel TV veroorzaakt door LTE/4G signalen. Tevens is hij adviseur in het kabinet van de Vlaamse minister van Cultuur, Media en Jeugd voor de transitie van FM naar digitale radio.

Dr.ir. Mark Bentum

Dhr. Bentum is associate professor (universitair hoofddocent) op de UT en tevens vakgroepvoorzitter van de Telecommunication Engineering leerstoel verbonden aan de faculteit EWI (Electrotechniek, Wiskunde en Informatica). Hij heeft ruime ervaring op het gebied van kanaalmoduleringen en metingen, RF techniek, communicatie, etc. Dhr. Bentum is een senior lid van de IEEE, voorzitter van de Nederlandse URSI-commissie, vicevoorzitter van de IEEE Benelux-sectie, initiator en voorzitter van het IEEE Benelux AES / GRSS-hoofdstuk, en heeft opgetreden als een recensent voor verschillende conferenties en tijdschriften.

1.5 INDELING RAPPORT

Het rapport is als volgt ingedeeld. In hoofdstuk 2 wordt de meetprocedure beschreven en vergeleken met andere meetmethodes. Hoofdstuk 3 beschrijft validatiemetingen aan het systeem. Naast validatiemetingen is de meetonzekerheid een belangrijk onderdeel in de antennediagrammetingen. De analyse van de gehanteerde meetonzekerheid is beschreven in hoofdstuk 4. Voor de beantwoording van een aantal vragen was het uitvoeren van een verificatievlucht noodzakelijk. De uitkomsten van de verschillende metingen gedurende deze vlucht zijn beschreven in hoofdstuk 5. Het rapport sluit af met hoofdstuk 6 waarin de belangrijkste conclusies en aanbevelingen van dit validatieonderzoek worden gepresenteerd.

2 ITU-R SM2056 MEETPROCEDURE

De antennediagrammetingen verricht door Agentschap Telecom zijn gebaseerd op een meetprocedure die is beschreven in rapport ITU-R SM2056 – “Airborne verification of antenna patterns of broadcasting stations”. Dit ITU rapport en de hierin beschreven procedure is destijds opgesteld door het agentschap en daarna ingebracht bij het internationale telecommunicatieorgaan ITU. Vervolgens is de procedure door andere landen/ITU als een valide meetprocedure vastgesteld.

De oorspronkelijke aanleiding voor het meten van de antennediagrammen van FM omroepzenders in 2012 was meerledig: ten eerste de herverdeling van FM-omroepfrequenties in 2003, ten tweede een groot aantal wijzigingen van antenneopstellingen op de zendertorens van de publieke omroep in 2010 en ten derde de branden in de zendertorens van Smilde en IJsselstein in 2011. Het doel van de metingen is het controleren van de antennediagrammen zoals deze in FM-omroepvergunningen zijn opgenomen. Dit geeft een beeld van de naleving door vergunninghouders van de vergunningsparameters in de verleende vergunning. In dit validatierapport worden de metingen, zoals omschreven in het ITU rapport ‘ITU-R SM2056’ gevalideerd. In dit hoofdstuk volgt een korte omschrijving van de meetprocedure en de implementatie hiervan door Agentschap Telecom. Ook wordt de meetmethode vergeleken met alternatieve methodes.

2.1 BESCHRIJVING MEETPROCEDURE

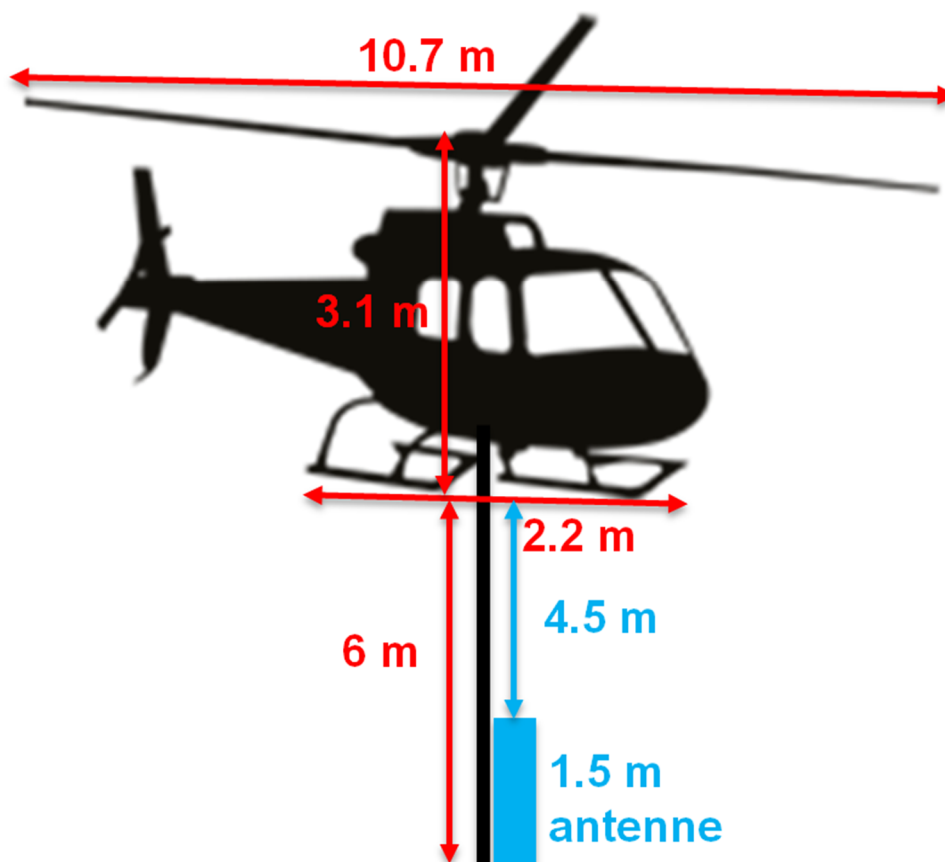
De antennediagrammetingen worden uitgevoerd door een meetsysteem te plaatsen in een helikopter. Eerst wordt een aantal metingen gedaan om de juiste parameters te bepalen voorafgaand aan de daadwerkelijke metingen van het antennediagram. Met behulp van een propagatievlucht wordt de optimale afstand (binnen bepaalde marges) van de helikopter tot de antennemast bepaald. Voor de optimale hoogte (binnen bepaalde marges) van de helikopter wordt een stijgvlucht uitgevoerd. Als eenmaal deze waarden bekend zijn, kan de cirkelvlucht gedaan worden om het antennediagram te meten. Op deze wijze kan een nauwkeurige weergave van het antennediagram verkregen worden. De verschillende soorten metingen worden hieronder uitgewerkt. Eerst volgt een toelichting op het meetsysteem.

2.1.1 MEETSYSTEEM

Het meetsysteem bestaat uit de volgende onderdelen (zie ook figuur 1.1.1):

- *Meetantennes*. Een periodic loop antenna array. De antenne is gebouwd door Agentschap Telecom. Kalibratie van de antenne is gedaan door NPL in het Verenigd Koninkrijk.
- *Meetontvanger*. Rohde & Schwarz FSMR 3.6. Het instrument wordt jaarlijks gekalibreerd.
- *DGPS systeem*. Trimble AgGPS 162
- *PCs*. HP Probook 6555B laptop
- *Een piloot display*. Sunit VGA
- *Software*. RadiMation
- *Camera/monitor*. Jentronics

De helikopter is een Eurocopter AS355⁸ / SNIAS AS 355 F2 en heeft een rotordiameter van 10.69 meter. In figuur 2.1.1 wordt de helikopter met uitgeklapte antenne schematisch weergegeven.



Figuur 2.1.1: Schematische voorstelling van de helikopter met uitgeklapte meetantenne

Tijdens de cirkelvlucht wordt door de meetontvanger in combinatie met de meetantenne de veldsterkte van het signaal gemeten. Vanuit deze meting kan het e.r.p. (Effective Radiated Power) in een bepaalde richting van de antennemast (zendertoren) bepaald worden. Daarvoor is het nodig om de exacte meetpositie te weten, maar ook alle verliezen in het meetsysteem. Voor plaatsbepaling wordt een DGPS (Differential Global Positioning System) ontvanger gebruikt, zodat de afstand van de helikopter tot de zendantenne nauwkeurig berekend kan worden. De verliezen in het meetsysteem zijn van te voren nauwkeurig in kaart gebracht.

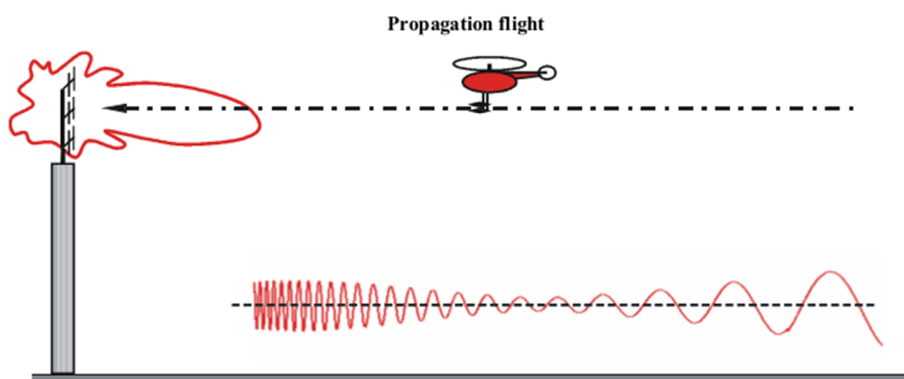
De berekeningen -van ruwe meetdata naar uitgestraalde FM vermogen- worden in de RadiMation software verricht door de master-PC. Een slave-PC stuurt het display aan voor de piloot; een scherm waarop een virtuele box is te zien waarbinnen gevlogen moet worden. In de metingen beschreven in dit rapport is een virtuele box van 20 meter aangehouden. Dezelfde marges zijn ook gehanteerd bij eerdere metingen door het agentschap.

⁸ Voor de volledige specificaties zie <http://airbushelicoptersinc.com/products/AS355-specifications.asp>

Een meettechnicus bestuurt de mast met de meetantennes. Bij aanvang van de meting wordt de mast met de meetantennes naar beneden geklapt en uitgeschoven. Vervolgens wordt de mast met de meetantennes 180 graden gedraaid. Ter controle van dit proces is in de mast een camera aangebracht. Met deze camera kan tijdens de meting de richting van de meetantennes in de gaten gehouden worden en waar nodig worden bijgestuurd. De meetantenne moet te allen tijde richting de zendmast worden gericht binnen een marge van ± 15 graden. De meetdata wordt vervolgens opgeslagen in de master-PC zodat deze beschikbaar is voor latere verwerking via Matlab scripts.

2.1.2 PROPAGATIEVLUCHT

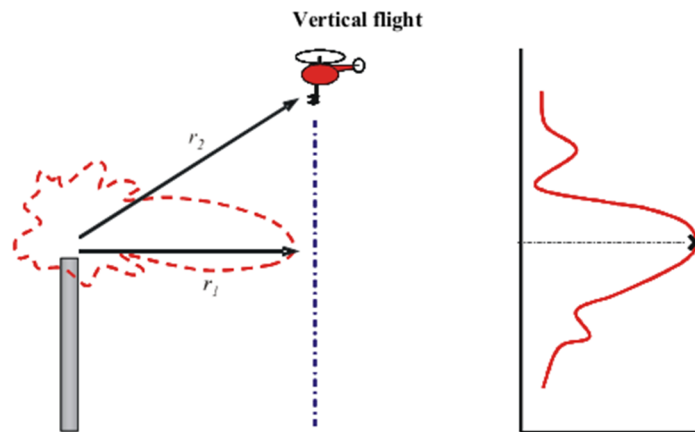
Nadat de juiste voorbereidingen getroffen zijn (invoeren van de gegevens over de te meten FM zenders (frequentie, locatie) in de RadiMation software, opstellen van het meetplan, check van de apparatuur), kan begonnen worden met het bepalen van de afstand en de hoogte van de cirkelvlucht(en). De afstand tot de zendertoren wordt bepaald door een zogeheten propagatievlucht. In de propagatievlucht wordt gevlogen op de hoogte van het antennesysteem in de hoofdbundel. Tussen 2,5 kilometer en 400 meter afstand van de zendertoren wordt het signaalniveau (e.r.p.) gemeten. Het punt van de minste (grond) reflectie wordt gekozen als optimale afstand voor de cirkelvlucht. Op dit punt zijn de lokale variaties in het ontvangen signaal minimaal. De propagatievlucht wordt alleen uitgevoerd in de hoofdbundel. Het zou kunnen dat daardoor de metingen in andere richtingen niet optimaal zijn. Dit wordt verder onderzocht in hoofdstuk 5, Verificatievlucht.



Figuur 2.1.2: Schematische voorstelling van de propagatievlucht

2.1.3 STIJGVLUCHT

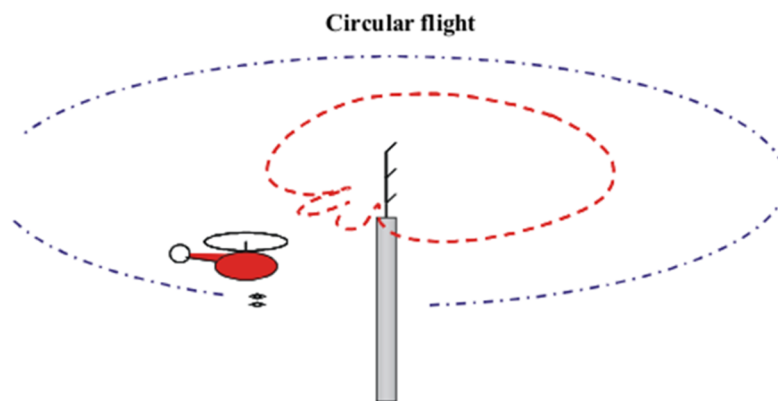
Nadat de optimale vliegafstand bepaald is, wordt de optimale vlieghoogte bepaald. In een stijgvlucht wordt eveneens het signaalniveau gemeten (e.r.p.). Vervolgens wordt de optimale hoogte bepaald door te kijken naar het maximaal ontvangen uitgestraald vermogen in de cirkelvlucht. Op deze hoogte wordt de cirkelvlucht uitgevoerd.



Figuur 2.1.3: Schematische voorstelling van de stijgvlucht

2.1.4 CIRKELVLUCHT

Nadat de optimale vlieghoogte en vliegafstand zijn bepaald, wordt de daadwerkelijke meting van het antennediagram uitgevoerd: de cirkelvlucht. Met behulp van een virtuele box krijgt de piloot aanwijzingen op welke afstand en hoogte hij moet vliegen. Mogelijke afstandsvariaties tijdens de vlucht worden gecorrigeerd in de RadiMation software. Per meting worden er meerdere (2 tot 3) cirkelvluchten uitgevoerd.



Figuur 2.1.4: Schematische voorstelling van de cirkelvlucht

2.1.5 DATA VERWERKING

De RadiMation software slaat de ruwe meetdata van de metingen op in meetbestanden. Met de data kan direct na de meting al een eerste indicatie van het antennediagram gemaakt worden om te analyseren of de data alle noodzakelijke gegevens heeft opgeslagen en er geen grote fouten zijn gemaakt. Na afloop van de metingen worden de gegevens offline verwerkt in Matlab.

2.1.6 STERKE/ZWAKKE PUNTEN

De meetprocedure is een goede manier om antennediagrammen te meten van antenne-installaties op hoge opstelpunten met hoog uitgestraald vermogens. De procedure houdt goed rekening gehouden met eventuele beïnvloeding van het hoofdsignaal, zoals veroorzaakt door reflecties.

Sterke punten van de meetprocedure zijn:

- De uitgevoerde meetmethode is nauwkeurig (zie ook het hoofdstuk 4 over de meetonzekerheid). Deze methode is dan ook nauwkeuriger dan andere meetmethodes (sectie 2.3).
- De meetmethode is relatief ongevoelig voor invloed van objecten in omgeving (reflecties, shadowing⁹). Dat komt omdat op hoogte wordt gemeten waardoor de reflecties minder aanwezig zijn en shadowing in zijn geheel niet voorkomt. Hiermee is de methode betrouwbaar en reproduceerbaar zolang er natuurlijk geen aanpassingen zijn doorgevoerd aan de antenne-installatie. De onzekerheden in het ontvangen signaal (*small scale fading*¹⁰) zijn ordes kleiner dan het *direct-line-of-sight* signaal (direct zicht).
- Het is een snelle methode om het antennediagram te meten van alle zenders op een toren.

Zwakke punten van de meetprocedure zijn:

- De meetprocedure is gericht op het meten van het uitgestraalde vermogen in de hoofdbundel. Bij niet-rondstralende antennediagrammen is het uitgestraalde vermogen buiten de hoofdbundel ook belangrijk. Uit hoofdstuk 5 (Verificatievlucht) blijkt dat onder andere dat de meetonzekerheid toeneemt buiten de hoofdbundel.
- De meetprocedure vergt voorbereidingstijd in verband met de inhuur van de helikopter. De procedure is voor het agentschap daarmee afhankelijk van een externe partij. Vanwege de langere voorbereidingstijd kunnen weersomstandigheden (vooral harde wind) extra vertraging van de metingen teweeg brengen.

2.2 IMPLEMENTATIE DOOR AGENTSCHAP TELECOM

De ITU-R SM2056 meetprocedure is een meetprotocol. Dat betekent dat iedere partij die antennediagrammen vanuit de lucht wil meten een meetopstelling moet implementeren die voldoet aan deze procedure. De meetprocedure schrijft geen type meetapparatuur of helikopter voor. Het meetprotocol zou om die reden ook door middel van een drone kunnen worden uitgevoerd.

Het agentschap heeft documentatie aan de Universiteit Twente aangeleverd, waarin zij beschrijft op welke wijze het ITU-R SM2056 meetprocedure is geïmplementeerd. Tevens heeft de universiteit metingen bijgewoond om de antennediagrammeetmethode te beoordelen. Dit zijn de zogenaamde verificatiemetingen welke in het kader van dit

⁹ Shadowing betekent schaduwwerking door grote objecten. Dit is eenzelfde soort effect als de schaduw bij zichtbaar licht.

¹⁰ Naast het directe pad (direct-line-of-sight) worden ook andere paden (reflecties tegen object, de grond) ontvangen. Deze kunnen constructief of destructief optellen op het signaal van het directe pad. Hierdoor ontstaan er variaties in het signaal. Dit type variatie wordt *small scale fading* genoemd.

validatieonderzoek zijn uitgevoerd. Als de implementatie door het agentschap wordt vergeleken met de ITU-R SM2056 procedure dan worden de volgende punten geconstateerd:

- Meetprotocol
 - Er is veel aandacht voor kwaliteitsborging van apparatuur en correcte werking van de meetopstelling.
 - Er zijn randvoorwaarden opgesteld waaraan een meting moet voldoen.
 - Antennehoogte > 80 meter
 - Uitgestraald vermogen > 1 kW e.r.p.
 - Er zijn meer randvoorwaarden opgesteld, maar deze zijn niet van belang voor deze validatie.
- Meetnauwkeurigheid
 - Nauwkeuriger dan beschreven in de ITU-R SM2056 procedure.
 - Periodieke kalibratie van meetapparatuur en andere componenten (antenne).

Hieruit kan worden geconcludeerd dat de implementatie door het agentschap op een aantal punten beter is dan de ITU-R SM2056 procedure voorschrijft. In aanvulling hierop zou het agentschap meer criteria op kunnen stellen waaraan een meting moet voldoen. Naast antennehoogte en uitgestraalde vermogen is het zinvol om nog meer randvoorwaarden op te stellen, zoals de aanwezigheid van hoge gebouwen die de meting nadelig kunnen beïnvloeden (reflecties) en hoogvermogen FM zenders op dezelfde mast (vooral in de dicht in de buurt van de te meten FM frequentie).

2.3 VERGELIJKING MET ANDERE MEETMETHODES

Het meten van antennediagrammen van grote zendinstallaties kan op verschillende manieren gedaan worden, met elk zijn voordelen en nadelen. Een mogelijke tweedeling van meetmogelijkheden is het meten in de lucht en meten op de grond.

Uit het literatuuronderzoek zijn het ITU report en de volgende CEPT recommendations voor het meten van omroepantenne-installaties naar voren gekomen:

- ITU Report ITU-R SM2056 “Airborne verification of antenna patterns of broadcasting stations”
- CEPT ECC Recommendation (16)04 “Determination of the radiated power from FM sound broadcasting stations through field strength measurements in the frequency band 87.5 to 108 MHz”¹¹
- CEPT ECC Workgroup FM22 “FM-BC ERP measurements along a route” / FM22(16)14 “Determination of the radiated power of radio station through field strength measurement along a route”

De ITU-R SM2056 is het enige rapport voor metingen in de lucht. Dit is ook de methode die Agentschap Telecom heeft gekozen om antennediagrammetingen uit te voeren. De twee andere methodes zijn metingen op de grond met behulp van een meetauto. Ze zijn sterk aan

¹¹ Deze recommendation is een aanpassing van de CEPT ECC Recommendation (12)03 “Determination of the radiated power through field strength measurements in the frequency range from 400 MHz to 6000 MHz” voor de FM band.

elkaar gerelateerd. Alleen implementeren ze de verwerking van de grondreflectie op een andere wijze.

Om de drie meetmethodes met elkaar te vergelijken, heeft de universiteit een aantal beoordelingscriteria opgesteld. De gekozen criteria zijn:

- **Nauwkeurigheid:**
 - *Onderdrukking reflecties* – reflecties zullen impact hebben op de metingen en daarmee in de nauwkeurigheid van het uiteindelijk gemeten en gepresenteerde antennediagram. Criterium is welke mate van reflecties is te verwachten binnen de meetmethode.
 - *Onderdrukking omgevingsinvloeden* – welke impact heeft de omgeving op de metingen? Dat is naast de eerdergenoemde reflecties ook shadowing: schaduwwerking door hoge gebouwen.
 - *Kwaliteit van de te gebruiken apparatuur* – wordt hoogwaardige apparatuur ingezet of zijn er beperkingen met betrekking tot afmetingen en beschikbaar elektrische vermogen, waardoor andere keuzes gemaakt moet worden.
- *Vorbereidingstijd* - welke tijd is nodig om daadwerkelijk met de metingen te beginnen? In de beoordeling nemen we niet de ontwikkeltijd mee van de meetprocedure.
- *Snelheid/doorlooptijd meting* – na de voorbereidingstijd: wat is vervolgens de snelheid van de meting van het antennediagram?
- *TCO (Total Cost of Ownership)/kosten per meting* – wat zijn de kosten per meting?
- *Statische fout van de directe omgeving* – wat is de invloed van de helikopter/de drone/het voertuig op de meting?
- *Geschiktheid voor niet-standaard antennediagrammen*
 - *lage opstelpunten* – wat is de geschiktheid van de meetprocedure voor lage opstelpunten?
 - *laagvermogen zenders* – wat is de geschiktheid van de meetprocedure voor zenders met een laag uitgestraald vermogen (e.r.p.).
- *Geschiktheid voor andere frequenties/modulaties* – wat is de geschiktheid van de meetprocedure voor andere metingen dan die van antennediagrammen van FM-zenders? Bijvoorbeeld voor 2G/3G/4G en straks 5G cellulaire systemen, maar ook DAB+ en DVB-T.

Bovenstaande criteria worden hieronder nader uitgewerkt:

Onderdrukking reflecties

Metten in de lucht heeft een aantal voordelen ten opzichte van het meten op de grond. Het belangrijkste verschil is het reflectiepatroon. Op de grond is de kans op meerdere reflecties veel groter dan in de lucht. De meeste reflectiepaden worden onderdrukt of zijn niet aanwezig bij het meten in de lucht. Dat heeft als directe gevolg dat de meetonzekerheid van metingen in de lucht kleiner is dan die van op de grond (1,5 dB ten opzichte van 2 tot 3 dB). Een nadere analyse van de meetonzekerheid in de antennediagrammetingen wordt gedaan in hoofdstuk 4.

Bij het meten op de grond wordt met behulp van een meetauto met pompmast ook het directe pad gemeten. De hoogte is enigszins beperkt en hoeft niet gelijk te zijn aan de optimale hoogte van het antennediagram in verticale richting. Binnen de metingen in de lucht wordt deze optimale hoogte in voorbereidende metingen bepaald en vervolgens gebruikt in de antennediagrammetingen. De meetonzekerheden die genoemd worden in beide methodes zijn respectievelijk 3 en 2 dB.

Onderdrukking omgevingsinvloeden

Gedeeltelijke of gehele shadowing komt bij meten in de lucht (zowel door een helikopter als een drone) niet voor. Dit is anders bij het meten vanaf de grond. Bomen, hoge gebouwen etc. zijn aanwezig en beperken door shadowing de grondmetingen.

Kwaliteit van de te gebruiken apparatuur

Binnen de gehanteerde meetmethode door het agentschap, wordt gebruik gemaakt van hoogwaardige meetapparatuur. Maar dit is niet voor alle implementaties mogelijk. Bijvoorbeeld als bij luchtmetingen een drone wordt ingezet, levert dat een beperkingen op voor het totale gewicht en stroomverbruik van de meetapparatuur. Deze beperkingen zijn niet aanwezig bij metingen in een helikopter of bij metingen op de grond (waarbij een auto/busje kan worden ingezet).

Vorbereidingstijd

De voorbereidingstijd is afhankelijk van de gekozen implementatie. Bij metingen in de lucht kan gekozen worden uit een systeem onder een helikopter of aan een drone. Bij gebruik van een helikopter moet deze gehuurd bij een externe partij om vervolgens het meetsysteem in te bouwen. Daarna moeten testmetingen uitgevoerd worden. Dit neemt gemiddeld een dag in beslag. Ook moeten antennediagrammetingen met behulp van een helikopter gemeld worden aan de luchtverkeersleiding Nederland¹². Deze afstemming is meestal binnen een dag gerealiseerd.

Bij een meetsysteem onder een eigen drone is deze voorbereidingstijd veelal beperkt tot het doen van een aantal testmetingen. Wel is vliegen met een drone op grotere hoogte dan 120 meter binnen het huidige wettelijke kader niet *mogelijk*¹³. Aangezien de meeste antenne-opstelpunten hoger zijn dan deze maximale hoogte, kan een drone momenteel niet worden ingezet.

Bij metingen op de grond is het ook de vraag welke implementatie gekozen wordt. Is er altijd een meetsysteem en vervoermiddel aanwezig? Of moet er telkens een auto gehuurd worden en daarin het systeem worden ingebouwd? In beide gevallen zal de voorbereidingstijd minder zijn dan het geval van de metingen in de lucht met een helikopter.

Snelheid/doorlooptijd meting

Als eenmaal de voorbereidingen getroffen zijn, is het meten in de lucht met de helikopter snel te doen. Er zijn geen obstakels en er kan continue gemeten worden. Bij metingen op de grond moet telkens het systeem worden opgebouwd bij iedere meting. Dat wil zeggen dat de antennemast moet worden uitgeschoven (pompmast). Vervolgens moet een optimale hoogte worden bepaald. Deze procedure moet op relatief veel locaties worden uitgevoerd.

Wel is het meten in de lucht veel afhankelijker van het weer (harde wind). Meten op de grond kan praktisch altijd plaatsvinden.

TCO (Total Cost of Ownership)/kosten per meting

De kosten van het systeem zijn voor alle type metingen hetzelfde (ook voor de metingen met een drone is het niet te verwachten dat deze lager zullen uitkomen). Bij metingen met behulp van een helikopter zal een helikopter met piloot gehuurd moeten worden. Hoewel deze

¹² <https://www.lvn.nl/>

¹³ <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/drone/vraag-en-antwoord/vergunning-drone>

kosten hoog zijn, kunnen de metingen zelf snel worden uitgevoerd. Daarmee zullen de kosten per meting niet veel verschillen dan die van de veel complexere metingen op de grond.

Ook moet men niet vergeten dat een groot deel van de kosten die gemoeid zijn met een meetsysteem voor antennediagrammetingen vooral in de ontwikkelingsfase worden gemaakt. Aangezien het aantal metingen beperkt zal zijn, zal de ontwikkelingsfase voor een belangrijk deel de kostprijs bepalen. Er zijn geen aanwijzingen dat een andere meetprocedure of opzet leidt tot lagere ontwikkelingskosten.

Statische fout van de directe omgeving

De directe omgeving kan de metingen beïnvloeden. Dat kan bij metingen in de lucht bijvoorbeeld het geval zijn door de helikopter of de drone. Metingen op de grond hebben dit minder als er gebruik gemaakt wordt van een lange antennemast (pompmast) bij het meten.

Wat de invloed is van de helikopter op de ITU-R SM2056 meetprocedure analyseren we in hoofdstuk 5 van dit rapport.

Geschiktheid voor lage opstelpunten

Bij lagere opstelpunten zijn metingen met een helikopter lastiger uitvoerbaar vanwege de beperking in het vliegen op lage hoogte. Met drones en met metingen op de grond is deze beperking er nauwelijks.

Geschiktheid laagvermogen zenders

Bij lagere uitgestraalde vermogens verandert er aan de genoemde meetprocedures niets. Wel moet de apparatuur goed worden ingesteld (en/of geschikt zijn) om deze lagere uitgestraalde vermogens nauwkeurig te kunnen meten.

Geschiktheid voor andere frequenties/modulaties

De besproken meetprocedures kunnen ook worden ingezet voor metingen van andere frequenties/toepassingen op hoge opstelpunten en grote uitgestraalde vermogens. Voor het meten van cellulaire systemen (mobiele communicatiesystemen) is de gekozen methode (ITU-R SM2056) minder geschikt, gezien de lagere opstelpunten, kleinere stralingsomgeving én (daardoor) lagere uitgestraalde vermogens. Ook is laag vliegen vlak boven de bebouwing door een helikopter niet toegestaan.

2.3.1 OVERZICHT

Op basis van bovenstaande criteria kan de volgende vergelijkingstabel worden opgesteld:

Criteria	ITU-R SM2056		CEPT ECC REC(16)04	CEPT ECC FM22 (16)14
	Helikopter	Drone		
Onderdrukking reflecties	++	++	+/-	+/-
Onderdrukking omgevingsinvloeden	++	++	+/-	+/-
Kwaliteit te gebruiken apparatuur	++	+/-	++	++
Statische fout directe omgeving	+	+/-	++	++
Overall nauwkeurigheid van de metingen	+	+/-	-	-
Snelheid/doorlooptijd van de metingen	++	+	-	-
Vorbereidingstijd	--	+/-	+	+
Kosten per meting	+/-	+/-	+/-	+/-
Geschiktheid voor lage vermogens	+	+	+	+
Geschiktheid voor lage opstelpunten	--	+	+	+
Geschiktheid voor andere frequenties/modulaties	+/-	++	++	++

Tabel 2.3.1: Vergelijking van de verschillende meetprocedures om antennediagrammen te meten.

Uit deze tabel blijkt dat de ITU-R meetprocedure de nauwkeurigste methode is om een antennediagram te meten. De procedure kan zowel door een helikopter of drone worden uitgevoerd en is in beide gevallen nauwkeuriger dan metingen met behulp van een meetauto.

2.4 COMMERCIELE OPLOSSINGEN

Het agentschap heeft zelf een meetprocedure ontwikkeld om antennediagrammetingen uit te voeren. Het is ook mogelijk om deze metingen door een externe partij uit te laten voeren. De laatste jaren zijn er commerciële partijen opgekomen die complete meetsystemen kunnen leveren dan wel een complete meting kunnen uitvoeren. Ook indien het agentschap kiest voor een externe partij, zal er nog een uitgebreide accreditatie moeten plaatsvinden waarbij het huidige systeem voor het agentschap als referentie dient. Op dit moment is de keuze beperkt tot drone oplossingen. Drones zijn inmiddels gemeengoed geworden. En er is bovendien een trend zichtbaar naar drones met een groter draagvermogen.

Het grootste technische nadeel van een drone-oplossing is het beperkte draagvermogen en de beperkte stroomvoorziening, waardoor de vliegduur beperkt is. De beperkte stroomvoorziening en het beperkte draagvermogen levert een beperking op van de te gebruiken meetapparatuur. Ook heeft de meettechnicus minder controle over de meetapparatuur gedurende de meting. De volgende commerciële partijen bieden drone-oplossingen aan:

- Sixarms (Australië) - <http://www.sixarms.com>
- Colibrex (Duitsland) - <http://www.colibrex.com>
- ELTI (Slovenië) - <http://www.elti.com/s/89/airborne-rf-measurement-system.html>

De verwachting is dat internationaal dergelijke metingen zich de komende jaren verder zullen uitbreiden. In Nederland heeft ASTRON¹⁴ enkele jaren geleden aangetoond dat antennediagrammetingen met drones inderdaad mogelijk zijn¹⁵. De LOFAR¹⁶ antennes van ASTRON zijn echter lage antennes die zijn geplaatst op de grond. FM-omroepantennes zijn vaak op 120 meter of hoger geplaatst. Er is momenteel geen wettelijk kader om een drone te gebruiken boven deze hoogte.

¹⁴ ASTRON is Nederlandse instituut voor radioastronomie.

¹⁵ Zie http://www.astron.nl/midaa2014/documents/7_MidPrep2014_UAV_Pupillo.pdf

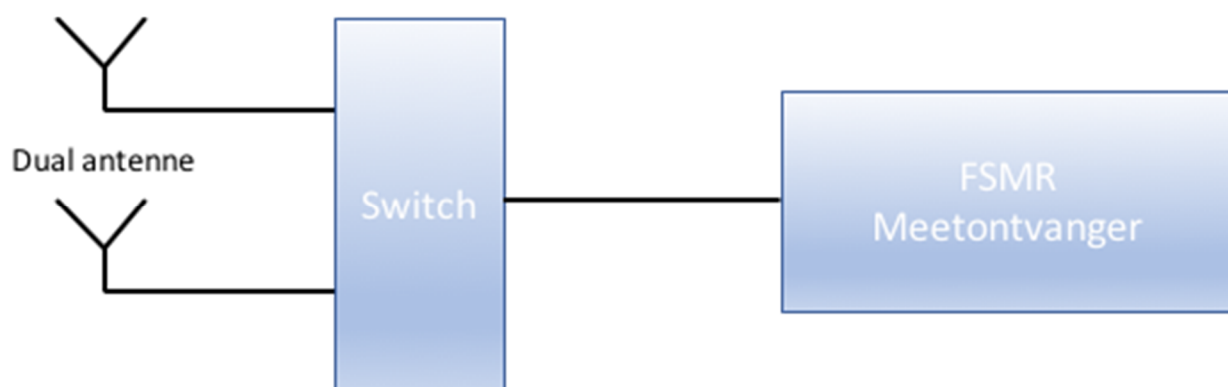
¹⁶ <http://www.lofar.org/>

3 VALIDATIE

In dit hoofdstuk wordt het antennediagrammeetsysteem gevalideerd. De validatie is op meerdere niveaus uitgevoerd. Allereerst zijn de RF onderdelen van het meetsysteem geanalyseerd. Ook zijn er controlemetingen aan het systeem uitgevoerd door FM signalen van een geijkte generator aan te bieden. Verder zijn kalibratierapporten van de gebruikte apparatuur gebruikt om de nauwkeurigheid van deze metingen te kunnen bepalen. Ten slotte is ook de verwerking van de ruwe meetgegevens door zowel de RadiMation software als de Matlab scripts geanalyseerd.

3.1 ANALYSE MEETSYSTEEM

In het door Agentschap Telecom ontworpen antennediagrammeetsysteem is het aantal componenten minimaal gehouden. Naast de antenne is er een RF antennekabel, RF schakelaar en een Rohde & Schwarz FSMR meetontvanger. De RF schakelaar schakelt continue tussen beide meetantennes. In figuur 3.1.1 is een versimpeld blokdiagram weergegeven.



Figuur 3.1.1: Blokdiagram van het antennediagrammeetsysteem

De antenneschakelaar ("Switch") is een actieve component; de andere componenten zijn passief. Oversturing van de ontvanger en intermodulatieproducten in de ontvanger kunnen niet ontstaan door passieve componenten¹⁷. Een uitzondering is de antenneschakelaar. Deze schakelt met een 1 kHz frequentie tussen beide antennes. De invloed van de schakelaar is onderzocht in sectie 3.2.3.

3.1.1 ONDERDELEN RF MEETSYSTEEM

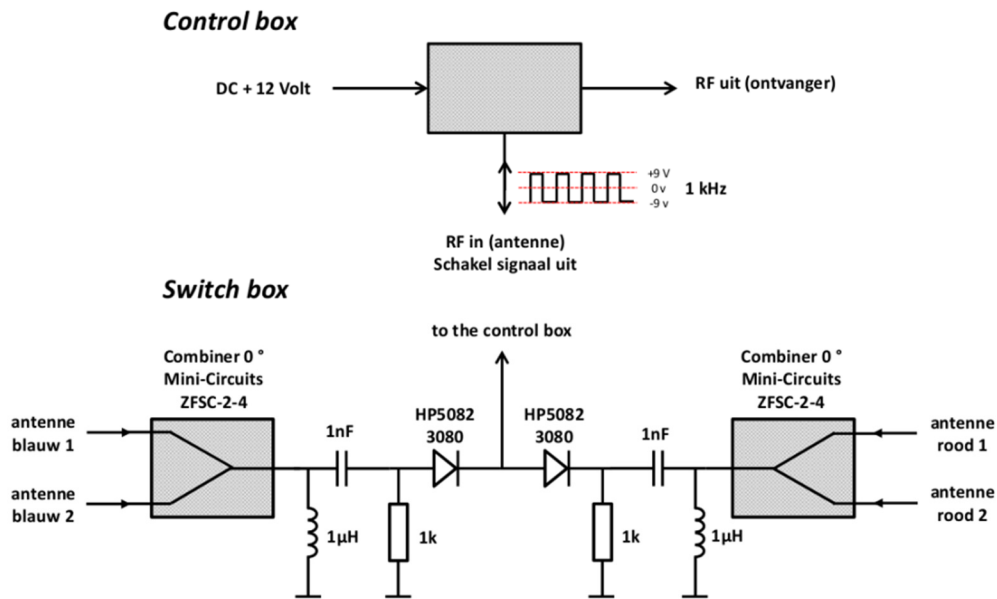
Het systeem bestaat uit:

¹⁷ Intermodulatie kan wel ontstaan bij grote signaalniveaus in passieve componenten (PIM (Passive Inter Modulation)). Gezien de signaalniveaus in de meetopstelling is dit fenomeen niet aan de orde.

- RF antenne
 - Dit is een zelfontworpen “Aperiodic loop array” antenne met een antennefactor van gemiddeld -17 dBi in de FM band. Deze antenne verzwakt FM signalen en is daarom zeer geschikt om op relatief korte afstand van een zendertoren te worden gebruikt. Een foto van de antenne is te zien in figuur 3.1.2. De antenne is gekalibreerd door het Britse National Physical Laboratory (NPL).
- RF kabel met antenneschakelaar (“Switch”)
 - Dit betreft een dubbel afgeschermde RG223 coaxkabel met SMA connectoren. De antenneschakelaar is door Agentschap Telecom zelf ontworpen en bestaat uit een klein aantal RF componenten. Het schema van deze schakelaar wordt in figuur 3.1.3 weergegeven. In sectie 3.2.3 is de invloed van deze schakelaar op de metingen bepaald.
- Rohde & Schwarz FSMR meetontvanger
 - Dit is een meetontvanger van het merk Rohde & Schwarz. De meetontvanger wordt aangestuurd vanuit een laptop door middel van de RadiMation software. De meetontvanger is gekalibreerd. De kalibratie wordt uitgevoerd door Rohde & Schwarz, onder accreditatie van de DKD (Deutscher Kalibrierdienst).
- Matlab scripts
 - De RadiMation software schrijft de meetresultaten weg in bestanden. Na afloop van de meting worden Matlab scripts gebruikt voor verdere verwerking van de meetdata en weergave van de resultaten.



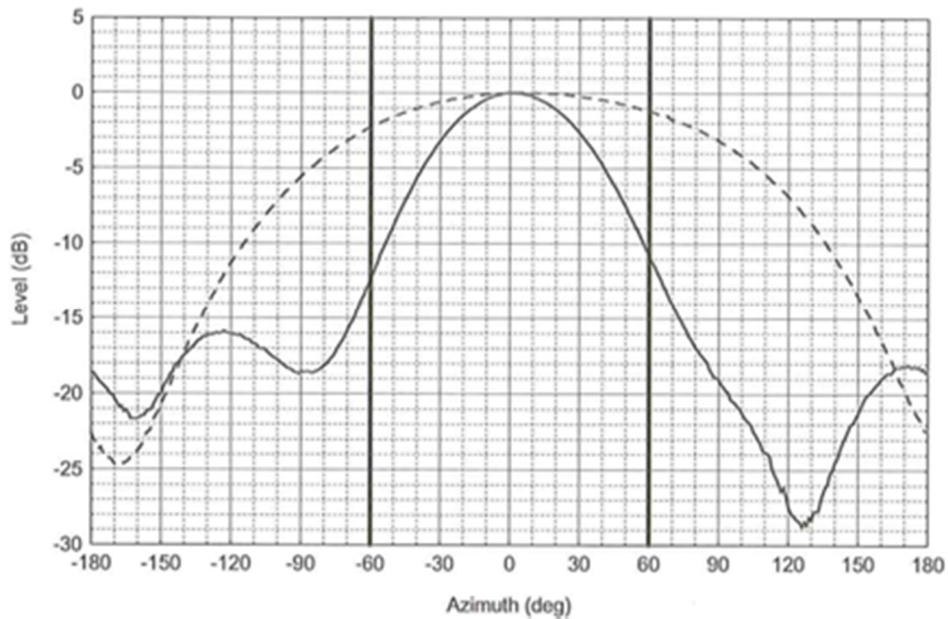
Figuur 3.1.2: De meetantenne



Figuur 3.1.3: RF schema van de antenneschakelaar

3.1.1.1 ANTENNEDIAGRAM

Het antennediagram van de meetantenne is een belangrijk aandachtspunt in het meetstelsel. Een antenne met een directioneel antennediagram onderdrukt reflecties zoals de grondgolf sterk. Dit verhoogt de nauwkeurigheid van het stelsel. Anderzijds is een directionele antenne gevoeliger voor richtfouten wat nadelig is voor de nauwkeurigheid. Agentschap Telecom heeft een antenneontwerp gekozen dat rekening houdt met beide zaken. Het antennediagram, dat is weergegeven in figuur 3.1.4, toont het diagram in de dimensie van het richten van de antenne naar de bron. Voor de andere dimensies (verticaal, horizontaal) zijn geen antennediagrammen beschikbaar, maar deze zullen een vergelijkbaar diagram tonen. In de dimensie van het richten van de antenne naar de bron (zendertoren) kan de antennemast verticaal worden geplaatst zoals bij een daadwerkelijke meting of horizontaal. In figuur 3.1.4 worden de antennediagrammen getoond voor beide posities. De grafiek voor de verticale plaatsing is alleen relevant voor de antennediagrammetingen (stippellijn).



Figuur 3.1.4: Antennediagram van de meetantenne in de dimensie van het richten van de antenne naar de bron (zendertoren). De gestippelde lijn toont het antennediagram als de antennemast verticaal is geplaatst zoals bij een daadwerkelijke meting. De doorgetrokken lijn is de horizontale plaatsing welke niet relevant is voor de antennediagrammetingen. Dit betreft een genormaliseerd antennediagram, waarbij de hoofdrichting op 0 dB is gesteld.

3.1.2 VERWACHTE SIGNAALNIVEAUS

In deze sectie worden verwachte signaalniveaus (boven- en ondergrens) op de ingang van de meetontvanger bepaald en vergeleken met de specificaties van de Rohde & Schwarz meetontvanger.

Een meetontvanger heeft een beperkt meetbereik voor signalen. Te sterke signalen zullen leiden tot oversturing van de ontvanger. Te zwakke signalen zullen door de ontvanger niet meer kunnen worden weergegeven, omdat ze onder het eigen ruisniveau van de ontvanger komen. Om die reden is het zinvol om na te gaan of de verwachte signaalniveaus binnen het bereik van deze ontvanger vallen. Daarnaast speelt selectiviteit een rol. Is de meetontvanger in staat om een relatief zwak FM signaal goed te kunnen meten in de buurt van een sterk (FM) signaal? Ook dit wordt in deze sectie uitgewerkt.

3.1.2.1 BOVENGRENS

Het onderstaande scenario schetst een praktijksituatie waarbij een maximaal FM signaal wordt gemeten:

- FM uitgestraald vermogen $P_{tx} = 200 \text{ kW}$ (53 dBW)
- Afstand tot de zender 500 meter¹⁸

¹⁸ Deze minimale afstand wordt vanwege veiligheidsredenen aangehouden. Daarboven is de veldsterkte te hoog, om een goede werking van apparatuur en helikopter te waarborgen.

- Free-space padverlies $R_{\text{propagatie}}$: 66,3 dB
- Frequentie 97,75 MHz (midden FM band¹⁹)
 - Antenneversterking G_{antenne} : -17,4 dBd (kalibratiegegevens NPL)
- Verlies kabel R_{kabel} : 2,2 dB (kalibratiegegevens kabel)
- Verzwakker in de meetontvanger (standaardinstelling) $R_{\text{RF verzwakker}}$: 30 dB

Het gemeten signaal zal in dit geval zijn (in het dB-domein):

$$P_{\text{rx}} = P_{\text{tx}} - R_{\text{propagatie}} + G_{\text{antenne}} - R_{\text{kabel}} - R_{\text{RF verzwakker}}$$

$$P_{\text{rx}} = 53 - 66,3 + -17,4 - 2,2 - 30 = -62,9 \text{ dBW} = -32,9 \text{ dBm}$$

De bovengrens is dus -32,9 dBm.

3.1.2.2 ONDERGRENS

Net als voor de bovengrens kan een praktijkscenario worden geschetst, waarbij een minimaal signaal wordt gemeten:

- FM uitgestraald vermogen $P_{\text{tx}} = 1 \text{ kW}$ (30 dBW)
 - Agentschap Telecom stelt dat minimaal 1 kW FM zenders kunnen worden gemeten met deze methode.
- Afstand tot de zender 2500 meter
 - Free-space padverlies $R_{\text{propagatie}}$: 80,2 dB
- Frequentie 97.75 MHz (midden FM band)
 - Antenneversterking G_{antenne} : -17,4 dBd (kalibratiegegevens NPL)
- Verlies kabel R_{kabel} : 2,2 dB (kalibratiegegevens kabel)
- Verzwakker in de meetontvanger (standaardinstelling) $R_{\text{RF verzwakker}}$: 30 dB (NB: in de gebruikte setting van het meetsysteem staat de verzwakker van de meetontvanger altijd op 30 dB).

Het gemeten signaal zal in dit geval zijn (in dB-domein):

$$P_{\text{rx}} = P_{\text{tx}} - R_{\text{propagatie}} + G_{\text{antenne}} - R_{\text{kabel}} - R_{\text{RF verzwakker}}$$

$$P_{\text{rx}} = 30 - 80,2 + -17,4 - 2,2 - 30 = -99,8 \text{ dBW} = -69,8 \text{ dBm}$$

De ondergrens is dus -69,8 dBm. Dit is een worst-case (theoretisch) scenario, omdat in de meeste gevallen de optimale meetafstand tot de te meten zender kleiner is dan 1 km. Hiermee zal het padverlies veel kleiner zijn dan hiervoor is weergegeven. Bij een meetafstand van 1 km is het gemeten signaal (free-space loss 72.2 dB):

$$P_{\text{rx}} = 30 - 72,2 + -17,4 - 2,2 - 30 = -91,8 \text{ dBW} = -61,8 \text{ dBm}$$

Het ontvangen signaal kan wel zwakker zijn als buiten de hoofdbundel wordt gemeten. Bij een voor-achterverhouding van 20 dB, wat zeer gebruikelijk is bij dit soort

Naast veiligheidsredenen is er ook de zogenaamde Fraunhofer afstand. Bij afstanden groter dan de Fraunhofer afstand is sprake van het verre veld van de zender. Metingen kunnen alleen in het verre veld worden uitgevoerd. Bij een omvang van de antenne (op de zendertoren) van 30 meter is deze afstand 555 meter. Uit praktijkmetingen blijkt dat de optimale meetafstand altijd veel groter is dan deze Fraunhofer-afstand.

¹⁹ Het midden van de FM band is gekozen, omdat weliswaar bij hogere frequenties de antenne een hogere versterking heeft, maar dit gecompenseerd wordt door het hogere free-space padverlies.

antenneopstellingen, zou het ontvangen vermogen aan de achterkant van de antenne 10 W zijn. Doordat het agentschap echter een voorwaarde heeft opgenomen van 1 kW uitgestraald vermogen (in een bepaalde richting) voor een meting, wordt dit aspect niet meegenomen in deze analyse. In praktische situaties komen lagere vermogens beneden de 1 kW voor bij directionele antennediagrammen.

3.1.2.3 SPECIFICATIE MEETONTVANGER

De Rohde & Schwarz meetontvanger heeft de volgende specificaties²⁰:

- Gevoeligheid/ruisvloer -150 dBW/Hz (-120 dBm/Hz)²¹
 - Voor 200 kHz bandbreedte²² is dat -67 dBm
- Maximale ingangssignaal
 - 1 dB compressiepunt -17 dBW (13 dBm), hierboven is de ontvanger niet meer lineair.
- Immuniteit voor sterke signalen
 - Out-of-band > 90 dB
 - In-band > 80 dB
- Meetnauwkeurigheid
 - 0,5 dB volgens de datasheet van Rohde & Schwarz
 - 0,1 dB volgens het kalibratierapport (sectie 4.1)
 - Beide waarden gelden alleen wanneer een signaal in het lineaire meetbereik wordt gemeten.

3.1.2.4 ANALYSE

Uit de analyse van de verwachte signaalniveaus blijkt dat de specificaties van de meetontvanger voldoende zijn om sterke signalen te ontvangen. De meetontvanger is wel ongevoelig voor zwakke signalen. De ondergrens hiervan hangt af van onder andere de meetafstand. In een typische meting zal de ondergrens rond de 1 kW uitgestraald vermogen in een bepaalde richting zijn. Daaronder zal de meetontvanger minder nauwkeurig meten. De selectiviteit van de meetontvanger is ruim voldoende om sterke signalen in de FM band of daarbuiten (bijvoorbeeld DAB+ of DVB-T) te kunnen onderdrukken.

	Theoretische waarde (worst case)	Specificatie meetontvanger
Ondergrens	-69,8 dBm	-67 dBm (200 kHz bandbreedte)
Bovengrens	-32,9 dBm	-13 dBm

Tabel 3.1.5: Theoretisch meetbereik versus specificaties meetontvanger

Op basis van de analyse van het meetsysteem concludeert de Universiteit Twente dat het bereik van de te verwachten signalen niet optimaal is gekozen. Bij zwakke signalen zal de meetontvanger nabij de ruisvloer van het instrument meten. Sterke signalen vallen ruimschoots binnen het lineaire bereik van de ontvanger. Bij sterke signalen dient ook

²⁰ https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/F_SMR_dat-sw_en.pdf

²¹ De technische term is hiervoor DANL (Displayed Average Noise Level).

²² De bandbreedte van een FM kanaal is 200 kHz.

rekening gehouden te worden met andere sterke bronnen buiten de FM-band, zoals DAB+ of DVB-T zenders. De universiteit beveelt daarom aan om de gebruikte RF verzwakking kleiner te kiezen, zodat de verwachte signaalniveaus beter aansluiten bij het meetbereik van de meetontvanger.

3.2 CONTROLEMETINGEN

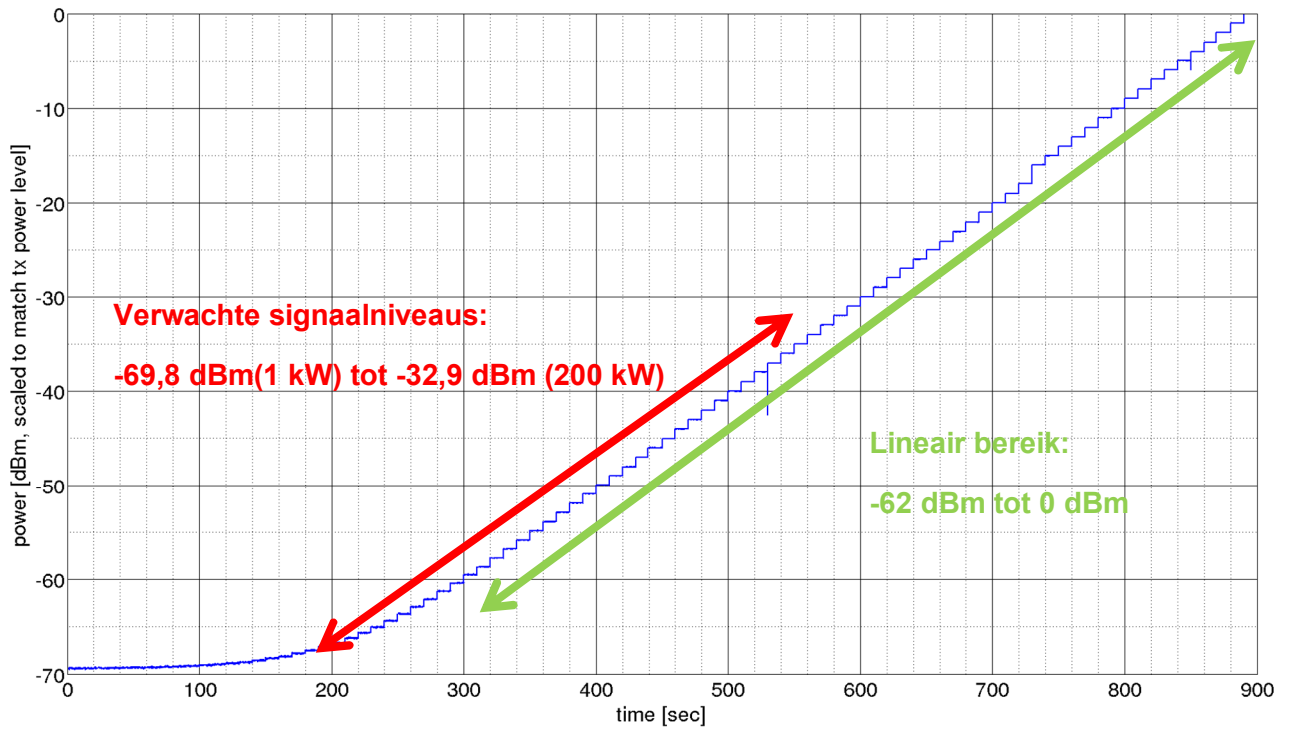
Om het meetbereik van de meetontvanger in de praktijk vast te stellen, zijn controlemetingen uitgevoerd met een gekalibreerde Aeroflex Inc IFR2026B signaalgenerator. De meetopstelling bestond uit een signaalgenerator, een korte RF kabel (RG-223) en de meetontvanger. De metingen zijn uitgevoerd op 17 mei 2017 en 5 juli 2017.

3.2.1 MEETBEREIK

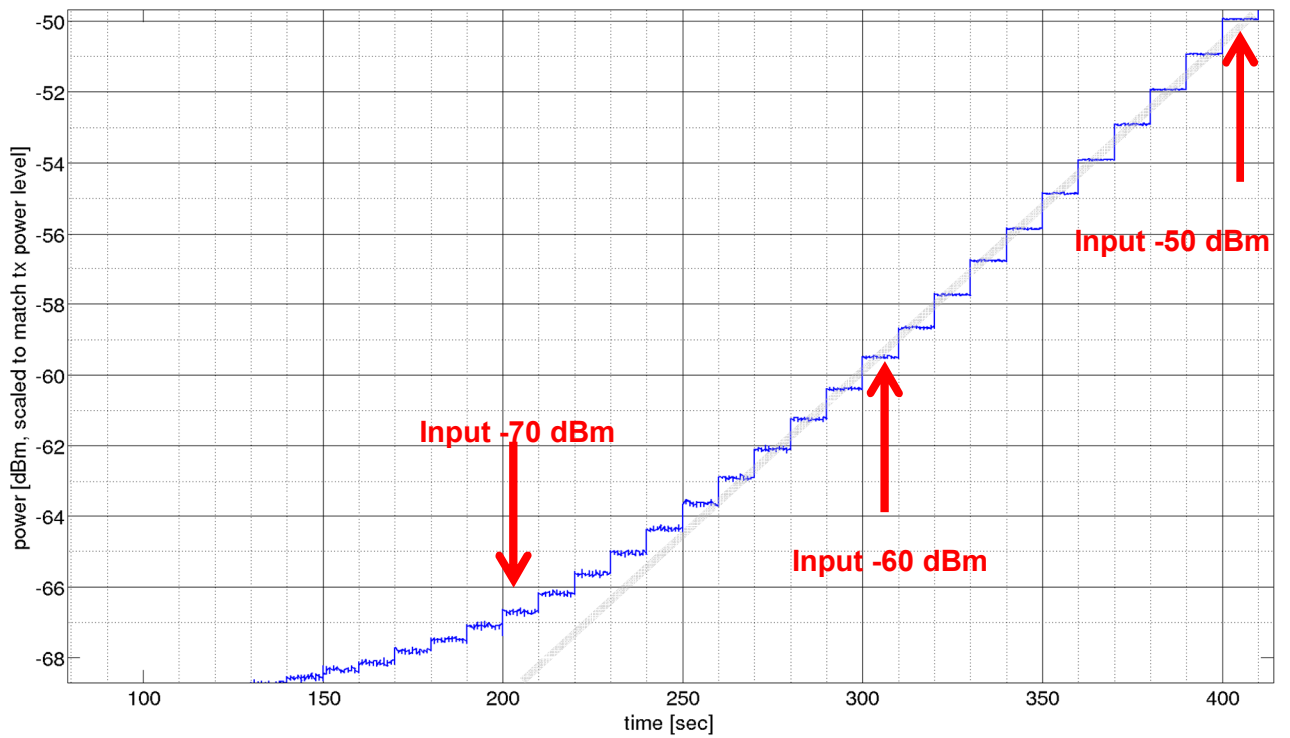
In deze meting is de generator ingesteld op een vermogen van -90 dBm en iedere 10 seconde is de generator handmatig met 1 dB verhoogd tot 0 dBm. Binnen dit bereik wordt het te ontvangen signaalniveau verwacht en is aan de bovenkant een extra signaal van 30 dB meegenomen. In figuur 3.2.1 is het ontvangen signaal versus tijd door de meetontvanger gedurende het experiment weergegeven. Er is een klein verlies in de RF kabel (0.3 dB), die is gecompenseerd in de weergave van de grafiek. Dit verlies wordt veroorzaakt doordat een andere RF kabel is gebruikt dan tijdens de reguliere metingen. In de ideale situatie zou de uitkomst een rechte lijn (trapje) zijn.

3.2.1.1 DETAILS EXPERIMENT

- Generator
 - Signaal met FM modulatie
 - Spectrummasker volgens ITU-R SM.1268-3 Annex 1
 - FM deviation: 75 kHz
 - FM audio input: 10 kHz sine
 - Zendfrequentie: 97,75 MHz (midden FM band)
 - Signaalniveau -90 tot 0 dBm
 - Iedere 10 seconden naar een 1 dB hoger niveau
- Meetontvanger
 - Ontvangstfrequentie: 97,75 MHz
 - RBW filter: 200 kHz
- Weergave (Matlab)
 - Compensatie voor verliezen door RF kabel (0,3 dB)



Figuur 3.2.1: Meetbereik van de meetontvanger



Figuur 3.2.2: Ingezoomd meetbereik van de meetontvanger

Tijdens de meting is er 1 stap overgeslagen, waardoor in plaats van 1 dB een 2 dB stap is gemaakt (rond de -17 dBm). Daarnaast is er heel kort (< 1 seconde) een lager vermogen ingesteld rond de -37 dBm, waardoor er een korte piek naar onderen zichtbaar is.

3.2.1.2 ANALYSE

Uit deze metingen blijkt dat het grootste deel van de verwachte signaalniveaus in het lineaire bereik van de meetontvanger liggen. De verwachte signaalniveaus komen niet volledig overeen met het lineaire bereik van de meetontvanger. Bij lage FM uitgestraalde vermogens en grote afstanden tot de mast kan het meetsysteem het FM vermogen niet meer (goed) meten. Er zal een meetfout ontstaan. De achterliggende oorzaak hiervoor is dat het signaal bij de systeemruis wordt opgeteld. Bij een steeds zwakker signaal zal de systeemruis dominant worden, waardoor de afwijking groter zal zijn. Bij het signaalniveau van -63 dBm is er een afwijking van 1 dB (dat wil zeggen dat de meetontvanger -62 dBm meet). Als deze waarde als ondergrens wordt genomen dan gelden de volgende afstanden:

- Op 2500 meter afstand kan het meetsysteem uitgestraalde FM vermogens vanaf 6 kW meten²³.
- Bij een afstand van 1 kilometer is dit een FM signaal van 1 kW²⁴.

De Universiteit Twente beveelt aan om het ontvangen RF signaal bij nieuwe metingen niet met 30 dB te verzwakken, maar met een kleinere waarde; 20 dB of minder. De optimale RF verzwakking hangt onder andere af van de uitgestraalde vermogens van de te meten FM omroepzenders en andere FM omroepzenders op dezelfde mast. Een kleinere waarde sluit beter aan bij het lineaire bereik van de meetontvanger. In dat geval valt het maximaal te verwachten signaalniveau op de ontvanger nog binnen het lineaire bereik.

3.2.2 SELECTIVITEIT

In deze meting is de generator ingesteld op een vermogen van -60 dBm. Iedere 30 seconde is de generator handmatig ingesteld op verschillende frequenties rondom de FM frequentie die de meetontvanger meet. In het ideale geval zal in al deze gevallen de ruisvloer worden gemeten. Vanwege de beperkte selectiviteit in reguliere meetontvangers zal bij frequenties rondom het gewenste kanaal een deel van een sterk nabuursignaal lekken in het gewenste kanaal. In figuur 3.2.3 wordt het ontvangen signaal versus de tijd door de meetontvanger gedurende het experiment weergegeven.

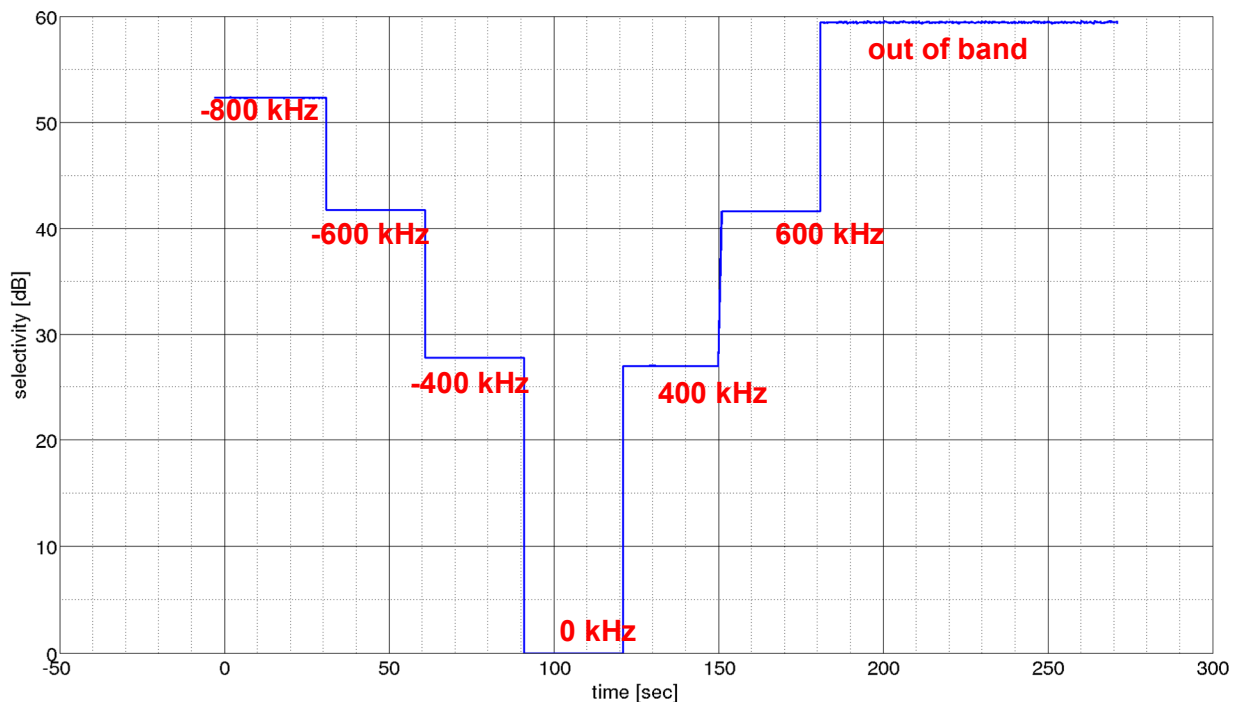
Er is een klein verlies in de RF kabel (0.3 dB), dat is gecompenseerd in de weergave van de grafiek. Zowel frequenties in de FM band als daarbuiten zijn gemeten, zoals in de volgende sectie is weergegeven.

²³ Hiervoor is de formule uit sectie 3.1.2.2 toegepast. Een 6 kW zender is in decibel 7.8 dB sterker ten opzichte van 1 kW. Hiermee zal het gemeten vermogen niet -69.7 dBm zijn, maar 61.9 dBm.

²⁴ De uitkomst uit sectie 3.1.2.2 is een ontvangen vermogen van -61.7 dBm wat afgerond -62 dBm is.

3.2.2.1 DETAILS EXPERIMENT

- Generator
 - Signaal met FM modulatie
 - Spectrummasker volgens ITU-R SM.1268-3 Annex 1
 - FM deviation: 75 kHz
 - FM audio input: 10 kHz sine
 - Ontvangstfrequentie: 97,75 MHz (midden FM band)
 - Zendfrequentie (in volgorde van de tijd 30s per frequentie)²⁵:
 - 96,95 MHz (-4 FM kanalen)
 - 97,15 MHz (-3 FM kanalen)
 - 97,35 MHz (-2 FM kanalen)
 - 97,75 MHz (ontvangstfrequentie)
 - 98,15 MHz (+2 FM kanalen)
 - 98,35 MHz (+3 FM kanalen)
 - 227,36 MHz (DAB+ frequentie, kanaal 12C, NPO multiplex)
 - 470 MHz (frequentie in DVB-T band)
 - 293,25 MHz (3^e harmonische van ontvangstfrequentie)
 - Signaalniveau: -60 dBm
- Meetontvanger
 - Ontvangstfrequentie: 97,75 MHz
 - RBW filter: 200 kHz
- Weergave (Matlab)
 - Compensatie voor verliezen door RF kabel (0,3 dB)



Figuur 3.2.3: Selectiviteit van de meetontvanger

²⁵ In de planning voor FM zenders wordt altijd een minimale frequentieafstand van 2 FM kanalen aangehouden (400 kHz). Hierdoor heeft het geen nut om de selectiviteit van ± 1 FM kanaal te meten.

3.2.2.2 ANALYSE

Uit de metingen blijkt dat de selectiviteit van de ontvanger voor signalen buiten de FM band maximaal is (> 60 dB). De metingen tonen de ruisvloer van het systeem. In de FM band is de selectiviteit minder, vooral in de buurt van het ontvangen FM kanaal. Het meest kritisch is de ontvanger voor ± 2 FM kanalen afstand, 27 dB. Dat wil zeggen dat een sterk signaal op deze frequenties 27 dB zwakker wordt gemeten op het gewenste kanaal. Om een goede meting uit te kunnen voeren aan het uitgestraalde vermogen van de FM zender, moet ook nog een extra marge worden gebruikt aan sterke nabuursignalen. Als deze gesteld wordt op 6 dB²⁶, dan mag het FM signaal in een buurkanaal maximaal 21 dB sterker zijn. Deze grens geldt per zendrichting. Een FM zender op ± 1 FM kanaal op dezelfde locatie komt in Nederland niet voor. Dit is zo gepland door het agentschap. Voor ± 3 FM kanalen geldt een vermogen van maximaal 36 dB sterker en voor ± 4 kanalen 46 dB. Uit bovenstaande blijkt dat er vooral aandacht moet zijn of voor de aanwezigheid van sterke zenders op ± 2 FM kanalen die een antennediagrammeting van het gewenste FM kanaal kunnen beïnvloeden.

Naast de antenne kunnen sterke signalen ook inkoppelen via de RF kabel of antenneschakelaar. Doordat de RF kabel een veel grotere afscherming heeft dan de (negatieve) antenneversterking van de antenne is deze invloed verwaarloosbaar. Hetzelfde geldt voor de RF schakelaar die is ingebouwd in een metalen behuizing. Hierdoor ontstaat er een goede afscherming tegen ongewenste signalen.

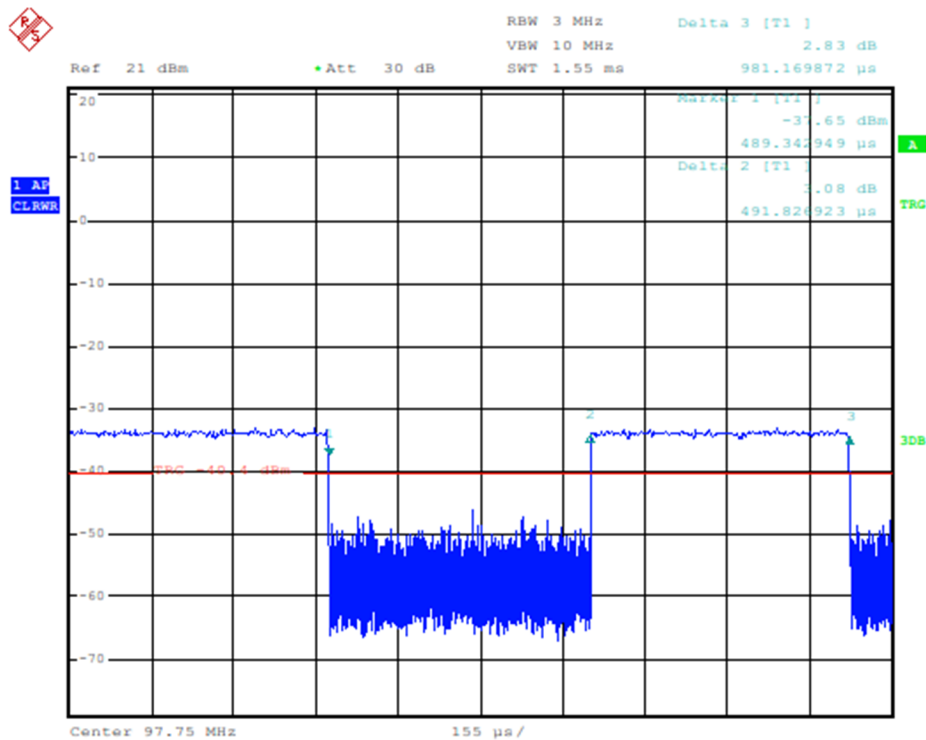
3.2.3 ANTENNESCHAKELAAR

In het meetsysteem schakelt de antenneschakelaar continu tussen de twee antennes. Dit schakelen heeft mogelijk een negatieve invloed op de metingen. Ten eerste wordt een deel van het FM signaal *niet* gemeten gedurende het schakelen tussen de twee antennes. Ten tweede zorgt het schakelen²⁷ ervoor dat een deel van het signaal lekt naar naburige FM kanalen. Hierdoor kunnen sterke naburige FM signalen de meting beïnvloeden. Vanwege de lage schakelfrequentie van 1 kHz is de verwachting dat de invloed hiervan beperkt zal zijn op de meetresultaten. Zeker omdat er altijd 400 kHz (2 kanalen) tussen twee naburige FM zenders is gepland.

In het eerste experiment is op een ingang van de schakelaar een signaal aangeboden en is de andere ingang van de schakelaar afgesloten met een weerstand van 50 Ohm. Het uitgangssignaal wordt aangesloten op de meetontvanger. In figuur 3.2.4 wordt de signaalsterkte versus de tijd getoond op de meetontvanger. Uit dit figuur kan de schakelfrequentie worden bepaald; een frequentie van 1019 Hz. Deze schakelfrequentie komt vrij dicht in de buurt van de verwachte frequentie. (Deze verwachte frequentie wordt bepaald door het ontwerp van de antenneschakelaar.)

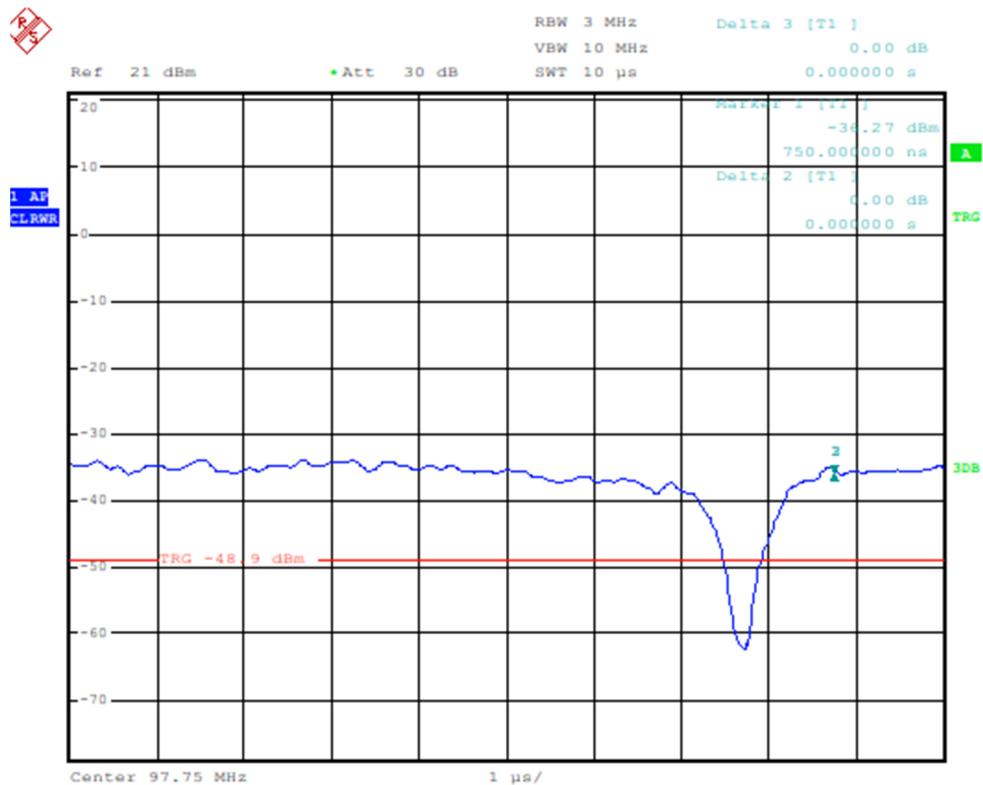
²⁶ De gekozen 6 dB is een praktische waarde. Stoorsignalen lager dan 6 dB zullen geen significante invloed hebben op het bepalen van het uitgezonden signaal van het hoofdsignaal.

²⁷ Het bronsignaal wordt vermenigvuldigd met een blokgolf (schakelsignaal) waardoor naast het bronsignaal ook mengproducten op hogere (en lagere) frequenties zullen ontstaan. Een blokgolf is namelijk opgebouwd uit meerdere frequenties. Vanwege de lage schakelfrequentie ten opzichte van het bronsignaal zullen deze producten alleen zichtbaar zijn in de naburige FM kanalen.



Figuur 3.2.4: Schakelfrequentie van de antenneschakelaar

In het tweede experiment is de invloed van het schakelen (“meetgat”) op de meting bepaald. Voor deze meting is op beide antenne-ingangen een signaal aangeboden. Figuur 3.2.5, toont de signaalsterkte versus de tijd op de meetontvanger. Uit het experiment blijkt dat tijdens het schakelen het signaal een korte periode inzakt, gedurende ongeveer 1 μs. Er wordt twee keer geschakeld in een periode, dus 2 / 1000 van het FM signaal gaat verloren. Dit heeft een verwaarloosbare invloed op de meting (< 0.1 %).



Figuur 3.2.5: Meetgat door het schakelen van de antenneschakelaar

De invloed van de schakelfrequentie (vermenigvuldiging met een blokgolf) is niet onderzocht. Vanwege de lage schakelfrequentie (1 kHz) gaat de Universiteit Twente ervan uit dat de invloed hiervan nihil zal zijn op de meetresultaten; aangezien er altijd 400 kHz (2 kanalen) tussen twee naburige FM zenders op dezelfde mast is gepland door Agentschap Telecom. De belangrijkste componenten van de schakelblokgolf zullen 1, 3 en 5 kHz zijn. Deze frequenties zijn ten opzichte van de bandbreedte van een FM kanaal (200 kHz) veel kleiner. Dit betekent dat er alleen signalen in de buurt van een FM signaal zullen lekken (± 10 kHz).

Hieruit kan worden geconcludeerd dat de invloed van de schakelaar op de metingen verwaarloosbaar is.

3.3 KALIBRATIERAPPORTEN MEETAPPARATUUR

In deze validatiemetingen is naast de Rohde & Schwarz meetontvanger ook een Aeroflex Inc. IFR2026B signaalgenerator gebruikt. Van beide meetapparaten zijn recente kalibratierapporten beschikbaar die een correcte werking van de apparaten waarborgen. De eerste pagina van ieder rapport zijn in figuur 3.3.1 en figuur 3.3.2 getoond. De kalibratierapporten laten zien dat de meetapparatuur functioneert binnen de opgegeven specificaties tijdens de validatiemetingen.

Unit Data

Item / Gegenstand: **Measuring Receiver**

Manufacturer / Hersteller: **ROHDE & SCHWARZ**

Type / Typ: **FSMR3**

Material Number / Materialnummer: **1165.3311K03** Serial Number / Seriennummer: **200011**

Asset Number / Inventarnummer: **35070**

This calibration certificate documents, that the named item is tested and measured against defined specifications. Measurement results are located usually in the corresponding interval with a probability of approx. 95% (coverage factor $k = 2$). Calibration is performed with test equipment and standards directly or indirectly traceable by means of approved calibration techniques to the PTB/DKD or other national / international standards, which realize the physical units of measurement according to the International System of Units (SI). In all cases where no standards are available, measurements are referenced to standards of the R&S laboratories. Principles and methods of calibration correspond and are conformant with EN ISO/IEC 17025, ANSI/NCSL Z540.1-1994 and ANSI/NCSL Z540.3-2006. The applied quality system is certified to EN ISO 9001. This calibration certificate may not be reproduced other than in full. Calibration certificates without signatures are not valid. The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Order Data

Customer / Auftraggeber: **Ministerie van Economische Zaken Agentschap Telecom**

**Plet Mondriaanplein 41
3812 GZ Amersfoort
NL**

Order Number / Bestellnummer: **60194**

Date of Receipt / Eingangsdatum: **2016-10-31**

Dieser Kalibrierschein dokumentiert, dass der genannte Gegenstand nach festgelegten Vorgaben geprüft und gemessen wurde. Die Messwerte liegen im Regelfall mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95% im zugeordneten Wertebereich (Erweiterte Messunsicherheit mit $k = 2$). Die Kalibrierung erfolgte mit Messmitteln und Normen, die direkt oder indirekt durch Ableitung mittels anerkannter Kalibrertechniken rückgeführt sind auf Normale der PTB/DKD oder anderer nationaler/internationaler Standards zur Darstellung der physikalischen Einheiten in Übereinstimmung mit dem internationalen Einheitensystem (SI). Wenn keine Normale existieren, erfolgt die Rückführung auf Bezugnormale der R&S-Laboratorien. Grundsätze und Verfahren der Kalibrierung beziehen sich auf und entsprechen EN ISO/IEC 17025, ANSI/NCSL Z540.1-1994 und ANSI/NCSL Z540.3-2006. Das angewandte Qualitätsmanagementsystem ist zertifiziert nach EN ISO 9001. Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverarbeitet werden. Kalibrierscheine ohne Signifizierungen sind ungültig. Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.

Performance

Place and Date of Calibration / Ort und Datum der Kalibrierung

Werk Memmingen, 2016-11-02

Scope of Calibration / Umfang der Kalibrierung

Standard Calibration

Statement of Compliance (Incoming) / Konformitätsaussage (Anlieferung)

One or more measured values are within the uncertainty guard band marked as UGB1. However, all are within the data sheet specifications.

Statement of Compliance (Outgoing) / Konformitätsaussage (Auslieferung)

All measured values are within the data sheet specifications.

Extent of Calibration Documents / Umfang des Kalibrierdokuments

**2 Pages Calibration Certificate
24 Pages Outgoing Results
24 Pages Incoming Results**
Rohde & Schwarz Messgerätebau GmbH

Date of Issue / Auslieferungdatum

Head of Laboratory / Laborleitung

Person Responsible / Bearbeiter

2016-11-02

Steigmüller

Daniel Gust

Page 1/2
ver0816/RB0707

Figur 3.3.1: Kalibrierreport Rohde & Schwarz FSMR meetontvanger

Calibration Certificate
 Certificado de Calibración

Certificate No. 1250-307074469
 Número

Unit Data

Item SIGNAL GENERATOR
 Instrumento
Manufacturer Aeroflex Inc.
 Fabricante
Type IFR2026B
 Tipo
Material No. IFR 2026B **Serial No.** 202601/891
 Nº del Material Nº de Serie
Asset No. 37290
 Número Inventario

This calibration certificate documents that the named item is tested and measured against defined specifications. Measurement results are located usually in the corresponding interval with a probability of approx. 95% (coverage factor k=2). Calibration is performed with test equipment and standards directly or indirectly traceable by means of approved calibration techniques to the ENAC or other national/international standards, which realize the physical units of measurement according to the International System of Units (SI). In all cases where no national standards are available, measurements are referenced to standards of the R&S laboratories. Principles and methods of calibration correspond with ISO/IEC 17025. This calibration certificate may not be reproduced other than in full. Calibration certificates without signatures are not valid. The contents of the present certificate are not covered under ENAC accreditation nor under its international recognition agreements. The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Order Data

Customer Ministerie van Economische Zaken
 Cliente Agentschap Telecom
 Piet Mondriaanplein 41
 3812 GZ AMERSFOORT
 NETHERLANDS

Order No. 59208
 Número de Pedido
Date of Receipt 2016-04-06
 Fecha de Rec.

Performance

Place and Date of Calibration R & S MADRID, RSES,
 Lugar y Fecha(s) de Calibración From 2016-04-08 to 2016-04-11
Scope of Calibration Standard Calibration
 Tipo de Calibración
Statement of Compliance (Incoming) All measured values are within the data sheet specifications.
 Estado en la Recepción
Statement of Compliance (Outgoing) All measured values are within the data sheet specifications.
 Resultado de la Calibración
Extent of Calibration 40 Pages Calibration Certificate
 Páginas del Certificado

Este certificado de calibración muestra que el equipo mencionado ha sido comprobado y calibrado de acuerdo con especificaciones definidas. Los resultados de las medidas están dentro del correspondiente intervalo con una probabilidad del 95% (factor de cobertura K=2). La calibración se ha realizado con equipos y patrones directa o indirectamente trazables, mediante técnicas aprobadas, a ENAC u otros patrones nacionales / internacionales que materializan las unidades físicas de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades SI. En todos los casos en los que no sean posibles patrones nacionales, las medidas están referidas a patrones de los laboratorios de R&S. Los principios y métodos de calibración están de acuerdo con la norma EN ISO/IEC 17025. El sistema de calidad utilizado está certificado por la EN ISO 9001. Este certificado de calibración no puede ser reproducido más que en su totalidad. Certificados de calibración sin firmas, no son válidos. El contenido del presente certificado no está cubierto por la acreditación ENAC ni por sus acuerdos internacionales de reconocimiento. El usuario está obligado a mantener el equipo recalibrado dentro de los intervalos apropiados.

Rohde & Schwarz España, S.A. (Office Madrid)

Date of Issue
 (YYYY-MM-DD)
 Fecha de Emisión

2016-04-11

Calibration Manager
 Director de Calibración



Carlos Salazar

Person Responsible
 Técnico



Luis-Miguel Bravo

Page 1/40
 PT 3583.9833.00

Figuur 3.3.2: Kalibratierrapport Aeroflex Inc IFR2026B signaalgenerator

3.4 VERWERKING RADIMATION

De RadiMation software rekent de ruwe meetdata van de meetontvanger om naar het uitgestraalde vermogen van de FM antenne. Het resultaat wordt in tekstbestanden weggeschreven. Om te valideren of deze software correct functioneert, heeft Universiteit Twente een tweetal handmatige berekeningen uitgevoerd en deze vergeleken met de uitkomst van de RadiMation software:

- Afstand zendertoren en helikopter
- Uitgestraalde e.r.p. vermogen van de FM zender

Zowel de locatie van de zendertoren als de helikopterpositie worden weergegeven in GPS coördinaten. Deze coördinaten moeten omgezet worden naar een afstand tussen deze punten. De aarde kan gezien worden als een (afgeplat) bolvormig object. Om de afstand tussen twee punten op deze bol te bepalen, moet een complexe driedimensionale berekening worden uitgevoerd. Als de afstand relatief klein is ten opzichte van de kromming van de aarde, kunnen ook benaderingsformules worden gebruikt. De RadiMation software gebruikt een dergelijke benaderingsformule [6].

Om te verifiëren of deze benaderingsformule voldoende nauwkeurig is, heeft Universiteit Twente voor een tweetal metingen²⁸ de afstanden tussen de helikopter en zendtoren via een andere methode berekend²⁹. Uit deze berekeningen blijkt dat de afwijkingen tussen beide rekenmethodes kleiner zijn dan 0.1%. Dat wil zeggen dat op 1000 meter afstand de fout kleiner dan 1 meter is. Dit is voldoende nauwkeurig voor deze metingen. De variaties in het gemeten signaal, veroorzaakt door een meetfout in de afstand, zijn verwaarloosbaar.

Naast het narekenen van de afstand heeft Universiteit Twente ook het uitgestraalde vermogen van de FM zender handmatig nagerekend. Het ingangssignaal van de meetontvanger is een spanning (dB μ V) en de RadiMation software zet deze aan de hand van de afstand tussen zendertoren en meetantennes om tot de zendantenne (dBW e.r.p.). Daarnaast is er bij direct zicht op de zendantenne sprake van een free-space padverlies van radiosignalen. De gebruikte formule in de RadiMation software is:

$$P_{TX}[dBW] = V [dB\mu V] + C_{dBW} + PL_{free\ space} + R_{cable} + G_{antenne} + C_{dBd}$$

Hierbij is

- $P_{TX}[dBW]$ het zendvermogen
- $V [dB\mu V]$ de ingangsspanning van de meetontvanger in dB μ V
- C_{dBW} een constante welke de spanning omzet naar een vermogen in dBW. Deze constante heeft een waarde van -136.99 dB bij 50-ohm systemen.
- $PL_{free\ space}$ het padverlies volgens het free-space model. Deze is als volgt gedefinieerd: $PL_{free\ space} = -20\log_{10}\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)$ waarbij r de afstand is tussen zendmast en helikopter en λ de golflengte van het FM signaal.
- R_{cable} het kabelverlies tussen de antenne en meetontvanger. Deze verliezen zijn voor verschillende frequenties gemeten en beschikbaar in bestandsvorm.
- $G_{antenne}$ de antennefactor van de antenne. Deze antennefactor is door het Britse NPL voor verschillende frequenties gemeten en beschikbaar in bestandsvorm.
- C_{dBd} de constante welke de antennefactor van een isotrope ontvanger omzet naar een dipoolontvanger. In het omroepdomein is het gebruikelijk om zendvermogens te

²⁸ Dat wil zeggen dat ruwe meetdata uit vorige meetcampagnes hiervoor zijn gebruikt.

²⁹ <https://nl.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/5256-pos2dist>

relateren aan een dipoolzendvermogen. Deze constante heeft een waarde van -2.15 dB

Voor een tweetal metingen van een vorige meetcampagne heeft Universiteit Twente het uitgestraalde vermogen volgens bovenstaande formule nagerekend en de uitkomsten vergeleken met de RadiMation software. Uit deze berekeningen zijn geen verschillen naar voren gekomen. Conclusie is dat de RadiMation software de ruwe meetdata correct omzet naar het uitgestraalde vermogen.

3.5 VERWERKING MATLAB

Nadat RadiMation het zendvermogen heeft berekend, volgt de laatste stap in het meetsysteem, namelijk de verwerking van de ruwe meetdata in Matlab. De belangrijkste functies in Matlab zijn:

- Visualisatie van de data
 - Selecteren van een meting
 - Bekijken van een antennediagram
- Middelen van de ruwe meetdata per 10 graden
 - In de FM-omroepvergunning wordt het uitgestraalde vermogen per 10 graden weergegeven.

In de visualisatiestap worden meetgegevens gepresenteerd en om die reden heeft validatie van dit onderdeel geen meerwaarde. In onderstaande sectie zoomen we in op de middeling van ruwe meetdata.

3.5.1 MIDDELING VAN RUWE MEETDATA

De Matlab scripts middelen de ruwe meetdata van het uitgestraalde vermogen per 10 graden. Hierbij gelden de volgende parameters:

- Middeling ± 3 graden. Dat wil zeggen dat het uitgestraalde vermogen op bijvoorbeeld 60 graden bepaald wordt door de ruwe meetdata tussen 57 en 63 graden te middelen.
- Middeling in het lineaire domein.
- Het gemiddelde van de ruwe data wordt gebruikt.
- Afronding op hele decibels (dB's)

Het gebruik van een 6-gradenvenster voor middeling van de ruwe meetdata over 10 graden is een goede keuze. Een kleiner venster gaat ten koste van de meetnauwkeurigheid en een groter venster zorgt ervoor dat snelle veranderingen/wijzigingen in het antennediagram niet meer zichtbaar zijn of door de middeling vertekend worden weergegeven.

In radiocommunicatie worden signalen standaard gezien als log-normale variabelen. Middeling van dergelijke variabelen moet daarom ook plaats vinden in het log-domein en niet in het lineaire domein. In de volgende sectie onderzoekt Universiteit Twente of de ruwe meetdata als log-normale variabelen kunnen worden beschouwd. De Universiteit Twente vindt dat -ongeacht de distributie van de ruwe meetdata- het beter is om de mediane waarde te nemen uit de geselecteerde meetset en niet het gemiddelde. Het gemiddelde is gevoeliger voor beïnvloeding door extreme meetwaarden dan de mediaan. Dit geeft een beter resultaat als de verdeling van de meetdata niet (log-)normaal is.

In de allerlaatste stap van het berekende uitgestraalde vermogen wordt de meetwaarde afgerond op hele dB's, omdat de meetnauwkeurigheid 1 dB is. Een hogere precisie zou een hogere nauwkeurigheid van het meetsysteem suggereren.

Om de middeling van Matlab te verifiëren is een normale ingangsvariabele aangeboden (experiment). De middeling voor dit testsignaal was correct (uitkomst); het uitgangsvermogen is de verwachtingswaarde van deze variabele.

3.5.1.1 DISTRIBUTIE VAN DE RUWE MEETDATA

Om de middeling goed te kunnen uitvoeren, is het belangrijk om de distributie van de ruwe meetdata te onderzoeken. De distributie van de data bepaalt de meetnauwkeurigheid van het systeem. Voor een (log-)normale variabele geldt bijvoorbeeld dat met 95% waarschijnlijkheid de berekende verwachtingswaarde binnen de grens van plus of min twee keer de standaardafwijking is. Als de variabele niet (log-)normaal kan worden beschouwd gelden deze grenzen niet! In de wiskunde bestaat een aantal testen om te controleren of een variabele kan worden gezien als normaal of log-normaal. In dit onderzoek zijn de volgende testen gebruikt:

- Kolmogorov-Smirnov test³⁰
- Jarque–Bera test³¹

Deze testen zijn door Universiteit Twente uitgevoerd op de ruwe meetdata van twee metingen. Hieruit bleek dat de ruwe meetdata *niet* kan worden gezien als een normale of log-normale variabele. Dit betekent dat het beter is om de mediane waarde te gebruiken in plaats van het gemiddelde. De mediane variabele is niet alleen ongevoeliger voor extreme meetwaarden, maar ook voor asymmetrische verdelingen.

3.5.1.2 ANALYSE

Uit de bovenstaande experimenten blijkt dat de middeling in de huidige verwerking door Matlab niet correct is uitgevoerd, aangezien de meetdata geen normale verdeling heeft. Doordat de signaalvariëaties van de meetdata klein is, zal de uiteindelijke invloed op het berekende antennediagram echter beperkt zijn. De Universiteit Twente beveelt aan om de middeling aan te passen en verder onderzoek te doen naar de optimale middelingsmethode. In sectie 5.8 wordt op dit aspect verder ingegaan.

Doordat de meetdata geen (log-)normale verdeling heeft, kunnen ook de standaardregels voor meetnauwkeurigheid niet worden toegepast. In het hoofdstuk meetnauwkeurigheid wordt hier verder op ingegaan.

³⁰ https://en.wikipedia.org/wiki/Kolmogorov%E2%80%93Smirnov_test

³¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Jarque%E2%80%93Bera_test

4 MEETONZEKERHEID

Een belangrijk onderdeel van het onderzoek door Universiteit Twente is de validatie van de meetonzekerheid. De resultaten hiervan zijn beschreven in dit hoofdstuk. De validatie bestaat uit verschillende delen. Allereerst zijn de kalibratierapporten van de gebruikte meetapparatuur geanalyseerd. Daarnaast heeft Universiteit Twente de methodiek en uitkomsten van de door Agentschap Telecom gehanteerde meetonzekerheid van het totale systeem in dit hoofdstuk geanalyseerd. Het hoofdstuk sluit af met een alternatieve methode om de onzekerheid te bepalen. Deze methode maakt onderscheid tussen statische en willekeurige ruis tijdens een meetsessie, waardoor de meetonzekerheid nauwkeuriger kan worden in geschat.

4.1 KALIBRATIERAPPORTEN MEETAPPARATUUR

De meetopstelling van het agentschap bevat twee componenten die periodiek door externe partijen worden gekalibreerd. Het betreft de meetantenne en de meetontvanger. Hieronder is de eerste pagina getoond van deze rapporten uit 2012 tijdens de laatste FM meetcampagne³². Uit de rapporten blijkt dat de meetontvanger voldoet aan de specificaties. Op veel punten presteert de ontvanger beter dan de opgegeven waarde in de datasheet. De kalibratie van de meetantenne (antennediagram) heeft als doel om te verifiëren dat het antennediagram van de meetantenne onveranderd is gebleven ten opzichte van het oorspronkelijke antennediagram.

³² Dit is dus een ander kalibratierapport dan getoond in sectie 3.3.

akkreditiert durch die / accredited by the

Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH

als Kalibrierlaboratorium im / as calibration laboratory in the

Deutschen Kalibrierdienst

DKD



Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-K-15195-01-00

Kalibrierschein
Calibration certificate

Kalibrierzeichen
Calibration mark

0196
D-K- 15195-01-00
2012-08

Gegenstand
Object **Measuring Receiver**

Hersteller
Manufacturer **Rohde & Schwarz**

Typ
Type **FSMR3**

Fabrikat/Serien-Nr.
Serial number **200011**

Auftraggeber
Customer **Ministerie van Economische Zaken
Landbouw en Innovatie
Piet Mondriaanplein 41
NL-3812 GV Amersfoort
Netherlands**

Auftragsnummer
Order No. **55157**

Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines
Number of pages of the certificate **13 + 1**

Datum der Kalibrierung
Date of calibration **2012-08-10**

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Die DAkkS ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.

Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.



This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DAkkS is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.

The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature are not valid.

Datum Date	Stellv. Leiter des Kalibrierlaboratoriums Vice Head of the calibration laboratory	Bearbeitet Person in charge
2012-09-07	 Andreas Guserle	 Wolfgang Immerz

Rohde & Schwarz Messgerätebau GmbH • Rohde und Schwarz Str. 1 • 87700 Memmingen • Telephone national: 08331/0-80 International: 0049 8331/10 80
Fax: 08331/10-811 24 • Managing Director: Jürgen Stegmüller • Chairman of the Supervisory Board: Manfred Fleischmann • Company's Place of Business: München
Commercial Register No.: HRB 1 059 • VAT Identification No.: DE 811 190 745

Figur 4.1.1: Kalibrierbericht Rohde & Schwarz meetontvanger uit 2012



NATIONAL PHYSICAL LABORATORY
Teddington Middlesex UK TW11 0LW Telephone +44 20 8977 3222

Certificate of Calibration

Aperiodic loop antenna array

This certificate provides traceability of measurement to recognised national standards, and to the units of measurement realised at the National Physical Laboratory or other recognised national standards laboratories. This certificate may not be reproduced other than in full, unless permission for the publication of an approved extract has been obtained in writing from the Managing Director. It does not of itself impute to the subject of calibration any attributes beyond those shown by the data contained herein.

FOR: Ministerie van Economische Zaken
Landbouw en Innovatie
Agentschap Telecom
Piet Mondriaanplein 41
3812 GZ Amersfoort
Netherlands

DESCRIPTION: The array consisted of two aperiodic loop antennas which were mounted 1.5 m apart on a metallic boom. Each antenna had two orthogonal elements which were aligned at ± 45 deg from the axis of the boom. The test frequency range was 80 MHz to 210 MHz.

PERIOD OF TEST WORK: 12 – 16 March 2012

ORDER NUMBER: 20120037

Reference : 2011120281

Date of Issue : 27 March 2012

Checked by : *H. Pharo*

Page 1 of 19

Signed : *M J Alexander* (Authorised Signatory)

Name : M J Alexander for Managing Director

Figuur 4.1.2: Kalibratierapport van de meetantenne door NPL.

4.2 MEETONZEKERHEIDSANALYSE

Agentschap Telecom heeft een meetonzekerheidsanalyse uitgevoerd. Hieronder wordt een *voorbeeld* van een samengestelde meetonzekerheid getoond voor een fictieve

omroepzender op 97.75 MHz. Deze FM-omroepzender zendt uit vanaf een 8-laags multipattern antennesysteem, op een antennehoogte van 177 meter. De hoogte van de meetantenne onder de helikopter is 171 meter en de meetafstand tussen beide antennes bedraagt 801 meter.

Samengestelde meetonzekerheid

Symbool	Bron van de onzekerheid	Onzekerheid		Kansverdeling	Deeltal	Sensitivity coefficient c_i	Standaard-onzekerheid van de bron $u_i(A_x)$ %	Vrijheidsgraden ν_i of ν_{eff}
		\pm dB	%					
Lichtsnelheid								
c	Lichtsnelheid in lucht	nihil						
Frequentie								
f	Zendfrequentie		0,1	uniform	1,7321	2	0,1	∞
Afstand								
R	Afstand zendantenne tot meetantenne		0,7	normaal	2	2	0,7	∞
Antennegain								
G _{M-CAL}	Kalibratie van de antennegain	0,7	17	normaal	2	1	8,7	∞
A _{KAB}	Kabeldemping	0,1	2	normaal	2	1	1,2	∞
A _{HOR}	Horizontale richtfout	0,06	1,4	uniform	1,7321	1	0,8	∞
A _{VERT}	Verticale richtfout	0,22	5,2	uniform	1,7321	1	3,0	∞
A _{POL}	Polarisatiefout	0,25	5,9	uniform	1,7321	1	3,4	∞
Vermogen								
P _{RX-CAL}	Kalibratie meetontvanger	0,1	2	normaal	2	1	1,2	∞
A _{MIS}	Misaanpassing	0,1	2,1	u-vormig	1,4142	1	1,5	∞
A _{NABU}	Nabuurkanaalstoring	0,2	3,5	uniform	1,7321	1	2,0	∞
A _{FILT}	Filterverliezen	nihil						
Reflecties								
A _{REF}	Invloed reflecties	0,01	0,3	uniform	1,7321	1	0,2	∞
Invloed vlieghoogtefout								
A _H	Invloed vlieghoogtefout	0,2	4,7	normaal	2	1	2,4	∞
Vertekening meetantenne								
A _{MA}	Vertekening door diagram meetantenne	0,03	0,7	uniform	1,7321	1	0,4	∞
U(P _{ERP})	Gecombineerde standaard onzekerheid			normaal			10,6	∞
U	Expanded standaard onzekerheid (95%)			normaal (k=2)			21,3	∞

Tabel 4.2.1: Samengestelde meetonzekerheid voor een fictieve omroepzender

4.2.1 ANALYSE

De samengestelde meetonzekerheid bestaat uit een aantal onzekerheden. In het algemeen vindt de Universiteit Twente dat de onzekerheden van de individuele onderdelen realistisch zijn in geschat. Ook kan worden gesteld dat de meetonzekerheidsanalyse een goede indicatie geeft van de onzekerheid in het meetsysteem. Wel zijn er een aantal onderwerpen die extra toelichting nodig hebben.

Dit zijn:

- de meetonzekerheid bij zwakkere FM signalen
- de invloed van reflecties
- de middeling van meetwaarden
- het onderscheid tussen variabelen met een vaste realisatie per meetsessie en per meetwaarde
- de distributie van ruwe meetwaarden

Deze punten worden hieronder toegelicht:

Meetonzekerheid bij zwakkere FM signalen

Uit metingen in het vorige hoofdstuk (sectie 3.2.1) blijkt dat de meetontvanger bij zwakke FM signalen zwakker dan 10 dB boven de ruisvloer van de meetontvanger een grotere afwijking heeft. Dit heeft tot gevolg dat bij zwakkere FM zenders de meetonzekerheid toeneemt. Wel blijkt uit deze metingen dat deze afwijking grotendeels constant is per signaalniveau. Deze niet-lineariteit kan worden gecorrigeerd in een verdere ontwikkeling van het meetsysteem om de meetonzekerheid van het systeem in deze gevallen te verkleinen. Hiervoor zijn wel aanvullende metingen nodig, omdat dit specifieke punt niet in de kalibratie van Rohde & Schwarz, onder accreditatie van de DKD (Deutscher Kalibrierdienst), is meegenomen.

Invloed van reflecties

De invloed van reflecties op de samengestelde meetonzekerheid wordt bepaald door uit te gaan van onbebouwd terrein³³. In stedelijke omgevingen zullen de reflecties sterker zijn door hoge objecten maar ook door objecten nabij de antenne-installatie op de zendertoren. Hoge objecten ontvangen een veel groter deel van het uitgestraalde vermogen (hoofdbundel FM zendantenne), wat ook weer deels gereflecteerd wordt. Dit blijkt ook uit de verificatiemetingen in het volgende hoofdstuk. Echter, door de ruwe meetwaarden te middelen (volgende punt) heeft dit uiteindelijk geen invloed.

Middeling van meetwaarden

In de huidige opzet van het meetsysteem worden meetwaarden gemiddeld over een hoek van 6 graden. Reflecties welke minima en maxima veroorzaken in de meetwaarden zijn erg lokaal. Middeling zal de invloed van reflecties en daarmee de meetonzekerheid reduceren. In de samengestelde meetonzekerheidsanalyse wordt deze middeling van meetwaarden door het agentschap niet meegenomen. Hiermee wordt in feite de invloed van reflecties overschat. Uit het voorgaande punt -de invloed van reflecties- blijkt dat reflecties in de praktijk groter kunnen zijn dan aangenomen is. De middeling van de meetwaarden zal deze vergrote invloed teniet doen. Bijvoorbeeld bij een middeling van 100 meetwaarden zal de standaarddeviatie (meetonzekerheid veroorzaakt door de reflecties) met een factor 10 afnemen. Uiteindelijk is de Universiteit Twente van mening dat de meetonzekerheid veroorzaakt door reflecties realistisch is in geschat als het aspect van middeling wordt meegenomen.

Onderscheid tussen variabelen met een vaste realisatie per meetsessie en per meetwaarde

In de samengestelde meetonzekerheid maakt het agentschap geen onderscheid gemaakt tussen parameters die constant zijn gedurende een meetsessie (1 realisatie) en parameters die per meetwaarde een andere realisatie hebben. Een voorbeeld maakt dit duidelijk. Reflecties zullen gedurende de vlucht/meetsessie continue veranderen. Deze parameter verandert dus per meetwaarde. Aan de andere kant zal de meetfout die ontstaat doordat de

³³ Wel wordt hierbij een worst case scenario aangenomen (zout water) die een radiosignaal maximaal reflecteert.

kabelverliezen afwijken ten opzichte van de kalibratiemeting identiek zijn gedurende de gehele meetsessie. Dit is een parameter welke constant is gedurende een meetsessie. Het is belangrijk om dit onderscheid te maken, omdat bij middeling alleen de invloed van parameters die per meetwaarde een andere realisatie hebben worden gereduceerd. Door deze splitsing te maken, kan de meetonzekerheid beter worden bepaald. In de volgende sectie (sectie 4.3) wordt dit punt uitgewerkt.

Distributie van ruwe meetwaarden

In de analyse van de meetonzekerheid wordt aangenomen dat de variabelen in de meetonzekerheid een (log)-normale verdeling hebben. Dit is een gebruikelijke aanname. Om te valideren dat deze aanname inderdaad geldig is, heeft Universiteit Twente twee verschillende wiskundige tests uitgevoerd op de ruwe meetdata. Dit zijn de *Kolmogorov-Smirnov*³⁴ test en de *Jarque–Bera*³⁵ test. In sectie 3.5.1.1 zijn deze testen toegepast op de meetdata van twee metingen. Hieruit komt naar voren dat de ruwe meetdata *niet* kan worden gezien als normale of log-normale variabele. Hiermee kunnen ook niet de standaardmethodes worden gebruikt voor het bepalen van de meetonzekerheid. Bijvoorbeeld zoals de 95%-grens op plus of min twee keer de standaarddeviatie van een variabele. Wel kan de *Chebyshev's* ongelijkheid worden gebruikt die wij in de volgende sectie beschrijven.

4.2.1.1 CHEBYSHEV'S ONGELIJKHEID

Voor variabelen met een onbekende distributie geldt de *Chebyshev's ongelijkheid*³⁶. Hiermee kan ook de meetnauwkeurigheid worden bepaald. Deze ongelijkheid is toepasbaar voor een brede groep van waarschijnlijkheidsverdelingen. De regel stelt dat niet meer dan $1/k^2$ van de realisaties meer dan k -standaard deviaties weg van het gemiddelde kunnen zijn. Een voorbeeld is de 96% meetonzekerheidsgrens op vijf keer plus of min de standaard deviatie ($\pm 5\sigma$). Dit is dus een lossere regel dan de grens van plus of min twee keer de standaard deviatie ($\pm 2\sigma$) die bij (log)-normale verdelingen wordt toegepast.

Universiteit Twente heeft een viertal metingen geanalyseerd om na te gaan of de 1-dB nauwkeurigheid wordt gehaald als de *Chebyshev's ongelijkheid* wordt toegepast. Op de optimale afstand kan de standaarddeviatie worden bepaald uit de meetwaarden op iedere hoek. Door vervolgens de *Chebyshev's ongelijkheid* toe te passen op de meetdata blijkt dat voor deze metingen inderdaad de 1-dB grens wordt gehaald. In deze meetonzekerheid wordt nog niet de statische meetfout meegenomen. Dit bespreken we in de volgende sectie.

4.3 ALTERNATIEVE SAMENGESTELDE MEETONZEKERHEIDSANALYSE

Uit de voorgaande sectie blijkt dat de samengestelde meetonzekerheidsanalyse verder kan worden verbeterd. De resultaten hiervan worden in dit onderdeel besproken. Als basis is de meetonzekerheidsberekening uit de CEPT ECC Recommendation (12)03 "Determination of

³⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Kolmogorov%E2%80%93Smirnov_test

³⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Jarque%E2%80%93Bera_test

³⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Chebyshev's_inequality

the radiated power through field strength measurements in the frequency range from 400 MHz to 6000 MHz” over genomen³⁷. Deze lijkt sterk op de berekening door Agentschap Telecom. Het verschil is dat deze methode direct rekent in onzekerheden in dB-waarden. Vervolgens zijn alle waarden overgenomen uit de tabel 4.2.1 en is er onderscheid gemaakt tussen statische foutbronnen en foutbronnen die bij elke meetwaarde een andere realisatie hebben.

Symbol	Source of uncertainty (i.e. contributions for the uncertainty calculations)	Measured value	Uncertainty		Distribution	Divisor	Sensitivity coefficient c_i	Standard uncertainty of the source $u(A_i)$ dB	Notes
			%	± dB					
Frequency									
f	Transmit frequency			0.100					
Distance									
R	Distance to the base station tower (m)	800.000							
X	Uncertainty in distance to the base station tower (m)	6.000	0.750						
	Effect of the uncertainty on R, taking into account the free-space propagation model used			0.065	rectangular	1.732	1	0.037	random ruis gedurende meting
Antenna gain									
G_{CAL}	Antenna gain calibration			0.700	normal	2	1	0.350	statische ruis gedurende meting
A_{CAB}	Cable attenuation			0.100	normal	2	1	0.050	statische ruis gedurende meting
A_{HOR}	Horizontal alignment error			0.060	rectangular	1.732	1	0.035	random ruis gedurende meting
A_{VER}	Vertical alignment error			0.220	rectangular	1.732	1	0.127	random ruis gedurende meting
A_{POL}	Polarisation error			0.250	rectangular	1.732	1	0.144	random ruis gedurende meting
Power									
P_{CAL}	Calibration test receiver			0.100	normal	2	1	0.050	random ruis gedurende meting
A_{MIS}	Mismatch			0.090	u-shape	1.414	1	0.064	statische ruis gedurende meting
A_{FIL}	Filter losses			0.000	rectangular	1.732	1	0.000	statische ruis gedurende meting
A_{INT}	Adjacent channel interference			negligible					statische ruis gedurende meting
Reflections									
A_{REF}	Reflections			0.5	unknown	1.000	1	0.500	random ruis gedurende meting
Helikopter height									
A_H	Influence height of helicopter			0.2	normal	2.000	2	0.200	random ruis gedurende meting
Distortion measurement antenna									
A_D	Distortion by diagram measurement antenna			0.03	rectangular	1.732	1	0.017	random ruis gedurende meting
Summary									
Static noise								0.359	gecombineerde statische fout
Random noise								0.577	gecombineerde random ruis
Averaging random noise (100 samples)								0.058	random ruis na middeling
U(P _{MSD}) Combined standard uncertainty								0.364	
U	Expanded standard uncertainty (95% conf.)							1.007	statische ruis is vooral normaal; 2x sigma; random noise via chebychev 5x sigma

Expanded measurement uncertainty: 1.007 dB

Tabel 4.3.1: Alternatieve samengestelde meetonzekerheid voor een fictieve omroepzender³⁸

4.3.1 ANALYSE

Uit tabel 4.3.1 blijkt dat de totale meetonzekerheid 1 dB is met een nauwkeurigheid van 95%. Dit geldt als de standaarddeviatie in de ruwe meetdata (veroorzaakt wordt door met name reflecties) kleiner is dan 0,5 dB. De standaarddeviatie hangt af van het antennediagram. Voor omnidirectionele antennediagrammen is deze waarde correct gekozen³⁹. Voor directionele antennediagrammen is deze waarde te laag. Dit is te zien in

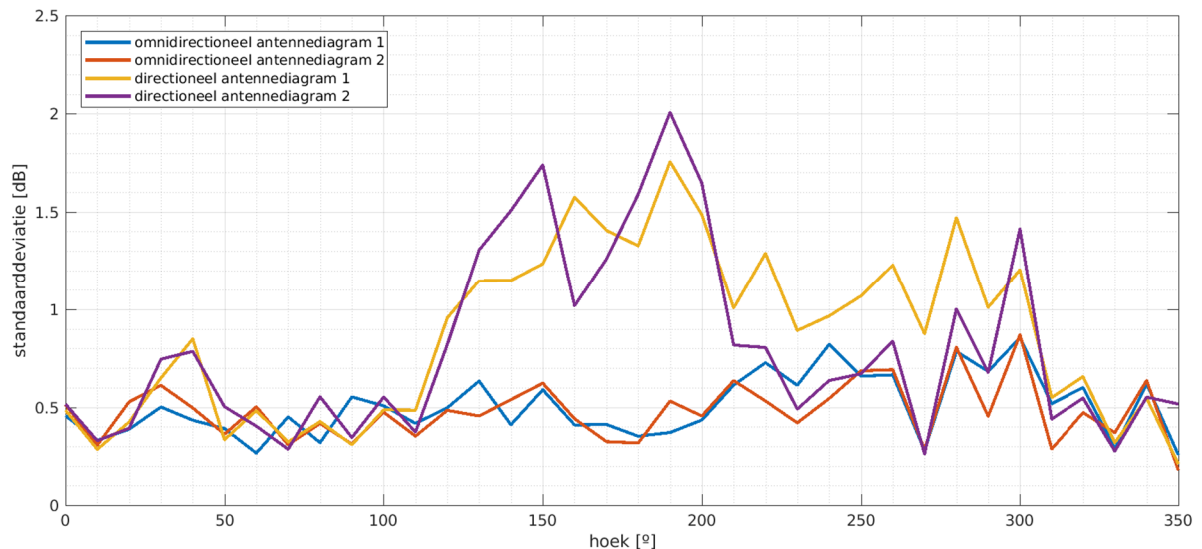
³⁷ Deze methode is ook toepasbaar voor frequenties in de FM omroepband. De CEPT ECC Recommendation (16)04 (sectie 2.3) is een aanpassing van recommendation (12)03 voor toepassing in de FM band.

³⁸ Overgenomen en aangepast uit CEPT ECC Recommendation (12)03 “Determination of the radiated power through field strength measurements in the frequency range from 400 MHz to 6000 MHz”

³⁹ Uit figuur 4.3.2 is te zien dat de 0,5 dB een gemiddelde waarde is voor omnidirectionele antennediagrammen. Het maximum voor deze antennediagrammen is 0,75 dB. De verificatiemetingen hebben plaatsgevonden op een worst-case locatie. Op andere locaties

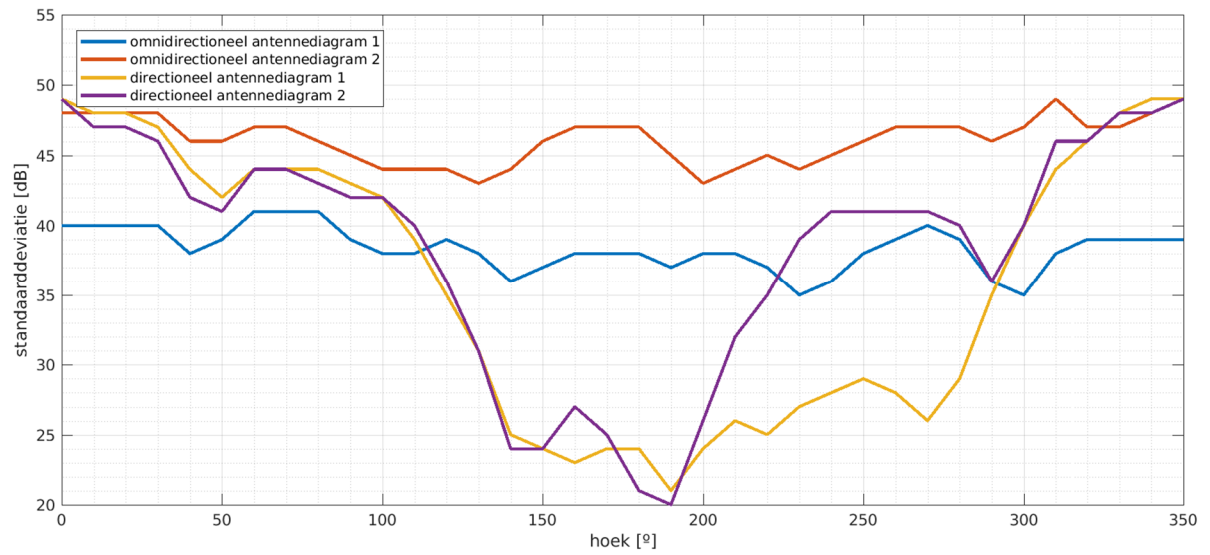
figuur 4.3.2. Hierin wordt de standaarddeviatie getoond voor de antennediagrammen van de verificatievlucht. In figuur 4.3.3 wordt het bijbehorende vermogen van deze antennediagrammen weergegeven. De maximale standaarddeviatie in figuur 4.3.2 is 2 dB voor een directioneel antennediagram. Echter, het agentschap stelt een minimum uitgestraald vermogen van 1 kW als voorwaarde voor een meting. Indien deze lagere vermogens niet worden meegenomen, is de maximale standaarddeviatie 1,5 dB. Deze waarde kan ingevuld worden in tabel 4.3.1. De totale samengestelde meetonzekerheid wordt dan 1,5 dB. Deze 1,5 dB waarde kan gezien worden als bovengrens voor directionele antennediagrammen waarbij het uitgestraalde vermogen hoger is dan 1 kW.

Resumerend kan gesteld worden dat de meetonzekerheid maximaal 1,5 dB is. Bij antennediagrammen die lijken op een omnidirectioneel patroon wordt 1 dB gehaald. In sectie 5.4 wordt dieper ingegaan op de achterliggende oorzaak. Het komt er op neer dat bij directionele antennediagrammen reflecties een dominantere rol spelen aan de ‘achterkant’ van de antenne. Dit veroorzaakt een groter verschil in lokale maxima en minima. De meetonzekerheid zal dus toenemen in deze gebieden van het antennediagram. Een aanbeveling is daarom om de gemeten standaarddeviatie mee te nemen bij de berekening van de samengestelde meetonzekerheid voor ieder antennediagram.



Figuur 4.3.2: Standaarddeviatie van de ruwe meetdata voor de antennediagrammen uit de verificatievlucht versus de antennehoek.

zullen de standaarddeviaties voor dergelijke antennediagrammen lager zijn. Dit is handmatig gecontroleerd voor een aantal metingen uit 2012.



Figuur 4.3.3: Gemeten uitgestraald vermogen van de antenndiagrammen uit de verificatievlucht versus de antennehoek.

5 VERIFICATIEVLUCHT

Op 28 en 29 september 2017 heeft een verificatievlucht plaatsgevonden in Rotterdam om een aantal onderdelen in het meetsysteem te valideren. Deze helikoptervlucht is op dezelfde wijze uitgevoerd door het agentschap als de metingen in 2012. De Waalhaventoren in Rotterdam is uitgekozen, omdat dit als een worst-case locatie kan worden beschouwd. Door de omringende hoogbouw zullen reflecties een sterkere invloed hebben op de metingen dan bij andere zendertorens. Ook de havenomgeving met vele metalen objecten (schepen, kranen, containers) zal dit effect versterken.



Figuur 5.0.1: Helikopter tijdens testvlucht

5.1 DOELEN

De verificatiemetingen hadden de volgende doelen.

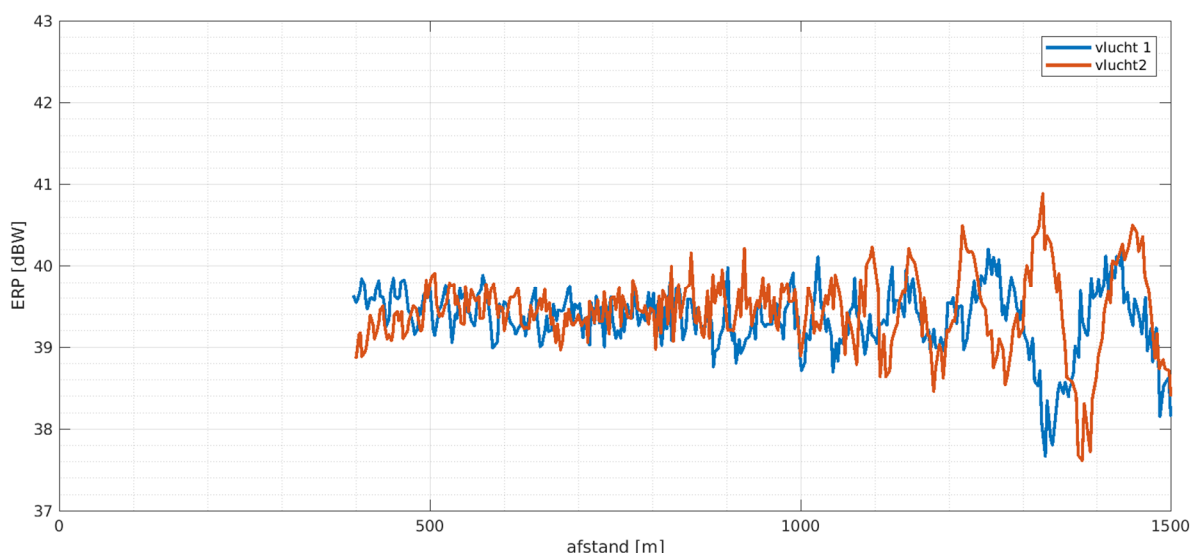
- Validatie en reciprociteit van het gehele meetsysteem. (sectie 5.2)
- Beoordeling procedure tijdens meetvluchten (sectie 5.3).
- Bepalen optimale afstand metingen uit verschillende aanvliegeroutes (sectie 5.4)
- Antennediagram meten op verschillende afstanden (sectie 5.5)
- Meten van zwakke uitgestraalde FM vermogens van 1 kW of minder (sectie 5.6)
- Meten van het antennediagram van de meetantenne (sectie 5.7)
- Invloed verschillende middelingmethodes op antennediagram (sectie 5.8)
- Invloed middelingsvenster op antennediagram (sectie 5.9)

5.2 VALIDATIE EN REPRODUCEERBAARHEID VAN HET GEHELE MEETSISTEEM

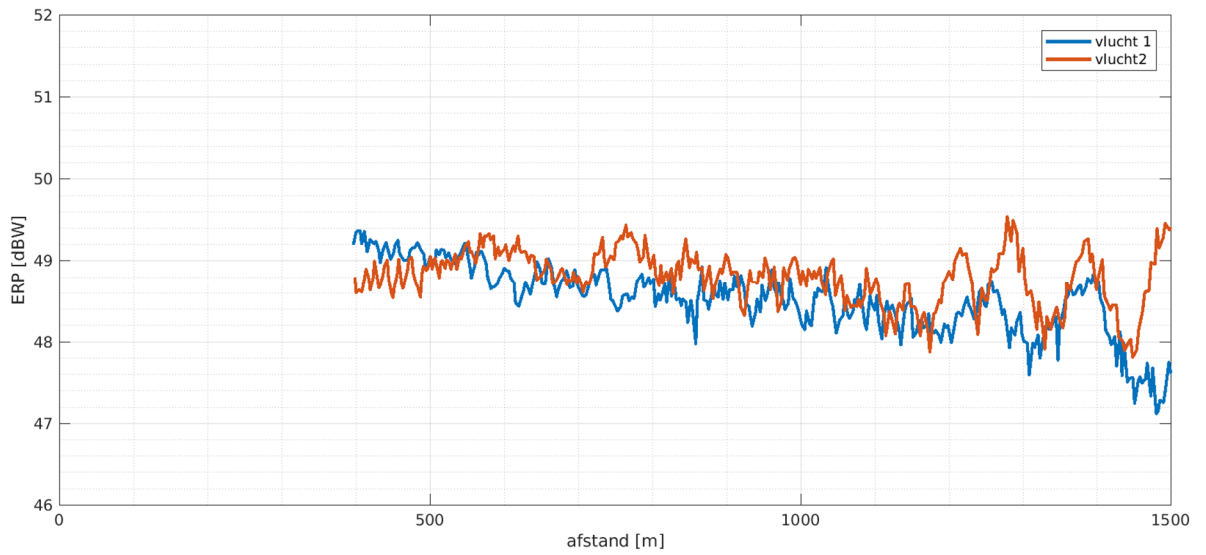
Om validatie en reproduceerbaarheid van het gehele meetsysteem te analyseren, zijn er twee onafhankelijke verificatiemetingen uitgevoerd. Met onafhankelijk wordt bedoeld dat het gaat om twee identieke vluchten (propagatie-, stij- en cirkelvlucht) die op verschillende tijdstippen zijn uitgevoerd. Hierbij is per vlucht een omnidirectioneel en een directioneel antennediagram onderzocht. De resultaten zijn weergegeven in de figuren 5.2.1 tot en met 5.2.8 en tabel 5.2.9 en 5.2.10. De resultaten zijn opgedeeld volgens de verschillende onderdelen in de meetprocedure (propagatie-, stij- en cirkelvlucht).

Propagatievlucht

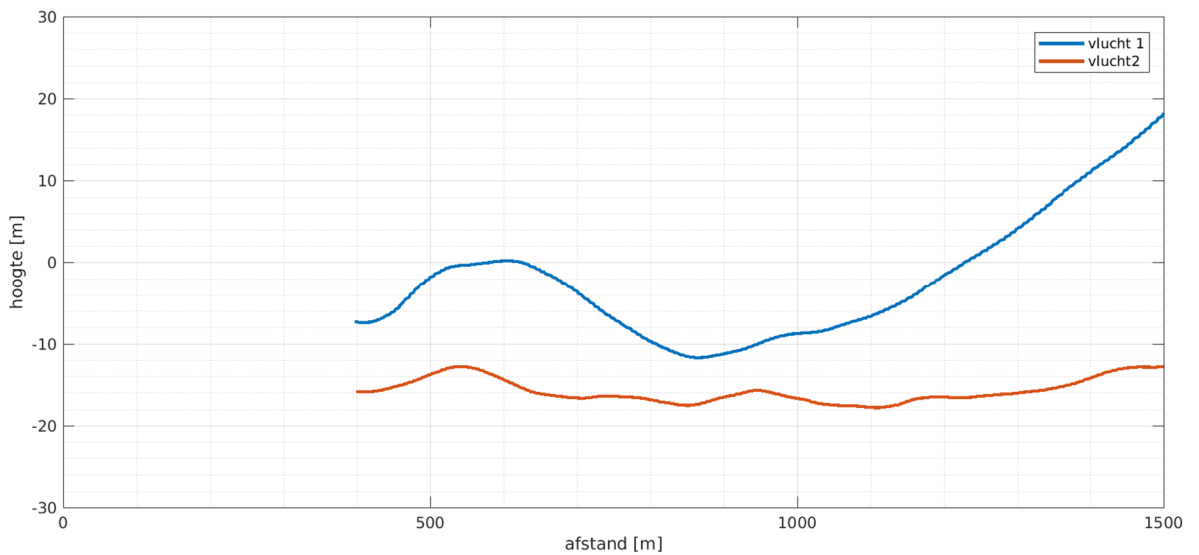
In dit onderdeel wordt naar de zendmast toegevoegen om een optimale meetafstand tot de mast te bepalen. In figuur 5.2.1 (omnidirectionele antennediagram) en 5.2.2 (directionele antennediagram) worden de resultaten van deze vlucht weergegeven: het ontvangen uitgestraalde e.r.p. vermogen versus de afstand. In elke grafiek worden twee lijnen weergegeven voor de eerste en respectievelijk tweede vlucht. Figuur 5.2.1 toont de metingen voor de omnidirectionele antennediagram en figuur 5.2.2 een directioneel antennediagram. De optimale afstand is berekend door te bepalen wanneer de lokale variaties –veroorzaakt door (grond)reflecties van het signaal– minimaal zijn. Dit betreft een globaal optimum dat wordt bepaald over alle te meten frequenties gedurende een vlucht. In dit geval is het globale optimum 800 meter. In figuur 5.2.3 wordt de hoogtevariatie getoond ten opzichte van de ideale hoogte. In figuur 5.2.4 wordt de azimuth-variatie getoond ten opzichte van de ideale aanvlieghoek.



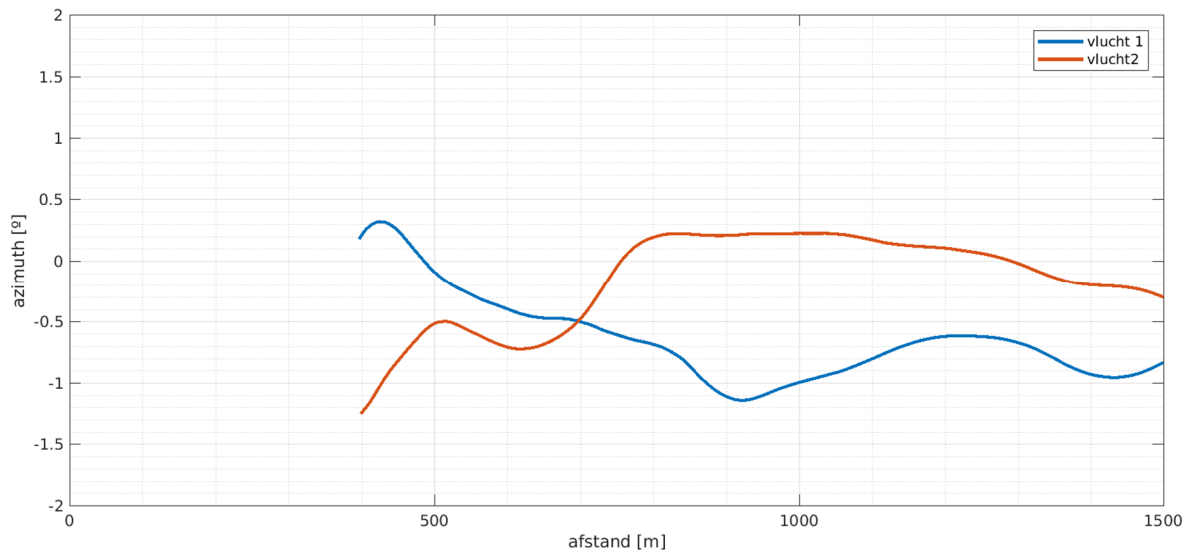
Figuur 5.2.1: Ontvangen uitgestraalde vermogen (e.r.p.) voor beide propagatievluchten versus de afstand voor het omnidirectionele antennediagram



Figuur 5.2.2: Ontvangen uitgestraalde vermogen (e.r.p.) voor beide propagatievluchten versus de afstand voor het directionele antennediagram



Figuur 5.2.3: Hoogtevariatie ten opzichte van de ideale hoogte voor beide propagatievluchten



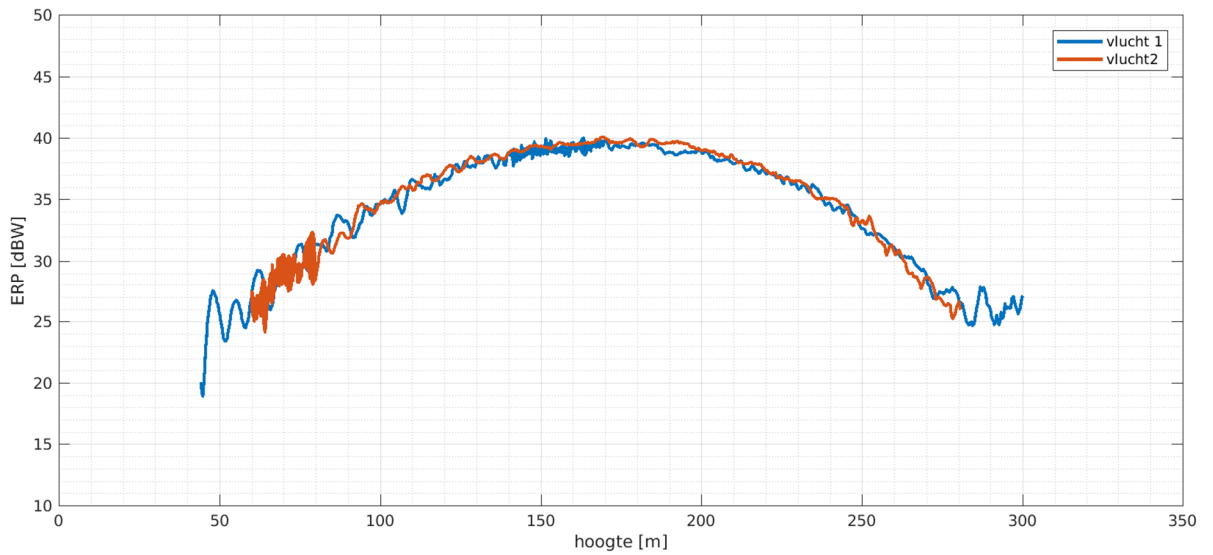
Figuur 5.2.4: Azimut-variantie variatie ten opzichte van de ideale aanvlieghoek (azimut) voor beide propagatievluchten

Analyse

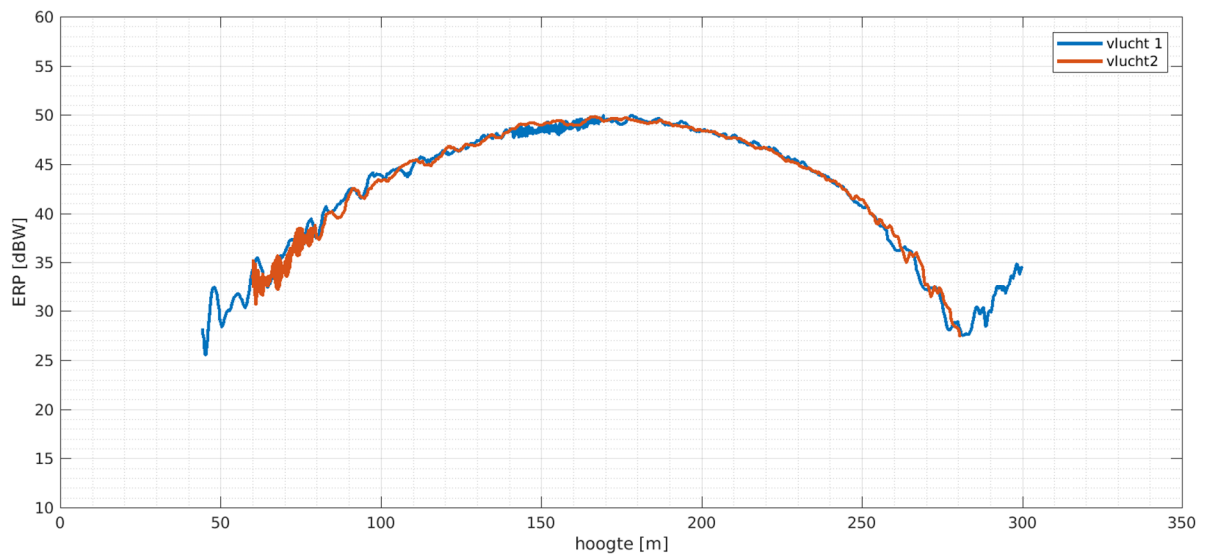
Uit de twee propagatievluchten blijkt dat beide vluchten min of meer gelijkwaardig zijn voor de afstand kleiner dan 1 km (figuur 5.2.3 en 5.2.4). Ook is te zien dat de optimale afstand niet erg kritisch is. In het gebied tussen de 500 en 1000 meter zijn de lokale variaties van het uitgestraalde vermogen laag. Verschillen tussen beide vluchten worden veroorzaakt doordat de piloot geen perfecte aanvliegroute heeft. Op de optimale meetafstand mag de maximale variatie in hoogte ± 20 meter zijn voor deze meetvlucht. Dit blijkt uit de resultaten van de stijgvlucht, die in de volgende paragraaf worden besproken. In dit gebied meet het agentschap de hoofdbundel van het antennediagram. Voor de azimutfout (de variatie ten opzichte van de ideale aanvlieghoek) geldt een 2-graden afwijking als pragmatische maximum variatie. In de zendvergunning wordt per 10-graden een maximum uitgestraalde vermogen gegeven. Daarnaast is het fysisch niet mogelijk om antennediagrammen te implementeren die sterk veranderen per hoek. Hiervoor zijn 10-graden of meer nodig om een sterke reductie dan wel versterking te realiseren. Om deze redenen is 2-graden een pragmatische toegestane variatie.

Stijgvlucht

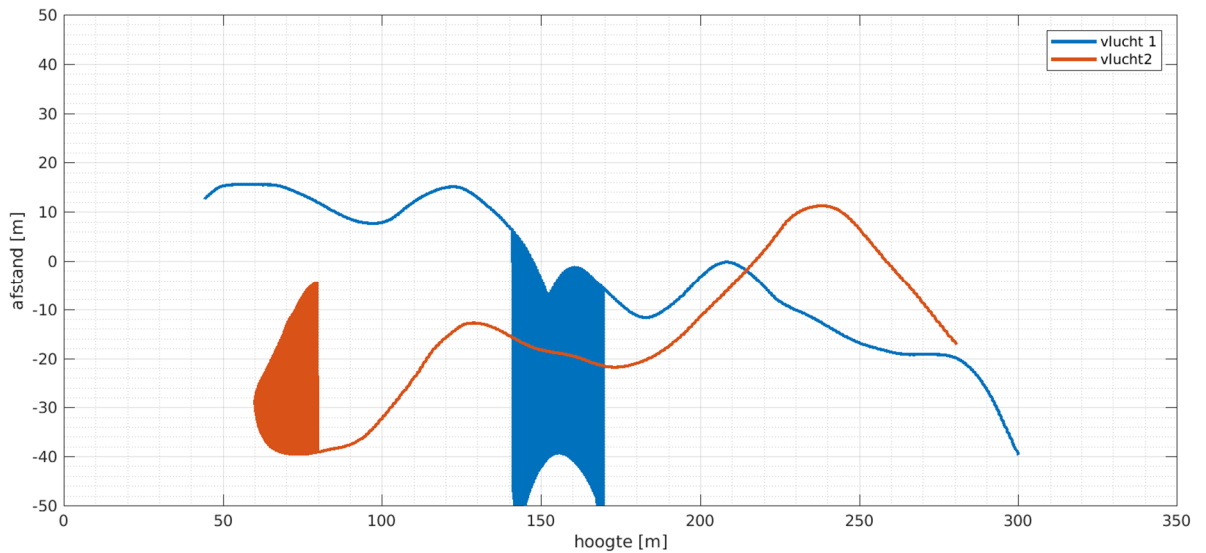
In dit onderdeel maakt de helikoper een stijgvlucht op de ideale afstand tot de zendmast. Het doel van deze meting is om de ideale meethoogte te bepalen. Voor een helikopterpiloot is dit het lastigste onderdeel in de meting. In figuur 5.2.5 en 5.2.6 worden de resultaten van deze vlucht weergegeven: het ontvangen uitgestraalde e.r.p. vermogen versus de hoogte. Daarnaast wordt in figuur 5.2.7 de afstandsvariantie getoond ten opzichte van de ideale afstand en in figuur 5.2.8 de azimutvariantie ten opzichte van de ideale aanvlieghoek.



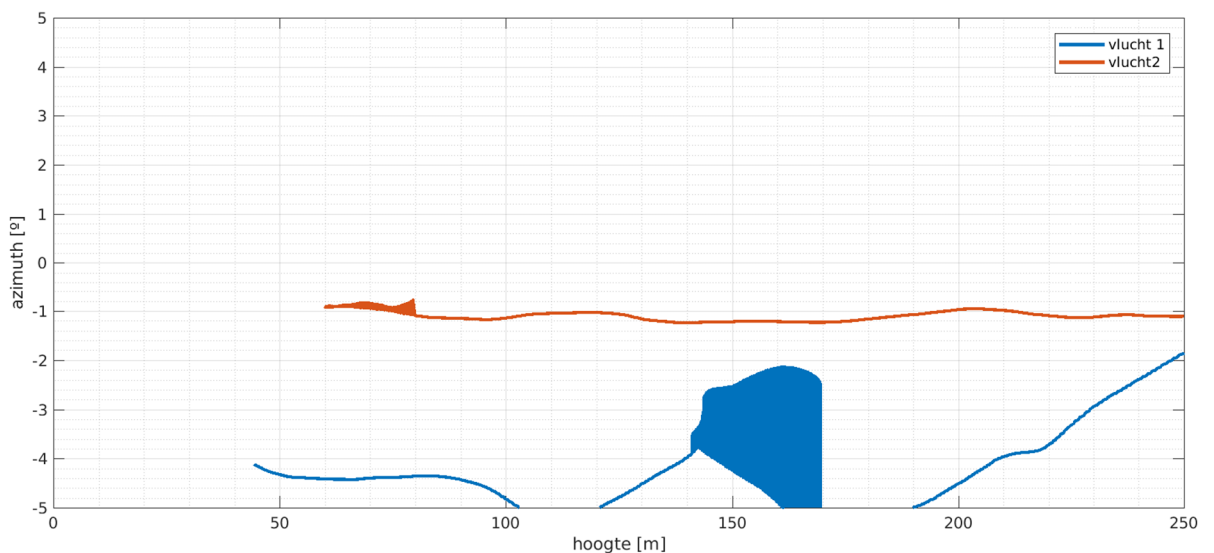
Figuur 5.2.5: Ontvangen uitgestraalde vermogen (e.r.p.) voor beide stijgvluchten versus de hoogte voor het omnidirectionele antennediagram



Figuur 5.2.6: Ontvangen uitgestraalde vermogen (e.r.p.) voor beide stijgvluchten versus de hoogte voor het directionele antennediagram



Figuur 5.2.7: Afstandsvariatie ten opzichte van de ideale afstand voor beide stijgvluchten



Figuur 5.2.8: Azimutvariatie variatie ten opzichte van de ideale aanvlieghoek (azimut) voor beide stijgvluchten

Analyse

Ook uit de stijgvlucht blijkt dat beide vluchten gelijkwaardig zijn. Het antennepatroon verandert weinig rondom de ideale meethoogte. Een afwijking van ± 20 meter is toegestaan, zonder dat dit de resultaten (uitgestraalde e.r.p. vermogen van de FM zender) beïnvloed. Daarnaast is een “blauw vlak” te zien in figuur 5.2.7, net onder de ideale meethoogte. Dit wordt veroorzaakt doordat deze stijgvlucht niet in een ideale lijn naar boven is verlopen. In dit hoogtegebied heeft de helikopter stilgestaan (en iets gezakt in hoogte) waardoor op meerdere afstanden tot de zendmast op dezelfde hoogte is gemeten. Uit de propagatievlucht bleek ook al dat de ideale afstand geen kritische factor is. In de verwerking van de meetdata wordt de afstand tot de zendmast meegenomen in de berekeningen. In dit

opzicht zal een afwijking geen invloed hebben op de resultaten, behalve een toenemende signaalvariatie. Daarnaast is te zien in figuur 5.2.8 dat de afwijking ten opzichte van de ideale aanvlieghoek voor vlucht 1 te groot is. In een echte meting zou deze stijgvlucht opnieuw worden uitgevoerd. Doordat het antennediagram voor beide FM zenders in deze hoeken (hoofdbundel) niet variëren, is er desondanks weinig verschil te zien in figuur 5.2.6 en 5.2.7.

Cirkelvlucht

Het laatste onderdeel in een meetsessie is de cirkelvlucht. Hier vliegt de helikopter rondom de mast in een cirkel op de ideale afstand en hoogte. Per 10 graden wordt het uitgestraalde vermogen van de FM zender bepaald. Dit is gelijk aan het antennediagram in de FM-omroepvergunning. In tabel 5.2.9 en tabel 5.2.10 worden de resultaten van beide cirkelvluchten getoond.

Omnidirectioneel antennediagram			
graden	vlucht 1 (dBW)	vlucht 2 (dBW)	verschil (dB)
0	39.5	38.7	-0.8
10	40.3	39.8	-0.5
20	40.4	40.5	0.1
30	39.5	38.9	-0.6
40	38.5	37.9	-0.6
50	39.2	38.9	-0.3
60	40.8	40.2	-0.6
70	41.1	40.7	-0.4
80	40.7	40.6	-0.1
90	39.1	38.9	-0.2
100	38	37.4	-0.6
110	38.4	38.5	0.1
120	38.8	38.8	0
130	37.6	37.4	-0.2
140	35.8	36.2	0.4
150	36.5	37	0.5
160	37.8	37.6	-0.2
170	38.4	38.2	-0.2
180	37.9	38.3	0.4
190	37.4	37.7	0.3
200	37.4	37.5	0.1
210	37.9	38	0.1
220	37	37.4	0.4
230	34.9	34.6	-0.3
240	36	36.2	0.2
250	38.1	38.9	0.8
260	39.4	39.1	-0.3
270	40	39.4	-0.6
280	38.5	38.7	0.2
290	36.4	36.1	-0.3
300	35.5	35.6	0.1
310	38.5	37.8	-0.7
320	39.1	39	-0.1
330	39.5	39.2	-0.3
340	39	39.2	0.2
350	39.3	38.9	-0.4
gemiddeld			-0.1 dB

Tabel 5.2.9: Antennediagram van een omnidirectioneel antennediagram voor verschillende vluchten

Directioneel antennediagram			
graden	vlucht 1 (dBW)	vlucht 2 (dBW)	verschil (dB)
0	48.5	47.6	-0.9
10	47.9	47.5	-0.4
20	48	47.7	-0.3
30	47.1	46.3	-0.8
40	43.9	43.2	-0.7
50	42	42.2	0.2
60	44	43.8	-0.2
70	44.4	44.2	-0.2
80	43.5	43.8	0.3
90	42.5	42.4	-0.1
100	41.6	40.9	-0.7
110	39.3	39.6	0.3
120	35.4	36	0.6
130	31	31.8	0.8
140	25.6	26.7	1.1
150	24.7	25.8	1.1
160	24.1	24.5	0.4
170	24.4	25	0.6
180	24.4	24.5	0.1
190	21.5	22.2	0.7
200	23.6	23.9	0.3
210	26.2	25.5	-0.7
220	25	24.2	-0.8
230	26.8	26.3	-0.5
240	28.4	28.3	-0.1
250	29.3	29.5	0.2
260	27.9	27.9	0
270	26.4	26.5	0.1
280	29.2	29.7	0.5
290	35.5	35.1	-0.4
300	40	39.9	-0.1
310	44	42.8	-1.2
320	45.6	45.3	-0.3
330	47.7	46.9	-0.8
340	48.3	48.2	-0.1
350	48.8	48.2	-0.6
gemiddeld			-0.1 dB

Tabel 5.2.10: Antennediagram van een directioneel antennediagram voor verschillende vluchten

Analyse

De waarden in bovenstaande tabellen zijn overgenomen uit de Matlab analyse van de Radimation software. De afronding is veranderd naar 0,1 dB (in plaats van 1 dB) om beter de verschillen inzichtelijk te hebben. Gemiddeld is het verschil 0,1 dB tussen beide metingen wat een klein verschil is. Per meting (hoek) zijn er verschillen gemeten tot 1,1 dB. De achterliggende oorzaak voor de verschillen in de gemeten antennediagrammen is de variatie van hoogte en azimut (aanvlieghoek) ten opzichte van de ideale lijn. Deze zijn per vlucht anders en resulteren in variaties in het gemeten antennediagram. Geconcludeerd kan worden dat op basis van deze twee verificatievluchten van dezelfde antennediagrammen de meetprocedure reproduceerbaar is: dezelfde antennediagrammen worden gemeten. Eventuele verschillen vallen binnen de meetonzekerheid van het systeem (hoofdstuk 4).

5.3 BEOORDELING PROCEDURE TIJDENS MEETVLUCHTEN

Voordat er een meetvlucht wordt uitgevoerd, voert het agentschap een aantal controlemetingen uit:

- Controlemeting demping antenne RF kabel. De demping van de RF kabel wordt gemeten en moet vergelijkbaar zijn met de gekalibreerde demping.
- Controlemeting reflectiecoëfficiënt van beide antennes. De reflectiecoëfficiënt moet vergelijkbaar zijn met eerdere metingen. (Voor en na de metingen.)
- Controlemeting van een bestaande referentie FM zender. Deze testvlucht moet dezelfde meetresultaten geven als voorgaande metingen.

Deze controlemetingen zijn afdoende om een correcte werking van het systeem te waarborgen. Naast deze metingen wordt ook de meetontvanger periodiek gekalibreerd, zodat hiermee een correcte werking wordt gegarandeerd.

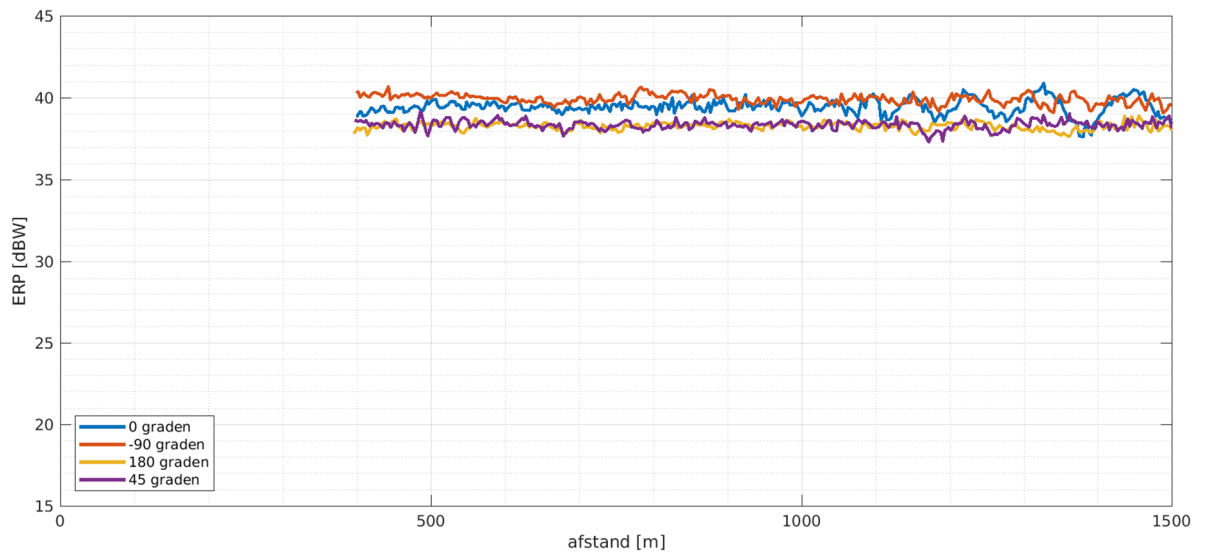
In het algemeen hebben weersinvloeden geen invloed op het gemeten antennediagram. Wel heeft (harde) wind en ook de ervaring van de helikopterpiloot een relatief grote invloed op de kwaliteit van de metingen. Beide oorzaken kunnen er voor zorgen dat de afwijking ten opzichte van de ideale afstand, hoogte en azimut te groot worden. In de RadiMation software wordt dit weliswaar gecorrigeerd. De meetonzekerheid neemt hierdoor wel toe.

Universiteit Twente beveelt aan om de eisen aan de piloot contractueel vast te leggen, zodat de vlucht optimaal wordt uitgevoerd.

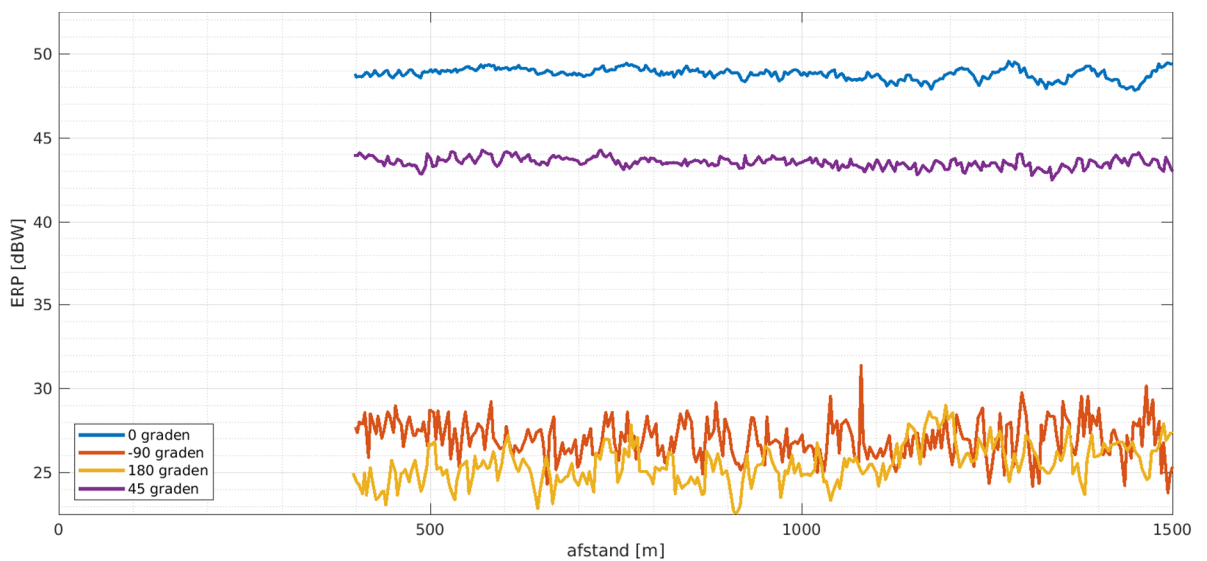
5.4 BEPALEN OPTIMALE AFSTANDSMETINGEN UIT VERSCHILLENDE AANVLEIGROUTES

In figuur 5.4.1 en 5.4.2 worden de resultaten van deze meting weergegeven: het ontvangen uitgestraalde e.r.p. vermogen versus de afstand voor de verschillende aanvlieghoeken. De hoofdstraalrichting van de antenne is op 355 graden (0 graden is het noorden). Daarnaast zijn er propagatievluchten gemaakt op andere aanvlieghoeken. Deze aanvlieghoeken worden beschreven ten opzichte van de hoofdstraalrichting. Vluchten zijn gemaakt op -90 graden, 180 graden en op 45 graden. Huidige FM zendantennes zijn vaak zogenaamde multipattern antennes welke bestaan uit meerdere panelen. Bij de keuze van aanvlieghoeken is om die reden gekozen om niet altijd loodrecht op een paneel te vliegen, maar ook tussen de panelen. Figuur 5.4.1 toont de meting voor het omnidirectionele antennediagram en figuur 5.4.2 de meting door een directioneel antennediagram.

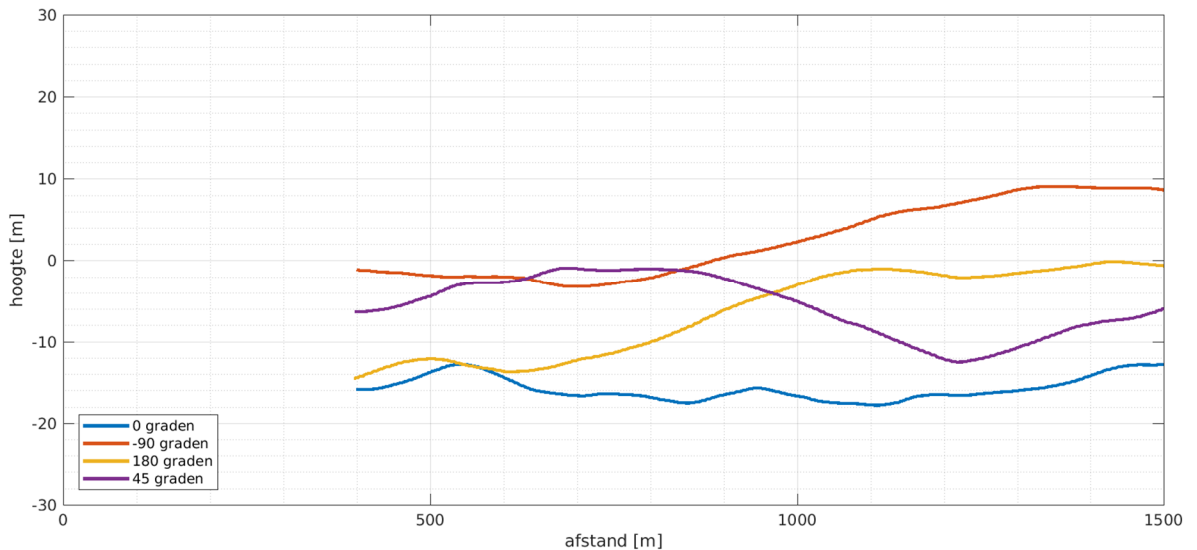
Daarnaast toont figuur 5.4.3 de hoogtevariatie ten opzichte van de ideale hoogte en figuur 5.4.4 laat de azimut-variatie zien ten opzichte van de ideale aanvlieghoek.



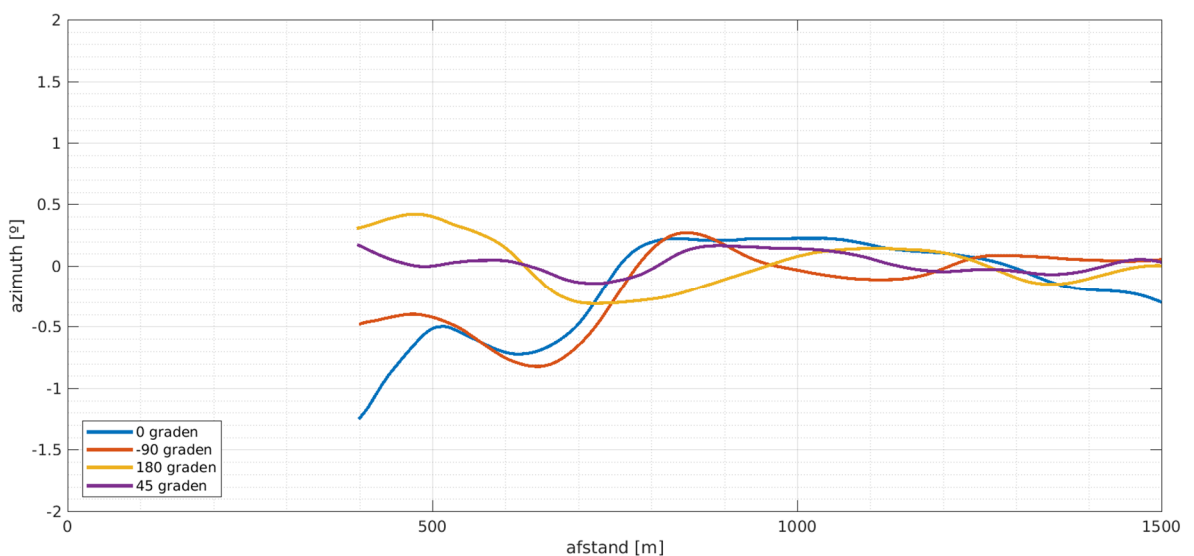
Figuur 5.4.1: Ontvangen uitgestraalde vermogen (e.r.p.) versus de afstand voor het omnidirectionele antennediagram voor verschillende aanvlieghoeken



Figuur 5.4.2: Ontvangen uitgestraalde vermogen (e.r.p.) versus de afstand voor het directionele antennediagram voor verschillende aanvlieghoeken



Figuur 5.4.3: Hoogtevariatie ten opzichte van de ideale hoogte voor de verschillende propagatievluchten



Figuur 5.4.4: Azimutvariatie ten opzichte van de ideale aanvlieghoek voor de verschillende propagatievluchten

Analyse

Bij het bepalen van een optimale afstand tot de zendmast wordt gekeken naar de optimale afstand voor alle frequenties die op hetzelfde moment worden gemeten. Bovenstaande figuren tonen de propagatievlucht voor 2 frequenties/antennediagrammen. Ten opzichte van de grafieken in sectie 5.2 is een groter bereik gekozen voor de y-as, om ook lagere signaalwaarden van het directionele antennediagram te kunnen tonen. Voor een goede vergelijking is voor het directionele antennepatroon dezelfde schaal toegepast. Hierdoor lijken signaalvariaties kleiner dan getoond in sectie 5.2.

Over het algemeen kan worden gesteld dat de optimale afstand gelijk is voor de verschillende hoeken van de propagatievlucht. Boven de 1 km wijken de vluchten van elkaar af doordat hoge bebouwing (reflecties) een rol spelen op grotere afstanden. Ook zal de grondreflectie dominant zijn, omdat het padverschil tussen het directe pad en de grondreflectie kleiner is geworden.

Ook in het geval van een directioneel antennediagram zijn de propagatievluchten uit hoeken waarbij het signaal veel zwakker is (> 10 dB) dan uit de hoofdstraalrichting ongeschikt om de optimale afstand te bepalen. In deze gevallen spelen de reflecties uit de hoofdstraalrichting (en/of andere hoeken waar het signaal veel sterker is) een grote rol in het gemeten signaal.

Daarnaast blijkt uit de metingen dat de variaties tussen minima en maxima kleiner zijn voor een directionele antennediagram dan een omnidirectionele antennediagram. Dit effect is sterker gezien in de metingen van 2012. Bovenstaand punt versterkt de stelling dat naast de grondreflectie ook reflecties door hoge gebouwen of objecten nabij de zendantenne een significante invloed hebben op de gemeten signaalvariëaties in de propagatievlucht. Uit de analyse van de metingen van 2012 blijkt bijvoorbeeld dat de variaties tussen minima en maxima ongeveer 50% kleiner zijn voor een directioneel antennediagram⁴⁰.

5.5 ANTENNEDIAGRAM METEN OP VERSCHILLENDE AFSTANDEN

Voor dit onderdeel zijn de antennediagrammen van het omnidirectioneel en directioneel antennediagram op verschillende afstanden tot de zendmast gemeten: op 600 meter, op 800 meter (optimale afstand) en op 1200 meter. De resultaten worden in de tabellen 5.5.1 en 5.5.2 weergegeven.

⁴⁰ Dit geldt voor dezelfde antennediagrammen die zijn gemeten in 2017 tijdens de verificatievlucht.

Omnidirectioneel antennediagram					
graden	800 meter (dBW)	600 meter (dBW)	1200 meter (dBW)	Vershil 600 met 800 meter	Vershil 1200 met 800 meter
0	39.5	39.3	39.7	-0.2	0.2
10	40.3	40	40.4	-0.3	0.1
20	40.4	40.3	40.5	-0.1	0.1
30	39.5	39.7	39.6	0.2	0.1
40	38.5	38.2	38.4	-0.3	-0.1
50	39.2	39.4	39.5	0.2	0.3
60	40.8	40.9	40.6	0.1	-0.2
70	41.1	41.2	41.3	0.1	0.2
80	40.7	40.6	40.2	-0.1	-0.5
90	39.1	39.2	39.3	0.1	0.2
100	38	37.7	37.5	-0.3	-0.5
110	38.4	38	38.2	-0.4	-0.2
120	38.8	39.1	39	0.3	0.2
130	37.6	37.9	37.5	0.3	-0.1
140	35.8	35.8	35.8	0.0	0.0
150	36.5	36.7	36.5	0.2	0.0
160	37.8	37.6	37.7	-0.2	-0.1
170	38.4	38.3	38	-0.1	-0.4
180	37.9	38.1	37.8	0.2	-0.1
190	37.4	37.4	37.3	0.0	-0.1
200	37.4	37.2	37.2	-0.2	-0.2
210	37.9	37.9	38.1	0.0	0.2
220	37	37.1	37	0.1	0.0
230	34.9	35.1	35.3	0.2	0.4
240	36	36.1	35.7	0.1	-0.3
250	38.1	38.2	38.5	0.1	0.4
260	39.4	39.3	39.5	-0.1	0.1
270	40	39.5	39.5	-0.5	-0.5
280	38.5	38.3	38.6	-0.2	0.1
290	36.4	35.8	36.4	-0.6	0.0
300	35.5	35.6	35.6	0.1	0.1
310	38.5	37.9	38.4	-0.6	-0.1
320	39.1	39.2	39.3	0.1	0.2
330	39.5	39	39.6	-0.5	0.1
340	39	39.1	39.6	0.1	0.6
350	39.3	39	39.1	-0.3	-0.2
Gemiddeld				-0.1 dB	0.0 dB

Tabel 5.5.1: Cirkelvlucht omnidirectioneel antennediagram voor verschillende afstanden tot de zendertoren

Directioneel antennediagram					
graden	800 meter (dBW)	600 meter (dBW)	1200 meter (dBW)	Vershil 600 met 800 meter	Vershil 1200 met 800 meter
0	48.5	48.1	48.6	-0.4	0.1
10	47.9	47.5	47.8	-0.4	-0.1
20	48	47.5	47.6	-0.5	-0.4
30	47.1	47	47.1	-0.1	0.0
40	43.9	43.4	43.5	-0.5	-0.4
50	42	42.3	42.5	0.3	0.5
60	44	44.1	43.9	0.1	-0.1
70	44.4	44.7	44.7	0.3	0.3
80	43.5	43.8	43.3	0.3	-0.2
90	42.5	42.6	42.7	0.1	0.2
100	41.6	41.4	41.4	-0.2	-0.2
110	39.3	39.3	39.2	0.0	-0.1
120	35.4	36.3	35.9	0.9	0.5
130	31	31.9	31.5	0.9	0.5
140	25.6	26.3	26.2	0.7	0.6
150	24.7	25.1	25.1	0.4	0.4
160	24.1	24.6	24.3	0.5	0.2
170	24.4	24.6	24.3	0.2	-0.1
180	24.4	24.2	24.9	-0.2	0.5
190	21.5	21.5	23.2	0.0	1.7
200	23.6	22.9	24.5	-0.7	0.9
210	26.2	25	27	-1.2	0.8
220	25	24	25.6	-1.0	0.6
230	26.8	26.4	26.7	-0.4	-0.1
240	28.4	28	28.4	-0.4	0.0
250	29.3	28.7	29.3	-0.6	0.0
260	27.9	28	28.8	0.1	0.9
270	26.4	26.6	27.9	0.2	1.5
280	29.2	29.8	31.1	0.6	1.9
290	35.5	35.3	35.7	-0.2	0.2
300	40	40.2	40.2	0.2	0.2
310	44	43.6	43.7	-0.4	-0.3
320	45.6	45.8	45.7	0.2	0.1
330	47.7	46.8	47.6	-0.9	-0.1
340	48.3	48.1	48.4	-0.2	0.1
350	48.8	48.5	48.6	-0.3	-0.2
gemiddeld				-0.1 dB	0.3 dB

Tabel 5.5.2: Cirkelvlucht directioneel antennediagram voor verschillende afstanden tot de zendertoren

Analyse

Uit de metingen op verschillende afstanden blijkt dat de optimale afstand niet een kritische factor is. Dit versterkt het feit dat de meetprocedure reproduceerbaar is. Verschillen zijn in dezelfde orde grootte als voor twee onafhankelijke metingen op de optimale afstand. Wel is te zien dat voor het directioneel antennediagram de afwijking iets groter is op 1200 meter en dan met name in de hoeken waarbij het uitgestraalde vermogen veel lager is ten opzichte van het uitgestraalde vermogen in de hoofdstraalrichting. In deze gevallen spelen reflecties een dominantere rol zoals ook uit de propagatievlucht blijkt. Hierdoor neemt de meetonzekerheid toe. Daarnaast speelt ook mee dat de meetontvanger een lichte niet-lineariteit heeft voor zwakke signalen dicht bij de ruisvloer van de meetontvanger. Dit fenomeen is beschreven in sectie 3.2.1. Op 1200 meter afstand en bij lage uitgestraalde vermogens zal men in dit niet-lineaire meetgebied meten. Voor het bepalen van het antennediagrammen in deze sectie wordt op 800 meter gevlogen en treedt deze niet-lineariteit dus niet op.

5.6 METEN VAN ZWAKKE UITGESTRAALDE FM VERMOGENS VAN 1 KW OF MINDER

Uit de validatiemetingen van de meetontvanger bleek dat de meetontvanger bij signalen minder dan 10 dB van de ruisvloer niet meer volledig lineair is. In dit meetgebied zal een grotere meetfout ontstaan. Dit is vooral voor het meten van zwakkere uitgestraalde FM vermogens (< 1 kW) van belang. Om dit punt te onderzoeken is een drietal cirkelvluchten uitgevoerd op de optimale afstand tot de zendmast waarbij de verzwakking in de meetontvanger is gevarieerd, namelijk 30 dB (standaardinstelling), 20 dB en 10 dB verzwakking. Daarnaast zijn de resultaten uit een andere meting gebruikt van een cirkelvlucht op 1200 meter met 30 dB verzwakking (sectie 5.5). Deze vlucht is toegevoegd in dit onderdeel, omdat het padverlies van het RF signaal lager zal zijn, waardoor genoemde niet-lineariteit zich sterker zal openbaren. De resultaten van twee directionele antennediagrammen zijn in onderstaande tabellen weergegeven; tabel 5.6.1 en tabel 5.6.2. De uitgestraalde vermogens van de omnidirectionele antennediagrammen zijn niet toegevoegd, omdat deze te hoog liggen voor dit onderdeel. De blauw gearceerde gebieden zijn gemeten uitgestraalde vermogens lager dan 1 kW. Daarnaast worden aan de rechterkant de verschillen getoond ten opzichte van de 20 dB RF verzwakking. Deze referentie is gekozen, omdat bij 10 dB de meetontvanger eventueel kan worden overstuurd, waardoor deze ook niet-lineariteit kan vertonen.

Directioneel antennediagram nr 1							
graden	30 dB verzwakking 800 meter (dBW)	20 dB verzwakking 800 meter (dBW)	10 dB verzwakking 800 meter (dBW)	30 dB verzwakking 1200 meter (dBW)	verschil 30 dB met 20 dB verzw.	verschil 10 dB met 20 dB verzw.	verschil 30 dB 1200 m met 20 dB verzw.
0	48.5	48.2	48.3	48.6	0.3	0.1	0.4
10	47.9	47.4	47.2	47.8	0.5	-0.2	0.4
20	48	48	47.9	47.6	0	-0.1	-0.4
30	47.1	46.6	46.5	47.1	0.5	-0.1	0.5
40	43.9	43.6	43.4	43.5	0.3	-0.2	-0.1
50	42	42.2	42.2	42.5	-0.2	0	0.3
60	44	43.8	43.8	43.9	0.2	0	0.1
70	44.4	44.1	44.2	44.7	0.3	0.1	0.6
80	43.5	43.6	43.5	43.4	-0.1	-0.1	-0.2
90	42.5	42.7	42.5	42.7	-0.2	-0.2	0
100	41.6	41.6	41.5	41.4	0	-0.1	-0.2
110	39.3	39.1	39	39.2	0.2	-0.1	0.1
120	35.4	36	35.9	35.9	-0.6	-0.1	-0.1
130	31	31.7	31.5	31.5	-0.7	-0.2	-0.2
140	25.6	26.1	26.2	26.2	-0.5	0.1	0.1
150	24.7	25.1	25.6	25.1	-0.4	0.5	0
160	24.1	23.9	24.5	24.3	0.2	0.6	0.4
170	24.4	24.2	24.2	24.3	0.2	0	0.1
180	24.4	23.8	23.8	24.9	0.6	0	1.1
190	21.5	22.5	22.4	23.2	-1	-0.1	0.7
200	23.6	24.9	24.2	24.5	-1.3	-0.7	-0.4
210	26.2	26.1	26.4	27	0.1	0.3	0.9
220	25	25.4	24	25.6	-0.4	-1.4	0.2
230	26.8	26.5	26	26.7	0.3	-0.5	0.2
240	28.4	28.5	28.4	28.4	-0.1	-0.1	-0.1
250	29.3	29.1	29.3	29.3	0.2	0.2	0.2
260	27.9	28.6	28.5	28.8	-0.7	-0.1	0.2
270	26.4	26.7	26.9	27.9	-0.3	0.2	1.2
280	29.2	30.2	30.2	31.1	-1	0	0.9
290	35.5	35.6	35.7	35.7	-0.1	0.1	0.1
300	40	40.1	40.2	40.2	-0.1	0.1	0.1
310	44	43.8	43.9	43.7	0.2	0.1	-0.1
320	45.6	46	45.8	45.7	-0.4	-0.2	-0.3
330	47.7	47.1	47.5	47.6	0.6	0.4	0.5
340	48.3	48.2	48.1	48.4	0.1	-0.1	0.2
350	48.8	48.7	48.4	48.6	0.1	-0.3	-0.1
gemiddeld					-0.1 dB	-0.1 dB	0.2 dB
Gemiddeld (blauwe regels)					-0.3 dB	-0.1 dB	0.4 dB

Tabel 5.6.1: Directioneel antennediagram 1 voor verschillende RF verzwakkingen

Directioneel antennediagram nr 2							
graden	30 dB verzwakking 800 meter (dBW)	20 dB verzwakking 800 meter (dBW)	10 dB verzwakking 800 meter (dBW)	30 dB verzwakking 1200 meter (dBW)	verschil 30 dB met 20 dB verzw.	verschil 10 dB met 20 dB verzw.	verschil 30 dB 1200 m met 20 dB verzw.
0	48.4	48.4	48.3	48.4	0	-0.1	0
10	47.4	47	46.9	47.5	0.4	-0.1	0.5
20	46.9	47.3	47.1	46.9	-0.4	-0.2	-0.4
30	45.6	45.4	45.3	45.8	0.2	-0.1	0.4
40	42	42.1	41.9	42	-0.1	-0.2	-0.1
50	41.5	41.4	41.3	41.6	0.1	-0.1	0.2
60	43.7	43.2	43	43.3	0.5	-0.2	0.1
70	43.9	43.4	43.6	44	0.5	0.2	0.6
80	43.2	43	43	42.9	0.2	0	-0.1
90	42.4	42.6	42.3	42.6	-0.2	-0.3	0
100	41.7	41.7	41.3	41.3	0	-0.4	-0.4
110	39.7	39.2	39	39.4	0.5	-0.2	0.2
120	36.1	36.2	35.9	36.3	-0.1	-0.3	0.1
130	31.3	31	31	31.2	0.3	0	0.2
140	24	23.3	23.4	24.3	0.7	0.1	1
150	24.1	22.9	23.7	24.2	1.2	0.8	1.3
160	26.7	26.6	26.2	26.8	0.1	-0.4	0.2
170	25.8	25.9	25.5	25.6	-0.1	-0.4	-0.3
180	21	20.7	21.6	22.2	0.3	0.9	1.5
190	19.9	19.9	20.4	21.8	0	0.5	1.9
200	26.2	26.5	26.9	26.4	-0.3	0.4	-0.1
210	32	31.8	32.2	32.3	0.2	0.4	0.5
220	35.7	36.3	35.7	35.9	-0.6	-0.6	-0.4
230	38.7	39.2	38.9	39.4	-0.5	-0.3	0.2
240	40.8	40.8	41.3	40.8	0	0.5	0
250	41.2	41.8	41.4	42	-0.6	-0.4	0.2
260	40.9	41.5	41.2	41.6	-0.6	-0.3	0.1
270	41.1	41.2	41.3	41.1	-0.1	0.1	-0.1
280	39.5	40.1	39.9	40	-0.6	-0.2	-0.1
290	36	35.6	35.5	35.8	0.4	-0.1	0.2
300	40.4	40.6	40.8	40.8	-0.2	0.2	0.2
310	45.5	45.4	45.3	45.6	0.1	-0.1	0.2
320	46.5	47	46.8	46.8	-0.5	-0.2	-0.2
330	47.5	47.2	47.4	47.6	0.3	0.2	0.4
340	48.2	48.1	48.2	48.6	0.1	0.1	0.5
350	48.9	48.8	48.7	48.6	0.1	-0.1	-0.2
Gemiddeld					0.0 dB	0.0 dB	0.2 dB
Gemiddeld (blauwe regels)					0.3 dB	0.3 dB	0.8 dB

Tabel 5.6.2: Directioneel antennediagram 2 voor verschillende RF verzwakkingen

Analyse

Uit de verschillende metingen blijkt dat de meetontvanger inderdaad niet-lineair is bij zwakke signalen. Dit verschil is het duidelijkst te zien bij de cirkelvlucht met 30 dB RF verzwakking op 1200 meter ten opzichte van de 30 dB vlucht op de optimale afstand. Gemiddeld is het uitgestraalde vermogen 0.2 dB sterker bij de vlucht op 1200 meter; bij de blauwe cellen is dit gemiddeld 0.8 dB. Daarnaast is bij directioneel antennediagram 2 op 140, 150, 180 en 190 graden het verschil groter dan 1 dB. Op deze hoeken is de signaalsterkte het zwakst van beide antennediagrammen. Hier lijkt duidelijk de niet-lineariteit zichtbaar zoals we die beschreven in het validatiehoofdstuk (sectie 3.2). Uit sectie 5.4 blijkt dat bij zwakkere uitgestraalde vermogens ook de signaalvariaties toenemen. Hierdoor neemt de meetonzekerheid toe tot 1,5 dB. Niet-lineariteit en meetonzekerheid zijn in dezelfde orde grootte, hierdoor zal de niet-lineariteit niet altijd zichtbaar zijn in de resultaten van de tabellen 5.6.1 en 5.6.2.

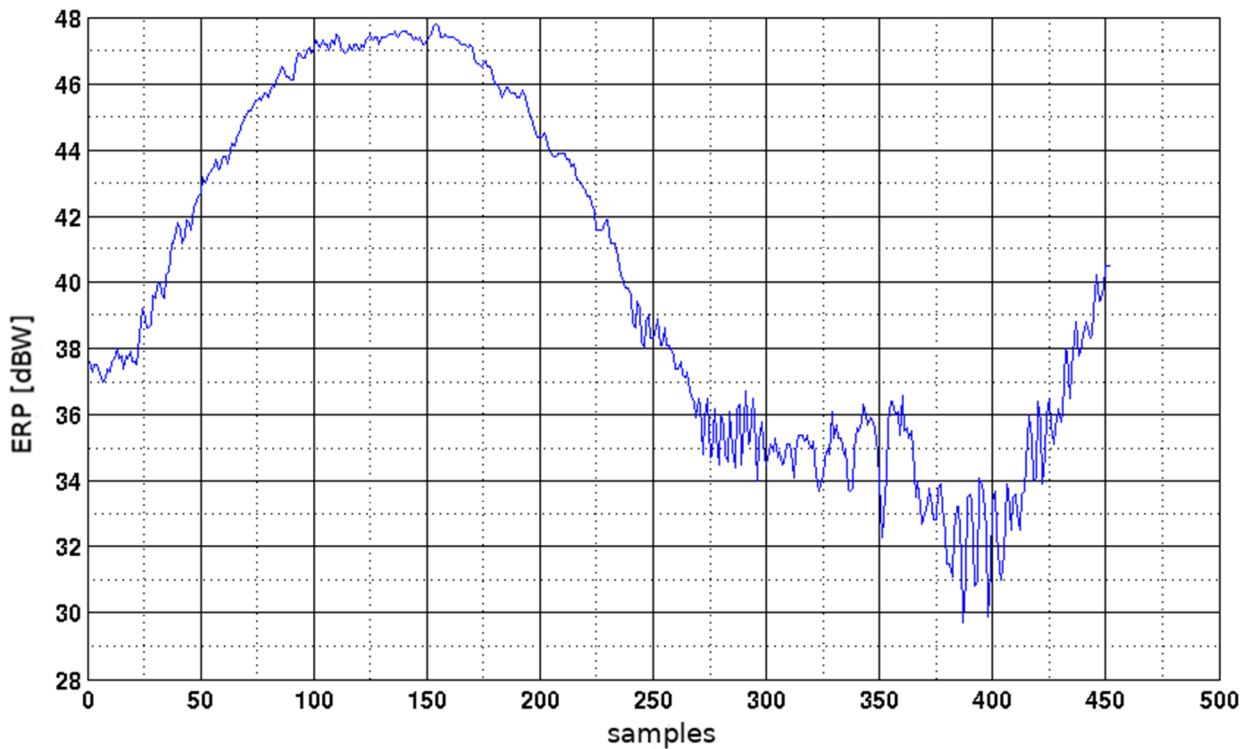
Deze resultaten moeten wel in perspectief worden gezien. Voor reguliere meetafstanden tot 1 km en uitgestraalde vermogens boven de 1 kW blijkt de ontvanger lineair te werken. Bij grotere afstanden zal deze minimale vermogensgrens wel hoger gaan liggen vanwege het grotere padverlies⁴¹ en het daarmee zwakker RF signaal. Uit sectie 5.4 komt naar voren dat de verschillen in signaal tussen de maxima en minima tijdens de propagatievlucht veel groter zijn in gebieden van het directionele antennediagram waar het RF signaal zwak wordt uitgezonden: 'de achterkant van de antenne'. Doordat de gekozen middeling sterke signalen relatief bevoordeelt, wordt daardoor het gemeten uitgestraalde vermogen aan de 'achterkant van de antenne' te hoog gemeten. In hoofdstuk 4 meetonzekerheid is verder ingegaan op de gekozen implementatie van de middeling van signalen.

5.7 METEN VAN HET ANTENNEDIAGRAM VAN DE MEETANTENNE

Om het antennediagram van de meetantenne te verifiëren is een meting uitgevoerd waarbij de helikopter rond zijn as is gedraaid op een punt in de hoofdstraalrichting van de FM zendantenne. De resultaten zijn in figuur 5.7.1 weergegeven. Hier is het uitgestraalde vermogen uitgezet tegen de samples. Doordat de helikopter niet de hoek van de helikopter registreert, kunnen de meetwaarden niet omgezet worden naar hoeken. Uit het figuur kan worden afgeleid dat de meetantenne een relatieve grote openingshoek heeft van ongeveer 135 graden. Daarnaast is de variatie in de hoofdstraalrichting van de antenne laag (< 0,5 dB). Hiermee is de meetantenne ongevoelig voor richtfouten.

Ook kan uit figuur 5.7.1 worden afgeleid dat de lokale variaties op het antennediagram erg klein zijn; minder dan 0,1 dB. Dit betekent dat de helikopter (reflecties) geen significante invloed lijkt te hebben op de metingen. Er zijn ook geen andere aanwijzingen dat de helikopter invloed heeft op de meetresultaten.

⁴¹ Draadloze signalen zoals een FM signaal verzwakken naarmate de afstand groter wordt. Deze verzwakking wordt ook wel padverlies (of paddemping) genoemd.



Figuur 5.7.1: Gemeten antennediagram van de meetantenne

5.8 INVLOED VERSCHILLENDE MIDDELINGSMETHODES OP HET ANTENNEDIAGRAM

Uit het hoofdstuk meetonzekerheid (hoofdstuk 4) blijkt dat de geïmplementeerde middelingsmethode niet optimaal is gekozen. In de door het agentschap gekozen methode worden ruwe meetsamples in het lineaire domein gemiddeld. Het is beter om de mediane waarde te kiezen in het logaritmische domein. De gekozen implementatie van het agentschap bevoordeelt namelijk sterkere meetwaarden licht. Meer informatie hierover is te vinden in het vorige hoofdstuk 4.

De invloed van de middelingsmethode moet wel in perspectief worden gezien. De variatie in ruwe signaalwaarden is laag. De verwachte invloed van de middelingsmethode zal daarom ook een beperkte invloed hebben.

In de volgende tabellen wordt het antennediagram getoond voor respectievelijk een omnidirectioneel (figuur 5.8.1) en directioneel antennediagram (figuur 5.8.2) waarbij de middelingsmethode is gevarieerd.

Omnidirectioneel antennediagram			
graden	AT implementatie (dBW)	mediaan (dBW)	verschil (dB)
0	39.5	39.6	0.1
10	40.3	40.3	0
20	40.4	40.4	0
30	39.5	39.5	0
40	38.5	38.4	-0.1
50	39.2	39.2	0
60	40.8	40.7	-0.1
70	41.1	41.2	0.1
80	40.7	40.8	0.1
90	39.1	39	-0.1
100	38	38	0
110	38.4	38.4	0
120	38.8	38.8	0
130	37.6	37.6	0
140	35.8	35.7	-0.1
150	36.5	36.6	0.1
160	37.8	37.8	0
170	38.4	38.4	0
180	37.9	37.9	0
190	37.4	37.4	0
200	37.4	37.5	0.1
210	37.9	37.9	0
220	37	37	0
230	34.9	35	0.1
240	36	36	0
250	38.1	38.2	0.1
260	39.4	39.5	0.1
270	40	40	0
280	38.5	38.7	0.2
290	36.4	36.3	-0.1
300	35.5	35.5	0
310	38.5	38.4	-0.1
320	39.1	39.2	0.1
330	39.5	39.5	0
340	39	39	0
350	39.3	39.3	0
gemiddeld			0.0 dB

Tabel 5.8.1: Omnidirectioneel antennediagram 2 voor verschillende middelingsmethodes

Directioneel antennediagram			
graden	AT implementatie (dBW)	mediaan (dBW)	verschil (dB)
0	48.5	48.6	0.1
10	47.9	47.9	0
20	48	48.1	0.1
30	47.1	47.1	0
40	43.9	44	0.1
50	42	42	0
60	44	44.1	0.1
70	44.4	44.3	-0.1
80	43.5	43.5	0
90	42.5	42.5	0
100	41.6	41.7	0.1
110	39.3	39.3	0
120	35.4	35.3	-0.1
130	31	31	0
140	25.6	25.4	-0.2
150	24.7	24.4	-0.3
160	24.1	23.4	-0.7
170	24.4	24.1	-0.3
180	24.4	24.1	-0.3
190	21.5	21.4	-0.1
200	23.6	23.6	0
210	26.2	26.3	0.1
220	25	24.9	-0.1
230	26.8	26.8	0
240	28.4	28.3	-0.1
250	29.3	29.2	-0.1
260	27.9	27.8	-0.1
270	26.4	26.3	-0.1
280	29.2	29.4	0.2
290	35.5	35.4	-0.1
300	40	39.7	-0.3
310	44	44	0
320	45.6	45.6	0
330	47.7	47.7	0
340	48.3	48.5	0.2
350	48.8	48.9	0.1
gemiddeld			-0.05 dB
Gemiddeld (blauwe regels)			-0.14 dB

Tabel 5.8.2: Directioneel antennediagram 2 voor verschillende middelingsmethodes

Analyse

Uit de tabellen 5.8.1 en 5.8.2 blijkt dat er over het algemeen weinig verschil is tussen beide middelingsmethoden. Wel is er een groter verschil bij lagere uitgestraalde vermogens onder de 1 kW. Dit is ook te zien in tabel 5.8.2 (blauw gearceerd). De gekozen middelingsmethode door Agentschap Telecom geeft typisch 0.1 tot 0.3 dB te hoge waarden⁴² met een enkele uitschieter. Bij afronding naar hele dB waarden zoals in de implementatie van het agentschap wordt toegepast, zou dit kunnen resulteren in een 1 dB lager uitgestraalde vermogen in het gemeten antennediagram.

De oorzaak waarom de verschillen in middelingsmethoden groter zijn bij lagere uitgestraalde vermogens is dat de verschillen tussen minima en maxima toenemen als aan de 'achterkant' van een directionele antenne wordt gemeten (zie sectie 5.4). Bij grotere lokale signaalvariaties zal de bevoordeling van sterkere signalen meer zijn bij lineair middelen van de meetwaarden dan als voorde mediane waarde wordt gekozen.

5.9 INVLOED MIDDELINGSVENSTER OP ANTENNEDIAGRAM

In de huidige opzet van de metingen wordt een middelingsvenster van 6 graden gebruikt per 10-graden hoek. De keuze voor 6-graden is pragmatisch. Bij een grotere hoek kunnen sterkere veranderingen in het antennediagram niet goed worden weergegeven, doordat de middeling deze verandering onderdrukt. Bij kleinere hoeken neemt het aantal meetwaarden af, waardoor ook de meetnauwkeurigheid afneemt.

In onderstaande tabel is het middelingsvenster gevarieerd met 6 graden (± 3 graden, standaardinstelling) met 2 graden (± 1 graden) en met 10 graden (± 5 graden) voor een directioneel antennediagram. Dit is herhaald voor de tweede vlucht.

⁴² Hierbij wordt als "ground truth" de nieuwe middelingsmethode uit het vorige hoofdstuk gebruikt.

Directioneel antennediagram vlucht 1

graden	2 graden venster (dBW)	6 graden venster (dBW)	10 graden venster (dBW)	verschil 6 en 2 graden (dB)	verschil 10 en 2 graden (dB)
0	48.5	48.5	48.5	0	0
10	47.9	47.9	47.9	0	0
20	48	48	48	0	0
30	47	47.1	47	0.1	0
40	43.9	43.9	44	0	0.1
50	41.8	42	42.2	0.2	0.4
60	44.2	44	43.9	-0.2	-0.3
70	44.3	44.4	44.4	0.1	0.1
80	43.5	43.5	43.6	0	0.1
90	42.4	42.5	42.6	0.1	0.2
100	41.7	41.6	41.5	-0.1	-0.2
110	39.3	39.3	39.3	0	0
120	35.3	35.4	35.6	0.1	0.3
130	31.1	31	31.1	-0.1	0
140	25.5	25.6	25.8	0.1	0.3
150	24.8	24.7	24.6	-0.1	-0.2
160	23.5	24.1	23.9	0.6	0.4
170	24	24.4	24.3	0.4	0.3
180	24.4	24.4	24.4	0	0
190	21.6	21.5	21.6	-0.1	0
200	23.4	23.6	23.7	0.2	0.3
210	26.2	26.2	26	0	-0.2
220	25	25	25.1	0	0.1
230	26.9	26.8	26.7	-0.1	-0.2
240	28.3	28.4	28.5	0.1	0.2
250	28.9	29.3	29.4	0.4	0.5
260	27.9	27.9	27.9	0	0
270	26.1	26.4	26.7	0.3	0.6
280	29.2	29.2	29.6	0	0.4
290	35.4	35.5	35.6	0.1	0.2
300	39.7	40	40.1	0.3	0.4
310	44.1	44	44	-0.1	-0.1
320	45.4	45.6	45.9	0.2	0.5
330	47.6	47.7	47.6	0.1	0
340	48.3	48.3	48.4	0	0.1
350	48.9	48.8	48.9	-0.1	0
gemiddeld				0.1 dB	0.2 dB

Tabel 5.10.1: Directioneel antennediagram 1 met verschillende middelingsvensters

Directioneel antennediagram vlucht 2					
graden	2 graden venster (dBW)	6 graden venster (dBW)	10 graden venster (dBW)	verschil 6 en 2 graden (dB)	verschil 10 en 2 graden (dB)
0	47.6	47.6	47.6	0	0
10	47.6	47.5	47.6	-0.1	0
20	47.8	47.7	47.7	-0.1	-0.1
30	46.2	46.3	46.3	0.1	0.1
40	43.1	43.2	43.3	0.1	0.2
50	42.1	42.2	42.2	0.1	0.1
60	43.6	43.8	43.7	0.2	0.1
70	44.3	44.2	44.2	-0.1	-0.1
80	43.8	43.8	43.8	0	0
90	42.3	42.4	42.4	0.1	0.1
100	40.9	40.9	41	0	0.1
110	39.5	39.6	39.6	0.1	0.1
120	36	36	36	0	0
130	31.7	31.8	31.8	0.1	0.1
140	26.7	26.7	27	0	0.3
150	25.9	25.8	25.6	-0.1	-0.3
160	24.4	24.5	24.6	0.1	0.2
170	24.8	25	24.9	0.2	0.1
180	24.6	24.5	24.4	-0.1	-0.2
190	22	22.2	22.4	0.2	0.4
200	24.2	23.9	23.9	-0.3	-0.3
210	25.4	25.5	25.6	0.1	0.2
220	24.2	24.2	24.6	0	0.4
230	26.1	26.3	26.5	0.2	0.4
240	28.4	28.3	28.5	-0.1	0.1
250	29.4	29.5	29.5	0.1	0.1
260	27.9	27.9	27.9	0	0
270	26.1	26.5	26.6	0.4	0.5
280	29.4	29.7	29.9	0.3	0.5
290	35.2	35.1	35.3	-0.1	0.1
300	39.7	39.9	39.9	0.2	0.2
310	42.6	42.8	43	0.2	0.4
320	45.3	45.3	45.2	0	-0.1
330	47	46.9	46.9	-0.1	-0.1
340	48.2	48.2	48.1	0	-0.1
350	48.2	48.2	48.2	0	0
gemiddeld				0.0 dB	0.1 dB

Tabel 5.10.2: Directioneel antennediagram 2 met verschillende middelingsvensters

Directioneel antennepatroon vlucht 1					
graden	2 graden venster (dBW)	6 graden venster (dBW)	10 graden venster (dBW)	verschil 2 en 6 graden (dB)	verschil 10 en 6 graden (dB)
0	48.7	48.6	48.6	-0.1	-0.1
10	47.3	47.9	47.9	0.6	0.6
20	48.1	48.1	48.1	0	0
30	47.1	47.1	47.1	0	0
40	44	44	44	0	0
50	41.8	42	42.2	0.2	0.4
60	44.2	44.1	43.9	-0.1	-0.3
70	44.3	44.3	44.4	0	0.1
80	43.5	43.5	43.5	0	0
90	42.4	42.5	42.6	0.1	0.2
100	41.8	41.7	41.7	-0.1	-0.1
110	39.3	39.3	39.3	0	0
120	35.3	35.3	35.4	0	0.1
130	31	31	31	0	0
140	25.4	25.4	25.5	0	0.1
150	24.3	24.4	24.4	0.1	0.1
160	23.1	23.4	23.4	0.3	0.3
170	23.6	24.1	24.1	0.5	0.5
180	24.3	24.1	24.1	-0.2	-0.2
190	21	21.4	21.3	0.4	0.3
200	23.1	23.6	23.6	0.5	0.5
210	26.1	26.3	26	0.2	-0.1
220	24.9	24.9	25	0	0.1
230	27	26.8	26.6	-0.2	-0.4
240	28.1	28.3	28.4	0.2	0.3
250	28.5	29.2	29.4	0.7	0.9
260	27.7	27.8	27.8	0.1	0.1
270	26.2	26.3	26.5	0.1	0.3
280	29.4	29.4	29.4	0	0
290	35.4	35.4	35.4	0	0
300	39.6	39.7	39.6	0.1	0
310	44	44	44	0	0
320	45.3	45.6	45.6	0.3	0.3
330	47.4	47.7	47.6	0.3	0.2
340	48.6	48.5	48.5	-0.1	-0.1
350	48.9	48.9	48.9	0	0
gemiddeld				0.1 dB	0.1 dB

Tabel 5.10.3: Directioneel antennediagram 1 met verschillende middelingsvensters met alternatieve middelingsmethode

Directioneel antennepatroon vlucht 2					
graden	2 graden venster (dBW)	6 graden venster (dBW)	10 graden venster (dBW)	verschil 6 en 2 graden (dB)	verschil 10 en 2 graden (dB)
0	48.5	48.5	48.5	0	0
10	47.5	47.4	47.3	-0.1	-0.2
20	46.9	47	47	0.1	0.1
30	45.8	45.7	45.7	-0.1	-0.1
40	42.1	42	42	-0.1	-0.1
50	41.3	41.4	41.6	0.1	0.3
60	43.9	43.7	43.5	-0.2	-0.4
70	43.9	43.9	43.9	0	0
80	43.4	43.2	43.2	-0.2	-0.2
90	42.4	42.4	42.4	0	0
100	41.9	41.8	41.8	-0.1	-0.1
110	39.7	39.7	39.7	0	0
120	36.2	36.1	36.1	-0.1	-0.1
130	31.3	31.3	31.3	0	0
140	23.1	23.5	23.8	0.4	0.7
150	24.1	23.8	24	-0.3	-0.1
160	27	26.7	26.3	-0.3	-0.7
170	25.8	25.5	25.4	-0.3	-0.4
180	20.7	20.9	21.2	0.2	0.5
190	19.6	19.6	19.6	0	0
200	25.9	26	25.9	0.1	0
210	32.2	32.1	32.1	-0.1	-0.1
220	35.8	35.4	35.4	-0.4	-0.4
230	38.6	38.6	38.6	0	0
240	41.3	40.8	40.7	-0.5	-0.6
250	41.2	41.1	41.2	-0.1	0
260	41.1	41.1	41.1	0	0
270	41.1	41.1	41.1	0	0
280	39.7	39.6	39.6	-0.1	-0.1
290	35.7	36	36.2	0.3	0.5
300	40.3	40	39.9	-0.3	-0.4
310	45.6	45.6	45.5	0	-0.1
320	46.2	46.4	46.5	0.2	0.3
330	47.3	47.5	47.5	0.2	0.2
340	48.4	48.3	48.2	-0.1	-0.2
350	49	49	48.9	0	-0.1
gemiddeld				0.0 dB	0.0 dB

Tabel 5.10.4: Directioneel antennediagram 2 met verschillende middelingsvensters met alternatieve middelingsmethode

Analyse

Uit de meetresultaten blijkt dat er weinig verschil is in antennediagrammen tussen de verschillende venstergroottes. De venstergrootte heeft geen sterke invloed op het gemeten antennediagram. Wel is een kleine offset waarneembaar tussen de 0,1 en 0,2 dB ten opzichte van het 2-graden venster. Deze offset neemt toe bij een groter venster (10 graden). Ook zijn de verschillen groter aan de 'achterkant' van de antenne of bij sterke veranderingen in het antennediagram. In zo'n geval zijn de verschillen typisch 0,2 tot 0,3 dB. De verklaring hiervoor is dat in deze gebieden de verschillen tussen minima en maxima groter zijn (zie sectie 5.4). Bij een grotere venstergrootte is de kans op sterkere signalen groter en de gekozen middelingsmethode bevoordeelt dan (licht) sterkere meetwaarden.

Een aanbeveling is om de nieuwe middelingsmethode te implementeren (mediane waarde). Deze gebruikt de mediane meetwaarde en is daardoor minder gevoelig voor sterke meetwaarden. In tabel 5.10.3 en tabel 5.10.4 worden dezelfde resultaten getoond met deze alternatieve middelingsmethode. Te zien is dat de gemiddelde offset tussen de verschillende venstergroottes kleiner is geworden en er geen relatie meer is tussen venstergrootte en offset. Ook laten deze tabellen zien dat bij dezelfde antennehoek, maar verschillende venstergrootte de gemeten uitgestraalde vermogensverschillen niet zijn afgenomen ten opzichte van de originele middelingsmethode. Dit is een aanwijzing dat inderdaad de verschillen in minima en maxima groter zijn voor deze hoeken. Dit kan opgelost worden door of langer te meten of om de meetnauwkeurigheid te verhogen in dergelijke gebieden (zie sectie 4.3).

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 CONCLUSIES

In dit validatieonderzoek is de meetprocedure onderzocht die Agentschap Telecom gebruikt om FM-omroep antennediagrammetingen uit te voeren. Agentschap Telecom voert dergelijke metingen uit in het kader van toezicht op de naleving van FM-omroepvergunningen. De algemene conclusie uit dit onderzoek is dat de gehanteerde methodiek valide en reproduceerbaar is.

Allereerst is in hoofdstuk 2 de gehanteerde meetmethodiek vergeleken met andere uit de literatuur bekende methodes om antennediagrammen te meten. De huidige meetmethode is gebaseerd op het ITU-R SM2056 rapport en wordt als zodanig toegepast door het agentschap. In de meetopstelling is gekozen voor inbouw van de meetapparatuur in een helikopter, maar de meetmethode zou ook kunnen worden toegepast voor metingen met een drone. Naast het ITU-R SM2056 rapport zijn nog twee alternatieve methodes gevonden bij de CEPT/ECC, waarbij het antennediagram wordt gemeten door middel van een meetauto. De alternatieve methodes zijn samen met de door het agentschap gehanteerde methode op een aantal criteria beoordeeld. Voordeel van de huidige meetopzet is de hogere nauwkeurigheid ten opzichte van andere methodes. Ook kan met de huidige meetopzet snel een antennediagram worden gemeten. Nadeel is de relatief lange voorbereidingstijd. Daarnaast is de huidige implementatie van het agentschap niet geschikt om een antennediagram te meten van laagvermogen FM zenders (lager dan 1 kW) doordat het meetbereik van de meetontvanger niet optimaal is gekozen. De ITU-R SM2056 methode is op zich wel toepasbaar voor laagvermogen zenders. Doordat het agentschap een criterium van minimaal 1 kW uitgestraald vermogen gebruikt, kan dit niet als nadeel worden aangemerkt.

Een tweede onderdeel van het onderzoek betrof het uitvoeren van metingen aan de meetopstelling in een laboratoriumomgeving. Hier zijn de individuele componenten van het meetsysteem onderzocht. Dit betreft het RF meetsysteem, de verwerking door de RadiMation software en Matlab scripts. De algemene uitkomst is dat het meetsysteem correct is geïmplementeerd. Om de nauwkeurigheid te verhogen zijn wel een aantal aandachtspunten geïdentificeerd. Allereerst sluit het meetbereik van de Rohde & Schwarz meetontvanger niet optimaal aan op de verwachte signaalniveaus. Dit geldt vooral voor zwakkere FM signalen. Ook vertoont de meetontvanger bij signalen minder dan 10 dB vanaf de ruisvloer een lichte niet-lineariteit. Hierdoor zullen de uitgestraalde vermogens van zwakkere FM signalen (licht) worden overschat. Een tweede aandachtspunt is de gekozen middelingsmethode. De huidige implementatie bevoordeelt licht sterke meetwaarden bij de middeling van ruwe meetdata.

In het hoofdstuk meetnauwkeurigheid is de methodiek voor bepaling van de meetnauwkeurigheid onderzocht. In het algemeen kan worden gesteld dat de onzekerheden van de individuele onderdelen aan de hoge kant zijn. Dit is volgens het agentschap een bewuste keuze. In de praktijk zijn deze onzekerheden meestal lager. Ook kan worden geconcludeerd dat de meetonzekerheidsanalyse een goede indicatie geeft van de onzekerheid in het meetsysteem. Op basis van de alternatieve onzekerheidsanalyse die in dit rapport wordt beschreven zal de meetnauwkeurigheid voor omnidirectionele antennediagrammen 1 dB zijn. Voor directionele antennediagrammen zal de meetnauwkeurigheid buiten de hoofdbundel groter zijn, maximaal 1.5 dB. In de alternatieve meetonzekerheidsanalyse wordt onderscheid gemaakt tussen foutbronnen die één realisatie hebben gedurende een vlucht versus foutbronnen die elke meetwaarde veranderen. De onzekerheid door de laatste categorie kan met behulp van middeling worden gereduceerd.

In september 2017 heeft een verificatievlucht plaatsgevonden om het algemene systeem te valideren, maar ook om een aantal experimenten uit te voeren. De metingen hebben plaatsgevonden in Rotterdam. De Waalhaventoren is uitgekozen, omdat dit – vanwege omringende hoogbouw en daardoor grotere reflecties – als een worst-case locatie kan worden beschouwd. Uit de metingen blijkt dat de meetmethodiek reproduceerbaar is. Onafhankelijke metingen van hetzelfde antennediagram leveren dezelfde meetwaarden op. Daarnaast blijkt dat de signaalvariëaties aan de ‘achterkant’ van de antenne groter zijn dan in de hoofdbundel. In deze gevallen neemt de meetonzekerheid toe, zoals blijkt uit de analyse van de meetonzekerheid.

Voor de antennediagrammetingen die in het verleden zijn uitgevoerd, hebben de uitkomsten van dit rapport de volgende invloed. Voor metingen in de hoofdbundel van de antenne zijn de uitkomsten onveranderd. Voor metingen aan de ‘achterkant’ van een antenne is het uitgestraalde vermogen te hoog gemeten. De exacte afwijking is afhankelijk van een aantal factoren en in dit rapport zijn individuele metingen uit het verleden niet specifiek onderzocht. De inschatting van de universiteit is dat bij de gemeten directionele antennediagrammen de daadwerkelijke afwijking aan de ‘achterkant’ van de antenne in de meeste gevallen kleiner is dan 1 dB.

6.2 AANBEVELINGEN

In dit validatieonderzoek heeft Universiteit Twente de meetmethodiek en de verwerking van de ruwe meetdata in meetwaarden onderzocht. De gebruikte meetmethodiek is gebaseerd op een methode die 15 jaar geleden is ontwikkeld en ook internationaal door andere landen/ITU is geaccepteerd. Er zijn een aantal verbeterpunten geïdentificeerd waarmee vooral de nauwkeurigheid van het meetsysteem kan worden verhoogd:

- Lagere RF verzwakking
 - o In de huidige meetopstelling is door het agentschap gekozen voor een relatief grote RF verzwakking gekozen. De verwachte signaalniveaus komen niet volledig overeen met het meetbereik van de meetontvanger waardoor het systeem minder goed het vermogen van zwakkere FM zenders kan meten. Het meetbereik van de meetontvanger biedt voldoende ruimte om te kiezen voor een lagere verzwakkerstand. (Zie sectie 3.2.1 voor meer informatie.)
- Andere middelingsmethode
 - o In de huidige methode worden sterke signalen licht bevoordeeld. Hierdoor zal het gemeten uitgestraalde vermogen licht worden overschat. Door te kiezen voor de mediane waarde kan dit worden opgelost. (Zie sectie 3.5.1 en sectie 5.8 voor meer informatie.)
- Onzekerheidsanalyse
 - o Met de alternatief gepresenteerde meetonzekerheidsanalyse kan de nauwkeurigheid van het systeem beter worden bepaald doordat onderscheid gemaakt wordt tussen foutbronnen die één realisatie hebben gedurende een vlucht versus foutbronnen die elke meetwaarde veranderen. (Zie sectie 4.3 voor meer informatie)
- Meer ronden om de zendtoren bij directionele antennediagrammen
 - o Uit de verificatievlucht kan worden geconcludeerd dat bij het bepalen van zwakkere uitgestraalde FM vermogens buiten de hoofdbundel er twee zaken spelen. Door een sterkere invloed van reflecties neemt de meetonzekerheid toe tot 1.5 dB. Daarnaast kunnen zwakke uitgestraalde zendvermogens, lager dan 1 kW, vallen in het niet-lineaire deel van de meetontvanger. Hierdoor worden deze uitgestraalde vermogens licht overschat tot 1 dB. Het laatste punt kan worden opgelost via een lagere RF verzwakking (zie eerste

verbeterpunt). Voor het eerste aangehaalde punt, sterkere invloed van reflecties, zou mogelijk langer meten (meer rondren om de zendtoren) een oplossing kunnen bieden om de meetonzekerheid te reduceren. (Zie sectie 5.4 en sectie 5.6.)

- Aanvullende criteria voor randvoorwaarden meting
 - o Het agentschap heeft al een aantal basiscriteria opgesteld voor uitvoeren van de metingen, zoals minimaal uitgestraalde vermogen en minimale antennehoogte. Een aanbeveling is om dit uit te breiden met (concrete) criteria voor sterke nabuurlenders (FM) op dezelfde antennemast en de aanwezigheid van hoge gebouwen die de meting nadelig kunnen beïnvloeden (reflecties). Hiervoor is wel aandacht in de meetmethodiek, maar worden geen concrete waarden genoemd. (Zie sectie 2.2).

Ten slotte heeft de technologie zich gedurende deze jaren natuurlijk verder ontwikkeld. Vooral de opkomst van drones biedt nieuwe mogelijkheden. Inmiddels zijn er een aantal commerciële partijen die dergelijke metingen uit kunnen voeren. De verwachting is dat internationaal dergelijke metingen zich de komende jaren verder zullen uitbreiden. Een aanbeveling is om te onderzoeken in hoeverre metingen met een drone meerwaarde bieden ten opzichte van de huidige methodiek om antennediagrammen met een helikopter te meten. Wel zijn omroepantennes vaak 120 meter of hoger geplaatst. Momenteel is er geen wettelijk kader om een (professionele) drone te gebruiken boven deze hoogte.

7 GERAADPLEEGDE BRONNEN

- [1] T.S. Rappaport, "Wireless Communications: Principles and Practice (2nd Edition)," Prentice Hill, 2002
- [2] A.F. Molisch, "Wireless Communication," Wiley – IEEE, 2011
- [3] ITU, Report ITU-R SM.2056 "Airborne verification of antenna patterns of broadcasting stations" editie 2012
- [4] CEPT, ECC Recommendation (16)04 "Determination of the radiated power from FM sound broadcasting stations through field strength measurements in the frequency band 87.5 to 108 MHz"
- [5] CEPT ECC Workgroup FM22, "FM-BC ERP measurements along a route" / FM22(16)14 "Determination of the radiated power of radio station through field strength measurement along a route"
- [6] Dare!! Instruments, "Handleiding RadiMation EMC software" en gerelateerde documenten zoals bestandsformaten en helimeetsysteem berekeningen
- [7] Agentschap Telecom, "Antennediagrammetingen in de FM-omroepband", april 2013
- [8] Agentschap Telecom, "Matlab-scripts voor verwerking meetgegevens"
- [9] Universiteit Twente "A T-DAB field trial using a low-mast infrastructure", december 2006
<https://research.utwente.nl/en/publications/a-t-dab-field-trial-using-a-low-mast-infrastructure-2>
- [10] ITU, ITU-R SM.1268-3, "SM.1268 : Method of measuring the maximum frequency deviation of FM broadcast emissions at monitoring stations"

8 BEGRIPPENLIJST

2G/3G/4G/5G – Hiermee worden mobiele communicatienetwerken bedoeld. Een 2G netwerk is een GSM netwerk, 3G is UMTS, 4G LTE en 5G is een toekomstige standaard voor mobiele communicatienetwerken.

DAB+ – Digital Radio via de ether, de digitale opvolger van FM.

DVB-T – Digitale TV via de ether, ook bekend als Digitenne (merknaam van KPN).

CEPT - The European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT) is opgericht op 26 juni 1959 als een Europees coördinatieorgaan tussen de verschillende nationale overheidsorganisaties op het gebied van telecom en post.

CEPT ECC – Een onderdeel van de CEPT, Electronic Communications Committee welke gericht is op elektronische communicatie waaronder communicatie via de ether.

DANL – Displayed Average Noise Level

dBm - uitgestraalde zendvermogens worden bij technische berekeningen naar het logaritmische domein omgerekend. dBm is hiervan de eenheid. Ten opzichte van dBW wordt hier de referentie ten opzichte van 1 mW gebruikt in plaats van 1 W. Hierdoor zijn dBm waarden altijd 30 dB hoger dan dBW waarden. Een 1 kW zender is bijvoorbeeld 60 dBm.

dBW – uitgestraalde vermogens worden bij technische berekeningen naar het logaritmische domein omgerekend. dBW is hiervan de eenheid. Een 1 kW uitgestraald zendvermogen komt overeen met 30 dBW

DGPS – Differential Global Positioning System, een nauwkeuriger manier om een positie te bepalen. Dit is nauwkeuriger dan het reguliere GPS systeem.

e.r.p – effective radiated power, het uitgestraalde vermogen van een FM zender

FM – Frequency Modulation. Het geluid wordt door middel van frequentieverschillen gemoduleerd/overgezonden.

ITU – International Telecommunication Union, een internationaal orgaan op het gebied van telecommunicatie. Het onderdeel ITU-R houdt zich bezig met communicatie via de ether (radio).

Matlab – Matlab® is een technische softwareomgeving van the Mathworks

RadiaMation – RadiMation® is EMC software van Dare!! Instruments

RF – Radio Frequency. Deze afkorting wordt gebruikt om aan te geven dat een onderdeel in de meetopstelling de radio golven verwerkt.