



M.H. Trompstraat 6
3601 HT Maarssen
Nederland
Tel: + 31 (0) 346 284004
Email: info@totech.nl
Web: www.totech.nl
KvK: 30169033
BTW: NL001961734B19

Halve Golf Dipool t.b.v. NVIS communicatie. Half Wave Dipole for NVIS communication.

Eerste publicatie: 4 dec 2006

Versie: 1.7, dec 2019, Wim Telkamp

Dit document is slechts ter informatie geplaatst op de Website van TeTech en is bedoeld voor persoonlijk, niet commercieel gebruik. TeTech is niet aansprakelijk voor enige directe of indirecte schade voortvloeiende uit het gebruik van enig gegeven uit dit document. Kopiëren van dit document is toegestaan uitsluitend t.b.v. niet commercieel gebruik, mits in zijn geheel, ongewijzigd en voorzien van bronvermelding. Locatie <http://www.totech.nl/divers/NVISantenneNL1.pdf>. Copyright (c) 2006-2019, TeTech.

Samenvatting.

Tijdens de JOTA (Jamboree On The Air) van de Jan Campert Groep vinden de meeste radiocontacten, waarbij de scouts zelf het woord voeren, plaats in de Nederlandse taal. Om de scouts toch het nodige van HF mee te laten pikken en contacten te leggen door geheel Nederland en België, is het lage HF deel goed bruikbaar. In het 2..10 MHz gebied worden verticaal omhoog gerichte golven sterk teruggebogen (gereflecteerd, F-laag). Vanwege de hoge opstralingshoek is het pad door de (absorberende) D-laag relatief kort.

Deze manier van werken staat bekend onder de naam NVIS (Near Vertical Incidence Sky Wave). Voor amateurgebruik is de 80 m en 40 m prima geschikt. 100 W zendvermogen is voldoende om binnen het dekkingsgebied met S9 of meer binnen te komen bij het tegenstation. Gezien de huidige zonnevlek cyclus (2006), is de 80m band (3.6 MHz) prima geschikt.

Dit document behandelt de halve golf dipool (inclusief ontwerpafwegingen en ontwerpprocedure) welke ontworpen is voor de JOTA (Jamboree On The Air). De bedoeling is dat afstanden tot ongeveer 400 km (NL, BE en DE) overbrugd kunnen worden. Op deze manier kunnen eenvoudig contacten gelegd worden tussen diverse JOTA stations op HF via SSB. Daarnaast wordt designinformatie gegeven t.b.v. zelfbouw van dipoolantennes. De ontwerpgegevens zijn ook toepasbaar voor bijvoorbeeld VHF/UHF reflectorantennes.

Gebleken is dat bij relatief laag opgestelde dipolen ($h/\lambda < 0.125$) de verliezen ten gevolge van de eindige grondgeleiding sterk op kunnen lopen (tot meer dan 90%). Samen met de overige verliezen resulteert dit in een antennerendement van minder dan 10% en een overall gain van rond de -3 dBi. Dit verlies is sterk te verminderen door de dipool wat hoger te plaatsen of het aanbrengen van zwevende ground wires.

Een overall gain van rond de 6 dBi is haalbaar met één enkele halve golf dipool (gevoed via balun/coax combinatie of kippenladder).

Inhoudsopgave.

1. Inleiding.	3
2. Near Vertical Incidence Skywave (NVIS) propagation.	3
3. Eigenschappen halve golf open dipool.	5
3.1. <i>Ontstaan van straling.</i>	5
3.2. <i>Impedantie, Q-factor en Bandbreedte.</i>	7
3.2.1. Stralingsweerstand.	7
3.2.2. Q-factor en bandbreedte van de halve golf dipool.	8
3.2.3. Vergroting bandbreedte.	10
3.3. <i>Verliezen.</i>	11
3.3.1. geleidingsverliezen.	11
3.3.2. Verlies t.g.v. plastic isolatie.	12
4. Eigenschappen halve golf open dipool over ideaal grondvlak.	14
4.1. <i>Reflectie op ideaal grondvlak.</i>	14
4.2. <i>Stralingsdiagram halve golf dipool boven grondvlak.</i>	15
4.3. <i>Impedantie en bandbreedte van dipool.</i>	17
5. Eigenschappen halve golf open dipool over echte grond.	20
5.1. <i>Reflectie op "echte" grond.</i>	20
5.2. <i>Stralingsdiagram.</i>	21
5.3. <i>Verliezen.</i>	22
5.4. <i>De ingangssweerstand en bandbreedte.</i>	23
5.5. <i>Vermindering verliezen.</i>	23
6. Aanpassing en symmetrie.	25
6.1. <i>Symmetrie.</i>	25
6.2. <i>Aanpassing.</i>	25
7. De uiteindelijke antenne.	27
7.1. <i>Overwegingen en mogelijkheden.</i>	27
7.2. <i>Afmetingen en montagedetails.</i>	27
7.3. <i>Simulatieresultaten.</i>	30
7.4. <i>Praktijkresultaten.</i>	31
8. Andere varianten.	32
8.1. <i>Inverted V.</i>	32
8.2. <i>Hele golf dipool en 1.25λ dipool.</i>	32
8.3. <i>Dubbele hele of halve golf dipool</i>	32
8.4. <i>Horizontale geplaatste loop antennes.</i>	33
9. Slot.	34

1. Inleiding.

Tijdens de JOTA (Jan Campert Groep te Maarssen, www.jancampertgroep.nl) wordt normaal gesproken een FD4 antenne als allround HF antenne gebruikt. De resultaten vielen nogal tegen, matige signalen en relatief veel storing.

De meeste contacten waarbij de scouts het woord voeren, waren met Nederlandstalige stations, op 2 m en 80 m. Eind 2004 is het idee ontstaan om een antenne te bouwen, speciaal voor "lokaal" verkeer. De bedoeling is om op de lagere amateurbanden gebruik te maken van NVIS (Near Vertical Incidence Skywave). De antenne dient zoveel mogelijk vermogen naar boven te stralen, en het liefst zo min mogelijk in het horizontale vlak.

Naast het terrein van de scouting vereniging bevindt zich een weiland (helaas, niet in bezit van de vereniging) waar zonder problemen een 40 m lange antenne geplaatst kan worden. Voor de JOTA 2005 is het niet gelukt om de benodigde toestemming te verkrijgen, maar vlak voor de JOTA 2006 is het gelukt om gebruik te mogen maken van het weiland.

Dit document behandelt de gebruikte halve golf dipool (als NVIS antenne) en geeft informatie om zelf een afweging te kunnen maken tussen de diverse parameters (verliezen, bandbreedte, antennehoogte, etc) welke van belang zijn.

2. Near Vertical Incidence Skywave (NVIS) propagation.

Oppervlaktegolfpropagatie (zoals gebruikt door midden- en langegolfzenders) geeft op HF aanzienlijk meer demping. Door de afnemende oppervlakteweerstand van de grond bij toenemende frequentie (geringere indringdiepte), komt de oppervlaktegolf minder ver. Bovendien is voor oppervlaktegolfpropagatie een verticaal gepolariserende antenne nodig (verticale spriet). Om enig antennerendement te behalen is hiervoor een goed aardnet nodig welke in geval van mobiel bedrijf praktisch gezien niet realiseerbaar is. Communicatie via de grondgolf (bijvoorbeeld van horizontale naar horizontale dipool) geeft meestal nog meer demping en valt hiermee ook af.

De demping tussen twee antennes enkele honderden km uit elkaar, via oppervlakte golf of grondgolf propagatie, is daardoor onbruikbaar hoog. Er is echter een andere langere route, welke uiteindelijk minder demping geeft (en vaak onbewust gebruikt wordt).

In het 2 tot 10 MHz gebied (3..10 MHz overdag, 1.5..4 MHz 's nachts) komt een verticaal omhoog gestraalde golf via de ionosfeer behoorlijk sterk terug. Omdat de RF energie recht omhoog gaat, en weer nagenoeg recht naar beneden komt, is het pad door de D laag relatief kort, en daarmee ook de demping t.g.v. de D-laag. Reflectie vindt plaats op de F lagen (ong 300 km hoogte). Dit biedt mogelijkheden voor amateurgebruik op de 160, 80 en 40 m band.

De manier waarbij tot ongeveer 400 km gecommuniceerd wordt via ionosferische reflectie op HF, wordt aangeduid met de term "NVIS". Dit staat voor "Near Vertical Incidence Skywave" (nagenoeg verticaal invallende ruimtegolf). Een kenmerk is dat er (nagenoeg) geen dode zone (skip distance) is. Men kan stations werken die net te ver weg liggen voor VHF/UHF communicatiemiddelen.

INFO:

NVIS propagatie is volgens diverse literatuur voor het eerst op grote schaal bewust gebruikt door het Amerikaanse Leger in Vietnam t.b.v. communicatie over afstanden tot honderden kilometer. Voor het Leger zijn er diverse voordelen: eenvoudige antennes, terreingesteldheid (bergen, begroeiing, etc) van weinig invloed, plaatsbepaling via radiosignalen is lastiger, etc.

Tussen 2 NVIS antennes met 6dBi gain in verticale richting, kan men een demping verwachten in orde van 100 dB. Hetgeen neer komt op S9+20 dB ontvangst bij 50W ingangsvermogen (50uV in 50 Ohm = S9).

In geval van communicatie over erg korte afstand (8 km) kan je tussen twee horizontaal opgestelde dipolen (over goede grond) eveneens in orde van 100 dB demping verwachten. Er kan dan interferentie tussen de skywave en ground wave optreden. Om de kans op (hinderlijke) interferentie te voorkomen is het raadzaam om te voorkomen dat een verticaal gepolariseerde component ontstaat. In de praktijk komt dit neer op het gebruik van horizontaal opgestelde dipoolantennes, netjes symmetrisch gevoed (dus geen common mode component in de verticale coax of kippenladder).

Door de geringe afstraling in het horizontale vlak, heb je minder last van allerhande storing (welke dicht bij de grond ontstaat).

NVIS propagatie is dan ook een manier om met relatief lage vermogens, en eenvoudige antennes, goede verbindingen op te zetten over afstanden van 0 tot in orde van 400 km. In de praktijk, en vooral gedurende de nacht, zijn aanmerkelijk grotere afstanden te halen (in orde van 1500 km, met lagere ontvangstsinaalsterkte). Dit komt doordat gedurende de nacht de D-laag afwezig is waardoor de totale paddemping minder is dan overdag.

De antenne oriëntatie.

Als je NVIS propagatie zou zien als reflectie tegen een voor het menselijk oog onzichtbare spiegel, zou je verwachten dat de oriëntatie van de dipool in het platte vlak van belang is. De spiegeltheorie is echter een zeer vereenvoudigde benadering.

Tijdens het pad aarde - geïoniseerde laag en geïoniseerde laag - aarde, treedt polarisatiedraaiing op (Faraday rotatie). Bij HF is dit effect zeer sterk. De polarisatie van de EM-velden voor HF frequenties roteert een groot aantal keren. Tevens ontstaan meerdere golffronten met iets verschillende propagatiesnelheid. Het gevolg is dat je praktisch gezien niets kunt zeggen over de polarisatie van de gereflecteerde golf. Meestal is sprake van een circulaire component waardoor de oriëntatie van de dipool nagenoeg niet van belang is (dit kun je zelf met een kleine loop antenne voor ontvangst uit proberen).

Samengevat: Men kan de oriëntatie van de dipool (of dipolen) volledig laten bepalen door het gewenste stralingsdiagram. Als je bijvoorbeeld goede dekking in Nederland wenst, zou je een hele golf dipool in OW-richting kunnen plaatsen. Je hebt dan iets minder last van stations uit Oost-Europa.

3. Eigenschappen halve golf open dipool.

Indien u niet geïnteresseerd bent in de technische details, maar wel in de ontwerpgegevens en de constructie van de antenne, dan kunt u verder gaan met hoofdstuk 5.

De halve golf dipool is een veelvuldig gebruikte antenne. Hij is makkelijk te construeren en kan via een (mantelstroom)balun rechtstreeks op gangbare coaxiale kabels aangesloten worden. De eigenschappen zijn goed bekend waardoor hij ook veelvuldig in meetopstellingen gebruikt of voorgeschreven wordt.

Voor het aannemelijk maken van diverse eigenschappen, is enige achtergrond met betrekking van straling en reflectie van belang.

3.1. *Ontstaan van straling.*

Voor het kunnen verklaren van een aantal effecten is het van belang om iets te weten over het ontstaan van RF-straling en uitgestraald vermogen.

Alleen een wisselstroom (versnellende lading) is in staat om een stralingsveld op te wekken. Ieder deel van een antenne waar wisselstroom doorheen gaat, draagt bij aan het stralingsdiagram. De bijdrage aan de stralingsintensiteit in een bepaalde richting kan constructief maar ook destructief zijn (in fase of tegenfase bijdragen).

Met (stralings)vermogensdichtheid (Φ_p) wordt bedoeld het aantal W/m^2 dat passeert op zekere afstand (loodrecht op de uitbreidingsrichting). In geval van een stralingsveld zijn E en H in de tijd gezien in fase, maar staan ruimtelijk gezien loodrecht op elkaar. In dat geval geldt een relatief eenvoudige formule:

$$\Phi_p = E \cdot H = \frac{E^2}{377} \quad [W/m^2] \quad Z_{0v} = \frac{E}{H} \approx 377 \quad [\Omega, V/A]$$

Waarin: Φ_p = vermogensdichtheid in W/m^2 , E = elektrische veldsterkte in V/m , H = magnetische veldsterkte in A/m , Z_{0v} = impedantie (golfweerstand) van vrije veld (lucht, vacuüm) in Ohm.

Bij verdubbeling van de afstand, neemt de stralingsintensiteit of vermogensdichtheid met een factor 4 af.

Toelichting:

In diverse literatuur (natuurkunde, optica, verlichtingstechniek) wordt ook een stralingsintensiteit (K) gedefinieerd als zijnde het aantal W/m^2 dat per steradiaal uitgestraald wordt. Er geldt dan: $\Phi_p = K/r^2$.

De definitie voor vermogensdichtheid gaat uit van wat er op een bepaalde plaats terecht komt, terwijl de definitie voor stralingsintensiteit uitgaat van wat de bron in een bepaalde richting uitstraalt.

Een klein draadsegmentje dat onderdeel is van een antenne draagt bij aan het stralingsveld volgens:

$$|E| = \frac{Z_{0v}}{2} \cdot \frac{\Delta l e}{\lambda} \cdot \frac{I}{r} \cdot \cos \varphi \quad [V/m] \quad \lambda = \frac{c_0}{f} \quad [m] \quad c_0 \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Waarin: $|E|$ = grootte van elektrische veldsterkte in V/m, $\Delta l e$ = lengte van het denkbeeldig draadsegmentje in m, Z_{0v} = impedantie (golfweerstand) van vrije veld (lucht, vacuüm) in Ohm, λ = Golflengte van de straling, r = afstand tot draadsegment in m ($r > 0.25\lambda$).

De formule gaat praktisch gezien op voor stroomvoerende segmenten waarvan de grootste afmeting kleiner dan $1/8\lambda$ is. $\cos \varphi = 1$, voor richtingen loodrecht op de stroomrichting (in het verlengde van de stroom, is er dus geen stralingsveld). Zie ook figuur 3.1A. De openingshoek van het stralingsdiagram van een enkel draadsegmentje is 90° .

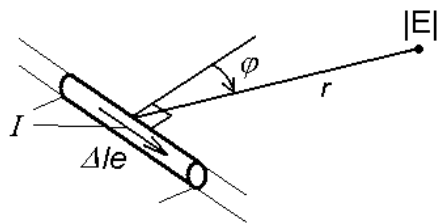
Een halve golf dipool is goed voor te stellen als twee kwartgolf transmissielijnen. De stroomverdeling als functie van de plaats is bij goede benadering sinusvormig (zelfs als de dipool niet exact in resonantie is, dus iets te kort of te lang is). In figuur 3.1B is de stroomverdeling weergegeven en is de dipool tevens in 8 segmentjes gedeeld. Het totale stralingsveld van de halve golf dipool wordt bepaald door de som van de afzonderlijke veldbijdragen van de 8 draadsegmentjes.

In een richting loodrecht op de dipool zijn alle bijdragen in fase, maar onder bijvoorbeeld 45 graden, treden reeds looptijdverschillen op waardoor de bijdragen van de segmentjes niet meer volledig in fase zijn (Δs is maximaal tussen segment 1 en 8). Om deze reden is de -3dB openingshoek van een halve golf dipool 78° in plaats van 90° .

Indien de voedingsstroom 1 Arms bedraagt, bedraagt de gemiddelde stroom in de dipoolsegmentjes 0.636A (gemiddelde waarde factor voor sinus). In een richting loodrecht op de dipool maakt het niet uit of in segmentje 1 meer stroom loopt dan in segmentje 4, zolang de gemiddelde stroom over de lengte van de dipool maar niet wijzigt. Op 100m afstand, en bijvoorbeeld 10 MHz, bedraagt de veldsterkte 0.599V/m ($953\mu\text{W}/\text{m}^2$, loodrecht op de dipool).

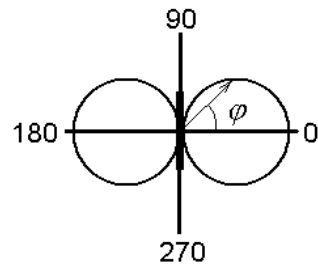
Basic radiation from wire segment.

Radiation from wire segment

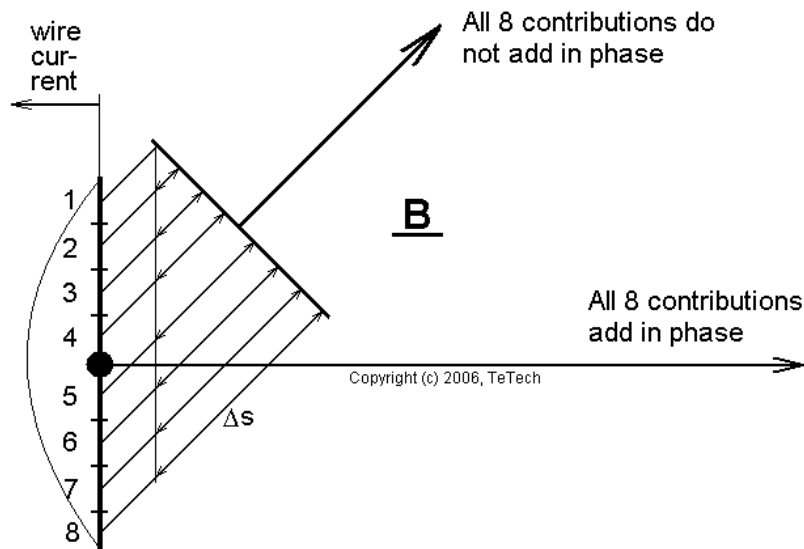


A

Polar Radiation Pattern



Segmentation of Dipole and formation of Radiation Pattern



figuur 3.1: Straling van een draadsegmentje en vorming stralingsdiagram.

3.2. Impedantie, Q-factor en Bandbreedte.

3.2.1. Stralingsweerstand.

In de vorige paragraaf is een voorbeeld gegeven van de veldsterkte (en vermogensdichtheid) loodrecht op een halve golf dipool op 100 m afstand. Als je dit doet voor de gehele driedimensionale ruimte (integratie van vermogensdichtheid over $4 \cdot \pi$ steradianen), vind je het totaal uitgestraalde vermogen. We hebben de voedingsstroom op 1 Arms gesteld en kunnen dan via $P_{\text{rad}} = I^2 \cdot R_{\text{rad}}$ de stralingsweerstand vinden.

Voor de met 1 A gevoede halve golf dipool bedraagt het uitgestraalde vermogen 73 W (numerieke integratie). Hieruit volgt de welbekende 73 Ohm ingangswaerstand van een halve golf dipool.

Hieruit kan men ook de Gain (officieel Directive Gain) van de dipool afleiden. De gain van een halve golf dipool bedraagt 1.64 (2.15 dBi). In de praktijk is de dipool wat korter, daardoor neemt de Gain slechts iets af. Zelfs een zeer korte dipool (bij 0.05λ) heeft nog altijd een Directive Gain van 1.5 (1.76dBi). In de praktijk is bij antennes veel kleiner dan de golflengte de overall gain lager vanwege verliezen in de aanpassingsnetwerken.

Om de dipool in resonantie te krijgen (lees geen imaginair deel), dient men hem meestal wat korter te kiezen (net als het geval is bij een kwart golf resonator). Dit betekent dat alle segmentjes wat korter worden en er wat minder veldsterkte geproduceerd wordt. Het totaal uitgestraalde vermogen neemt wat af en daarmee (bij gelijke voedingsstroom) de stralingsweerstand (R_{rad}).

Als eerste orde benadering voor de stralingsweerstand van een daadwerkelijke halve golf dipool, geldt:

$$R_{rad} \approx 73 \cdot \left(\frac{le}{0.5 \cdot \lambda} \right)^2 \quad [\Omega]$$

!Let op!:

Formule alleen geldig voor kleine afwijkingen ten opzichte van de theoretische halve golf dipool ($0.4 \dots 0.55\lambda$).

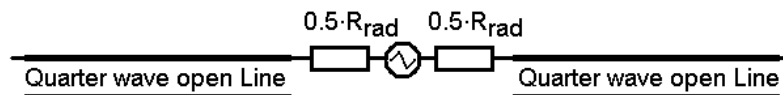
Een daadwerkelijke dipool met lengte van 0.44λ heeft daarmee een stralingsweerstand van 56.5 Ohm en kan daardoor rechtstreeks (met 1:1 balun) op een 50 Ohm coax aangesloten worden.

3.2.2. Q-factor en bandbreedte van de halve golf dipool.

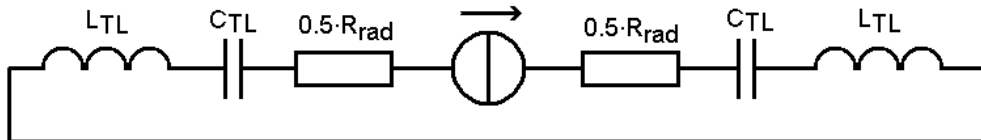
Voor het bepalen van de Q-factor, en vervolgens de bandbreedte, wordt van het transmissielijnmodel uitgegaan zoals dat ook voor Patch-antennes gebruikelijk is. We zullen alleen een aanname moeten doen over de karakteristieke impedantie.

Een kwartgolf lange niet-afgesloten transmissielijn kan voorgesteld worden door een LC-seriekring. Onze dipool bestaat uit een serieschakeling van de stralingsweerstand en twee LC kringen (afgestemd op gelijke frequentie). Zie figuur 3.2. Hoe lager R_{rad} en hoe groter L (en dus hoe kleiner C), hoe hoger de Q-factor zal zijn (hoe kleiner de bandbreedte).

Transmission Line to Lumped Component conversion



The Transmission lines do not radiate. All radiation effects are in the radiation resistance.



$$Q = \frac{\omega \cdot L_{TL}}{0.5 \cdot R_{rad}} \quad L_{TL} = \frac{4 \cdot Z_0}{\pi \cdot \omega_0} \quad Z_0 = 138 \cdot \log \frac{D}{d} \quad d = \text{wire diameter, } D = 0.25 \cdot \lambda$$

Formulas are only valid for frequencies close to the quarter wave resonance frequency of the transmission lines. L_{TL} should not be confused with the "DC" inductance of a transmission line.

Figuur 3.2: Transmissielijnmodel voor 0.5λ dipool en LCR equivalent.

Wat moet er voor de karakteristieke impedantie van de lijnstukken genomen worden, er is immers geen retourgeleider (zoals dat voor een Patch antenne wel het geval is)?

Op basis van de uitbreidingsafstand van het reactieve H-, E-veld en meting van de Q-factor voor diverse dipooldikten kan men de twee lijnstukken zien als een coaxiale structuur waarvan de denkbeeldige afscherming een diameter heeft van 0.25λ .

Ter info:

De twee draden van een 3.6 MHz halve golf dipool (vrije ruimte) met een draaddikte van 2mm hebben daarmee een karakteristieke impedantie van ongeveer 550 Ohm.

Als men aan de hand van de kwart golf lijnstukken de overeenkomstige L en C waarden bepaalt, geldt voor de Q factor van de halve golf dipool (d = draaddiameter):

$$Q_{0.5\lambda dip} \approx 3.0 \cdot \log\left(\frac{\lambda}{4 \cdot d}\right)$$

De dipool uit "Ter info" heeft daarmee een Q factor van 12.

Als we uitgaan van een bandbreedte waarbij de VSWR is toegenomen tot 2, dan geldt voor een seriekring:

$$BW_{vswr=2} = 0.71 \cdot \frac{f_0}{Q}$$

Hierbij dient op de resonantiefrequentie te gelden: VSWR=1.

Combineren van de twee formules geeft de VSWR=2 bandbreedte voor de halve golf dipool:

$$\frac{BW_{0.5\lambda \text{ dip, VSWR=2}}}{f_c} \approx \frac{0.22}{\log\left(\frac{\lambda}{4 \cdot d}\right)} \quad [\text{Hz}]$$

Waarin: f_c = de resonantiefrequentie (centerfrequentie) van de halve golf dipool, in Hz, d = diameter van de dipooldraden of -pijpen, in m, λ = golflengte, in m.

De dipool uit "Ter info" heeft daarmee een bruikbare bandbreedte van 213 kHz (vrije veld, geen verdere verliezen).

3.2.3. Vergroting bandbreedte.

Omdat de draaddiameter van de dipool zich binnen de "log" bevindt (10-log), moet je een behoorlijk dikkere draad kiezen om een merkbare vergroting van bandbreedte te krijgen. In plaats van draad kan men strip, gaas of meerdere draden gebruiken. De effectieve diameter van strip bedraagt ongeveer 0.5-strijbreedte.

Voor zeer dikke dipooldraden zal een significante verkorting nodig zijn om ze in resonantie te krijgen. We weten dat dit een verlaging van de stralingsweerstand geeft. Dit betekent dat een deel van de winst in bandbreedte weer verloren gaat door de lager uitvallende stralingsweerstand.

Het effect van meerdere draden is goed merkbaar. De zelfinductie van dunne draden wordt voor een groot deel bepaald door de magnetische flux dicht bij de geleider ($\int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = \mu \cdot \int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{A}$). Voor de capaciteit geldt hetzelfde, de grootste spanningsval ($\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$) treedt op dicht bij de geleider. De koppeling tussen twee of meer draden, vele diameters uit elkaar, is daardoor gering. Het gevolg is een behoorlijke afname van zelfinductie en toename van capaciteit (met als gevolg lagere Z_0).

Een dipool voor 3.6 MHz (80m band) bestaande uit twee parallelle draden van 2mm diameter, 1 meter uit elkaar, heeft ongeveer 40% méér bandbreedte dan een dipool van 1 draad van 2mm diameter.

Toelichting:

Hoewel buiten het bestek van dit document. Dikkere draden (of meerdere draden) heeft ook zin om de kans op corona-ontlading op de draadeinden te verminderen in geval van zeer hoge vermogens (>400 W).

Als bandbreedte van belang is, kan men in plaats van een halve golf een hele golf dipool nemen. Het nadeel is zijn hoge stralingsweerstand (in orde van kOhms), maar de bandbreedte neemt wel met in orde van 33% toe.

3.3. Verliezen.

In de vrij opgestelde dipool hebben we te maken met twee verliezen:

1. Warmteverlies door ohmse verliezen in de geleiders
2. Diëlectrische verliezen in eventueel aanwezige isolatie.

3.3.1. geleidingsverliezen.

Aangezien we met RF te maken hebben, is de kans reëel dat de stroom slechts in een schilletje loopt. Voor de indringdiepte geldt:

$$\text{Skindepth} = \text{Skindiepte} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}}$$

Bij 3.6 MHz bedraagt de indringdiepte:

Materiaal	Spec.Weerst (Ohm·m.)	μ_r	Skindepth (mm)
Koper	0.0175e-6	1	0.035
Aluminium	0.0265e-6	1	0.043
RVS (magnetisch)	0.88e-6	300	0.014

Een dipool wordt in de regel gemaakt van draad met een dikte in orde van millimeters. De stroom loopt in de praktijk dus in een dun schilletje:

Er geldt dan (d=draaddiameter, in m):

$$R_{AC} = \frac{l}{d} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot \mu \cdot f}{\pi}} \quad d > 4 \cdot \delta \quad R_{ACkoper} = 80n \cdot \frac{l}{d} \cdot \sqrt{f}$$

De extra weerstand welke in serie komt te staan met de stralingsweerstand is niet gelijk aan de draadweerstand voor 0.5λ . Dit komt omdat over de dipool lengte gezien, de effectieve stroom slechts 71% van de voedingsstroom bedraagt (dus factor 2 in vermogen). De verliesweerstand is dan ook slechts de helft van de draadweerstand. Ofwel voor de verliesweerstand van een halve golf dipool met ronde draad of pijp geldt (d=draaddiameter):

$$R_{Loss_{0.5\lambda dip}} = \frac{6}{d \cdot \sqrt{f}} \quad [Ohm] \quad \text{for copper}$$

Bovenstaande formule is geldig voor koper en ronde draad. De verliesweerstand ($R_{Loss_{0.5\lambda dip}}$) is recht evenredig met $\sqrt{\rho \cdot \mu_r}$.

Een dipool voor 80m met draaddiameter van 2mm, heeft een verliesweerstand van 1.6 Ohm. Dezelfde dipool van magnetisch RVS draad komt echter uit op 200 Ohm. Dit betekent dat uitgaande van de standaard 73 Ohm dipoolimpedantie, 74% van het zendvermogen in de draad verloren gaat (in de vorm van warmte).

Conclusie geleidingsverliezen:

Wees voorzichtig met het gebruik van magnetische materialen voor antennes (ijzer). Als je vanwege de sterkte toch ijzer wenst te gebruiken, zorg dan dat het gegalvaniseerd is met een niet magnetisch materiaal waarvan de laagdikte tenminste groter is dan de indringdiepte (in het niet-magnetisch materiaal, bijvoorbeeld "copper-clad steel", "copper covered steel, CCS").

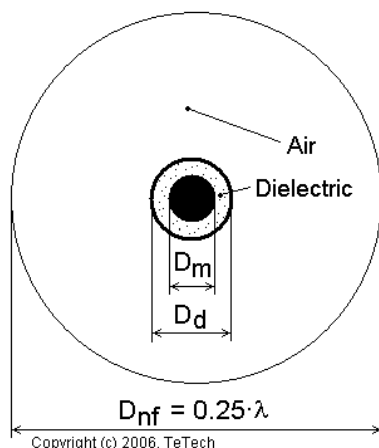
Een andere optie is om naast de ijzerdraad een koperdraad mee te trekken. De ijzerdraad (met hogere elasticiteitsmodulus dan koper), zorgt dan voor trekontlasting en de koperdraad voor de elektrische geleiding.

3.3.2. Verlies t.g.v. plastic isolatie.

Verlies ten gevolge van draadisolatie is in praktisch alle gevallen te verwaarlozen.

Om een indruk te krijgen van het verlies ten gevolge van de isolatie kunnen we gebruik maken van het transmissielijnmodel dat ook in de vorige paragraaf gebruikt is. Als we aannemen dat de dikte van de isolatie kleiner dan 0.05λ is, gaan de E-veld lijnen loodrecht door de draadisolatie heen. We kunnen nu de capaciteit van de transmissielijn opdelen in twee capaciteiten (zie figuur 3.3).

Assessment of Dielectric Losses in a Halve Wave Dipole



Example Calculation

$D_m = 1.78\text{mm}$
 $D_d = 3.4\text{mm}$
 $D_{nf} = 20\text{m}$ (3.6 MHz ant.)
 $\epsilon_r = 5$ (for dielectric)
 $DF = 0.1$ (dielectric loss factor)

for Capacitance calc.: Wire length = 1m

$C_{m-nf} = 5.96463\text{ pF}$ (no insulation present)
 $C_{m-d} = 430\text{pF}$
 $C_{d-nf} = 6.40935\text{pF}$
 $C_{m-d-nf} = 6.3152\text{ pF}$ (insulation present)

$$\frac{U_{m-d}}{U_{m-nf}} = 0.0147$$

$$Q\text{-factor of total capacitor} = \frac{1}{0.1 \cdot 0.0147^2} = 46\text{k}$$

Figuur 3.3: Inschatting diëlectrische verliezen t.g.v. draadisolatie.

De capaciteit tussen de dipooldraad (met diameter D_m) en de nabije veld afstand (met diameter D_{nf}) bestaat uit de serieschakeling van de capaciteit van het diëlectricum en de capaciteit tussen het diëlectricum en de nabije veld afstand.

Voor een coaxiale structuur kan onderstaande formule gebruikt worden:

$$C_{coax} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l \cdot e}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}$$

In figuur 3.3 zijn de capaciteitswaarden (per meter lengte) weergegeven voor een praktische situatie (2.5mm² geïsoleerd soepel draad). De Q factor van de isolatie (1/DF) bedraagt 10.

De meeste spanning welke zich tussen de dipoolhelften bevindt, staat over de lucht (en dus niet over de isolatie). Daardoor is Q-factor van de capaciteit van de dipooldraden met isolatie vele malen hoger dan de Q factor (=1/DF) van het isolatiemateriaal (bijvoorbeeld PVC).

De Q-factor van een verliesvrije halve golf dipool op basis van dunne draad bedraagt doorgaans in orde van 12. De Q factor van de near field capaciteit tussen de dipoolhelften bedraagt in orde van 46000 (46k, zie figuur 3.3).

Het vermogensverlies (relatief) t.g.v. de isolatie bedraagt dan in orde van $Q_{loaded}/(Q_{unloaded}+1) = 12/46000 = 0.26m$.

Dit vertaalt zich in een verliesweerstand (welke in serie staat met R_{rad}) van: $73 \cdot 0.26m = 0.02 \text{ Ohm}$.

Conclusie diëlectrische verliezen:

Bij de gebruikelijke draad- of buisdipolen is het verlies van een eventueel aanwezige dunne dielectrische laag (kunststof, verf, etc) verwaarloosbaar.

Toelichting.

Hoewel niet relevant voor dit hoofdstuk, bedraagt de toename van capaciteit een factor $6.3152 \text{ pF}/5.96463 \text{ pF} = 1.059$. Magnetisch gezien is er niets veranderd. Schijnbaar is de diëlectrische constante met een factor 1.059 toegenomen. Dit vertaalt zich in een (snelheids)factor $c_0/(\text{sqrt}(1.059)) = 0.9718 \cdot c_0$. Het is te verwachten dat de dipool door de relatief dunne isolatie in orde van 2.5% korter uitvalt. Deze verkorting komt bovenop de verkortingsfactor voor het eindeffect (capacitive fringing).

Als je de dipool van dikker draad maakt, of meer draden gebruikt en de dikte van de isolatie gelijk houdt, is het effect van de isolatie minder en daarmee ook de verkortingsfactor t.g.v. de isolatie.

4. Eigenschappen halve golf open dipool over ideaal grondvlak.

4.1. Reflectie op ideaal grondvlak.

Reflectie op een oneindig goed geleidend grondvlak is relatief eenvoudig te behandelen aan de hand van het negatieve spiegelbeeld (negative image). Deze spiegelbeeldtheorie gaat namelijk ook op voor het nabije veld.

Om de gevolgen voor de dipool te bepalen kan men grofweg twee wegen behandelen:

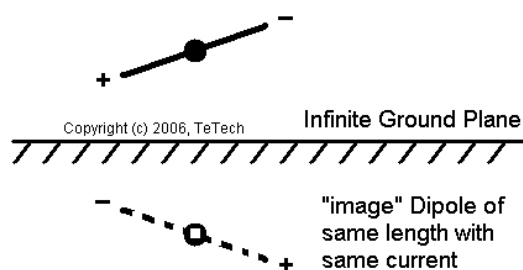
1. Uitgaan van de “standaard” formules/grafieken voor wederzijdse koppeling tussen twee dipolen. Dit geeft snel een antwoord op de verandering van stralingsweerstand en imaginair deel.
2. Uitgaan van superpositie van de velden van de twee antennes en zo een inschatting maken van het uitgestraalde vermogen. Dit geeft inzicht in waarom de stralingsweerstand wijzigt, maar geeft geen indruk van het imaginair deel.

In dit document wordt van methode twee uitgegaan. De verandering van imaginair deel kan in de praktijk snel bepaald worden door het verlengen of verkorten van de antenne.

Figuur 4.1A toont het ontstaan van een negatief spiegelbeeld. Het totale stralingsveld wordt nu gevormd door de bijdragen van de twee dipolen (beneden het grondvlak is er geen stralingsveld).

In ons geval is de rechtse afbeelding van figuur 4.1B van belang. De voedingsstroom van de spiegelbeelddipool is even groot als van de gevoede dipool, maar natuurlijk wel in tegenfase.

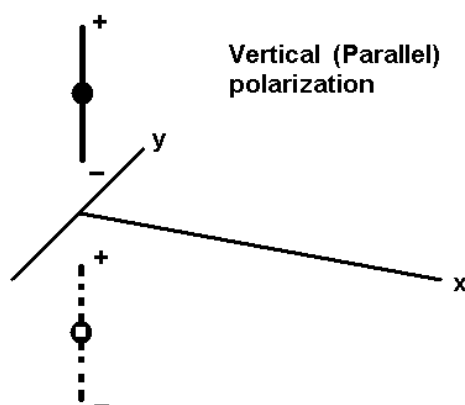
Reflection on a perfect ground plane.



A

Perfect Ground:

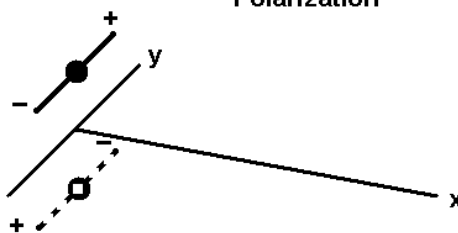
- E-Field lines end perpendicular at the Ground Plane.
- H-Field lines close to the Ground Plane run along the Ground Plane.



Very close to the XY Ground Plane, the fields of the direct and reflected (image) ray are in phase. The result is 6 dB increase of the antenna gain. Please note: for perfect reflection and elevation above the Brewster Angle (surface wave condition).

B

Horizontal (Normal) Polarization



Very close to the XY Ground Plane, the fields of the direct and reflected (image) ray cancel each other. The result is no field along the XY plane. If antenna is close to ground, there is about of 6.6 dB gain at very high elevation angle (small θ). This phenomenon is used in reflector antennas.

Figuur 4.1: Reflectie op een oneindig goed geleidend grondvlak.

4.2. **Stralingsdiagram halve golf dipool boven grondvlak.**

We kunnen snel een aantal conclusies trekken. Voor zeer kleine elevatie is voor alle richtingen de weglengte van de dipool naar en ver weg gelegen punt gelijk aan de weglengte van de spiegelbeeldipool naar datzelfde ver weg gelegen punt. Aangezien de beide dipolen even sterk stralen, doch in tegenfase, heffen de velden elkaar op. In het horizontale vlak straalt een dipool boven een grondvlak niet. De dipool met perfect grondvlak straalt ook niet naar beneden.

Extra info:

In geval van array's (samenstellen) bestaande uit gelijke elementen, wordt het stralingsdiagram gevonden door het zogenaamde "group pattern" (=stralingsdiagram van array met puntbronnen als elementen) te vermenigvuldigen met het "element pattern" (=stralingsdiagram van een enkel element). In ons geval is in feite sprake van een twee elements array bestaande uit in tegenfase gevoede dipolen.

Voor andere elevatie bepaalt het weglengteverschil (eigenlijk faseverschil) of de velden elkaar versterken of (deels) opheffen. Het makkelijkste is om uit te gaan van een constante stroom voeding voor de dipool.

Voor het geproduceerde stralingsveld in verticale richting geldt dat als $h = 0.166\lambda$, de resulterende veldsterkte (bij gelijk blijvende voedingsstroom) gelijk is aan die van de dipool zonder grondvlak. Bij kleinere h treedt verzwakking op. Tussen $h = 0.166\lambda$ en 0.333λ treedt constructieve superpositie op. Bij $h = 0.5\lambda$ treedt in verticale richting volledige uitdoving op.

Figuur 4.2 toont de geproduceerde veldsterkte op zekere afstand als functie van de elevatie (loodrecht op de dipool). De dipool is met constante stroom gevoed. Deze diagrammen zijn gemaakt met MS Excel!

Wat valt op? Beneden $h/\lambda=0.2$ verandert het E-veld stralingsdiagram qua vorm niet veel meer (het blijft een cirkel). Hoewel niet weergegeven, geldt hetzelfde voor de vorm van het stralingsdiagram in de lengterichting van de dipool.

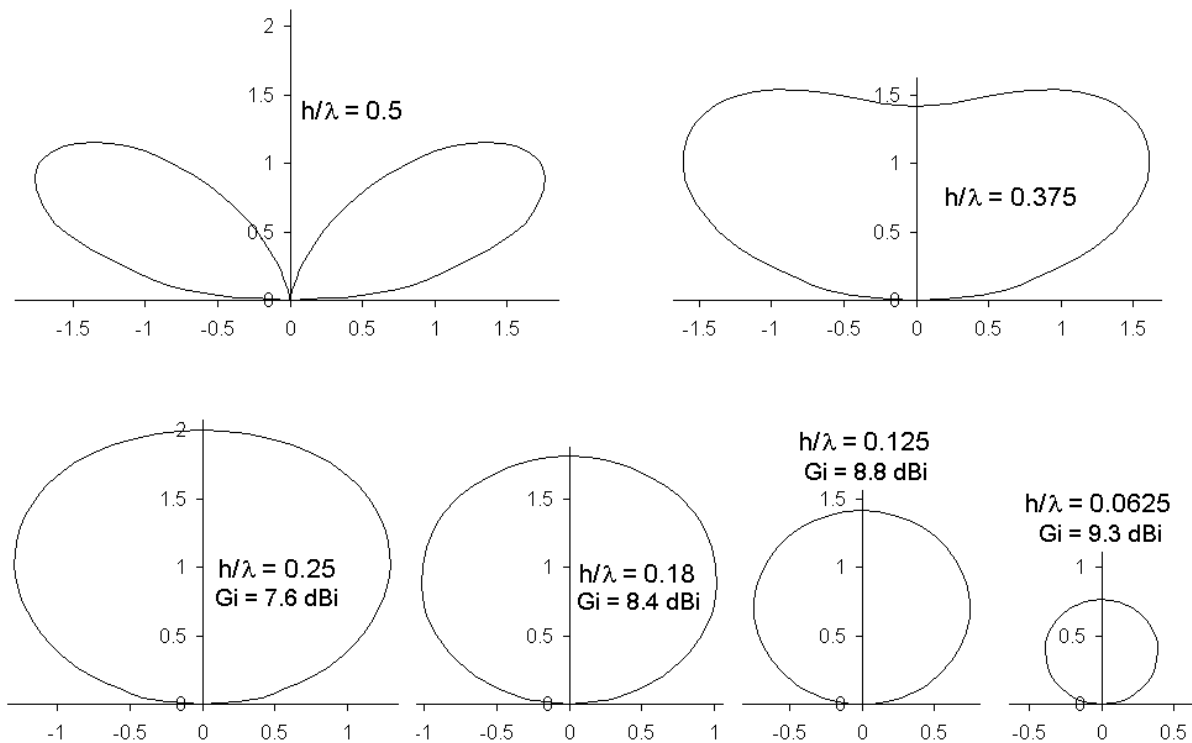
Met behulp van onderstaande formule, kan men een indruk krijgen van de Directive Gain (BW_H en BW_V zijn de -3dB openingshoeken in het horizontale en verticale vlak):

$$G_i = \frac{52k}{BW_H \cdot BW_V}$$

Voor kleine h/λ geldt: $BW_H=90^\circ$ en $BW_V=62^\circ$. Men zou dan op een gain, ten gevolge van richtwerking (Directive gain), uitkomen van rond de 9.3 (9.7 dBi). In figuur 4.2 zijn tevens de gesimuleerde gainwaarden weergegeven voor diverse h/λ . De benaderingsformule is zo gek nog niet.....

Over een hoogtevariatie van 0.0625λ tot 0.25λ , neemt de gain slechts af van 9.3 dBi tot 7.6 dBi. Voor lokaal/regionaal gebruik wil je veel gain omhoog hebben. h/λ zal dan in ieder geval kleiner dan 0.4λ dienen te zijn.

Broad Side Radiation patterns of HW dipole above ground with constant current feed (versus various h/λ).



For all E-field diagrams, the feed current is kept the same. "1" represents the fieldstrength without ground present. for $h/\lambda = 0.833$, the fieldstrength in the vertical direction is not changed by the presence of the perfect ground. For lower h/λ ratios, the fieldstrength in all directions is reduced significantly, hence strongly reducing the radiated power (with respect to the dipole without perfect ground present).

Figuur 4.2: Vorm stralingsdiagram 0.5λ dipool boven "perfect ground".

4.3. Impedantie en bandbreedte van dipool.

We hebben nu een indruk van de gain van de dipool boven perfect ground en zijn zelfs in staat om de veldsterke op zekere afstand uit te kunnen rekenen. Als je dit voor de volledige 3D ruimte doet, kom je tot een zeker uitgestraald vermogen (bijv: bij 1A voedingsstroom) en kan je het reële deel (R_{rad}) van de antenne-impedantie bepalen.

Er is een makkelijkere manier om het uitgestraalde vermogen te vinden. We weten immers de Directive Gain (Gain door de richtwerking). Als we kijken naar $h/\lambda = 0.0625$, dan zien we dat in de richting van maximale gain de veldsterkte slechts 75% van de veldsterkte van de oorspronkelijke dipool zonder grondvlak bedraagt. Bovendien is de gain $9.3 - 2.14 = 7.16\text{dB}$ hoger (factor 5.19).

Het uitgestraald vermogen bedraagt dan ook een factor $0.75^2 \cdot (1/(5.19)) = 0.11$ van dat van een dipool zonder grondvlak. Bij voeding met 1Arms komt dit neer op 8.03W (tegenover 73W voor een vrij opgestelde dipool). Dit betekent dat op basis van $P_{rad} = I^2 \cdot R_{rad}$ de stralingsweerstand slechts 8 Ohm bedraagt!

Aangezien de Stralingsweerstand rechtstreeks in de formule voor de Q factor zit (Q is omgekeerd evenredig met Rrad), heeft dit gevolgen voor de bandbreedte. De Z_0 van de twee kwartgolf lijnstukken zit ook in de formule, doch een 2mm dikke draad op $80 \cdot 0.0625 = 5\text{m}$ boven de grond, heeft nog altijd een karakteristieke impedantie van 550 Ohm. De coaxiale structuur heeft grofweg dezelfde impedantie. De resulterende karakteristieke impedantie zal lager uitvallen, maar zeker niet halveren. Het gevolg is dat laag opgestelde dipolen boven een perfect ground, véél bandbreedte verliezen. Gelukkig werkt ook hier de truck van de dikke geleiders of meerdere geleiders om de bandbreedte te vergroten.

Onderstaande tabellen tonen enkele waarden voor stralingsweerstand, gain en bandbreedte als functie van de hoogte voor een halve golf dipool over "perfect ground".

Height (λ)	G (dBi)	Rrad	HPBW (E-plane, deg)	HPBW (H-plane, deg)
0.05	9.4	6.0	61	91
0.07	9.2	11	61	92
0.1	9.0	20	62	94
0.125	8.8	29	62	96
0.18	8.4	51	51	103
0.25	7.6	78	72	117

Height (λ)	Q factor of antenna	Bandwidth VSWR=2
No ground	10	250kHz
0.05	137	19 kHz
0.07	74	35 kHz
0.1	38	67 kHz
0.125	24	107 kHz
0.18	14	163 kHz
0.25	10	253 kHz

De centerfrequentie bedraagt 3.6 MHz, de draaddiameter = 10mm, totale draadlengte = 40m. Voor een draaddiameter van 2mm, neemt de bandbreedte met grofweg 17% af.

Het afnemen van de stralingsweerstand heeft diverse gevolgen: De verliesweerstand (geleidingsverliezen en eventueel diëlectrische verliezen) tellen relatief zwaarder mee (lees meer verlies). De veldsterkte dicht bij de geleiders neemt sterk toe. Een zeker vermogen in bijv 12.5 Ohm resulteert in een dubbele stroom (ten opzichte van hetzelfde vermogen in 50 Ohm). Omdat de Z_0 van de dipooldraden nagenoeg niet wijzigt, verdubbelt in dit geval ook de spanning op de uiteinden. Resultaat, zowel het H- als E-veld verdubbelt. Laag opgestelde dipolen introduceren daardoor relatief hoge stroom in het grondvlak.

Ter Info:

Bovenstaande tabel en de besproken formules zijn ook bruikbaar voor het ontwerpen van UHF reflectorantennes en patch-achtige antennes waarbij in veel gevallen sprake is van volledige reflectie. Indien u gebruik maakt van strip, dan komt een strip van 20mm breed ongeveer overeen met een ronde draad van 10mm doorsnede.

Conclusie halve golf dipool over perfect geleidend grondvlak:

1. Maximaal haalbare gain (verticale richting) bedraagt in orde van 9.4 dBi. De gain neemt af bij toenemende hoogte. Echter bij $h/\lambda=0.18$ (dat is 14.4m hoogte voor de 80m band), blijft nog steeds 8.4 dBi over. Voor $h/\lambda=0.5$ bedraagt de gain in verticale richting nagenoeg 0.
2. $h/\lambda < 0.18$ geeft optimaal korte afstands bereik (NVIS, tot 400 km), $0.3 < h/\lambda < 0.4$ geeft optimaal stralingsdiagram voor zowel lokaal verkeer als verkeer in straal tot ong. 800 km.
3. Zowel bandbreedte als stralingsweerstand nemen voor $h/\lambda < 0.2$ sterk af (bij grove benadering kwadratisch met h/λ).
4. Ten gevolge van de lage stralingsweerstand bij kleine h/λ , zijn de stromen en bijbehorende spanningen hoog. De veldsterktes onder de antenne lopen daardoor aanmerkelijk op (controleer tegen ICNIRP Guidelines, www.icnirp.org).

5. Eigenschappen halve golf open dipool over echte grond.

5.1. Reflectie op "echte" grond.

Reflectie op "echte" grond hangt sterk af van de eigenschappen van de grond (ϵ_r en geleiding) en de polarisatie van het EM-veld.

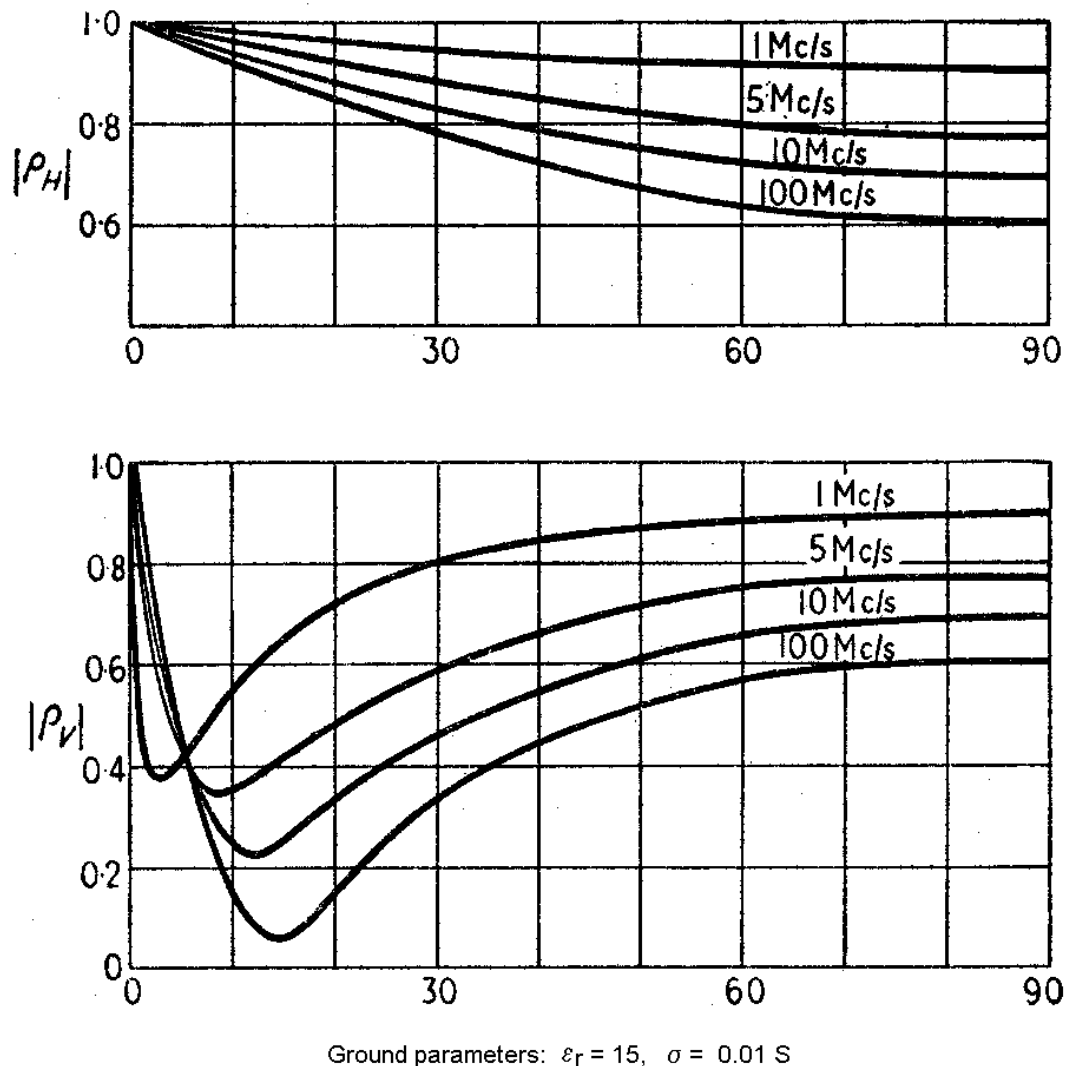
Voor geringe elevatie en horizontale polarisatie (natuurkundig "normal polarization" of "s-polarization") is de reflectie gelijk aan die van een perfect ground (dus reflectiecoëfficiënt (ρ_H) = -1). Bij toenemende elevatie neemt $|\rho_H|$ af en bereikt zijn minimale waarde (doorgaans tussen -0.5 en -0.9) voor 90° elevatie (dus verticaal invallende straling). Figuur 5.1 toont ρ_H en ρ_V onder verschillende elevatie voor "goede grond" ($\epsilon_r = 15$, $\sigma = 0.01$ S).

Er is voor horizontale polarisatie geen "(pseudo) Brewster Angle", zoals bestaat voor verticale polarisatie (natuurkundig "parallel polarization" of "p-polarization").

Voor goede grond bedraagt $|\rho_H| = 0.8$ (90° elevatie, 3.6 MHz). Dit betekent wel dat: $100 \cdot (1 - 0.8^2) = 36\%$ van de ingaande golfenergie verloren gaat. Voor slechte grond (bijv zandgrond) is de reflectie aanmerkelijk minder en daarmee de absorptie aanmerkelijk hoger (in de regel boven 50%).

Bovenstaande geldt voor een vlakke golf. Dicht bij een dipool heeft men te maken met een complex (sferisch) golffront gecombineerd met reactieve velden. Dit veld bevat daarmee zowel horizontaal als verticaal gepolariseerde componenten. In dergelijke gevallen kan men gebruik te maken van meet- en/of simulatieresultaten.

Reflection Coefficient for Hor. and Vert. polarisation over "Good Ground".



Figuur 5.1: Reflectiecoëfficiënt voor H- en V-polarisatie over "good ground", bron: "The Services text book of radio, volume 5", 1958.

5.2. Stralingsdiagram.

De dipool straalt (nagenoeg) niet in zijn lengterichting. In richtingen loodrecht op de dipool is de straling maximaal, doch horizontaal gepolariseerd. $\rho_H = -1$, zodat in het horizontale vlak, ook in geval van "echte grond" niet uitgestraald wordt. Een gedeelte van de straling verdwijnt wel in de grond, maar wordt daar in warmte omgezet en draagt niet bij aan het stralingsdiagram.

Door de grotere indringdiepte (in orde van meters tot 10m bij 3.6 MHz) is de effectieve antennehoogte wat meer dan de hoogte ten opzichte van het maaiveld. De directive gain is daardoor wat lager (grotere openingshoek).

De vorm van het stralingsdiagram lijkt dan ook veel op dat van figuur 4.2. Het is doorgaans wat breder waardoor de gain ten gevolge van de richtwerking (directive gain) minder is. De overall gain na aanpassing is echter aanmerkelijk lager vanwege de verliezen in de grond.

5.3. Verliezen.

Eenvoudige berekening aan de verliezen is zoals eerder aangegeven niet mogelijk. Onderstaande tabellen zijn verkregen door middel van 3D planar simulatie (met inbegrip van reactieve veld componenten).

Resultaten voor goede grond.

$\epsilon_r = 15$, $\sigma = 0.01\text{S/m}$ (dielectric loss factor = 3.3)

Gesimuleerd op 3.6 MHz.

Height (λ)	Rtot	Bandwidth VSWR=2	Rad.eff. (%)	Directivity (dBi)	Gain (dBi)
0.05	37	128	23	8.2	1.8
0.07	36	120	37	8.4	4.1
0.1	40	128	55 (75)	8.4 (8.5)	5.8 (7.2)
0.125	46	145	66	8.4	6.6
0.18	62	195	79	8.0	7.0
0.25	82	270	86	7.3	6.6

Resultaten voor slechte grond (bijv droog zand).

$\epsilon_r = 4$, $\sigma = 0.001\text{S/m}$ (dielectric loss factor = 1.25)

Simulated at 3.6 MHz.

Height (λ)	Rtot	Bandwidth VSWR=2	Rad.eff. (%)	Directivity (dBi)	Gain (dBi)
0.05	72	247	20	7.5	0.5
0.07	66	223	28	7.6	2.1
0.1	64	210	39 (63)	7.7 (8.0)	3.6 (6.0)
0.125	65	212	47	7.7	4.4
0.18	72	233	60	7.4	5.2
0.25	81	270	69	6.9	5.3

Voor beide tabellen: draaddiameter = 10mm, totale draadlengte = 40m, Resonantiefrequentie ligt in beide gevallen zeer dicht bij 3.6 MHz.

Voor de getallen tussen de haakjes, zie de volgende paragraaf.

In beide gevallen (dus slechte en goede grond), is in geval van $h/\lambda < 0.1$ (dat is 8m hoogte voor 3.6 MHz) het verlies in gain behoorlijk. Lagere opstelling wordt, in tegenstelling tot wat andere bronnen vermelden, voor zendantennes afgeraden.

Sommige bronnen melden dat de ruis bij geringere hoogte afneemt (en suggereren of claimen daarmee dat de antenne beter werkt). De RX-ruis neemt inderdaad af, maar het gewenste signaal neemt even sterk af. De S/N verhouding verbetert niet. In geval van zenden raak je wel signaal kwijt.

Uit de tabellen is op te maken dat voor slechte grond, de optimale hoogte aanmerkelijk hoger ligt dan voor goede grond. Voor hogere frequenties neemt de reflectiecoëfficiënt verder af (dus toenemende verliezen). De realiseerbare overall

gain valt daardoor lager uit. Voordeel is wel dat bij hogere frequenties het makkelijker wordt om een redelijke h/λ te verkrijgen.

5.4. De ingangssweerstand en bandbreedte.

Er wordt hier expres van ingangssweerstand en niet meer van stralingsweerstand gesproken. De ingangssweerstand wordt nu voor een groot deel bepaald door warmteverliezen.

Wij hebben onze halve golf dipool gemodelleerd als twee kwart golf draadstukken. De karakteristieke impedantie van de twee draadstukken bedraagt voor 10mm draaddiameter in orde van 500 Ohm. Indien er in welke vorm dan ook geen vermogen uitgestraald of in warmte omgezet zou worden, zou bij resonantie de impedantie 0 Ohm zijn (eigenschap van verliesvrije kwartgolf transformator). Ieder verlies (evenredig over de lijn verdeeld) in het nabije-veld gebied van de kwart golf lijnstukken, leidt tot een verhoging van de impedantie (mits de impedantie bij resonantie ruimschoots beneden 500 Ohm blijft).

Omdat de grond niet volledig reflecteert, maar absorbeert, wordt op grond van bovenstaande een sterke toename in totale weerstand verwacht (R_{tot}). R_{tot} is dus de som van stralingsweerstand en verliesweerstand.

De tabellen van de vorige paragraaf tonen ook de totale ingangssweerstand, samen met de bandbreedte. De stralingsweerstand neemt sterk toe, zodanig dat in nagenoeg alle gevallen aansluiting (via mantelstroombalun) op een 50 Ohm coax geen probleem is. Door de verliezen neemt ook de bandbreedte toe.

De makkelijke aanpassing en relatief grote bandbreedte is het enige geluk bij het relatief grote ongeluk. Stel dat je de dipool op 10m hoogte hangt ($h/\lambda=0.125$) en je $VSWR=1$, dan weet je nu dus dat je verliezen hebt. Eigenlijk had je $VSWR$ bij de antenne 1.72 moeten zijn.....

5.5. Vermindering verliezen.

Tussen haakjes zijn de resultaten weergegeven indien onder de dipool 3 draden gespannen zijn van 45m lang, 1m boven de grond, draden 3m uit elkaar. De winst in overall gain bedraagt enkele dB's.

Verdere verbetering is te krijgen door de gronddraden hoger te hangen (bijv 1.5..2m), de verbetering bedraagt dan in orde van 3 dB. Meer gronddraden geeft eveneens verbetering (maar ook meer kosten).

Opgemerkt dient te worden dat het op de grond leggen van de draden (hetgeen voor de hand ligt), nagenoeg geen verbetering geeft.

Conclusie halve golf dipool boven “echte grond”:

1. De “directive gain” is tot enkele dB’s minder dan ten opzichte van een “perfect ground”.
2. De overall gain is ten gevolge van de verliezen echter aanmerkelijk minder, zeker voor $h/\lambda < 0.1$ en relatief lage grondgeleiding.
3. Ten gevolge van de grondverliezen is de ingangsimpedantie dusdanig dat rechtstreekse koppeling (via mantelstroombalun) op 50 Ohm coaxiale kabel mogelijk is.
4. De verliezen zijn te verminderen door het spannen van zwevende gronddraden welke 5..10% langer zijn dan de dipool. Met 3 draden op ongeveer 1.5..2m is een winst in gain van 3 dB te behalen. Het leggen van de draden op de grond heeft echter geen positief effect.

6. Aanpassing en symmetrie.

6.1. Symmetrie.

Het doel van de NVIS dipool is om juist niet in het horizontale vlak te stralen. De voedingslijn dient daarom geen common mode component (mantelstroom) te bevatten. Dit resulteert in verticaal gepolariseerde straling welke voor een component met lage opstralingshoek kan zorgen (en daarmee ook gevoelig wordt voor storing in de buurt).

In de meeste gevallen is een balancering van 26 dB of meer voldoende. Dit betekent dat als de antennestroom 1A bedraagt, de common mode component een factor 20 lager ligt (dus mantelstroom van maximaal 50mA).

Voor een 50 Ohm dipool voldoet een mantelstroomfilter met een common mode impedantie van 500 Ohm of meer prima. Tot 400W PEP kan gewoon RG58 gebruikt worden. Gebruik kernen met een zo hoog mogelijke impedantie (bij de gewenste frequentie). Meer kernen met bijv. 3 tot 4 windingen voldoet beter dan één kern met veel windingen. Het mantelstroomfilter dient direct bij de antenne geplaatst te worden.

Opgemerkt dient te worden dat de A_L -waarde van kernen voor LF gegeven is. Je dient de waarde zelf te corrigeren voor een eventueel lagere μ_r bij de gewenste werkfrequentie. Gebruik materialen welke bij de werkfrequentie géén hoge Q factor hebben (dus $\mu_r' < \mu_r''$). Een μ_r tussen 500 (40m band) en 2000 (80/160m band) is veelal geschikt.

Als je verwacht dat storing vanuit de shack via de kabel de antenne kan bereiken (computer, TV, fluorescentieverlichting, etc), zou je halverwege (daar waar de kabel op de grond of dak komt) een extra mantelstroomfilter kunnen plaatsen. Dit filter "hangt" dan niet aan de dipool. Op de TeTech website bevindt zich een document dat dieper ingaat op de ferriet balun (<http://www.tetech.nl/divers/balun.pdf>).

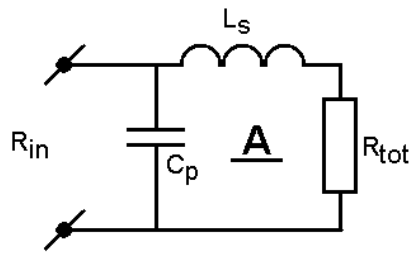
6.2. Aanpassing.

De impedantie van de dipool over "echte" grond ligt in de buurt van de 50 Ohm waardoor vaak rechtstreekse voeding vanuit een 50 Ohm coax mogelijk is. Als je echter over zeer goede grond beschikt; eventueel ook nog zwevende gronddraden aanbrengt en de antenne laag opstelt, kan de impedantie aanmerkelijk lager dan 50 Ohm uitvallen. Als je VSWR beneden 2 .. 3 blijft, pas dan aan bij de zender. De toename in kabelverlies is beperkt.

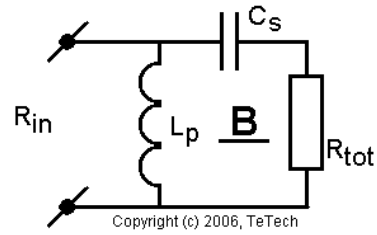
Als je aanpassing overweegt kan je de mantelstroombalun blijven gebruiken, maar je hebt wel een LC T-filter nodig. Figuur 6.1 toont de opzet en de ontwerpformules.

Één van de componenten van het LC filter maak je door de dipool iets langer (spoel, optie A) of korter (condensator, optie B) te maken. De stralingsweerstand verandert nauwelijks door de geringe verkorting of verlenging. Je kan de mate van verlenging uitrekenen aan de hand van de Q factor van de dipool en de benodigde spoel of condensator waarde.

Simple Matching of R to Resistance > R



$$R_{in} \geq R_{tot}$$



$$Q = \sqrt{\frac{R_{in}}{R_{tot}} - 1} = \frac{X(L_S)}{R_{tot}} = \frac{R_{in}}{X(C_p)}$$

$$Q = \sqrt{\frac{R_{in}}{R_{tot}} - 1} = \frac{X(C_S)}{R_{tot}} = \frac{R_{in}}{X(L_p)}$$

$X(\dots)$ = magnitude of impedance for the relevant component
 for example: $X(L_S) = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_S$, $X(C_p) = 1/(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_p)$

Figuur 6.1: Aanpassen $R_{rad} < 50 \text{ Ohm}$ naar 50 Ohm .

7. De uiteindelijke antenne.

7.1. Overwegingen en mogelijkheden.

De antenne zal voornamelijk gebruikt worden voor regionaal verkeer op 80m. Zo rond deze tijd van het jaar (oktober 2006) is de 80m een betrouwbare band voor NVIS propagatie (dit zal over een jaar of 4 vanwege hogere zonnevlekactiviteit wellicht anders zijn). Engeland moet ook bereikt kunnen worden.

Er is de beschikking over een groot weiland met klei/veen grond dat goed bemest is (vee) en nagenoeg altijd vochtig is (polder). De grondgeleiding bij 3.6 MHz is niet bepaald, maar zal minstens voldoen aan "very good ground".

De torenbouwers van de Scoutingvereniging kunnen twee torens/masten van 12 m hoog bouwen. (zwevende) gronddraden kunnen geplaatst worden.

Vanwege het gewenste bereik (ook Engeland), de bandbreedte en eenvoudige aanpassing is gekozen voor een gemiddelde opstelhoogte van 11..12m. (ong 0.14λ).

Uitgaande van de tabellen voor "ideale grond" en interpolatie, levert dit een stralingsweerstand op van rond de 35 Ohm, een bandbreedte van rond de 130 kHz, een gain van 8.6dBi en openingshoek (haaks op dipool) van rond de 98° . Vanwege de niet perfecte ground, zal de impedantie wat hoger uitvallen (de gain wat lager en de bandbreedte wat hoger).

Als balun wordt een gewone 1:1 mantelstroombalun gebruikt.

Helaas, de bandbreedte is wat aan de lage kant. Dit lossen we op door van een dubbeldraads dipool uit te gaan. Samen met de vergroting van de bandbreedte door de beperkte grondgeleiding, zal 200 kHz (3.6 .. 3.8 MHz phone band) haalbaar zijn.

Voor alle zekerheid hangen we er één gronddraad onder op 1.5m hoogte.

7.2. Afmetingen en montagedetails.

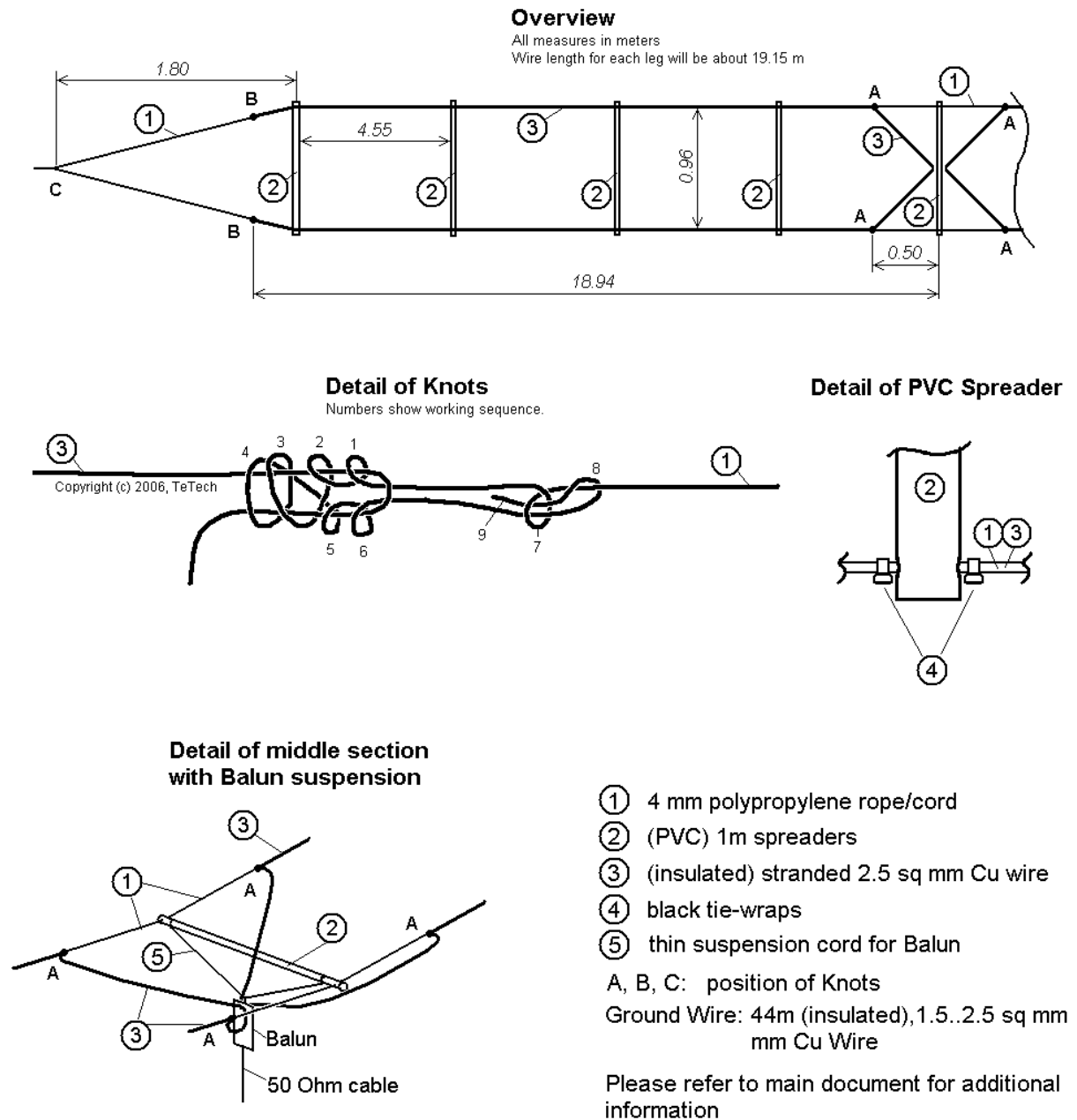
Figuur 7.1 toont de helft van de antenne (niet op schaal!). Het is een dubbeldraads dipool (geen gevouwen dipool) op basis van 2.5 mm^2 soepel montagedraad. De dikte van het montagedraad inclusief isolatie bedraagt 3.4mm. Voor de dipool is totaal ongeveer 80m draad benodigd. Een rol van 100m kost in orde van E35,-- (incl. BTW).

Op <http://www.tetech.nl/divers/NVISfoto.jpg> treft u een foto aan van de antenne (550kB). Hoogte ophangpunten is 12m.

[aanvulling 2009] http://www.tetech.nl/divers/Parque_de_antenas_OC_JOTA2009.jpg toont de situatie voor JOTA 2009. De voorste mast bevat een 0.4λ antenne (waarvan 7m vishengel) voor 40m band met drie zwevende kwartgolf radialen (1.5m boven de grond).

De achterste mast bevat een 0.5λ antenne (waarvan 6.30 m LIDL vlaggenmast) met drie kwartgolf radialen (niet echt nodig) voor 20m band. Onderlinge beïnvloeding is niet merkbaar.

Overview and Construction Details of Half-Wave NVIS - antenna for 80m band.



Figuur 7.1, Afbeelding van de antenne en diverse details.

De overzichtsafbeelding.

De spreiders kunnen gemaakt worden van 1m lange grijs PVC pijp (installatiebuis). Op de buitenste spreiders na (dikker getekend in de figuur) is de drukkracht op de spreiders minimaal. Men kan ze van dunne grijze PVC maken (eventueel kan er één per kant vervallen).

Indien je tot 2m doorzakken accepteert dan bedraagt de spankracht in orde van 200N (20 kg). De drukkracht op de buitenste spreider bedraagt dan rond de 30N. Een 17..20 mm grijs PVC spreider kan deze belasting prima doorstaan.

Opmerking:

200N op 12m hoogte genereert een behoorlijk moment. Door windbelasting kan dit verder toenemen. In de meeste gevallen is een tuidraad nodig om de spankracht van de dipool te compenseren.

Kantelen van de dipool.

Door het doorhangen van de dipool en de bevestiging van de balun, hangt de dipool mooi vlak en zal bij wind niet om zijn as gaan draaien.

Al het touw/koord is 4mm polypropyleen (oranje/rood). Dit is bij nagenoeg iedere bouwmarkt verkrijgbaar voor enkele euro's per 10m.

De spreiders (detailtekening).

De positie van de spreiders is niet kritisch, ze hebben verwaarloosbare invloed op het elektrisch gedrag van de antenne. De koperdraad (en polypropyleen touw) lopen door geboorde gaten. Door aan weerskanten een tie-wrap te plaatsen zijn ze gefixeerd (en zijn indien nodig toch nog te verschuiven).

De knopen (detailtekening).

De afgebeelde knoop is knop A. Met deze 4 knopen wordt de balun ontlast. De volgorde van leggen van de knoop is van belang om de afstand tussen de knopen rond de 1m te krijgen. Het makkelijkste is om eerst de lus van het koperdraad te maken (nummer 3 in te detailtekening). Vervolgens doe je handeling 1 tot en met 6. Als laatste doe je de paalsteek (handeling 7, 8 en 9). Schuif de lussen 1 tot en met 6 goed tegen elkaar aan. Deze knoop loopt niet los en de koperdraad (eventueel met isolatie) slipt er niet doorheen. De knoop is eenvoudig te lossen om de koperdraad te kunnen verschuiven.

Als je voorkeur hebt voor een 8-knoop in plaats van een paalsteek, leg je eerste de 8 knoop, vervolgens doe je handeling 1 t/m 6 en werk je het eind terug door de 8-knoop.

Voor de uiteinden kan je isolatoren gebruiken, maar voor de JOTA is voor de knopen B gewoon dezelfde knoop als in de detailtekening gebruikt (natuurlijk wel horizontaal gespiegeld). Je kan de knoop; zeer makkelijk lossen om de koperdraad te verlengen/verkorten. Het deel (koperdraad) dat je over hebt, vouw je terug en zet je vast met tape, touw of tie-wrap (of knip je af als je zeker van je zaak bent).

De antenne heeft iets meer dan één week gestaan. Vocht of het nat worden van de draden heeft geen merkbare invloed op de VSWR gehad, dus voor tijdelijke opstelling zijn (dure) isolatoren niet nodig.

Voor knoop C is eveneens dezelfde knoop gebruikt. Indien de antenne iets gekanteld hangt, is het voldoende om de knoop iets te verschuiven.

Balun-ophanging (detailtekening).

De balun is opgehangen aan een V-touwtje. Daardoor wordt de middelste spreider niet op doorbuiging belast en door de driehoekvorm ontstaat een rigide geheel waardoor kantelen van de dipool bij windvlagen vermeden wordt.

Zwevende gronddraden.

De lengte van de zwevende gronddraden is niet kritisch (ong 44m). De hoogte is ook niet kritisch (ong 1.5.. 2m). Als je 3 draden ophangt, plaats ze ongeveer 3m uit elkaar (voor 80m band). Bij deze antenne is, vanwege de goede grondgeleiding, slechts één gronddraad gebruikt.

Diversen.

Om gewicht te sparen, is voor de eerste 12m kabel gebruik gemaakt van H155 kabel (foam dielectric, foiled cable). Dit weegt minder dan RG58.

Om het afstellen (en op- en afbouwen) te vereenvoudigen is het handig om in de masten katrollen te hebben met touw erdoorheen. De antenne kan dan makkelijk omhoog gehesen en gespannen worden.

Indien u uw terrein deelt met vee, paarden, etc, denk dan aan het volgende:

1. Overleg met de landeigenaar/huurder wat je van plan bent.
2. Houdt de dieren in de gaten, zij kunnen schrikken van de vreemde constructies en zichzelf en anderen verwonden. Dit is zeker het geval als je een vlieger/gas- of luchtballon oplaat (met antenne eraan).
3. Laat niets slingeren. Metalen of plastic delen, draadeindjes, plakband, stukjes tie-wrap, etc, horen niet thuis in het spijsverteringskanaal. Voorzie kleine onderdelen van een opvallende draad zodat je ze makkelijk kan vinden. Ook maaimachines kunnen slecht tegen stalen haringen.... Voor en na gebruik tellen is een goede manier om na te gaan of je dingen in het land achtergelaten hebt.
4. Laat geen gaten achter, een koe, paard, schaap, etc kan een poot/been breken.

Als je bovenstaande in de gaten houdt, mag je de volgende keer wellicht weer van het terrein/weiland gebruik maken.

Zorg dat je de kabel kunt afkoppelen buiten de shack. In geval van naderend onweer kun je de kabel afkoppelen en veroorzaakt een eventuele blikseminslag in de antenne in ieder geval geen brand in de shack.

7.3. Simulatieresultaten.

Gesimuleerd is de antenne uit figuur 7.1 (full-wave simulation). Aanvullende antennegegevens:

- Draaddiameter: 1.8mm (geen isolatie)
- Hoogte boven de grond: 11m,
- 1 gronddraad van 44m, 1m boven de grond.
- Goede grond ($\epsilon_r = 15$, $\sigma = 0.01S$).

Resultaten:

- Directivity 8.3 dBi (verticaal)
- Overall Gain 7.1 dBi (verticaal)
- $HPBW_{H_vlak} = 104^\circ$.
- $HPBW_{E_vlak} = 65^\circ$.

- Stralingsrendement: 77%
- Ingangsimpedantie: (44 + 0j) Ohm @ 3.70 MHz.
- $BW_{VSWR=2} = 191$ kHz (grofweg 3.60 .. 3.80 MHz), bandbreedte gemeten bij de zender kan groter zijn vanwege kabelverliezen.

7.4. Praktijkresultaten.

De antenne is gebouwd volgens de tekening. De draden zijn ingekort (zoals te verwachten was vanwege de draadisolatie). De exacte draadlengte wordt nog toegevoegd aan het document (de antenne bevindt zich nu in de winteropslag).

Er zijn geen gainmetingen verricht. Dit is bij deze frequenties nogal bewerkelijk. Het doorhangen bedraagt in orde van 1.5m en zelfs bij wind blijft het geheel zeer stabiel. De antenne is met opzet niet strakker getrokken om rek (of breuk) te voorkomen.

Het geven van signaalsterkterapporten is niet zo zinvol. De meeste ontvangers hebben onvoldoende nauwkeurige S-meters en de signaalsterkte is sterk afhankelijk van de door het tegenstation gebruikte antenne. Bovendien een rendementsafname van 100 naar 50% is slechts 0.5 S-punt.

Wat wel van belang om te vermelden is dat de Signaal/Ruis verhouding aanmerkelijk beter is ten opzichte van de FD4. Dit is zeker voor de scouts een pluspunt. De hoofdzendamateer (PA0AKS), die reeds tientallen jaren bij groep betrokken is, was zéér onder de indruk van de ontvangstkwaliteit.

Deze goede resultaten hebben de doorslag gegeven om de antenne, en de ontwerpoverwegingen erachter, op papier te zetten. [aanvulling 2009] De antenne is nu 4 jaar achtereen gebruikt, voor het laatst tijdens de JOTA 2009. In het overgrote deel van de verbindingen (2008) is gewerkt met 10W vermogen.

8. Andere varianten.

Er zijn zeer veel andere manieren om gain in verticale richting te creëren (en geringe horizontale afstraling). Een aantal varianten passeert in dit hoofdstuk de revue. U dient zich wel te realiseren dat de benodigde inspanning meer dan evenredig toeneemt met de winst in versterking.

8.1. *Inverted V.*

De inverted-V is interessant vanwege dat maar één mast nodig is. De effectieve hoogte ligt op ongeveer 64%. Dit betekent dat de mast hoger dient te zijn in verhouding tot de twee masten voor een horizontale dipool.

De Inverted-V heeft als NVIS antenne het nadeel dat hij in zijn lengte richting een behoorlijke verticaal gepolariseerde component produceert. Dit leidt tot een lage opstralingshoek bij goede grondgeleiding en lagere gain in verticale richting (leuk voor lange afstand, maar niet voor lokaal en regionaal verkeer). De antenne wordt meer gevoelig voor onder geringe elevatie invallende storing.

8.2. *Hele golf dipool en 1.25λ dipool.*

De hele golf dipool heeft in het vrije veld (dus geen grond aanwezig) een gain van 4.0 dBi (tegenover 2.14 voor een halve golf dipool). De openingshoek bedraagt 51° . De ingangsweerstand is echter erg hoog (kOhm gebied). Een kwartgolf kippenladder kan men gebruiken om de impedantie naar 50 Ohm te transformeren.

Boven een grondvlak met kleine h/λ bedraagt de openingshoek rond de 40° (en rond de 92° loodrecht op de dipool). Dit betekent dat het dekkingsgebied sterk ovaalvormig wordt. Indien men in het midden van Nederland de dipool in OW richting opstelt, heeft men in NZ richting een goede dekking (en minder last van stations vanuit het oosten en westen).

Over goed geleidende grond, en zeker met 3 gronddraden, neemt de ingangsweerstand verder toe. Over slecht geleidende grond neemt de ingangsweerstand niet toe, of zelfs af (ten opzichte van hele golf dipool in het vrije veld). De maximaal haalbare gain over perfect ground is 11dBi. Een ander voordeel van de hele golf dipool is zijn 33% grotere bandbreedte t.o.v. een halve golf dipool, waardoor je meestal geen dubbele draad nodig hebt.

Het verlengen van de dipool tot maximaal 1.25λ geeft nog enige toename van gain, maar ook het ontstaan van zijlobben en wegvallen van het bandbreedtevoordeel. In sommige gevallen kan aanpassing plaatsvinden met alleen een spoel in combinatie met een 1:1 balun

8.3. *Dubbele hele of halve golf dipool*

Als je plaatselijk de wolken wilt opwarmen is een 2 elements array van full-wave dipoles een optie. Indien je de dipolen $0.5..0.6\lambda$ uit elkaar plaatst, en in fase voedt, kom je over perfect ground tot bijna 14 dBi. De ruisbijdrage neemt echter niet toe, zodat de S/N ratio in geval van ontvangen beter wordt.

Een array bestaande uit twee halve golf dipolen ($0.5..0.6\lambda$ uit elkaar) is eveneens een goede verticale straler (ong 12 dBi gain over perfect ground).

Om het stralingsrendement te verbeteren kunnen gronddraden toegevoegd worden zoals eerder behandeld.

8.4. Horizontale geplaatste loop antennes.

Loops kunnen gebruikt worden, mits ze omhoog stralen.

1. Een hele golf loop (zijden van 0.25λ) is zeer geschikt en is laagohmig in het voedingspunt (maar vereist wel 4 masten!).
2. Een aan het eind onderbroken 2λ loop geeft meer gain (maar is veel groter en hoogohmig aan zijn ingang).
3. Een niet onderbroken 2λ loop is niet geschikt voor NVIS communicatie, omdat deze niet omhoog straalt.

9. Slot.

U bent aangekomen bij het eind van het document. Het antenneontwerp, en dit document, is gebaseerd op een ontwerpprocedure welke onderdeel uitmaakt van een van TeTech's antennecursussen. Zoals reeds eerder genoemd, hebben de goede resultaten de doorslag gegeven om de ontwerpoverwegingen tijdens mijn vakantie in Zuid Spanje op papier te zetten. Wellicht biedt het anderen tot inspiratie.

Zonder medewerking van Scouting Jan Campertgroep Maarssen (www.jancampertgroep.nl), en de familie Spelt (weiland), was dit project niet van de grond gekomen.

De tabellen met ontwerpgegevens voor "good ground" en "bad ground" zijn speciaal voor dit document aangemaakt om u te helpen een naar tevredenheid werkende antenne te maken binnen de gegeven randvoorwaarden.

Er zijn op dit moment geen plannen om het document te vertalen naar, bijvoorbeeld, het Engels.

TeTech heeft twee antenneontwerp cursussen beschikbaar: "Praktisch Ontwerp van "kleine" RF Antennes" en "Praktisch Ontwerp van RF Antennes" (<http://www.tetech.nl/cursussen.htm>).

These courses are also available in English (lectures and course material): "Practical design of small RF antennas" and "Practical RF Antenna Design" (<http://www.tetech.nl/courses.htm>).

Opmerkingen om de bruikbaarheid van dit document te verbeteren, zijn zéér welkom. Niet commerciële gebruikers (hobbyisten, studenten) kunnen hun vragen sturen naar divers@tetech.nl. Afhankelijk van de beschikbare tijd worden deze beantwoord (dit lukt tot nu toe behoorlijk goed). Probeer ook eens nieuwsgroepen. Ik ben geregeld te vinden op nieuwsgroepen met betrekking tot antennes (UK, NL, ES).

Bedrijven en instellingen kunnen rechtstreeks contact opnemen met TeTech.

Wim Telkamp.
TeTech