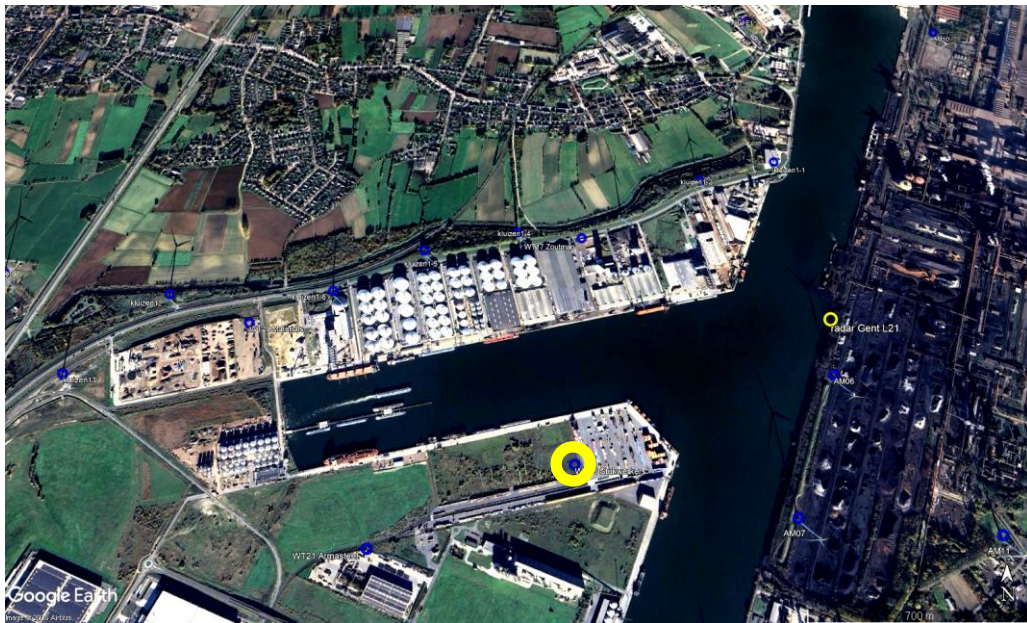


Studie omtrent de mogelijke invloed van een windturbine aan het kanaal Gent-Terneuzen, - site Kluizendok “Stukwerkers” – op de havenradar en scheepsradar



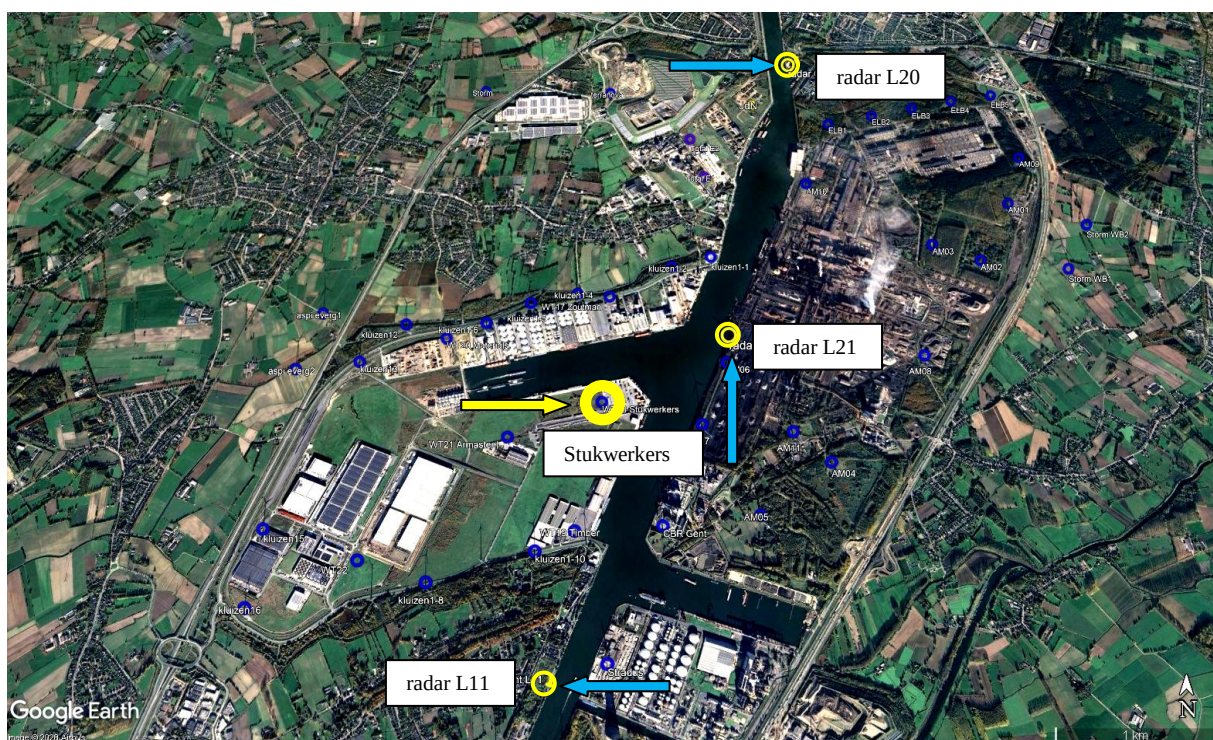
In opdracht van Luminus
Prof.dr.ir.J.Catrysse (19/03/2026)

Studie omtrent de mogelijke invloed van een windturbine kanaal Gent-Terneuzen, site Kluizendok “Stukwerkers” op de havenradar en scheepsradar

1. Inleiding.

In deze studie wordt nagegaan wat de mogelijke invloed is bij vervanging van een windturbine aan het kanaal Gent-Terneuzen – Kluizendok, site “Stukwerkers” - met betrekking tot de havenradars en de scheepsradar.

De locatie van dit project is gegeven in onderstaande kaart.



Figuur 1. Overzicht inplantingszone windturbine en ligging havenradars L11, L20 en L21

Uit bovenstaande overzichtskaart blijkt dat de afstanden tussen de havenradars L11 en L20 tot de windturbine uit dit project respectievelijk 2050 m en 3775 m bedraagt, en voor de havenradar L21 is dit 1100 m.

De havenradars worden aangegeven met een blauwe pijl, de windturbine met een gele pijl.

In de praktijk betekent dit dat naar operationele invloed, de mogelijke effecten van de windturbine uit dit project voor deze havenradars L11 en L20 verwaarloosbaar zal zijn (zie verder de detailanalyse).

De afstand van de nieuwe windturbine tot het Zeekanaal Gent-Terneuzen bedraagt 300 m, en tot de kade van het Kluizendok 200 m, tot de vaargeul 450 m en tot het centrum van de ingang zelf van het Kluizendok is dit 550 m

2. Situering en actuele gegevens.

In een zone aan het kanaal Gent-Terneuzen, op de site “Kluizendok site Stukwerkers” (zoals aangegeven op figuur 1), wordt de vervanging gepland van een windturbine. Gegeven de specifieke ligging tegenover het zeekanaal, dient een advies ingewonnen voor deze turbine bij de bevoegde instanties van De Vlaamse Waterweg (vroeger WenZ). Hierbij dient rekening gehouden met de vereisten van de omzendbrief EME/2000.01 omtrent het optreden van een mogelijke radarblinde zone, ten gevolge van de geplande windturbine. Dit is vervat in: “Besluit van de Vlaamse Regering van 5 juni 2009 tot aanwijzing van de instanties die over een vergunningsaanvraag advies verlenen”, bvr 5/6/2009; b.s. 24/8/2009).

De vraag wordt dus gesteld indien, voor de gegeven situatie, er zich inderdaad radarblinde gebieden kunnen voordoen met betrekking tot de havenradar(s) en de scheepsradar.

3. Gegevens van de havenradar, scheepsradar en windturbine.

In deze paragraaf worden de nodige parameters samengevat van de havenradar, een typische scheepsradar en typische gegevens van een windturbine, die nodig zijn voor deze studie.

Uit de gegevens beschikbaar gesteld door de afdeling Scheepvaartbegeleiding volgt dat de havenradars L20 en L21 van het type “Therma Scanter 2001 – 18 ft antenne” zijn, de havenradar L11 van het type “Bridgemaster E” met antenne 8’ is, en werd ook een typische scheepsradar “Bridgemaster E” als voorbeeld gekozen, met een kleine antenne van slechts 4’ (1.2 meter), zoals dat voor een (binnen)schip als gebruikelijk kan gesteld worden.

3.1. Havenradar

De havenradars in dit gebied hebben een “codenaam” L11, L20 en L21.

Parameter	antenne 18’
Power	4 kWatt
Pulsduur	50 nsec
IF Bandwidth	20 MHz
Receiver sensitivity noise/detection	- 125 dBW/-119 dBW
Polarisatie	Horizontaal
Antenna gain (dB)	35
Azimuth beamwidth (-3 dB punten in °)	0.4°
Zijlobben in horizontale vlak (< 5° / >5°)	< -27 dB tot -30 dB

Tabel 1a. Algemene gegevens van de havenradars L20 en L21

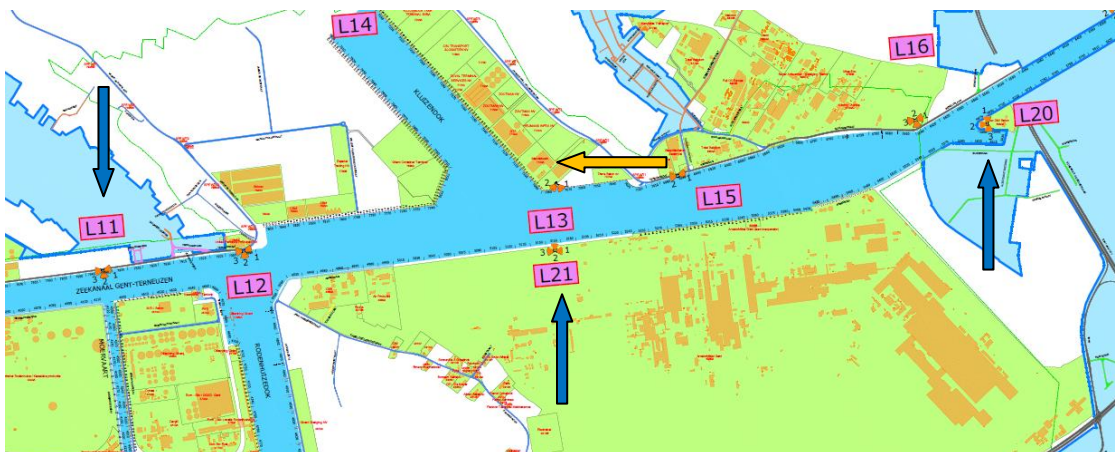
Parameter	antenne 8’
Power	10 kWatt
Pulsduur	50 nsec
IF Bandwidth	20 MHz
Receiver sensitivity noise/detection	- 119 dBW/-113 dBW
Polarisatie	Horizontaal
Antenna gain (dB)	31
Azimuth beamwidth (-3 dB punten in °)	1°
Zijlobben in horizontale vlak	< -24 dB

Tabel 1b. Algemene gegevens van de havenradar L11

De havenradars L20 en L21 (Therma Scanter 2001 met antenne 18’ CHL/SG35.0H18-IC2) hebben de karakteristieken zoals aangegeven in de bovenstaande tabel 1a bij 9410 MHz.

De havenradar L11 (Bridgemaster E met antenne 8’) heeft de algemene karakteristieken zoals aangegeven in de bovenstaande tabel 1b bij 9410 MHz.

De referenties L12, L13 en L15 betreffen enkel camera bewaking.



Figuur 2. Ligging van de havenradars L11, L20 en L21 en site “Stukwerkers”

Verder hebben de havenradars nog de volgende ligging:

radar	locatie	
L11	51°08'26.94"N	3°46'29.00"O
L20	51°11'23.28"N	3°48'11.28"O
L21	51°09'51.12"N	3°47'35.82"O

Tabel 2. Ligging van de havenradars L11, L20 en L21

Bovendien wordt er op het (uitgezonden) radarsignaal een blanking ingesteld zodat er niet wordt uitgestraald over de landzijde.

3.2. Scheepsradar

Een typische scheepsradar (vb. Bridgemaster E) heeft de volgende karakteristieken:

Parameter	antenne 4'
Power	4 kWatt
Pulsduur	50 nsec
IF Bandwidth	20 MHz
Receiver sensitivity noise/detection	- 119 dBW/-113 dBW
Polarisatie	Horizontaal
Antenna gain (dB)	29
Azimuth beamwidth (-3 dB punten in °)	2°
Zijlobben in horizontale vlak	< -23 dB

Tabel 3. Gegevens van een typische scheepsradar

3.3. Windturbine

Het type windturbine dat voor dit project in aanmerking komt is op het ogenblik van deze studie nog niet definitief bekend. Daarom worden volgende maximale waarden aangehouden:

	WT nieuw
Tiphoogte	250 m
Masthoogte	162,5 m
Mastdiameter voet	max 8 m
Rotordiameter	175 m

Tabel 4. Typische gegevens van een windturbine

WT	locatie		tot L11	tot L20	tot L21	tot kanaal	tot dok
Stukwerkers	51°09'33.13"N	3°46'46.40"O	2050 m	3775 m	1100 m	300 m	200 m

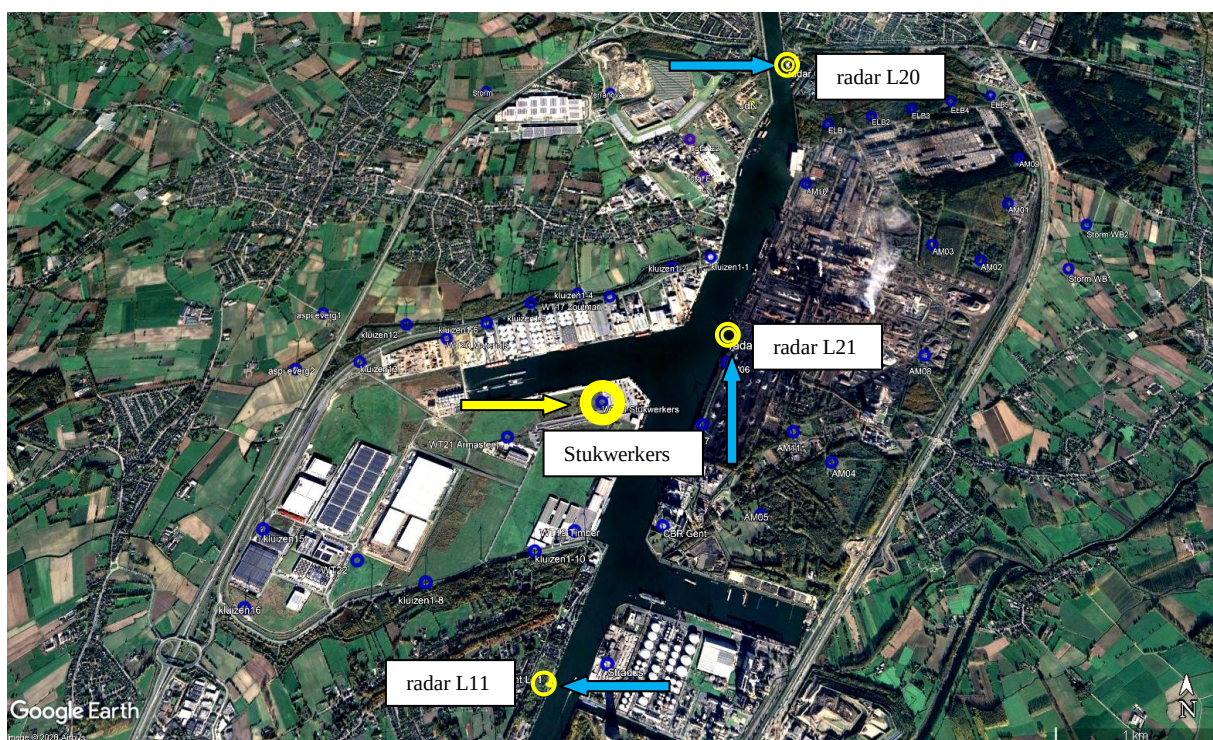
Tabel 5. Locatie van de geplande windturbine

Uit een aantal studies blijkt dat voor dergelijke grote windturbines de mast de dominante factor vormt bij een scheepsradar. Dit komt door het feit dat de radarantenne zo is opgesteld dat steeds een radiopad gevolgd wordt tegen het aardoppervlak. De gondel evenals de wieken maken dan een beduidend kleinere “effectieve radar/radio doorsnede” uit dan de mast zelf, gegeven de tiphoogte en de diameter van de rotor.

Uit voorgaande studies en beschikbare literatuur omtrent de mogelijke invloed op radarsystemen, blijkt dat de mast een dominant effect van minstens 20 à 26 dB tegenover de andere onderdelen voorstelt.

Gegeven de -3 dB openingshoek van de radarbundel en de typische afmetingen van de mast van een dergelijke windturbine, dienen de mogelijke effecten in verband met zowel reflectie als mogelijke schaduwzones in aanmerking genomen te worden

De ligging van de windturbine en de radars wordt in de volgende figuur gegeven.



Figuur 3. Algemene ligging van de huidige projectzone

3.4. Effecten van grote reflecterende voorwerpen op radiogolven.

Grotere reflecterende voorwerpen kunnen de volgende effecten veroorzaken:

- dode zones en verzwakking van het signaal achter het voorwerp. Dit vermindert het normaal bereik van de installatie
- verzadiging van de ontvanger bij sterke reflecties op voorwerpen dichtbij het systeem
- meervoudige reflecties, waardoor mogelijke meervoudige (foutieve) echo's ontstaan

Deze effecten dienen uiteraard gezien te worden in het kader van de positie van zowel de radio/radar systemen en de inplanting van de windturbines.

In deze studie wordt uitgegaan van een middelgroot binnenschip met $RCS = 100 \text{ m}^2$ voor observatie in het zeekanaal, en $RCS = 250 \text{ m}^2$ als worst case voor een groot schip

4. Detailstudie diverse effecten.

4.1. Radarentenne-gain en mogelijke saturatie

De inplanting kan aanleiding geven tot de waarneming van bijkomende vaste reflecties, die door de schipper duidelijk kunnen waargenomen, en ook correct geïnterpreteerd worden.

Hierbij dient ook nagegaan te worden of de ontvanger niet in saturatie kan gestuurd worden bij een te sterke reflectie van een nabij gelegen voorwerp.

Het ontvangen signaal van een radar wordt gegeven door

$P_r =$	$((P_t * G_t) / (4 * \pi * R^2))$	vermogensdichtheid op afstand R
	$* \sigma_m$	RCS van windturbinemast
	$* (1 / (4 * \pi * R^2))$	teruggekaatste vermogensdichtheid
	$* (\lambda^2 / (4 * \pi)) * G_r$	equivalente oppervlakte receiver met $G_r = G_t$

Bij saturatie treedt de ontvanger buiten zijn “dynamic range”. Deze is voor de betrokken havenradar en scheepsradar te ramen als 125 dB boven het ruisniveau. Hieruit kan dan de maximale afstand tussen radarantenne en voorwerp afgeleid worden, waarbij nog saturatie van de ontvanger zou optreden.

$$R^4 = G^2 * \sigma_m * (\lambda^2 / (4 * \pi)^3) * (P_t / P_r)$$

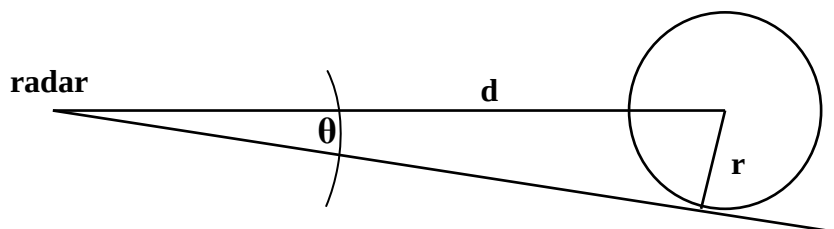
waarbij P_r dus 125 dB boven het ruisniveau van de ontvanger ligt.

Omdat hierbij kan verondersteld worden dat de radarbundel nog niet de volledige mast zal bestralen, mag de effectief bestraalde oppervlakte genomen worden voor de RCS σ_m van de mast, bij een niet-vlakke vorm. Deze wordt voor de betreffende turbinemast op zowat 300 m² geraamd (worst case). Zo bekomt men voor de saturatie-afstand:

havenradar	50 m
scheepsradar	40 m

4.2. Radarbundel en schaduw effect-dode zones en verminderde zichtbaarheid

Om de invloed van de breedte van de radarbundel in te schatten, wordt uitgegaan van de totale horizontale -3 dB bundelhoek. Deze bedraagt voor de havenradars L20 en L21 0.4°, voor de havenradar L11 is dit 1° en voor de scheepsradar is dit een hoek van 2°.



Figuur 4. Hoekbepaling voor volledige bestraling van de windturbinemast door de radarbundel

Hierin is θ de halve -3 dB openingshoek van de antenne, r de straal van de turbinemast en d de afstand tussen radar en windturbine.

De minimale afstand waarbij de radarbundel de mast volledig bestrijkt, wordt gegeven door

$$d = r / \sin(\theta)$$

Rekening houdend met de -3 dB openingshoek, wordt dit een afstand van 1150 m voor de havenradars L20 en L21, van 460 m voor de havenradar L11, en van 230 m voor de scheepsradar, bij een mastdiameter van 8 meter.

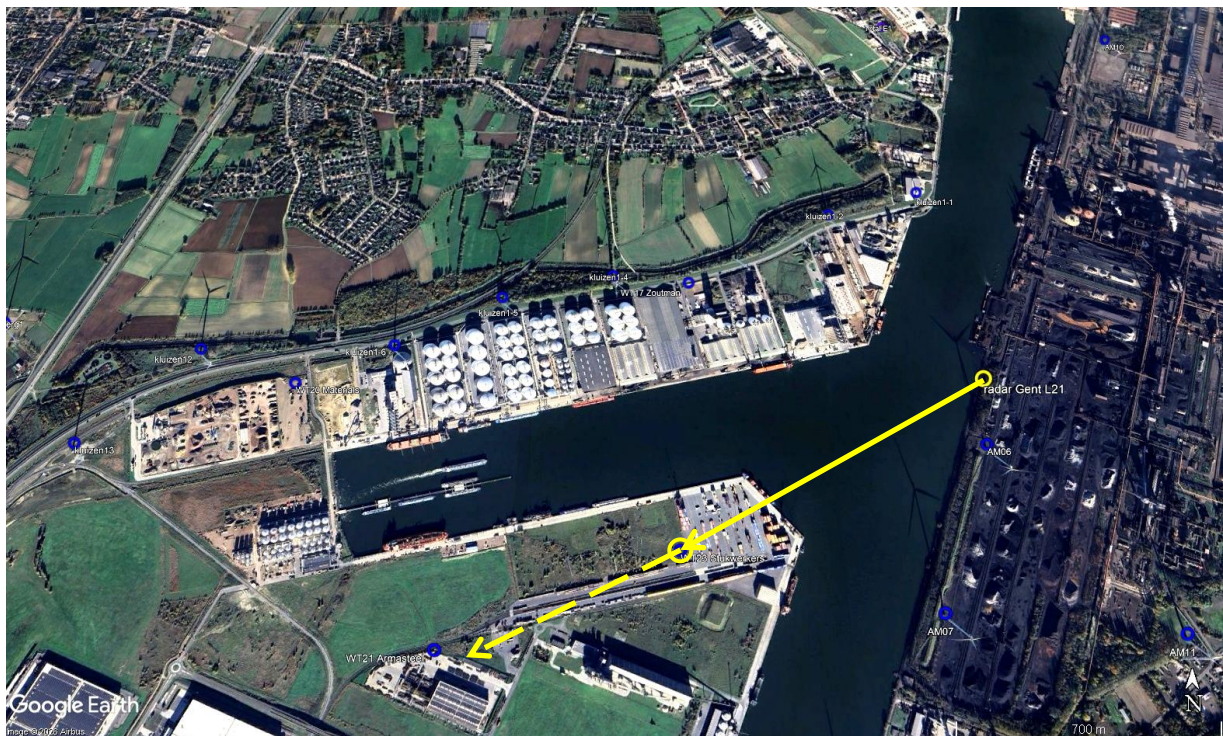
Deze afstand is dan de minimale afstand tussen windturbine en radarantenne, om het diffractiemodel te kunnen toepassen. Het gevolg hiervan is dan dat enkel vlak achter de windturbine een zware schaduwzone ontstaat, en dat verder (een aantal meter achter de windturbine) er een zone van “verzwakt” radarsignaal ontstaat.

Bij een kortere afstand ontstaat er achter de windturbine een volledige schaduwzone (dode zone), wanneer de radarbundel dus maar gedeeltelijk de mast van de windturbine bestraalt.

Gegeven de afstanden tussen de windturbine tot de havenradars L11 en L20 kan dus voor alle situaties het diffractiemodel toegepast worden, en dient voor de havenradar L21 rekening gehouden met een beperkte dode zone achter de windturbine in functie van de mastdiameter.

4.2.1. Havenradar L21.

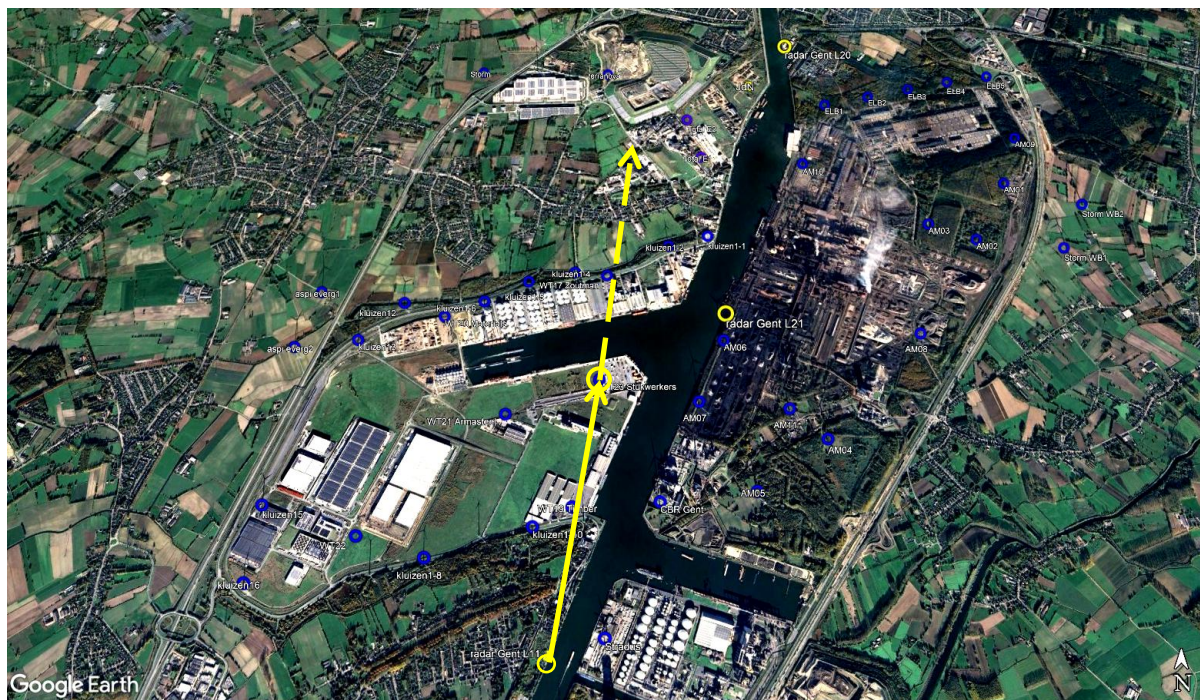
De windturbine en de havenradar L21 liggen onderling op een afstand van 1100 m. Deze afstand is kleiner dan de minimale afstand van 1150 m voor het diffractiemodel, maar de dode zone die hierbij optreedt, ligt aan wal (figuur 5) en heeft dus geen enkele operationele invloed.



Figuur 5. Richting van de dode zone voor de havenradar L21, aan wal gelegen

4.2.2. Havenradar L11.

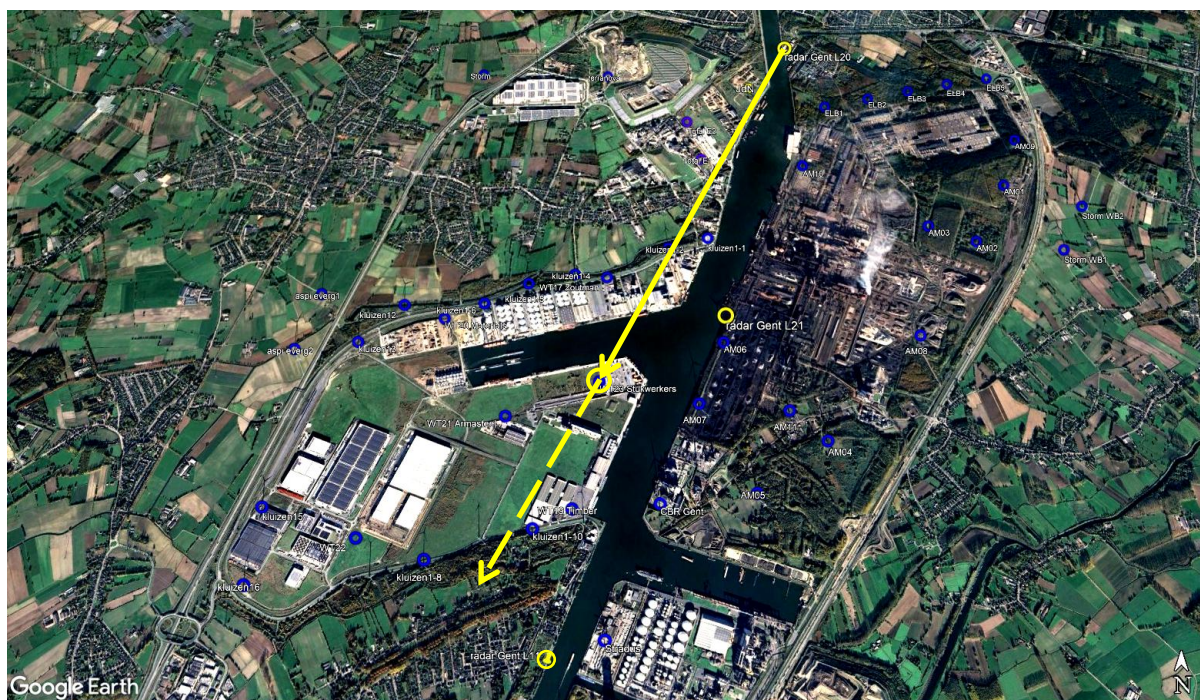
De windturbine en de havenradar L11 liggen onderling op een afstand van 2050 m. De mogelijke schaduwzones die hierbij kunnen optreden liggen in het Kluizendok, en verder aan wal. De zone in het Kluizendok wordt direct door L21 gecontroleerd, en ook L20 bestrijkt ook wel het Kluizendok, echter wel met schaduwzones te wijten aan voorliggende windturbines (huidige situatie). De feitelijke toegang tot het Kluizendok blijft zichtbaar, en wordt ook volledig gecontroleerd wordt door de havenradar L21, die recht tegenover het Kluizendok gelegen is, en dit zonder meer volledig kan waarnemen.



Figuur 6. Richting van de schaduwzone voor de havenradar L11

4.2.3. Havenradar L20.

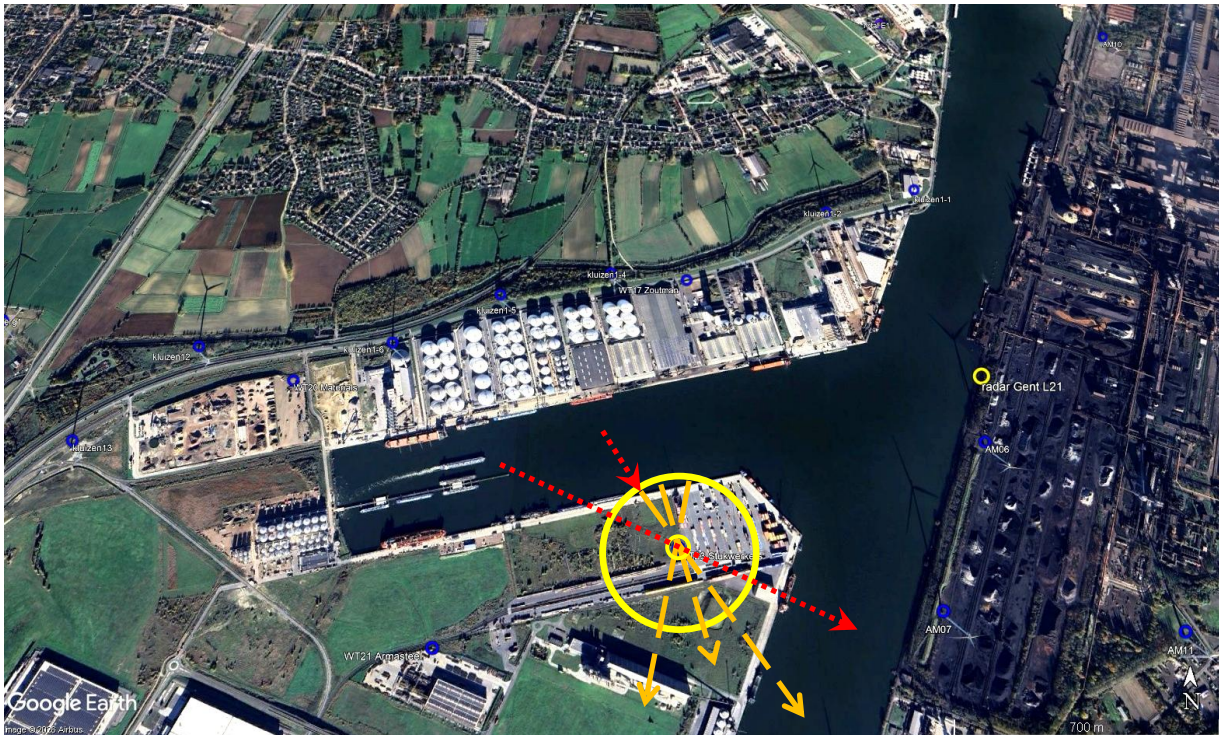
De windturbine en de havenradar L20 liggen onderling op een afstand van 3775 m. De mogelijke schaduwzones die hierbij kunnen optreden liggen volledig aan wal. De radar bestrijkt wel het Kluizendok zelf (figuur 7), echter wel met schaduwzones te wijten aan voorliggende windturbines (huidige situatie). De feitelijke toegang tot het Kluizendok wordt zowel gecontroleerd door radar L11, en volledig gecontroleerd wordt door de havenradar L21, die recht tegenover het Kluizendok gelegen is, en dit zonder meer volledig kan waarnemen



Figuur 7. Richting van de schaduwzone voor de havenradar L20

4.2.4. Scheepsradars

In figuur 8 is de zone van 230 m (mastdiameter 8 m) tot een scheepsradar rond de windturbine aangegeven, waarbij achter de windturbine een echte dode zone ontstaat. Uiteraard dient hierbij enkel rekening gehouden te worden met het feit dat een schip zich op het wateroppervlak bevindt, en dus enkel een klein gebied **aan de kade** van het Kluizendok aanleiding kan geven tot een dode zone voor de scheepsradar.



Figuur 8. Mogelijke dode zones (oranje pijlen) voor de scheepsradar van 230 m, bij een mastdiameter van 8 m

4.3. Schaduwzones of gebieden met verminderde radarzichtbaarheid

Voor de havenradar L21 kunnen er zich voor onderhavig project geen gebieden van, verminderde zichtbaarheid voordoen, die een operationele invloed hebben.

Voor de havenradar L20 wijzigt de zichtbaarheid niet ten opzichte van de huidige situatie (met meerdere windturbines in deze zone van het Kluizendok).

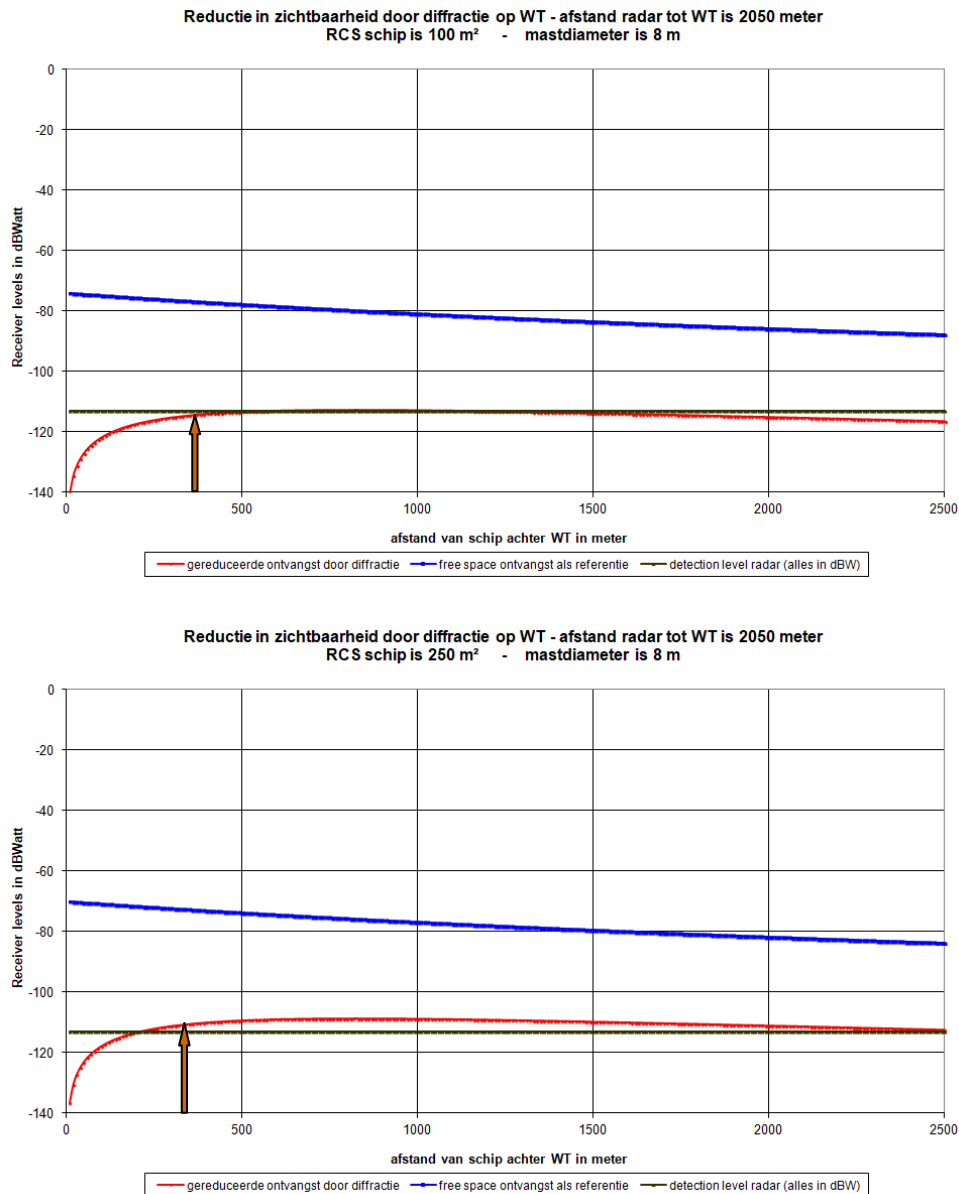
Voor de radar L11 wordt voor de volledigheid van dit rapport de vermindering in zichtbaarheid wel geanalyseerd, rekening houdend met een grotere mastdiameter van 8 m. Belangrijk is te noteren dat de toegang tot het Kluizendok in eerste instantie door de radar L21 gebeurt, en dat zowel radar L11 als L20 een “back-up” vormen.

4.3.1. Havenradar L11

Het gebied met een mogelijke verminderde zichtbaarheid doet zich voor in de richting van een gedeelte het Kluizendok, zoals in figuur 6 aangegeven. Hierbij dient ook opgemerkt te worden dat de schepen in het Kluizendok op de zijwaartse kant worden waargenomen, en dus met grote waarschijnlijkheid toch nog zichtbaar blijven voor radar L11, met een “dode zone” ergens tussenin.

De volgende reeks grafieken geeft de verminderde zichtbaarheid direct op de radaraslijn L11/WT “Stukwerkers”.

Er zal dus een zekere vermindering in zichtbaarheid optreden op de directe radaraslijn achter de windturbine “Stukwerkers”, in een beperkt gedeelte van het Kluizendok zelf (figuur 6).



Figuur 9. Vermindering in zichtbaarheid achter de windturbine, mastdiameter van 8 m en $RCS_{\text{schip}} = 100 \text{ m}^2$ en 250 m^2
 De rode pijl is de ligging van het Kluizendok op de aslijn radar L11/WT op een afstand van 300 m achter de windturbine

4.3.2. Scheepsradars

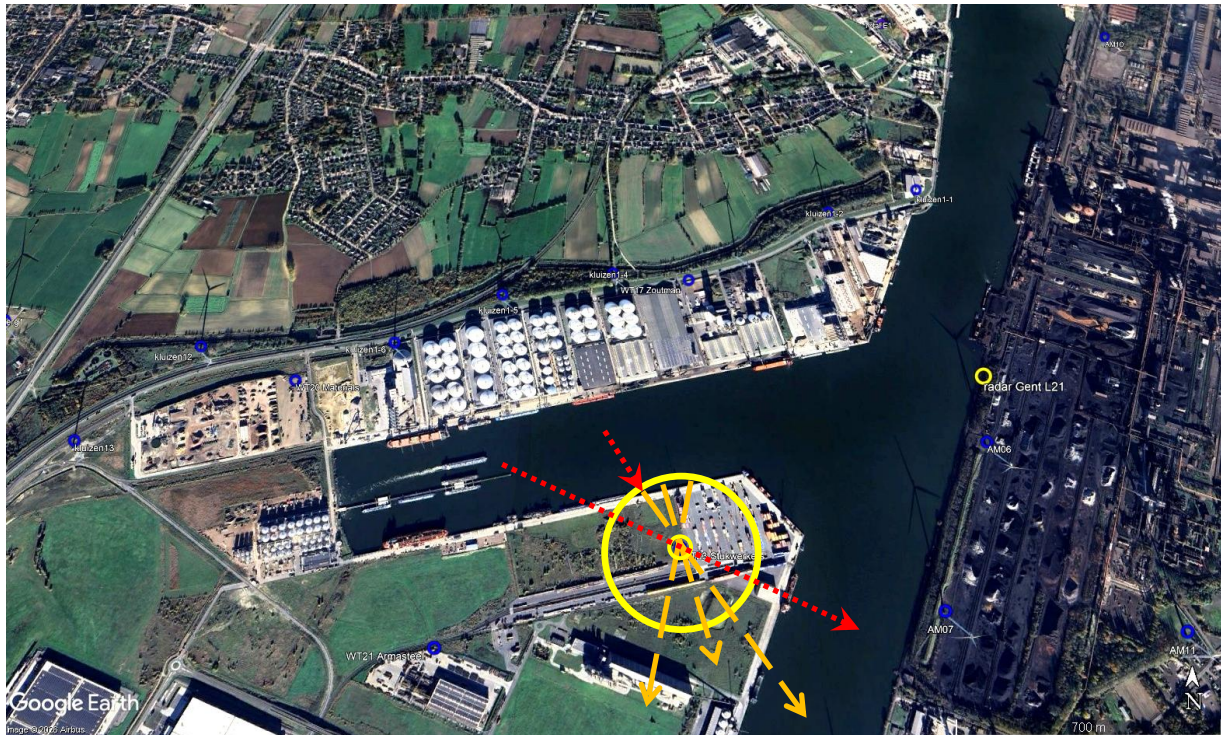
Buiten de gebieden die aanleiding geven tot dode zones, kunnen er zich achter de windturbine ook nog gebieden voordoen, waarbinnen een verminderd niveau van radarsignaal zal optreden. Dit is normaal een combinatie van een kleine dode zone en een zone met verminderde radardekking in de lijn radar-windturbine, achter de turbine.

In figuur 8 zijn met een rode stippelpijl twee voorbeelden gegeven van zones in het Kluizendok naar de vaargeul van het Zeekanaal, die een verminderde zichtbaarheid zullen hebben. Uiteraard geldt hetzelfde ook in omgekeerde richting.

Gegeven de positie van de schepen in het Kluizendok die dit effect zullen waarnemen, stelt dit in de praktijk echter geen operationeel probleem.

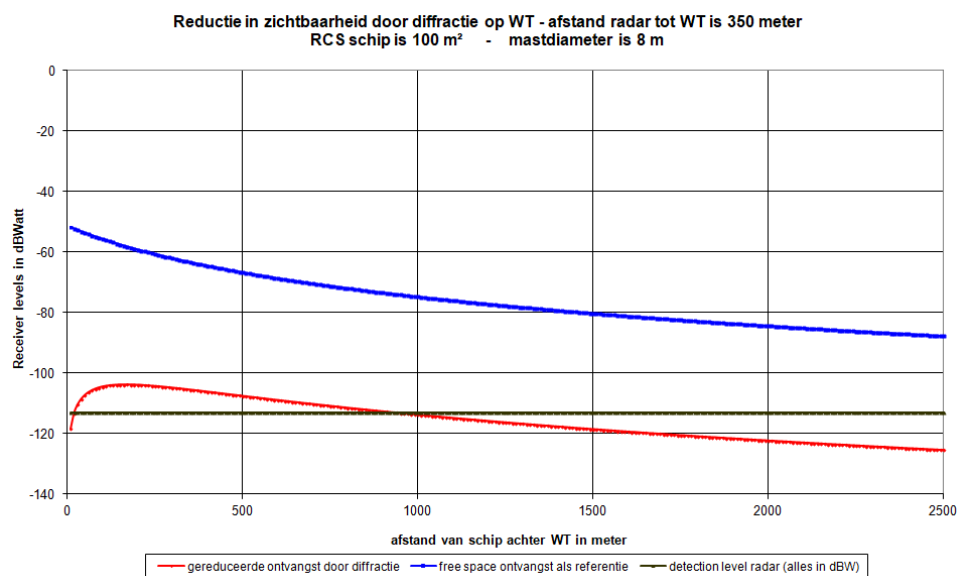
Er dient hierbij nog eens expliciet genoteerd te worden dat de waarnemingen in beide richtingen op de zijkant van de schepen gebeurt, en dus maar een plaatselijk effect geeft. Bovendien is dit een eerder kortstondig tijdelijk effect tijdens het varen zelf.

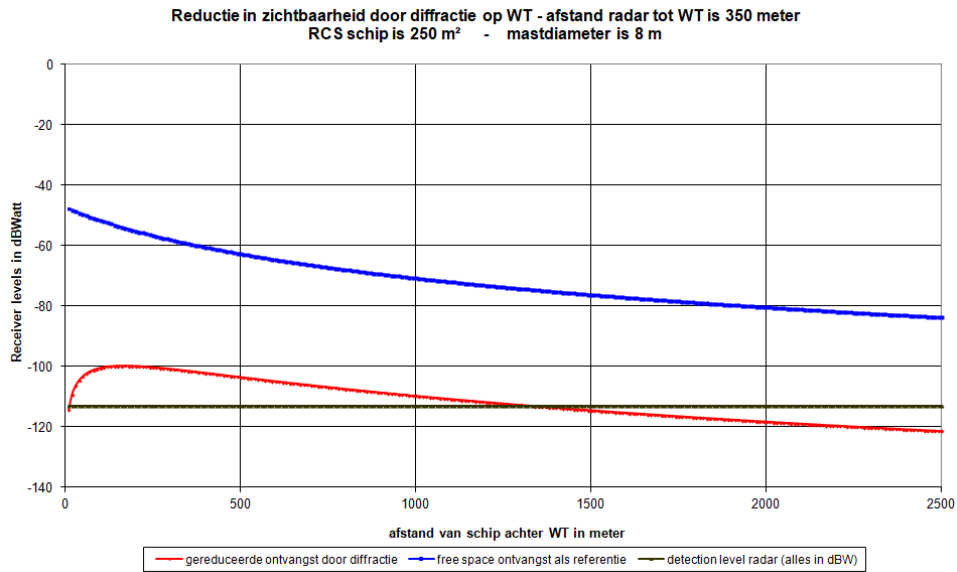
De toegang tot het Kluizendok blijft zonder meer volledig zichtbaar.



Figuur 10. Zones voor verminderde zichtbaarheid door de scheepsradar (rode stippelpijlen) zonder operationeel gevolg
Hetzelfde geldt ook in de omgekeerde richting vanuit het Zeekanaal naar het Kluizendok

De eerste reeks grafieken toont de verminderde zichtbaarheid voor de scheepsradar, vanuit het Kluizendok naar de vaargeul van het Zeekanaal Gent-Terneuzen.

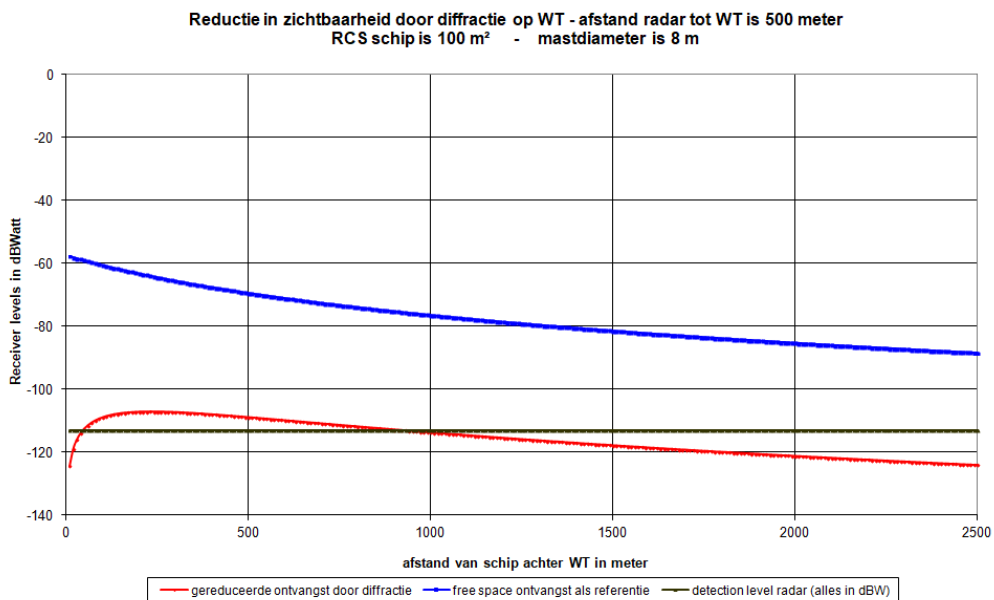


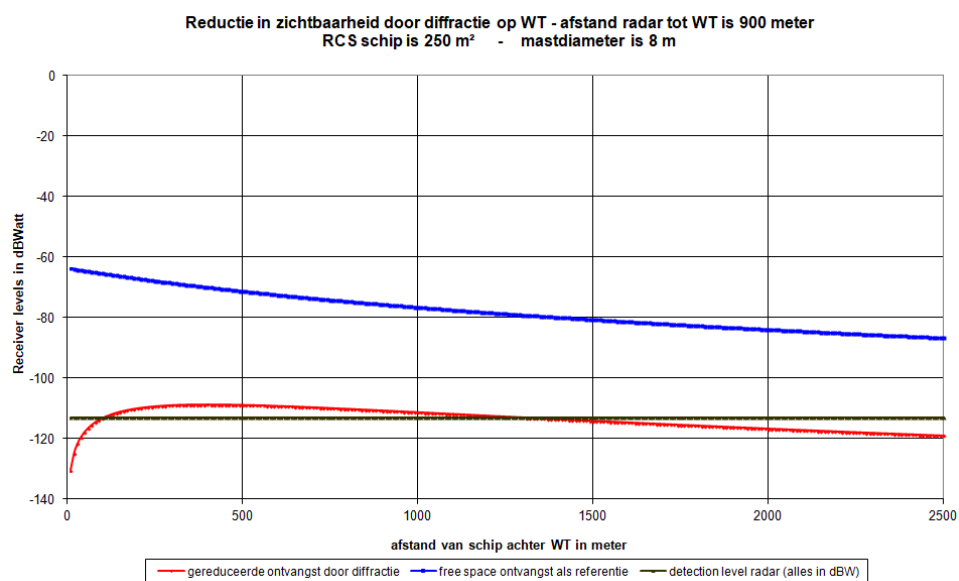
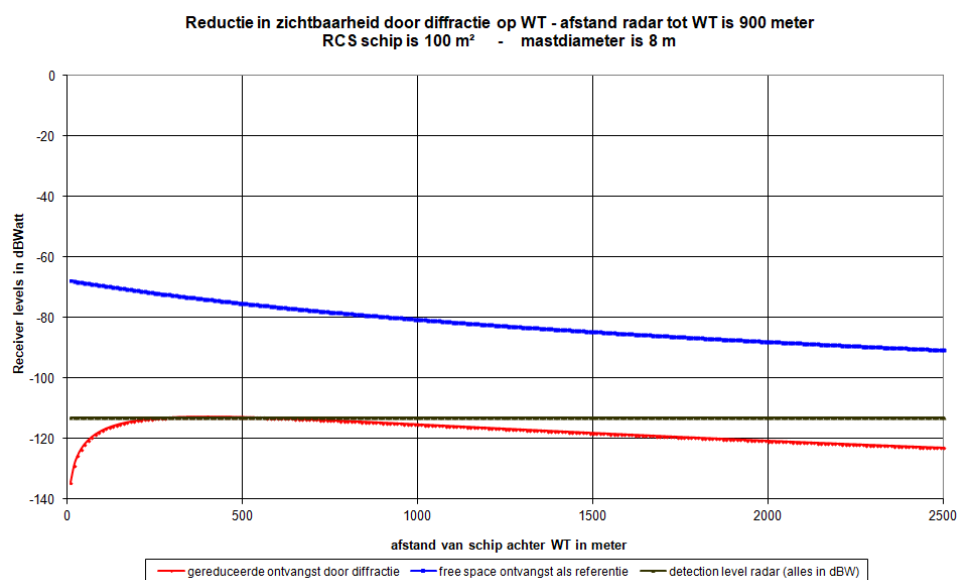
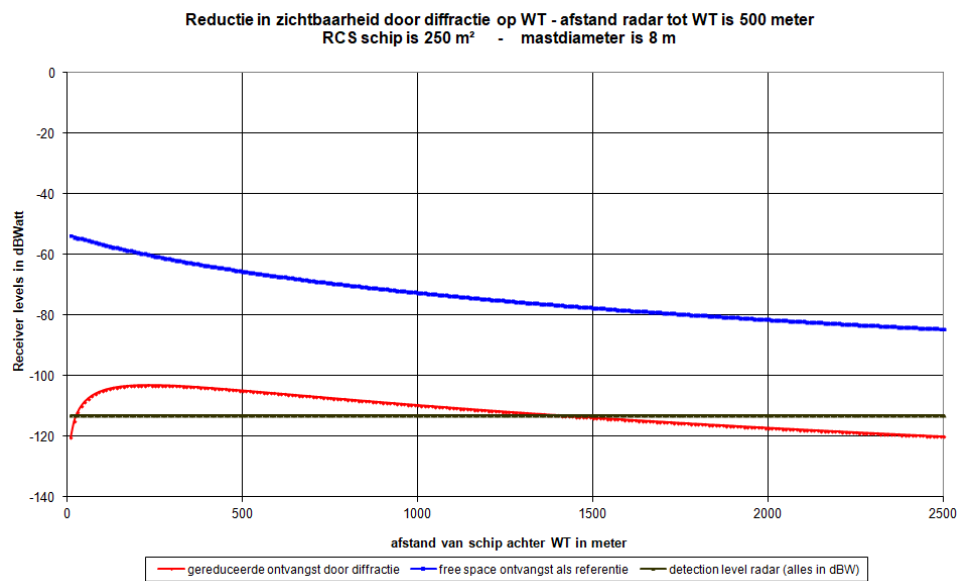


Figuur11a.Vermindering in zichtbaarheid achter de windturbine,mastdiameter van 8 m en $RCS_{\text{schip}} = 100 \text{ m}^2$ en 250 m^2

Een tweede reeks grafieken toont de verminderde zichtbaarheid voor de scheepsradar van een schip in het Zeekanaal, in de richting van het Kluizendok op afstanden van 500 m en 900 m tot de windturbine.

Er dient ook expliciet vermeld te worden dat deze toestand zich slechts tijdelijk zal voordoen bij het varen van het schip, waardoor de aslijn scheepsradar/windturbine zich continu verplaatst, en de radar opnieuw een “free space” zichtbaarheid krijgt.



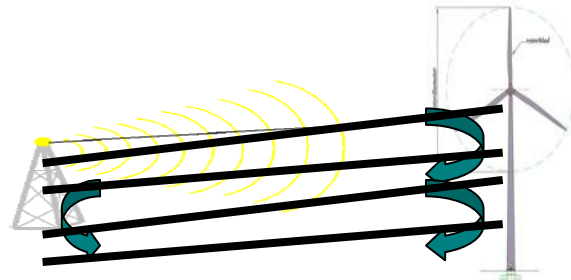


Figuur11b. Vermindering in zichtbaarheid achter de windturbine, mastdiameter van 8 m en $RCS_{\text{schip}} = 100 \text{ m}^2$ en 250 m^2

4.4. Radiale meervoudige reflecties

Meervoudige reflecties kunnen optreden door het feit dat het radarsignaal een aantal keer gereflecteerd wordt tussen verschillende objecten, of tussen een object en de radarantenne zelf. Deze laatste situatie wordt in deze studie verder genoemd als “radiale meervoudige reflectie” en de overige situaties als “meervoudige reflecties”.

Bij radiale meervoudige reflecties wordt het radarsignaal op en neer gekaatst tussen het waar te nemen object en de radarantenne zelf. Dit wordt schematisch weergegeven in de volgende figuur 12. Hierbij zal achter het object (op dubbele afstand) een tweede vast object aftekenen. Deze tweede echo kan eventueel via software uitgefilterd worden uit het radarbeeld.



Figuur 12. Principe van radiale meervoudige reflectie

De afstand tussen de radarantenne en object wordt bekomen uit de volgende formule:

$$R^8 = G^2 * \sigma_m^2 * \sigma_{ant} * (\lambda^2 / (4 * \pi)^5) * (P_t / P_r)$$

Afhankelijk van de gekozen referentie voor P_r , worden twee afstanden tussen radarantenne en windturbine bekomen. Bij de keuze van radiaal detectie niveau voor P_r wordt een afstand bekomen waarbij een tweede object onderscheiden zal kunnen worden. Bij de keuze van noise floor voor P_r zal een extra ruis op het radarscherm verschijnen.

	Radial Resolution Level	Noise Floor Level
havenradars L20 en L21	450 m	550 m
havenradar L11	330 m	390 m
scheepsradar	220 m	270 m

Voor de havenradars L20, L21 en L11 speelt dit effect dus geen rol.

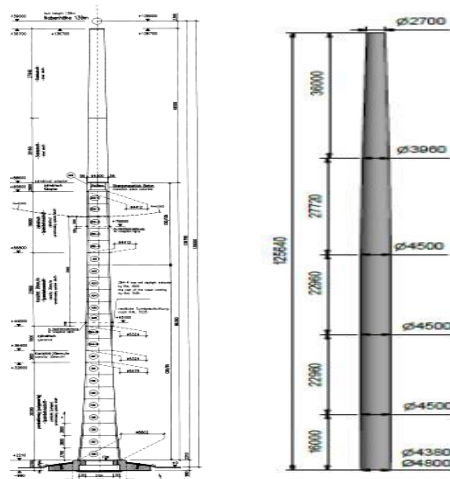
4.5. Samengestelde meervoudige reflecties

Bij meervoudige reflecties dient een onderscheid gemaakt te worden tussen 4 verschillende types. Dit wordt telkens geïllustreerd aan de hand van de schematische voorstellingen in de bijhorende figuren.

Aangezien het juiste type van windturbine op het ogenblik van dit rapport nog niet bekend is, worden een 2 typische varianten van masten behandeld: cilindervormige mast en een licht-conische mast, waarbij in het laatste geval een reductie van de mast RCS optreedt (zie annex A en B voor meer details). De RCS van het schip wordt op 250 m² als worst case genomen. De afstanden tussen windturbine en de radarsystemen wordt in tabel 5bis nog eens herhaald:

WT	locatie		tot L11	tot L20	tot L21	tot kanaal	tot dok
Stukwerkers	51°9'33.13"N	3°46'46.40"O	2050 m	3775 m	1100 m	300 m	200 m

Tabel 5bis. Afstanden tussen radar en windturbine



Figuur 13. Verschil tussen een (licht)conische en cylindervormige mast van een windturbine

4.5.1. Meervoudige reflecties van type 1

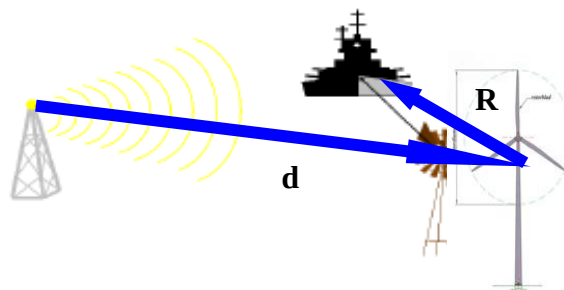
In dit geval is de situatie vrij eenvoudig, omdat de radarbundel eerst invalt op de windturbine, waarbij de afstand d tussen radarantenne en windturbine constant blijft. Daarna is er een reflectie naar een schip, waarbij de bundel teruggekaatst wordt op de windturbine en zo terug naar de radarantenne wordt gereflecteerd. Deze reflectie genereert een valse echo achter de windturbine en het radarsignaal komt opnieuw in de hoofdlobe van de radarantenne terecht.

In dit geval wordt een gebied rond de windturbine gedefinieerd met straal R , waarbij type 1 van meervoudige reflectie kan optreden.

De straal R rond de windturbine wordt gegeven door:

$$R^4 = G^2 * \sigma_m^2 * \sigma_{\text{schip}} * (\lambda^2 / ((4 * \pi)^5 * d^4)) * (P_t / P_r)$$

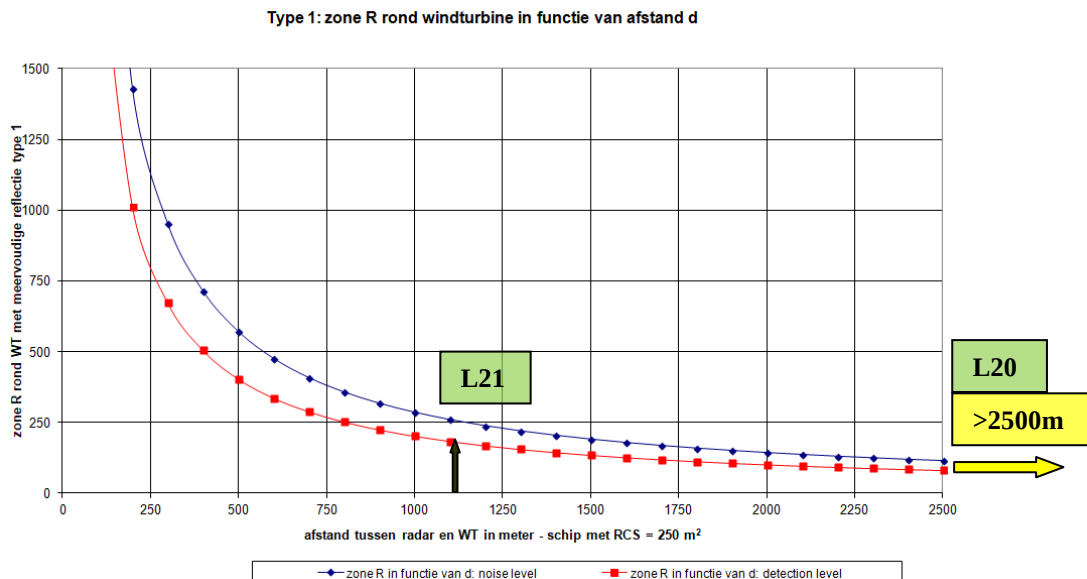
Afhankelijk van de gekozen referentie voor P_r , worden twee afstanden tussen radarantenne en windturbine bekomen. Bij de keuze van radiaal detectie niveau voor P_r wordt een afstand bekomen waarbij een tweede object onderscheiden zal kunnen worden. Bij de keuze van noise floor voor P_r zal een extra ruis op het radarscherm verschijnen.



Figuur 14. Meervoudige reflecties van type 1

4.5.1.1. Havenradars L20 en L21

4.5.1.1.1. cylindervormige mast (worst case)



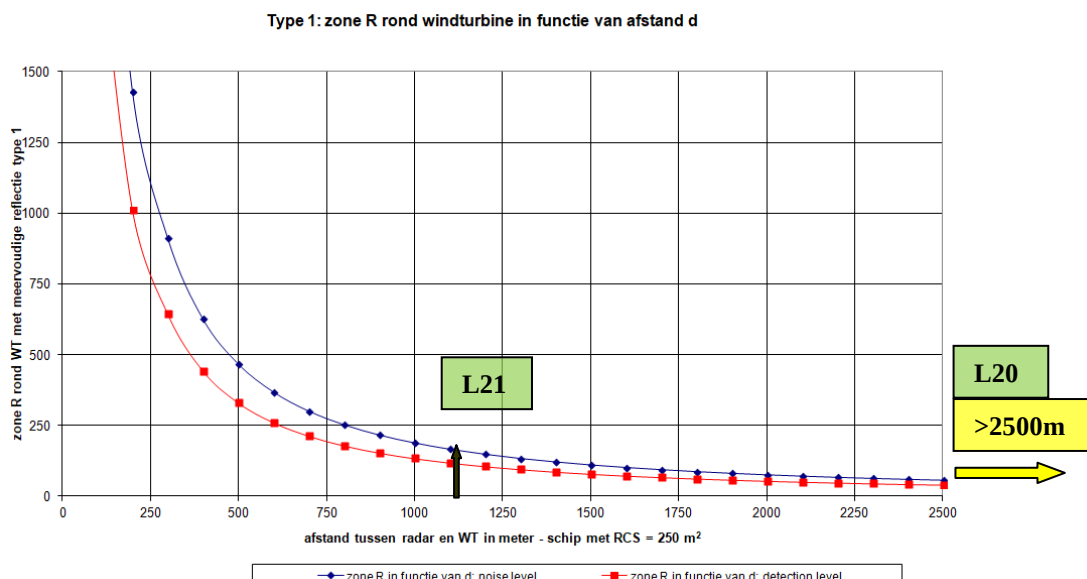
Figuur 15. Zone rond een WT, meervoudige reflectie type 1, in functie van de afstand tot de radar, RCS schip = 250 m²

Voor de radar L20 is er een zone rond de windturbine met een straal van 85 m, zodat objecten (worst case RCS = 250 m²) die aanleiding zouden kunnen geven tot een meervoudige reflectie van type 1 voor de radar L20, zich aan wal bevinden.

Voor de havenradar L21 is deze zone voor de “worst case” cylinder maximaal 250 m, en tot 175 m bij een minimale STC instelling. Zelfs in worst case is er voor meervoudige reflecties van type 1 geen effect op de vaargeul, en enkel aan de dichtbijgelegen kade van het Kluizendok zelf. Bij een gepaste STC instelling reduceert dit tot een zone aan wal.

4.5.1.1.2. licht-conische mast

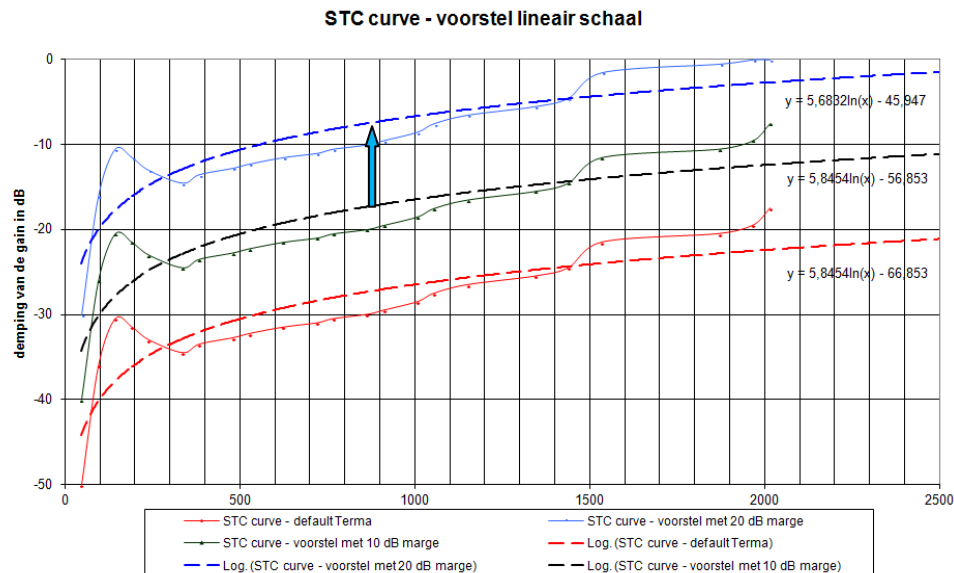
Bij de keuze van een windturbine met een licht-conische mast (hellingsgraad 1°), kan rekening gehouden worden met een zekere reductie van de RCS van de mast (zie annex A). Het blijkt duidelijk uit figuur 16, in vergelijking met figuur 15, dat deze keuze een zeker mitigerend effect heeft.



Figuur 16. Zone rond een WT voor meervoudige reflectie type 1, bij een licht-conische mast, RCS schip = 250 m²

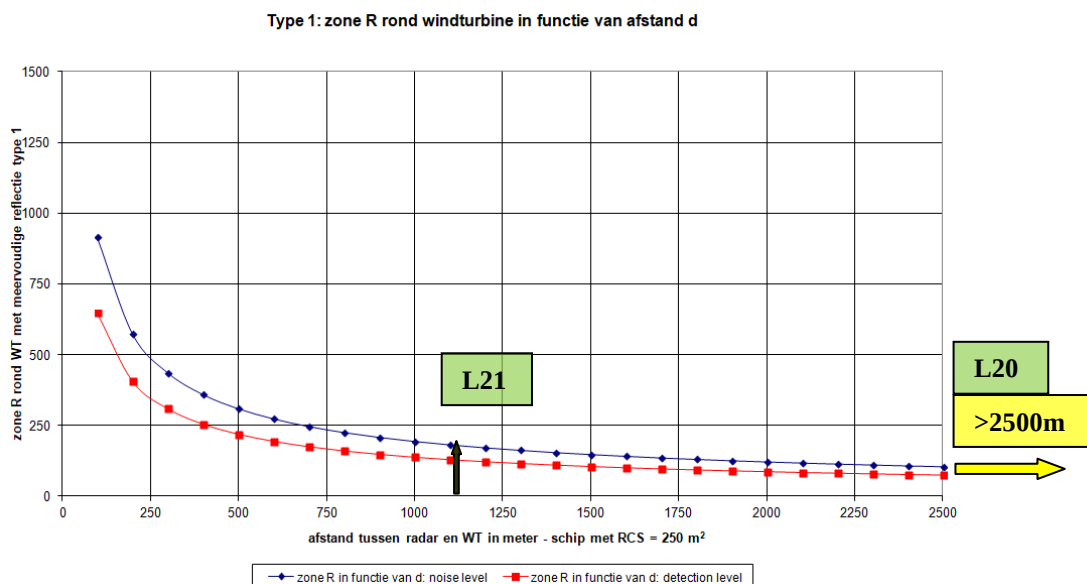
4.5.1.1.3. Mitigerend effect van een minimale STC voor een cilindrische mast

De havenradars zijn uitgerust met een instelbare STC afstelling. In figuur 17 wordt de default instelling gegeven met de rode curve (fabrieksinstelling). Omdat de STC op locatie kan bijgesteld worden naar gelang de lokale situatie, wordt voor dit rapport uitgegaan van een generieke minimale STC instelling, gegeven door de blauwe curve in figuur 18.

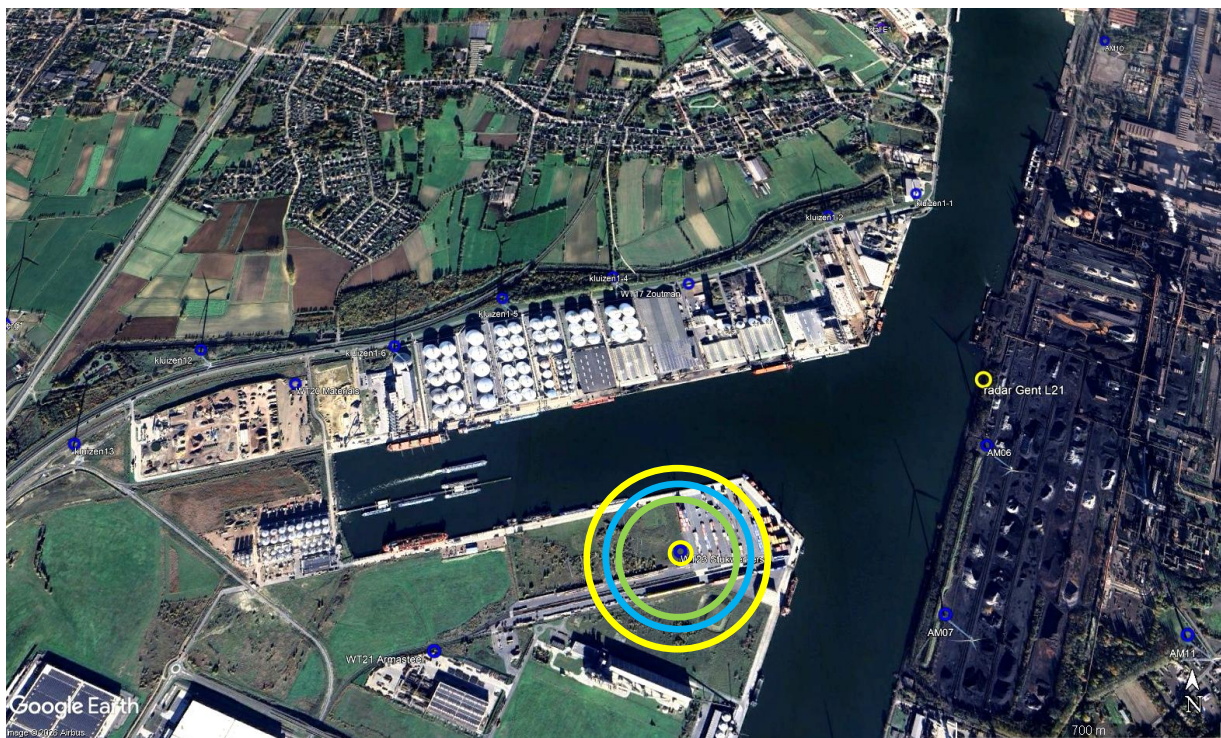


Figuur 17. Typische STC curves: blauwe curve is de minimale default instelling voor L21 (Terma Scanner 2001i)

Het effect van deze minimale STC instelling wordt in de figuur 18 gegeven. Ook hier is een zeker mitigerend effect waar te nemen voor een meervoudige reflectie van type 1, zoals blijkt uit de volgende figuur 18 in vergelijking met de grafieken van figuren 16 en 17.



Figuur 19 . Zone rond een WT voor meervoudige reflectie type 1, bij minimale STC waarden en cilindervormige mast

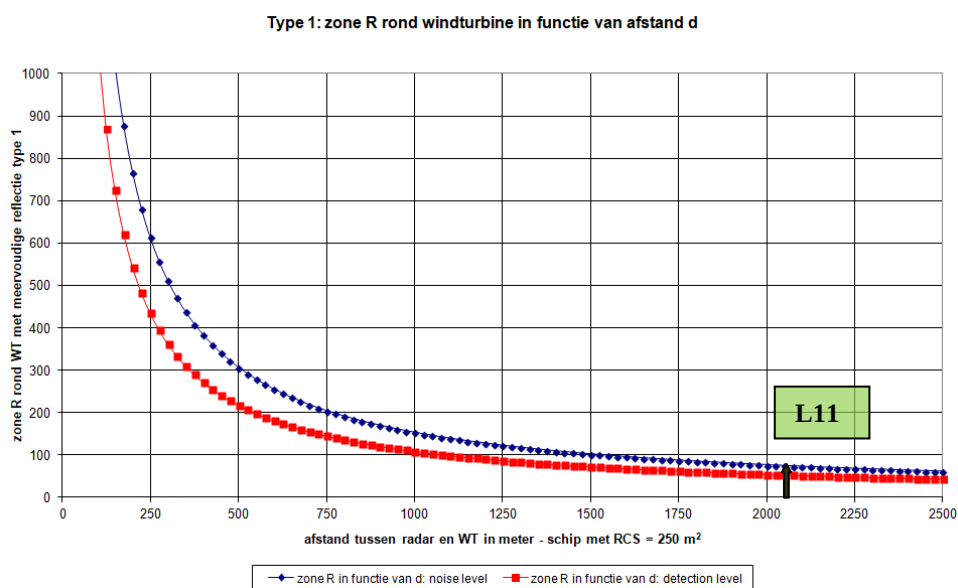


Figuur 20. Zones rond de WT voor meervoudige reflectie type 1 voor de havenradar L21

- cilindervormige mast (geel)
- licht-conische mast (groen)
- default STC met cilindervormige mast (blauw)

4.5.1.2. Havenradar L11

Deze havenradar L11 bevindt zich op 2050 m van de windturbine “Stukwerkers”, en de zone voor meervoudige reflecties van type 1 blijven beperkt tot zowat 50 m, zoals blijkt uit de volgende grafiek voor de worst case situatie van een cilindervormige mast.

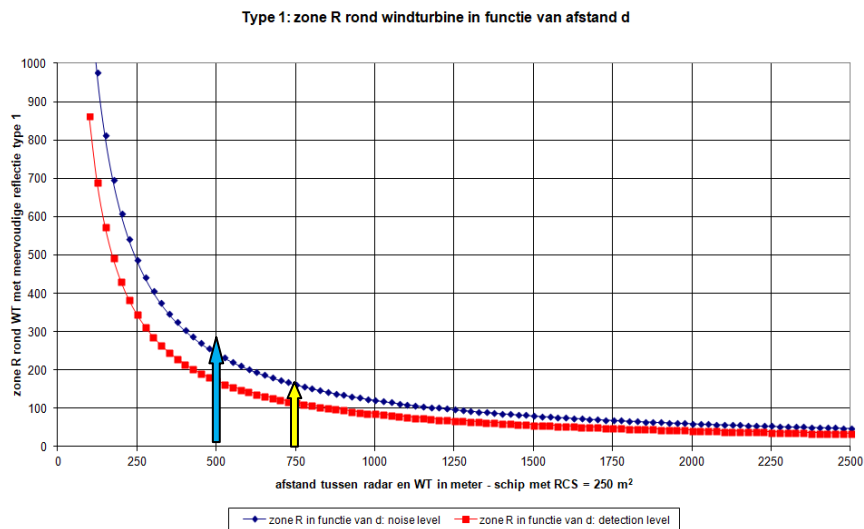


Figuur 20. Zone rond een WT, meervoudige reflectie type 1, in functie van de afstand tot de radar, RCS schip = 250 m²

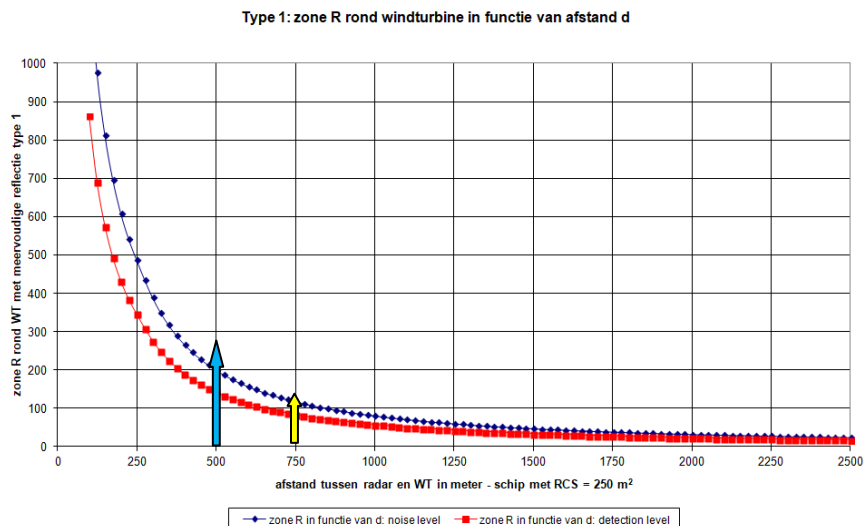
4.5.1.3. Scheepsradars

In de figuren 21 (cylindervormige mast WT) en 22 (licht-conische mast WT) worden in functie van de afstand van de scheepsradar tot de windturbine, de straal van de zone aangegeven waarbinnen het tweede object (schip) zich dient te bevinden om tot dit type meervoudige reflectie aanleiding te geven, moet gelegen zijn.

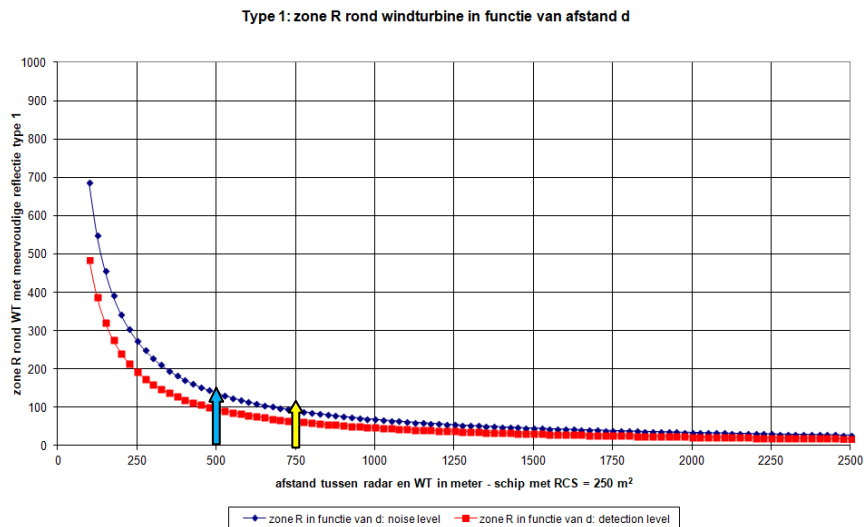
Uit deze grafieken volgt dat in functie van de afstand tussen scheepsradar en windturbine, deze zone waarbinnen zich een tweede object (schip) dient te bevinden, sterk varieert. Hierbij dient genoteerd te worden dat in de praktijk, de versterking van de radarontvanger continu kan bijgesteld worden. In figuur 23 wordt een voorbeeld gegeven waarbij een reductie van 10 dB wordt toegepast, bij een cylindervormige mast van de windturbine.



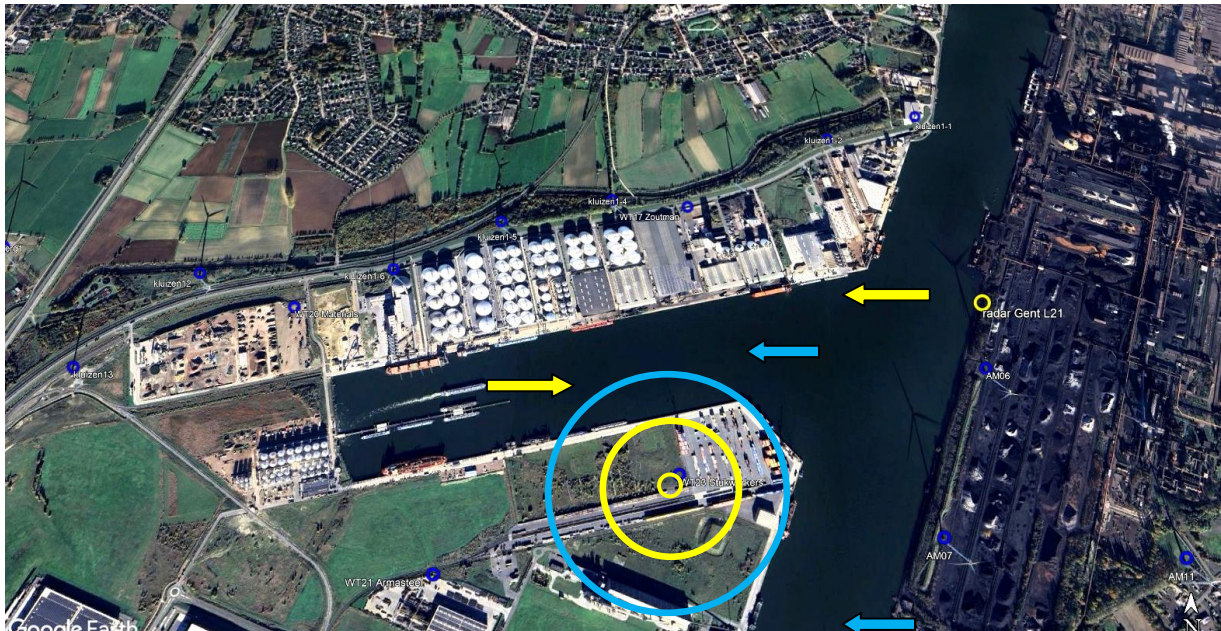
Figuur 21. Zone rond een WT voor meervoudige reflectie type 1, bij een cylindervormige mast



Figuur 22. Zone rond een WT voor meervoudige reflectie type 1, bij een licht-conische mast



Figuur 23. Zone rond een WT voor meervoudige reflectie type 1, bij een cilindervormige mast, reductie gain – 10 dB



Figuur 24. Zone, bij een afstand van de scheepsradar van 500 m (blauw) en 750 m (geel) voor reflectie type 1, worst case van een cilindervormige mast

In een “worst case” van een cilindervormige mast van de windturbine kan leidt dit tot de volgende conclusies:

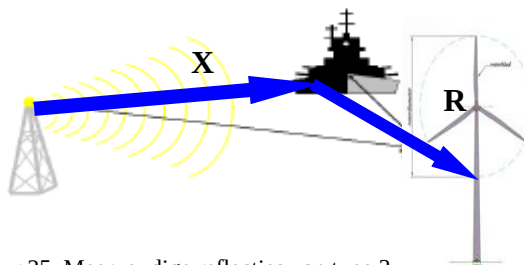
- Bij een afstand van 500 m tussen scheepsradar en windturbine, zal dit effect zich voordoen als het tweede object (schip) zich op een afstand van zowat 300 m van de windturbine bevindt (blauwe pijlen en blauwe zone)
- Bij een afstand van 750 m tussen scheepsradar en windturbine, zal dit effect zich voordoen voor een tweede object (schip) op een afstand tot 150 m tot de windturbine (gele pijlen en gele zone).

Rekening houdend de mogelijke posities van het waarnemend schip (scheepsradar) op het wateroppervlak, volgt hieruit dat de mogelijke valse echo's, die steeds op de as WT/radar achter de windturbine zullen voordoen, aan land zullen gelegen zijn.

De bijhorende effecten van tweede of valse echo verschillen hierbij echter niet van de effecten die sowieso optreden bij een groot reflecterend object of gebouw op de oevers.

4.5.2. Meervoudige reflecties van type 3

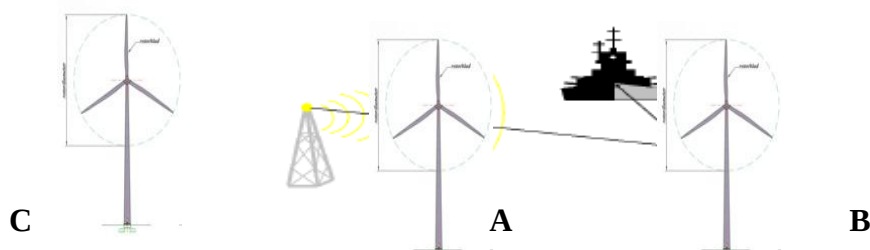
In dit geval valt de radarbundel eerst in op het schip, en wordt dan heen en weerkaatst naar de windturbine. Dit wordt in de volgende figuur schematisch weergegeven. De belangrijke afstand tussen radar en schip X is nu echter niet meer constant.



Figuur 25. Meervoudige reflecties van type 3

In dit geval dient onderscheid gemaakt te worden voor een situatie waarbij het schip en de windturbine zich aan dezelfde kant van de radarantenne bevinden, dan wel waarbij de radarantenne zich tussen beide objecten bevindt. Op die manier dient rekening gehouden met drie verschillende situaties, zoals in onderstaande figuur aangegeven.

Deze reflectie genereert een valse echo achter het schip en het radarsignaal komt opnieuw in de hoofdlobe van de radarantenne terecht.



Figuur 26. De drie verschillende situaties voor meervoudige reflecties bij het type 3.

Voor het type A ontstaat er rond de windturbine een zone van meervoudige reflecties. Eenzelfde zone ontstaat rond de radarantenne voor het type C. Voor het type B zijn er twee gelijke zones rond de windturbine en de radarantenne, dan wel dat het volledige gebied tussen de radar en de WT er gevoelig voor is. De straal R rond de windturbine gegeven door:

$$R^4 = G^2 * \sigma_{\text{schip}}^2 * \sigma_m * \left(\frac{\lambda^2}{(4 * \pi)^5 * X^4} \right) * (P_t / P_r)$$

Hierbij kunnen nu de extreme afstanden beschouwd worden voor elk van de situaties A, B, C.

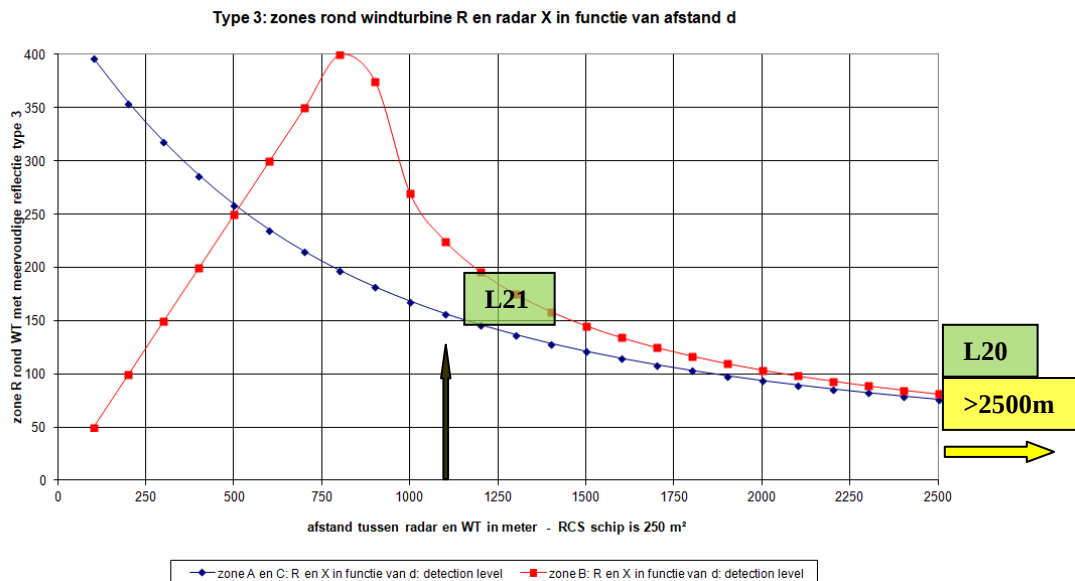
$$K^4 = G^2 * \sigma_{\text{schip}}^2 * \sigma_m * \left(\frac{\lambda^2}{(4 * \pi)^5} \right) * (P_t / P_r)$$

Type A: $X = d + R$	$R = -(d/2) + \{(d/2)^2 + K\}^{1/2}$
Type B: $X = d - R$	$R = (d/2) + \{(d/2)^2 - K\}^{1/2}$
Type C: $X = R - d$	$R = (d/2) + \{(d/2)^2 + K\}^{1/2}$

In voorkomend geval kan hieruit ook de afstand X tot de radarantenne bekomen worden.

4.5.2.1. Havenradars L20 en L21

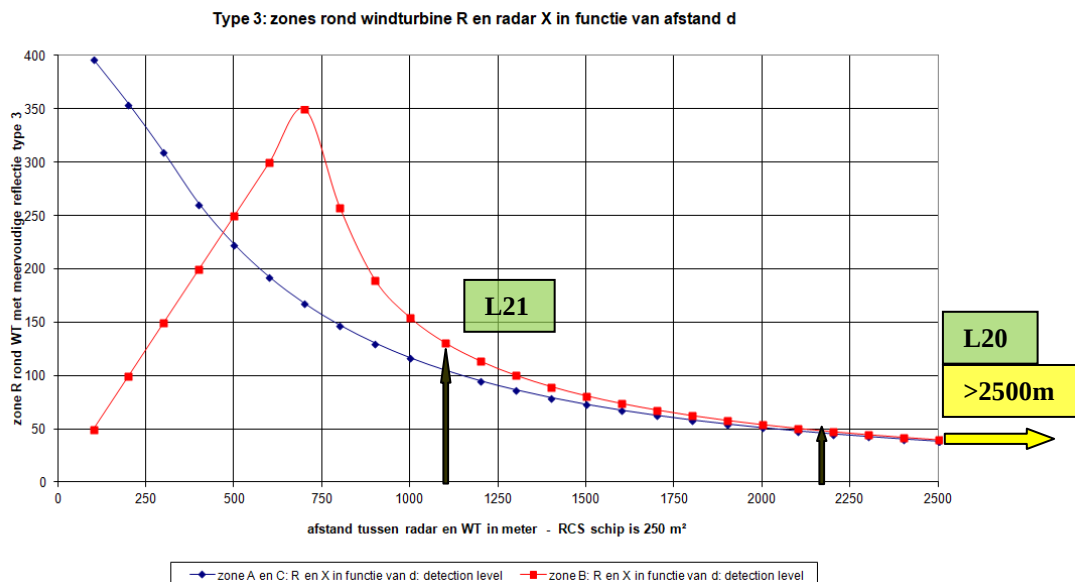
4.5.2.1.1. cilindervormige mast – “worst case”



Figuur 27. Zone rond radar en WT voor meervoudige reflectie type 3, in functie van de afstand tot de radar

4.5.2.1.2. licht-conische mast

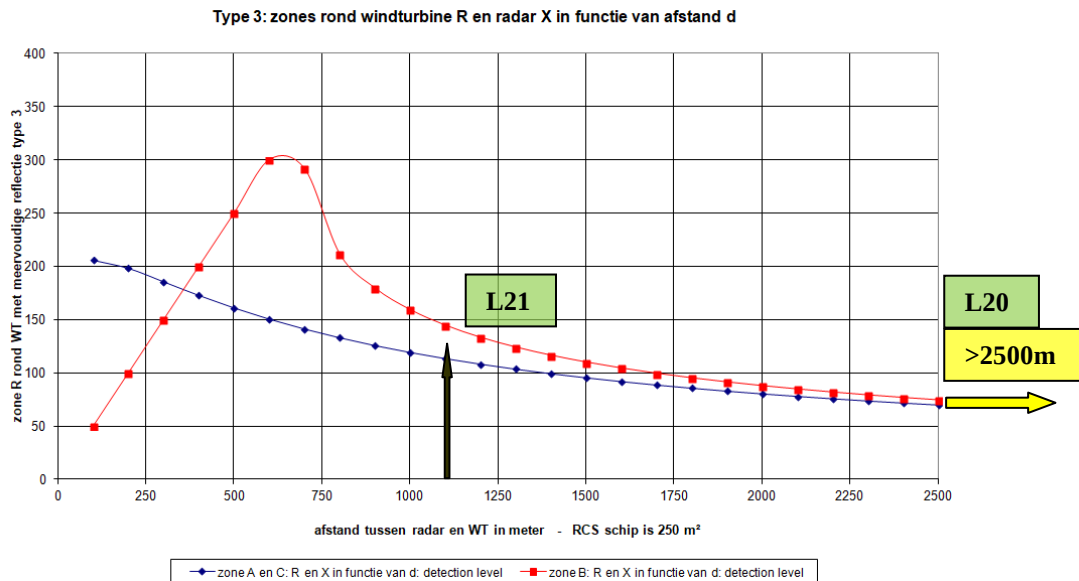
Bij de keuze van een windturbine met een licht-conische mast (hellingsgraad 1°), kan rekening gehouden worden met een beperkte reductie van de RCS van de mast (zie annex A). Gegeven de afstanden tussen de havenradar en de windturbine, volgt duidelijk uit de figuren 27 en 28 dat deze op zich een eerder beperkt mitigerend effect heeft voor deze situatie.



Figuur 28. Zone rond radar en WT voor meervoudige reflectie type 3, bij een licht-conische mast

4.5.2.1.3. Mitigerend effect van een minimale STC voor een cilindrische mast

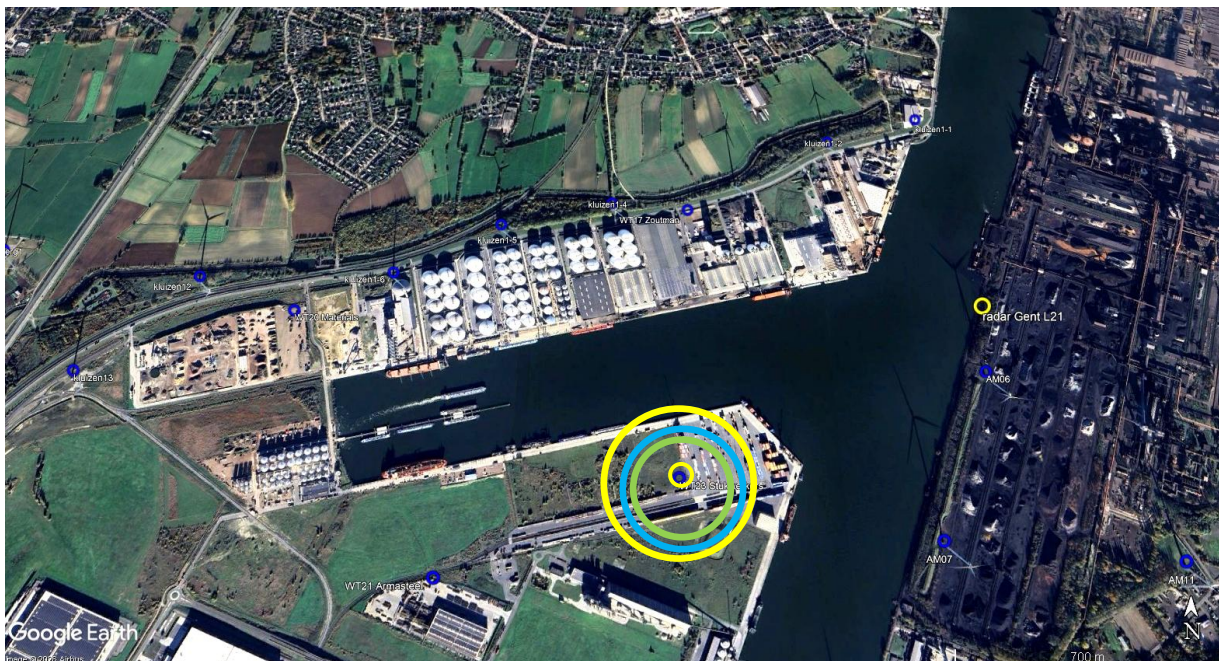
De havenradars zijn uitgerust met een instelbare STC afstelling. In figuur 18 wordt de default instelling gegeven met de rode curve (fabrieksinstelling). Omdat de STC op locatie kan bijgesteld worden naar gelang de lokale situatie, wordt voor dit rapport uitgegaan van een generieke minimale STC instelling, gegeven door de blauwe curve in figuur 18.



Figuur 29. Zones rond een WT voor meervoudige reflectie type 3, bij minimale STC waarden, en cilindervormige mast

De zones omtrent de havenradar L20 en de windturbine reduceren – zelfs zonder een minimale instelling van de STC – tot ongeveer 50 m. Voor schepen op de vaarroute van het Zeekanaal en in het Kluizendok zelf stelt dit dus geen operationeel probleem.

Voor de havenradar L21 is deze zone voor de “worst case” cylinder maximaal 225 m, en tot 150 m bij een minimale STC instelling. Zelfs voor de worst case is er voor meervoudige reflecties van type 3 geen effect vanop de vaargeul, en enkel aan de dichtbijgelegen kade van het Kluizendok zelf. Bij een gepaste STC instelling reduceert dit tot een zone aan wal.

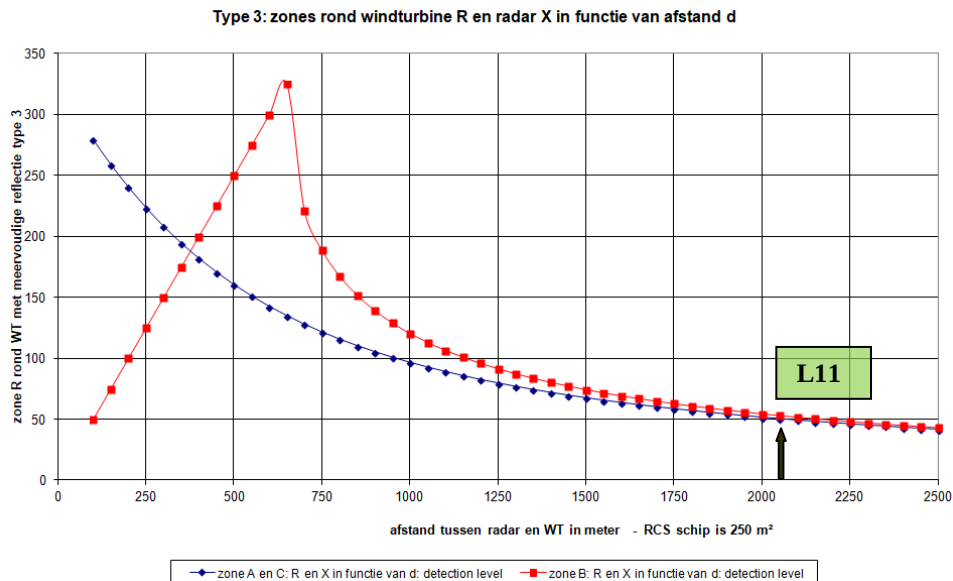


Figuur 30. Zones rond de WT voor meervoudige reflectie type 3 voor de havenradar L21

- cilindervormige mast (geel)
- licht-conische mast (groen)
- default STC met cilindervormige mast (blauw)

4.5.2.2. Havenradar L11

Deze havenradar L11 bevindt zich op 2050 m van de windturbine “Stukwerkers”, en de zone voor meervoudige reflecties van type 3 blijven beperkt tot zowat 50 m, zoals blijkt uit de volgende grafiek voor de worst case situatie van een cilindervormige mast.



Figuur 31. Zone rond radar en WT voor meervoudige reflectie type 3, in functie van de afstand tot de radar

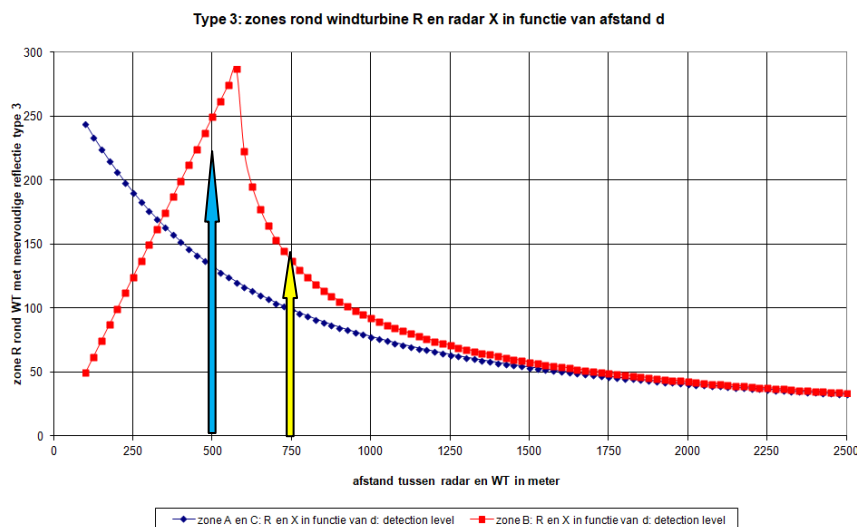
4.5.2.3. Scheepsradars

In de figuren 32 (cilindervormige mast WT) en 33 (licht-conische mast WT) worden in functie van de afstand van de scheepsradar tot de windturbine, de straal van de zone aangegeven waarbinnen het tweede object (schip) zich dient te bevinden om tot dit type meervoudige reflectie aanleiding te geven, moet gelegen zijn.

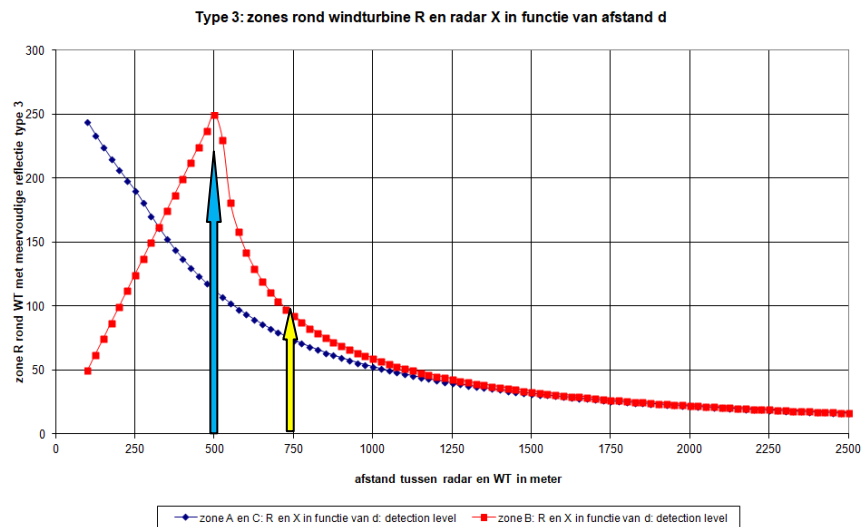
Uit deze grafieken volgt dat in functie van de afstand tussen scheepsradar en windturbine, deze zone waarbinnen zich een tweede object (schip) dient te bevinden, sterk varieert.

Hierbij dient genoteerd te worden dat in de praktijk, de versterking van de radarontvanger continu kan bijgesteld worden. In figuur 34 wordt een voorbeeld gegeven waarbij een reductie van 10 dB wordt toegepast, bij een cilindervormige mast van de windturbine.

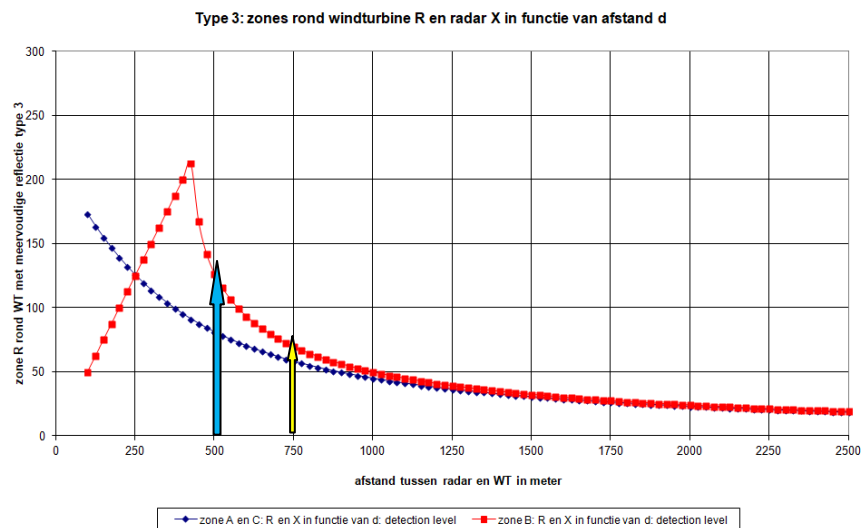
Hierbij dient expliciet opgemerkt te worden dat dit effect niet verschilt van gelijkaardige situaties met grote objecten op de oevers.



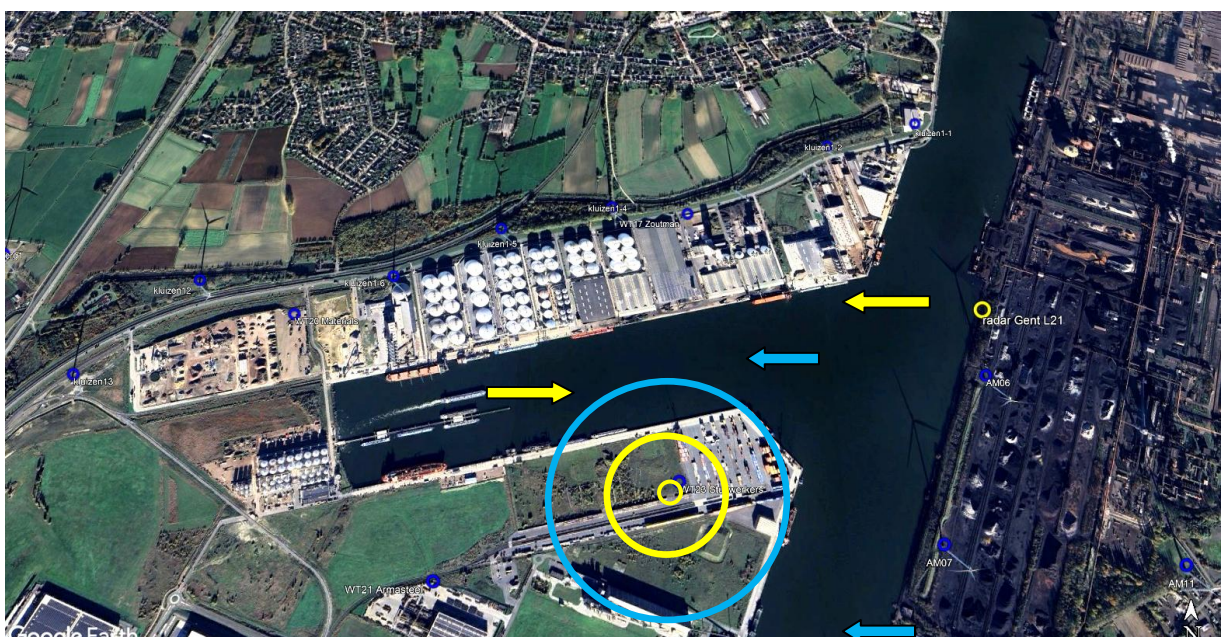
Figuur 32. Zone rond WT, meervoudige reflectie type 3, cilindervormige mast



Figuur 33. Zone rond WT, meervoudige reflectie type 3, licht-conische mast



Figuur 34. Zone rond WT, meervoudige reflectie type 3, cilindervormige mast, reductie gain – 10 dB



Figuur 35. Zone, bij een afstand van de scheepsradar van 500 m (blauw) en 750 m (geel) voor reflectie type 3, worst case van een cilindervormige mast

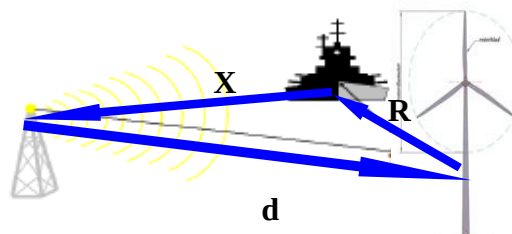
In een “worst case” van een cilindervormige mast van de windturbine kan leidt dit tot de volgende conclusies:

- Bij een afstand van 500 m tussen scheepsradar en windturbine, zal dit effect zich voordoen als het tweede object (schip) zich op een afstand van maximaal 250 m van de windturbine bevindt (blauwe pijlen en blauwe zone)
- Bij een afstand van 750 m tussen scheepsradar en windturbine, zal dit effect zich voordoen voor een tweede object (schip) op een afstand tot maximaal 150 m tot de windturbine (gele pijlen en gele zone).

Rekening houdend de mogelijke posities van het waarnemend schip (scheepsradar) op het wateroppervlak, volgt hieruit wel dat de mogelijke valse echo's, die steeds op de as WT/radar achter de windturbine zullen voordoen, aan land zullen gelegen zijn.

De bijhorende effecten van tweede of valse echo verschillen hierbij echter niet van de effecten die sowieso optreden bij een groot reflecterend object of gebouw op de oevers.

4.5.3. Meervoudige reflecties van type 2&4



Figuur 36. Meervoudige reflecties van type 2 (hierboven) en type 4

In dit geval valt de radarbundel eerst in op het schip, en wordt dan weerkaatst naar de windturbine en zo terug naar de radarantenne (type 4), dan wel precies omgekeerd (type 2 zoals op getoond in figuur 36). Dit wordt in de volgende figuur schematisch weergegeven. De belangrijke afstand tussen radar en schip X is nu echter niet meer constant.

In dit geval dient onderscheid gemaakt te worden voor een situatie waarbij het schip en de windturbine zich aan dezelfde kant van de radarantenne bevinden, dan wel waarbij de radarantenne zich tussen beide objecten bevindt. Op die manier dient rekening gehouden met drie verschillende situaties, zoals reeds in figuur 26 werd aangegeven.

Deze reflectie genereert een valse echo achter het schip (type 4) of achter de windturbine (type 2) en het radarsignaal komt nu in de zijlobe van de radarantenne terecht. Hiermee dient dus rekening gehouden bij de ontvangstgevoeligheid van de radar.

Voor het type A ontstaat er rond de windturbine een zone van meervoudige reflecties. Eenzelfde zone ontstaat rond de radarantenne voor het type C. Voor het type B zijn er twee gelijke zones rond de windturbine en de radarantenne, dan wel dat het volledige gebied tussen de radar en de WT er gevoelig voor is.

De straal R rond de windturbine gegeven door:

$$R^2 = G_{TX} * G_{RX_zijlobe} * \sigma_{schip} * \sigma_m * \left(\frac{\lambda^2}{(4 * \pi)^4 * X^2} \right) * (P_t / P_r)$$

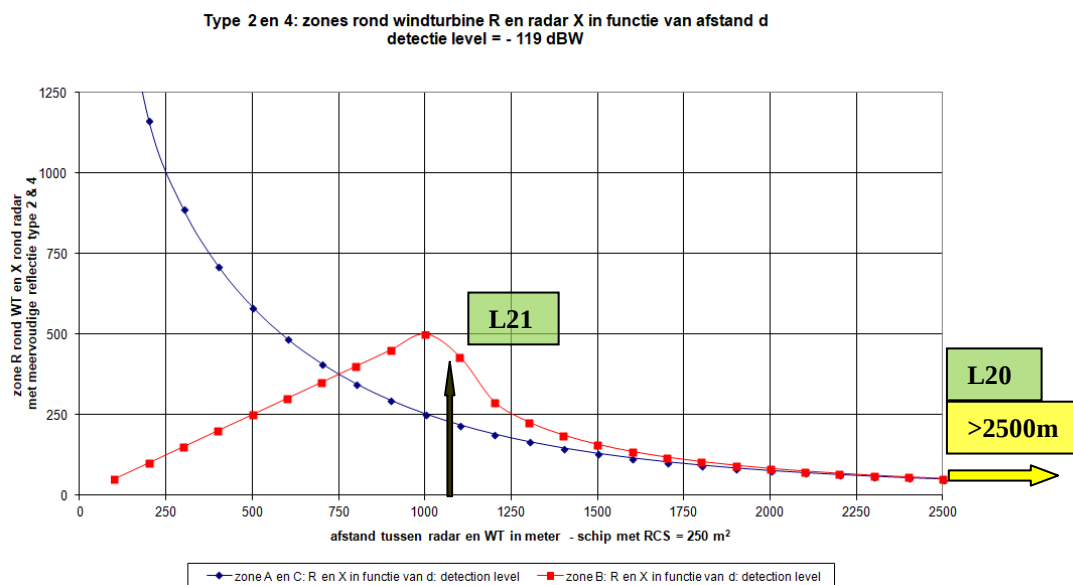
Hierbij kunnen nu de extreme afstanden beschouwd worden voor elk van de situaties A, B, C, en op een identieke manier berekend worden uit K, zoals voor type 3 meervoudige reflecties.

$$K^2 = G_{TX} * G_{RX_zijlobe} * \sigma_{schip} * \sigma_m * \left(\frac{\lambda^2}{(4 * \pi)^4} \right) * (P_t / P_r)$$

In voorkomend geval kan hieruit ook de afstand X tot de radarantenne bekomen worden.

4.5.3.1. Havenradars L20 en L21

4.5.3.1.1. cilindervormige mast – “worst case”

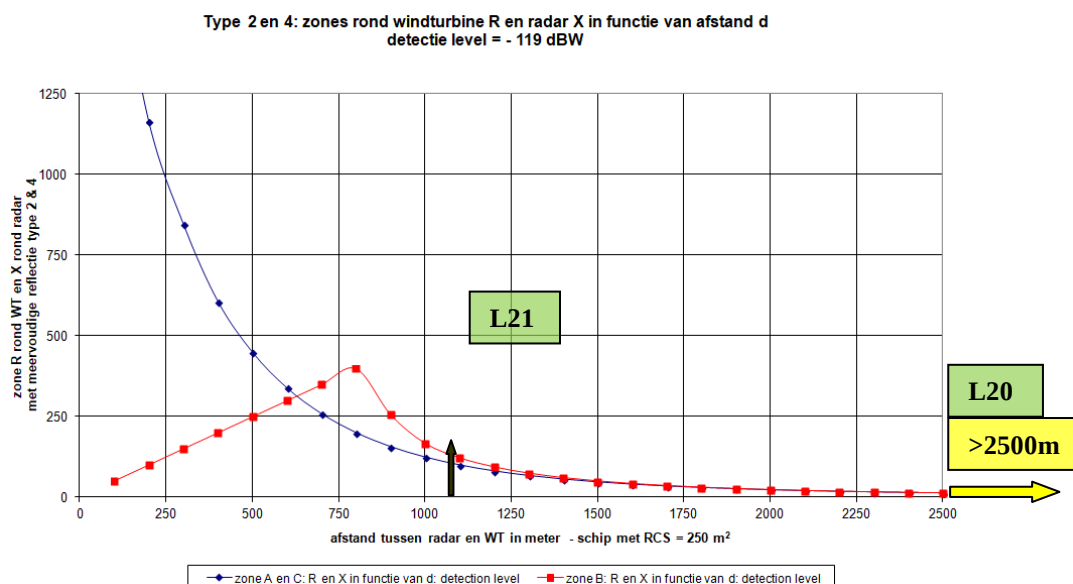


Figuur 37. Zone rond radar en WT voor meervoudige reflectie type 2&4, in functie van de afstand tot de radar

4.5.3.1.2. licht-conische mast

Bij de keuze van een windturbine met een licht-conische mast (hellingsgraad 1°), kan rekening gehouden worden met een beperkte reductie van de RCS van de mast (zie annex A).

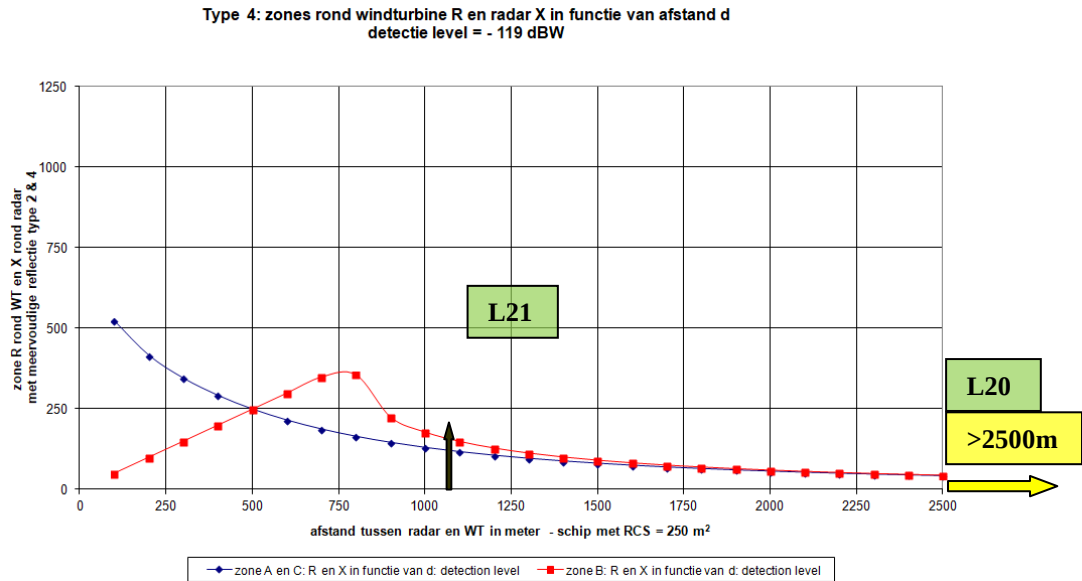
Gegeven de afstanden tussen de havenradar en de windturbine, volgt duidelijk uit de figuren 37 en 38 dat deze op zich een zeker mitigerend effect heeft voor deze situatie.



Figuur 38. Zone rond radar en WT voor meervoudige reflectie type 2&4, bij een licht-conische mast

4.5.3.1.3. Mitigerend effect van een minimale STC voor een cilindrische mast

De havenradars zijn uitgerust met een instelbare STC afstelling. In figuur 18 wordt de default instelling gegeven met de rode curve (fabrieksinstelling). Omdat de STC op locatie kan bijgesteld worden naar gelang de lokale situatie, wordt voor dit rapport uitgegaan van een generieke minimale STC instelling, gegeven door de blauwe curve in figuur 18.



Figuur 39. Zones rond een WT voor meervoudige reflectie type 2&4, bij minimale STC waarden, en cilindervormige mast

De zones omtrent de havenradar L20 en de windturbine reduceren – zelfs zonder een minimale instelling van de STC – tot ongeveer 50 m. Voor schepen op de vaarroute van het Zeekanaal en in het Kluizendok zelf stelt dit dus geen operationeel probleem.

Voor de havenradar L21 is deze zone voor de “worst case” cylinder maximaal 400 m, en tot 150 m bij een minimale STC instelling. Voor de worst case is er voor meervoudige reflecties van type 2&4 een beperkt effect tot op de vaargeul van het Zeekanaal, en een zeker effect nabij en aan de dichtbijgelegen kade van het Kluizendok zelf. Bij een gepaste STC instelling reduceert dit tot een zone aan wal.

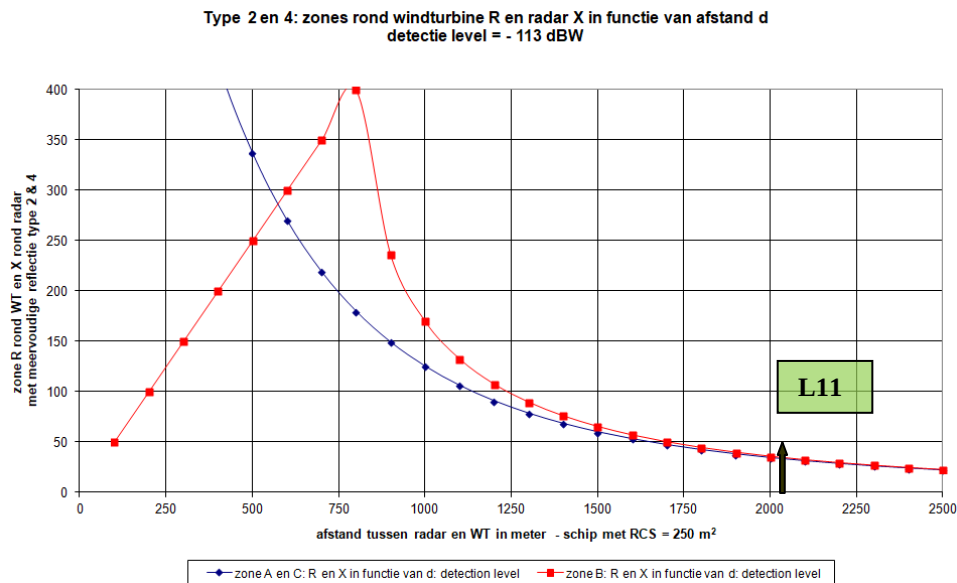


Figuur 40. Zones rond de WT voor meervoudige reflectie type 2&4 voor de havenradar L21

- cilindervormige mast (geel)
- licht-conische mast (groen)
- default STC met cilindervormige mast (blauw)

4.5.3.2. Havenradar L11

4.5.3.2.1. cylindervormige mast – “worst case”



Figuur 41. Zone rond radar en WT voor meervoudige reflectie type 2&4, in functie van de afstand tot de radar

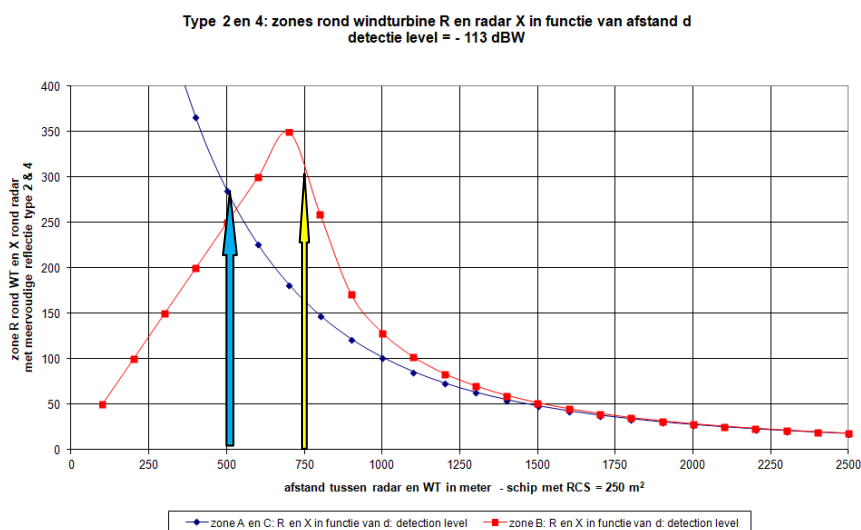
4.5.3.3. Scheepsradars

In de figuren 42 (cylindervormige mast WT) en 43 (licht-conische mast WT) worden in functie van de afstand van de scheepsradar tot de windturbine, de straal van de zone aangegeven waarbinnen het tweede object (schip) zich dient te bevinden om tot dit type meervoudige reflectie aanleiding te geven, moet gelegen zijn.

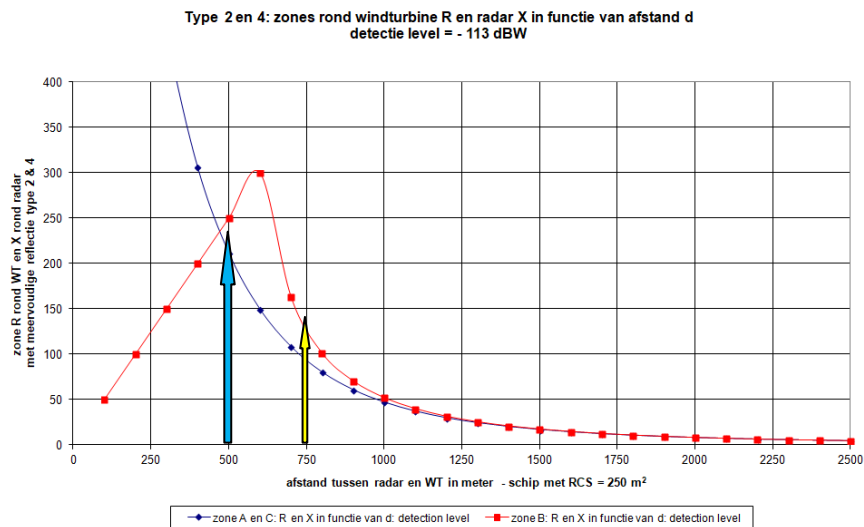
Uit deze grafieken volgt dat in functie van de afstand tussen scheepsradar en windturbine, deze zone waarbinnen zich een tweede object (schip) dient te bevinden, sterk varieert.

Hierbij dient genoteerd te worden dat in de praktijk, de versterking van de radarontvanger continu kan bijgesteld worden. In figuur 44 wordt een voorbeeld gegeven waarbij een reductie van 10 dB wordt toegepast, bij een cylindervormige mast van de windturbine.

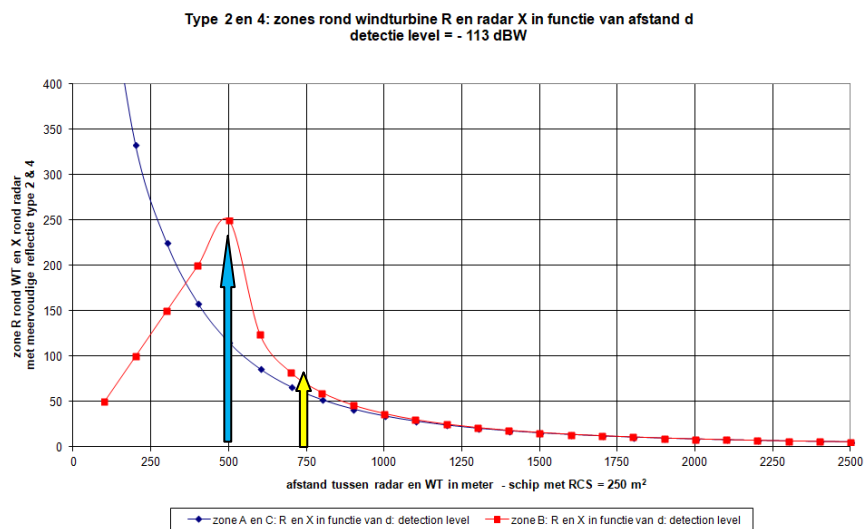
Hierbij dient expliciet opgemerkt te worden dat dit effect niet verschilt van gelijkaardige situaties met grote objecten op de oevers.



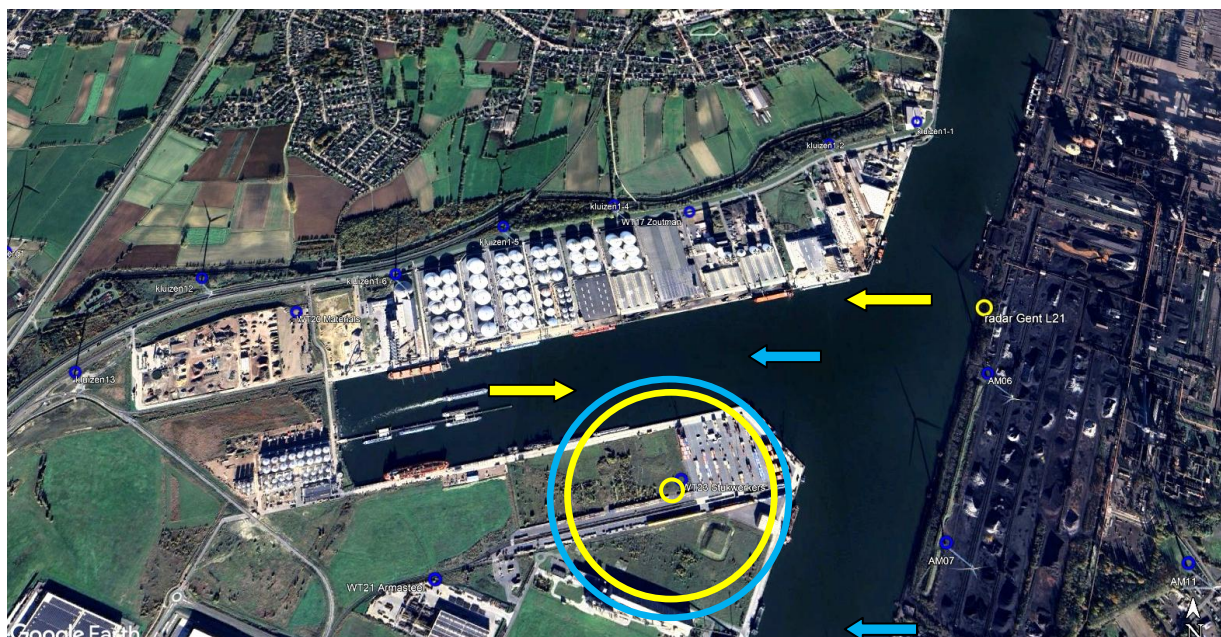
Figuur 42. Zone rond WT, meervoudige reflectie type 2&4, cylindervormige mast



Figuur 43. Zone rond WT, meervoudige reflectie type 2&4, licht-conische mast



Figuur 44. Zone rond WT, meervoudige reflectie type 2&4, cilindervormige mast, reductie gain – 10 dB



Figuur 44. Zone, bij een afstand van de scheepsradar van 500 m (blauw) en 750 m (geel) voor reflectie type 2&4, worst case van een cilindervormige mast

In een “worst case” van een cilindervormige mast van de windturbine kan leidt dit tot de volgende conclusies:

- Bij een afstand van 500 m tussen scheepsradar en windturbine, zal dit effect zich voordoen als het tweede object (schip) zich op een afstand van zowat 300 m van de windturbine bevindt (blauwe pijlen en blauwe zone), en bij een gepaste STC instelling tot een zone van 250 m
- Bij een afstand van 750 m tussen scheepsradar en windturbine, zal dit effect zich voordoen voor een tweede object (schip) op een afstand tot 300 m tot de windturbine (gele pijlen en gele zone), en bij een gepaste STC instelling tot een zone van 100 m.

Rekening houdend de mogelijke posities van het waarnemend schip (scheepsradar) op het wateroppervlak, volgt hieruit wel dat de mogelijke valse echo's, die steeds op de as WT/radar achter de windturbine zullen voordoen, aan land zullen gelegen zijn.

De bijhorende effecten van tweede of valse echo verschillen hierbij echter niet van de effecten die sowieso optreden bij een groot reflecterend object of gebouw op de oevers.

5. Conclusies.

A priori kan gesteld worden dat voor alle zones met een schaduweffect en verminderde radarwaarneming, dit steeds gebeurt op de directe aslijn van radar naar windturbine, en dat deze zones achter de windturbine gelegen zijn. In de praktijk komt dit voor dit project erop neer dat dit in omgevingen is waar de schepen op de zijkant worden waargenomen, en dus naast de gestoorde radaraslijn voldoende zichtbaar blijven.

5.1. Havenradars

5.1.1. Dode zones, schaduweffecten en verminderde radarwaarneming

Gezien de ligging van de havenradars L11, L20 en L21, bevinden zowel de dode zones als mogelijke schaduwzones met verminderde radarwaarneming zich quasi volledig landinwaarts. Een kleine zone van verminderde radarwaarneming zal zich voordoen ten opzichte van de radar L11 aan de nabijgelegen kade aan het Kluizendok. Maar dit stelt geen operationele problemen, en de toegang van het Kluizendok vanaf het Zeekanaal blijft volledig zichtbaar voor de havenradar L21 en L11.

5.1.2. Meervoudige reflecties en valse echo's

Voor de “worst case” situatie van een windturbine met een cilindervormige mast, of bij een licht-conische mast, treden er een aantal zeer beperkte zones van meervoudige reflecties op, zowel rond de havenradars L11 en L21 als de windturbine.

Bij een minimale STC instelling bij de havenradars reduceren deze zones tot afmetingen die geen operationele invloed of effecten meer hebben, en dit geldt dan uiteraard bij de default (fabrieks) instelling van de STC. De effecten van meervoudige reflecties met betrekking tot de havenradar L20 zijn verwaarloosbaar.

5.2. Scheepsradars

Hierbij dient gesteld te worden dat voor de scheepsradars, een aantal effecten niet specifiek zijn voor een windturbine, maar evenzeer (zullen) voorkomen bij elk relatief groot object in de nabije omgeving van de oevers (vb. een grote silo of gelijkaardige metaalconstructie).

5.2.1. Dode zones, schaduweffecten en verminderde radarwaarneming

Gezien de ligging van de windturbine tegenover het Zeekanaal, zullen de mogelijke dode zones en schaduwzones met verminderde radarwaarneming zich hoofdzakelijk achter de windturbine aan land bevinden, met uitzondering van een kleine zone, in het Kluizendok en de vaargeul van het Zeekanaal. Er dient hierbij wel opgemerkt te worden dat het waar te nemen schip telkens op de zijkant wordt gezien, en er dus enkel een “storing” optreedt op de directe aslijn van de scheepsradar met de windturbine. Wat dus in de praktijk geen operationele problemen oplevert.

De toegang van het Kluizendok vanaf het Zeekanaal blijft volledig zichtbaar.

5.2.2. Meervoudige reflecties en valse echo's

Er treden een aantal zones op rond scheepsradars en de windturbine, waarbij voor een object in die zone, er meervoudige reflecties kunnen optreden. Deze zones zullen continu variëren in functie van de exacte ligging of vaart van het schip tegenover de windturbine, maar liggen aan wal, dan wel onmiddellijk aan de kades van het Kluizendok en de vaargeul. Dit zal voor de scheepvaart zelf geen operationeel gevolg hebben.

Ook dient nog opgemerkt te worden dat de ontvangstgevoeligheid van de scheepsradars continu kan bijgesteld worden, precies om in alle omstandigheden dergelijke storende reflecties tot een minimum te herleiden, zonder afbreuk te doen aan een veilige waarneming.

Lijst van afkortingen

SRK	Schelde Radar Keten, de Vlaams-Nederlandse instantie die instaat voor het beheer van en toezicht op het scheepvaartverkeer in de Noordzee
VHF UHF	Very High Frequency en Ultra High Frequency, geven de frequentiebanden aan van radio communicatie. Voor de marifone systemen wordt VHF gebruikt tussen 150 MHz en 165 MHz
RF	Radio Frequente systemen
dBm	Eenheid van vermogen, in een logaritmische schaal. 0 dBm is precies gelijk aan een vermogen van 1 milliWatt.
dBW	Eenheid van vermogen, in een logaritmische schaal. 0 dBW is precies gelijk aan een vermogen van 1 Watt (en ook gelijk aan 30 dBm).
- 3 dB	Deze waarde geeft aan dat nog slechts de helft van het vermogen beschikbaar is. Bij een radarbundelbreedte, wordt deze waarde gebruikt om de “openingshoek” van de radarbundel aan te geven, waarbij dus de helft van het vermogen beschikbaar is t.o.v. de hoeveelheid vermogen in de directe hoofdrichting van de radarbundel.
RCS	Radar Cross Section, of de oppervlakte van een object dat effectief een radarsignaal zal reflecteren.
STC	Sensitivity Time Control, een instelling waarbij de gain of de gevoeligheid van de ontvanger aangepast wordt in de tijd (dwz. afstand tussen radar en object)

Annex A: Reductie van de RCS van een mast

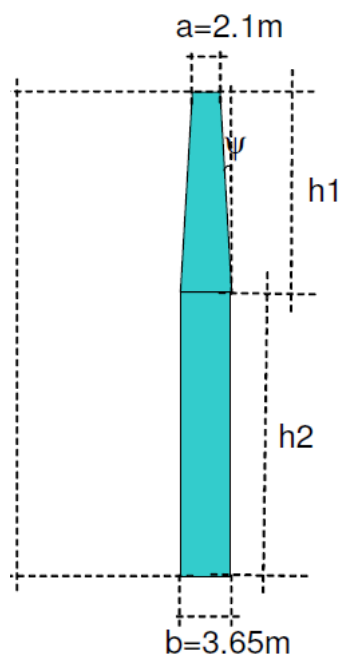
Verschillende factoren kunnen aanleiding geven tot een reductie van de RCS van de mast van een windturbine tegenover de worst case van een stalen cilindervormige mast.

A.1. Effect van een conische mast op de RCS van een WT

In de voorgaande basisstudie werd uitgegaan van een cilindervormige mast van de windturbine. Dit kan beschouwd worden als een “worst case” situatie.

In de praktijk blijken een aantal masten van windturbines, geheel of gedeeltelijk, conisch te zijn, waardoor de RCS van de windturbine aanzienlijk kan verschillen van een cilindervormige mast.

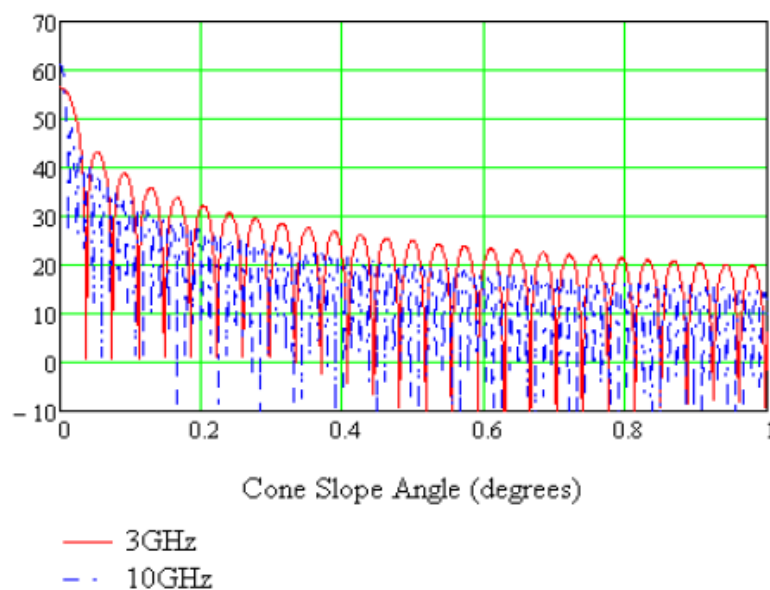
Bij een studie omtrent het effect van een (gedeeltelijk) conische mast, werd de Vestas V82 windturbine als voorbeeld genomen:



h1	23.2 m
h2	54.3 m
totale hoogte	77.5 m

De mast van de Vestas V82 bestaat uit een eerste cilindervormige basis, met een hoogte van 54.3 m en een conisch gedeelte erboven op met een hoogte van 23.2 m voor dit voorbeeld.

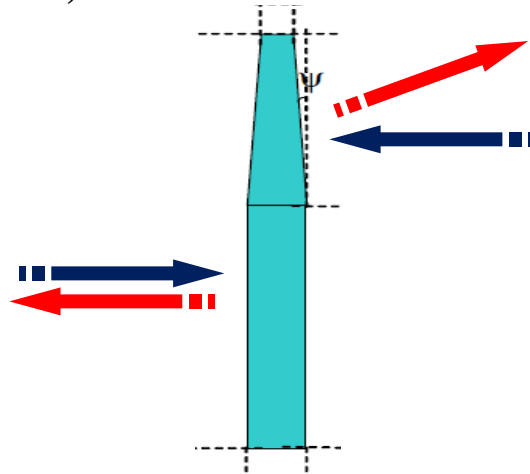
Tussen 2007 en 2009 werden een aantal studies uitgevoerd door o.a. J. Pinto van BAE Systems, Advanced Technology, en gepubliceerd in een eindrapport en een paar papers. De studie omvatte o.a. de invloed van de hellingshoek van het conisch gedeelte van de windturbinemast op de totale RCS van de mast (en totale windturbine). De reductie van RCS in functie van de hellingshoek wordt in de volgende figuur weergegeven bij 3 GHz en 10 GHz.



Tegenover een volledige cilindervorm van de mast kan dus met zekerheid gesteld worden dat een minimale reductie van de RCS met 20 dB (factor 100) mogelijk is bij voldoende coniciteit van de mast (hellingsgraad $> 1^\circ$).

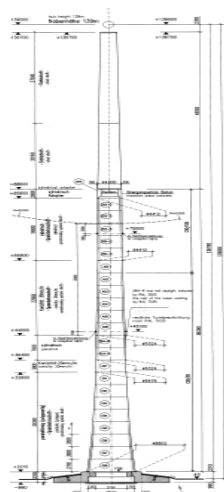
In een verder stadium werd ook de mogelijkheid van een volledig conische mast meegenomen. De resultaten worden o.a. neergelegd in twee patent(aanvragen), nl. US20100231434 (2010) en US8384581 (2013). Hierin wordt geclaimd dat bij een volledige conische mast er zelfs een reductie met 40 dB zou mogelijk zijn.

De fysische reden is dat de reflecties bij een conische mast een andere richting uitgaan dan de invallende golf, en dus niet meer (volledig) in het bereik van de zend/ontvangstantenne terugkomt (zie figuur hieronder).

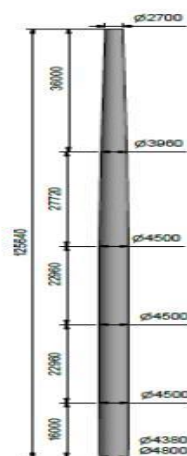


Het effect wordt meer uitgesproken bij een grotere hellingshoek van het conische gedeelte, zoals ook blijkt uit de vorige grafiek. Een methode om dicht bij het aardoppervlak dit effect te accentueren, maar gemiddeld een vrij lichte mast te bekomen, bestaat erin om met een brede onderbouw met een grotere hellingshoek te starten, en die vrij snel naar een lichtere helling te laten evolueren. Hieronder worden drie typische conische masten geschetst, waarbij duidelijk de sterk conische vorm kan waargenomen worden in het onderste gedeelte van de mast, precies waar ook de bundel van de havenradar op invalt.

Hierbij dient opgemerkt te worden dat voor een vol-conische mast de effecten zoals beschreven in de studie met 10 à 20 dB zullen gereduceerd worden en dus totaal verwaarloosbaar zullen zijn.



Enercon stalen mast



Vestas



Enercon betonnen sokkel

De hellingshoeken variëren hierbij van ongeveer 1° tot meer dan 4° bij het onderste gedeelte van de Enercon met een sokkel in gewapend beton.

Een reductie van de RCS met 30 dB lijkt daarbij realistisch te zijn.

Bovenstaande studie omtrent het effect van conische masten werd uitgevoerd met een focus op de luchtvaartraders, waarbij dus de top van de mast een belangrijk gegeven uitmaakt.

Bij scheepvaarttoepassingen zal dus bij een mast met cilindervormig onderstel (en een kegelvormige top) de cilindervorm dienen in aanmerking genomen te worden (worst case). Het mitigerende effect kan dus slechts in aanmerking genomen worden bij windturbines met een volledig conische mast. Daarbij dient onderscheid gemaakt te worden tussen masten met een kleine hellingsgraad (typisch 0,2 à 0,3°) en conische masten (hellingsgraad > 1°).

A.2. Literatuur overzicht van de RCS van een mast van een WT

In de literatuur zijn een aantal studies bekend, die werden uitgevoerd door QinetiQ, Navcom en EADS/Cassidian, met zowel metingen uit de praktijk als simulaties.

Een voorbeeld hiervan uit een QinetiQ (Poupart 2003) studie bij een windturbinepark Swaffham (UK) wordt in de volgende figuur gegeven, weliswaar met focus op het luchtverkeer.

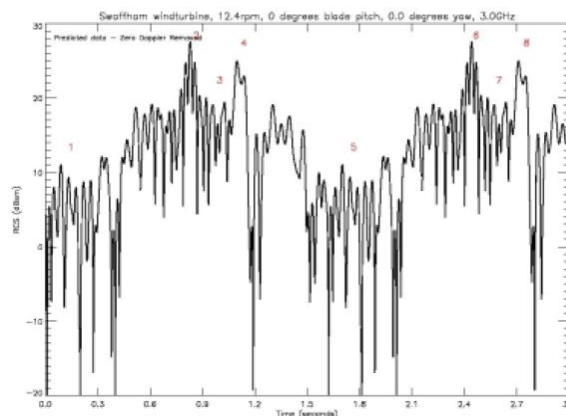


Figure 4-5; The Swaffham turbine RCS versus time at 0° pitch, 0° yaw, with the zero-Doppler component removed.

Hieruit blijkt reeds dat gemiddelde waarden voor de RCS van windturbines tussen 20 dBsqm (100 m²) en 30 dBsqm (1000 m²) als realistisch mogen aangenomen worden.

Gelijkaardige resultaten en waarden blijken ook uit een studie van EADS (jaarrapport 2008).

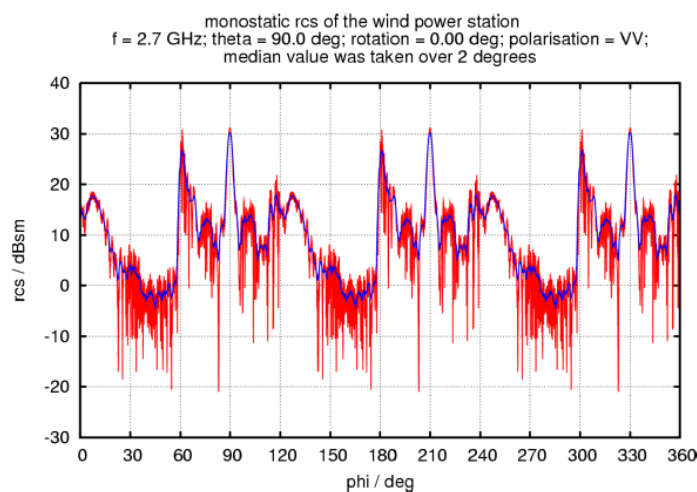


Abbildung 6 RQS vs. Rotorstellung, Rotororientierung 90 Grad, WEA mit 70m Rotor exemplarisch

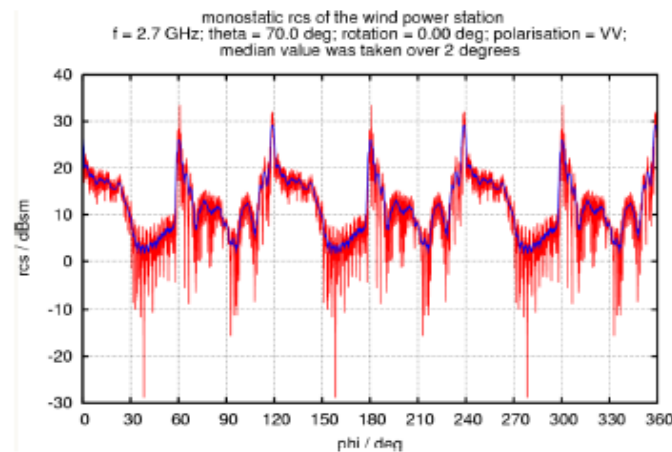


Abbildung 7 RQS vs. Rotorstellung, Rotororientierung 70 Grad, WEA mit 70m Rotor exemplarisch

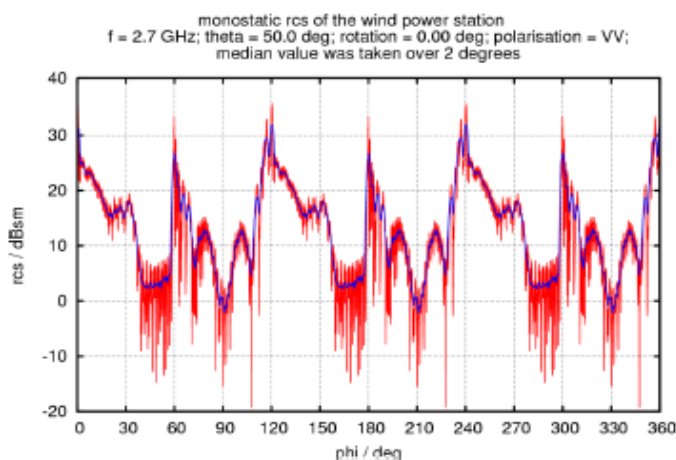


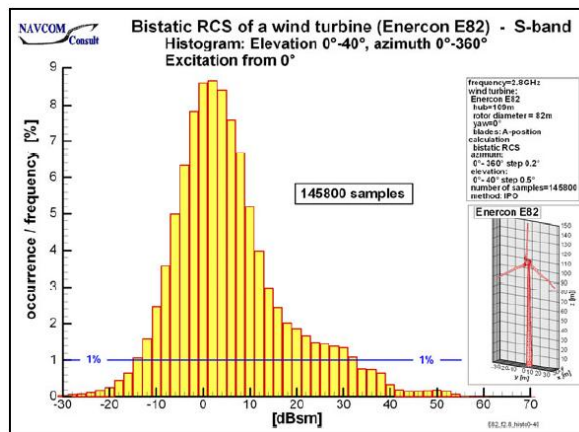
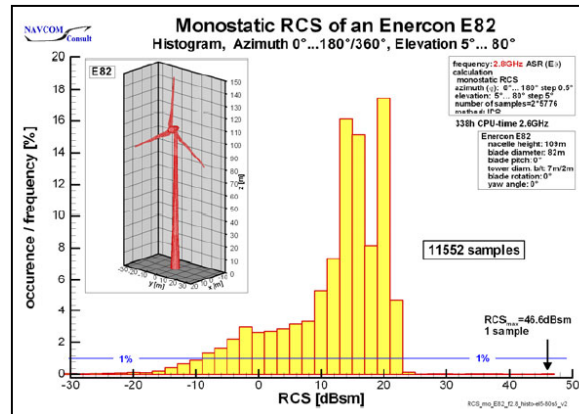
Abbildung 8 RQS vs. Rotorstellung, Rotororientierung 50 Grad, WEA mit 70m Rotor exemplarisch

Bovenstaande effecten en waarden gelden voor de monostatische RCS waarden, die van belang zijn bij de directe waarneming van objecten. Bij de meervoudige reflecties is echter de bistatische RCS waarde van belang. Een studie uitgevoerd op een Enercon E82 windturbine, met een mast van 108 m en een tiphoogte van 150 m (Navcom – G.Greving 2007), toont een histogram voor de RCS in functie van verschillende invalshoeken van het radarsignaal, en dat zowel voor de monostatische als de bistatische RCS.

Hieruit kan afgeleid worden dat voor de monostatische RCS er een gemiddelde bovenwaarde van 20 dBsqm (100 m²) kan aangenomen worden voor een E82 windturbine, en een bistatische RCS bovenwaarde van maximaal 10 dBsqm (10 m²) kan aangenomen worden weliswaar in de S-band (2,7 GHz) en voor de volledige windturbine, inclusief de rotorbladen. Uit de theoretische modellen volgt dat de RCS frequentieafhankelijk is, en voor een cylinder is dit evenredig met de frequentie. De masten van windturbines zijn, afhankelijk van het type, cilindervormig, dan wel (licht) conisch.

In een eerste benadering betekent dit, dat bij een Enercon E82 voor de X-band (9,6 GHz) een monostatische RCS van 350 m² en een bistatische RCS van 35 m² kan aangenomen worden.

De studie omtrent Enercon E82 geldt voor een “typische” Enercon windturbine, waarbij de mast continu licht-conisch is. Typische waarden zijn een diameter van 4,7 m aan de basis en 2,2 m aan de top van de mast. De masthoogte voor het type in de studie is 108 m, wat representatief is voor de huidige generatie windturbines. De overeenkomstige hellingsgraad is dan gemiddeld 1°, variërend van 1,14° aan de basis tot 0,9° tegen de top.



In tegenstelling hiermee is een typische Vestas mast (quasi) cilindervormig tot op een hoogte van 50 m, waarna een conisch gedeelte volgt. De coniciteit is dus typisch naar de luchtvaart gericht, maar voor de scheepvaart is de mast dus als cilindervormig te beschouwen.

Uit vergelijking met de rapporten van Qinetiq en EADS kan dan voor de X-band een monostatische RCS van 35 dBsqm vooropgesteld worden, en in analogie een bistatische RCS van 25 dBsqm bij een (quasi) cilindervormige mast als “referentie-default” waarde.

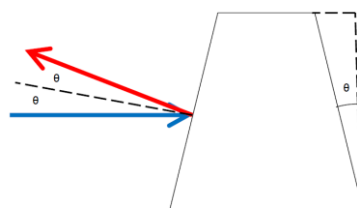
Op te merken is ook dat alle studies onderstellen dat er een voldoende grote afstand is tussen de radarantenne en de windturbine, zodat het verre veld met een uniforme veldverdeling voor de antenne mag ondersteld worden.

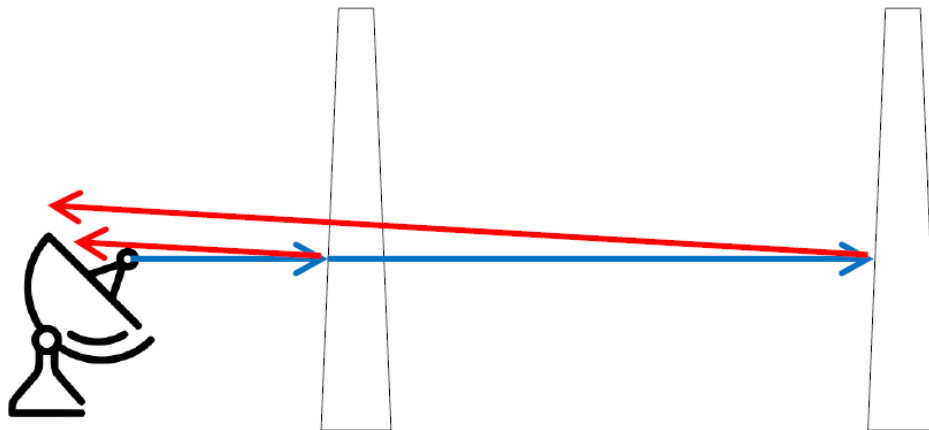
Dit is in de scheepvaart niet altijd het geval, zodat toch met een zekere veiligheidsmarge dient rekening gehouden te worden omwille van de eerder korte afstanden tussen radar en objecten.

A.3. Analytisch model voor de RCS reductie van de mast van een WT

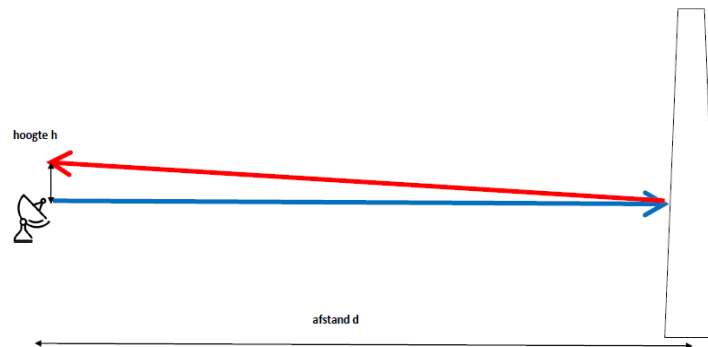
De vraag stelt zich nu of dit effect op kortere afstand wel tot een voldoende reductie kan leiden, omdat de gereflecteerde bundel nog niet teveel uit het “gezichtsveld” van de radarantenne zal terecht komen. De hoek waaronder de radarbundel wordt gereflecteerd is het dubbel van de hellingsgraad van de windturbinemast.

Dit wordt schematisch in de volgende figuren geschetst.





Hierbij dient in acht genomen te worden dat de radarantenne een zekere verticale opening heeft, zodat er pas een reducerend effect kan optreden vanaf een zeker hoogteverschil tussen de radarantenne en de gereflecteerde bundel. Dit hoogteverschil wordt in de volgende tabel gegeven in functie van afstand tussen radar en windturbine, en van de hellingsgraad van de turbinemast.



Afstand\hellingsgraad	0,1°	0,2°	0,5°	1°	2°
500 m	3,5 m	7 m	8,75 m	17,5 m	35 m
1000 m	7 m	14 m	17,5 m	35 m	70 m
2500 m	17,5 m	35 m	43,5 m	87,5 m	175 m
5000 m	35 m	70 m	87 m	175 m	350 m
10 km	70 m	140 m	175 m	350 m	700 m
25 km	175 m	350 m	435 m	875 m	1750 m

Hoogte van gereflecteerde radarbundel in functie van afstand en hellingsgraad

Uit deze tabel kunnen een aantal effecten afgeleid worden:

- een quasi-cylindervormige mast (hellingsgraad 0,1°) zal pas effect resorteren vanaf een afstand tussen 5 km en 10 km. Naar situaties in de scheepvaartomgeving moet dit effect buiten beschouwing gelaten worden, en dient de mast dus als cylindervormig gemodelleerd te worden.
- bij een licht-conische mast, met een minimale hellingsgraad van 1° kan reeds op korte afstand een zeker mitigerend effect meegenomen worden. Vanaf een afstand van 2500 m zal het effect al zeer uitgesproken zijn, en vanaf 5 km een belangrijk mitigerende bijdrage leveren.
- voor tussenliggende doorsneden van de turbinemast zal een ad-hoc reductie kunnen in acht genomen worden, rekening houdend met hellingsgraad en afstand. Bij een conische mast met een grotere hellingsgraad van 1° kan een belangrijke mitigerende reductie van de RCS reeds op korte afstand in aanmerking genomen worden.

Uit de gegevens van de actuele “on-shore” windturbines, kan gesteld worden dat er momenteel drie types dominant voorkomen: cilindervormige en quasi-cilindervormige mast met een hellingsgraad tussen 0° tot 0,2° tot op een hoogte van 50 m, dan wel een licht-conische mast met een hellingsgraad van gemiddeld 1° over de volledige hoogte van de mast.

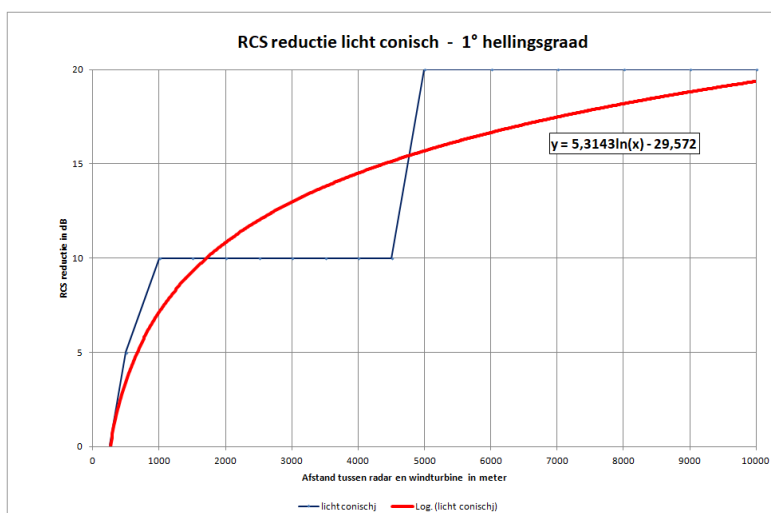
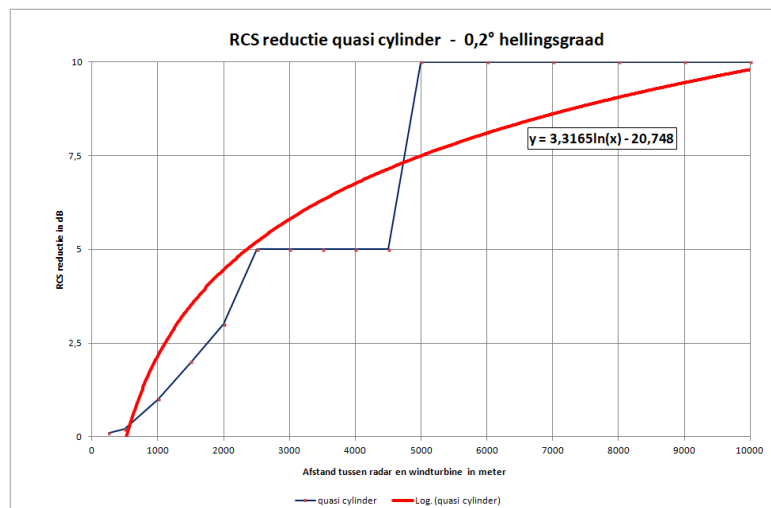
Daarom worden de volgende reductiefactoren voor de RCS van de turbinemast gehanteerd:

afstand	quasi-cylinder (*) (0,2°)	licht-conisch (1°)	conisch (>2°)
0 -250 m	0 dB	0 dB	0 dB
250 m – 500 m	0 dB	0 dB	5 dB
500 m -1000 m	0 dB	5 dB	10 dB
1000 m – 2500 m	0 dB	10 dB	10 dB
2500 m – 5000 m	5 dB	10 dB	20 dB
5 km – 10 km	10 dB	20 dB	20 dB
> 10 km	20 dB	20 dB	20 dB

(*) **Bij een volledig cilindervormige mast is er geen reductiefactor, en wordt een waarde voor de bistatische RCS van 350 m² (25 dBsqm) vooropgesteld.**

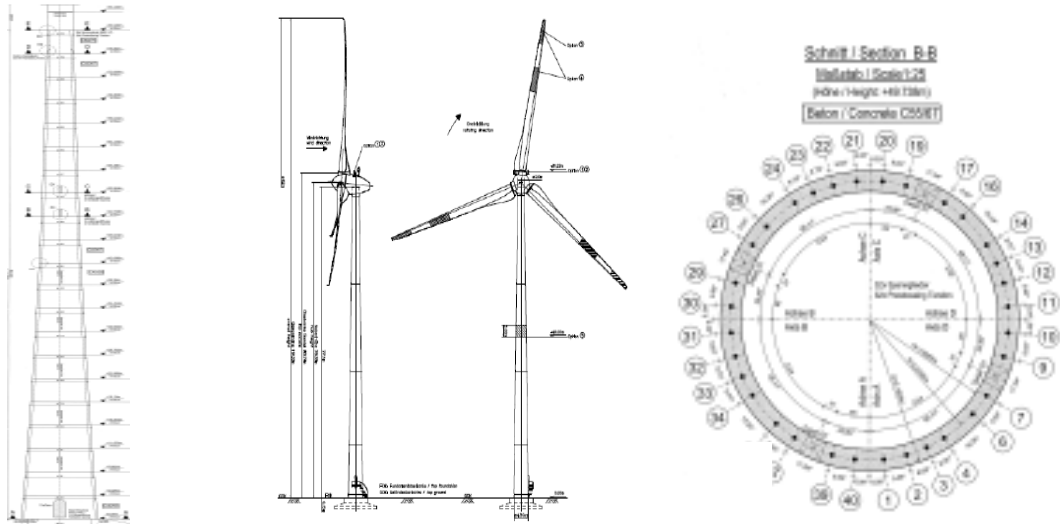
De factoren die voorgesteld worden houden rekening met een voorzichtigheidsprincipe, waarbij een marge van 10 dB ten opzichte van de theoretische studies wordt in acht genomen.

Uitgaande van de bovenstaande tabel kan een curve afgeleid worden, zodat de RCS reductie ook in analytische vorm (*formule in logaritmische benadering*) in het simulatiemodel van meervoudige reflecties kan ingebracht worden.



Annex B: Effect van een betonnen onderbouw voor de WT mast

Een aantal mogelijke fabrikanten/leveranciers van windturbines bieden een mogelijkheid van een gedeeltelijke of zelfs volledig uitvoering in gewapend beton van de windturbinemast. Zonder hierbij de keuzecriteria te beperken, kan bvb. een Enercon E82 windturbine als voorbeeld genomen worden. De betonnen wand heeft daarbij een typische dikte van 30 cm.

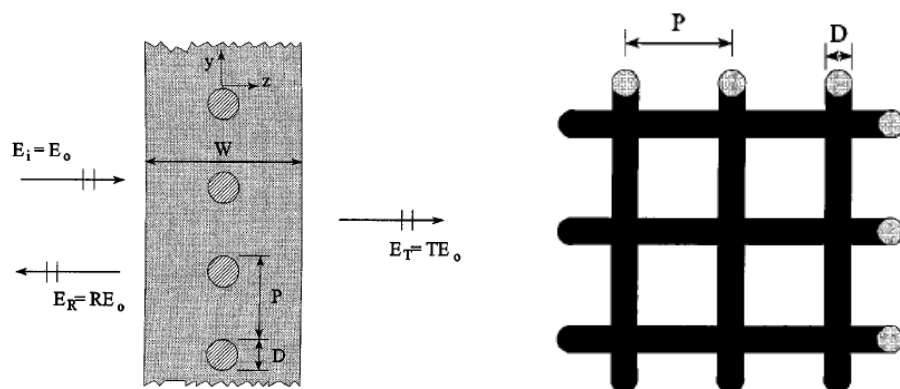


Enercon E82

In de literatuur is heel wat te vinden omtrent de elektromagnetische eigenschappen van gewapend beton, zoals de permitiviteit ϵ en de permeabiliteit μ , en ook omtrent de afschermende waarde (Shielding Effectiveness SE) of de transmissie doorheen gewapend beton van radiogolven.

De parameters ϵ en μ zijn belangrijk voor een aantal technologieën om beton snel te drogen onder industriële omstandigheden. De afschermende waarde SE tegen, dan wel de transmissie voor radiogolven zijn belangrijk bij het al of niet afschermen, dan wel doorlaatbaar houden, van ruimten voor draadloze communicatie, zoals GSM, UMTS en Wifi toepassingen.

In deze publicaties ontbreken meestal de directe waarden van de reflecterende eigenschappen tegen radio/radar signalen. Nochtans zijn er twee factoren die de afschermende eigenschappen van een materiaal bepalen: reflectie van de invallende golf en demping van het signaal bij transmissie doorheen het materiaal.



Bij gewapend beton zullen twee factoren meespelen:

- bij de lagere frequenties zijn de openingen van de wapening klein ten opzichte van de golflengte, zodat de wapening zich zal voordoen als een homogeen geleidend vlak. Dit zal uiteraard resulteren in een grote reflectie-coëfficiënt of dus ook een grote waarde voor de RCS van constructies in gewapend beton.

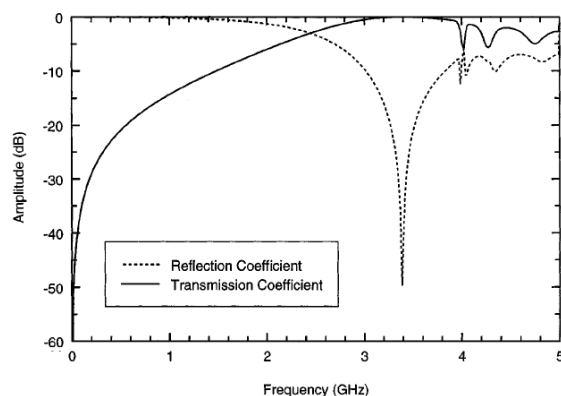
Wanneer de openingen echter gelijk worden of groter dan een halve golflengte van het radiosignaal, wordt de wapening “transparant”. In dit geval zal het beton zelf dus bepalend worden voor de eigenschappen omtrent afscherming of transmissie.

Bij de radar frequentie van 10 GHz is de golflengte $\lambda = 3$ cm, en $\lambda/2$ dus 1,5 cm.

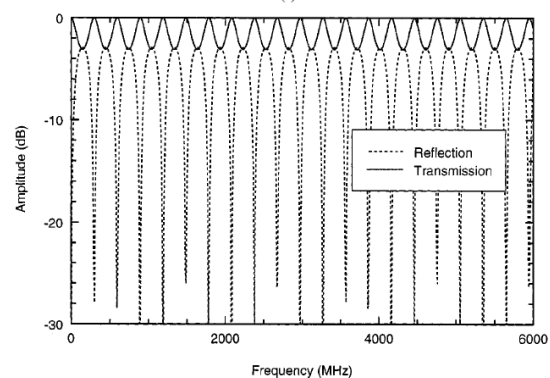
- bij de hogere frequenties zal dus de betonnen wand bepalend zijn voor de elektromagnetische eigenschappen van het geheel. De dikte van de wand zal daarbij een belangrijke rol spelen voor de transmissie doorheen een wand, gegeven de demping van een radiogolf bij transmissie van deze materialen. Dit is niet het geval voor de reflectie van een invallende golf.

In een publicatie van Dalke, Holloway et al “*Effects of reinforced concrete structures on RF communications*” - NIST, Boulder, USA – **IEEE Transactions on EMC, Vol.42,4, Nov. 2000**, worden een aantal simulatie-resultaten gepubliceerd voor een paar samples van gewapend beton. Het frequentiegebied gaat echter slechts tot 6 GHz, maar geeft toch een tendens aan.

De eerste figuren hieronder zijn gesimuleerde resultaten (FDTD methode) voor het grid van gewapend beton alleen, en als referentie voor een volledige metalen structuur met dezelfde dikte W als de gewapend betonnen wand

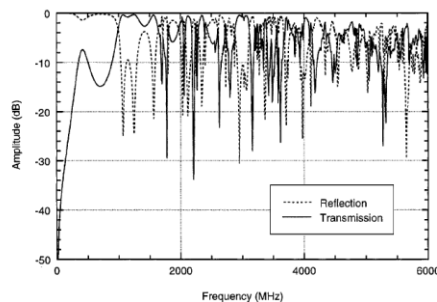


Gewapend beton net P = 7.62 cm, D = 1.91 cm

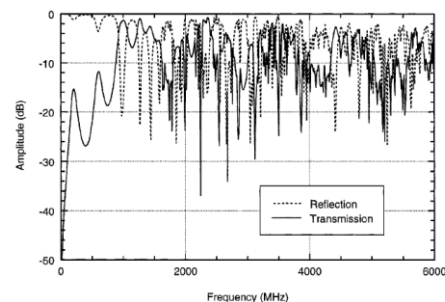


Volledig metalen vlak

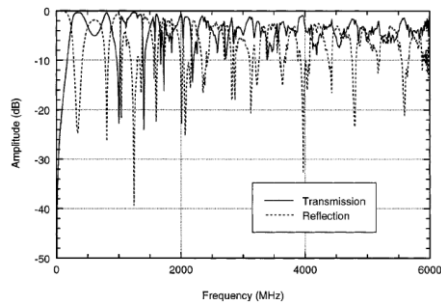
De volgende figuren zijn de resultaten voor gewapend beton (*figuren 6/8, 11/12 & 13/14*):



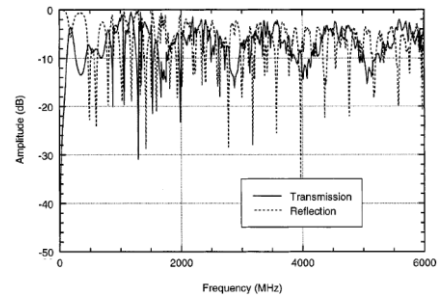
Reflection and transmission coefficients for a concrete wall with a 2-D rebar lattice: $P = 7.62$ cm, $D = 1.91$ cm, $W = 15.24$ cm.



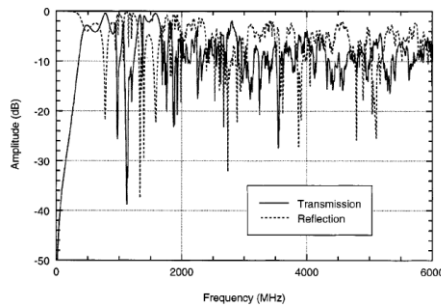
Reflection and transmission coefficients for a concrete wall with a 2-D rebar lattice: $P = 7.62$ cm, $D = 1.91$ cm, $W = 30.48$ cm.



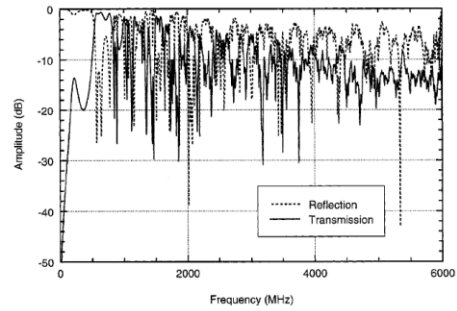
Reflection and transmission coefficients for a concrete wall with a 2-D rebar lattice. $P = 15.24$ cm, $D = 1.91$ cm, $W = 15.24$ cm.



Reflection and transmission coefficients for a concrete wall with a 2-D rebar lattice. $P = 15.24$ cm, $D = 1.91$ cm, $W = 30.48$ cm.



Reflection and transmission coefficients for a concrete wall with a 2-D rebar lattice. $P = 15.24$ cm, $D = 5.08$ cm, $W = 15.24$ cm.



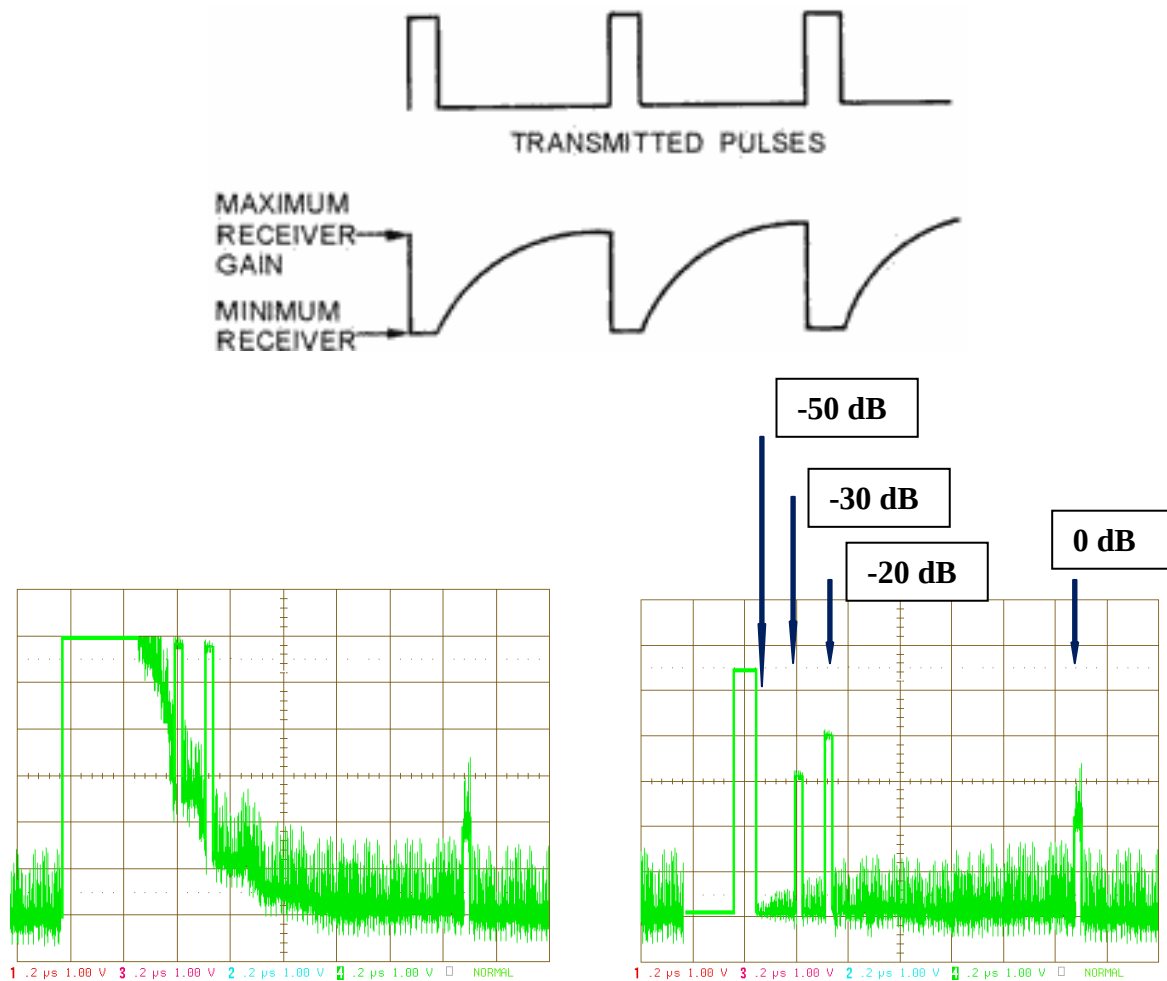
Reflection and transmission coefficients for a concrete wall with a 2-D rebar lattice. $P = 15.24$ cm, $D = 5.08$ cm, $W = 30.48$ cm.

Door extrapolatie naar 10 GHz en rekening houdend met een wanddikte van 30 cm, mag dus aangenomen worden dat een mast in gewapend beton een vermindering van de reflectie van radio/radar signalen met 6 dB inhoudt ten opzicht van een stalen mast voor de windturbine.

Deze vermindering in reflectie zal zich dus evenzeer uiten in een vermindering van de RCS voor de betreffende mast van de windturbine, en komt dus bovenop het geometrische effect van een conische mast.

Annex C: Sensitivity Time Control (STC) bij een radar

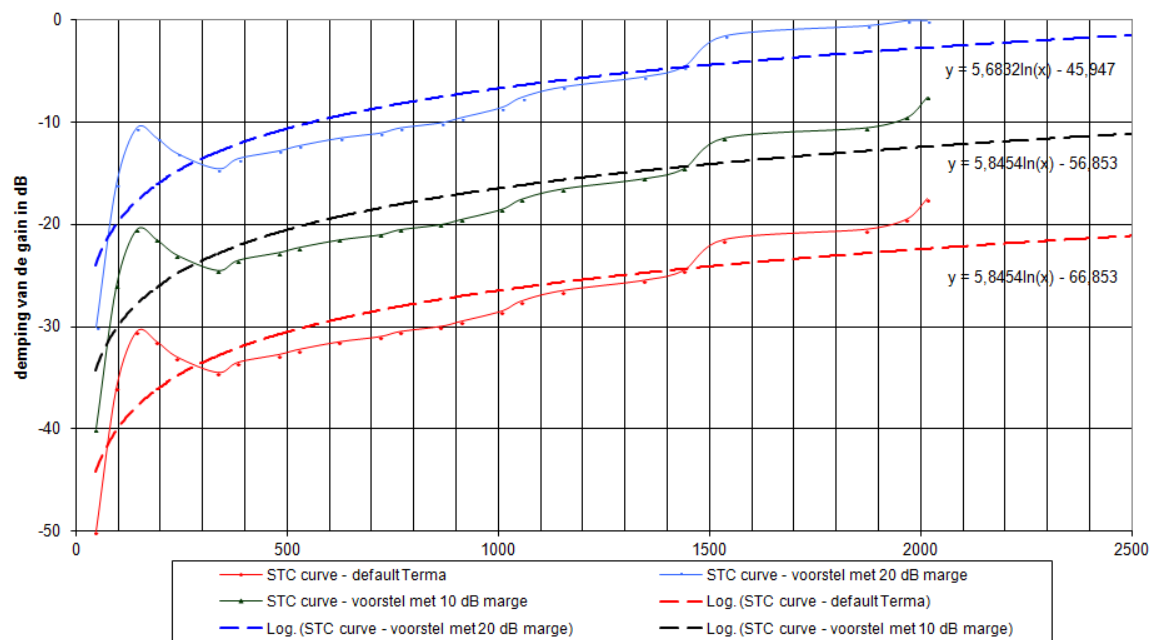
Een techniek tot reductie van de gevoeligheid van de ontvanger wordt geboden door de “Sensitivity Time Control” (STC), waarbij de gevoeligheid van de ontvanger in functie van de tijd wordt aangepast: net na de radarpuls is er een grote attenuatie van de gevoeligheid, en dit om verzadiging van de versterkers te vermijden bij de aanwezigheid van grote reflecterende voorwerpen in de onmiddellijke omgeving van de radar. Om de gevoeligheid, en dus het bereik van de radar, te behouden op grote afstand, wordt deze attenuatie in functie van de tijd tot nul herleid. Een typische STC curve, en het effect op het ontvangen signaal wordt in de volgende figuren geschetst.



In een aantal gevallen worden de STC parameters niet in functie van de tijd, maar in functie van de afstand van waarneming weergegeven, waarbij dus dient rekening gehouden te worden met de dubbele looptijd (heen en terug) van de radarpuls.

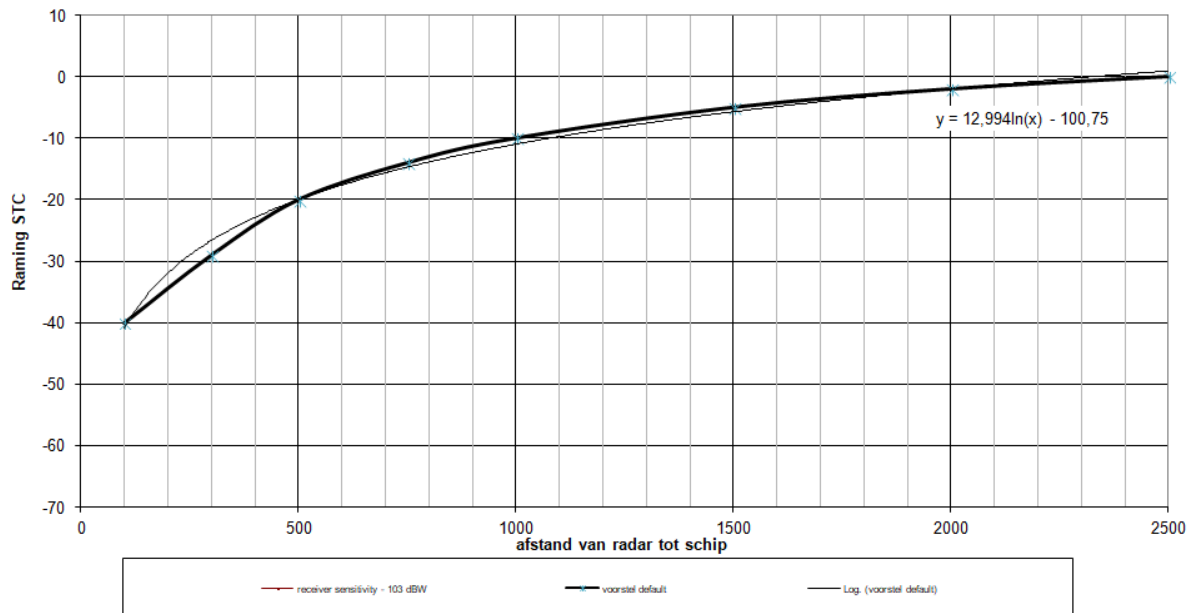
Voor de havenradar L21 is een STC ingebouwd, maar de concrete parameters zijn niet beschikbaar. Daarom wordt uitgegaan van een typische standaard curve, zoals in onderstaande figuur weergegeven. Het is daarbij een normale techniek dat de standaardparameters worden aangepast voor een optimale werking in relatie met de omgeving door een off-set van de attenuatie. Twee curves met een marge van 10 dB (zwart) en 20 dB (blauw) worden in de grafiek toegevoegd.

STC curve - voorstel lineair schaal



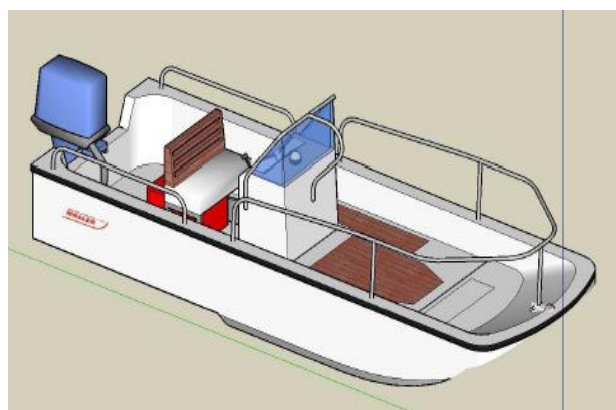
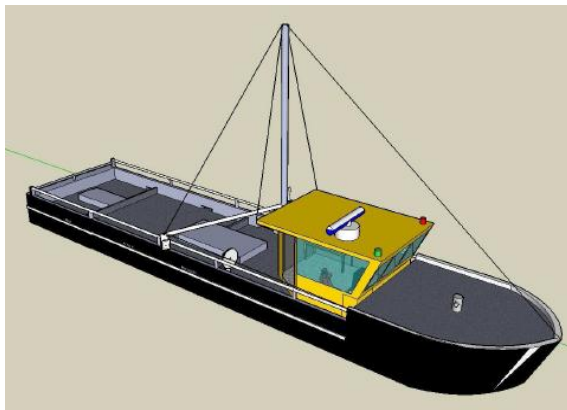
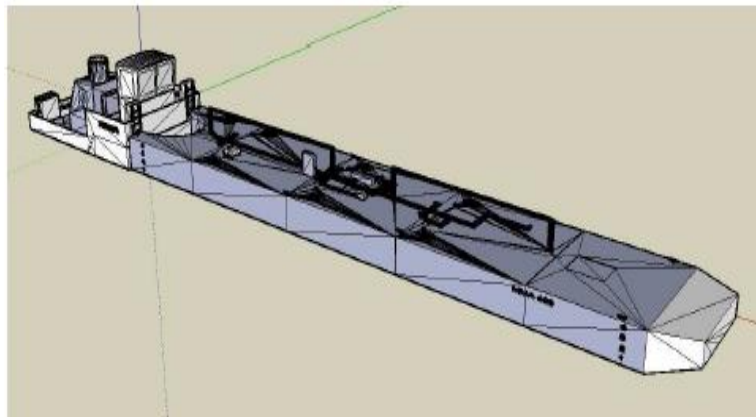
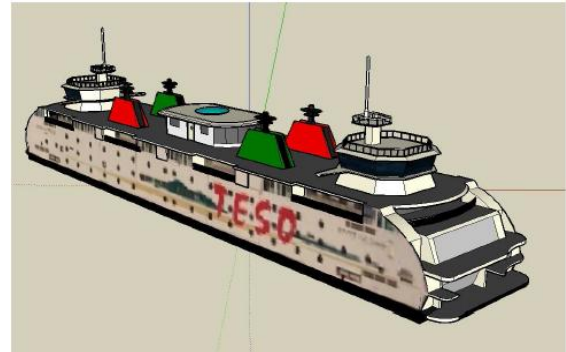
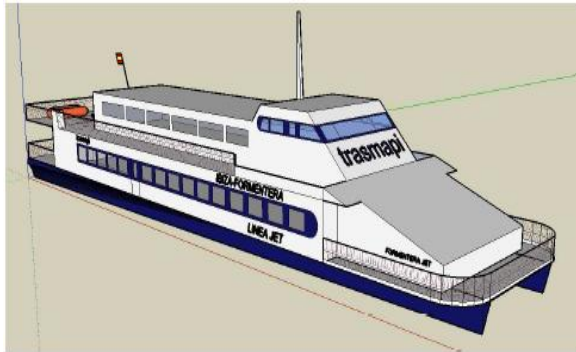
De onderstaande grafiek geeft de default instelling van de STC weer voor de Bridgemaster radars (havenradar L11 en de scheepsradar).

Voorstel van raming STC voor een gapfiller radar



Annex D: RCS van schepen

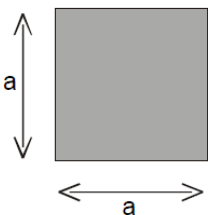
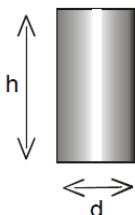
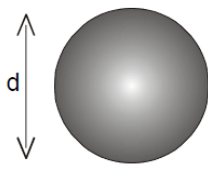
In de literatuur zijn ook een paar voorbeelden bekend van numerieke simulaties omtrent de Radar Cross Section (RCS) van enkele typische (kleinere) schepen, bij zowel een aanstraling door de radar op de zijkant (peak) , als een gemiddelde waarde. Sommige resultaten worden hierbij ter informatie weergegeven.



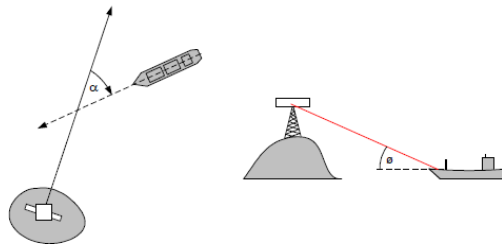
Vessel	Length (m)	Height (m)	Peak RCS (dBsm)	Nominal RCS (dBsm)
Boston Whaler	7.2	2.4	46	3
Traditional Ferry	71.6	16.8	61	25
Fishing Boat	10.7	4.7	53	22
High Speed Ferry	43.7	11.6	84	15
Oil Barge with Tug	116.8	11.2	66	35

De omrekening van dBsqm naar de gewone waarden voor σ_{schip} is als volgt: 20 dBsqm stemt overeen met 10 m², 40 dBsqm stemt overeen met 100 m² en 60 dBsqm met 1000 m².

Verder zijn er voor de RCS van schepen nagenoeg geen studies en resultaten bekend. Alleen een paper van Ingo Harre “*RCS in Radar Range Calculations for Maritime Targets*” behandelt de RCS van schepen, waarbij uitgegaan wordt van theoretische waarden, zoals hieronder aangegeven.

Rectangular Plate	Cylinder	Sphere
		
$\sigma = \frac{4 \cdot \pi \cdot a^4}{\lambda^2}$	$\sigma = \frac{\pi \cdot d \cdot h^2}{\lambda}$	$\sigma = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2$
σ for $a = 1\text{ m}$:	σ for $h = 1\text{ m}$ and $d = 0.5\text{ m}$:	σ for $d = 1\text{ m}$:
X band: $\approx 12,300\text{ m}^2$	X band: $\approx 50\text{ m}^2$	X band: 0.785 m^2
S band: $\approx 1,300\text{ m}^2$	S band: $\approx 16\text{ m}^2$	S band: 0.785 m^2

Maar daarna komt de praktijk aan bod van de afwijkende omstandigheden ten opzichte van de “vlakke golf” omstandigheden onder loodrechte inval, met de invalshoeken van de radar naar het schip. Maar de onderstelling van “verre veld”, waarbij de radarbundel (veel) breder is dan het object, blijft behouden.

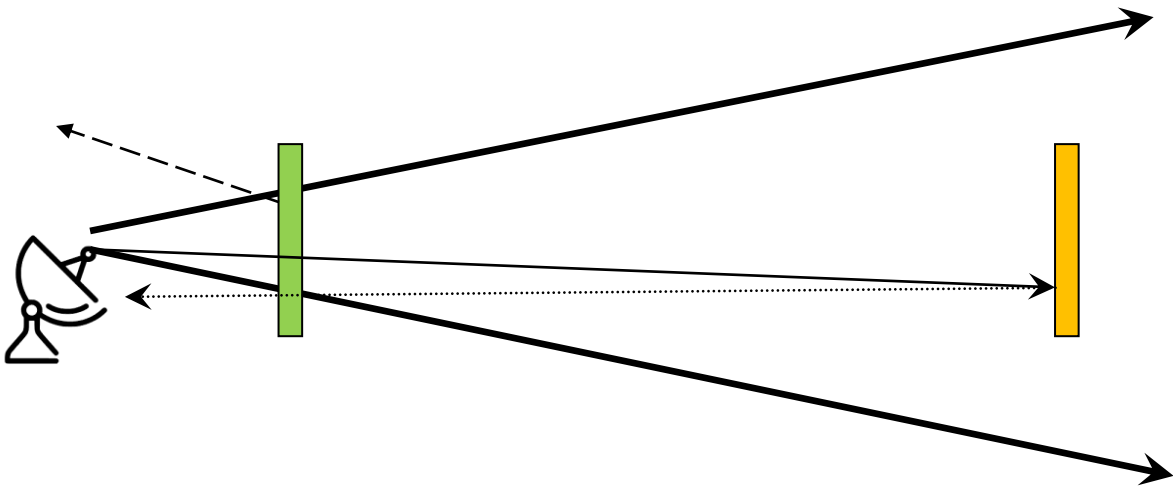


Ship RCS Table
(Source: Williams/Crump/Curtis: Experimental study of the radar cross section of maritime targets, Electronic Circuits and Systems, Vol. 2, No. 4, July 1978, amended by I. Harre, 2004)

Target Ship			Median radar cross section of target vessel, m ²										approx. min. RCS	approx. max. RCS
Type	Overall length (m)	Gross tonnage	10	100	1,000	10,000	100,000	1,000,000	10,000,000					
Inshore fishing vessel	9	5	■										3	10
Small coaster	40-46	200-250		■	■								20	800
Coaster	55	500		■	■								40	2,000
Coaster	55	500			■	■							300	4,000
Coaster	57	500			■	■							1,000	16,000
Large Coaster	67	836-1,000			■	■							1,000	5,000
Collier	73	1,570			■	■							300	2,000
Warship (frigate)	103	2,000*				■	■						5,000	100,000
Cargo liner	114	5,000				■	■						10,000	16,000
Cargo liner	137	8,000				■	■						4,000	16,000
Bulk carrier	167	8,200			■	■	■						400	10,000
Cargo	153	9,400			■	■	■						1,600	12,500
Cargo	166	10,430			■	■	■						400	16,000
Bulk carrier	198	15,000-20,000			■	■	■						1,000	32,000
Ore carrier	206	25,400			■	■	■						2,000	25,000
Container carrier	212	26,436**			■	■	■						10,000	80,000
Medium tanker	213-229	30,000-35,000			■	■	■						5,000	80,000
Medium tanker	251	44,700			■	■	■						16,000	1,600,000

* Displacement
** Considerable deck cargo
s = stern on
Q = quarter
B = broadside
BW = bow
BWQ = bow on
n = near

Op korte afstand, waarbij het object niet volledig bestraald wordt door de radarbundel, kunnen deze resultaten echter niet meteen gebruikt worden.

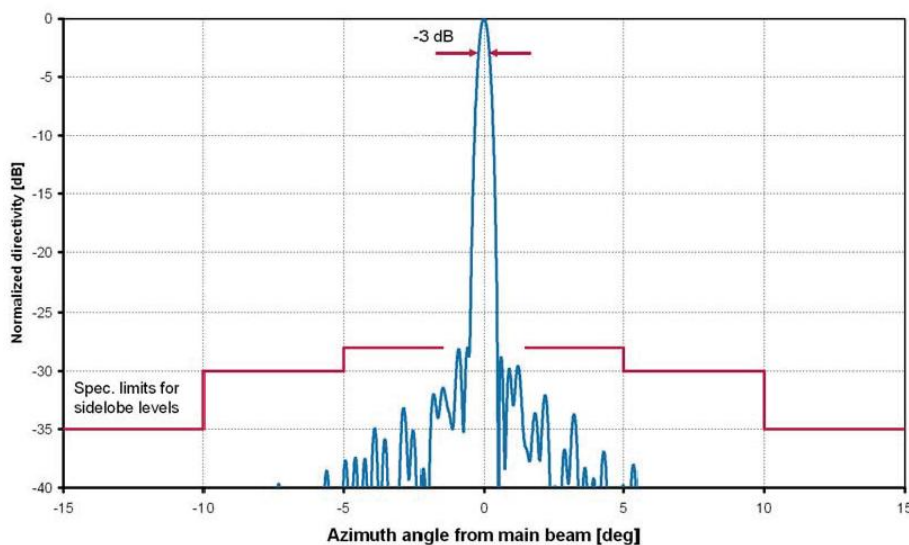


De verschillen tussen de twee situaties zijn hierboven geschetst:

- op korte afstand zal een aanzienlijk gedeelte van het invallende signaal weerkaatst worden buiten de antenne-bundel, zodat in wezen met een kleinere RCS kan of mag rekening gehouden worden.
- er treden geen randeffecten van het voorwerp op. De randen beïnvloeden mee een gedeelte van het weerkaatste signaal, en zorgen voor een grotere bundeling, en ook voor een grotere diffractie op de zijranden zelf. Dit is een gekend verschijnsel bij het bepalen van het stralingspatroon bij parabool-reflectoren en waar diverse ingrepen op die randen gebeuren om die negatieve effecten weg te werken (omplooiën van de rand, diëlektrische ring plaatsen, een ring met relatief lage geleidbaarheid en speciale vorm, enz. ...).

Zeker in azimuth zal de radarbundel op korte afstand niet de volledige zijkant van de scheepsromp bestralen, en bovendien is dient rekening gehouden met de invalshoek op de romp.

Het stralingspatroon van de radar Therna Scanner 2001 met een 18' antenne wordt in de volgende figuur gegeven.



De bundelbreedte in azimuth kan als volgt afgelezen worden:

- 3 dB	0,4 °
- 10 dB	0,7°
- 20 dB	1°

Daaruit volgt de fysische bundelbreedte in functie van de afstand tot de antenne:

afstand	0,4°	0,7°	1°
100 m	0,7 m	1,225 m	1,75 m
200 m	1,4 m	2,45 m	3,5 m
400 m	2,8 m	7 m	7 m
1000 m	7 m	12,25 m	17,5 m

In elevatie is de – 3 dB openingshoek 20°, wat een “hoogte” oplevert van 35 m bij 100 m afstand en 87,5 m bij een afstand van 250 m.

Hieruit blijkt dat reeds op vrij korte afstand een schip in de hoogte volledig bestraald worden, echter in de breedte helemaal niet.

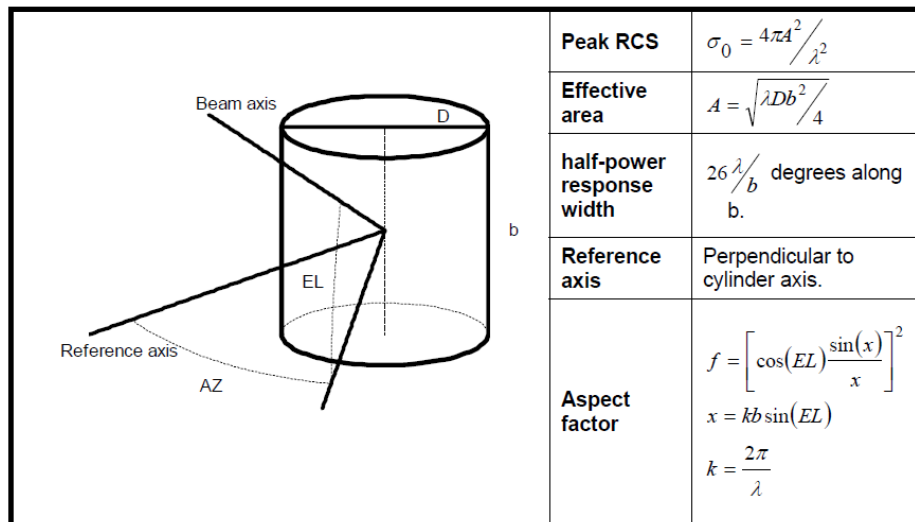
In de volgende tabel wordt een overzicht gegeven van de bestraalde oppervlakte, in functie van de afstand tot het object, de hoogte van het object en de bundelbreedte van de radar die in aanmerking genomen wordt.

hoogte	15 m		30 m		45 m	
afstand	0,4°	0,7°	0,4°	0,7°	0,4°	0,7°
100 m	10,5 m ²	18,375 m ²	21 m ²	36,75 m ²	---	---
200 m	21 m ²	36,75 m ²	42 m ²	73,5 m ²	63 m ²	110,25 m ²
400 m	42 m ²	73,5 m ²	84 m ²	147 m ²	126 m ²	220,5 m ²
1000 m	100,5 m ²	183,75m ²	210 m ²	367,5 m ²	315 m ²	551,25m ²
2500 m	251,5 m ²	459,375 m ²	502,5m ²	918,75 m ²	753,75 m ²	1378,15 m ²

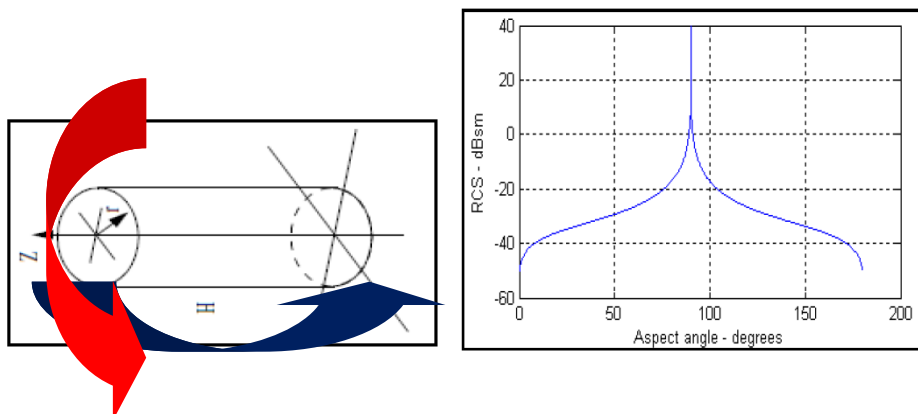
Annex E: Enkele opmerkingen omtrent de RCS waarden

Voor de RCS waarde van een cylinder zijn er onder condities van een uniform verdeelde vlakke golf theoretische uitdrukkingen bekend.

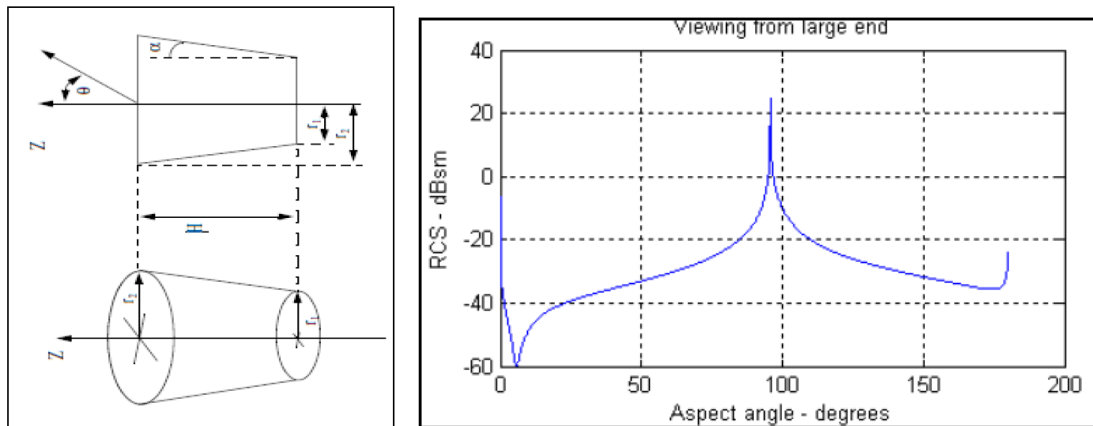
Cylinder



De piekwaarde voor de RCS die op deze manier bekomen wordt geldt voor de monostatische waarde bij een vlakke golf, met een polarisatie voor het E-veld die precies evenwijdig is met as van de cylinder. Van zodra er een kleine afwijking voor de polarisatie of invalshoek van het invallend veld ten opzichte van de asrichting voorkomt (blauwe pijl), daalt de RCS waarde drastisch, zoals in de volgende figuren aangegeven (**reference:** *RCS computation of shapes obtained by cascading simple objects using PO method and results obtained using Matlab Software, N. Swathi et al., Int. Journal of Electronics and Communication Technology, April 2013*).



Een gelijkaardig verschijnsel doet zich voor bij een conische structuur. Hierbij dient opgemerkt te worden dat enkel de piekwaarde relevant is bij de effecten van een windturbine, omdat de variatie van het invallend veld bij een radarinstallatie niet over de “langs”richting verandert, maar wel naar buitendraaiend over de dwarsrichting, zoals met de rode pijl op de voorgaande figuur schematisch weergegeven.



Gelijkaardige conclusies volgen ook uit gelijkaardige studies uitgevoerd door QinetiQ, Navcom en EADS/Cassidian, met zowel metingen uit de praktijk als simulaties. Een voorbeeld hiervan uit een QinetiQ (*Poupart 2003*) studie bij een windturbinepark Swaffham (UK) wordt in de volgende figuur gegeven, weliswaar met focus op het luchtverkeer.

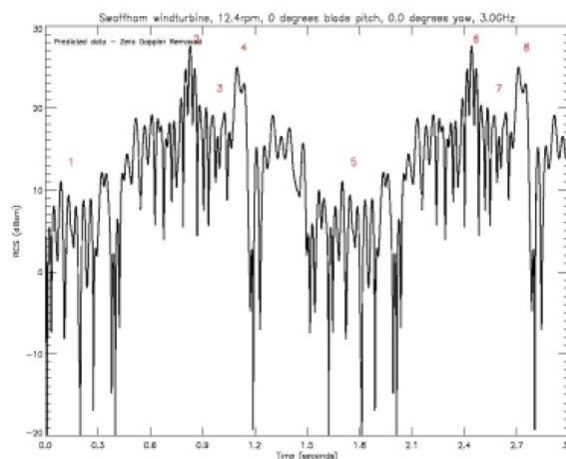


Figure 4-5; The Swaffham turbine RCS versus time at 0° pitch, 0° yaw, with the zero-Doppler component removed.

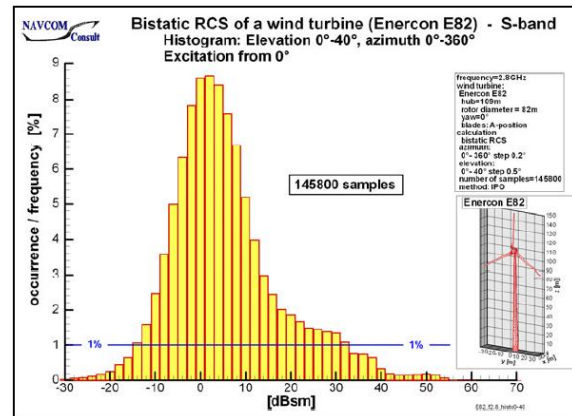
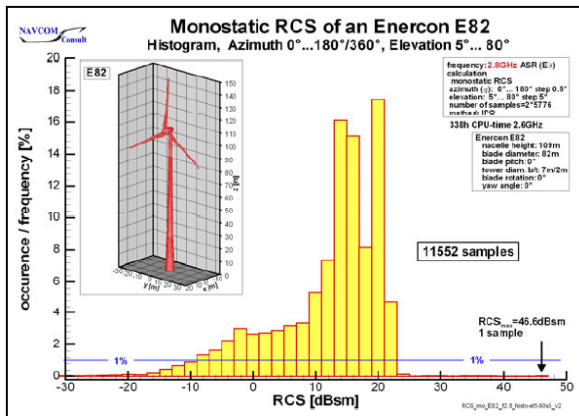
Hieruit blijkt reeds dat gemiddelde waarden voor de RCS van windturbines tussen 20 dBsqm (100 m^2) en 30 dBsqm (1000 m^2) als realistisch mogen aangenomen worden.

Bovenstaande effecten en waarden gelden voor de monostatische RCS waarden, die van belang zijn bij de directe waarneming van objecten. Bij de meervoudige reflecties is echter de bistatische RCS waarde van belang. Een studie uitgevoerd op een Enercon E82 windturbine (*Navcom – G.Greving 2007*) toont een histogram voor de RCS in functie van verschillende invalshoeken van het radarsignaal, en dat zowel voor de monostatische als de bistatische RCS.

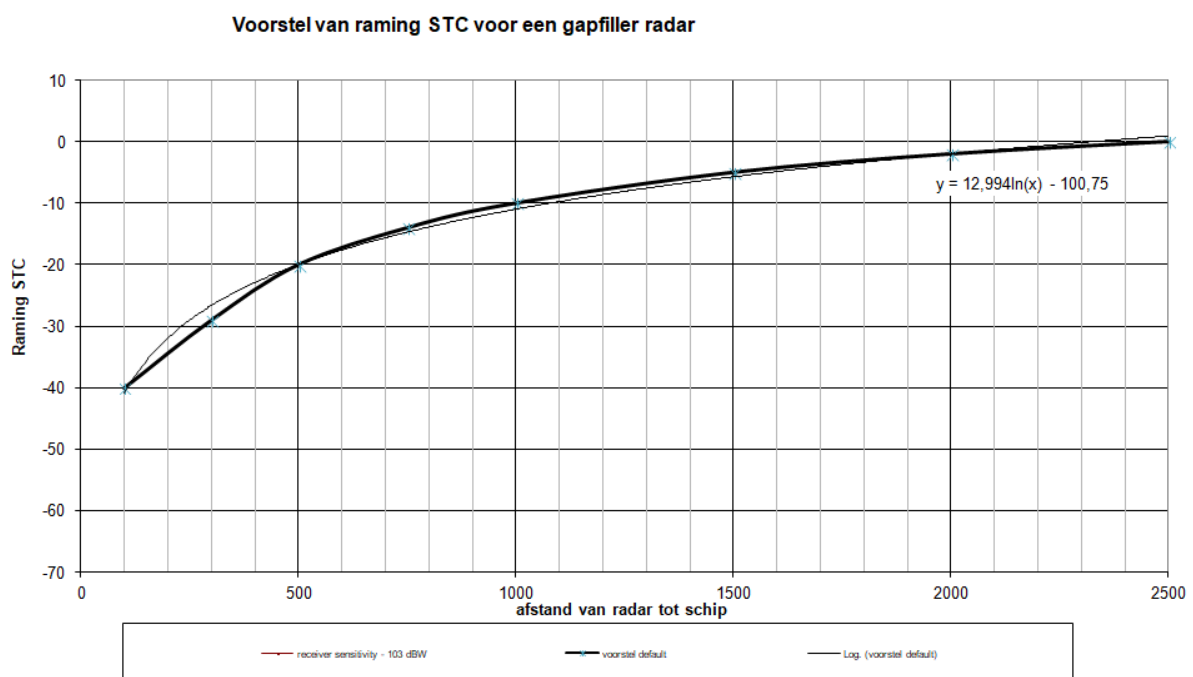
Hieruit kan afgeleid worden dat voor de monostatische RCS er een gemiddelde bovenwaarde van 23 dBsqm (200 m^2) kan aangenomen worden voor een E82 windturbine, en een bistatische RCS bovenwaarde van maximaal 10 dBsqm (100 m^2) kan aangenomen worden.

Een gedeeltelijke verklaring voor deze eerder kleinere gemiddelde waarden ten opzichte van een perfect theoretisch model, komt van het feit dat de voorwaarden voor de theoretische piekwaarde niet voldaan zijn, omdat:

- het invallende veld niet voldoende uniform vlak is
- de bundelbreedte van het radarsignaal slechts gedeeltelijk de mast gelijkmatig bestraalt
- de polarisatie van het invallend veld niet evenwijdig met het oppervlak van de WT is



Op te merken is wel dat alle studies onderstellen dat er een voldoende grote afstand is tussen de radarantenne en de windturbine, zodat het verre veld voor de antenne mag ondersteld worden. Dit is in de scheepvaart niet altijd het geval, zodat toch met een zekere veiligheidsmarge dient rekening gehouden te worden omwille van de eerder korte afstanden tussen radar en objecten.



Default STC curve voor de havenradar L11 (type Bridgemaster)