

## Memo

**Aan**

Fedor Baart / Rijkswaterstaat

**Datum**

20 januari 2026

**Ons kenmerk**

11211520-020-BGS-0001

**Aantal pagina's**

1 van 31

**Contactpersoon**

Matthijs Gawehn

**Doorkiesnummer**

+31(0)6 5159 4108

**E-mail**

Matthijs.Gawehn@deltares.nl

**Onderwerp**

Verkenning X-Band radars voor Rijkswaterstaat archief

## 1 Inleiding

### 1.1 Aanleiding

De Kustwacht ziet toe op de veiligheid op zee. Door meer scheepvaart, nieuwe activiteiten op zee en de bouw van windparken wordt het steeds drukker op de Noordzee. De kans op aanvaringen is daardoor groter en de mogelijke gevolgen daarvan op het vaste land ook.

In 2025 is gestart met Vessel Traffic Monitoring (VTMon; [Vessel Traffic Monitoring \(VTMon\) - Kustwacht Nederland](#)), dienstverlening gericht op vroegtijdige signalering van dreigend gevaar voor de scheepvaart in en rondom windparken. Daarbij maakt de Kustwacht onder andere gebruik van nautische radar op offshore platforms. Voor meervoudig doelmatig gebruik van het radararchief wordt bekeken of er – naast het detecteren van schepen - meerdere toepassingen van radar mogelijk zijn. Met slimme signaalverwerking is mogelijk ook informatie over hydrodynamica, golven en bathymetrie uit de radardata te halen. In het project Maritieme Informatievoorziening Servicepunt (MIVSP; [Maritieme Informatievoorziening Servicepunt | Digitale Noordzee](#)) realiseert, exploiteert en beheert Rijkswaterstaat de fysieke en digitale infrastructuur die nodig is om data te verzamelen en verspreiden.

Op verzoek van Rijkswaterstaat voert Deltares een verkenning uit naar mogelijkheden voor radartoepassingen met betrekking tot golven en eventueel andere hydrodynamica en bodemligging (bathymetrie). Deze opdracht wordt als deelproject binnen het Corporate Innovatie Programma (CIP) uitgevoerd.

### 1.2 Doelstelling

Het doel is om aan te geven:

- in hoeverre de huidige navigatieradargegevens ook gebruikt kunnen worden voor toepassingen als golfmetingen;
- wat er eventueel aangepast zou moeten worden om dat wel mogelijk te maken en;
- welke data daartoe op welke manier opgeslagen zou moeten worden.

### 1.3 Hoofdboodschap

Om golfgegevens uit radarbeelden te halen moet sea clutter (ruis) zichtbaar zijn. Geen van de ontvangen radarbestanden (Zandvoort, Scheveningen, Hollandse Kust West Alpha) bevat geschikte gegevens om golfinformatie uit te kunnen afleiden. De clutter – die als ruis gezien wordt - is er vooraf al uitgefilterd.

Met het juiste radarinstrument en geschikte instellingen is het wel mogelijk om de golfhoogte, -richting en -lengte te bepalen over een ruimtelijk gebied. Bij een pulsradar heeft men dan de beelden van diverse omwentelingen nodig, bij een FMCW (*frequency modulated continuous radar*) volstaat één omwenteling omdat dan via de Dopplerverschuiving uit de orbitaalsnelheid de golfrichting, -lengte en zelfs hoogte bepaald kan worden (zie Sectie 2.2).

## 1.4 Aanpak en indeling

Deze studie is door Deltares uitgevoerd maar in nauwe samenwerking met Rijkswaterstaat (WVL en CIV). Ook Sens2Sea heeft informatie aangeleverd en op verzoek van Rijkswaterstaat een eerste review uitgevoerd.

In de uitwerking zijn drie onderdelen te onderscheiden namelijk:

- Algemene uitleg over radar en literatuurstudie golfanalyse op basis van radarbeelden (Hoofdstuk 2, 3, 4)
- Analyse van enkele Noordzee-radarbestanden die Deltares van CIV ontvangen heeft (Hoofdstuk 5)
- Aanbevelingen voor meervoudig gebruik van de Noordzeeradars (Hoofdstuk 8)

De indeling van dit document is als volgt. Na dit introducerende Hoofdstuk 1 geeft Hoofdstuk 2 algemene informatie over navigatieradar zoals het principe, type radars en antennes. In Hoofdstuk 3 wordt uitgelegd hoe uit radaropnames golfgegevens verkregen kunnen worden. Hoofdstuk 4 combineert de twee voorgaande hoofdstukken door een samenvatting te geven van relevante radareigenschappen voor golfmetingen. Hoofdstuk 5 geeft de eerste resultaten van de analyse van de radardata die we van de CIV (Centrale Informatie Voorziening) van Rijkswaterstaat hebben ontvangen. In Hoofdstuk 6 geeft voorbeelden van bestaande systemen waar al golf-, stromings- en bodemgegevens uit radarbeelden worden gehaald. De conclusies staan in Hoofdstuk 7. Als aanbeveling (Hoofdstuk 8) hebben we een korte checklist gemaakt waar een radarsysteem aan zou moeten voldoen om geschikt te zijn voor het verkrijgen van golfinformatie.

De termen scheepsradar, navigatieradar, marine radar, nautische radar, X-band radar worden veelal door elkaar gebruikt. Al die benamingen hebben in deze studie betrekking op hetzelfde soort radar.

## 2 Algemene informatie navigatieradar

### 2.1 Principe van radar

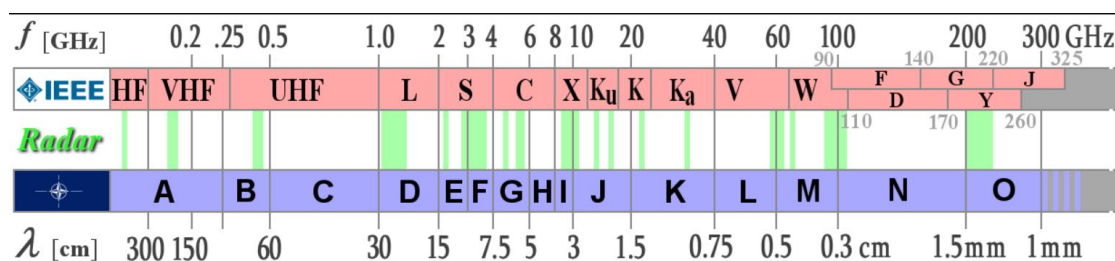
Een radar (*radio detection and ranging*) zendt via een antenne radiogolven (hoogfrequente elektromagnetische golven) uit en ontvangt – ook via een antenne - een gereflecteerd signaal terug (echo). Uit de tijd en intensiteit van de ontvangen echo kan bepaald worden waar een object zicht bevindt en soms ook hoe groot het is en welke snelheid het heeft. De snelheid van de elektromagnetische energie is de lichtsnelheid (300.000 km/s). De tijd tussen de uitzending van het signaal en de ontvangst van de echo is tweemaal de afstand gedeeld door de lichtsnelheid. Er kan gebruik worden gemaakt van een aparte zend- en ontvangstantenne, maar tegenwoordig gebruikt men veelal één antenne voor zowel het zenden als het ontvangen. De zender moet een sterk zendvermogen en een stabiele frequentie leveren. De ontvanger moet uiterst gevoelig zijn want de reflectie is meestal diffuus en verspreidt zich in allerlei richtingen.

Het uitgezonden signaal bestaat veelal uit een korte puls (met de vorm van een sinusfunctie) met de draaggolffrequentie van de betreffende radar. De pulsherhalingsfrequentie (*Pulse Repetition Frequency* of PRF) geeft aan hoe vaak een puls wordt uitgestuurd en bepaalt, samen met het uitgezonden vermogen, het maximale bereik. . Een lagere PRF biedt namelijk meer tijd

voor het signaal om heen en terug te reizen en kan dus een groter bereik leveren. In de tussentijd kan de reflectie ontvangen worden.

Continue radars (*CW; continuous wave radar*) zenden geen puls maar een constant signaal uit dat ook constant wordt ontvangen. Door de Dopplerverschuiving kan naast de afstand ook de snelheid van het doel bepaald worden.

Onderstaande figuur geeft een overzicht van verschillende radar frequenties en de benamingen daarvoor. De scheepsradar (ook wel navigatieradar of marine radar) zendt en ontvangt in de X-band met een frequentie van ongeveer 8 – 12 GHz, ofwel een golflengte van circa 0.03 m.



Figuur 2.1: Overzicht radarfrequenties

Bij primaire radars wordt de reflectie van een object ontvangen, dat is dus een gedeelte van het uitgezonden signaal. Secundaire radars daarentegen ontvangen een door het object uitgezonden signaal. Daarvoor is een transponder nodig op het object. Voor het meten van het zeeoppervlak gebruikt men dus primaire radars.

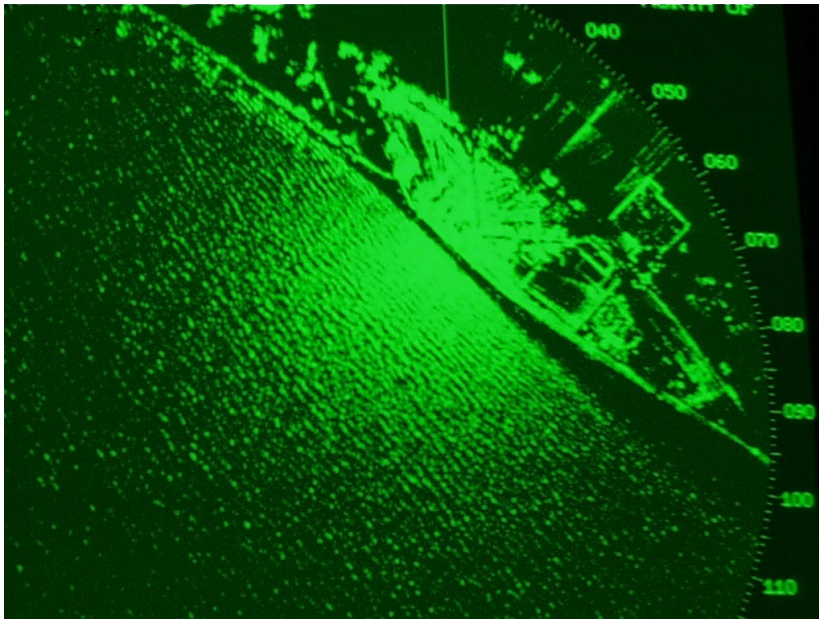
## 2.2 X-band radar voor golven

### 2.2.1 Inleiding

Het op het wateroppervlak gereflecteerde scheepsradarsignaal dat golf informatie kan leveren wordt vaak gezien als onbedoelde ruis (*sea clutter*) en als zodanig weggefilterd. Via Bragg-scattering wordt de energie van de radar vooral teruggekaatst door kleine capillaire golfjes met golflengtes in dezelfde orde als die van de radar (0.03 m). Windgolven en deining (golflengtes orde 30 – 300 m; golfperiodes orde 5 – 15 s) zijn veel langer en zorgen voor de modulatie van de amplitude en fase van die korte golven zoals veranderingen in oriëntatie (tilt), hellingmodulatie, versterken of dempen (hydrodynamische modulatie) en afscherming (radarschaduw) waardoor het radar signaal het zee oppervlak niet meer bereikt (Huang et al., 2017). Het resultaat is het bekende seaclutter-patroon in een PPI-beeld (radarscherm zoals op een schip. PPI staat voor Plan Position Indicator), waarin golfkammen en -dalen zichtbaar worden (Figuur 2.2).

Pionierstudies in de jaren '80 (Young et al. 1985, Wensink et al, 1988) en '90 (Nieto-Borge, Reichert en Dittmer, 1999, Greidanus, 1994) van de vorige eeuw hebben aangetoond dat uit nautische X-band-radarbeelden betrouwbare golfparameters kunnen worden afgeleid, en sindsdien is veel vervolgonderzoek gedaan. Dit heeft geleid tot operationele systemen als WaMoS II (van Rutter; Reichert et al., 1999), SeaDarQ (van Aptomar), Miros Wavex en Sens2Sea.

In de volgende paragrafen wordt nader ingegaan op type radars en bijbehorende eigenschappen. Omdat het bij de radars vaak om combinaties van onderdelen gaat en de resultaten zoals resolutie en bereik ook afhangen van de omgevingscondities en instellingen is niet altijd een harde specificatie te geven. De tekst is dus vooral informatief en sommige delen worden verduidelijkt in de volgende hoofdstukken; 3, 4, 7 en 8.



Figuur 2.2: Voorbeeld PPI (bron: Vogelzang et al., 2000)

### 2.2.2 Radar transmitter (magnetron vs solid state)

Het uitsturen van het radarsignaal gebeurt met een magnetron of met halfgeleiderversterkers (*solid-state power amplifiers*). Beide hebben hetzelfde doel: het radiosignaal (RF-signaal) van de radar versterken zodat er genoeg vermogen is om via de antenne uit te zenden. Het verschil zit in hoe dat gebeurt:

- Een magnetron is een vacüumbuis die zélf een hoogvermogen radiosignaal in de X-band opwekt. Hij oscilleert op een bepaalde frequentie en levert direct krachtige RF-pulsen (bijvoorbeeld 10–25 kW) die naar de antenne gaan. Magnetronradars zijn meestal niet-coherent dat wil zeggen dat de (absolute) fase van opeenvolgende pulsen willekeurig is. Ze zijn niet stabiel in fase en frequentie. De hoge spanningen die worden gebruikt in magnetronradars betekenen ook een hoger energieverbruik, wat de operationele kosten kan verhogen en de betrouwbaarheid op lange termijn kan beperken. Ook neemt de kwaliteit van de holtebuizen vaak na verloop van tijd af, waardoor hun nuttige levensduur wordt beperkt en de periodieke onderhoudskosten toenemen.
- Een halfgeleiderversterker gebruikt transistors om een al bestaand, schoon RF-signaal te versterken, dit noemt men ook wel 'solid state'. Eerst wordt een stabiel, laagvermogen X-band-signaal gegenereerd en daarna wordt het versterkt tot het gewenste zendvermogen. Dit geeft meer controle over frequentie en fase ('coherent'), is betrouwbaarder en vraagt minder onderhoud, maar levert per element meestal minder piekvermogen dan een magnetron. In moderne kust- en surveillanceradars met solid-state technologie wordt het signaal nog steeds in pulsen uitgezonden, maar die pulsen worden vaak voorzien van een frequentiemodulatie (FMCW). Hierdoor kan in de ontvanger gebruik worden gemaakt van pulse compression, waardoor een hoge range-resolutie wordt bereikt zonder dat extreem hoge piekvermogens nodig zijn.

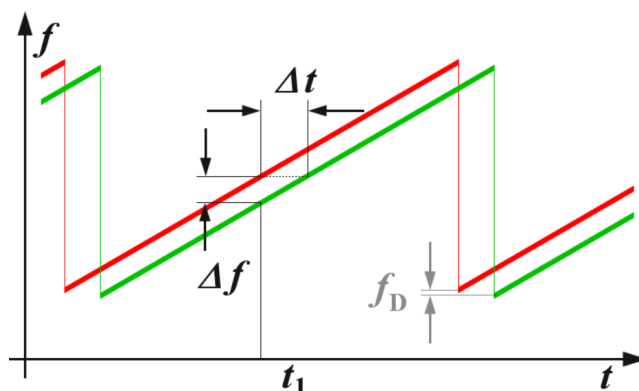
In de context van golfmetingen betekent dit dat magnetron-pulsradars vaak een zeer sterke seaclutter geven door hun hoge piekvermogen, terwijl solid-state/FMCW-radars vooral profiteren van hun coherentie en stabiliteit. Met coherent wordt bedoeld dat de frequenties en fasen van de uitgestuurde en ontvangen signalen gedefinieerd en direct afgeleid zijn van een stabiele basis oscillator, zie ook Sectie 2.2.4. Met een pulsradar bepaalt men het golfspectrum op basis van (bijvoorbeeld) 64 omwentelingen, en daaruit de golfsnelheid, -lengte en -richting. De ruimtelijke resolutie van het radarbeeld in de uitgezonden richting is typisch orde 5 – 10 m.

De FMCW radar kan de golfsnelheid, - lengte en -richting al uit één omwenteling bepalen doordat het gebruikt maakt van de Dopplerverschuiving. De ruimtelijke resolutie is veel hoger, orde decimeters.

De PRF (*Pulse Repetition Frequency*) geeft aan hoe vaak een puls wordt uitgestuurd en bepaalt samen met het uitgezonden vermogen het maximale bereik. Een lagere PRF biedt meer tijd voor het signaal om heen en terug te reizen en kan dus een groter bereik leveren. De PRF van oudere apparatuur is meestal niet aan te passen. Daarom is de gewenste omwentelingsnelheid (RPM) afhankelijk van de functie. Voor gegevens zoals bodemvorm is een lagere snelheid van 10 of 20 RPM geschikt omdat dat per omwenteling meer uitzending levert en daardoor minder gaten op grotere afstand. Voor gegevens waarbij de dispersierelatie nodig is (de dispersierelatie koppelt golfgetal en frequentie en bepaalt hoe watergolven zich voortplanten afhankelijk van hun golflengte en waterdiepte) zoals golven en diepte is 40 RPM gewenst. (persoonlijke communicatie met Sens2Sea).

### 2.2.3 FMCW-radars

FMCW-radars (*Frequency-Modulated Continuous Wave*) sturen continu een signaal uit maar anders dan bij gewone continue radar, verandert dat signaal van frequentie of fase (zie Figuur 2.3). De frequentie modulatie noemt men ook wel *sweep* of *chirp*. Afstand en snelheid volgen uit de beat-frequentie tussen zenden en ontvangen. Deze solid state systemen zijn intrinsiek coherent en onderhoudsarm, met hoge afstandsresolutie (Huang et al., 2017; Amato et al., 2010).



Figuur 2.3: Voorbeeld van zaagtand frequentie van FMCW systeem; rood is uitgezonden signaal, groen de echo. (bron: radartutorial.eu)

FMCW radars zijn over het algemeen nauwkeurig, zijn ook geschikt voor korte afstanden en ze kunnen snelheid meten. Een belangrijk nadeel voor golfmetingen is dat veel commerciële solid-state/FMCW-radars intern sterk filteren op seaclutter. Daardoor verdwijnt juist de informatie die nodig is voor golfspectra en morfologie.

### 2.2.4 Coherente radars

Een radar is coherent (COH) wanneer zenden en ontvangen op een stabiele fase-referentie zijn gebaseerd. Dat maakt Doppleranalyse en fase-gebaseerde golfhoogtebepaling mogelijk (Plant, 2005; Huang et al., 2017). Coherente X-band-systemen kunnen richtingsspectra en stromingen tegelijk meten (Trizna, 2016; Plant, 2005). Coherente radar levert hogere resolutiebeelden en heeft maar één omwenteling nodig voor het bepalen van de golfgegevens. Bovendien is – in tegenstelling tot niet-coherente radar - de aanwezigheid van capillaire golven voldoende voor een radarbeeld, er zijn niet per se windgolven nodig.

Coherent-on-receive (COR) combineert een conventionele magnetronzender met coherente ontvangst. Elke puls wordt met een willekeurige fase uitgezonden, maar een extra referentiekanaal kan deze fase per puls bijhouden. Horstmann et al. (2021) beschrijven een

COR-marineradar met magnetronzender en solid-state modulator, specifiek ontworpen voor oceaanobservaties.

In COH en COR systemen kan golfhoogte rechtstreeks uit de orbitale snelheden van het wateroppervlak worden geschat, zonder externe boei-calibratie (Trizna, 2016; Horstmann et al., 2021; Carrasco et al., 2017).

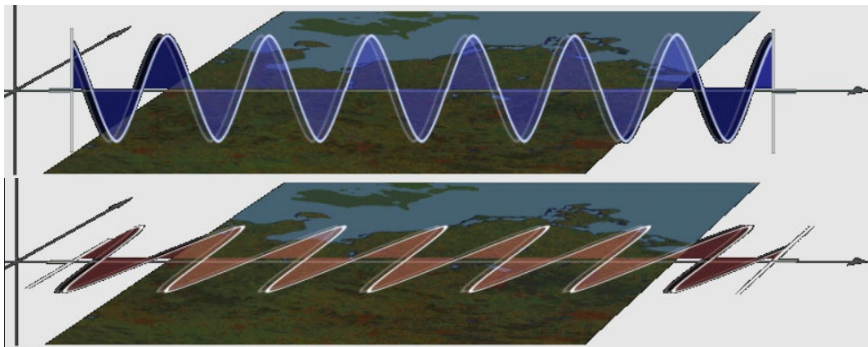
### 2.2.5 Antenne en polarisatie

Een antenne zorgt ervoor dat elektromagnetische energie wordt omgezet in een elektrisch signaal (bij ontvangst) en andersom (bij verzenden), en verdeelt het vermogen in bepaalde richtingen. Het antennepatroon moet zeer smal zijn in de zijwaartse hoek om voldoende nauwkeurigheid en resolutie te bereiken.

De open array antenne is een horizontale witte balk van enkele meters lang die ronddraait. Aangezien de antennegrootte invers correleert met de horizontale bundelbreedte die de radar kan produceren, bieden de grotere open-array radarantennes meestal een meer gerichte bundel en kunnen ze dus een fijnere hoekresolutie genereren om details te tonen. Grotere antennes bieden ook een hogere antenneversterking, wat betekent dat kleinere doelen op grotere afstand kunnen worden gedetecteerd.

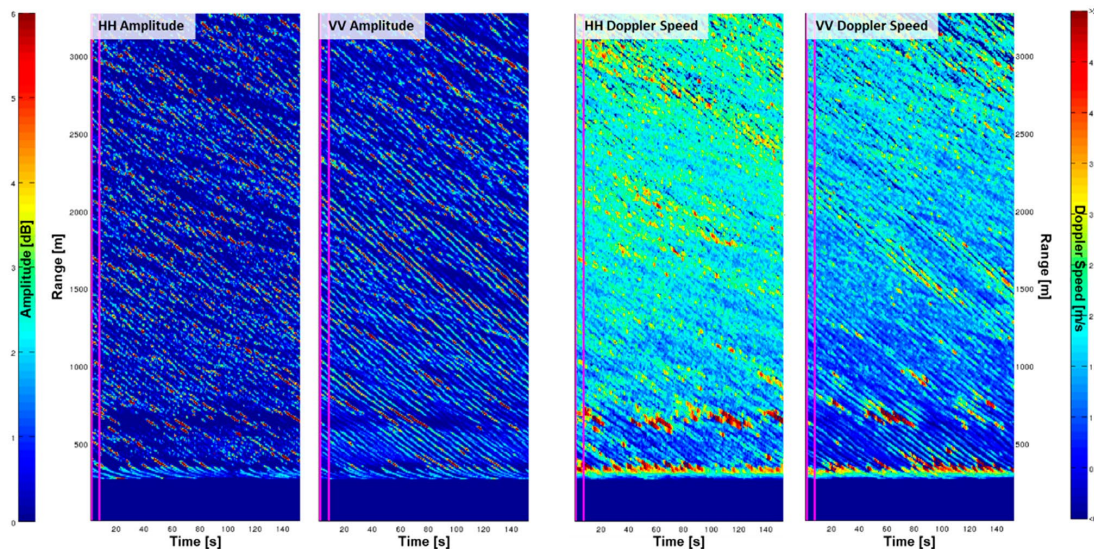
De meeste navigatieradars gebruiken een slotted-waveguide-antenne, een metalen pijp met sleuven die een smalle horizontale bundel produceren. De oriëntatie van de sleuven bepaalt de polarisatie (zie Figuur 2.4).

- HH-polarisatie (horizontaal) is standaard voor nautische radar en optimaal voor schepen en andere metalen doelen.
- VV-polarisatie (verticaal) levert daarentegen een sterker golfsignaal voor nauwkeurige golfanalyse (Trizna, 2016; Plant, 2005).



Figuur 2.4: Verticaal (boven) en horizontaal (onder) gepolariseerd elektrisch veld (bron: Christiaan Wolff via radartutorial.eu)

Dual-pol (co-pol) antennes (HH+VV) combineren beide werelden, maar zijn (nog) geen standaard. Via clutterdiscriminatie van dual-pol signalen kan worden bepaald welke echo's van golven/zee zijn en welke van ongewenste bronnen (regen, land, schepen, etc.), en zo kan het radarbeeld gericht opgeschoond en verder geanalyseerd worden. Horstmann et al. (2021) beoordelen zowel HH als VV polarisatie als geschikt voor golfanalyse, met voorkeur voor VV. Een HH radar heeft minder last van verstoringen ten gevolge van regen.



Figuur 2.5 Voorbeeld van amplitude en Doppler snelheid volgens antennes met HH of VV polarisatie (bron: Horstmann et al., 2021)

De grootste radarantenne die nu op een Noordzeeplatform staat heeft een lengte van ongeveer 6 m, zie Figuur 2.6.



Figuur 2.6: radarantenne op een platform (beeld: Robert Keupers via digitalenordzee.nl)

Voor effectieve golfanalyse zijn minimale systeemvereisten geformuleerd (Nieto-Borge et al., 1999; Nieto-Borge et al., 2004; Nieto-Borge et al., 2008) zoals: Antenne rotatie  $\geq 32$  rondes per minuut, Puls lengte  $\leq 80$  ns, Antennelengte  $\geq 2,5$  m. De antenne-lengte bepaalt de horizontale bundelbreedte (en daarmee de richtingsresolutie en gain); een langere X-band antenne (2,5 m) geeft een smallere bundel ( $\approx 1^\circ$  bundelbreedte bij 10 GHz), waardoor seaclutter en golfpatronen veel scherper zijn en dus beter te analyseren.

### 2.2.6 Belang van ruwe data

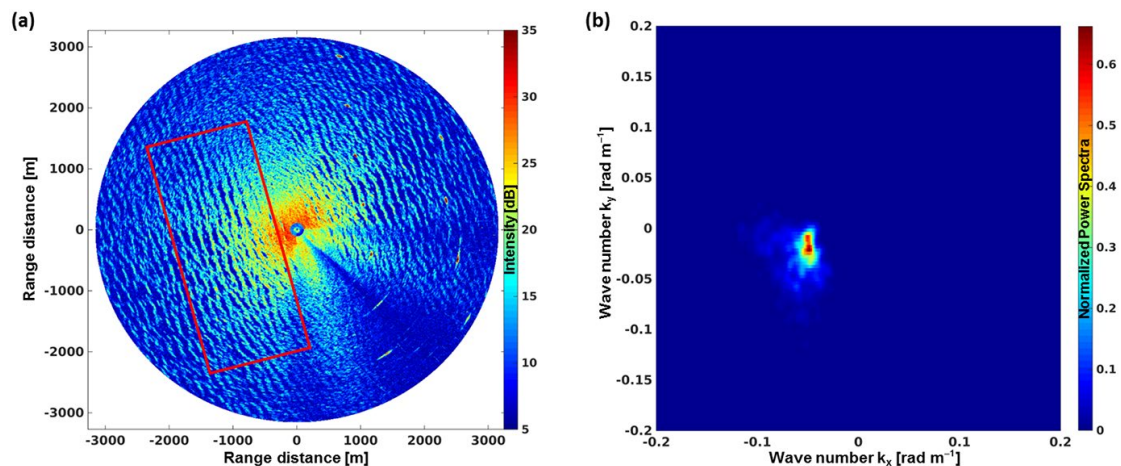
Voor golven, ecologie en morfologie is toegang tot ongefilterde sea clutter essentieel: alleen dan kunnen de subtiele modulaties door de golfkruinen worden geanalyseerd. Klassieke magnetronradars leveren meestal ruwe video (Nieto-Borge et al., 1999; Reichert et al., 1999; Huang et al., 2017), terwijl moderne solid-state systemen vaak gefilterde vts-video aanbieden.

### 3 Golfanalyse met X-band navigatieradar

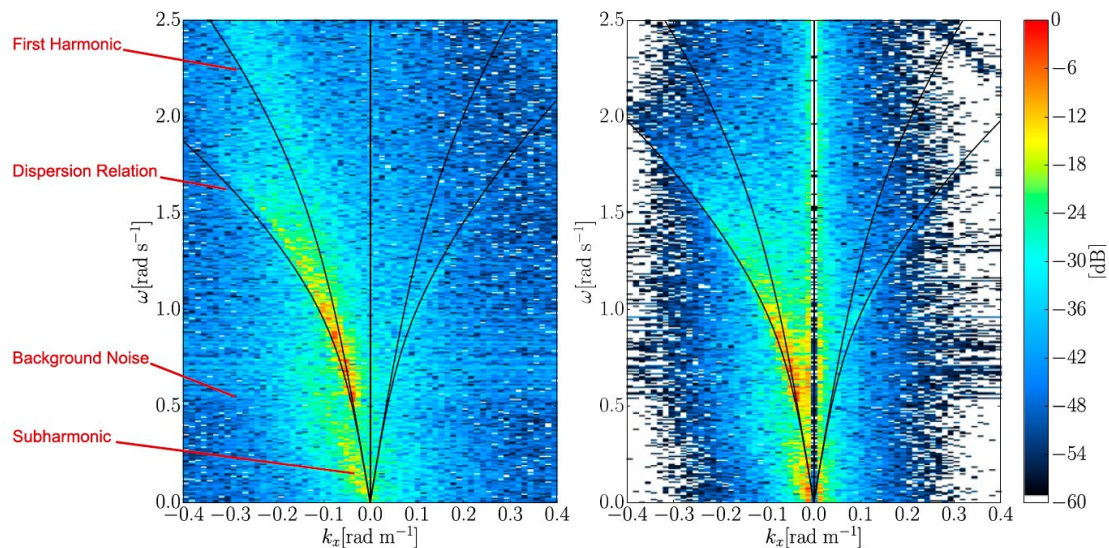
#### 3.1 Fysische basis: welke informatie bevat de sea clutter?

De backscatter (de reflectie van het signaal in de richting waar het vandaan kwam) in X-band wordt gedomineerd door Bragg-resonantie op capillaire golven met halve radar-golflengte (~0.015 m). Deze korte golven worden op hun beurt gemoduleerd door:

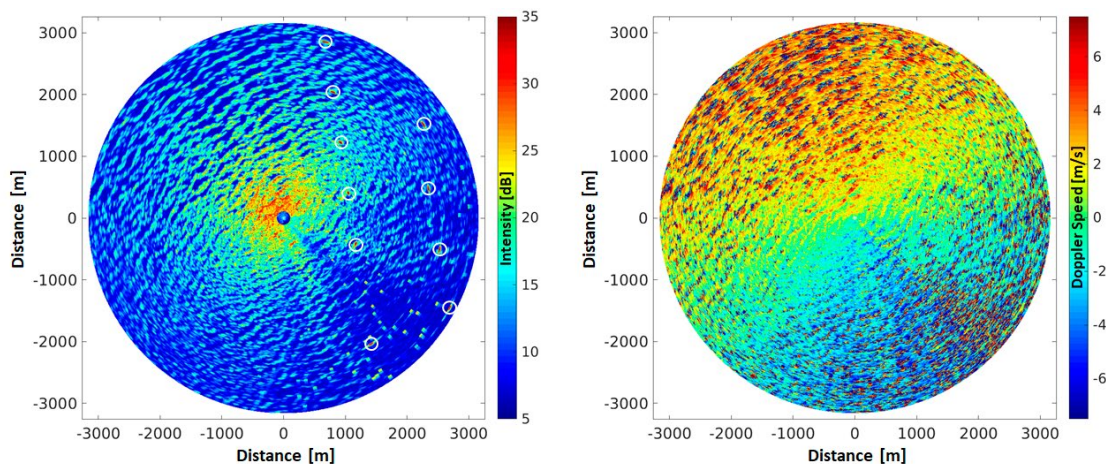
- de tilt van het zeeoppervlak (hellingsmodulatie);
- hydrodynamische modulatie (versterking/demping van korte golven in kammendelen);
- shadowing (afschermen van gebieden achter hoge golven) (Huang et al., 2017).



Figuur 3.1: Voorbeeld van (a) een x-band radar PPI beeld met (b) bijbehorend ruimtelijk golfspectrum met dominante golfgetallen (bron: Carrasco et al., 2017)



Figuur 3.2: Voorbeeld van een 3D golfspectrum in het golfgetal-frequentie domein ( $k_x, \omega$ ) zoals verkregen uit het Doppler signaal (links) (bijvoorbeeld via COH of COR, zie ook Figuur 3.3, rechts) of via de amplitude (kan ook niet-coherent, zie ook Figuur 3.3 links)(bron: Støle-Hentschel et al., 2018)



Figuur 3.3: Voorbeeld van een intensiteitsbeeld (links) en de Doppler snelheid gemeten met een COR (bron: Horstmann et al., 2021)

Uit een enkel radar beeld kan via een 2D Fourier transformatie een ruimtelijk golfspectrum in het golfgetal domein ( $k_x$ ,  $k_y$ ) worden verkregen (Figuur 3.1). Uit temporele reeksen van meerdere radar-beelden (typisch 64 of meer rotaties) kan bijvoorbeeld via een 3D-Fouriertransformatie het spectrum worden uitgebreid naar het golfgetal-frequentie domein ( $k_x$ ,  $k_y$ ,  $\omega$ ) (Figuur 3.2). Het zeegolf-deel van dit spectrum ligt op of rond de lineaire dispersierelatie; door daarop te fitten kunnen worden bepaald:

- de golfrichting en het richtingsafhankelijke spectrum;
- de bijbehorende golflengten en fase- en groepssnelheden;
- en de oppervlakte-stroming, via de Doppler-verschuiving van de dispersierelatie.

De absolute schaal van het golfspectrum – en daarmee de significante golfhoogte  $H_s$  – volgt daar echter niet direct uit. Voor niet-coherente X-bandradars wordt  $H_s$  doorgaans bepaald met:

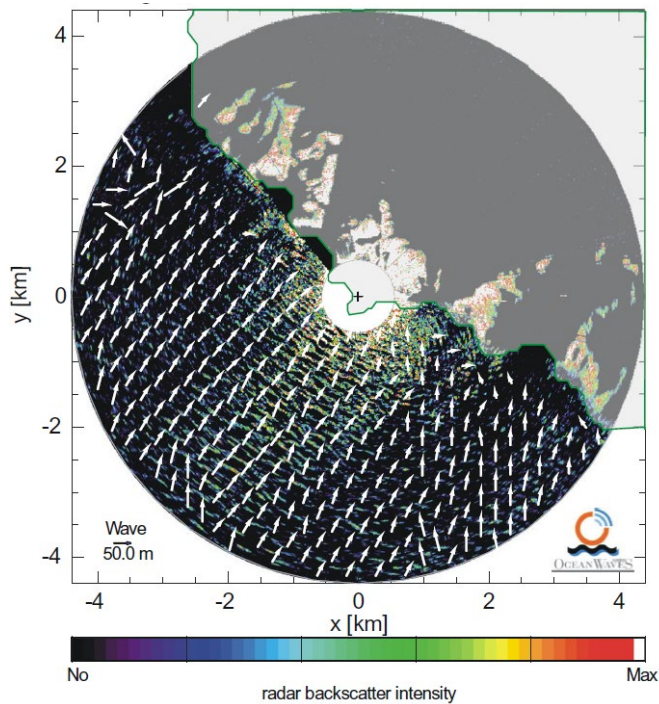
- een Modulation Transfer Function (MTF) die beschrijft hoe variaties in het golfveld worden omgezet in variaties in radarintensiteit (Nieto-Borge et al., 2004);
- een methode op basis van de Signal-to-Noise Ratio (SNR), waarbij  $H_s$  wordt afgeleid uit de verhouding tussen golfgerelateerde energie en achtergrondruis in het radarspectrum (Nieto-Borge et al., 2008).

Zowel de MTF als SNR-benaderingen worden in de praktijk empirisch gekalibreerd met een lokale golfboei (bijvoorbeeld door  $H_s$  uit radar en boei over langere tijdreeksen op elkaar te fitten).

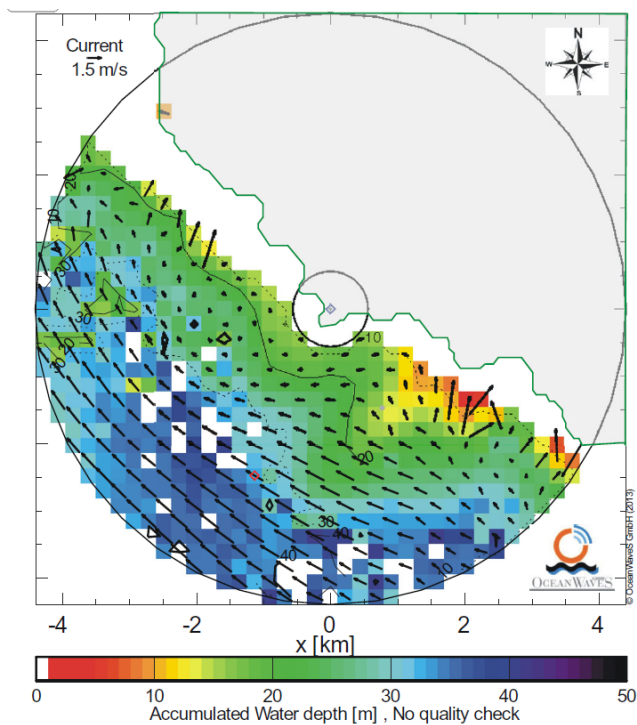
Bij coherente en coherent-on-receive radars kan  $H_s$  in principe direct uit de gemeten orbitaalbeweging van de golven worden afgeleid, omdat naast amplitude ook fase- en snelheidsinformatie beschikbaar is (Trizna, 2016; Støle-Hentschel et al., 2018; Horstmann et al., 2021), zie ook Paragraaf 2.2.4.

## 3.2 Klassieke amplitude-gebaseerde methoden

Al sinds de jaren '80 van de vorige eeuw is aangetoond dat uit navigatieradarbeelden golfspectra (zie Figuur 3.1 en Figuur 3.2) en oppervlakte stromingen (Figuur 3.5) kunnen worden afgeleid. Onder andere Young et al., 1985 lieten zien dat X-bandradar gebruikt kan worden om richtingsspectra te schatten en daaruit ook stroomsnelheden af te leiden. Operationalisering van de technieken volgde iets later (Nieto-Borge et al., 1999) waarbij uit opvolgende nautische radarbeelden richtingsspectra worden verkregen (zie ook Figuur 3.1). Ook levert dat vectorvelden van de golfvoortplanting (Figuur 3.4) en de oppervlaktestroming (Figuur 3.5, zie ook Hessner et al., 2014 en Lund et al., 2020).



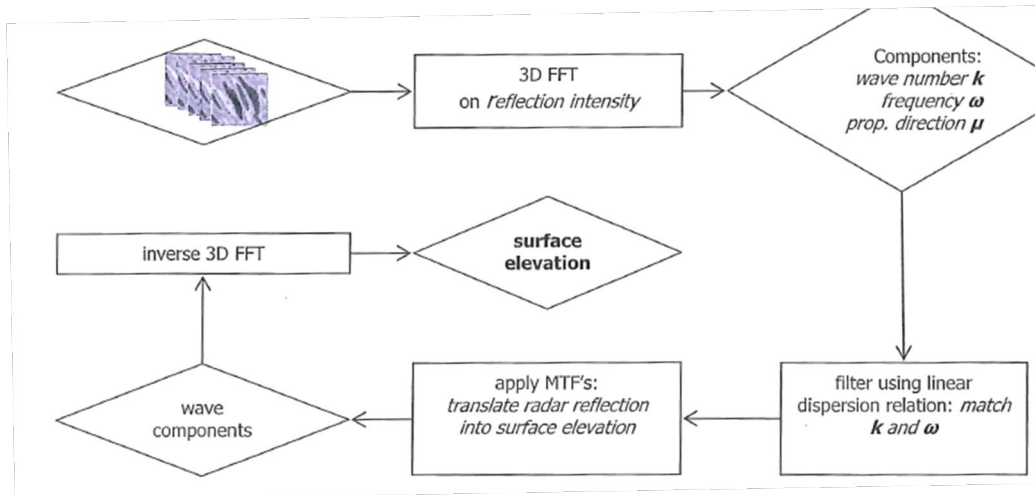
Figuur 3.4 Voorbeeld van lokale golfspectra gecondenseerd tot een vector veld van hoofd-golfinval. Berekeningen zijn gedaan met WaMoSII (bron: Hessner et al., 2014)



Figuur 3.5: Voorbeeld van oppervlakte stroming geschat uit lokale golfspectra (zie ook Figuur 3.2). Berekeningen zijn gedaan met WaMoSII (bron: Hessner et al., 2014)

Zelfs de golfhoogte  $H_s$  kon worden geschat op basis van standaard scheepsradar. Hierop is het operationele systeem WaMoS II voortgebouwd, dat golfspectra en oppervlakte stroming levert met gebruik van conventionele X-band navigatieradars (Reichert et al., 1999). De kernstappen zijn: een lokale 3D-FFT op de sequentie radarbeelden (Figuur 3.6), selectie van energie rond de dispersierelatie, reconstructie van een directioneel golfspectrum, en afleiding van parameters zoals de piekperiode  $T_p$ , de bijbehorende piekgolflengte  $\lambda_p$  en de bijbehorende

piekrichting  $\theta_p$ , gevolgd door toepassing van een modulation transfer function (MTF) om de overgang van beeldspectrum naar golfspectrum te kalibreren en zo ook de significante golfhoogte  $H_s$  te schatten (Nieto-Borge et al., 1999; Nieto-Borge et al., 2004).



Figuur 3.6: Typisch analyse schema van X-band radar beelden met 3D-FFT om intensiteitsbeeld te vertalen naar waterhoogte (bron: Naaijen & Blondel-Coupré 2012)

Omdat de MTF afhankelijk is van wind, kijkhoek en radarinstellingen, wordt deze vaak gekalibreerd met boeimetingen van  $H_s$ . Nieto-Borge et al. (2008) gebruiken een signal-to-noise-ratio-benadering om  $H_s$  robuuster te schatten uit de verhouding tussen golfsignaal en achtergrondruis.

Een reeks studies heeft de nauwkeurigheid en beperkingen van amplitude-gebaseerde methoden geëvalueerd, zowel op vaste platforms (FINO) als in kustgebieden (Vogelzang et al., 2000; Hessner et al., 2013; Vogelzang et al., 2000; Lund et al., 2020). In het algemeen blijkt dat  $H_s$ ,  $T_p$  en  $\theta_p$  goed overeenkomen met boeimetingen, mits aan de systeemvereisten wordt voldaan en de wind boven circa 3–4 m/s ligt (Huang et al., 2017; Vogelzang et al., 2000).

### 3.3 Coherente en COR-radars

Trizna gebruikte een reeks coherente marineradars (COHrad, CORrad) en liet zien dat hiermee frequentiespectra én oppervlaktestroming kunnen worden gemeten, vooral bij VV-polarisatie (Trizna, 2016; Trizna, 2011). Coherente systemen hebben twee belangrijke voordelen:

1. de Doppler-snelheid (Figuur 3.3 rechts) van de orbitaalbeweging kan direct worden gemeten;
2. de amplitudeschaling is fysisch beter beheersbaar, waardoor minder afhankelijkheid van een empirische MTF bestaat (Plant, 2005; Huang et al., 2017).

Horstmann et al. (2021) introduceren een COR X-band marineradar met magnetronzender en tonen aan dat hiermee zowel richtingspectra, stroming als  $H_s$  kunnen worden bepaald. Daarbij wordt ook expliciet gebruikt gemaakt van Dopplerinformatie (zie ook Carrasco et al., 2017).

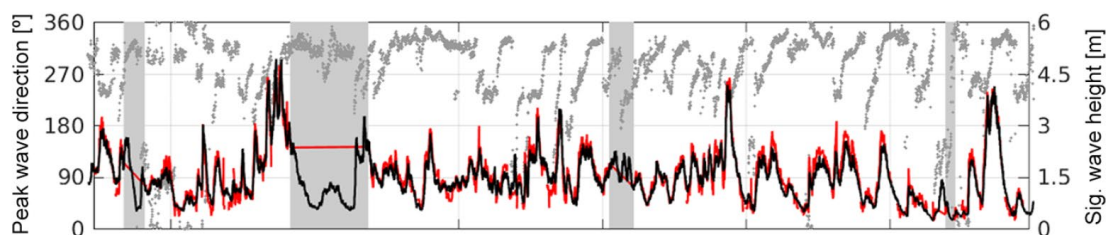
Støle-Hentschel et al. (2018) laten zien dat zeespiegelreconstructies uit Doppler-meting en uit amplitude-meting onder goede omstandigheden consistente resultaten geven: beide leveren vergelijkbare oppervlakteschattingen, mits de signaal-ruis-verhouding goed is.

Dit ondersteunt de praktijk dat veel commerciële systemen nog steeds niet-coherente navigatieradars zijn, die ook goed kunnen worden ingezet voor golfanalyse zolang de algoritmen en calibratie goed zijn ingericht.

## 3.4 Twee routes voor golfhoogte bepaling

Er zijn grofweg twee routes voor het schatten van significante golfhoogte  $H_s$ :

1. Amplitude-gebaseerd (niet-coherent)
  - gebruik van een MTF of SNR-benadering om het beeldspectrum om te zetten naar een oppervlaktespectrum;
  - kalibratie tegen lokale boeien (Nieto-Borge et al., 1999, 2008).
2. Fase-/Doppler-gebaseerd (coherent/COR)
  - $H_s$  direct afleiden uit variaties in orbitaalsnelheden (Figuur 3.7) of uit coherent gereconstrueerde golfvelden (Trizna, 2016; Horstmann et al., 2021; Carrasco et al., 2017; Støle-Hentschel et al., 2018).



Figuur 3.7: Voorbeeld tijdserie van golfrichting (linker y-as) en golfhoogte (rechter y-as). Golfhoogte wordt vergeleken tussen in-situ boei (zwart) en verkregen uit orbitaalsnelheden gemeten met een COR (rood) (bron: Carrasco et al., 2017)

Hoewel coherente en coherent-on-receive (COR) radars conceptueel grote voordelen bieden voor het direct afleiden van  $H_s$  uit de orbitaalbeweging, zijn deze systemen in de literatuur nog minder vertegenwoordigd dan de klassieke amplitude-gebaseerde methoden op basis van een MTF of SNR-analyse. Dit hangt waarschijnlijk samen met het feit dat een groot deel van de bestaande nautische radars nog steeds uit niet-coherente magnetron-navigatieradars bestaat, waarvoor MTF-achtige benaderingen goed zijn ingeburgerd en relatief eenvoudig operationeel toepasbaar zijn.

## 3.5 Operationele systemen en toepassingen

### 3.5.1 Operationele radarsystemen voor golfinformatie

- WaMoS II (van Rutter) is het meest verbreide systeem en analyseert standaard X-bandradarbeelden om in bijna realtime  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\lambda_p$ ,  $\theta_p$  en oppervlaktestroming te leveren (Reichert et al., 1999; Hessner et al., 2014; Vogelzang et al., 2000). SeaDarQ (van Aptomar) verwerkt X-bandradarbeelden voor oliedetectie en golf- en stromingsschatting.
- Miros Wavex gebruikt navigatieradars op boten voor golf- en stroomparameters.
- Sens2Sea ontwikkelt moderne golf-radars en analysetools, met focus op geavanceerde golfproducten (waaronder near-real-time spectra en fase-opgeloste velden) op basis van bestaande en nieuwe X-bandradars.

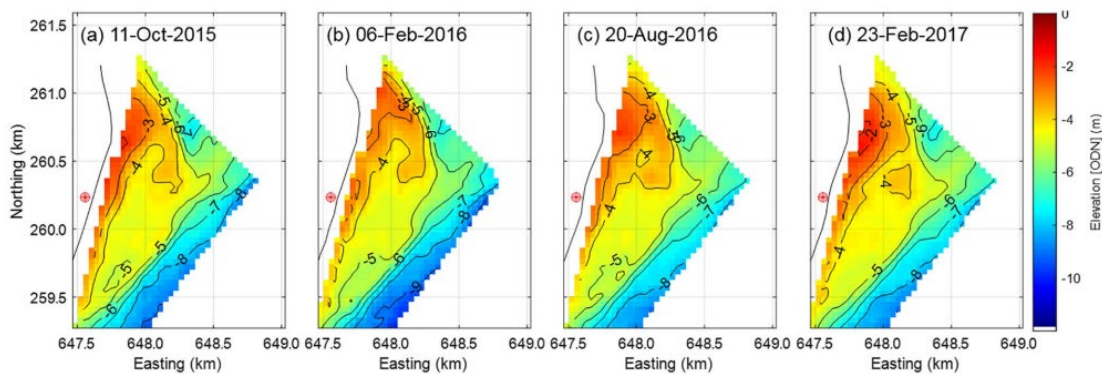
### 3.5.2 Fase-oplossende golfvoorspelling

Met fase-oplossende golfvelden uit navigatieradar kan niet alleen het statistische spectrum, maar ook de individuele golven rond een schip worden gevolgd. Naaijen et al. (2016) laten zien dat hiermee scheepsbewegingen enkele minuten vooruit kunnen worden voorspeld, wat operationele risico's bij offshore-operaties reduceert. Dit systeem is ook experimenteel gevalideerd (Naaijen et al., 2018). Deze ontwikkeling sluit aan bij bredere literatuur over deterministische golfvoorspelling en mixed space-time methoden (Simpson et al., 2020).

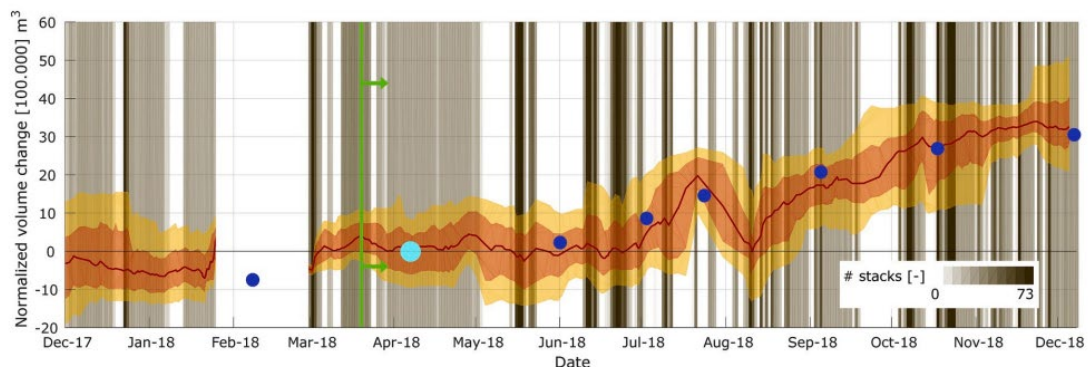
Sens2Sea heeft een MIT project met scheepsbewegingsvoorspelling samen met PK Marine en geeft een gebied aan waar een offshore operatie kan plaatsvinden met een bewegingsvoorspelling van 3 minuten deterministisch.

### 3.5.3 Morfologie en diepte-inversie

X-bandradars zijn ook bruikbaar voor het zichtbaar maken van morfologische ontwikkelingen, zoals zandbanken (Atkinson et al., 2021), delta's en suppleties. Radar-diepte-inversie kan een kosteneffectief alternatief zijn voor frequente bathymetrische surveys (Figuur 3.8, zie ook Atkinson et al., 2021). Gawehn et al. (2020) passen diepte-inversie toe om suppleties op een open zandkust en een eb-getijd-delta te monitoren met een magnetron X-band radar (Figuur 3.9).



Figuur 3.8: Voorbeeld tijdserie (van a naar d) van morfologische verandering (bron: Atkinson et al., 2021)



Figuur 3.9: Tijdserie van suppletievolumen tijdens langjarige plaatsing. Blauwe stippen zijn in-situ metingen en rode tijdserie met onzekerheidsbanden is volgens x-band radar diepte inversie (bron: Gawehn et al., 2020)

De nauwkeurigheid van diepte-inversie wordt meestal in de enkele decimeters tot meter nauwkeurigheid aangegeven (zie bijv. Gawehn et al., 2020 en Atkinson et al., 2021). Echter hangt de nauwkeurigheid af van de diepte. Naarmate het dieper wordt, worden golven minder gemoduleerd door de zeebodem en worden de diepteschattingen onnauwkeuriger.

Het genereren van een enkele dieptekaart/bathymetrie in het radarzichtveld benodigd normaliter een reeks radarbeelden (een "image stack") van 6-12 min bij een radar rotatiesnelheid van 2-3s. Echter worden vaak meerdere schattingen gedaan per dag zodat onbruikbare perioden (bijvoorbeeld met zware buien of sterke whitecapping) kunnen worden omzeild.

De resolutie van verwerkte data is doorgaans lager dan de resolutie van de ruwe radar bestanden. Resultaten voor hydrodynamica en bathymetrie hebben normaliter een resolutie die niet hoger is dan 50-100 m. De ruimtelijke resolutie is gekoppeld aan de lengte van de

zeegolven O(100m). De analyse van een golfbeeld legt dus intrinsieke beperkingen op de resolutie van hydrodynamische en morfologische resultaten.

## 4 Samenvatting relevante radareigenschappen voor golfmetingen

### 4.1 Overzicht

#### Coherentie

- Coherente radars (incl. COR) behouden fase-informatie en ondersteunen Doppler en fase-gebaseerde golfhoogte-schatting (Trizna, 2016; Horstmann et al., 2021; Carrasco et al., 2017).
- Niet-coherente magnetronradars missen deze fase-informatie, maar leveren door hun grote dynamiek nog steeds bruikbare amplitude-informatie; In combinatie met lokale boei metingen kan Hs ook via MTF-/SNR-methoden worden geschat (Nieto-Borge et al., 1999, 2008).

#### Radararchitectuur

- Pulsradars met magnetronzender leveren hoge piekvermogens en sterke seaclutter; goed voor golven, morfologie en ecologie (Nieto-Borge et al., 1999; Vogelzang et al., 2000). Zij zijn niet-coherent.
- Solid-state/FMCW-radars zijn coherent en onderhoudsarm, met hoge resolutie, maar filteren vaak sea clutter intern en bieden niet altijd ruwe data-uitgangen (Amato et al., 2010; Horstmann et al., 2021). Solid state kan zowel puls als continu zijn, FMCW is continu.

#### Antenne en polarisatie

- Vertikale polarisatie (VV) geeft ~10 dB sterker golfsignaal dan horizontale (HH) en is gewenst voor nauwkeurige golfanalyse (Trizna, 2016; Plant, 2005).
- Horizontale polarisatie (HH) is gangbaar in VTS-radars (vessel traffic service) en optimaal voor scheepvaarttargets, maar minder gevoelig voor seaclutter (Amato et al., 2010).

#### Ruwe data en filtering

- Voor golven, ecologie en morfologie is toegang tot ruwe, ongefilterde seaclutterdata cruciaal (Nieto-Borge et al., 1999; Reichert et al., 1999; Chernyshov et al., 2022).

Een detail overzicht van de verschillende types radar en radararchitectuur wordt hieronder gegeven.

## 4.2 Detailoverzicht van radar architectuur, verwerking en toepassing

### 4.2.1 Radar Architectuur

Categorie	Type	Beschrijving	Toepassing
Coherentie	Coherent Radar	Uitgezonden en ontvangen signalen delen één fase-referentie. Ondersteunt Doppler, interferometrie & fase-gebaseerde golfhoogte.	FMCW radars, high-end kustmonitoring, fasegebaseerde golfanalyse. 'solid state'
	Niet-Coherent Radar	Geen fasebehoud; amplitude-only. Geen Doppler of faseanalyse.	Klassieke magnetron-navigatieradars, eenvoudige kust/VTS-radars.
	Coherent-on-Receive (COR)	Magnetronzender niet coherent, maar fase wordt bij ontvangst hersteld. Ondersteunt Doppler tot op zekere hoogte.	Moderne pulsradars (maritiem).
Signaal	Pulse Radar (Magnetron/CHIRP)	Verzendt korte pulsen met hoog piekvermogen. Goede seaclutter → goede detectie golven/targets.	VTS, scheepvaart, ecologie (bruinvissen), morfologie.
	FMCW Radar (Solid State)	Continu freq.-verschuivend signaal. Lage vermogens, hoge range-resolutie. Vaak interne clutterfiltering → golven minder zichtbaar.	Moderne radars, korte tot middellange afstand.
Transmitter Type	Magnetron	Hoog vermogen, eenvoudige hardware. Niet coherent (tenzij COR). Beste voor sterke seaclutter → golven.	VTS, kustmonitoring, ecologie, navigatie.
	Solid State	Lage vermogens, betrouwbaar, onderhoudsarm. Altijd coherent. Kan intern filteren → golfsignaal verloren.	Moderne RWS- en commerciële radars.
	Klystron / TWT	Hoog vermogen, breedband, uitstekende stabiliteit.	Langeafstand surveillance, defensie, meteo.
	DDS (Digital Synthesizer)	Digitale golfvormen, flexibel en stabiel.	Moderne compacte radars.

### 4.2.2 Antenne Karakteristieken

Categorie	Type	Beschrijving	Toepassing
Antenne Type	Slotted Waveguide Antenna	Robuust, veel gebruikt in marineradar.	Navigatie, VTS, kustmonitoring.
	Parabolic Dish	Hoge gain, smalle bundel.	Langeafstand detectie.
	Phased Array	Elektronisch beamsteering, geen mechanische rotatie.	High-end systems, defensie
Polarisatie	HH (Horizontal)	Minder gevoelig voor golven (~10 dB lager), goed voor scheepvaarttargets.	Navigatie, VTS.
	VV (Vertical)	Sterk golfsignaal (~10 dB sterker). Goed voor golfanalyse.	Golven, morfologie, kustmonitoring.
	Dual-Pol (HH+VV)	Twee orthogonale polarisaties.	Advanced ocean radars, clutterdiscriminatie.

### 4.2.3 Signaal verwerking

(Deze opties zijn mogelijk afhankelijk van de hardwarearchitectuur hierboven).

Categorie	Verwerking	Beschrijving	Voorwaarden
Doppler & Snelheid	Range-Doppler Processing	Haalt snelheidsinformatie uit faseverschil.	Coherent radar of COR
	MTI/MTD Moving Target Indication/Detection	Clutteronderdrukking via Doppler.	Coherent radar of COR
Golfanalyse	Golfspectra	Golfrichtingen & perioden uit zeeclutter-spectrum.	VV-pol + ruwe zeeclutter
	Fase gebaseerde golfhoogte	Golfhoogte (Hs) uit fasevariaties.	Coherent radar (FMCW/puls coherent)
Algemeen	Clutter Filtering	Onderdrukt ongewenste echo's.	Configuratie-optie nodig

#### 4.2.4 Frequentie band

Band	Beschrijving	Toepassing
X-band	8 – 12 GHz; Hoge resolutie, gevoelig voor capillaire golven → perfect voor seaclutteranalyse.	Golven, morfologie, maritieme veiligheid.
S-band	2 – 4 GHz; Minder gevoelig voor regen en atmosferische demping.	Langeafstand maritiem, scheepvaart.
C-band	4 – 8 Hz; Tussenpositie; gebruikt in meteo.	Meteo radars.
Ka/W-band	27 – 110 GHz; Millimetergolven, zeer hoge resolutie, korte range.	Automotive, short-range imaging.

#### 4.2.5 Maritieme toepassing

Toepassingsgebied	Voorkeur	Waarom
Golfanalyse	Pulsradar (VV), coherent radar met ruwe data	Sterke zeeclutter nodig (~VV + ruw).
Morfologie (zandgolven, sedimentpatronen)	Pulsradar, FMCW (coherent, geen filtering)	Sterke amplitudeverschillen; hoge resolutie nuttig.
Ecologie (bruinvissen)	Pulsradar met hoge dynamiek, 60 tpm	Amplitudedynamiek cruciaal.
Scheepvaart/VTS	HH, pulse of solid state	Target detection (MTI/MTD) belangrijker dan seaclutter.
Riviermonitoring	FMCW	Hoge resolutie, lage vermogens, stabiel.

### 4.3 Conclusies

De literatuur laat zien dat X-band navigatieradars een veelzijdige technologie zijn voor het meten van zeegolven, stromingen en zelfs bathymetrie (Huang et al., 2017; Lund et al., 2020; Gawehn et al., 2020). Pioniersstudies op niet-coherente magnetronradars (Nieto-Borge et al., 1999; Reichert et al., 1999; Vogelzang et al., 2000) zijn inmiddels aangevuld met coherente en COR-systemen die fase-oplossende golfvelden leveren (Trizna, 2016; Horstmann et al., 2021; Carrasco et al., 2017; Støle-Hentschel et al., 2018).

Voor een toekomstbestendig RWS-radararchief en nieuwe aankopen betekent dit dat radarsystemen idealiter:

- in de X-band werken met voldoende antennelengte (>2.5 m) en bij voorkeur met instelbare rotatiesnelheden. Voor golven is 40 RPM gewenst;
- vertikaal gepolariseerde VV- of dual-pol antennes hebben;
- ruwe, ongefilterde seaclutter beschikbaar maken, minimaal als amplitudevideo en bij voorkeur als volledige I/Q-data (complexe samples met zowel amplitude als fase);
- waar mogelijk coherente of COR-architectuur gebruiken;
- geen beperkingen opleggen via interne clutterfilters of frequency diversity (puls-tot-puls variatie van de draagfrequentie), omdat dit de interpreteerbaarheid van de seaclutter voor golfanalyse verslechtert.

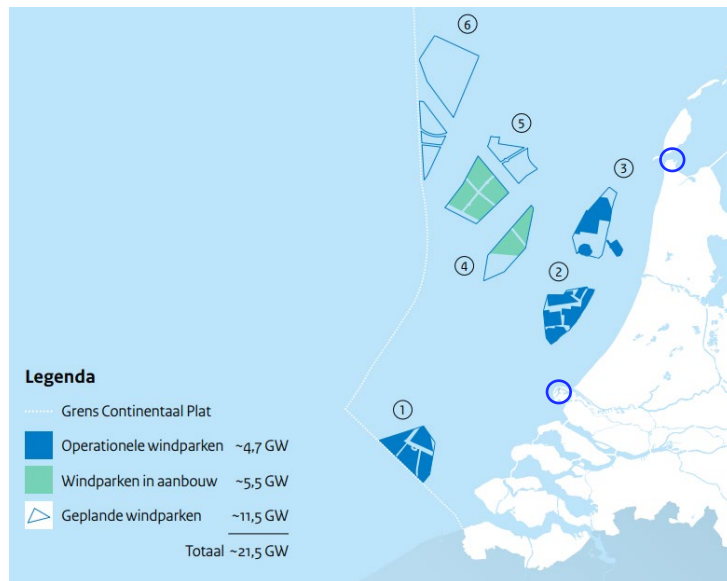
## 5 Bruikbaarheid van CIV radardata Noordzee en schatting opslagbehoefte

### 5.1 Inleiding

In deze studie is gebruik gemaakt van radarbeelden van vijf verschillende radars in de Zuidelijke Noordzee. Twee daarvan betreffen radars van Sen2Sea (zie Figuur 5.1), te weten op Maasvlakte II en Erfprins in Den Helder, zie Hoofdstuk 6 voor uitgewerkte data daarvan.

Van drie andere locaties (Scheveningen, Hollandse Kust West Alpha (HWA) en Zandvoort) hebben wij via de Centrale Informatievoorziening (CIV) van Rijkswaterstaat de bestanden ontvangen, en was het de vraag in hoeverre de gegevens bruikbaar zijn. Het huidige hoofdstuk

beschrijft de bevindingen ten aanzien van deze CIV radardata. Overigens heeft Rijkswaterstaat 11 radaropstellingen, allemaal solid state radars van Terma.



Figuur 5.1: Ligging windparken (bron: [Nieuwe windparken op zee | RVO.nl](#)) en twee van de beschouwde radardata (blauw: Sen2Sea, zie Hoofdstuk 6)

## 5.2 Inlezen van de data

De CIV-data zijn afkomstig van (coherente) solid-state navigatieradars en zijn aangeleverd als CAT240 .bin-bestanden (zie ook EUROCONTROL, 2015). De ruwe radarvideo wordt opgeslagen als pixels op een video-radiaal per azimut: alle cellen hebben dezelfde resolutie in azimut en range en liggen opeenvolgend in de range-richting. Voor de transmissie van deze radarvideo worden gestandaardiseerde 'Data Items' gebruikt. In het geval van CIV gaat het specifiek om de data-items I240/040 en I240/041 (zie ook EUROCONTROL, 2015), die beide video-berichten van type 2 vertegenwoordigen, maar verschillen in de manier waarop de range-informatie wordt gecodeerd. Bij I240/040 is de codering analoog aan de lichtsnelheid in nanoseconden ("nano"), terwijl bij I240/041 wordt gewerkt in femtoseconden ("femto"). Dit onderscheid is cruciaal voor het correct bepalen van de bijbehorende range-pixelresolutie. Scheveningen en HWA gebruiken een byte-headerformaat van het type femto (I240/041), terwijl Zandvoort een byte-headerformaat van het type nano (I240/040) heeft.

De bijbehorende ranges en ruimtelijke resoluties verschillen per locatie (Tabel 5.1). Voor Scheveningen bedraagt de long-range pixelresolutie ongeveer 6,0 m bij een azimutstap van 0,044° en een rotatiesnelheid van circa 3,6 s per omwenteling. Voor HWA is de long-range pixelresolutie circa 12,0 m, met een azimutstap van 0,087° en een rotatiesnelheid van ongeveer 4,0 s. Voor Zandvoort is de long-range pixelresolutie ongeveer 3,7 m, maar de exacte azimutresolutie en rotatiesnelheid zijn niet eenduidig vastgesteld. De gebruikte CIV-radars zijn alle Terma SCANTER-systemen: enerzijds de SCANTER 2202 (X-band, 2D, volledig coherente pulse-compressieradar met solid-state zender en software-gedefinieerde functionaliteit) en anderzijds de Terma SCANTER 5202 (eveneens een X-band, 2D puls-compressieradar met solid-state en software-gedefinieerde functionaliteit). Details zoals de exacte antenntypen en de mate waarin clutter automatisch wordt onderdrukt, zijn nog onderwerp van nadere verificatie.

Voor de verwerking van de CIV-radardata is een Python-script gebruikt dat in 2023 door de CIV (Koen Lim) beschikbaar is gesteld. Dit script is aangepast om PPI-beelden te kunnen plotten en composieten te maken, en er is een zoomfunctie toegevoegd om data binnen een kleinere straal rond de radar te visualiseren. Daarnaast is het script uitgebreid zodat video header-types

van het type “nano” (I240/040) correct kunnen worden ingelezen. De extra functionaliteiten voor inzoomen en het genereren van composieten zijn specifiek geïntroduceerd om mogelijke seaclutter beter te kunnen herkennen.

Ten slotte zijn er verschillen in datacompressie en uitleesbaarheid tussen de bestanden van de verschillende locaties. De data van HWA en Scheveningen zijn opgeslagen met datacompressie, terwijl dit voor Zandvoort niet duidelijk is. De Zandvoort-bestanden konden niet op dezelfde manier worden ingelezen als de data van HWA en Scheveningen. Met name het bepalen van de hoekverdraaiing (azimutpositie) bleek bij Zandvoort niet op dezelfde wijze mogelijk, waardoor de resulterende weergave van de data vermoedelijk niet correct is. Deze beperkingen worden in de verdere analyse expliciet meegenomen bij de interpretatie van de Zandvoort-resultaten.

Tabel 5.1: Specificaties beschouwde CIV navigatie radar bestanden (voor zover bekend)

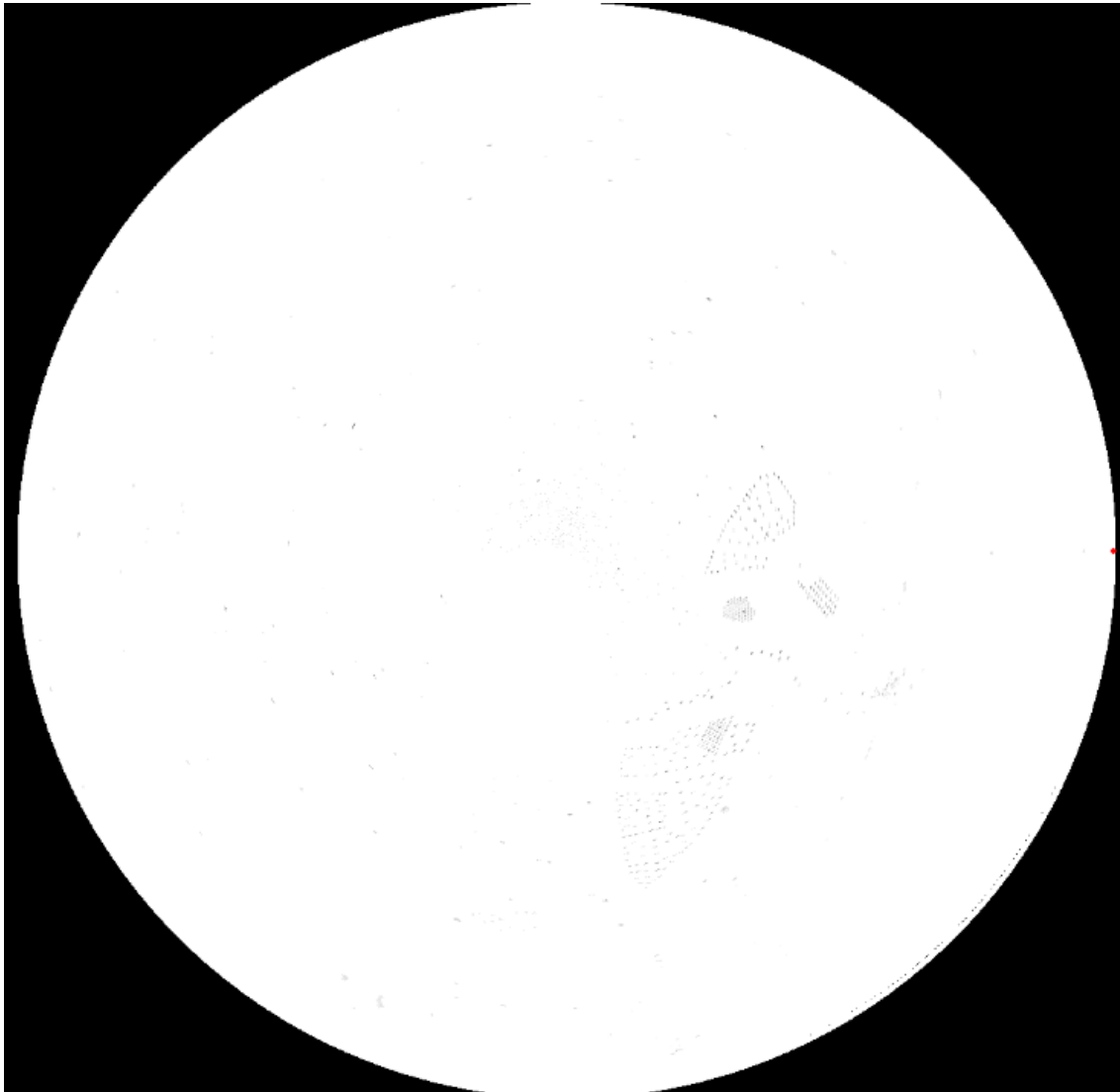
	HWA	VTS Scheveningen	Zandvoort
Format	I240/041	I240/041	I240/040
Eenheid lichtsnelheid	femto sec	femto sec	nano sec
Range [# pixel]	7400	72 ?	16400
Range resolution [m]	12.0	6.0	3.7
Range [km]	89	0.43	?
Azimuth resolutie [°]	0.087	0.044	?
Straal breedte [°]	?	?	?
RPM	15	16.6	20?
omwentelings snelheid [s]	4.0	3.6	3?
Pulsduur [ ]	?	?	?

In geen van de CIV radar data is seaclutter gevonden. De reden hiervoor is waarschijnlijk interne filtering door de MTI/MTD (zie ook Paragraaf 4.2.3). De Zandvoortdata konden niet correct worden ingelezen, maar het lijkt alsof daar ook de punt dichtheid niet hoog genoeg is om golfpatronen te kunnen herkennen. In het vervolg worden voorbeelden getoond van de ingelezen data.

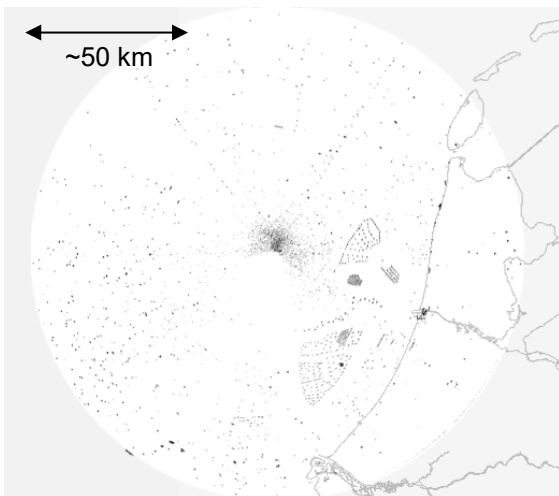
### 5.3 Data van radar locatie Hollandse Kust West Alpha (HWA)

De radardata van HWA bevatten reflectiewaarden die de intensiteit van de teruggekaatste signalen weergeven (Figuur 5.2 en Figuur 5.3). In de HWA-data zijn duidelijke, stationaire reflecties zichtbaar die samenhangen met de aanwezigheid van offshore windparken.

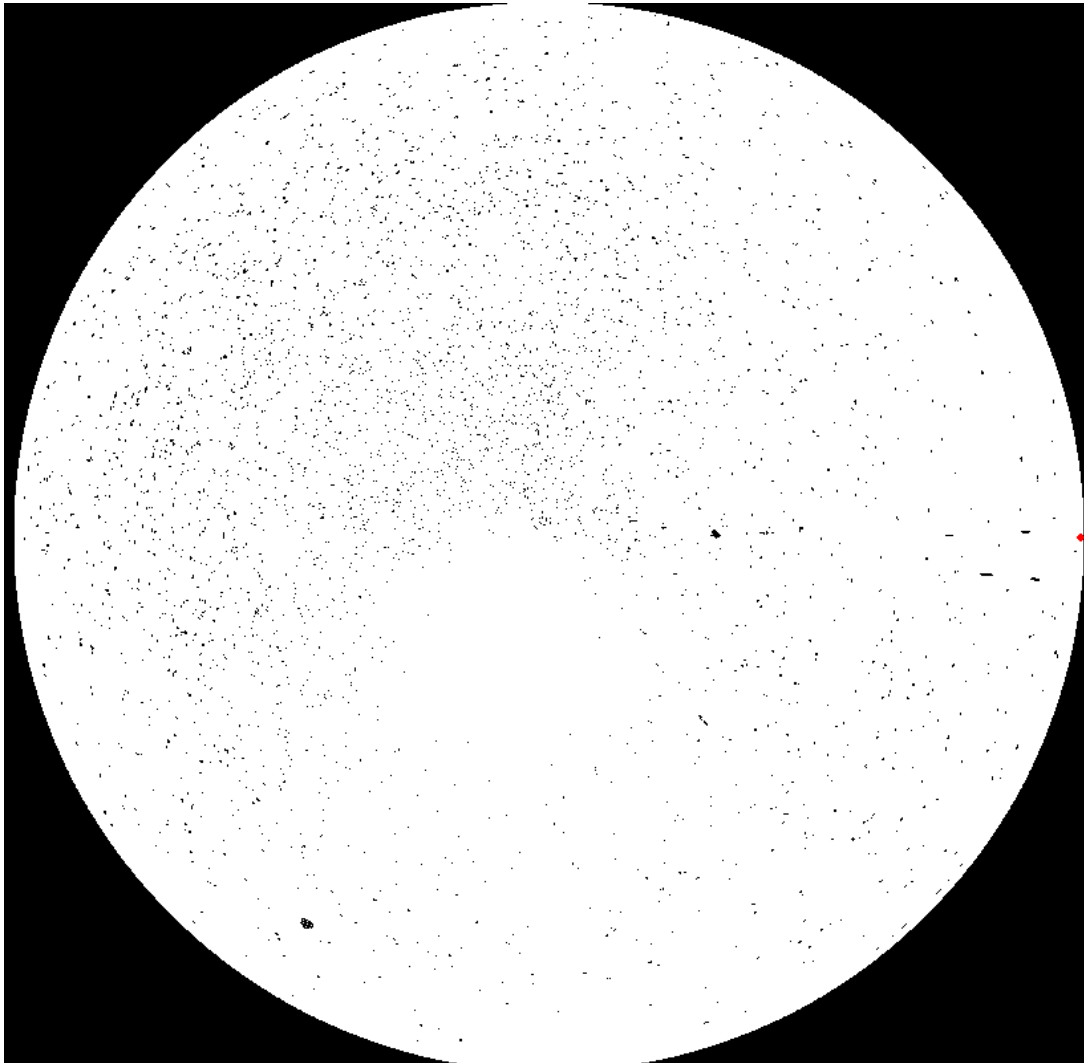
Om na te gaan of golfpatronen herkenbaar zijn, zijn alle reflectiewaarden ook geanalyseerd in de vorm van bitmaps (Figuur 5.4). Hieruit blijkt echter dat zelfs als de laagste gemeten reflectiewaarden worden meegenomen in beeld, er geen golfpatronen kunnen worden waargenomen. Ruizige reflectiepatronen in de bitmaps komen mogelijk van kortstondige schuimkoppen. Schuimkoppen zorgen voor meer terugkaatsing van radarsignalen en worden daardoor waarschijnlijk niet altijd intern weg gefilterd door de MTI.



*Figuur 5.2 Voorbeeld PPI van HWA. Beeld is weergegeven als intensiteitsbeeld waarbij sterkere reflecties donkerder worden weergegeven. In de oostelijke helft zijn windmolenparken te herkennen.*



*Figuur 5.3: Voorbeeld PPI van HWA radar met daarop projectie van Nederlandse landcontouren (geschatte ligging)*

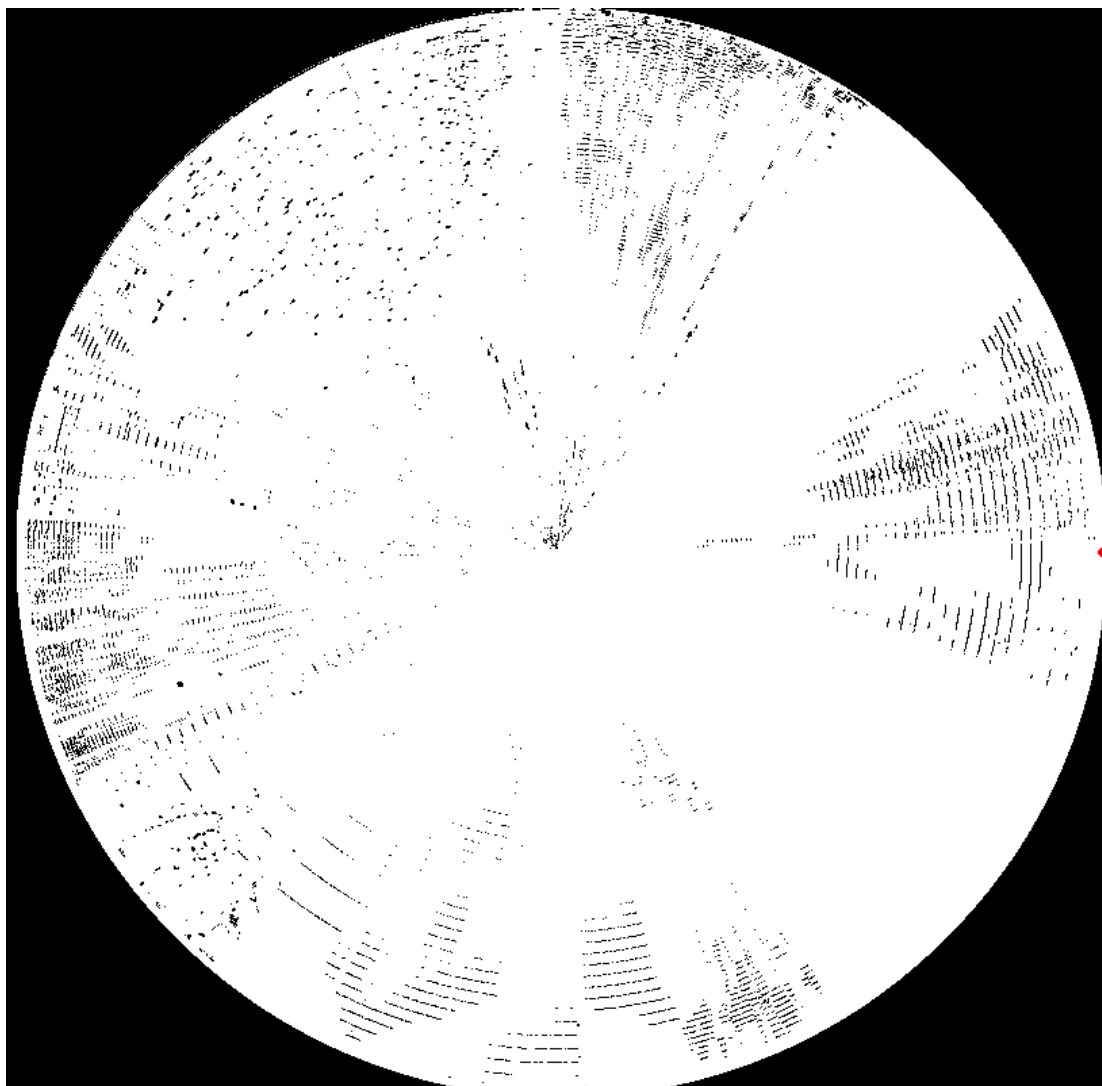


*Figuur 5.4 Zoom op de binnenste 10 km range van de HWA radar. Om mogelijke seaclutter te kunnen herkennen is een beeldcomposiet gemaakt van 10 volledige omwentelingen en worden alle waargenomen reflecties weergegeven als bitmap.*

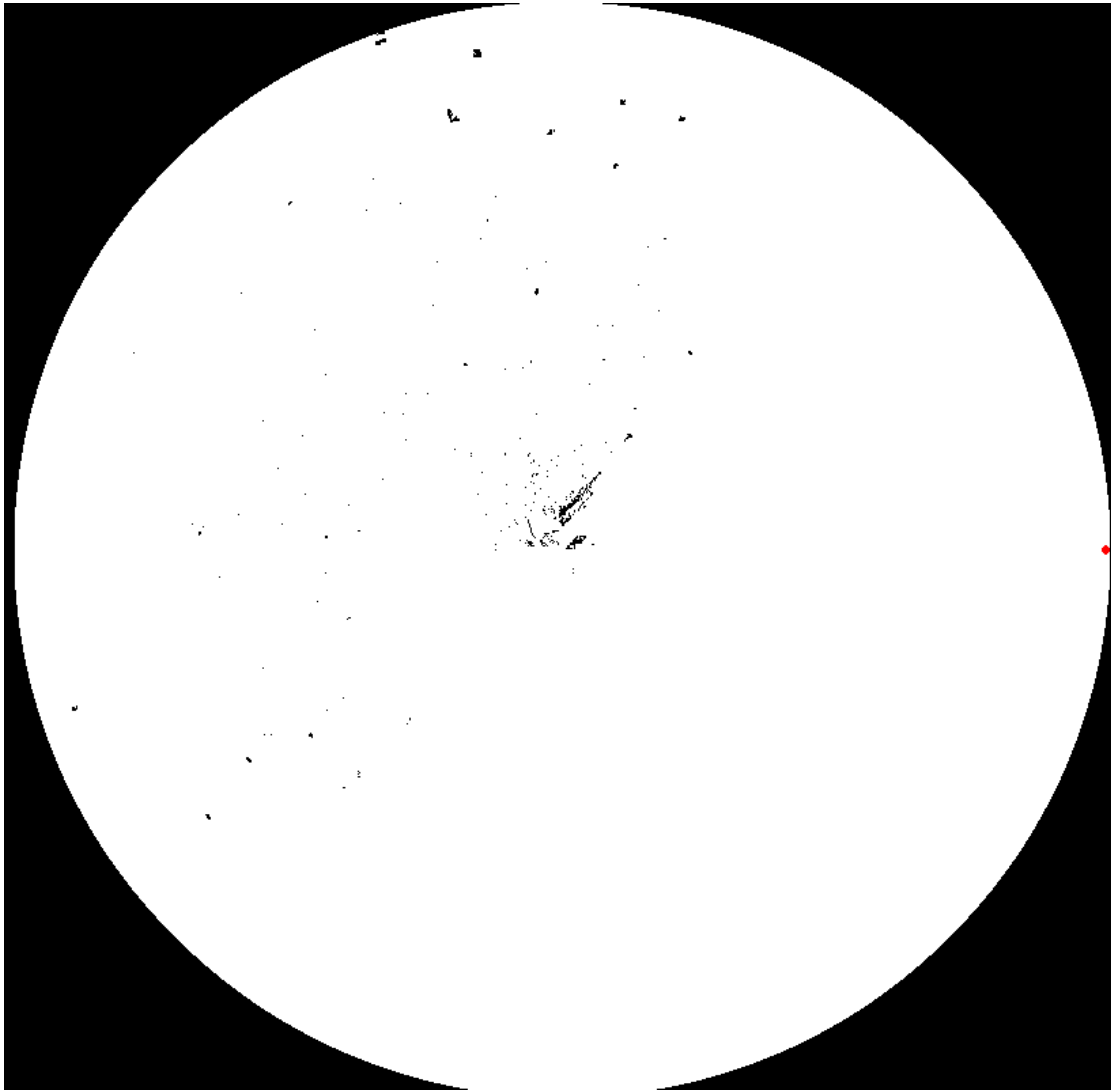
## 5.4 Data van radar locatie VTS Scheveningen

Voor de radar locatie Scheveningen lijkt het aantal pixels langs een raai klein volgens de processing (slechts 72, zie Tabel 5.1). De reden hiervoor is onduidelijk. De radar data van Scheveningen bevatten ook ruis, vooral op grotere afstand van de radar (Figuur 5.5). Het gaat hier mogelijk om artefacten van het inlezen van de data. Echter, als men kijkt naar een bitmap beeldcomposiet van 10 rotaties en binnen een straal van 10 km, dan is het beeld zeer coherent en lijkt het correct (Figuur 5.6).

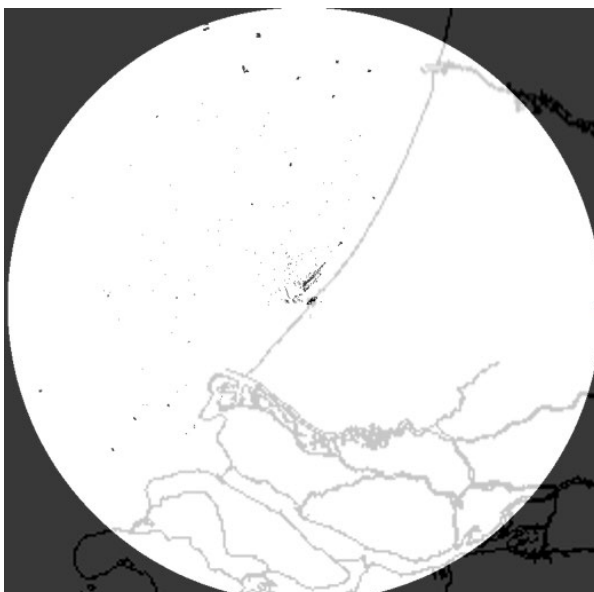
Hier zijn ook consistente patronen zichtbaar die deels stationair zijn maar soms ook natuurlijke bewegingspatronen volgen (niet getoond). De data van Scheveningen laten vooral reflectiewaarden ten westen van het beeld zien wat overeenkomt met de verwachte kustlijn oriëntatie (Figuur 5.7).



*Figuur 5.5* Voorbeeld radar data van een enkele rotatie bij Scheveningen. Voor de zichtbaarheid worden alle reflectiewaarden getoond in de vorm van een bitmap.



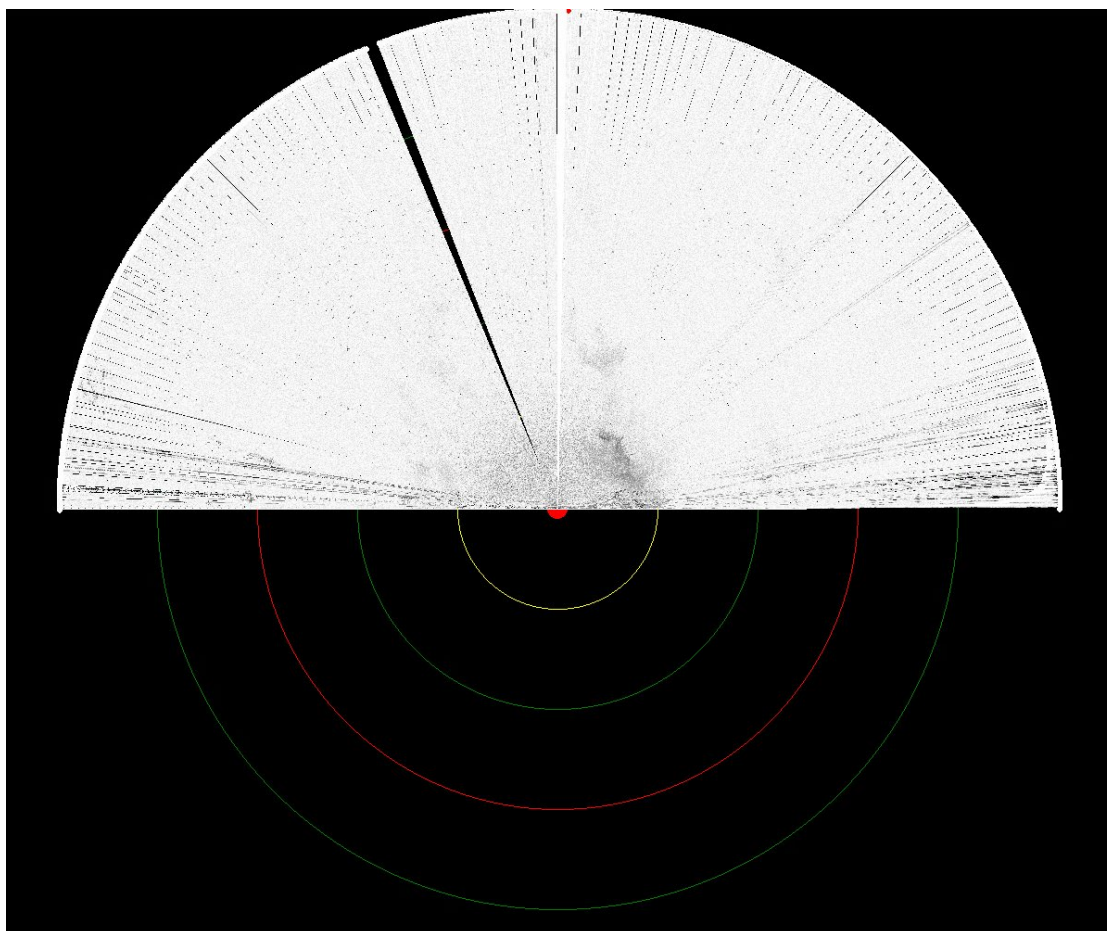
*Figuur 5.6 Zoom op de binnenste 10 km range van de Scheveningen radar. Om mogelijke zeeclutter te kunnen herkennen is een beeldcomposiet gemaakt van 10 volledige omwentelingen en worden alle waargenomen reflecties weergegeven als bitmap.*



*Figuur 5.7: Mogelijke ligging radarbeeld t.o.v. Nederlandse kustlijn. schatting; schaal is onbekend*

## 5.5 Data van radar locatie Zandvoort

Van de Zandvoortradar die op het circuit staat, was een extra groot bestand beschikbaar. 'Per (on)geluk' bevatte het orde 10x zoveel gegevens, waarschijnlijk vanwege een andere filtering. De file bevat 10 minuten aan data, 3s per sweep. Helaas kon de Zandvoortdata niet correct worden ingelezen. Dit komt waarschijnlijk door een onbekende datacompressie. Maar ook de hoekverdraaiing van raai tot raai kon hier niet worden bepaald. Het is onduidelijk of golfpatronen mogelijk zichtbaar zijn in de data als deze correct kunnen worden ingelezen.



Figuur 5.8 – Voorbeeld PPI voor radar locatie Zandvoort. De data zijn waarschijnlijk niet goed ingelezen.

## 5.6 Data opslag behoefte

De hoeveelheid data in ruwe PPI X-band radarbeelden is relatief groot. In deze paragraaf geven we een schatting, op basis van ervaring met een X-bandradar op Ameland. Daar bleek dat 12 minuten aan ruwe data, bij een range-resolutie van 7,5 m en een radius van 7,5 km, ongeveer 3 GB aan opslagruimte vergt wanneer gebruik wordt gemaakt van efficiënt binair bestandsformat. Uit dezelfde ervaring blijkt dat circa 6 minuten aan data doorgaans voldoende is om een golfspectrum – en daarmee ook oppervlaktestroming en bathymetrie – te bepalen.

Bathymetrie schattingen op basis van radardata zijn gevoelig voor fenomenen zoals schuimkoppen, intensieve neerslag of andere extreme weersomstandigheden. Het kan daarom raadzaam zijn om meerdere databestanden per dag op te slaan, zodat onbruikbare perioden kunnen worden omzeild. De hoeveelheid data die wordt opgeslagen is daarmee een bewuste keuze, afhankelijk van het beoogde gebruik.

Wanneer het doel is om oppervlaktestromingen in kaart te brengen, is het belangrijk dat de aandrijvende krachten zoals het getij, goed worden bemonsterd. In een dergelijk scenario kan er bijvoorbeeld voor worden gekozen om elke 2 uur een videobestand van 6 minuten op te

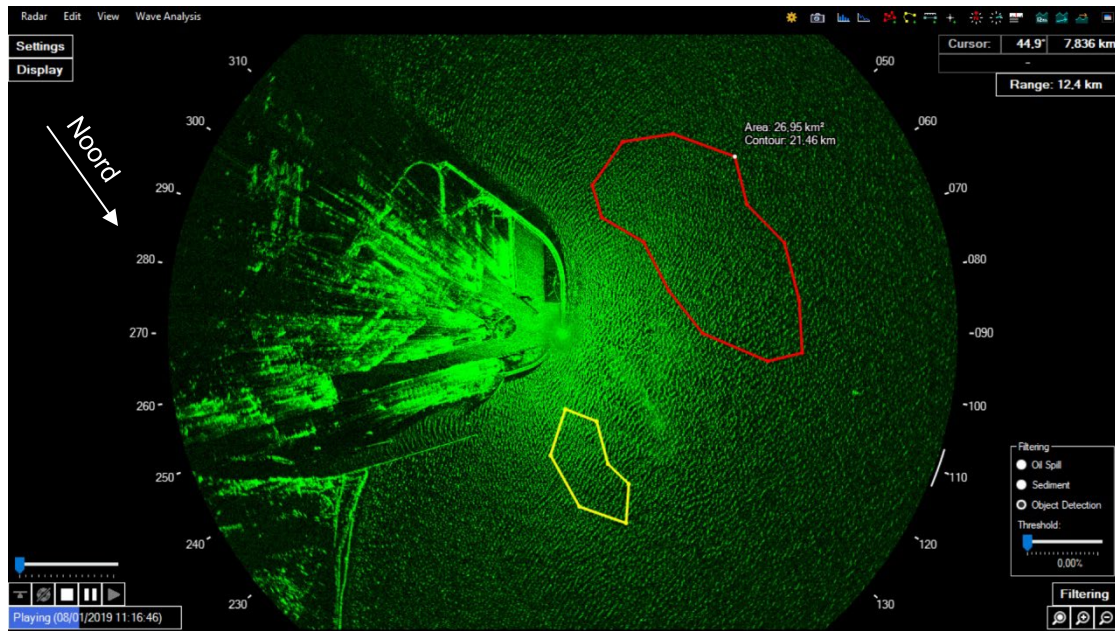
nemen voor nadere analyse. In het Ameland-voorbeeld zou dit betekenen dat er per dag 12 bestanden van elk 6 minuten en circa 1.5 GB worden gegenereerd, wat neerkomt op een totale opslagbehoefte van ongeveer 18 GB per dag. Voor uitsluitend bathymetrieschattingen kan deze datavolume vaak omlaag: één bestand van 6 minuten per dag, dus circa 1.5 GB, zal in veel gevallen volstaan.

De benodigde opslagruimte schaaft met de resolutie en de maximale range van de radar. Voor een vast aantal azimuthoeken groeit de bestandsgrootte in principe lineair met de maximale range. Dat betekent dat grotere radarafstanden rechtstreeks leiden tot grotere bestanden. In het geval dat radardata in cartesisch x–y grid worden opgeslagen, zoals bij de Ameland radar, dan schaaft de bestandsgrootte kwadratisch. Zo zou bij eenzelfde range-resolutie van 7.5 m, maar een grotere range van 10 km, de bestandsgrootte voor een filmpje van 6 minuten toenemen van ongeveer 1.5 GB naar circa 2.7 GB. Voor aanpassing van de resolutie gelden de zelfde regels. Ervaring met de analyse van satelliet beelden leert dat doorgaans een resolutie van 10 m ook volstaat om golfspectra dicht bij de kust te kunnen analyseren. Mogelijk kan de resolutie van radarbeelden dus iets grover voor analyse en daarmee de benodigde opslag behoefte iets omlaag.

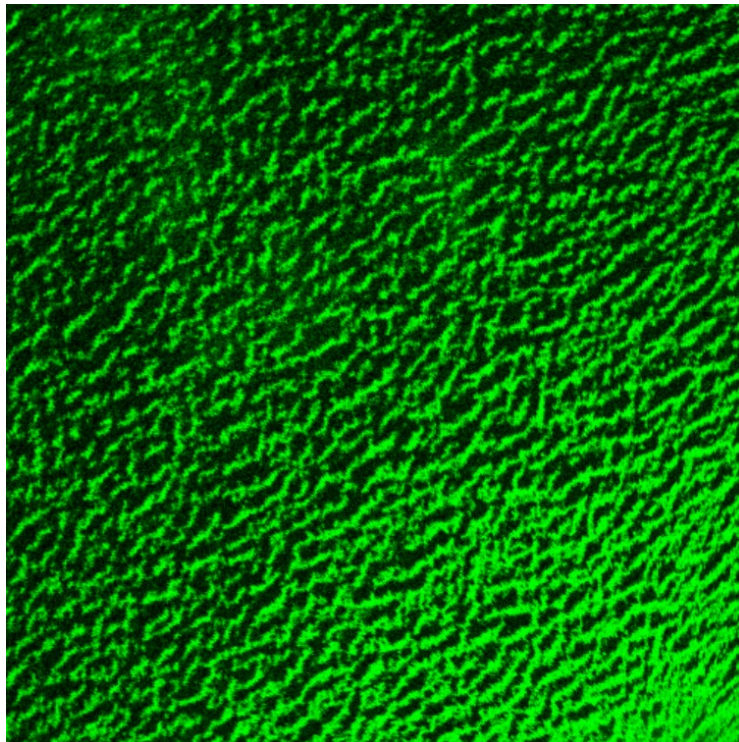
In het geval van de radar bij Ameland is door de grote hoeveelheid data gekozen om de verwerking van de beelden lokaal te doen en vervolgens alleen de resultaten voor bathymetrie, golfkarakteristieken en stroming over te halen. Deze bestanden zijn veel kleiner (orde grootte 1-10Mb) dan de onderliggende ruwe data (1.5 GB) en kunnen bijvoorbeeld via 4G internetverbinding worden verzonden. Een mogelijk nadeel van deze aanpak is dat er naast de radar voor lokale rekencapaciteit moet worden gezorgd. Een dergelijke opzet vergt dan ook meer onderhoud, bijvoorbeeld omdat een computer vastloopt of omdat hardware moet worden vervangen of gereset.

## 6 Voorbeelden geschikte radardata bij locatie Maasvlakte 2

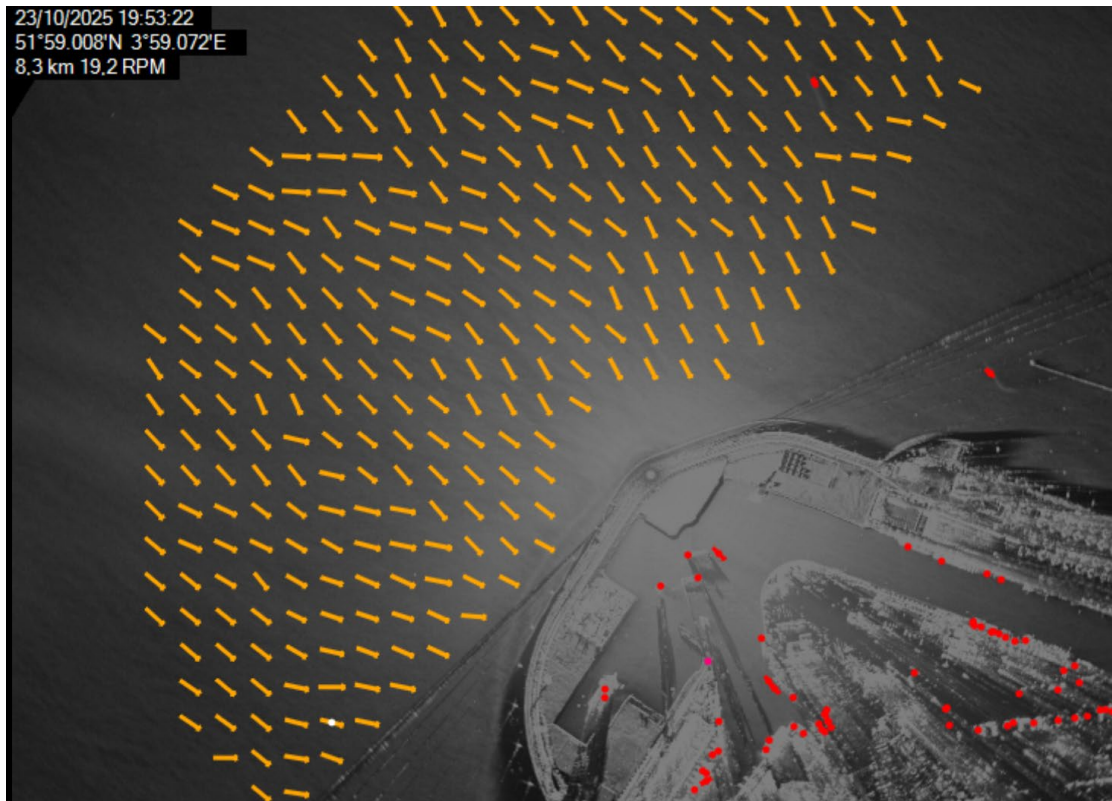
Om en indruk te krijgen van X-band radardata die wel seaclutter tonen en zodanig kunnen worden gebruikt voor hydrodynamische en morfologische analyse, is contact gezocht met het bedrijf Sens2Sea. Sens2Sea verwerkt radardata van locaties Maasvlakte 2, Fort Erfprins te Den Helder en Eemshaven. Voorbeelden van de X-band radar bij de Maasvlakte en Fort Erfprins geven een goede indruk van seaclutter (Figuur 6.1, Figuur 6.2, Figuur 6.5) en de door Sens2Sea daarop gebaseerde informatie zoals de richting van hoofdgolfinval (Figuur 6.3), oppervlactestroming en ook bathymetrie (Figuur 6.4). De X-band radar bij Maasvlakte 2 is een niet-coherente magnetron radar die ook wordt gebruikt voor VTS.



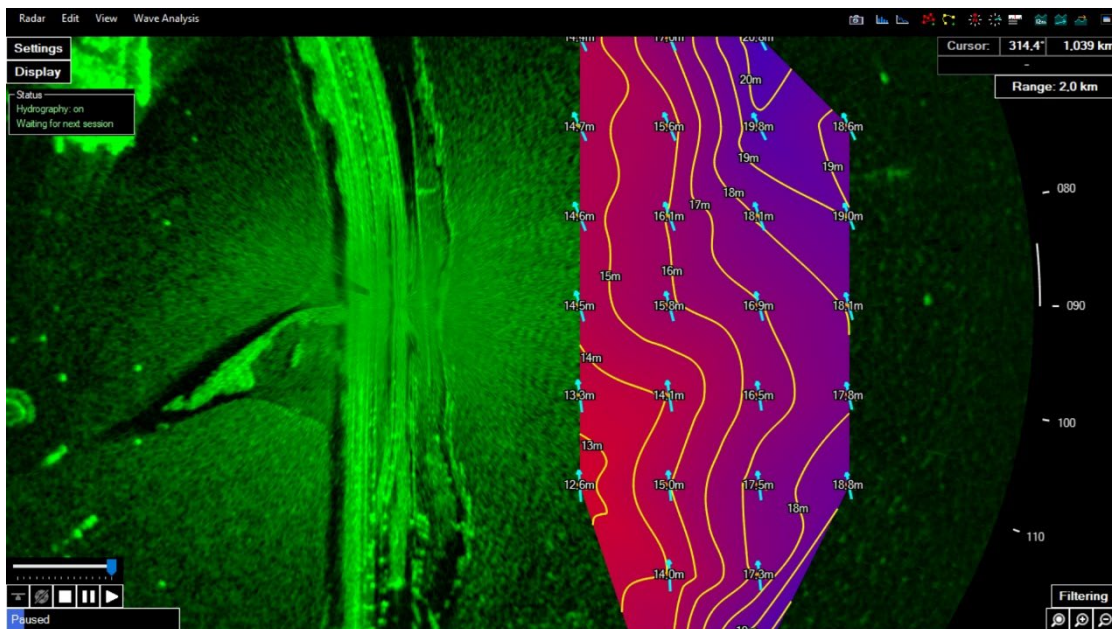
Figuur 6.1: Voorbeeld PPI van de X-band VTS radar bij Maasvlakte 2 (bron: Sens2Sea)



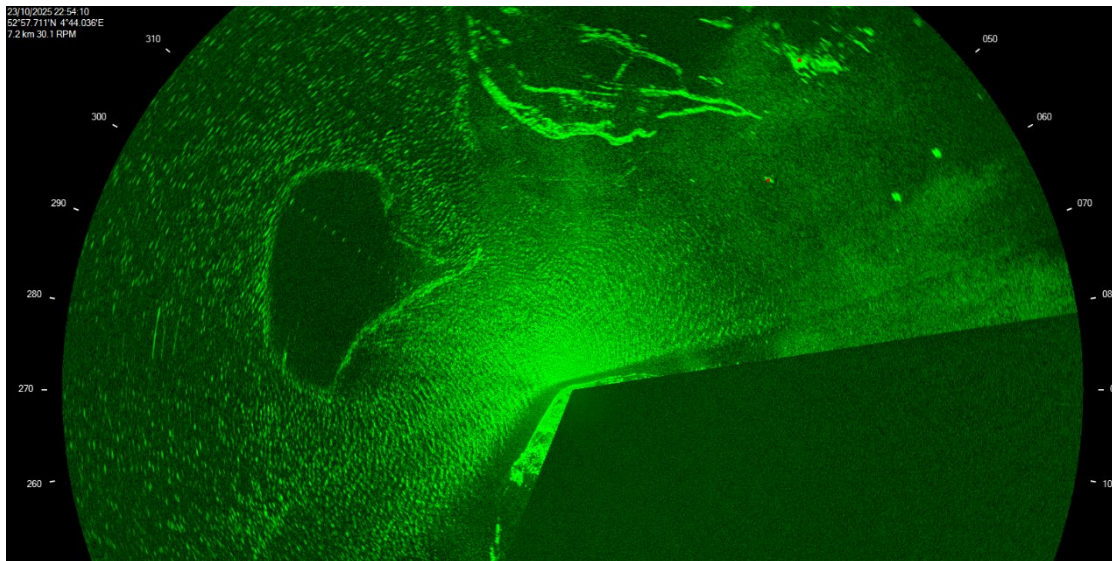
Figuur 6.2: Detail radar data van Maasvlakte 2. Er is duidelijke seaclutter zichtbaar. (bron: Sens2Sea)



Figuur 6.3: Voorbeeld van geschatte golfval tijdens storm bij locatie Maasvlakte 2. Rode punten geven de locatie van schepen weer. (bron: Sens2Sea)



Figuur 6.4: Voorbeeld van geschatte bathymetrie en oppervlactestroming in een deelgebied bij locatie Maasvlakte 2. (bron: Sens2Sea)



Figuur 6.5: Voorbeeld van PPI bij locatie Erprins, Den Helder (bron: Sens2Sea)

## 7 Conclusies

Uit de literatuur blijkt dat X-band navigatieradars met geschikte software - veelzijdige instrumenten zijn voor het meten van zeegolven, oppervlaktestromingen en zelfs bathymetrie (Huang et al., 2017; Lund et al., 2020; Gawehn et al., 2020). De eerste toepassingen met niet-coherente magnetronradars (Wensink et al., 1988, Greidanus, 1994, Nieto-Borge et al., 1999; Reichert et al., 1999; Vogelzang et al., 2000) zijn inmiddels uitgebreid met coherente en coherent-on-receive systemen die fase-oplossende golfvelden kunnen leveren (Trizna, 2016; Horstmann et al., 2021; Carrasco et al., 2017; Støle-Hentschel et al., 2018). In theorie zijn dus vele VTS (Vessel Traffic Service) radarsystemen geschikt om beelden te leveren waaruit op operationele schaal hydrodynamische en morfologische parameters zijn af te leiden.

De in deze studie geanalyseerde CIV radardata van enkele Noordzeelocaties sluiten daar echter maar beperkt op aan. Voor geen van de CIV locaties (VTS-Scheveningen, Hollandse Kust West Alpha, Zandvoort) is seaclutter zichtbaar in de data, waarschijnlijk door interne filtering via MTI/MTD. De clutter – reflecties van het radarsignaal op het wateroppervlak – wordt vaak beschouwd als ruis en daarom weggefilterd maar is vereist om golfinformatie te verkrijgen.

Voor de data van Zandvoort is de geschiktheid voor seaclutteranalyse onduidelijk, omdat door onbekende datacompressie en problemen met de azimutbepaling de data niet goed konden worden geïnterpreteerd. Ter vergelijking laten de voorbeelden van Sens2Sea bij Maasvlakte 2 zien dat X-bandradars die wél ruwe seaclutter doorlaten, goed bruikbaar kunnen zijn voor het afleiden van golfkenmerken, stroming en bathymetrie.

Voor het RWS-radararchief en bij nieuwe systeemkeuzes betekent dit dat niet alleen de frequentieband en hardware van belang zijn, maar vooral ook de beschikbaarheid en kwaliteit van de ruwe seaclutter data. Idealiter gaat het om radarsystemen die:

- in de X-band werken met voldoende antennelengte (>2.5 m) en rotatiesnelheid (orde 40 RPM);
- VV- of dual-pol-antennes gebruiken;
- ruwe, ongefilterde seaclutter beschikbaar maken, minimaal als amplitudevideo en bij voorkeur als volledige I/Q-data (complexe samples met zowel amplitude als fase);
- waar mogelijk een coherente of coherent-on-receive-architectuur toepassen;
- geen (of configureerbare) beperkingen opleggen via interne clutterfilters of frequency diversity (puls-tot-pulsvariatie van de draagfrequentie), omdat dit de interpreteerbaarheid van de zeeclutter voor golfanalyse verslechtert.

Samengevat laat de combinatie van literatuur en praktijkanalyse zien dat X-bandradar een groot potentieel heeft voor hydrodynamische en morfologische toepassingen, maar dat dit potentieel alleen kan worden benut als de radarsystemen en dataketen expliciet worden ingericht op het bewaren en ontsluiten van ruwe radar data, zonder interne filters, dus geen seaclutter filter of rain clutter onderdrukking.

## 8 Aanbevelingen ten aanzien van X-band radar voor seaclutter analyse

Om additionele informatie zoals golven uit navigatieradar te verkrijgen dient de radar aan een aantal eisen te voldoen. Het gaat erom dat de seaclutter zichtbaar is. We geven hier een lijst van zes eigenschappen die nodig zijn om een radar systeem daar geschikt voor te laten zijn. De eerste drie zijn elk onmisbaar. Voor de laatste drie (cursief) geldt dat zonder één van hen nog wel een basisgolfbeeld gemaakt kan worden maar dat de nauwkeurigheid minder zal zijn en dat spectrale analyse mogelijk beperkter zal zijn. Het uitgangspunt is het gebruik van een X-band radar.

Als aan al deze eisen wordt voldaan dan is de radar volledig geschikt voor hoogwaardige golfanalyse en additionele gegevens zoals oppervlaktestroming en bathymetrie.

- Primaire radar (onmisbaar)
- Ruwe data beschikbaar (onmisbaar)
- Filtering uitschakelbaar (onmisbaar)
- *Verticale polarisatie (VV) of dual-pol* (kan ev. HH, als de rest op orde is; in de praktijk sterke voorkeur voor VV)
- *Coherent of FMCW* (kan ev. ook met niet-coherente pulsradar, als de rest op orde is)
- *Rotatiesnelheid van minstens 20 RPM* (kan ev. 15 RPM, als de rest op orde is)

Een detailtabel is toegevoegd in Appendix A.

## 9 Referenties

Amato, F., Fiorini, M., Gallone, S., & Golino, G. (2010). Fully solid state radar for vessel traffic services. In *Proceedings of the 11th International Radar Symposium (IRS 2010)*.

Atkinson, J., et al. (2021). Nearshore monitoring with X-band radar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2020JC016841.

Carrasco, R., Streßer, M., & Horstmann, J. (2017). A simple method for retrieving significant wave height from Dopplerized X-band radar. *Ocean Science*, 13(1), 95–103. <https://doi.org/10.5194/os-13-95-2017>

Chernyshov, P., et al. (2022). On the effect of interferences on X-band radar wave measurements. *Sensors*, 22(10), 3818.

EUROCONTROL. (2015). *EUROCONTROL specification for surveillance data exchange – ASTERIX Category 240: Radar video transmission* (EUROCONTROL-SPEC-0149-240, Ed. 1.3). EUROCONTROL. <https://www.eurocontrol.int/publication/cat240-eurocontrol-specification-surveillance-data-exchange-asterix>

Gawehn, M. A., van Dongeren, A., de Vries, S., Swinkels, C., Hoekstra, R., Aarninkhof, S. G. J., & Friedman, J. (2020). The application of a radar-based depth inversion method to monitor near-shore nourishments on an open sandy coast and an ebb-tidal delta. *Coastal Engineering*, 159, 103716. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103716>

Greidanus, H (1994). Directional ocean wave spectra validation: ERS-1 SAR and SHIRA. June 1994. ISBN 9054111151 Beleidscommissie Remote Sensing

<https://www.digitale Noordzee.nl/data/scheepvaartdata/nautische-radar>

Hessner, K., Reichert, K., & Nieto-Borge, J. C. (2015). High-resolution radar wave and current measurements in highly inhomogeneous coastal areas. In *Proceedings of the 2015 IEEE Underwater Technology Symposium*.

Horstmann, J., Bödewadt, J., Carrasco, R., Cysewski, M., Seemann, J., & Streßer, M. (2021). A coherent on receive X-band marine radar for ocean observations. *Sensors*, 21(23), 7828. <https://doi.org/10.3390/s21237828>

Huang, W., Gill, E. W., & Li, J. (2017). Ocean wind and wave measurements using X-band marine radar: A comprehensive review. *Remote Sensing*, 9(12), 1261. <https://doi.org/10.3390/rs9121261>

Lund, B., Haus, B. K., Graber, H. C., Horstmann, J., Carrasco, R., Novelli, G., Guigand, C. M., Mehta, S., Laxague, N. J. M., & Özgökmen, T. M. (2020). Marine X-band radar currents and bathymetry: An argument for a wave number-dependent retrieval method. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(2), e2019JC015618. <https://doi.org/10.1029/2019JC015618>

Naaijen, P., & Blondel-Couprie, E. (2012, October). Wave induced motion prediction as operational decision support for offshore operations. In *Proceedings of the International Conference Marine Heavy Transport & Lift* (Vol. 3, pp. 24-25).

Naaijen, P., Roozen, D. K., & Huijsmans, R. H. M. (2016). Reducing operational risks by on-board phase resolved prediction of wave induced ship motions. In *Proceedings of the ASME*

2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2016-54591).

Naaijen, P., van Oosten, K., Roozen, K., & van 't Veer, A. P. (2018). Validation of a deterministic wave and ship motion prediction system. In *Proceedings of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering* (OMAE2018-78037).

Nieto-Borge, J. C., Reichert, K., & Dittmer, J. (1999). Use of nautical radar as a wave monitoring instrument. *Coastal Engineering*, 37(3–4), 331–342. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(99\)00032-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(99)00032-0)

Nieto-Borge, J. C., Rodríguez, G. R., Hessner, K., & González, P. I. (2004). Inversion of marine radar images for surface wave analysis. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21(8), 1291–1300.

Nieto-Borge, J. C., Hessner, K., Jarabo-Amores, P., & de la Mata-Moya, D. (2008). Signal-to-noise ratio analysis to estimate ocean wave heights from X-band marine radar image time series. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2(1), 35–41. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn:20070027>

Plant, W. J. (2005). Simultaneous measurement of ocean winds and waves with an airborne coherent radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22(7), 1101–1119.

Reichert, K., Hessner, K., Nieto-Borge, J. C., & Dittmer, J. (1999). WaMoS II: A radar based wave and current monitoring system. In *Proceedings of the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference* (ISOPE-I-99-246).

Simpson, A., et al. (2020). Wave-by-wave forecasting via assimilation of marine radar observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 37(7), 1231–1251.

Støle-Hentschel, S., Seemann, J., Nieto-Borge, J. C., & Trulsen, K. (2018). Consistency between sea surface reconstructions from nautical X-band radar Doppler and amplitude measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 35(6), 1201–1220. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0145.1>

Trizna, D. B. (2016). Coherent marine radar measurements of ocean wave frequency spectra and near surface currents. In *Proceedings of OCEANS 2016 MTS/IEEE* (Shanghai, China).

Vogelzang, J., Boogaard, H. L., Hessner, K., & Reichert, K. (2000). Wave height measurements with navigation radar. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII(B7), 1652–1659.

Young, I. R., W. Rosenthal, and F. Ziemer, 1985: A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents. *J. Geophys. Res.*, 90, 1049–1059, <https://doi.org/10.1029/JC090iC01p01049>.

Wensink, H, E. van Halsema, P.Hoogeboom en P. de Loor (1988): New Radar Backscatter Measurements From Platform Noordwijk, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 'Remote Sensing: Moving Toward the 21st Century'*, Edinburgh, UK, 1988, pp. 1617-1617, doi: 10.1109/IGARSS.1988.569542.

## A Radar systeemvereisten t.b.v. RWS-aanbestedingen

Dit is een set aan eisen en wensen die in aanbestedingen kan worden meegenomen om geschiktheid van radar voor additionele gegevens te duiden.

Onderverdeling in *must-have*, *should-have* en *nice-to-have* is toegevoegd.

Categorie	Eis	Type	Waarom	Noodzaak
<b>Polarisatie</b>	VV-polarisatie beschikbaar (of dual-pol)	Hardware	VV is orde 10 dB gevoeliger	SHOULD
	HH optioneel (voorkeur voor VV of dual-pol)	Hardware	Minimaal vereist voor golven	<b>MUST, indien geen VV</b>
<b>Data-uitgangen</b>	Ruwe, ongefilterde seaclutter beschikbaar (I/Q of amplitude)	Hardware	Golfanalyse en morfologie onmogelijk zonder ruwe data	<b>MUST</b>
	Clutterfiltering uitschakelbaar	Firmware / software	Voorkomt verlies van golfsignaal	<b>MUST</b>
<b>Radararchitectuur</b>	Coherent (FMCW of puls coherent-on-receive)	Hardware	Fase-informatie t.b.v. Doppler/golfhoogte	SHOULD
	Geen verplichte frequency diversity, of uitschakelbaar	Firmware / Hardware	Frequency diversity verstoort wave spectrum	<b>MUST</b>
<b>Resolutie &amp; dynamiek</b>	Hoge amplitude-dynamiek (>96dB)	Hardware	Alleen belangrijk voor ecologie zoals bruinvisdetectie	NICE
	Range-resolutie < 10 m	Firmware?	Geschikt voor detectie golfpatronen	<b>MUST</b>
<b>Antenne</b>	Slotted waveguide of dual-pol antenne	Hardware	Robuust, maritiem bewezen	SHOULD
	Smalle beamwidth (<1° indien mogelijk)	Hardware	Verbeterde ruimtelijke resolutie	SHOULD
<b>Rotatiesnelheid</b>	20–60 RPM configureerbaar	Hardware	60 RPM nodig voor ecologie; lagere RPM voor golven	SHOULD
<b>Frequentieband</b>	X-band	Hardware	Beste voor golfsignatuur	<b>MUST</b>
<b>Onderhoud / betrouwbaarheid</b>	Lage onderhoudsfrequentie	Operatie	RWS-beheer	SHOULD
<b>Compatibiliteit met archivering</b>	Open data-formaat, volledige metadata beschikbaar	Interface	Noodzakelijk voor RWS-archief	<b>MUST</b>