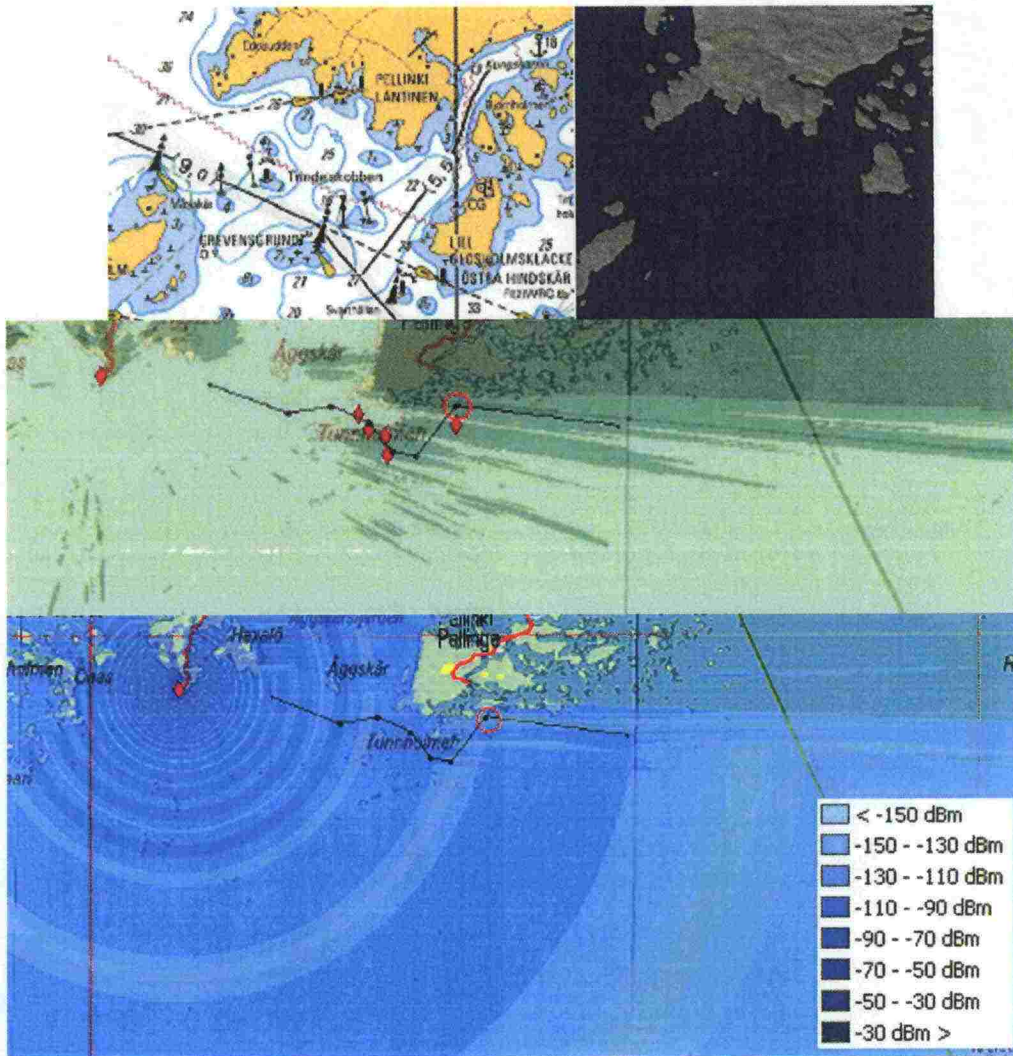


VÄYLÄN SÄHKÖMAGNEETTISTEN SIRONTAKENTTIEN MALLINTAMINEN



Merenkululaitos

Helsinki 2007

ISSN 1456 – 9442



Tekijät (toimielimestä: toimielimen nimi, puheenjohtaja, sihteeri) VTT Tietoteknikka	Julkaisun laji Merenkululaitoksen sisäisiä julkaisuja
Arto Hujanen, Lotta Tuomimäki, Wenche Backman, Jari Hautio, Hans Toivanen ja Seppo Horsmanheimo	Toimeksiantaja Merenkululaitos, Väylänpito, R. Joro
	Toimielimen asettamispäivämäärä

Julkaisun nimi

VÄYLÄN SÄHKÖMAGNEETTISTEN SIRONTAKENTTIEN MALLINTAMINEN

Tiivistelmä

Hankkeen tehtävänä oli laskea sähkömagneettiset sirontakentät viidelle turvalaitteelle Pellingin 9m väylällä. Laskentakohteiksi valittiin meriturvallisuuden kannalta tärkeitä lähellä väylän kääntökohtia olevia tutkamerkkejä. Toisena tehtävänä oli laskea Emäsalon VTSaseman tutkan näkyvyys S- ja X-taajuusalueella. Laskennassa tuli huomioida tutkamerkkien sirontakuviot, tutka-aallon monitie-eteneminen suoraan ja vedenpinnan kautta, merenkäynnin tila, tutka-aallolle tapahtuva etenemisvaimennus sekä ympäristön ja maapallon kaareutumisen aiheuttama katvevaikutus.

Hankkeessa laajennettiin aikaisemmissa Merenkululaitoksen projekteissa kehitettyä tutkaheijastinten analysointimenetelmää. Siihen lisättiin 3D-ympäristömallin generointi korkeus- ja rantaviiva-aineiston pohjalta sekä katvealueiden haku. Katvealueiden laskennassa on huomioitu maaston lisäksi myös maapallon kaarevuus. Laskennat suoritettiin S- ja X-taajuusalueella vaaka- ja pystypolarisaatiolla. Tutkamerkkien ja VTS-aseman korkeus- ja sijaintitiedot saatiin Merenkululaitokselta. VTS-aseman tapauksessa keskityttiin suurten rannikkoalusten, maksimiuppouma 1000 tonnia, tutkanäkyvyyden arviointiin.

Tulokset osoittavat, että kehitetyn laskentamenetelmän avulla on mahdollista arvioida turvalaitteiden ja VTS-aseman tutkanäkyvyyttä. Tulosten varmentaminen vaatii kuitenkin mittauksia tai käytännön kokeita. Laskentatuloksia voidaan käyttää väyliä suunnittelun ja kunnossapidon tukena. Ne mahdollistavat uusien turvalaitteiden sijoituspaikkojen vertailun kuin myös tutkaheijastimien korkeuksien ja mitoitusten vaikutuksen arvioinnin ilman testiasennuksia ja koemittauksia. Tämän avulla on mahdollista saavuttaa merkittäviä asennus- ja kunnossapitosäästöjä. Laskentamenetelmä tarjoaa myös työkalun mahdollisten ongelmapaikkojen kartoittamiseen, jota voidaan hyödyntää mm. riskinhallinnassa.

Avainsanat (asiasanat)			
Sirontakenttä, tutkanäkyvyys, monitie-eteneminen			
Muut tiedot			
Sarjan nimi ja numero		ISSN	ISBN
Merenkululaitoksen julkaisuja 01 / 2007		1456 - 9442	
Kokonaissivumäärä	Kieli	Hinta	Luottamuksellisuus
2 + 40	Suomi		
Jakaja		Kustantaja	

Sisällysluettelo

1	Johdanto	5
2	Tavoite	5
3	Kohteen kuvaus	5
3.1	Tutkaheijastinmalli	7
3.2	Ympäristön mallintaminen	10
4	Rajaukset	10
5	Menetelmät	11
5.1	Laskentamallit	13
5.1.1	Maapallon ja radiohorisontin kaarevuus	13
5.1.2	Normalisoitu tehosuhte	13
5.1.3	Pistesirottajamalli	14
5.1.4	Skolnikin mediaanimalli	14
5.2	Laskentaparametrit	15
6	Tulokset	16
6.1	Turvalaitteiden tutkanäkyvyys	16
6.1.1	Tredjedelskubb	16
6.1.2	Grevensgrund	19
6.1.3	Svarthällen	22
6.1.4	Glosholmsgrund	24
6.1.5	Låghällan	27
6.1.6	Yhteenveto	29
6.2	VTS-aseman S- ja X-kaistan tutkien näkyvyys	33
6.2.1	Emäsalon VTS-aseman tutka	33
6.2.2	Yhteenveto	37
7	Jatkokehityskohteita	37
8	Yhteenveto	38
	Lähdeviitteet	40

1 Johdanto

Tämä tutkimus on jatkoa aikaisemmille VTT:n Merenkululaitokselle tekemille tutkaheijastinten analysointihankkeille, joissa on selvitetty käytössä olevien tutkaheijastinmallien [1] ja uusien referenssimallien [2] sähkömagneettisia sirontaominaisuuksia S- (3 GHz) ja X-taajuusalueella (9 GHz) sekä suunniteltu ja arvioitu uuden tutkaheijastinmallin näkyvyyttä Vuosaaren väylällä [3]. Tutkaheijastinten ominaisuuksia on selvitetty VTT:llä kehitetyllä tutkapoikkipinta-alan laskentaohjelmistolla, CAST:illa [4]. Tätä ohjelmistoa on kehitetty yhdessä Merivoimien Tutkimuslaitoksen kanssa erilaisten kohteiden häiveominaisuuksien analysointiin.

2 Tavoite

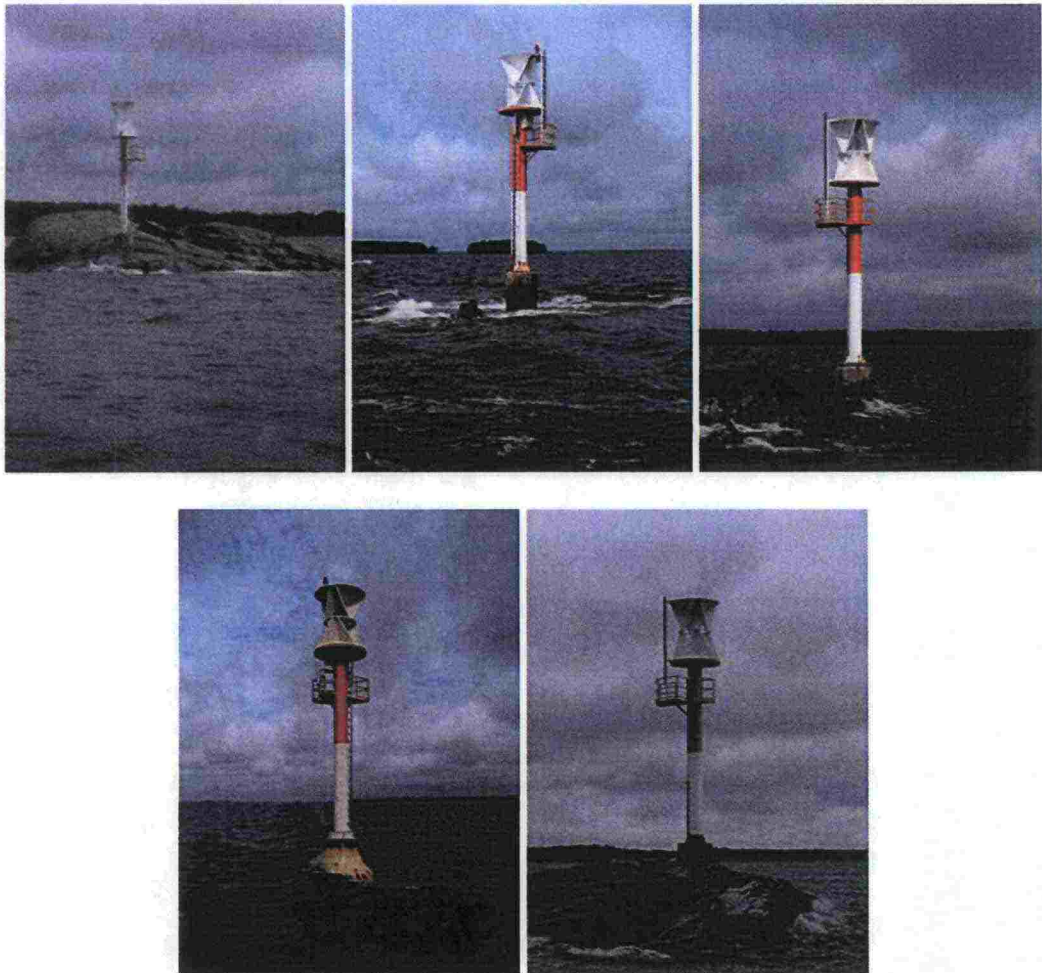
Projektin ensimmäisenä tavoitteena oli laskea sähkömagneettiset sirontakentät viidelle Pellingin 9m väylällä olevalle turvalaitteelle. Turvalaitteet on valittu siten, että ne sijaitsevat lähellä väylän käänntökohtia ja ovat näin ollen tärkeitä väylän turvallisuuden kannalta. Tutkaheijastinten analysoinnissa käytettyä laskentamenetelmää laajennetaan huomioimaan ympäristössä esiintyvät katvealueet, maapallon kaarevuus sekä merenkäynnin tila.

Toisena tavoitteena oli kehittää laskentamalli, jonka avulla voidaan arvioida laivojen näkyvyyttä Emäsalon VTS-aseman tutkassa. Laskentamallissa otetaan huomioon tutkan sijainti, maapallon kaarevuus, ympäristössä esiintyvät katvealueet, merenkäynnin tila ja tutkan tekniset ominaisuudet, sikäli kuin on mahdollista.

Kolmantena ja viimeisenä tavoitteena oli toteuttaa laskentatulosten selkeä visualisointi ja tallentaminen helposti jatkokäsiteltävään muotoon. Tulosten visualisoinnissa käytetään ArcGIS-ohjelmistoa ja tulosten jatkokäsittelyssä Matlab-ohjelmistoa.

3 Kohteen kuvaus

Analyysin kohteena on osa Pellingin 9m väylää, joka sijaitsee Helsingistä itään. Merenkululaitos valitsi tarkasteluun viisi kiinteää tutkamerkkiä väylän varrelta. Nämä turvalaitteet sijaitsevat joko betonialustalla, karilla tai matalalla ja loivalla luodolla. Kuten kuvasta 1 nähdään, kaikissa valituissa tutkamerkeissä on käytössä sama tutkaheijastinmalli.



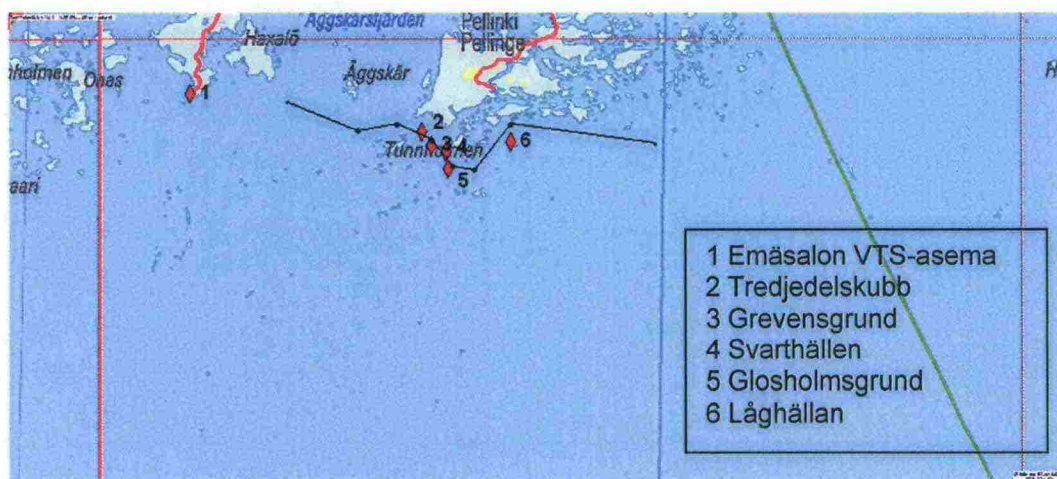
Kuva 1. Valitut turvalaitteet: ylärivissä vasemmalta oikealle Tredjedelskubb, Grevensgrund ja Svarthällan, alarivissä Glosolmsgrund ja Låghällan.

Tutkamerkkien todelliset sijainti- ja korkeustiedot on esitetty taulukossa 1. Tiedot on saatu Merenkululaitoksen WebMap-ohjelmiston turvalaitteiden perusselosteista. Taulukossa korkeusarvo määrittelee tutkamerkissä olevan tutkaheijastimen keskipisteen korkeuden vedenpinnasta. Tietoa tutkaheijastinten suuntaus- ja tiltauskulmista ei ollut saatavilla. Analyysiä varten tutkaheijastinten suunnat on asetettu siten, että heijastimen pääkeila osoittaa väylälle. Suuntauskulma on määritelty siten, että arvo 0° osoittaa pohjoiseen. Suunta-arvot kasvavat myötäpäivään. Tiltauskulmaksi on määritelty kaikissa tapauksissa 0° , koska kyseessä ovat kiinteät turvalaitteet. Myös nämä arvot on esitetty alla olevassa taulukossa.

Taulukko 1. Tutkamerkkien sijainti-, korkeus- ja suuntatiedot.

Tutkamerkki	Koordinaatit (KKJ)		Suunta (aste)	Tiltaus (aste)	Korkeus (m)
	P	I			
Tredjedelskubb	6676102,1	3434004,6	0	0	13,7
Grevensgrund	6675572,9	3434377,7	36	0	11,7
Svarthällan	6675249,6	3435019,9	29	0	12,7
Glosolmsgrund	6674548,5	3435120,6	0	0	10,2
Låghällan	6675711,0	3437828,8	-17	0	11,6

Maanmittauslaitokselta tilattiin kartta-aineistoa tarkasteltavalta väyläosuudelta ympäristön aiheuttamien katvealueiden selvittämiseksi. Kartta-alueen koko on 46 km x 20 km. Alueen luoteiskulman koordinaatit KKKJ-koordinaatistossa ovat (P=6681102,1, I=3416004,6) ja kaakkoiskulman (P=6661102,1, I=3461833,156). Kuvassa 2 on esitetty kartta valitusta alueesta sekä tutkamerkkien ja VTS-aseman sijainnit. Kuvassa mustalla viivalla esitetään väylän keskilinja ja muistilla pisteillä väylän kääntökohdat.



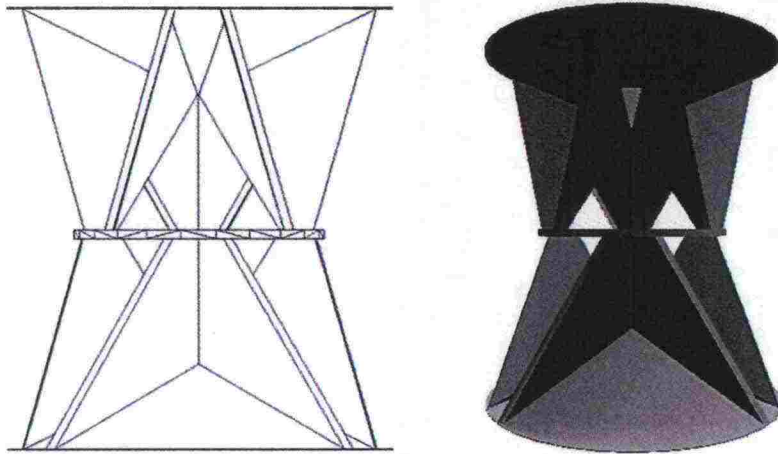
Kuva 2. Turvalaitteiden sijainti kartalla.

Tilattu kartta-aineisto sisälsi alueen rantaviivat ja maaston korkeuskäyrät 5 metrin korkeusresoluutiolla. Aineisto ei sisältänyt kaikkein pienimpiä ja matalimpia saaria, luotoja ja karikoita.

3.1 Tutkaheijastinmalli

Merenkululaitokselta saatujen kuvien ja mittojen avulla luotiin CAD-ohjelmistolla malli tutkaheijastimesta dwg- ja stl-formaatissa. Ensiksi mainittua formaattia käytettiin CAD-ohjelmistossa ja jälkimmäistä tutkaheijastimen sirontakuvion laskemisessa CAST-ohjelmistolla. Tutkaheijastinmalli on esitetty kuvassa 3. Mallin sähkömagneettiset ominaisuudet on asetettu vastaamaan terästä kuten aikaisemmissa turvalaitteiden analysointihankkeissa.

Toteutetussa tutkaheijastinmallissa sopet ovat kahdessa kerroksessa ja soppien välissä on isot aukot. Soppeja on heijastimessa kaikkiaan kuusi, kolme kummassakin kerroksessa. Tutkaheijastimen kokonaiskorkeus on 2613 mm ja ulkohalkaisija 2330 mm. Kyseessä on siis kookkaaseen merenkulun turvalaitteeseen sijoitettava tutkaheijastin.



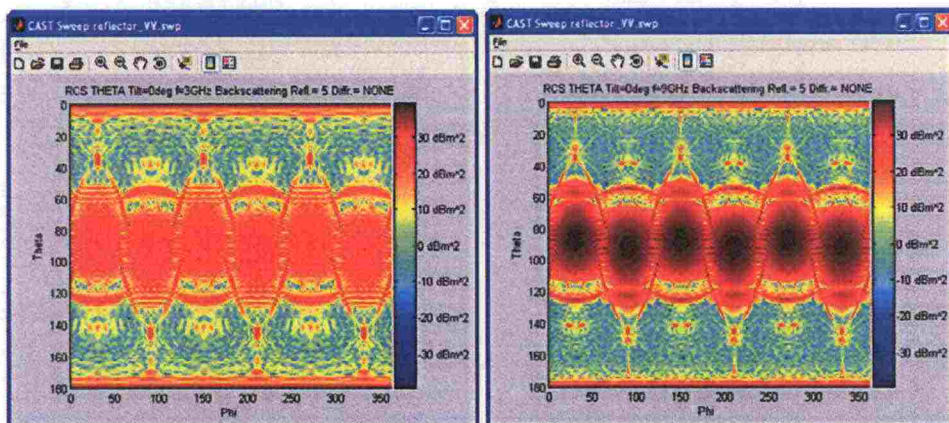
Kuva 3. Tutkaheijastinmalli CAD-kuvana ja laskennassa käytettynä mallina.

Tutkaheijastimen mitat ja ominaisuudet on esitetty taulukossa 2.

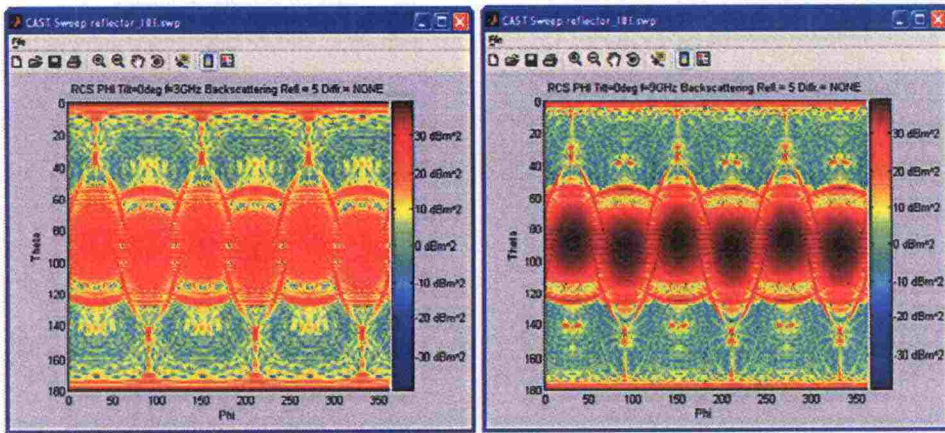
Taulukko 2. Tutkaheijastinmallin Pova3Dma mitat ja ominaisuudet.

Korkeus	2613 mm
Ulkohalkaisija	2330 mm
Sisähalkaisija	1750 mm
Sopen korkeus	1306,5 mm
Materiaali	teräs

Tutkaheijastimelle laskettiin sirontakuviot 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla pysty- (VV) ja vaakapolarisaatiolla (HH). Kuvassa 4 on esitetty tulokset pystypolarisaation ja kuvassa 5 vaakapolarisaation suhteen. Kuvissa pystykulma-arvo (theta) on määritelty siten, että 0-arvo vastaa tarkastelua suoraan ylhäältä. Kulma-arvot kasvavat siirryttäessä ylhäältä alaspäin aina 180°:een asti.

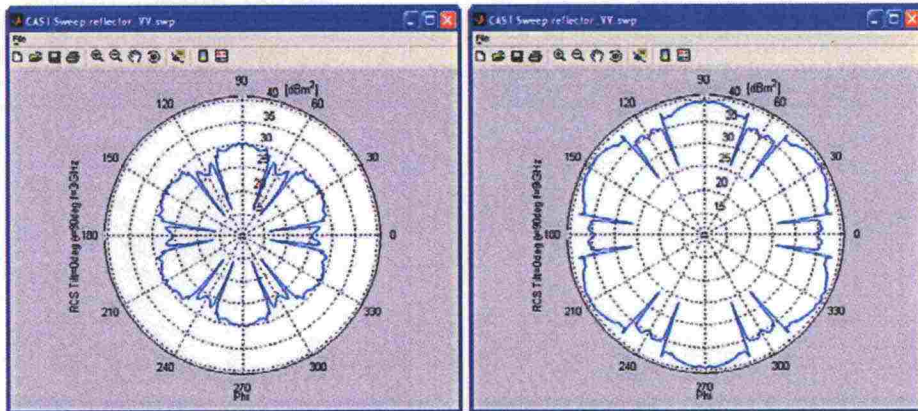


Kuva 4. Sirontakuviot VV-polarisaatiolla 3 GHz:n ja 9 GHz:n tapauksissa.

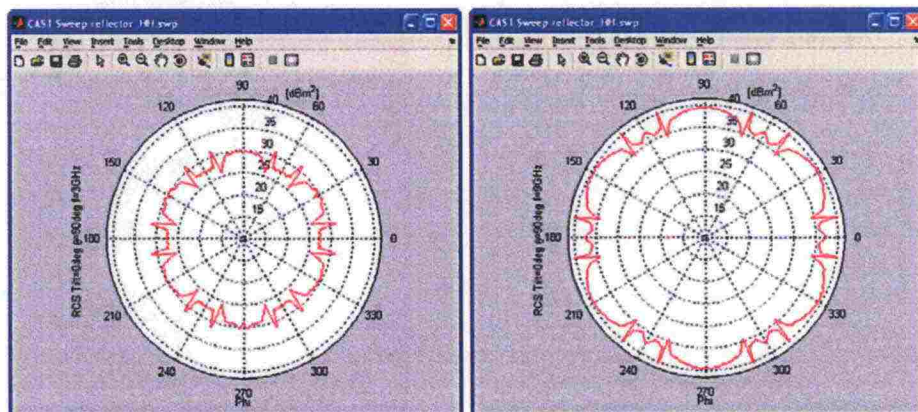


Kuva 5. Sirontakuviot HH-polarisaatiolla 3 GHz:n ja 9 GHz:n tapauksissa.

Käytetty tutkaheijastinmalli toimii hyvin pystykulman ollessa $60^\circ - 120^\circ$. Sirontakuviosta näkyvät symmetrisesti asetettujen soppien synnyttämät pääkeilat, joiden välissä on kapeita sivukeiloja. Sivukeilojen reunoilla on voimakkaita minimikohtia, jotka johtuvat tutkaheijastimen kerroksellisesta rakenteesta ja aukoista soppien välissä. Kuvissa 6 ja 7 on esitetty vaakaleikkaukset tutkaheijastimen sirontakuviosta eri polarisaatiolla ja taajuuksilla. Kuvista havaitaan, että sivukeilojen alueella tehotasot ovat noin 5 dBm^2 alhaisempia kuin pääkeilojen alueella. Kuvista nähdään myös, että HH-polarisaatiolla sivukeilojen reunoilla esiintyy paikallisia maksimiipukkejä.



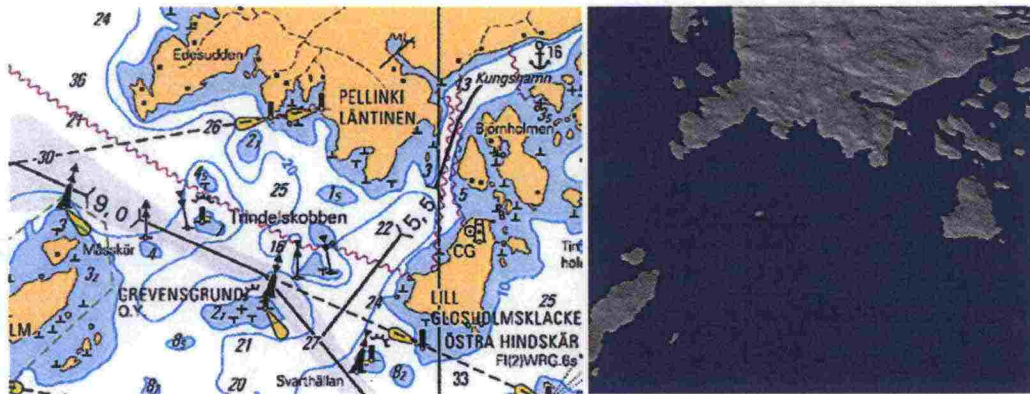
Kuva 6. Sirontakuvion vaakaleikkaus VV-polarisaatiolla 3 GHz:n ja 9 GHz:n tapauksissa.



Kuva 7. Sirontakuvion vaakaleikkaus HH-polarisaatiolla 3 GHz:n ja 9 GHz:n tapauksissa.

3.2 Ympäristön mallintaminen

Katvealueiden mallintamista varten Maamittauslaitokselta tilatun korkeus- ja rantaviiva-aineiston pohjalta luotiin 3D-ympäristömalli, joka muodostuu tasokolmioista. Aineistosta generoitiin 10m pistehila. Kolmioiden määrä mallissa on säädeltävissä pistehilan resoluution avulla. Kolmiulotteinen tasokolmioverkko luotiin Delaunayn kolmiointialgoritmeilla. Tasokolmioverkkoon generoitiin kaikkiaan 280 000 kolmioita. Laskenta-ajan pitämiseksi kohtuullisena tasokolmioiden määrää pudotettiin suodattamalla pois vedenpintaa mallintavat kolmiot eli ne tasokolmiot, joiden kaikki kulmapisteet olivat alle metrin korkeudella vedenpinnasta. Suodatuksen tuloksena kokonaiskolmiomäärä putosi 240 000:een. Kuvassa 8 on esitetty osa laskenta-alueesta ja kartta-aineiston pohjalta luodusta 3D-ympäristömallista.



Kuva 8. Kartta Pellingin väylältä rajatusta alueesta ja sitä vastaava 3D-malli.

4 Rajaukset

Valitut tutkamerkit ovat kiinteitä, joten analyysissä ei selvitetä tutkaheijastimen asennon vaikutusta tuloksiin vaan tutkaheijastimen oletetaan olevan pystysuorassa asennossa. Tästä syystä kaikissa laskennoissa tutkaheijastimen tiltauskulma on 0° .

Kaikki viisi tutkamerkkiä sijaitsevat käytännöllisesti katsoen vedessä. Tästä syystä analyysissä käytetään pistesirottajamallia. Tutkamerkin tukimaston ja kiinnityspaikan tutkaherätetason oletetaan olevan merkityksetön verrattuna tutkaheijastimen herätetasoon. Osuessaan pyöreään mastoon tutka-aalto siroaa voimakkaasti kaikkiin suuntiin, jolloin sironta takaisinpäin on suhteellisen pieni.

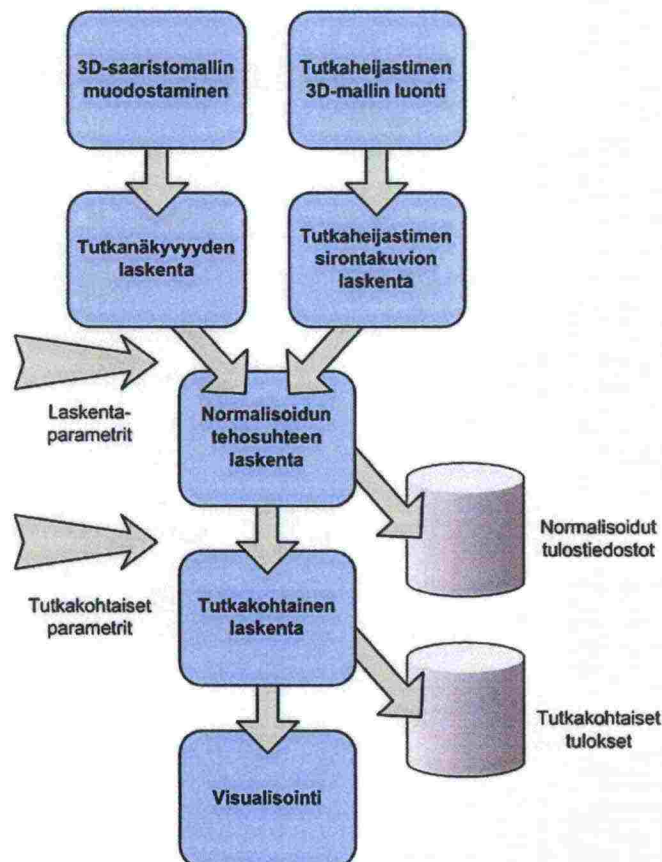
Tutkaherätteen laskennassa huomioidaan heijastus vedenpinnan kautta, mikäli heijastusreitti on esteetön. Laskennassa ei huomioida reitillä olevien saarten aiheuttamaa tutkaherätettä tai tutka-aallon sivuttaissuuntaista monitie-etenemistä. Mallinnuksessa ei myöskään huomioida kasvillisuuden tai puuston vaikutusta, koska tarvittavaa aineistoa ei ollut saatavilla projektin puiteissa. Merta mallinnetaan äärettömän paksuna materiaalina, jonka sähkömagneettiset ominaisuudet on asetettu vastaamaan merivettä. Analyysissä merenkäynnin tila on asetettu vastaamaan Pierson-Moskowitz-taulukossa esitettyä SeaState arvoa 2. Merkittävien aaltojen korkeus on 0,46 – 0,91 metriä ja keskimääräinen aallon-

korkeus 0,27 m [5]. Tutkanäkyvyyden arvioinnissa ei huomioida Fresnelin vyöhykkeitä eikä sääolosuhteiden vaikutusta.

Laivojen näkyvyyttä VTS-aseman tutkassa tarkastellaan 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla. Laskentamenetelmässä huomioidaan ympäristön aiheuttamat katve-alueet, maapallon kaarevuus, vedenpinnasta tapahtuva monitie-eteneminen ja tutkasignaalille tapahtuva etenemisvaimennus. Laivoihin syntyy tyypillisesti yksittäisiä dominoivia herätepisteitä. Tästä syystä analyysissä laivat mallinnetaan pistesirontajamallilla. Laskennan kannalta ongelmana on se, että herätepiste muuttuu laivan asennon vaihtuessa. Tästä johtuen sirontalähteen korkeus vedenpinnasta haetaan IALA:n taulukosta [6] tilastollisen Skolnikin mediaanimallin avulla lasketun tutkakoikkipinta-arvon perusteella. Analyysissä rajoitetaan tutkimaan vain suurten rannikkoalusten (*large coaster*) näkyvyyttä VTS-aseman tutkassa. Maksimiuppouma-arvona käytetään 1000 tonnia. Tarkempaa mallinnusta ei ollut mahdollista tehdä, koska riittävää tietoa erilaisista väylällä liikkuvista laivatyypeistä ja niiden asennoista tutkaan nähden ei ollut saatavilla.

5 Menetelmät

Turvalaitteiden ja VTS-aseman näkyvyyden arvioimiseksi kehitettiin laskentamenetelmä, joka vaiheittain huomioi sirontalähteen, ympäristön katvealueet, maapallon kaareutumisen, vedenpinnan kautta tapahtuvan monitie-etenemisen, etenemisvaimennuksen ja tutkakohtaiset ominaisuudet. Toteutetun laskentamallin vaiheet on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Tutkanäkyvyyden arviointiin toteutetun laskentamenetelmän vaiheet.

Ensimmäisessä vaiheessa luodaan 3D-malli laskentaympäristöstä korkeuskäyrä- ja rantaviivatietojen perusteella. Tässä tapauksessa mallinnuksen kohteena oli 46 km x 20 km alue Pellingin talviväylältä. Mallin muodostuksen vaiheet on kuvattu tarkemmin kappaleessa 3.2.

Toisessa vaiheessa 3D-ympäristömalli projisoidaan pallopinnalle, jonka kaarevuus vastaa maapallon efektiivistä kaarevuutta. Laskentakaava maapallon kaarevuuden huomioimiseksi on esitetty luvussa 5.1.1. Mallinnuksella selvitetään, onko tarkasteltavasta pisteestä suora näköyhteys tai näköyhteys vedenpinnan kautta tutkamerkkiin/VTS-aseman tutkaan, vai jääkö piste katveeseen, jolloin näköyhteyttä ei ole lainkaan. Annettujen sijaintitietojen ja asetetun tutka-korkeuden perusteella tarkasteltavasta alueesta lasketaan ns. näkyvyysrasteri jokaiselle tutkamerkille. Emäsalon VTS-asemalle lasketaan erikseen taajuuskohtaiset näkyvyysrasterit, koska sen tutka-antennit on asennettu eri korkeuksille.

Samanaikaisesti näkyvyysrastereiden laskentavaiheen kanssa luodaan laskettavista tutkaheijastimista 3D-malli, mikäli sellaista ei ole jo saatavilla. Tutkaheijastinmalli luetaan CAST-ohjelmistoon ja sille lasketaan sirontarasterit 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla ja molemmilla polarisaatioilla. Sirontarasteri lasketaan koko tarkastelukulma-avaruuden yli 1° pysty- ja vaakakulma-resoluutiolla.

Seuraavassa vaiheessa yhdistetään tutkanäkyvyys- ja sirontarastereiden tulokset. Käyttäjän antamien laskentaparametrien avulla lasketaan normalisoidut tehosuhteet eri taajuuksilla ja polarisaatioilla jokaisessa näkyvyysrasterin pikselissä. Normalisoidut tehosuhteet lasketaan CAST-ohjelmistolla ja tulokset tallennetaan tutkamerkkikohtaisiin tulostiedostoihin desibelimuodossa¹. Normalisoiduissa laskentatuloksissa on huomioitu tutkaheijastimen sirontakuvio (tutkapoikkipinta), etenemisvaimennus, katvealueet, maapallon kaareutuvuus ja vedenpintaheijastuksen yhteydessä myös merenkäynti (SeaState-2). Normalisoidun tehosuhteen laskentamenetelmä on kuvattu tarkemmin luvuissa 5.1.2 ja 5.1.3. VTS-aseman tapauksessa laivan oletetaan toimivan ”tutkaheijastimena”. Sen tutkapoikkipinta-ala ei ole tiedossa eikä edes laskettavissa, koska 3D-malleja eri laivoista tai tietoa niiden asennosta tutkaan nähden ei ole saatavilla. Laivan tutkapoikkipinnan arvioinnissa hyödynnetään tilastollista mallia, ns. Skolnikin mediaanimenetelmää, joka on kuvattu luvussa 5.1.4.

Seuraavassa vaiheessa suoritetaan tutkakohtaiset laskennat. Tutkakohtaisten parametrien avulla normalisoidusta tehosuhteista lasketaan tutkatyyppikohtaiset tulokset. Tutkakohtaisia parametreja ovat antennivahvistus, lähetysteho ja pienin havaittu vastaanottoteho. Laskentatapa on tarkemmin esitetty luvussa 5.1. Tutkakohtaiset tulokset (vastaanotettu teho dBm-muodossa) tallennetaan tutkamerkkikohtaisiin tulostiedostoihin.

Analyysin viimeinen vaihe on tulosten visualisointi ja jatkokäsittely. Visualisointia varten laskennan tulokset – näkyvyysrasteri, normalisoitu tehosuhterasteri tai vastaanotettu tehorasteri – voidaan lukea ArcGIS-ohjelmistoon ja esittää samassa tai erillisissä näkymissä. Tulorasterit on kohdistettu siten, että tulosten esittäminen päällekkäin on mahdollista. Jatkokäsittelyä varten on

¹ Tehosuureille pätee $dB = 10\log_{10}(\text{mitta/vertailukohta})$

toteutettu Matlab-skriptit, jotka mahdollistavat tulosten tarkastelun ja jatkokäsittelyn numeerisessa muodossa.

5.1 Laskentamallit

Laskentamalleissa huomioidaan maapallon kaarevuus, tutkaheijastimen sirontakuvio, monitie-eteneminen vedenpinnasta ja etenemisvaimennus. Tutkaherätearvot lasketaan normalisoituina tehosuhteina, jotta eri tutkien ominaisuudet, mm. lähetysteho ja vahvistukset, ovat myöhemmin huomioitavissa.

5.1.1 Maapallon ja radiohorisontin kaarevuus

Katvealueiden mallintamisessa otetaan huomioon maapallon kaarevuus efektiivisen maapallon säteen R_{eff} avulla:

$$R_{eff} = K \cdot R_e,$$

missä K on keskimääräisessä ilmakehässä pätevä radioaallon kaareutumisesta johtuva kerroin ja R_e on maapallon säde (~6370 km). Maapallon kaarevuus huomioidaan laskettaessa heijastuskohdan sijainti.

5.1.2 Normalisoitu tehosuhte

Vastaanotetulle teholle on voimassa yleinen tutkayhtälö

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4},$$

missä P_r on tutkan vastaanottama teho [W], P_t tutkan lähetysteho [W], G tutka-antennin vahvistus [yksikötön], σ kohteen tutkapoikkipinta [m²], λ aallonpituus [m] ja R tarkasteluetaisyys [m]. Kun tutka-antennin vahvistus G on 1 ja lähetysteho P_t on 1, voidaan normalisoitu tehosuhte N esittää muodossa

$$N = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot F \sigma \cdot \frac{1}{R^4}.$$

Tässä yhtälössä tutka-aallon etenemisvaimennus tulee huomioiduksi termillä $1/R^4$. Monitie-etenemisen vaikutus huomioidaan kertomalla tutkapoikkipinta-ala σ efektiivisellä kertoimella F . Mikäli tutkan vahvistus G ja lähetysteho P_t tiedetään, saadaan vastaanotettu teho P_r laskettua kaavasta

$$P_r = P_t G^2 N.$$

Tässä projektissa tutkaheijastimen tutkapoikkipinta-ala σ lasketaan VTT:llä kehitetyllä APO-menetelmällä (Antenna Theory applied to Physical Optics). Efektiivisen kertoimen F laskennassa käytetään kirjallisuudesta löytyvää piste-sirottamallia.

Pienin havaittu vastaanotettuteho $P_{r,min}$ on tutkakohtainen arvo, joka on laskettavissa kaavasta

$$P_{r,min} = kT_s B_n S / N ,$$

missä k on Boltzmannin vakio [J/K], T_s kohinalämpötila [K], B_n kohinakaistan leveys [Hz] ja S/N kynnystasoa vastaava signaali-kohina-suhde [yksikötön]. B_n :n tulee olla vähintään $1/\tau$, ettei pulssi vääristy.

Tarkempi tutka-antennin mallintaminen tehdään usein käyttämällä Blaken taulukkoa ja kaavoja [7]. Tämä perustuu suureen joukkoon tutkaparametreja, jotka ovat vain tutkalaitteiden valmistajien tiedossa.

5.1.3 Pistesirottajamalli

Tutkaheijastin voidaan mallintaa yksittäisellä sirottajalähteellä. Sen efektiivinen kerroin voidaan laskea lähteessä [8] esitetyllä menetelmällä, pistesirottajamallilla. Bistaattisessa tapauksessa (lähetin ja vastaanotin eri paikoissa) laskentamalli voidaan esittää seuraavalla lausekkeella

$$F = (1 + \rho_t^2 + 2\rho_t \cos \Psi_t) (1 + \rho_r^2 + 2\rho_r \cos \Psi_r) ,$$

missä ρ_t on heijastuskerroin vedenpinnasta lähettimen ja kohteen välillä ja ψ_t sen vaihe, ρ_r on vedenpinnan heijastuskerroin vastaanottimen ja kohteen välillä ja ψ_r sen vaihe. Vaihearvot saadaan kaavalla

$$\Psi_{t,r} = \phi_{t,r} + \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta R_{t,r} ,$$

missä ϕ on heijastuskertoimen vaihe ja ΔR on matkaero. Matkaerot määritellään seuraavasti:

$$\Delta R_{t,r} = \sqrt{(h_{t,r} + h)^2 + R_{t,r}^2} - \sqrt{(h_{t,r} - h)^2 + R_{t,r}^2} ,$$

missä $h_{t,r}$ on lähettimen/vastaanottimen korkeusero heijastimeen nähden, h heijastimen korkeus ja $R_{t,r}$ on lähettimen/vastaanottimen etäisyys heijastimeen xy-tasossa.

5.1.4 Skolnikin mediaanimalli

VTS-aseman tutkan näkyvyyttä tarkastellaan tilastollisten mallien avulla. Skolnikin mediaanimenetelmän [10] avulla voidaan laskea karkea arvio perinteisten teräsalusten tutkapaikkipinnalle, kun tiedetään tutkan taajuus ja laivan uppouma. Skolnikin mediaanikaava on

$$\sigma_m = 52 \cdot f^{1/2} \cdot D^{3/2} ,$$

missä σ_m on kohteen tutkapoikkipinnan mediaani [m^2], f tutkataajuus [MHz] ja D laivan maksimiuppouma [ktn].

Korvaamalla tutkaheijastinten tapauksessa CASTilla laskettu tutkapoikkipinta-ala σ tällä tilastollisella tutkapoikkipinta-alalla σ_m saadaan normalisoitu tehosuhte laskettua. VTS-aseman tutkanäkyvyyden laskennassa laskentajärjestystä on muutettu siten, että normalisoidun tehosuhteen laskentavaiheessa käytetään tutkapoikkipinta-alan arvona 1 dBm^2 . Vasta tutkakohtaisten tulosten yhteydessä huomioidaan laivan todellinen tutkapoikkipinta. Menettelyn avulla ainoastaan tutkakohtaisten tulosten uudelleenlaskenta on tarpeen, kun muutetaan tarkasteltavan laivan maksimiuppoumaa. Tämä kuitenkin edellyttää, että IALA:n taulukosta haettu keskimääräinen korkeusarvo ei muutu. Mikäli se muuttuu, joudutaan näkyvyysrasterit ja normalisoidut tehosuhderasterit laskemaan uudelleen. Muuttunut korkeusarvo vaikuttaa tutkaheijastimesta haettavaan sironta-arvoihin ja vedenpintaheijastuksen heijastuskertoimeen.

5.2 Laskentaparametrit

Tutkamerkkien ja VTS-aseman tutkanäkyvyyksien laskennassa käytetyt parametrit on esitetty taulukossa 3. VTS-aseman tutka-antennit pyörivät, joten niiden mallinnuksessa käytetään isotrooppisen eli ympärisäteilevän antennin säteilykuviota.

Taulukko 3. Laskentaparametrit.

Laskentaparametri	Arvo	
	Tutkamerkki	VTS-asema
Heijastimen alareunan korkeus vedenpinnasta	Tutkamerkkikohtainen	-
Tutkan korkeus	20 m	51 m ja 53,5 m
Laskentaresoluutio	50 m	50 m
Rasterin koko	36 km x 20 km	46 x 20 km
Laskentataajuuudet	3 GHz ja 9 GHz	3 GHz ja 9 GHz
Sirontamoodi	Monostaattinen	Monostaattinen
Polarisaatiot	HH ja VV	HH ja VV
Heijastukset	5	-
Laskentamalli	Pistesirottaja	Pistesirottaja
Laskentadynamiikka	-30 .. -130 dB	-30 .. -150 dB
Heijastimen kääntökulma	Tutkamerkkikohtainen	-
Aluksen uppouma	-	1000 tonnia

Tutkamerkkien tutkanäkyvyyden tarkastelussa käytetyn laskenta-alueen leveys on 36 km (säde on 18 km). Tutkamerkki sijaitsee laskenta-alueesta muodostetun kohdistetun laskentarasterin keskipikselissä. VTS-aseman tapauksessa rasterin koko on sama kuin kartta-aineistosta luodun 3D-ympäristömallin. Tutkamerkkien yhteydessä tutkanäkyvyys laskettiin S- ja X-alueella 20 m:n tutkakorkeudella. VTS-aseman tapauksessa tutkakorkeus S-taajuudella oli 51 m ja vastaavasti X-taajuudella 53,5 m.

Teknisten tietojen saanti eri tutkatyypeistä osoittautui vaikeaksi. Erityisesti tietoa pienimmästä vastaanottotehosta ei ollut saatavilla. Merenkulkulaitokselta ja tutkalaitteiden kartoituksessa saatuihin tietoihin pohjautuen tutkalaitekohtaisissa laskennoissa käytettiin taulukossa 4 esitettyjä parametriarvoja. Laivatutkan ominaisuudet pohjautuvat JRC:n JMA-9900-sarjan tutkan ja Kongsbergin S- ja X-taajuusalueiden tutkien teknisiin tietoihin.

Taulukko 4. Tutkalaitekohtaiset parametrit.

Laskentaparametri	Arvo		
	Laiva S-kaista	Laiva X-kaista	VTS-asema
Lähetysteho	30 kW	25 kW	30 kW
Antennivahvistus	26 dB	31 dB	34 dB
Vastaanottotehon minimiraja	-130 dBm	-130 dBm	-150 dBm

6 Tulokset

Analyysin tavoitteena oli selvittää, miten valitut tutkamerkit näkyvät laivan tutkassa. Ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin maapallon kaareutumisen ja ympäristön aiheuttamien katvealueiden vaikutusta tutkanäkyvyyteen. Seuraavaksi analysoitiin tutkaheijastimen, vedenpintaheijastuksen ja etäisyyden vaikutusta tutkanäkyvyyteen erityisesti lähellä väylän käänkökohtia. Tulokset on esitetty esimerkkitutkalla laskettuina tehoresterina.

VTS-aseman tapauksessa selvitettiin suuren rannikkoalueen näkyvyyttä VTS-aseman tutkassa. Analysoinnissa keskityttiin vastaaviin asioihin kuin tutkamerkkien tapauksissa eli tutkanäkyvyyteen lähellä käänkökohtia.

Laskentatulokset on esitetty ArcGIS-ohjelmistossa. ArcMap-komponenttiin on luettu tutkamerkkikohtaiset tulosrasterit sekä taustakartta. Rasteri on asetettu osittain läpikuultavaksi, jotta myös taustakartta näkyisi. Analysoitava kohde on esitetty kuvissa punaisella salmiakki-symbolilla ja Pellingin väylä mustalla viivalla, jossa mustilla ympyröillä on merkitty käänkökohdat.

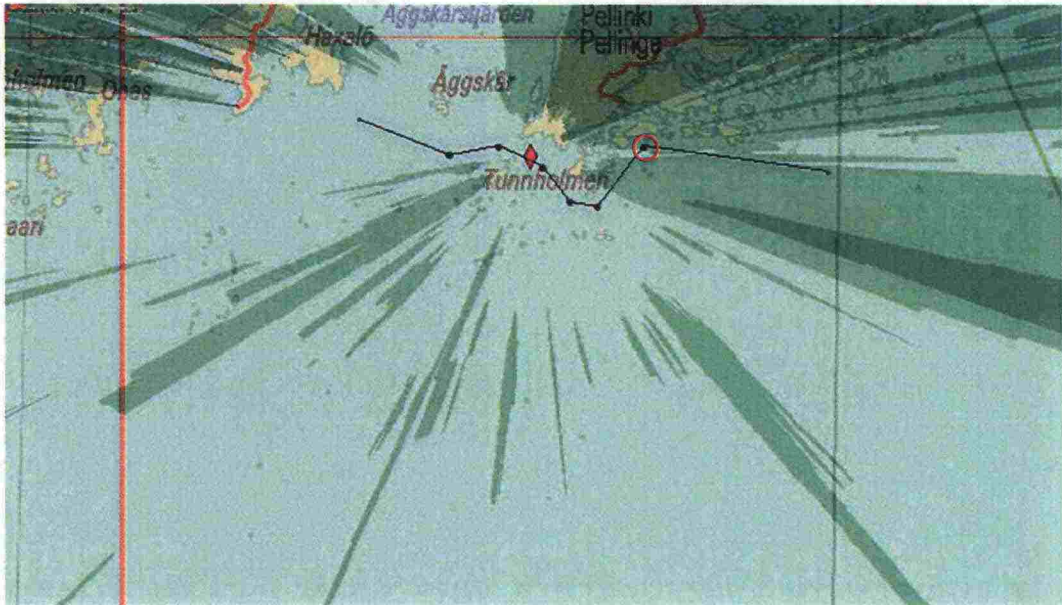
6.1 Turvalaitteiden tutkanäkyvyys

Seuraavissa kappaleissa on esitetty tutkamerkkien näkyvyysrasterit ja tehoresterit esimerkkitutkalla. 3 GHz:n taajuuden tapauksessa tutkan lähetysteho on 30 kW ja antennivahvistus 26 dB. 9 GHz:n taajuuden tapauksessa lähetysteho on 25 kW ja antennivahvistus 31 dB. Koska tietoa pienimmästä vastaanottotehosta ei ollut saatavilla, asetettiin molemmissa tapauksissa minimirajaksi -130 dBm. Laivassa olevan tutkan korkeus on kaikissa tapauksissa 20 m.

6.1.1 Tredjedelskubb

Tredjedelskubb-tutkamerkissä tutkaheijastin on 13,7 m korkeudella vedenpinnasta. Kuvassa 10 on esitetty ympäristön aiheuttamat katvealueet 18 km säteeltä tutkaheijastimen ympäriltä. Vaaleanvihreä väri esittää alueita, joissa on

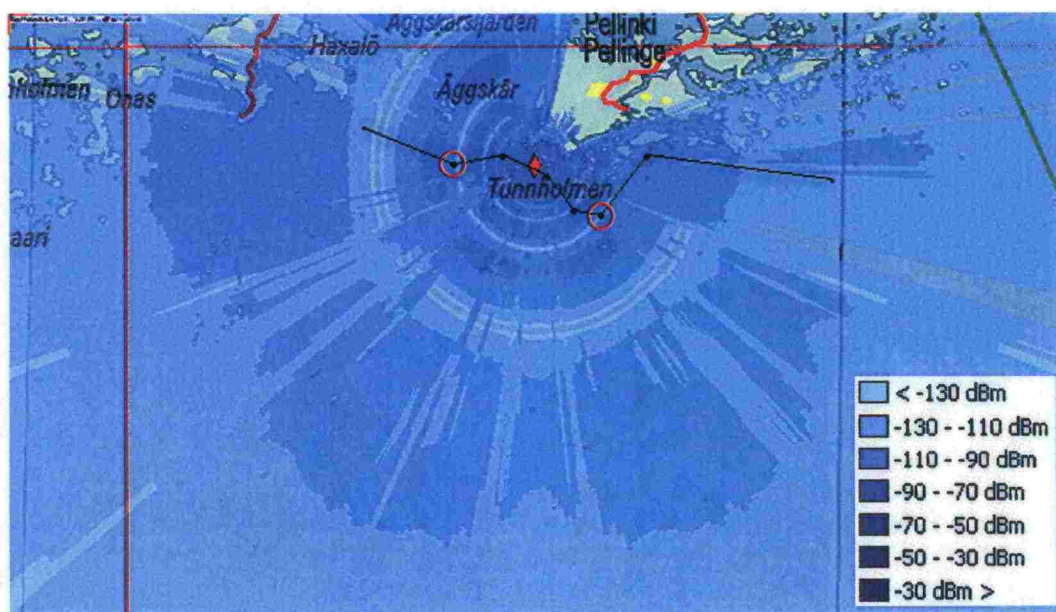
suora näköyhteys ja esteetön heijastusreitti vedenpinnan kautta tutkamerkkiin. Tummempi vihreä esittää alueita, joissa heijastusreitti vedenpinnan kautta on estynyt. Tummin vihreä esittää ympäristön synnyttämiä katvealueita.



Kuva 10. Tredjedelskubb-tutkamerkin näkyvyysrasteri.

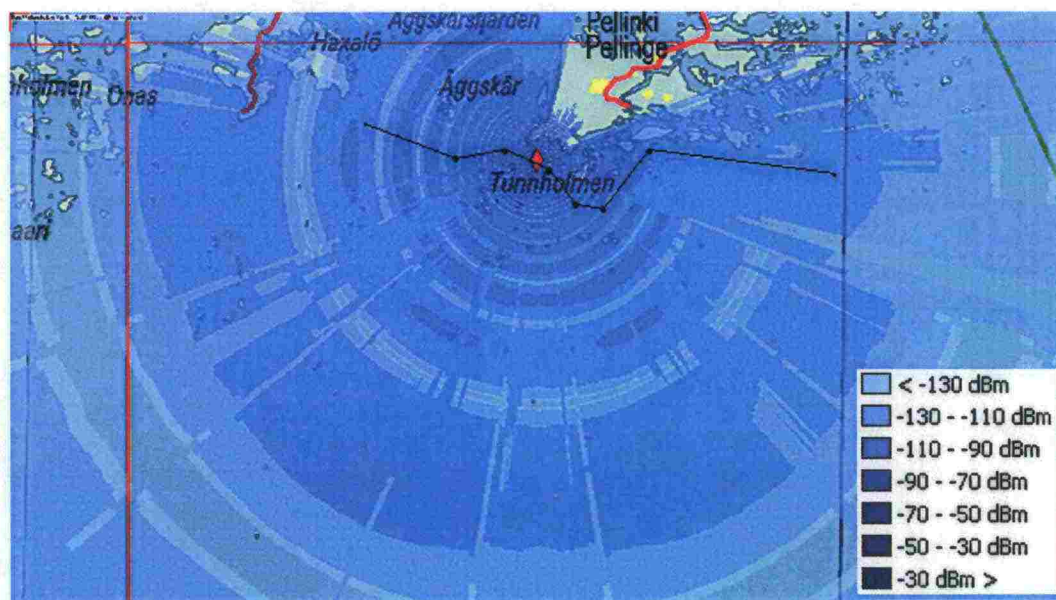
Tredjedelskubb-tutkamerkin ympärillä olevat saaret ovat niin matalia, että suora näköyhteys laivasta tutkaheijastimeen on olemassa saarten yli. Ainoastaan Pellinki ja Glosholmen ovat riittävän korkeita aiheuttamaan katvealueita, mutta ne eivät ylety Pellingin väylälle asti. Kuvasta nähdään, että näköyhteys kaikista väylän käänkökohdista tutkamerkkiin on olemassa. Ainoastaan Glosholmen-saari estää vedenpintaheijastuksen oikeanpuoleisimman käänkökohdan läheisyydessä. Tämä kohta on merkitty kuvaan punaisella ympyrällä. Laskennassa on huomioitu myös maapallon kaarevuus. Sillä ei ole juurikaan vaikutusta tuloksiin, koska tutka ja turvalaitteen tutkaheijastin ovat riittävän korkealla vedenpinnasta, jotta näkyvyys horisontin yli 18 km asti säilyy.

Kuvassa 11 on esitetty tehorasteri 3 GHz:n taajuudella ja VV-polarisaatiolla. Tehorasteriin syntyy vaaleita renkaita, jotka esittävät minimikohta-alueita. Kuvasta havaitaan, että kaksi punaisella ympyrällä merkittyä väylän käänkökohta osuu minimikohta-alueelle. Tämä alue on hyvin kapea, joten pahimmassakin tapauksessa tutkamerkki voi olla hävinneenä tutkanäytöltä vain lyhyen aikaa. Lännessä esiintyy leveämpi minimikohta-alue suoralla väyläosuudella.



Kuva 11. Tehorasteri esimerkkitutkalla 3 GHz:n taajuudella VV-polarisaatiolla.

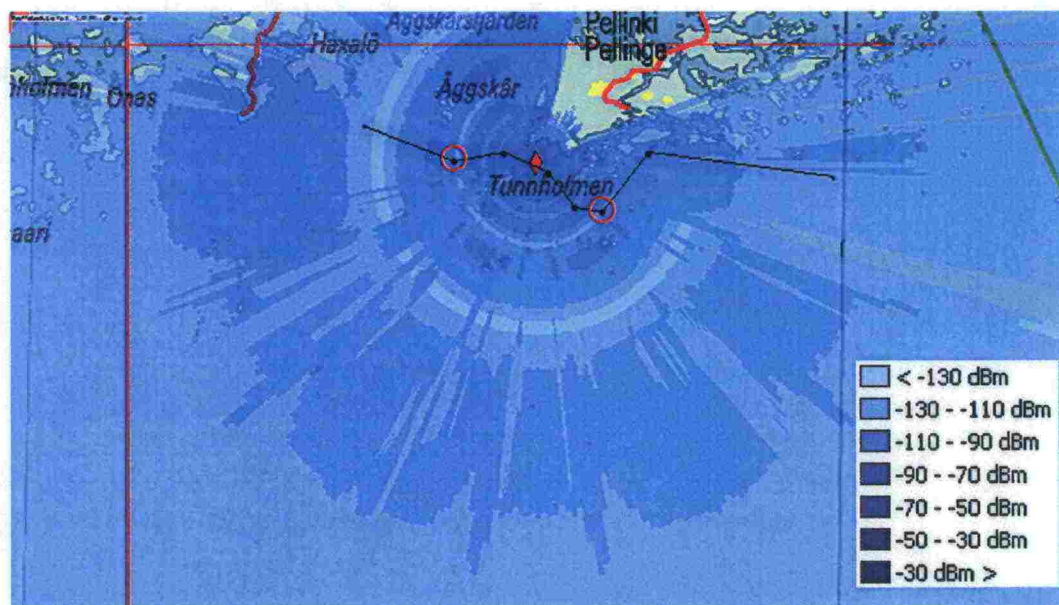
9 GHz:n taajuuden tapauksessa käytettiin pienempää lähetystehoa ja suurempaa antennivahvistusta kuin 3 GHz:n taajuuden tapauksessa. Korkeammasta antennivahvistuksesta johtuen arvot tehorasterissa 9 GHz:n taajuudella ovat korkeampia kuin 3 GHz:n tapauksessa. Taajuuden kasvattaminen tihentää minimikohtarenkaiden määrää. Kuvasta 12 havaitaan hyvin leveä minimikohtarengas noin 15 km päässä tutkamerkistä. Se ei kuitenkaan ulotu tarkasteltavalle väyläosuudelle asti. Kaikki kuvan kääntökohdat sijaitsevat minimikohta-alueiden ulkopuolella. Korkeamman taajuuden tuloksena tehorasteri on symmetrisempi kuin 3 GHz:n tapauksessa ja sivukeilojen vaikutus tuloksiin on pienempi.



Kuva 12. Tehorasteri esimerkkitutkalla 9 GHz:n taajuudella VV-polarisaatiolla.

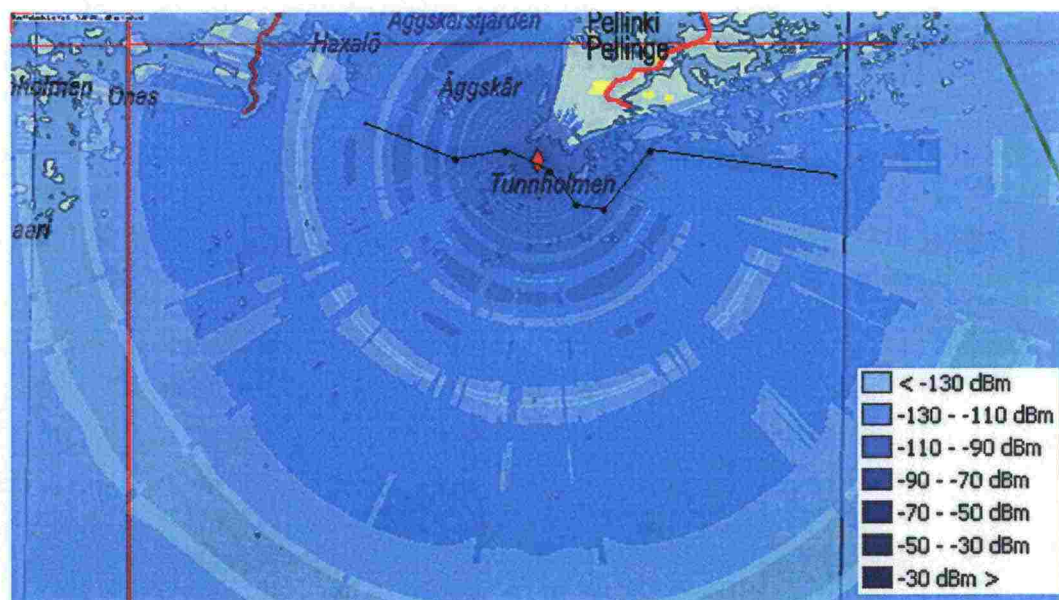
Seuraavassa kuvassa on esitetty tehorasteri 3 GHz:n taajuudella ja HH-polarisaatiolla. Minimikohta-alueet sijaitsevat samoissa kohdissa kuin VV-polarisaation tapauksessa. Tehorasterin arvot ovat aavistuksen verran korkeampia.

Tästä syystä tehotasot minimikohta-alueilla nousevat -130 dBm:n yläpuolelle. Tämä havaitaan selvimmin punaisella merkittyjen tutkamerkkien läheisyydessä. Merkittävimmät muutokset tehorasterissa näkyvät kapeiden sivukeilojen alueella.



Kuva 13. Tehorasteri esimerkkitutkalla 3 GHz:n taajuudella HH-polarisaatiolla.

9 GHz:n taajuuden tapauksessa tehorasterit HH- ja VV-polarisaatiolla ovat hyvin samanlaiset. HH-polarisaatiolla tehoarvot ovat aavistuksen korkeampia ja sivukeilojen vaikutus pienempi kuin VV-polarisaatiolla. Kaikki väylän käänköpisteet sijaitsevat minimikohta-alueiden ulkopuolella. Leveä minimikohta-alue esiintyy edelleen noin 15 km päässä tutkamerkistä.

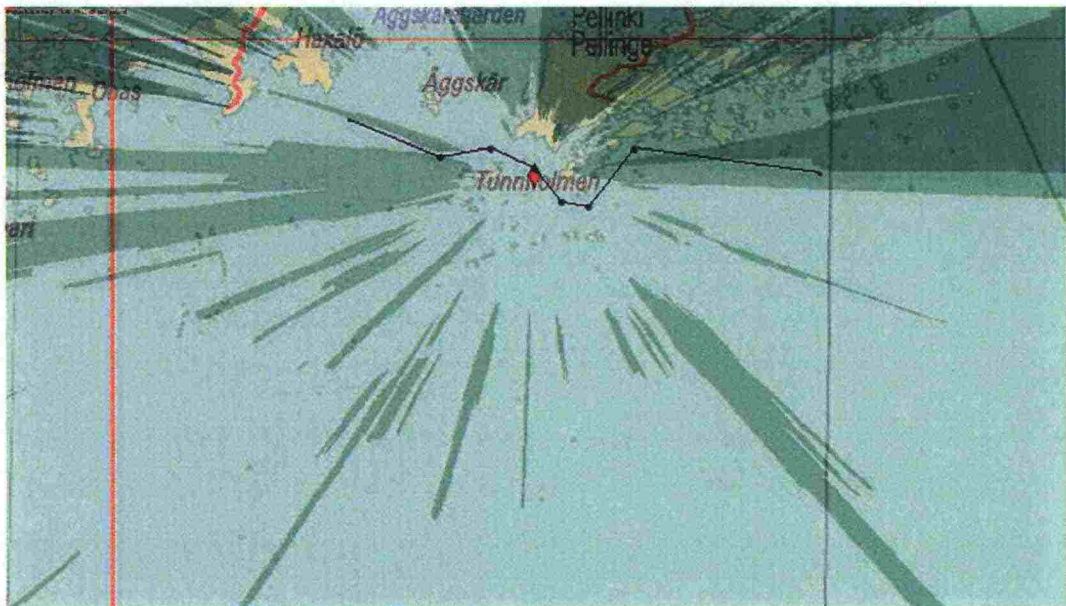


Kuva 14. Tehorasteri esimerkkitutkalla 9 GHz:n taajuudella HH-polarisaatiolla.

6.1.2 Grevensgrund

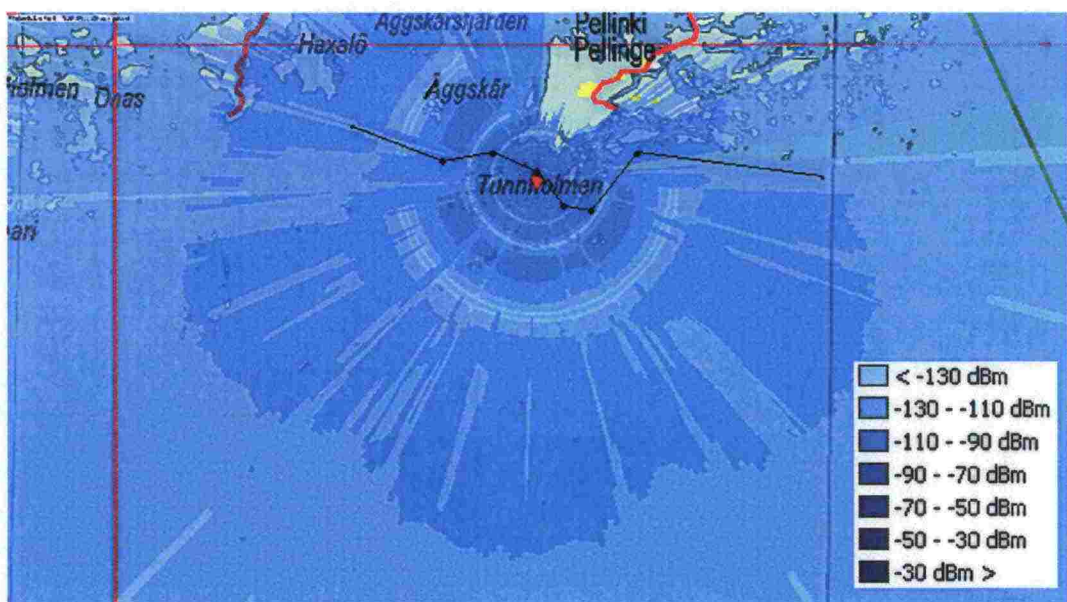
Grevensgrund-tutkamerkki sijaitsee Tunnsolmin ja Glosolmenin saarten välissä. Turvalaitteen tutkaheijastin on 11,7 m korkeudella vedenpinnasta, mikä on 2 m

alempana kuin Tredjedelskubb-tutkamerkin tapauksessa. Korkeuden vaikutus näkyy kuvan 15 näkyvyysrasterissa. Katvealueet ovat merkittävästi leveämpiä kuin Grevensgrundin tapauksessa. Gloscholmen ja Pellingin saaret aiheuttavat katvealueita itään ja koilliseen. Tunholmin saari aiheuttaa vedenpinta-heitastuksen estymisen länteen. Näkyvyys etelään on kuitenkin esteetön. Osissa väylää tutkamerkin näkyvyys on estynyt. Kaikki tarkasteltavat käänköhdät ovat kuitenkin katvealueiden ulkopuolella.



Kuva 15. Grevensgrund-tutkamerkin näkyvyysrasteri.

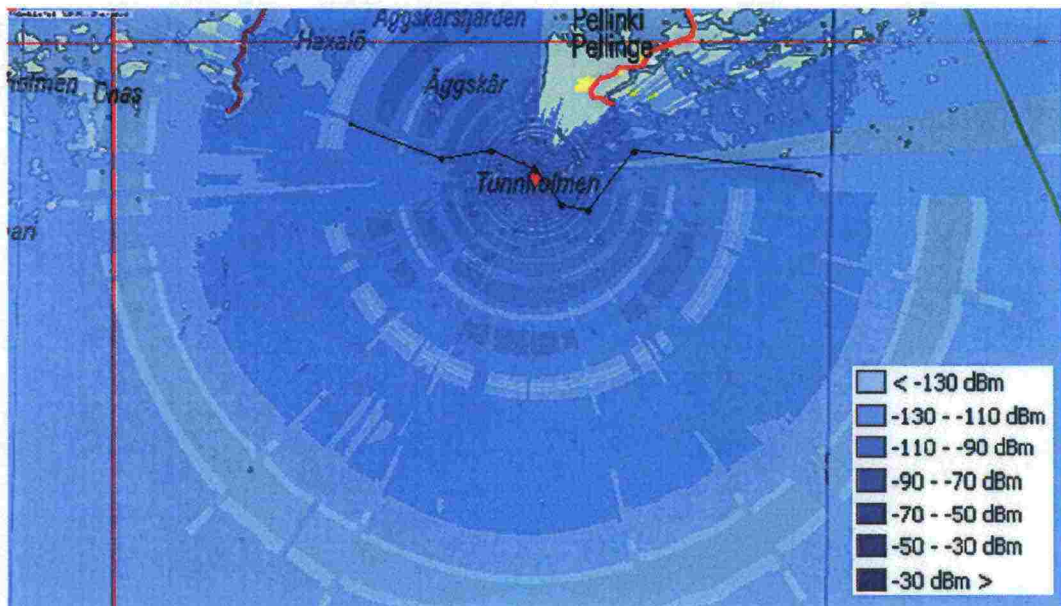
Tutkaheijastimen pääsuuntaa on käännetty 36° myötäpäivään, Kuvasta 16 nähdään, että pieni osa väylän suorasta osuudesta on katveessa (lähellä oikeanpuoleisinta käänkökohtaa). Tutkanäkyvyys muissa osissa väylää on hyvä ja yksikään väylän käänkökohta ei sijaitse minimikohta-alueella.



Kuva 16. Tehorasteri esimerkkitutkalla 3 GHz:n taajuudella VV-polarisaatiolla.

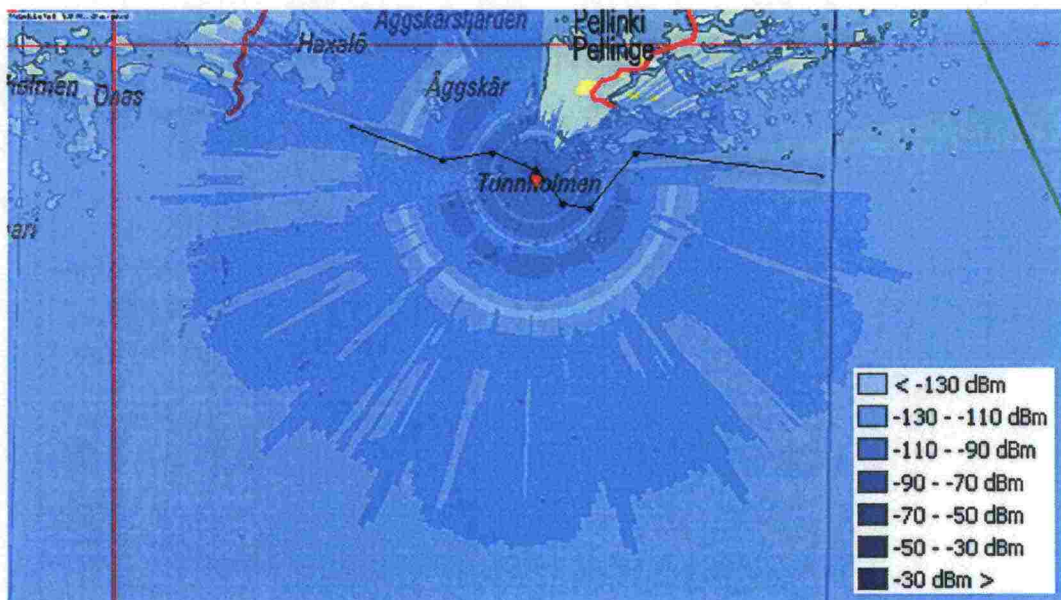
9 GHz:n taajuuden tapauksessa minimikohtarenkaat tihtyvät. Kaikki väylän käänkökohdat sijaitsevat minimikohta-alueiden ulkopuolella. Arvot tehorasterissa

ovat 3 GHz:n tapaan aavistuksen verran korkeampia lukuun ottamatta leveää minimikohta-aluetta noin 15 km päässä tutkamerkistä.



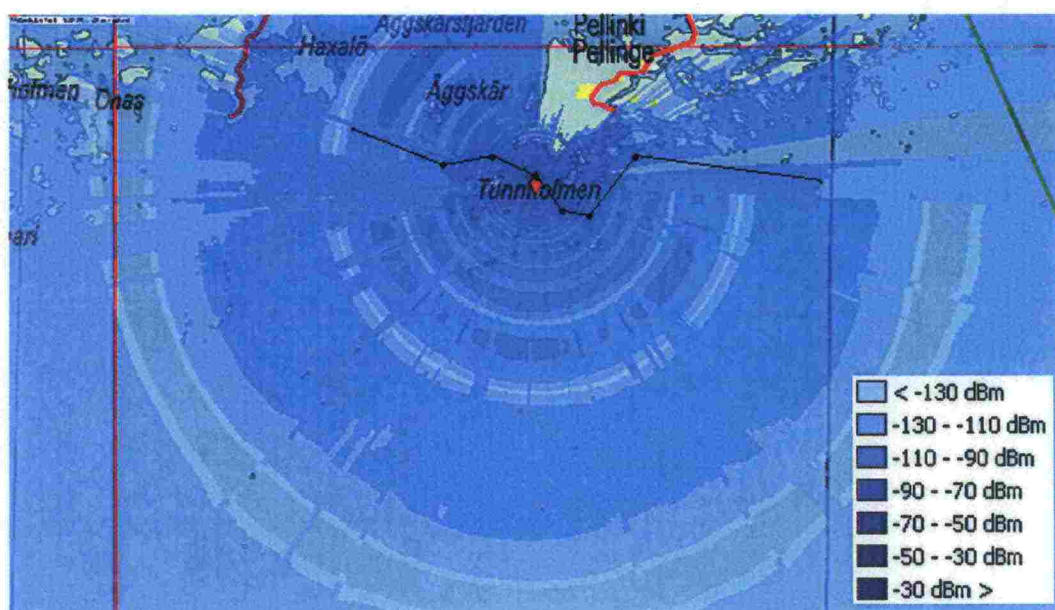
Kuva 17. Tehorasteri esimerkkitutkalla 9 GHz:n taajuudella VV-polarisaatiolla.

Seuraavassa kuvassa on esitetty tehorasteri 3 GHz:n taajuudella ja HH-polarisaatiolla. Polarisaation vaihtaminen ei merkittävästi muuta tuloksia. Suurimmat muutokset ovat sivukeilojen alueella. Väylän käänkökohdat ovat edelleen minimikohta-alueiden ulkopuolella.



Kuva 18. Tehorasteri esimerkkitutkalla 3 GHz:n taajuudella HH-polarisaatiolla.

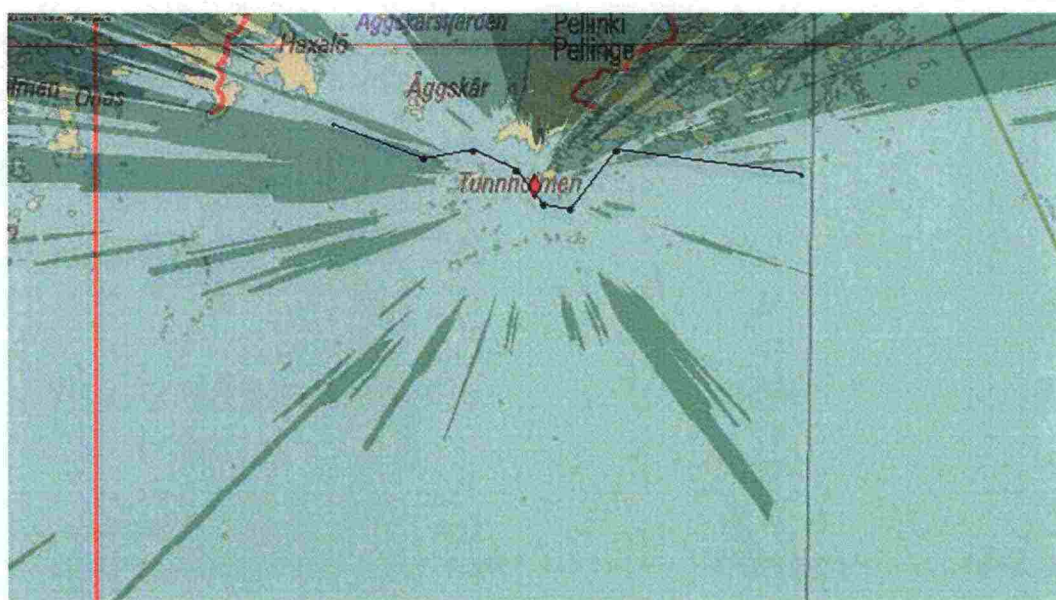
9 GHz:n taajuuden tapauksessa muutokset ovat vielä pienemmät kuin 3 GHz:n tapauksessa. Hiukan korkeammasta tehoasosta johtuen minimikohtarenkaat ovat aavistuksen verran kapeampia kuin VV-polarisaation tapauksessa.



Kuva 19. Tehorasteri esimerkkitutkalla 9 GHz:n taajuudella HH-polarisaatiolla.

6.1.3 Svarthällen

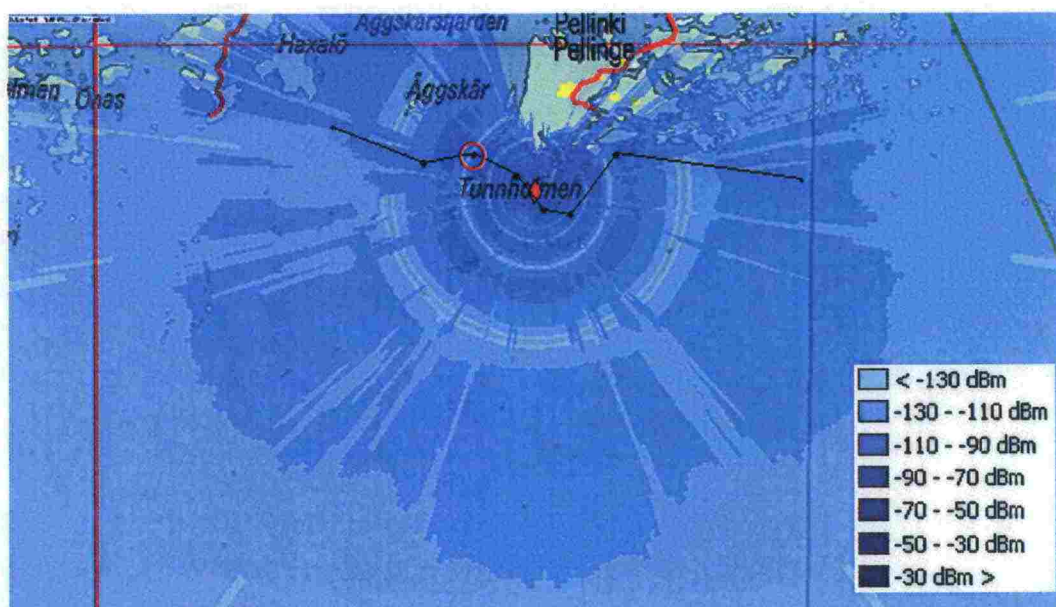
Svarthällen-tutkamerkki sijaitsee Glosholmen-saaresta lounaaseen. Turvalaitteen tutkaheijastin on 12,7 m korkeudella vedenpinnasta. Katvealuetta syntyy vain Pellingin saaren suuntaan. Alueita, joissa vedenpintaheijastus on estynyt, syntyy pääosin Tunnholmin ja Glosholmenin saarten taakse koilliseen ja luoteeseen. Tutkamerkin näkyvyys tarkasteltavalle väyläosuudelle on hyvä.



Kuva 20. Svarthällen-tutkamerkin näkyvyysrasteri.

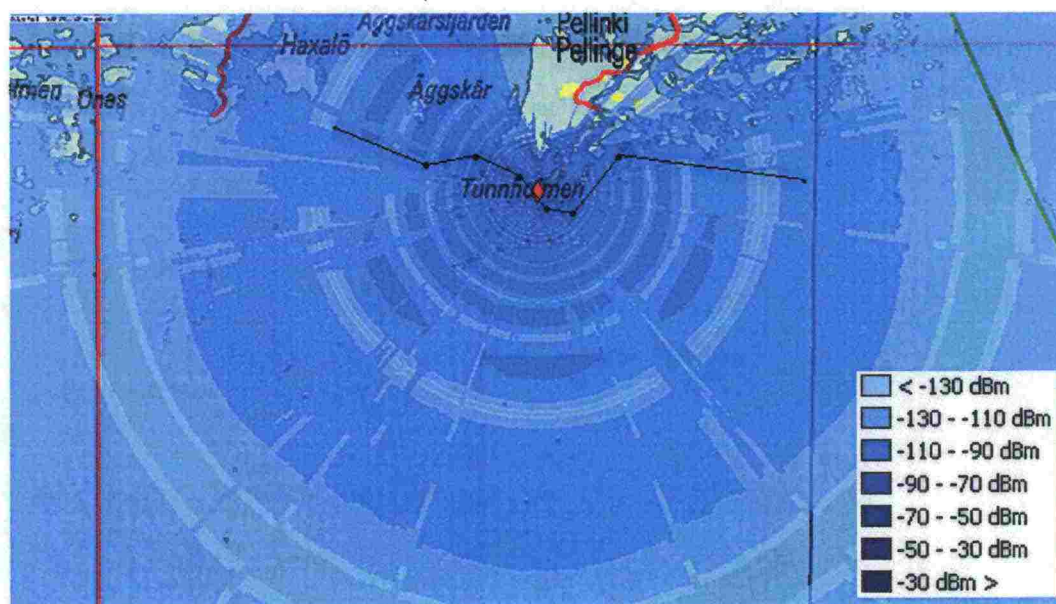
Tutkaheijastimen pääsuuntaa on käännetty 29° myötäpäivään. Laajoja minimikohta-alueita ei synny lähelle väylän käänntökohtia. Vain yksi käänntökohta (punaisella ympyrällä merkitty) sijaitsee kapean minimikohta-alueen reunalla. Idässä osa väylän suoraa osuutta leikkaa leveämpää minimikohta-aluetta.

Tutkamerkin tehorasterin arvot 3 GHz:n taajuudella ja VV-polarisaatiolla ovat varsin korkeita koko tarkasteltavan väylän alueella.



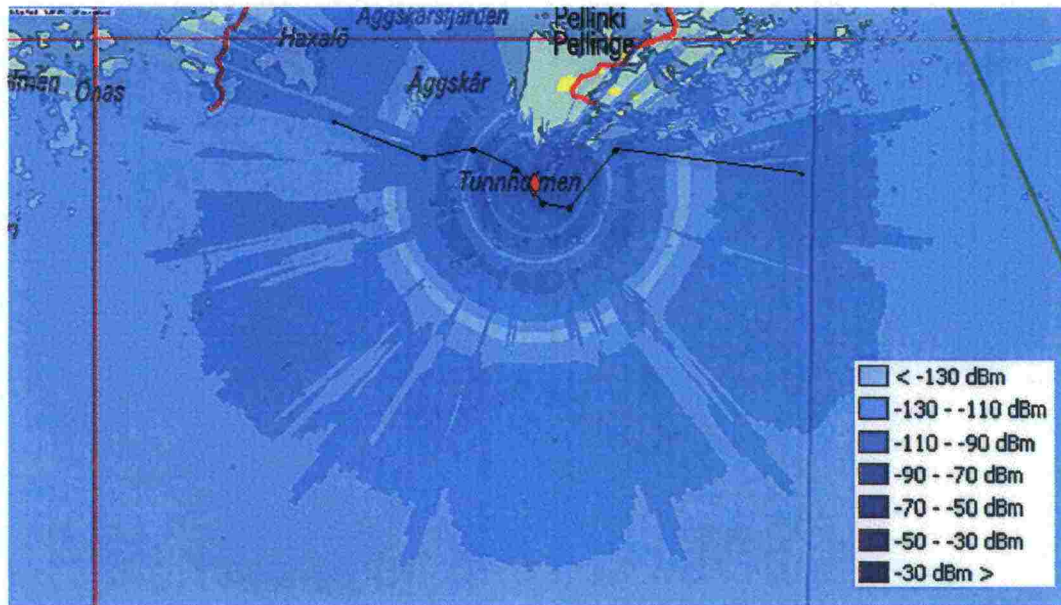
Kuva 21. Tehorasteri esimerkkitutkalla 3 GHz:n taajuudella VV-polarisaatiolla.

9 GHz:n taajuuden tapauksessa tutkamerkin näkyvyys koko väylällä on hyvä. Ainoastaan idässä pieni osa väylän suoraa osuutta kulkee minimikohta-alueen poikki.



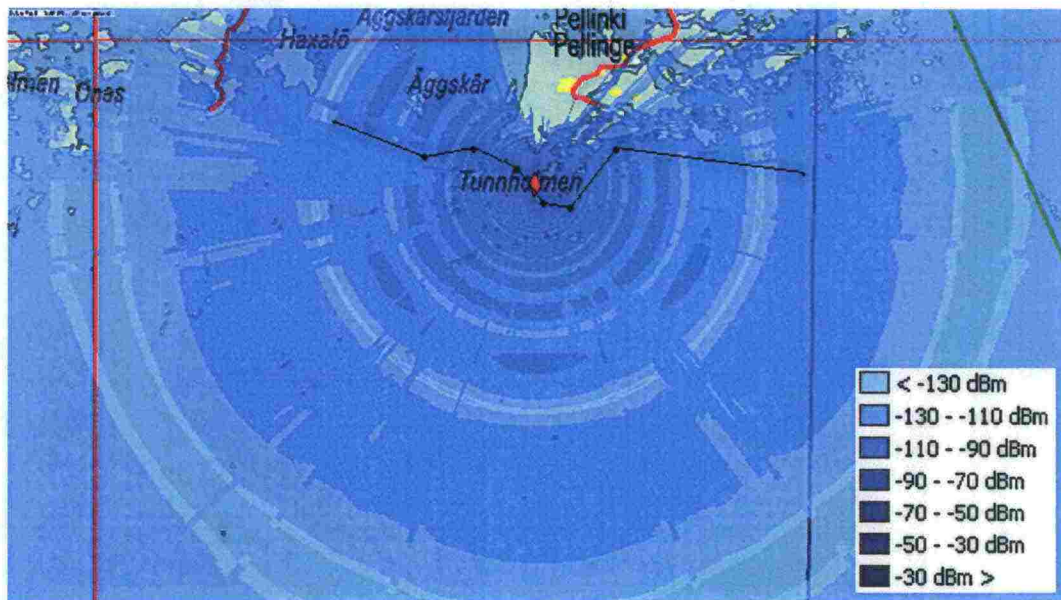
Kuva 22. Tehorasteri esimerkkitutkalla 9 GHz:n taajuudella VV-polarisaatiolla.

Seuraavassa kuvassa on esitetty tehorasteri 3 GHz:n taajuudella ja HH-polarisaatiolla. Polarisaation muuttaminen kasvattaa hiukan tehorasterin arvoja. Sen tuloksena minimikohtarenkaat kapenevat ja kuvassa 21 punaisella ympyrällä merkitty väylän kääntökohta siirtyy minimikohta-alueen ulkopuolelle.



Kuva 23. Tehorasteri esimerkkitutkalla 3 GHz:n taajuudella HH-polarisaatiolla.

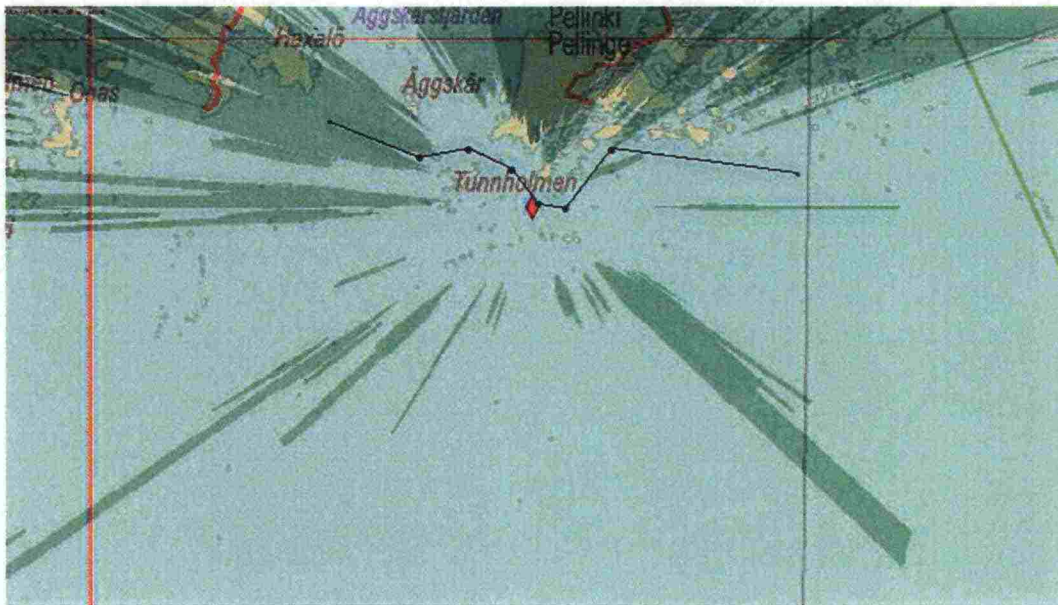
9 GHz:n taajuuden tapauksessa polarisaation muuttaminen ei merkittävästi muuta tuloksia. Tehotaso on hiukan korkeampi kuin VV-polarisaatiolla ja minimikohta-alueet ovat hiukan kaventuneet. Leveä minimikohta-alue esiintyy edelleen 15 km päässä tutkamerkistä.



Kuva 24. Tehorasteri esimerkkitutkalla 9 GHz:n taajuudella HH-polarisaatiolla.

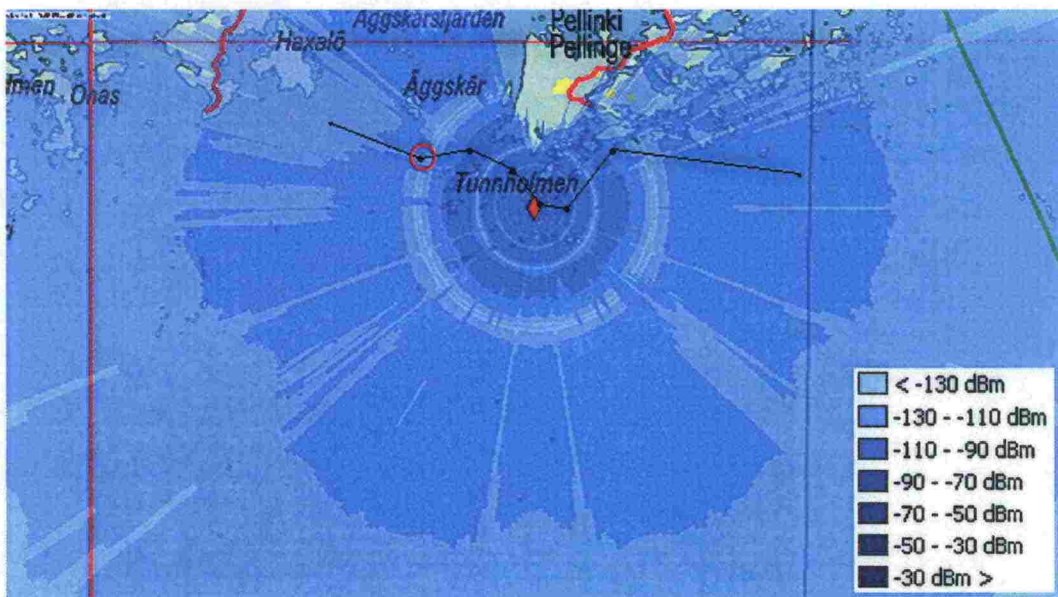
6.1.4 Glosholmsgrund

Tutkamerkki sijaitsee Glosholmen-saaresta lounaaseen. Turvalaitteen tutkaheijastin on 10,2 m korkeudella vedenpinnasta. Pellingin saari synnyttää katvealueita pohjoiseen. Vastaavasti Tunnholménin ja Glosholmenin saaret synnyttävät luoteeseen ja koilliseen alueita, missä vedenpintaheijastus on estynyt. Tunnholménin tapauksessa tämä alue ylittää tarkasteltavalle väyläosuudelle asti. Tutkamerkin näkyvyys väylälle on hyvä.



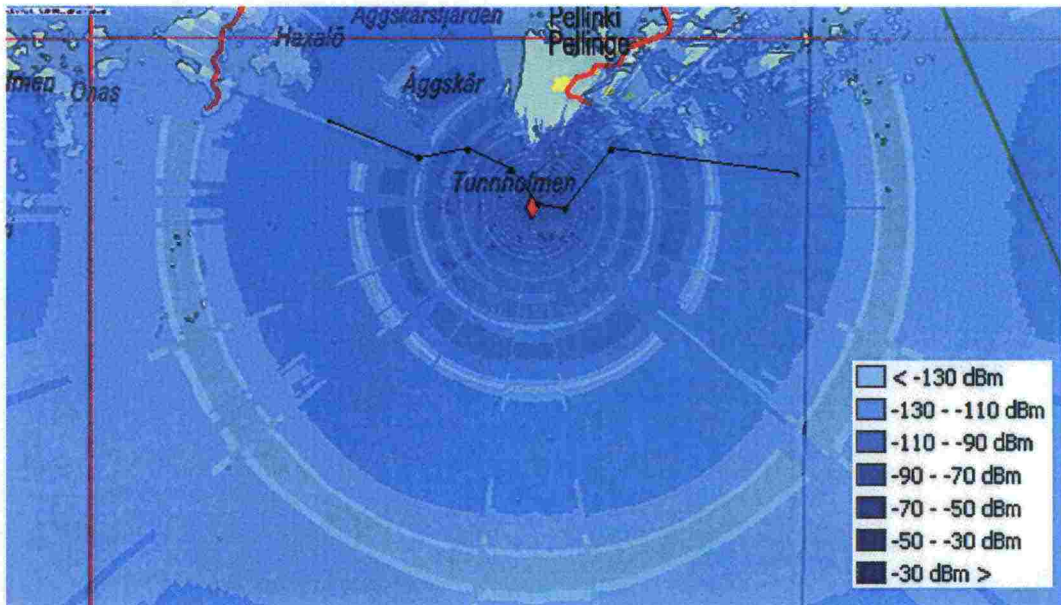
Kuva 25. Glosholmsgrund-tutkamerkin näkyvyysrasteri.

Tutkaheijastimen pääsuuntaa ei ole muutettu. Yksi kääntopisteistä ja lyhyt osuus väylän suorasta osasta sijaitsevat minimikohta-alueella. Muuten tutkamerkin näkyvyys väylälle on hyvä.



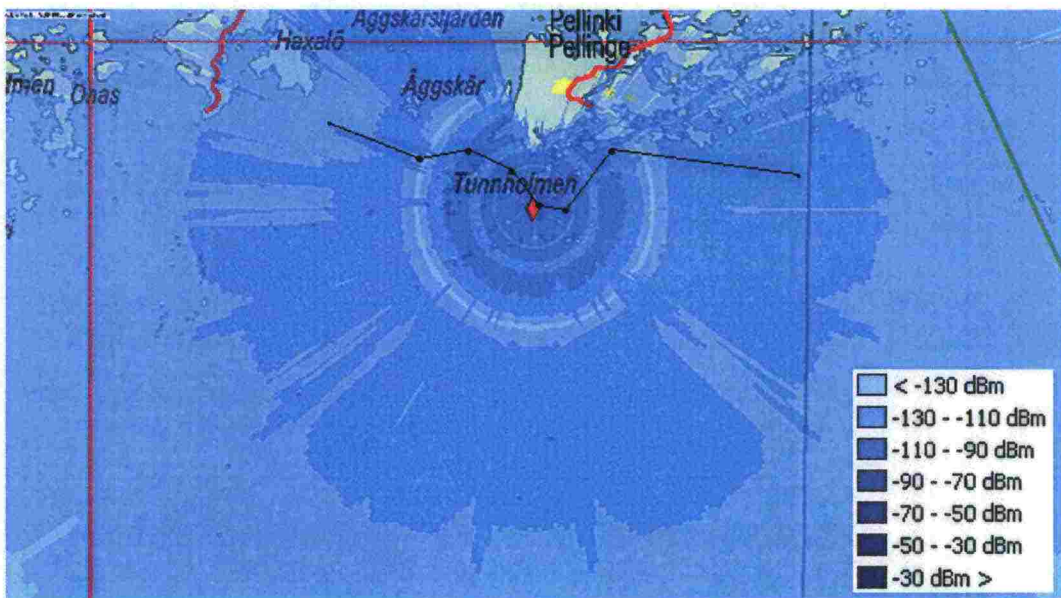
Kuva 26. Tehorasteri esimerkkitutkalla 3 GHz:n taajuudella VV-polarisaatiolla.

9 GHz:n taajuuden tapauksessa kaikki väylän kääntopisteet sijaitsevat minimikohta-alueiden ulkopuolella. Vain idässä kapea minimikohta-alue leikkaa tarkasteltavan väylän suoraa osuutta. Leveä minimikohta-alue on edelleen näkyvissä noin 15 km päässä tutkamerkistä.



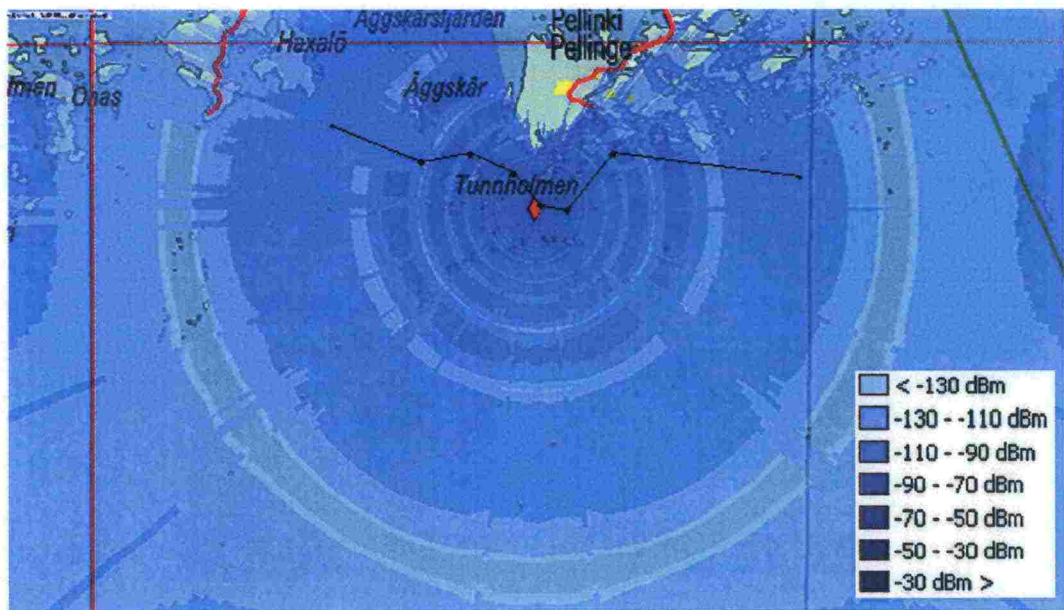
Kuva 27. Tehorasteri esimerkkitutkalla 9 GHz:n taajuudella VV-polarisaatiolla.

Seuraavassa kuvassa on esitetty tutkamerkin tehorasteri 3 GHz:n taajuudella ja HH-polarisaatiolla. Arvot tehorasterissa kasvavat hiukan ja minimikohtarenkaat kaventuvat. Kaikki väylän käänkökohdat siirtyvät minimikohta-alueiden ulkopuolelle. Vain lyhyet osat suorista väyläosuksista idässä ja lännessä leikkaavat minimikohta-alueita.



Kuva 28. Tehorasteri esimerkkitutkalla 3 GHz:n taajuudella HH-polarisaatiolla.

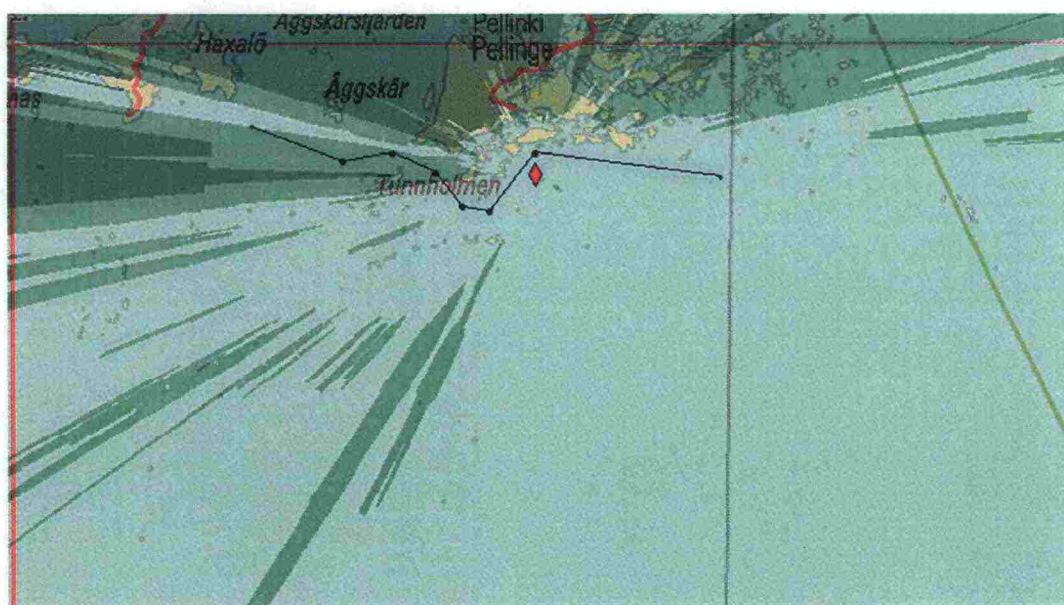
9 GHz:n taajuuden tapauksessa muutokset tutkamerkin tehorasterissa ovat pieniä. Tehotaso kasvaa hiukan ja rasterista katoavat tutkaheijastimen sivukeilojen aiheuttamat piikit. Minimikohta-alueita ei synny tarkasteltavalle väyläosuudelle.



Kuva 29. Tehorasteri esimerkkitutkalla 9 GHz:n taajuudella HH-polarisaatiolla.

6.1.5 Låghällan

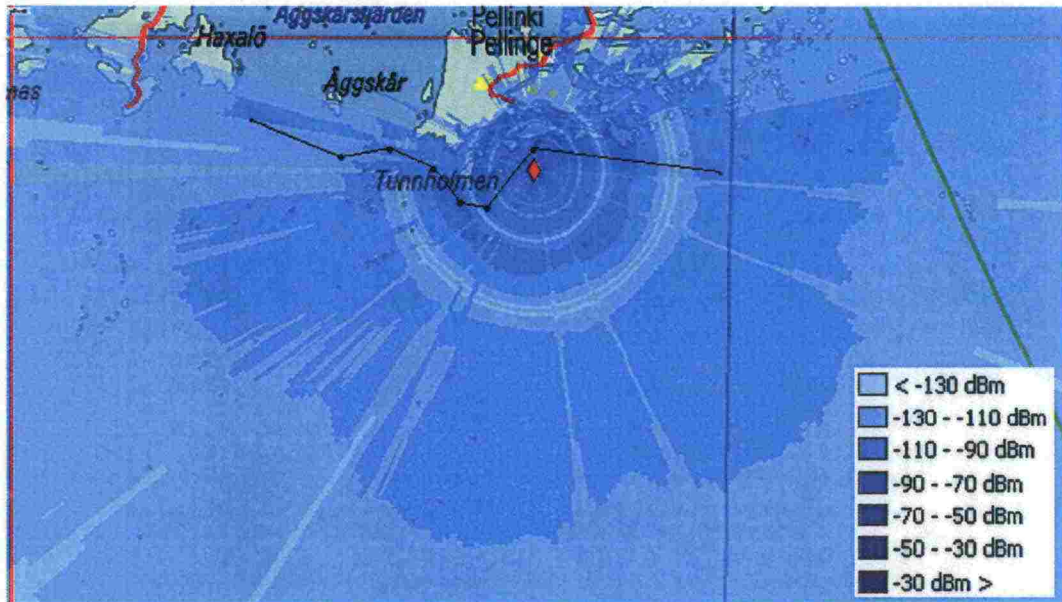
Viimeisenä analysoitavana turvalaitteena oli Låghällan-tutkamerkki. Se sijaitsee Långöstä etelään ja on oleellisesti kauempana muista lasketuista tutkamerkeistä. Sen tutkaheijastin sijaitsee 11,6 m korkeudella vedenpinnasta. Kuvasta 30 voidaan havaita, että tutkamerkkiä lähellä olevat saaret ovat varsin matalia. Näköyhteys saarten yli tutkamerkin ja tutkan välillä on olemassa. Ainostaan Tunnsolmenin saaren korkeimmat kohdat ja Pellingin saari synnyttävät katvealueita. Nämä eivät kuitenkaan yllä tarkasteltavalle väylälle asti. Tutkamerkin näkyvyys itään on esteetön, mutta Pellingi-saaren länsipuolella vedenpintaheijastus on monin paikoin estynyt.



Kuva 30. Låghällan-tutkamerkin näkyvyysrasteri.

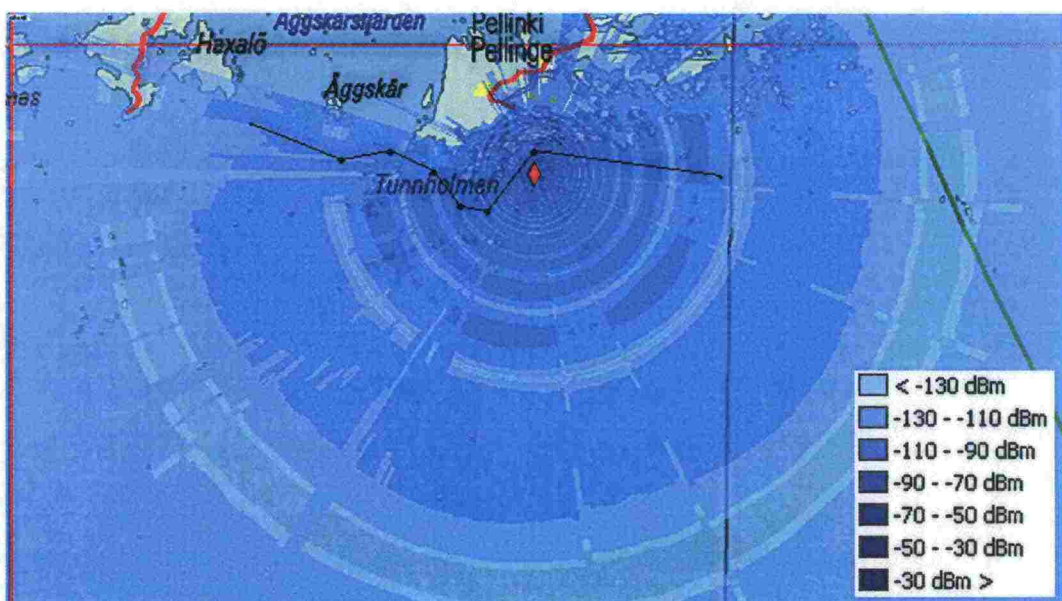
Tutkaheijastimen pääsuuntaa on käännetty 17° vastapäivään. Kuvassa 31 havaitaan selvästi Pellingi-saaren aiheuttama katve. Se ei kuitenkaan yllä väylälle

asti. Kaikki väylän käänköhdät ovat minimikohta-alueiden ulkopuolella. Vain idässä lyhyt väyläosuus leikkaa minimikohta-alueetta. Matalampi tutkaheijastimen korkeus kasvattaa tutkaherätettä vedenpinnan kautta. Sen tuloksena arvot tehoresterissa ovat keskimäärin korkeampia kuin esimerkiksi Tredjedelskubb-tutkamerkin tapauksessa. Tämä näkyy kuvissa 11 ja 31, kun tarkastellaan tummansinisen alueen laajuutta.



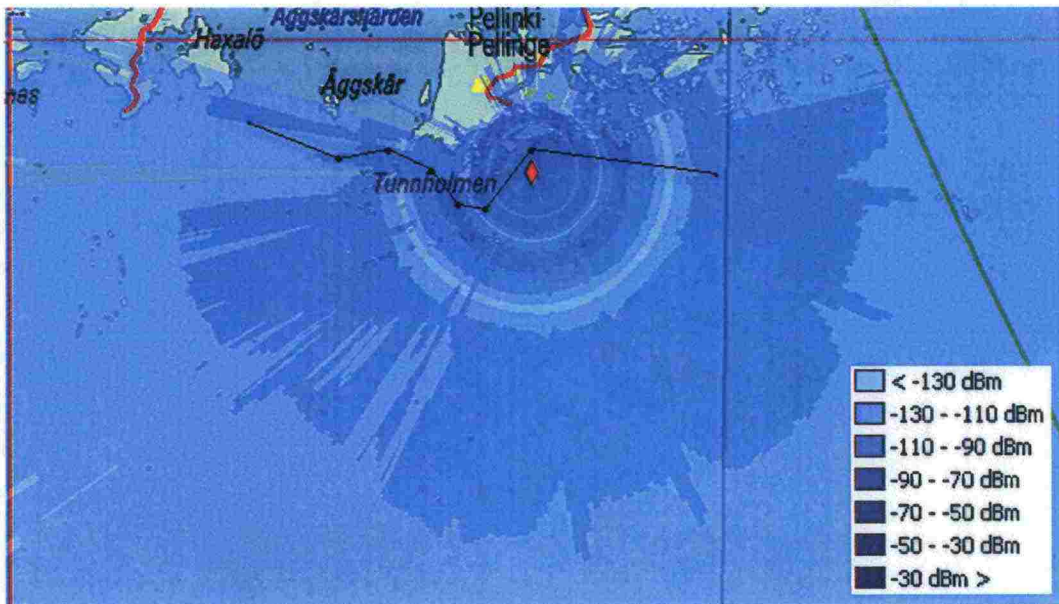
Kuva 31. Tehorasteri esimerkkitutkalla 3 GHz:n taajuudella VV-polarisaatiolla.

9 GHz:n taajuuden tapauksessa tutkamerkin näkyvyys väylälle on hyvä. Koko tarkasteltava väyläosuus sijaitsee minimikohta-alueiden ulkopuolella.



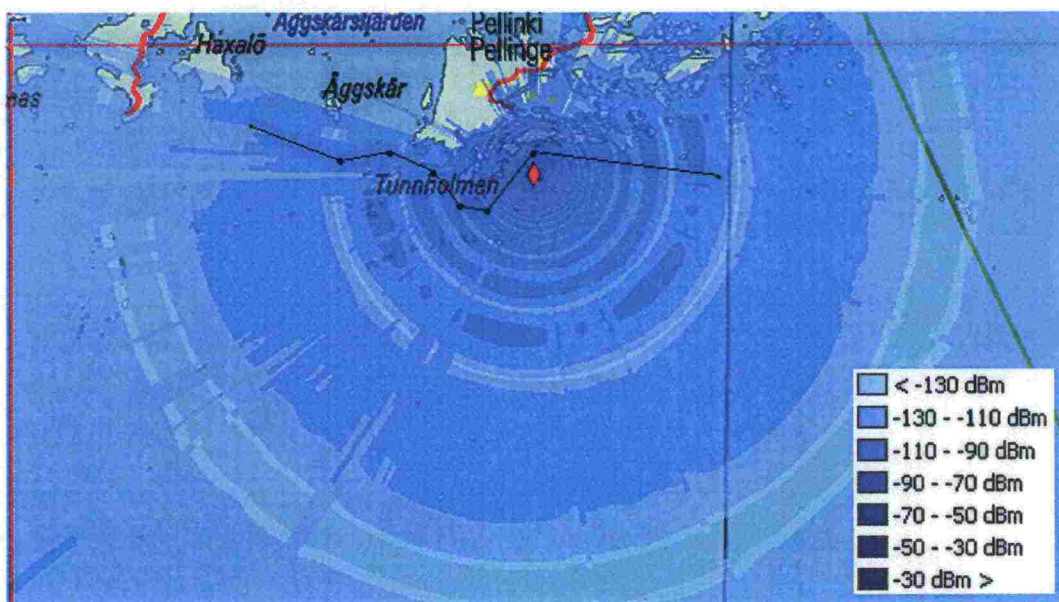
Kuva 32. Tehorasteri esimerkkitutkalla 9 GHz:n taajuudella VV-polarisaatiolla.

Seuraavassa kuvassa on esitetty tehoresteri 3 GHz:n taajuudella ja HH-polarisaatiolla. Polarisaation vaihtaminen kasvattaa hiukan tehotasoa ja sivukeilojen aiheuttamat piikit näkyvät selvemmin tehoresterissa.



Kuva 33. Tehorasteri esimerkkitutkalla 3 GHz:n taajuudella HH-polarisaatiolla.

9 GHz:n taajuuden tapauksessa polarisaation vaihto ei merkittävästi muuta tuloksia. Kääntökohdat ovat edelleen minimikohta-alueiden ulkopuolella. Tehorasterin reuna-alueilla olevat arvot tasoittuvat hiukan, mutta leveä minimikohta-alue 15 km päässä tutkamerkistä säilyy edelleen. Tutkamerkin näkyvyys väylälle on hyvä.



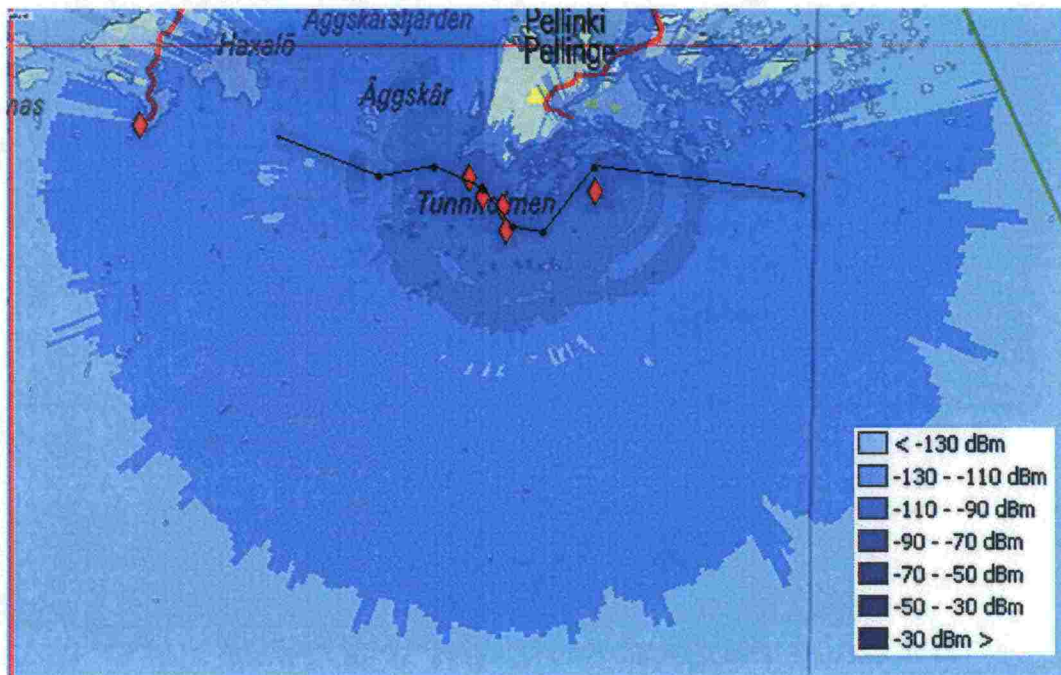
Kuva 34. Tehorasteri esimerkkitutkalla 9 GHz:n taajuudella HH-polarisaatiolla.

6.1.6 Yhteenveto

Kaikkien tutkamerkkien tehorastereissa esiintyy rengasmaisia minimikohta-alueita. Minimiarvot perustuvat yhteen SeaState-arvoon, joten pitkälle meneviä johtopäätöksiä minimikohtien syvyyksistä ja paikoista ei voida yhden laskennan pohjalta tehdä. Näiden alueiden vaikutusta voidaan pienentää sijoittamalla turvalaitteisiin toinen tutkaheijastin. Se on asennettava riittävän etäälle olemassa olevasta tutkaheijastimesta, jotta kerroksellisille tutkaheijastimille ominaista

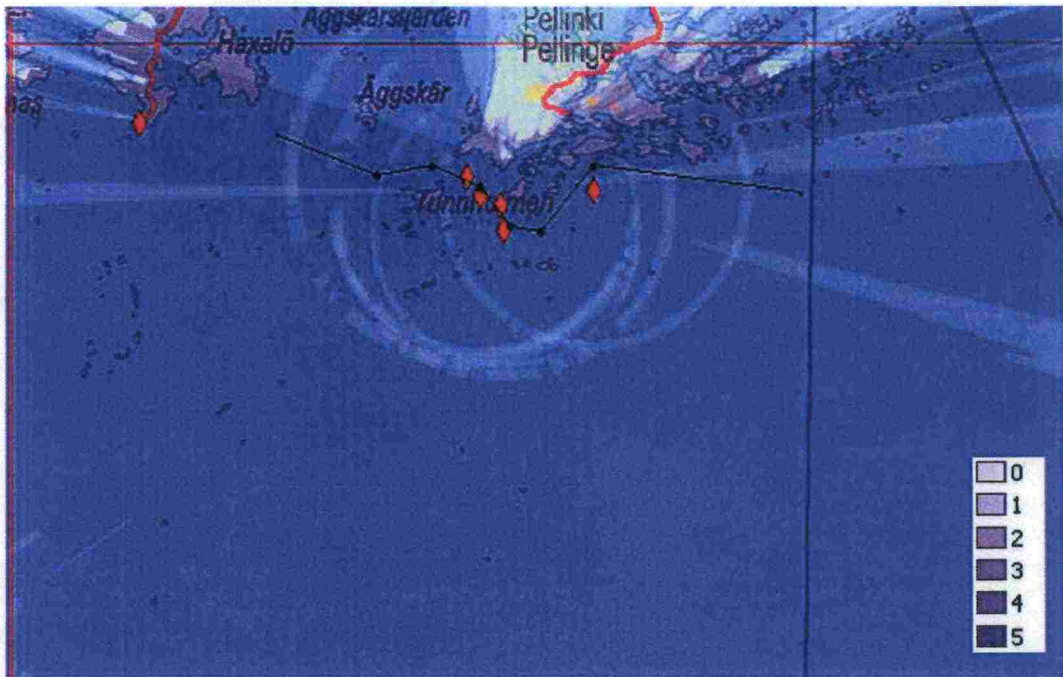
sirontakuvion liuskoittumista ei tapahtuisi. Kaava, jolla heijastinten välinen etäisyys voidaan laskea, on esitetty tutkimusraportissa [11]. Esimerkkitapauksissa tämä on muutaman metrin luokkaa.

Nykyisellä turvaheijastinmallilla ja niiden sijoittelulla kyetään kattamaan hyvin mahdolliset minimikohta-alueet. Tarkasteltaessa kuvassa 35 esitettyä tutkamerkkien yhteistä tehorasteria nähdään, ettei väylältä löydy sellaisia alueita, missä ei yhtään tutkamerkkiä näkyisi.



Kuva 35. Tutkamerkkien yhteinen tehorasteri 3 GHz:n taajuudella ja HH-polarisaatiolla.

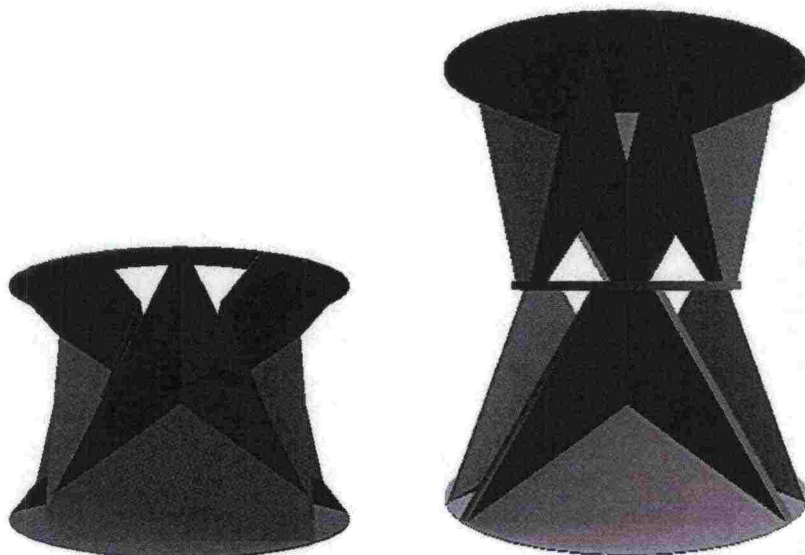
Kysymys on pikemminkin se, kuinka monta tutkamerkkiä tulee minimissään näkyä, jotta turvallinen liikkuminen väylällä voidaan varmistaa. Kuvassa 36 on esitetty lukumäärätiedot, kun vastaanottotehon kynnyksäraja-arvona on käytetty -130 dBm.



Kuva 36. Näkyvien tutkamerkkien lukumäärät tehorasteri 3 GHz:n taajuudella ja HH-polarisaatiolla.

Katvealueiden osalta on syytä muistaa, ettei laskennoissa ole huomioitu kasvillisuuden tai puuston vaikutusta. Lisäksi maaston mallintamiseen liittyy epätarkkuustekijöitä.

Seuraavaksi vertailtiin tutkaheijastinmallin vaikutusta laskentatuloksiin Tredjedelskubb-tutkamerkin tapauksessa. Vertailtaviksi tutkaheijastinmalleiksi valittiin edellisessä projektissa [3] kehitetty TH750-malli ja käytössä oleva Pova3Dma-malli. Laskennassa käytetyt 3D-mallit on esitetty kuvassa 37. Kuvassa tutkaheijastinmallien mittasuhteet eivät ole samat. Tarkat mitat on esitetty taulukossa 5.



Kuva 37. Tutkaheijastinmallit TH750 ja Pova3Dma.

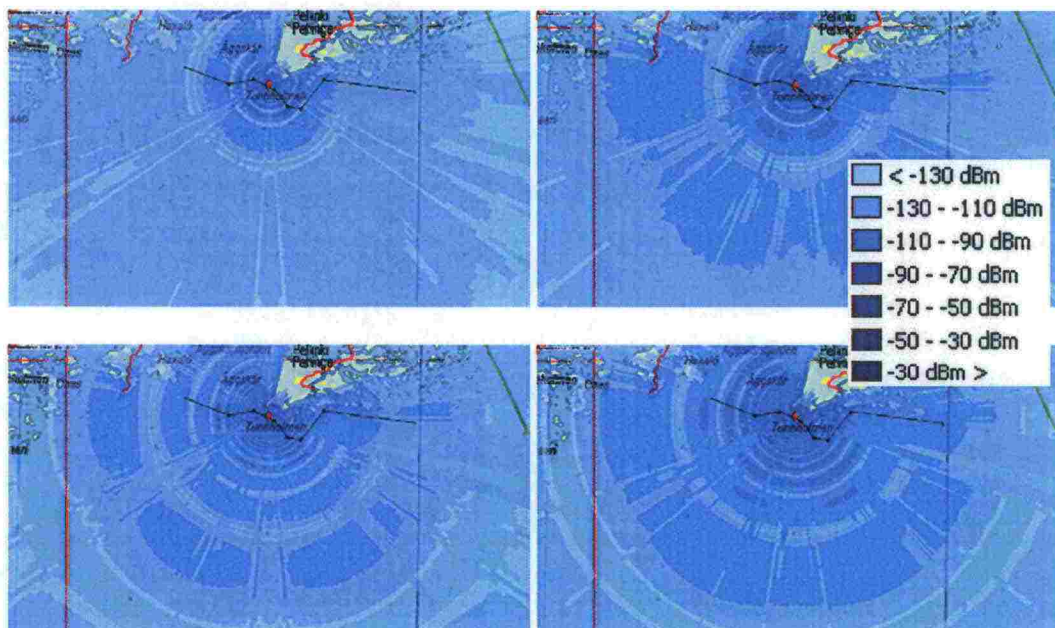
TH750-mallissa soppeja on kuusi kuten Pova3Dma-mallissa. Ne on sijoitettu samaan kerrokseen vuorotellen kärki ylöspäin ja kärki alaspäin, kun taas Pova3Dma-mallissa sopet ovat kahdessa kerroksessa. Tällöin soppien väliin jää

suuremmat aukot kuin TH750-mallissa. Pova3Dma-malli on selvästi TH750-mallia kookkaampi. Korkeuseroa mallien välillä on 1,537 m ja ulkohalkaisijaeroa 0,64 m. Kokoeron takia myös sopet ovat Pova3Dma-mallissa merkittävästi suuremmat kuin TH750-mallissa.

Taulukko 5. Mallien TH750 ja Pova3Dma mitat ja ominaisuudet.

Malli	TH750	Pova3Dma
Korkeus	1076 mm	2613 mm
Ulkohalkaisija	1690 mm	2330 mm
Sisähalkaisija	1260 mm	1750 mm
Sopen korkeus	750 mm	1306,5 mm
Materiaali	teräs	teräs

Vertailua varten laskettiin tehorerit 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla ja VV-polarisaatiolla. Kuvassa 38 on esitetty laskennan tulokset. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty TH70-mallin ja oikeanpuoleisessa Pova3Dma-mallin tulokset. Ylemmissä kuvissa esitetään tehorerit 3 GHz:n taajuudella ja alemmissä 9 GHz:n taajuudella.



Kuva 38. TH750-mallilla (vas.) ja Pova3Dma-mallilla(oik.) lasketut tehorerit esimerkkitutkalla 3 GHz:n (ylh.) ja 9 GHz:n (alh.) taajuudella VV-polarisaatiolla.

Tutkapaikkipinta-ala riippuu eniten tutkaheijastimen poikkipinta-alasta. Tästä syystä on selvää, että Pova3Dma-mallin tutkaheijastimen tehotaso on suurempi kuin TH750-mallin. Kuvien 6 ja 7 sirontakuvioiden vaakaleikkauksista nähdään, että Pova3Dma-malli toimii hyvin vaakatassossa. Näin ollen merkittäviä eroja säteilykuvioon ei synny sen ja TH750-mallin välillä. Kuvassa 37 havaittavat symmetriaerot johtuvat pääasiassa väriarvojen skaalauksesta. Molemmissa tapauksissa on käytössä vain yksi tutkaheijastin, joten minimikohtarenkaat esiintyvät tehoresterissa samoissa paikoissa. TH750-mallin tapauksessa minimikohtarenkaat ovat leveämpiä johtuen selvästi alemmasta keskimääräisestä tehotasosta.

6.2 VTS-aseman S- ja X-kaistan tutkien näkyvyys

Seuraavaksi tarkasteltiin suuren rannikkoalueksen näkyvyyttä VTS-aseman S-kaistan ja X-kaistan tutkissa. Tutkaan liittyvät sijainti-, korkeus- ja ominaisuustiedot on saatu Merenkululaitokselta. Vastaanotetun tehon minimirajaksi on laskennoissa asetettu -150 dBm ja laivan tutkaherätekorkeudeksi 12 m.

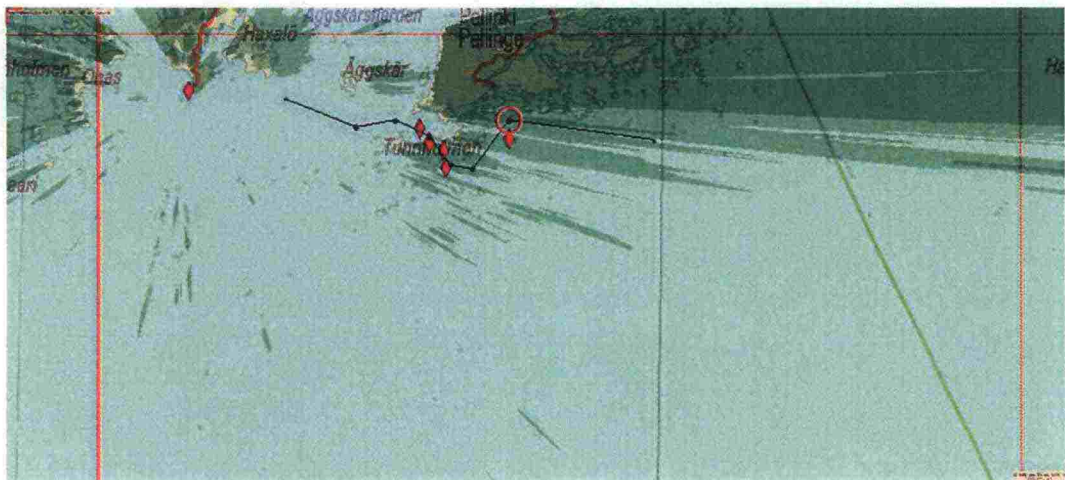
6.2.1 Emäsalon VTS-aseman tutka

Kuvissa 39 ja 40 on esitetty näkyvyysrasterit Emäsalon S- ja X-tutkille. Ensimmäisessä kuvassa on S-tutkan näkyvyysrasteri tutkakorkeudella 51 m. Kuvasta nähdään, että vain suuret saaret, Emäsalo, Grevensgrund ja Pellinki, ovat riittävän korkeita aiheuttamaan katvealueita. Muut alueen saaret ovat matalia. Pahimmassa tapauksessa ne estävät heijastusreitit vedenpinnan kautta. Kuvasta nähdään myös, ettei maapallon kaareutumisesta aiheudu katvetta käytetyillä laskentakorkeuksilla. Tarkasteltavista tutkamerkeistä Svarthällen, Gloscholsgrund ja Låghällan ovat Tunnholmenin saaren takana siten, ettei vedenpintaheijastus ole mahdollinen. Väylän käänköhdistä oikeanpuoleisin (punaisella ympyrällä merkitty) jää Pellinki-saaren katveeseen ja Tunnholmen-saari estää vedenpintaheijastuksen kahden edellisen käänköhdan läheisyydessä.



Kuva 39. VTS-aseman tutkan näkyvyysrasteri 51 m tutkakorkeudella (S-kaista).

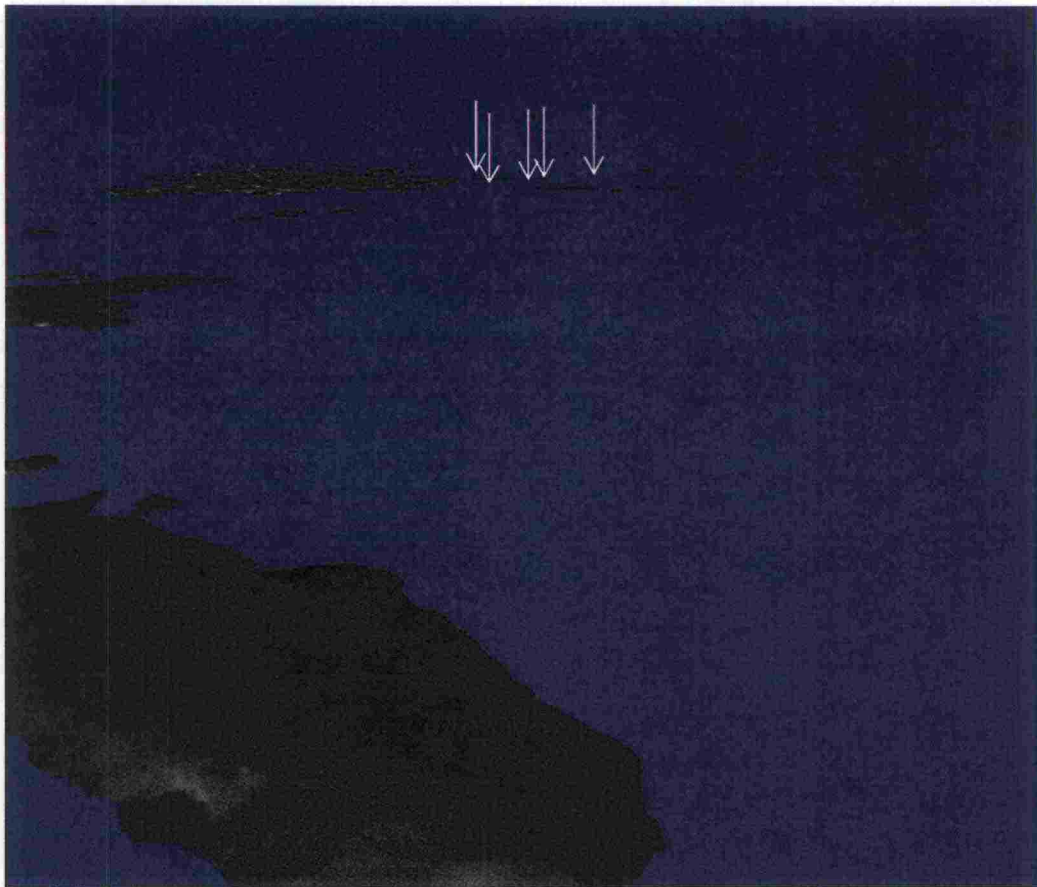
Toisessa kuvassa on X-tutkan näkyvyysrasteri tutkakorkeudella 53,5 m. Korkeuserolla ei ole mainittavaa vaikutusta näkyvyysrastereihin.



Kuva 40. VTS-aseman tutkan näkyvyysrasteri 53,5 m tutkakorkeudella (X-kaista).

Eräs seikka, mikä näkyy molemmissa näkyvyysrastereissa, on rastereihin syntyneet terävät varjot. Tämä johtuu siitä, että saaret on mallinnettu tasokolmioilla, jolloin saarten pyöreät muodot eivät tule riittävän hyvin esille. Tästä syystä varjot ovat hyvin teräviä. Todellisuudessa katvealueeseen vaikuttaa myös saaria peittävä puusto ja kasvillisuus.

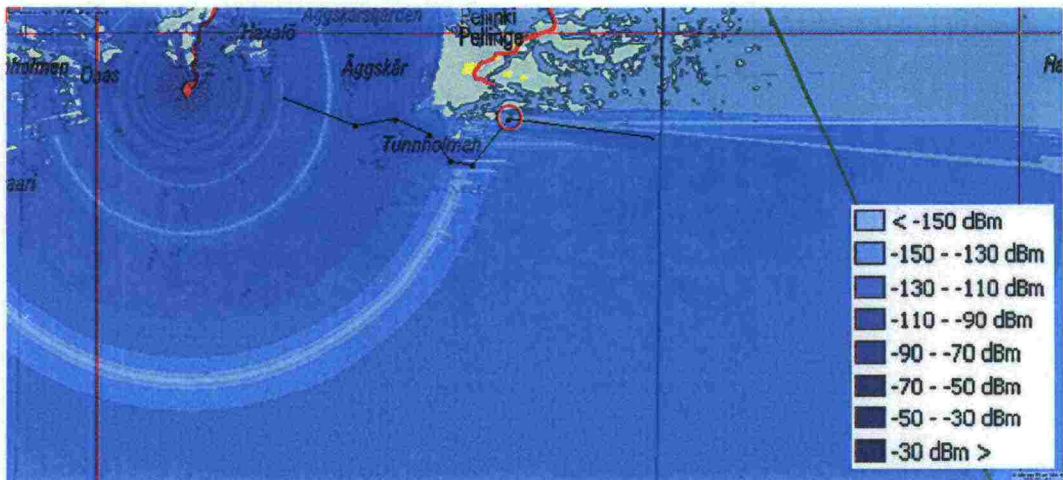
Kuvassa 41 on esitetty 3D-näkymä Emäsalon VTS-asemalta valittujen tutkamerkkien suuntaan (tutkamerkkien sijaintipaikat esitetty nuolilla). Katselukorkeus kuvassa on merkittävästi käytettyä tutka-antennikorkeutta suurempi, jotta saaret ovat helpommin tunnistettavissa. Kuvassa ei ole huomioitu puuston vaikutusta.



Kuva 41. Näkymä 3D-ympäristömallista Emäsalosta tarkasteltujen tutkamerkkien suuntaan.

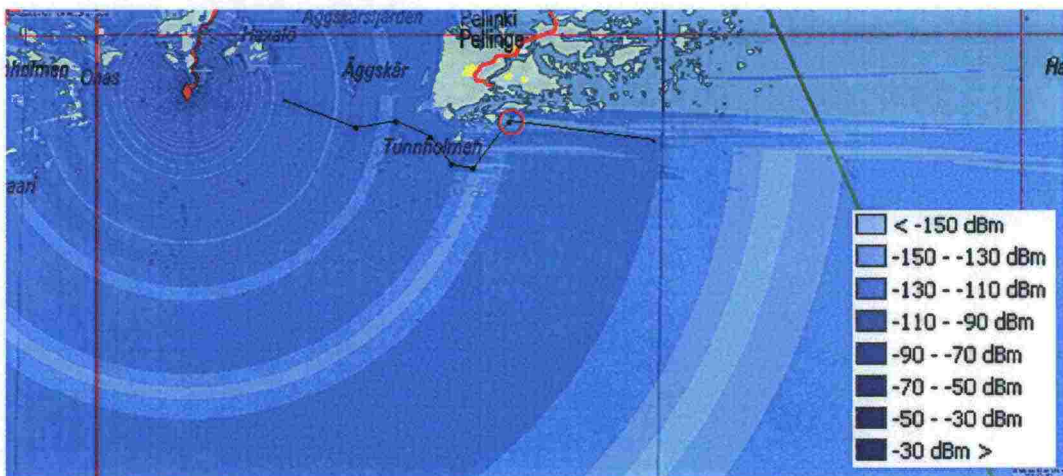
Tutkamerkeistä Svarthällen, GlosHolmsgrund ja Låghällan ovat Tunholmenin saaren takana siten, ettei vedenpintaheijastus ole mahdollinen. Todennäköisesti puuston huomiointi voisi johtaa myös suoran näköyhteyden katoamiseen.

Kuvassa 42 on esitetty Emäsalon VTS-aseman S-tutkan tehorasteri VV-polarisaatiolla. Kuvasta näkyy selvästi, että tutka-antennissa on käytetty isotrooppista säteilykuviota. Tehorasteri on kaikkiin suuntiin säännöllinen. Ainoastaan ympäristön aiheuttamat katvealueet synnyttävät rasteriin epäsymmetrisyyttä. Kuvassa oikeanpuoleisin käänköskohta on Pellinki-saaren katveessa. Lisäksi leveä minimikohtarengas peittää lähes kokonaan suoran väyläosuuden Tunholmen-saaren eteläpuolella.



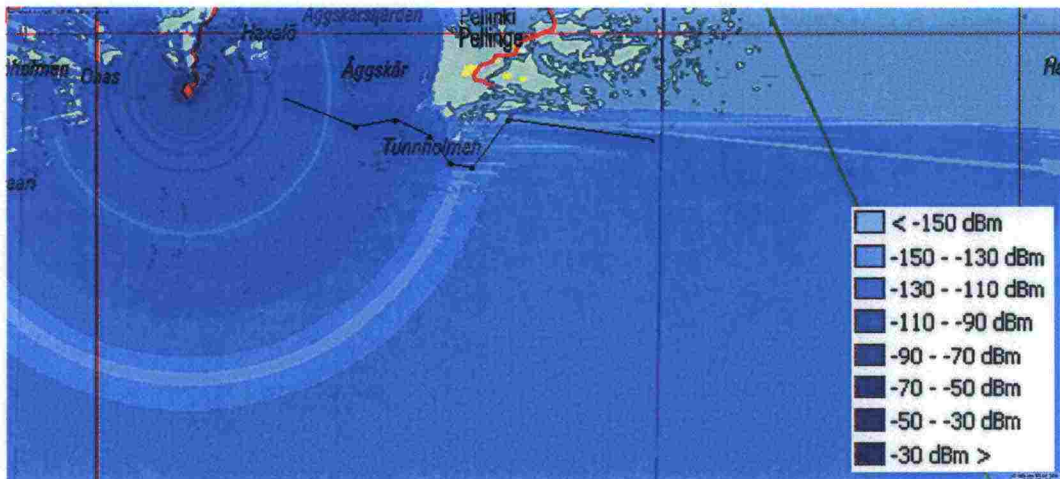
Kuva 42. VTS-aseman S-tutka ja VV-polarisaatio.

VTS-aseman tapauksessa oletetaan, että S- ja X-tutkan lähetysteho ja vahvistus on sama. Tästä syystä keskimääräinen tehotaso X-tutkan rasterissa on alhaisempi kuin S-tutkan rasterissa. Pudonnut tehotaso näkyy kuvassa vaaleansinisen värin osuuden kasvuna. Lisäksi X-tutkan rasterissa minimikohtarenkaat esiintyvät tiheämmin. Kuvasta havaitaan, että X-tutkan tapauksessa minimikohta-alue on siirtynyt hiukan Tunnsolmenin saaren eteläpuolella, mutta toinen käänköhdistä jää edelleen minimikohta-alueelle. Punaisella ympyrällä merkitty käänköhta pysyy myös X-tutkan tapauksessa katvealueella.



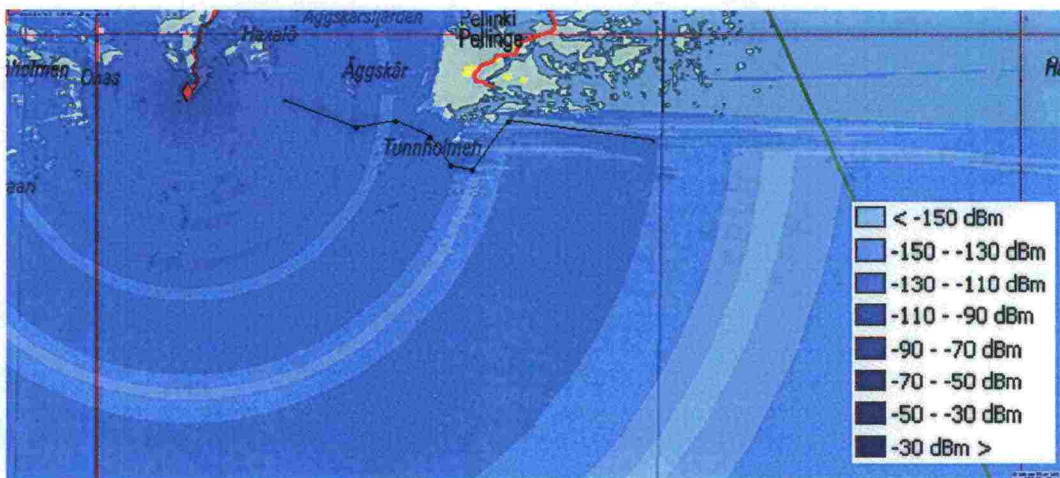
Kuva 43. VTS-aseman X-tutka ja VV-polarisaatio.

Seuraavassa kuvassa on esitetty tehorrasteri S-tutkalla ja HH-polarisaatiolla. Polarisaation vaihto kasvattaa hiukan tehotasoja. Sen tuloksena minimikohtarenkaat kaventuvat ja niiden tehotaso nousee yli -150 dBm:n. Minimikohtien sijainti on sama kuin VV-polarisaation tapauksessa.



Kuva 44. VTS-aseman S-tutka ja HH-polarisaatio.

Polarisaation vaihtaminen X-tutkan tapauksessa ei merkittävästi muuta tehorasteria.



Kuva 45. VTS-aseman X-tutka ja HH-polarisaatio.

6.2.2 Yhteenveto

Emäsalon VTS-aseman tutkista tehdyt laskennat osoittavat, että mahdollisia katvealueita syntyy suurten saarien, Emäsalon ja Pellingin, taakse. Kummankin tutkan tapauksessa syntyy minimikohta-renkaita ja yksi niistä leikkaa leveänä suoraa väyläosuutta Tunnholmenin saaren eteläpuolelle. VTS-aseman tapauksessa tulokset ovat suuntaa-antavia, koska yksityiskohtaista tietoa tutka-antennin ominaisuuksista esim. pienimmästä vastaanottotehosta ei ollut saatavilla. Tutkanäkyvyyteen vaikuttaa myös saarten kasvillisuus ja puusto. Tulokset antavat kuitenkin osviittaa mahdollisista ongelma-alueista, joissa tarkempi tarkastelu olisi tarpeen joko mittauksin tai käytännön kokeina.

7 Jatkokehityskohteita

Sääolosuhteet vaikuttavat turvalaitteiden ja VTS-aseman tutkanäkyvyyteen. IALA:n suosituksista ja kirjallisuudesta löytyy laskentamalleja, jotka ottavat huomioon sääolosuhteiden vaikutukset. Yhdistämällä näihin mm. Ilmatieteen

laitoksen ylläpitämää tilastollista tai reaaliaikaista säätietoa on mahdollista arvioida turvalaitteiden tutkanäkyvyyttä erilaisissa sääolosuhteissa kuten sumussa tai lumisateessa. Tutkanäkyvyyteen vaikuttaa myös saarten puusto ja kasvillisuus. Niiden vaikutus on sääolosuhteita staattisempi. Maanmittauslaitokselta saatavan kasvillisuus- ja puustotiedon avulla on mahdollista mallintaa tarkemmin ympäristön aiheuttamia katvealueita. Todennäköisesti myös Fresnelin vyöhykkeiden huomiointi tutka-aaltojen esteettömän etenemisen mallintamisessa parantaisi laskentatarkkuutta. Tämä kuitenkin vaatii tarkempaa tietoa Fresnelin vyöhykkeiden käyttäytymisestä 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuusalueilla. Tähän liittyvää tutkimusaineistoa on saatavilla kirjallisuudesta.

Analyysissä rajoituttiin mallintamaan tutka-aallon etenemistä suoraan ja vedenpinnan kautta. Analyysissä ei huomioitu ympäristön aiheuttamaa tutkaherätettä, tutka-aallon sivuttaista monitie-etenemisestä tai sen taipumista terävistä maastomuodoista. Ympäristön aiheuttaman tutkaherätteen ennustaminen on tarpeen, jos pyritään mallintamaan tutkan toimintaa. Merkittävin haaste tälle on tutkalaitteista saatavan tiedon rajallisuus. Tutka-antennin tarkempi mallintaminen on mahdollista tehdä mm. hyödyntämällä Blaken taulukkoa ja laskentakaavoja. Tämä kuitenkin edellyttää tutkalaitekohtaisten ominaisuustietojen saamista tutkavalmistajilta, mikä on osoittautunut varsin hankalaksi.

On hyvin todennäköistä, että ajan myötä ylläpidettävien tulosrastereiden määrä kasvaa suureksi ja tulosten hallinta tiedostopohjaisella järjestelmällä tulee ongelmalliseksi. Ratkaisuna tähän on laskentaparametrien ja laskentatulosten tallentaminen tietokantaan, josta ne ovat haettavissa eri kunnossapito-, suunnittelu- ja riskinhallintasovelluksiin. Merenkululaitoksella on käytössä Oracle-tietokanta, johon olisi mahdollista toteuttaa tarvittavat tietokantataulut. Tämä helpottaisi myös laskentatulosten visualisointia, koska useat GIS-ohjelmistot, mukaan lukien ArcGIS, tukevat tietokantahakuja Oracle-tietokannasta.

Merenkululaitoksen kanssa käytyjen keskustelujen pohjalta tärkeänä jatkokehityskohteenä nähdään laskentatulosten hyödyntäminen suunnitteluvaiheessa väylien rakennus- ja kunnossapitokustannuksien pienentämiseksi. Mahdollisia säästöjä saadaan aikaiseksi vertaamalla turvamerkkien sijoitusvaihtoehtoja ja mitoitusratkaisuja mm. asennuskorkeutta, tutkaheijastimen kokoa ja mallia. Laskentatulosten avulla suunnittelusta voidaan tehdä systemaattisempaa ja kokonaisvaltaisempaa.

8 Yhteenveto

Projektin tuloksena on kehitetty laskentamalli, jonka avulla voidaan arvioida turvalaitteiden näkyvyyttä erilaisissa ympäristöissä. Maanmittauslaitokselta saadun kartta-aineiston avulla on mahdollista luoda riittävän tarkka 3D-ympäristömalli ympäristön aiheuttamien katvealueiden mallintamiseen. Turvalaitteen tutkanäkyvyydestä saadaan varsin hyvä approksimaatio yhdistämällä tutkaheijastimen sironta-arvot, maapallon kaarevuus, vedenpintaheijastus ja etenemisvaimennus. Laskentamallin avulla on mahdollista vertailla eri tutkaheijastinmallien vaikutusta tutkamerkin näkyvyyteen ja hyödyntää tätä tietoa heijastinten mitoituksessa.

Laskentatuloksista havaitaan, että tarkastelluissa turvalaitteissa käytetty tutkaheijastinmalli synnyttää minimikohtarenkaita, joiden tiheys riippuu käytetystä taajuudesta. Nämä minimikohtat voidaan eliminoida asentamalla kaksi tutkaheijastinta turvalaitteeseen siten, että ne ovat riittävän etäällä toisistaan, jottei monikerroksiselle tutkaheijastinmallille ominaista sirontakuvion liuskoittumista tapahdu. Laskentatulokset osoittavat, että pistesirontajamalli soveltuu myös pienille ja matalille luodoille tai saarille sijoitettujen kiinteiden tutkamerkkien laskentaan. Suurten saarten tapauksissa on käytettävä monisirontajamallia. Sen tuloksiin liittyy kuitenkin enemmän epävarmuustekijöitä ja tulosten verifiointi on vaikeaa.

Suurten rannikkolaivojen tutkanäkyvyyden arviointi Emäsalon VTS-aseman S- ja X-kaistan tutkissa on haastava ongelma. Siihen liittyy paljon epävarmuustekijöitä. Ensiksikin tarkkaa tietoa suurten rannikkolaivojen tutkapoikkipinta-aloista ei ole saatavilla, vaan on tyydyttävä tilastollisiin arvoihin. Laivan asento ja sen synnyttämä tutkaheräte muuttuu laivan kulkiessa pitkin väylää. Toiseksi VTS-aseman tutkien teknisistä ominaisuuksista, mm. vastaanottotehoista, ei ole saatavilla riittävästi tietoa. Pyörivät tutka-antennit mallinnettiin isotrooppisina säteilijöinä, jolloin tehoresteista tuli hyvin symmetrisiä. Rajoituksista huolimatta laskentatulokset antavat osviittaa siitä, missä mahdollisia ongelma-alueita esiintyy niin ympäristön aiheuttamien katveiden kuin etäisyydestä johtuvien tutka-aallon minimikohtien muodossa.

Kaikkia mahdollisia häiriötekijöitä ei laskennassa ole huomioitu eikä ole tarpeenkaan. Mallinnustarkkuus riippuu pitkälti siitä, miten laskentatuloksia on tarkoitus hyödyntää. Esimerkiksi pelkästään katvealueiden visualisointi antaa jo arvokasta tietoa mahdollisista ongelma-alueista. Tätä voidaan tarkentaa hyödyntämällä esim. puusto- ja kasvillisuustietoa. Yhdistämällä tietoa erilaisten tutkaheijastinmallien sirontaominaisuuksista saadaan arvio siitä, kuinka tietäntyyppinen tutkamerkki toimii tietyssä käyttöympäristössä. Tutkalaitekohtaisia eroja voidaan selvittää tutkalaitekohtaisten parametrien avulla. Mallinnuksesta saadaan tilannekohtainen ottamalla huomioon vuorokaudenaika ja sääolosuhteet. Käytännössä mallinnus normaaleissa ja vaativissa olosuhteissa riittää.

Tutkanäkyvyyden mallintamisesta saadaan lisätietoa väyläsuunnittelun tueksi. Tulosten avulla on mahdollista arvioida väylällä olevien turvalaitteiden toimivuutta/tarpeellisuutta sekä niihin liittyviä riskitekijöitä. Mallinnustulosten avulla voidaan kokonaisvaltaisemmin ja systemaattisemmin vertailla turvalaitteiden sijoituspaikkoja sekä suunnitella ja mitoittaa tutkaheijastimia käyttötarpeen mukaan. Suunnittelun kautta voidaan vaikuttaa rakennus- ja ylläpitokustannuksiin. Samalla laskentamenetelmä tuottaa yksityiskohtaisempaa tietoa mm. riskinhallintaan.

Lopuksi on syytä vielä muistuttaa, että analyysin tulokset ovat suuntaa-antavia. Jotta analyysin tuloksia voi hyödyntää esimerkiksi tutkamerkkien sijoittelun tai väyläliikenteen turvallisuuden arvioinnin tukena, ovat tulokset ensiksi syytä verifioida joko mittauksin tai käytännön kokeilla.

Lähdeviitteet

- [1] Hujanen, A., Backman, W., Tuomimäki, L., Toivanen, H., Horsmanheimo, S., Tutkaheijastimien analysointi, Tutkimusraportti Merenkululaitokselle, VTT Tietotekniikka, 3.9.2004, 39 s.
- [2] Hujanen, A., Backman, W., Tuomimäki, L., Toivanen, H., Horsmanheimo, S., Tutkaheijastinprototyypin laskenta, Tutkimusraportti Merenkululaitokselle, VTT Tietotekniikka, 20.4.2005, 61 s.
- [3] Hujanen, A., Backman, W., Tuomimäki, L., Hagberg, V-M, Toivanen, H. ja Horsmanheimo, S., Tutkaheijastimen laskenta: Itätoukki ja Länsitoukki, VTT, 28.4.2006, 27 s.
- [4] <http://www.vtt.fi/cast>
- [5] Sea State Definition Table (Pierson - Moskowitz Sea Spectrum), <http://www.oceandata.com/support/Sea%20State%20Table.htm>
- [6] IALA Recommendation V-128 on Operational and Technical Performance Requirements for VTS Equipment, Edition 2.0, June 2005
http://site.ialathree.org/pages/publications/documentspdf/doc_64_eng.pdf
- [7] Barton, D., Modern Radar System Analysis. Artech House, Dedham, USA, 1988.
- [8] Knott E. F., Shaeffer J. F., Tuley M. T., Radar Cross Section, 2. painos, Artech House, 1993.
- [9] Long M. W., Radar Reflectivity of Land and Sea, 3. painos, Artech House, 2001.
- [10] Wilson, H., Leong, H., An estimation and verification of vessel radar-cross-sections for HF Surface Wave Radar, Proceedings of the International Radar Conference, 3.-5.9.2003, s. 711-716.
- [11] Hujanen, A., Backman, W., Toivanen, H., Tuomimäki, L., Horsmanheimo, S., Laskennat uusilla tutkaheijastinmalleilla, Tutkimusraportti Merenkululaitokselle, VTT Tietotekniikka, 15.8.2005, 34 s.

