

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond

Erko Kulu 163255IATM

**SENIITKIIRGUSEGA SIDE EESTI
TINGIMUSTES (300 kHz – 30 MHz)**

Magistritöö

Juhendaja: Ivo Mürsepp
Doktor

Tallinn 2018

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Erko Kulu

01.05.2018

Annotatsioon

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on uurida seniitkiirgusega sidet ja selle kasutusvõimalusi Eesti tingimustes, leides optimaalsed sidevõrgu parameetrid ning tehes soovitusi selle kasutamiseks.

Magistritöö ühe osana uuritakse ionosfääri levitingimusi Eesti kohal ning tehakse soovitusi nende lugemiseks ionosondide baasil. Samuti käsitletakse seniitside antenne ja nende paigaldusmeetodeid viidates antennide õige paigalduse olulisusele. Täiendavalt viiakse läbi hulgaliselt simulatsioone kolme erineva signaali levi arvutuse tarkvaraga käsitledes levitingimusi erinevatel aastaegadel 2018 aasta baasil. Teooria paikapidavuse hindamiseks viiakse läbi sidetestid statsionaarsete poollaine dipoolidega ja sõidukile paigaldatavate antennidega. Side testid viiakse läbi kahes etapis, millest esimene osa teostatakse 2018 jaanuaris Põhja-Eestis ning teine osa 2018 märtsis Lõuna-Eestis. Magistritöö lõpuks antakse hinnang seniitside kasutatavusele Eesti tingimustes.

Lõputöö on kirjutatud Eesti keeles ning sisaldab teksti 60 leheküljel, 7 peatükki, 40 joonist ja 16 tabelit.

Võtmesõnad: Ruumilaine side, seniitside, NVIS, ionosfäär, seniitside antenn, lühilaine simulatsioonid.

Abstract

Near Vertical Incidence Skywave in Estonian conditions (300 kHz – 30 MHz)

The master's thesis paper „Near Vertical Incidence Skywave in Estonian conditions (300 kHz – 30 MHz)” introduces the high frequency ionospheric communication methods in Estonian environment.

The purpose of this thesis is to investigate the Near Vertical Incidence Skywave (NVIS) as a communication mean and in same time to find the most optimal parameters for transmission in Estonian conditions. The paper will introduce the ionosphere and ionospheric layers where signal reflection occurs. In same time it will introduce how ionosondes will help to describe the ionospheric conditions for communication in Estonia. The paper will also look into NVIS antennas and how the installation methods are affecting the communication. Therefore different methods are analysed for antennas and recommendations for optimal installations are made.

Furthermore several signal propagation simulations are made with three different simulation softwares in order to find optimal frequencies for transmission and to evaluate the network reliability during different seasons of the year based on 2018. Finally several communication field tests are carried out in northern and southern Estonia to evaluate the validity of the theory.

The thesis is in Estonian and contains 60 pages of text, 7 chapters, 40 figures and 16 tables.

Keywords: Sky wave, Near Vertical Incidence Skywave, NVIS, Ionosphere, NVIS antenna, signals propagation simulations.

Lühendite ja mõistete sõnastik

ALE	<i>Automatic Link Establishment</i> , automaatne sagedusvaliku protokoll
AM	<i>Amplitude modulation</i> , amplituud modulatsioon
dB	<i>Decibel</i> , detsibell
dB _i	<i>Antenna gain relative to isotropic radiator</i> , antennivõimendus isotroopse kiirgaja suhtes
dBW	<i>Decibel Watt</i> , detsibelli ühe vatti kohta
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i> , ekvivalentne isotroopne kiirgusvõimsus
f_0	<i>Critical frequency</i> , kriitiline sagedus
FOT	<i>Frequency of Optimal Transmission</i> , optimaalne saatesagedus
GHz	Gigaherts
hmF2	Ionosfääri F2 kihi kõrgus maapinnast (km)
kbps	<i>Kilobits per second</i> , kilobitti sekundis
kHz	Kiloherts
km	Kilomeeter
LQA	<i>Link Quality Analysis</i> , sidelingi kvaliteedi analüüs
LUF	<i>Lowest Usable Frequency</i> , madalaim kasutatav sagedus
Mbps	<i>Megabits per second</i> , megabitti sekundis
MHz	Megaherts
MUF	<i>Maximum Usable Frequency</i> , kõrgeim kasutatav sagedus
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> , USA ookeanite ja atmosfääri teadusagentuur
NVIS	<i>Near Vertical Incident Skywave</i> , seniitside
PSK	<i>Phase Shift Keying</i> , faasinihke modulatsioon
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> , kvadratuur amplituud modulatsioon
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> , signaali ja müra suhe
SSB	<i>Single Side Band</i> , ühekülgribaga signaal AM modulatsioonis
SSN	<i>Sunspot Number</i> , päikeseplekide arv

UTC

Coordinated Universal Time, universaalaeg

W

Vatt

λ

Lainepikkus

Sisukord

1 Sissejuhatus	12
1.1 Taust ja probleem	12
1.2 Ülesande püstitus	13
1.3 Ülevaade tööst	14
2 Ruumilaine side	15
2.1 Üldtuntud ruumilaine side	15
2.2 Seniitside kui ruumilaine erivorm	17
3 Ionosfäär	19
3.1 Ionosfääri ehitus	19
3.2 Kihitide kriitilised sagedused	20
3.3 Ionosondid	22
3.4 Päikese aktiivsuse tsüklid	25
4 Seniitside antennid.....	27
4.1 Antenni kõrguse valik.....	27
4.2 Antenni peakiire suund ja optimaalne kaldenurk	29
4.3 Seniitside antennid sõidukil kasutamiseks	33
5 Levimudeli simulatsioonid	36
5.1 ITURHFProp	38
5.2 VOACAP.....	43
5.3 MARSsys.....	48
5.4 Simulatsioonide tulemuste võrdlus.....	52
6 Testmõõtmised	53
6.1 Sidetestid sõiduki varrasantenniga	53
6.2 Sidetestid sõiduki raamantenniga	57
6.3 Sidetestid statsionaarsete dipoolantennidega.....	59
7 Kokkuvõte	63
Kasutatud kirjandus	66
Lisa 1 – Ionosondide vaatluste tulemused.....	68
Lisa 2 – ITURHFProp simulatsioonid.....	74

Lisa 3 – VOACAP simulatsioonid	83
Lisa 4 – MARSsys simulatsioonid	93
Lisa 5 - Mürataseme mõõdistuses Tartus	98
Lisa 6 - Sidetestide tulemused 27. – 28.03.2018	100

Jooniste loetelu

Joonis 1. Pinnalaine ja ruumilaine [2].	16
Joonis 2. Seniitside – kiirgus suunatakse ionosfääri vertikaalselt [7].	18
Joonis 3. Ionosfääri kihid ja elektronide kontsentratsioon kihtides päevasel ajal [8]. ...	19
Joonis 4. Ionosfääri kihtide päevane ja öine muutus [10].	20
Joonis 5. Ionosondide asukohad ülemaailmselt [12].....	23
Joonis 6. Eestile lähimad ionosondid [12].....	23
Joonis 7. Päikese plekkide arv viimased 13 aastat [14].....	26
Joonis 8. Horisontaalse poolaine dipooli võimenduse ja suunadiagrammi sõltuvus antenni paigalduskõrgusest võrreldes isotroopse antenniga (dBi) [7].....	28
Joonis 9. Antenni võimenduse sõltuvus paigalduskõrgusest erineval pinnasel [7].	28
Joonis 10. Seniitside katteala arvutamise lihtsustatud joonis koos valemiga [15].	31
Joonis 11. Antenni kiirguse kaldenurga sõltuvus levikaugusest 3,5 MHz juures [7].	32
Joonis 12. Antenni kiirguse kaldenurga sõltuvus levikaugusest 7 MHz juures [7].	32
Joonis 13. Kaks horisontaalse dipooli paigaldusviisi koos optimaalse kaldenurgaga.	33
Joonis 14. Varrasantenni paigaldus sõidukil.	35
Joonis 15. Raamantenni tüüpiline ühendusskeem [19].	35
Joonis 16. Simulatsiooniks valitud asukohad	36
Joonis 17. ITURHFProp Soodla-Vihterpalu simulatsiooni saatjate asukohad [27].	39
Joonis 18. ITURHFProp Soodla-Vihterpalu simulatsioon (jaanuar 2018) [27].	40
Joonis 19. ITURHFProp Soodla-Vihterpalu <i>MUF</i> simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.	41
Joonis 20. ITURHFProp Soodla-Vihterpalu optimaalne saatesagedus <i>FOT</i> ($MUF \cdot 0,85$) simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.	41
Joonis 21. ITURHFProp Tartu-Aluksne <i>MUF</i> simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.	42
Joonis 22. ITURHFProp Tartu-Aluksne optimaalne saatesagedus <i>FOT</i> ($MUF \cdot 0,85$) simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.	42
Joonis 23. VOACAP Soodla-Vihterpalu simulatsioon jaanuar 2018 [21].	44

Joonis 24. VOACAP Soodla-Vihterpalu <i>MUF</i> simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.....	45
Joonis 25. VOACAP Soodla-Vihterpalu <i>FOT</i> simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.....	45
Joonis 26. VOACAP Tartu-Aluksne <i>MUF</i> simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.....	46
Joonis 27. VOACAP Tartu-Aluksne <i>FOT</i> simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.....	46
Joonis 28. VOACAP Soodla-Vihterpalu võrgu käideldavuse simulatsioon.....	47
Joonis 29. VOACAP Tartu-Aluksne võrgu käideldavuse simulatsioon.....	47
Joonis 30. MARSsys Soodla-Vihterpalu simulatsioon jaanuar 2018 (väljatugevuse graafik).....	49
Joonis 31. MARSsys Soodla-Vihterpalu simulatsioon jaanuar 2018 (<i>MUF graafik</i>)....	49
Joonis 33. MARSsys Soodla-Vihterpalu <i>MUF</i> simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.....	50
Joonis 34. MARSsys Soodla-Vihterpalu <i>FOT</i> simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.....	51
Joonis 35. MARSsys Soodla-Vihterpalu võrgu käideldavuse simulatsioon.....	52
Joonis 36. Sidetestide asukohad kaardil 30.01.2018.....	54
Joonis 37. Sõiduki antennide asendid – horisontaalne ja vertikaalne varrasantenn.....	55
Joonis 38. Sõiduki raamantenn RF-3134-AT005.....	58
Joonis 39. Sidetestide asukohad 27. – 28.03.20.....	60
Joonis 40. <i>MUF</i> -i muutus ionosondide andmetel 27. – 28.03.2018 [29].....	61

Tabelite loetelu

Tabel 1. Ionosondide tulemused ajavahemikul 24.02.2018 – 28.02.2018 [12].....	24
Tabel 2. Optimaalsed saatesagedused Eestis veebruar 2018.....	25
Tabel 3. Antenni paigalduskõrguse sõltuvus sagedusest.....	29
Tabel 4. Leviala kalkulatsioon kasutades lihtsustatud valemit (4).....	30
Tabel 5. SSB signaali minimaalne vajalik <i>SNR</i>	38
Tabel 6. Varrasantenni sidetestide asukohad 30.01.2018.....	54
Tabel 7. Sidetestide tulemused 30.01.2018	56
Tabel 8. Raamantenni sidetestide asukohad 27.03.2018	58
Tabel 9. Raamantenni sidetestide tulemused 27.03.2018.....	59
Tabel 10. Mürataseme tugevus dipool antennis (Tartu linnas ja väljas)	60
Tabel 11. Valmiera jaama sidetestide tulemused mõõdetuna Tartust	100
Tabel 12. Aluksne jaama sidetestide tulemused mõõdetuna Tartust.....	101
Tabel 13. Tartu jaama sidetestide tulemused mõõdetuna Valmierast	102
Tabel 14. Valmiera jaama sidetestide tulemused mõõdetuna Aluksnest.....	103
Tabel 15. Tartu jaama sidetestide tulemused mõõdetuna Aluksnest.....	104
Tabel 16. Valmiera jaama sidetestide tulemused mõõdetuna Aluksnest.....	105

1 Sissejuhatus

Seniitside on ruumilaine side metoodika lühilaine sagedusalas, mis kasutab ära ionosfääri kui peegelduvat kihti ning seeläbi on võimalik saavutada märkimisväärseid sidekaugusi. Antud lõputöö uurib lähemalt seniitside kasutamise võimalusi Eesti tingimustes.

1.1 Taust ja probleem

Tänapäeva kiirelt arenevas tehnoloogilises maailmas kasutatakse järjest rohkem raadiosidet juhtmevabade sidevõrkude loomisel. Kuna tarbitavad andmemahud ainult kasvavad, siis sidevõrkude disainimisel liigutakse üha kõrgematele sagedustele, kus suuremad ribalaiused lubavad ka kiiremat andmeedastust. Samas toob see endaga kaasa üha väiksemad sidekaugused, vajaduse suurema hulga tugijaamade järele ning tugijaamade hulgast lähtuvalt tihedama võrgu. Kogu see võrk on aga sõltuv elektritoitest ning transmissiooni kanalitest. Looduskatastroofid ja sõjalised konfliktid on suurimad riskid, mis võivad häirida või katkestada selliste võrkude töö ning riiklikul tasemel tuleb alati mõelda alternatiivsetele sidepidamise võimalustele, mida kriisireguleerimisel kasutada. Looduskatastroofi korral töötav sidevõrk aitab korraldada päästetöid ja koordineerida abi saatmist ning seeläbi võib päästa tuhandete inimeste elu. Näiteks Ameerika Ühendriikides on raadioamatöörid aktiivselt kaasatud riiklikku hädaabi reservvõrku kuna neil on olemas vajalikud vahendid ja oskused [1]. Samuti riiklikes sõjalistes konfliktides on üheks esmaseks eesmärgiks halvata vastase sidevõrkude töö, et tekitada koordineerimatus ja takistada info liikumist vaenuliku poole üksuste vahel. Seetõttu on riigikaitstes alternatiivside võrkudel väga suur roll, mis aitab oluliselt tugevdada riigikaitse alustalasid.

Sellised alternatiivside võimalused peavad olema sõltumatud elektrivõrgustiku tööst ja muust infrastruktuurist, mis katastroofi või kriisi korral võib kahjustada saada. Alati on üheks alternatiiviks tavaline pinnalainet kasutav raadioside, kuid üleriiklike võrke on selle meetodiga raske saavutada kuna sidekaugused on riiklikus mastaabis väikesed.

Üleriikliku võrgu loomiseks on põhimõtteliselt kaks võimalust - kasutada satelliitsidet või ionosfääri ruumilaine sidet. Eesti on väike riik ning ise sidesatelliiti orbiidil ei oma kuna see on väga kulukas ja seetõttu on üldjuhul suurriikide pärusmaa. Riigina võime küll rentida teiste riikide või suurkorporatsioonide satelliitside kanaleid ja kasutada neid, kuid meil puudub reaalne kontroll satelliidi üle ning muudab meid kellestki teisest sõltuvaks. Samuti kulub sidekanali rentimisele kriisiolukorras liiga palju aega kui see ei ole eelnevalt ette valmistatud.

Üheks eelpool mainitud alternatiivside võimaluseks on kasutada ruumilaine sidet, mis baseerub raadiolainete kiirgamisel ionosfääri ja sealt nende allapeegeldumisel. Sellise meetodikaga on võimalik saavutada suuri sidekauguseid ning samuti ei ole see sõltuv kõrvalseisvast teenusepakkujast, kelle üle puudub kontroll. Selline sidepidamise meetodika on üsna odav võrreldes satelliitsidega kuna vajab sidepidamiseks üksnes paari raadiosaatjat, head antenni ja laetud akusid. Tavalist ruumilaine sidet ei saa küll Eesti tingimustes kasutada, kuna Eesti on oma territooriumilt väike ning raadiolaine peegeldub Eestist niioelda üle (pime tsoon), kuid siiski on võimalik kasutada seniitsidet kui ruumilaine side erivormi, millega saab katta väiksemaid maa-alasid. Seniitside puhul peab küll arvestama, et see võib olla üsna kapriisne ning vajab hoolikat sidevõrgu planeerimist, kuid siiski on see alternatiivsides arvestatav meetodika.

1.2 Ülesande püstitus

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on uurida seniitkiirgusega sidet ja selle kasutusvõimalusi Eesti tingimustes ning leida kõige optimaalsemad parameetrid selle kasutamiseks. Kuna Eesti on geograafilise paiknemise poolest üsna põhja pooluse lähedal, siis päikesekiirguse vähesuse tõttu ei pruugi seniitside saavutamine olla lihtne. Seetõttu ei pruugi Eesti tingimustes sobida seniitside meetodid, mida kasutatakse ekvaatori lähedal ning seeläbi on üheks alameesmärgiks uurida millised meetodid ja sagedused on Eesti tingimustes kõige optimaalsemad. Samuti on üheks alameesmärgiks uurida seniitsides kasutatavaid antenni ning antenni paigalduse mõju seniitside saavutamisele. Täiendavalt tuleb ka läbi viia sidevõrgu simulatsioonid ning teostada reaalsed mõõdistused, et kontrollida teooria paikapidavust.

1.3 Ülevaade tööst

Sissejuhatuses tutvustatakse töö eesmärki ning antakse lühiülevaade seniitsidest kui ühest alternatiivside võimalusest.

Teises peatükis kirjeldatakse ruumilaine side olemust ning tutvutatakse seniitsidet kui ruumilaine side erivormi. Kirjeldatakse ruumilaine side kasutus valdkondi praktikas ning vaadeldakse ka selle sidepidamise meetodika negatiivseid külgi.

Kolmas peatükk käsitleb ionosfääri ehitust ning vaatleb ionosfääri kihte ja nende parameetreid lähtuvalt Eesti geograafilisest asukohast. Samuti vaadeldakse erinevate ionosondide vaatlustulemusi ning selgitatakse päikese aktiivsuse tsüklite mõju sidepidamisele.

Neljas peatükk keskendub seniitside antennidele ning nende paigaldus meetodikatele. Vaadeldakse antenni paigalduskõrguse ja antenni kaldenurga mõju seniitsidele ning leitakse optimaalsed parameetrid Eesti tingimusi silmas pidades. Täiendavalt tutvustatakse sõidukitele paigaldatavaid seniitside antenne.

Viiendas peatükis viiakse läbi erinevaid sidevõrgu simulatsioone kasutades kolme erinevat ruumilaine planeerimise tarkvara. Vaadeldakse simulatsiooni tulemusi ning hinnatakse seniitside kasutatavust erinevatel aastaegadel 2018 aasta baasil.

Kuuendas peatükis kirjeldatakse reaalse mõõtmiste läbiviimist ning vaadeldakse mõõtmiste tulemusi tehes järeldusi teooria paikapidavusele.

2 Ruumilaine side

Järgnevas peatükis käsitletakse ruumilaine side olemust. Kuidas on võimalik ionosfääri ruumilaine sidet ära kasutada ja milliseid rakendusi sellise sidemetoodikaga üldjuhul kasutatakse. Samuti vaadeldakse seniitsidet kui ruumilaine side erivormi, mis on selle magistritöö põhifookus.

2.1 Üldtuntud ruumilaine side

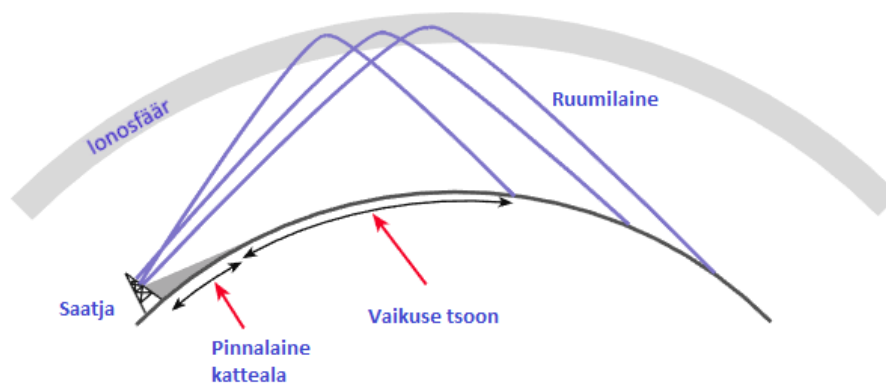
Ruumilaine sidet kasutatakse üldjuhul olukorras, kus on vaja luua sidevõrku suurte distantside taha, mis võivad ulatuda kuni 10 000 km-ni (kilomeetrini) või enamgi. Mõningad kasutusvaldkonnad sellisel sidel on:

- raadioamatööride lühilaine sidevõrgud;
- militaarsidevõrgud;
- riikidevahelised sidevõrgud;
- mandri ja saarte vahelised sidevõrgud.

Raadioamatöörid kasutavad väga suures mahus lühilaine ionosfääri sidet. Korraldatakse isegi võistlusi, kes suudab kõige pikemat side distantssi saavutada ning tihtipeale räägitakse distantssidest, mis võivad ulatuda teisele poole maakera.

Samuti kasutatakse sama sidepidamise metoodikat palju militaar ja riiklikes sidesüsteemides. Militaarsidesüsteemides omab see olulist rolli kuna on sõltumatu muudest tehnilistest vahenditest, mida on vaenlasel võimalik mõjutada (satelliitside, kaabelliinid, lingisüsteemid) ning samas on üsna odav võrreldes teiste süsteemidega. Sideühenduse loomiseks sadade või tuhandete kilomeetrite kaugusele on vaja üksnes raadiojaama, antenni ja teadmisi selle kasutamiseks. Samuti leiab ruumilaine side laialdaselt kasutust riikides mille geograafia (mäestikud, kolooniad) ei võimalda muid sidepidamise metoodikaid.

Ruumilaine side kasutab ära signaali peegeldumist ionosfääri erinevatelt kihtidelt ning seeläbi saavutatakse tunduvalt suuremaid side distantse kui tavalist pinnalainet kasutades. Pinnalaine üldjuhul ei paindu eriti horisondi taha ning samuti jääb pinnalaine teele palju looduslikke ja tehisklikke objekte (mets, taimestik, ehitised jne), mis suurendavad oluliselt signaali sumbumist. Kuna ruumilaine side puhul suunatakse kiirgus üles ionosfääri ning peegeldub sealt tagasi maapeale, siis maakera kumerusest tingitud horisont ei ole piiravaks ning samuti ei jää signaali levimise teele signaali summutavaid objekte. Joonisel 1 on näha ruumilaine ja pinnalaine sideulatuse erinevus ning samuti nende vahele tekkiv niinimetatud vaikuse tsoon. Vaikuse tsoon on maa-ala, kus üldjuhul side puudub kuna pinnalaine on juba sumbunud kuid ruumilaine ei ole veel ionosfäärist tagasi peegeldunud [2].



Joonis 1. Pinnalaine ja ruumilaine [2].

Ruumilaine side on küll kasutatav kaugete vahemaade taha suhteliselt odavate vahenditega ja väikese võimsusega, kuid sellisel side vormil on ka oma negatiivsed küljed. Põhilised, mida mainida on väikesed andmemahud ja üsna kapriissed levitingimused.

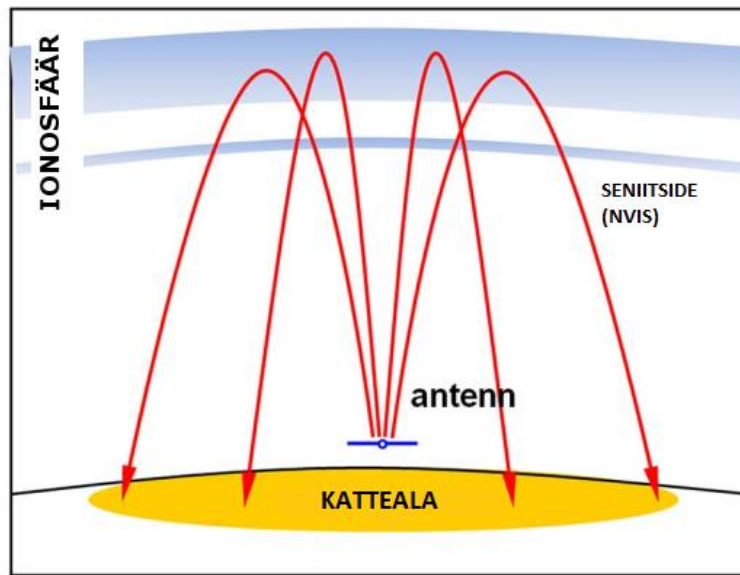
Piirangud ülekantavatele andmemahtudele paneb kasutatav madal sagedusala. Kui me tänapäeva mobiilside tehnoloogiates, kus saatesagedused on üle 1 GHz-i (gigaherts), räägime signaali ribalaiustest 10 MHz (megaherts) ja enam ning saavutatavad andmeside kiirused jäävad suurusjärku 20 - 100 Mbps (*megabits per second*), siis lühilaine sides selliseid ribalaiused ei ole rakendatavad sagedusala füüsikaliste piirangute tõttu (saatesagedused vahemikus 2 - 30 MHz). Üldlevinud kanalilaius

lühilaine sides on 3 kHz, mida üldjuhul piisab üksnes AM (*Amplitude Modulation*) modulatsioonis ühe külgribaga kõnesideks. Siiski on ka lühilaine side lainevormid aja jooksul arenenud ning kasutades digitaalmodulatsioone nagu PSK (*Phase Shift Keying*) ja QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) ning ribalaiuseid kuni 24 kHz (kiloherts) on saavutatavad andmesidekiirused suurusjärgus 16 kbps (*kilobits per second*) [3].

Teine mainitud negatiivne külg seniitside puhul on kapriisne side kvaliteet. Eelkõige on see põhjustatud ajas pidevalt muutuvatest levitingimustest. Selliste muutuste põhjuseks on eelkõige ionosfäär ja nimelt just ioniseeritud osakeste osakaal erinevates ionosfääri kihtides, mis muutuvad tänu päikese aktiivsusele (vaata ka Ionosfääri peatükki). Sellest tulenevalt töötavad öisel ajal madalamad sagedused ning päevasel ajal kõrgemad sagedused [5]. Levitingimuste muutusest tulenevat negatiivset mõju on võimalik vähendada oskusliku sidepidamise ja tänapäeva tehnoloogiliste abivahenditega nagu lühilaine side automaatne sagedusvaliku protokoll ALE (*Automatic Link Establishment*) [4], mis on sisseehitatud enamustesse lühilaine raadiotesse.

2.2 Seniitside kui ruumilaine erivorm

Seniitside, mis on tuntud ka inglise keelse lühendi NVIS (*Near Vertical Incident Skywave*) all on ruumilaine side erivorm. Sellisel juhul suunatakse kiirgus üles ionosfääri poole peaaegu risti maapinnaga (vertikaalselt) ehk maksimaalne kiirgus suunatakse otse üles. Ionosfääris toimub signaali peegeldumine väga terava nurga all, pigem võiks öelda, et signaal paindub alla tagasi maapinna poole mitmete väikeste murdumiste tulemusena [5]. Niimoodi kiirgust suunates tekib ionosfääri peegeldustena nii-öelda vihmavarju efekt, kus sidevõrgu katteala maapinnal on suures plaanis ringikujuline ning vaikusetsooni ei teki ning side on saavutatav kogu katteala ulatuses (Joonis 2). Väga suuri distantse (peegeldumise terava nurga tõttu) sellise meetodikaga ei ole võimalik saavutada ning katteala jääb üldjuhul suurusjärku 35 – 350 km [6], mis arvestades Eesti suurust on täiesti sobiv.



Joonis 2. Seniitside – kiirgus suunatakse ionosfääri vertikaalselt [7].

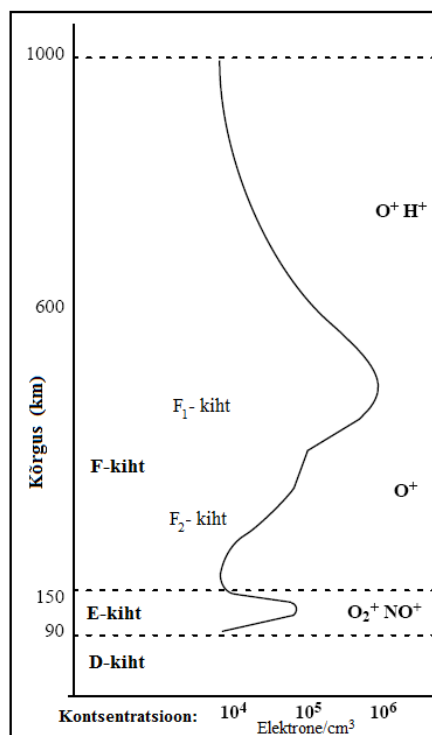
Seniitside on üldjuhul kasutatav sagedusvahemikus 2 - 10 MHz [6] kuna kõrgemad sagedused läbivad ionosfääri ja ei peegeldu enam alla tagasi (peegeldumise terava nurga tõttu). Side pidamine sellistes tingimustes vajab hoolikat sagedushaldust kuna levitingimused on väga muutuvad ning konkreetse sageduse valik sõltub aastaajast, kellaajast, ionosfääri tingimustest ning päikesest aktiivsusest. Kasutatava sageduse valikut käsitletakse täpsemalt veel edaspidistes peatükkides.

3 Ionosfäär

Peatükis vaadeldakse Ionosfääri kui raadiolainete peegelduvat kihti, milline on selle ehitus ning kuidas see on muutuses sõltuvalt päikese aktiivsusest. Ionosfääri kohta info saamiseks jälgitakse ionosonde ning tehakse selle baasil järeldused Eesti tingimuste kohta.

3.1 Ionosfääri ehitus

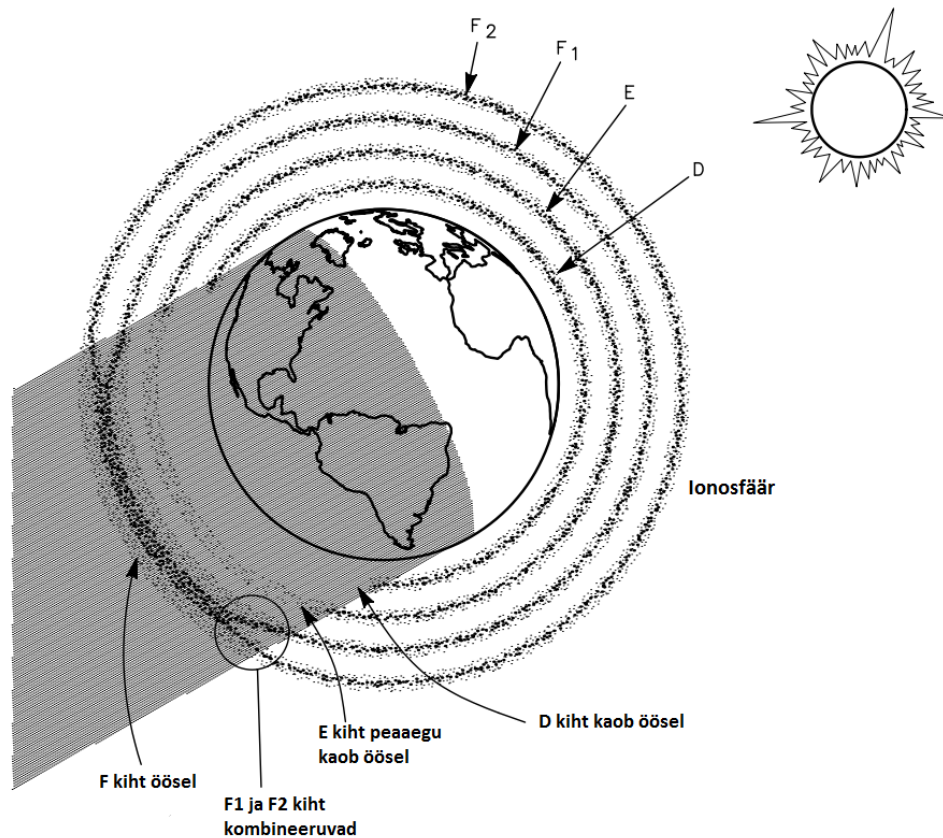
Ionosfäär on atmosfääri kiht, mis asub maapinnast 50 - 400 km kõrgusel ja mis omab olulist rolli ruumilaine sides signaali tagasipeegeldava kihina. Enamus ionosfäärist on elektriliselt neutraalne, kuid päikese ioniseeriva kiirguse toimel toimuvad ioniseerivad protsessid, mille tulemusena gaasi osakestest eralduvad elektronid ning tekivad vabad laengukandjad [5]. Tulenevalt ioniseeritud osakeste kontsentratsioonist jagatakse ionosfäär veel omakorda D, E ja F kihiks (Joonis 3).



Joonis 3. Ionosfääri kihid ja elektronide kontsentratsioon kihtides päeval ajal [8].

D kiht asub maapinnast 60 – 90 km kõrgusel ning selle tihedus on üldiselt madal ning seetõttu ei kasutata seda sidepidamisel peegelduva kihina, kuid selles kihis toimub

arvestatav sumbumine seda läbivatele signaalidele. D kiht esineb ainult päeval ajal ning öisel ajal kaob. E kiht asub kõrgusel 90 - 150 km ja on tunduvalt suurema elektronide ja ionide kontsentratsiooniga kui D kiht. Sarnaselt D kihile väheneb päeval ajal osakeste kontsentratsioon oluliselt kui päikesekiirgust peale ei paista, kuid E kiht jääb siiski nõrgalt eksisteerima ka öisel ajal. F kiht on ruumilaine side koha pealt kõige olulisem kiht kuna osakeste kontsentratsioon on seal kõige kõrgem ning signaali tagasi peegeldumine kõige intensiivsem [5]. F kiht asub maapinnast kõrgusel 150 - 350 km. Päeval ajal jaguneb kiht veel kaheks F1 ja F2 kihiks (keskmiste kõrgustega 225 km ja 320 km) ning öisel ajal liituvad F1 ja F2 kihid taas F kihiks (Joonis 4). F kihi kontsentratsioon on maksimaalne keskpäeval ning minimaalne koidikul [9].



Joonis 4. Ionosfääri kihtide päevane ja öine muutus [10].

3.2 Kihitide kriitilised sagedused

Sageduse valik ionosfääri sides on kriitilise tähtsusega. Kui sagedus on valitud piisavalt madal siis peegeldub signaal ionosfääri kihilt tagasi maa peale, kui sagedus on liiga kõrge siis signaal läbib vastavat ionosfääri kihti ja maa peale tagasi ei peegeldu. Kõige kõrgemat sagedust, kus signaal veel maapeale tagasi peegeldub nimetatakse kihi

kriitiliseks sageduseks (f_0) arvestades, et signaal suunatakse ionosfääri poole risti maapinnaga ehk otse üles. Iga kihi kriitiline sagedus sõltub selle elektronide kontsentratsioonist ja on arvutatav valemiga (1) [5]:

$$f_0 = \sqrt{\frac{N}{1,24 \cdot 10^{-8}}}, \text{ Hz}, \quad (1)$$

kus;

f_0 – on kihi kriitiline sagedus (Hz);

N – on elektronide kontsentratsioon kihis (elektroni/cm³).

Kuna alati ei suunata kiirgust otse üles ionosfääri poole vaid mingi nurga all, siis maksimaalne kasutatav sagedus *MUF* (*Maximum Usable Frequency*) konkreetse ionosfääri kihil sõltub selle kriitilisest sagedusest ja kiirguse kaldenurgast ning arvutatakse valemiga (2) [5]:

$$MUF = \frac{f_0}{\sin \alpha} \quad (2)$$

kus;

MUF – Maksimaalne kasutatav sagedus (Hz);

α – kiirguse kaldenurk maapinna suhtes (°).

Seniitside puhul, kus $\alpha = 90^\circ$ on kihi kriitiline sagedus sama mis *MUF* ($f_0 = MUF$).

Kuna põhiliseks peegeldavaks kihiks on päeval F2 ja öösel F kiht, siis peaks sageduse valikul lähtuma nende kihtide kriitilistest sagedustest ja nendele vastavatest *MUF*-dest. Üldiselt on soovitatav valida kasutatav sagedus natuke alla *MUF*-i sageduse, sest kui valime liiga madala sageduse siis hakkavad alumised ionosfääri kihid laine levikule mõju avaldama. Näiteks mida madalamad on sagedused seda rohkem sumbuvad need D kihis ja seega valitav sagedus peaks olema võimalikult kõrge, et minimeerida sumbuvus. Sellest tulenevalt kasutatakse terminit *LUF* (*Lowest Usable Frequency*), mis määrab ära madalaima kasutatava sageduse. *LUF*-st allpool olevatel sagedustel signaal sumbub D kihis ning ei jõua üldse peegelduva F kihini. Seetõttu peab kasutatav sagedus üldjoontes jääma *LUF*-i ja *MUF*-i vahele, kuid kõige efektiivsem on kasutada siiski

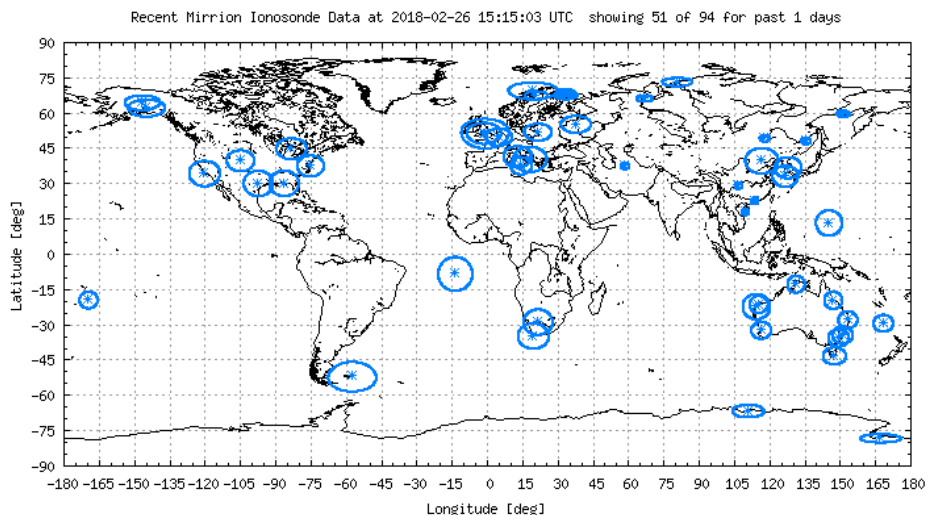
optimaalset töösagedust FOT (*Frequency of Optimal Transmission*), mis on leitav seosega (3) [11,10].

$$FOT = MUF \cdot 0,85 \quad (3)$$

Lähtuvalt eeltoodust näeme, et põhiline mis meid sageduse valikul huvitab on F kihi FOT , mis peaks olema kõige optimaalsem saatesagedus. Kuna aga kihtide konsentratsioon on pidevalt ajas muutuv vastavalt sellest kui palju nad päikesekiirgust saavad, siis ka kihtide kriitilised sagedused on ajas muutuvad ning sellest lähtuvalt ka FOT . Kõige lihtsam meetod F2 kriitilise sageduse (f_oF2) määramiseks on jälgida ionosonde.

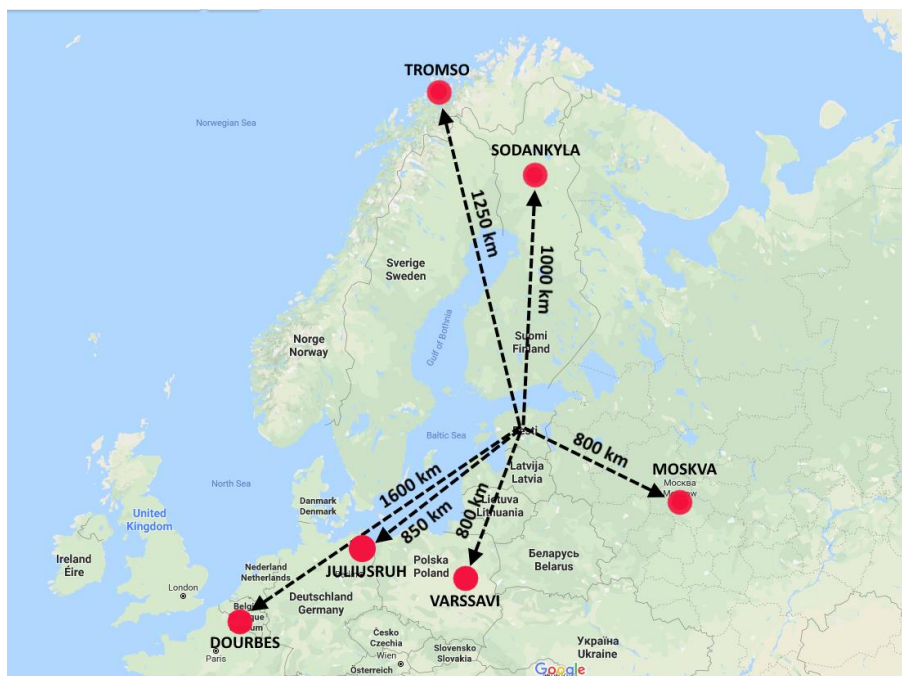
3.3 Ionosondid

Ionosond on spetsiaalne radar, mis on mõeldud ionosfääri kihtide hetkeseisu hindamiseks. Ionosond kiirgab maapealt signaali ionosfääri erinevatel lühilaine sagedustel ning mõõdab tagasipeegelduvat lainet saades infot ionosfääri kontsentratsiooni, kihtide kõrguste kohta ning millised on nende kriitilised sagedused antud ajahetkel. USA teadusagentuur NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) on spetsialiseerunud maa ookeanite ja atmosfääri jälgimisele ning nende veebilehel kogutakse kokku info maailmas asuvatelt ionosondidelt (Joonis 5). Nende veebilehel [12] on saadaval reaalajas info nii F kihi kõrguste kui kriitiliste sageduste kohta, mis on vajalikud optimaalse sageduse määramiseks. Veebileht on hea just hetkeolukorra analüüsimiseks ning samuti annab veebileht tagantjärele kuni viie ööpäeva ionosfääri levitingimused, kuid ajaloolise ülevaate saamine erinevate aastaegade kohta ei ole selle veebilehe tugevaks küljeks.



Joonis 5. Ionosondide asukohad ülemaailmselt [12]

NOAA andmetel meile kõige lähemal asuvad ionosondid asuvad Moskvas (Venemaa), Varssavis (Poola), Sodankylas (Soome), Tromsos (Norra), Dourbes (Belgia) ja Juliusruh (Saksamaa). Moskva, Varssavi ja Juliusruhi mõõtepunktid asuvad Eestist ca 800 km kaugusel, ülejäänud punktid asuvad vahemikus 1000 km kuni 1600 km (Joonis 6).



Joonis 6. Eestile lähimad ionosondid [12].

Järgnevalt võtame aluseks nende viie ionosondi poolt toodetud info ionosfääri kihtide kohta, selle baasil analüüsime F kihi kõrguse muutust ja kriitilise sageduse kõikumist

viie ööpäeva jooksul ning üritame teha järeldusi Eesti tingimuste kohta. Algselt oli plaanis kasutada kõigi kuue ionosondi infot võrdluseks, kuid Sodankyla ionosondi statistilised andmed ei olnud saadaval ja jäeti analüüsi nimistust välja. Käesoleva töö Lisa 1 sisaldab endas kõikide valitud ionosondide graafikuid ajavahemikul 24.02.2018 – 28.02.2018 tehtud mõõdistuste kohta. Tabel 1 koondab endas üldistatud tulemusi F2 kihi käitumisest, täpsema ülevaate saamiseks tuleb tutvuda iga graafikuga eraldi.

Tabel 1. Ionosondide tulemused ajavahemikul 24.02.2018 – 28.02.2018 [12].

	F2 kihi kriitiline sagedus <i>foF2</i>		F2 kihi kõrgus maapinnast <i>hmF2</i>	
	öö	päev	öö	päev
	20:00 - 08:00 (UTC+2)	08:00 - 20:00 (UTC+2)	20:00 - 08:00 (UTC+2)	08:00 - 20:00 (UTC+2)
Tromso (NOR)	1,5 - 8 MHz	2 – 4,5 MHz	150 - 450 km	200 - 300 km
Moskva (RUS)	1,8 - 3 MHz	3 – 5,5 MHz	200 - 350 km	200 - 250 km
Juliusruh (GER)	1,5 – 3 MHz	3 – 5,5 MHz	250 - 350 km	200 - 250 km
Varssavi (POL)	2 - 3,5 MHz	3 – 5,5 MHz	250 - 350 km	225 - 275 km
Dourbes (BEL)	2 - 4 MHz	3 – 6 MHz	250 - 325 km	200 - 250 km

Vaadates tabelis 1 ja lisa 1 olevaid graafikuid näeme, et mida lähemale põhjapoolusele oleme seda ebamäärasem on F2 kihi kõrgus ja samuti ka kriitiline sagedus. Seda põhjustab tõenäoliselt vähene päikese kiirgus, kuna talvisel ajal on päikese kiirguse kaldenurk põhja pooluse lähedal maa ionosfäärile eriti terava nurga all ning seetõttu on ioniseeritud osakeste kontsentratsioon, mis päeva jooksul tekib väga madal. Eriti annab see tunda öisel ajal, mil põhja pooluse lähedal F kiht on väga nõrk ning see omakorda tähendab, et seniitide saavutamine võib osutuda kas väga raskeks või võimatuks. Mida allapoole me laiuskraadidel liigume seda rohkem näeme ka, et F2 muutub järjest konkreetsemaks ja seda ka öisel ajal. Eelkõige väljendub see F2 kihi kõrguses, mis ei haju enam suurel kõrguste vahemikul ning samuti kihi kriitilise sageduse osas, mis on ka öisel ajal konkreetsemalt paigas (Tromso 1,5 – 8 MHz; Dourbes 2 – 4 MHz). Põhjuseks on taas päikese kiirguse kaldenurk ionosfääri suhtes ehk mida lähemale me ekvaatorile liigume seda rohkem päikest ionosfäärile paistab. Selle tulemusena päeva jooksul kogutud ioniseeritud osakeste kontsentratsioon on suurem ning öösel kui hakkab toimuma de-ioniseerimise protsess, siis ei suudeta saavutada elektrilist

neutraalsust nii kiiresti ning põhimõtteliselt peegelduv kiht peab hommikuni vastu. Sama protsessi tulemusena näeme ka, et öisel ajal kasutatavad sagedused on kõrgemad ekvaatori läheduses ning madalamad pooluse lähedal.

Eesti geograafilise asukoha tõttu peab kindlasti arvestama eelpool mainitud asjaoluga side planeerimisel ning tasub silmas pidada, et Kesk-Euroopa seniitside mudel ei pruugi Eesti jaoks sobilik olla. Kuna sidetingimused on rohkem sõltuvuses laiuskraadidest kui pikkuskraadidest, siis Eesti jaoks võiksid sobida kõige paremini Moskva ja seejärel Juliusruh-i mõõdistuste tulemused. Reaalse hinnangu saamiseks võrreldakse sidetestide peatükis ionosondide vaatlustulemusi sidetestide tulemustega ning tehakse järeldused milline ionosond kõige paremini Eesti tingimusi kajastab.

Vaadeldes täpsemalt Moskva ja Juliusruh-i graafikuid saame teha järelduse Eestis kasutatavate sageduste kohta veebruaris 2018 (Tabel 2). Jagame ööpäeva kolmeks lõiguks kuna hommikusel ajal, enne päikesetõusu kui on kihi ionisatsioon minimaalne, tuleb kasutada sagedusi mis jäävad ka alla 2 MHz. Optimaalse saatesageduse tulemustest näeme, et eriti hommikune aeg võib kujuneda side saavutamisel väga keeruliseks kuna selliste antennide mõõtmed on väga suured ning üldjuhul turul olevate antennide saatesagedused algavad alles alates 2 MHz-st.

Tabel 2. Optimaalsed saatesagedused Eestis veebruar 2018.

Kellaeg EST UTC+2	Kriitiline sagedus $f_oF2 = MUF$	Optimaalne saatesagedus $FOT = (MUF \cdot 0,85)$
05:00 – 08:00	1,6 – 2,5 MHz	1,36 – 2,125 MHz
08:00 – 19:00	3 – 5 MHz	2,55 – 4,25 MHz
19:00 – 05:00	2 – 3 MHz	1,7 – 2,55 MHz

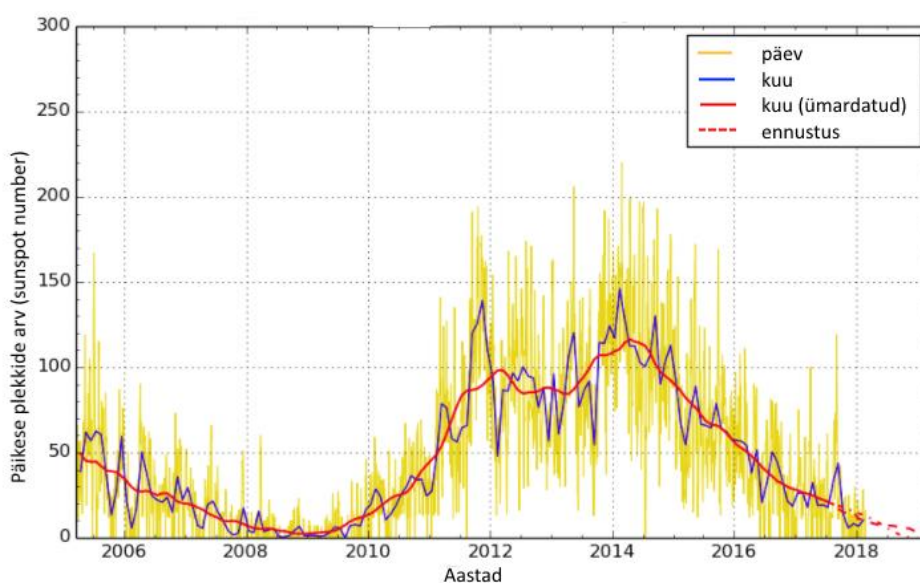
3.4 Päikese aktiivsuse tsüklid

Päike on suur ja gaasiline, selle osakesed on elektriliselt laetud ning gaasi liikumise tulemusena tekib võimas magnetväli. See magnetväli on pidevas muutuses ja teatud aja jooksul päikese magnetilised poolused vahetavad kohad. Pooluste vahetamise perioode nimetatakse päikese aktiivsuse tsükliteks (*solarcycle*) ning tavaliselt üks tsükkel kestab 11 aastat. Päikese tsüklite muutust hinnatakse päikeseplekkide arvu *SSN* (*sunspot*

number) muutuse jälgimise teel. Päikese aktiivsuse tsükli keskel on päikeseplekkide arv maksimaalne ning seeläbi ka päikese kiirguse mõju maa ionosfäärile kõrge [13].

Päikese tsüklite muutus mõjutab raadiosidet ning eelkõige ruumilaine sidet, mis on otseselt seotud ionosfääri kihtidega. Päikese aktiivsus tsükli keskel, kui kiirgus on maksimaalne, siis ka ionosfääris on ioniseeritud osakeste osakaal suurem ning tsükli alguses ja lõpus on olukord vastupidine. Seeläbi suureneb tsükli keskel F kihi kriitiline sagedus kordades ning samuti võib tekkida E kihi juurde täiendav peegelduskiht Es, mis on siiski üsna juhuslik ja raskesti ennustatav [7]. Päikeseplekkide arv on eelkõige oluline kui side planeerimiseks kasutatakse planeerimistarkvarasid või mudeleid, mis üldjuhul ei oma reaalaaja andmeid ionosfäärist. Sellisel juhul sisestatakse see muutujana kas valemisse või tarkvarasse.

Hetkel on päikese aktiivsuse tsükkel languses ja peaks jõudma miinimumini 2019 aasta alguses misjärel algab uus 11 aastane tsükkel (Joonis 7). Jaanuaris 2018 võib päikeseplekkide arvu väärtuseks $SSN = 18$ [14], kuid see muutub iga kuu ning tuleb alati sidevõrgu planeerimisel taas ülevaadata. Sellest tulenevalt võib järeldada, et nii sellel kui ka järgmisel aastal (2018 - 2019) ei kehti just väga soodsad tingimused ruumilaine sideks, kuid alates aastast 2020 peaks hakkama olukord paremuse poole minema. Päikeseplekkide arvust tuleb veel juttu neljandas peatükis kus viime läbi levimudelite simulatsioone erinevate tarkvaradega ning päikeseplekkide arv on vajalik mudeldamise sisendina.



Joonis 7. Päikese plekkide arv viimased 13 aastat [14].

4 Seniitside antennid

Seniitside õnnestumine sõltub suuresti elektromagnetlaine energia ionosfääri suunamise efektiivsusest, seetõttu on õige antenni valik ja selle korrektne paigaldus ülimalt olulise tähtsusega. Kuna ionosfäärist peegelduvat sidet on võimalik kasutada ainult madalatel sagedustel, siis pikk lainepikkus määrab ka üsna suured antenni mõõtmed (elektriliselt) - väike antenn lihtsalt ei saa olla efektiivne.

Seniitside puhul tuleb kiirgus suunata üles ionosfääri ning sellest lähtuvalt tuleb ka antenn valida sellise suunadiagrammiga kus antenni peakiir oleks vertikaalsihis ülesse. Kõige levinum sedalaadi antenn on horisontaalne dipool, mis on üsna laia suunadiagrammiga vertikaalsihis. Kitsa suunadiagrammiga antenn kohtame seniitsides harva kuna madalatele sagedustele on sellist antenni keeruline konstrueerida.

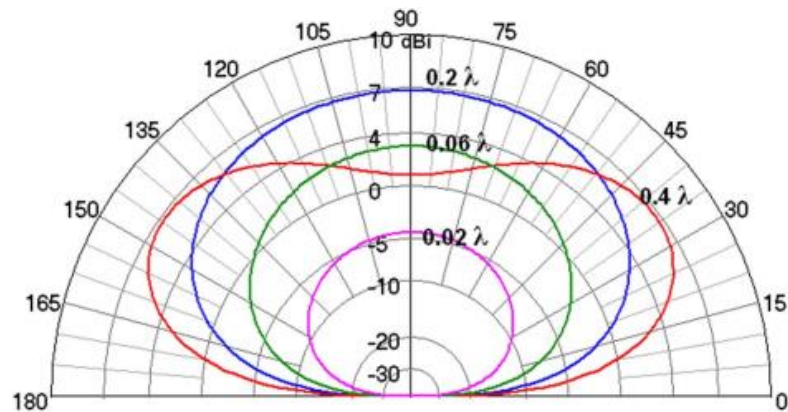
Järgnevates peatükkides käsitletakse levinumaid seniitsides kasutatavaid antenni ja antenni paigaldamisel olulisi faktoreid. Samuti vaadeldakse sõidukile paigaldatavaid antenni ja nende efektiivsust.

4.1 Antenni kõrguse valik

Antenni kõrgus maapinnast mängib olulist rolli kvaliteetse side saavutamisel kuna antenni mõõtmed on üldjuhul suured ning maapinna lähedus mõjutab antenni suunakarakteristiku kujunemist. Põhilised tegurid, mis seda mõjutavad on signaali sumbumine maapinnas ning signaali peegeldumine maapinnalt, mis omakorda mõjutab suunadiagrammi moodustumist [7].

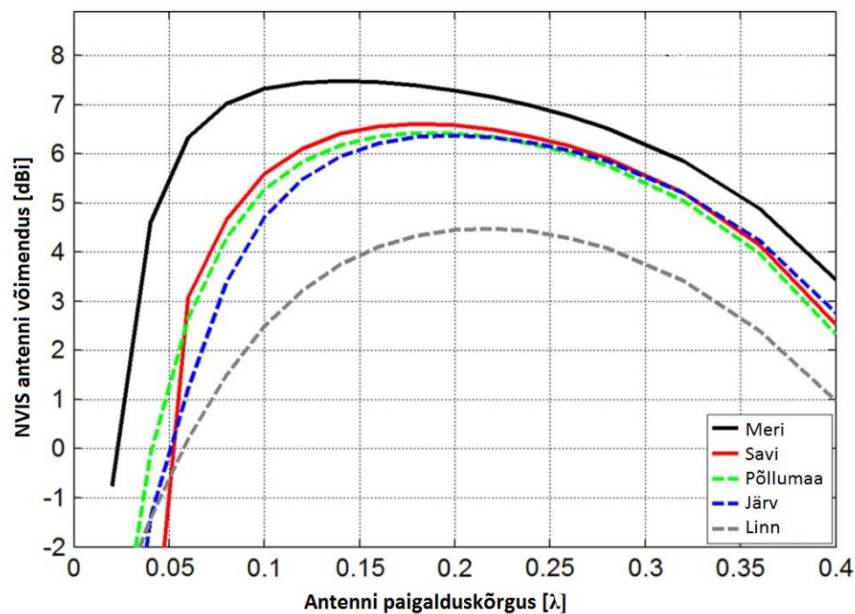
Joonisel 8 näeme horisontaalse poollaine dipooli suunakarakteristiku ja võimenduse sõltuvust antenni kõrgusest. Antenni väga madalal paigalduskõrgusel ($0,02 \lambda$) näeme, et antenni vertikaalne suunatus on hea, kuid võimendus on väga madal kuna suur osa energiast neeldub maapinnas. Viies antenni maapinnast kõrgemale ($0,06 \lambda$) antenni vertikaalne suunatus väheneb maapinna peegelduse vähenemise tõttu (suunadiagramm läheb lapikumaks), kuid signaali neeldumine maapinnas väheneb veel rohkem ning üldkokkuvõttes võidame antenni võimenduses. Tõstes veel antenni paigalduskõrgust saavutame maksimaalne antenni võimenduse kõrgusel $0,2 \lambda$ (15 m @ 4 MHz). Kui

jätkuvalt antenni kõrgust suurendada ($0,4 \lambda$), siis antenni suunadiagramm läheb lamedamaks ning maksimaalne võimendus vertikaalsihis hakkab vähenema [7].



Joonis 8. Horisontaalse poolaine dipooli võimenduse ja suunadiagrammi sõltuvus antenni paigalduskõrgusest võrreldes isotroopse antenniga (dBi) [7].

Antenni võimendus sõltub mingil määral ka maapinna juhtivusest mille kohale on antenn paigaldatud. Mida parema juhtivusega on maapind seda suurem on maapinna peegeldustegur ja võimendus paraneb. Sellest lähetuvalt peaks side paremini saavutatav olema vihmaga kui maapind on märg ning talvisel ajal lumise maapinnaga. Joonisel 9 näeme võimendusteguri muutust ka erineva pinnase juures. Savine pinnas (*clay*) ja põllumaa (*farmland*) peaksid hästi sobima Eesti tingimustesse ning maksimaalne võimendus on sellisel juhul saavutatav kui antenni kõrgus maapinnast jääb vahemikku $0,15 - 0,2 \lambda$ [7].



Joonis 9. Antenni võimenduse sõltuvus paigalduskõrgusest erineval pinnasel [7].

Kui siiani oleme peatükis käsitletud saateantenni võimendust erineva paigalduskõrguse juures siis peaks siinkohal mainima, et vastuvõtul ei ole antenni paigalduskõrgus nii oluline kui saateantenni puhul. Nimelt kui muudame saateantennil paigalduskõrgust 1 m pealt 12 m peale siis saavutame signaali võimendust ca 12 dB, samasugune muudatus vastuvõtu antennil annab signaali võimendust üksnes 2 – 5 dB [7]. Kuna üldjuhul kasutatakse antenni nii vastuvõtuks kui saatmiseks siis peaks antenni paigaldamisel lähtuma saateantenni paigaldamise juhistest ning vastuvõtu antenni erisusi selles töös pikemalt ei käsitleta.

Arvestades käesolevas peatükis käsitletut võime teha üldised järeldused antenni paigalduskõrgusele saatesageduse 4 MHz juures, mis sobib Eesti tingimustes kasutamiseks. Kõige parema tulemuse saavutamiseks tuleks horisontaalne dipool paigaldada maapinnast 15 m kõrgusele (Tabel 3), mis annab 7 dB võimendust võrreldes isotroopse antenniga. Samas on 15 m selline kõrgus, mis üldjuhul eeldab juba mastide olemasolu ja antenni paigaldusmeeskonda vähemalt kaks inimest. Kõige lihtsamini on horisontaalne dipool siiski paigaldatav kahe puu vahele ning teostatav ühe inimese poolt. Sellisel juhul peaks paigaldamisel arvestama vähemalt 3 - 4 m paigalduskõrgusega maapinnast.

Tabel 3. Antenni paigalduskõrguse sõltuvus sagedusest

Sagedus	Minimaalne paigalduskõrgus $0,06\lambda$	Optimaalne paigalduskõrgus $0,2\lambda$
2MHz	9 m	30 m
3MHz	6 m	20 m
4MHz	4,5 m	15 m
5MHz	3,6 m	12 m
6MHz	3 m	10 m

4.2 Antenni peakiire suund ja optimaalne kaldenurk

Nagu eelnevalt juba mainitud on antenni õige paigaldus seniitside puhul kriitilise tähtsusega. Üks olulistest parameetritest antenni paigalduse juures on ka antenni

kiirguse kaldenurga õige valik. Kui üldiselt eeldame, et seniitside puhul tuleb kiirgus suunata otse üles ionosfääri poole siis tegelikkuses võiks antennile anda väikse kalde ja kiirgus suunata üles väikse nurga all.

Eelpool mainitud antenni kiirguse kaldenurk on oluline vajaliku katteala suurendamiseks. Kui suunata kiirgus otse üles (90° nurga all maapinna suhtes), siis kõige intensiivsem signaali tagasipeegeldus ilmneb saateantenni läheduses, kuid antennist kaugemal vastuvõetava signaali tugevus väheneb ning reaalse saavutatava katteala raadius võib olla piiratud [15]. Samas tuleb silmas pidada, et katteala raadius sõltub suuresti ka antenni peakiire laiusest. Teoreetiliselt kitsa kiire puhul on katteala väike kuna ka tagasipeegeldus toimub väikse ala peal ionosfääris. Reaalsuses on lühilained kasutatavad antennid üldjuhul üsna laia peakiirega ning ka otse üles suunates on saavutatavad märkimisväärsed kattealad.

Kui soovitakse sidevõrgule suuremat katteala tuleb korrigeerida antenni peakiire suunda ning viia see vastavusse soovitava katteala suurusega. Mida suurem on antenni kalle seda rohkem küll signaal hajub ruumilises mõttes ja tegelikkuses kaotame signaali energias ning *SNR*-s (signaali ja müra suhe), kuid see on vajalik täiendava katteala saavutamiseks. Näiteks 150 km-se diameetriga leviala saavutamiseks võiks antenni kalle olla suurusjärgus 75° (Tabel 4) lähtuvalt valemist (4).

Tabel 4. Leviala kalkulasioon kasutades lihtsustatud valemit (4)

Antenni kiirguse kaldenurk φ (°)	leviala raadius
80	53 km
75	80 km
70	109 km
60	173 km

Antenni kiirguse kaldenurga arvutamiseks saab kasutada lihtsustatud katteala valemit (4) [15].

$$r = \frac{hmF^2}{\tan \varphi} \quad (4)$$

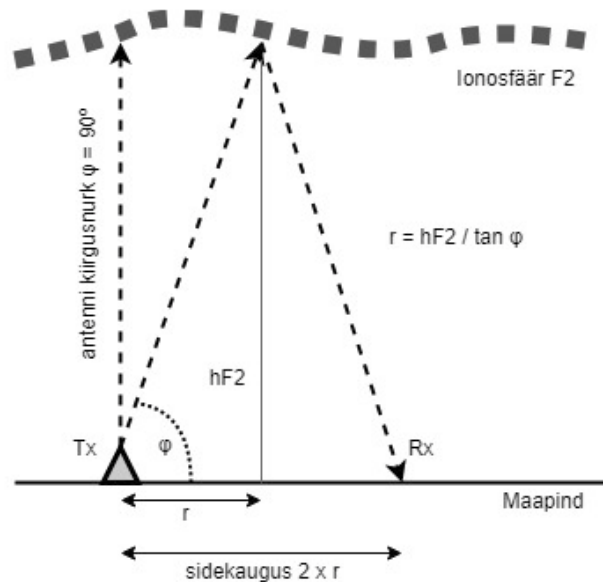
kus;

$hmF2$ - on F2 kihi kõrgus, mis on küll muutuv kuid antud juhul võime keskmistada kõrgust 300 km-le,

r - tähistab distantsti saatjast peegledumiskohani ja kahekordse r saab võrdsustada leviala raadiusega (Joonis 10),

φ - antenni kiirguse nurka maapinna suhtes ($^{\circ}$).

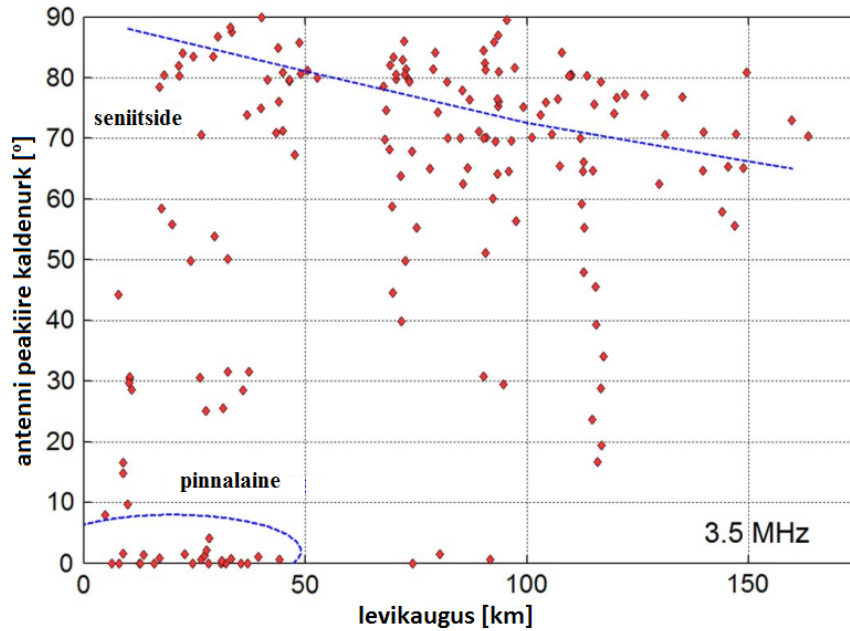
Antud valemit kasutades peab arvestama, et kui antenni kaldenurk on $> 80^{\circ}$ ehk peaaegu risti seniidiga, siis valem ei anna reaalseid tulemusi kuna valem on puhtalt teoreetiline ja ei võta arvesse antenni peakiire hajumist.



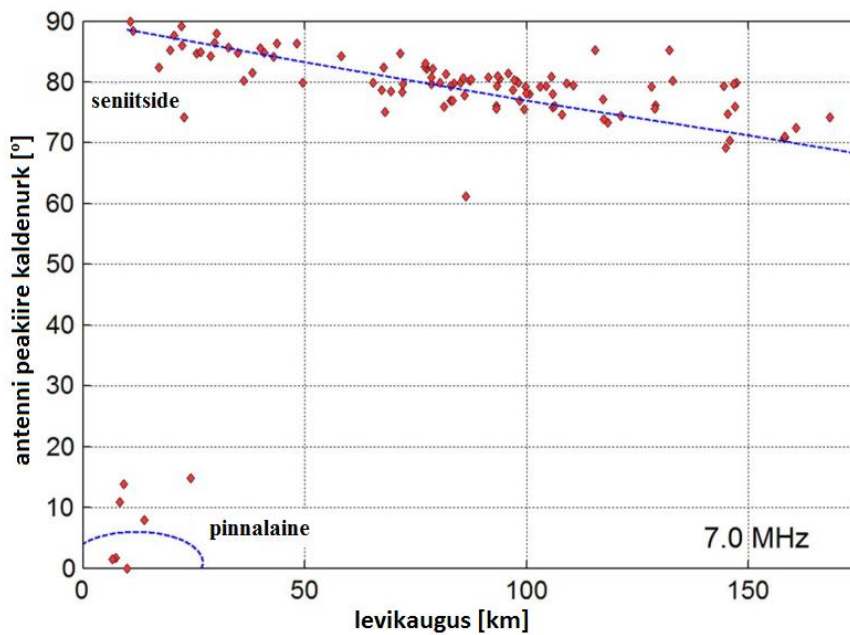
Joonis 10. Seniitside katteala arvutamise lihtsustatud joonis koos valemiga [15].

Hulgaliselt katseid on läbi viinud ka Hollandi Raadioside agentuur koostöös Twente ülikooliga aastal 2015, mis tõestavad, et antenni kiirguse kaldenurka on vaja korrigeerida vastavalt soovitud leviala suurusele [7]. Oma katsete käigus viisid nad läbi umbkaudu 300 mõõdistust Hollandis, kus kasutati erinevaid distantse ja erinevaid antenni kiirguse kaldenurkasid. Mõõtetulemuste graafikutel (Joonis 11 ja 12) näeme punkte, mis viitavad katse edukale tulemusele ning sinist punktiirjoont, mis näitab eeldatavat tulemust. Võrreldes oma vahel 3,5 MHz ja 7 MHz graafikut näeme, et kõrgematel sagedustel avaldub konkreetselt antenni kiirguse kaldenurga mõju. Madalamatel sagedustel on mõju hajavam. Eesti oludes peaksime arvestama optimaalse

saatesagedusega ca 4 MHz lähedusse, mis jääb kahe graafiku vahepeale. Samas kui võrdleme 3,5 MHz ja 7 MHz graafikut omavahel siis näeme mõlemal juhul sarnast seost antenni kaldenurga ja distantsi vahel ning Eesti oludes saame eeldada, et kehtib samasugune seos.



Joonis 11. Antenni kiirguse kaldenurga sõltuvus levikaugusest 3,5 MHz juures [7].



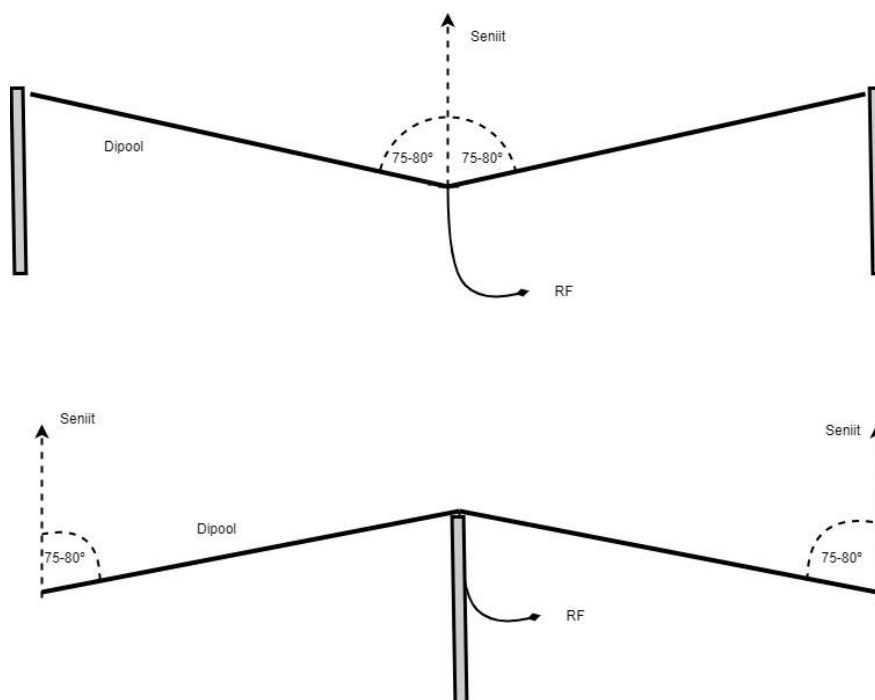
Joonis 12. Antenni kiirguse kaldenurga sõltuvus levikaugusest 7 MHz juures [7].

Eesti kohal on üldjuhul F2 kiht ca 15 km kõrgemal kui Hollandis [16], seega Eestis võiksime arvestada natuke väiksema kaldega kui hollandlaste läbi viidud uuringus, kuid reaalselt antenni paigaldades on see nii väike vahe mille võib arvesse võtmata jätta.

Arvestades käesolevas peatükis käsitletut võime Eesti kohta teha järgnevad üldistavad järeldused:

- selleks et katta oluline osa Eesti territooriumist peab arvestatav katteala olema raadiusega 75 - 100 km (diameeter 150 – 200 km);
- sellise katteala saavutamiseks peab antenni peakiire kaldenurk paigaldamisel jääma vahemikku 75 – 80° maapinna suhtes.

Kui eeldada, et sidevõrgu antennina kasutatakse horisontaalset dipooli siis antenni paigaldus võiks välja näha nagu kujutatud joonisel 13.



Joonis 13. Kaks horisontaalse dipooli paigaldusviisi koos optimaalse kaldenurgaga.

4.3 Seniitside antennid sõidukil kasutamiseks

Liikuva side puhul on seniitside kasutamine raskendatud, kuna üldjuhul liikumise all mõtleme liikumist sõidukiga, mille mõõtmed piiravad ka selle külge paigaldatavaid antenne. Horisontaalse dipooli paigaldamine sõidukile ei ole mõeldav kuna dipool

antenn paigaldatult võib olla 50 m pikk (vastavalt sagedusele ka pikem), mis ei mahu mingil moel sõidukile. Seetõttu kasutatakse sõidukitel väiksemaid antenne, mis oma mõõtmete tõttu kaotavad oluliselt efektiivsuses. Kõige lihtsamaks sõiduki antenniks seniitside puhul on tavaline lühilaine varrasantenn (4 – 5 m pikk), mis on painutatud peaaegu horisontaalsesse asendisse ehk antenni tipp painutatakse alla. Sellisel juhul on antenni vertikaalsihis kiirgus suurem kui püstisel antennil ning seniitiside saavutamine tõenäolisem. Samas antenni painutamisest saavutatav positiivne efekt sõltub siiski kasutatavast sagedusest ning väga madalaid sagedusi kasutades võiks antenn siiski jääda püstisesse asendisse [17,18].

Lähtuvalt Hagn ja Van derLaan-i uuringust [17] saame lühilaine varrasantenni maksimaalse võimenduse sagedusvahemikus 4 – 8 MHz välja arvutada järgneva valemiga:

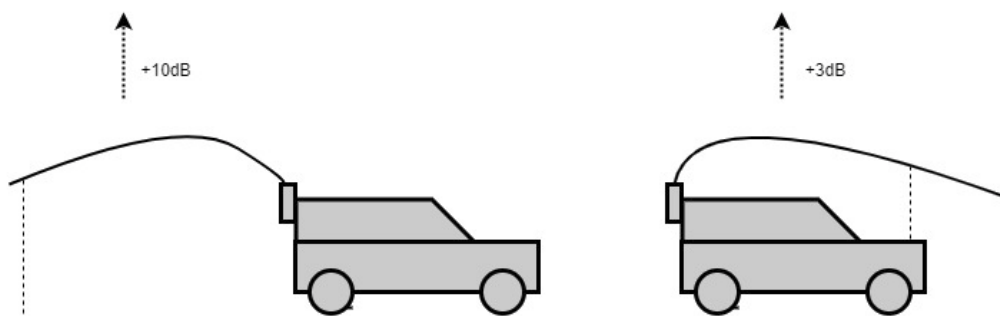
$$G_p \approx -70 + 55 \log_{10} \cdot f \quad (5)$$

kus;

G_p – varrasantenni võimendus (dBi),

f – saatesagedus (MHz).

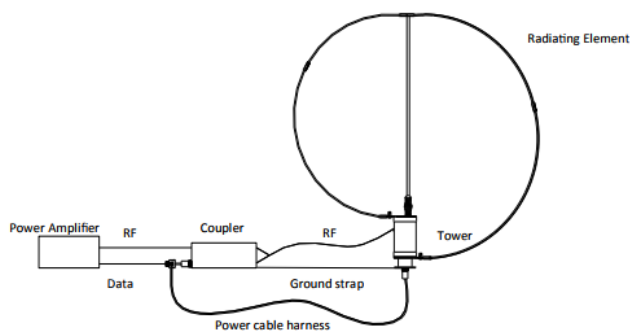
Sellisel juhul on varrasantenni võimendus 4 MHz peal suurusjärgus -37 dBi kuid peab arvestama, et tegu on peakiire suunal oleva maksimaalse võimendusega ja kui varrasantenn on püstiasendis, siis maksimaalne võimendus on antenni külgedel ehk horisontaalsihis ning vertikaalsihis on kiirgus veelgi väiksem. Varrasantenni alla painutamiseaga suurendame kiirgust just vertikaalsihis ehk otse üles ionosfääri poole. Lähtuvalt Hagn ja Van derLaan-i läbi viidud katsetest [17] paraneb allapainutatud antenni signaalitugevus ruumilaine vastuvõtul +10 dB ±4 dB võrreldes püstioleva varrasantenniga kui antenn on painutatud tahapoole ehk autost eemale. Kui aga painutada antenn ettepoole ehk üle auto kere nii, et antenni esimene ots on seotud auto ninasse ning antenni varda ja auto vahele jääb vähemalt ühe meetri jagu vaba ruumi, siis paraneb signaalitugevus võrreldes püstise varrasantenniga üksnes +3 dB ±4 dB (Joonis 14). Nendest tulemustest saame teha järelduse, et auto kere mõjutab antenni toimimist märkimisväärselt ning üle auto antenni painutamine ei ole soovitatav. Auto taha painutatud antennil paraneb signaali võimsus suurusjärgus 4 korda (6 dB) võrreldes üle auto painutatud antenniga.



Joonis 14. Varrasantenni paigaldus sõidukil.

Antenni painutamisel tuleb silmas pidada, et see annab efekti üksnes sagedustel alates 4 MHz-st. Madalamatel sagedustel 2 – 3 MHz ei ole antenni painutamine soovitatav ning sellega võib kaasnaeda hoopis vastupidine efekt ning üldine antenni efektiivsus hoopis väheneb [18]. Lähtudes Eesti tingimustest, kus päevane optimaalne kasutatav sagedusvahemik on 4 – 5 MHz ning öine suurusjärgus 2 – 3 MHz võib teha järelduse, et päeval ajal on antenni painutamine soovituslik, kuid öisel ajal side pidades tuleks antenn sättida taas püstisesse asendisse.

Sõidukitel kasutatakse palju ka raamantenni, mida üldjuhul peetakse oma omadustelt paremaks kui varrasantenni. Siiski on raamantenni puhul negatiivseks küljeks tema väikesed mõõtmed ning tema efektiivsus langeb oluliselt madalamatel sagedustel. Raamantenn paigaldatakse auto katusele nii, et kiirgav element on tavaliselt paralleelselt auto liikumise suunaga [19]. Antenni sobitamiseks on üldjuhul antenniga komplektis antennituuner, mis häälestub vastavalt saatesagedusele (Joonis 15). Raamantennist tuleb rohkem juttu ka mõõtmiste peatükis, kus viiakse läbi katsed Harris raamantenniga.



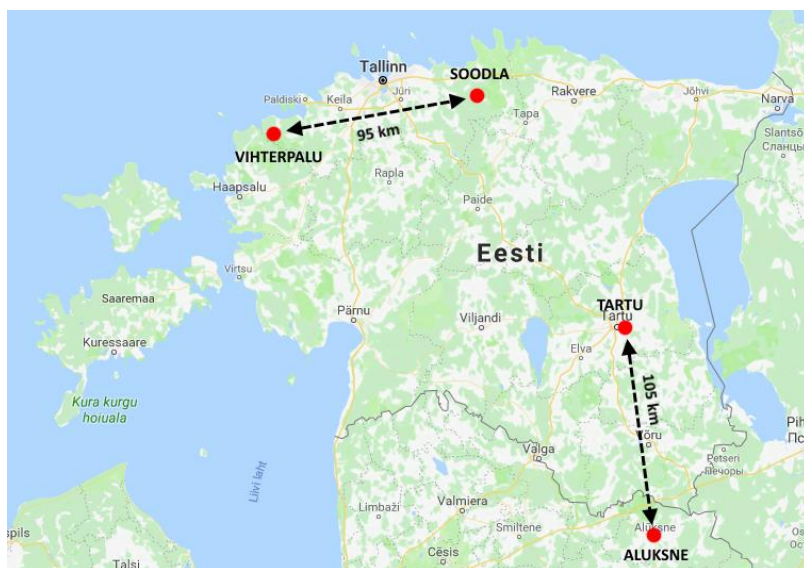
Joonis 15. Raamantenni tüüpiline ühendusskeem [19].

5 Levimudeli simulatsioonid

Käesolevas peatükis viiakse läbi levimudeli simulatsioonid kolme erineva tarkvaraga, milleks on ITURHFProp, VOACAP ja MARSsys. Kaks esimest on vabavarana internetist saadaval kõikidele, kuid kolmas MARSsys on litsentseeritud tarkvara, mis on loodud Türgi riikliku informaatika uurimiskeskuse *Tubitak Bilgem* poolt. Simulatsioonide käigus vaadatakse millistel tingimustel on side saavutatav, millised peavad olema kasutatavad sagedused ning kuidas aastaajad mõjutavad side toimimist. Aastaaegadest sõltuvalt viiakse läbi neli erinevat simulatsiooni:

- talv (jaanuar);
- kevad (aprill);
- suvi (juuli);
- sügis (oktoober).

Geograafilises mõistes simuleeritakse kahte erinevat distantsi sellise vahemaaga, et pinnalaine ei saaks enam märkimisväärselt simulatsiooni tulemust mõjutada. Üks simulatsioon viiakse läbi Põhja-Eestis Soodla ja Vihterpalu vahel ning teine simulatsioon Lõuna-Eestis Tartu ja Aluksne (Läti) vahel. Asukohad valiti lähtuvalt sellest, et hiljem oleks võimalik võrrelda reaalsete sidetestide ja simulatsioonide vastavust. Valitud asukohad ning nende vahelised distantsid on nähtavad joonisel 16.



Joonis 16. Simulatsiooniks valitud asukohad

Simulatsiooniks valitud lähteandmed (kehtivad mõlema otsa kohta):

- saatja väljundvõimsus – 20 W (Vatt);
- antenni tüüp – Horisontaalne poollaine dipool (4 dBi @ 9 m [7]);
- signaali tüüp – Ühe külgribaga moduleeritud signaal - SSB (*Single Side Band*);
- keskkonna mürad – Linnaväline müratase (*Rural*).

Simulatsioonideks vajalikud päikeseplekide arvu *SSN* väärtusteks kasutatakse Belgia observatooriumi ennustusi [14], mille väärtused on:

- jaanuar 2018: *SSN* = 18
- aprill 2018: *SSN* = 13
- juuli 2018: *SSN* = 10
- oktoober 2018: *SSN* = 8

Simulatsiooni käigus viiakse läbi ka sidevõrgu käideldavuse kalkulatsioone. Käideldavuse hindamiseks tuleb ette anda täiendavaid parameetreid, millest üks on vajalik signaali ja müra suhe *SNR*, mida esitatakse ühikuga detsibellides (dB). Oluline on antud juhul aru saada, et mida laiema ribaga on signaal seda suurem on ka müra summaarne võimsus vastuvõtja sisendis ja seda raskem on saavutada vajalikku *SNR*-i. Seetõttu on kehvade levitingimuste juures otstarbekas kasutada võimalikult kitsast signaali nii, et müra tase vastuvõtja sisendis oleks minimaalne ja side kergemini saavutatav. Antud juhul kasutame SSB signaali, mis on ribalaiusega *BW* (*bandwidth*) ca 2,5 kHz (olenevalt vastuvõtjast kasutatakse kas 2,4 kHz või 2,6 kHz ribalaiusega filtreid) [20].

Erinevates allikates kasutatakse vajaliku *SNR* esitamiseks erinevat meetodikat seega tuleb jälgida, mille kohta antud *SNR* kehtib ning vajadusel ümber teisendada, et need oleksid omavahel võrreldavad. Näiteks [21] andmetel on SSB signaali puhul vajalik $SNR = 40$ dB/Hz (ühe Hertsi ribalaiuse juures) ja kui teisendada see valemiga (6) [20] 2,5 kHz-sele sagedusribale saame, et SSB režiimis töötava vastuvõtja vajalik $SNR = 6$ dB.

$$SNR_{BW} = 10 \cdot \log\left(\frac{BW}{BW_{ref}}\right) \quad (6)$$

kus;

SNR_{BW} – signaali ja müra suhe vajaliku ribalaiuse juures;

BW – signaali ribalaius (antud juhul SSB $BW = 2,5$ kHz);

BW_{ref} – referents ribalaius (antud juhul $BW_{ref} = 1$ Hz).

Järgnevalt koguti erinevaid andmeid SSB signaali minimaalse vajaliku SNR kohta, et kasutada neid simulatsioonide läbiviimisel. Lähtuvalt tulemustest (Tabel 5) näeme, et erinevatele andmetele tuginedes minimaalne vajalik SNR võib varieeruda, siiski on näha, et enamusele andmetele tuginedes on minimaalne vajalik SNR SSB signaali puhul 6 dB ning seda väärtust kasutatakse ka simulatsioonide läbiviimisel.

Tabel 5. SSB signaali minimaalne vajalik SNR

Allikas	SNR SSB
[20]	6
[22]	6
[23]	10
[21]	6

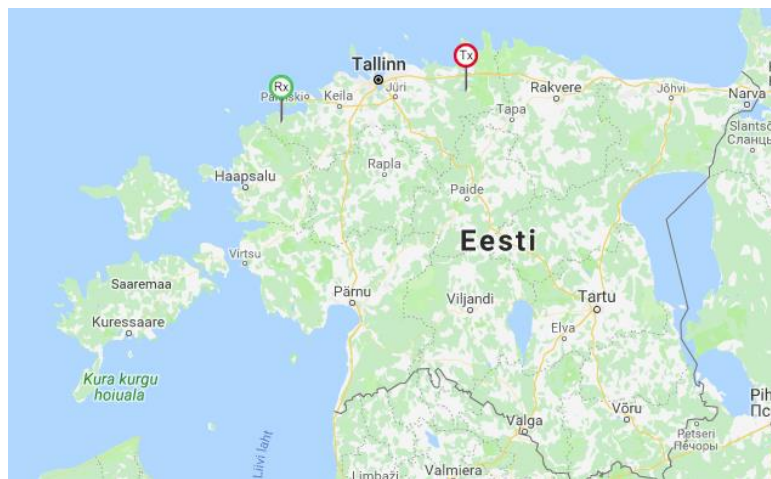
Järgnevaid simulatsioone silmas pidades peab autor oluliseks tähelepanu juhtida simulatsiooni joonistel esitatud ajateljele. Joonised kus on kujutatud tarkvara ekraanitõmmiseid on ajatelg universaalajas UTC (*Coordinated Univesral Time*). Töödeldud simulatsioonide joonistel on kasutatud aega UTC+2, mis kajastab täpsemalt Eesti ajavööndit, kuid ei võta siiski arvesse suveaega.

5.1 ITURHFProp

ITURHFProp on lühilaine simulatsiooni mudel, mis baseerub ITU-R P.533-13 soovitusel, nimetatud soovitus on vabalt alla laetav ITU-R veebilehelt [24]. ITU-R P.533-13 kuulub raadiolainete levimudelite kategooriasse, mis on mõeldud lühilaine sagedusalades 2 – 30 MHz sideühenduste planeerimiseks. Antud mudel ei arvesta ainult lainelevi sageduslike eripäradega vaid võtab arvesse ka signaal-müra suhet ja sidepidamise kellaajalist sõltuvust sagedusest nii analoog kui digitaalsete sidesüsteemidega. Soovitus kirjeldab sidepidamise võimalusi eelkõige ionosfääri ruumilaine ärakasutamisel, pinnalaine levimudeleid antud soovitus ei käsitle [25].

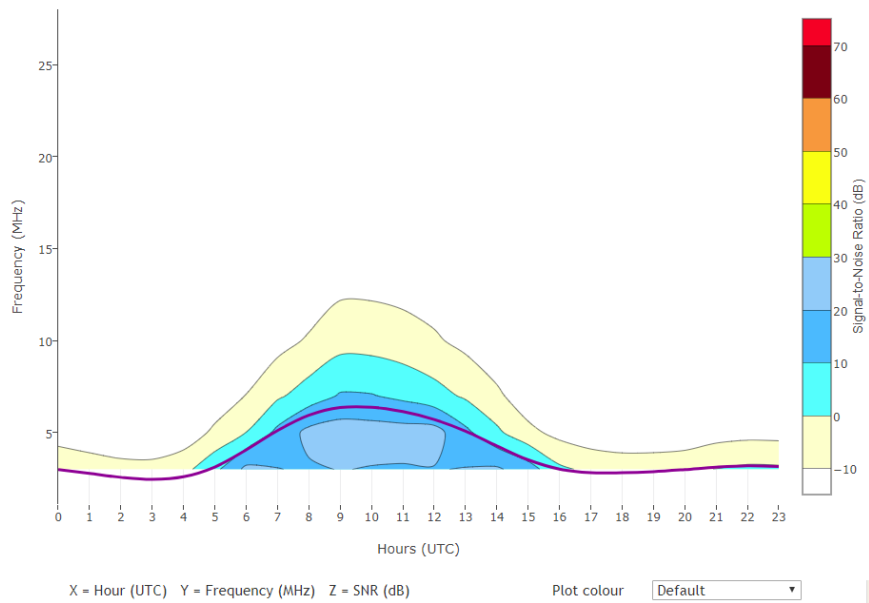
Simulatsioon viiakse läbi veebirakendusega aadressil <http://www.predtest.uk>, milles sisalduv tarkvara on üles ehitatud ITURHFProp mudelile ning lisatud on kaardirakendus kasutamise lihtsustamiseks. Päikese plekkide arvu käsitsi sisestama ei pea, see võetakse automaatselt NOAA lähikosmose ilmaennustuse (*NOAA Space Weather Prediction Centre*) veebilehelt [26].

Esmalt viidi läbi simulatsioon 2018 aasta jaanuari kohta nii, et saatja asub Soodla objektil ning vastuvõtja asub Vihterpalu objektil (Joonis 17). Joonisel 18 näeme simulatsiooni tulemusi, kus värvidega on esitatud saavutatav *SNR* erinevatel kellaaegadel ja erinevate sageduste juures. Lilla joonega on graafikul tähistatud *MUF*. Tulemustest näeme, et päevasel ajal tõuseb *MUF* vahemikku 5 – 6 MHz ning *MUF*-i sagedustel on saavutatav *SNR* kuni 20 dB. *MUF*-st natuke allpool olevatel sagedustel (*FOT*) on saavutatavad ka *SNR* väärtused vahemikus 20 – 30 dB, mis on täiesti piisavad kvaliteetse side saavutamiseks. Samas öisel ajal näeme, et *MUF* püsib üldiselt 3 MHz piiri peal ja hommikusel ajal võib langeda ka alla 3 MHz-i. Signaali tugevust öisel ajal hinnata on raske kuna graafik ei kajasta sagedusi mis jäävad alla 3 MHz-i, kuid siiski on aimatav, et *SNR* väärtused on öösel oluliselt väiksemad ja jäävad 0 dB lähedusse. Simulatsiooni tulemusest lähtuvalt on side päevasel ajal saavutatav, kuid öisel ajal võib osutuda problemaatiliseks kuna minimaalselt vajalik 6 dB *SNR* ei ole tagatud.



Joonis 17. ITURHFProp Soodla-Vihterpalu simulatsiooni saatjate asukohad [27].

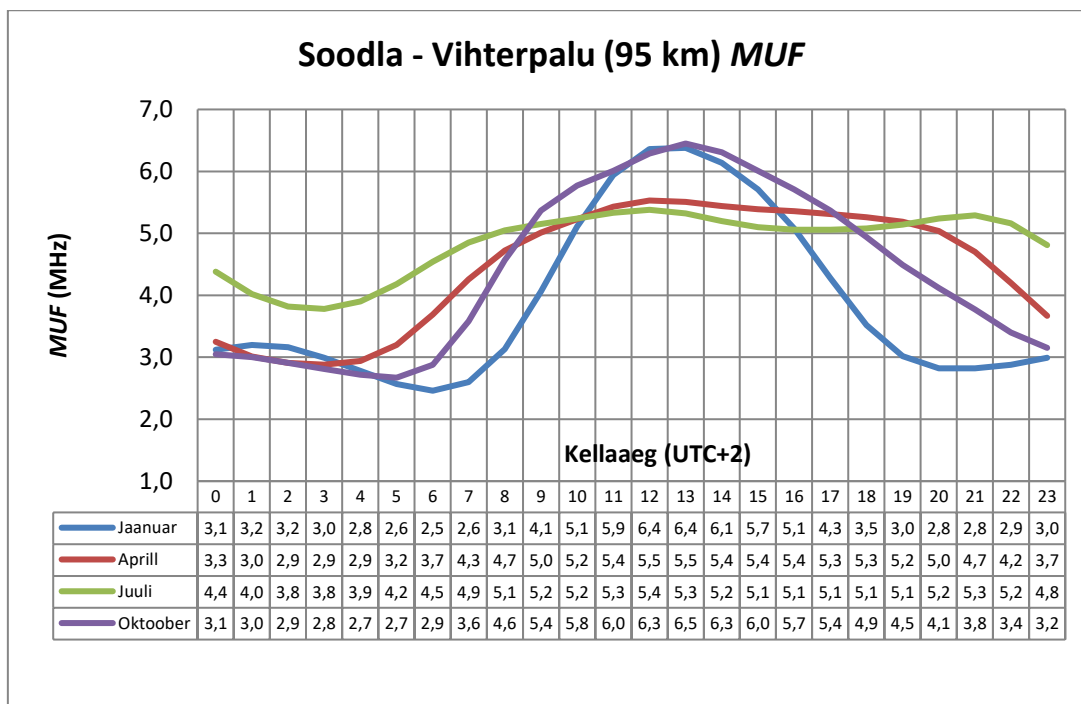
MUF + SNR. From Lat. 59.3794, Long. 25.5394 to Lat. 59.2352, Long. 23.8784



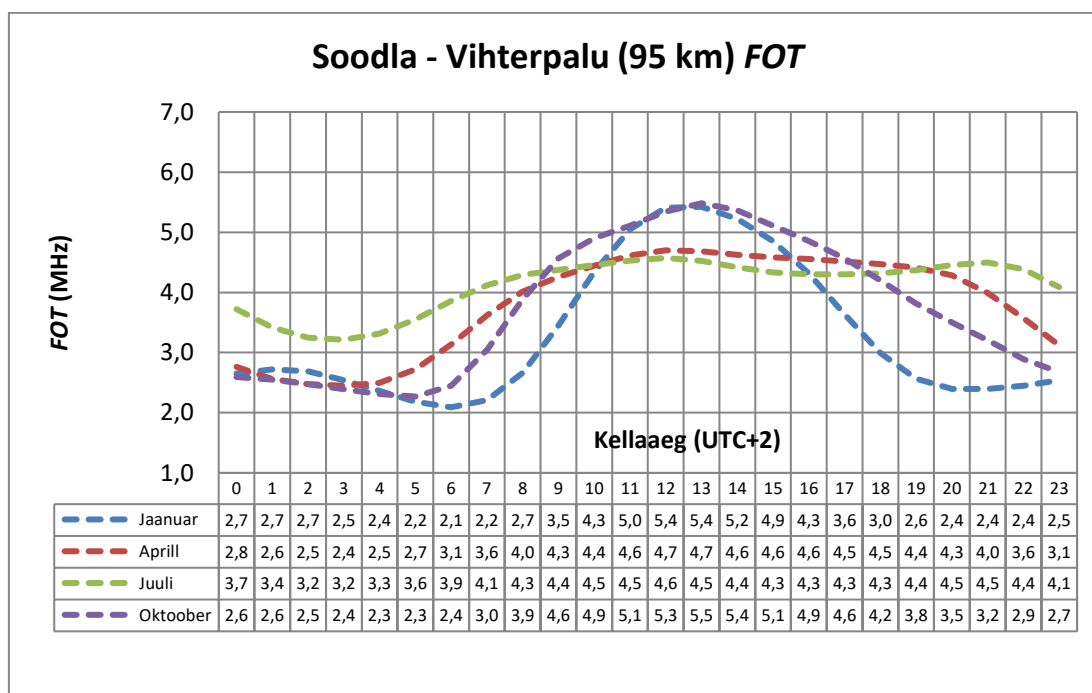
Joonis 18. ITURHFProp Soodla-Vihterpalu simulatsioon (jaanuar 2018) [27].

Käesolevas peatükis käsitleme edaspidi simulatsioonide koondtulemusi, mille põhjal saab teha järeldusi rakenduse ennustuste tulemustest. Lisa 2 koondab endas kõigi 8 simulatsiooni üksikasjalikke tulemusi (SNR , MUF) millest lähtuvad ka järgnevad analüüsid. Veebirakenduse poolt kalkuleeritavad graafikud algavad alates 3 MHz-st, mis ei kajasta Eesti tingimusi täiel määral, kuid võttes aluseks rakenduse arvtulemusi on võimalik teha ka järeldusi madalamatel sagedustel.

Soodla-Vihterpalu simulatsioonide koondtulemusena (Joonis 19 ja 20) näeme, et signaali levi tingimused on üsna muutuvad ja sõltuvad aastaegadest. Sügisesed ja talvised levitingimused on üsna sarnased, kus öisel ajal võib MUF langeda kuni 2,5 MHz-ni, mis omakorda tähendab optimaalset saatesagedust (FOT) 2,1 MHz ning väga madalaid SNR väärtusi. Päeval ajal jääb FOT üldiselt vahemikku 3 – 5,5 MHz ning saavutatav SNR jääb vahemikku 10 – 30 dB. Suvisel ja kevadisel ajal on ööpäevased levitingimused tunduvalt ühtlasemad. Kevadisel ajal hommikune saatesagedus jääb üsna madalaks, kuid ülejäänud ööpäeva jooksul on tunduvalt stabiilsem. Samuti saavutatavad SNR -d jäävad kogu ööpäeva jooksul üldiselt vahemikku 5 – 20 dB nii kevadel kui ka suvel.



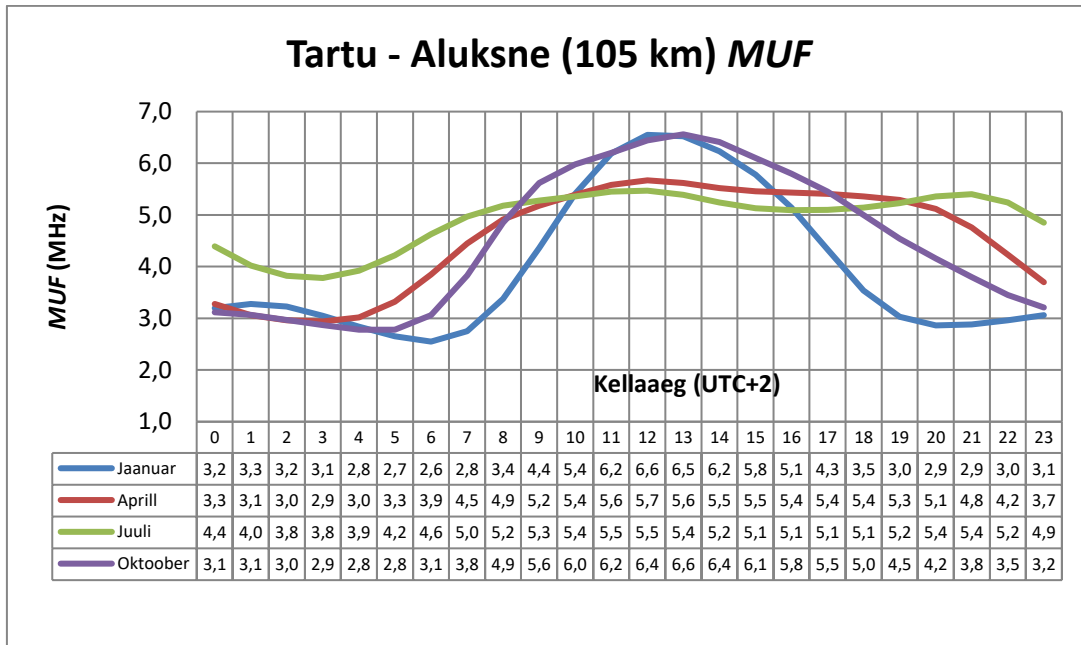
Joonis 19. ITURHFProp Soodla-Vihterpalu MUF simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.



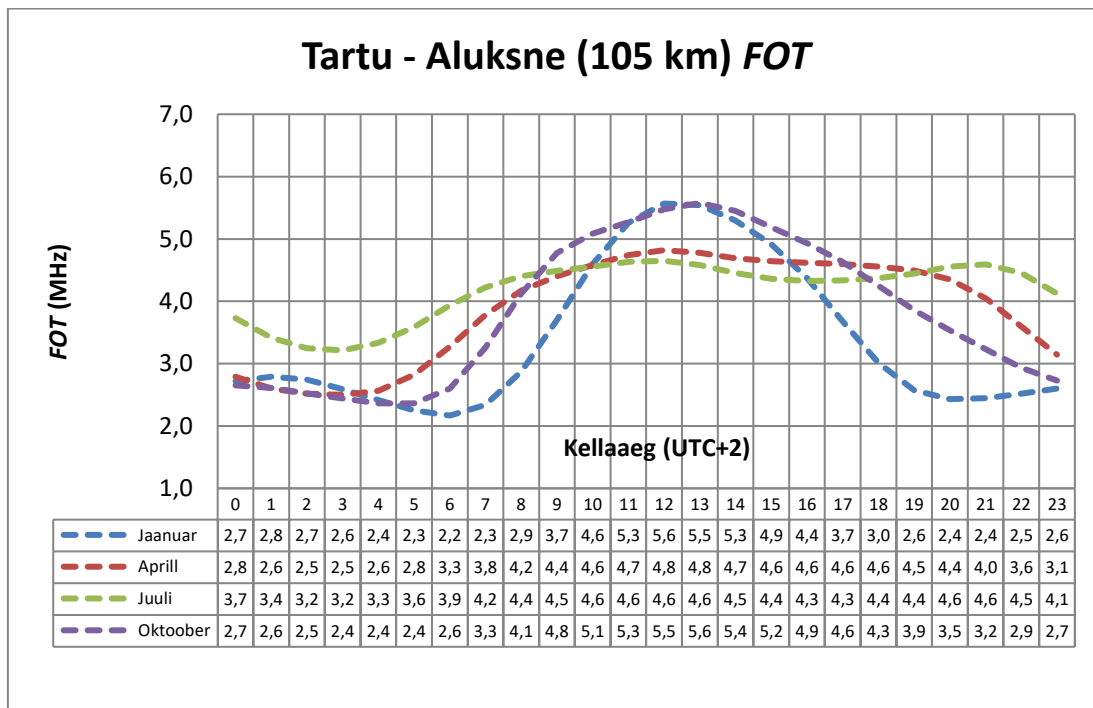
Joonis 20. ITURHFProp Soodla-Vihterpalu optimaalne saatesagedus FOT (MUF·0,85) simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.

Tartu-Aluksne simulatsioonitulemused (Joonis 21 ja 22) ei erine eriti Soodla-Vihterpalu tulemustest. Geograafiline asukohta muutus 200 km võrra ei muuda oluliselt levitingimusi ja simulatsiooni tulemused on väga sarnased. Siiski näeme, et geograafiliselt põhja poolse simulatsiooni optimaalsed saatesagedused on natukene madalamad. Graafikult on seda raske märgata, kuid arvtulemustest on näha, et

saatesagedused on mõningatel juhtudel 100 kHz võrra madalamad. See tuleneb asjaolust, et mida lähemal me ekvaatorile oleme seda rohkem päikesekiirgus saab ionosfäär ning üha kõrgemad sagedused hakkavad maapinnale tagasi peegelduma.



Joonis 21. ITURHFProp Tartu-Aluksne *MUF* simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.



Joonis 22. ITURHFProp Tartu-Aluksne optimaalne saatesagedus *FOT* ($MUF \cdot 0,85$) simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.

Võrgu käideldavuse simulatsioone ITURHFprop tarkvaraga läbi ei viidud, kuna minimaalse vajaliku *SNR* väärtust käsitsi muuta ei saa ja tarkvara poolt pakutav vaikeväärtus ei tundunud realistlik.

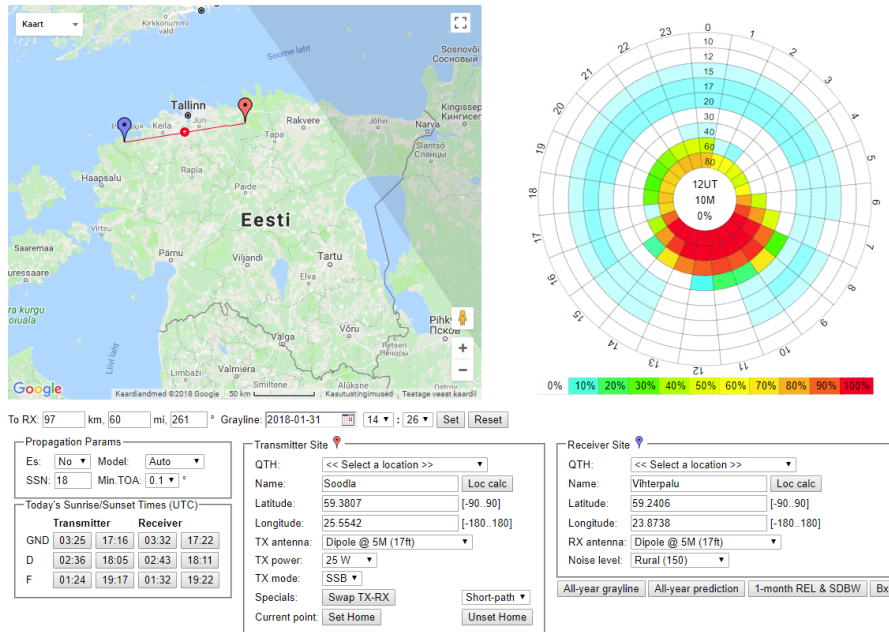
5.2 VOACAP

VOACAP on lühilaine simulatsioonitarkvara, mis on loodud USA sagedusregulaatori NTIA (*National Telecommunication and Information Administration*) poolt ja oli algselt mõeldud *Voice of America* lühilaine ringhäälingujaamade levi simulatsiooniks. Aja jooksul on see kujunenud üheks sisukamaks ruumilaine side rakenduste planeerimistarkvaraks maailmas. VOACAP on vabavara ning vabalt kättesaadav igatühele. Tarkvara on kasutatav nii eraldi installituna kui ka veebirakendusena, kuid samas veebirakenduse võimalused on piiratumad kui installeeritavas versioonis [21].

Simulatsioone viidi läbi nii veebirakendusega, kui ka tarkvara installeeritava täisversiooniga. Installeeritava tarkvara eripäraks on, et päikeseplekide arv *SSN* (*sunspot number*) tuleb käsitsi sisestada ning selleks, et andmed oleks võrreldavad kasutati mõlemal juhul Belgia observatooriumi ennustusi [14], mille täpsed väärtused on välja toodud peatüki alguses.

Esmalt teostati lihtsustatud simulatsioon veebirakenduses Soodla-Vihterpalu distantsil. Joonisel 23 näeme simulatsiooni algandmeid ja tulemusi. Ringikujulise graafikuga on näidatud simulatsiooni tulemused, kus ringis olevad numbrid näitavad kellaaega (UTC) ning vertikaalsed numbrid tähistavad lainepikkust. Samuti näeme, et erinevate värvidega on tähistatud sidevõrgu käideldavus. Jooniselt näeme, et päevasel ajal on saavutatav 80 – 100 % võrgu käideldavus 80 ja 60 m lainealades (3,7 ja 5 MHz), kuid öisel ajal on kasutatav ainult 80 m laineala (3,7 MHz) ning sedagi üksnes 50 – 80 %-se käideldavusega, mille miinimum jääb hommikustele tundidele.

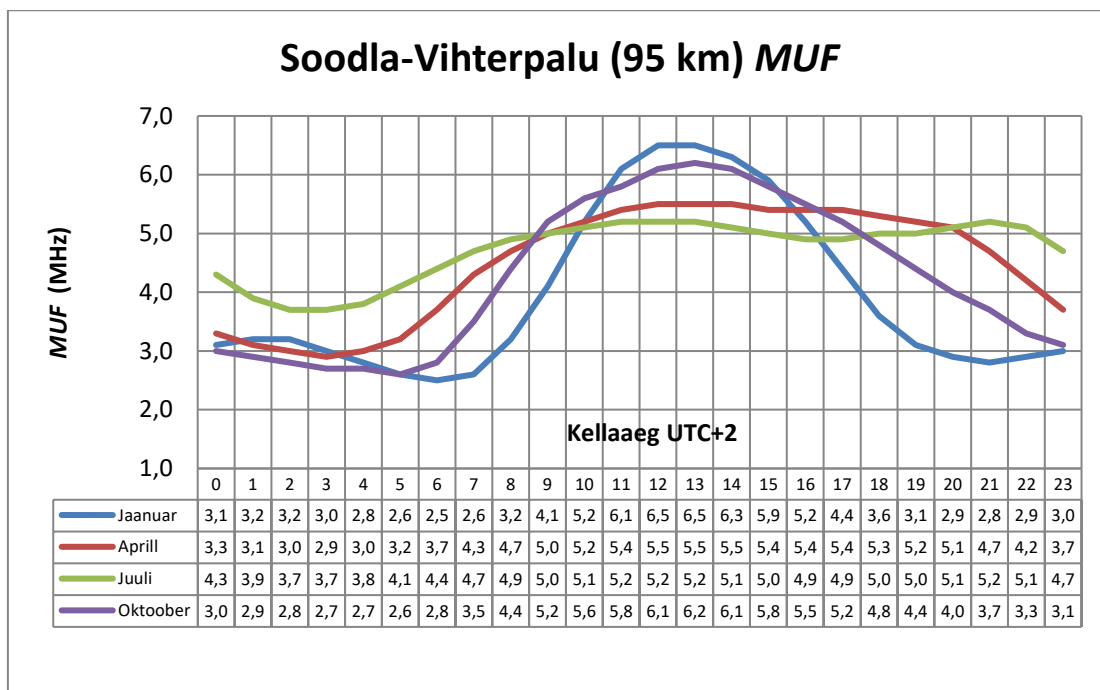
Veebirakenduses käsitletakse üksnes konkreetseid lainealaid, põhjuseks on asjaolu, et veebirakenduse liides on kirjutatud raadioamatöörade poolt ning käsitleb üksnes raadioamatööridele kasutuseks eraldatud sagedusalade analüüse. Detailsema sagedusanalüüsi tulemusi on võimalik saada installeeritava VOACAP versiooniga.



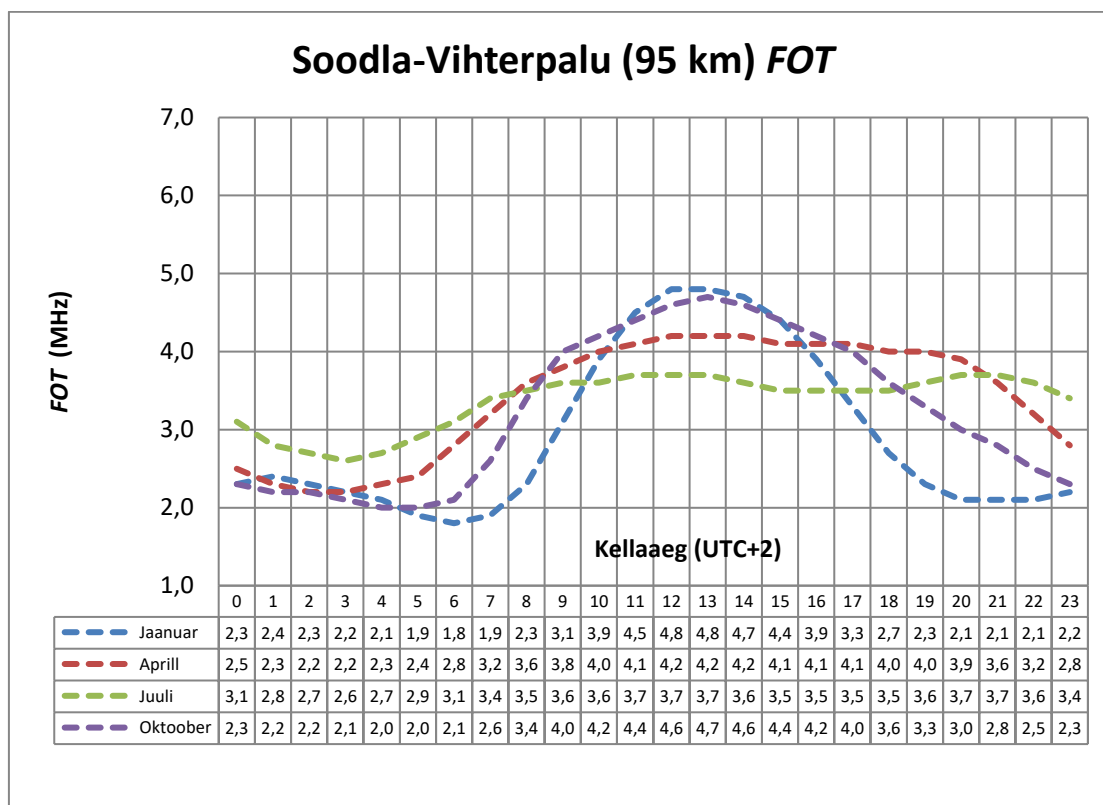
Joonis 23. VOACAP Soodla-Vihterpalu simulatsioon jaanuar 2018 [21].

Järgnevalt viidi läbi hulgaliselt simulatsioone installeeritud VOACAP tarkvaraga nii Soodla-Vihterpalu kui ka Taru-Aluksne distantsil kasutades erinevaid aastaegasid. Simulatsioonide detailsed graafikud on leitavad käesoleva töö lisa 3 ning peatükis käsitletakse edaspidi ainult koondtulemusi. *FOT* arvutamisel ei ole lähtunud valemist (3) vaid vastav *FOT* on arvutatud tarkvara poolt.

Soodla-Vihterpalu simulatsiooni koondtulemustest (Joonis 24 ja 25) näeme taas, et levitingimused on väga muutuvad ja sõltuvad ööpäevasest kellaajast ning aastaegadest. Sügisese ja talvise sageduse graafikud on üsna sarnased. Öisel ajal jääb *FOT* üldiselt vahemikku 2 – 2,5 MHz, kuid hommiku tundidel võib isegi langeda alla 2 MHz (1,9 MHz @ jaanuar; kellaegadel 05 - 06). Päevasel ajal on kasutatav sagedusvahemik 2,5 – 4,5 MHz. Kevadisel ja suvisel ajal on levitingimused stabiilsemad ning optimaalne saatesagedus *FOT* jääb kogu ööpäeva lõikes vahemikku 2,3 – 4,2 MHz. Huvitav asjaolu on see, et võrreldes ITURHFProp simulatsioonidega on pakub VOACAP ca 500 kHz võrra madalamaid saatesagedusi millest lähtub, et levitingimused peaksid olema kehvemad VOACAP arvates.

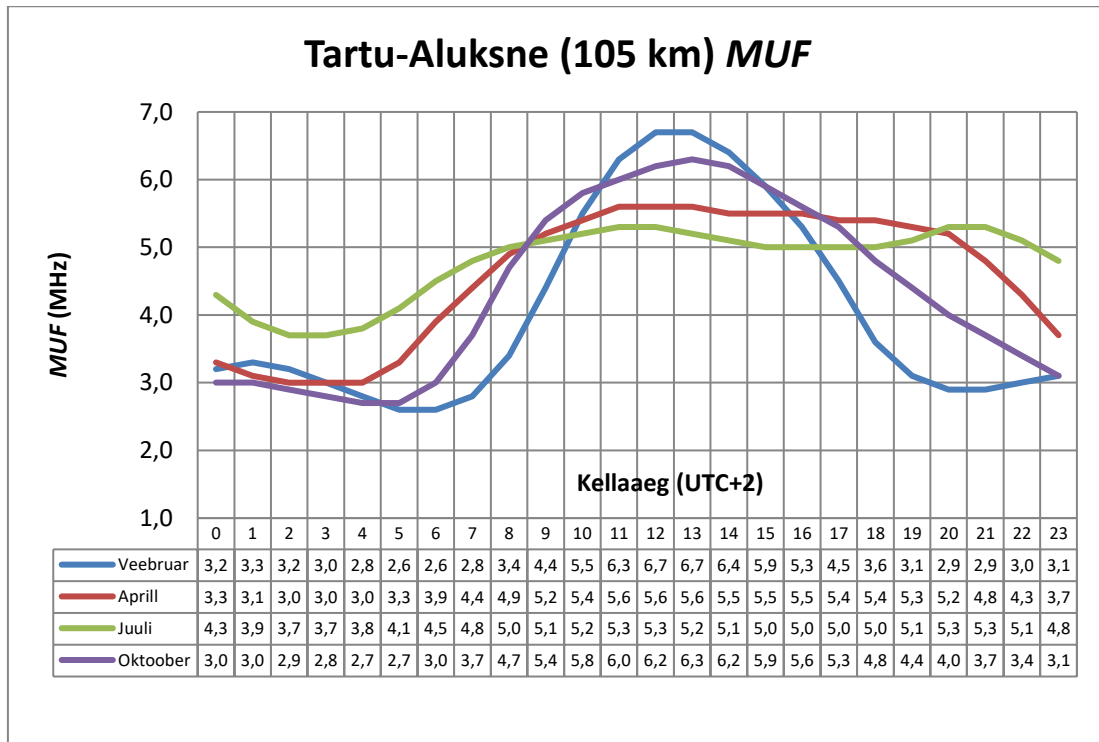


Joonis 24. VOACAP Soodla-Vihterpalu MUF simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.

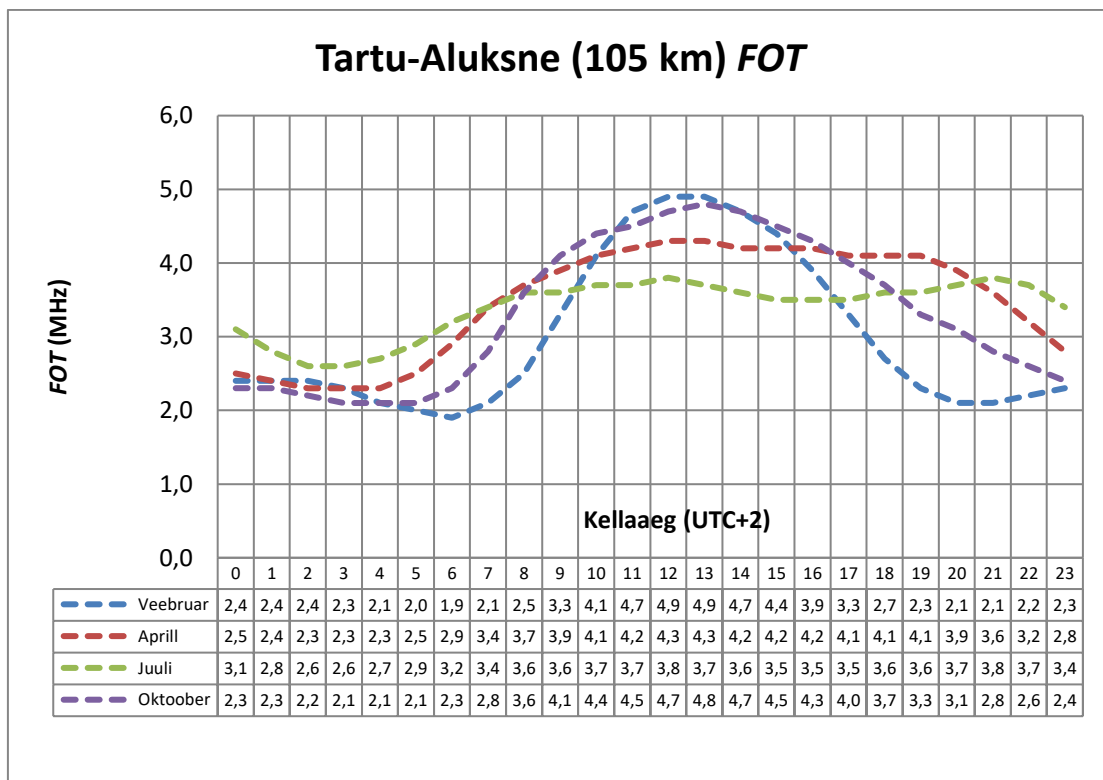


Joonis 25. VOACAP Soodla-Vihterpalu FOT simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel

Tartu-Aluksne simulatsioonidest näeme (Joonis 26 ja 27), et oluliselt midagi muutunud ei ole geograafilise asukoha muutusega. Samamoodi on märgata väikest FOT suurenemist nagu ka ITURHFProp ennustuses.



Joonis 26. VOACAP Tartu-Aluksne MUF simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.

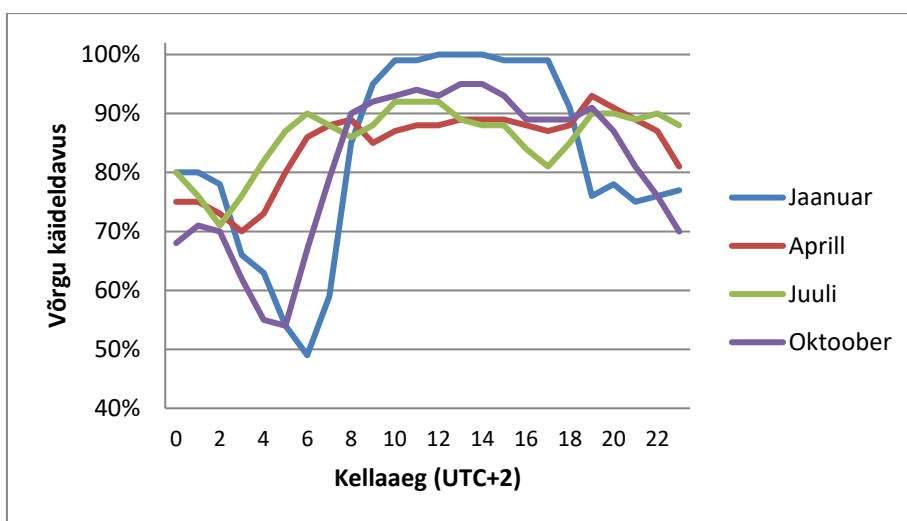


Joonis 27. VOACAP Tartu-Aluksne FOT simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.

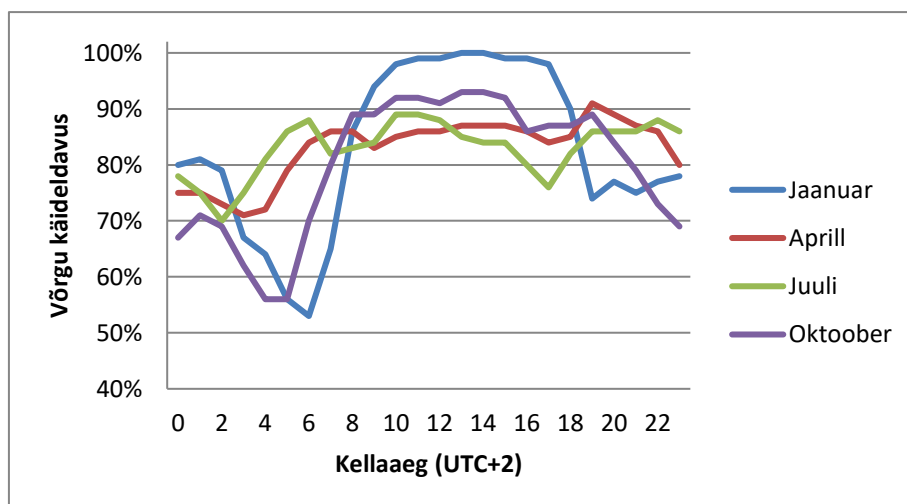
Täiendavalt viidi läbi simulatsioon Soodla-Vihterpalu ja Tartu-Aluksne võrgu käideldavuse kohta, et saada ülevaade millises ulatuses on side tagatav. Käideldavuse

hindamiseks kasutati VOACAP-i sisseehitatud mudelit, mille kohaselt side tagamiseks SSB signaali puhul peab signaal müra suhe olema vähemalt 6 dB [21].

Simulatsiooni tulemusest (Joonis 28 ja 29) näeme, et 100%-list käideldavust ei ole võimalik pidevalt saavutada eriti veel päikese aktiivsuse tsükli lõppfaasis, kus SSN on madal. Eriti muutlik on olukord taas talvisel ajal ja sügisel, kui päikest on vähe ning öisel ajal F kiht hõre ning sellisel juhul võib võrgu käideldavus langeda suurusjärku 50 – 60% ja side saavutamine võib olla problemaatiline. Päeval ajal jääb käideldavus üldiselt vahemikku 70 – 95% ning ei ole väga suures sõltuvuses aastaegadest. Muutus tekib just öisel ajal siis kui F kihi kontsentratsiooni erinevused on kõige suuremad.



Joonis 28. VOACAP Soodla-Vihterpalu võrgu käideldavuse simulatsioon.

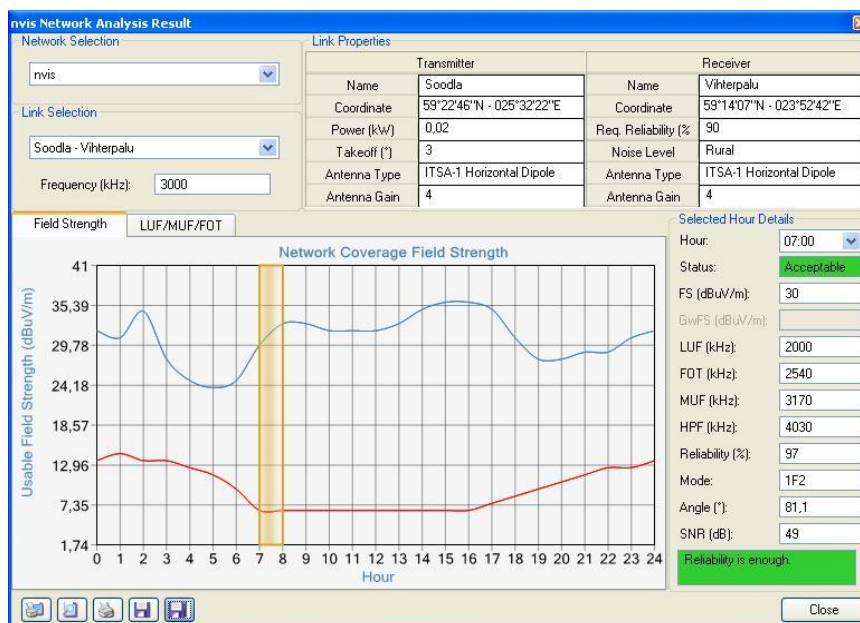


Joonis 29. VOACAP Tartu-Aluksne võrgu käideldavuse simulatsioon

5.3 MARSsys

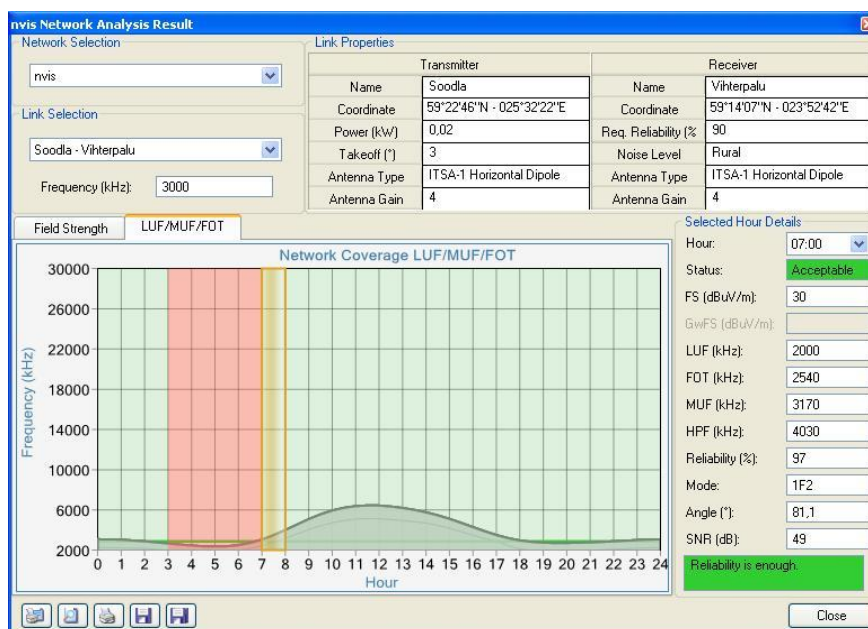
MARSsys on professionaalne sagedushaldus tarkvara, mis on loodud Türgi riikliku informaatika uurimiskeskuse *Tubitak Bilgem* poolt. Tarkvara koosneb kahest põhimoodulist millest üks on sagedushalduse litsentseerimise andmebaasi rakendus ning teine inseneri arvutus tarkvara ehk signaalilevi arvutus moodul. Signaalilevi moodul koondab endas radarite, ringhäälingu, raadiolinkide ja liikuva maaside simulatsioonimudeleid sealhulgas ka lühilaine mudelit. Lühilaine simulatsioonimoodul võimaldab arvutada nii pinnalaine kui ruumilaine komponendi levi ja neid ka omavahel kombineerida [28]. Antud peatüki raames käsitletakse üksnes lühilaine ruumilaine side arvutusi, mis on käesoleva töö fookus.

Esmalt viidi taas läbi Soodla-Vihterpalu simulatsioon jaanuaris 2018, kasutades [14] poolt ennustatud *SSN* väärtusega 18. Simulatsiooni tulemused on kajastatud joonisel 30, kus joonise ülemises otsas näeme simulatsiooni algandmeid koos saatesagedusega (3 MHz) ning allpool graafikul sinise joonena on näha signaali väljatugevuse (*Network Coverage Field Strenght*) muutus ööpäeva lõikes vastuvõtu antenni asukohas. Sidelingi hindamisel ei võeta arvesse üksnes signaali väljatugevust vaid põhiline hindamine käib vajaliku *SNR* baasil kuna ka müratase muutub ööpäeva lõikes. Graafikul saab iga tunni kohta eraldi andmed klikkides vastaval kellaajal ning paremal näidatakse selle kellaaja signaali parameetrid. Joonisel on klikitud hommikust ajavahemikku (oranž lai joon) kella 07 – 08 vahel ning signaali parameetritest näeme, et sidevõrgu käideldavus on 97 % (norm 90 %) ning *SSB* saavutatav *SNR* = 15 dB (kasutades valemit (6)).



Joonis 30. MARSsys Soodla-Vihtepalu simulatsioon jaanuar 2018 (väljatugevuse graafik).

Joonisel 31 näeme sama simulatsiooni tulemust, kuid signaali väljatugevuse graafik on asendatud *LUF/MUF/FOT* graafikuga ning helesinine värv graafikul tähistab, et vajalik sidevõrgu käideldavus vastavatel kellaaegadel on saavutatud ning punane värv, et käideldavus jääb alla soovitud normi, mille tõttu võib hommikutundidel side saavutamine olla problemaatiline.

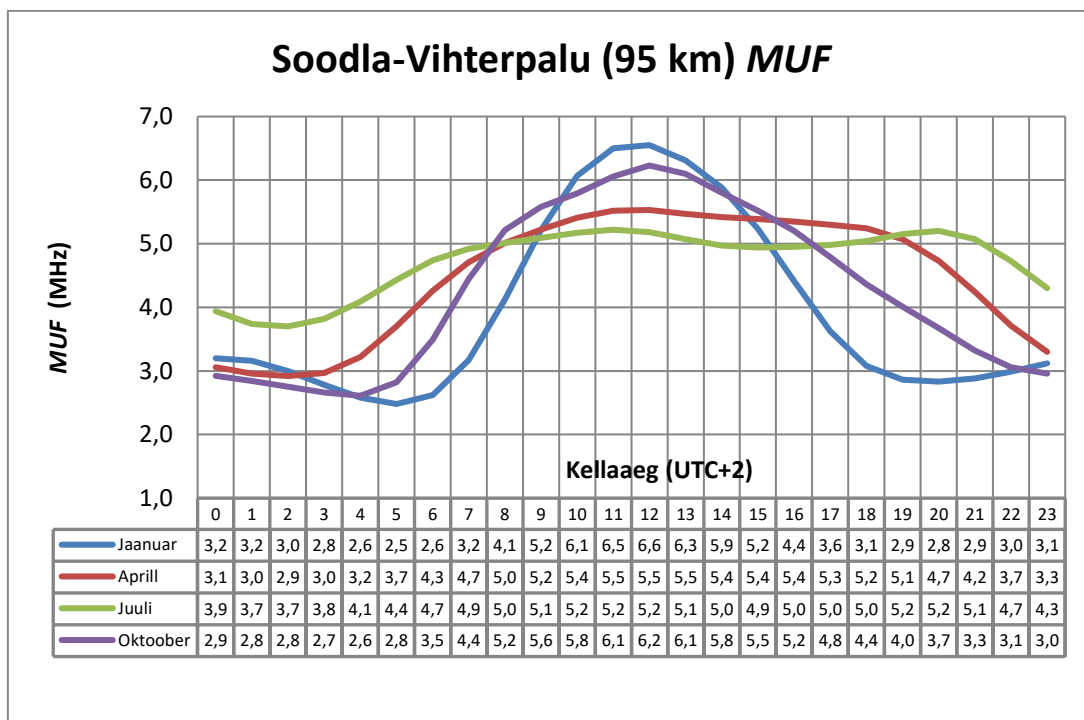


Joonis 31. MARSsys Soodla-Vihtepalu simulatsioon jaanuar 2018 (MUF graafik).

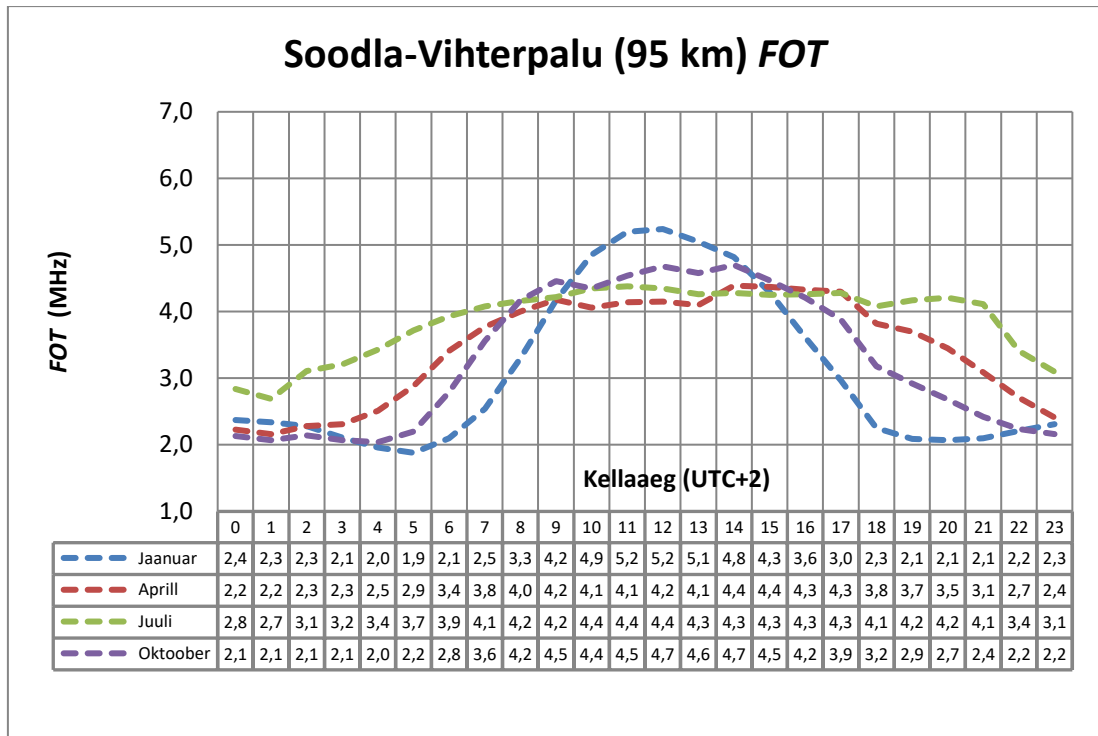
Viies läbi erinevaid simulatsioone MARSsys-ga selgus ka tarkvaral mõningaid puudusi. Nimelt sidevõrgu käideldavuse hindamisel kasutab tarkvara alati ühte konkreetset sagedust, mitte ei võta arvesse *FOT* muutumist ööpäeva lõikes, et saada kombineeritud

käideldavust. Selle asemel tuleb igal sagedusel käideldavus eraldi hinnata. Teiseks negatiivseks küljeks on sama omadus, mis ITURHFprop puhul. Nimelt kumbki tarkvara ei suuda signaali levi ega käideldavust hinnata allpool 3MHz piiri, mis Eesti tingimustest lähtuvalt on siiski vajalik.

Järgnevalt käsitletakse simulatsioonide koondtulemusi, mille üksikasjalikud simulatsioonid on välja toodud lisas 4. Simulatsiooni koondtulemustest (Joonis 32) näeme, et *MUF* graafik ei erine eriti ITUHFprop või VOACAP simulatsiooni tulemustest. Näha on aga väikest erinevust hommikuse ja õhtuse sagedusliku ülemineku aegades, kuid suures plaanis on graafikud väga sarnased. Samas kui vaadata *FOT* simulatsioonitulemusi (Joonis 33), siis näeme erinevusi ning näha on, et MARSSys ei arvuta *FOT* väärtusi ionosfääri peatükis esitatud valemiga (3). Suvise ja talvise *FOT*-i maksimaalsed sagedused on ca 0,5 MHz kõrgemad kui teiste simulatsiooni tarkvaradega (suvi 4,5 MHz ja talv 5 MHz). Öised minimaalsed saatesagedused jäävad siiski samasse suurusjärku (miinimum 1,9 MHz). Näha on, et MARSSys arvates on levitingimused natuke paremad kui teiste tarkvaradega. Samas kui võrrelda *MUF*-i hinnanguid reaalsete ionosfääri mõõdistustega (Lisa 1), siis on näha et need on liialt optimistlikud ja ei kajasta reaalseid tingimusi.



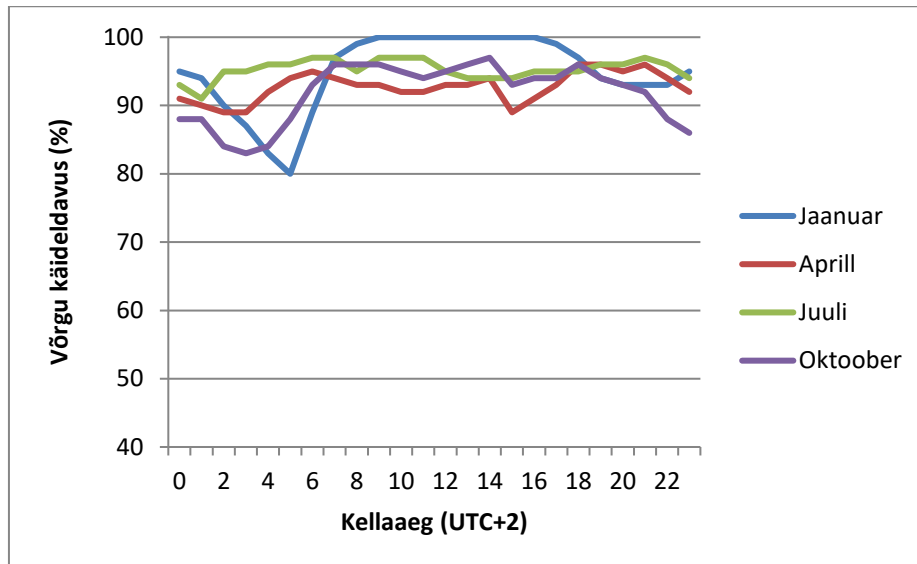
Joonis 32. MARSSys Soodla-Vihterpalu *MUF* simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.



Joonis 33. MARSsys Soodla-Vihterpalu FOT simulatsiooni koondtulemused erinevatel aastaegadel.

Järgnevalt viidi läbi Soodla-Vihterpalu võrgu käideldavuse simulatsioon. Joonisel 34 näeme simulatsiooni tulemusi, mis on üsna optimistlikud võrreldes VOACAP ennustusega. Võrgu käideldavus jääb peaaegu kogu aeg vahemikku 90 - 100%, mis on väga hea tulemus. Ainult sügisel ja talvisel ajal võib käideldavus langeda vahemikku 80 - 90%, kuid siiski on see täiesti arvestatav tulemus, ning sellest lähtuvalt peaks side olema saavutatav ka öisel ajal nii sügisel kui talvel. VOACAP samaväärne ennustus pakkus võrgu käideldavuseks 50 – 60%.

Tartu-Aluksne simulatsioone ei hakatud läbi viima kuna tulemused olid samaväärsed nagu Soodla-Vihterpalu distantsil ja geograafiline asukohta muutus 200 km võrra ei oma olulisi muutusi parameetrites ning samuti võrgu käideldavuses.



Joonis 34. MARSsys Soodla-Vihterpalu võrgu käideldavuse simulatsioon

5.4 Simulatsioonide tulemuste võrdlus

Võrreldes eeltoodud tarkvarade simulatsiooni tulemusi omavahel näeme, et *MUF* ja *FOT* graafikud on üldjoontes sarnased ja suuri erinevusi ei ole. Kõikide tarkvarade suvine *MUF*-i graafik jääb üldjuhul vahemikku 3 – 5,5 MHz Samuti talvine *MUF* võib langeda kõigil 2 MHz-i lähedusse ning päevasel ajal tõusta kuni 6,5 MHz-ni.

Kui võrdleme võrgu käideldavuse hinnanguid, siis näeme tunduvalt suuremaid erinevusi. MARSsys hinnangul jääb võrgu käideldavus vahemikku 80 – 100%, mis on väga hea tulemus. Samas VOACAP-i ennustus ei ole nii optimistlik ning hommikul ajal võib käideldavus langeda isegi 50%-ni.

Hinnates tarkvarade kasutusmugavust võib öelda, et ITUHFPProp ja VOACAP-i veebirakendused on kõige lihtsamad ja ei vaja suurt süvenemist. Samas VOACAP-i installeeritav versioon on vastupidiselt veebirakendusele väga detailne ja vajab arusaamiseks tunduvalt rohkem süvenemist. Samuti on VOACAP ainukene tarkvara, mis suudab käideldavust hinnata ka allpool 3 MHz-i piiri, mis on Eesti tingimustes siiski vajalik. MARSsys on oma kasutajaliidesega üsna mugav kuigi ülesehituse loogika erineb täiesti teistest tarkvaradest.

6 Testmõõtmised

Käeolevas peatükis viiakse läbi reaalsed sidetestid, et hinnata teooria ja levimudelite ennustuste paikapidavust Eesti tingimustes. Testmõõtmisi teostatakse kahes etapis - 30. jaanuaril 2018 viiakse läbi sidetestid statsionaarse raadiojaama ja mobiilse sõiduki vahel Põhja-Eestis ning 27. – 28. märtsil 2018 viiakse läbi ööpäevaringsed sidetestid statsionaarsete punktide vahel Lõuna-Eestis ja Põhja-Lätis.

Sidetestide läbiviimisel kasutatakse ALE protokoll, mis on sisse ehitatud enamustesse lülilaine raadiojaamadesse ning mille eeliseks on, et raadiojaam viib läbi sidekontrolli kõikidel ALE kanalivalikusse sisestatud sagedustel ning valib ise kõige paremate levitingimustega sageduse sideühenduse loomiseks. Nimetatud tehnoloogia lihtsustab oluliselt sagedusplaneerimist, kus kasutaja peab üksnes tagama, et raadiojaamas on piisav sageduste valik kogu kasutatava sageduspektri ulatuses.

Sidekanali hindamiseks kasutatakse sidelingi kvaliteedi analüüsi funktsiooni *LQA* (*Link Quality Analysis*), mille käigus ALE protokoll viib läbi sidekanali kontrolli kõigil etteantud sagedustel ning annab sidelingi hinnangu 100 punkti skaalal. *LQA* hinnag võtab arvesse bitivea tõenäosust ning signaali ja müra suhet [4].

6.1 Sidetestid sõiduki varrasantenniga

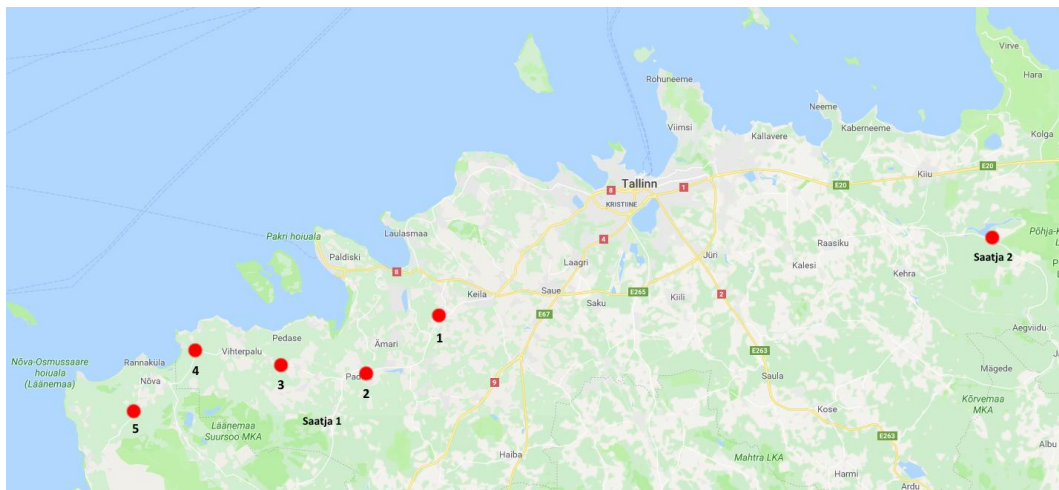
Sidetestide läbiviimiseks kasutati sõidukit, mille külge oli installeeritud lühilaine varrasantenn. Testide läbiviimisel selgus, et kahe sõiduki antenni vahel seniitside saavutamine on problemaatiline kuna sõiduki antennid on elektrilistelt lühikesed ning on väga väikese efektiivsusega (antenni võimendus on negatiivne). Seetõttu tuleb vähemalt ühes sidelingi otsas kasutada efektiivsemat antenni nagu näiteks poollaine dipool. Samuti tuleb sõiduki antenni madalat efektiivsust kompenseerida suurema väljundvõimsusega, et seniitside oleks saavutatav.

Esmalt viidi läbi sidetestid 30. jaanuaril 2018 Harjumaal kus testiti sidekaugusi vahemikus 70 – 110 km (Tabel 6). Paikne saatja (Saatja 2) asetses Soodlas saatja väljundvõimsusega 20 W, kasutades horisontaalset poollaine dipooli RF-1941 (häälestatud sagedusele 2 MHz) paigalduskõrgusega ca 5 m, ning mobiilne saatja (Saatja 1) alustas 70 km kauguselt sidetestide ning liikus kuni 110 km kauguseni (Joonis

35), väljundvõimsus 150 W koos võimsusvõimendi ja antennituuneriga, varrasantenn SB-V16F (Joonis 36) paigaldatud sõiduki katusele. Esialgseid sideteste alustati küll väiksematelt sidekaugustelt, et kontrollida side toimimist, kuid käesolevas peatükis käsitletakse sidekaugusi alates 70 km-st, et likvideerida pinnalainest tekkiv mõju.

Tabel 6. Varrasantenni sidetestide asukohad 30.01.2018

Saatja	Asukoht	kaugus (km)	Koordinaadid	Kellaeg
Saatja 2	Soodla	0	59,375N 25,627E	
Saatja 1	Lehola	70	59,28N 24,31E	11:47
	Padise	80	59,22N 24,16E	12:30
	Harju-Risti	90	59,23N 23,97E	13:22
	Vihterpalu	100	59,25N 23,78E	14:06
	Tusari	110	59,17N 23,64E	15:19



Joonis 35. Sidetestide asukohad kaardil 30.01.2018

Igas mõõtepunktis testiti sõiduki antenni kahte konfiguratsiooni. Ühel juhul tehti sidetestid püstise (vertikaalse) varrasantenniga ning teisel juhul maaga paralleelseks painutatud (horisontaalse) antenniga (Joonis 36), et kontrollida antennide peatükis kirjeldatud.



Joonis 36. Sõiduki antennide asendid – horisontaalne ja vertikaalne varrasantenn

Sidetestideks kasutati automaatset sagedusvaliku tehnoloogiat ALE ning sidelinki hinnati igal sagedusel ning asukohapunktis. Vaadates sidetestide tulemusi (Tabel 7) näeme, et side oli saavutatud kõikides asukoha punktides. Roheliseks on värvitud mõõtetulemused kus side kvaliteet oli piisav, et tagada kõneside edastus (LQA üle 40 punkti, lähtuvalt sidetestidel sooritatud sidekontrollidest). Tulemustest selgub, et mitte kõik sagedused ei andnud positiivseid tulemusi. Sagedusest 5,4 MHz kõrgematel sagedustel ei saavutatud sidet ühelgi juhul. Põhjuseks on taas asjaolu, et sagedused on kõrgemad kui MUF ning ionosfäärist tagasipeegeldust ei toimunud ning signaal lihtsalt läbis atmosfääri. Samas sagedustel, mis jäävad allapoole MUF -i on saavutatud piisava kvaliteediga side mitmel sagedusel korraga.

Kõige parema tulemuse andnud sagedused on märgitud tumerohelisega (Tabel 7) - üldjuhul on parima tulemuse andnud sagedused vahemikus 3,8 – 5,4 MHz ning mõningatel juhtudel on kasutatud sagedusi ka alla 3 MHz. Samas on võrdluseks siinkohal huvitav välja tuua, et simulatsiooni tulemused pakuvad FOT väärtuseks nendel kellaegadel sagedusi vahemikus 4 – 5 MHz. Siinkohal võib teha järelduse, et sageduste valikul ei peaks lähtuma üksnes FOT väärtustest ning jaama ALE kanalivalikus peaksid olema esindatud kanalid kuni maksimaalse MUF -i väärtuseni.

Tabel 7. Sidetestide tulemused 30.01.2018

		Vertikaalne antenn					Horisontaalne antenn						
		Lehola	Padise	Harju-Risti	Vihterpalu	Tusari*	Lehola	Padise	Harju-Risti	Vihterpalu	Vihterpalu*	Tusari*	
nr	sagedus (kHz)	70	80	90	100	110	70	80	90	100	100	110	
Saatja 1 - varrasantenn	1	2109	4	3	0	0	50	3	2	0	0	44	
	2	2407	46	32	0	37	45	41	29	42	44	50	43
	3	2701	40	69	69	46	69	34	69	52	44	59	61
	4	3809	0	0	0	38	79	0	0	43	49	53	48
	5	3900	46	53	4	46	75	59	47	52	53	63	67
	6	4854	57	33	50	44	43	42	62	50	40	14	38
	7	5268	58	62	50	54	24	89	99	69	35	31	22
	8	5419	62	64	80	52	29	69	100	63	41	36	26
	9	6935	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	9081	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	13958	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	18644	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	23016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	26441	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Saatja 2 - poollaine dipool	1	2109	47	37	0	0	40	0	0	0	0	0	
	2	2407	45	0	69	0	45	0	0	45	50	43	
	3	2701	40	69	79	0	69	0	0	44	0	59	60
	4	3809	0	0	0	0	79	0	0	43	48	53	17
	5	3900	46	53	32	0	75	49	0	52	53	54	0
	6	4854	57	0	0	0	43	42	62	50	32	0	0
	7	5268	58	62	43	54	0	89	99	59	35	0	0
	8	5419	62	64	0	52	0	69	99	58	0	0	0
	9	6935	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	9081	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	13958	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	18644	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	23016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	26441	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Kui võrrelda omavahel Saatja 1 ja Saatja 2 tulemusi, siis näeme et Saatja 1 puhul on testide tulemused paremad kui Saatja 2 puhul. See tuleneb asjaolust, et Saatja 2 puhul on signaali ekvivalentne isotroopne kiirgusvõimsus EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*) suurem ning seeläbi Saatja 1 poolt vastuvõetav signaal tugevam. Kui hindame millised võiksid olla saatjate kiirgusvõimsused siis saame Saatja 2 puhul 20 W-se väljundvõimsuse ja +3 dBi-se antennivõimenduse (Joonis 8) juures kiirgusvõimsuseks 16 detsibelli ühe vatti kohta (dBW) ($13 \text{ dBW} + 3 \text{ dBi} = 16 \text{ dBW}$). Samas Saatja 1 kiirgusvõimsuse hinnang 150 W-se väljundvõimsuse juures koos varrasantenni antennivõimenduse -31 dBi (valem (5)) ning arvestades veel antenni alla painutamisest tekkivat täiendavat +10 dB (Joonis 14) juures jääb suurusjärku 1 dBW ($22 \text{ dBW} - 31 \text{ dBi} + 10 \text{ dB} = 1 \text{ dBW}$). Sellest tulenevalt saame teha järelduse, et efektiivne antenn on üks võtmekomponentidest kvaliteetse side saavutamisel, mida on kehva antenni puhul võimsuse suurendamisega kompenseerida on ülimalt raske.

Täiendavalt võrreldi veel vertikaalse ning horisontaalse varrasantenni mõju sidekvaliteedile. Tulemustest (Tabel 7) on näha, et antenni asetuse mõju on suhteliselt väike ning ei ole eriti sagedusest sõltuv, vastupidiselt sõiduki antennide peatükis käsitletud teooriale. Kui üritada hinnata kumb antennipaigutus siiski parema tulemuse andis, siis võttes kõikide asukoha punktide *LQA* maksimum väärtuste (tumerohelise taustaga) aritmeetilised keskmised saame tulemuseks, et vertikaal antenni puhul keskmine *LQA* = 68,7 ning horisontaalantenni puhul keskmine *LQA* = 71,7. Kuna vahe on väga väike siis antud juhul ei saa teha järeldust kumb antenni paigutuse viis parema tulemuse andis.

Sidetestide tulemustest (Tabel 7) näeme veel, et mõned mõõtepunktid on tähistatud tärniga. Nendes mõõtepunktides on Saatja 2 horisontaalse poollaine dipooli alla paigaldatud täiendav peegeldustraat lahtiselt maapinnale, mis parandas *LQA* väärtusi keskel läbi 10 punkti võrra. Kehvade sidetingimuste juures või võrgu käideldavuse suurendamiseks on selline lähenemine soovitatav.

6.2 Sidetestid sõiduki raamantenniga

Sarnased sidetestid nagu varrasantenniga oli plaanis läbi viia ka sõidukile paigaldatava raamantenniga. Saatjate konfiguratsioonid olid sarnased eelmistele mõõtmistele kus paiksel saatjal (Saatja 2) on väljundvõimsus 20 W, kasutades horisontaalset poollaine

dipooli RF-1941 paigalduskõrgusega ca 5 m, ning mobiilsel saatjal (Saatja 1) on väljundvõimsus 150 W koos võimsusvõimendi ja antennituuneriga, varrasantenni asemel on auto katusele paigaldatud seekord raamantenn RF-3134-AT005 (Joonis 37).



Joonis 37. Sõiduki raamantenn RF-3134-AT005

Selle testimise käigus siiski ei saavutatud nii häid tulemusi kui varrasantenniga. Nimelt esmased sidetestid tehti ca 10 km kaugusel ning juba siis esines kvaliteetse sidekanali loomisel probleeme. Sidetestide jätkati kuni 40 km kaugusele (Tabel 8) ning siis loobuti kuna side kadus.

Tabel 8. Raamantenni sidetestide asukohad 27.03.2018

Saatja	Asukoht	kaugus (km)	Koordinaadid
Saatja 2	Pilka	0	58,408N 26,886E
Saatja 1	Melliste	10	58,334N 26,977E
	Kurista	20	58,244N 27,006E
	Mooste	30	58,173N 27,137E
	Leevaku	40	58,117N 27,289E

Raamantenni sidetestide tulemustest (Tabel 9) näeme, et piisav side kvaliteet saavutati ainult ühel korral - 10 km distantsi juures ning seegi suure tõenäosusega läbi pinnalaine. Alates 20 km ei saavutatud piisava kvaliteediga sidekanalit. Keeruline on antud juhul järeldada, millest ebatavaliselt kehv tulemus pärines. Levitingimused olid head kuna

samal ajal viidi läbi dipoolide vahel sidetestide, mille tulemused olid positiivsed. Pigem võiks järeldada, et kasutatud raamantennil on midagi viga. Mõõtmiste ajal esines korduvalt probleeme ka antenni sobitusega ning väljundvõimsust vähendati jaama poolt automaatselt.

Tabel 9. Raamantenni sidetestide tulemused 27.03.2018

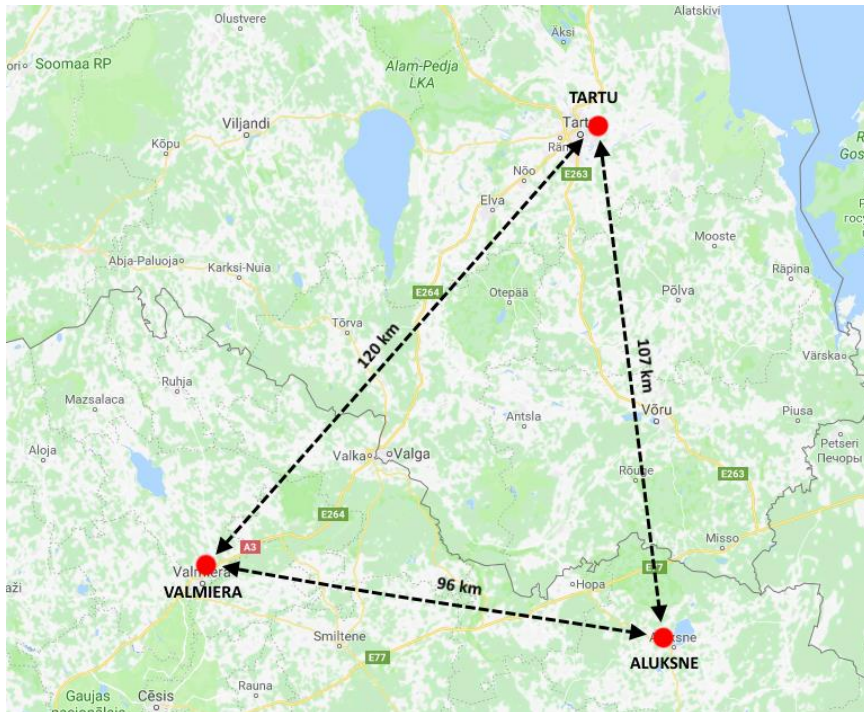
		Melliste	Kurista	Mooste	Leevaku	
nr	sagedus [kHz]	10	20	30	40	
Saatja 1 - raamantenn	1	2057	13	9	0	0
	2	2239	0	0	0	0
	3	2308	14	11	0	0
	4	2404	15	12	0	0
	5	2662	23	18	0	0
	6	4522	13	9	0	0
	7	4612	13	9	0	0
	8	4856	44	22	9	0
	9	5319	0	0	0	0
	10	5440	0	0	0	0

nr	sagedus [kHz]	10	20	30	40	
Saatja 2 - poolaine dipool	1	2057	0	0	0	0
	2	2239	0	0	0	0
	3	2308	0	0	0	0
	4	2404	0	0	0	0
	5	2662	23	0	0	0
	6	4522	0	0	0	0
	7	4612	0	0	3	2
	8	4856	44	23	0	0
	9	5319	0	0	0	0
	10	5440	0	0	0	0

6.3 Sidetestid statsionaarsete dipoolantennidega

Senised mobiilsed testid käsitlesid seniitside kasutamist ainult päeval ajal ning öisel ajal side hindamiseks andmed puudusid. Järgnevalt viidi läbi sidetestid statsionaarsete punktide vahel ööpäeva lõikes, et saada andmeid ka puudevate kellaegade kohta. Sidetestid viidi läbi ajavahemikul 27. – 28.03.2018 kolme asukohapunkti vahel (Joonis

38), millest üks asus Eestis ning kaks Lätis ning vahemaad jäid suurusjärku 100 km. Käeoleva töö autor nende mõõdistuste juures pidevalt ei viibinud ning autori panus piirnes Tartus antenni paigaldamise abistamisega ning mürataseme mõõdistustega.



Joonis 38. Sidetestide asukohad 27. – 28.03.20

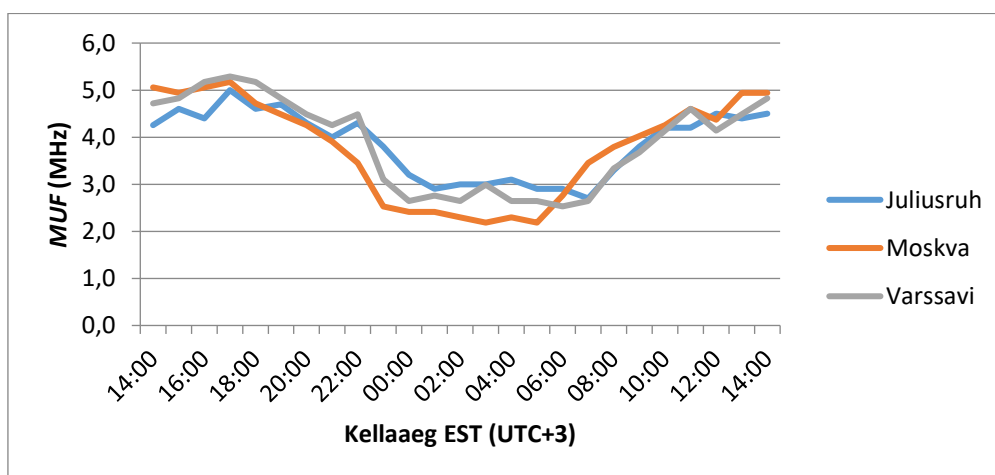
Kui esialgu oli plaanis Tartu poolne antenn paigaldada otse Tartu linna, siis linnatingimustes esineva suure inimtekkelise mürataseme tõttu koliti antenn linnast umbkaudu 8 km kaugusele. Mürataseme mõõdistuste spektripildid on välja toodud lisas 5 ning nende koondtulemustest näeme (Tabel 10), et müratase linnatingimustes on oluliselt kõrgem (8 – 27 dB) ning raskendab märkimisväärselt side saavutamist. Selle kompenseerimiseks tuleks saatjate väljundvõimsust suurendada keskestlābi 100 – 1000 korda ning kuna üldjuhul ei ole see realiseeritav, siis tuleks vältida asukoha valikul linnatingimusi ning teisi asukohtasid kus inimtekkelise müra tase võib olla kõrge.

Tabel 10. Mürataseme tugevus dipool antennis (Tartu linnas ja väljas)

	2 MHz	3 MHz	4 MHz	5 MHz
Tartu linn	30 dB μ V	17 dB μ V	16 dB μ V	16 dB μ V
Väljapool linna	3 dB μ V	8 dB μ V	2 dB μ V	-1 dB μ V

Tartu läheduses asuv raadiojaam töötas väljundvõimsusega 20 W kasutades horisontaalset poollaine dipooli paigalduskõrgusega antenni otstes umbkaudu 5m. Aluksne ja Valmiera raadiojaamad töötasid väljundvõimsusega 150 W ning antennina oli Valmiera jaamas kasutusel horisontaalne poollaine dipool ning Aluksnes pööratud V antenn (*inverted V antenna*). Sidetestide detailsed tulemused on toodud käesoleva töö lisa 6, kus on esitatud kõikide raadiojaamade vahelised sidetestid erinevatel sagedustel ning kellaaegadel. Käesolevas peatükis tehakse edaspidi järeldusi nendest tulemustest lähtuvalt.

Sidetestide tabelitest lisa 6 näeme, et maksimaalne sagedus, mis andis positiivse tulemuse on 4,8 MHz juures ja seda üsna lühiajaliselt. Sagedusel 5,3 MHz ei saavutatud kordagi sideühendust kuna *MUF* oli ületatud ning signaal maapinnale tagasi ei peegeldunud. Kui vaadelda sama ajavahemiku ionosondide tulemusi (Joonis 39) [29], siis on näha et tõepoolest maksimaalne *MUF* jäi 5,2 MHz piirimaile. Kuna ei kasutatud sidetestides sagedusi, mis jäid 4,8 MHz ja 5,3 MHz vahele, siis on raske hinnata millise ionosondi tulemused kõige paremini Eesti tingimusi kirjeldavad. Kui aga täiendavalt vaadelda öiseid sidetestide tulemusi, kus saavutati nõrk sideühendus 2,3 ja 2,4 MHz peal, siis lähtuvalt Moskva ionosondi vaatlustulemustest ei oleks selline ühendus võimalik olnud kuna *MUF* oli ületatud. Seega saab järeldada, et side planeerimiseks Eesti tingimustes sobivad paremini Juliusruhi ja Varssavi ionosondide andmed ning Moskva ionosondi vaatlustulemusi ei ole soovitatav kasutada.



Joonis 39. *MUF*-i muutus ionosondide andmetel 27. – 28.03.2018 [29]

Samuti kui võrrelda omavahel sidetestides kasutatud sagedusi, ionosondide *MUF* väärtusi (Joonis 39) ning simulatsiooni peatükis välja toodud *FOT*-i väärtusi kui optimaalseid saatesagedusi, siis saab teha olulise järelduse, et sageduste planeerimisel ei

tohiks lähtuda üksnes *FOT*-i väärtustest kuna väga häid tulemusi saavutati üsna *MUF*-i lähedastel sagedustel, mis ületasid *FOT*-i ning side planeerimisel peaks sellega arvestama.

Kui vaadelda kõikide jaamade sidetestide tulemusi (Lisa 6), siis on näha, et piisava kvaliteediga sidet ei saavutatud kogu ööpäeva lõikes. Ka päevasel ajal ei olnud alati vajalik sidekvaliteet saavutatud ($LQA > 40$). Päevastel kellaaegadel saavutati piisava kvaliteediga side ca 70% juhtudest. Probleeme esines nii hommikuse kui ka õhtuse üleminekuajades. Piiravaks asjaoluks on valitud sagedused, kuna puuduvad sidesagedused vahemikus 2,7 – 4,5 MHz, mis peaksid just eelkõige sobima hommikustel ja õhtustel üleminekusaegadel. Sellest lähtuvalt peab ALE kanalivalikus alati olema sagedused jaotatud ühtlaselt kogu sobiliku spektri ulatuses. Antud juhul soovitaks Eesti tingimustesse sagedusplaneeringut sagedusvahemikus 2 – 6 MHz nii, et oleks vähemalt kolm sagedust ühe megahertsi (üks sagedus iga 300 kHz tagant), mis teeb ühe sidevõrgu vajalike sageduste hulgaks vähemalt 12 sagedust.

Vaadeldes öiseid kellaaegasid on näha, et Alukse ja Valmiera kohta andmed puuduvad, kuid Tartu vastuvõtu jaama kohta on andmed olemas ning mõningaid järeldusi saab teha. Ajavahemikul 00:00 – 06:00 on näha, et maksimaalne *LQA* ulatub 25 – 35 punktini, mis jääb küll allapoole hinnangulist miinimumi, mida on vaja kvaliteetse sidekanali loomiseks. Mõningatel juhtudel võib küll kõneside olla häiretega arusaadav, kuid öine side siiski positiivseid tulemusi ei andnud. Seetõttu võib siinkohal teha järelduse, et öisel ajal side saavutamine on problemaatiline nii nagu ka teoorias on kirjeldatud.

Antud juhul peab küll autor oluliseks välja tuua, et eelnevad hinnangud põhinevad kõneside hindamisel kasutades ALE protokoll, kuid kasutades järgmise generatsiooni ALE 3G protokoll, mis võimaldab sidet saavutada veel madalamate singaal-müra suhete juures on võimalik side kvaliteeti tunduvalt parandada [30].

7 Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli uurida seniitkiirgusega sidet ja selle kasutusvõimalusi Eesti tingimustes. Kuna tänapäevased sidemetoodikad sõltuvad järjest rohkem elektritoitest ja tuumikvõrgu transmissiooni kanalitest siis ei ole nad arvestatavad riiklike sõjaliste konfliktide või looduskatastroofide olukorras kus igapäevased sidevõrgud võivad olla halvatud. Sellistes olukordades mängivad suurt rolli riiklikud alternatiivside võrgud mille üheks võimaluseks on ionosfääri peegeldusel baseeruv seniitside tehnoloogia. Kuna Eesti paikneb geograafilise suhteliselt põhja pooluse lähedal, siis päikesekiirguse vähesuse tõttu ionosfäärile ei pruugi Eesti tingimustesse sobida seniitside meetodid mida kasutatakse ekvaatori lähedal.

Ionosfääri tingimused omavad suurt rolli seniitside saavutamisel, seetõttu sidevõrgu sageduste planeerimisel tuleb jälgida, milline on ionosfääri kihtide hetkeseis Eesti kohal. Lähtuvalt ionosondide vaatlustulemustest ja läbi viidud mõõtmistest võib öelda, et Eesti tingimuste iseloomustamiseks sobivad kõige paremini Juliusruhi ja Varssavi ionosondide andmed ning sidevõrgu planeerimisel peaks nendest lähtuma. Samuti omavad suurt mõju päikese aktiivsuse 11 aastased tsüklid, mis käesoleva magistritöö kirjutamise ajal on üsna miinimumi lähedal ja seeläbi seniitside jaoks ei olnud soodsad tingimused.

Kasutades simulatsiooni tarkvarasid saab hinnata sidevõrgu realiseeritavust ja käideldavust. Magistritöö raames viidi läbi simulatsioonid ITUHFProp, VOACAP ja MARSys tarkvaradega. Simulatsiooni tulemustest, ionosondide vaatlusandmetest ning läbi viidud mõõtmistes võib järeldada, et tarkvarad üldjuhul ülehindavad ionosfääri F kihi hetkeseisu Eesti kohal, mis on põhiliseks peegelduvaks kihiks. Kõrgeim kasutatav sagedus (*MUF*) on üldjuhul madalam kui tarkvarade poolt pakutav ning reaalse *MUF* määramisel tuleks lähtuda ionosondide andmetest. Kui kasutatakse raadiojaama ALE tehnoloogiat, mis otsib ise kõige sobivama sageduse, siis peab kasutaja tagama, et raadiojaama sageduste valikus esindatud sagedused kuni *MUF*-ni välja. Üldjuhul on Eesti tingimustes kasutatav maksimaalne sagedus kuni 5,5 MHz, kuid aastaringse võrgu planeerimisel on soovitatav sagedusvalikut laiendada kuni 6 MHz-ni. Seeläbi on autori poolne soovitus, et seniitside võrgu planeerimisel peab ALE sagedusvalik olema vahemikus 2 – 6 MHz nii, et iga megaherti kohta oleks vähemalt kolm sagedust (üks

sagedus iga 300 kHz tagant). Kokku teeb see vajalike sageduste hulgeks vähemalt 12 sagedust ühe sidevõrgu kohta ning mõõtmistest on selgunud, et puudused sageduste valikus võivad lõppeda sideühenduse puudumisega. Talvisel ajal võib hommikutundidel optimaalne saatesagedus langeda isegi 1,9 MHz peale, kuid üldjuhul paneb selle kasutamisele piirangud antenn ja saatja, mille alumine sageduspiir on tüüpiliselt 2 MHz.

Kui hinnata seniitside võrgu käideldavust Eesti tingimustes, siis üldjuhul jääb käideldavus 70% - 90% vahele, mis võib kõikuda, olenevalt ionosfääri hetkeseisust. Näitlikult tähendab see, et kümnest päevast ühel või kahel ei ole side tagatud ning ülejäänud päevadel on side olemas. Kui täpsemalt vaadelda, siis päevasel ajal on käideldavus üldiselt hea, kuid just öisel ajal (eriti hommikutundidel) võib esineda probleeme side saavutamisel, ning käideldavus võib langeda 50%-ni ning seda eriti talvisel ajal kui päikest vähe. Võrreldes simulatsiooni tulemusi ja sideteste omavahel siis täpseima tulemuse on andnud simulatsioonitarkvara VOACAP. Sama tarkvara kasuks räägib asjaolu, et tegemist on ainukese tarkvaraga, mis suudab simuleerida sidevõrku ka alla 3 MHz ning on seetõttu on autori poolt soovitatav tarkvara.

Reaalne võrgu käideldavus sõltub väga palju ka antennist ja selle paigaldusest. Kahe paikse horisontaalse dipooli vahel on side üldjuhul saavutatav isegi väikeste võimsuste juures (20 W), kuid siiski on väga oluline antenni paigalduskõrgus. Dipooli soovitatav paigaldusviis on kujutatud joonisel 13, nii et antenn on paigaldatud kahe puu vahele ning minimaalne kõrgus maapinnast on 3 m (antenni võimendus 0 kuni +3 dBi). Üldjuhul tähendab see antenni otspunkte ca 5 m kõrgusel ning keskmine osa ca 3 m kõrgusel. Kõige parema tulemuse annab 12 - 15 m kõrgusele paigaldatud antenn (antenni võimendus ca +6 dBi @ Joonis 8), kuid igas olukorras ei ole seda võimalik teha. Madalate paigalduskõrguste juures on soovitatav paigaldada dipooli alla maapinnale ka täiendav peegeldustraat.

Kui kasutada ühes otsas dipooli asemel sõiduki varrasantenni, siis sõiduki antenni kehva võimendust tuleb täiendavalt kompenseerida suurema väljundvõimsusega (soovitatav 150W), et seniitside oleks saavutatav. Selliste parameetritega läbi viidud sidetestidel saavutati päevasel ajal käideldavuseks isegi 100% kuni kauguseni 110 km. Sõiduki lahendustest testiti ka raamantenni, kuid häid tulemusi sellega ei saavutatud.

Täiendavalt tahab autor välja tuua, et sidevõrgu käideldavusele omab suurt mõju inimtekkeline müratase lühilaine sagedusalas, mis on üldjuhul väga kõrge linnatingimustes ning seeläbi antenni asukoha valikul tuleks vältida linnatingimusi.

Eelnevast lähtuvalt on seniitside Eesti tingimustes edukalt kasutatav, kuid võib tekkida aegajalt olukordi, kus ühel hetkel on side tagatud ning teisel mitte. Seniitside puhul ei suudeta kunagi saavutada selliseid sidevõrgu käideldavuse suurusjärke nagu kaabelside puhul, kuid alternatiivside võrguna on Eesti tingimustes täiesti kasutatav ning sellest odavamalt lahendust on raske leida.

Kasutatud kirjandus

- [1] The national association for Amateur Radio veebileht, *Amateur Radio Emergency Service.*: [WWW] <http://www.arrl.org/ares>, kasutatud 03.04.2018.
- [2] *Skywaves; Skip Distance & Skip Zones.*: [WWW] <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/ionospheric/skywaves-skip-distance-zone.php>, kasutatud 19.02.2018.
- [3] R. M. Alsina-Pagès, J. L. Pijoan, M. Salvador, J. R. Regué, D. Badia, and S. Graells P. Bergadà, *Digital transmission techniques for a longhaul HF link: DSSS versus OFDM.*: [WWW] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2013RS005203/pdf>, 21.07.2014.
- [4] ALE Handbook, *Automatic Link Establishment.*: [WWW] http://hflink.com/standards/ALE_Handbook__gov_chapter3.pdf, kasutatud 07.04.2018.
- [5] J. Umborg, *Raadiotehnika alused.*, 2017.
- [6] *NVIS Propagation: Near Vertical Incident Skywave.*: [WWW] <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/ionospheric/nvis-near-vertical-incidence-skywave.php>, kasutatud 25.02.2018.
- [7] Erik van Maanen, George J. Petersen, Albert J. Westenberg, Mark J. Bentum, Cornelis H. Slump, Roel Schiphorst Ben A. Witvliet, *Near Vertical Incidence Skywave Propagation: Elevation Angles and Optimum Antenna Heights for Horizontal Dipole Antennas.*: [WWW] <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7047674&isnumber=7061582>, 01.02.2015.
- [8] T. Fuller-Rowell D. Anderson, *The Ionosphere.*: [WWW] <http://solar-center.stanford.edu/SID/science/Ionosphere.pdf>, 1999.
- [9] A. Isotamm, *Raadioamatööri käsiraamat.*, 1958.
- [10] I. Poole, *Radio Waves and Ionosphere.*: [WWW] <https://www.arrl.org/files/file/Technology/pdf/119962.pdf>, 1999.
- [11] S.C. Finch, *NVIS – Near Vertical Incident Skywave Antenna: The Emergency Communication Antenna.*, 2017.
- [12] NOAA veebileht, *Real Time Ionosonde Data Mirror.*: [WWW] <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/IONO/rt-iono/>, kasutatud 26.02.2018.
- [13] NASA veebileht, *What is Solar Cycle?*: [WWW] <https://spaceplace.nasa.gov/solar-cycles/en/>, kasutatud 01.03.2018.
- [14] Belgia kuningliku observatooriumi veebileht, *Sunspot Indexing and long term Solar Observations.*: [WWW] <http://www.sidc.be/silso/home>, kasutatud 01.03.2018.
- [15] Spanish Amateur Radio Union ajakiri, *NVIS communication in the HF band.*: [WWW] <http://www.ipellejero.es/hf/NVIS/english.php>, kasutatud 28.01.2018.
- [16] Space Weather veebileht, *Near-Real-Time Map of the F2-Layer Height Maximum.*: [WWW] <http://www.spacew.com/www/hmf2.html>, kasutatud 29.01.2018.
- [17] B.A. Austin ja W.C. Liu, *Assessment of vehicle-mounted antennas for NVIS applications.*, 03.06.2002.

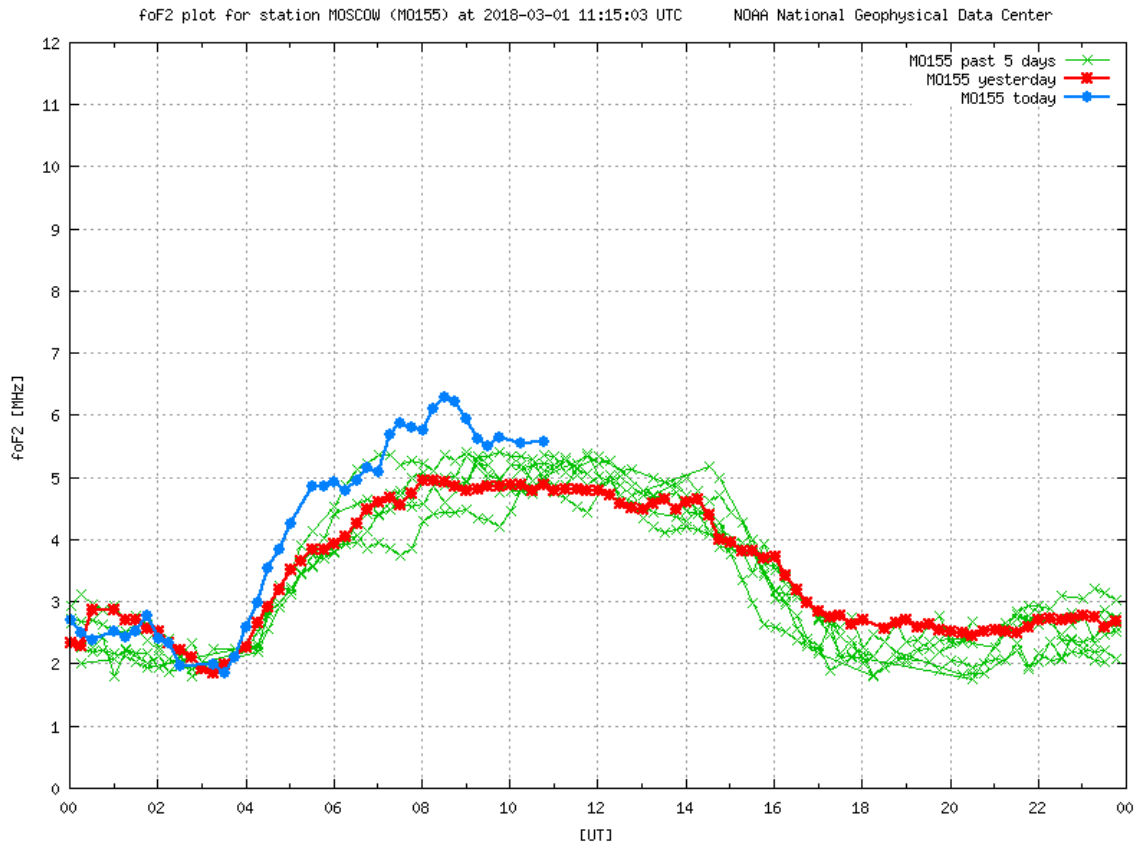
- [18] G. A. Hagn ja J. E. van derLaan, *Measured relative response towards the zenith of short-whip antennas on vehicles at high frequency.*: [WWW] <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1622011&isnumber=33999>, kasutatud 28.01.2018.
- [19] Comrod Antennas veebileht, *Comrod HF230L_OTM HF NVIS Loop Antenna.*: [WWW] http://www.comrod.com/getfile.php/131428/Datasheets/T%20Antennas%20-%20Military/HF230L_OTM.pdf, kasutatud 28.01.2018.
- [20] KF6HI Amateur Radio, *SNR.*: [WWW] <http://kf6hi.net/radio/SNR.html>, kasutatud 11.03.2018.
- [21] VOACAP veebileht,,: [WWW] <http://www.voacap.com/>, kasutadaud 07.03.2018.
- [22] *SNR for various modes.*: [WWW] <https://www.eham.net/ehamforum/smf/index.php?topic=35770.0;wap2>, kasutatud 13.03.2018.
- [23] P-T. de Boer, *Signal/noise ratio of digital amateur modes.*: [WWW] <http://www.pa3fwm.nl/technotes/tn09b.html>, kasutatud 13.03.2018.
- [24] ITU-R P.533-13, *Method for the prediction of the performance of HF circuits.*: [WWW] <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.533/en> (2015), 2015.
- [25] E. Kulu referaat aines Standardimine IRT0190, *ITU-R P.533-13 HF võrkude lainelevi mudel sideühenduse hindamiseks.*, 2017.
- [26] NOAA veebileht, *Predicted Sunspot Number and Radio Flux.*: [WWW] <https://www.swpc.noaa.gov/products/predicted-sunspot-number-and-radio-flux>, kasutatud 05.03.2018.
- [27] ITURHFProp veebirakendus,,: [WWW] <http://www.predtest.uk>, kasutatud 05.03.2018.
- [28] Tubitak Bilgem, *MARSsys.*: [WWW] <http://iltaren.bilgem.tubitak.gov.tr/en/urunler/marssys>, kasutatud 13.03.2018.
- [29] Space Science Lab veebileht, *Digital Ionogram DataBase.*: [WWW] <http://ulcar.uml.edu/DIDBase/>, kasutatud (07.04.2018).
- [30] ITU, *ITU ALE Handbook.*: [WWW] http://hfink.com/itu/ITU_ALE_Handbook.pdf, kasutatud 01.05.2018.

Lisa 1 – Ionosondide vaatluste tulemused

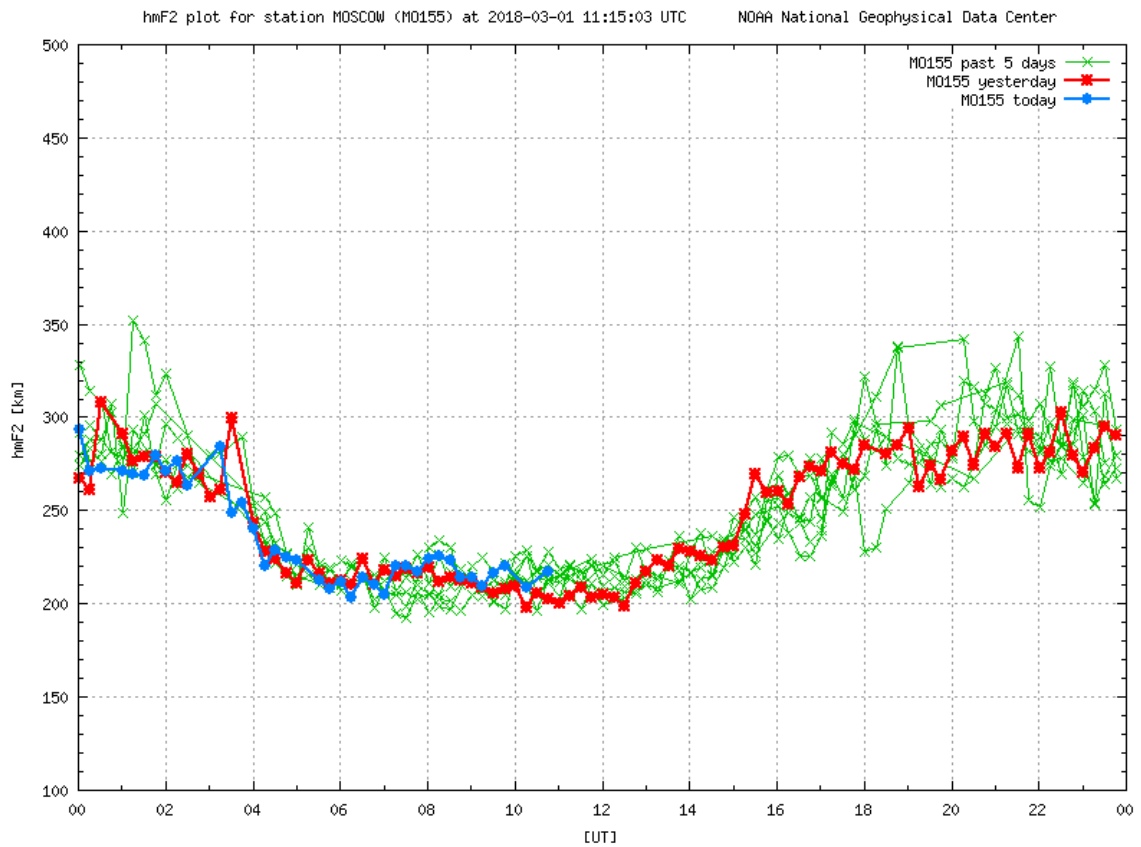
Käesolev lisa sisaldab endas kuue Eestile kõige lähemal paikneva Ionosondi F kihtide mõõdistusi ajavahemikul 24.02.2018 – 28.02.2018. Lisas käsitletavat andmed pärinevad NOAA veebilehelt [12].

Ionosondide asukohad:

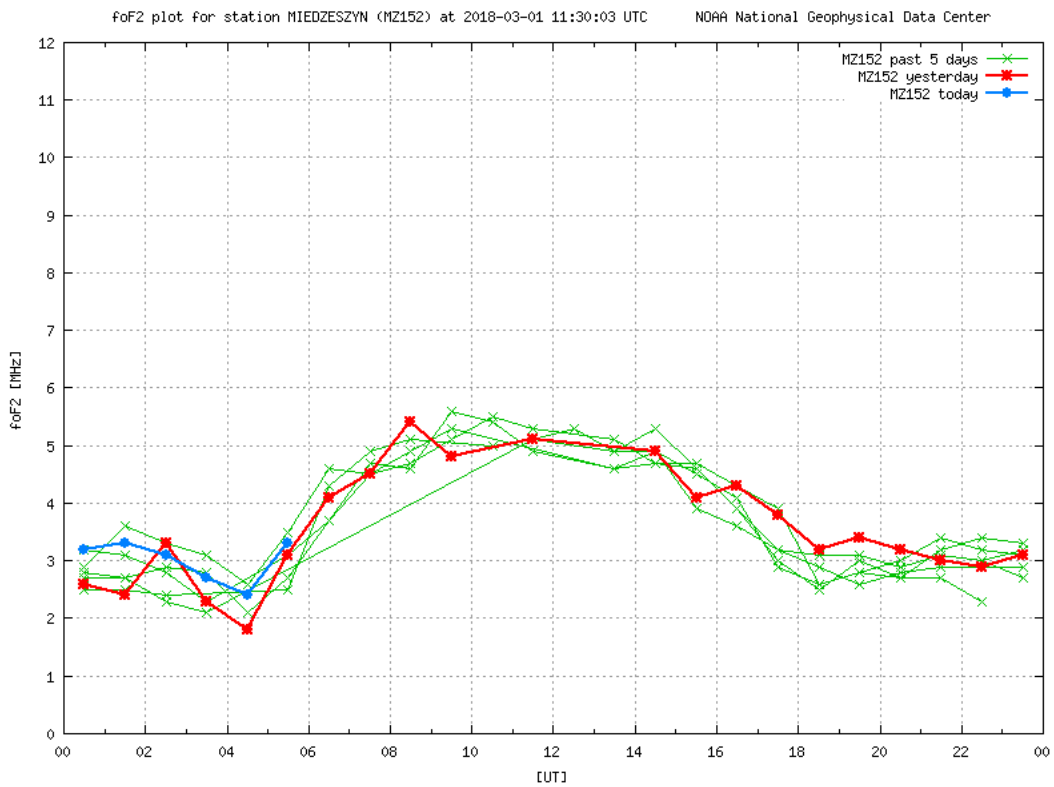
- Moskvas (Venemaa);
- Varssavis (Poola);
- Tromsos (Norra);
- Dourbes (Belgia);
- Juliusruh (Saksamaa).



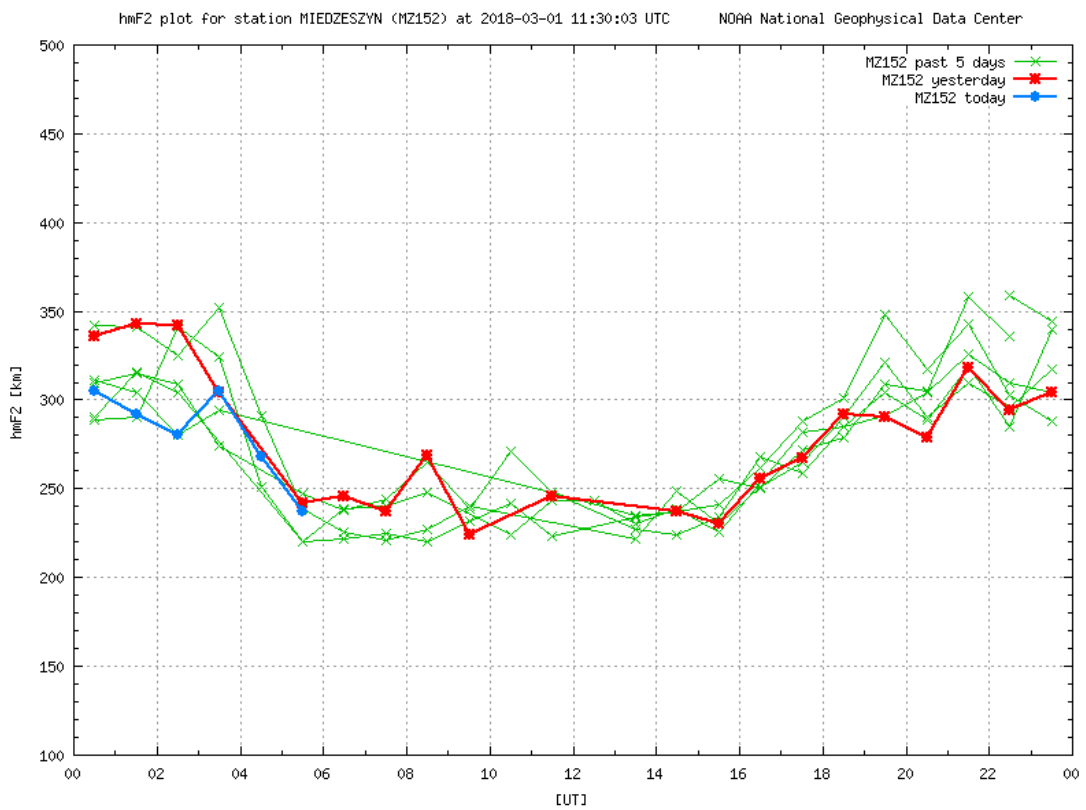
Graafik 1. Moskva ionosondi vaatlustulemused (f_oF2)



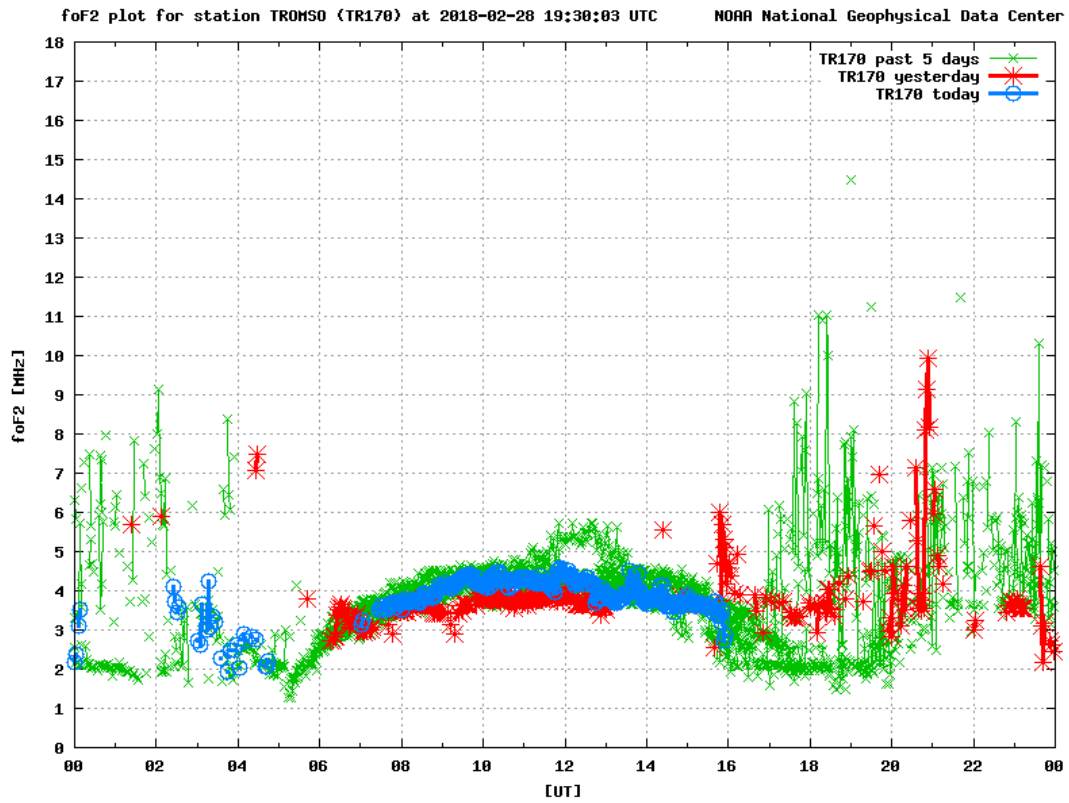
Graafik 2. Moskva ionosondi vaatlustulemused ($hmF2$)



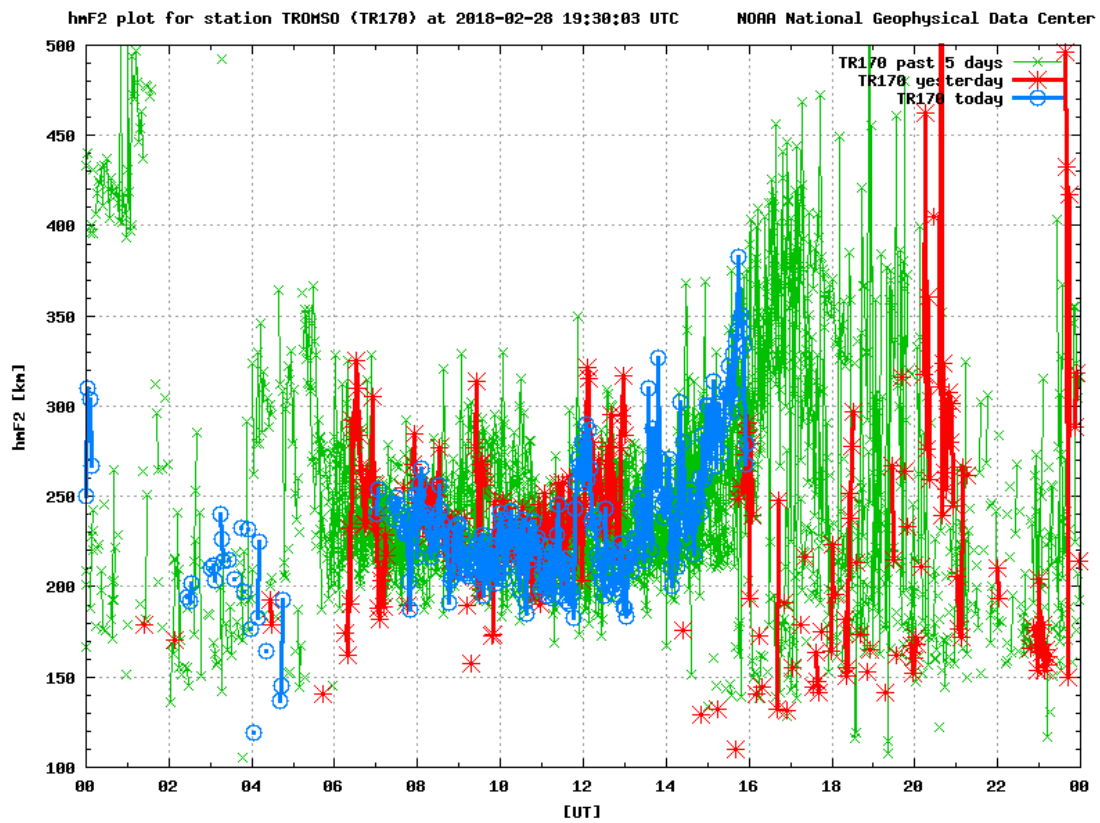
Graafik 3. Varssavi ionosondi vaatlustulemused ($foF2$)



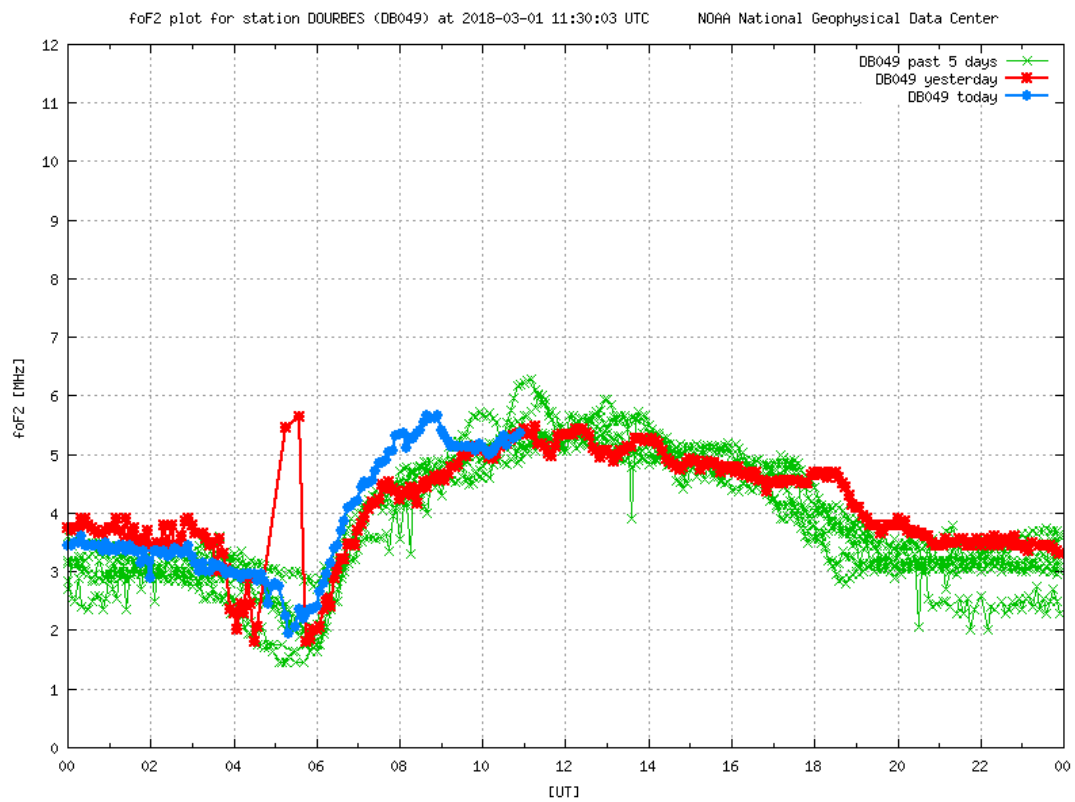
Graafik 4. Varssavi ionosondi vaatlustulemused ($hmF2$)



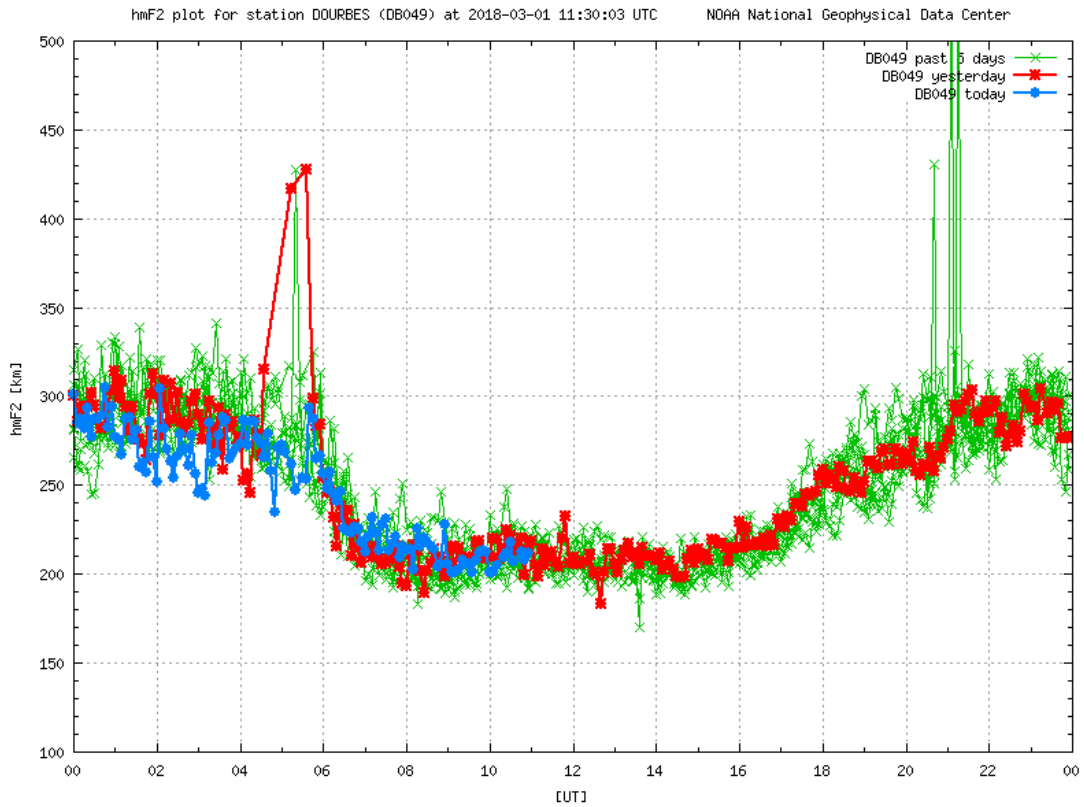
Graafik 5. Tromso ionosondi vaatlustulemused (f_oF2)



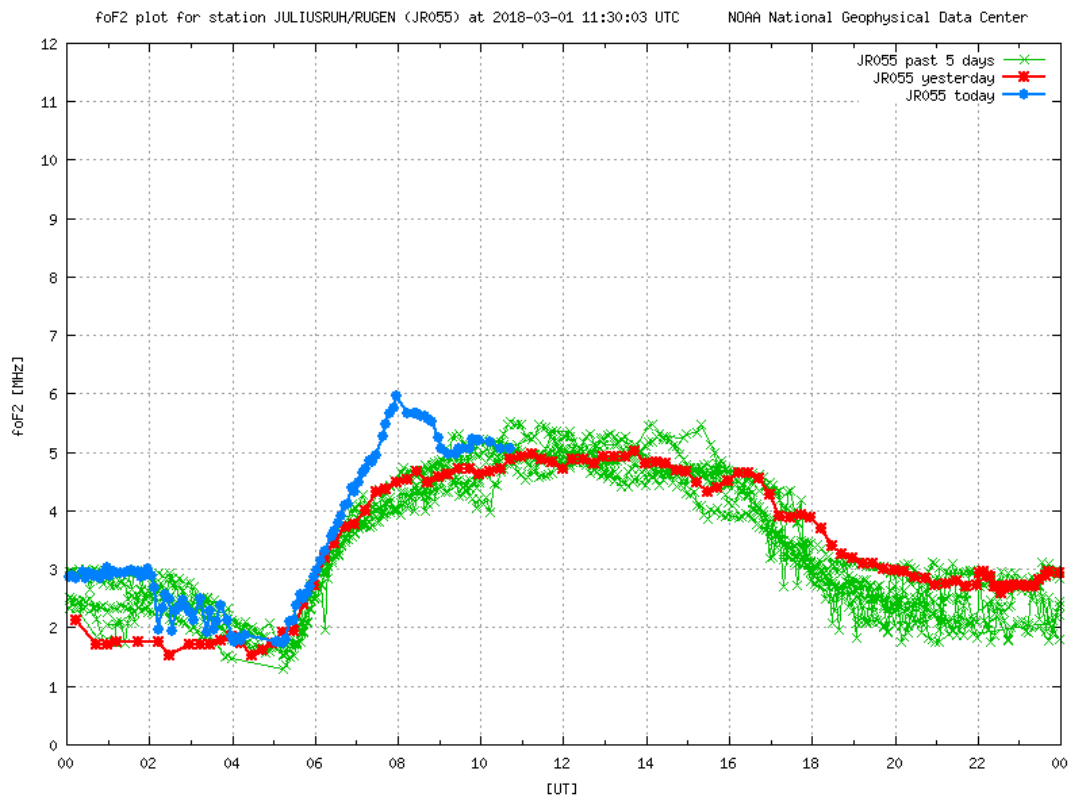
Graafik 6. Tromso ionosondi vaatlustulemused (h_mF2)



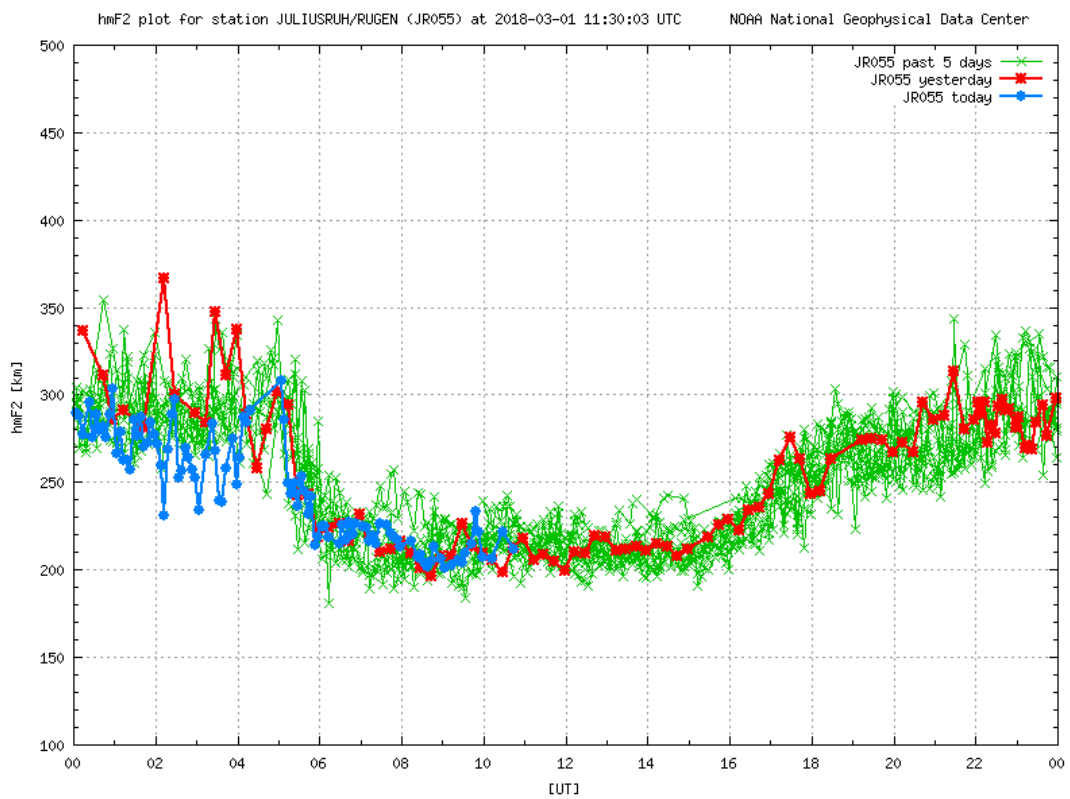
Graafik 7. Dourbes ionosondi vaatlustulemused (f_oF2)



Graafik 8. Dourbes ionosondi vaatlustulemused (f_mF2)



Graafik 9. Juliusruh ionosondi vaatlustulemused (f_oF2)



Graafik 10. Juliusruh ionosondi vaatlustulemused (h_mF2)

Lisa 2 – ITURHFProp simulatsioonid

Käesolev lisa sisaldab endas ITURHFProp simulatsioonide tulemusi, mida on kasutatud levimudelite simulatsioonide peatükis. Simulatsioonid on läbi viidud kasutades ITURHFProp veebirakendust [27].

Simulatsioonide nimekiri:

- Soodla-Vihterpalu (95 km) talv (jaanuar) 2018
- Soodla-Vihterpalu (95 km) kevad (aprill) 2018
- Soodla-Vihterpalu (95 km) suvi (juuli) 2018
- Soodla-Vihterpalu (95 km) sügis (oktoober) 2018
- Tartu-Aluksne (105 km) talv (jaanuar) 2018
- Tartu-Aluksne (105 km) kevad (aprill) 2018
- Tartu-Aluksne (105 km) suvi (juuli) 2018
- Tartu-Aluksne (105 km) sügis (oktoober) 2018

Soodla - Vihterpalu (95 km) talv (jaanuar) 2018

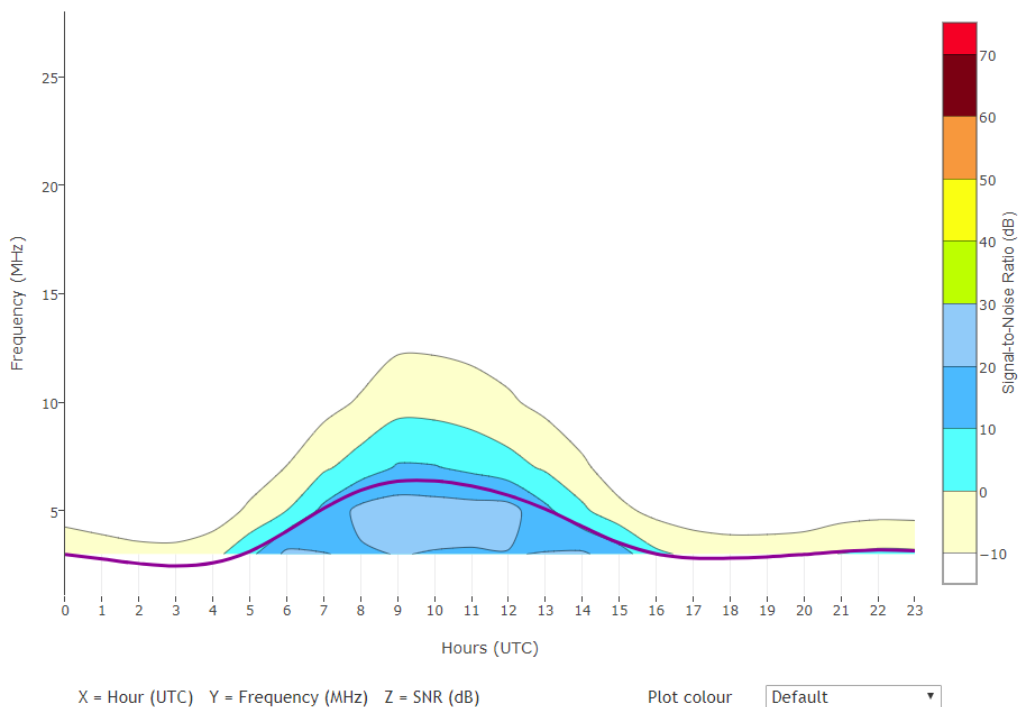
International Telecommunications Union - Radiocommunication Sector (ITU-R)
ITUHFProp Ver Jul 19 2016 - HF Model Ver P.533-13.6
Analysis Prepared Sat Apr 7 20:05:54 2018

***** P533 Input Parameters *****

Prediction
Year = 2018
Month = January
Hour = 1 (hour UTC)
SSN (R12) = 12
Distance = 95.625716 (km)
Tx power = -16.989700
Tx Location Point1
Tx latitude = 59.379400 N
Tx longitude = 25.539400 E
Rx Location Point2
Rx latitude = 59.235200 N
Rx longitude = 23.878400 E
local time Rx = 2 (hour UTC)
local time Tx = 2 (hour UTC)
Frequency = 3.525000
Bandwidth = 3000.000000
Modulation = ANALOG

***** End P533 Input Parameters *****

MUF + SNR. From Lat. 59.3794, Long. 25.5394 to Lat. 59.2352, Long. 23.8784



Graafik 11. ITUHFProp Soodla-Vihterpalu simulatsioon (jaanuar 2018)

Soodla - Vihterpalu (95 km) kevad (aprill) 2018

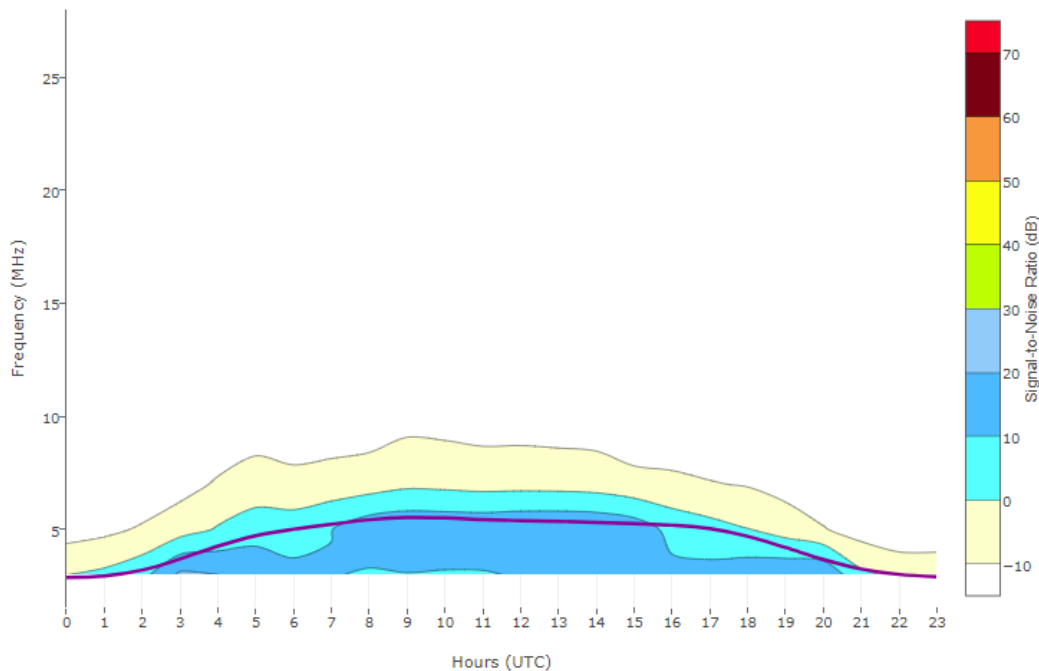
International Telecommunications Union - Radiocommunication Sector (ITU-R)
ITUHFProp Ver Jul 19 2016 - HF Model Ver P.533-13.6
Analysis Prepared Sat Apr 7 20:33:48 2018

***** P533 Input Parameters *****

Prediction
Year = 2018
Month = April
Hour = 1 (hour UTC)
SSN (R12) = 10
Distance = 95.625716 (km)
Tx power = -16.989700
Tx Location Point1
Tx latitude = 59.379400 N
Tx longitude = 25.539400 E
Rx Location Point2
Rx latitude = 59.235200 N
Rx longitude = 23.878400 E
local time Rx = 2 (hour UTC)
local time Tx = 2 (hour UTC)
Frequency = 3.525000
Bandwidth = 3000.000000
Modulation = ANALOG

***** End P533 Input Parameters *****

MUF + SNR. From Lat. 59.3794, Long. 25.5394 to Lat. 59.2352, Long. 23.8784



X = Hour (UTC) Y = Frequency (MHz) Z = SNR (dB)

Plot colour

Graafik 12. ITUHFProp Soodla-Vihterpalu simulatsioon (aprill 2018)

Soodla - Vihterpalu (95 km) suvi (juuli) 2018

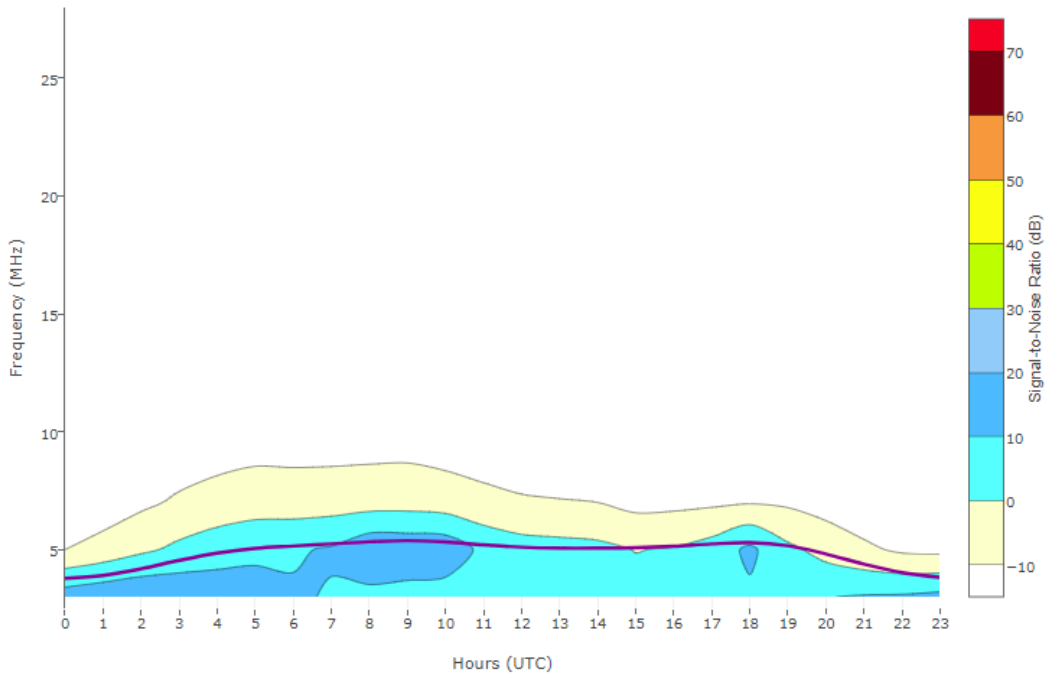
International Telecommunications Union - Radiocommunication Sector (ITU-R)
ITUHFProp Ver Jul 19 2016 - HF Model Ver P.533-13.6
Analysis Prepared Sat Apr 7 20:36:04 2018

***** P533 Input Parameters *****

Prediction
Year = 2018
Month = July
Hour = 1 (hour UTC)
SSN (R12) = 12
Distance = 95.625716 (km)
Tx power = -16.989700
Tx Location Point1
Tx latitude = 59.379400 N
Tx longitude = 25.539400 E
Rx Location Point2
Rx latitude = 59.235200 N
Rx longitude = 23.878400 E
local time Rx = 2 (hour UTC)
local time Tx = 2 (hour UTC)
Frequency = 3.525000
Bandwidth = 3000.000000
Modulation = ANALOG

***** End P533 Input Parameters *****

MUF + SNR. From Lat. 59.3794, Long. 25.5394 to Lat. 59.2352, Long. 23.8784



Graafik 13. ITUHFProp Soodla-Vihterpalu simulatsioon (juuli 2018)

Soodla - Vihterpalu (95 km) sügis (oktoober) 2018

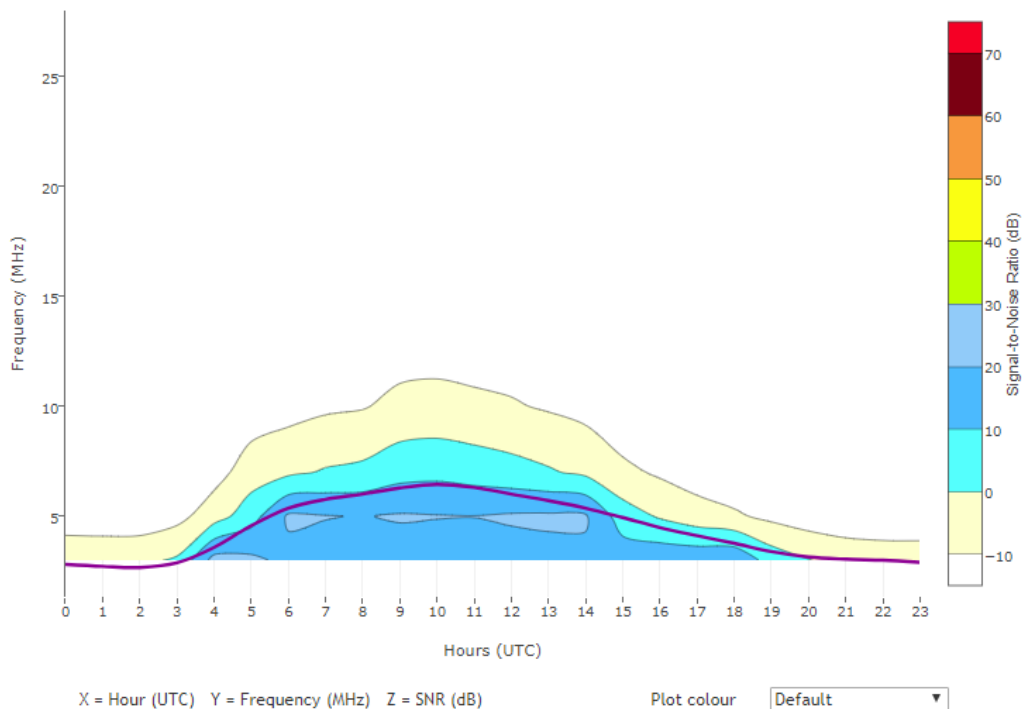
International Telecommunications Union - Radiocommunication Sector (ITU-R)
ITUHFProp Ver Jul 19 2016 - HF Model Ver P.533-13.6
Analysis Prepared Sat Apr 7 20:37:11 2018

***** P533 Input Parameters *****

Prediction
Year = 2018
Month = October
Hour = 1 (hour UTC)
SSN (R12) = 11
Distance = 95.625716 (km)
Tx power = -16.989700
Tx Location Point1
Tx latitude = 59.379400 N
Tx longitude = 25.539400 E
Rx Location Point2
Rx latitude = 59.235200 N
Rx longitude = 23.878400 E
local time Rx = 2 (hour UTC)
local time Tx = 2 (hour UTC)
Frequency = 3.525000
Bandwidth = 3000.000000
Modulation = ANALOG

***** End P533 Input Parameters *****

MUF + SNR. From Lat. 59.3794, Long. 25.5394 to Lat. 59.2352, Long. 23.8784



Graafik 14. ITUHFProp Soodla-Vihterpalu simulatsioon (oktoober 2018)

Tartu-Aluksne (105 km) talv (jaanuar) 2018

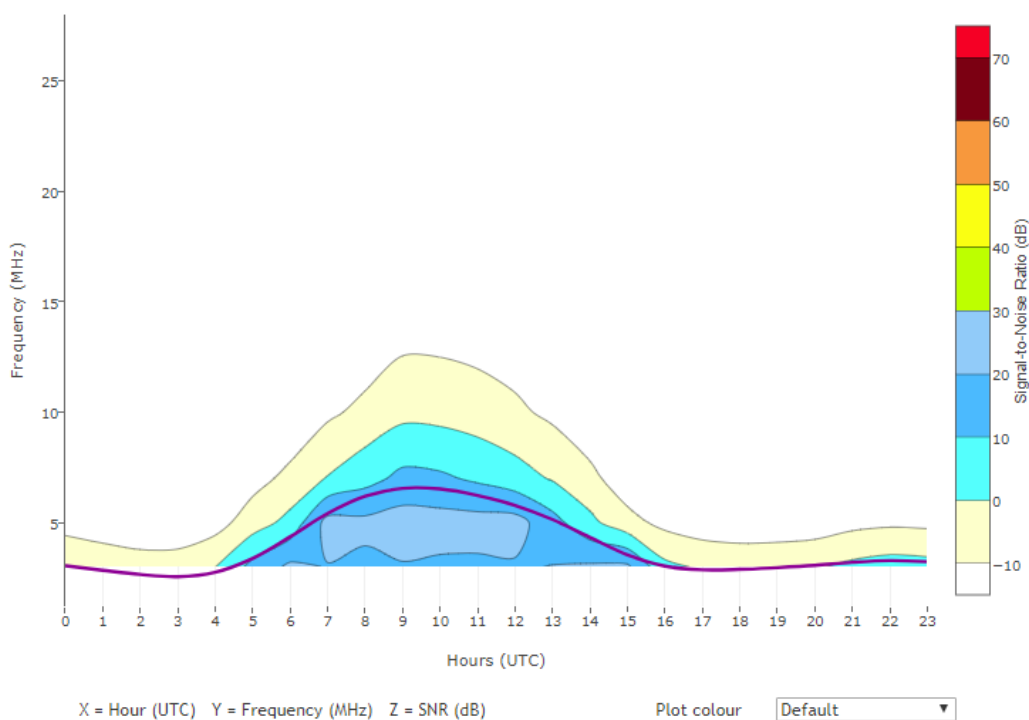
International Telecommunications Union - Radiocommunication Sector (ITU-R)
ITUHFProp Ver Jul 19 2016 - HF Model Ver P.533-13.6
Analysis Prepared Sat Apr 7 20:39:14 2018

***** P533 Input Parameters *****

Prediction
Year = 2018
Month = January
Hour = 1 (hour UTC)
SSN (R12) = 12
Distance = 104.136862 (km)
Tx power = -16.989700
Tx Location Point1
Tx latitude = 58.345600 N
Tx longitude = 26.802900 E
Rx Location Point2
Rx latitude = 57.418600 N
Rx longitude = 27.053500 E
local time Rx = 2 (hour UTC)
local time Tx = 2 (hour UTC)
Frequency = 3.525000
Bandwidth = 3000.000000
Modulation = ANALOG

***** End P533 Input Parameters *****

MUF + SNR. From Lat. 58.3456, Long. 26.8029 to Lat. 57.4186, Long. 27.0535



Graafik 15. ITUHFProp Tartu-Aluksne simulatsioon (jaanuar 2018)

Tartu-Aluksne (105 km) kevad (aprill) 2018

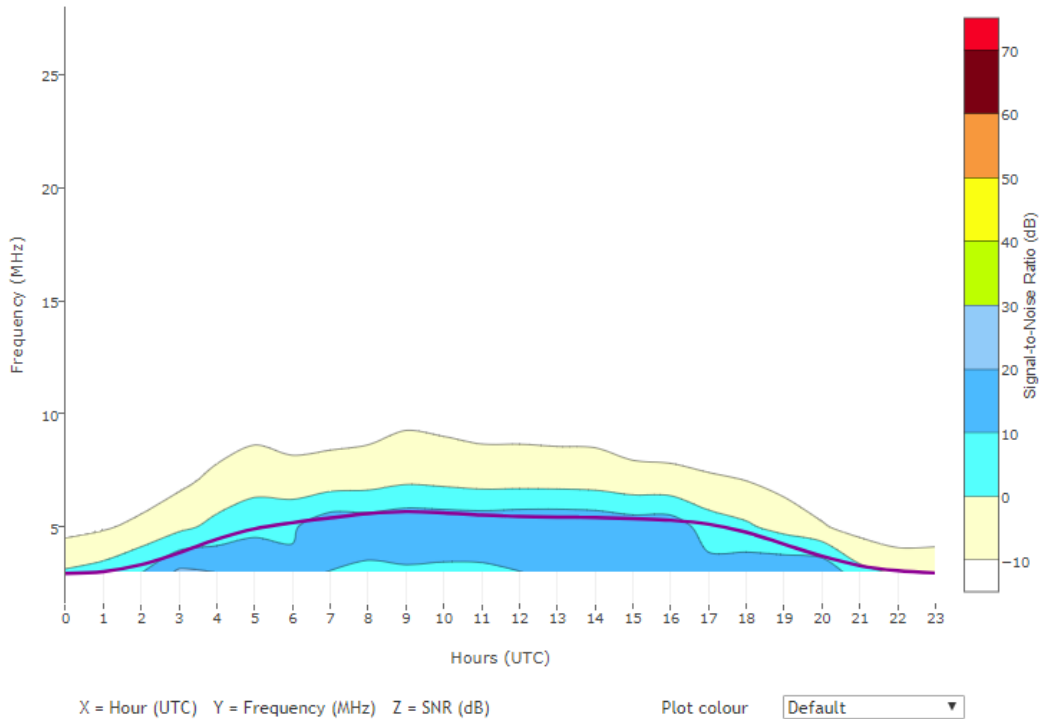
International Telecommunications Union - Radiocommunication Sector (ITU-R)
ITUHFProp Ver Jul 19 2016 - HF Model Ver P.533-13.6
Analysis Prepared Sat Apr 7 20:40:27 2018

***** P533 Input Parameters *****

Prediction
Year = 2018
Month = April
Hour = 1 (hour UTC)
SSN (R12) = 10
Distance = 104.136862 (km)
Tx power = -16.989700
Tx Location Point1
Tx latitude = 58.345600 N
Tx longitude = 26.802900 E
Rx Location Point2
Rx latitude = 57.418600 N
Rx longitude = 27.053500 E
local time Rx = 2 (hour UTC)
local time Tx = 2 (hour UTC)
Frequency = 3.525000
Bandwidth = 3000.000000
Modulation = ANALOG

***** End P533 Input Parameters *****

MUF + SNR. From Lat. 58.3456, Long. 26.8029 to Lat. 57.4186, Long. 27.0535



Graafik 16. ITUHFProp Tartu-Aluksne simulatsioon (aprill 2018)

Tartu-Aluksne (105 km) suvi (juuli) 2018

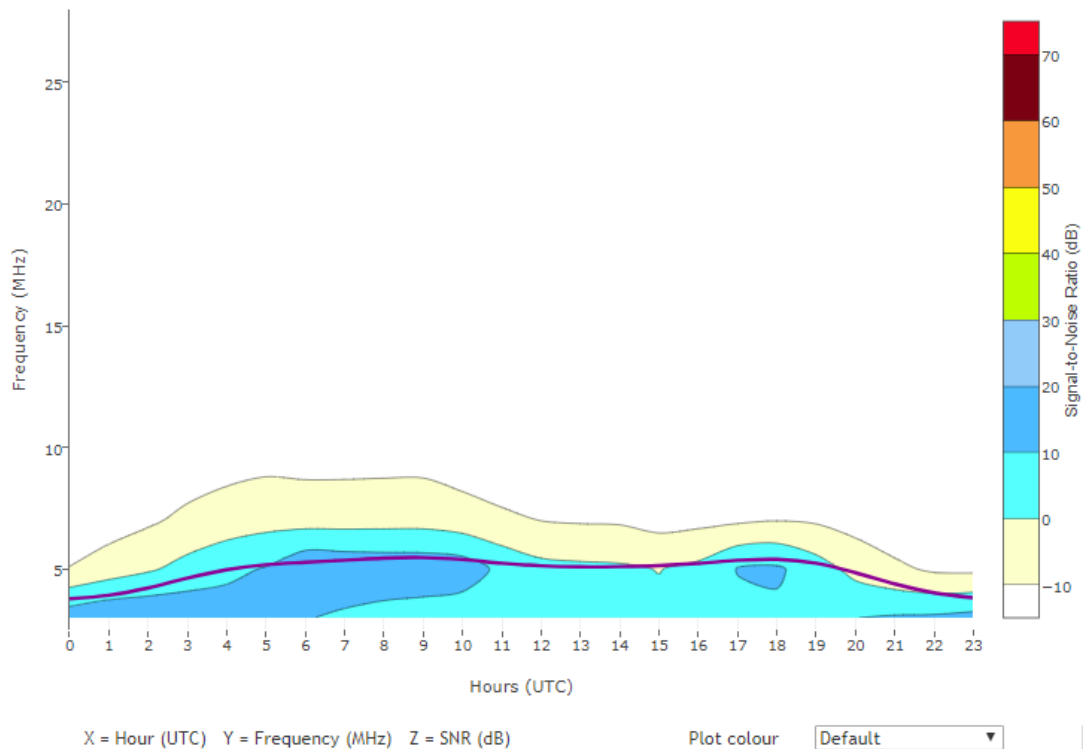
International Telecommunications Union - Radiocommunication Sector (ITU-R)
ITUHFProp Ver Jul 19 2016 - HF Model Ver P.533-13.6
Analysis Prepared Sat Apr 7 20:42:48 2018

***** P533 Input Parameters *****

Prediction
Year = 2018
Month = July
Hour = 1 (hour UTC)
SSN (R12) = 12
Distance = 104.136862 (km)
Tx power = -16.989700
Tx Location Point1
Tx latitude = 58.345600 N
Tx longitude = 26.802900 E
Rx Location Point2
Rx latitude = 57.418600 N
Rx longitude = 27.053500 E
local time Rx = 2 (hour UTC)
local time Tx = 2 (hour UTC)
Frequency = 3.525000
Bandwidth = 3000.000000
Modulation = ANALOG

***** End P533 Input Parameters *****

MUF + SNR. From Lat. 58.3456, Long. 26.8029 to Lat. 57.4186, Long. 27.0535



Graafik 17. ITUHFProp Tartu-Aluksne simulatsioon (juuli 2018)

Tartu-Aluksne (105 km) sügis (oktoober) 2018

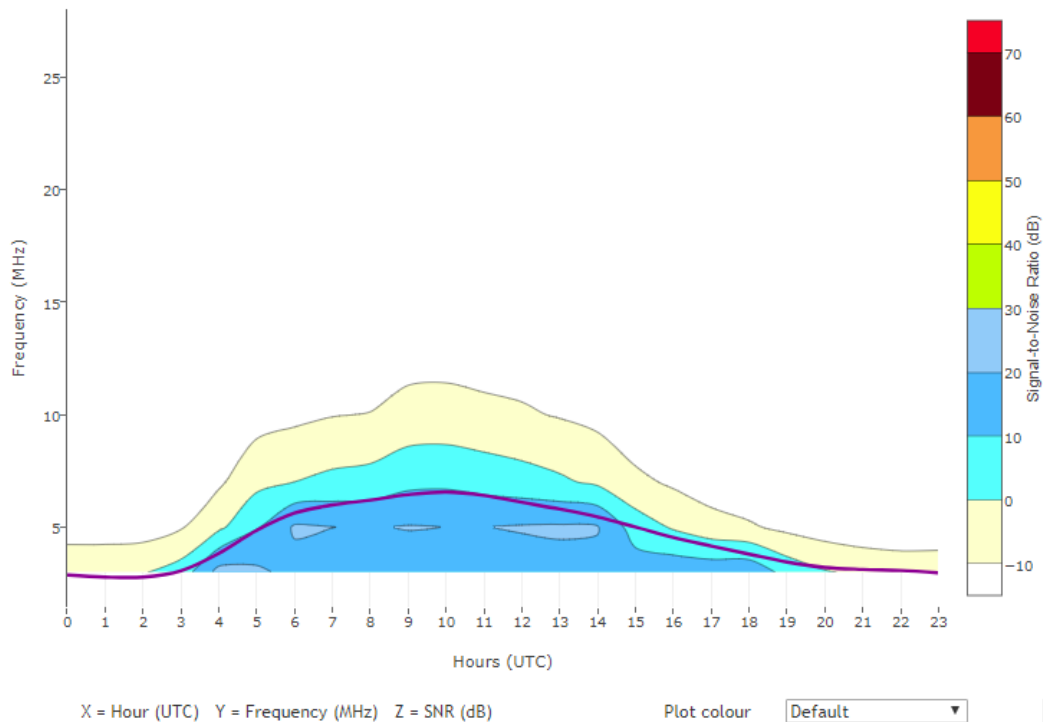
International Telecommunications Union - Radiocommunication Sector (ITU-R)
ITUHFProp Ver Jul 19 2016 - HF Model Ver P.533-13.6
Analysis Prepared Sat Apr 7 20:43:49 2018

***** P533 Input Parameters *****

Prediction
Year = 2018
Month = October
Hour = 1 (hour UTC)
SSN (R12) = 11
Distance = 104.136862 (km)
Tx power = -16.989700
Tx Location Point1
Tx latitude = 58.345600 N
Tx longitude = 26.802900 E
Rx Location Point2
Rx latitude = 57.418600 N
Rx longitude = 27.053500 E
local time Rx = 2 (hour UTC)
local time Tx = 2 (hour UTC)
Frequency = 3.525000
Bandwidth = 3000.000000
Modulation = ANALOG

***** End P533 Input Parameters *****

MUF + SNR. From Lat. 58.3456, Long. 26.8029 to Lat. 57.4186, Long. 27.0535

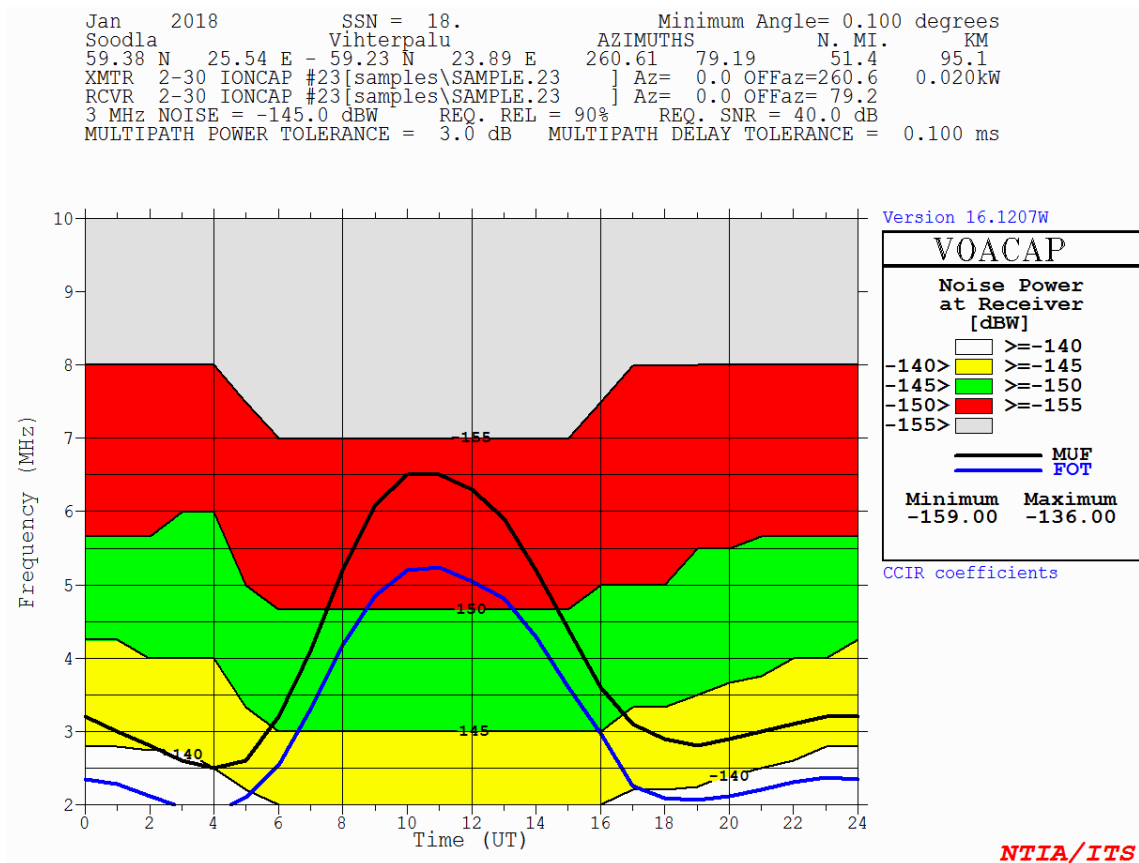


Graafik 18. ITUHFProp Tartu-Aluksne simulatsioon (oktoober 2018)

Lisa 3 – VOACAP simulatsioonid

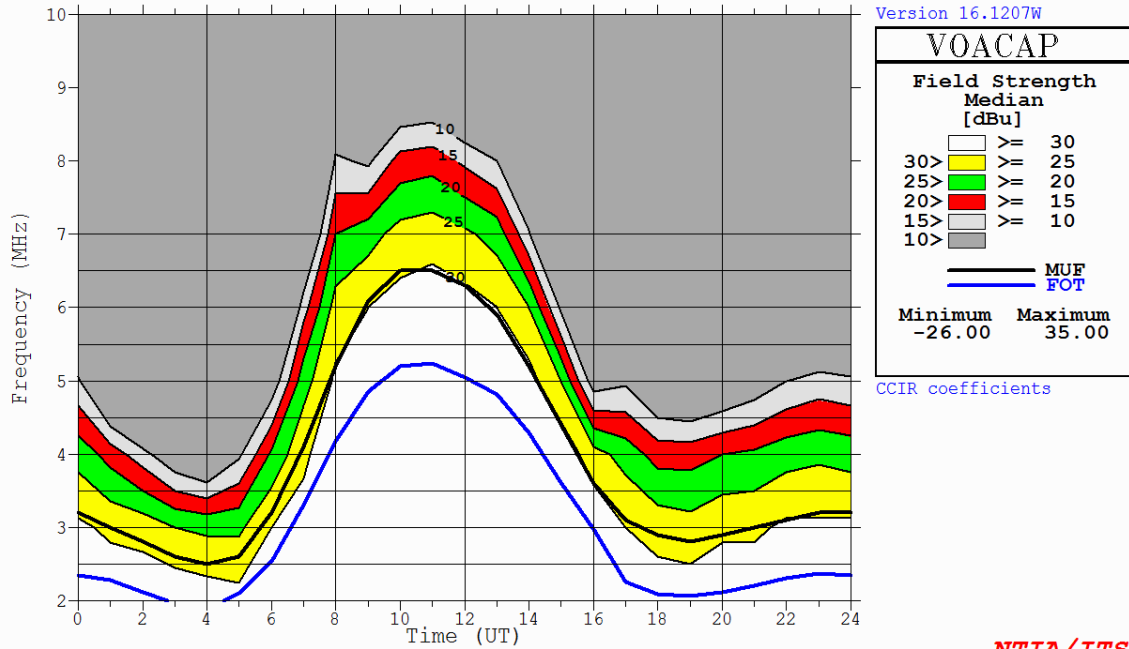
Käesolev lisa sisaldab endas VOACAP tarkvara [21] simulatsioonide tulemusi, mida on kasutatud levimudelite simulatsioonide peatükis. Simulatsioonide läbi viimisel on kasutatud järgnevaid päikeseplekkide arvusid [14]:

- Jaanuar 2018: $SSN = 18$
- Aprill 2018: $SSN = 13$
- Juuli 2018: $SSN = 10$
- Oktoober 2018: $SSN = 8$



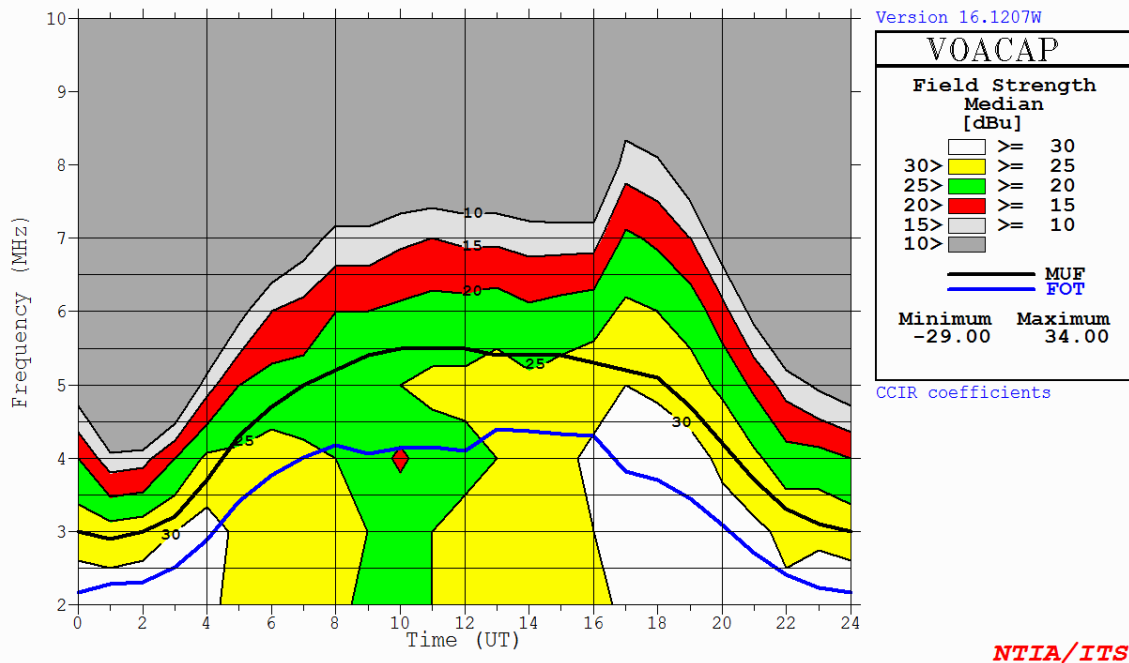
Graafik 19. VOACAP mürataseme simulatsioon (jaanuar 2018)

Jan 2018 SSN = 18. Minimum Angle= 0.100 degrees
 Soodla Vihterpalu AZIMUTHS N. MI. KM
 59.38 N 25.54 E - 59.23 N 23.89 E 260.61 79.19 51.4 95.1
 XMTR 2-30 IONCAP #23[samples\SAMPLE.23] Az= 0.0 OFFaz=260.6 0.020kW
 RCVR 2-30 IONCAP #23[samples\SAMPLE.23] Az= 0.0 OFFaz= 79.2
 3 MHz NOISE = -145.0 dBW REQ. REL = 90% REQ. SNR = 40.0 dB
 MULTIPATH POWER TOLERANCE = 3.0 dB MULTIPATH DELAY TOLERANCE = 0.100 ms



Graafik 20. VOACAP Soodla-Vihterpalu simulatsioon (jaanuar 2018)

Apr 2018 SSN = 13. Minimum Angle= 0.100 degrees
 Soodla Vihterpalu AZIMUTHS N. MI. KM
 59.38 N 25.54 E - 59.23 N 23.89 E 260.61 79.19 51.4 95.1
 XMTR 2-30 IONCAP #23[samples\SAMPLE.23] Az= 0.0 OFFaz=260.6 0.020kW
 RCVR 2-30 IONCAP #23[samples\SAMPLE.23] Az= 0.0 OFFaz= 79.2
 3 MHz NOISE = -145.0 dBW REQ. REL = 90% REQ. SNR = 40.0 dB
 MULTIPATH POWER TOLERANCE = 3.0 dB MULTIPATH DELAY TOLERANCE = 0.100 ms

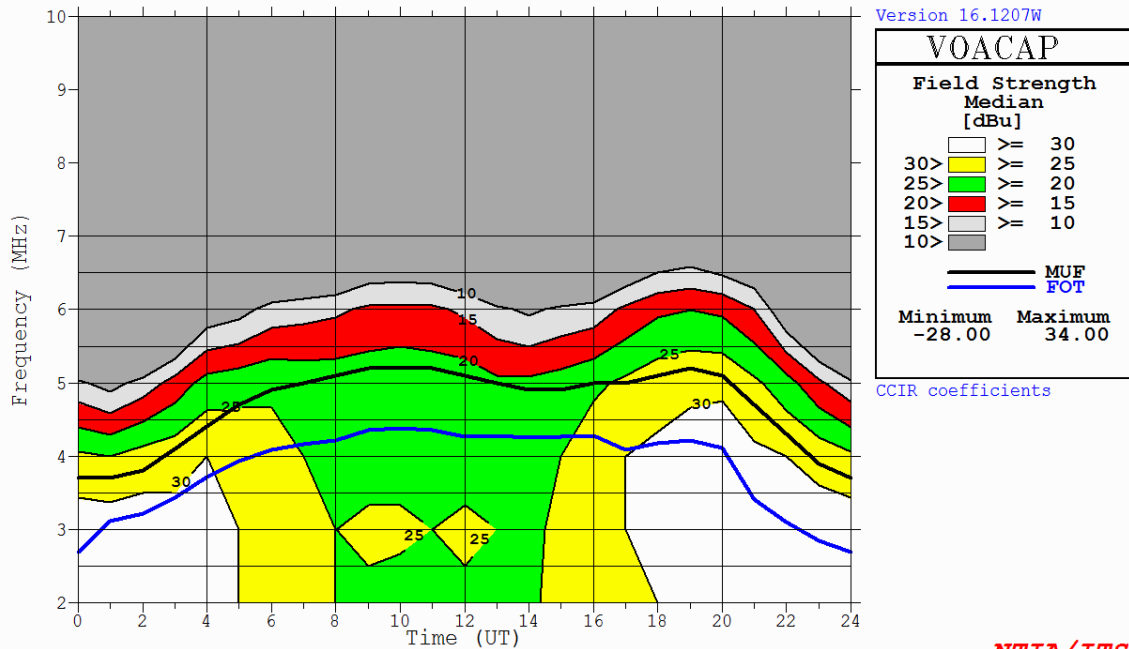


Graafik 21. VOACAP Soodla-Vihterpalu simulatsioon (aprill 2018)

```

Jul 2018 SSN = 10. Minimum Angle= 0.100 degrees
Soodla Vihterpalu AZIMUTHS N. MI. KM
59.38 N 25.54 E - 59.23 N 23.89 E 260.61 79.19 51.4 95.1
XMTR 2-30 IONCAP #23[samples\SAMPLE.23 ] Az= 0.0 OFFaz=260.6 0.020kW
RCVR 2-30 IONCAP #23[samples\SAMPLE.23 ] Az= 0.0 OFFaz= 79.2
3 MHz NOISE = -145.0 dBW REQ. REL = 90% REQ. SNR = 40.0 dB
MULTIPATH POWER TOLERANCE = 3.0 dB MULTIPATH DELAY TOLERANCE = 0.100 ms

```

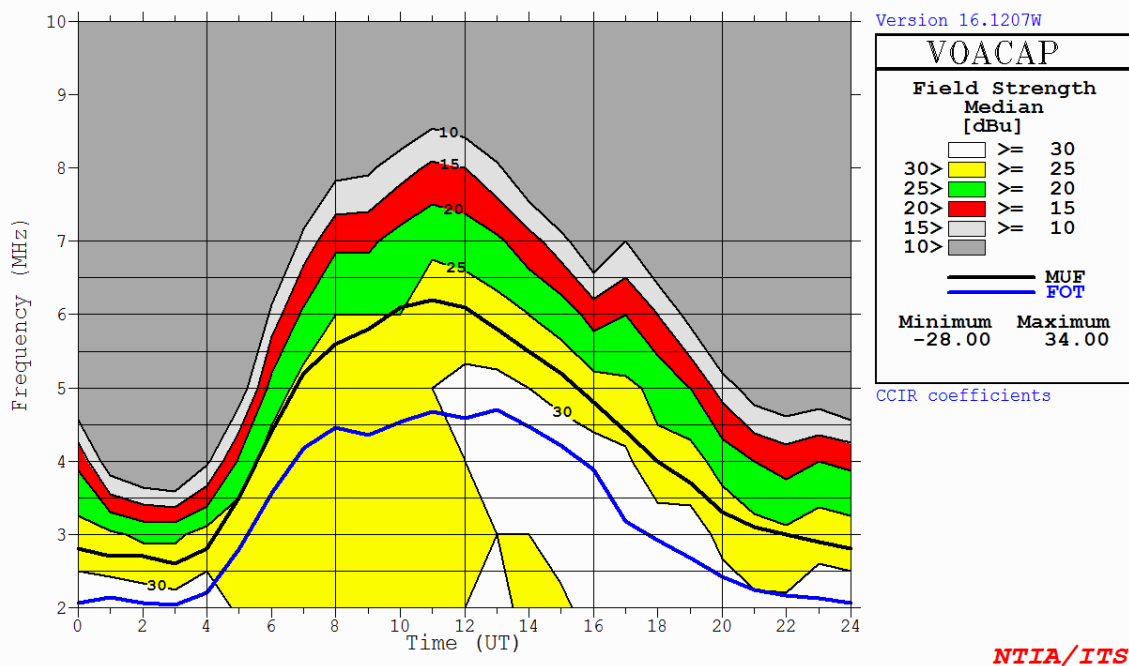


Graafik 22. VOACAP Soodla-Vihterpalu simulatsioon (juuli 2018)

```

Oct 2018 SSN = 8. Minimum Angle= 0.100 degrees
Soodla Vihterpalu AZIMUTHS N. MI. KM
59.38 N 25.54 E - 59.23 N 23.89 E 260.61 79.19 51.4 95.1
XMTR 2-30 IONCAP #23[samples\SAMPLE.23 ] Az= 0.0 OFFaz=260.6 0.020kW
RCVR 2-30 IONCAP #23[samples\SAMPLE.23 ] Az= 0.0 OFFaz= 79.2
3 MHz NOISE = -145.0 dBW REQ. REL = 90% REQ. SNR = 40.0 dB
MULTIPATH POWER TOLERANCE = 3.0 dB MULTIPATH DELAY TOLERANCE = 0.100 ms

```

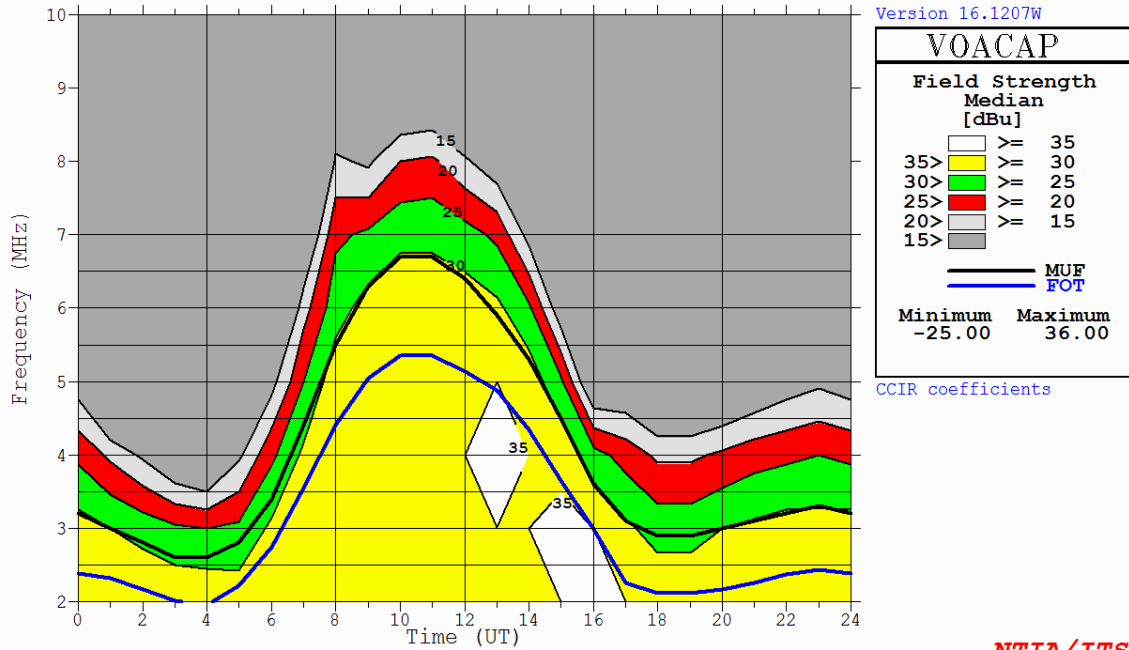


Graafik 23. VOACAP Soodla-Vihterpalu simulatsioon (oktoober 2018)

```

Jan 2018 SSN = 18. Minimum Angle= 0.100 degrees
Tartu Aluksne AZIMUTHS N. MI. KM
58.35 N 26.80 E - 57.42 N 27.05 E 171.78 351.99 56.4 104.4
XMTR 2-30 IONCAP #23[samples\SAMPLE.23 ] Az= 0.0 OFFaz=171.8 0.020kW
RCVR 2-30 IONCAP #23[samples\SAMPLE.23 ] Az= 0.0 OFFaz=352.0
3 MHz NOISE = -145.0 dBW REQ. REL = 90% REQ. SNR = 40.0 dB
MULTIPATH POWER TOLERANCE = 3.0 dB MULTIPATH DELAY TOLERANCE = 0.100 ms

```



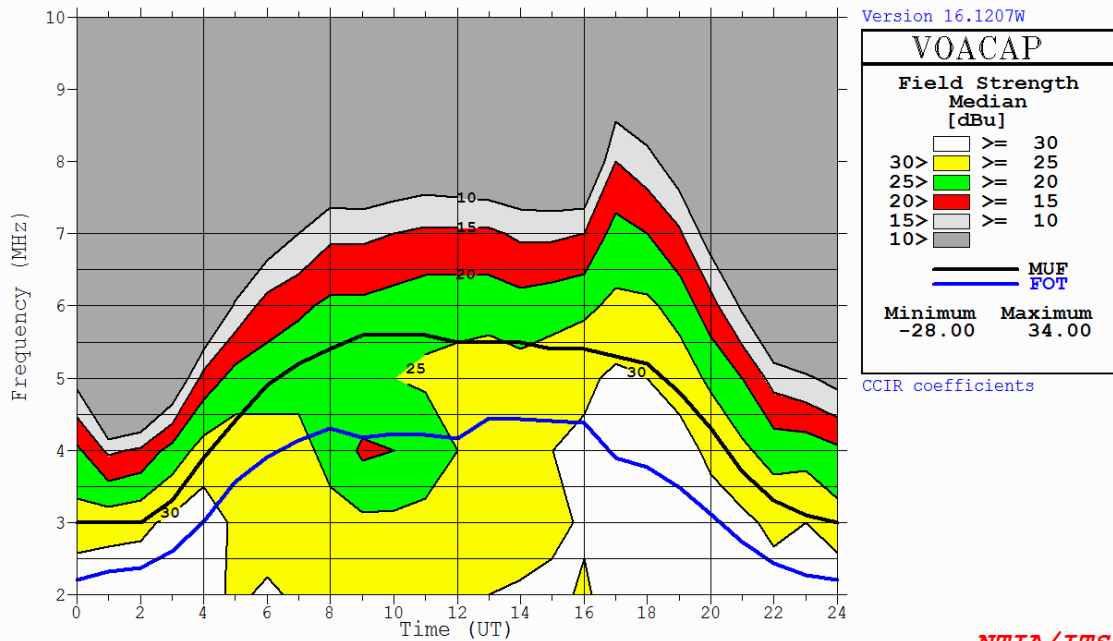
NTIA/ITS

Graafik 24. VOACAP Tartu-Aluksne simulatsioon (jaanuar 2018)

```

Apr 2018 SSN = 13. Minimum Angle= 0.100 degrees
Tartu Aluksne AZIMUTHS N. MI. KM
58.35 N 26.80 E - 57.42 N 27.05 E 171.78 351.99 56.4 104.4
XMTR 2-30 IONCAP #23[samples\SAMPLE.23 ] Az= 0.0 OFFaz=171.8 0.020kW
RCVR 2-30 IONCAP #23[samples\SAMPLE.23 ] Az= 0.0 OFFaz=352.0
3 MHz NOISE = -145.0 dBW REQ. REL = 90% REQ. SNR = 40.0 dB
MULTIPATH POWER TOLERANCE = 3.0 dB MULTIPATH DELAY TOLERANCE = 0.100 ms

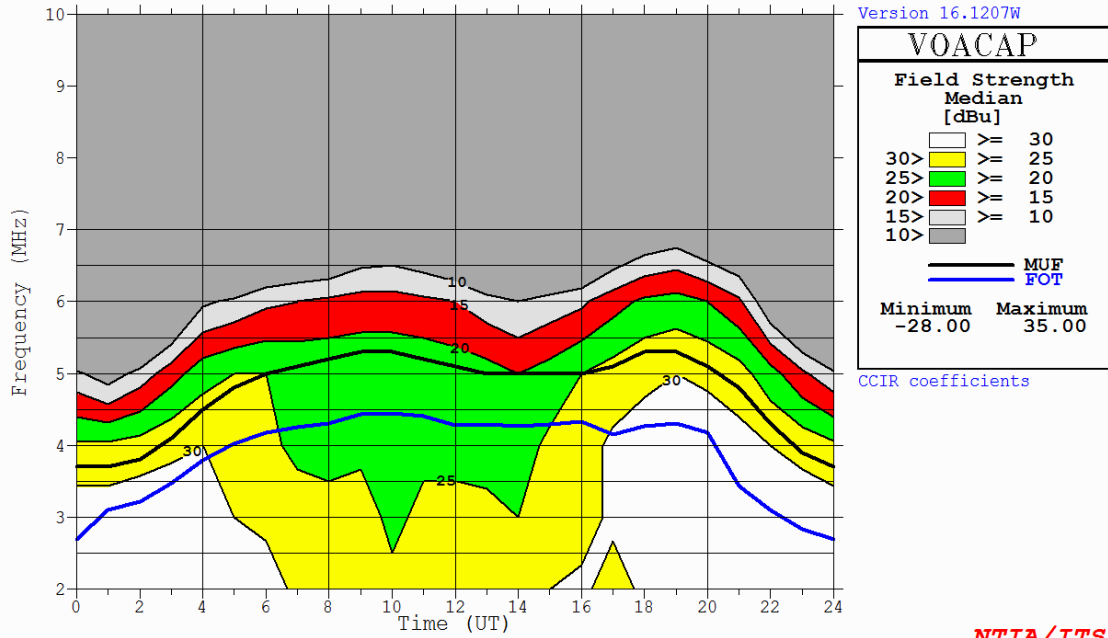
```



NTIA/ITS

Graafik 25. VOACAP Tartu-Aluksne simulatsioon (aprill 2018)

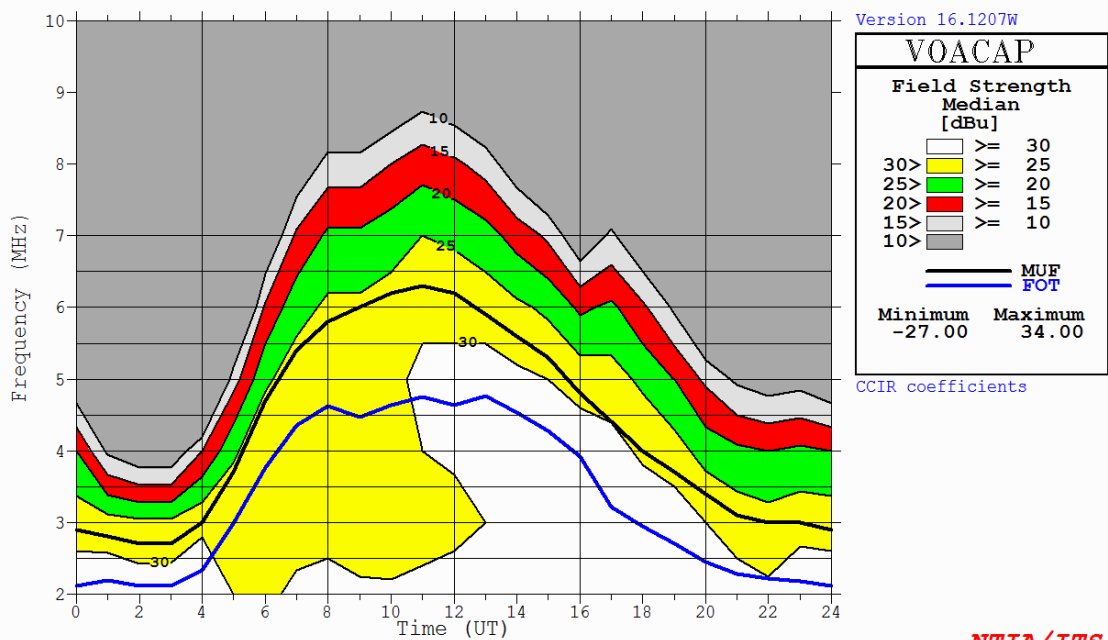
Jul 2018 SSN = 10. Minimum Angle= 0.100 degrees
 Tartu Aluksne AZIMUTHS N. MI. KM
 58.35 N 26.80 E - 57.42 N 27.05 E 171.78 351.99 56.4 104.4
 XMTR 2-30 IONCAP #23[samples\SAMPLE.23] Az= 0.0 OFFaz=171.8 0.020kW
 RCVR 2-30 IONCAP #23[samples\SAMPLE.23] Az= 0.0 OFFaz=352.0
 3 MHz NOISE = -145.0 dBW REQ. REL = 90% REQ. SNR = 40.0 dB
 MULTIPATH POWER TOLERANCE = 3.0 dB MULTIPATH DELAY TOLERANCE = 0.100 ms



NTIA/ITS

Graafik 26. VOACAP Tartu-Aluksne simulatsioon (juuli 2018)

Oct 2018 SSN = 8. Minimum Angle= 0.100 degrees
 Tartu Aluksne AZIMUTHS N. MI. KM
 58.35 N 26.80 E - 57.42 N 27.05 E 171.78 351.99 56.4 104.4
 XMTR 2-30 IONCAP #23[samples\SAMPLE.23] Az= 0.0 OFFaz=171.8 0.020kW
 RCVR 2-30 IONCAP #23[samples\SAMPLE.23] Az= 0.0 OFFaz=352.0
 3 MHz NOISE = -145.0 dBW REQ. REL = 90% REQ. SNR = 40.0 dB
 MULTIPATH POWER TOLERANCE = 3.0 dB MULTIPATH DELAY TOLERANCE = 0.100 ms



NTIA/ITS

Graafik 27. VOACAP Tartu-Aluksne simulatsioon (oktoober 2018)

Jan 2018		SSN = 18.		Minimum Angle= 0.100 degrees						
SOODLA		VIHTERPALU		AZIMUTHS			N. MI.		KM	
59.38 N 25.52 E		- 59.25 N 23.88 E		261.87	80.46	50.8	94.1			
UTC	SDBW	REL	SNR	MUFday	FOT	MUF	HPF	FREQ	FREQ2	FREQ3
01	-99 (S9+)	66%	46	10%	2.2	3.0	3.6	3.6	10.1	7.1
02	-101 (S9+)	63%	45	6%	2.1	2.8	3.3	3.6	10.1	7.1
03	-107 (S9)	54%	40	2%	1.9	2.6	3.1	3.6	10.1	7.1
04	-110 (S8)	49%	38	1%	1.8	2.5	3.0	3.6	10.1	7.1
05	-108 (S9)	59%	43	2%	1.9	2.6	3.1	3.6	10.1	7.1
06	-98 (S9+)	85%	56	26%	2.3	3.2	3.8	3.6	5.4	10.1
07	-92 (S9+)	95%	63	79%	3.1	4.1	4.9	3.6	5.4	7.1
08	-89 (S9+)	99%	66	98%	3.9	5.2	6.2	3.6	5.4	7.1
09	-88 (S9+)	99%	72	77%	4.5	6.1	7.3	5.4	3.6	7.1
10	-87 (S9+)	100%	73	87%	4.8	6.5	7.8	5.4	3.6	7.1
11	-87 (S9+)	100%	73	88%	4.8	6.5	7.9	5.4	3.6	7.1
12	-87 (S9+)	100%	73	83%	4.7	6.3	7.6	5.4	3.6	7.1
13	-87 (S9+)	99%	73	71%	4.4	5.9	7.1	5.4	3.6	7.1
14	-87 (S9+)	99%	68	99%	3.9	5.2	6.3	3.6	5.4	7.1
15	-88 (S9+)	99%	67	90%	3.3	4.4	5.3	3.6	5.4	7.1
16	-92 (S9+)	91%	60	52%	2.7	3.6	4.3	3.6	5.4	10.1
17	-99 (S9+)	76%	52	10%	2.3	3.1	3.7	3.6	10.1	7.1
18	-98 (S9+)	78%	52	13%	2.1	2.9	3.4	3.6	5.4	10.1
19	-99 (S9+)	75%	51	12%	2.1	2.8	3.4	3.6	5.4	10.1
20	-97 (S9+)	76%	51	14%	2.1	2.9	3.5	3.6	5.4	10.1
21	-96 (S9+)	77%	51	19%	2.2	3.0	3.6	3.6	5.4	10.1
22	-95 (S9+)	80%	52	26%	2.3	3.1	3.7	3.6	5.4	10.1
23	-94 (S9+)	80%	52	30%	2.4	3.2	3.8	3.6	5.4	10.1
24	-95 (S9+)	78%	51	28%	2.3	3.2	3.8	3.6	5.4	10.1

Apr 2018		SSN = 13.		Minimum Angle= 0.100 degrees						
SOODLA		VIHTERPALU		AZIMUTHS			N. MI.		KM	
59.38 N 25.52 E		- 59.25 N 23.88 E		261.87	80.46	50.8	94.1			
UTC	SDBW	REL	SNR	MUFday	FOT	MUF	HPF	FREQ	FREQ2	FREQ3
01	-101 (S9+)	70%	49	10%	2.2	2.9	3.6	3.6	5.4	10.1
02	-101 (S9+)	73%	51	10%	2.3	3.0	3.6	3.6	10.1	7.1
03	-98 (S9+)	80%	55	23%	2.4	3.2	4.0	3.6	5.4	10.1
04	-94 (S9+)	86%	60	56%	2.8	3.7	4.5	3.6	5.4	10.1
05	-95 (S9+)	88%	60	82%	3.2	4.3	5.2	3.6	5.4	7.1
06	-95 (S9+)	89%	60	93%	3.6	4.7	5.8	3.6	5.4	7.1
07	-100 (S9+)	85%	60	34%	3.8	5.0	6.2	5.4	3.6	7.1
08	-98 (S9+)	87%	62	44%	4.0	5.2	6.4	5.4	3.6	7.1
09	-98 (S9+)	88%	62	52%	4.1	5.4	6.7	5.4	3.6	7.1
10	-97 (S9+)	88%	63	56%	4.2	5.5	6.8	5.4	3.6	7.1
11	-96 (S9+)	89%	64	56%	4.2	5.5	6.8	5.4	3.6	7.1
12	-96 (S9+)	89%	64	54%	4.2	5.5	6.7	5.4	3.6	7.1
13	-95 (S9+)	89%	64	52%	4.1	5.4	6.7	5.4	3.6	7.1
14	-96 (S9+)	88%	63	52%	4.1	5.4	6.6	5.4	3.6	7.1
15	-94 (S9+)	87%	61	99%	4.1	5.4	6.6	3.6	5.4	7.1
16	-92 (S9+)	88%	63	98%	4.0	5.3	6.5	3.6	5.4	7.1
17	-89 (S9+)	93%	65	98%	4.0	5.2	6.4	3.6	5.4	7.1

18	-89 (S9+)	91%	63	92%	3.9	5.1	6.2	3.6	5.4	7.1
19	-89 (S9+)	89%	61	87%	3.6	4.7	5.8	3.6	5.4	7.1
20	-91 (S9+)	87%	56	76%	3.2	4.2	5.2	3.6	5.4	7.1
21	-94 (S9+)	81%	53	56%	2.8	3.7	4.6	3.6	5.4	7.1
22	-97 (S9+)	75%	50	36%	2.5	3.3	4.1	3.6	5.4	7.1
23	-96 (S9+)	75%	51	24%	2.3	3.1	3.8	3.6	5.4	10.1
24	-98 (S9+)	73%	50	19%	2.2	3.0	3.6	3.6	5.4	10.1

Jul 2018 SSN = 10. Minimum Angle= 0.100 degrees

SOODLA VIHTERPALU AZIMUTHS N. MI. KM

59.38 N 25.52 E - 59.25 N 23.88 E 261.87 80.46 50.8 94.1

UTC	SDBW	REL	SNR	MUFday	FOT	MUF	HPF	FREQ	FREQ2	FREQ3
01	-93 (S9+)	76%	51	55%	2.6	3.7	4.7	3.6	5.4	7.1
02	-92 (S9+)	82%	56	68%	2.7	3.8	4.9	3.6	5.4	10.1
03	-91 (S9+)	87%	59	83%	2.9	4.1	5.2	3.6	5.4	10.1
04	-92 (S9+)	90%	61	93%	3.1	4.4	5.6	3.6	5.4	7.1
05	-95 (S9+)	88%	59	32%	3.4	4.7	6.0	3.6	5.4	7.1
06	-96 (S9+)	86%	58	56%	3.5	4.9	6.2	3.6	5.4	7.1
07	-96 (S9+)	88%	59	71%	3.6	5.0	6.4	3.6	5.4	7.1
08	-97 (S9+)	92%	58	79%	3.6	5.1	6.5	3.6	5.4	7.1
09	-97 (S9+)	92%	58	83%	3.7	5.2	6.6	3.6	5.4	7.1
10	-97 (S9+)	92%	58	84%	3.7	5.2	6.6	3.6	5.4	7.1
11	-97 (S9+)	89%	58	84%	3.7	5.2	6.6	3.6	5.4	7.1
12	-97 (S9+)	88%	58	82%	3.6	5.1	6.4	3.6	5.4	7.1
13	-97 (S9+)	88%	58	77%	3.5	5.0	6.3	3.6	5.4	7.1
14	-99 (S9+)	84%	56	67%	3.5	4.9	6.3	3.6	5.4	7.1
15	-99 (S9+)	81%	55	49%	3.5	4.9	6.3	3.6	5.4	7.1
16	-97 (S9+)	85%	56	99%	3.5	5.0	6.3	3.6	5.4	7.1
17	-92 (S9+)	90%	59	100%	3.6	5.0	6.4	3.6	5.4	7.1
18	-91 (S9+)	90%	58	98%	3.7	5.1	6.5	3.6	5.4	7.1
19	-90 (S9+)	89%	57	98%	3.7	5.2	6.6	3.6	5.4	7.1
20	-89 (S9+)	90%	56	97%	3.6	5.1	6.4	3.6	5.4	7.1
21	-89 (S9+)	88%	55	95%	3.4	4.7	6.0	3.6	5.4	7.1
22	-90 (S9+)	80%	52	77%	3.1	4.3	5.5	3.6	5.4	7.1
23	-91 (S9+)	76%	52	65%	2.8	3.9	5.0	3.6	5.4	10.1
24	-92 (S9+)	71%	49	56%	2.7	3.7	4.8	3.6	5.4	10.1

Oct 2018 SSN = 8. Minimum Angle= 0.100 degrees

SOODLA VIHTERPALU AZIMUTHS N. MI. KM

59.38 N 25.52 E - 59.25 N 23.88 E 261.87 80.46 50.8 94.1

UTC	SDBW	REL	SNR	MUFday	FOT	MUF	HPF	FREQ	FREQ2	FREQ3
01	-104 (S9)	62%	44	4%	2.1	2.7	3.4	3.6	10.1	7.1
02	-109 (S8)	55%	41	2%	2.0	2.7	3.3	3.6	10.1	7.1
03	-111 (S8)	54%	40	1%	2.0	2.6	3.2	3.6	10.1	7.1
04	-105 (S9)	67%	47	4%	2.1	2.8	3.5	3.6	10.1	7.1
05	-98 (S9+)	79%	55	42%	2.6	3.5	4.3	3.6	5.4	10.1
06	-93 (S9+)	90%	62	89%	3.4	4.4	5.5	3.6	5.4	7.1
07	-93 (S9+)	92%	62	98%	4.0	5.2	6.4	3.6	5.4	7.1
08	-93 (S9+)	93%	67	60%	4.2	5.6	6.9	5.4	3.6	7.1
09	-92 (S9+)	94%	68	68%	4.4	5.8	7.1	5.4	3.6	7.1

10	-92 (S9+)	93%	68	72%	4.6	6.1	7.5	5.4	3.6	7.1
11	-91 (S9+)	95%	69	76%	4.7	6.2	7.7	5.4	3.6	7.1
12	-90 (S9+)	95%	69	73%	4.6	6.1	7.5	5.4	3.6	7.1
13	-90 (S9+)	93%	69	65%	4.4	5.8	7.1	5.4	3.6	7.1
14	-92 (S9+)	89%	63	99%	4.2	5.5	6.8	3.6	5.4	7.1
15	-90 (S9+)	89%	64	98%	4.0	5.2	6.4	3.6	5.4	7.1
16	-90 (S9+)	89%	64	95%	3.6	4.8	5.9	3.6	5.4	7.1
17	-89 (S9+)	91%	63	88%	3.3	4.4	5.4	3.6	5.4	7.1
18	-90 (S9+)	87%	60	68%	3.0	4.0	4.9	3.6	5.4	7.1
19	-92 (S9+)	81%	56	54%	2.8	3.7	4.5	3.6	5.4	7.1
20	-96 (S9+)	76%	51	36%	2.5	3.3	4.1	3.6	5.4	7.1
21	-98 (S9+)	70%	48	23%	2.3	3.1	3.8	3.6	5.4	10.1
22	-99 (S9+)	68%	47	20%	2.3	3.0	3.6	3.6	5.4	10.1
23	-97 (S9+)	71%	49	18%	2.2	2.9	3.6	3.6	5.4	10.1
24	-98 (S9+)	70%	49	14%	2.2	2.8	3.5	3.6	5.4	10.1

Jan 2018	SSN = 18.	Minimum Angle= 0.100 degrees								
TARTU	ALUKSNE	AZIMUTHS	N. MI.	KM						
58.36 N	26.81 E	- 57.43 N	27.07 E	171.51	351.73	56.4	104.5			
UTC	SDBW	REL	SNR	MUFday	FOT	MUF	HPF	FREQ	FREQ2	FREQ3
01	-98 (S9+)	67%	47	12%	2.3	3.0	3.7	3.6	10.1	7.1
02	-100 (S9+)	64%	46	8%	2.1	2.8	3.4	3.6	5.4	10.1
03	-105 (S9)	56%	41	3%	2.0	2.6	3.2	3.6	10.1	7.1
04	-107 (S9)	53%	40	2%	1.9	2.6	3.1	3.6	10.1	7.1
05	-104 (S9)	65%	46	6%	2.1	2.8	3.3	3.6	10.1	7.1
06	-96 (S9+)	86%	56	40%	2.5	3.4	4.1	3.6	5.4	10.1
07	-91 (S9+)	94%	61	89%	3.3	4.4	5.3	3.6	5.4	7.1
08	-89 (S9+)	98%	63	99%	4.1	5.5	6.6	3.6	5.4	7.1
09	-87 (S9+)	99%	70	83%	4.7	6.3	7.6	5.4	3.6	7.1
10	-87 (S9+)	99%	70	90%	4.9	6.7	8.0	5.4	3.6	7.1
11	-87 (S9+)	100%	70	90%	4.9	6.7	8.0	5.4	3.6	7.1
12	-86 (S9+)	100%	71	85%	4.7	6.4	7.7	5.4	3.6	7.1
13	-87 (S9+)	99%	70	74%	4.4	5.9	7.1	5.4	3.6	7.1
14	-87 (S9+)	99%	65	99%	3.9	5.3	6.3	3.6	5.4	7.1
15	-87 (S9+)	98%	64	91%	3.3	4.5	5.3	3.6	5.4	7.1
16	-91 (S9+)	90%	59	53%	2.7	3.6	4.4	3.6	5.4	10.1
17	-99 (S9+)	74%	51	11%	2.3	3.1	3.7	3.6	10.1	7.1
18	-98 (S9+)	77%	51	15%	2.1	2.9	3.5	3.6	5.4	10.1
19	-98 (S9+)	75%	50	15%	2.1	2.9	3.5	3.6	5.4	10.1
20	-96 (S9+)	77%	51	18%	2.2	3.0	3.5	3.6	5.4	10.1
21	-95 (S9+)	78%	52	23%	2.3	3.1	3.7	3.6	5.4	10.1
22	-94 (S9+)	80%	52	30%	2.4	3.2	3.8	3.6	5.4	10.1
23	-94 (S9+)	81%	52	34%	2.4	3.3	3.9	3.6	5.4	10.1
24	-94 (S9+)	79%	51	31%	2.4	3.2	3.9	3.6	5.4	10.1

Apr 2018		SSN = 13.			Minimum Angle= 0.100 degrees					
TARTU		ALUKSNE			AZIMUTHS			N. MI.	KM	
58.36 N 26.81 E		- 57.43 N 27.07 E			171.51	351.73	56.4	104.5		
UTC	SDBW	REL	SNR	MUFday	FOT	MUF	HPF	FREQ	FREQ2	FREQ3
01	-100 (S9+)	71%	49	12%	2.3	3.0	3.7	3.6	5.4	10.1
02	-100 (S9+)	72%	50	13%	2.3	3.0	3.7	3.6	5.4	10.1
03	-97 (S9+)	79%	54	31%	2.5	3.3	4.1	3.6	5.4	10.1
04	-92 (S9+)	84%	59	65%	2.9	3.9	4.7	3.6	5.4	10.1
05	-94 (S9+)	86%	58	87%	3.4	4.4	5.5	3.6	5.4	7.1
06	-95 (S9+)	86%	57	95%	3.7	4.9	6.0	3.6	5.4	7.1
07	-99 (S9+)	83%	58	42%	3.9	5.2	6.4	5.4	3.6	7.1
08	-98 (S9+)	85%	59	51%	4.1	5.4	6.6	5.4	3.6	7.1
09	-97 (S9+)	86%	60	59%	4.2	5.6	6.8	5.4	3.6	7.1
10	-97 (S9+)	86%	60	60%	4.3	5.6	6.9	5.4	3.6	7.1
11	-96 (S9+)	87%	61	60%	4.3	5.6	6.9	5.4	3.6	7.1
12	-95 (S9+)	87%	61	56%	4.2	5.5	6.8	5.4	3.6	7.1
13	-95 (S9+)	87%	62	55%	4.2	5.5	6.7	5.4	3.6	7.1
14	-96 (S9+)	86%	61	55%	4.2	5.5	6.7	5.4	3.6	7.1
15	-94 (S9+)	84%	58	99%	4.1	5.4	6.7	3.6	5.4	7.1
16	-91 (S9+)	85%	60	99%	4.1	5.4	6.6	3.6	5.4	7.1
17	-89 (S9+)	91%	62	99%	4.1	5.3	6.6	3.6	5.4	7.1
18	-89 (S9+)	89%	61	92%	3.9	5.2	6.3	3.6	5.4	7.1
19	-89 (S9+)	87%	59	88%	3.6	4.8	5.9	3.6	5.4	7.1
20	-91 (S9+)	86%	55	77%	3.2	4.3	5.2	3.6	5.4	7.1
21	-94 (S9+)	80%	53	56%	2.8	3.7	4.6	3.6	5.4	7.1
22	-96 (S9+)	75%	50	37%	2.5	3.3	4.1	3.6	5.4	7.1
23	-96 (S9+)	75%	51	26%	2.4	3.1	3.8	3.6	5.4	10.1
24	-97 (S9+)	73%	50	22%	2.3	3.0	3.7	3.6	5.4	10.1

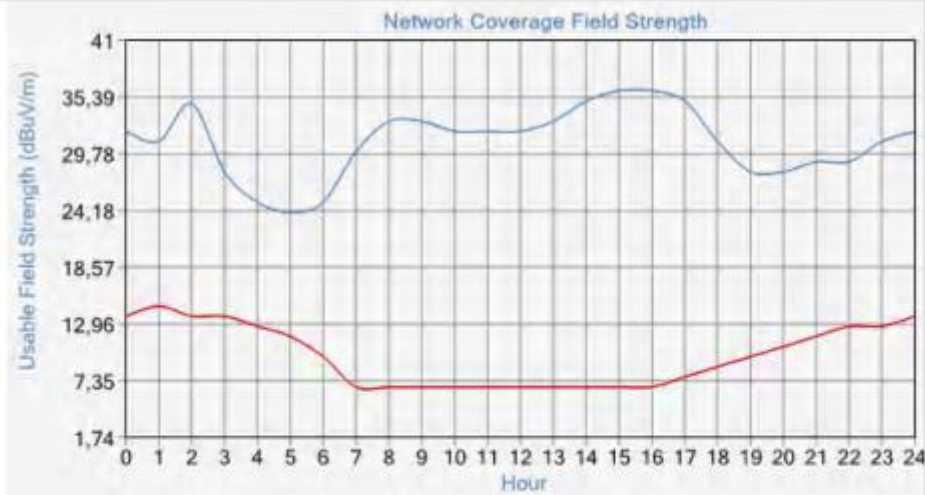
Jul 2018		SSN = 10.			Minimum Angle= 0.100 degrees					
TARTU		ALUKSNE			AZIMUTHS			N. MI.	KM	
58.36 N 26.81 E		- 57.43 N 27.07 E			171.51	351.73	56.4	104.5		
UTC	SDBW	REL	SNR	MUFday	FOT	MUF	HPF	FREQ	FREQ2	FREQ3
01	-93 (S9+)	75%	50	54%	2.6	3.7	4.7	3.6	5.4	7.1
02	-92 (S9+)	81%	55	68%	2.7	3.8	4.9	3.6	5.4	10.1
03	-91 (S9+)	86%	58	85%	2.9	4.1	5.2	3.6	5.4	10.1
04	-92 (S9+)	88%	59	95%	3.2	4.5	5.7	3.6	5.4	7.1
05	-99 (S9+)	82%	57	21%	3.4	4.8	6.2	5.4	3.6	7.1
06	-96 (S9+)	83%	56	61%	3.6	5.0	6.4	3.6	5.4	7.1
07	-96 (S9+)	84%	56	75%	3.6	5.1	6.5	3.6	5.4	7.1
08	-97 (S9+)	89%	55	82%	3.7	5.2	6.6	3.6	5.4	7.1
09	-97 (S9+)	89%	55	85%	3.7	5.3	6.7	3.6	5.4	7.1
10	-97 (S9+)	88%	55	86%	3.8	5.3	6.7	3.6	5.4	7.1
11	-98 (S9+)	85%	55	86%	3.7	5.2	6.6	3.6	5.4	7.1
12	-97 (S9+)	84%	55	83%	3.6	5.1	6.5	3.6	5.4	7.1
13	-97 (S9+)	84%	55	78%	3.5	5.0	6.3	3.6	5.4	7.1
14	-99 (S9+)	80%	53	68%	3.5	5.0	6.3	3.6	5.4	7.1
15	-99 (S9+)	76%	51	48%	3.5	5.0	6.3	3.6	5.4	7.1
16	-97 (S9+)	82%	53	100%	3.6	5.0	6.4	3.6	5.4	7.1
17	-92 (S9+)	86%	56	100%	3.6	5.1	6.5	3.6	5.4	7.1

18	-91 (S9+)	86%	55	98%	3.7	5.3	6.7	3.6	5.4	7.1
19	-90 (S9+)	86%	54	99%	3.8	5.3	6.7	3.6	5.4	7.1
20	-89 (S9+)	88%	54	98%	3.7	5.1	6.5	3.6	5.4	7.1
21	-89 (S9+)	86%	53	95%	3.4	4.8	6.0	3.6	5.4	7.1
22	-90 (S9+)	78%	51	77%	3.1	4.3	5.5	3.6	5.4	7.1
23	-90 (S9+)	75%	51	65%	2.8	3.9	5.0	3.6	5.4	10.1
24	-92 (S9+)	70%	48	56%	2.6	3.7	4.7	3.6	5.4	10.1

Oct 2018	SSN = 8.	Minimum Angle= 0.100 degrees								
TARTU	ALUKSNE	AZIMUTHS	N. MI.	KM						
58.36 N	26.81 E	- 57.43 N	27.07 E	171.51	351.73	56.4	104.5			
UTC SDBW	REL SNR	MUFday	FOT	MUF	HPF	FREQ	FREQ2	FREQ3		
01	-103 (S9)	62%	44	6%	2.1	2.8	3.4	3.6	10.1	7.1
02	-107 (S9)	56%	41	2%	2.1	2.7	3.3	3.6	10.1	7.1
03	-107 (S9)	56%	42	2%	2.1	2.7	3.3	3.6	10.1	7.1
04	-101 (S9+)	70%	49	11%	2.3	3.0	3.7	3.6	10.1	7.1
05	-96 (S9+)	80%	55	57%	2.8	3.7	4.6	3.6	5.4	10.1
06	-93 (S9+)	89%	59	93%	3.6	4.7	5.8	3.6	5.4	7.1
07	-94 (S9+)	89%	59	98%	4.1	5.4	6.7	3.6	5.4	7.1
08	-92 (S9+)	92%	65	68%	4.4	5.8	7.1	5.4	3.6	7.1
09	-92 (S9+)	92%	65	74%	4.5	6.0	7.3	5.4	3.6	7.1
10	-92 (S9+)	91%	65	75%	4.7	6.2	7.6	5.4	3.6	7.1
11	-91 (S9+)	93%	66	79%	4.8	6.3	7.8	5.4	3.6	7.1
12	-90 (S9+)	93%	67	75%	4.7	6.2	7.6	5.4	3.6	7.1
13	-90 (S9+)	92%	67	68%	4.5	5.9	7.2	5.4	3.6	7.1
14	-91 (S9+)	86%	60	99%	4.3	5.6	6.9	3.6	5.4	7.1
15	-90 (S9+)	87%	61	98%	4.0	5.3	6.5	3.6	5.4	7.1
16	-89 (S9+)	87%	61	96%	3.7	4.8	6.0	3.6	5.4	7.1
17	-89 (S9+)	89%	61	89%	3.3	4.4	5.4	3.6	5.4	7.1
18	-90 (S9+)	84%	58	70%	3.1	4.0	5.0	3.6	5.4	7.1
19	-92 (S9+)	79%	54	55%	2.8	3.7	4.6	3.6	5.4	7.1
20	-96 (S9+)	73%	49	38%	2.6	3.4	4.1	3.6	5.4	7.1
21	-98 (S9+)	69%	47	26%	2.4	3.1	3.8	3.6	5.4	10.1
22	-98 (S9+)	67%	47	23%	2.3	3.0	3.7	3.6	5.4	10.1
23	-97 (S9+)	71%	49	21%	2.3	3.0	3.7	3.6	5.4	10.1
24	-98 (S9+)	69%	48	17%	2.2	2.9	3.6	3.6	5.4	10.1

Lisa 4 – MARSsys simulatsioonid

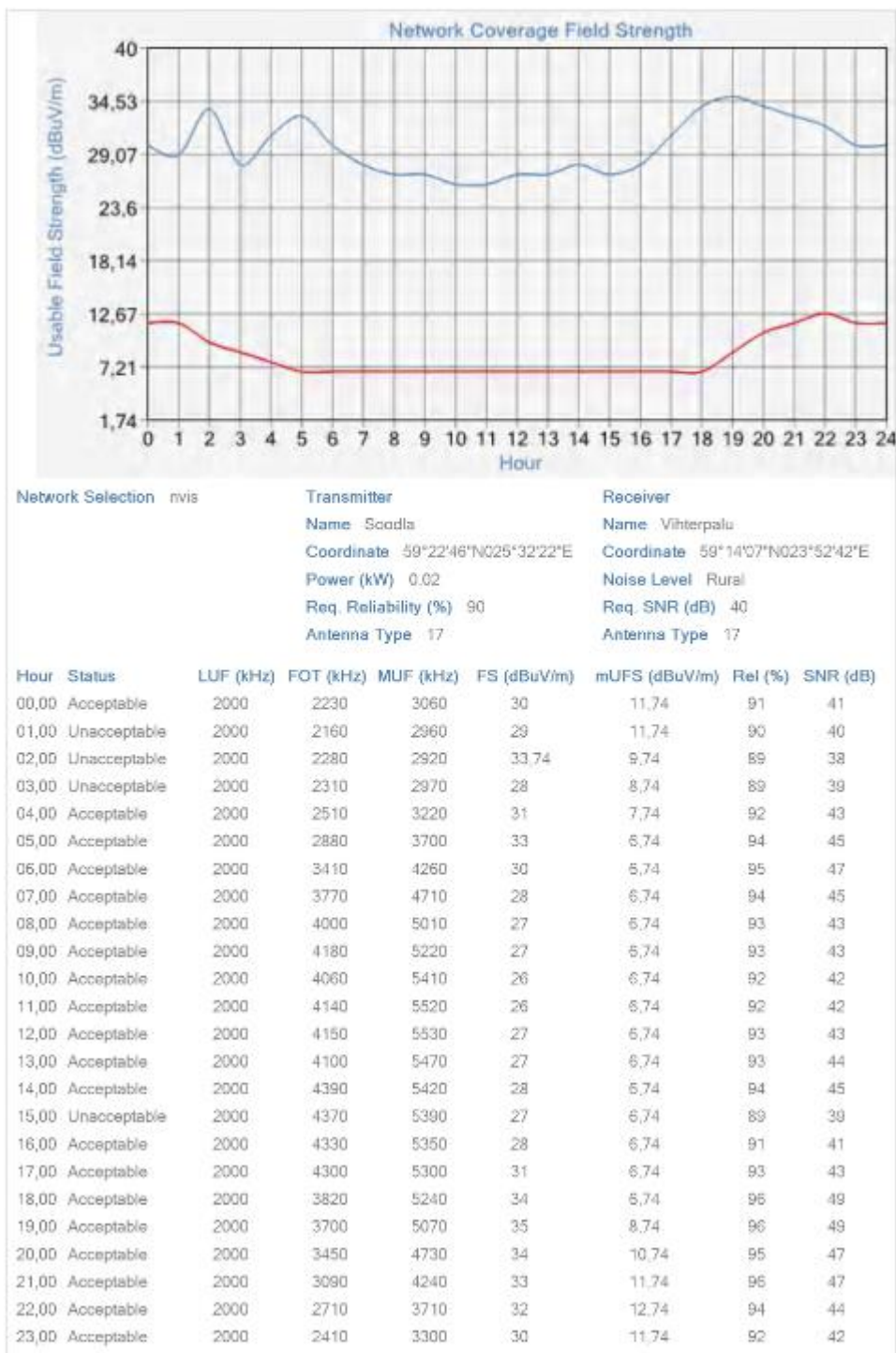
Käesolev lisa sisaldab endas MARSsys tarkvara simulatsioonide tulemusi, mida on kasutatud levimudelite simulatsioonide peatükis. Simulatsioonide läbiviimisel kasutati MARSsys leviarvutus mooduli ruumilaine arvutus funktsiooni ning arvutustes kasutatud päikeseplekkide arvud võeti Belgia observatooriumi ennustustest [14].



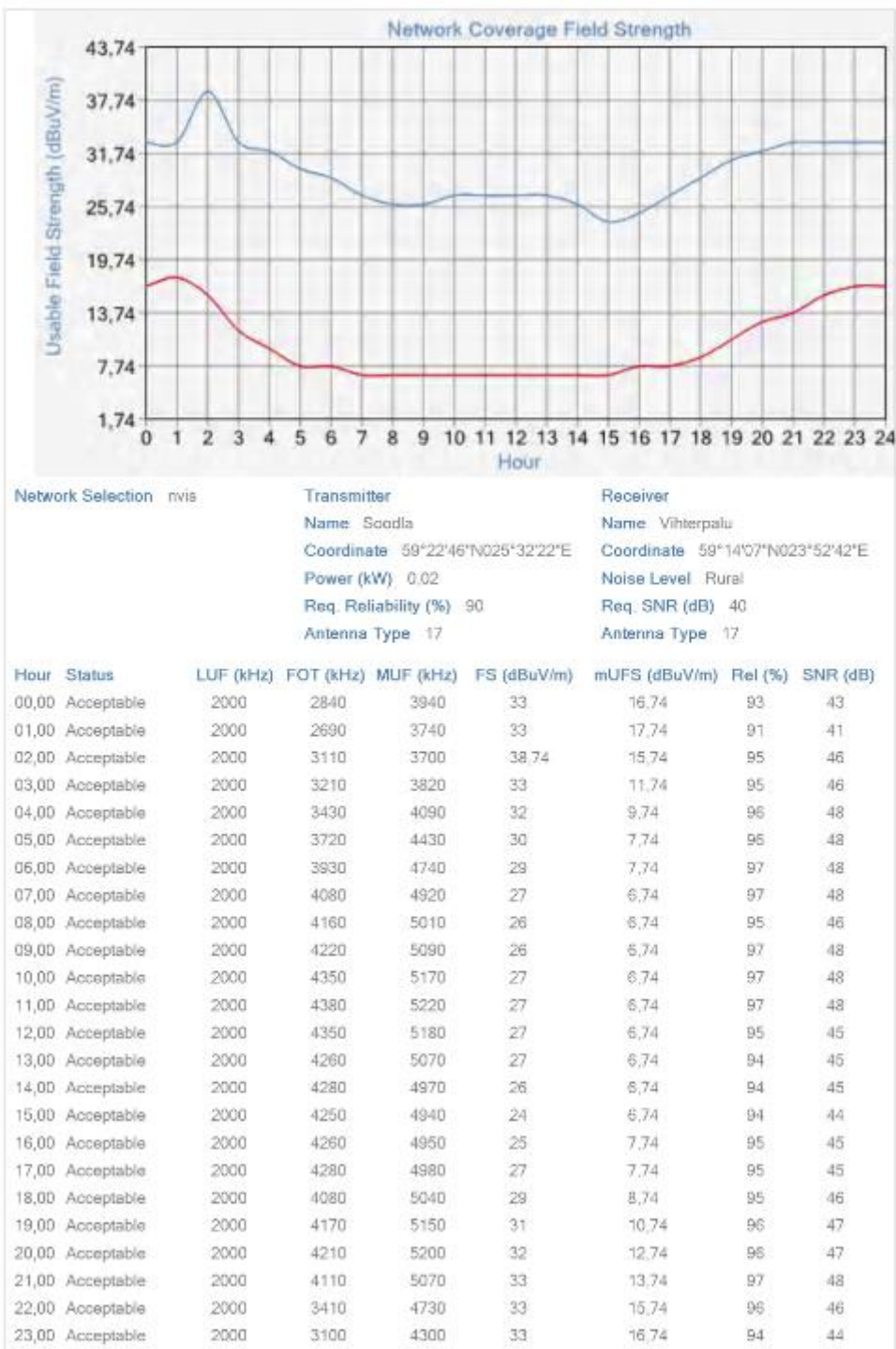
Network Selection	Transmitter	Receiver
nviz	Name Soodla	Name Vihterpalu
	Coordinate 59°22'46"N025°32'22"E	Coordinate 59°14'07"N023°52'42"E
	Power (kW) 0.02	Noise Level Rural
	Req. Reliability (%) 90	Req. SNR (dB) 40
	Antenna Type 17	Antenna Type 17

Hour	Status	LUF (kHz)	FOT (kHz)	MUF (kHz)	FS (dBuV/m)	mUFS (dBuV/m)	Rel (%)	SNR (dB)
00,00	Acceptable	2000	2370	3200	32	13,74	95	45
01,00	Acceptable	2000	2340	3160	31	14,74	94	44
02,00	Acceptable	2000	2280	3000	34,74	13,74	90	40
03,00	Unacceptable	2000	2110	2780	28	13,74	87	37
04,00	Unacceptable	2000	1960	2580	25	12,74	83	33
05,00	Unacceptable	2000	1880	2480	24	11,74	80	31
06,00	Unacceptable	2000	2100	2620	25	9,74	89	39
07,00	Acceptable	2000	2540	3170	30	6,74	97	49
08,00	Acceptable	2000	3300	4120	33	6,74	99	53
09,00	Acceptable	2000	4170	5210	33	6,74	100	57
10,00	Acceptable	2000	4850	6070	32	6,74	100	56
11,00	Acceptable	2000	5200	6500	32	6,74	100	56
12,00	Acceptable	2000	5240	6550	32	6,74	100	58
13,00	Acceptable	2000	5050	6310	33	6,74	100	59
14,00	Acceptable	2000	4820	5880	35	6,74	100	60
15,00	Acceptable	2000	4290	5230	36	6,74	100	59
16,00	Acceptable	2000	3610	4410	36	6,74	100	59
17,00	Acceptable	2000	2970	3620	35	7,74	99	56
18,00	Acceptable	2000	2250	3080	31	8,74	97	49
19,00	Unacceptable	2000	2090	2860	28	9,74	94	44
20,00	Unacceptable	2000	2070	2830	28	10,74	93	43
21,00	Unacceptable	2000	2100	2880	29	11,74	93	43
22,00	Unacceptable	2000	2210	2990	29	12,74	93	43
23,00	Acceptable	2000	2310	3120	31	12,74	95	45

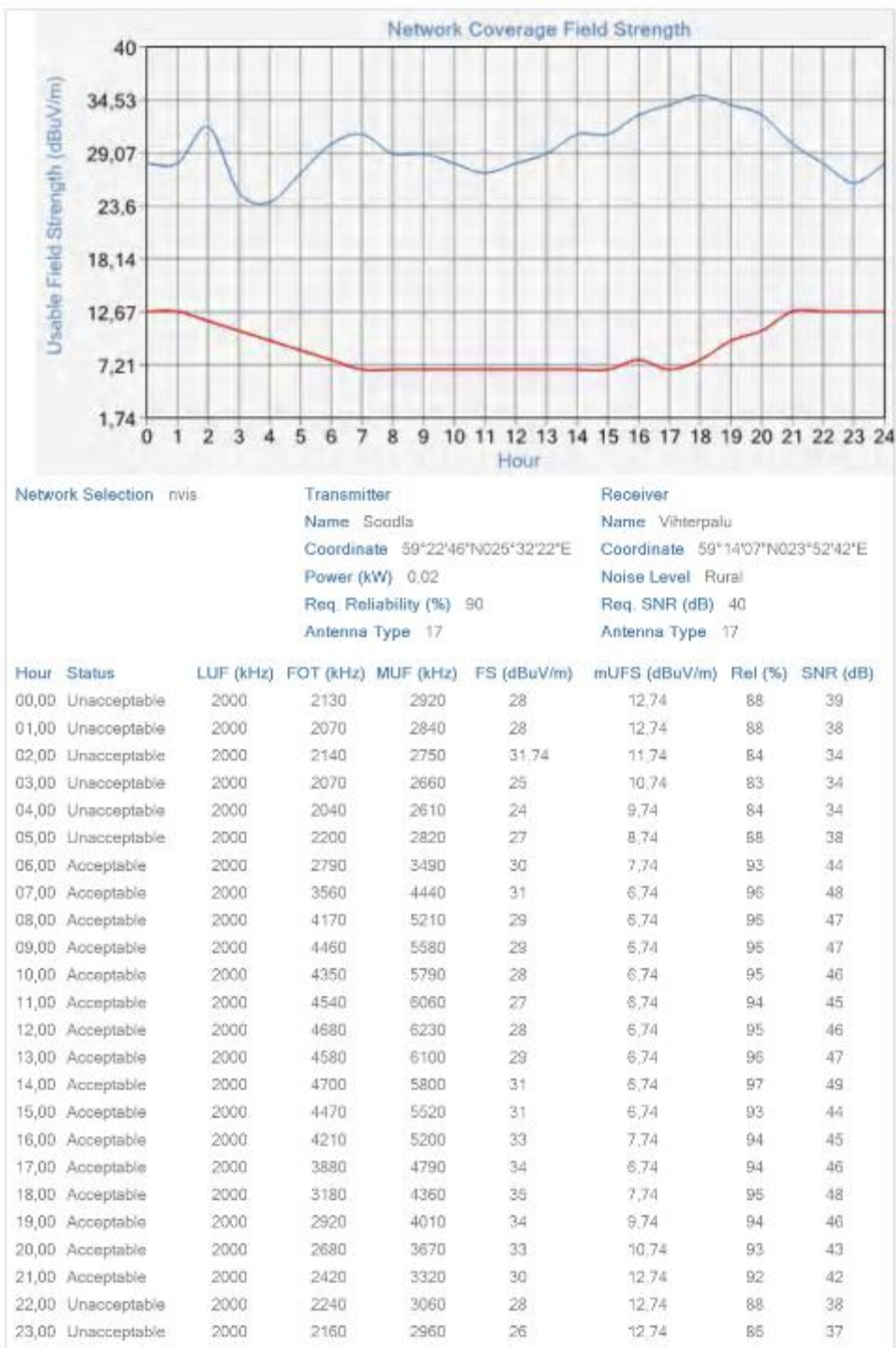
Graafik 28. MARSsys Soodla-Vihterpalu simulatsioon (jaanuar 2018)



Graafik 29. MARSsys Soodla-Vihterpalu simulatsioon (aprill 2018)



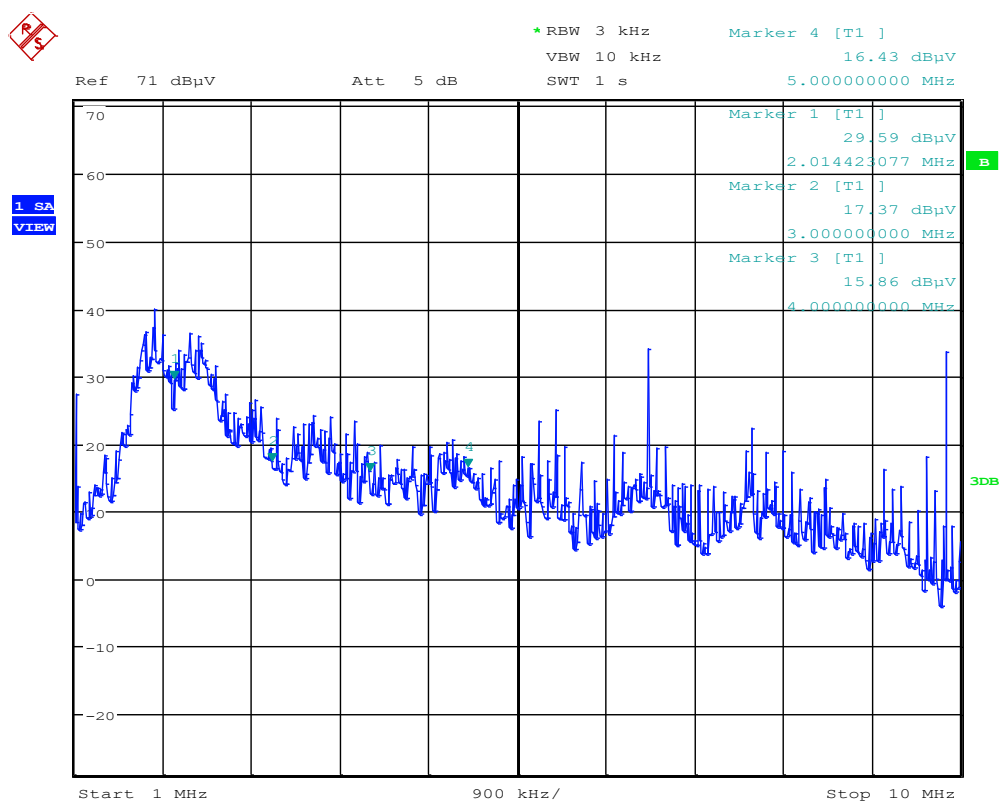
Graafik 30. MARSsys Soodla-Vihterpalu simulatsioon (juuli 2018)



Graafik 31. MARSsys Soodla-Vihterpalu simulatsioon (oktoober 2018)

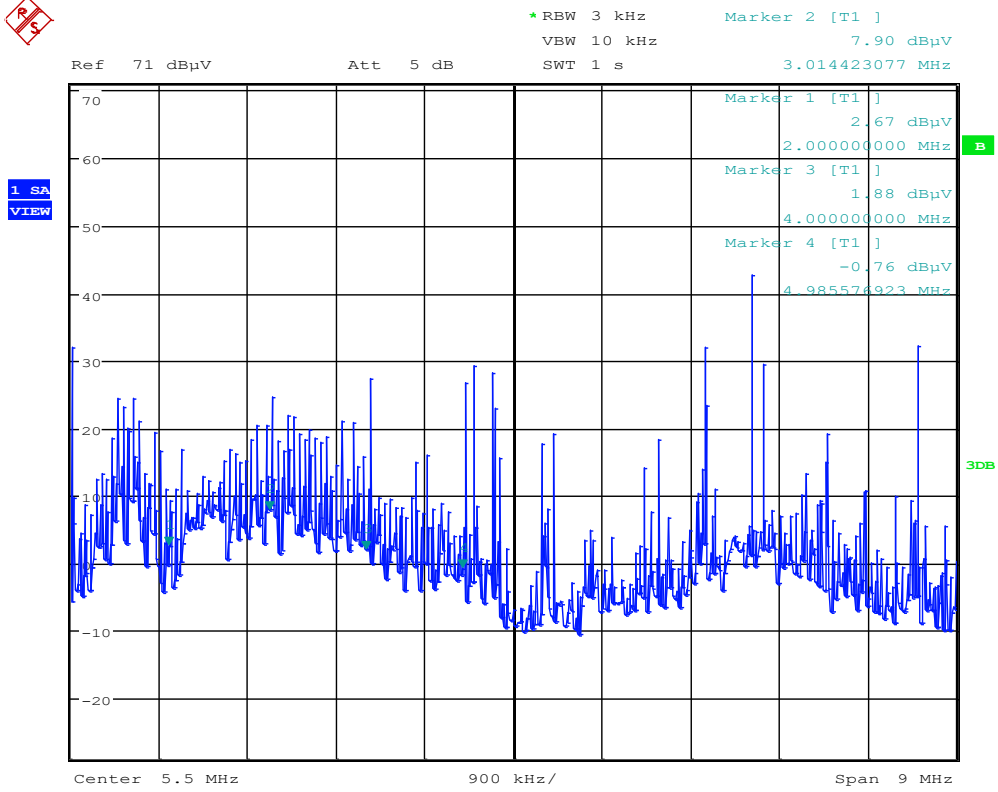
Lisa 5 - Mürataseme mõõdistuses Tartus

Käesolev lisa sisaldab endas mürataseme mõõdistuste spektripilte Tartu linnas ja Tartu linna piirist ca 8 km kaugusel 27. märtsil 2018. Mürataset mõõdeti horisontaalse poollaine dipool antenniga ja spektrianalüsaatoriga Rohde&Schwarz FSU26. Lisatud spektripildid on mõõdetud keskväärtuse detektoriga kasutades 3 kHz laiust filtrit sagedusvahemikus 1 – 10 MHz.



Date: 27.MAR.2018 12:39:29

Spektripilt 1. Mürataseme mõõditused Tartu linnas 27.03.2018



Date: 27.MAR.2018 14:32:26

Spektripilt 2. Mürataseme mõõdistused väljaspool Tartu linna 27.03.2018

Lisa 6 - Sidetestide tulemused 27. – 28.03.2018

Käesolev lisa sisaldab endas ajavahemikul 27. – 28.03.2018 läbiviidud sidetestide tulemusi

Tabel 11. Valmiera jaama sidetestide tulemused mõõdetuna Tartust

VALMIERA -> TARTU		27.03.2018												28.03.2018												
Nr	sagedus (kHz)	15:25	15:41	16:10	16:30	17:06	17:34	18:03	19:05	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	10:41	11:05
1	2057	0	0	0	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0
2	2239	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2308	33	30	0	0	16	13	0	45	28	0	25	18	0	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0	16	0
4	2404	25	51	0	0	14	11	0	40	50	0	35	43	0	0	24	25	0	0	0	43	0	0	0	16	0
5	2662	57	41	0	0	43	34	59	0	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61	43	0	17	0
6	4522	0	27	21	18	16	13	9	36	22	13	7	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	4612	0	27	18	16	13	13	9	12	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	4856	0	0	0	0	50	40	52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	5319	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	5440	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 12. Aluksne jaama sidetestide tulemused mõõdetuna Tartust

ALUKSNE -> TARTU		27.03.2018												28.03.2018												
Nr	sagedus (kHz)	15:25	15:41	16:10	16:30	17:06	17:34	18:03	19:05	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	10:41	11:05
1	2057	0	0	13	2		14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0
2	2239	0	0	2	1		13	50	0	0	59	0	0	0	0	0	35	0	0	0	0	0	0	0	12	0
3	2308	0	0	13	14		4	59	39	36	0	42	35	34	34	0	24	25	0	0	0	0	0	0	17	0
4	2404	0	36	16	14		15	30	0	50	45	53	51	35	35	36	0	25	21	0	45	0	40	0	30	0
5	2662	0	0	16	14		42	59	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	50	52	34	16	0
6	4522	0	0	0	0		16	13	7	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	4612	0	0	0	0		18	14	8	26	15	9	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	3
8	4856	0	0	0	0		39	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	5319	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	5440	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 13. Tartu jaama sidetestide tulemused mõõdetuna Valmierast

TARTU -> VALMIERA		27.03.2018										28.03.2018										
Nr	sagedus (kHz)	15:30	15:50	17:09	17:31	18:20	18:50	20:00	21:00	22:11	23:10	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:20	9:20	10:30
1	2057	0	0	0	0	32	32	36	0	1	0									0	0	0
2	2239	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									0	0	0
3	2308	34	0	0	0	0	36	28	0	0	0									0	0	0
4	2404	57	0	0	0	0	36	50	0	0	42									50	0	0
5	2662	47	45	43	34	50	44	0	0	0	0									41	42	0
6	4522	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									0	0	0
7	4612	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									0	0	0
8	4856	0	36	54	44	0	0	0	0	0	0									0	0	0
9	5319	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									0	0	0
10	5440	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									0	0	0

Tabel 14. Valmiera jaama sidetestide tulemused mõõdetuna Aluksnest

VALMIERA -> ALUKSNE		27.03.2018										28.03.2018												
Nr	sagedus (kHz)	15:30	15:50	17:09	17:31	18:20	18:50	20:00	21:00	22:11	23:10	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:20	9:20	10:30	11:30	12:10
1	2057	11	0	0	11	0	0	4	0	0	0									0	0	0	0	0
2	2239	12	0	0	0	0	0	26	50	50	40									0	0	0	0	0
3	2308	30	0	0	2	0	0	45	40	31	40									22	0	0	0	0
4	2404	11	0	0	0	0	40	14	50	50	23									31	0	22	0	0
5	2662	21	0	42	36	31	50	29	23	0	0									50	0	2	0	0
6	4522	0	0	33	27	0	0	0	0	0	0									0	0	0	0	0
7	4612	13	0	32	29	25	53	7	0	0	0									0	0	0	0	0
8	4856	1	0	40	54	0	0	0	0	0	0									0	0	0	0	0
9	5319	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									0	0	0	0	0
10	5440	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									0	0	0	0	0

Tabel 15. Tartu jaama sidetestide tulemused mõõdetuna Aluksnest

TARTU -> ALUKSNE		27.03.2018										28.03.2018													
Nr	sagedus [kHz]	17:25	18:01	18:45	18:59	19:46	20:12	20:25	20:35	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:10	7:50	8:24	8:35	9:48	10:36	11:11
1	2057	0	0	0		0													0	0	0	0	0	0	0
2	2239	0	50	39		42													43	32	0	0	0	0	2
3	2308	0	59	42		43													39	39	0	0	0	0	0
4	2404	0	30	21		56	64												40	50	0	0	0	30	0
5	2662	59	59	42		50														0	0	0	0	0	2
6	4522	0	0	0		0													0	0	0	0	0	0	0
7	4612	0	0	0		0													0	0	0	0	0	0	0
8	4856	39	36	25		0													0	0	0	0	0	0	0
9	5319	0	0	0	0	0	0	0	0										0	0	0	0	0	0	0
10	5440	0	0	0	0	0	0	0	0										0	0	0	0	0	0	0

Tabel 16. Valmiera jaama sidetestide tulemused mõõdetuna Aluksnest

VALMIERA -> ALUKSNE		27.03.2018										28.03.2018													
Nr	sagedus [kHz]	17:25	18:01	18:45	18:59	19:46	20:12	20:25	20:35	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:10	7:50	8:24	8:35	9:48	10:36	11:11
1	2057	0	0	0	0	0		0	0										0	32	0	0	0	0	0
2	2239	0	0	3	41	0		41	32										31	31	0	0	0	0	0
3	2308	0	0	2	50	50		31	21										41	39	40	0	0	0	0
4	2404	0	0	40	50	0		31	31										42	41	40	0	0	3	0
5	2662	41	32	50	0	32		0	41										41	50	59	0	0	21	16
6	4522	30	23	16	0	0		0	0										0	0	0	0	0	0	0
7	4612	34	27	53	0	0		0	0										0	0	0	0	0	0	0
8	4856	44	37	26	0	0		0	0										0	0	0	0	0	0	0
9	5319	0	0	0	0	0	0	0	0										0	0	0	0	0	0	0
10	5440	0	0	0	0	0	0	0	0										0	0	0	0	0	0	0