

Tartu Ülikool
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Ökoloogia ja Maateaduste instituut
Geograafia osakond

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias

RAIETE TUVASTAMINE EESTI METSADES

RADARSATELLIIT SENTINEL-1A ABIL

Mirjam Põhjala

Juhendaja: MEng Aire Olesk

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2015

Sisukord

Sissejuhatus	4
1. Teoreetilised lähtekohad.....	6
1.1 Eesti metsanduse ülevaade.....	6
1.2 Tehisava-radari kirjeldus	9
1.2.1 Tehisava-radari parameetrid	10
1.2.2 Tehisava-radari pildi moodustumine	12
1.3 Elektromagnetlained	13
1.3.1 SARi lainepikkused	14
1.3.2. Peegeldumise omapära	15
1.3.3. SARi polarisatsioon.....	16
1.4 Metsade seire tehisava-radari abil.....	18
2. Andmed ja meetodika.....	21
2.1 Uurimisala kirjeldus.....	21
2.2 Andmete kirjeldus.....	24
2.3 Meetodika	25
2.3.1 Piltide lugemine.....	26
2.3.2 Piltide kärpimine	26
2.3.3 Piltide kalibreerimine	27
2.3.4 Juht- ja alampiltide ühildamine	28
2.3.5 Müra vähendamine	29
2.3.6 Reljeefi korrigeerimine.....	29
2.3.7 Metsaeraldiste polügonide ettevalmistamine	30
2.3.8 Raialade tagasipeegeldumise intensiivsuse arvutamine	30
3. Tulemused	31
3.1 Ilmastikuolude mõju	31
3.2 Raiete tuvastamine	34
3.2.1 Lageraie	36
3.2.2 Harvendusraie.....	39
3.2.3 Teised raieliigid	41
4. Arutelu.....	44
4.1 Ilmastikutingimuste mõju signaali tugevusele.....	44
4.2 Raiete tuvastamine	45
Kokkuvõte	48

Tänuavaldused	50
Felling detection in Estonian forest using Sentinel-1A satellite images	51
Kasutatud kirjandus	52

Sissejuhatus

2014. aasta aprillis saatis Euroopa Kosmoseagentuur (ESA) orbiidile esimese Copernicuse programmi keskkonnaseire satelliidi Sentinel-1A (S-1A), mis on järjepidevalt andmeid edastanud alates sama aasta oktoobrikuust. C-lainealas töötava tehisava-radari Sentinel-1A vaateala laius on 250 km ning ruumiline lahutus Eesti ülelendudel 20 x 22 meetrit. Kogu Maa suudab süsteem üles pildistada 12-päevase uuendussagedusega. Sentinel-1A andmed on tasuta kättesaadavad ning need edastatakse maapealsesse andmejaotuskeskusesse ühe tunni jooksul alates nende tegemisest, mis on suur edasimineku olemasolevate tehisava-radari ehk SARi (*Synthetic Aperture Radar*) süsteemidega võrreldes (ESA 2015b).

Algselt kasutati tehisava-radarite andmeid peamiselt sõjalise luure eesmärkidel, kuid käesoleval ajal leiab radarkaugseire aina rohkem rakendust ka tsiviilvaldkonnas. Satelliitidelt radarmõõdistamise eeliseks on andmete kiire kättesaadavus suurte alade kohta. Näiteks interferomeetrilise radariga kogutakse andmeid globaalse kõrgusmudeli jaoks (Henderson, Lewis 2013). Veel aitab radarkaugseire kaardistada üleujutusi (Voormansik jt 2014), metsi ning jääolusid, tuvastada õlireostust, hoonete ja maapinna liikumist (Henderson, Lewis 2013). Uute tehisava-radari instrumentide lisandumisega on paranenud sensorite tehnilised võimalused, suurenenud katvus ning kordustsüklite arv, mis laiendab rakendusvaldkondi veelgi (ESA 2013). Käesoleva magistritöö peamine eesmärk on uurida, millised võimalused avanevad radarsatelliit Sentinel-1A piltide kasutamisel Eesti metsade seirel ning kuidas mõjutavad erinevad keskkonnategurid radarsatelliidi kasutusvõimalusi Eesti tingimustes.

Tänaasel päeval saadakse põhiline ülevaade Eesti metsadest kasutades statistilist metsainventuuri (SMI), lausmetsakorraldust, ortofotosid ning satelliitpilte. SMI on valikuuring, mille andmestik on piisava ulatusega kogu Eestit hõlmavateks hinnanguteks ja uuringuteks ning metsanduse arengukava koostamiseks (KKM 2010, Pärt 2010). Metsade lausinventeerimisel antakse väga täpne ülevaade kindla metsa seisukorrast. Kõik kogutud andmed koondatakse kokku metsaressursi arvestuse riiklikku registrisse (metsaregistrisse) ja seetõttu aitavad need andmed täiendada üldisi Eesti metsavarude ülevaateid (KAUR 2014).

Toetavaks andmestikuks Eesti metsadest ülevaate saamisel on Maa-ameti toodetud ortofotod, millega on kaetud kogu Eesti territoorium. Tervele riigile suudetakse aga ring peale teha nelja aastaga, mistõttu on osade alade andmed vananenud ning ei kajasta reaalsust (Maa-amet 2015). Lisaks on metsade analüüsimiseks kasutatud väikeses mahus elektromagnetlainete

spektri optilises lainelas skaneeritult edastatud maapinna kujutisi ehk optilisi satelliitpilte. Üks enim kasutatust leidev satelliit on Landsat, mille Eestis kaardistatud lageraiealade aegrida ulatub praeguseks tagasi 1987. aastani (Peterson jt 2008). Optilise kaugseire miinuseks on piiratud nähtavus, kuna instrument ei näe läbi pilvede ning vajab valgusallikat. Seega ei taga optilised satelliitpildid andmete järjepidevust. Tänapäevaks on lisandunud mitmeid uusi aktiivseid kaugseire instrumente, mis kiirgavad ise energiat ning mille välja saadetud elektromagnetlained ja objektilt tagasi peegeldunud impulsid suudavad läbida atmosfääri (Rees 2001). Tehisava-radar on üheks selliseks näiteks.

Metsade seisundit on tehisava-radari instrumentide abil maailmas ka varasemalt uuritud, kuid töö autorile teadaolevalt Eestis sellele enne keskendutud ei ole. Seega annab Sentinel-1A radarsatelliidi andmete tasuta kättesaadavus ning tihe kordustsükkel uued uurimisvõimalused metsandussektorile just radarkaugseire näol. Sellest tulenevalt on antud magistritöö peamiseks eesmärgiks uurida, millised võimalused avanevad Sentinel-1A satelliitpiltide kasutamiseks Eesti metsade seirel.

Uurimistöö eesmärgi täitmiseks püstitati järgmised uurimisküsimused:

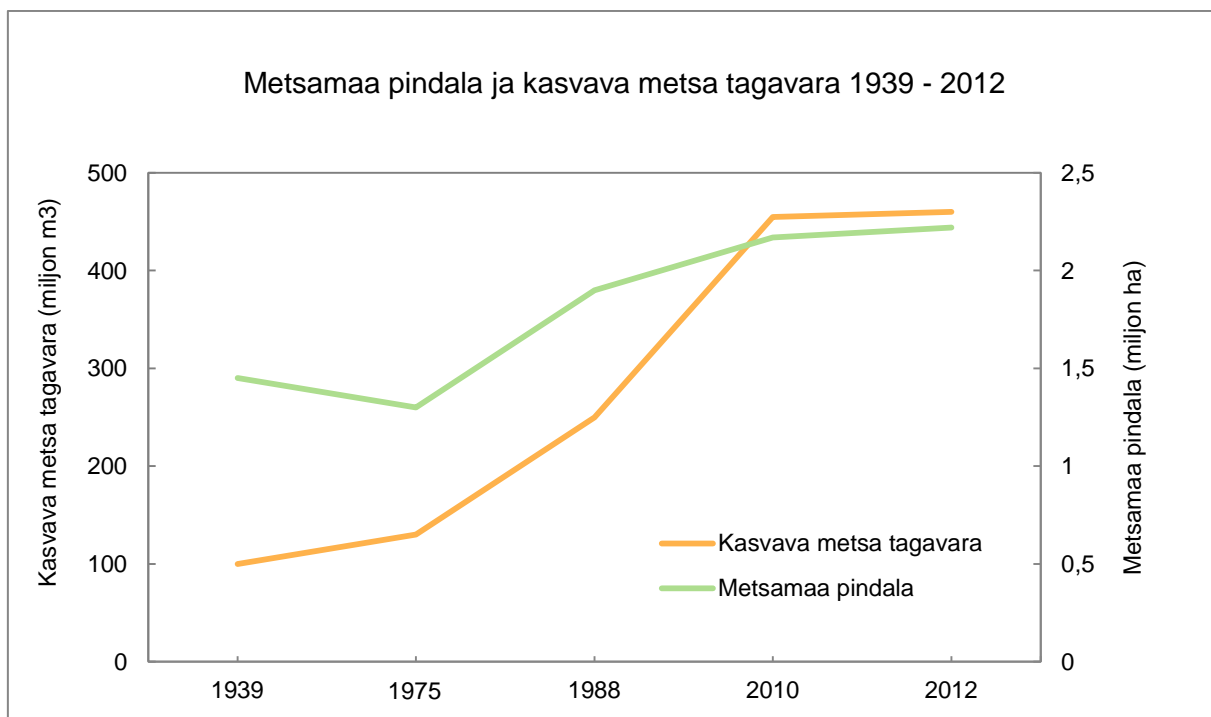
- Kas ja milliseid raieid on võimalik tuvastada Sentinel-1A satelliitpiltidelt Eesti metsades?
- Milline on minimaalne üksuse suurus maapinnal, et muutus metsa seisundis oleks tuvastatav?
- Kuidas mõjutavad ilmastikuolud Sentinel-1A kasutusvõimalusi Eesti metsades?

Magistritöö sisuline osa on jaotatud neljaks peatükiks. Selleks, et mõista täpsemalt radarkaugseire tööpõhimõtteid, keskendub töö teoreetiline osa tehisava-radari toimimise süsteemile ning elektromagnetlainete omadustele. Lisaks antakse ülevaade metsade uurimise iseärasuste kohta tehisava-radariga, pakkudes läbilõiget valdkonna varasematest uurimistöödest. Teises osas on kirjeldatud andmete päritolu ja andmetöötluse meetodikat. Kolmandas peatükis on ära toodud töö peamised tulemused ning neljandas sellega seonduv arutelu.

1. Teoreetilised lähtekohad

1.1 Eesti metsanduse ülevaade

Metsad moodustavad iseloomuliku osa Eesti maastikust, nende kogupindala on rohkem kui kaks miljonit hektarit (ha), kattes üle poole riigi territooriumist (joonis 1) (KAUR 2014). Metsamaa on Eesti metsaseaduse tähenduses maatükk, mis on metsamaa kõlvikuna kantud maakatastrisse või on pindalaga vähemalt 0,1 hektarit, millel kasvavad puittaimed kõrgusega vähemalt 1,3 meetrit ja puuvõrade liitusega vähemalt 30 protsenti. Metsamaaks ei loeta elamumaad, õuemaad, pargi, kalmistu, haljasala, marja- ja viljapuuaiad, aiandi, puukooli, dendraariumi ning puu- ja põõsaistandike maad (RT I 2006, 30, 232).



Joonis 1. Metsamaa pindala ja kasvava metsa tagavara muutus Eestis perioodil 1939 – 2012 (KAUR 2014).

Taimegeograafilise jaotuse järgi kuulub Eesti põhjapoolkera parasvöötme metsavööndi salu-okasmetsa ehk nn. segametsade allvööndi põhjaossa. Lehtpuu ja okaspuu enamusega metsade osakaal on praktiliselt võrdne, mõlemad moodustavad 50% puistute pindalast. Kõige levinumad puuliigid on harilik mänd, harilik kuusk ning aru- ja sookask, mis moodustavad

enamuspuuliigina kokku 81,2% metsamaa pindalast ja 76,6% kasvava metsa tagavarast (MMK 2010).

Eesti puistute keskmine hektaritagavara on 222 m³, keskmine kõrgus 17,7 m, keskmine rinnasdiameeter 19,6 cm ning keskmine vanus 52 aastat (KAUR 2014). Eesti metsavarude statistilise ülevaate annab 1999. aastal käivitatud statistiline metsainventeerimine. SMI on süstemaatiline valikuuring, kus üle Eesti paigutatud väikesepindalistel ringproovitükkidel tehtud mõõtmiste tulemused üldistatakse kogu riigile (Pärt 2010).

Enne SMI käivitamist tugines Eesti metsavarude statistika peamiselt lausmetsakorralduse andmestikul, mida koguti eelkõige metsamajandamiskavade koostamiseks (MMK 2010). Metsamajandamiskava annab väga täpse ülevaate kindla metsa seisukorrast. Regulaarselt on inventeeritud ainult riigimetsi, kuna erametsaomanikul ei ole kohustust omada metsale majandamiskava. Seetõttu puuduvad osal metsamaast takseerandmed või need on vananenud ning üldistused kogu riigi metsavarude kohta jääksid lünklikuks (KAUR 2014). Samas toetavad tänased kogutud takseerimisandmed üldise statistika tegemist, sest kõik metsaadmed koondatakse kokku metsaregistrisse (KKM 2011).

Kehtiva metsaseaduse kohaselt on metsamajandamise aluseks metsaregistrisse kantud metsainventeerimise andmed. Metsainventeerimisega koostatakse metsamajandamiskava, mis annab ülevaate kinnistu metsavarudest, seal kehtivatest looduskaitsest ja muudest kitsendusest ning soovitusel metsa majandamiseks (RT I 2006, 30, 232). Kava koostamise aluseks on seadusest tulenev määrus metsa korraldamise juhendi kohta (RTL 2009, 9, 104). Juhend sätestab metsa kaardistamise tingimused, mille tulemusena koostatakse metsaeraldiste kaardikiht, mis sisaldab eraldiste piire ja numbreid. Lisaks on juhendis määratud metsa inventeerimise meetodika, metsa majandamise viiside ja võtete kavandamise nõuded, metsa raiemahu arvestamise meetodika ja metsamajandamiskava koostamisele esitatavad nõuded (RTL 2009, 9, 104).

Metsamajandamiskava kehtib kümme aastat ning selleks perioodiks antakse konkreetse maatüki kohta soovituslikud uuendusraiate, hooldusraiate ja metsauuendamise nimekirjad eraldiste kaupa (RTL 2009, 9, 104). Seaduse järgi on Eestis lubatud raied: uuendusraie, mille hulka kuuluvad lage- ja turberaie; hooldusraie, mille hulka kuuluvad valgustus-, harvendus- ning sanitaarraie; valikraie; trassiraie; raadamine; kujundusraie (RT I 2006, 30, 232). Järgnevalt on täpsemalt kirjeldatud kehtiva metsaseaduse (RT I 2006, 30, 232) alusel nimetatud raieliike.

- Aegjärgne raie (AR) – on turberaie liik, mille korral raiutakse uuendamisele kuuluvas metsas hajali paiknevaid puid 10 kuni 20 aasta jooksul korduvate raiejärkudena.
- Harvendusraie (HR) – on hooldusraie liik, mille korral raiutakse metsa väärtuse tõstmiseks, metsa tiheduse ja koosseisu reguleerimiseks ning lähitulevikus väljalangevate puude puidu kasutamise võimaldamiseks piiritletud raielangilt teatud hulk puid.
- Häilraie (HL) – on turberaie liik, mille korral raiutakse uuendamisele kuuluv mets häiludena korduvate raiejärkudena.
- Kujundusraie – on valikraie liik, mida tehakse kaitstaval loodusobjektil kaitse-eesmärgi saavutamiseks vastavalt kaitsekorralduskavale, liigi kaitse ja ohjamise tegevuskavale või kaitstava looduse üksikobjekti või vääriselupaiga seisundi säilitamiseks ja parandamiseks.
- Lageraie (LR) – on uuendusraie liik, mille korral raiutakse piiritletud raielangilt raie algusest arvates kõik puud, välja arvatud seemne- ja säilikpuud.
- Raadamine (RD) – on raie, mida tehakse, et võimaldada maa kasutamist muul otstarbel kui metsa majandamiseks.
- Sanitaarraie (SR) – on hooldusraie liik, mis on mõeldud metsa sanitaarse seisundi parandamiseks ja ohuallikat mittekujutavate surevate või surnud puude puidu kasutamise võimaldamiseks, kui see ei ohusta elustiku mitmekesisust.
- Trassiraie (TR) – on raie, mille hulka kuulub kuni nelja meetri laiuselt kvartali- või piirisihi sisseraie või olemasoleva sihi või teeserva, kraavikalda ja kraaviserva puhastamine puudest.
- Turberaie – on uuendusraie liik, mille korral raiutakse puid korduvate raiejärkudega. Turberaie jaguneb aegjärgseks, häil- ja veerraieks.
- Valgustusraie (VA) – on hooldusraie liik, mille eesmärgiks on puude valgus- ja toitetingimuste parandamine ning metsa liigilise koosseisu kujundamine.
- Valikraie (VR) – on raieliik, mille korral raiutakse puid valikuliselt väga pika aja jooksul, nii et puistu kui tervik säiliks.
- Veerraie (VE) – on turberaie liik, mille korral raiutakse mets servast lageraiana, mujalt hajali paiknevate üksikpuudena korduvate raiejärkudena.

Eestis raiutavast raiemahust moodustavad valdava osa uuendusraied, vähem teostatakse hooldusraieid ja teisi raieliike (KAUR 2014). Seega on kõige sagedasemaks raieliigiks Eesti metsades lageraie, turberaie tehakse enamasti aladel, kus looduskaitsealistest piirangutest on lageraie keelatud. Hooldusraietest on kõige sagedasem harvendusraie (KAUR 2014).

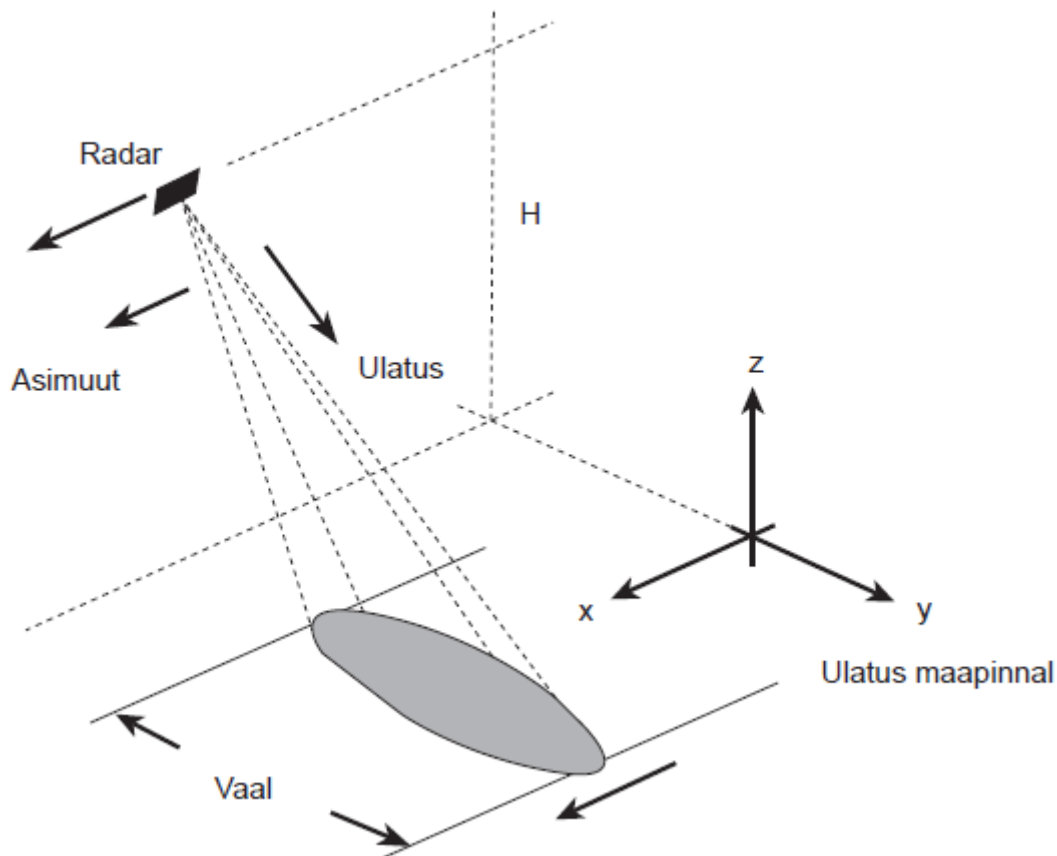
1.2 Tehisava-radari kirjeldus

Tehisava-radarit võib nimetada radari tänapäevaseks edasiarenduseks ja seetõttu on nende tööpõhimõtted sarnased. Radar on elektromagnetiline instrument, mis kiirgab välja raadiolaineid ning seejärel mõõdab objektilt ehk kiirguse hajutajalt tagasipeegeldunud kiirgust. Radarisse tagasi jõudnud signaali töödeldakse ning sellest eraldatakse informatsioon uuritava objekti kauguse ja suuna kohta (Birk *et al* 1995). Tehisava-radar tugineb aga antenni ja uuritava maa-ala vahelisele suhtelisele liikumisele, mille abil luuakse sünteesitud signaalide kogum (Henderson, Lewis 2013).

Radarit hakati aktiivse kaugseire meetodina arendama Teise maailmasõja ajal, mil eesmärgiks oli hinnata vastaste sihtmärkide kaugust. Pärast sõda hakati radarit aina enam ka tsiviilrakendustes kasutama (Woodhouse 2006). 1978. aastal saatis USA Rahvuslik Lennunduse ja Kosmose Administratsioon (NASA) orbiidile esimese tsiviilotstarbelise radarkaugseire satelliidi SEASAT, mille eesmärk oli kaardistada ookeane. See oli ühtlasi esimene SARi instrumenti kandev satelliit. Juba need varajased missioonid aitasid usaldusväärset kaardistada tehisava-radari abil Maa pinda ning saada teavet tema füüsikaliste omaduste kohta nagu topograafia, morfoloogia, karedus ja dielektrilised omadused (Chan, Koo 2008).

Tehisava-radarit saab hästi kasutada nii maa, jää kui ka mere pindade puhul. Olenemata ilmastikutingimustest ja nähtavusest toimib radar raadiosagedusliku sensorina pikkadel vahemaadel suure täpsusega (Birk *et al* 1995). Võrreldes optilise kaugseirega on SARi võimalik kasutada ka öösel, sest kujutise saamine ei sõltu päikesevalgusest. Lisaks ei sega vaatlusi ilmastikuolud, sest radar kasutab mikrolainete sagedusvahemikku jäävat elektromagnetkiirgust, mida neeldub atmosfääris marginaalselt vähe (Bamler, Hartl 1998).

Tehisava-radari tööpõhimõte seisneb lennukile või satelliidile kinnitatud antennis, mis kiirgab välja elektromagnetlaineid ning registreerib maapinnalt piki liikumisteedkonda ajaliselt järjestikku tagasihajunud signaale (joonis 2) (Woodhouse 2006). Tehisava-radari instrumenti kandev satelliit tiirleb enamasti kosmoses polaarorbiidil ning orbiidi kõrgus jääb tavaliselt vahemikku 500-900 kilomeetrit (Bamler, Hartl 1998). Vastuvõetud signaalist luuakse enamasti 2-dimensiooniline (2D) pildimaatriks (Chan, Koo 2008).



Joonis 2. Tehisava-radari pildistusgeomeetria (Woodhouse 2006).

1.2.1 Tehisava-radari parameetrid

Tehisava-radari tekitatud rasterpildi üks mõõde on ulatus (*range*), mis jääb radari ning maapinnal oleva sihtmärgi vahele. Mida tihedam on välja saadetud impulsside tagasipeegeldunud kajasignaali, seda kõrgem on saadud pildi ruumiline lahutus. Ulatuse suunas lahutuse arvutamisel on θ - langemisnurk; H - lennukõrgus; B - ribalaius; τ - impulsi pikkus $1/B$; C – valguskiirus (valem 1).

$$R_r = \frac{C\tau}{2 \sin \theta} \quad (\text{valem 1})$$

Teine dimensioon on asimuut (*azimuth*), mis on risti ulatuse suunaga ning paralleelne platvormi lennusuunaga. Radari asimuudi-suunaline ruumiline lahutusvõime on proportsionaalne antenni suurusega (Chan, Koo 2008). Asimuudi suunas lahutuse arvutamisel on L - antenni pikkus; ρ - kaldevahemik $H/\cos\theta$; λ – lainepikkus (valem 2).

$$R_a = \frac{\lambda \rho}{2R_a} = \frac{L}{2} \quad (\text{valem 2})$$

Tehisava-radari iseärasuseks võrreldes statsionaarsete radaritega on antenni ja uuritava piirkonna vahelise suhtelise liikumise kasutamine. Nii tekitab lühikeste vaheaegade järel signaale välja saatev liikuv antenn efekti suuremast antennist ja seetõttu tekib nii-öelda virtuaalne antenn ehk tehisava (McCandless, Jackson 2004). Tehisava võimaldab saavutada kõrgema ruumilise lahutuse, kuna järjestikku välja saadetud signaale töödeldakse koos, luues seeläbi efekti suuremast antennist. Radaripilt moodustub mööda asimuudi suunda elektromagnetlainete kiirtevihuga skaneerides (ESA 2015a).

Asimuudi suunal parandab lahutust Doppleri efekt, mille arvutamisel f - vastuvõetav sagedus; f_0 - allika poolt tekitatav sagedus; v - laine levimise kiirus; u_s - allika kiirus (kui allikas eemaldub vaatlejast $u_s > 0$); u_v - vaatleja kiirus (kui vaatleja läheneb allikale $u_v > 0$) (valem 3). Liikuva laineallika poolt tekitatava laine sagedus sõltub laineallika liikumisest vastuvõtja suhtes (McCandless, Jackson 2004). Seega pildimaatriksi koostamisel arvestatakse, et õhusõidukile lähenevalt ehk lennusuunas eespool paiknevalt alalt saabuva signaali sagedus on väljasaadetud signaalist kõrgem, lennusuunaga risti on sagedus muutumatu ja tagapool madalam. Mõõteraadiuse suunas määrab lahutusvõime radari pulsi pikkus ja kodeering (Chan, Koo 2008).

$$f = f_0 \left(\frac{v+u_v}{v+u_s} \right) \quad (\text{valem 3})$$

Kaugseires eristatakse spektraalset, ajalist, radiomeetrilist ning ruumilist lahutust. Spektraalne lahutus määrab ära, kui täpselt suudab instrument erineva sagedusega kogutud elektromagnetlaineid sageduse järgi eristada. Kordustsükli arv ja andmete uuendussagedus määrab kaugseiresüsteemi ajalise lahutuse ning radiomeetrilise lahutuse defineerib pildistamissüsteemi bitisügavus ehk hallskaala toonide arv. Ruumiline lahutus on määratud kahe eristatava objekti minimaalse vahekaugusega. Radaripiltidel enamasti ruumiline lahutus ei võrdu pikslisuurusega, andmed on ülediskreeditud (s.t. piksli suurus on väiksem kui ruumiline lahutus) (Henderson, Lewis 2013).

Tehisava meetod annab radaripiltidele meetrite suurusjärgus lahutusvõime, tüüpiline satelliitidel paiknevate tehisava-radarite ruumiline lahutus on 1-150 m ning vaateala laius 10-500 km (Birk *et al* 1995). Radarkaugseire satelliidil Sentinel-1A on neli erinevat töörežiimi, mille vaateala laiused ning ruumiline lahutus on erinevad, tavaliselt kaasneb laiema vaatealaga ka madalam lahutus (ESA 2015b).

Tehisava-radari Sentinel-1A abil mere- ja jääolude kaardistamiseks kasutatakse eriti laia töörežiimi (*Extra Wide Swath Mode*), mille vaateala on 400 km ning lahutus seejuures 40 m. Lisaks töötab S-1A riba (*Stripmap*) ning lainetus (*Wave*) režiimil, kuid maaseireks kasutatakse enim laia interferomeetrilist töörežiimi (*Interferometric Wide swath*), mille vaateala laius on 250 km ja lahutus 20 m (ESA 2013).

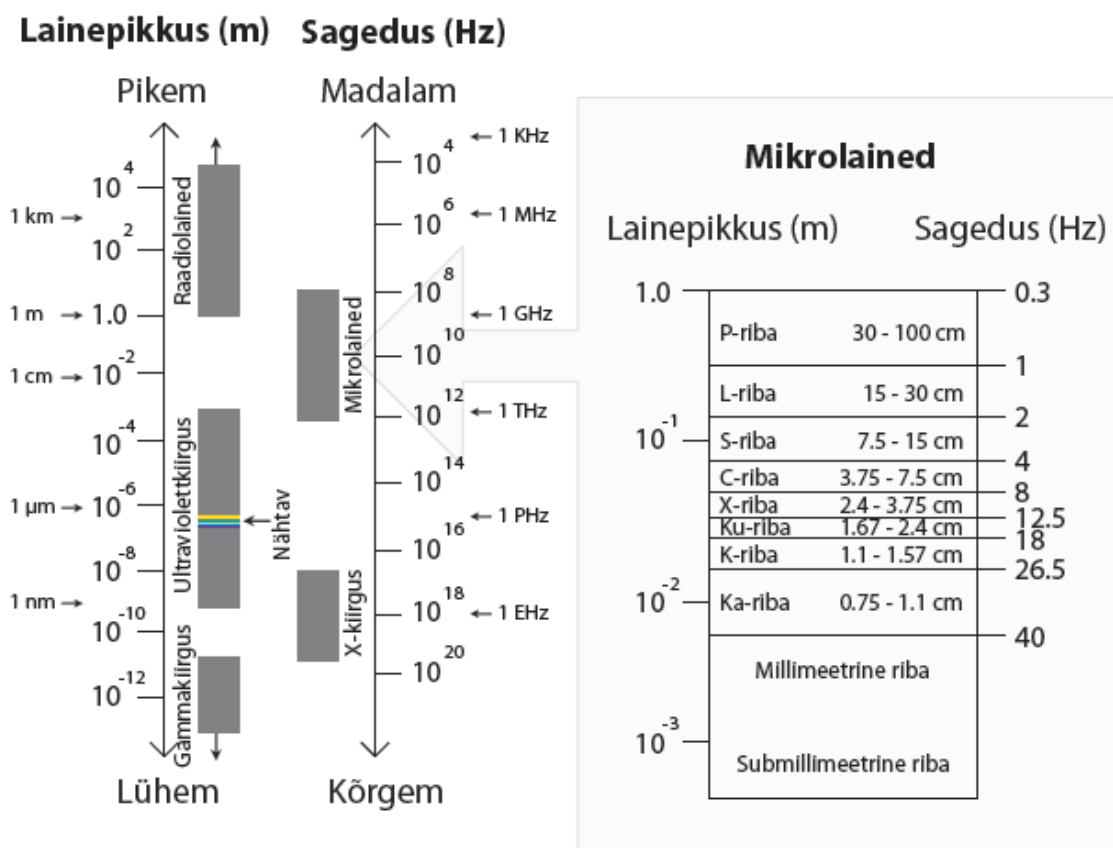
1.2.2 Tehisava-radari pildi moodustumine

Tehisava-radari andmetöötluse protseduur toimub sarnaselt teistele mittetavapärastele pildistamismeetoditele kahe sammuna. Esimeseks osaks on toorandmete kogumine, millele järgneb signaalitöötlus. Lõpliku pildi saamiseks vajavad andmed märkimisväärses osas signaalitöötlust, sest radarist saadavad algandmed sarnanevad pigem hologrammile kui pildile (McCandless, Jackson 2004). Radarisse iga piksli kohta tagasipeegeldunud signaalid salvestatakse kompleksarvuna, mis sisaldavad signaali amplituudi ehk tugevust ning signaali faasi. Tehisava-radari andmeteks on seega kõige algsemal kujul kompleksarvude maatriks, kus iga maatriksi element on vastavuses pildi piksliga määratud maapinnatükiga (Chan, Koo 2008).

Peamiselt vaatavad satelliidil või lennukil paiknevad tehisava-radari instrumendid maapinda lennusuunast paremale ning valgustavad seega maapinda mikrolainetega ainult ühest kindlast suunast (Henderson, Lewis 2013). Kosmoses paiknevad SAR-süsteemid opereerivad mikrolainealas, mille lainepikkused jäävad sentimeetrist kuni mõnekümne detsimeetrini. Radari sensor liigub piki trajektoori kõrgusel H ja kiirgab oma impulsikordussagedusel mikrolaine impulsse valgustavasse alasse maapinnal (joonis 2). Kordamööda impulsside saatmisega võetakse instrumendis vastu Maalt tagasipeegeldunud impulsside kaja (Chan, Koo 2008). Andmete töötlemiseks asetatakse kajad külj-külje kõrvale kahemõõtmelisse maatriksisse, kus iga vastuvõetud kaja omab vastavust ühega väljasaadetud impulssidest. Saadud kahemõõtmelise pildi koordinaatideks on ulatus ja asimuut (McCandless, Jackson 2004).

1.3 Elektromagnetlained

Elektromagnetlaineiks nimetatakse teineteisega seotud elektri- ja magnetvälja süsteemi, mille spekter on lõpmatult lai. Elektromagnetlaine lainepikkus on piki laine levimissuundi mõõdetud kaugus kahe samas faasis võnkumise punkti vahel (Fuller 1990). Sõltuvalt lainega edasikantavast energiahulgast on elektromagnetlainete alaliikideks: raadiolained, mikrolained, infrapunane kiirgus, nähtav valgus, ultraviolettkiirgus, röntgenikiirgus (X-kiirgus), gammakiirgus (joonis 3).



Joonis 3. Elektromagnetlainete alaliigid ning mikrolainete lainepikkused.

Elektromagnetlained võivad homogeenses keskkonnas levida sirgjooneliselt ning peegelduda tagasi objektide ja keskkondade lahtuspindadelt, samas võib laine murduda ehk muuta suunda pärast keskkonna lahtuspinna läbimist. Lainelisuse tõttu võivad elektromagnetlainetel esineda nähtused nagu interferents ja difraktsioon. Interferentsi korral

liituvad samast allikast lähtuvad koherentsed lained ning difraktsiooni puhul kanduvad lained tõkete taha, seejuures peavad tõkke mõõtmed olema samas suurusjärgus lainepikkusega (Fuller 1990). Radarile on nähtavad eelkõige objektid, mis on tema lainepikkusest suuremad (Birk *et al* 1995).

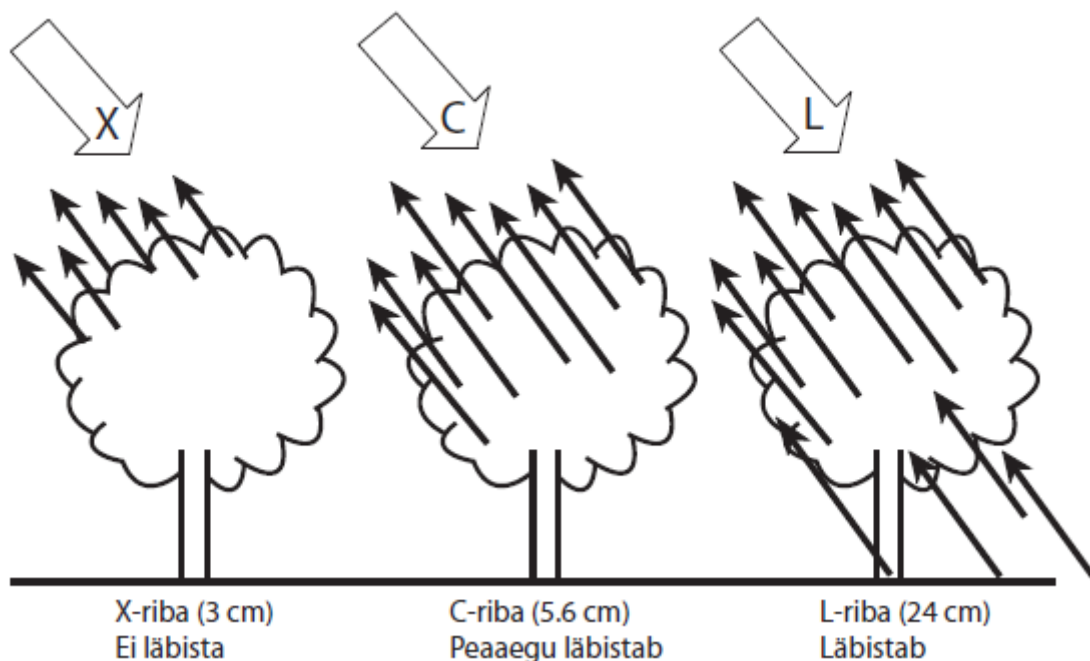
Tavalistes elektromagnetlainetes toimub võnkumine kõikvõimalikes laine levimisega ristuvates tasandites ehk puudub üks kindel elektrivälja võnkesiht. Samas esineb laineid, millel võib täheldada polarisatsiooni. Polariseeritud laines toimuvad elektri- ja magnetvõnkumised ainult ühel kindlal laine levimisega ristaval tasandil (Rees 2001).

1.3.1 SARi lainepikkused

Tehisava-radari levinumad impulsside kandesageduste lainepikkused on: L-riba (24 cm lainepikkus), C-riba (5,6 cm lainepikkus) ja X-riba (3 cm lainepikkus). Lisaks on vähesel määral SARi instrumente, mis toimivad P-riba (75 cm lainepikkus) sagedusvahemikus (joonis 3) (McCandless, Jackson 2004).

Saksa Öhu- ja Kosmoselennunduse Keskuse (DLR) interferomeetriline tehisava-radar TanDEM-X toimib X-lainealas ning seda kasutatakse näiteks ülemaailmse kõrgusmudeli loomiseks. L-lainealas töötab Jaapani satelliit ALOS-2, millel on mitu erinevat töörežiimi ning kõrgeim ruumiline lahutus 3 m (EO 2015). ESA orbiidile lennutatud Sentinel-1A omab tehisava-radarit, mis töötab C-lainealas, jätkates seega eelmiste ERS ja ENVISAT missioonide radarmõõtmiste andmerida. Sentinel-1A on eriline oma andmete hulga, ajalise tiheduse ning vaba ja avatud andmete jagamise poolest (ESA 2013). Pikima lainepikkusega mikrolaine alas töötavaid tehisava-radareid leidub täna küllaltki vähe, kuid üheks näiteks on NASA polarimeetriline SAR AirMOSS, mis toimib P-lainealas. Radarist välja saadetud kiirgus suudab läbi tungida taimestikust, jääst, liustikest ning mullast (JPL 2015).

Pikematel lainepikkustel töötavad radarid (L-riba, P-riba) annavad tugeva tagasipeegelduse suurtelt objektidelt ning suudavad hästi edasi anda maapinna omadusi. Lisaks võimaldab pikema lainepikkusega välja saadetud impulss läbistada näiteks lund, taimkatet ning kuivades oludes ka liiva ja mulda (Birk *et al* 1995). Metsade biomassi ning tüvemahtude hindamiseks on enamasti kasutatud L-riba lainealas toimivad tehisava-radareid, sest need suudavad läbistada puude võrastikku kuni tüveni välja (joonis 4) (Pulliainen *et al* 2002a).



Joonis 4. Puuvõrade läbistatavus erinevatel lainepikkustel (McCandless, Jackson 2004).

Lühemas lainealas (C-riba, X-riba) toimivad tehisava-radarid on kasulikud kirjeldamiseks väiksemaid iseärasusi maapinnal. Peale selle peegeldab lühema lainepikkusega välja saadetud impulss väga hästi tagasi taimkattelt ja lume ning mulla pinnalt, mis annab võimaluse klassifitseerida erinevaid maakattetüüpe (Birk *et al* 1995).

1.3.2. Peegeldumise omapära

Elektromagnetkiirgus lainepikkusega 3–24 cm suudab tungida läbi atmosfääri ja seal hõljuvate osakeste. Väljasaadetud kiirgus suudab minna objektide sisse ja seetõttu on eeskätt tundlik nende suurusele, orientatsioonile, kujule, veesisaldusele, pinnakaredusele ja dielektrilise läbitavusele (Henderson, Lewis 2013). Dielektriline läbitavus on aine omadus, mis iseloomustab dielektrikute ehk mittejuhtide elektrilise polarisatsiooni võimet. Näiteks metallist objektide dielektriline läbitavus on sarnaselt veega väga kõrge ja seetõttu eristuvad metallist objektid ja märjad alad hästi teistest objektidest (Rees 2001).

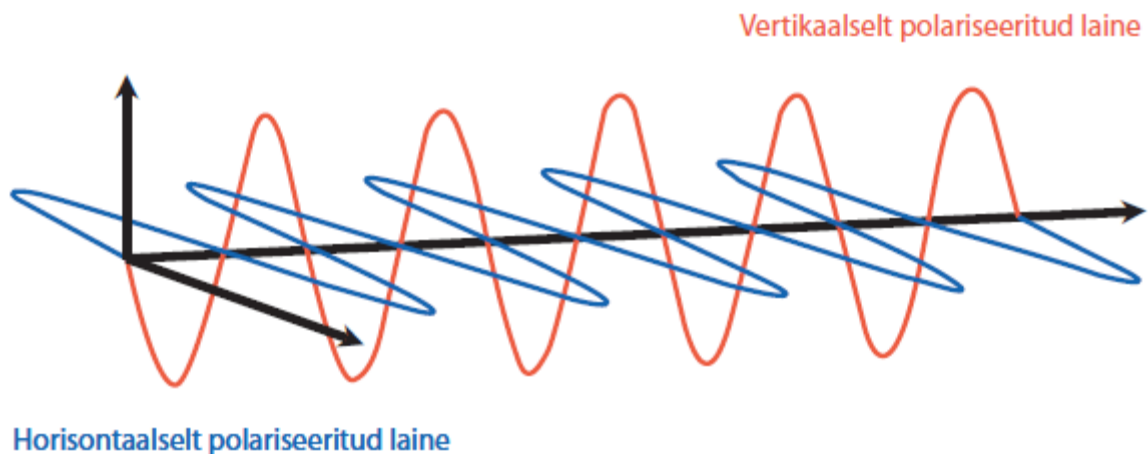
Satelliidile kinnitatud SAR vaatab alati küljele, sest otse alla vaadates ei suudaks tehisava-radari instrument määrata kahel samal kaugusel olevast punktist registreeritud signaali päritolu. Seega saab küljele vaadates eristada punkte maapinnal, kuna signaalil kulub punktideni jõudmiseks erinev aeg (Birk *et al* 1995). Tehisava-radar registreerib väljasaadetud kiirguse tagasipeegeldunud signaali tugevust ja faasi. Mida rohkem signaali radarisse tagasi peegeldub, seda suurem on signaali intensiivsus, nii paistavad lamedad ja edasi hajutavad pinnad radaripiltidel tumedad, kuna nendelt hajub enamus kiirgusest eemale. Samas ebatasased alad paistavad jällegi heledamad, sest suurem osa kiirgust jõuab radarisse tagasi ja seetõttu on ka signaal tugevam (Henderson, Lewis 2013). Nii paistavad näiteks veekogud radaripildil mustana, sest veekogult peegeldunud signaal ei jõua radarini tagasi. Tugeva lainetuse või jääkatte korral võib erandlikult veekogult osa signaalist sensorini siiski tagasi jõuda (Henderson, Lewis 2013).

Lisaks maapinna karedusele sõltub radarisse tagasi peegeldunud kiirguse intensiivsus ka maapinna ning teiste objektide veesisaldusest (Steele-Dunne *et al* 2012). Signaali tugevus on suures korrelatsioonis ilmastikuoludega, seda mõjutavad põud, üleujutused, külmumine ning sulamine (Saatchi *et al* 2000). Kui arvestada, et peaaegu 50% puidu biomassist moodustab vesi, siis metsade uurimisel tuleb arvestada aastaegadest tulenevaid veesisalduse muutusi puude tüves, lehtedes, okstes ja juurtes. Talvisel ajal on külmunud pinnase tõttu vee liikumine taimedes piiratud ja seetõttu langeb nende veesisaldus ning dielektriline läbitavus, mis omakorda mõjutab radari sensorisse tagasihajunud kiirguse intensiivsust (Sparks *et al* 2001).

Polarimeetriline tehisava-radar suudab väga täpselt määrata nii saadetud kui ka vastuvõetud signaali polarisatsiooni, sest instrument kasutab mõõtmisel koherentset kiirgust kindlal lainepikkusel. Eri liiki peegeldustel muutub kiirguse polarisatsioon erinevalt, mis annab täiendavat informatsiooni objektide täpsemaks kirjeldamiseks (Rees 2001).

1.3.3. SARi polarisatsioon

Polarisatsioon on lainete võnkesuunda kirjeldav omadus ning esineb ainult lainetel, mille levimis- ja võnkumistasandid on erinevad. Elektromagnetlained, millel on eelistatud võnkumissuund, on polariseeritud lained ning polarisatsiooni määrab ära elektrivälja võnkumise tasand. Polariseeritud laines toimuvad elektri- ja magnetvõnkumised ainult ühel kindlal laine levimisega ristuv tasandil (joonis 5) (Fuller 1990).



Joonis 5. Elektromagnetlainete polarisatsioon.

Polarimeetrilised tehisava-radarid on polarisatsioonide eristamise võimalustega, mõõdetakse polarisatsiooni muutust peegeldusele täielikult või teatud kindlate kombinatsioonide piires (Birk *et al* 1995). Polarimeetiline radar võtab arvesse laine eelistatud võnkumissuunda ja suudab kasutada nii impulsi saatmisel kui ka vastuvõtmisel kahte ortogonaalset polarisatsiooni. Eristatakse horisontaalse (H) ning vertikaalse (V) suunaga laineid ning mõõdetakse nende kõik võimalikke kombinatsioone (Rees 2001).

Polarimeetiline SAR saadab välja kindla võnkesuunaga impulssi (H või V) ning mõõdab objektidelt tagasipeegeldunud impulsi nii horisontaalses (H) kui ka vertikaalses kanalis (V). Nendest kombineerituna võivad esineda HH- ja VV-polarisatsioon ehk kiirgus saadetakse välja sama suunaga, millega ta tagasi tuleb ning HV- ning VH- polarisatsioon. HV- ja VH-polarisatsiooni korral edastatakse seadmest laine välja ühes võnketasandis ja võetakse vastu sellega risti asetsevas (Rees 2001).

Radarsatelliit Sentinel-1A on polarimeetiline instrument, mis töötab korraga kas ühes (HH või VV) või kahes polarisatsioonis (HH/HV või VV/VH) (ESA 2013). Erinevate polarisatsiooni kanalite kasutamine annab erisugust informatsiooni objektide kohta. Näiteks HH-polarisatsiooniga uuritakse ookeani sisemuse ja põhjaga seotud lainetust. Seevastu VV-polarisatsiooni kanal on jällegi parem vaatamaks lokaalsest ilmastikusituatsioonist tulenevate lainete iseärasusi (ESA 2015b). Risti polarisatsiooniga (HV või VH) tagasipeegeldunud

intensiivsus näitab suuremat dünaamilist ulatust parasvöötme metsades (Watanabe *et al* 2006).

1.4 Metsade seire tehisava-radari abil

Radarkaugseire abil on metsaga kaetud alasid ka varasemalt uuritud. Peamiselt on leitud, et tulemuste saamine on suuresti sõltuv ilmastikutingimustest ning seetõttu on põhjalikumalt vaadeldud ilmastikuolude mõju metsaga kaetud aladelt kiirguse intensiivsuse lugemiseks (Koskinen *et al* 2001, Pulliainen *et al* 1996). Põhilised metsaseire valdkonnad, mida radarsatelliidi abil on uuritud, on biomassi kaardistamine (Pulliainen *et al* 2002a, Ranson *et al* 2000), lageraiealade tuvastamine (Fransson *et al* 2008, Santoro *et al* 2012) ning väiksemal määral tormituultest mõjutatud metsaalade leidmine (Eriksson *et al* 2012, Fransson *et al* 2010).

Metsade muutusi on tuvastatud erinevate satelliitide SAR-süsteemide abil. Põhiliselt on keskendunud L-lainealas toimivate tehisava-radaritele, kuna pikem lainepikkus suudab läbistada puuvõra ning seeläbi koguda informatsiooni puutüve omaduste kohta (Santoro *et al* 2006, Santoro *et al* 2009, Watanabe *et al* 2006). Uuritud on ka C-lainealas töötavate instrumentide võimalusi metsade seirel (Pulliainen *et al* 1996) ning samas kombineeritud erinevate sensoritega saadud tulemusi (Pulliainen *et al* 2002b). Kõige suuremad tagasipeegeldunud kiirguse intensiivsuse erinevused metsa muutuste tuvastamiseks on andnud HV-polarisatsiooniga pildid.

Radarist välja saadetud signaali tagasihajumine sõltub oluliselt ilmastikust, aastaegade vaheldumine toob endaga kaasa muutused taimkatte- ja maapinna omadustes (Saatchi *et al* 2000). Külmal ning lumisel talvel sõltub signaali tugevus lumikatte paksusest, tihedusest ning niiskusest. Lumikatte puudumisel mõjutab tagasihajunud signaali tugevust mulla niiskus- ja külmumisaste (Santoro *et al* 2009). Korrelatsioon tagasihajumise ning metsa biomassi vahel varieerub positiivsest negatiivseni, olles sõltuvuses radari lainepikkusest, polarisatsioonist ning lehestiku ja mulla niiskusest (Pulliainen *et al* 1996).

Taimestiku puhul sõltub signaali tagasihajumine lisaks temperatuurile ka taimkatte tihedusest ja katvusest ning lainepikkusest (Saatchi *et al* 2000). Raagus puude puhul võib läbida signaal metsa kuni maapinnani, suvel aga peegeldub signaal enamasti lehtede pinnalt. Lehtede ning puutüve veesisaldus on suvel suurem ning mõjutab puu kui terviku keskmist dielektrilist

läbitavust (Saatchi *et al* 2000). Tihedas metsas sõltub tagasihajumise intensiivsus puuvõra külmumisastmest ning võib seetõttu varieeruda kuni 4 detsibelli (dB) (Santoro *et al* 2006). Ühtlasi mittekülmunud pinnasega tihedas metsas on tagasihajumise väärtused konstantsed, kui just ei ole metsas muutusi toimunud (Santoro *et al* 2006).

Hõredas metsas sõltub tagasihajumine enamasti metsa dielektrilisest läbitavusest, kuna osa kiirgusest jõuab maapinnani ja seetõttu on erinevates tingimustes tulemused sarnasemad (Santoro *et al* 2006). Erinevusi tagasipeegeldumises on leitud ka puuliigiti ja seda peamiselt veesisalduse ning puistu struktuuri tõttu. Lehtpuude fotosüntees lõpeb talveperioodil ning nende puuvõra veesisaldus muutub kardinaalselt, mis omakorda mõjutab läbipaistvust radari kiirgusele. Okaspuud suudavad samas paremini vett säilitada ning külmale vastu panna ja seetõttu on okaspuu enamusega puistutes aastaegade vaheldudes stabiilsemad tulemused (Sparks *et al* 2001).

Ilmastikutingimused mõjutavad radarsatelliitide võimet eristada metsa vanust, liigilist koosseisu, tagavara ning lagaraiega alasid. Siberis läbi viidud uurimuses L-laineala JERS ja ALOS satelliitpiltide abil leiti, et väga tiheda ning paksu lumikatte korral ei ole võimalik lageraie alasid tuvastada, kuna tagasihajumise intensiivsuse väärtuses esines liiga palju anomaaliaid (Thiel *et al* 2009). C-laineala tehisava-radaril on tuvastatud 3-4 dB muutusi tagasihajumises, kui lumeolud on olnud erinevad piltide ülelennu aegadel (märg, kuiv lumi) (Santoro *et al* (2009). ERS-1 SAR piltidelt kogutud andmed on näidanud, et 2 cm õhuke kuiv lumikate põhjustas võrreldes mittekülmunud pinnasega 1,6 dB langust metsaga kaetud aladel (Pulliainen *et al* 1996).

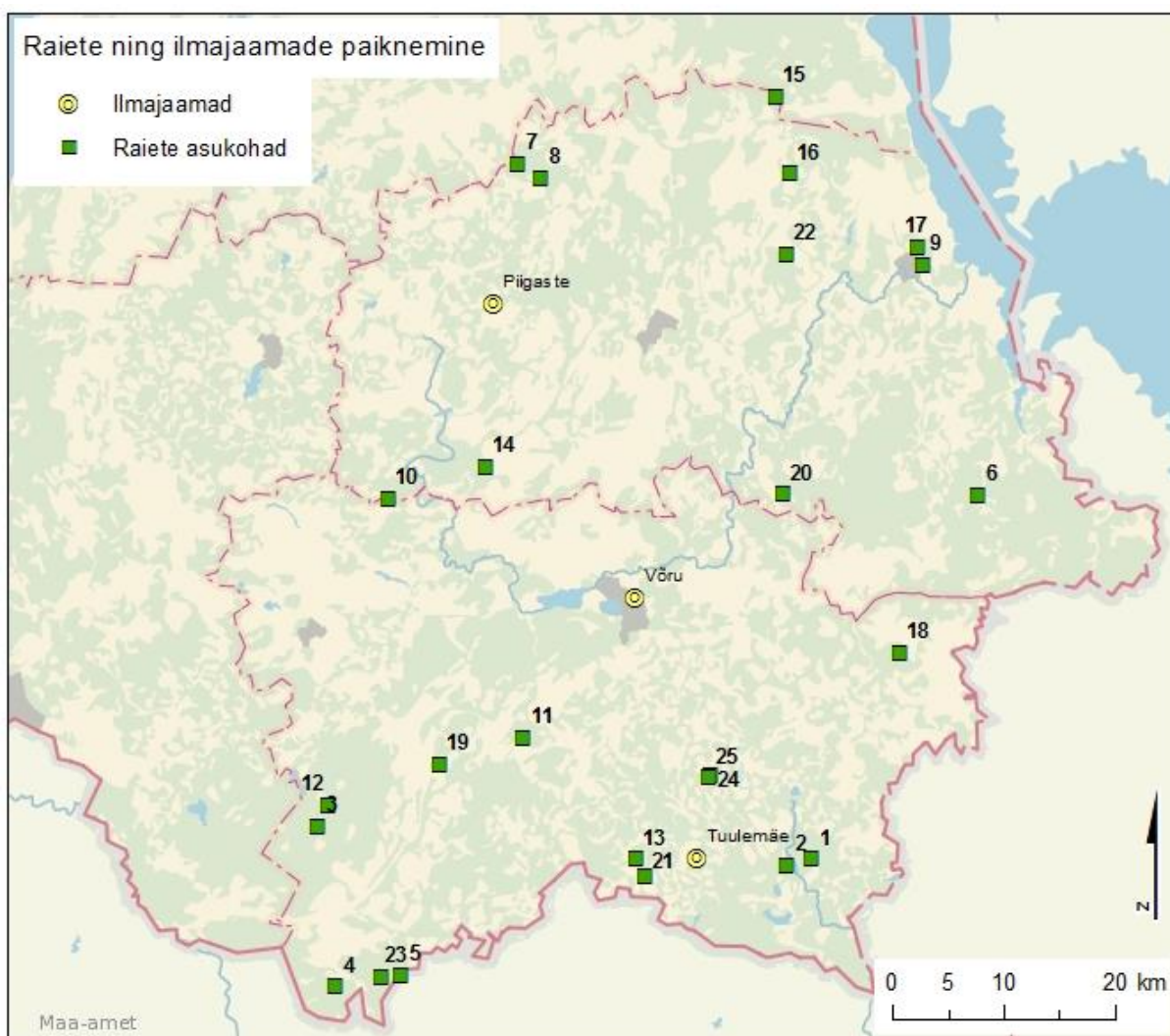
Varasemalt on leitud, et radarilt tagasihajunud kiirgus võib nullkraadi lähedase temperatuuri korral kõikuda 2-4 dB, mis teeb sellistes oludes ka raiete tuvastamise keerulisemaks (Santoro *et al* 2009). Santoro ja teised (2009) on lisaks avastatud, et külmunud ning külmumata pinnase tagasihajuvuse erinevus C-lainealas võib olla maksimaalselt 7 dB. Seetõttu annavad samal aastaajal ja sarnaste ilmastikutingimustega kogutud tehisava-radari pildid täpsemaid tulemusi (Fransson *et al* 2007). Kõige väiksem raieala maapinnal, mida varasemates teadustöodes on vaadeldud, on 1,5 hektarit ning Jaapani SARi ALOS PALSAR piltide võrdlemisel on seal ka muutus tuvastatud (Fransson *et al* 2007). Lisaks on eelnevates uuringutes välja tulnud, et lageraie tuvastamiseks on usaldusväärne vähemalt kahe detsibelline langus radarsisse tagasipeegeldunud signaali tugevuses (Fransson *et al* 2008) ning tormimurru kaardistamiseks 1,5 dB muutus (Eriksson *et al* 2012).

Kuna Sentinel-1A hakkas süstemaatiliselt andmeid koguma alles oktoobris 2014, ei ole veel avaldatud Sentinel-1A mõõtmiste põhiseid metsanduslikke uuringuid. Samuti ei ole Eesti metsade muutusi varasemalt teiste SAR-süsteemidega uuritud ja kuna ka Eestis muutuvad tingimused metsades sõltuvalt aastaajast, on oluline uurida eelpool nimetatud mõjusid siinsetes oludes ja leida optimaalsed raietuvastuseks sobivad ilmastikutingimused ja SARi parameetrid sõltuvalt raie ulatusest ja tüübist.

2. Andmed ja meetodika

2.1 Uurimisala kirjeldus

Käesolevas töös analüüsitavad uurimisalad asuvad Võru- ja Põlvamaal. Tegu on 25 erineva katastriüksusega, kus perioodil november 2014 kuni märts 2015 on toimunud raietegevus (joonis 6). Nendes on omakorda 87 metsaeraldist, milles metsa on lõigatud. Harvendusraiet on tehtud 41 eraldises, lageraiet 35 eraldises, nii sanitaar-, häil- kui ka veerraiet kolmes eraldises ning aegjärkset raiet kahes eraldises. Uurimistöös analüüsitud eraldiste pindalad jäävad vahemikku 0,1–6,4 ha (tabel 1).



Joonis 6. Võru ning Põlva maakonnas paiknevate raielankide asukohad.

Vaatluse all olevate eraldiste enamuspuuliigid on mänd (MA), kuusk (KU), kask (KS), haab (HB) ning hall lepp (LV). Eraldistest 72% on okaspuu enamusega puistud ning vastavalt 28%

lehtpuu enamusega. Kuuse enamusega on 32 eraldist, mänd moodustab 30 eraldise enamuspuliigi ning vastavalt kask 20, hall lepp 3 ning haab 2 (tabel 1).

Tabel 1. Uurimisalas asuvate raiete ülevaade.

Raie nr	Katastriüksuse nimetus	Katastrinumber	Eraldise nr	Pindala (ha)	Raie-liik	Enamupuuliik	Raie algus	Raie lõpp
1	Misso metuskond 58	46801:001:0042	31	0,41	HR	MA	2.02.2015	23.02.2015
	Misso metuskond 58	46801:001:0042	36	0,8	HR	KS	2.02.2015	23.02.2015
	Misso metuskond 58	46801:001:0042	1	3,22	HR	KS	28.01.2015	23.02.2015
	Misso metuskond 58	46801:001:0042	2	0,78	HR	KU	28.01.2015	23.02.2015
	Misso metuskond 58	46801:001:0042	10	1,05	HR	KU	28.01.2015	23.02.2015
	Misso metuskond 58	46801:001:0042	3	2,73	HR	KU	19.02.2015	26.03.2015
	Misso metuskond 58	46801:001:0042	4	2,28	HR	KU	19.02.2015	26.03.2015
	Misso metuskond 58	46801:001:0042	6	1,42	HR	KU	19.02.2015	26.03.2015
	Misso metuskond 58	46801:001:0042	1	2,23	HR	KU	22.01.2015	23.02.2015
	Misso metuskond 58	46801:001:0042	1	0,11	LR	LV	20.01.2015	16.02.2015
	Misso metuskond 58	46801:001:0042	10	0,69	LR	MA	16.01.2015	16.02.2015
	Misso metuskond 58	46801:001:0042	16	0,59	LR	KU	16.01.2015	16.02.2015
	Misso metuskond 58	46801:001:0042	13	1,29	LR	KS	16.01.2015	16.02.2015
	Misso metuskond 58	46801:001:0042	14	1,71	LR	MA	16.01.2015	16.02.2015
	Misso metuskond 58	46801:001:0042	5	3,43	LR	MA	21.01.2015	11.02.2015
Misso metuskond 58	46801:001:0042	3	5,29	SR	KU	5.02.2015	23.02.2015	
2	Misso metuskond 9	46801:001:0630	7	1,78	HR	MA	7.01.2015	16.02.2015
	Misso metuskond 9	46801:001:0630	10	0,56	HR	MA	7.01.2015	16.02.2015
	Misso metuskond 9	46801:001:0630	11	1,05	HR	MA	7.01.2015	16.02.2015
	Misso metuskond 9	46801:001:0630	12	0,52	HR	MA	7.01.2015	16.02.2015
	Misso metuskond 9	46801:001:0630	25	2,91	HR	MA	5.01.2015	16.02.2015
	Misso metuskond 9	46801:001:0630	18	0,37	LR	KS	2.02.2015	26.03.2015
	Misso metuskond 9	46801:001:0630	19	0,44	LR	KS	2.02.2015	26.03.2015
	Misso metuskond 9	46801:001:0630	20	0,53	LR	KS	2.02.2015	26.03.2015
	Misso metuskond 9	46801:001:0630	16	1,74	LR	KS	26.01.2015	19.02.2015
	Misso metuskond 9	46801:001:0630	17	2,63	LR	KS	26.01.2015	19.02.2015
Misso metuskond 9	46801:001:0630	5	0,56	LR	MA	28.01.2015	19.02.2015	
3	Antsla metuskond 27	49301:001:0170	23	0,54	HR	MA	5.02.2015	4.03.2015
	Antsla metuskond 27	49301:001:0170	24	0,73	HR	KS	5.02.2015	4.03.2015
	Antsla metuskond 27	49301:001:0170	25	0,36	HR	MA	5.02.2015	4.03.2015
	Antsla metuskond 27	49301:001:0170	9	2,48	HR	MA	5.02.2015	4.03.2015
4	Mõniste metuskond 1	49301:003:0570	12	1,31	HR	MA	13.01.2015	9.03.2015
	Mõniste metuskond 1	49301:003:0570	14	0,39	HR	MA	13.01.2015	9.03.2015
	Mõniste metuskond 1	49301:003:0570	15	2,38	HR	MA	13.01.2015	9.03.2015
	Mõniste metuskond 1	49301:003:0570	8	0,61	HR	MA	18.01.2015	17.02.2015
	Mõniste metuskond 1	49301:003:0570	10	1,1	HR	MA	18.01.2015	17.02.2015
	Mõniste metuskond 1	49301:003:0570	13	0,45	HR	MA	13.01.2015	17.02.2015
	Mõniste metuskond 1	49301:003:0570	17	0,65	HR	KU	26.01.2015	9.03.2015
	Mõniste metuskond 1	49301:003:0570	18	4,31	HR	KU	26.01.2015	9.03.2015
	Mõniste metuskond 1	49301:003:0570	1	1,04	HR	KS	20.01.2015	9.03.2015
	Mõniste metuskond 1	49301:003:0570	12	5,33	HR	KU	20.01.2015	9.03.2015
Mõniste metuskond 1	49301:003:0570	4	2,71	HR	KS	30.01.2015	9.03.2015	
5	Mõniste metuskond 17	49301:004:0086	29	0,89	HR	KU	4.02.2015	9.03.2015
	Mõniste metuskond 17	49301:004:0086	30	0,51	HR	KU	4.02.2015	9.03.2015
6	Orava metuskond 6	54701:002:1046	4	1,62	HR	KS	6.02.2015	12.03.2015
	Orava metuskond 6	54701:002:1046	18	1,82	HR	KU	6.02.2015	12.03.2015
7	Kiidjärve metuskond nr 6	87201:002:0455	1	0,83	HR	KS	11.12.2014	11.02.2015
	Kiidjärve metuskond nr 6	87201:002:0455	8	1,06	HR	KU	10.12.2014	11.02.2015
	Kiidjärve metuskond nr 6	87201:002:0455	4	1	HR	KS	30.11.2014	11.02.2015
	Kiidjärve metuskond nr 6	87201:002:0455	5	1,05	HR	KS	30.11.2014	11.02.2015
	Kiidjärve metuskond nr 6	87201:002:0455	6	1,24	HR	KS	30.11.2014	11.02.2015
8	Kiidjärve metuskond nr 44	87201:002:0497	1	6,44	HR	HB	11.11.2014	11.02.2015
	Kiidjärve metuskond nr 44	87201:002:0497	4	3,55	HR	HB	11.11.2014	11.02.2015
9	Räpina metuskond 32	70703:004:0647	11	4,26	SR	MA	17.02.2015	10.03.2015
10	Sõmerpalu metuskond 7	84301:002:0640	8	3,49	LR	MA	5.02.2015	2.03.2015
	Sõmerpalu metuskond 7	84301:002:0640	17	0,83	LR	MA	5.02.2015	2.03.2015
	Sõmerpalu metuskond 7	84301:002:0640	3	0,37	LR	MA	5.02.2015	13.02.2015
11	Rõuge metuskond 17	69701:002:0086	1	2,96	LR	KU	15.01.2015	11.02.2015
	Rõuge metuskond 17	69701:002:0086	5	0,14	LR	KU	15.01.2015	11.02.2015
12	Antsla metuskond 98	14303:001:0117	20	2,58	LR	KS	22.01.2015	7.03.2015

13	Roosa metskond 12	18102:001:1130	12	1,98	LR	KU	12.01.2015	11.02.2015
14	Erastvere metskond 54	28502:004:0646	8	0,86	LR	MA	15.01.2015	2.03.2015
15	Kiidjärve metskond 98	47301:001:1068	1	3,27	LR	KU	25.12.2014	14.02.2015
16	Meelva maastikukaitseala 2	47301:001:1082	3	4,17	LR	MA	10.12.2014	12.02.2015
17	Räpina metskond 31	70703:004:0634	21	4,23	SR	KU	26.12.2014	14.02.2015
	Räpina metskond 31	70703:004:0634	5	0,17	LR	KU	26.01.2015	14.02.2015
	Räpina metskond 31	70703:004:0634	6	0,27	LR	KU	26.01.2015	14.02.2015
18	Aedu	46001:001:0802	1	3,6	LR	MA	12.12.2014	17.12.2014
19	Kooli	86501:001:0032	2	1,94	LR	KS	20.01.2015	22.01.2015
	Kooli	86501:001:0032	3	1,35	LR	KS	20.01.2015	22.01.2015
	Kooli	86501:001:0032	4	0,34	LR	LV	20.01.2015	22.01.2015
20	Kriivanurme	87901:004:0133	1	0,21	LR	KU	3.12.2014	5.12.2014
	Kriivanurme	87901:004:0133	5	1,06	LR	KU	3.12.2014	5.12.2014
21	Metsa-Sormuli	18102:001:0112	1	1,3	LR	KU	14.01.2015	15.01.2015
22	Püttsepa XXIVB	47302:001:0492	2	0,7	LR	KU	26.11.2014	28.11.2014
	Püttsepa XXIVB	47302:001:0492	3	0,5	LR	MA	26.11.2014	28.11.2014
	Püttsepa XXIVB	47302:001:0492	4	0,8	LR	MA	26.11.2014	28.11.2014
23	Toomemäe	49301:004:0018	2	1,9	LR	MA	2.02.2015	3.02.2015
24	Mustikaoru	18101:001:0229	1	1,79	HR	KU	21.12.2014	27.12.2014
	Mustikaoru	18101:001:0229	3	1,42	VE	LV	21.12.2014	27.12.2014
	Mustikaoru	18101:001:0229	6	0,22	VE	KU	21.12.2014	27.12.2014
	Mustikaoru	18101:001:0229	7	0,79	HL	KU	21.12.2014	27.12.2014
	Mustikaoru	18101:001:0229	8	0,43	AR	MA	21.12.2014	27.12.2014
25	Kergatsi	18101:001:1253	2	0,2	AR	KS	21.12.2014	27.12.2014
	Kergatsi	18101:001:1253	3	1,9	HL	KU	21.12.2014	27.12.2014
	Kergatsi	18101:001:1253	5	0,6	HL	KU	21.12.2014	27.12.2014
	Kergatsi	18101:001:1253	6	0,3	VE	KU	21.12.2014	27.12.2014

Võrdlemaks metsas toimunud muutusi on valitud referentsandmeteks uurimisasal paiknevate raiealade 1, 6 ja 14 üheksa eraldist, kus kogu uuritava perioodi vältel autorile teadaolevalt raiegevust ei toimunud. Mets püsis nendes üheksas eraldistes muutumatuna (tabel 2).

Tabel 2. Uurimisasal paiknevate raiegevuseta alade täpsem ülevaade.

Ala nr	Katastriüksuse nimetus	Katastrinumber	Eraldise nr	Pindala (ha)	Enamuspuuliik
1	Misso metskond 58	46801:001:0042	8	1,3	KU
	Misso metskond 58	46801:001:0042	16	1,4	KU
	Misso metskond 58	46801:001:0042	25	1,7	KU
6	Orava metskond 6	54701:002:1046	18	1,1	MA
	Orava metskond 6	54701:002:1046	19	1,1	MA
	Orava metskond 6	54701:002:1046	33	2,8	MA
14	Erastvere metskond 54	28502:004:0646	15	2,1	MA
	Erastvere metskond 54	28502:004:0646	16	3	MA
	Erastvere metskond 54	28502:004:0646	17	5,2	MA

Töö autor käis 11. veebruaril 2015 üle vaatamas antud uurimisaslasse kuuluvat viite katastriüksust, raiealaid 19, 21, 22, 24 ja 25. Välitööde eesmärgiks oli vaadelda, millisena paistab looduses lumega kaetud raiutud lank ning GPS-möödistusega kontrollida, kas tegelik raie ühtib metsaeraldiste piiridega (joonis 7). Selgus, et raiealad ühtivad metsaeraldiste kontuuridega, mistõttu võib neid aluseks pidada raie piiritlemiseks.



Joonis 7. Välitööd. 1 - Püttsepa XXIVB katastriüksuse lageraie ala 11.02.2015. Foto: Mirjam Põhjala, 2 - Püttsepa XXIVB eraldiste piiride kattumine GPS-mõõdistusel saadud raialaga (Maa-ameti ortofoto 3.06.2011).

2.2 Andmete kirjeldus

Radarsatelliidi Sentinel-1A pildid on tasuta allalaetavad ESA andmejaotuskeskuses SchiHub. Käesolevas töös on kasutatud 13 erinevat radaripilti, mis on kogutud perioodil november 2014 kuni aprill 2015. Andmete töötlemisel kasutatud kujutised on kõik ülesvõetud Eesti aja järgi kell 6:25. SAR vaatab lennusuuna suhtes küljele ning kõigi kasutatud piltide lennusuund on laskuv (*descending*) (SchiHub 2015). Töös on uuritud VH polarisatsiooniga pilte, tuginedes teadmisele, et risti polarisatsiooniga tagasipeegeldunud intensiivsus näitab metsade korral suuremat dünaamilist ulatust (Watanabe *et al* 2006).

Ilmastikuolude analüüsimiseks uurimisalal on kasutatud Riigi Ilmateenistuse kolme jaama vaatlusandmed, mis asuvad Võru ning Põlva maakonnas. Ilmaandmed on kogutud Võru meteoroloogiajaamast (MJ), Piigaste hüdroomeetriaamast (HJ) ning Tuulemäe sademete mõõtejaamast (SMJ). Ilmajaamade valikul lähtuti sellest, et olemas oleks nii temperatuuri, sademete kui ka lumikatte paksuse info (Riigi Ilmateenistus 2015).

Temperatuur on arvestatud kolme jaama keskmisena kell 7.00, mis kajastab ilmastikuolusid radarsatelliidi ülelennu ajal antud uurimiseala piirides (tabel 3). Seitse Sentinel-1A kujutist, mida analüüsiks on kasutatud, on saadud alla nullkraadise temperatuuriga ning ülejäänud kuus pilti on ülesvõetud plusskraadidega. Keskmine sademete hulk on arvestatud kolme jaama

viimase 12 tunni sademete summa keskmisena ning lumikatte paksus sarnaselt kõigi vaatluse all olevate jaamade keskmisena antud kuupäevadel. Novembrist kuni märtsini esinesid uurimisalal valdavalt miinuskraadid ning lumikate, seega nimetatakse käesolevas töös seda aega edaspidi talveperioodiks ning aprilli vastavalt suveperioodiks.

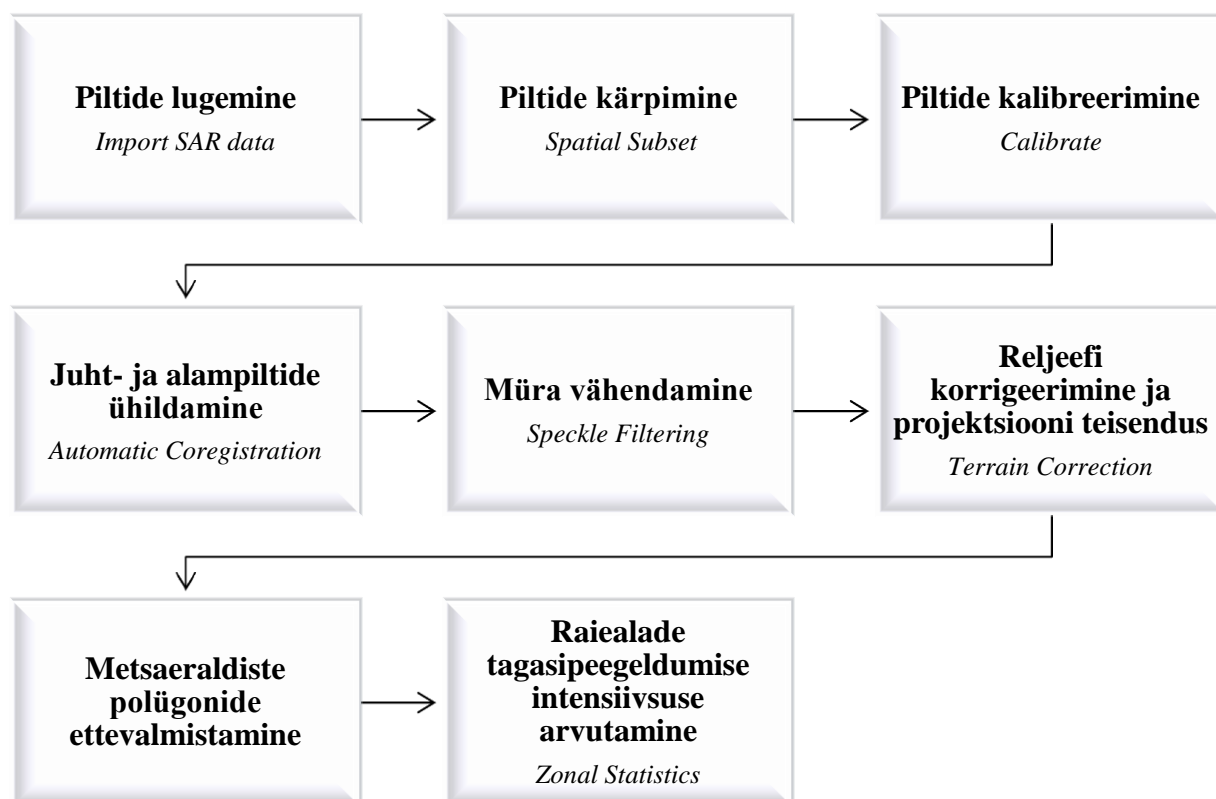
Uuritava perioodi kohta on raiete info saadud Riigimetsa Majandamise Keskuselt (RMK) ning ettevõttelt A&P Mets AS. Kinnistute katastrinumbri alusel on raiete andmed seotud Keskkonnaagentuuri metsaregistri eralduste piirjoontega (KAUR 2015). Uurimisala piiritlemiseks on kasutatud haldusjaotuse ruumiandmeid Maa-ametist seisuga 01.05.2015.

Tabel 3. Ilmastikuolud uurimisalal Sentinel-1A piltide ülelennu aegadel.

S-1A pildi kuupäev	Temperatuur	Sademed	Lumikatte paksus
11.11.2014	7,6 °C	0,1 mm	0 cm
23.11.2014	-0,3 °C	0 mm	2 cm
5.12.2014	0,4 °C	0 mm	0,7 cm
17.12.2014	3,0 °C	0,2 mm	0 cm
29.12.2014	-10,6 °C	0,1 mm	11,7 cm
10.01.2015	-1,6 °C	0,2 mm	14,7 cm
22.01.2015	-6,5 °C	0,7 mm	10,7 cm
15.02.2015	-4,8 °C	0,1 mm	15,3 cm
27.02.2015	-0,4 °C	0 mm	6,7 cm
11.03.2015	2,7 °C	0 mm	0,7 cm
23.03.2015	-0,6 °C	0 mm	0 cm
16.04.2015	0,4 °C	8,1 mm	0 cm
28.04.2015	12,3 °C	0 mm	0 cm

2.3 Metoodika

Käesoleva töö andmete ettevalmistamiseks ning töötlemiseks on kasutatud ESA vabavaralist tarkvara Sentinel-1 Toolbox (S1TBX) ning ArcGIS 10.2. Töötlusahela etapid on toodud joonisel 8.



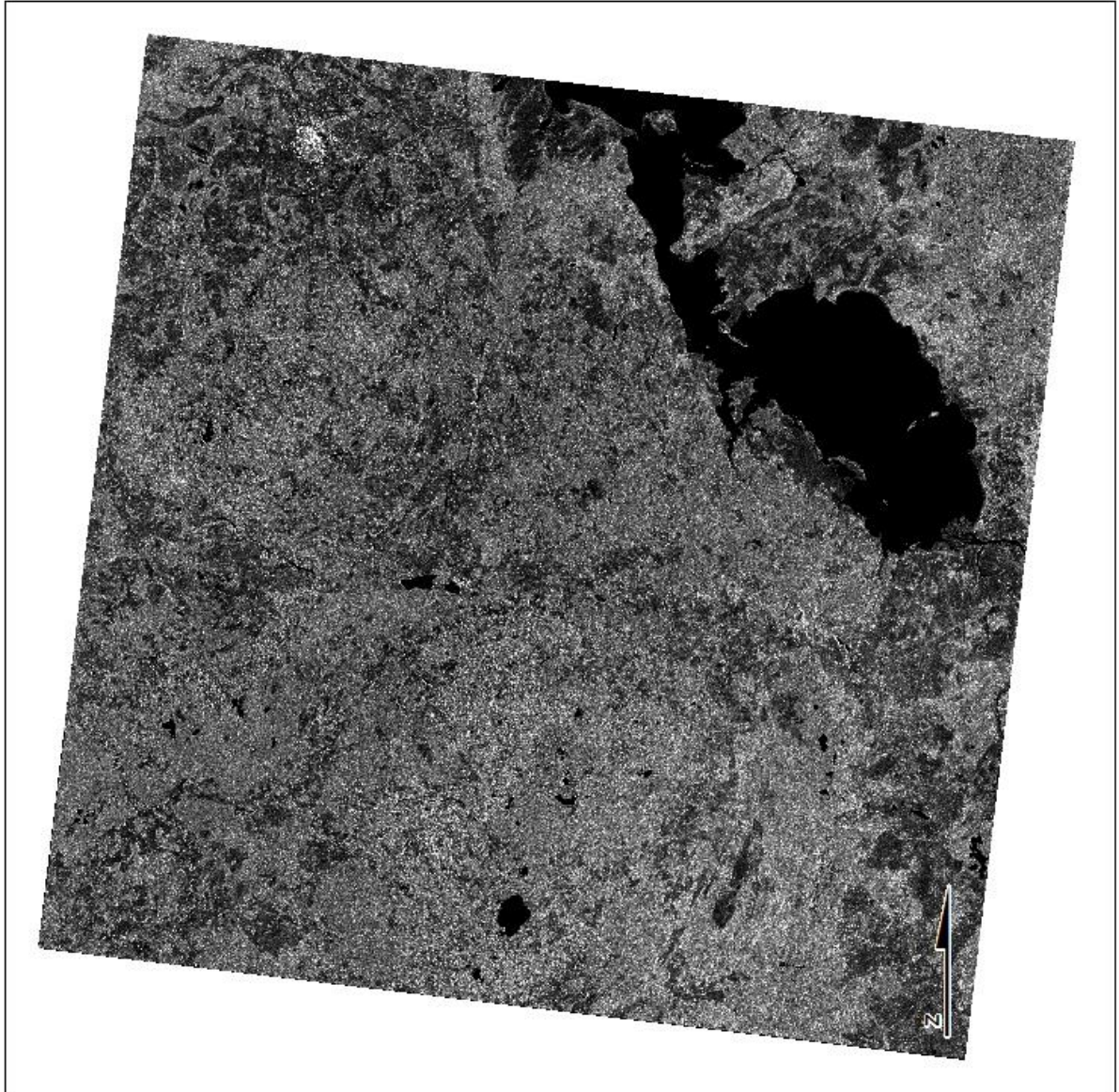
Joonis 8. Tarkvaraga Sentinel-1 Toolbox ja ArcGIS 10.2 teostatud andmetöötluse sammude plokkskeem.

2.3.1 Piltide lugemine

S1TBX tarkvara toetab kõiki ESA SARi missioonide andmeid: Sentinel-1A, ERS-1, ERS-2 ning Envisat. Lisaks on võimalik importida ja töödelda ALOS, TerraSAR-X, COSMOSkyMed, RADARSAT-1 ning RADARSAT-2 tehisava-radarite pilte. Sentinel-1A andmed on allalaetavad *.safe* - failivormingus, mida antud programm loeb.

2.3.2 Piltide kärpimine

Sentinel-1A ühe pildi suuruseks on 1,64 GB, seetõttu on andmetöötluse kiirendamiseks soovitatav täiskaadrist eelnevalt täpsem huviala välja lõigata. Piltide töötusaeg väheneb kärpimisel praktiliselt võrdeliselt väljalõigatud pildiosa pindalaga. Antud töös kasutatud pildid on kõik kärbitud samadesse mõõtmetesse, nii asimuudi kui ka ulatuse suunas on pildi füüsilisteks mõõtmeteks 123 km (joonis 9).



Joonis 9. 11.november 2014 ülelennul tehtud Sentinel-1A pildi väljalõige.

2.3.3 Piltide kalibreerimine

Tehisava-radari pildi kalibreerimise eesmärk on tagada kujutis, kus piksliväärtus oleks otseselt seotud radarisse tagasipeegeldunud intensiivsuse väärtusega ning sarnase parameetritega erinevate radarite andmed oleks omavahel üksühele võrreldavad. Tavapärane SARi algprodukt (*Level-1 GRD*) ei sisalda radiomeetrilisi parandusi ja olulised kõrvalekalded jäävad alles (ESA 2013). Seega on vajalik pilt eelnevalt kalibreerida, et selle piksliväärtus esindaks tõelist tagasihajuvust uuritavalt alalt.

Kalibreerimine annab SARi piltidele väärtused, millega on lubatud erinevate piltide võrdlemine, kalibreerimata pilt on piisav ainult kvalitatiivseks kasutamiseks. Kui on tarvis võrrelda erineval ajahetkel ülesvõetud tehisava-radarite andmeid, tuleb algprodukt eelnevalt kalibreerida. Samamoodi on kalibreerimine eelduseks erinevate sensorite ning töörežiimidel töötavate SARi andmete võrdlemiseks (S1TBX Help 2015). Sellega minimeeritakse variatsioonid, mis võivad tekkida tehniliselt andmete kogumisel. Näiteks tarkvara muutused ja uuendused, süsteemi korrigeerimine, radari või protsessori muudatused konfiguratsioonis jne (Henderson, Lewis 2013).

Algse pildi digitaalne piksliväärtus on vahemikus 0 (must) kuni 255 (valge). S1TBXi *Radiometric Calibrate* tööriist võimaldab need piksliväärtused ümber arvestada beeta-null (β_0), sigma-null (σ_0) või gamma (γ) tagasipeegeldumise intensiivsuse väärtusteks. Tõeline tagasipeegeldumine ehk σ_0 koefitsient on signaali tagasipeegeldumise intensiivsus ruumiühiku kohta (1 m^2). β_0 on omakorda heleduse hinnang tagasipeegeldusest, mis on piksli tugevus lähtuvalt radari vaatlusest ja sätestatud tingimustest. Gamma erineb sigma-nullist ainult normaliseerimise viisi poolest ning γ tulempiltide väärtused on rohkem konstantsemad ja ei too seetõttu maapinna erinevusi nii hästi välja (S1TBX Help 2015).

Kalibreerimise väärtused arvutatakse kui jagatakse digitaalse piksliteväärtuse ruut absoluutse kalibreerimise konstantiga. Konstant saadakse transponderi, ehk sidesatelliidi seadme, mis edastab signaale ühelt jaamalt teisele, täppismõõtmisel (S1TBX Help 2015). Käesolevas töös on kõik pildid kalibreeritud σ_0 väärtustesse, et hinnata tagasipeegeldumise tugevuse erinevust ja selle abil hinnata metsades toimunud muutusi (Watanabe *et al* 2006).

2.3.4 Juht- ja alampiltide ühildamine

Piltide ühildamisega registreeritakse üksikud analüüsiks kasutatavad pildid kokku ühte kuhja (*stack*) pikslisise täpsusega. Määrata tuleb juhtpilt (*master*) ning selle külge omistatakse alampildid (*slave*). S1TBXi *Coregistration* tööriista abil leitakse piltide ühendamiseks kontrollpunktid (*GCPs*) automaatselt. Kõigil kuhja ühendatud piltidel peab olema ühisosa, kuid täielik kattuvus ei ole nõutud (S1TBX Help 2015).

Pildid võivad olla ülesvõetud erineval ajahetkel või erineval töörežiimil, kuid eelnev kalibreerimine peab olema tehtud ühtemoodi (S1TBX Help 2015). Antud töös on juhtpildiks valitud kõige uuem ehk 28. aprillil 2015 tehtud Sentinel-1A radarpilt ja sellele on külge ühildatud ülejäänud töötluseks kasutatud 12 pilti. Piltide ühildamisega kõrvaldatakse võimalikud tekkinud variatsioonid ning parandatakse muutuste tuvastamist kuhjas olevate piltide vahel.

2.3.5 Müra vähendamine

Must-valgetele SARi kujutistele on omane teraline müra ehk täpikesed (speckles). Täpid teevad pildi tõlgendamise raskemaks ning langetavad pildi kvaliteeti ja tagasipeegeldunud signaali tugevust. Ühe piksli sees on mitu erinevas faasis punktpeegeldajat, mille tõttu toimub juhuslikult konstruktiivne või destruktiivne interferents (S1TBX Help 2015). Piltidel olevat müra on võimalik maha suruda ruumilise keskmistamisega. S1TBXi *Speckle Filtering* tööriista abil vähendatakse müra, et pilt näeks selgem välja ning tagasipeegeldunud signaal oleks homogeensetel loodusaladel ühtlasem.

2.3.6 Reljeefi korrigeerimine

SAR vaatab lennusuuna suhtes küljele ja seetõttu tuleb arvestada külgsuunalisest pildigeomeetriast tekkivate varjude ja moonutustega künklikumatel aladel. S1TBXi *Terrain Correction* tööriista abil eemaldatakse moonutused läbi maapinna koordinaatide sidumise ja geomeetrilise korrigeerimise. Tekitatud ortorektifitseeritud pildile tuleb määrata koordinaatsüsteem, käesolevas töös on valitud Eesti põhiline riiklik ristkoordinaatsüsteem L-EST97.

Tuletamiseks täpseid geograafilisi asukohaandmeid kasutatakse SARi pildi metaandmetes olevat infot, mis seotakse digitaalse kõrgusmudeliga (DEM-mudel). Radari metaandmetes loetakse välja orbiibi trajektoor, mille järgi määratakse radari täpne asukoht kindlal ajahetkel orbiidil. Lisaks kasutatakse ära radari andmete aegrida (esimese peegelduse aeg, järgmise peegelduse aeg jne) ning langemisnurk maapinnale (S1TBX Help 2015). Antud töös on

Sentinel-1A pildid seotud kõrgusmudeliga SRTM 3 second DEM, mille andmed on tarkvaras juba olemas ning mis on pakutavatest kõrgusmudelitest parima ruumilise lahtusega.

2.3.7 Metsaeraldiste polügonide ettevalmistamine

Keskkonnaagentuuri kodulehelt on metsaregistri eralduste piirjooned allalaetavad maakondade kaupa. Tarkvara ArcGIS 10.2 abil on uurimisalast lähtuvalt Põlva ja Võru maakondade eraldiste kihtidest välja selekteeritud kõigi 25 raieala katastriüksuste 87 eraldise piirjooned ning nendest on tekitatud uued kihid edasiseks analüüsiks.

2.3.8 Raiealade tagasipeegeldumise intensiivsuse arvutamine

Töödeldud Sentinel-1A pildid on edasi konverteeritud *.tiff* failivormingusse ning imporditud tarkvarasse ArcGIS. Tööriista *Zonal Statistics* abil on arvatud kõikidel 13 pildil eraldi vaatluse all oleva 87 metsaeraldiste keskmine tagasipeegeldumise intensiivsus ruumiühiku kohta (σ_0).

Antud väärtused on teisendatud kümnendlogaritmilisse mõõtühikusse ehk detsibellidesse. See annab võimaluse väga suurt ja väga väikest signaalitasemete suhet kergesti ja arusaadavalt kirjeldada, kasutamata tülikaid pikki arve. Detsibell näitab kahe füüsikalise suuruse suhet, antud juhul tagasipeegeldunud elektromagnetlainete võimsuse suhet võrreldes isotroopselt hajunud laine võimsuse suhtega.

3. Tulemused

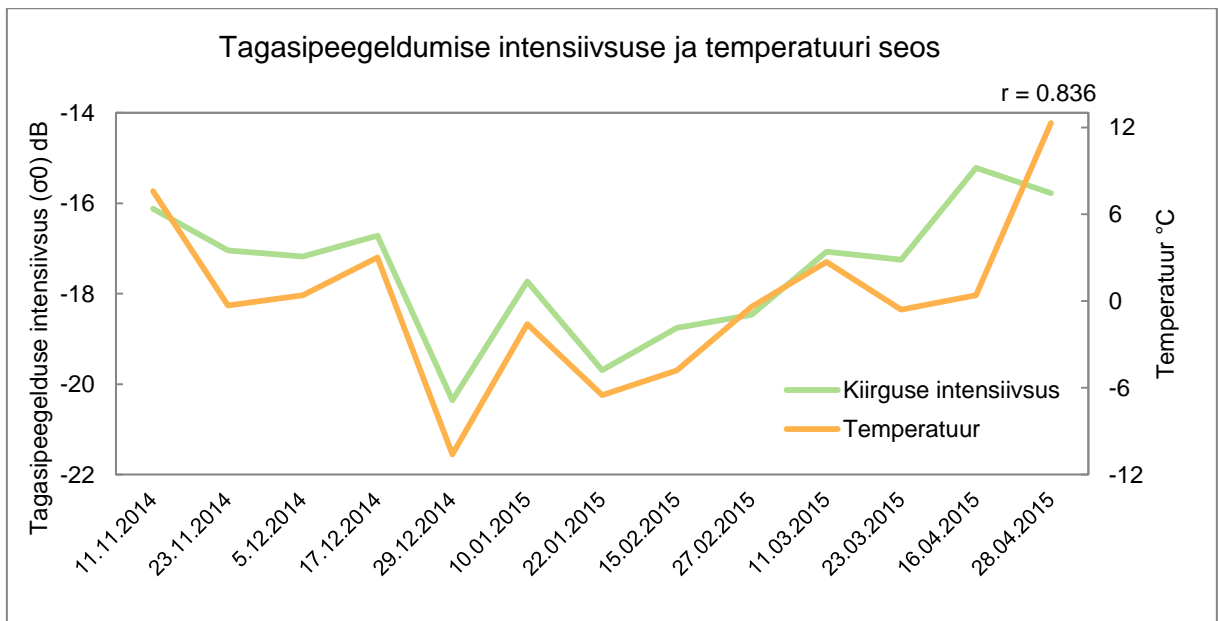
3.1 Ilmastikuolude mõju

Analüüsiks kasutatud 13 erineva Sentinel-1A pildi keskmises tagasipeegeldumise intensiivsuses (σ_0) kogu uurimisalal on märgata küllaltki suuri kõikumisi (tabel 4). Kõige vähem (-20,356 dB) peegeldus radarisse kiirgust tagasi 29.12.2014 ülelennatud pildil ning tugevaim (-15,214 dB) oli intensiivsus 16.04.2015 ülesvõetud kujutisel.

Tabel 4. Sentinel-1A pildi keskmine tagasipeegeldumise intensiivsus Võru- ja Põlvamaal.

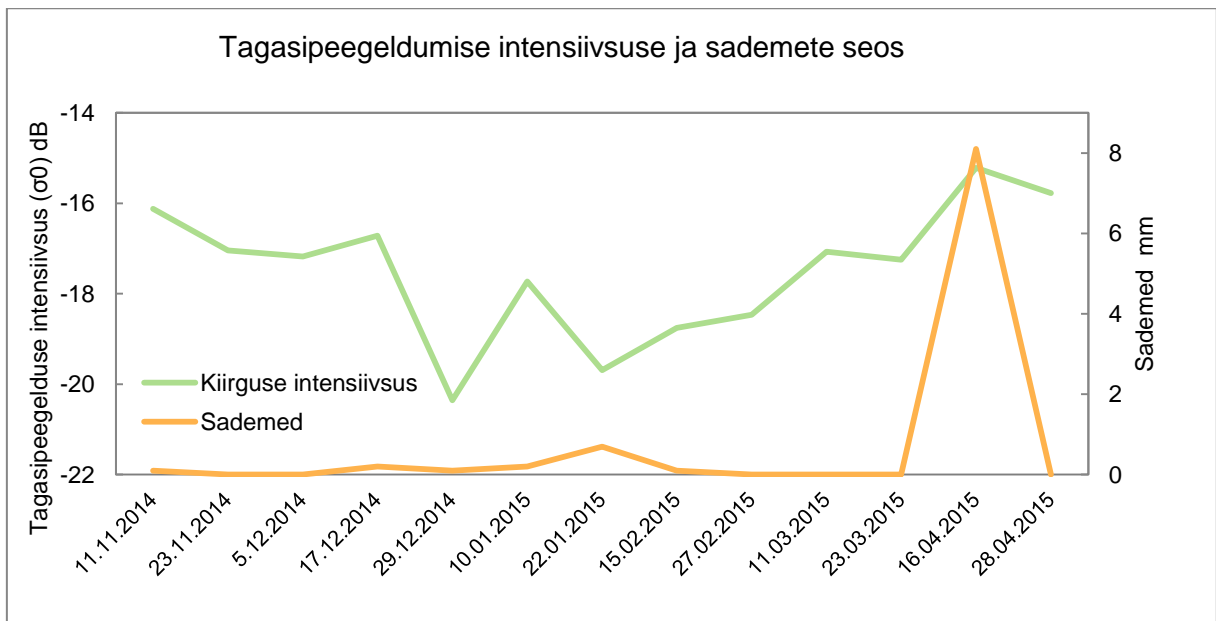
S-1A pildi kuupäev	Uurimisala keskmine σ_0
11.11.2014	-16,123 dB
23.11.2014	-17,044 dB
5.12.2014	-17,177 dB
17.12.2014	-16,713 dB
29.12.2014	-20,356 dB
10.01.2015	-17,726 dB
22.01.2015	-19,686 dB
15.02.2015	-18,751 dB
27.02.2015	-18,466 dB
11.03.2015	-17,070 dB
23.03.2015	-17,246 dB
16.04.2015	-15,214 dB
28.04.2015	-15,776 dB

Keskkonnatingimuste võrdlemisel uurimisala keskmise intensiivsusega selgus, et vaadeldaval perioodil omab temperatuur kõige suuremat mõju radarisse tagasi peegeldunud kiirguse tugevusele. Õhutemperatuuri alanedes langeb ka σ_0 väärtus (joonis 10). Vaatluse all oleva 13 S-1A kujutise temperatuuri ja kiirguse intensiivsuse vahel on tugev seos, lineaarne korrelatsioonikordaja $r= 0,836$. Samas näitab joonis 10 selgelt, et alla nullkraadistes ilmastikutingimustes on seos tugevam kui plusskraadidel, seega võib järeldada, et talvistes oludes on radaripildi σ_0 väärtus tugevalt sõltuvuses uuritava ala õhutemperatuurist. Kui vaadelda ainult talveperioodi pilte ehk jätta analüüsist välja aprillis ülelennatud pildid, siis temperatuuri ning tagasipeegeldunud kiirguse intensiivsuse lineaarne korrelatsiooni kordaja tõuseb 0,944-ni.



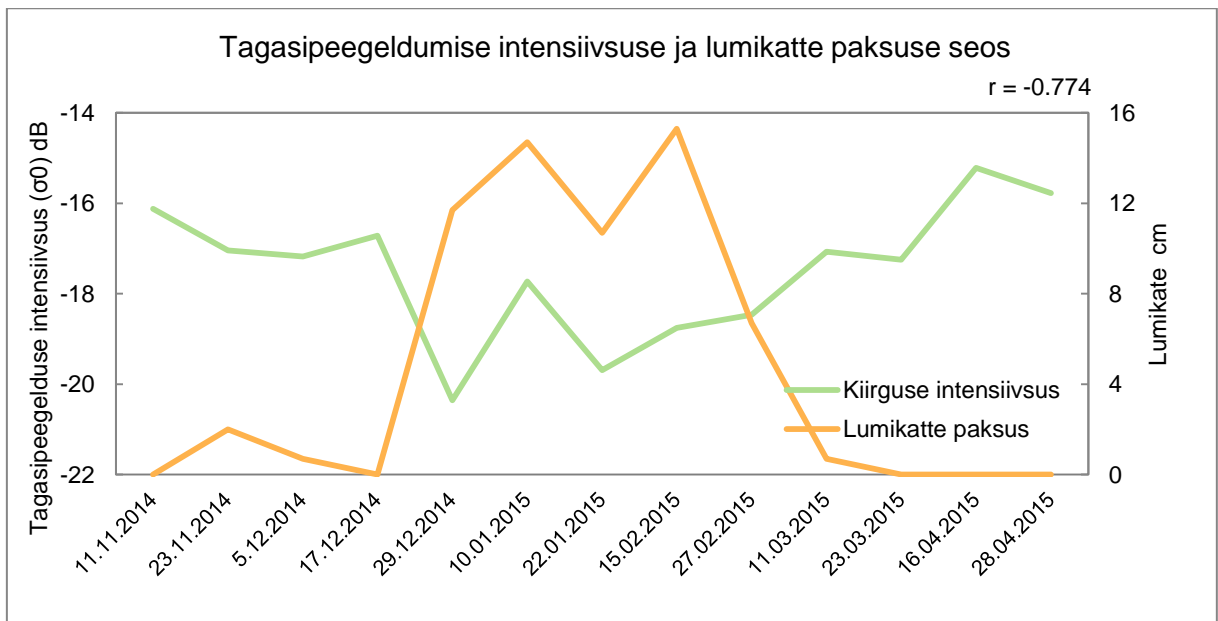
Joonis 10. S-1A ülelennu piltide keskmise tagasipeegeldumise intensiivsuse (σ_0) seos õhutemperatuuriga uurimisalal.

Seitsmel korral esines Sentinel-1A andmete kogumise ajal sademeid, seega kuus ülesvõtet on sademetevabad (joonis 11). Miinuskraadidel oli sademeid neljal korral, täpsemalt 29. detsembri 2014 kuni 15. veebruari perioodi piltidel (tabel 3). Selles vahemikus ülesvõetud kujutiste ajal sadas lund, 11.11.2014 pildi ajal vihma ning 16.04.2015 vihma ja lörtsi segu. Jooniselt 11 tagasipeegeldumise tugevuse ning sademete vahel seost välja ei tule. Pigem on aprillikuu piltide abil näha, et sademed hakkavad σ_0 väärtust rohkem mõjutama suvisel ajal kui maapinnal enam lumikatet ei ole. Kahe kujutise keskmise tagasipeegeldumise intensiivsuse võrdlus osutab, et sademete esinemise ajal on ka tagasipeegeldunud kiirgus tugevam (-15,214 dB) kui kuival ja soojemal ajal (-15,776 dB). Seega võib eeldada, et suviste piltide võrdlemisel tekib suurem korrelatsioon sademete ja σ_0 väärtuse vahel kui talvisel ajal.



Joonis 11. S-1A ülelennu piltide keskmise tagasipeegeldumise intensiivsus (σ_0) ja sademed 12 h enne ülesvõtet uurimisalal.

Kaheksa Sentinel-1A ülevõtte ajal esines uuritaval alal lumikate. Üle 10-sentimeetrine lumikate esines neljal kujutisel vahemikus 29.12.2014-15.02.2015. 27. veebruari ülelennu ajal oli lumikatte paksuseks peaaegu 7 cm ja ülejäänud kolme pildi ajal kuni 2 cm (tabel 3). Lumikatte paksuse ning radarisse tagasipeegeldunud kiirguse tugevuse vahel on lineaarne korrelatsioonikordaja $r=-0,774$, mis näitab kahanevat seost. Seega mida paksem on lumikate, seda vähem kiirgust jõuab radarisse tagasi (joonis 12).



Joonis 12. S-1A ülelennu piltide keskmise tagasipeegeldumise intensiivsuse (σ_0) seos lumikatte paksusega uurimisalal.

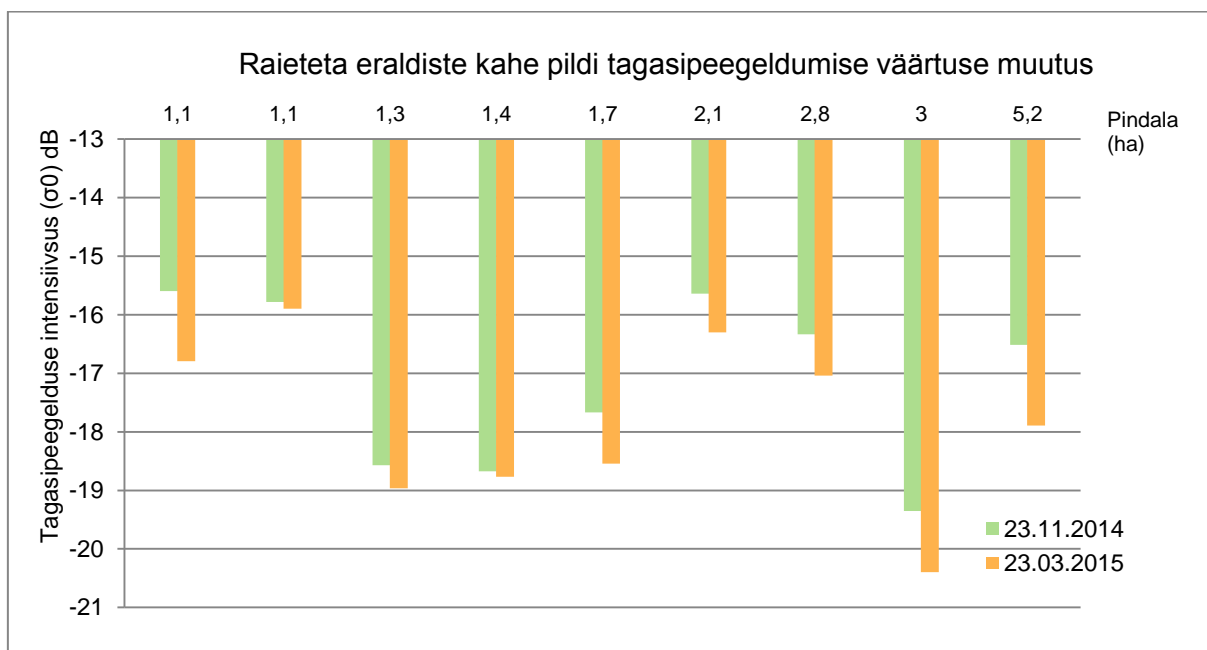
3.2 Raiete tuvastamine

Eelnevas ilmastikuolude ning uurimisalalt radarisse tagasipeegeldunud kiirguse intensiivsuse analüüsis selgus, et talvistel lume ning miinuskraadidega piltidelt on tagasipeegeldumine nõrgem. Aprillis tõusis märgatavalt ülelennatud Sentinel-1A kujutiste σ_0 väärtus, seetõttu on edasisest analüüsist välja jäetud kahe aprillikuu pildilt arvatud eraldiste põhised kiirguse intensiivsuse väärtused ja vaadatud ainult talviseid pilte, vähendamaks keskkonnatingimuste mõju raiete tuvastamisel. Suviste S-1A kujutiste pealt raiete tuvastamiseks tuleks läbi viia uus pikemat piltide aeg-rida kasutatav analüüs. Samuti puuduvad referentsandmed raietest, mis jääksid kahe aprillikuu pildi ülelennu vahele.

Selleks, et leida optimaalsed raietuvastuse parameetrid sõltuvalt raie ulatusest ja tüübist on eraldi välja toodud kahe pildipaari tehisava-radarisse tagasipeegeldunud kiirguse intensiivsuse võrdlus. Võrdluspaariks on valitud 23. novembri 2014 ning 23. märtsi 2015 S-1A kujutised. Mõlemate ülesvõetud piltide ilmastikuolud on sarnased (tabel 3), mis vähendab keskkonnatingimustest tulenevaid tendentse kiirguse tagasipeegeldumises ning parandab võimalusi muutuste tuvastamiseks. Peale selle on uurimisala keskmine tagasipeegeldumine mõlema ülelennu ajal lähedane, erinedes teineteisest 0,2 dB võrra (tabel 4) ning ka kõik uuritavad raied on selle perioodi jooksul teostatud.

Vaatluse all oleva 87 metsaeraldises toimusid raieetööd perioodil 11.11.2014-26.03.2015, kuna viimane talveperioodi S-1A kujutis on tehtud 23.03.2015, siis on edasisest analüüsist kõrvaldatud eraldised, millel on raie lõppkuupäevaks märgitud hilisem aeg. Seega on uuritud täpsemalt 81 metsaeraldist, mille pindala on vahemikus 0,1-6,4 hektarit. Harvendus- ja lageraie eraldisi on kokku 70 ning sel põhjusel on need raieliigid eraldiste pindala põhiselt jagatud gruppidesse: väiksemad kui 0,5 ha; 0,5-1 ha; 1-2 ha; suuremad kui 2 ha.

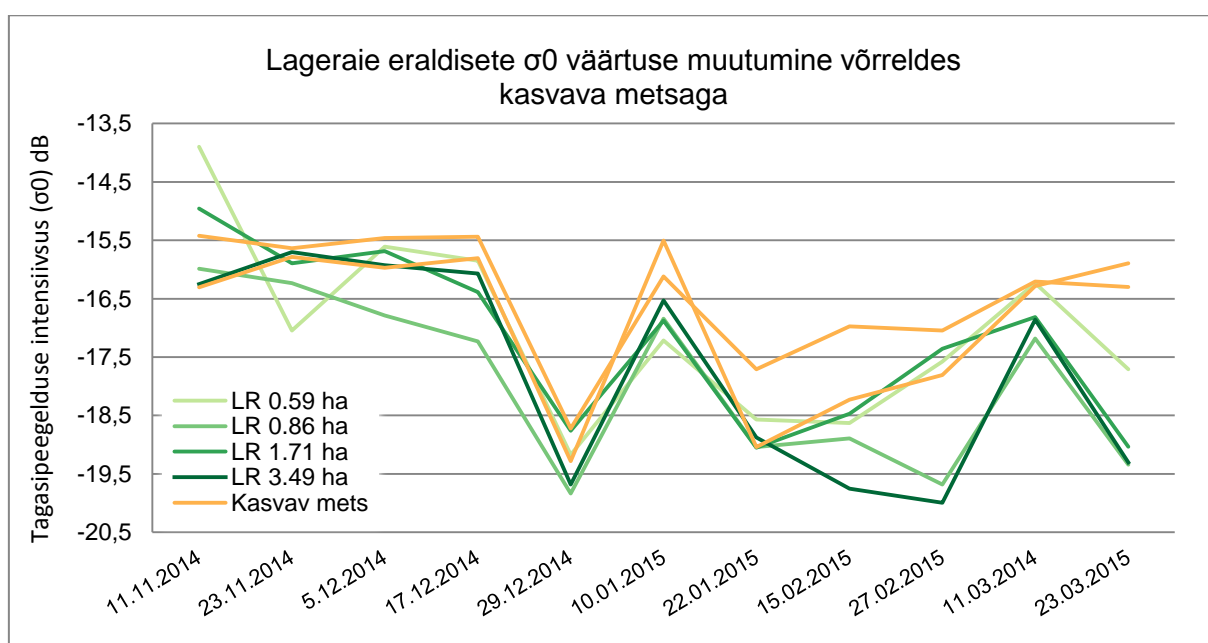
Üheksa metsaeraldist, kus uuritava perioodi vältel raiegevust ei toimunud ning mets püsis kasvavana (tabel 2), on käesolevas töös kasutatud muutuste tuvastamise aluseks. Eelnevalt valitud märtsi ning novembri pildipaari võrdluses selgub, et eraldistes, kus raie sellel perioodil ei tehtud, esineb küll väikseid kõikumisi signaali tugevuses, kuid nad jäävad peamiselt alla ühe detsibelli (joonis 13). Tuginedes sellele ning varasematele uurimistöödele on käesolevas töös võetud C-lainealas toimiva Sentinel-1A signaali tugevuse muutuse usaldusväärseks piiriks lageraie tuvastamisel vähemalt 2 dB langust (Fransson *et al* 2008) ning teiste raieliikide puhul 1,5 dB langust (Eriksson *et al* 2012).



Joonis 13. 23.11.2014 ja 23.03.2015 S1-A pildipaari võrdlus raiegevuseta eraldistes.

3.2.1 Lageraie

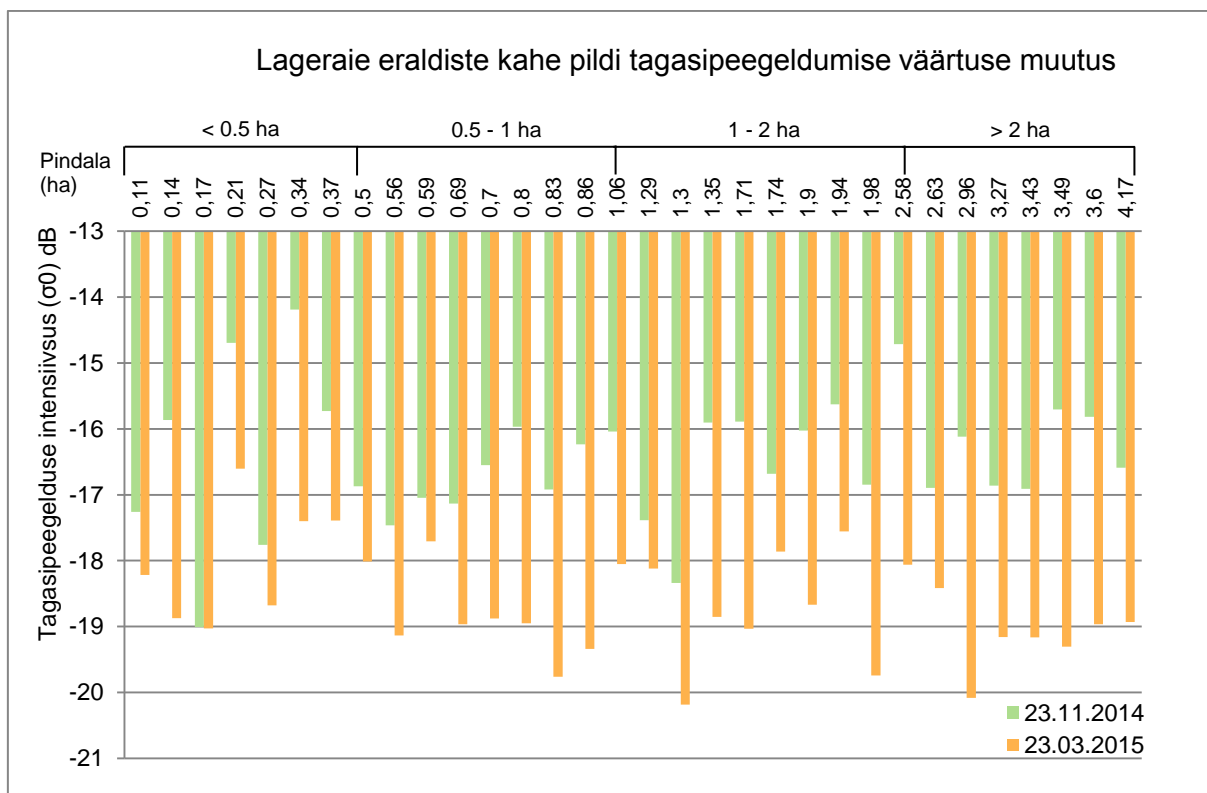
Lageraie eraldiste tagasipeegeldumise koefitsient σ_0 väärtus sõltub kogu vaadeldaval talveperioodil suuresti temperatuurist. Jooniselt 14 on selgelt näha, et eraldiste tagasipeegeldumise intensiivsus langeb 29.12.2014, kui temperatuur oli kõige madalam, samamoodi langeb võrdluseks valitud kahes ilma raieta eraldises. Joonisesse valitud lageraie eraldistes on raied toimunud perioodil 15.01.2015-5.03.2015, mis seletab σ_0 väärtuse 1-3 dB langust sellel perioodil lageraie eraldistes võrreldes kasvava metsaga. Samas on näha, et väiksema pindalaga eraldises on ka muutus väiksem, mistõttu tuleb põhjalikumalt vaadelda kõiki lageraie eraldisi täpsemalt.



Joonis 14. S-1A talveperioodi ülelennu piltide (σ_0) väärtuse muutumine lageraie eraldistes võrreldes kasvava metsaga.

Uuritaval perioodil 23.11.2014-23.03.2015 tehti lageraiet 32 metsaeraldisel, mille pindalad jäävad vahemikku 0,11-4,17 ha. Arvestades kõiki lageraie eraldisi, siis 56% langes radarisse tagasipeegeldunud kiirguse intensiivsus üle 2 dB, seejuures 22% langes kiirgus üle 3 dB (joonis 15). Üsna selge tendents σ_0 väärtuse langemisel üle 2 dB kahe pildi võrdluses tuleb välja 0,7-hektarilisel pindala piiril. Raiealadel, mis olid suuremad kui 0,7 ha (21 tk) langes tagasipeegeldumine 81% juhtudest üle kahe detsibelli. Samas on märgata selget seost pindala ning tagasipeegeldumise intensiivsuse muutumisel, suurematel eraldistel suudab C-lainealas

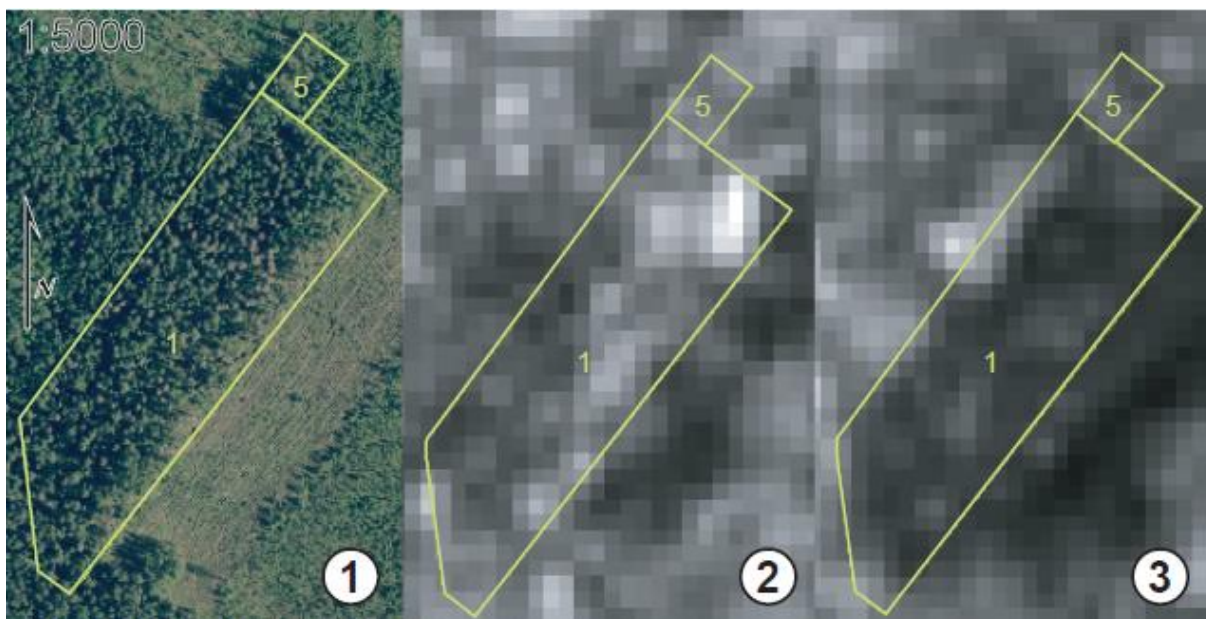
töötav Sentinel-1A paremini lageraiet tuvastada. Nii on vaatluse all olevate üle 2-hektarilistel eraldistel keskmine signaali tugevuse langus pärast raiet 2,8 dB. Eraldised, mille pindala jääb vahemikku 1-2 hektarit on keskmine langus 2,2 dB, vahemikus 0,5-1 hektarit 2,1 dB ning metsaeraldised, mille pindala on alla 0,5 hektari langeb tagasipeegeldumise intensiivsus keskmiselt 1,6 dB.



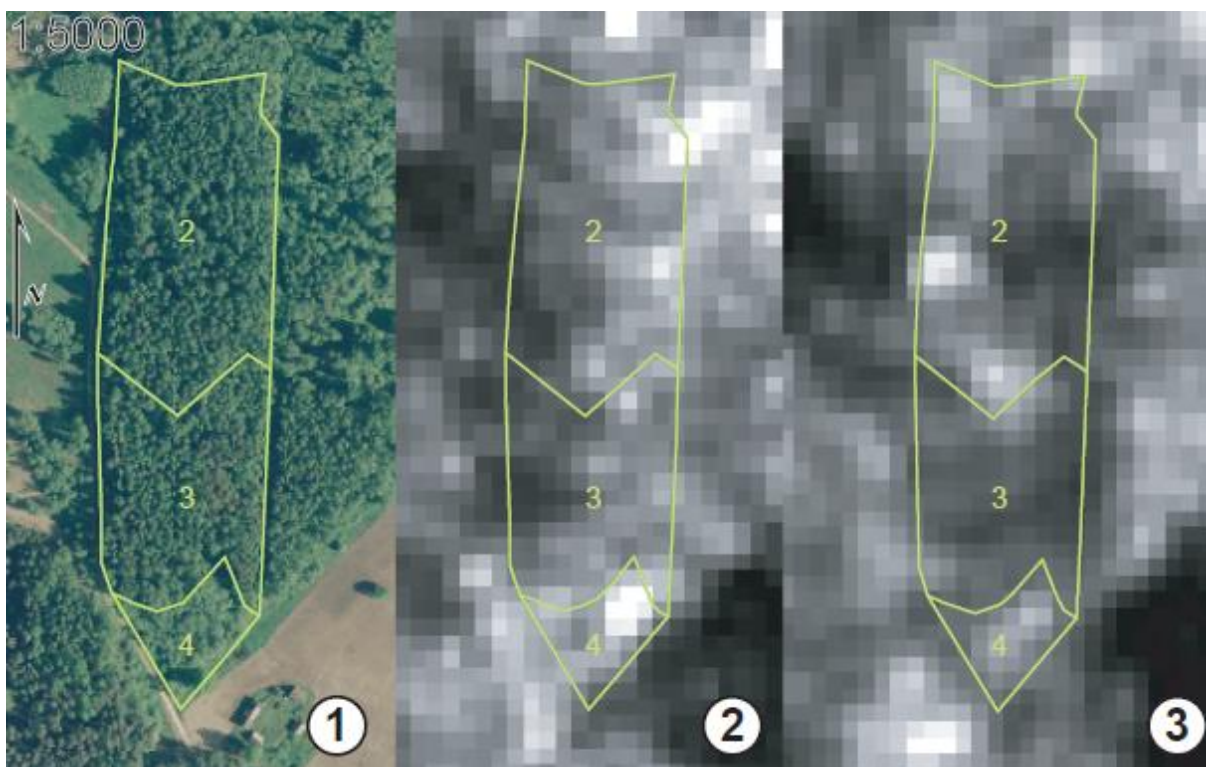
Joonis 15. 23.11.2014 ja 23.03.2015 S1-A pildipaari võrdlus lageraie eraldistes.

Samas langeb ka kahes alla 0,7 ha eraldises pärast raietegevust tagasipeegeldumise väärtus märgatavalt üle kolme detsibelli. Rõuge metskonna 17 kinnistu 0,14 ha eraldises (joonis 16) ning Kooli kinnistu 0,34 ha eraldises (joonis 17). Radaripiltidelt on näha, et lageraie alad paistavad tumedamad kui metsaga kaetud alad. Signaali tugevus väheneb, sest pärast raiet on ala tasasem ning signaal hajub rohkem laiali. Samas kui neid väiksemaid metsaeraldisi lähemalt uurida, siis selgub, et mõlemad väikesed eraldised piirnevad suuremate eraldistega, milles on samamoodi raiet teostatud ning seetõttu mõjutavad ka antud eraldise σ_0 väärtuse langemist. Ühtlasi leidub ka üksikuid 0,7-hektarist suuremaid eraldisi, mille kahe kujutise võrdlusel muutus jääb alla kahe detsibelli. Näiteks Metsa-Sormuli 1,3 hektarilise eraldise

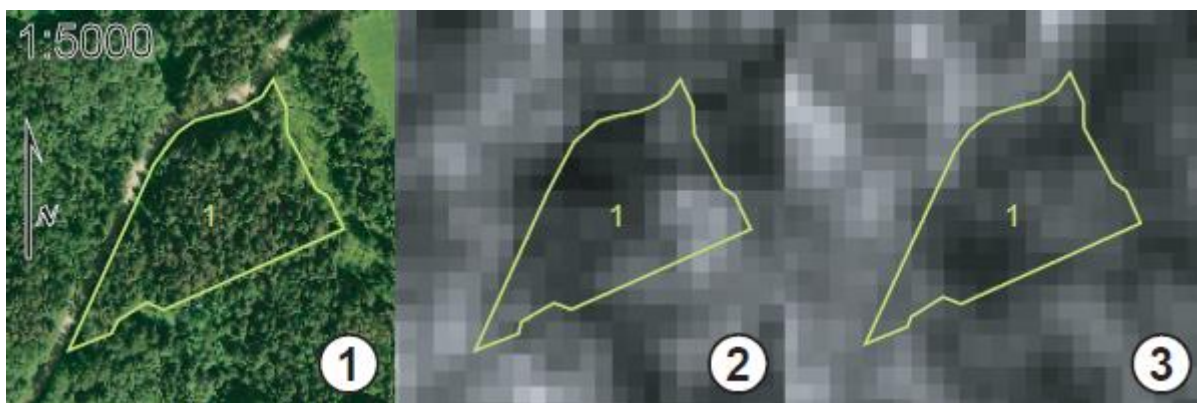
tagasipeegeldumise intensiivsus langeb 23.03.2015 ülesvõetud kujutisel 1,84 dB võrreldes 23.11.2014 kujutisega (joonis 18).



Joonis 16. Rõuge metskonna 17 lageraie eraldised 1 (2,96 ha) ja 5 (0,14 ha). 1 - Maa-ameti ortofoto 22.05.2011. 2 – S-1A kujutis 23.11.2014. 3 – S-1A kujutis 23.03.2015.



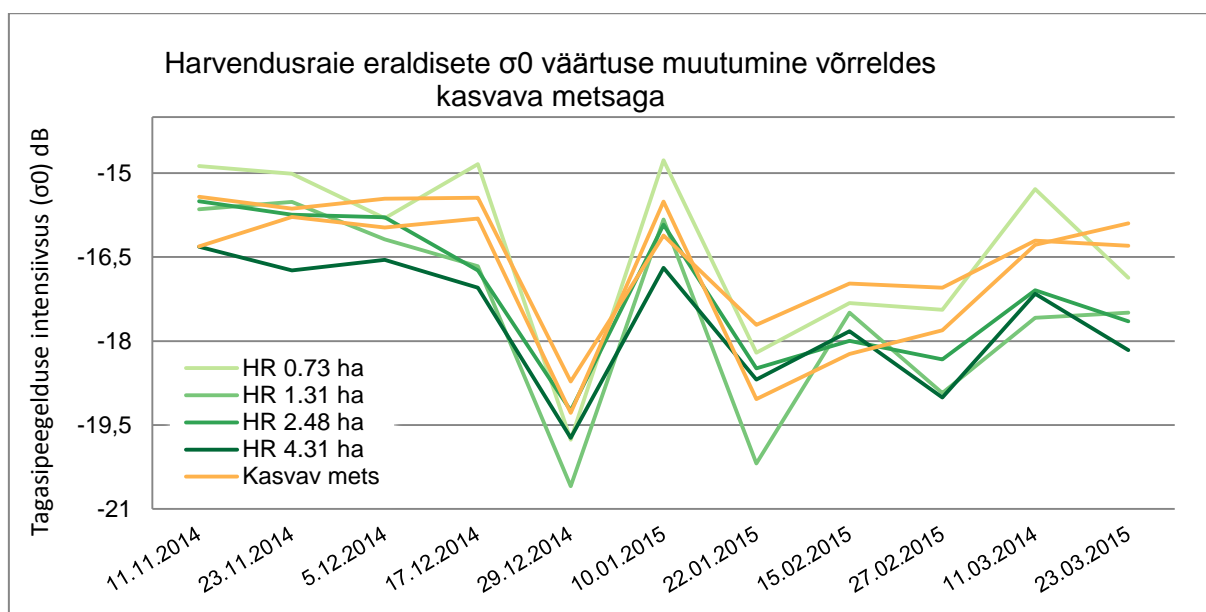
Joonis 17. Kooli kinnistu lageraie eraldised 2 (1,94 ha), 3 (1,35 ha) ja 4 (0,34 ha). 1 - Maa-ameti ortofoto 22.05.2011. 2 – S-1A kujutis 23.11.2014. 3 – S-1A kujutis 23.03.2015.



Joonis 18. Metsa-Sormuli kinnistu lageraie eraldis 1 (1,3 ha). 1 - Maa-ameti ortofoto 03.06.2013. 2 – S-1A kujutis 23.11.2014. 3 – S-1A kujutis 23.03.2015.

3.2.2 Harvendusraie

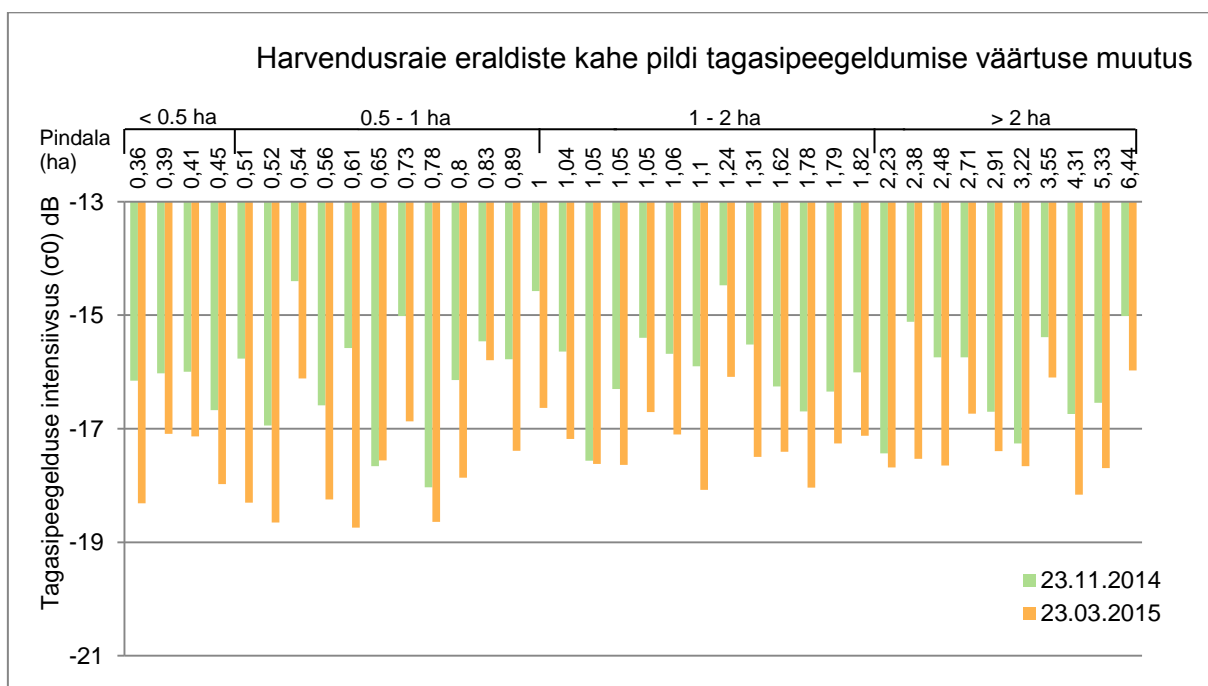
Sarnaselt lageraie eraldistele sõltub ka harvendusraie eraldiste tagasipeegeldumise intensiivsus kogu vaadeldaval talveperioodil peamiselt temperatuurist. Jooniselt 19 paistab selgelt, et eraldiste tagasipeegeldumise koefitsient σ_0 väärtus langeb 29.12.2014 ja 22.01.2015 kui temperatuurid olid madalaimad ning kasvab vastavalt temperatuuride tõusule. Samas võib märgata väikest σ_0 väärtuse langust harvendusraie eraldistest võrreldes kasvava metsaga perioodil 13.01.2015 – 9.03.2015, mil raied on teostatud.



Joonis 19. S-1A talveperioodi ülelennu piltide (σ_0) väärtuse muutumine harvendusraie eraldistes võrreldes kasvava metsaga.

Kokku on 38 metsaeraldist, millel uuritaval perioodil 23.11.2014-23.03.2015 tehti harvendusraiet ning nende pindalad jäävad vahemikku 0,36-6,44 ha. Arvestades kõiki harvendusraie eraldisi, siis 71% langes radarisse tagasipeegeldunud kiirguse intensiivsus üle 1 dB, seejuures 42% oli muutus üle 1,5 dB ning ainult 17% langes signaali tugevus üle 2 dB (joonis 20).

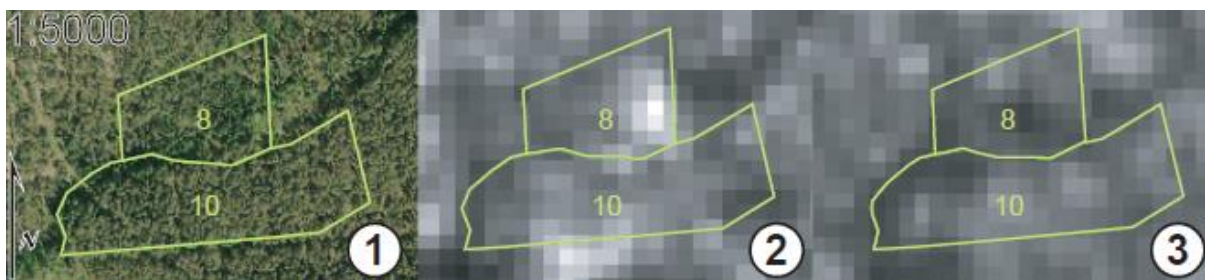
Lageraie puhul langes pärast metsas toimunud raiet tagasipeegeldumise intensiivsus suuresti sõltuvalt eraldise pindalaga. Harvendusraie puhul tuleb aga pigem välja vastupidine seos, mida suurem on eraldise pindala, seda väiksem on ka σ_0 väärtuse muutus. Raiealadel, mis on suuremad kui 1,4 ha (17 tk) jäi tagasipeegeldumine 65% juhtudest alla ühe detsibelli. Seega minimaalset üksust, mille puhul Sentinel-1A suudaks tuvastada harvendusraiet on keeruline välja tuua, sest vaatluse all olevate alla 0,5 ha metsaeraldistes oli keskmine signaali tugevuse langus pärast harvendusraiet 1,4 dB, samas 0,5-1 ha eraldistes 1,5 dB, 1-2 ha eraldistes 1,3 dB ning üle 2 ha eraldistes langes σ_0 väärtus pärast raiet keskmiselt 1 dB.



Joonis 20. 23.11.2014 ja 23.03.2015 S1-A pildipaari võrdlus harvendusraie eraldistes.

Kõige rohkem langeb kahe kujutise võrdluses radarisse tagasipeegeldunud kiirguse intensiivsus Mõniste metskonna 1 kinnistu 0,61-hektarilises eraldises ning lisaks on sama kinnistu 1,1-hektarilistes eraldistes langus üle 2 dB (joonis 21). Töö autorile ei ole küll teada antud kinnistult raiutud mahtusid, kuid teades, et harvendusraie korral raiutakse metsast teatud

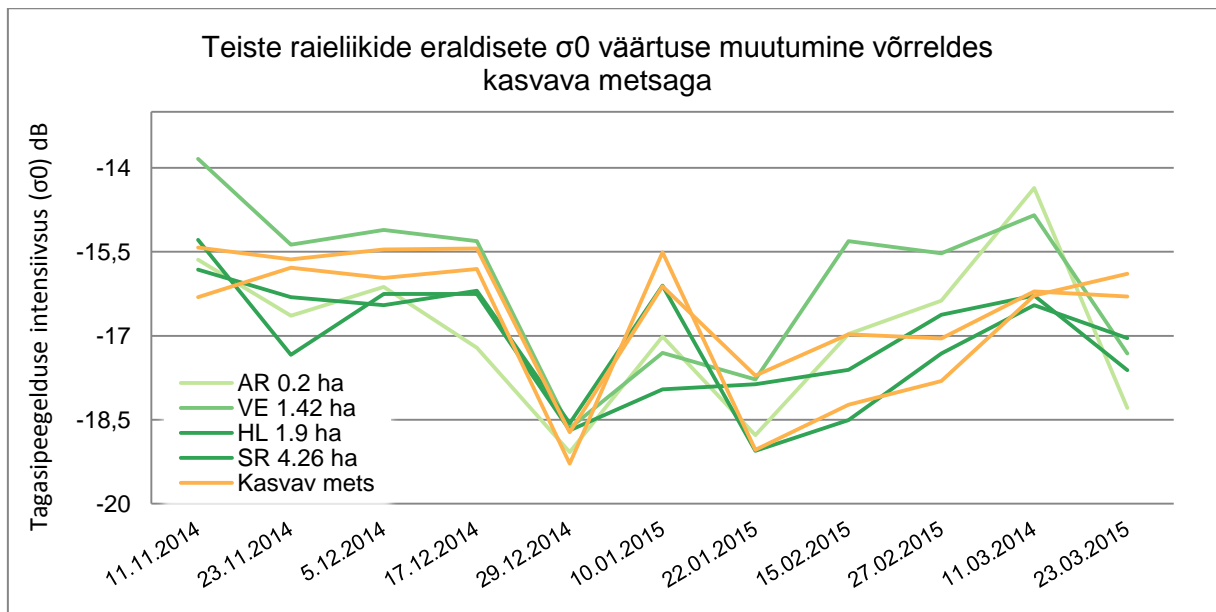
hulk puid metsa hooldamise eesmärgil, võib eeldada, et sellelt kinnistult on võrreldes teiste harvendusraie aladega rohkem metsa raiutud.



Joonis 21. Mõniste metskonna 1 kinnistu harvendusraie eraldised 8 (0,61 ha), 10 (1,1 ha). 1 - Maa-ameti ortofoto 03.06.2013. 2 – S-1A kujutis 23.11.2014. 3 – S-1A kujutis 23.03.2015.

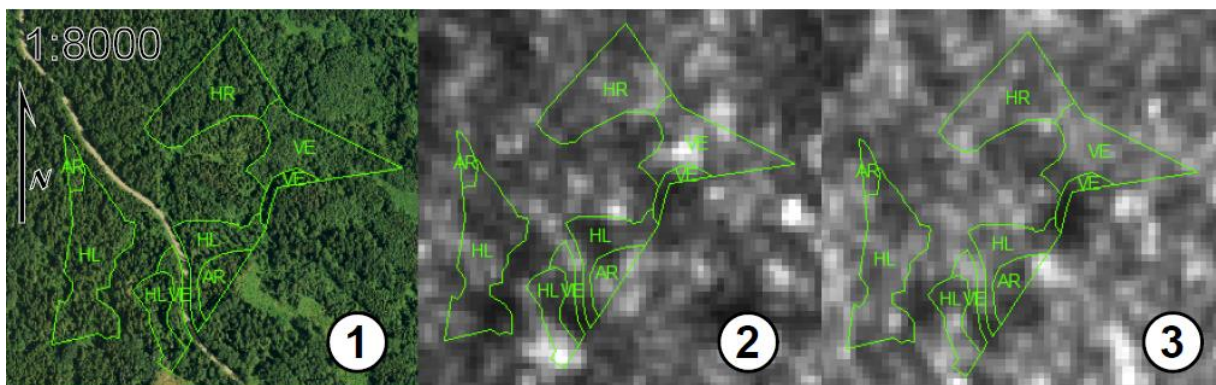
3.2.3 Teised raieliigid

Sarnaselt lage- ning harvendusraie eraldistele sõltub ka teiste raieliikide eraldiste tagasipeegeldumise intensiivsus kogu vaadeldaval talveperioodil põhiliselt temperatuurist. Eraldiste σ_0 väärtus tõuseb plusskraadidel ning langeb miinuskraadidel. Aegjärene raie ning häil- ja veerraie on teostatud perioodil 21.12.2014-27.12.2014, mis põhjendab joonisel 22 selget langust tagasipeegeldumises 10.01.2015 ülesvõetud Sentinel-1A kujutiselt kui võrrelda kasvavat metsa sanitaarraie eraldistega. Sanitaarraiet on tehtud vaatluse all olevas eraldises 17.02.2015-10.03.2015 ning pärast seda on märgata väikest langust σ_0 väärtuses.

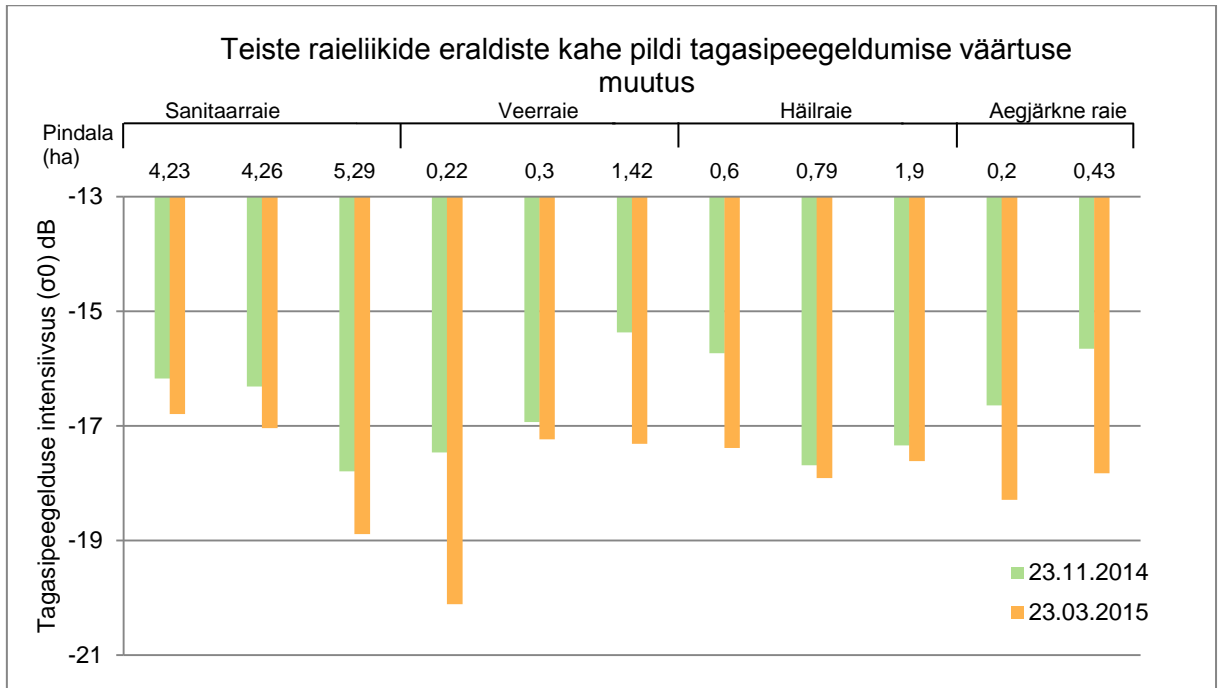


Joonis 22. S-1A talveperioodi ülelennu piltide (σ_0) väärtuse muutumine aegjärgse raie, veer-, häil- ning sanitaarraie eraldistes võrreldes kasvava metsaga.

Kokku on uurimisaslas 11 metsaeraldist, millel uuritaval perioodil 23.11.2014-23.03.2015 teostati ka teisi raieid peale lage-ja harvendusraie. Täpsemalt teostati sanitaarraiet kolmes eraldises, mille pindala on 4,23-5,29 ha. Häilraiet kolmes eraldises, mille pindala on vahemikus 0,6-1,9 ha ning veerraieid samuti kolmes eraldises, pindalaga 0,22-1,42 ha (joonis 23). Kahes eraldises tehti vaadeldaval perioodil aegjärgset raieid ning nende pindala oli vastavalt 0,2 ja 0,43 ha. Kõige enam langes tehisava-radarisse tagasipeegeldunud kiirguse intensiivsus kahe pildi võrdluses aegjärgse raie korral, vastavalt 0,2 ha eraldise korral 1,64 dB ning 0,43 ha eraldises 2,17 dB (joonis 24). Lisaks ületas muutus ka kahe veerraie eraldise puhul 1,9 dB, nii häil- kui ka sanitaarraie korral on σ_0 väärtuse langus väiksem.



Joonis 23. Kegatsi ja Mustikaoru kinnistute raied. 1 - Maa-ameti ortofoto 03.06.2013. 2 – S-1A kujutis 23.11.2014. 3 – S-1A kujutis 23.03.2015.



Joonis 24. 23.11.2014 ja 23.03.2015 S1-A pildipaari võrdlus teiste raieliikide eraldistes.

4. Arutelu

4.1 Ilmastikutingimuste mõju signaali tugevusele

Käesolevas töös uuriti esmalt, kuidas mõjutavad erinevad keskkonnategurid C-lainealas töötava Sentinel-1A radarsatelliidi kasutusvõimalusi Eesti tingimustes. Tehisava-radarist väljasaadetud kiirgus suudab tulenevalt lainepikkusest minna objektide sisse ning seeläbi radarisse tagasi jõudmisel kirjeldada nende omadusi (Henderson, Lewis 2013). Samas on Staachi ja teised (2000) välja toonud, et tehisava-radarisse tagasipeegeldunud kiirguse intensiivsus sõltub palju keskkonnateguritest. Tagasipeegeldumise tugevust mõjutavad näiteks põud, üleujutused ning maapinna külmumine ja sulamine, mistõttu tuleb arvestada ilmastikutingimustega kui tehisava-radariga kirjeldada maapinnal toimunud muutatusi. Juba Pulliainen ja teised (1996) on varastes uuringutes välja toonud, et uurimaks metsaga kaetud alasid radarkaugseire abil, on tarvis eelnevalt analüüsida ilmastikutingimuste mõju signaali tugevusele. Sama on leidnud ka Koskinen ja teised (2001), et metsas toimuvad sõltuvalt aastaajalisusest küllaltki suured muutused, mis võivad radarisse tagasipeegeldunud kiirguse tugevust mõjutada.

Antud uurimistöös on analüüsitud peamiselt talveperioodil ülelennatud Sentinel-1A kujutisi. Uurimisala keskmine tagasipeegeldumise intensiivsus on arvatud 13 erineval pildil vahemikus 11.11.2014-28.04.2015 ja nende väärtusi on võrreldud Riigi Ilmateenistuse kogutud õhutemperatuuri, sademete ning lumikatte paksuse andmetega. Tulemustest selgus sarnaselt Staachi ja teistega (2000), et signaali tugevus sõltub palju ilmastikutingimustest. Käesolevas töös selgus täpsemalt, et alla nullkraadistes ilmastikuoludes on radarisse tagasipeegeldunud kiirguse intensiivsus tugevas korrelatsioonis õhutemperatuuriga. Temperatuuri alanedes, langeb ka σ_0 väärtus. Samas aprillikuu piltidel, kui temperatuur on tõusnud ning lumi sulanud, on seos väiksem. Kui Santoro ja teised (2009) on leidnud, et C-lainealas võib maksimaalselt tagasipeegeldumise intensiivsus erineda sõltuvalt miinus- ja plusskraadidest maksimaalselt 7 dB, siis käesoleva töö tulemustes leiti, et temperatuuri erinevuse ja signaali tugevuse vahel võib olla maksimaalselt veidi üle 4 detsibelline erinevus. Nii suur erinevus muudab raiete tuvastamise ilma ilmastikuolusid vaatamata võimatuks, sest näiteks 29. detsembril 2014 oli uurimisala keskmine õhutemperatuur $-10,6^{\circ}\text{C}$ ning σ_0 väärtus $-20,356$ dB ning vastavalt 28. aprilli 2015 ülelennu ajal $12,3^{\circ}\text{C}$ ja $-15,776$ dB.

Sademetete ning tagasipeegeldumise intensiivsuse vahel talveperioodil nii suurt korrelatsiooni ei teki, pigem on aprillikuu piltide abil näha, et sademed hakkavad σ_0 väärtust rohkem mõjutama suvisel ajal kui maapinnal enam lumikatet ei ole. Nii on ka Steele-Dunne ja teised (2012) välja toonud, et tehisava-radarisse tagasipeegeldunud kiirguse intensiivsus sõltub suvel enim maapinna ning teiste objektide veesisaldusest. Talviste Sentinel-1A kujutiste ajal on maapind külmunud ning vee liikumine piiratud, seega tekib sademetete ning tagasipeegeldumise intensiivsuse vahel väiksem seos. Suveperioodil algab taimedes taas vegetatsiooniperiood, millega suureneb nende veesisaldus, see seletab jällegi sademetete suuremat seost aprillikuu piltidelt radarisse tagasipeegeldunud intensiivsuse vahel.

Santoro ja teised (2009) on leidnud, et külmal ning lumisel talvel sõltub signaali tugevus lumikatte paksusest, tihedusest ning niiskusest. Kuigi antud töös ei olnud kasutada lumikatte tiheduse ja niiskuse infot, siis lumikatte paksuse ning tagasipeegeldumise tugevuse vahel leiti kahanev seos. Selgus, et mida paksem on lumikatte, seda vähem kiirgust jõuab radarisse tagasi. Kui Santoro ja teised (2009) tuvastasid 3-4 dB muutuse signaali tugevuses, kui lumeolud piltide ülelennu aegadel erinesid, siis antud töös tuvastati pigem lumikatte olemasolu ning puudumise vahel sarnane muutus.

4.2 Raiete tuvastamine

Varasemates teadustöodes on tehisava-radari instrumentide abil peamiselt kaardistatud lageraie alasid (Fransson *et al* 2008, Santoro *et al* 2012). Ka Eestis on kõige sagedamaks uuendusraie liigiks lageraie, sest see võimaldab saada kõige enam majanduslikku tulu ning tagada seejuures väikseim negatiivne mõju keskkonnale (KAUR 2014). Aladel, kus looduskaitsepiirangutest on lageraie keelatud, teostatakse ka teisi uuendusraieid. Nii on antud uurimistöös väiksemal määral vaadeldud ka aegjärkse, häil- ja veerraie tuvastamise võimalusi. Keskkonnaagentuuri välja antud Aastaraamat Mets 2013 (2014) kohaselt moodustuvad hooldusraie aastased mahud peamiselt harvendusraiest ning vähemal määral sanitaarraiest, seetõttu on ka neid raieliike uurimistöös analüüsitud.

Käesoleva töö tulemusena leiti, et signaali tugevust mõjutavad küllaltki palju ilmastikuolud, seega tuleb raiete tuvastamisel erinevatelt Sentinel-1A kujutistelt lähtuda uurimisala keskkonnatingimustest. Lisaks on Saatchi ja teised (2000) välja toonud, et radarisse tagasipeegeldumise intensiivsus sõltub lisaks temperatuurile ka taimkatte tihedusest ja

katvusest. Talveperioodil kui puud on raagus võib signaal läbida metsa kuni maapinnani ning suvel peegelduda tagasi juba lehtede pinnalt, mis võib mõjutada radarisse tagasipeegeldunud kiirguse intensiivsust (Saatchi *et al* 2000). Lisaks on Fransson ja teised (2007) järeldanud, et samal aastaajal ja sarnaste ilmastikutingimuste juures kogutud tehisava-radari pildid annavad täpsemaid tulemusi erinevate muutuste leidmiseks. Seetõttu on antud uurimistöös põhjalikumalt vaadeldud talveperioodi, mil ilmastikunäitajad olid sarnasemad ning eraldi analüüsitud sarnaste näitajatega kahe S1-A kujutise signaali tugevuse erinevust, et tuvastada metsas toimunud raieid.

Fransson ja teised (2008) on leidnud, et lageraie tuvastamiseks peab signaali tugevus vähenema vähemalt 2 dB. Sellest tulenevalt on ka antud uurimistöös vaadeldud, millistel aladel väheneb enne ja pärast raietegevust radarisse tagasipeegeldunud intensiivsus vähemalt 2 dB. Kuna alla 0,7-hektariliste metsaeraldiste tagasipeegeldunud signaali tugevuses ei märgatud nii suurt muutust pärast raietegevust, siis on järeldatud, et väiksemaks üksuseks maapinnal on 0,7 hektarit, millest alates võib lageraie tuvastada. Kõikide talveperioodi Sentinel-1A piltide võrdlemisel referentsmetsadega, kus raiet ei toimunud, joonistus selgelt välja erinevus raietegevusega metsade tagasipeegeldumise väärtuses. Kõige enam langes signaali tugevus pärast raiet lageraie eraldistes, vähemal määral ka teiste raieliikide puhul. Seetõttu võib pidada C-lainealas töötavat Sentinel-1A parimaks just lageraiete kaardistamisel.

Eesti metsaseaduse (RT I 2006, 30, 232) järgi raiutakse harvendusraie korral teatud hulk puid, et tõsta metsa väärtust või reguleerida metsa tihedust ja koosseisu. Seega sõltub harvendusraie maht konkreetse metsa olemusest. Töös kasutatud Sentinel-1A piltide võrdlemisel selgus, et pärast harvendusraie langeb eraldistes tagasipeegeldunud signaali tugevus 71% üle 1 dB. Samas vaadeldes ka referentsmetsi, kus raietegevust ei toimunud, langes signaali tugevus samuti kahe pildi võrdlemisel peaaegu 1 dB, seega ei saa seda võtta harvendusraie piiriks. Samas üle 1,5 dB langes signaali tugevus 42% metsaeraldistes, mis viitab sellele, et metsas on siiski muutus toimunud. Teisalt on ka Eriksson ja teised (2012) lugenud tormimurru tuvastamiseks metsades 1,5 dB langust signaali tugevuses, mille alusel võib pidada ka C-lainealas toimiva tehisava-radari väiksema mahuliste raiete tuvastamiseks just 1,5 dB langust.

Tulemustest võib järeldada, et harvendusraie korral ei ole võimalik Sentinel-1 A piltide abil konkreetselt määrata minimaalset üksust maapinnal raie tuvastamiseks. Samas on märgata, et väiksematel eraldistel langeb harvendusraie korral radarisse tagasipeegeldunud kiirguse intensiivsus rohkem kui suuritel aladel. Tõenäoliselt seletab seda harvendusraie omapära, sest raiutakse konkreetsest metsa vajadustest lähtuvalt teatud hulk puid. Seega võib eeldada, et

suurematel eraldistel annab väiksema mõju see kui osa puid on raiutud, samas tuleks selle kinnitamiseks täpsemalt raiemahtusid uurida, millele antud töö ei keskendunud.

Käesolevas töös tuvastati nii sanitaar-, häil-, veer- kui ka aegjärgse raie puhul võrdluses referentsmetsadega radarisse tagasijõudnud signaali tugevuses langus. Sanitaarraie on sarnaselt harvendusraiega hooldusraie liik, mis on mõeldud metsa sanitaarse seisundi parandamiseks (RT I 2006, 30, 232). Seega võib eeldada, et sanitaarraie signaali tugevuse langus pärast raie muutub sarnaselt harvendusraiega, kuid samas oli antud töös vaatluse all ainult kolm sanitaarraie eraldist, mille pindala on üle 4 hektari ning muutused kahe pildi võrdlusel olid vahemikus 0,6 – 1,1 dB.

Suurim langus kahe pildi signaali tugevuse võrdlusel teiste raieliikidega oli veerraiel ning aegjärksel raiel, mis on sarnaselt lageraiele uuendusraie liigid. Nende raieliikide korral raiutakse puid korduvate raiejärgudega ning seetõttu sõltub raieulatus suuresti konkreetsest metsast. Samas oli töö autoril vaadeldava perioodi kohta küllaltki vähe teiste raieliikide võrdlusandmeid, et üldisi järeldusi välja tuua. Samuti sõltuvad antud raieliigid suuresti metsa olemusest ning vajaksid seetõttu referentsandmeteks reaalseid raiemahtusid.

Kuna Sentinel-1A andmed on kättesaadavad olnud ainult alates 2014. aasta oktoobrist, siis on käesolevas töös analüüsitud valdavalt talveperioodi pilte. Nendelt on leitud optimaalsed raietuvastuse parameetrid sõltuvalt raie ulatusest ja tüübist. Samas Santoro ja teised (2009) on leidnud, et nullkraadi lähedase temperatuuri korral võib tagasihajunud kiirgus kõikuda 2-4 dB ja seetõttu on talvistes oludes raiete tuvastamine keerulisem. Käesolevas töös on muutusi metsades vaadeldud paralleelselt ilmastikunäitajatega, mis tagas ka efektiivsema raiete tuvastuse. Ühtlasi annab see võimaluse antud uurimistöo edaspidise uurimise jätkamiseks Eesti metsade seirel suveperioodil ning täpsemalt uurida, kuidas mõjutab vegetatsiooniperiood ning vihm radarisse tagasipeegeldunud signaali tugevust.

Kokkuvõte

Euroopa Kosmoseagentuur saatis 2014. aasta kevadel orbiidile C-lainealas töötava tehisava-radari Sentinel-1A. Radarsatelliidi andmed on kõigile tasuta kättesaadavad alates sama aasta oktoobrikuust. Süsteem suudab kogu Maa üles pildistada 12-päevase uuendussagedusega, mis on suur edasimineku võrreldes seniste SAR süsteemidega. Sentinel-1A andmed laiendavad uurimisvõimalusi nii veekogude, maismaa kui ka jääolude seirel.

Üle poole Eesti maismaast on kaetud metsaga, seega on oluline kaardistada võimalikult täpselt ja kiiresti metsas toimuvaid muutusi. Sellest lähtuvalt on käesoleva magistritöö peamine eesmärk uurida, millised võimalused avanevad radarsatelliit Sentinel-1A piltide kasutamisel Eesti metsade seirel ning välja selgitada, kuidas mõjutavad erinevad keskkonnategurid radarsatelliidi kasutusvõimalusi Eesti tingimustes.

Töös kasutati 13 Sentinel-1A pilte perioodil 11. november 2014 kuni 28. aprill 2015. Pildid kalibreeriti sigma-null (σ_0) väärtustesse, et võrrelda radarisse tagasipeegeldunud signaali intensiivsuse muutumist erinevatel ülelendudel. Lisaks ühildati kujutised kokku ning vähendati reljefi korrigeerimisega tehisava-radari külgsuunalisest pildigeomeetriast tekkivaid varjutusi ja moonutusi. Töödeldud piltidelt arvutati metsaeraldiste põhiselt keskmised tagasipeegeldumise intensiivsuse väärtused ning neid võrreldi erinevatel kujutistel enne ja pärast raietegevust.

Töö tulemusena selgus, et C-lainealas töötava Sentinel-1A radarisse tagasipeegeldunud kiirguse intensiivsus on Eesti tingimustes suuresti sõltuv ilmastikuoludest. Alla nullkraadiste temperatuuride ning signaali tugevuse vahel leiti tugev seos, mida madalamale temperatuur langes, seda nõrgem signaal radarisse tagasi peegeldus. Lumikatte olemasolu langetas tagasipeegeldumise intensiivsust veelgi. Samas võib antud uurimistöo põhjal järeldada, et talveperioodil sademed signaali tugevust oluliselt ei mõjuta, pigem hakkavad sademed tagasipeegeldumise intensiivsust mõjutama suvisel ajal.

Raiete tuvastamisel võeti arvesse eelnevat analüüsi ilmastikuolude mõjust signaali tugevusele ning leiti, et kõige selgemini on Sentinel-1A piltidelt tuvastatavad lageraied. Pärast raiet langes enamuse metsaeraldiste keskmine signaali tugevus rohkem kui 2 dB, seejuures tekkis selge seos pindala ning tagasipeegeldunud kiirguse intensiivsuse vahel. 81% eraldistest, mis olid suuremad kui 0,7 ha, langes signaali tugevus enam kui 2 dB. Seega suudab C-lainealas töötav Sentinel-1A muutusi tuvastada paremini suurematelt lageraielt aladelt.

Harvendusraie puhul tekkis eraldiste pindala ning radariesse tagasipeegeldunud signaali tugevuse vahel pigem vastupidine seos. Raiealadel, mis olid suuremad kui 1,4 ha langes tagasipeegeldumine alla ühe detsibelli 65% eraldistest. Samas võrreldes referentsandmetega, kus kogu vaadeldaval perioodil raiegevust ei toimunud, võib siiski märgata, et pärast harvendusraiet langes signaali tugevus eraldises keskmiselt 1,5 dB. Teistest raieliikidest analüüsi töös veel aegjärkset raie, veer-, häil- ning sanitaarraiet ning leiti, et võrreldes referentsmetsadega langes ka nende raie puhul radariesse tagasijõudnud signaali tugevus pärast raiegevust. Samas oli antud raieliikide kohta küllaltki vähe andmeid, et üldisi järeldusi välja tuua. Käesoleva töö tulemuste põhjal joonistus pigem välja, et paremini tuvastatavad on veer- ning aegjärkne raie, mis on sarnaselt lageraiega uuendusraie liigid.

Töö tulemustest võib kokkuvõtvalt järeldada, et Eesti tingimustes sõltub C-lainealas töötava Sentinel-1A piltide radariesse tagasipeegeldunud signaali tugevus ilmastikuoludest. Talveperioodil mõjutab kiirguse intensiivsust peamiselt õhutemperatuur ja lumikate ning väiksemal määral sademed. Sarnaste ilmastikuolude korral võib üle 2 dB langust piltide tagasipeegeldumiste väärtustes lugeda lageraieks. Muutused on tuvastatavad alates 0,7 ha suurustest eraldistest. Kui muutus jääb vahemikku 1,5-2 dB võib eeldada, et metsas on teostatud harvendusraiet.

Tänuavaldused

Täna kõiki, kes selle magistritöö valmimisele kaasa aitasid. Erilised tänud kuuluvad meeldiva koostöö eest minu juhendajale Aire Oleskile, kes leidis alati aega küsimustele vastamiseks. Samuti täna Kaupo Voormansikut heade nõuannete eest ning veel tahan tänada Riigimetsa Majandamise Keskust ja ettevõtet A&P Mets, kes mõlemad olid lahkelt nõus jagama töös kasutatud raieandmeid.

Felling detection in Estonian forest using Sentinel-1A satellite images

Mirjam Põhjala

Summary

This Master's thesis presents the performance of the recently launched C-band Sentinel-1A satellite missions for detecting forest fellings in coniferous and deciduous forests within Estonia. An open data policy and a 12-day repeat cycle make Sentinel-1A an attractive monitoring tool for the forestry sector. C-band backscatter is influenced by the variation and dynamics of the seasons, and the main objective of this thesis was to analyze whether the detection of forest fellings under Estonian conditions is influenced by such environmental variations.

Thirteen repeat-pass Sentinel-1 dual-pol interferometric wide swath (IW) images acquired from November 2014 to April 2015 were processed and compared with forest logging data collected from the Estonian State Forest Management Centre and from one private forestry enterprise. Meteorological data was acquired from the Estonian Weather Service. A time series of Sentinel-1 data was collected before and after the logging events. Images were calibrated, co-registered, speckle reduced, re-projected to the L-EST97 coordinate system and the images backscatter intensity was transformed to dB scale for comparison.

This study revealed that logging detection accuracy depends on the size of the stand, the type of felling and the weather conditions (temperature, snow cover, precipitation). A strong correlation of 0,944 was found between the mean backscatter of S-1A winter images and the temperature. Thus, the best intensity based logging detection results are achieved by comparing and averaging SAR images taken under similar environmental conditions. It was also found that the smallest stand size where clear-cuts could be detected was $\geq 0,7$ ha, for which the before and after image HV channel backscattering coefficient (σ_0) dropped over 2 dB in 81% of cases. The backscatter intensity dropped at least 1,5 dB in 42% of all forest stands after selective logging.

Kasutatud kirjandus

- Bamler, R., Hartl, P.**, 1998. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems* 14(4), R1-R54.
- Birk, R., W. Camus, E. Valenti, W. J. McCandles**, 1995. Synthetic aperture radar imaging systems. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 10(11), 15–23.
- Chan, Y., K., Koo, V., C.**, 2008. An introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR). *Progress in Electromagnetics Research B* 2, 27-60.
- Eriksson, L. E. B., Fransson, J. E. S., Soja, M. J., Santoro, M.**, 2012. Backscatter signatures of wind-thrown forest in satellite SAR images. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'12)*, 6435-6438.
- Fransson, J. E. S., Magnusson, M., Olsson, H., Eriksson, L. E. B., Folkesson, K., Sandberg, G., Santoro, M., Ulander, L. M. H.**, 2008. Detection of Clear-Cuts Using ALOS PALSAR Satellite Images. *Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, 1-4.
- Fransson, J. E. S., Magnusson, M., Olsson, H., Eriksson, L. E. B., Sandberg, G., Smith-Jonforsen, G., Ulander, L. M. H.**, 2007. Detection of Forest Changes Using ALOS PALSAR Satellite Images. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'07)*, 2330-2333.
- Fransson, J. E. S., Pantze, A., Eriksson, L. E. B., Soja, M. J., Santoro, M.**, 2010. Mapping of wind-thrown forests using satellite SAR images. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'10)*, 1242-1245.
- Fuller, A. J. B.**, 1990. *Microwaves: an introduction to microwave theory and techniques*. Third Edition, Pergamon Press, 1-112.
- Henderson, F. M., Lewis, A. J.**, 2013. *Principles and Applications of Imaging Radar*. Manual of remote sensing: Third edition. Wiley India Pvt. Ltd., 1-124.
- Koskinen, J.T., Palliainen, J. T., Hyyppä, J. M., Engdahl, M. E., Hallikainen, M. T.**, 2001. The seasonal behavior of interferometric coherence in boreal forest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39(4), 820-829.

- McCandless, S. W., Jackson C. R.,** 2004. Principles of synthetic aperture radar. Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual, 1-23.
- Peterson, U., Liira, J., Püssa, K.,** 2008. Metsaga alade ning lageraiete ja nendega sarnaste häiringute kaugseire. Kaugseire Eestis, artiklikogumik, 48-68.
- Pulliainen, J. T., Engdahl, M., Hallikainen, M.,** 2002a. Estimation of boreal forest biomass from multi-temporal INSAR data by inverting an empirical backscattering-coherence model. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'02) 3, 1786-1788.
- Pulliainen, J. T., Kurvonen, L., Hallikainen, M. T.,** 2002b. Multitemporal behavior of L- and C-band SAR observations of boreal forests. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 37(2), 927-937.
- Pulliainen, J. T., Mikhela, P. J., Hallikainen, M. T., Ikonen, J. P.,** 1996. Seasonal dynamics of C-band backscatter of boreal forests with applications to biomass and soil moisture estimation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 34(3), 758-770.
- Pärt, E.,** 2010. Ülevaade: „Eesti metsavarud“. Metsakaitse- ja Metsauuenduskeskus, Tallinn, 1-22.
- Ranson, K. J., Sun, G.,** 2000. Effects of Environmental Conditions on Boreal Forest Classification and Biomass Estimates with SAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 38(3), 1242-1252.
- Rees, W. G.,** 2001. Physical principles of remote sensing. Second edition, Cambridge University Press, 11-36, 297-317.
- Saatchi, S. S., Moghaddam, M.,** 2000. Estimation of crown and stem water content and biomass of boreal Forest using polarimetric SAR imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 38(2), 697-709.
- Santoro, M., Eriksson, L. E. B., Askne, J., Schmullius, C.,** 2006. Assessment of stand-wise stem volume retrieval in boreal forest from JERS-1 L-band SAR backscatter. International Journal of Remote Sensing 27(16), 3425-3454.
- Santoro, M., Fransson, J. E. S., Eriksson, L. E. B., Magnusson, M., Ulander, L. M. H., Olsson, H.,** 2009. Signatures of ALOS PALSAR L-Band Backscatter in Swedish Forest. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 47(12), 4001-4019.

Santoro, M., Pantze, A., Fransson, J. E. S., Dahlgren, J., Persson, A., 2012. Nation-Wide Clear-Cut Mapping in Sweden Using ALOS PALSAR Strip Images. *Remote sensing* 4(6), 1693-1715.

Sparks, J. P., Campbell, G. S., Black, A. R., 2001. Water content, hydraulic conductivity, and ice formation in inter stems of *Pinus contorta*: a TDR case study. *Oecologia* 50(7), 468-475.

Steele-Dunne, S. C., Friesen, J., van de Giesen, N., 2012. Using diurnal variation in backscatter to detect vegetation water stress. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50(7), 2618-2629.

Thiel, C. J., Thiel, C., Schmullius, C., 2009. Operational Large-Area Forest Monitoring in Siberia Using ALOS PALSAR Summer Intensities and Winter Coherence. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47(12), 3993-4000.

Voormansik, K., Praks, J., Antropov, O., Jagomägi, J., Zalite, K., 2014. Flood Mapping With TerraSAR-X in Forested Regions in Estonia. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 7(2), 562-577.

Watanabe, M., Shimada, M., Rosenqvist, A., Tadono, T., Matsuoka, M., Romshoo, S. A., Ohta, K., Furuta, R., Nakamura, K., Moriyama, T., 2006. Forest Structure Dependency of the Relation Between L-Band σ^0 and Biophysical Parameters. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44(11), 3154-3165.

Woodhouse, I. H., 2006. Introduction to microwave remote sensing. CRC Press, Taylor & Francis Group, 7-23.

Internetiallikad:

Earth Observation Portal (EO), 2015. Satellite Missions Database.

<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions> (Viimati vaadatud: 14.05.2015).

Euroopa Kosmoseagentuur (ESA), 2015a. RADAR and SAR Glossary.

<http://envisat.esa.int/handbooks/asar/CNTR5-2.htm#eph.asar.gloss.radsar> (Viimati vaadatud: 02.02.2015).

Euroopa Kosmoseagentuur (ESA), 2015b. Sentinel-1.

http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1 (Viimati vaadatud: 24.03.2015).

Euroopa Kosmoseagentuur (ESA), 2013. Sentinel-1 User Handbook.

https://earth.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook (Viimati vaadatud: 15.05.2015).

Keskkonnaagentuur (KAUR), 2015. Metsaregistri eralduste piirjooned.

<http://www.keskkonnaagentuur.ee/et/kaardikihid> (Viimati vaadatud: 15.02.2015).

Keskkonnaagentuur (KAUR), 2014. Aastaraamat mets 2013.

http://www.keskkonnainfo.ee/failid/Mets_2013.pdf (Viimati vaadatud: 24.03.2015).

Keskkonnaministeerium (KKM), 2011. Eesti metsanduse arengukava aastani 2020.

https://www.riigiteataja.ee/akt/3180/2201/1003/Eesti_%20metsanduse_arengukava.pdf# (Viimati vaadatud: 25.03.2015).

Maa-amet, 2015. Maa-ameti geoportaal.

<http://geoportaal.maaamet.ee/> (Viimati vaadatud: 11.05.2015).

Metsa korraldamise juhend. Keskkonnaministri otsus 16.01.2009 // RTL 2009, 9, 104.

<https://www.riigiteataja.ee/akt/13124148> (Viimati vaadatud: 10.05.2015).

Metsakaitse –ja Metsauuenduskeskus (MMK), 2010. Eesti metsandus.

<http://www.keskkonnainfo.ee/failid/mets2011/EestiMetsandus.swf> (Viimati vaadatud: 12.05.2015).

Metsaseadus. Riigikogu otsus 07.06.2006 // RT I 2006, 30, 232.

<https://www.riigiteataja.ee/akt/MS> (Viimati vaadatud: 10.05.2015).

NASA Jet Propulsion Laborator (JPL), 2015. Airborne Microwave Observatory of Subcanopy and Subsurface

<https://airmoss.jpl.nasa.gov/> (Viimati vaadatud: 14.05.2015).

Riigi Ilmateenistus, 2015.

<http://www.ilmateenistus.ee/> (Viimati vaadatud: 12.05.2015).

Sentinel-1 Scientific Data Hub (SciHub), 2015.

<https://scihub.esa.int/> (Viimati vaadatud: 29.04.2015).

Sentinel – 1 Toolbox (S1TBX), 2015. Help.

Mina, Mirjam Põhjala, (sünnikuupäev: 05.04.1990),

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Raiete tuvastamine Eesti metsades radarsatelliit Sentinel-1A abil“,

,mille juhendaja on Aire Olesk,

1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 25.05.2015