

## TIIVISTELMÄRAPORTTI

### Puuston vaikutus kohteen havaitsemiseen SAR-tutkalla

**Juha Lemmetyinen, Jorge Jorge Ruiz, Anna Kontu, Riku Tarvainen, Juval Cohen**  
Ilmatieteen laitos  
Erik Palménin aukio 1, PL 503, 00101 Helsinki  
juha.lemmetyinen@fmi.fi

**Tiivistelmä.** Pohjoisten havumetsien puustolla ja sen ominaisuuksilla (mm. kosteus, lämpötila, jäätyminen/lumipeite) on merkittävä vaikutus synteettisen apertuurin tutkan (Synthetic Aperture Radar, SAR) vasteeseen eri vuodenaikoina. Puuston ominaisuudet määräävät tutkasignaalin läpäisykyvyn, ja siten vaikuttavat mikroaaltoalueen tutkien kykyyn havaita lehvästön alle sijoittuneita kohteita. Erityisesti talviolosuhteiden dynaamisia vaikutuksia puuston ja tutkasignaalin vuorovaikutukseen on tutkittu toistaiseksi vähän. Tutkimuksessa toteutettiin mittausjärjestely, joka mahdollisti havumetsän tutkavasteen jatkuvan seurannan torniin sijoitetulla kuvaavalla, 1 - 10 GHz SAR-tutkalla sekä L-, X, Ku ja Ka-alueen mikroalatoradiometreillä (1.4 - 36.5 GHz). Mikroaaltoalueen mittauksia tukivat kattavat mittaukset maaperän, puuston ja mm. lumipeitteen ominaisuuksista. Tutkimustulosten perusteella kehitettiin malli, joka simuloi puuston läpäisevyyden biomassan, ympäristön olosuhteiden ja puuston sähköisten ominaisuuksien funktiona.

#### 1. Johdanto

Pohjoisten havumetsien puustolla ja sen ominaisuuksilla (mm. kosteus, lämpötila, jäätyminen/lumipeite) on merkittävä vaikutus synteettisen apertuurin tutkan (Synthetic Aperture Radar, SAR) vasteeseen eri vuodenaikoina. Puuston sähköiset ominaisuudet ja rakenne määräävät tutkasignaalin sironnan ja läpäisyn, ja siten vaikuttavat mikroaaltoalueen tutkatiedustelun kykyyn havaita lehvästön alle sijoittuneita kohteita.

Lehvästön vaikutusta mikroallosignaaliin mm. lauhkean vyöhykkeen lehtimetsissä on tutkittu aiemmin (Matzler, 1994; Guglielmetti et al., 2007); tällöin puuston mikroaltoavasteessa tapahtuu merkittäviä muutoksia liittyen erityisesti lehvästön kasvuun ja maaperän sekä puuston vesimäärään. Talviolosuhteiden osalta kirjallisuudessa esiintyy vain vähän tutkimustietoa (esim. Pullainen et al., 1999), ja esimerkiksi useimmissa kaukokartoituksessa sovellettavissa säteilykuljetusmalleissa puuston sähköisten ominaisuuksien on oletettu pysyvät talvisin stabiilina puuston maaperästä saaman veden tyrehtyessä ja lehvästön jäätyessä (esim. Montomoli et al., 2019). Pohjoisilla alueilla puuston luonnolliset suojautumismekanismit kuitenkin mahdollistavat jäätymättömän veden säilymisen kasvien solukoissa aina  $-40^{\circ}\text{C}$  pakkasasteeseen saakka (Kärkkäinen, 2003; Havranek & Tranquillini, 1995); jäätymisasteeseen vaikuttavat mm. puuaineksen solutason rakenteelliset ominaisuudet (Lintunen et al., 2013). Talviolosuhteissa jäätyneen ja ns. vapaan veden suhde

---

Postiosoite	Käyntiosoite	Puhelin	s-posti, internet
Postadress	Besöksadress	Telefon	e-post, internet
Postal Address	Office	Telephone	e-mail, internet
MATINE/Puolustusministeriö	Eteläinen Makasiinikatu 8 A	Vaihde 295 160 01	MATINE.plm@gov.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			

puustossa määrää pitkälti puuston sähköiset ominaisuudet (mm. permittiivisyyden), jotka vaikuttavat suoraan mikroaaltojen läpäisyyn ja sirontaan puustosta. Havumetsien osalta on viimeaikaista tutkimusnäyttöä siitä, että sekä L-alueen että X - Ka -alueen mikroaaltojen läpäisykyky puustossa kasvaa merkittävästi ilman ja puuston lämpötilan pudotessa alle 0°C:n, läpäisykyvyn lisääntyessä monotonisesti aina -40 pakkasasteeseen (Li et al., 2018; Schwank et al., 2021). Ilmiö on yhdistettävissä suoraan puustossa tapahtuviin sähköisiin muutoksiin (Schwank et al., 2021). Myös puuston lumipeitteellä on havaittava vaikutus mikroaaltojen läpäisevyyteen ainakin X-Ka -taajuusalueella (Li et al., 2018). Näissä aiemmissa kokeellisissa mittauksissa ei kuitenkaan ollut käytössä aktiivista mittalaitetta (s.o. tutkaa), joilla saataisiin suoraan arvioitua puuston ominaisuuksien vaikutus tutkan havaitsemiin suureisiin (takaisinsironnan vaihe ja amplitudi). Epäsuoria viitteitä puuston läpäisykyvyn muutoksista on saatu myös viimeaikaisista satelliiteista tehdyissä C-alueen (5.3 GHz) tutkamittauksissa (Cohen et al., 2019).

Tässä kaksivuotisessa (2020-2021), Maanpuolustuksen Tieteellisen Neuvottelukunnan (MATINE) rahoittamassa hankkeessa oli tavoitteena selvittää, miten pohjoisen havumetsävyöhykkeen puuston ominaisuuksien vaihtelu eri vuodenaikoina vaikuttaa avaruuteen tai ilma-aluksiin sijoitettujen SAR-tutkajärjestelmien suorituskykyyn havaita lehvästön alle sijoitettuja kohteita. Tutkimuksessa sovellettiin torniin sijoitettua monitaajuuksista, täyspolarimetrista SAR-tutkaa. Mittausasetelma mahdollisti lehvästön alle sijoitettujen, tutkasignaalia voimakkaasti heijastavien kohteiden mittauksen lehvästön läpi. Tutkavastetta verrattiin mitattuihin puuston ominaisuuksiin (lämpötila, sähköinen permittiivisyys, lumipeite) eri vuodenaikoina. Havaintoja selittämään kehitettiin semi-empiirinen malli, jossa lähtökohtana oli puuston sisältämä jäätyneen ja vapaan veden määrä ja tästä johdettavissa olevat sähköiset ominaisuudet.

## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

### 2.1 Tutkimuskysymykset

Tutkimuksen kokonaistavoitteena oli selvittää, kuinka ympäristön luonnollisten olosuhteiden muutokset vaikuttavat kuvaavien SAR-tutkien kykyyn havaita lehvästön alle sijoitettuja kohteita.

Keskeisiä tutkimuskysymyksiä olivat:

- Kuinka sää-, maaperä- ja lumiolosuhteet sekä puuston biologiset muutokset vaikuttavat havumetsän sähköisiin ominaisuuksiin eri vuodenaikoina?
- Mikä on näiden vaikutus mikroaaltojen läpäisykykyyn ja sitä kautta SAR tutkan vasteeseen (amplitudi eli signaalin voimakkuus sekä vaiheominaisuudet, kuten koherenssin säilyminen) 1-10 GHz:n taajuusalueella?
- Kuinka nämä muutokset vaikuttavat kykyyn havaita erilaisia kohteita lehvästön läpi SAR-tutkalla mainitulla taajuvälillä (kohteen vasteen voimakkuus, vaihemuutokset, koherenssin säilyminen eri kohtauskulmilla ja polarisaatioilla), ottaen huomioon myös vaihtelevan biomassan ja puuston tiheyden?

## 2.2 Tutkimussuunnitelma

Tutkimuksessa oli tavoitteena kerätä kattava havaintoaineisto vähintään 12 kk:n ajanjaksolta soveltaen mittaustorniin sijoitettua laajan taajuusalueen SAR-tutkaa. Tulosten perusteella oli tavoitteena kokonaismalli, joka mahdollistaa puuston taustaherätteen ja läpäisevyyden dynaamisen arvioinnin puuston biomassan ja sähköisten ominaisuuksien funktiona.

Tutkimuksen toteutunut aikataulu on esitetty kuvassa 1. Talven 2020 aikana suoritettiin tutkalaitteiston testaus, ja kesällä 2020 rakennettiin tarvittava mittaussjärjestely. Säännölliset mittaukset tutkalla aloitettiin syyskuussa 2020. Mittausaikasarjassa on kuukauden tauko joulukuussa 2020 tutkan suuntauslaitteiston vikatilanteen vuoksi sekä toinen tauko Kesäkuussa 2021 tutkan elektroniikan ollessa päivitettävänä. Näitä mittaustaukoja lukuun ottamatta mittaukset kyettiin suorittamaan suunnitellusti. Tutkalla on saatavilla mittaustuloksia myös talven 2020 ajalta.

Vuosi	2020												2021											
	Tam	Hel	Maa	Huh	Tou	Kes	Hei	Elo	Syy	Lok	Mar	Jou	Tam	Hel	Maa	Huh	Tou	Kes	Hei	Elo	Syy	Lok	Mar	Jou
<b>Työpaketti</b>																								
TP1: Mittausjärjestelyt	■																							
TP2: Mittauskampanja													■											
TP3: Analyysi													■											
TP4: Tutkimuksen synteesi													■											

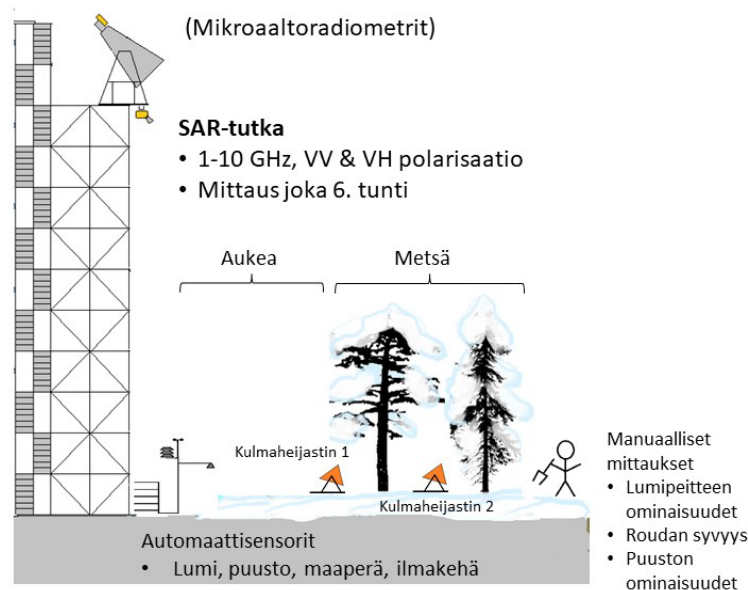
Kuva 1. Tutkimuksen aikataulu.

### 3. Aineisto ja menetelmät

#### 3.1 Mittausjärjestely

Tutkimuksessa käytetty pääasiallinen mittalaite SodSAR (Sodankylä Synthetic Aperture Radar) on Suomalaisen Harp Technologies Oy:n kehittämä taajuuspyyhkäisevä SAR tutka. Tutka mahdollistaa mittaukset 1-10 GHz:n taajuusalueella; mitattava taajuus on vapaasti valittavissa. Tutka mahdollistaa eri polarisaatioiden (VV, VH, HV, HH) joustavan mittaamisen. Aerial Oy:n toteuttama 3-akselien suuntaus- ja liikutuslaitteisto mahdollistaa havainnot eri suunnista sekä tutkan liikuttamisen lateraalisuunnassa synteettisen apertuurin mittauksia varten. Tutkan ominaisuuksia ja kuvantamismenetelmää on kuvattu erillisessä tutkimusartikkelissa (Jorge Ruiz et al., 2020). Tutka asennettiin 19 m korkeudelle mittaus-torniin, mahdollistaen mittaukset lehvästön yläpuolelta. Samaan mittaus-torniin on sijoitettu passiivisia mikroaaltoradiometrejä eri taajuuksilla; näistä alimman taajuuden (1.4 GHz) vastaanottimia sovellettiin puuston permittiivisyyttä kuvaavan mallin kehittämisessä (Schwank et al., 2021).

Tutkimuksessa toteutettiin mittausjärjestely, joka mahdollisti koealueen ja sinne sijoitettujen heijastavien kohteiden jatkuvan seurannan (Kuva 2). Heijastavina kohteina käytettiin alumiinisia kulmaheijastimia, jotka sijoitettiin maanpinnan tasalle ja suunnattiin kohden tutkaa. Yksi heijastin asetettiin avoalueelle paikkaan, josta oli esteetön näköyhteys tutkaan. Kaksi muuta heijastinta sijoitettiin lehvästön alle paikkoihin, jossa tutkan ja heijastimen väliin jäi mahdollisimman tasainen latvuspeitto. Mittausjärjestelyä rakennettaessa kokeiltiin myös alumiinisten pallojen käyttöä referenssikohteina, mutta näiden tutkapoikkipinta todettiin riittämättömäksi, jolloin pallojen vastetta ei pystynyt määrittelemään oikaistuista SAR-kuvista.



Kuva 2. Havainnekuva Sodankylän mittausjärjestelystä.

Kuvassa 3 on esiteltyä SodSAR-tutka (a), maastoon sijoitetut kulmaheijastimet sekä (b)

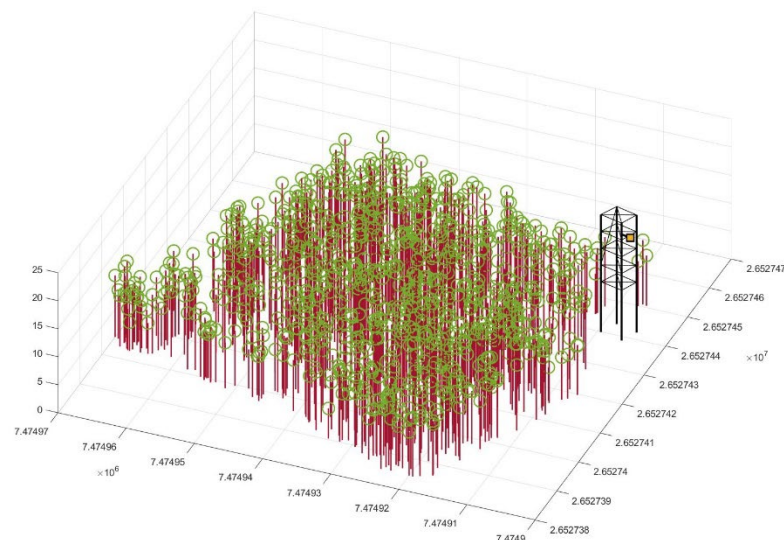
automaattinen sääasema ja puuston permittiivisyyttä ja lämpötilaa mittaavia sensoreita (c). Näiden mittausten lisäksi alueelta on saatavilla kattava aineisto meteorologisia mittaustuksia sekä mm. mittaustuksia maaperän kosteus- ja lämpötilaprofiilista. Mittausalueella suoritettiin myös viikoittaisia mittaustuksia lumen ominaisuuksista (mm. kerrostuneisuus, tiheysprofiili, mikrorakenne, lämpötila).



Kuva 3. Tutkimuksessa käytettyä Sodankylän Arktisen avaruuskeskuksen mittausinfrastruktuuria. SodSAR asennettuna mittaustorniin latvuston yläpuolelle (vas.); maastoon asennettuja kulmaheijastimia (kesk.); automaattinen sääasema ja puuston lämpötilan ja permittiivisyyden mittaus (oik.).

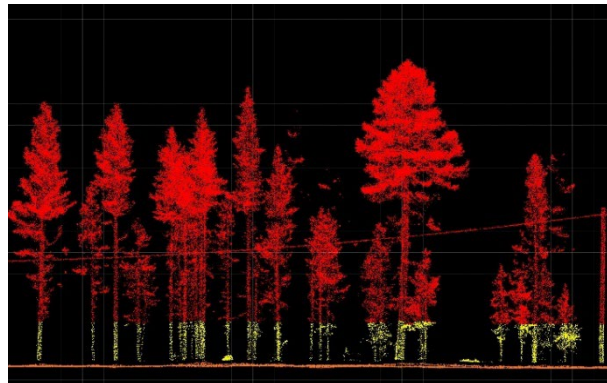
### 3.2 Koealueen puuston mittaukset

Koealueen metsästä mitattiin kattava, yli 1000 puuta käsittävä mittaustietokanta kesällä 2019. Aineisto käsittää koealan yli 5 cm läpimittaisten puiden sijainnin, halkaisijan (1.3 m korkeus), korkeuden, sekä latvuston alarajan korkeuden (kuva 4). Puiden sijainti mitattiin tarkkuus-GPS:n avulla. Kesällä 2020 suoritettiin myös koealueen laserkeilaus. Laserkeilaustietokannan käsittely (Kuva 5) on tätä kirjoittaessa kesken, mutta aineisto mahdollistaa yhdessä manuaalisten mittausten kanssa puuston tarkan geometrian sekä mm. biomassan arvioinnin.



Kuva 4. Havainnekuva mittaustietokannan puuston korkeudesta (m). Yksittäisten puiden paikka on mitattu tarkkuus-GPS:n avulla. Puiden korkeus mitattu kolmiomenetelmällä kesällä 2019. Mittaustornin sijainti havainnollistettu oikealla.

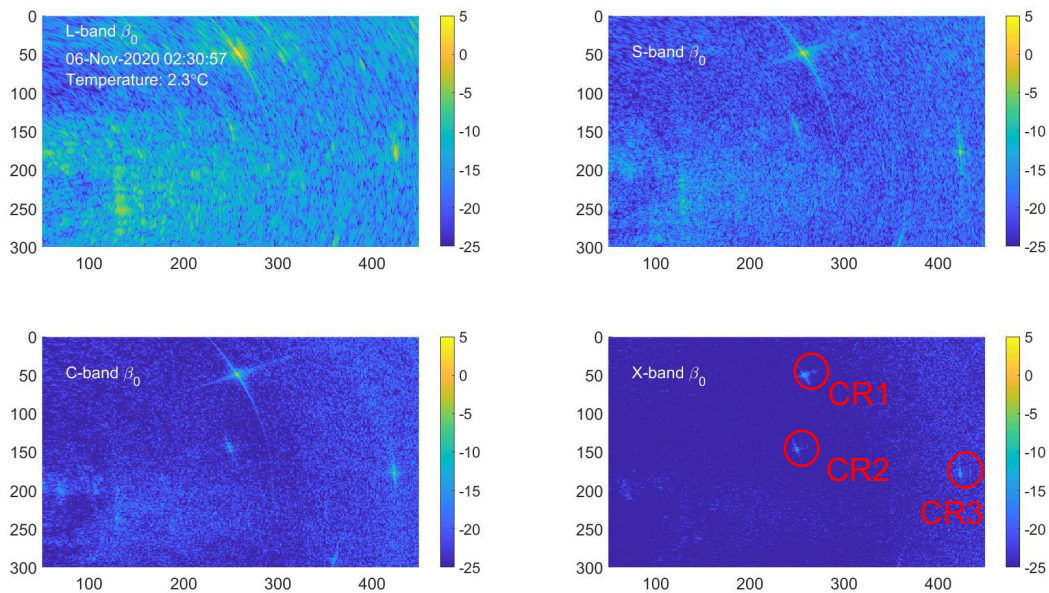




Kuva 5. Esimerkki mittausalueen laserkeilausaineistosta. Poikkileikkaus 3D-pistepilvestä.

### 3.3 Mittausaineisto

Tutkimuksen mittauskampanja toteutettiin suunnitellusti talvella 2020-2021. Kuvassa 6 on esitettyä esimerkki SAR-prosessoinnin avulla fokusoiduista tutkakuvista neljälle taajuuskaistalle (L-alue: 1-2 GHz; S-alue: 3-4 GHz; C-alue: 5-6 GHz; X-alue: 9-10 GHz). Kuvatuna on ns. vertikaali-vertikaali (VV) yhdensuuntaispolarisaation tutkapaikkipinta-ala. SAR-kuvankäsittely SodSAR-tutkan tapauksessa on esitelty tarkemmin erillisessä artikkelissa (Jorge Ruiz et al., 2020).

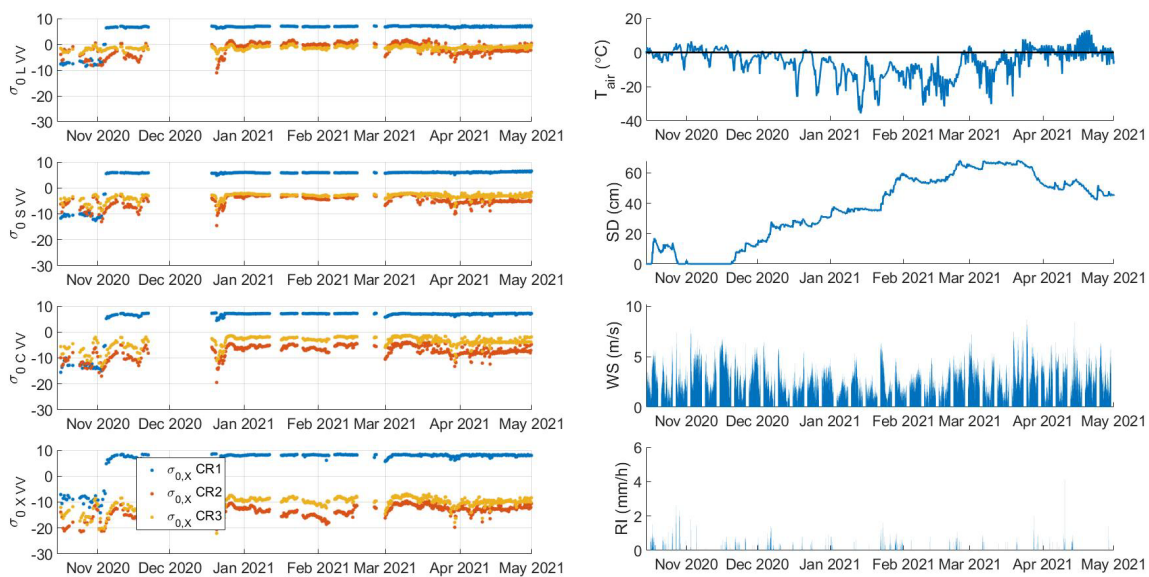


Kuva 6. Esimerkki fokusoiduista SAR-kuvista L-, S-, C-, ja X-alueelle. VV-polarisaatio, 6.11.2020. Kulmaheijastimet erottuvat kuvassa ympäristöä kirkkaampina kohteina. Kulmaheijastimet on ympäröity X-alueen kuvassa; kirkkain kohde ylälaidassa on avoalueelle sijoitettu heijastin (CR1). Mittaussuunta on vasemmalta oikealle.

Kuvassa 7 on esitetty fokusoiduista kuvista eroteltu aikasarja kulmaheijastinten CR1, CR2 ja CR3 vasteesta mittauskampanjan aikana. CR1:n sijainti mahdollisesti esteettömän näköyhteyden tutkaan; mitattu tutkavaste pysyy verraten tasaisena kaikilla taajuusalueilla.

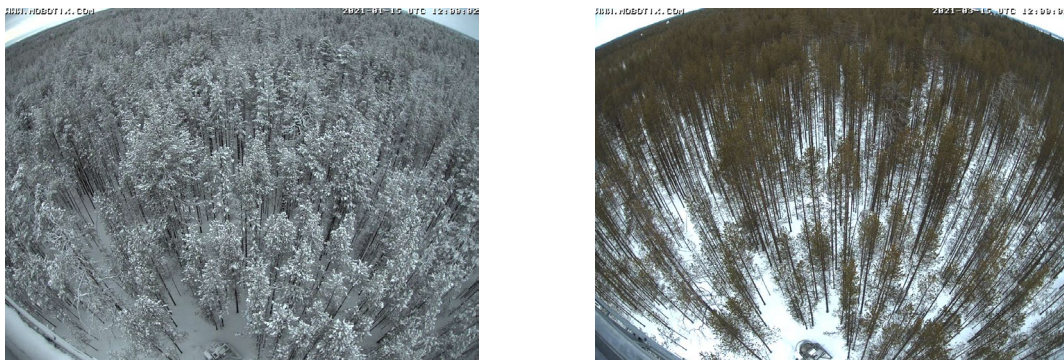
Latvuston alle sijoitettujen CR2 ja CR3 -heijastinten vasteissa on sen sijaan havaittavissa voimakasta vaihtelua.

Joulukuun 2020 mittaukset puuttuvat aikasarjasta tutkan liikutuslaitteiston vikaantumisen vuoksi. Lyhyempi vikaantuminen tapahtui Helmikuun 2021 lopulla. CR1 (avoalueen kulmaheijastin) asetettiin lopulliselle paikalleen lokakuun 2020 lopussa. Kuvan 7 oikealla puolella on myös esitettyinä aikasarjana alueelta mitattu ilman lämpötila, lumen syvyys, tuulennopeus sekä sadanta.



Kuva 7. Mittausaikasarja kulmaheijastinten CR, CR2 ja CR3 sirontapoikkipinta-alasta (vasen sarake) sekä esimerkkejä ympäristön olosuhteista (ilman lämpötila  $T_{air}$ , lumen syvyys (SD), tuulennopeus (WS) ja sadanta (RI)). SAR-kuvan signaalitason desibeliarvot ovat viitteellisiä.

Latvuston tilaa seurattiin myös mastoon asennetulla web-kameralla. Talvella 2021 15.1. ja 15.3. otetuissa valokuvissa (Kuva 8) on helposti havaittavissa ero latvustoon kertyneen tykkylumen määrässä. Lumen määrä arvioitiin kuvista päivittäin kolmeportaisella asteikolla (lumeton, kevyt lumipeite, kattava lumipeite).



Kuva 8. Valvontakamerakuvaa koealueen latvustosta 15. Tammikuuta (vas.) ja 15. Maa-

liskuuta 2021 (oik.).

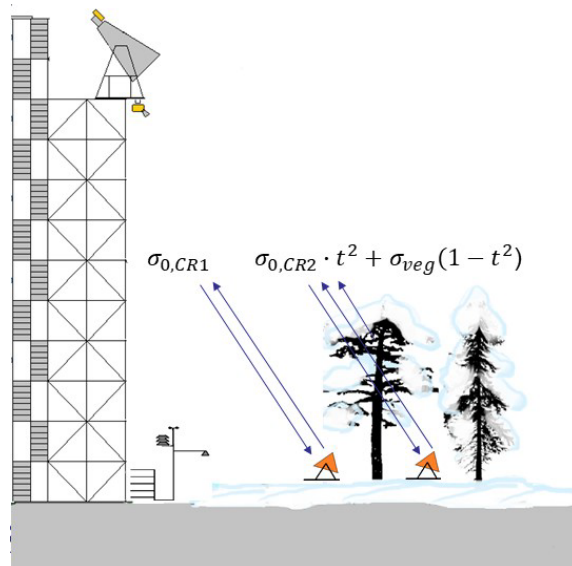
### 3.4 Malli puuston läpäisevyydelle

Puuston vaikutusta tutkan signaalivasteeseen arvoitiin kulmaheijastimista mitatun kokonaisvasteen kautta, verraten avoimella alueella olevan heijastimen (CR1) vastetta latvuston alle sijoitettuihin heijastimiin (CR2 ja CR3). CR2:n ja CR3:n vasteisiin summautuu tällöin paitsi kulmaheijastimen oma takaisinsironta, myös latvuston takaisinsironta. Tämä voidaan esittää yksinkertaisen ns. pilvimallin avulla (Attema & Ulaby, 1987), siten että latvuston alle sijoitettujen heijastinten kokonaisvasteeksi saadaan

$$\sigma_{tot,CRx} = \sigma_{0,CRx} \cdot t^2 + \sigma_{veg}(1-t^2) \quad (1)$$

jossa  $\sigma_{0,CRx}$  on kulmaheijastimen takaisinsirontakerroin,  $t$  puuston yksisuuntainen transmissiivisyys (läpäisykerroin) ja  $\sigma_{veg}$  latvuston takaisinsirontakerroin. Kyseessä on ns. 0-kertaluvun sirontamalli, jota on sovellettu laajalti metsän tutkakaukokartoituksessa. Kuvan 9 tapauksessa, jossa avoalueen kulmaheijastimen CR1 vaste  $\sigma_{0,CR1}$  oletetaan identtiseksi CR2:n kanssa, saadaan puuston transmissiivisyys  $t$  ratkaistua suoraan heijastinten takaisinsirontakerrointen suhteesta ( $t^2 = \sigma_{0,CR1}/\sigma_{0,CR2}$ ), mikäli  $\sigma_{veg} \ll \sigma_{0,CR1,2}$ .

SAR-kuvanmuodostuksessa oma vaikutuksensa on myös kohteen takana sijaitsevien kohteiden takaisinsironnalla, mikäli nämä ovat tarpeeksi korkeita; signaalinkäsittelyssä näiden takaisinsironta summautuu fokusoidussa kuvassa etualan takaisinsirontaan, joka on projisoitu maatasolle (ns. layover-efekti). Toisaalta kohteen havaitsemisen kannalta merkittäväksi tekijäksi muodostuu kohteesta havaittu kokonaisteho suhteessa avoimen alueen kohteeseen ja toisaalta taustan (lehvistö ja maanpinta) tutkavasteeseen; tämän vuoksi tuloksissa on pääosin tarkasteltu suoraan kulmaheijastinten signaalivasteen suhdetta  $\sigma_{0,CR1}/\sigma_{0,CR2}$ .



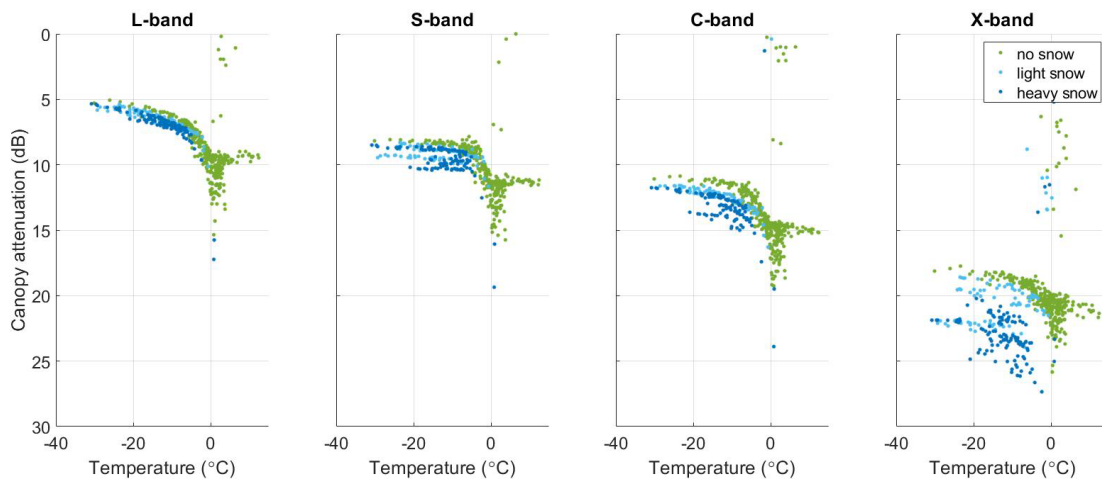
Kuva 9. Havainnekuva avoalueelle sijoitetun ja toisaalta latvuston alla olevan kulmaheijastimen tutkavasteesta. Latvuston alla heijastimesta mitattuun vasteeseen vaikuttavat puuston yksisuuntainen transmissiivisyys  $t$  ja latvuston oma takaisinsironta  $\sigma_{veg}$ .



## 4. Tulokset ja pohdinta

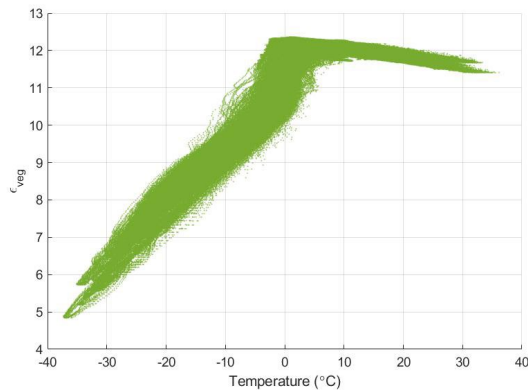
### 4.1 Ympäristön olosuhteiden vaikutus puuston läpäisevyyteen ja taustahäirätykseen

Tutkimuksessa merkittävimäksi tutkavasteeseen vaikuttaviksi tekijöiksi osoittautuivat talvikaudella latvuston fysikaalinen lämpötila kaikilla taajuusalueilla, sekä toisaalta latvustoon kertynyt lumi muilla kuin L--alueella. Kuvassa 10 on esitetty kulmaheijastinten CR1 ja CR2 vasteen suhteesta arvioitu latvuston kaksisuuntainen kokonaisvaimennus ( $t^2$  kaavassa 1) desibeleinä suhteessa ilman lämpötilaan. Kuvattuna on neljä taajuusaluetta (L-, S-, C- ja X-alueet). Matalimmalla taajuusalueella (L-alue, tässä 1-2 GHz) on havaittavissa selkeä vaste lämpötilan suhteen. Latvuston vaimennus on heikoimmillaan, kun lämpötila laskee alle 0 °C, vaimennuksen vähentyessä lähes monotonisesti -5 ja -30 °C:n välillä aina n. 5 dB:iin saakka. Suurin vaimennus (10-12 dB) osuu hieman yli 0°C:n lämpötiloihin, kesäkauden vaimennuksen ollessa n. 9 dB. Vaimennus käyttäytyy pääosin samankaltaisesti korkeammilla taajuusalueilla. Kuitenkin jo S-alueella (2-3 GHz) on nähtävissä latvuston lumipeitteen vaikutus: lumipeitteinen latvusto vaimentaa tutkasignaalia 0.5-2 dB. C- (5-6 GHz) ja X- (9-10 GHz) lumipeitteen vaikutus kasvaa edelleen, kuten myös arvioidun vaimennuksen hajonta. X-alueella lumipeitteisen latvuston vaimennus on jopa 5 dB suurempikuin lumettoman latvuston vaimennus vastaavassa lämpötilassa.



Kuva 10. Latvuston kaksisuuntainen vaimennus ( $t^2$ ) lämpötilan suhteen eri taajuusalueilla. Kuvissa on eroteltu tilanteet, joissa latvusto on ollut lumeton (vihreä) ja lumipeitteinen (sininen).

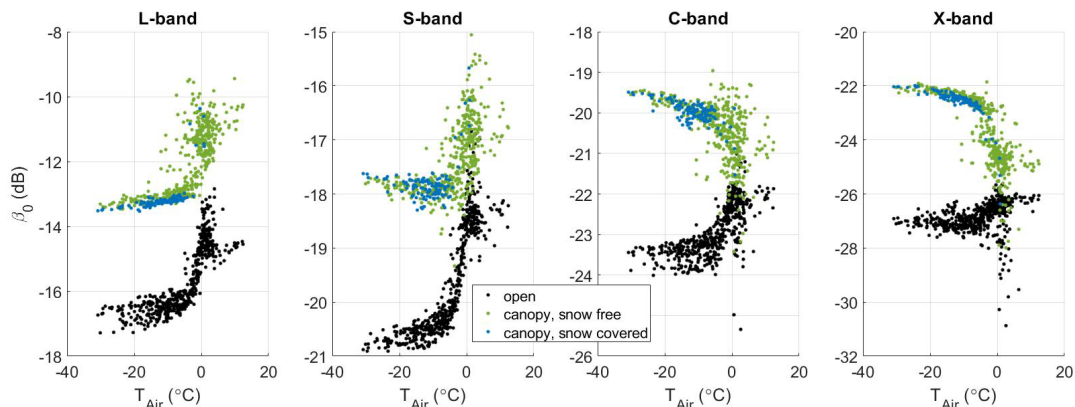
Puuston vaimennusmuutokset lämpötilan suhteen 0 °C:n alapuolella johtuvat jäätyneen ja vapaan veden suhteesta puustossa. Arktisille kasvi- ja puulajeille tyypilliset solutason suojautumismekanismit hidastavat vesijään syntymistä aina -40 °C lämpötiloihin saakka (Havranek & Tranquillini, 1995; Sakai, 1983). Lämpötilan vaikutus on nähtävissä puista mitatussa suhteellisessa permittiivisyydessä (suhde ilman permittiivisyyteen  $\epsilon = 1$ ). Kuvassa 11 on kuvattuna puihin asennetuilla sensoreilla mitattu permittiivisyys (mittaustaajuus 70 MHz). Permittiivisyydessä on nähtävissä käänteinen vaste vaimennukseen nähden, permittiivisyyden lähentyessä ilman permittiivisyyttä alhaisissa lämpötiloissa. Suurin mitattu permittiivisyys saavutetaan 0 °C:n lämpötilassa.



Kuva 11. Puuston permittiivisyys lämpötilan funktiona, mitattuna Sodankylän koalueelta (yhdeksän sensorin keskiarvo, aikasarja 2018-2021).

Kuvassa 12 on esitetty vertailu puuttoman alueen ja metsän ns. taustaherätteen muutoksista eri taajuuksilla lämpötilan funktiona. L- ja S-alueella sekä metsän että avoimen alueen takaisinsironta reagoi pääpiirteittäin samalla tavoin, takaisinsirontan heikentyessä lämpötilan laskiessa alle 0 °C:n. Havaittu n. 3 dB:n signaalitason muutos avoimella alueella vastaa tyypillistä muutosta, joka havaitaan maan jäätyessä ja maanpinnan heijastuskerroimen pienentyessä. Korkeammilla C- ja X-alueen mittauksilla puustosta mitattu takaisinsironta sitä vastoin kasvaa voimakkaasti alle 0 °C:n lämpötiloissa. Tämä saattaa johtua ns. kulmaheijastusvaikutuksen kasvusta jäätyneen maan ja puunrunkojen välillä.

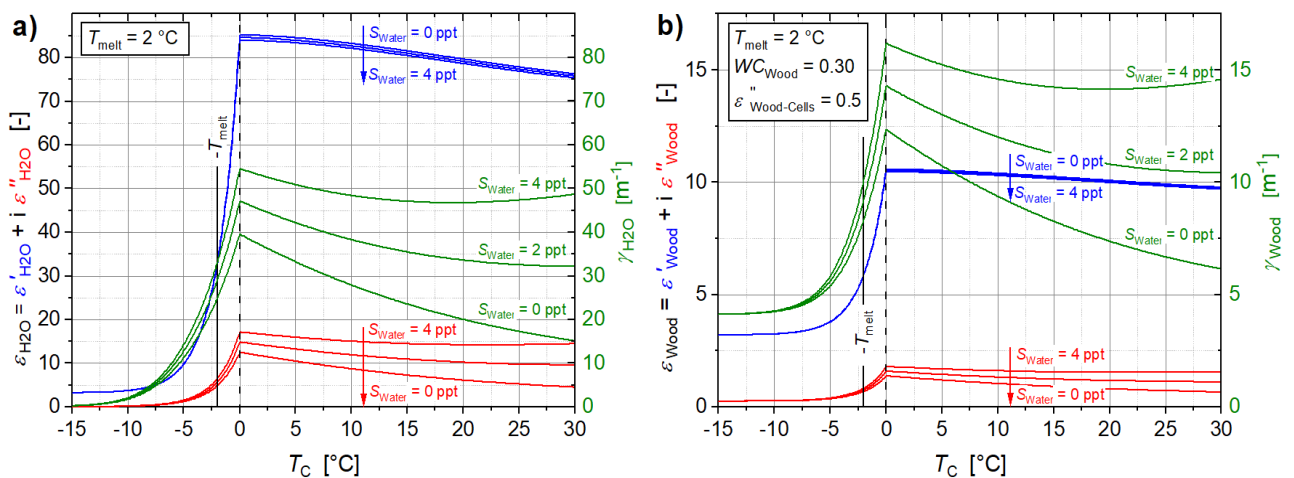
Lumipeitteellä ei vaikuta olleen merkittävää vaikutusta latvuston taustaherätteeseen millään tutkitulla taajuuksialueella, toisin kuin latvuston arvioidun läpäisevyyden kohdalla (Kuva 10). Läpäisevyyden muutokset muodostuvat merkittäviksi vain mikäli latvuston alla oleva kohde on voimakkaasti heijastava. Maanpinnan tapauksessa havaittu taustaheräte on useita desibelejä latvustoa heikompi, jolloin vaimennuksen muutoksilla on vain vähäinen vaikutus. Huom! SAR-kuvan signaalitason absoluuttikalibrointi oli tätä kirjoittaessa kesken, joten desibeliarvot ovat viitteellisiä.



Kuva 12. Puuttoman alan ja metsän aiheuttama taustaheräte eri taajuuksialueilla (huom. signaalin absoluuttinen taso ei kalibroitu). SAR-kuvan signaalitason desibeliarvot ovat viitteellisiä.

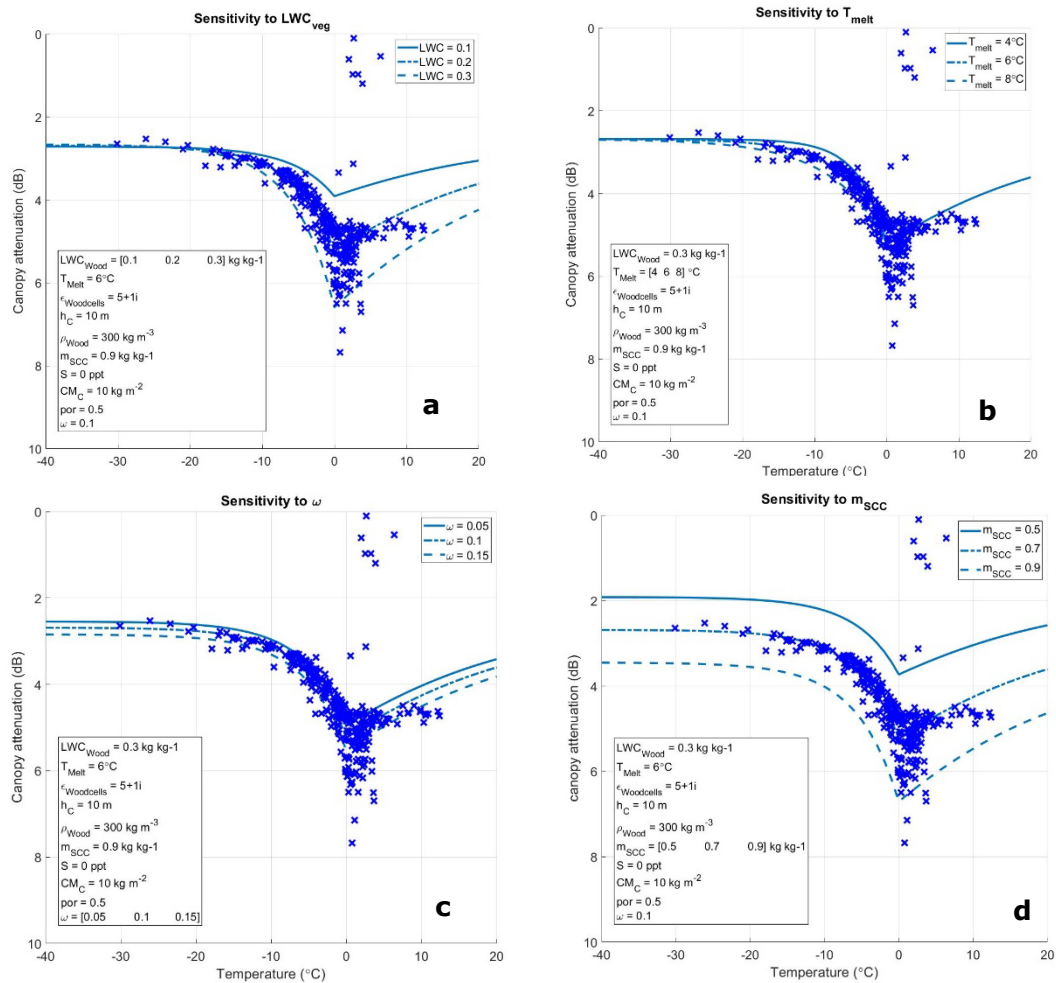
## 4.2 Mallinnettu vaimennus

Puuston transmissiivisyyttä  $t$  kuvaava malli pohjautuu L-alueen passiivi-mikroaaltojen transmissiivisyyttä kuvaavaan malliin (Schwank et al., 2021). Mallissa puuston permittiivisyys määräytyy mm. puuston biomassan, vesimäärän, suolapitoisuuden ja lämpötilan funktiona. Kuvassa 12 on esitetty mallinnettu veden (a) ja puuaineksen (b) kompleksinen permittiivisyys  $\varepsilon$  ja vaimennuskertoimen  $\gamma$  lämpötilan funktiona 1.4 GHz: taajuusalueella. Sekä veden että puuaineksen vaimennuskertoimen kasvaa ensin lämpötilan laskiessa välillä 30 - 0 °C. Veden asteittainen jäätyminen aiheuttaa vaimennuskertoimen nopean laskun 0 °C:n alapuolella.



Kuva 12. Veden (a) ja puuston (b) kompleksista permittiivisyyttä  $\varepsilon$  ja vaimennuskertointa  $\gamma$  kuvaava malli lämpötilan funktiona. Kompleksinen permittiivisyys ja vaimennuskertoimen laskettuna kolmelle eri veden suolapitoisuudelle (0, 2 ja 4 ppt). (Schwank et al., 2021).

Permittiivisyysmallia sovellettiin tutkasignaalin vaimennuskertoimen laskemiseen L-alueella. Kuvassa 13 on verrattu mallin ennustamaa vaimennusta verrattuna mitattuun vaimennukseen L-kaistalla. Poiketen Kuvan 10 tapauksesta kuvissa on huomioitu (sekä mitatussa että mallinnetussa vaimennuksessa) puuston oman takaisinsironnan osuus. Takaisinsironnan laskennassa on sovellettu Rayleigh-sirontamallia olettaen yksinkertaisen sironnan albedon vakioksi ( $\omega = 0.1$ ). Malli on mahdollista sovittaa hyvin havaintoihin; mallinuksessa on tosin käytetty ns. vapaina parametreina puuston vesimäärää (Liquid Water Content, LWC) sironta-albedoa ( $\omega$ ), empiiristä jäätymislämpötilaa  $T_{melt}$  ja ns. pienten sirotajien osuutta biomassasta  $m_{SCC}$ . Näiden ja muiden mallin parametrien tarkempi erittely on esitetty julkaisussa Schwank et al. (2021). Kuvassa 13 on esitetty mallin toteumia näiden tyypillisillä arvoilla. Arvojen, joilla paras sovitus saavutetaan voi todeta olevan realistisia, mutta toisaalta osa näistä on vaikeasti mitattavissa. Mallin jatkokehityksen kannalta olisi olennaista kyetä vähentämään sovitusparametrien määrää, sitoen näitä esim. saatavilla oleviin kirjallisuusarvoihin.

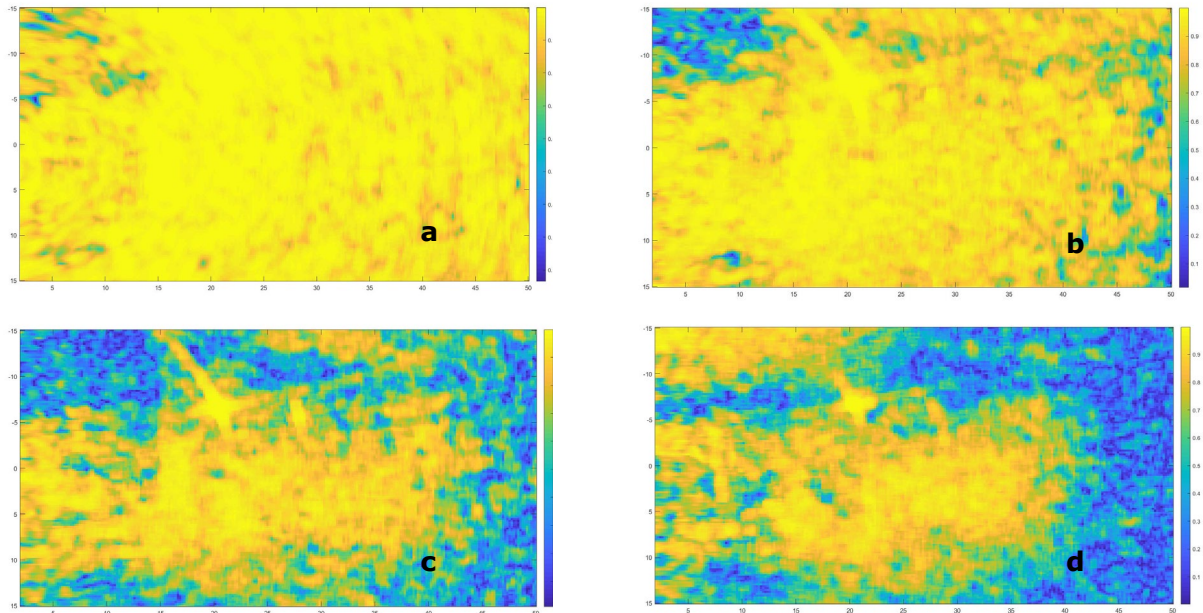


Kuva 13. Puuston kaksisuuntaisen kokonaisvaimennuksen mallinnusesimerkkejä L-alueella. Vaimennuksen laskennassa on huomioitu myös puuston oman takaisinsironnan taso (Rayleigh-sironta). Malliennusteet lämpötilan suhteen puuston vesimäärän (LWC, a), empiirisen sulamislämpötilan ( $T_{melt}$ , b), sironta-albedon ( $\omega$ , c) ja sirottajien suhteellisen osuuden ( $m_{scc}$ , d) eri sovitusarvoilla.

#### 4.2 Puuston vaihekoherenssi

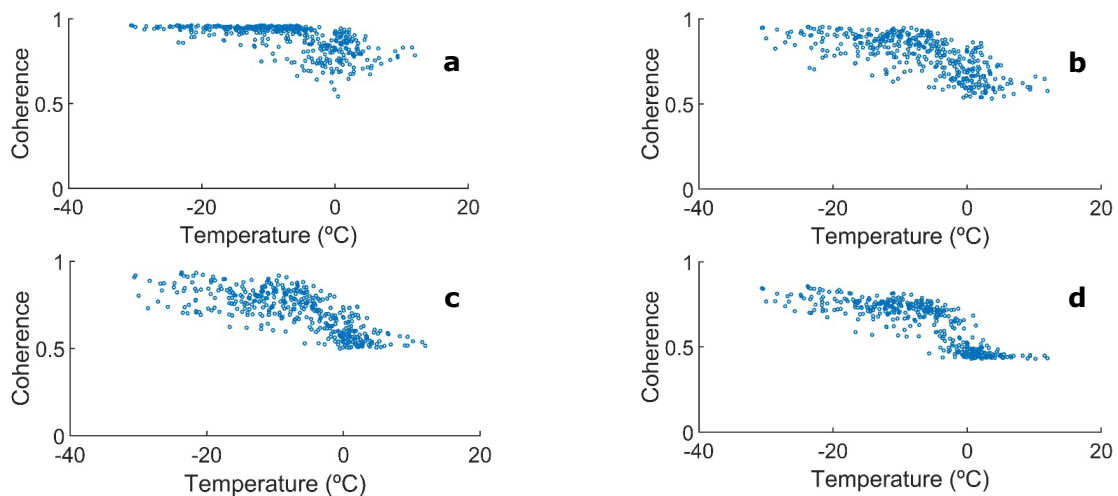
SodSAR-mittaukset mahdollistavat myös vaihekoherenssin muutosten havainnoinnin kahden SAR-kuvan välillä. Koherenssimuutokset kertovat kohteessa tapahtuneista geometrisistä tai muista fysikaalisista muutoksista. SAR-kuvien välistä koherenssia heikentävät esimerkiksi kasvillisuuden, maaperän tai lumen muutokset tuulen, sadannan, lämpötilan tai vaikkapa painaumien vaikutuksesta. Kuvassa 14 on esitetty koherenssin säilyminen kahden, 12 tunnin välein otetun SodSAR-kuvan välillä L-, S-, C-, ja X-kaistoilla. Kuvassa keltainen väri kuvaa koherenssiarvoa 1 (koherenssi on säilynyt), sininen väri koherenssin arvoa 0 (koherenssi on kadonnut). L-kaistan kuvaparin voi havaita säilyttäneen vaihekoherenssin likimain koko kuvan alueella, kun taas korkeammilla taajuuksilla koherenssi heikenee etenkin kuvan vasemmassa laidassa.





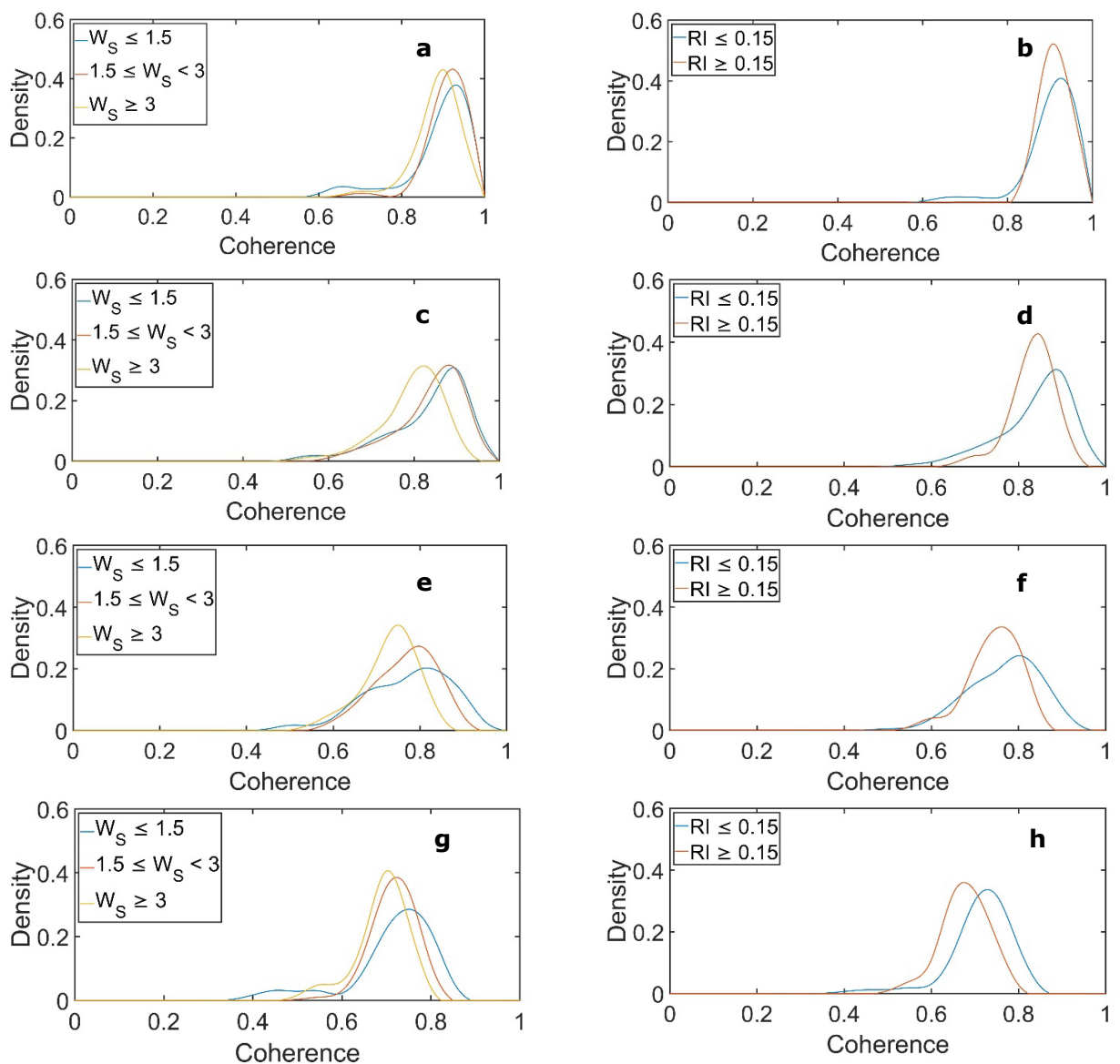
Kuva 14. Esimerkki mitatusta vaihekoherenssista interferometrinen kuvaparien välillä L- (a), S- (b), C- (c) ja X- (d) kaistoilla. Kuvaparit mitattiin 12 tunnin välein keväällä 2020, jolloin kulmaheijastimet eivät olleet lopullisilla paikoillaan (heijastimet erottuvat korkean vaihekoherenssin kohteina C- ja X-kaistan kuvissa).

Sekä lämpötilan että esimerkiksi tuulen ja sadannan havaittiin vaikuttavan vaihekoherenssin säilymiseen. Kuvassa 15 on esitetty kaikkien 2010-2011 mitattujen kuvaparien vaihekoherenssi metsittyneellä alalla (noin 10 x 10 m alue) näiden välissä mitatun maksimilämpötilan suhteen eri taajuusalueilla (kuvien välillä 6 tuntia). Alle 0°C:n lämpötiloissa vaihekoherenssin voi havaita säilyvän erittäin hyvin etenkin L-kaistalla. Mitatun maksimilämpötilan ollessa 0°C:n vaiheilla koherenssi heikkenee kaikilla taajuusalueilla n. 25 %.



Kuva 15. Kuvaparien vaihekoherenssi kuvaparien välisen maksimilämpötilan suhteen L-, S-, C-, ja X-kaistoilla (a-d).

Kuvassa 16 on esitetty histogrammeihin vaihekoherenssin säilyminen kaikkien talvella 2020-2021 mitattujen kuvaparien välillä. Kuvattuna on tuulennopeuden ja sademäärän (sekä vesi- että lumisade) vaikutus eri taajuusalueilla. Tuulennopeus on jaettu kolmeen eri kategoriaan (alle 1.75 m/s, 1.75-3.5 m/s ja yli 3.5 m/s). Sademäärä on vastaavasti jaettuna kahteen kategoriaan (sadanta alle ja yli 0.15mm/tunnissa). L-kaistalla (ylin kuvapari) sadannalla tai tuulennopeudella ei ole mainittavaa vaikutusta. C- ja X-kaistoilla sitä vastoin sekä tuulella että sadannalla on havaittava vaikutus, kasvaneen tuulennopeuksien ja sademäärien korreloidessa heikentyneen koherenssin kanssa. Koherenssi on tosin jo lähtökohtaisesti heikompaa kuin L-kaistalla.



Kuva 16. Tuulen (a, c, e, g) ja sadannan (b, d, g, h) vaikutus vaihekoherenssin säilymiseen L-, S-, C-, ja X-kaistoilla.

## 5. Loppupäätelmät

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää SAR-tutkien kykyä havaita latvuston alle sijoitettuja, voimakkaasti tutkasignaalia heijastavia kohteita eri luonnonoloissa. Tutkimuksen pääpaino oli talvikaudessa; aiemmissa passiivisia mikroaaltoja hyödyntävissä tutkimuksissa oli havaittu latvuston transmissiivisuuden (läpäisevyyden) kasvu korkeilla mikroaaltotaajuuksilla latvuston jäätyessä asteittain. Pohjoisille puulajikkeille ominaiseen tapaan elävässä puuaineksessa oleva vesi ei jäädy kokonaan lämpötilan laskiessa alle veden jäätymispisteen, vaan vapaata vettä voi esiintyä

jopa  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n lämpötiloissa. Mikroaaltosignaalin läpäisevyys latvustossa puolestaan määräytyy latvuston rakenteen ja tiheyden lisäksi suurelta osin puuaineksen sähköisten ominaisuuksien perusteella. Jään ja vapaan veden sähköiset ominaisuudet (mm. permittiivisyys ja sähkön johtavuus) poikkeavat suuresti toisistaan mikroaaltoalueella, jolloin veden jäätymisaste puuaineksessa pitkälti määrittää latvuston sähköiset ominaisuudet talvella. Tutkimuksessa haluttiin selvittää, oliko kyseinen ilmiö todennettavissa myös alemmilla (alle  $10\text{ GHz}$ ) taajuuksilla, jotka ovat yleisemmin käytössä mm. tutkakaukokartoituksessa, ja jotka lähtökohtaisesti läpäisevät latvuston ja puuaineksen korkeampia taajuuksia paremmin. Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään, kuinka eri tekijät (lämpötila, latvuston vesimäärä, permittiivisyys ja latvuston lumipeite) vaikuttavat tutkasignaalin vaimentumiseen ja edelleen kykyyn erottaa havaittu heijastava kohde ympäröivän metsän taustaherätteen keskeltä.

Tutkimuksessa todennettiin pohjoisten havumetsien talviajan muutosten vaikutus tutkasignaalin läpäisevyyteen  $1\text{-}10\text{ GHz}$ :n taajuusalueella. Erityisesti matalalla L-kaistalla ilman ja puuston lämpötilalla havaittiin suora yhteys tutkasignaalin vaimentumiseen latvustossa; latvuston vaimennuksen havaittiin heikkenevän jopa  $6\text{-}8\text{ dB}$   $0$  ja  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n välillä. Voimakkain vaimennus havaittiin  $0\text{-}3\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n välillä kaikilla tutkituilla taajuuskaistoilla.

Latvuston lumipeitteellä havaittiin olevan kasvava vaikutus signaalin vaimennukseen taajuuden kasvaessa. Korkeimmalla mitatulla taajuudella (X-kaista,  $9\text{-}10\text{ GHz}$ ) signaali-vaimennus oli ajoittain samaa suuruusluokkaa tai jopa suurempi kuin kesäkaudella. Lumipeitteen aiheuttama lisävaimennus kuitenkin vaihteli suuresti; vaimennuksen kasvuun näyttäisi vaikuttaneen myös aika, jonka satanut lumi pysyi latvustossa; vaimennus erityisesti X-alueella kasvoi havaittavasti mitä kauemmin latvusto oli saman sadantatapahtuman lumen peittämä. Tämä viittaa rakenteellisiin muutoksiin latvustossa olevassa lumesa, joka on mahdollisesti lisännyt sirontavaimennusta. Latvuston omassa takaisinsironnassa ei kuitenkaan havaittu merkittäviä muutoksia lumen vaikutuksen myötä.

Metsäpeitteiseltä koealalta havaittu ns. taustaheräte kasvoi C- ja X-kaistoilla lämpötilan pudotessa alle  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n. Vertailukohteena olevan avoalueen takaisinsironnassa havaittiin pieni muutos maanpinnan jäätyessä. Ilmiö liittyy mahdollisesti ns. kulmaheijastusvaikutuskomponentin kasvuun puunrunkojen ja maanpinnan välillä korkeilla taajuuksilla. Matalilla L- ja S-kaistoilla kokonaistakaisisironnasta sitä vastoin väheni merkittävästi sekä avomaalla että metsittyneellä alalla.

Kokonaisuutena matalataajuisien (alle C-alueen) tutkasignaalien voidaan todeta omaavan suurimman läpäisykyvyn kohteena olevalla metsätyypillä, ja L-alueen tutkien soveltuvan erityisen hyvin latvuston alle sijoitettujen kohteiden tai esim. maaperän muutosten

(maankosteus, maan jäätyminen) havaitsemiseen matalan tutkavaimennuksen vuoksi. Hyvä läpäisevyys näkyy myös vaihekoherenssin säilymisellä L-alueella etenkin talviaikaan riippumatta sääolosuhteista, joka viittaisi mahdollisuuteen koherenssimuutoksiin perustuvaan havainnointiin myös metsittyneellä alueella. Vaikka korkeammat taajuudet lähtökohdaisesti mahdollistavat suuremman spatiaalisen erottelukyvyn, tutkimus osoittaa harvankin metsätyypin vaikeuttavan kohteiden havainnointia sekä talvi- että kesäkaudella verraten suuren ja vaihtelevan läpäisevyyden vuoksi.

Tulosten voidaan sellaisenaan katsoa pätevän harvalle pohjoiselle mäntymetsälle (biomassa alle 100 m<sup>3</sup>/ha). Lisämittaukset joko torni-, lento-, tai satelliittikäyttöisillä SAR tutkilla ovat tarpeen tutkimustulosten yleistämiseen muille metsätyypeille (kuusimetsät; tiheät seka- ja lehtimetsät).

## 6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Työn tulokset muodostavat olennaisen osan DI J. Jorge Ruizin väitöstyöstä. Tutkimuksen perusteella on julkaistu toistaiseksi yksi vertaisarvioitu artikkeli.

Ruiz, J. R. Vehmas, J. Lemmetyinen, J. Uusitalo, J. Lahtinen, K. Lehtinen, A. Kontu, K. Rautiainen, R. Tarvainen, J. Pulliainen, and J. Praks, 2020 SodSAR: A tower-based 1-10 GHz SAR system for snow, soil and vegetation studies. *Sensors*, 20(22), 6702; <https://doi.org/10.3390/s20226702>.

Lisäksi tekeillä on seuraavat julkaisut:

Ruiz, J., J. Lemmetyinen, A. Kontu, R. Tarvainen, R. Vehmas, J. Pulliainen, and J. Praks (arvioitavana) Effect of environmental factors on coherence loss in SAR interferometry and impact on SWE retrieval. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*.

Ruiz, J., J. Lemmetyinen, A. Kontu, J. Pulliainen, and J. Praks (valmisteilla) Effect of environmental radar transmission and backscatter of a boreal forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*.

Työn tuloksia on lisäksi esitelty kahdessa konferenssijulkaisuissa:

Ruiz, J., J. Lemmetyinen, A. Kontu, R. Tarvainen, R. Vehmas, J. Pulliainen, and J. Praks Analysis of snow coherence conservation for SWE retrieval at L-, S-, C- and X-bands. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 11-16 July 2021, Brussels, Belgium. 10.1109/IGARSS47720.2021.9554103

Ruiz, J., Lemmetyinen, J., Kontu, A., and Pulliainen, J.: Snow Water Equivalent retrieval using L- & C-band InSAR., EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-11066, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-11066>, 2021



## 7. Lähdeluettelo

- Attema and Ulaby, 1978. Vegetation modelled as a water cloud, *Radio Science*, 13, 357-364.
- Cohen, J., Rautiainen, K., Ikonen, J., Lemmetyinen, J., Smolander, T., Vehviläinen, J., and Pulliainen, J. (2019). A modeling-based approach for soil frost detection in the northern boreal Forest region with C-band SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(2), 1069– 1083.
- Guglielmetti, M., M. Schwank, C. Mätzler, C. Oberdörster, J. Vanderborght, and H. Flüher, 2007. Measured microwave radiative transfer properties of a deciduous forest canopy, *Remote Sens, Environ.*, 109, 4, 2007, 523-532.
- Havranek, W., W. Tranquillini, 1995. Physiological Processes during Winter Dormancy and Their Ecological Significance in Ecophysiology of Coniferous Forests, W. Smith and T. Hinckley E d. San Diego, CA, USA: Academic Press, 1995, pp. 95-117.
- Ruiz, J. R. Vehmas, J. Lemmetyinen, J. Uusitalo, J. Lahtinen, K. Lehtinen, A. Kontu, K. Rautiainen, R. Tarvainen, J. Pulliainen, and J. Praks, 2020 SodSAR: A tower-based 1-10 GHz SAR system for snow, soil and vegetation studies. *Sensors*, 20(22), 6702; <https://doi.org/10.3390/s20226702>.
- Kärkkäinen, M., 2003. Puutieteen perusteet. Kustannusosakeyhtiö Metsälehti, Karisto Oy:n kirjapaino, Hämeenlinna, 2003. (ISBN 952-5118-51-7)
- Li, Q., R. Kelly, L. Leppänen, J. Vehviläinen, A. Kontu, J. Lemmetyinen and J. Pulliainen, 2019 (early access). The Influence of Thermal Properties and Canopy-Intercepted Snow on Passive Microwave Transmissivity of a Scots Pine, in *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* doi: 10.1109/TGRS.2019.289934.
- Lintunen, A , Holtta , T & Kulmala , M 2013 , ' Anatomical regulation of ice nucleation and cavitation helps trees to survive freezing and drought stress ' , *Scientific Reports* , vol. 3 , 2031 . <https://doi.org/10.1038/srep02031>
- Montomoli, F., G. Macelloni, M. Brogioni, J. Lemmetyinen, J. Cohen, H. Rott, 2016. Observations and Simulation of Multifrequency SAR Data Over a Snow-Covered Boreal Forest. *IEEE J Selected T. App. Earth Obs. Remote Sens.*, 9(3), 1216-1228. doi: 10.1109/JSTARS.2015.2417999.
- Pulliainen, J., L. Kurvonen and M. T. Hallikainen, 1999. Multitemporal behavior of L- and C-band SAR observations of boreal forests. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 37, 2, 927-937, doi: 10.1109/36.752211.
- Sakai, A., 1983. Comparative study on freezing resistance of conifers with special reference to cold adaptation and its evolutive aspects, *Canadian Journal of Botany*, vol. 61, no. 9, pp. 2323-2332, 1983.
- Schwank, M. A. Kontu, A. Mialon, R. Naderpour, D. Houtz, J. Lemmetyinen, K. Rautiainen, Q. Li, P. Richaume, Y. Kerr and C. Mätzler, 2021. Temperature Effects on L-band Vegetation Optical Depth of a Boreal Forest. *Remote Sens Environ.*, 263, 112542. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112542>.