



Jäänpaksuusmittauksia impulssitutkilla

Kirjoittajat: Ilkka Marttila

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi		
Jäänpaksuusmittauksia impulssitutkilla		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot		Asiakkaan viite
Järvenpään kaupunki (Tony Konkola) Tuusulan kunta (Risto Kanerva) Helsingin kaupunki (Petri Angelvuo) Espoon kaupunki (Tapio Taskinen)		
Projektin nimi		Projektin numero/lyhytnimi
Työ- ja asiakasturvallisuus luonnon jääolosuhteissa		116943/SafeOnIce
Tiivistelmä		
<p>Hankkeen kokonaistavoitteena oli kehittää luonnonjälle tehtävien hiihtolatujen ja luisteluratojen käyttäjien asiakasturvallisuutta ja näiden suorituspaikkojen koneellisen kunnossapidon työturvallisuutta. Hanke toteutettiin kolmessa erillisessä työpaketissa, joista yhden tavoitteena oli kehittää jään paksuuden mittaamenetelmiä.</p> <p>Jään paksuus mitataan yleensä kairaamalla. Jos mittauspaikkoja on paljon, niin menetelmä on työläs ja joissakin tapauksissa reiän tekeminen ei ole suotavaa. Hankkeessa selvitettiin ainetta rikkomattomien menetelmien soveltuvuutta jään paksuuden määrittämiseen testaamalla eri vaihtoehtoja kenttäkohteissa. Nykyään markkinoilla on impulssitutkia, jotka hyödyntävät laajaa taajuuskaistaa pienellä teholla.</p> <p>Suomessa on amerikkalaistutkia ja tutkauspalvelua tarjoavia yrityksiä. Pääsääntöisesti impulssitutkia on kolmea tyyppiä. Yleisin tyyppi on kaksiosainen, jossa antenniosaa kuljetetaan kohteen pinnalla ja toinen osa sisältää hallintaan tarvittavat säädöt ja näytön. Toinen tyyppi on periaatteessa samanlainen mutta antenniosaa kuljetetaan pinnan yläpuolella. Kolmas tyyppi on kompakti laite jossa kaikki osat ovat yhdessä ja samassa kahvallisessa kotelossa. Näitä kolmea tyyppiä voidaan kutsua seuraavasti: korkeataajuinen maatumka, asfalttitutka ja seinätutka. Ensin mainittu soveltui parhaiten jään paksuuden mittaamiseen. Kävelyvauhdilla tehty mittaus sopii hyvin muutaman kilometrin tai lyhemmän jääradan mittaamiseen. Asfalttitutka soveltuu jääteiden mittaamiseen. Seinätutkan tulokset eivät vakuuttaneet, mutta syy voi olla olosuhteissa ja laitteen käytössä uudessa sovelluskohteessa.</p> <p>Saatujen tulosten perusteella impulssitutka soveltuu jään paksuuden mittaamiseen erityisesti kuivissa olosuhteissa eli pakkaskelissä. Lisätarkkuutta saadaan, kun antenni on suoraan jään pinnassa. Impulssitutka ei kuitenkaan pysty erottamaan teräs- ja kohvajään paksuutta, jolloin jään tehollisen paksuuden määrittämiseksi on otettava näytepala. Erottelutarkkuus ja pienin mahdollinen mitattava jään paksuus määrittelevät minimitoimintataajuuden.</p>		
Espoo 20.6.2019		
Laatija	Tarkastaja	Hyväksyjä
		
Ilkka Marttila Tutkija	Pekka Pursula Tutkimustiimin päällikkö	Eila Lehmus Tutkimustiimin päällikkö
VTT:n yhteystiedot		
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, PL 1000, 02044 VTT		
Jakelu (asiakkaat ja VTT)		
Järvenpään kaupunki (Tony Konkola), Tuusulan kunta (Risto Kanerva), Helsingin kaupunki (Petri Angelvuo), Espoon kaupunki (Tapio Taskinen) VTT: arkisto 1 kpl		
<p>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</p>		

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	3
2. Jää, lumi ja vesi	3
3. Impulssitutka.....	4
4. Impulssitutkan tyypit ja valmistajat	6
4.1 PicoR-Ice	6
4.2 Geophysical Survey Systems Inc.....	7
4.3 Penetradar Corporation	7
5. Testit helmikuussa 2019	7
6. Testit huhtikuussa 2019	9
7. Lupakäytäntö	10
8. Tutkauspalveluja tarjoavat yritykset Suomessa.....	11
9. Yhteenveto ja suositukset	12
Lähdeviitteet.....	12
Liitteet	
LIITE 1 Veden ominaisuudet radioaalloilla taajuuden funktiona	
LIITE 2 Jäätutkausta Tuusulanjärvellä 22.2.2019	
LIITE 3 Jäätutkausta Rovaniemellä 9.4.2019	
LIITE 4 Venäläinen ja amerikkalainen tutka	

1. Johdanto

Hankkeen kokonaistavoitteena oli kehittää luonnonjälle tehtävien hiihtolatujen ja luisteluratojen käyttäjien asiakasturvallisuutta sekä näiden suorituspaikkojen koneellisen kunnossapidon työturvallisuutta. Idea on lähtöisin hankkeeseen osallistuvien kaupunkien ja kuntien liikuntatoimien tarpeista.

Jään paksuus mitataan yleensä kairaamalla. Jos mittauspaikkoja on paljon, niin menetelmä on työläs ja joissakin tapauksissa reiän tekeminen ei ole suotavaa. On myös mahdollista käyttää ainetta rikkomattomia menetelmiä jään paksuuden määrittämiseen. Paras niistä on radioaaltojen käyttö. Jo 80-luvulla Teknillisen Korkeakoulun Radiolaboratoriossa kehitettiin FM-tutka jään paksuuden mittaamiseen ja aiheesta tehtiin opinnäytetyö.

Nykyään on markkinoilla impulssitutkia, jotka hyödyntävät laajaa taajuuskaistaa pienellä teholla. Tarjolla on amerikkalaisia maatumkia (Ground Penetrating Radar) ja venäläinen PicoR-ice, joka on tehty nimenomaan jään paksuuden mittaamiseen. Suomessa on amerikkalaistutkia ja tutkauspalvelua tarjoavia yrityksiä.

Jään paksuutta ei tutkilla juurikaan ole mitattu. Sellaiseen ei ilmeisesti ole ollut tarvetta. Tämä raportti kertoo selvästi tutkimuksen käyttökelpoisuudesta. Pääsääntöisesti impulssitutkia on kolmea tyyppiä. Yleisin tyyppi on kaksiosainen, jossa antenniosaa kuljetetaan kohteen pinnalla ja toinen osa sisältää hallintaan tarvittavat säädöt ja näytön. Toinen tyyppi on periaatteessa samanlainen mutta antenniosaa kuljetetaan pinnan yläpuolella. Kolmas tyyppi on kompakti laite, jossa kaikki osat ovat yhdessä ja samassa kahvallisessa kotelossa.

2. Jää, lumi ja vesi

Jäätä muodostuu, kun vesi ja ilma kylmenevät riittävästi. Sen jälkeen teräsjäätä muodostuu lisää jään alapinnalle. Jos lunta sataa jään päälle, lumi toimii eristeenä ja jään muodostus hidastuu. Kun lunta tulee paljon, niin sen paino murtaa jään ja vettä pääsee jään yläpinnalle. Kun se jäätyy, niin syntyy kohvaa, joka on teräsjäätä heikompaa. Joskus käy niin että vesikerroksen jäätyessä pinnalta, jääkerrosten väliin jää vesikerros ja sillä on vaikutusta jään kantavuuteen.

Radioaalto kulkee väliaineessa hitaammin kuin ilmassa. Aineen dielektrisyysvakio ε eli permittivisyys kuvaa tätä ominaisuutta. Käyttökelpoinen suure on taitekerroin, joka on tämän vakion (suhteellinen arvo ε_r) neliöjuuri. Vedellä tämä arvo pienillä taajuuksilla on $\sqrt{88}$, kun lämpötila on 0 °C. Teräsjäällä arvo on $\sqrt{3.2}$. Muun jään (kohva) ja lumen tapauksessa ei päädytä näin selkeisiin lukuihin. Kun lumikerros kasvaa, pinnalla on kevyttä lunta, joka tiivistyy syvemmillä ja saattaa muuttua alempana kohvajääksi. On kuitenkin löydetty suhteellisen tarkka kaava $1/\rho$ kuivalle lumelle, kun muuttujana on tiheys. Myös kohvajään tapauksessa voidaan käyttää samaa kaavaa.

$$\sqrt{\varepsilon_r} = 1 + 0.845\rho$$

Aallonpituus aineessa riippuu valon nopeudesta tyhjiössä c , aineen dielektrisyysvakiosta ja taajuudesta f .

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon_r}}$$

Lämpötila vaikuttaa veden ominaisuuksiin. Ne etenevät vedessä matalilla taajuuksilla hyvin, mutta suurilla taajuuksilla huonosti. Asiaa kuvaa tunkeutumissyvyys. Se sekä neljännesaallon pituus jäässä on taulukoitu taajuuden funktiona seuraavassa.

taajuus [MHz]	tunkeutumissyvyys vedessä [mm]	neljännesaallon pituus jäässä [mm]
100	476	419
200	415	210
500	220	84
1000	82	42
1500	41	28
3000	11	14

Taulukko kertoo, että vedestä on haittaa ja sitä enemmän mitä suurempi taajuus on. On siis järkevää toimia kuivissa olosuhteissa eli pakkaskelissä. Neljännesaalto jäässä kertoo erottelukyvystä, josta seuraavassa luvussa enemmän.

3. Impulssitutka

Impulssitutka lähettää lyhyitä pulsseja. Ne etenevät väliaineissa eri nopeuksilla. Jos väliaineita on vain yksi niin etäisyyden s ja kulkuajan t välillä on yksinkertainen yhteys, joka riippuu valon nopeudesta c ja taitekertoimesta.

$$2s = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} t$$

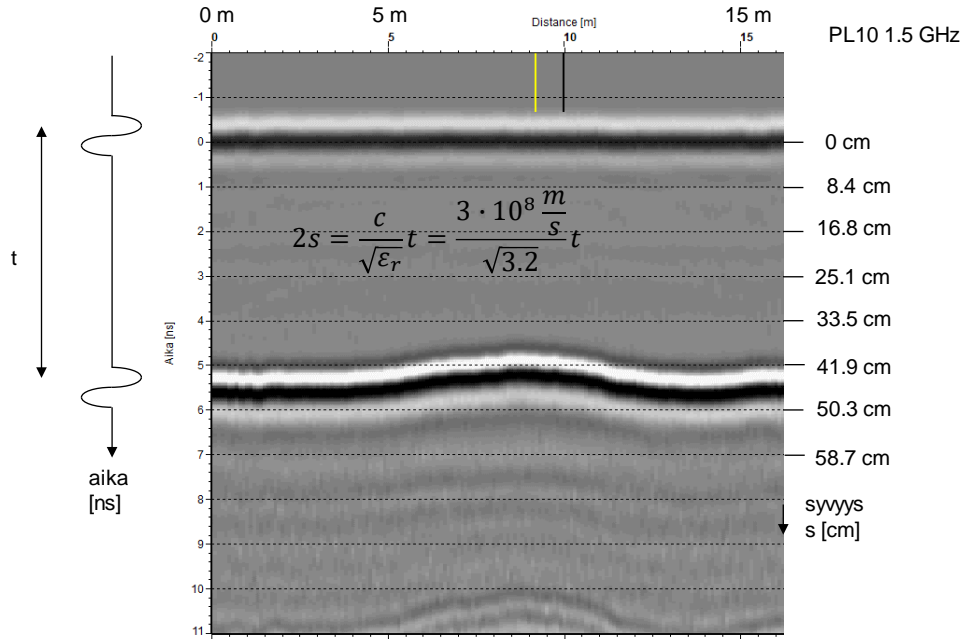
Lähetyspulssi on suorakaiteen muotoinen tutkan sisässä. Sen ulkopuolella pulssi on karkeasti ottaen siniaaltoa. Pulssinleveyden τ ja toimintataajuuden f_0 välillä on yhteys.

$$f_0 = \frac{1}{2\tau}$$

Differentioimalla etäisyyden kaava ja sijoittamalla siihen pulssinleveys saadaan laskettua resoluutio, joka paljastuu neljännesaallon suuruiseksi.

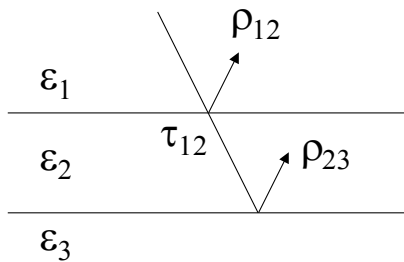
$$\Delta s = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \Delta t = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \tau = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \frac{1}{2f_0}$$

Kun pulssi kulkee monien rajapintojen läpi, niin se pitenee. Vastaanotettu pulssi käsitellään niin, että heikko taso näytetään harmaana, voimakas positiivinen signaali näytetään valkoisena ja voimakas negatiivinen signaali mustana. Näin saatu juova laitetaan peräkkäin muiden juovien viereen ja saadaan aikaan raitakuva, josta tulokset voidaan lukea.



Kuva 1. Esimerkki impulssitutkauksen tuloksesta.

Dielektrisyysvakioista voidaan laskea rajapintojen heijastus- ja läpäisykertoimet. Ne kertovat, että radioaallot heijastuvat jään ja veden rajapinnasta voimakkaasti. Lumen ja jään rajapinnasta tulee myös selvä heijastus. Sen sijaan lumen pintaheijastus on heikko, ellei siinä ole selvästi erottuvaa kuorta. Seuraavassa kuvassa näkyy kolmen rajapinnan tapaus. Laskelmien numeroarvot liittyvät aineisiin ilma, teräsjää ja vesi. Kaavat pätevät kohtisuorassa tapauksessa.



$$\rho_{12} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} = \frac{\sqrt{1} - \sqrt{3.2}}{\sqrt{1} + \sqrt{3.2}} = -0.28$$

$$\tau_{12} = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} = 0.72$$

$$\rho_{23} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r3}}}{\sqrt{\epsilon_{r3}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} = \frac{\sqrt{3.2} - \sqrt{88}}{\sqrt{3.2} + \sqrt{88}} = -0.68$$

4. Impulssitutkan tyypit ja valmistajat

Kuten johdannossa kerrottiin, niin impulssitutkia on kolmea tyyppiä. Yleisin tyyppi on kaksiosainen, jossa antenniosaa kuljetetaan kohteen pinnalla ja toinen osa sisältää hallintaan tarvittavat säädöt ja näytön. Kuljetus tapahtuu yleensä manuaalisesti eli kävellen. Hitaalla vauhdilla antenni liikkuu pomppimatta.

Toinen tyyppi on periaatteessa samanlainen mutta antenniosaa kuljetetaan pinnan yläpuolella. Haittana tässä on rajapintojen lukumäärän kasvu. Antenni näkee myös sivuille. Tuloksena saadaan ylimääräisiä heijastuksia ja pitempiä raitakuvioita. Tällainen tutka voidaan asentaa ajoneuvoon ja mittausnopeutta voidaan kasvattaa oleellisesti. Tärkeä sovellus on tien päällysteen paksuuden mittaus, jolloin kyseessä on asfalttitutka.

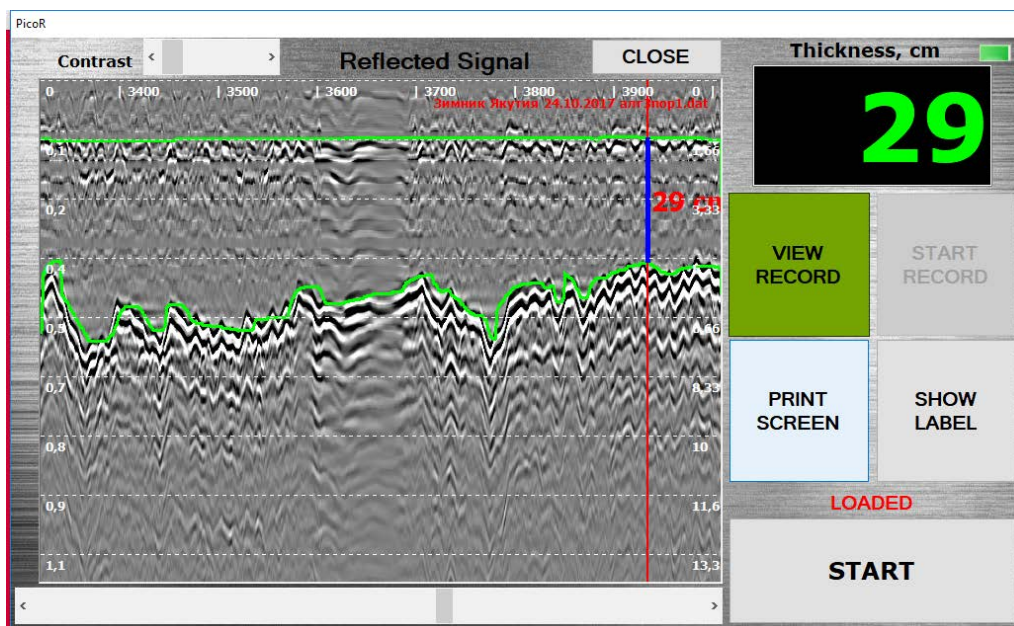
Kolmas tutkatyyppi on kompakti laite jossa kaikki osat ovat yhdessä ja samassa kahvallisessa kotelossa. Laitteesta käytetään nimeä käsiskanneri tai seinätutka.

Pinnan yläpuolella pidettävää antennia kutsutaan ilmastantenniksi. Se välttää lähikenttäongelmia, mutta vastassa on enemmän rajapintoja. Pinnan tasalla pidettäviä antenneja kutsutaan vastaavasti maavasteantenneiksi. Antennit ja vastaanottimet ovat erilaiset, joten tutka ei toimi hyvin muualla kuin omalla alueellaan. Seuraavissa kappaleissa kerrotaan yhden venäläis- ja kahden amerikkalaisvalmistajan laitteista.

4.1 PicoR-Ice

Venäläisten PicoR-ice on tehty nimenomaan jään paksuuden mittaamiseen. Tutkaa käytetään laajasti Venäjällä. Käyttöliittymän kieli on venäjää, kiinaa tai englantia, joka kertoo kohderyhmistä. Tutkalla ei toistaiseksi ole EU-hyväksyntää. Tutkassa on ilmastantenni ja se on yleensä kiinnitetty ajoneuvoon. Signaalinkäsittely erottelee jään pinnan ja pohjan heijastukset ja laskee niistä jään paksuuden. Pinnan korjaamista nolatasoon ja vauhdista riippumattomasti matkaskaalaa ei ole toistaiseksi saatavissa. Seuraavasta nettiosoitteesta löytyy lisätietoa.

www.ledomer.ru



Kuva 2. Impulssitutka PicoR-ice mittaustulos jäällä Venäjällä. Skaalausyksikkö vasemmalla ja ylhäällä on metri.

4.2 Geophysical Survey Systems Inc

GSSI:n laitevalikoima on vaikuttava ja niitä käytetään ympäri maapallon. Suurin osa näyttää olevan manuaalisesti pyörillä liikuteltavia, joissa antenni on suorassa kontaktissa maahan. Osa on kädessä pidettäviä malleja. Nettiosoite on:

www.geophysical.com

Pääsivulta pääsee tuotteisiin, josta löytyy 12 laitetta. Niistä ei suoraan voi päätellä, mikä sopisi jään mittaamiseen. Kun palataan pääsivulle, niin sovelluksista löytyy maali käyttäen reittiä solutions/geology and geophysics/ice and snow/ice and snow. Sovellus käyttää keskusyksikköä SIR 4000 ja 400 MHz:n antennia. Sillä on mitattu jääteitä ja Etelämantereen jäätikköä.

Suomessa on muutamia GSSI:n asfalttitutkia, jotka on yleensä rakennettu pakettiautoon. Tutkassa on ilmastiantenni, jopa kaksikin. Niiden pitää olla selvästi irti pinnasta, jolloin ne myös häiriintyvät ympäristöstä, myös ajoneuvosta. Tämän vuoksi tarvitaan puomi. Varren pään liike suhteessa tiehen on merkittävää. Tämä pystytään tuloksissa kompensoimaan. Muita hienouksia on mm pinnan ϵ_r :n laskenta, jolla kuitenkin ei jäämittauksessa ole oleellista hyötyä. Tällaista tutkaa käytettiin huhtikuun mittauksissa.

GSSI:n nettisivuilta löytyy kaksi seinätutkaa. Niiden ominaisuuksia on listattu seuraavaan taulukkoon. Taulukossa on myös huhtikuussa testattu StructureScan Mini HR, jota ei enää ole myynnissä.

seinätutkan nimi	taajuus [GHz]	kantama [cm]	paino [kg]	ohjehinta [€]
StructureScan Mini XT	2,7	60	1,8	16 500
StructureScan Mini LT	1,6	50	1,6	11 000
StructureScan Mini HR	2,6	40	1,6	

Hinnat on saatu GSSI:n maahantuojalta (Geo-work). Helmikuun testien 1.5 GHz:n kaluston yhteishinta on noin 29 000 €

4.3 Penetradar Corporation

Yhtiön GPR-laitteet koostuvat antenniosasta, jossa on myös lähetin ja keskusyksiköstä. Yhtiö käyttää laitteistaan lyhennettä IRIS = Integrated Radar Inspection System. Antenniosan koodi paljastaa taajuusalueen. 301B toimii 300 MHz:n taajuudella ja 2501B 2500 MHz:llä. Välissä on 4 muuta tyyppiä. Malleja on useita. Kevyimmät muistuttavat raivaussahaa. Seuraavasta nettiosoitteesta löytyy lisätietoa.

www.penetradar.com

Kotisivuilta löytyy myös asiakasrekisteri missä on lähes 100 asiakasta ympäri maapallon.

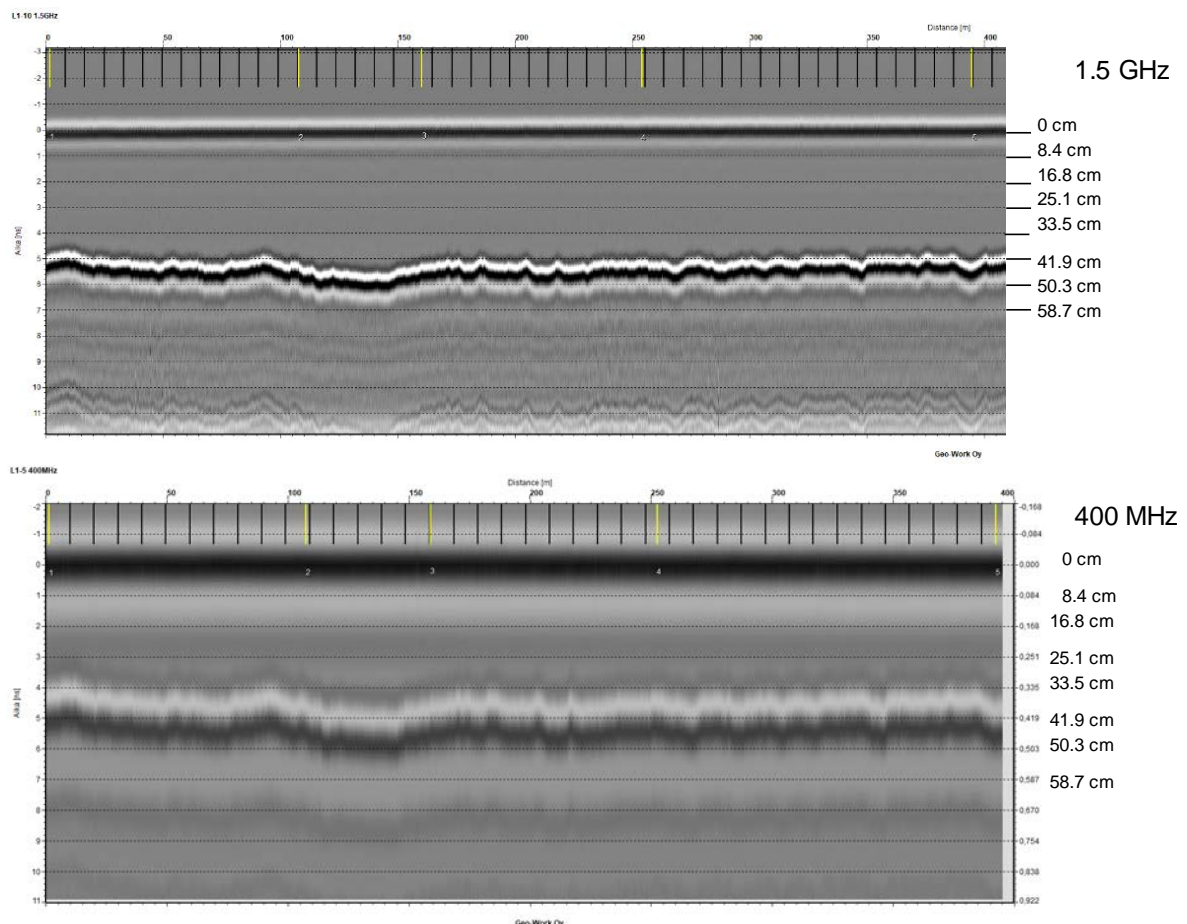
5. Testit helmikuussa 2019

Helmikuun testejä jouduttiin olosuhteiden takia siirtämään kahdesti, kunnes ne saatiin toteutettua 22. päivä. Kokeet haluttiin tehdä kuivissa olosuhteissa eli pakkaskelillä, ja niitä oli kaksi peräkkäistä päivää. Edellisenä päivänä tutkauspalvelun tarjoaja Geo-Work teki testejä

omin voimin, jolloin mittauspäivänä päästiin nopeasti alkuun. Ennen mittauksia sää oli lämmin pitemmän aikaa ja lumi oli sulanut jään päältä. Vain luistinradan lumipenkköjen kohdalla oli jäljellä sulamatonta lunta.

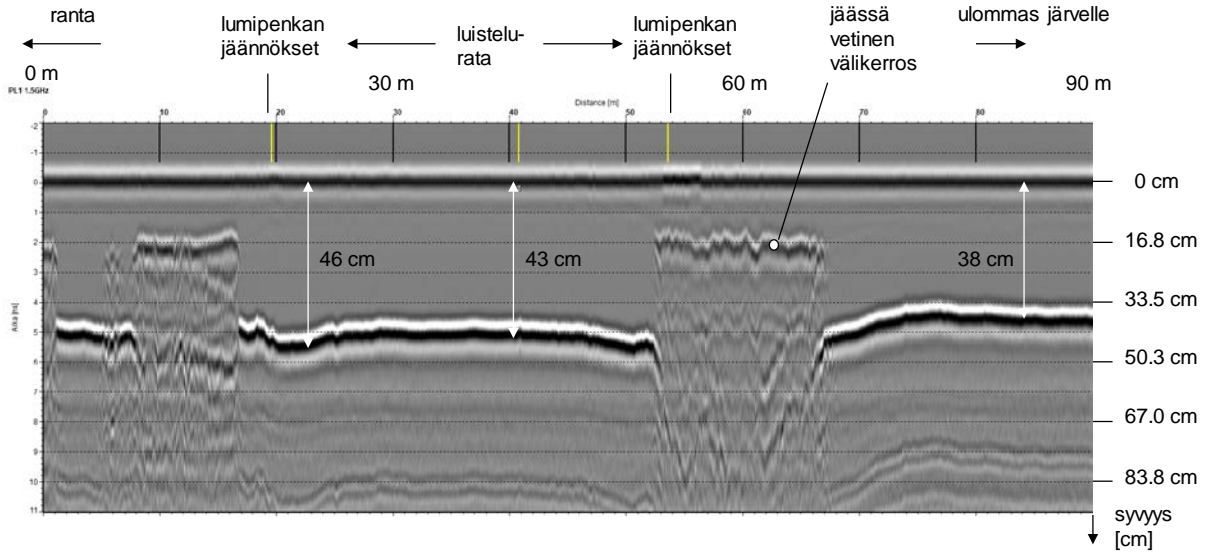
Mittauksissa käytettiin GSSI:n SIR 3000 keskusyksikköä ja kahta antennia taajuuksiltaan 1,5 GHz ja 400 MHz. Edellistä kuljetettiin pyörällisessä lastenkärryjä muistuttavassa kuljetusalustassa. Se oli oivallinen rakenne jääolosuhteisiin. Ergonomia oli hyvä, näyttöä oli helppo tarkkailla ja antenni oli myös näkökentässä. 400 MHz:n antennia raahattiin perässä. Keskusyksikkö oli rinkassa. Laitteet olivat kevyitä, joten liikkuminen ei ollut juurikaan kävelyä raskaampaa. Liitteessä 2 on valokuvat molemmista laitteista. toisessa erottuu selvästi matkapyörä, jolla saatiin aikaan nopeudesta riippumaton matkaskaala kuviin.

Pääosa mittauksista tehtiin luistinradalla. Ennen sitä mitattiin lyhyt veto radan ulkopuolella ja tehtiin testiavanto. Irti kairatutu jääpala oli 43 cm paksu, josta teräsjäätä oli 18 cm. Vertaamalla jäänpaksuutta kulkuaikaan saatiin suhteelliseksi dielektrisyysvakioksi 3,2, jota käytettiin kaikissa Tuusulanjärven mittauksissa. Niitä kertyi paljon. Radasta mitattiin 1 km ja 10 poikkileikkausta 1,5 GHz:n taajuudella. Sama tehtiin vielä 400 MHz:llä, mutta vain puolet määräst. Seuraavassa kuvassa on luisteluradan tutkaustulos molemmilla taajuuksilla. Kuivissa olosuhteissa suurempi taajuus antaa tarkempia tuloksia kuten oli oletettavaakin.



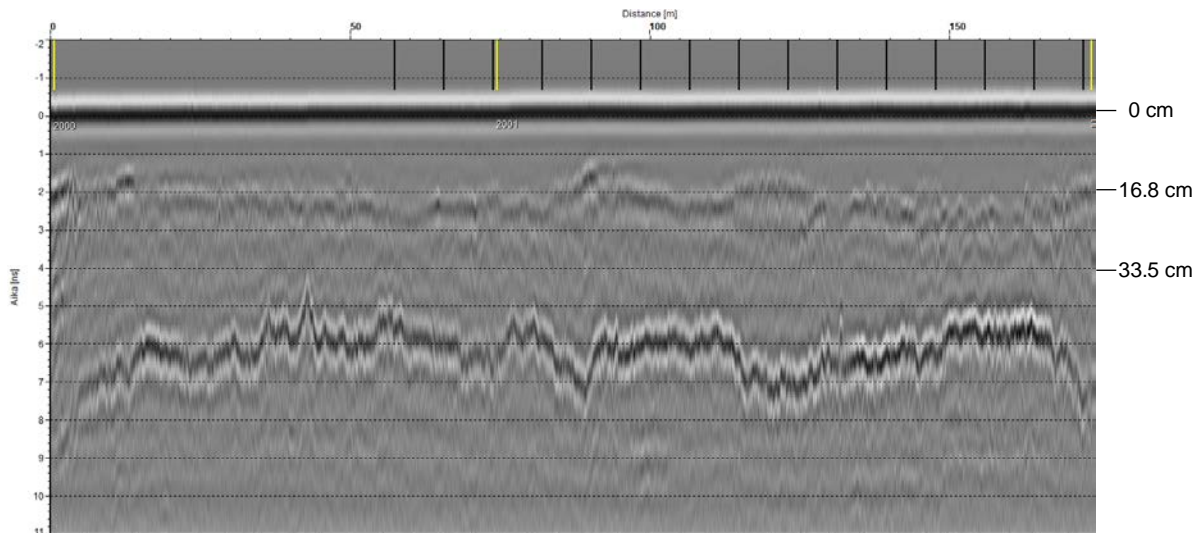
Kuva 3. Luisteluradan (400 m) tutkaustulos 1,5 GHz:llä (yllä) ja 400 MHz:llä (alla).

Mielenkiintoisempi tulos saavutettiin pohjoispään poikkileikkauksessa. Siellä oli jään sisäisiä vesikerroksia, jotka olivat aiheutuneet auratusta lumesta. Vesikerroksen alapuolisesta jäästä ei erottunut mitään selvää, ei edes 400 MHz:llä. Toinen merkille pantava seikka oli se, että radan keskellä oli ohuempaa jäätä. Se johtui lumipenkoista sulaneesta vedestä, joka jäätyi ja kerrytti jäätä enemmän penkköjen lähelle. Toki lumipenkköjen jäännöksetkin vaikuttivat.



Kuva 4. Luisteluradan pohjoispään poikkileikkaus 1,5 GHz:llä.

Päivän loppuksi käytiin meren jäällä, josta tuloksena seuraava kuva, jossa radan pituus oli 170 m. Siinä näkyy selvästi kaksi kerrosta, josta ylempi on jään sisäinen vesikerros. Pisteessä 2001 mitattiin avannosta 38 cm jäätä. Millään järkevällä ϵ_r arvolla ei vastaavuutta saada. Onkin oletettavaa, että vesikerros hidastaa radioaaltoja niin, että pohjalta tuleva kaiku viivästyy. Kuvasta näkyy sellainen lainalaisuus, että vesikerroksen ollessa syvemmällä pohjakaiku on korkeammalla ja päinvastoin. Näin ollen syvyysasteikon lisääminen pohjalle asti muun kuin ajan suhteen olisi arvausta. Kuva tehtiin 1,5 GHz:n kalustolla. Rata mitattiin myös 400 MHz:llä ja siinä näkyi samat asiat mutta epäselvemmin.

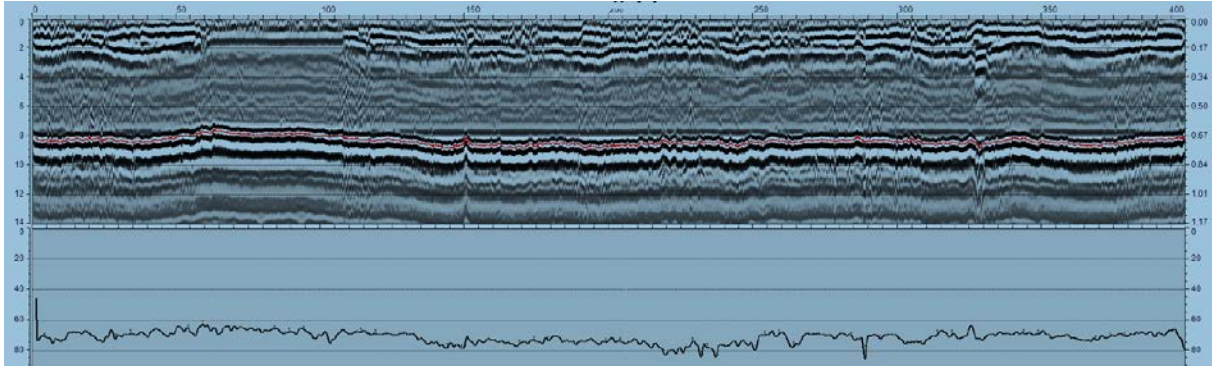


Kuva 5. Mittausrata merijäällä, taajuus 1,5 GHz, matka 170 m ja alareunan syvyys 11 ns.

6. Testit huhtikuussa 2019

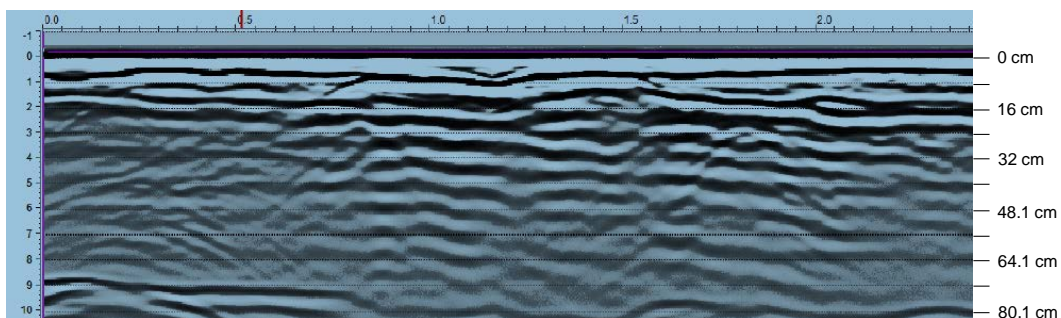
Mittauksissa käytettiin GSSI:n SIR 30 keskusyksikköä ja 2 GHz:n antenneja. Laitteista muodostuu asfalttitutka. Lämpimien säiden ja vetisyyden takia jääteiden mittaukset siirtyivät maaliskuulta huhtikuulle. Huhtikuun aamupakkasten myötä voitiin mitata, kun paikka

vaihdettiin jääradaksi Rovaniemen Vanttausjärvellä. Kuvassa näkyy jään profiili. Laitteistossa on ominaisuuksia, jolla jään pintaheijastus saadaan samalle tasolle ja myös jään paksuus laskettua, joka näkyy käyränä tutkakuvan alla. Sen paksuus oli noin 70 cm.



Kuva 6. Mittaus järviradalla, taajuus 2 GHz, matka 400 m ja alareunan syvyys 14 ns.

Myös seinätutkalla mitattiin. Se oli saman yhtiön Structure Scan Mini HR ja taajuus 2,6 GHz. Kuvassa näyttäisi erottuvan jään pohja, mutta se jää osittain kuvan alapuolelle riittämättömän kantaman takia.



Kuva 7. Mittaus seinätutkalla, taajuus 2,6 GHz, matka 2,4 m ja alareunan syvyys 10 ns.

Liitteessä 3 on valokuvat tutkista. Mittaukset suoritti Roadscanners Rovaniemeltä.

7. Lupakäytäntö

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom on liikenteen ja viestinnän lupa-, rekisteröinti- ja hyväksyntä- sekä turvallisuusviranomainen. Sen internet-sivuilta löytyy ohjeita radiolähettilien käytöstä. Jotkut lähettilimet ovat luvasta vapautettuja, mutta näihin eivät kuulu maa- ja seinätutkat taajuusalueella 30–12 400 MHz. Seuraavat kaksi kappaletta on suoraan kopioitu viraston sivuilta.

Voit hakea radiolupaa maatutkalle tai seinätutkalle vapaamuotoisella hakemuksella yhteydenottolomakkeen kautta. Hakemuksessa on annettava seuraavat tiedot:

- Asiakastiedot: yrityksen nimi, osoite, puhelinnumero ja y-tunnus sekä asiaa hoitavan henkilön nimi;
- Radiolaitteen käyttötarkoitus ja käyttöpaikka, esim. maaperätutkimus rakennuskohteissa, käyttöalue koko Suomi;

- Selvitys käytettävästä laitteistosta, keskusyksiköiden lukumäärä ja yksilöintitiedot sekä antenniyksiköiden lukumäärä ja yksilöintitiedot mukaan lukien kunkin antenniyksikön käyttämä taajuusalue.

Radiolaite on langaton laite, joka käyttää radiotaajuuksia. On tärkeää, että radiolaite käyttää sille tarkoitettua taajuutta. Jotta radiolaitteet eivät häiritsisi muita radiolaitteita tai häiriintyisi muista radiolaitteista, niiden tulee täyttää niille EU-alueella asetetut vaatimukset. EU-alueella saa myydä ja käyttää vain radiolaitteita, jotka täyttävät niille asetetut vaatimukset. Traficom valvoo Suomessa myytävien radiolaitteiden vaatimustenmukaisuutta.

Lisäksi valmistajille, maahantuojille ja jakelijoille annetaan seuraavat ohjeet:

Ennen kuin otat radiolaitteen tuotevalikoimaan, huolehdiathan mm. että

- laitteessa ja pakkauksessa on CE-merkintä,
- laitteen mukana on valmistajan laatima EU-vaatimustenmukaisuusvakuutus (EU Declaration of conformity, DoC),
- laitteen mukana on käyttöohje suomeksi ja ruotsiksi,
- laitteen mukana on maahantuojan yhteystiedot.

8. Tutkauspalveluja tarjoavat yritykset Suomessa

Suomessa on muutamia yrityksiä, jotka tarjoavat tutkauspalveluja. Niitä löytyy internetistä hakusanoilla maatutka, maatutkaluotaus ja GPR-tutka. Seuraava lista kertoo aakkosjärjestyksessä nimet, toimipaikat ja nettiosoitteet.

Carement
Rovaniemi, valtakunnallinen
www.carement.fi

Geofcon
Rovaniemi
www.geofcon.fi

Geologian tutkimuskeskus
Itä-Suomi
www.gtk.fi

Geovisor
Rovaniemi, Oulu ja Espoo, valtakunnallinen
www.geovisor.fi

Geo-Work Oy
Vääksy
www.geo-work.com

Insinööritoimisto Toikka Oy
Espoo
www.toikkaoy.com

Nevia
valtakunnallinen
www.nevia.fi

RC-Infra Oy
Ulvila
www.rcinfra.fi

Road Consulting
Rovaniemi, valtakunnallinen
www.roadconsulting.fi

Roadscanners
Rovaniemi ja Tampere, kansainvälinen
www.roadscanners.com

Yleensä palvelun tarjoajilla on useita laitteita ja GPS, jolla mitattu reitti paikallistetaan.

9. Yhteenveto ja suositukset

Projektissa selvitettiin mahdollisuuksia mitata jään kantavuutta sitä rikkomatta. Tehtyjen kokeiden perusteella jään paksuutta voisi mitata tutkalla. Niitä on kolmea tyyppiä: korkeataajuinen maatumka, asfalttitutka ja seinätutka. Ensin mainittu osoittautui oivalliseksi laitteeksi. Kävelyvauhdilla tehty mittaus sopii hyvin muutaman kilometrin tai lyhemmän jääradan mittaamiseen. Asfalttitutka soveltuu jääteiden mittaamiseen. Seinätutkan tulokset eivät vakuuttaneet, mutta syy voi olla olosuhteissa ja laitteen käytössä uudessa sovelluskohteessa.

Erottelukarkkuus ja pienin mahdollinen mitattava jään paksuus määrittelevät minimitoimintataajuuden. 1 GHz:llä luvut ovat 4,2 cm ja 8,4 cm, jotka riittävät. On myös hyvä muistaa, että parhaat tulokset saavutetaan kuivissa olosuhteissa eli pakkaskelissä antennin ollessa kosketuksessa jään pintaan. Pakkassäällä jään paksuus kasvaa ja jää on kuivaa. Kevättalvella se alkaa oheta ja vettyä. Vettynyt jää näyttää tutkassa paksulta, koska radioaallon nopeus on siinä hitaampaa.

Suurin tarve jään paksuuden mittaamiseen ja kantavuuden arviointiin on valittaessa ajankohtaa, jolloin on turvallista mennä jäälle työkoneilla ulkoilureittejä aurattaessa tai kunnossapitotoimenpiteiden yhteydessä. Tällöin jäällä kävely on yleensä turvallista ja jään paksuuden mittaus testatuilla menetelmillä on mahdollista toteuttaa. Tutkauspalvelua tarjoava yritys voi mitata suunnitellun radan ja tulostaa jäänpaksuusprofiilin. Jään paksuus ja rakenne on varmistettava näytepalasta, jonka voi ottaa radan ulkopuolelta.

Seinätutkan hankinta saattaa olla järkevä hankinta. Kieltämättä se ei ole ergonominen, mutta sitä voi käyttää jatkoarrella. Jään päällä oleva lumikerros on lapioitava pois mittauskohdasta. Mittauksia on tehtävä riittävän monta, jotta voidaan todeta jää riittävän paksuksi ja jatkaa turvallisesti aurauskalustolla. Ennen hankintaa on varmistettava, että laite toimii kuten voisi olettaa. Huhtikuun testit eivät näyttäneet hyviltä, mutta jäätä oli silloin paksulta ja seinätutkan pitäisi olla parhaimmillaan ohuemmillä jäillä.

Lähdeviitteet

- /1/ Taajuusmoduloitu tutka jään ja roudan mittaukseen. Diplomityö, Teknillinen Korkeakoulu, 1980, Pekka Ylinen.
- /2/ The in-situ dielectric constant of polar firn revisited. Julkaisu, Cold Regions Science and Technology 23 (1995) 245–256, Austin Kovacs, Anthony J. Gow, Rexford M. Morey.
- /3/ Lumen ominaisuuksien mittaus tutkalla. Diplomityö, Teknillinen Korkeakoulu, 2005, Eero Rinne.
- /4/ Electromagnetic aquametry. ISBN 3-540-22222-7 Springer Berlin Heidelberg New York, 2005, Klaus Kupfer.

LIITE 1 Veden ominaisuudet radioaalloilla taajuuden funktiona

Etenemiskerroin ja suhteellinen dielektrisyysvakio ovat

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon}$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} + j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}$$

$$\omega = 2\pi f$$

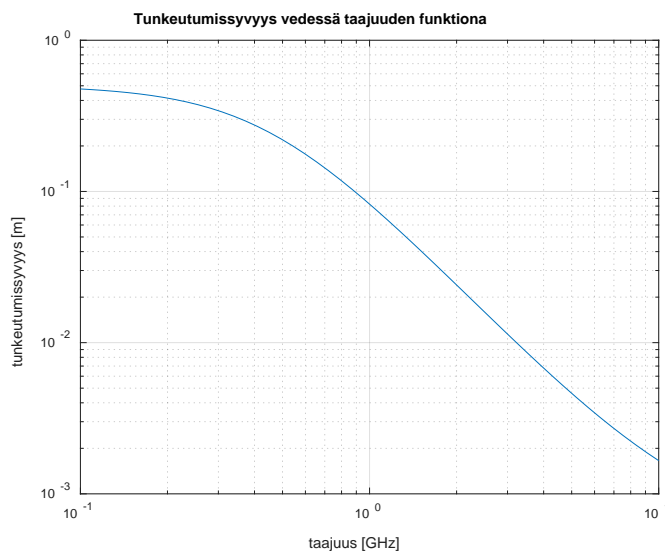
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H / m}$$

$$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F / m}$$

Muuttuja f on taajuus ja ω kulmataajuus. Kaavat ovat imaginäärimuuttujan takia yksinkertaisia. Ne sekä niihin liittyvät parametrit löytyvät kirjasta Electromagnetic aquametry, jonka on kirjoittanut Klaus Kupfer. Veden parametrit riippuvat mm lämpötilasta. Johtavuus σ järivedessä on noin 0.05 S/m.

T [°C]	ε_s	ε_∞	τ [ps]
0	87,91	5,7	17,67
10	83,92	5,8	12,68
20	80,21	5,7	9,37

Etenemiskertoimesta voidaan laskea tunkeutumissyvyys, joka on $1/\alpha$. Kuvassa on nollasteisen veden tapaus.



LIITE 2 Jäätutkausta Tuusulanjärvellä 22.2.2019



Yläkuvassa on 1.5 GHz:n laitteisto. Näyttö ja säätimet ovat kärryjen yläosassa ja antenni on valkoisessa muovilaatikossa jään pinnassa. Alakuvassa näyttö ja säätimet ovat rinkassa käyttäjän etupuolella ja antenniosaa raahataan perässä punaisessa muovilaatikossa. Viimeisenä tulee matkapyörä, joka aikaansaa lineaarisen matkaskaalan jääprofiilikuviin.



LIITE 3 Jäätutkaus Rovaniemellä 9.4.2019



Yläkuvan asfalttitutkassa on kaksi antennia edessä. Toisella saadaan aikaan kuviin heilunnasta riippumaton nollataso. Varusteina on mm videokamera, GPS/IMU ja laserskanneri, jota ei käytetty. Pulssianturin ansiosta kuviin saatiin lineaarinen matka-asteikko. Alakuvassa on GSSI:n seinätutka StructureScan Mini.



LIITE 4 Venäläinen ja amerikkalainen impulssitutka

Vasemmalla on venäläinen PicoR-ice tutka. Keskusyksikkö on sylissä ja antenniyksikkö vasemmassa kädessä. Yleensä tutka asennetaan ajoneuvoon. Oikealla on amerikkalaisen Penetradar tutkan kevytversio.

