



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIKKO RANNILA
RADIOLUOTAUKSEN KEHITTÄMINEN ONTELOLAATTOJEN ON-
TELOVESIEN PAIKANNUKSESSA

Diplomityö

Tarkastajat: professori Arto Saari ja
projektipäällikkö Olli Teriö
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Talouden ja Rakentamisen tiede-
kuntaneuvoston kokouksessa 3.
helmikuuta 2016

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

MIKKO RANNILA: Radioluotauksen kehittäminen ontelolaattojen ontelovesien paikannuksessa

Diplomityö, 88 sivua, 2 liitesivua

Maaliskuu 2016

Pääaine: Rakennustuotanto

Tarkastaja: projektipäällikkö Olli Teriö ja professori Arto Saari

Avainsanat: radioluotaus, kehittäminen, ontelolaatta, ainetta rikkomaton tutkimusmenetelmä, rakennustyömaan kosteudenhallinta

Ontelolaattojen onteloihin rakennusaikana kerääntynyt vesi poistetaan poraamalla reiät laattojen päihin onteloiden kohdalle sekä tehtaalla, että työmaalla. Joskus onteloihin tästä huolimatta jäänyt vesi aiheuttaa kiusallisia pieniä kosteusvaurioita tullessaan rakenteen läpi vasta rakennuksen käytön aikana. Ontelovesien paikantamiseen ei ole olemassa yleisesti vakiintunutta menetelmää tällä hetkellä.

Tutkimuksen tavoitteena on kehittää radioluotauksista betonirakenteiden tutkimiseen soveltuvalla maatutkalla rakentamisaikaisena ontelovesien paikannusmenetelmänä, jonka avulla voitaisiin varmistaa, että lisävedenpoistoreiät porataan oikeisiin kohtiin ontelolaattavälipohjissa. Lähtökohdaksi menetelmän onnistuneelle kehitykselle vaaditaan maatutkan ohjelmiston kehitystarpeiden määrittely sekä menetelmän testaus työmaalla. Ennalta tunnistetut kehitystarpeet ovat veden ja betonin heijastusten erottaminen toisistaan sekä pienimmän tutkalla havaittavan vesimäärän optimointi.

Tutkimuksen alussa määritellään tutkittava ongelma ja tutustutaan radioluotauksen aihepiiriin kirjallisuuskatsauksella. Työn empiirinen osuus suoritetaan kahden viikon mittaisena kokeellisena tutkimuksena, jossa kerätään aineistoa Parman Forssan ontelolaattatehtaalla suoritetuista koekappalemittauksista sekä testataan menetelmää kahdessa kerrostalokohteessa pääkaupunkiseudulla.

Maatutka on yleisesti käytössä teiden pohjarakenteiden tutkimuksissa, mutta talonrakentamisessa se on melko tuntematon tutkimusväline. Radioluotaus perustuu radiotaajuisten sähkömagneettisten aaltojen etenemiseen sähköisesti eristeisessä väliaineessa ja takaisin heijastuvan signaalin amplitudista ja kulkuajasta tallennetun tiedon tulkitsemiseen. Tutkimuksessa korostuu yhteistyö TTY:n signaalinkäsittelylaitoksen asiantuntijoiden kanssa. Määriteltyjen kehitystarpeiden pohjalta voidaan mahdollisesti lähteä toteuttamaan ohjelmistokehitystä signaalinkäsittelyn asiantuntemuksen siivittämänä.

Betonirakenteiden tutkimukseen soveltuvalla maatutkalla voidaan havaita vesi ontelosta ja menetelmä on sovellettavissa työmaalla. Vesi ja betoni voidaan erottaa toisistaan jatkossa matemaattisella signaalinkäsittelyllä, jota voidaan hyödyntää ohjelmistokehityksessä. Tutkimuksen tuloksissa jää arveluttamaan onko tutkan tekninen suorituskyky riittävä tarpeeksi pienten vesimäärien havaitsemiseen.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Construction Economics

MIKKO RANNILA: Development of ground penetrating radar in locating free water from hollow-core slabs

Master of Science Thesis, 88 pages, 2 Appendix pages

March 2016

Major: Building production

Examiner: Project manager Olli Teriö and Professor Arto Saari

Keywords: Ground penetrating radar, developing, hollow-core slab, non-destructive testing, moisture control of construction site

The free water accumulated inside the cavities of hollow-core-slabs during construction is removed by drilling holes in the both ends of the slabs in the factory and also on the construction site. The water inside the cavities may occasionally cause minor but harmful moisture damages when passing through the concrete not until the building is in use. At the moment, there is no generally accepted method for locating free water inside hollow-core slabs.

The goal of this research is to develop radio sounding as an application for locating free water inside the cavities by using a ground penetrating radar. Then could be confirmed that the waterholes will be drilled in the right locations on site. As a basis for successful development, defining the needs for development of the GPR software and testing of the application on construction site is necessary. Beforehand, the identified needs for development are distinguishing concrete and water and optimizing the lowest detectable amount of water inside the cavities.

In the beginning of this research the research problem is defined and literary research is used to become familiar with the topic of GPR theory and signal processing. The empirical part of the research is performed by experimental period of two weeks where GPR data is collected by test measurements in Parma's hollow-core slab factory located in Forssa, and by testing the application in two apartment building sites located in the metropolitan area of Finland.

GPR is generally used in investigating the bottom layers of road structures, but is fairly unknown application in building construction. GPR is based on propagation and reflection of electromagnetic signals in the medium and interpreting the information available of the amplitude and propagation time of the signals. Co-operation with experts in Signal Processing Faculty of Technical University of Tampere is emphasized in this research. From the basis of the development needs that will be defined, the software development process can possibly be executed.

With a GPR applicable for investigating concrete structures, free water can be detected inside cavities and the method is applicable on site. Water and concrete can be distinguished in the near future by mathematical signal processing applications. In the results of this research the smallest detectable amount of water remains debatable.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Parma Oy:n toimeksiantona Tampereen teknillisen yliopiston rakentamistuotannon ja –talouden laitoksella. Työn ohjauksesta vastasivat Parman kehitys- ja suunnittelujohtaja Juha Rämö sekä Tampereen teknillisen yliopiston tekniikan liseniaatti Olli Teriö.

Haluan kiittää Juha Rämöä sekä Olli Teriötä mahdollisuudesta päästä tekemään diplomityötä mielenkiintoisesta aiheesta sekä hyvästä ohjauksesta. Kiitos Keijo Nuutinen Miranet Oy:stä osallistumisesta diplomityön ohjaukseen. Suuri kiitos kuuluu Ari Visalle ja Juha Jylhälle TTY:n signaalinkäsittelylaitokselle. Kiitos Eeva Huuskonen-Snickers ja Tero Hokkanen Aalto-yliopistolta. Kiitos Mika Silvast ja Timo Saarenketo Road Scanners Oy:stä osallistumisestanne projektiin.

Lopuksi vielä kiitokset opiskelukavereille yhteisistä hetkistä opintojen ja vapaa-ajan parissa. Kiitos vanhemmilleni opiskeluiden tukemisesta ja kannustuksesta.

Tampereella, 23.5.2016

Mikko Rannila

SISÄLLYSLUETTELO

JOHDANTO	1
1.1 Tausta	1
1.2 Tavoitteet.....	2
1.3 Työn suoritus ja menetelmät	2
1.4 Tutkimuksen rajaukset	3
2. KIRJALLISUUSSELVITYS	4
2.1 Ontelolaatat	4
2.1.1 Välipohjien kosteusrasitus	5
2.1.2 Ontelovesien aiheuttamat kosteusvauriot.....	7
2.1.3 Ontelolaattojen vesireiät	8
2.1.4 Muita ontelovesien paikannusmenetelmiä	10
2.2 Radioluotaus ontelovesien paikantamisessa.....	12
2.2.1 Yleistä	12
2.2.2 Dielektrisyysarvo	12
2.2.3 Väliaineen sähkönjohtavuus	14
2.2.4 Impulssitutkan toimintaperiaate	15
2.2.5 Tutkadan tulkinta	18
2.2.6 Maatutkan tekniikka.....	20
2.2.7 Maatukamittausten dokumentointi.....	22
2.3 Radioluotauksen signaalinkäsittely	24
2.3.1 Maxwellin yhtälöt	24
2.3.2 Materiaalit sähkömagneettisessa kentässä	26
2.3.3 Datan suodattaminen.....	28
2.3.4 Amplitudi- ja vaihetiedon yhdistäminen.....	30
2.3.5 Askeltaajuustutka ja taajuusmoduloitu kantoaalto.....	31
3. TUTKIMUKSEN SUORITUS	33
3.1 Kokeellinen tutkimus	33
3.2 Tutkalaitteen esittely	34
3.3 Koekappalemittaukset	35
3.4 Työmaamittaukset	38
3.4.1 Case 1	39
3.4.2 Case 2.....	42
4. AINEISTO	44
4.1 Koekappalemittaukset	44
4.1.1 Mittauspöytäkirja	49
4.1.2 Vesi ontelossa	50
4.1.3 Betoni ontelossa	52
4.1.4 Betonin päällä oleva vesi	53
4.1.5 Harjateräs, sähköjohto ja tasoite ontelossa	54

4.1.6	Betonin erottaminen vedestä.....	55
4.1.7	Kostean tasoitteen erottaminen betonista ja vedestä.....	57
4.1.8	Ontelot pituussuuntaan.....	58
4.1.9	Pienin näkyvä vesimäärä 2,3 GHz antennilla	60
4.2	Työmaamittaukset	63
4.2.1	Case 1	63
4.2.2	Case 2.....	65
5.	TULOKSET	69
5.1	Ohjelmiston kehitystarpeet.....	69
5.1.1	Pienin havaittavissa oleva vesimäärä	70
5.1.2	Veden ja betonin erottaminen	73
5.2	Ontelovesien paikannus.....	74
5.2.1	Mittauksen suoritus työmaalla	74
5.2.2	Tutkan kalibrointi ja mittausasetukset	76
5.2.3	Mittausten dokumentointi	79
5.2.4	Tutkalaitteen soveltuvuus ontelovesien paikantamiseen	80
6.	POHDINTA	81
6.1	Tulosten tarkastelu	81
6.2	Virheen arviointi koekappalemittauksissa	82
6.3	Tutkimuksen tarkastelu	83
6.4	Jatkotutkimusehdotukset	85
	LÄHTEET.....	86

Liite A: Tutkan mittausasetukset

Liite B: Suhteellisen kosteuden tasokartta koekappalelaatasta

LYHENTEET JA KÄSITTEET

Aallonpituus	aallon kahden harjanhuipun välinen matka
Amplitudi	ilmaisee värähdysliikkeen laajuutta ja voimakkuutta
Hz	Taajuuden yksikkö
f_c	Impulssitutkan pulssin keskitaajuus
ϵ_r	Väliaineen dielektrisyysarvo
σ	Väliaineen johtavuus
Vaihe	kompleksisen permittiivisyyden reaali- ja imaginäärikomponenttien välinen kulma
Kulmataajuus	ilmaisee sinisignaalin kulman muutosta aikayksikköä kohden
Pulssintoistotaajuus	pulssitutkan pulssien lähetystaajuus
Pulssintoistoväli	lähetettyjen pulssien välinen aika tai matka
PASI	teräksinen parvekekiinnike
DEHA	ontelolaatan kanteen kiinnitettävä teräksinen nostoankkuri
Profiili	yksittäisen pulssin etenemistä väliaineessa kuvaava mutkitteleva viiva
Tutkakuva	maatutkan peräkkäisistä profiileista muodostama poikkileikkaus tutkattavasta kohteesta
Pyyhkäisy	pulssitutkan lähettämä ja vastaanottama yksittäinen pulssi
Näytteistystaajuus	tutkan tallentamien näytteiden määrä pyyhkäisyä kohden

JOHDANTO

1.1 Tausta

Ontelolaatat ovat yleisesti rakennusten väli- ylä- ja alapohjissa käytettyjä esijännitetyjä elementtejä, jotka on kevennetty pituussuuntaisilla onteloilla. Ontelolaattoja käyttämällä voidaan lisätä suunnitteluratkaisujen joustavuutta niiden mahdollistamien pitkien jänneväliden ansiosta. Onteloihin rakennusaikana kerääntyvä vesi pyritään poistamaan laattojen päihin onteloiden kohdalle porattavien vesireikien kautta. Joskus onteloihin jää vettä, joka voi aiheuttaa kosteusvaurioita laatan alapinnan tasoitteisiin kulkeutuessaan. Tämä voi tapahtua vasta pitkän ajan kuluttua rakennuksen luovutuksen jälkeen. Pahimmillaan ontelovedet voivat jäätyessään rikkoa laattoja rakentamisen aikana.

Kosteusvauriot ovat useimmiten pieniä tasoitevaurioita tai värjäytymiä maalipinnassa, mutta ne aiheuttavat ylimääräisiä kustannuksia ja ovat kiusallisia korjata jälkeensä. Ontelovesien aiheuttamat kosteusvauriot ovat harmillista myös rakennusyritysten ja elementtitoimittajien imagolle.

Laattoihin porataan vedenpoistoreiät valmistusprosessissa tehtaalla ja tehtaalla poratut reiät avataan työmaalla ja porataan lisävedenpoistoreiät tarvittaviin paikkoihin. Lisävedenpoistoreikien porauskohdista on olemassa yleispäteviä ohjeita. Ohjeet eivät kuitenkaan ole tapauskohtaisia, joten ontelovesien tarkalle paikannusmenetelmälle koetaan olevan tarvetta rakentamisessa.

Ontelovesien paikannukseen ei ole olemassa tarkkaa menetelmää. Lämpökamerakuvausta sekä kosteusmittausta on tutkittu aikaisemmin ontelovesien paikannusmenetelmänä. Idea radioluotauksen käytölle ontelovesien paikannuksesta on lähtöisin Jari Hämmäläisen diplomityöstä (Hämmäläinen 2012). Sen jälkeen aihetta on tutkittu Joonas Salosen kandidaatintyössä ”Ontelovesien paikannus maatutkalla” (Salonen 2013), jonka luomista lähtökohdista tätä tutkimusta lähdetään tekemään.

Radioluotauksen mahdollisuudet ainetta rikkomattomana tutkimusmenetelmä ovat herättäneet lisääntyvää kiinnostusta uusien käyttösovelluksien kohtaan. Radioluotaustekniikalla toimiva maatutka (GPR) on aikaisemmin yleisesti käytetty menetelmä teiden pohjamaan ja päällysteiden rakenteellisissa tutkimuksissa. Maatutkalla on mahdollista paikantaa muun muassa rakenteiden sisällä olevat raudat, kaapelit, ilmatilat ja vedet (Saarenketo 2006).

1.2 Tavoitteet

Diplomityön tavoitteena on selvittää ja määrittää betonirakenteiden tutkimiseen soveltuvan maatumkan kehitystarpeet ontelolaatan ontelovesien paikantamisessa mahdollisen ohjelmistokehityksen lähtötiedoiksi. Kehitystarpeiden realistinen arviointi vaatii lisänäkökulmaksi kehitysmahdollisuuksien kartoittamista yhteistyössä signaalinkäsittelyn asiantuntijoiden kanssa. Tavoitteena on myös menetelmän testaus ja arviointi työmaalla, sekä mittausten dokumentoinnin konseptin kehittäminen. Kuvassa 1.2 on esitetty tutkimuksen tavoitteet.



Kuva 1.2. Tutkimuksen tavoitteet.

Määrittelemällä tutkan ohjelmiston kehitystarpeet, voidaan luoda lähtökohdat ohjelmistokehitykselle. Ohjelmiston kehitystarpeiden tavoitteina voidaan aikaisemman tiedon mukaan mainita veden ja betonin heijastuksen erottaminen sekä pienten vesimäärien havaitseminen ontelon pohjalta.

Työmaamittauksissa testataan menetelmän käyttöä sekä saadaan aineistoa todellisista olosuhteista. Työmaalla tehtyjen mittausten dokumentoinnin konseptointia pyritään selvittämään, jotta mittausaineisto on jälkeinpäin tarkasteltavissa yksiselitteisesti.

Määrittelemällä ohjelmiston kehitystarpeet voidaan arvioida, onko matemaattisella signaalinkäsittelyllä mahdollista vastata kehitystarpeisiin. Perimmäinen tavoite on menetelmän kehittäminen rakennustyömaalla ontelolaattarakentamisessa yleiseksi palveluksi, jonka avulla saadaan ontelovedet poistettua rakennusaikana suuremmalla varmuudella.

1.3 Työn suoritus ja menetelmät

Työn teoriaosuudessa tutkimusmenetelmänä on kirjallisuuskatsaus. Kirjallisuuskatsauksessa esitetään tutkimuksen lähtökohdat ja määritellään tutkittava ongelma. Kirjalli-

suuskatsauksessa luodaan teoriapohjaa tutkittavan ongelman ympärille ja kerrotaan radioluotauksen toimintaperiaatteet ja perehdytään myös radioluotauksen signaalinkäsittelyn teoriaan.

Ohjelmiston kehitystarpeet määritellään laboratorio-olosuhteissa suoritettavien kokeellisten koekappalemittausten perusteella sekä testaamalla maatumkaa tapaustutkimuksena työmaalla. Koekappale suunnitellaan mallintamaan työmaaolosuhteita. Tärkein koekappalemittauksissa selvittävä asia on aineiston hankkiminen eri vesi- ja betonimääristä. Koekappalelaatan mittauksissa tulee kuitenkin selvittää myös työmaalla välipohjassa esiintyvien metallisten kiinnitysten ja harjateräksen vaikutus tutkakuvassa. Työmaamittauksissa testataan menetelmän käyttöä sekä saadaan aineistoa todellisista olosuhteista.

Työmaalla suoritettavissa tapaustutkimuksissa olosuhteet ovat todelliset, jolloin ei ennalta tiedetä onko onteloissa vettä. Mittauksia varten pyritään järjestämään kaksi kerrostalotyömaata, joissa välipohjarakenteena on ontelolaatta ja lattiatasoite. Alustavasti ontelovesien tutkimuksen suoritus pyritään ajoittamaan rakennusvaiheeseen pian lattiatasoitteiden levittämisen jälkeen.

1.4 Tutkimuksen rajaukset

Tässä tutkimuksessa ei pyritä kehittämään ontelovesien paikantamisesta valmista palvelua, vaan määritellään ohjelmiston jatkokehitystarpeet ja arvioidaan menetelmän soveltamista työmaalla. Ohjelmiston kehitysmahdollisuuksia pyritään kartoittamaan yhteistyössä TTY:n signaalinkäsittelynlaitoksen asiantuntijoiden kanssa, mutta rakennusalan opiskelijan lähtötiedot rajoittavat signaalinkäsittelyn teorian syvällistä ymmärtämistä.

Kokeellisten mittausten aineistoa tarkastellaan työssä yksinkertaisella tutkadatan tarkasteluun ja suodatukseen soveltuvalla GroundVision -ohjelmalla. Tutkan mittausdataa on mahdollista tarkastella matemaattisesti esimerkiksi MatLab -ohjelmalla. Tässä työssä ei kuitenkaan matemaattista tarkastelua tehdä.

Työmaalla tutkaa testataan, jotta saadaan realistinen käytännön näkökulma huomioitua johtopäätöksissä. Näin ollen työmaalla tehtyjen testausten perusteella ei pyritä selvittämään kaikkea mahdollista tutkaukseen liittyvää, vaan se on mahdollisesti myöhemmin tehtävien tutkimusten aihe. Työmaalla tehtyjen testausten perusteella arvioidaan menetelmän käyttöä ja selvitetään vaatimuksia menetelmän jatkokehitykselle.

Tutkimus on rajattu kerrostalokohteiden ontelolaattavälipohjiin, joissa rakenteena on 370 mm tai 320 mm korkea, kerrostalorakentamisessa yleisin laattatyypin. Ontelolaataston päällisenä rakenteena on ohut lattiatasoite. Tämä on edullisin lähtökohta menetelmän testaukselle. Raudoitetun pintabetonilaatan raudoitusten ontelolaataston päällä tiedetään vaikeuttavan tutkaamista.

2. KIRJALLISUUSSELVITYS

2.1 Ontelolaatat

Ontelolaatta on esivalmistettu väli- ala- ja yläpohjarakenteissa käytettävä rakennuselementti, joka on kevennetty pituussuuntaisilla onteloilla. Ontelolaatta soveltuu monipuolisesti niin liike-, toimisto- kuin asuinrakennuksiin. Ontelolaatat ovat esijännitetyjä elementtejä ja niitä käyttämällä voidaan saavuttaa pitkiä jännevälejä. Pitkillä jänneväleillä voidaan lisätä suunnitteluratkaisujen joustavuutta (Hedenstedt, Kemppainen 2011).

Ontelolaattojen valmistuksessa käytetään C40 - C70 lujuuden omaavaa betonia. Laatat valetaan liukuvaluna pitkien teräksisten valupetien päälle. Käytettävä massa on niin jäykkää, että valukoneen muotoilema ja tiivistämä laatta säilyttää muotonsa alustalla ilman erillisiä muottilaitoja. (elementtisuunnittelu.fi.)

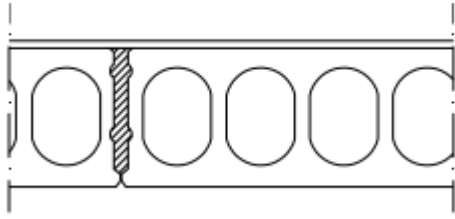
Ontelolaatan poikkileikkauksen muoto vaihtelee laattatyypin ja korkeuden mukaan. Ontelolaatan leveys on tavallisesti 1200 mm ja kerrostalorakentamisessa usein käytetyllä 370 mm korkealla laattalla maksimijänneväli on 14 m. Ontelolaatta täyttää nykyiset ääneneristysvaatimukset, kun sen massa on 500 kg/m². Kerrostalorakentamisessa käytetään enimmäkseen 370 mm korkeaa ontelolaattaa, jonka massa on saumattuna n. 510 kg/m². (Saarinen 2007.) Taulukossa 2.1 on esitetty ontelolaattatyypien painot sekä maksimijännevälit.

Taulukko 2.1. Ontelolaattojen painot ja mitat. (elementtisuunnittelu.fi.)

LAATTATYYPPI	LAATAN KORKEUS [mm]	ELEMENTIN PAINO [kg/m ²]	PAINO SAUMATTUNA [kg/m ²]	VÄHIMMÄISTUKIPINTA [mm]	MAKSIMIJÄNNEVÄLI [m]
O15	150	205	215	60	7,0
O20	200	245	260	60	11,0
O27	265	360	380	60	13,5
O32	320	380	400	60	16,0
O37	370	485	510	60	14,0
O40	400	435	465	100	18,5
O50	500	560	600	100	20,0

Ontelolaatat asennetaan paikoilleen nosturilla ja kavennetut laatat keskitetään suunnitelmissa reunoille. Holvi jäykistetään yhtenäiseksi toimivaksi rakenteeksi raudoittamalla ja valamalla laattojenväliset ja ulkoseinien viereiset saumat umpeen betonilla. (Heden-

stedt, Kempainen 2011; elementtisuunnittelu.fi.) Lattiatasoitteella tasoitetun ontelolaattavälipohjan rakenne on esitetty kuvassa 2.1.



Kuva 2.1. Ontelolaattojen välinen sauma on valettu täyteen saumabetonia, ja laataston päällä on 20 mm paksu pintatasoittekerros. (Saarinen 2007.)

Ontelolaataston päälle voidaan valaa raudoitettu tai raudoittamaton pintabetonilaatta tai käyttää pintatasoitetta. Tästä työstä on rajattu pois raudoitetut pintabetonilattiat ja keskitetään lattiatasoitteella pinnoitettuihin ontelolaattavälipohjiin, koska lattian pintaraudoitus tuo lisää haasteita radioluotauksen kehitykselle ontelovesien paikantamisessa.

2.1.1 Välipohjien kosteusrasitus

Ontelolaatat tehdään tiiviistä betonista, jolloin vesi ei imeydy betoniin kovinkaan nopeasti. Ontelolaattojen onteloihin voi päästä muodostumaan vettä rakennusaikana useista syistä. Laatat voivat kastua heti varastoinnissa useamman yhtäjaksoisen sadepäivän satuessa. Ontelolaattojen kastuminen työmaalla on kuitenkin usein merkittävin kosteusrasite. Asennus joudutaan tekemään joskus haastavissa sääolosuhteissa ja välipohjat voivat altistua vesi- ja lumisateille vielä asennuksen jälkeen. Ontelolaatat ovat esijännitetyjä, jolloin ne ovat asennuksen jälkeen kaarevia keskeltä tuille päin. Onteloihin voi päästä vettä, kun lumi ja vesi pääsevät kulkeutumaan ulko- ja väliseinien vierustalle. (Kukka 2008.)

Ontelolaattavälipohjan kastumisen estämisen kannalta olisi tärkeää saada holvi mahdollisimman nopeasti umpeen. Ontelolaatastojen huolellinen saumaustyö ja valujen suorittaminen heti kun se on mahdollista parantavat mahdollisuuksia saada välipohja tiiviiksi. (Kukka 2008.)

Onteloiden päihin asennetaan tehtaalla muoviset valutulpat, jotka estävät saumabetonin ja lattiatasoitteen valumisen ontelon sisään. Tulpat saattavat rakentamisen aikana irrota tai painua sisään, jolloin saumabetoni voi mahdollisesti tukkia laattojen päihin onteloiden kohdalle poratut vedenpoistoreiät. Varauksien kohdalla sekä päästä viistetyissä laatoissa onteloiden tulppaaminen on työläämpää. Viistetyissä laatoissa ei voida käyttää valutulppia onteloiden päissä, mutta onteloiden päät voidaan kuitenkin tulppata eri tavalla työmaalla. Kuvissa 2.1.1.a ja 2.1.1.b on onteloiden päät tulpattu muovisilla valutulpil-la varauksen vierellä.

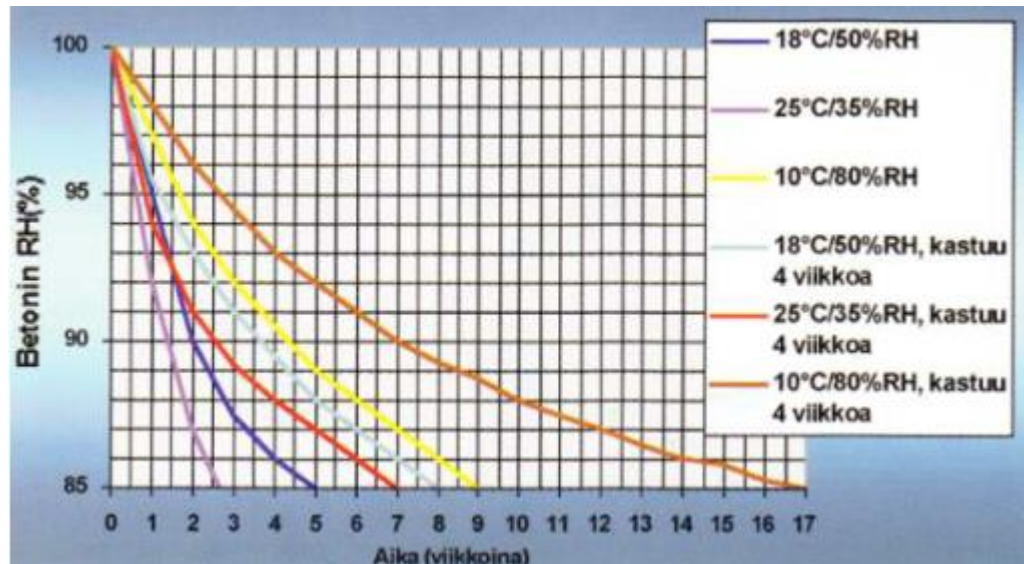


Kuva. 2.1.1.a. Ontelolaattojen päissä on valutulpat hyvin paikoillaan. (Työmaakäynti 30.10.2015.)



Kuva 2.1.1.b. Leikatun laatan onteloiden päät on pyritty tukkimaan muovisilla valutulpilla. (Työmaakäynti 30.10.2015.)

Ontelolaatan kuivuminen tapahtuu kahteen suuntaan. Laatta valmistetaan liukuvaluna tehtaalla ja valmistuksessa käytettävä vesisementtisuhte on pieni, jolloin laatta myös kuivuu nopeasti. Ulkopuolinen kosteusrasitus voi kuitenkin pidentää ontelolaattaväli-pohjan kuivumisaikaa huomattavasti. Kuvassa on esitetty ontelolaatan kuivumiskäyrä eri olosuhteissa. (Koivulahti 2013.)



Kuva 2.1.2. Ontelolaatan kuivuminen on riippuvainen olosuhteista. (Koivulahti 2013.)

Kuvasta voidaan huomata sääsuojauksen merkitys rakennuksen välipohjan kosteudenhallinnassa. Samanlaisissa olosuhteissa neljän viikon ajan kosteusrasitukselle altistuvan ontelolaatan kuivuminen kestää noin kaksi kertaa niin kauan kuin kuivassa olleen laatan kuivuminen. Laataston päälle valettu lattiatasoitekerros tai pintabetonilattia pidentää kuivumisaikaa entisestään paksuudesta riippuen. (Koivulahti 2013.)

2.1.2 Ontelovesien aiheuttamat kosteusvauriot

Ontelolaattavälipohjien onteloihin jäänyt vesi voi aiheuttaa yleensä pieniä rakennuksen käytönaikaisia kosteusvaurioita, mutta jäätyessään suuri vesimäärä voi jopa rikkoa laattoja. Ontelovesi voi tulla läpi laatan alapinnasta usein vasta rakennuksen luovutuksen jälkeen. Kosteus voi kulkeutua ontelon alapinnan läpi, aiheuttaen värjäytyksiä laatan alapinnan tasoitteessa tai maalipinnassa. (Kukka 2008.) Vähäisestä onteloihin jääneestä kosteudesta ei todennäköisesti ole haittaa.

Onteloon jäänyt vesi aiheuttaa pintaan tullessaan jälkikäteen ylimääräisiä kustannuksia ja korjaustoimenpiteitä. Kosteusvaurion sattuessa ontelot joudutaan tyhjentämään ja kuivattamaan, kun rakennus on jo käytössä. (Makkonen 2013.) Kuvassa 2.1.2 on ontelosta laatan alapinnan tasoitteeseen kulkeutunut vesi aiheuttanut kosteusvaurion.



Kuva 2.1.2. Kuvassa on rakennuksen käytönaikana sattunut ontelovesien aiheuttama kosteusvaurio. Vaurioitunut kohta on tyypillisesti kantavan seinän viereisen ontelon alapinnalla. Onteloveden aiheuttama kosteusvaurio korjataan poraamalla reikiä ontelon kohdalle kattoon ja kuivattamalla ontelo. Kuivattaminen tehdään usein koneellisesti. (kuva: *Ilta-sanomat* 2013.)

Vesi onteloissa voi kulkeutua pitkiä matkoja ja tulla ulos eri paikasta, kuin missä alkuperäinen vesipesä on (Hedenstedt, Kemppainen 2011). Tämä voi vaikeuttaa ongelmakohdan paikantamista jälkeempään korjatessa.

2.1.3 Ontelolaattojen vesireiät

Ontelolaattojen vedenpoisto pyritään varmistamaan poraamalla onteloiden kohdalle reiät laattojen molempiin päihin. Tehtaalla porataan halkaisijaltaan 12 – 14 mm vesireiät laatan molempiin päihin noin 500 – 1500 mm laatan päästä (Parma ontelo- ja kuorilaa- tastojen asennus- ja työmaaohje 2015). Vesireiät porataan tehtaan työtavoista riippuen joko alhaaltapäin ontelon alareunaan tai laatan päältä ontelon ylä- ja alapuolisen betonin läpi. Laatan kanteen jäävä reikä tukitaan massalla ylhäältä päin porattaessa. Menetelmät vesireikien porauksessa vaihtelevat eri tehtaiden tuotantotapojen mukaan. Tehtaalla poratut reiät avataan työmaalla ja porataan lisäreiät tarvittaviin paikkoihin.

Tehtaalla varauksia tehdessä ja ontelolaattoja leikattaessa voi onteloihin jäädä purseita, jotka voivat tukkia ontelon vesireikiä niin, ettei vesi pääse pois ontelosta. Valmistuksessa usein ontelolaattaa katkaistaessa onteloon valuu lietettä. Kun lietettä on ontelon pohjalla, voi vesireikiä porattaessa onteloon syntyä kaulus joka kovettuu. Kaulus tukkii vesireiät niin, ettei kaikki vesi pääse pois, vaikka vesireiät porattaisiin uudelleen. (Kukka 2008.) Onteloiden puhdistus tehtaalla vähentää edellä mainittuja ongelmia.

Vesireikien porauksessa on syytä kiinnittää seuraaviin paikkoihin ontelolaattavälipohjassa (Teriö 2003):

- kantavien seinien vierustat
- parvekesaranoiden ja –kannakkeiden vierusta (mahdollisesti 2 onteloa)
- S-pistekiinnitysten vierusta
- hormien ja läpimenojen vierustat
- kololaattojen sivuripustusten vierusta
- kololaatan edessä, ei kuitenkaan palkin kohdalla
- sisäkulman rengasterästen sidontavalujen vierusta
- sähköputkitusten läpimenojen vierustat
- onteloihin asennettavien viemäreiden lähellä (pesukoneen poistoputket).

Ontelolaattojen vedenpoistossa usein esiintyviä ongelmia ovat (Teriö 2003):

- Työmaaporaus ei ole osunut ontelon keskelle.
- Lähekkäin olevien varausten välistä kannasta ei ole valettu umpeen ja reikä puuttuu.
- Reikien tukkeutuminen – laatan sahauksessa syntyy lietettä, joka ajan kuluessa tukkii reiän tai reikien porauksessa syntyy kaulus, joka kovettuu reiän ympärille.
- Vinopäisiä laattoja ei porata tehtaalla.
- Lyhyissä laatoissa on vesireiät vain toisessa päässä, mikä ei ole riittävää.

Lisäreikien poraaminen tehdään usein sattumanvaraisiin paikkoihin, eikä ontelon tyhjeneminen ole varmaa. Lisäreikien porauskohtia voidaan arvioida silmämääräisesti, mutta kehittämällä tarkka menetelmä onteloiden vesitaskujen paikantamiseen, saadaan tarvittavien lisäreikien paikat kartoitettua. Kuvassa 2.1.3 on ontelolaattaholvi, jonka onteloiden vesireiät on avattu työmaalla.



Kuva 2.1.3. Ontelolaattojen vesireiät sijaitsevat laattojen molemmissa päissä jokaisen ontelon kohdalla. Kosteudesta reiän ympärillä voidaan huomata, että ontelosta on valunut vettä. (kuva: Kukka 2008.)

Onteloiden kuivumiseen jää enemmän aikaa, jos tehtaalla tehdyt vesireiät avataan ja lisäreiät porataan työmaalla aikaisessa vaiheessa ennen pintatöitä. Rakennuksen sisälämpötilalla ja kosteudella on myös vaikutusta onteloiden kuivumiseen.

2.1.4 Muita ontelovesien paikannusmenetelmiä

Ontelovesiä on pyritty paikantamaan aikaisemmin suhteellisen kosteuden mittarilla ja lämpökameralla. Lämpökamerakuvauksella voidaan havaita lämpötilaeroja laattojen alapinnasta. Betonin kosteus vaikuttaa laatan alapinnan lämpötilaan. Kumpikaan näistä menetelmistä ei ole kuitenkaan vakiintunut käyttöön yleisesti ontelovesien paikantamisessa.

Suhteellisen kosteuden mittaus

Ontelotilan tai sitä ympäröivän betonin kosteusmittaus voidaan toteuttaa ontelon kohdalle poratusta reiästä suhteellista kosteutta mittaavalla anturilla. Mittaukset tulisi tehdä 15 - 25 °C lämpötiloissa, jotta mittauksista voidaan pitää vertailukelpoisina (Makko-nen 2013). Mittaus suoritetaan pääpiirteittäin seuraavasti (RT 14-10984):

- Halutulle kohdalle porataan tarvittaessa halkaisijaltaan 5 – 16 mm reikä.
- Reikä puhdistetaan imuroimalla tai puhaltamalla.
- Mittapää asennetaan reikään ja pintarakenteen sekä mittapään rajapinta tiivistetään vesihöyryntiiviillä kitillä.

- Mittapään annetaan tasaantua rakenteissa vallitseviin olosuhteisiin tarpeellisen ajan, mittapään ominaisuuksista riippuen.



Kuva 2.1.4.a. Suhteellisen kosteuden mittaus betonirakenteesta. Reikään voidaan asentaa sähköputki. Joka tapauksessa rakenteen sisä- ja ulkopinnan välinen raja tulee tehdä ilmatiiviiksi. (kuva: RT 14-10984)

(Makkonen 2013) toteaa, että laajassa mittakaavassa ontelovesien paikantaminen kosteusmittarilla on työmaalla hankalaa aikataulun ja taloudellisten resurssien puitteissa. Mittauksia on kuitenkin tarpeellista tehdä, jos epäillään, että ontelossa on vettä ja jälkeenpäin tehtävät korjaukset tulisivat kohtuuttoman hankaliksi.

Lämpökamera

Lämpökamera muodostaa kohteen pinnasta kuvan sen lähettämän infrapunasäteilyn perusteella. Kaikki pinnat, joiden lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen säteilevät lämpö- eli infrapunasäteilyä. Ontelovesien paikannus lämpökameralla perustuu laastin alapinnan lämpötilaeroihin. (Makkonen 2013.) Lämpötilaerojen tasoittuminen vettä sisältävän ontelon kohdalla on hitaampaa, jolloin kosteat kohdat laastin alapinnassa voidaan havaita lämpökameralla.

Lämpökamerakuvaus täytyy suorittaa siis oikeaan aikaan, jotta lämpötilaerot laastin alapinnassa eivät ole ehtineet tasoittua. Mittaus on suositeltavaa suorittaa noin kahden päivän kuluttua siitä, kun lämmöt on laitettu rakennuksessa päälle (Makkonen 2013, Nieminen, 2009).

2.2 Radioluotaus ontelovesien paikantamisessa

Maatutkaluotaus perustuu signaalin etenemiseen ja heijastumiseen sähkömagneettisilta ominaisuuksiltaan vaihtelevissa väliaineissa. Suurin osa tällä hetkellä käytössä olevista maatutkista on pulssitutkia. Muita tutkatyyppejä ovat esimerkiksi taajuusmoduloitu jatkuva-aaltotutka (FM-CW) ja askeltaajuustutka (step frequency radar). (Maijala, Saarenketo 2000.)

2.2.1 Yleistä

Maatutkaluotaus eli GPR on ainetta rikkomaton tutkimusmenetelmä, joka on kehittynyt huomattavasti 1990-luvulta lähtien. Kehitystä on tapahtunut niin teorian, tekniikan ja teknologian kuin myös uusien käyttösovellusten osalta. (Jol 2008.) Maatutkaa on käytetty monipuolisesti geologisissa käyttötarkoituksissa, kuten maaperä- ja kallioperäkartoituksissa, pohjavesitutkimuksissa ja jäänpaksuusmittauksissa. Maatutkaa on käytetty menestyksekkäästi myös teiden, rautateiden, lentokenttien ja siltojen rakennetutkimuksissa sekä rakentamisvaiheen laadunvalvonnassa. Rakennusten tutkimuksissa maatutkaa on käytetty pääasiassa korjausrakentamisen suunnittelussa ainetta rikkomana tutkimusmenetelmänä esimerkiksi vanhojen kantavien seinä- ja lattiarakenteiden kartoituksessa. Maatutkavalmistajat ovat kehittäneet rakennusten tutkimukseen tarkoitettuja laitteita, joilla voidaan tutkia muun muassa lattialaattojen ja seinä- ja kallioperä- rakenteiden paksuuksia ja kartoittaa raudoitusten ja tyhjätilojen sijainteja rakenteissa. Maatutkakalustoja on käytetty myös planeettojen pintarakenteiden tutkimuksissa. (Maijala, Saarenketo 2000.)

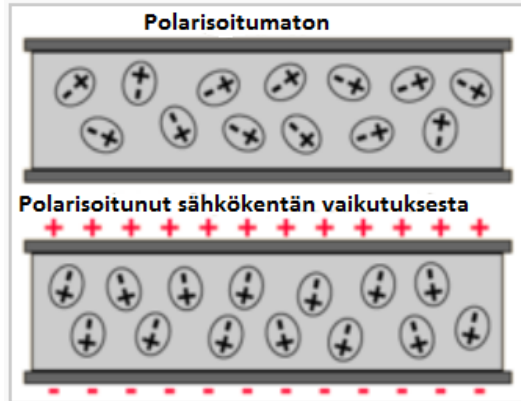
Tämä on johtanut radioluotauksen, eli maatutkan hyödyntämiseen laajalti geofysiikan ja geotekniikan osa-alueilla sekä herättänyt kiinnostusta uusien monitieteellisten sovellusten osalta teollisuudessa. Kehitystä on tapahtunut myös digitaalisen signaalinkäsittelyn saralla, vastaanotetun datan esittämisessä ja tallennuksessa. Takaisin heijastunutta signaalia digitaalisesti käsittelemällä voidaan parantaa tarkkuutta havainnoinnissa. (Jol 2008.)

Maatutkaluotaus perustuu signaalin etenemiseen ja heijastumiseen sähkömagneettisilta ominaisuuksiltaan vaihtelevissa väliaineissa. Sähkömagneettisia ominaisuuksia ovat dielektrisyys, johtavuus sekä magneettinen susceptibiliteetti. Tärkeimpiä näistä ovat dielektrisyys sekä johtavuus, magneettinen susceptibiliteetti voidaan jättää huomiotta muissa kuin magnetoituvissa väliaineissa, eli se voidaan jättää huomiotta myös ontelolaattaväli- ja pintarakenteissa. (Maijala, Saarenketo 2000.)

2.2.2 Dielektrisyysarvo

Dielektrisyysarvo, eli suhteellinen permittiivisyys kuvaa väliaineen kykyä varautua, eli polarisoitua ulkoisen sähkökentän vaikutuksesta. Sähkökentän vaikutuksen loputtua aineen alkutila palautuu. Materiaalin rakenteen ollessa sellainen, ettei alkutila palaudu

täysin, on polarisaatio osittain häviöllistä. Tällaisissa tapauksissa dielektrisyysarvoa voidaan tarkastella kompleksisena suureena, jossa reaaliarvo kuvaa palautuvaa polarisaatiota ja imaginääriosaa tapahtuvia häviöitä. (Saarenketo, Maijala 2004.) Väliaineen polarisaatiota on havainnollistettu kuvassa 2.2.2.



Kuva 2.2.2. Molekyylinen polarisaatio sähkökentän vaikutuksesta.

Tärkein polarisoituva molekyyli luonnonmateriaaleista on vesimolekyyli. Dielektrisyysarvon suuruus riippuu pääasiassa vapaan veden määrästä materiaalissa, sillä vesipitoisuuden kasvu nostaa suhteellista dielektrisyttä. (Saarenketo, Maijala 2004.)

Dielektrisyysarvo on verrannollinen sähkömagneettisen aallon etenemisnopeuteen väliaineessa. Mitä suurempi on dielektrisyysarvo, sitä hitaampi on aallon etenemisnopeus. Sähkömagneettinen pulssi tuottaa energiaa väliaineeseen ja väliaineen eriarvoiset varaukset saavat aikaan pienen siirrosvirran, joka tuottaa säteilevää elektromagneettista energiaa. Tämä paikallinen energia on hieman erivaiheinen pulssiin nähden, jolloin väliaineessa kulkevan aallon eteneminen hidastuu. Dielektrinen permittiivisyys voidaan erotella reaali- ja imaginäärikomponentteihin (Jol 2008):

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_r - i\varepsilon''_r.$$

Yleisesti materiaalin dielektrisyysarvolla tarkoitetaan dielektrisen permittiivisyyden reaalikomponenttia ε'_r . Useimmiten *suhteellista permittiivisyyttä* ε_r eli *dielektrisyysarvoa* kuvataan väliaineen kompleksisen permittiivisyyden suhteen tyhjiön permittiivisyyteen seuraavasti (Jol 2008, s. 7)

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

jossa ε_0 on tyhjiön permittiivisyys, 8.89×10^{-12} F/m.

Veden dielektrisyysarvo on $\varepsilon_r \approx 80$ ja betonin dielektrisyys vaihtelee välillä 4 – 20 riippuen betonin kosteudesta. (Jol 2008, s. 46). Taulukossa 2.2.1 on listattu ontelolaattojen tutkimiseen liittyvien tärkeimpien materiaalien elektromagneettisia ominaisuuksia. Yleisesti kaikkien geologisissa tutkimuksissa oleellisten materiaalien dielektrisyysarvot

ovat välillä 1 – 80. Rakenteiden tutkimuksessa poikkeuksena on teräs, jonka dielektrisyys on 250 – 5000.

2.2.3 Väliaineen sähkönjohtavuus

Väliaineen sähkönjohtavuus kuvaa vapaiden varausten liikkumista väliaineessa. Varaukset liikkuvat ulkoisen sähkökentän vaikutuksesta. Väliaineen sähkönjohtavuus ei vaikuta juurikaan signaalin heijastumiseen, vaan lähinnä sen vaimenemiseen. Mitä suurempi on väliaineen sähkönjohtavuus, sitä suurempi on myös maatumkasignaalin vaimennus. Maatumkan syvyysulottuvuus on siis parempi vähän sähköä johtavissa väliaineissa. (Passi 2007.) Signaali etenee vähäisellä vaimentumisella heikosti johtavassa materiaalissa kuten kuiva hiekka, jää tai kuivunut betoni. Jos signaali kulkee sähköä hyvin johtavassa materiaalissa, kuten suolapitoinen vesi tai kostea betoni, sähkömagneettinen energia absorboituu materiaaliin, eli signaali vaimenee nopeasti. Yleispätevä sääntö on, että mitä suurempi on materiaalin, esimerkiksi betonin, vesipitoisuus, sitä johtavampi materiaali on. (GSSI Handbook 2006.)

Signaalin sähköiselle vaimennukselle saadaan likiarvo desibeleinä metriä kohden kaavasta (Passi 2007):

$$\alpha = 1636,5 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}$$

jossa α on vaimennus, σ on johtavuus, μ_r on suhteellinen magneettinen susceptibiliteetti (voidaan olettaa arvoksi 1) ja ϵ_r on dielektrisyysarvo.

Taulukossa 2.2.1 on listattu ontelolaattaväli-pohjarakenteeseen liittyvien tärkeimpien materiaalien dielektrisyysarvoja ja johtavuuksia.

Taulukko 2.2.1. Ontelolaattaväli-pohjarakenteen materiaalien dielektrisyysarvoja ja sähkönjohtavuuksia. Veden dielektrisyysarvo on esitetty taulukossa välillä 78 – 88, mutta käytännössä veden dielektrisyysarvona käytetään usein 80. Taulukosta nähdään myös, että veden johtavuus vaihtelee huomattavasti. (Jol 2008)

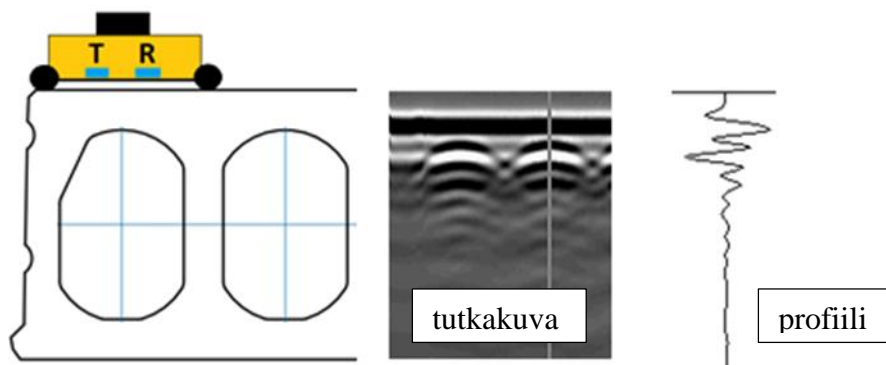
Materiaali	<i>dielektrisyys, ϵ_r</i>	<i>sähkönjohtavuus, σ_s (mS/m)</i>
ilma	1	0
vesi	78 (25 °C) - 88	0.1 - 10
merivesi	81 - 88	4000
betoni (kuiva)	4 - 10	1 - 10
betoni (märkä)	10 - 20	10 - 100
teräs	250 - 5000	1450000

Väliaineen dielektrisyys ja sähkönjohtavuus vaikuttavat signaalin heijastumiseen ja etenemiseen. Dielektrisyys vaikuttaa signaalin etenemisnopeuteen ja johtavuus lähinnä

vaimenemiseen. Nämä sähkömagneettiset ominaisuudet ovat hyvin erilaiset betonilla, vedellä sekä ilmalla.

2.2.4 Impulssitutkan toimintaperiaate

Yleisimmin käytetyn maatumkatyyppin, impulssitutkan, toimintaperiaate on seuraavan lainen. Väliaineeseen lähetetään pulssi, jonka pituus antennitaajuudesta riippuen on nanosekunnista kymmeneen nanosekunteihin. Osa pulssin energiasta heijastuu sähköisiltä ominaisuuksiltaan toisistaan eroavien aineiden rajapinnalta, ja osa etenee ja heijastuu takaisin seuraavilta rajapinnoilta. Signaali vaimenee kulkuajan funktiona geometrisen vaimennuksen, signaalin sironnan, heijastusten ja lämpöhäviöiden seurauksena. Heijastusten kulku-aika ja amplitudi mitataan ja amplitudi esitetään kulkuajan funktiona. Kun mittauksia tehdään tiheästi peräkkäisissä pisteissä, saadaan väliaineen rakenteesta jatkuva luotausprofiili, eli tutkakuva. (Maijala, Saarenketo 2000.) Impulssitutkan toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 2.2.4.



Kuva 2.2.4. Periaatekuva ontelolaatan skannauksesta impulssitutkalla. Keskellä ns. tutkakuva (B-scan-näkymä) ja oikealla ns. profiili (A-scan-näkymä), jossa kuvataan yhden pulssin eteneminen ontelon keskellä, esittämällä signaalin amplitudi kulkuajan funktiona. Signaali lähtee lähetinantennista ja takaisin heijastuneet signaalit otetaan vastaan vastaanottoantennilla, joka mittaa pulssin edestakaiseen matkaan kuluneen ajan ja signaalin amplitudin. Ohjelmisto muodostaa peräkkäisistä mittauspisteistä jatkuvan luotausprofiiliin, eli tutkakuvan.

Jos tutkapulssi etenee väliaineesta 1 väliaineeseen 2 ja väliaineiden dielektrisyysarvot ovat vastaavasti ε_1 ja ε_2 , heijastuskertoimeksi saadaan:

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}$$

Kaavan perusteella heijastuksen polariteetti kääntyy, jos ε_1 on pienempi kuin ε_2 . Heijastuskerroin on siis positiivinen signaalin kulkiessa dielektrisyydeltään suurempiarvoisesta materiaalista pienempiarvoiseen ja negatiivinen signaalin kulkiessa pienemmästä suuremman dielektrisyuden omaavaan materiaaliin. (Maijala, Saarenketo 2000.)

Maatutkan syvyysulottuvuus riippuu väliaineiden sähköisten ominaisuuksien lisäksi käytetystä antennitaajuudesta, ja siten signaalin aallonpituudesta. Väliaineen aiheuttama vaimennus suurenee taajuuden kasvaessa, koska väliaineen johtavuus samalla kasvaa ja koska tutka-aalloille näkyvien ja sen vuoksi signaalin energiaa sirottavien kohteiden määrä lisääntyy aallonpituuden lyhentyessä. Näin tunkeutumissyvyys pienenee taajuuden kasvaessa, mutta toisaalta erotuskyky samalla paranee. Erotuskyky paranee myös materiaalin dielektrisyysarvon suurentuessa. (Maijala, Saarenketo 2000.)

Impulssitutkan laitteisto koostuu pääasiassa neljästä eri komponentista. Pulssigeneraattori määrää lähetettävän signaalin pituuden, voimakkuuden ja toistotaajuuden. Lähetinantenni lähettää signaalin ja vastaanottoantenni kerää väliaineesta heijastuneet signaalit ja vahvistaa ne. Näytteenotin muuttaa heijastuneet signaalit sellaiseen muotoon, jossa ne voidaan tallentaa. (Passi 2007.)

Tutkakaluston antenni koostuu itse antennista ja antennin elektroniikkayksiköstä, joka määrää lähetettävän pulssin pituuden ja voimakkuuden. Maatutka-antennit voidaan jakaa karkeasti ilmavasteantenneihin ja maavasteantenneihin. Nämä puolestaan voivat olla joko monostaattisia, jolloin sama antenni toimii lähettimenä ja vastaanottimena tai bistaattisia, jolloin lähetin- ja vastaanottoyksikkönä on eri antenni. Useimmat maatutka-antennit ovat bistaattisia, mutta antennielementit on asennettu samaan laatikkoon. (Saarenketo, Maijala 2004.) Taulukossa 2 on esitetty erityyppisten maatutkatutkimuksissa käytettävien antennien ominaisuuksia.

Taulukko 2. Maatutkatutkimuksissa yleisesti käytetyt antennit on jaettu maavaste- ja ilmavasteantenneihin. Betonirakenteiden tutkimuksiin soveltuvissa maatutkalaitteistoissa on käytössä usein korkeataajuinen ilmavasteantenni. (Saarenketo, Maijala 2004.)

Antennit	Taajuus (MHz)	Syvyysulottuvuus (m)	Resoluutio (mm) (ϵ_r, δ)	Soveltuvuus
<u>Maavasteantennit</u>				
1 Korkeataajuiset	900 – 1500	0,4 – 1,0	40 – 65	päällyste, kantava, jakava, teräsverkko
2 Keskitäajuiset	400 – 600	1,5 – 4,0	80 – 150	kantava, jakava, kok. paks., matalat penkereet, pohjam. < 3m
3 Matalataajuiset	50 - 200	3 - 30	250 - 500	kok.paks., penger, pohjam. < 20 m (ei savi ja siltti)
<u>Ilmavasteantennit</u>				
1 Korkeataajuiset	2000 –	0,4 – 0,6	15 – 25	sorateiden kulutusk., päällyste, teräsverkot, kantava, jakava
2 Keskitäajuiset	900 – 1200	0,5 – 1,0	35 – 50	Päällyste, kantava, jakava, teräsverkko
3 Matalataajuiset (ei vielä Suomessa käytössä)	400 - 600	1,0 – 3,0	60 - 100	Kantava, jakava, kok. paks., matalat penkereet, pohjamaa < 3m

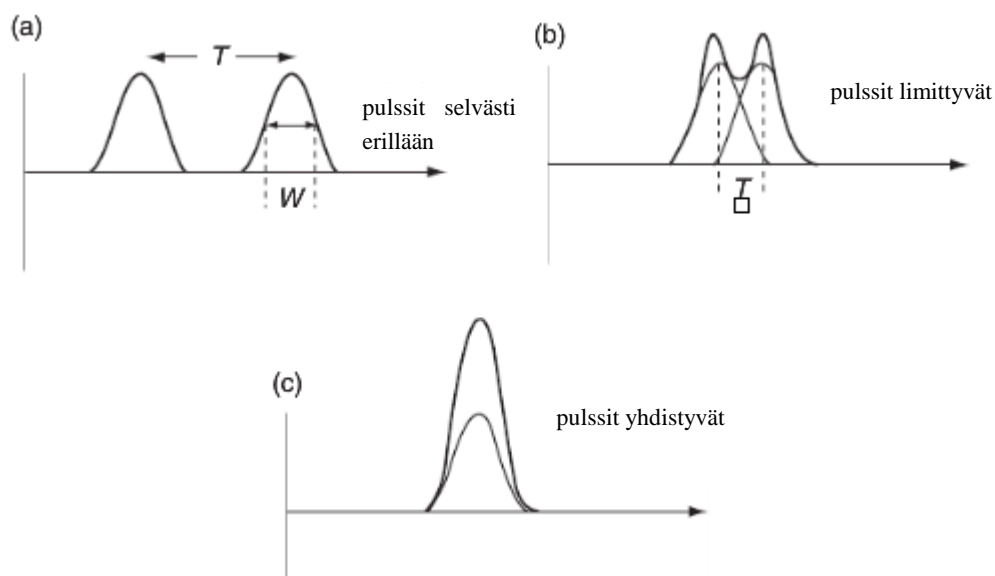
Ilmavasteantennit ovat pääasiassa tyypiltään kartiotorviantenneja, mutta viime aikoina myös muita antennityyppejä on kehitetty aktiivisesti (Saarenketo, Maijala 2004). Korkean resoluution antennit soveltuvat hyvin betonirakenteiden tutkimiseen.

Erotuskyvyllä tarkoitetaan sitä, kuinka lähellä toisiaan olevat rajapinnat voidaan tunnistaa erillisiksi. Tämä koskee sekä vaaka- että pystysuunnassa tapahtuvaa havainnointia. Mitä lyhyempi tutkan lähettämä pulssi on, sitä tarkemmin etäisyys saadaan määritettyä (Skolnik 1962). Pulssitutkan vertikaalisuuntainen erotuskyky voidaan laskea kaavasta:

$$h = \frac{\tau \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_r}}$$

jossa c on valon nopeus tyhjiössä (0,3 m/ns), τ on pulssin pituus (ns) ja ϵ_r on väliaineen dielektrisyys (Saarenketo, Maijala 2004).

Tarkasteltaessa erotuskykyä tarkemmin, sen määrittää kuinka hyvin kaksi pulssia voidaan erottaa toisistaan. Kuvassa 2.2.4.b on havainnollistettu pulssien erottamista esittämällä kolme tapausta kahden pulssin välisestä aikaerosta.



Kuva 2.2.4.b. Pulssit ajan funktiona, jossa W on puolet pulssin leveydestä. (a) Pulssit selvästi erotettavissa toisistaan, kun $T \gg W$. (b) Kaksi pulssia sanotaan olevan erotettavissa kun $T \approx W$. (c) Kun $T \ll W$, pulsseja ei voi erottaa toisistaan, mutta pulssien yhdistyminen ilmenee suurempana amplitudina. (muokattu lähteestä Jol 2008, s. 15.)

Olettamalla pulssin merkitseväksi pituudeksi W , joka on puolet aallon amplitudista, yleisesti hyväksytyyn käsitykseen mukaan voidaan tällöin pulssit erottaa toisistaan. Jos kahden pulssin välinen aikaero on pienempi, ne eivät erotu, vaan näkyvät todennäköisesti yhtenä tapahtumana. Kun pulssit ovat samanaikaiset, ne ilmenevät yhtenä amplitudiltaan suurempana aallonhuippuna. (Jol 2008, s. 15.)

Impulssitutkan pulssin leveys, W , riippuu kaistanleveydestä, B , joka on suoraan verrannollinen tutkan keskitajuuteen, f_c . Impulssitutkan lähettämän pulssin leveys voidaan laskea kaavasta:

$$W = \frac{1}{B} = \frac{1}{f_c}$$

Impulssitutkan resoluutiota on kuvattu (Jol 2008, s. 15) myös seuraavasti:

$$\Delta r \geq \frac{Wv}{4}$$

jossa pulssin leveys ja nopeus materiaalissa määrittävät resoluution pituuden vertikaalisesi, jota kutsutaan (Jol 2008) radiaaliseksi resoluutioksi. Käytännössä tutkan erotuskykyä heikentää signaalin vaimeneminen ja hajaantuminen etäisyyden kasvaessa, jolloin teoriassa laskettu resoluutio ei ole absoluuttisen todellinen.

Havaitun rajapinnan syvyys voidaan laskea kaavalla (Saarenketo, Maijala 2004):

$$s = v \cdot t = \frac{0,5 \cdot twt \cdot c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

jossa twt on signaalin kaksinkertainen kulku-aika. Rajapinnan syvyyden laskennassa ainoa muuttuja on siis materiaalin dielektrisyysarvo, kun tiedetään signaalin kulku-aika.

Keskusyksikön kautta ohjataan koko tutkayksikön toimintaa. Sen avulla määrätään mm. pyyhkäisyjen määrä aika- tai matkayksikköä kohti (pyyhkäisy/sek. tai pyyhkäisy/mm), mittausaika (ns), näytteistystaajuus (näytettä/pyyhkäisy) ja datan muoto (esim. 8, 16 bit). (Maijala, Saarenketo 2000.) Mittauskalusto tarvitsee myös virtalähteen. Tutkayksikön virrankulutus on erittäin pieni, mutta ohjausyksikkö ja tallentimet kuluttavat runsaasti virtaa (Passi 2007).

2.2.5 Tutkadatan tulkinta

Dielektrisyiden vaihtelu rajapintojen välillä aiheuttaa heijastuksen tutkakuvassa. Heijastus syntyy kahden eri materiaalin rajapinnassa, jossa dielektrisyys (ja signaalin nopeus) muuttuu. Mitä suurempi on dielektrisyiden välinen ero, sitä vahvempi heijastus syntyy. Tämän lisäksi ero materiaalien sähkönjohtavuuksien välillä vaikuttaa heijastuksen voimakkuuteen. Metalliset kohteet näkyvät voimakkaina heijastuksina, koska niiden johtavuus on suuri. Heijastuneen tutka-aallon lisäksi, metalliset kohteet heijastavat takaisin pienen ylimääräisen signaalin, joka johtuu niihin syntyvästä varauksesta. Eimetalliset, johtamattomat kohteet palauttavat vain heijastuneen energian. (GSSI Handbook 2006.)

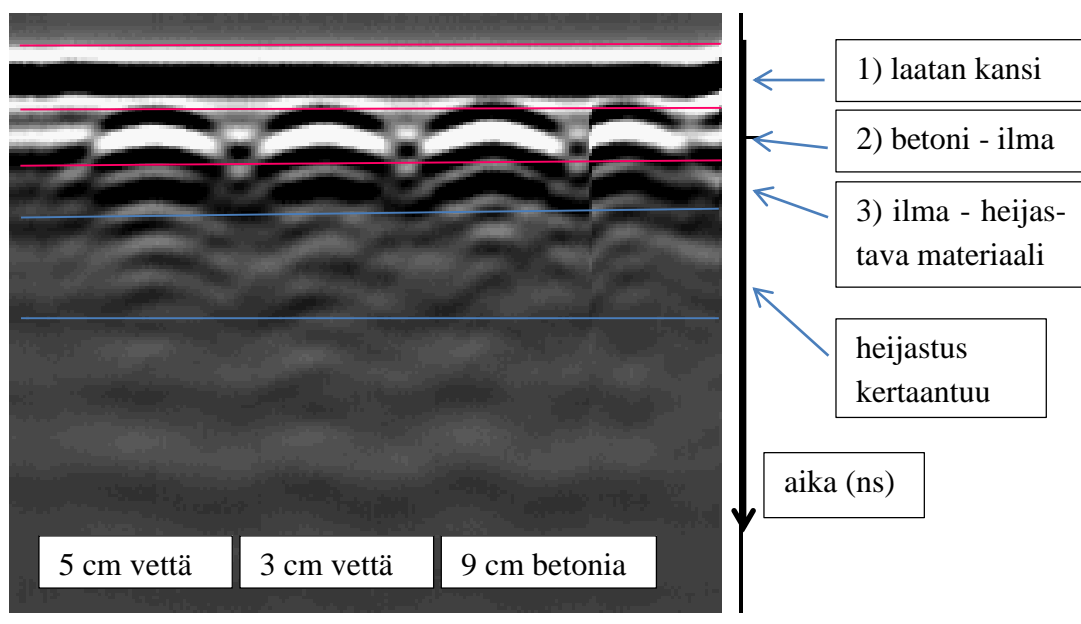
Metalli, jopa alumiinifolio, heijastaa sähkömagneettisen energian takaisin kokonaan. Heijastus näkyy selvästi, mutta materiaaleja sen takana ei voi havaita. Heijastuksen voimakkuus on verrannollinen kontrastiin kahden materiaalin dielektrisyiden välillä,

taulukon 3 mukaisesti. Mitä suurempi kontrasti, sitä voimakkaampi on heijastus. (GSSI Handbook 2006.)

Taulukko 3. Dielektrinen kontrasti ja siitä aiheutuvan heijastuksen voimakkuus eri materiaalien rajapinnoissa (GSSI Handbook 2006).

<u>Boundary</u>	<u>Dielectric contrast</u>	<u>Reflection strength</u>
Asphalt-concrete	Medium	Medium
Concrete-sand	Low	Weak
Concrete-air	High, phase reversal	Strong
Concrete deck-concrete beam	None	No reflection
Concrete-metal	High	Strong
Concrete - water	High	Strong
Concrete - PVC	Low to Medium, phase reversal	Weak

Heijastuksen polariteetti antaa myös oleellista tietoa. Antennin lähettämän pulssin polariteetti on seuraavanlainen: ensin tulee positiivinen huippu, sitten negatiivinen huippu, jonka jälkeen mahdollisesti toinen positiivinen huippu. Tutkakuvassa harmaassa väri-skaalassa tämä tarkoittaa ensin valkoista kaistaa, jota seuraa musta kaista, jonka jälkeen mahdollisesti vielä valkoinen kaista (kuva 2.2.5.). Jokainen heijastus on kopio lähetyspulsista, joten useimmat heijastukset alkavat valkoisella raidalla, jota seuraa musta raita. Kuitenkin betonin ja ilman välisellä rajapinnalla tapahtuu vaiheenkäntö, koska ilman pulssi kulkee suuremmasta dielektrisyydestä pienempään. Vaiheenkäännössä normaalin polariteetin järjestys kääntyy päinvastaiseksi. Tällöin heijastus harmaaväri-skaalassa alkaa mustalla (negatiivisella) valkoisen (positiivisen) sijaan. (GSSI handbook 2006.)



Kuva 2.2.5. Tutkapulssin heijastus ja heijastuksen polariteetti ontelolaattakoekappaleessa. Vasemmalta katsoen ensimmäisessä ontelossa on 5 cm vettä, toisessa 3 cm vettä

ja kolmannessa on 9 cm betonia ontelon pohjalla. Numerolla 1 on merkitty laatan pinnan aiheuttama heijastus, numerolla 2 on merkitty betonin – ilma –rajapinnan heijastus, jossa heijastuksen polariteetti kääntyy (musta/valkoinen/musta). Numerolla 3 on merkitty veden (kahden ensimmäisen ontelon kohdalla) ja betonin (kolmannen ontelon kohdalla) aiheuttama heijastus (valkoinen/musta/valkoinen). Signaalin nopeus riippuu materiaalin dielektrisyysarvosta.

Antennin ylittäessä putkimaisen kohteen kuten putken, kaapelin tai harjateräksen oikeassa kulmassa, tämän mallinen kohde näyttää tutkakuvassa väärinpäin olevalta U- tai V –kirjaimelta. Tämänlaisen heijastuksen muotoa kuvataan hyperbeliksi. Tämä muoto johtuu siitä, että pulssi havaitsee kohteen jo ennen kuin antennit ovat suoraan kohteen päällä, sekä tämän jälkeen. Kohde sijaitsee horisontaalisesti hyperbelin huipun kohdalla. (GSSI Handbook 2006.)

2.2.6 Maatutkan tekniikka

Tutkimuksessa käytettävä laitteisto on Ruotsalaisen Malå:n valmistama CX-11 (Concrete Imaging) System. Aikaisemmassa ontelovesien paikantamista maatutkalla käsittelevässä tutkimuksessa (Salonen 2013) käytössä oli toisen valmistajan, GSSI:n laitteisto. Näillä toimintaperiaate on kuitenkin samanlainen ja suurimmat erot ovat keskusyksikön asetuksissa ja tutkan antennin keskitaajuudessa. Datan jälkiprosessoinnissa käytettävä ohjelmisto vaihtelee myös valmistajan mukaan. Kuvassa 2.2.5 on tutkimuksessa käytetty Malå CX-11 tutkalaitteisto.



Kuva 2.2.6.a. Malå CX-11 tutkalaitteisto koostuu keskusyksiköstä, akusta ja antennilaitteesta, joka kulkee pyörien päällä. Tutkan pulssintoistovälin saa säädettyä matkan mukaan, mikä on ontelolaattojen tutkaamisessa järkevää. Takapyörä mittaa matkaa.

Tutkalaitteisto koostuu pyörien päällä liikutettavasta antennikelkasta, näyttöyksiköstä ja akusta, jotka kytketään toisiinsa johdoilla. Tutkassa on neljä pyörää ja pohjassa muovilevy, jonka takana ovat lähetys- ja vastaanottoantennit.

Malå GPR CX (Concrete Imaging) System - teknisiä tietoja (Malå Geoscience Internet-sivusto 2016):

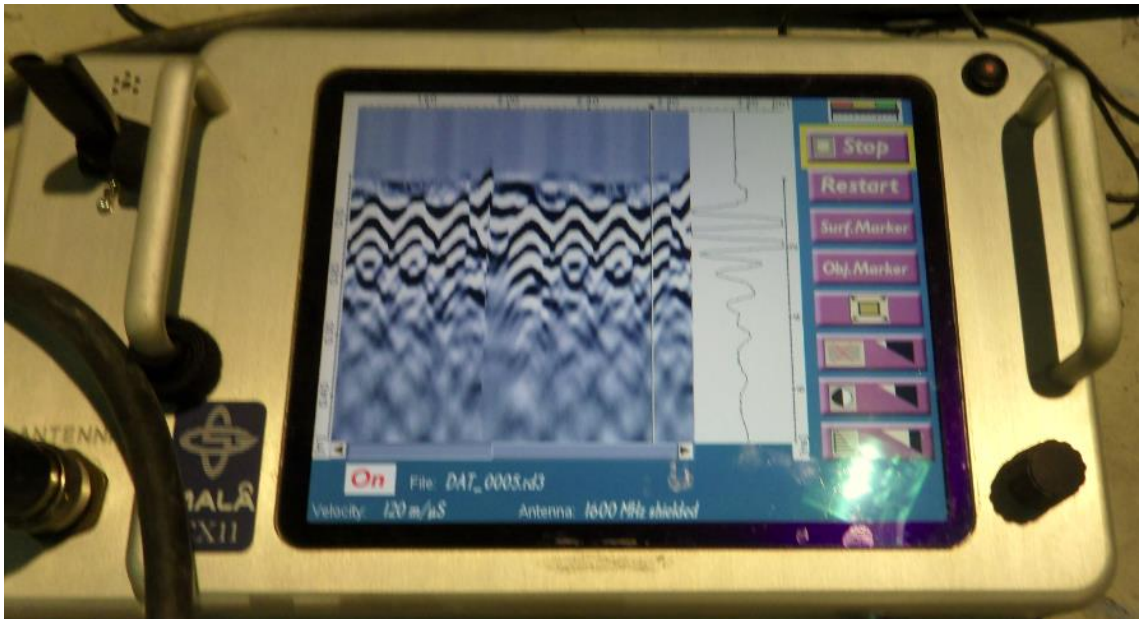
- Pulssintoistotaajuus 100 kHz
- Näytteistystaajuus 6 - 700 GHz
- Aikaikkuna 0 - 70 ns.

Malå korkeataajuisten antennien teknisiä tietoja (Malå Geoscience Internet-sivusto 2016):

- Keskitajuus 1.2, 1.6 ja 2.3 GHz
- Kaistanleveys < 100 %
- Aikaikkuna < 50 ns
- Pulssintoistotaajuus 100 kHz
- Datan tallennus Malå CX tai Malå XV monitorilla tai tietokoneella Malå Ground Vision –ohjelmalla.

Tutkimuksen kenttämittauksissa käytetyn maatutkan antennitaajuus oli 1,6 GHz ja lähetys- ja vastaanottoantennien välinen etäisyys 6 cm. Laite on saatavilla myös 2,3 GHz antennilla, jolloin lähetys- ja vastaanottoantennien välinen etäisyys on 4 cm.

Tutkattavan rakenteen materiaalit, muoto ja kohteen syvyys vaikuttavat ratkaisevasti mittausparametrien optimointiin (Saarenketo, Maijala 2000). Myös ontelolaattojen tutkauksessa mittausparametrien optimointi on tärkeää tutkakuvan luettavuuden kannalta.



Kuva 2.2.6.b. Tutkakuva keskusyksikön näytöltä ontelolaattakoekappaleen laboratorio-mittauksista harmaaväriskaalalla. Mittausparametrien ja näytön asetusten säädöt vaikuttavat huomattavasti kuvan laatuun. Kontrasti on säädetty tässä melko suureksi.

Keskusyksiköllä voidaan säätää näytön sekä datan tallennuksen asetuksia. Datan tallennuksen, toisin sanoen signaalin lähetyksen ja vastaanottamisen asetukset vaikuttavat suoranaisesti tallennetun datan laatuun. Signaalin parametreilla voidaan säätää muun muassa signaalin mittausaikaa, signaalin oletettua kulkunopeutta väliaineessa sekä näyteistystaajuutta. Näytön asetusten säätäminen vaikuttaa vain senhetkiseen näytön esittämään tutkakuvaan, joka on kuitenkin oleellinen tekijä ontelovesien reaaliaikaisessa paikantamisessa.

Mittausaineistoa voidaan suodattaa tai vahvistaa jo mittausvaiheessa käyttämällä laitteen ohjelmiston suodattimia. Tällöin korostuu operaattorin henkilökohtainen taito valita mittausparametrit oikein. Suodatinten monipuolisuus ja aineiston reaaliaikaisen käsittelyn mahdollisuudet vaihtelevat laitteen valmistajan mukaan. (Saarenketo, Maijala 2000, s. 51.)

2.2.7 Maatutkamittausten dokumentointi

Teiden maatutkatutkimuksissa käytetään dokumentoinnin apuna usein GPS paikannusta ja videokuvaa. GPS paikannuksella saadaan tallennettua mittauksen paikkatieto dataan. Normaalisti GPS -koordinaatit yhdistetään maatutkadataan ja tietojenkäsittelyohjelmistolla voidaan tehdä etäisyyskorjauksia. Dokumentointia voi parantaa myös liittämällä digitaalisia valokuvia dataan. (Saarenketo 2006.) Matkakoordinaatit voidaan sitoa dataan yksinkertaisimmillaan siten, että määritetään mittauksen alkupisteen sijainti ja lasketaan muiden mittauspisteiden sijainti pitkin mittauslinjaa alkupisteen ja vakiomitta-kaavan avulla (Saarenketo, Maijala 2004).

GPS paikannuksen tarkkuus ei ole riittävä rakennuksen sisällä tarkkaan paikkatiedon hyödyntämiseen. Paikan mittaamisessa tarkempia GPS sovelluksia on kehitetty. Näitä ovat differentiaali-GPS (DGPS) ja reaaliaikainen kinemaattinen mittaus (RTK). GPS sovelluksen valinnassa tutkalaitteistoon täytyy sen kyetä vastaamaan paikkatiedon tarkkuusvaatimuksiin. Maatutkalaitteistojen valmistaja (Malå Geoscience Internet-sivusto) ilmoittaa tutkalaitteiston kanssa yhteensopivien GPS-systeemien tarkkuuksiksi: GPS 5-15 m, DGPS 0,5-1 m ja RTK 1-2 cm.

2.3 Radioluotauksen signaalinkäsittely

2.3.1 Maxwellin yhtälöt

Maxwellin yhtälöillä voidaan ilmaista elektromagneettiset kentät ja fysikaalisten mitasuureiden suhteet:

$$\nabla \cdot \bar{D} = q$$

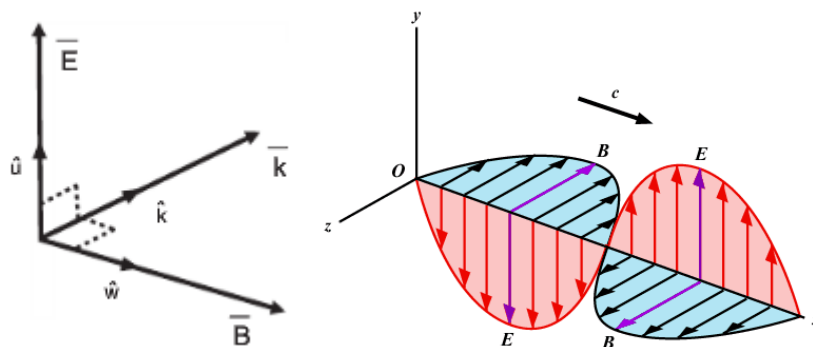
$$\nabla \cdot \bar{B} = 0$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$$

jossa D on sähkövuon tiheys (C/m^2), q on sähkövarauksen tiheys (C/m^3); B on magneettivuon tiheys (T); E on sähkökentän voimakkuus (V/m); H on magneettikentän voimakkuus (A/m); J on sähkövirran tiheys (A/m^2) ja t on aika (s). Merkintä $\nabla \cdot$ (nabla piste) tarkoittaa vektorifunktion *divergenssiä* eli lähteisyyttä (yksikkönä $1/m$). Merkintä $\nabla \times$ (nabla risti) sen *roottoria*, eli pyörteisyyttä (yksikkönä $1/m$). (Jol 2008.)

Elektromagneettisessa kentässä sähkökenttä (E), magneettikenttä (B) ja aallon etenemissuunta ovat kohtisuorassa toisiaan vasten (Jol 2008). Sähkö- ja magneettikenttää, sekä elektromagneettisen aallon etenemistä on havainnollistettu kuvassa 2.3.1.a.



Kuva 2.3.1.a. Sähkökenttä (E), magneettikenttä (B) ja aallon etenemissuunta ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan (Jol 2008, s. 9).

James Clerk Maxwell summasi yhtälöissään useiden tutkijoiden aikaisemmin tekemän työn. Näillä sähköisten ja sähkömagneettisten kenttien vuorovaikutusta kuvaavien yhtälöiden avulla sähkömagneettisia aaltoja voidaan kuvata matemaattisesti. Maxwellin yhtälöiden avulla voidaan luonnehtia materiaalien elektromagneettisia ominaisuuksia perustuen maatutkasignaalin heijastumiseen väliaineista. Riippuen energiahäviön suhteellisesta magnitudista energian säilyttämiseen, kentät voivat joko hajottaa tai kasvattaa

aaltoja. Maatutkalla voidaan havaita pinnanalaisia materiaaleja, kun olosuhteet tuottavat aaltomaisen vastareaktion. (Jol 2008, s. 8.)

Elektromagneettisten aaltojen luonnetta voidaan havainnollistaa kirjoittamalla Maxwellin yhtälöt seuraavalla tavalla, jolloin voidaan eliminoida joko sähkö- tai magneettikenttä:

$$\bar{\nabla} \times \bar{\nabla} \times \bar{E} + \mu\sigma \cdot \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \cdot \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = 0$$

Elektromagneettisten aaltojen luonnetta kuvaavasta yhtälöstä on eliminoitu magneettikenttä. Yhtälössä ensimmäinen termi kuvaa sähkökenttää, toinen termi on energiahukka ja kolmas termi on energian säilyvyys. Yleisesti maatutka on tehokas pienihäviöisissä materiaaleissa, joissa energiahukkatermi on pieni verrattuna energian säilyvyyteen. Maatutkatutkimuksissa mitataan yleisesti sähkömagneettisten aaltojen etenemistä sähkökentässä. Sähkökenttä voidaan kirjoittaa seuraavasti (Jol 2008, s. 9):

$$\bar{E} = f(\bar{r} \cdot \bar{k}, t) \hat{u}$$

jossa \bar{r} on vektori, joka kuvaa sijaintia ja $f(\bar{r} \cdot \bar{k}, t)$ toteuttaa skalaariyhtälön

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) - \mu\sigma \frac{\partial}{\partial t} f(\beta, t) - \mu\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} f(\beta, t) \equiv 0$$

jossa $\beta = \bar{r} \cdot \hat{k}$ on etäisyys etenemissuunnassa.

Pienihäviöisissä olosuhteissa

$$f(\beta, t) \approx f(\beta \pm vt) e^{\pm \alpha \beta}$$

jossa

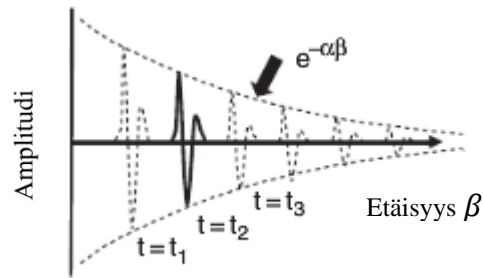
$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}, \quad \alpha = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$

v on aallon nopeus ja α vaimentuminen (Jol 2008).

Usein teorioissa käytetään sinimuotoista ilmaisu kulmataajuudella ω . Tässä muodossa:

$$f(\beta, t) = A \exp\left(-\left(i\left(\frac{\beta}{v} - \omega t\right)\right)\right) e^{-\alpha\beta}$$

jossa A on signaalin amplitudin huippu (Jol 2008). Kuvassa 2.3.1.b on havainnollistettu aallon etenemistä pienihäviöisessä ympäristössä.



Kuva 2.3.1.b. Pienihäviöisessä ympäristössä elektromagneettinen aalto etenee äärellisellä nopeudella ja amplitudin hajonta minimaalisella pulssin muodonmuutoksella (kuva: Jol 2008).

Maatutka mittaa vastaanotetun signaalin amplitudin ja signaalin matkaan kuluneen ajan, joiden perusteella se pyrkii tunnistamaan materiaalien elektromagneettisia ominaisuuksia.

2.3.2 Materiaalit sähkömagneettisessa kentässä

Materiaalien dielektrisiä ominaisuuksia voidaan tarkastella joko makroskooppisesta tai mikroskooppisesta näkökulmasta. Makroskooppisella lähestymistavalla katsottuna dielektriset ominaisuudet ovat Maxwellin yhtälöiden mukaisesti sähkökentän voimakkuuden, \bar{E} (V/m^2) ja sähköisen siirtymän \bar{D} (C/m^2) suhdetta materiaalissa. (Buyukötsturk, et. al. 2006.)

Elektromagneettisten kenttien ja väliaineiden välillä on riippuvuuksia, joiden perusteella voidaan kuvailla materiaalien ominaisuuksia.

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E}$$

$$\bar{J} = \sigma \bar{E}$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H}$$

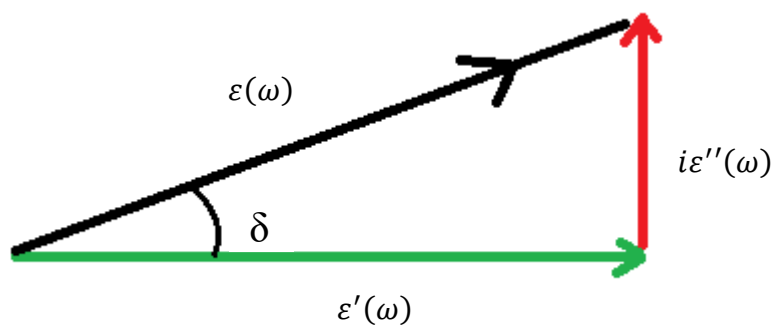
jossa ϵ on väliaineen *dielektrinen permittiivisyys*, μ on väliaineen *permeabiliteetti* ja σ on väliaineen *sähkönjohtavuus*. Ominaisuudet on esitetty yksinkertaisina vakioina. Tämä pätee vain ideallisessa tapauksessa yhtenäisen ja homogeenisen materiaalin osalta, jossa ei ilmene häviötä, anisotropiaa tai riippuvaisuutta signaalin taajuudesta. Todellisuudessa useimmat materiaalit osoittavat jonkin tasoista häviötä, taajuusriippuvaisuutta tai anisotropiaa yhdessä tai useammassa muuttujista. (Jol 2008, s. 44.)

Absoluuttinen permittiivisyys mittaa resistanssia, joka syntyy, kun väliaineeseen muodostuu sähkökenttä. Permittiivisyys mittaa kuinka sähkökenttä ja dielektrinen väliaine vaikuttavat toisiinsa. Väliaineen permittiivisyys kuvaa kuinka paljon sähkökenttää (tarkemmin, vuota) kehittyy varausyksikköä kohti väliaineessa. (Jol 2008, s. 43.)

Väliaineen polarisoitumisessa osa sähkömagneettisen aallon energiasta muuttuu lämmöksi partikkeleiden törmäyksien johdosta. Tämän ilmiön johdosta permittiivisyys kuvataan yleensä kompleksisena suureena, jossa reaalikomponentti edustaa välitöntä energian varastointi- ja vapautus mekanismeja ja imaginäärikomponentti edustaa tapahtuvaa energiahäviötä. Väliaineen dielektrisyysarvo koostuu reaali- ja imaginäärikomponenteista seuraavasti (Jol 2008):

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega)$$

Kompleksisen permittiivisyyden reaali- ja imaginäärikomponenttien suhdetta voidaan havainnollistaa kulmalla kuvan 2.3.2 osoittamalla tavalla.



Kuva 2.3.2. Reaali- ja imaginäärikomponenteista koostuva dielektrisyysarvo voidaan esittää vektoreiden summana. Kulma δ kuvaa vaihe-eroa (viivettä) sähkökentän ja sitä seuraavan polarisaatiossa tapahtuvan energiahäviön välillä. (Water structure and science Internetsivusto.)

Polarisaatioprosessi on riippuvainen myös signaalin taajuudesta, mikä johtuu molekyylien relaksaatioilmiöstä. Relaksaatiotaajuuden alapuolella partikkelit kykenevät reagoimaan nopeasti kenttiin ja pysyvät tahdissa kenttien muutosten kanssa. Relaksaatiotaajuuden yläpuolella partikkelit eivät pysy tahdissa nopeasti muuttuvan kentän kanssa, jolloin ne tuottavat energiahäviötä lämmön muodossa ympärilleen. Syntyvän lämpöenergian määrä on riippuvainen kenttienvälisestä vaihe-erosta. Sama kuvaus pätee useimpien materiaalien permittiivisyyden relaksaation tapahtuessa, joka johtaa permittiivisyyden reaalikomponentin pienenemiseen ja imaginäärikomponentin kasvua suuremmilla taajuuksilla. (Jol 2008, s. 47.)

Reaali- ja imaginäärikomponentti voidaan erottaa ja vapaan veden kompleksinen permittiivisyys voidaan ilmaista matemaattisesti seuraavasti:

Reaalikomponentin permittiivisyys:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2\tau^2}$$

Imaginäärikomponentin permittiivisyys:

$$\varepsilon''(\omega) = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}$$

jossa ε_s on permittiivisyys matalilla taajuuksilla (staattinen permittiivisyys) ja ε_∞ permittiivisyys korkeilla taajuuksilla (optinen permittiivisyys), τ on permittiivisyyden relaxaatioaika ja ω vaihe-eron kulmataajuus. (Jol 2008, s. 50.)

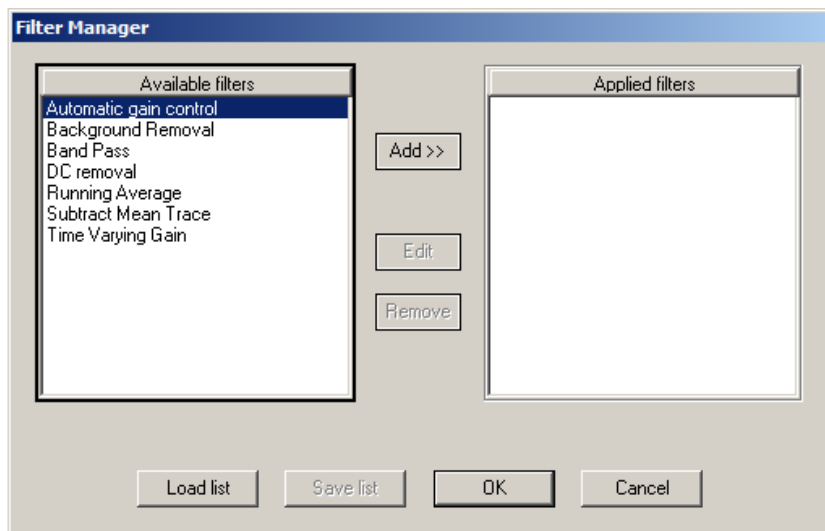
2.3.3 Datan suodattaminen

Maatutka-aineiston prosessoinnin tavoitteena on signaalin varsinaisen halutun informaation sisältävän osan ja sitä peittävän tai hämärtävän osan erottaminen toisistaan. Tarkoituksena on parantaa signaalin tulkittavuutta. Edellytyksenä onnistuneelle prosessoinnille on se, että aineiston käsittelijä tietää miten haluttu informaatio näkyy datassa ja miten kukin käsittelyoperaatio vaikuttaa datan sisältöön. (Maijala, Saarenketo 2000.)

Tarvittavan prosessoinnin määrä ja tarve riippuu tutkittavasta kohteesta ja rekisteröinnin laadusta. Tutkakuvissa on aina jonkin verran kohinaa, häiriöitä sekä tarpeettomia, tutkittavaa kohdetta peittäviä signaaleja. Datan prosessointia ei tarvita, jos tutkittava tieto näkyy, vaikka datassa olisikin häiriöitä. (Maijala, Saarenketo 2000.)

Tallennetussa datassa suositellaan käytettävän joitakin filttäreitä, jotta kohinaa ja sointia saadaan vähennettyä. Malå CX (Concrete Imaging) System:in ohjelmisto tallentaa datan raakana ja filttäreitä voidaan käyttää yhtä hyvin myös jälkeempään. Jos filttäreitä käytetään jo mittausvaiheessa, tulee olla maltillinen niiden käytössä, jotta kaikki pinnanalaisten heijastuksia aiheuttavat pinnat tallentuvat (Saarenketo 2006).

Suodattimien käyttöön ei ole yksiselitteisiä ohjeita ja niiden soveltuvuus vaihtelee tutkittavan kohteen mukaan. Kuvassa 2.3.7 on GroundVision ohjelmassa saatavilla olevat suodattimet. Datan prosessointiin tarkoitettuja ohjelmia on useita.



Kuva 2.3.7. Ramac GroundVision –ohjelmalla voidaan suodattaa signaalia ”Filter Manager” –välilehden suodattimilla.

Yksiulotteiset suodatusoperaatiot

Yksiulotteisella suodatuksella tarkoitetaan taajuussuodatusta, joka tehdään yhdelle aikasarjalle kerrallaan. Aikasarja voi muodostua yhden pyyhkäisyn näytteistä (vertikaalisuodatus) tai usean rinnakkaisen pyyhkäisyn samalla aikatasolla olevista näytteistä (horisontaalisuodatus). Signaalin taajuussisällön tunteminen on tällöin olennaista. Tämä voidaan selvittää esimerkiksi Fourier-muunnoksen avulla. Yleensä nyrkkisääntönä on kuitenkin, että ylipäästötaajuus on enintään puolet antennin keskitaajuudesta ja alipäästötaajuus vähintään kaksinkertainen keskitaajuuteen verrattuna. (Maijala, Saarenketo 2000.)

Vertikaalisuodatuksella poistetaan korkeataajuisia kohinaa ja matalataajuisia signaalin värähtelyä. Horisontaalisuodatuksella poistetaan pyyhkäisyltä toiselle samanlaisena toistuvaa taustaa. Vakiotauhanpoisto on erikoistapaus horisontaalisuodatuksessa. Siinä oletetaan taustan olevan vakio koko datassa. (Maijala, Saarenketo 2000.)

Signaalin vahvistaminen

Signaalia vahvistamalla pyritään kompensoimaan amplitudin vaimennusta. Pääasiallisena tarkoituksena on tuoda signaali sellaiselle voimakkuustasolle, että se on esitettävissä tulostuslaitteiden rajoitetulla dynamiikalla. Voidaan laskea vahvistuskäyrä, joka ottaa huomioon väliaineessa tapahtuvan signaalin sähköisen ja geometrisen vaimennuksen. Tällöin tuloksena on ns. näennäisheijastuskuva, joka kuvaa tuloksen teoriassa sellaisena mikä se olisi, jos väliaineessa ei tapahtuisi lainkaan signaalin vaimenemista. Automaattisessa signaalin vahvistamisessa (*"Automatic gain control"*) vahvistus lasketaan datasta itsestään. Perustuen oletukseen, että kussakin pyyhkäisyssä signaalin keskimääräinen tai neliöllinen amplitudi asetetuissa aikakaistoissa on vakio. Tästä parannetussa oletetaan, että amplitudi on vakio aikakaistoissa, jotka lasketaan koko datan läpi, kunhan datamäärä vain on tarpeeksi suuri. Laskettuja vahvistuskäyriä voidaan tasoittaa limittämällä aikakaistoja. (Maijala, Saarenketo 2000.)

Dekonvoluutio

Dekonvoluutiolla pyritään rekonstruoimaan maan vaste niin hyvin kuin mahdollista mitatun rekisteröinnin sekä tunnetun lähtösignaalin ja kohinan avulla. Operaatiota käytetään terävöittämään tutkasignaalia ja poistamaan moninkertaisia heijastuksia. (Maijala, Saarenketo 2000.)

Kaksiulotteinen suodatus

Kaksiulotteisella suodatuksella tarkoitetaan menetelmiä, joissa suodatus tehdään vinosti matka- ja aikakoordinaattien suhteen. Tämän vuoksi näitä nimitetään myös nopeus-suodatuksiksi. (Maijala, Saarenketo 2000.)

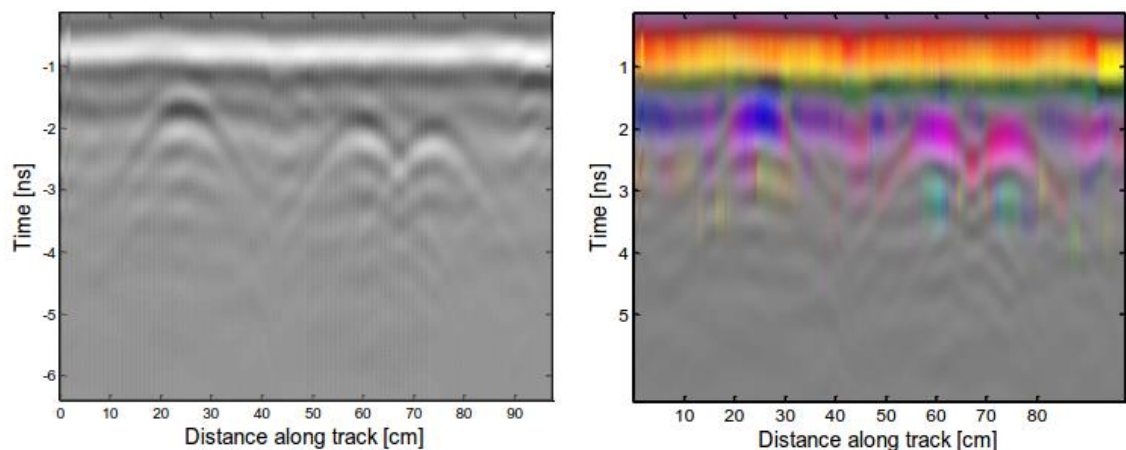
F-k-suodatuksessa aineistolle lasketaan kaksiulotteinen Fourier-muunnos, jolloin datan käsittely muuttuu aika-tilatasosta taajuus-aaltolukutasoon. Aika-tilatasossa limittyvä

häiriö ja signaali voivatkin erottua taajuus-aaltolukutasossa. Operaatio on varsin hidas ja se on käytännössä sovellettavissa vain suppeahkolle aineistolle. (Maijala, Saarenketo 2000.)

Migraatio on prosessi, joka kuvaa heijastuneen ja diffraktoituneen energian oikealle paikalleen. Lähettimen aaltokentän muodon johdosta pistemäiset heijastajat kuvautuvat tutkakuvaan hyperbeleinä. Operaatio on herkkä vaaka- ja pystysuuntaisille nopeusvaihteluille, minkä vuoksi operaatio on parhaillaan mahdollisimman homogeenisilla väliaineilla. (Maijala, Saarenketo 2000.)

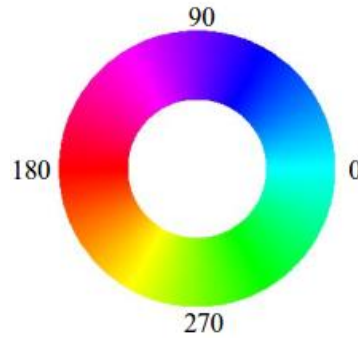
2.3.4 Amplitudi- ja vaihetiedon yhdistäminen

Impulssitutkan amplitudi- ja vaihetiedon hyödyntämistä on kehitetty (Mikhev et. al. 2012). julkaisussa. Taajuustasossa kehitettyä tekniikkaa, jossa rakennetaan erikseen amplitudi- ja vaiheprofiilit jokaiselle pyyhkäisylle, on kehitetty impulssitutkalle sopivaksi. Amplitudi- ja vaihetieto on yhdistetty samaan kuvaan siten, että amplitudi määrää pikselin intensiteetin ja vaihe määrittää värin. Kuvassa 2.3.3 on esitetty tutkimuksessa kerättyä dataa prosessoituna ja prosessoimattomana. (Mikhev, et. al. 2012.)



Kuva 2.3.3. *Datan prosessointia hyödyntäen vaihetietoa. Oikeanpuoleisessa kuvassa on sama maatutkalla kerätty data kuvattu edellä mainittua menetelmää käyttäen. (Mikhev, et. al. 2012.)*

Kuvassa 2.3.3 on voitu erottaa oikeanpuoleiset vierekkäiset metallitangot ja vasemmanpuoleinen muoviputki värien avulla. Menetelmässä heijastus on jaettu kahteen etäisyysprofiiliin, jotka vastaavat amplitudia ja vaihetta. Vaiheella tarkoitetaan keskimääräistä vaihesiirtoa aallon heijastuessa epähomogeenisesta materiaalista. Vaihesiirto riippuu kontrastista eri materiaalien pintojen välillä sekä signaalin etenemisestä heijastuksen aiheuttavassa materiaalissa. (Mikhev et. al. 2012.)



Kuva 2.3.4. Vaihe (asteissa) värien avulla ilmaistuna.

Julkaisussa ”Discrimination of buried objects in impulse GPR using phase retrieval technique” (Mikhev et. al. 2015) todetaan, että jos pinnanalaisten materiaalien permittiivisyysominaisuudet ovat lähes samankaltaiset, ovat vaihetiedosta saadut arvot lähellä toisiaan. Väliaineen heterogeenisuus asettaa toisen haasteen vaihetiedon tulkintaan eri materiaalien tunnistamisessa.

2.3.5 Askeltaajuustutka ja taajuusmoduloitu kantoaaltotutka

Tutkat, jotka hankkivat dataa taajuustasossa ja lähettävät jatkuvaa signaalia tunnetaan nimellä askeltaajuustutka tai taajuusmoduloitu jatkuva-aaltotutka (FM-CW). Taajuusmoduloitu jatkuva-aaltotutka lähettää vakioamplitudista, taajuudeltaan muuttuvaa signaalia. Pelkällä jatkuvaa aaltoa lähettävällä tutkalla voidaan mitata maalin nopeus, mutta ei etäisyyttä. Etäisyys voidaan määrittää lisäämällä lähetyssignaaliin niin sanottu ajastinmerkki, jolloin kaikusignaalit voidaan erotella toisistaan taajuuserojen perusteella. (Jol, H. s. 75.)

Tutka lähettää sarjan taajuuksiltaan kasvavia pulsseja. Pulssin k taajuus saadaan kaavasta (Paulose 1994):

$$f_k = f_n + (k + 1)\Delta F$$

jossa f_n on nimellinen kantotaajuus ja ΔF on taajuusaskelten väli. Tutkan aaltomuodon hetkellinen kaistanleveys on lähestulkoon pulssin leveyden käänteisluku, ja se on huomattavasti pienempi kuin tehollinen kaistanleveys. Aaltomuodon tehollinen kaistanleveys, B , määräytyy pulssien lukumäärän ja taajuusaskelten välin mukaan (Paulose 1994):

$$B_{eff} = N\Delta F$$

Resoluutio millä tahansa aaltomuodolla on riippuvainen tehollisesta kaistanleveydestä. Askeltaajuustutkan resoluutio saadaan kaavasta (Paulose 1994):

$$\Delta r = K \left(\frac{c}{2B} \right) = K \left(\frac{c}{2N\Delta F} \right)$$

jossa K on signaalin taajuuden painotusikkunan määrittelemä vakio ja suurempi tai yhtä suuri kuin yksi, ja c on valon nopeus. Resoluutiota voidaan parantaa joko kasvattamalla pulssien määrää tai suurentamalla taajuusaskelta. (Paulose 1994.)

3. TUTKIMUKSEN SUORITUS

Tutkimusta suunniteltaessa käytiin palavereja kohdeyrityksen edustajien kanssa, joissa määritettiin tutkimuksen rajaus ja tavoitteet. Tutkimuksen edetessä keskusteltiin myös Tampereen teknillisen yliopiston signaalinkäsittelylaitoksen asiantuntijoiden kanssa kehitysmahdollisuuksista. Tutkimuksen alussa oli perehdyttävä tutkatekniikkaan ja tutkimus ongelma määriteltiin kokouksissa puhuttujen asioiden pohjalta sekä kirjallisuuskatsauksella.

Tutkimuksen päätavoitteeksi asetettiin tutkan ohjelmiston kehitystarpeiden määrittely aikaisemman kokemuksen perusteella menetelmän testauksesta. Kehitystarpeiden määrittelyssä oli tärkeää selvittää myös ohjelmistokehityksen mahdollisuuksia yhteistyössä signaalinkäsittelyn laitoksen kanssa. Tutkimuksen empiirinen osuus toteutettiin kokeellisena tutkimuksena Parman Forssan ontelolaattatehtaalla sekä kahdella kerrostalotyömaalla pääkaupunkiseudulla. Koekappale suunniteltiin mittauksia varten siten, että sen avulla saadaan kerättyä tarvittava aineisto työmaalla esiintyvien tilanteiden mukaisesti ohjelmistokehityksen lähtötiedoksi. Työmaatestauksissa kohteena oli kaksi kerrostalotyömaata pääkaupunkiseudulla. Yhdistämällä koekappalemittauksista kerätty aineisto sekä työmaakokemukset tutkan käytöstä pyritään määrittelemään ohjelmiston kehitystarpeet. Koekappalemittauksista kerätystä aineistosta voidaan aloittaa signaalinkäsittelyn osalta kehitystyö.

3.1 Kokeellinen tutkimus

Kokeellisen tutkimuksen suoritusta varten vuokrattiin Malå CX-11 betonirakenteiden tutkimukseen soveltuva maatutka Aalto-yliopiston geotekniikan laitokselta. Kokeellinen osuus tuli suorittaa kahden viikon aikana, koska tutkan saatavuudessa oli pieniä haasteita. Alun perin tutkimusta varten piti saada (Malå CX-12) samantyyppinen maatutka Ruotsista Målalta, mutta tutka ei ollutkaan saatavilla, kun sitä olisi tarvittu.

Kokeellinen tutkimus suunniteltiin siten, että ensimmäisen viikon aikana suoritetaan koekappalemittaukset ontelolaattatehtaalla ja toisen viikon aikana testataan tutkaa työmaaolosuhteissa. Tutkan käytön opetteluun ja mittaasetusten säätämiseen kului kuitenkin yllättävän paljon aikaa ja koekappalemittausten aikataulu venyi hieman. Työmaalla päästiin testaamaan tutkaa kuitenkin kahdessa eri kohteessa.

3.2 Tutkalaitteen esittely

Malå CX-11 tutkalaitteisto koostuu tutkasta, näyttöyksiköstä ja akusta, jotka kytketään toisiinsa johdoilla. Tutkassa on neljä pyörää ja pohjassa muovilevy, jonka takana sijaitsevat lähetys- ja vastaanottoantenni. Toinen takapyörä mittaa matkaa, eli mittausta tehdessä täytyy varmistaa, että pyörän kontakti laatan pintaa vasten on hyvä. Kuvassa 3.1.2. on tutkalaitteisto käyttövalmiina.



Kuva 3.1.1. Malå CX-11 tutkalaitteisto.

Koelaatan mittaaminen oli helppoa mukana kannettavien laitteiden ja johtojen määrästä huolimatta, koska näyttöyksikkö ja akku voitiin asettaa laatan päälle mitattaessa. Työmaolosuhteissa laitteiston mukana kuljettaminen vaatii vähän soveltamista. Laitteeseen on saatavilla lisävarusteena mittapyörä, joka pyörii paremmin pintaa vasten, mutta sellaista ei tällä kahden viikon kenttätutkimusajanjaksolla ollut käytössä. Koelaatan mittauksessa tämä ei aiheuttanut ongelmia, mutta työmaalla tutkaaminen on huomattavasti helpompaa, jos mittapyörä pyörii vaivattomasti.

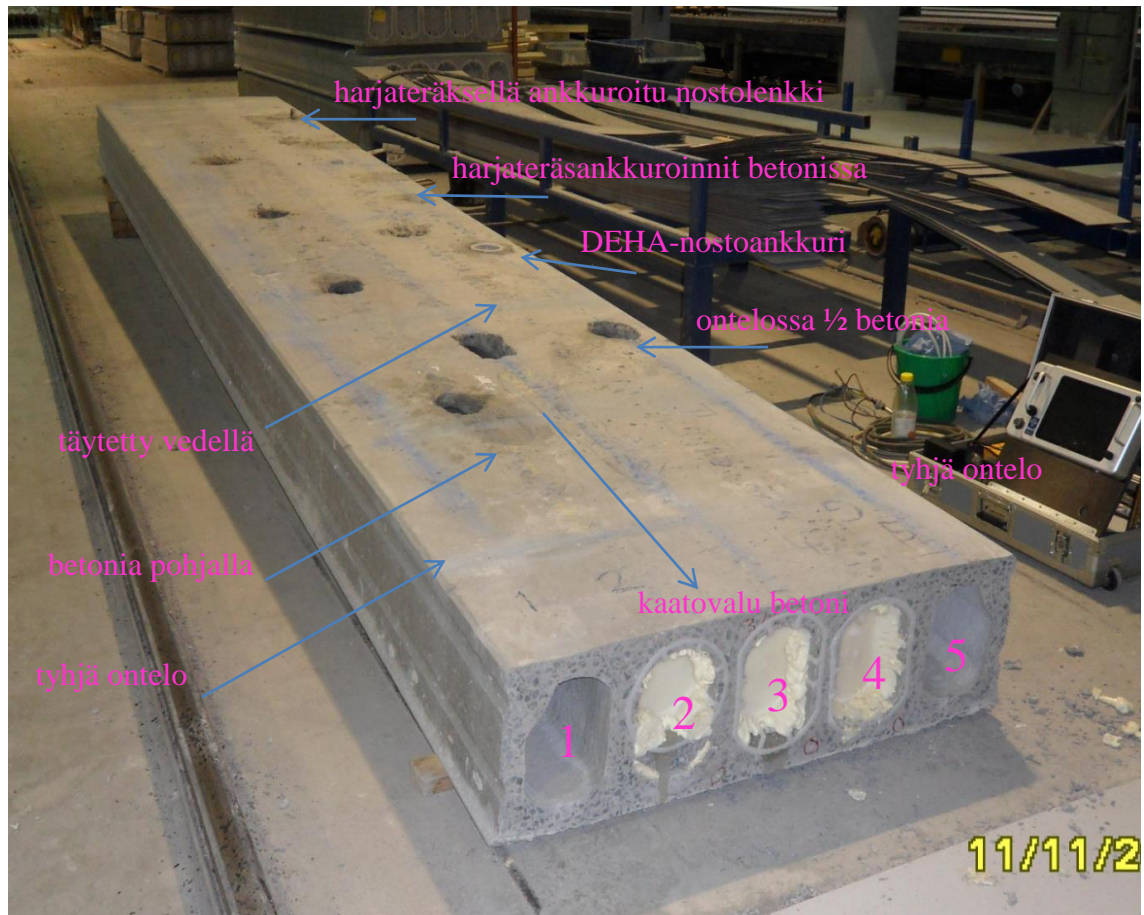
Työmaalla käytössä oli jatkovarsi, jonka avulla tutkaa sai helposti työnneiltyä lattian päällä. Akku kulki mukana työliivin taskussa ja näyttöyksikkö toisessa kädessä mittauksia tehdessä. Isokokoiselta erilliseltä näytöltä on hyvä seurata tutkakuvaa läheltä, mutta sen mukana kantaminen vaatii jatkossa kehitystä. Koekappalemittaukset tehtiin myös Roadscanners Oy:n kanssa yhteistyössä heidän GSSI StructureScan Mini betonirakenteiden tutkimiseen soveltuvalla maatutkalla. GSSI:n laitteessa ei ole muita siihen kytkettäviä elementtejä, vaan näyttö ja akku ovat sisällytetty tutkalaitteeseen. Mala CX-11 (Concrete Imaging) System maatutka toimii 1,6 GHz pulssin keskitaajuudella ja GSSI:n tutkalaitteen pulssin keskitaajuus oli 2,6 GHz.

3.3 Koekappalemittaukset

Koekappale (Kuva 3.3.1.) valmistettiin Parman Forssan ontelolaattatehtaalla, jossa myös mittaukset suoritettiin. Kappale piirrettiin Autocad-ohjelmalla ja valmistettiin tehtaalla kuvien mukaan. Mittausjärjestelyiden toteuttamisessa sain hyviä vinkkejä muun muassa Miranet Oy:n Keijo Nuutiselta joka keksi, että laattaa kallistamalla saadaan kätevästi mitattua erisuuria vesimääriä onteloista. Koekappaleen suunnittelussa sain myös Parman edustajien kanssa käydyssä palaverissa hyviä kommentteja, joiden pohjalta laatta suunniteltiin.

Koekappalemittaukset suoritettiin Forssan ontelolaattatehtaalla 11. – 19.11.2015 välisenä aikana. Laitteen mittausparametrien optimointi ja asetusten säätäminen sekä koejärjestelyjen valmistelu ja suunnittelu paikan päällä vei aikaa, joten mittauksia jouduttiin tekemään useampana päivänä kuin oli suunniteltu. Aineistossa esitetyt tulokset ovat pääosin 19.11.2015 tehdyistä mittauksista lukuun ottamatta onteloiden pituussuuntaisia tutkakuvia, jotka on mitattu 16.11.2015 sekä tutkimusta edeltäviä laboratoriomittauksia 2,3 GHz antennilla.

Mittaukset dokumentoitiin kirjaamalla mittauspöytäkirjaan etäisyys laatan korotetusta päästä ja sitä vastaavan tiedoston nimi. Pöytäkirjaan tehtiin myös merkintöjä onteloiden vesi- ja betonimääristä. Reunimmaisen ontelon 5 teräksien sijainnit dokumentoitiin myös. Tällöin suuremmilta epäselvyyksiltä aineiston tarkastelussa jälkeenpäin vältyttiin.



Kuva 3.2.1. Laatta on kallistettu korottamalla toista päätä. Ontelot on numeroitu yhdestä viiteen. Mittauspöytäkirjaan (taulukko 4.1.1.) on merkitty tarkasti koekappalelaatan yksityiskohdat.

Laatassa (P37) on viisi onteloa, jotka numeroitiin dokumentointia varten yhdestä viiteen. Onteloiden keskilinjat merkattiin laatan pintaan. Laatan toista päätä korotettiin, jolloin ontelonsisäisten vesimäärien vaihtelu saatiin järjestettyä helposti. Laatan pituus on 6,8 m. Mittaukset suoritettiin korotetusta päädyistä aloittaen ja edettiin 20 cm välisin linjoin, paitsi vesirajan kohdalla linjoja tihennettiin 10 cm välisiksi, jotta saadaan tarkasteltua pienempien vesimäärien näkymistä tutkاداتassa.

Ontelo 1 oli tyhjä koko matkalta, ontelossa 2 oli betonia pohjalla, suunnitelmien mukaan 50 mm, mutta käytännössä betonia oli enimmäkseen matkalta 80 - 90 mm. Onteloon 3 valettiin betonia matalampaan pätyyn n. 2 metrin matkalta siten, että betonikerroksen paksuus ontelon pohjalla vähenee laatan päätä kohti. Ontelo 4 täytettiin vedellä siten, että toisessa päässä ontelo on täynnä vettä ja veden pinta alkoi 100 cm laatan päästä. Tästä saatiin 20 cm välein mitattua eri vesimääriä. Reunimmaiseen onteloon 5 tehtiin erilaisia teräksisiä kiinnikkeitä, raudoituksia ja nostolenkkejä työmaalla esiintyvien rakenteiden mukaisesti.

Mittausten suorituksessa käytössä oli metrimitta ja taskulamppu, joiden avulla pystyttiin mittaamaan käytännöllisesti vesimääriä ja betonin paksuuksia onteloiden sisällä niistä

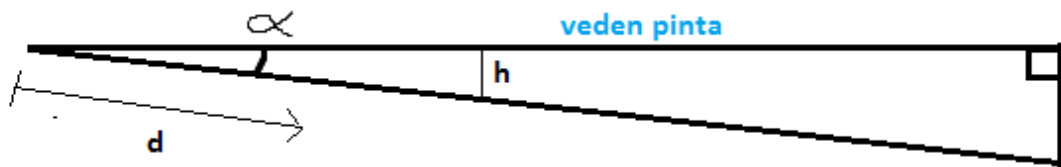
kohdista, joissa se oli mahdollista. Mittauspöytäkirjaan on jälkikäteen laskettu teoreettisia vesimääriä ontelossa, mutta niiden tarkkuudessa on virheen mahdollisuus. Betonin määrää ontelon pohjalla on myös jouduttu paikoittain arvioimaan. Mittausten dokumentoinnin tarkkuus on kuitenkin tarpeeksi hyvä mittausdatan analysointia varten.

Puisten tukien, joiden päällä laatta makasi, etäisyys oli 6,2 m ja tukien välinen korkeusero 31,5 cm. Näiden mittojen avulla saatiin laskettua laatan kallistuskulma (α), ja kallistuskulman avulla saatiin laskettua vedenpinnan korkeus ontelossa kullakin etäisyydellä.

Laatan ollessa 6,2 metrin matkalla 31,5 cm korotettu toisesta päästä, voidaan laskea kallistuskulma α trigonometrian avulla:

$$\tan \alpha = 31,5/620$$

josta saadaan laatan kallistuskulmaksi $\alpha = 2.908^\circ$.



Kuva 3.1.2. Koekappalelaatan ontelonsisäisen vedenpinnan korkeuden laskeminen.

Vedenpinnan korkeus ontelossa lasketaan kulman α avulla:

$$\sin \alpha = \frac{h}{d}$$

jolloin

$$h = d \cdot \sin \alpha$$

Tärkein mittauksista haluttu tieto oli selvittää kuinka eri vesimäärät ja betoni näkyvät tutkakuvassa ja kerätä näistä tarvittava mittausaineisto analysoitavaksi. Lisäksi 2 ontelosta saatiin dataa tapauksesta, jossa pohjalla on betonia, jonka päällä vettä. Poikittain onteloita vasten tehdyissä mittauksissa ei saatu dataa täynnä betonia olevasta ontelosta, siinä mittausjärjestelyissä hieman epäonnistuttiin. Reunimmainen ontelo 5 oli valettu suurimmalta osalta täyteen, mutta sen mittaaminen poikkisuunnassa ei näillä koejärjestelyillä onnistunut, koska tutkan signaali pääsi kulkeutumaan kohteen kautta antennista toiseen vain kolmen keskimmäisen ontelon kohdalla koeolosuhteissa, joissa mitattava pinta ei ole jatkuva, vaan rajoittuu laatan poikkimittaan.

Laskennallisissa vesimäärän arvoissa tulee ottaa huomioon mittavirheen mahdollisuus. Virhe voi todennäköisemmin aiheutua laatan kallistuskulman mittavirheestä, eli tukien etäisyyden tai niiden korkeuksien mittatarkkuudesta. Vesirajat on mitattu metrimitalla

avonaisesta ontelon päästä, näissä mittavirhe voi olla +/- 1 cm, joten vesirajan mittavirheellä on vaikutusta käytännössä vain vesirajan kohdalta suoritettujen mittausten datassa. Laatan kallistuskulma on laskettu mittaamalla puisten korokkeiden korkeusero ja niiden välinen etäisyys. Kallistuskulman laskennassa käytettiin mitattuja arvoja 620 cm (tukien etäisyys) ja 31,5 cm (tukien korkeusero). Etäisyyden mittavirhe voi olla enintään +/- 2 cm ja tukien korkeuseron mittavirhe enintään - 1,0 tai + 0,5 cm. Koeolosuhteissa mitatuilla arvoilla saatiin kallistuskulmaksi:

$$\tan \alpha = \frac{31,5}{620} \Rightarrow \alpha = 2,908$$

Kulman α arvojen vaihtelusta voidaan laskea mittausten prosentuaalinen virhe laskennassa käytetyn kulman ja pienimmän mahdollisen kulman suhteena:

$$\left(\frac{\sin(2,908)}{\sin(2,807)} - 1 \right) \cdot 100\% = 3,60\%$$

jos tukien korkeusero on 30,5 cm ja etäisyys 622 cm, on laatan kallistuskulma α 2,807°. Tämän virheen mahdollisuudesta johtuen on epävarmaa, onko viimeisimpien mittauslinjojen kohdalla sellaista tilannetta, jossa ontelo olisi täynnä vettä. Kulmalla $\alpha = 2,807^\circ$ 620 cm:n päässä laatan kuivasta päädystä olisi vedenpinnan korkeus vain 25,47 cm. Jos ontelon korkeus on mittastandardinmukaisesti 260 mm, se ei tällöin täyty kokonaan vedellä, vaan ilmaa jää väliin noin 50 mm. Laattojen mittastandardipoikkeamat eivät vaikuta oleellisesti mittaustuloksiin.

3.4 Työmaamittaukset

Työmaamittausten tavoitteena ei ollut suoranaisesti paikantaa ontelovesiä välipohjien onteloista, vaan testata maatumkaa todellisissa olosuhteissa ja määrittellä kehitystarpeita ontelovesien paikantamiselle sekä tutustua menetelmän käyttöön.

Työmaalla tutkua testattiin kahdessa kohteessa pääkaupunkiseudulla, jotka olivat hie-man eri työvaiheissa. Ensimmäisessä ei ollut vesikattoa päällä eikä lattiatasoitteita sekä onteloiden vesireiät olivat avaamatta. Toisessa kohteessa vesikatto oli päällä, lattiatasoitteet levitetty sekä onteloiden vesireiät avattu, ja lisävedenpoistoreiät porattu.

Luvussa 4 esitetään myös tämän tutkimuksen ulkopuolella aikaisemmin tehtyjä koemittauksia työmaalta. Aikaisemmissa mittauksissa on käytetty 2.3 GHz antennia. Tästä saadaan vertailuaineistoa.

Tutkaaminen oli helpompaa pinnalla, jossa oli tasoite ontelolaatastojen päällä. Pääasias-sa siksi, että mittapyörä, jonka avulla tutka on ohjelmoitu lähettämään pulseja tietyin välimatkoin, pyörii paremmin tasaista pintaa vasten. Epätasaisuudet pinnalla haittaavat

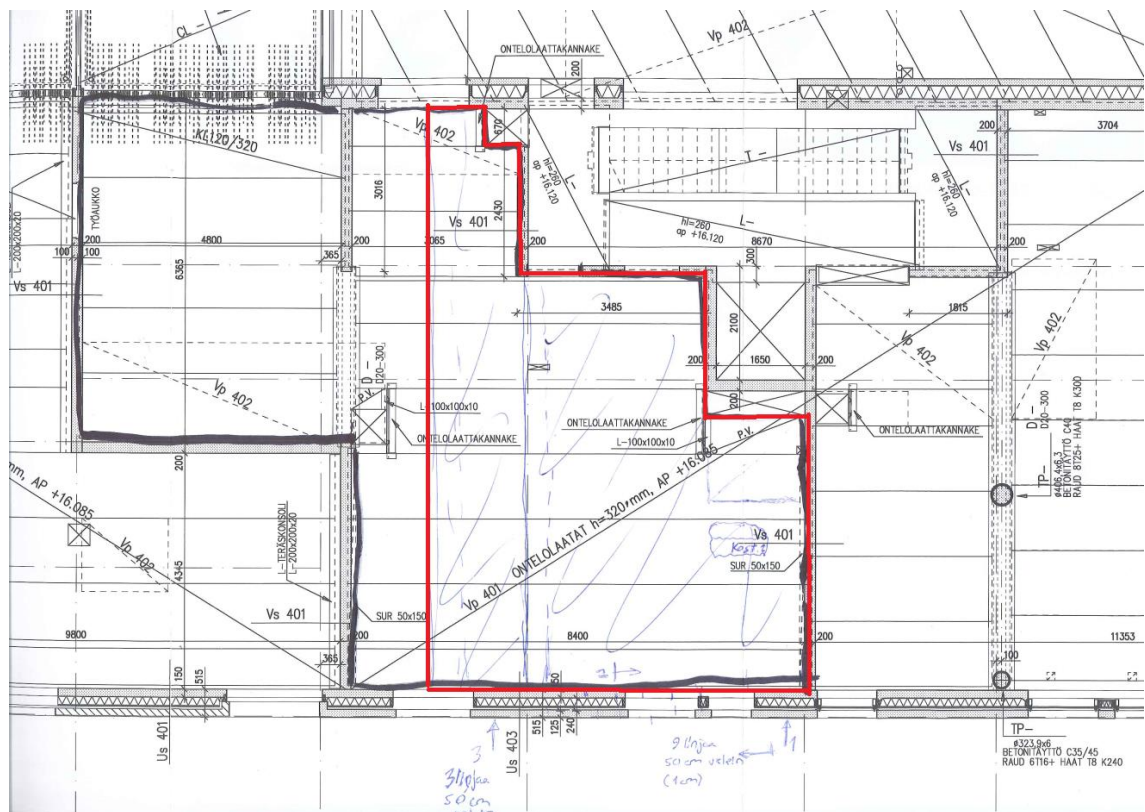
muutenkin laadukkaan tutkakuvan saamista siten, että ontelot olisivat mahdollisimman helposti vertailtavissa keskenään.

Tutkattavat alueen valittiin pääasiassa sillä periaatteella, että missä kerroksessa ja huoneissa oli eniten tilaa työskentelylle. Sen lisäksi suoritettiin katselmus, jossa arvioitiin etukäteen välipohjan kuivuutta ja mahdollisia kosteita kohtia.

3.4.1 Case 1

Ensimmäinen koemittaus suoritettiin 17.11.2015 SRV:n rakenteilla olevassa Gaalakerrostalokohteessa Helsingissä. Tässä vaiheessa rakennuksessa ei ollut vesikattoa ja ontelolaattavälipohjien päälle ei ollut levitetty lattiatasoitetta ja ontelolaattojen vesireiät oli avaamatta. Rakennus oli altistunut kosteusrasitukselle runkovaiheessa, joka osui aikataulun puolesta sateiselle syksylle. Ontelolaattojen päällä oli vettä paikoittain. Myös onteloissa oli todennäköisesti vettä.

Ennen koemittauksen suorittamista kierreltiin mestarin kanssa rakennuksessa ja valittiin koemittauksen tutkattavaksi kohdaksi punaisilla ääriviivoilla piirustukseen kuvassa 3.3.1 merkitty alue 2. kerroksessa. Valinta tehtiin sillä perusteella, että kyseisellä alueella oli esteettömin lattiapinta-ala, eikä muita töitä käynnissä sillä hetkellä. Lattiapinta-alan esteettömyys selkeytti toimintaa.



Kuva 3.3.1.a. Työmaalla tutkattiin 2. kerroksesta piirustukseen punaisella merkitty alue. Tutkaus suoritettiin puolen metrin välein onteloita vastaan poikkisuuntaan. Lattiatasoitetta ei ollut levitetty ja vesireikien avaaminen oli tekemättä.

Mittaus työmaalla aloitettiin kuvan 3.3.1 punaisella merkityn alueen oikeasta alareunasta ulkoseinästä poispäin, eli onteloiden poikkisuuntaan. Mittaus suoritettiin 0,5 m väliin linjoin. Metrimitta asetettiin ulkoseinän viereen, josta mittauslinjat oli helppo hakea. Mittauslinja sekä sitä vastaava tiedosto kirjattiin paperille datan jälkitarkastelua varten. Tutkalaitteiston liikuttaminen onnistui kantamalla akkua työliivin taskussa ja keskusyksikköä toisessa kädessä. Antennilaatikkoa työnnettiin laataston päällä jatkovarrella. Saumatun, mutta pintatasoittamattoman välipohjan päällä laadukkaasti datan aikaansaaminen oli vaikeaa, koska antennilaatikon mittapyörä oli välillä huonossa kontaktissa pintaa vasten. Jos pyörä ei pyöri, antenni ei myöskään lähetä pulsseja tasaisin välimatkoin, jolloin tutkakuvasta tulee vaikeasti luettava. Ulkoseinän vierellä kokeiltiin mitausta myös reunimmaisen ontelon päältä pituussuuntaan. Ontelon keskikohdan paikantaminen ja sen linjalla pysyminen siten, että mittapyöräkin pyörii, oli kuitenkin haastavaa.



Kuva.3.3.1.b. Tutkalaitteistoon kuuluu ladattava virtalähde, keskusyksikkö sekä antennilaatikko. Työmaalla tutkan liikuttaminen onnistui kävelykeppityylisen jatkovarren avulla. Akku sopii työliivin taskuun ja näyttölaite kulkee mukana vapaassa kädessä. Tutkauksen helpottamiseksi laitteiston mukana kuljettamisessa on kehittämisen varaa. Ontelolaattavälipohjan päällä ei ole lattiatasoitetta eikä onteloiden vesireikiä ole avattu.



Kuva 3.3.3.c. Kerrostalorakennuksessa oli monin paikoin vettä ontelolaataston pinnalla. Useissa tiloissa lattiapinta-ala ei ollut esteetöntä tutkimukselle tässä vaiheessa. Tämän kuvan aluetta ei tutkattu koemittauksessa.



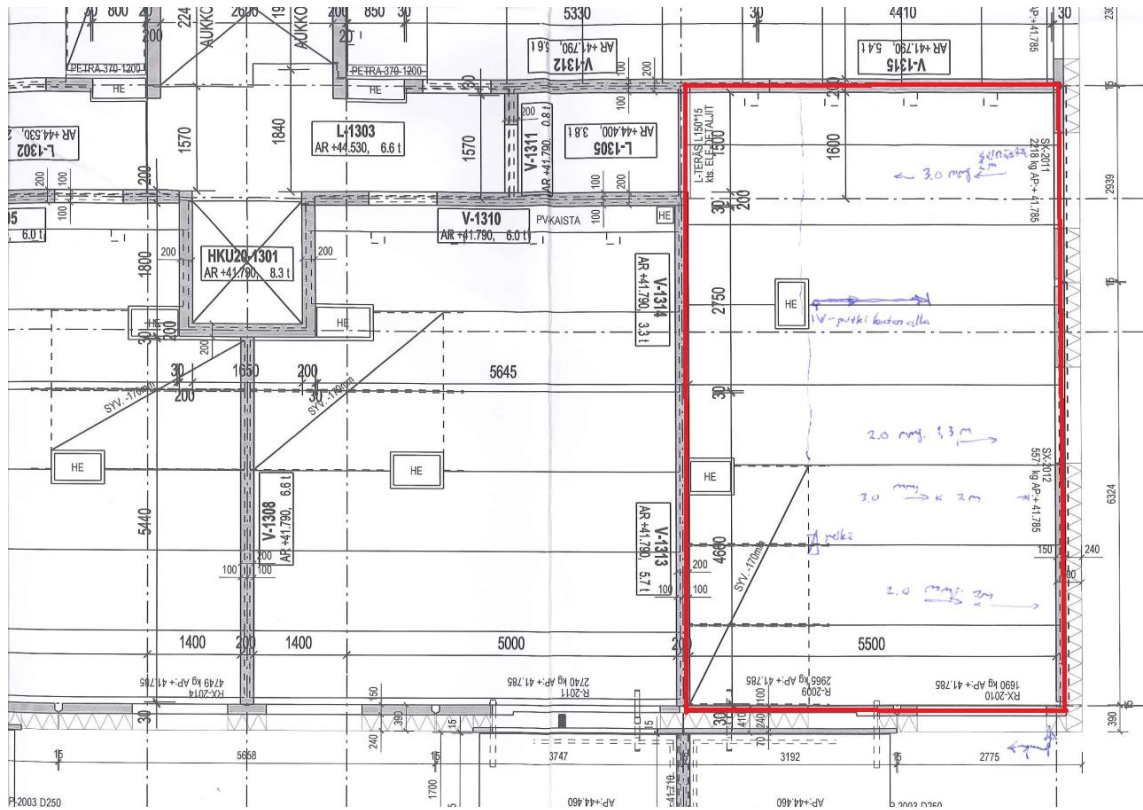
Kuva. 3.3.1.d. Keskusyksikön näytöltä reaaliaikaiseen tutkakuvaan saa myös väripaletin. Aloittelijan on vaikea tulkita näytön tutkakuva. Ottamalla käyttöön väripaletin keskusyksikön asetuksista on poikkeavia heijastuksia helpompi havaita, kuin harmaaväriskaalasta.

Haasteellista oli anteeniin liikuttaminen epätasaista laatan pintaa vasten samalla huolehtien, että mittapyörä pyörii sekä näytön tarkkailu samanaikaisesti. Koemittauksen dokumentoinnin laatua heikensi myös se, ettei käytössä olleella laitteistolla voitu tallentaa reaaliaikaista tutkakuva sellaisenaan keskusyksikön näytöltä suoraan tiedostomuotoon, vaan näytön dokumentointi piti suorittaa kameralla.

3.4.2 Case 2

Toinen koemittaus suoritettiin myös SRV:n rakenteilla olevassa kerrostalokohteessa, Vantaan Neulanen, 18.11.2015. Tässä talossa ontelolaattaväli pohjan päällä oli lattiatasoite ja onteloiden vesireiät oli avattu. Vesikatto oli asennettu ennen syksyn sateisimman jakson alkamista ja väli pohjat vaikuttivat katselmuksen perusteella kuivilta.

Tutkattu alue rakennuksen kolmannessa kerroksessa on merkitty piirustukseen punaisilla ääri viivoilla kuvassa 3.3.2.



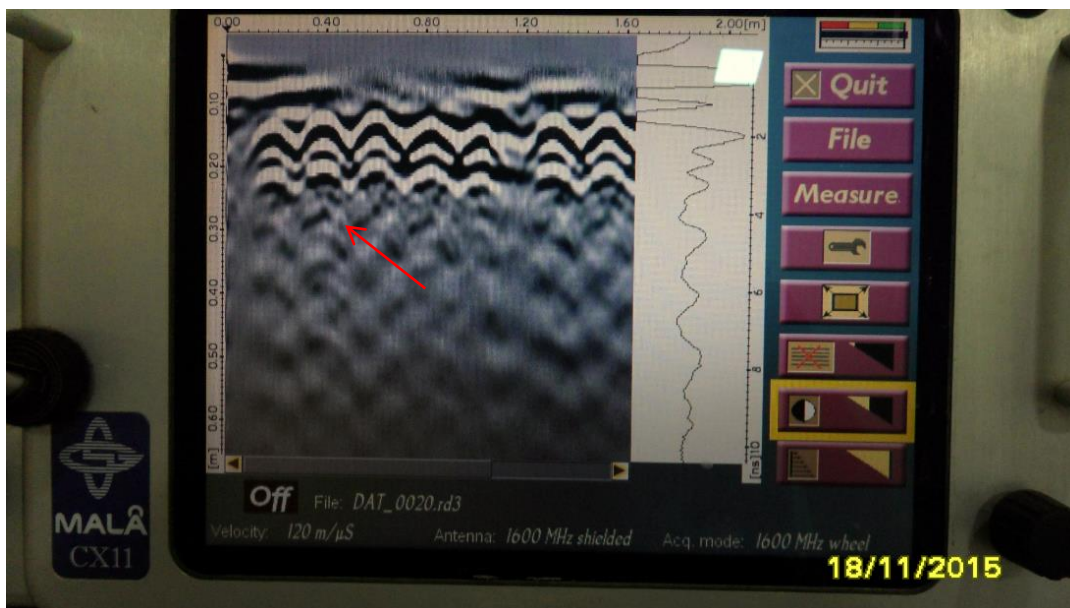
Kuva 4.3.2.a. Työmaalla tutkattiin piirustukseen punaisella merkitty noin 45 m² laajuisen alue. Mittauslinjojen väli oli puoli metriä ja tutkaus suoritettiin onteloita vastaan kohtisuorassa. Ulkoseinän vierellä kuvan alareunassa kokeiltiin myös reunimmaisen ontelon tutkaamista ontelon päältä pituussuuntaan. Pituussuuntaan tutkaaminen vaatii tarkkuutta ontelon keskilinjan paikantamisessa sekä mittaus suorituksessa.

Mittaus suoritettiin samalla periaatteella, puolen metrin välisin linjoin metrimittaa apuna käyttäen, kuin ensimmäisessäkin kohteessa. Linjoja vastaavat tiedostot kirjattiin ylös datan jälkitarkastelua varten. Lattiatasoiteella tasoitetun lattian päällä tutkaaminen oli huomattavasti helpompaa, koska mittapyörän kontakti pintaan oli parempi, eivätkä laattojen väliset saumatkaan olleet häiritsemässä. Tässäkin kohteessa ulkoseinän viereisen ontelon tutkaamista ontelon päältä pituussuuntaan kokeiltiin. Ontelon keskikohdan paikantaminen ja sillä linjalla pysyminen, siten että mittapyörä myös pyörii, oli haasteellista. Tutkakuvasta pituussuuntaan oli vaikea saada selkoa. Paremmalla mittapyörällä sekä ohjelmistolla pituussuuntainen paikantaminen saattaa olla tulevaisuudessa mahdollista.

Ontelolaattavälipohjan tutkaaminen onteloiden poikkisuunnassa tasaisella pinnalla oli helpompaa. Kuvassa 4.3.3.c. näkyy tutkatun alueen laattoja alhaalta päin.



Kuva 4.3.2.b. Rakennuksen välipohjat olivat yleisesti kuivan näköisiä, ja vesikatto oli asennettu alkusyksystä ennen sateista ajanjaksoa. Kuvassa näkyy tutkattavan huoneen ontelolaattavälipohja alhaalta päin kuvattuna. Yksi vesirei'istä oli kostea ympäriltä ja ontelossa oli reiän ympärillä kosteaa lietettä.



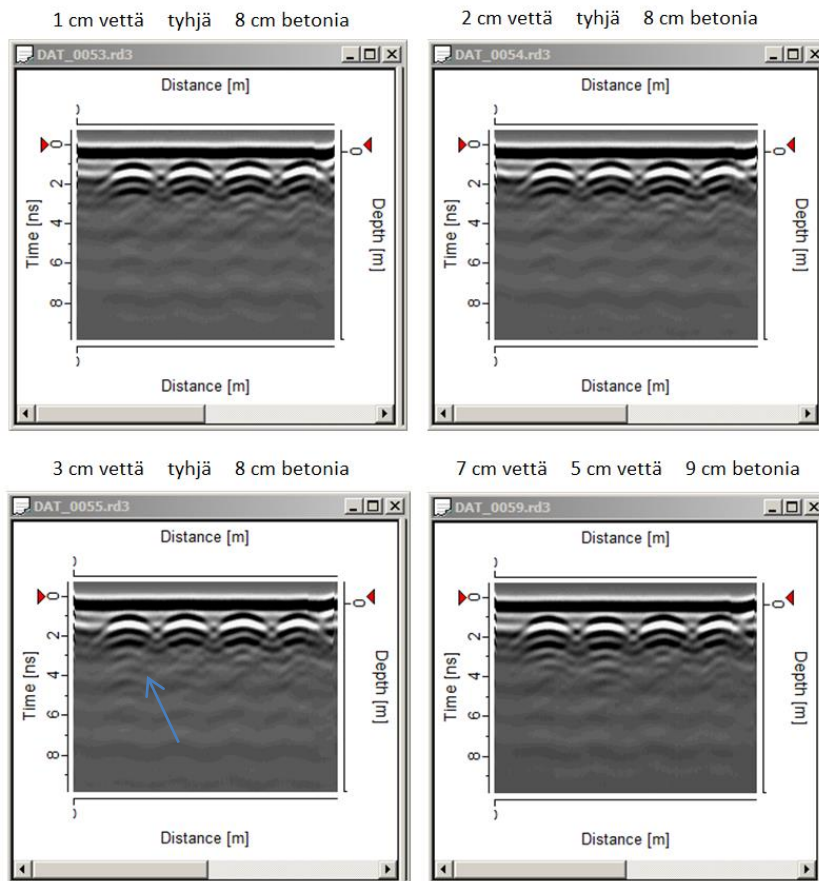
Kuva 4.3.2.c. Tutkakuva keskusyksikön näytöltä Vantaan Neulasen kolmannen kerroksen ontelolaattavälipohjasta. Toinen ontelo kuvassa oli kostea laatan alapinnan reiän ympäriltä (kuva 4.3.2.b.). Nuolen osoittamasta kohdasta on ilman parempaa tietoa ontelon sisällöstä vaikea sanoa mikä heijastuksen aiheuttaa. Tällä laitteistolla mittausero-
parametrien optimoinnilla voidaan pyrkiä vaikuttamaan tutkakuvan luettavuuteen keskus-
yksikön näytöltä. Korkeampi antennin keskitaajuus todennäköisesti parantaisi tutkaku-
van resoluutiota.

4. AINEISTO

4.1 Koekappalemittaukset

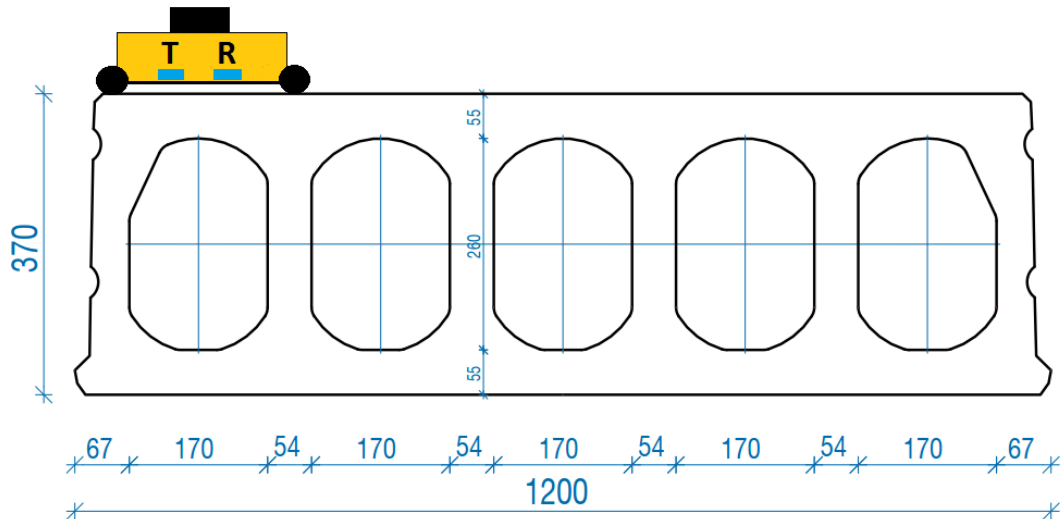
Tutkalla mitattua dataa voidaan tarkastella ja käsitellä jälkeinpäin tietokoneella. Tässä työssä on käytetty datan tarkastelussa Ground Vision –ohjelmaa. Ohjelmalla voidaan suodattaa dataa käyttämällä filttäreitä. Tämän työn aineisto on esitetty kuitenkin suodattamattomana. Datan suodatus vaikuttaa profiilin muotoon, joten suodattamattomana profiilin tarkastelu on paras vaihtoehto. Kuvassa 4.1.2 on esitetty neljän eri mittauslinjan tuottama data tutkakuvina Ground Vision –ohjelmalla. Seuraavissa luvuissa on esitetty mittausdata pääosin asettamalla tutkakuvia rinnakkain saman ontelon peräkkäisistä mittauslinjoista.

Aineiston tarkastelussa yksi oleellinen asia on mitkä vesi- ja betonimäärät alkavat erottua tyhjään onteloon verrattuna. Jatkokehityksen tavoitteena on löytää keinoja tarkempaan vesi- ja betonimäärien havaitsemiseen sekä veden ja betonin erottamiseen toisistaan. Aineistossa on esitetty tutkakuvat ontelon poikkileikkauksesta sekä profiilit ontelon keskeltä, 5 cm ontelon keskikohdasta oikealle sekä onteloiden välisen uuman kohdalta. Profiilit tutkakuvien alapuolella ovat lähinnä signaalinkäsittelyn tukemista varten.



Kuva 4.1. Kuvassa on esitetty neljä tiedostoa koekappalemittauksista GroundVision –ohjelmalla. Tiedostoissa näkyy selvästi viisiantelaisen P37-ontelolaatan kolme keskimäistä onteloa. Koekappalelaatan reunimmaisiet ontelot eivät näy tutkakuvassa. Veden heijastus näkyy selvästi sinisen nuolen osoittamalla kohdalla vasemmassa alakulmassa, kun vettä on ontelossa 3 cm.

Koekappalemittausten aineistossa esitetään kuiva ontelo, vesimäärä lisääntyvästi, betoni ontelon pohjalla sekä betoni ja vesi ontelossa. Tulosten esitystapana on tutkakuva, sekä signaalin profiili laatan kannaksen kohdalla, ontelon keskeltä ja ontelon reunasta. Aineistossa esitetään myös onteloiden päältä pituussuuntaan suoritettut mittaukset. Aineistossa on esitetty myös toisen tutkijan tekemiä vastaavalla tutkalaitteella, jonka pulssin keskitaajuus oli 2,3 GHz. Nämä ovat merkittäviä pienimmän ontelosta havaittavissa olevan vesimäärän selvittämisessä. Kuvassa 4.1 on havainnollistettu koekappalemittauksen tilannetta oikeita mittasuhteita jäljitellen.



Kuva 4.1. Malå CX-11 Concrete Imaging System:in lähetin- ja vastaanottoantennien väli on 6 cm 1,6 GHz:n antennisysteemillä. Mittaustilanne on kuvattu oikeita mittasuhteita jäljitellen.

Kun tiedetään laatan poikkileikkauksen dimensiot ja signaalin nopeus eri väliaineissa saadaan taulukosta (Taulukko 2.2.5, s. x), signaalin kuluaika väliaineessa voidaan laskea käyttämällä kaavaa:

$$s = v \cdot t = \frac{0.5 \cdot t_{wt} \cdot c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

jolloin

$$t = \frac{2s}{v}$$

Signaalin kuluaajan arvioiminen on oleellista tutkan asetusten mittausajan (time window) säätämässä. Seuraavassa on laskettu aikoja (ns), joissa signaali etenee kyseisiin rajapintoihin. Ajat on laskettu signaalin kaksinkertaisella matkalla, eli matkalle lähetysantennista rajapinnan kautta vastaanottoantenniin. Ensimmäisessä osassa on laskettu signaalin etenemisaikoja kuivan ontelon kohdalla. Toisessa osassa on laskettu signaalin etenemisaikoja kokonaan vedellä täyttyneen ontelon kohdalla. Signaalin etenemisnopeus on huomattavasti hitaampi vedessä verrattuna sen nopeuteen ilmassa.

Signaalin matkaan kulunut aika kuivan ontelon kohdalla:

Betoni – ilma -rajapinta:

$$t_1 = \frac{2 \cdot 0,055 \text{ m}}{95 \text{ m}/\mu\text{s}} = 1,158 \text{ ns}$$

Ilma – betoni -rajapinta:

$$t_2 = t_1 + \frac{2 \cdot 0,260 \text{ m}}{300 \text{ m}/\mu\text{s}} = 2,891 \text{ ns}$$

Betoni – ilma -rajapinta:

$$t_3 = t_2 + t_1 = 4,049 \text{ ns}$$

Keskimääräinen nopeus kuivan ontelon kohdalla on:

$$v = \frac{2s}{t} = \frac{2 \cdot 0,37 \text{ m}}{4,049 \text{ ns}} \approx 183 \text{ m}/\mu\text{s}$$

Signaalin matkaan kulunut aika vedellä täyttyneen ontelon kohdalla:

Betoni – vesi -rajapinta:

$$t_1 = \frac{2 \cdot 0,055 \text{ m}}{95 \text{ m}/\mu\text{s}} = 1,158 \text{ ns}$$

Vesi – betoni -rajapinta:

$$t_2 = t_1 + \frac{2 \cdot 0,260 \text{ m}}{33 \text{ m}/\mu\text{s}} = 16,916 \text{ ns}$$

Betoni – ilma -rajapinta:

$$t_3 = t_2 + t_1 = 18,074 \text{ ns}$$

Keskimääräinen nopeus vedellä täyttyneen ontelon kohdalla on:

$$v = \frac{2s}{t} = \frac{2 \cdot 0,37 \text{ m}}{18,074 \text{ ns}} \approx 41 \text{ m}/\mu\text{s}$$

Signaalin matkaan kulunut aika puoleen väliin vedellä täyttyneen ontelon kohdalla:

Betoni – ilma -rajapinta:

$$t_1 = \frac{2 \cdot 0,055 \text{ m}}{95 \text{ m}/\mu\text{s}} = 1,158 \text{ ns}$$

Ilma – vesi -rajapinta:

$$t_2 = t_1 + \frac{2 \cdot 0,13 \text{ m}}{300 \text{ m}/\mu\text{s}} = 2,025 \text{ ns}$$

Vesi – betoni -rajapinta:

$$t_3 = t_2 + \frac{2 \cdot 0,13 \text{ m}}{33 \text{ m}/\mu\text{s}} = 9,904 \text{ ns}$$

Betoni – ilma -rajapinta:

$$t_4 = t_3 + t_1 = 11,062 \text{ ns}$$

Keskimääräinen nopeus vedellä puoleen väliin täytetyn ontelon kohdalla on:

$$v = \frac{2s}{t} = \frac{2 \cdot 0,37 \text{ m}}{11,062 \text{ ns}} \approx 67 \text{ m}/\mu\text{s}$$

Mittauksissa säädettiin tutkan asetuksista signaalin nopeuden arvoksi 120 m/μs. Säättö tehtiin kokeilemalla ja arvioimalla näytön tutkakuvan luettavuutta sekä laskennallisesti arvioimalla. Signaalin todellisen keskinopeuden ollessa 120 m/μs, tulee matkaan kuluneen ajan olla noin 6,167 ns. Tämä on laskennallisesti oikea keskinopeuden arvo vesimäärän ontelon pohjalla ollessa noin 4 cm.

Signaalin nopeuden säädössä todellista nopeutta väliaineessa voi arvioida, mutta tärkeämpää on optimoida mittausparametrit siten, että tutkakuva olisi mahdollisimman hyvin luettavissa keskusyksikön näytöltä. Nopeuden lisäksi tutkakuvan ulkomuotoon vaikuttaa asetuksista ainakin aikaikkuna ja näytteistystaajuus.

4.1.1 Mittauspöytäkirja

Mittaukset dokumentoitiin pöytäkirjaan, joka on esitetty taulukossa 4.1.1. Pöytäkirjaan merkittiin jokaisen linjan kohdalle mittaustiedoston tunnus ja onteloiden sisältämä vesi, betoni tai muu materiaali.

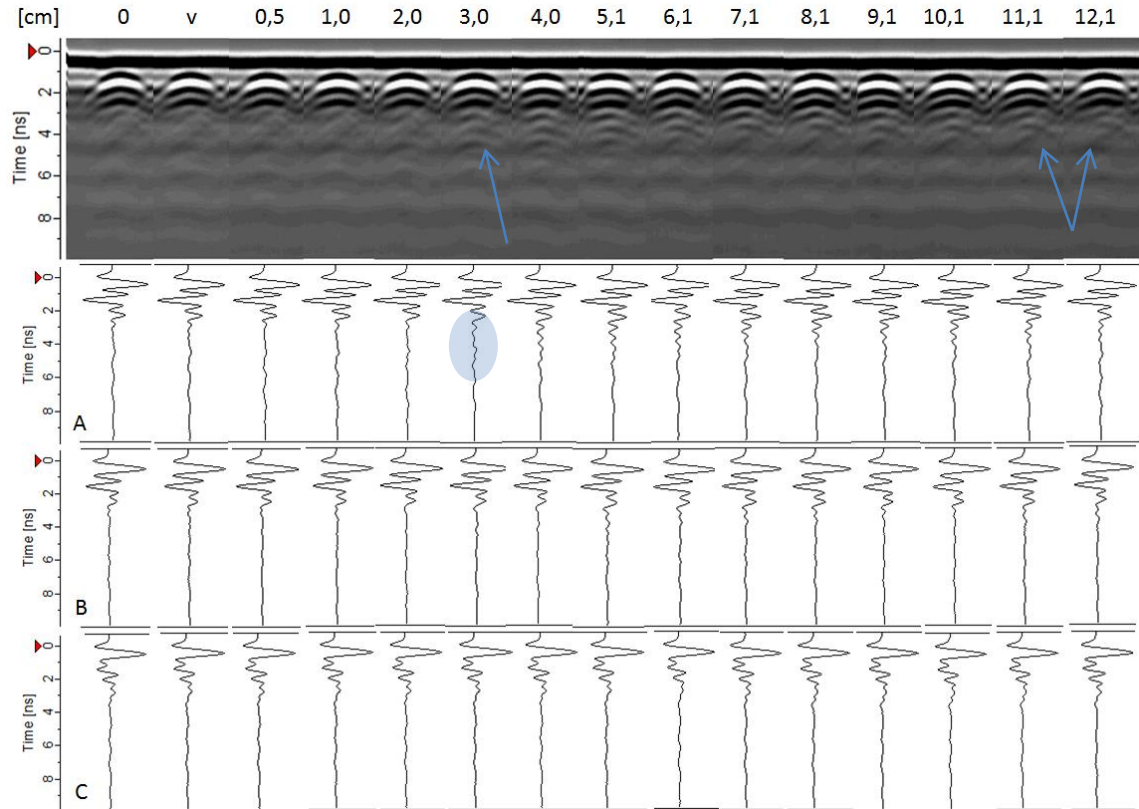
Taulukko 4.1.1. Mittauspöytäkirjaan on merkitty mittauslinja koekappalelaatan päästä mitattuin tasaisin välein ja mittauslinjaa vastaava tiedosto. Jokaisella ontelolla on pöytäkirjassa oma sarake, johon on merkitty mitä ontelon sisällä on missäkin kohdassa. Vihreällä merkityt solut ovat metrimittalla varmistettuja mittoja. Punaisella on merkitty solut joiden osalta todellisten mittojen arvioiminen on ollut hankalaa mittaustilanteessa. Vesiraja onteloissa on merkitty oranssilla ja sinisellä värillä on korostettu vettä ontelossa. Reunimmaisessa ontelossa 5 on teräksiä, joita esiintyy ontelolaatoissa työmaalla ja ontelo on valettu täyteen betonia 40 – 460 cm:n matkalta laatan päästä mitattuna. Välillä 480 – 560 cm on ontelo täytetty betonilla puoleen väliin ja 580 cm:n kohdalta eteenpäin ontelo on tyhjä. Ontelo 1 on koko matkalta tyhjä. Ontelon 1 ja 5 mittaaminen poikittain ei ollut käytännössä mahdollista, ja poikittain tehdyissä mittauksissa tärkein tieto saadaan kolmesta keskimmäisestä ontelosta 2, 3 ja 4.

Linja (cm)	Tiedosto	Ontelo 1	Ontelo 2	Ontelo 3	Ontelo 4	Ontelo 5
20	47		5 cm betonia	tyhjä	3 cm tasoitetta (kuivunut)	tulppaus
40	48		5 cm betonia	tyhjä	3 cm tasoitetta (kuivunut)	betoni
60	49		5 cm betonia	tyhjä	3 cm tasoitetta (kuivunut)	betoni
80	50		6 cm betonia	tyhjä	tyhjä	betoni
100	51		7 cm betonia	tyhjä	vesiraja	nostolenkki
110	52		7 cm betonia	tyhjä	0,5 cm	betoni
120	53		8 cm betonia	tyhjä	1,0 cm	betoni
140	54		8 cm betonia	vesiraja	2,0 cm	betoni
160	55		8 cm betonia	1,0 cm	3,0 cm	betoni
180	56		8 cm betonia	2,0 cm	4,0 cm	PASI
200	57		9 cm betonia	3,0 cm	5,1 cm	PASI
220	58		Reikä kannessa	4,0 cm	6,1 cm	betoni
240	59		9 cm betonia	5,1 cm	7,1 cm	betoni
260	60		9 cm betonia	6,1 cm	8,1 cm	betoni
280	61		9 cm betonia	7,1 cm	9,1 cm	Harjateräs lenkki
300	62		9 cm betonia	8,1 cm	10,1 cm	betoni
320	63		9 cm betonia	9,1 cm	11,1 cm	Harjateräs
340	64		Reikä kannessa	10,1 cm	12,1 cm	betoni
360	65		9 cm betonia, vesiraja	11,1 cm	13,2 cm	betoni
380	66		9 cm betonia + 1 cm vettä	12,1 cm	14,5 cm	betoni
400	67		9 cm betonia + 2 cm vettä	13,1 cm	15,2 cm	betoni
420	68		9 cm betonia + 3 cm vettä	14,1 cm	16,2 cm	DEHA
440	69		9 cm betonia + 4 cm vettä	15 cm tai tulppaus	17,2 cm	betoni
460	70		9 cm betonia + 5 cm vettä	tulppaus	18,2 cm	betoni
480	71		9 cm betonia + 6 cm vettä	17 cm betonia	19,2 cm	1/2 betonia
500	72		9 cm betonia + 7 cm vettä	17 cm betonia	20,2 cm	1/2 betonia
540	73		9 cm betonia + 8 cm vettä	15 cm betonia	22,3 cm	1/2 betonia
560	74		9 cm betonia + 9 cm vettä	13 cm betonia, vesiraja	23,3 cm	1/2 betonia
580	75		9 cm betonia + 10 cm vettä	11 cm betonia + 2 cm vettä	24,3 cm	tyhjä
600	76		9 cm betonia + 11 cm vettä	9 cm betonia + 5 cm vettä	25,3 cm	tyhjä
620	78		9 cm betonia + 12 cm vettä	7 cm betonia + 8 cm vettä	26,0 cm	tyhjä
640	77		9 cm betonia + 13 cm vettä	betoni + vesi tai tulppaus	26,0 cm tai tulppaus	tyhjä

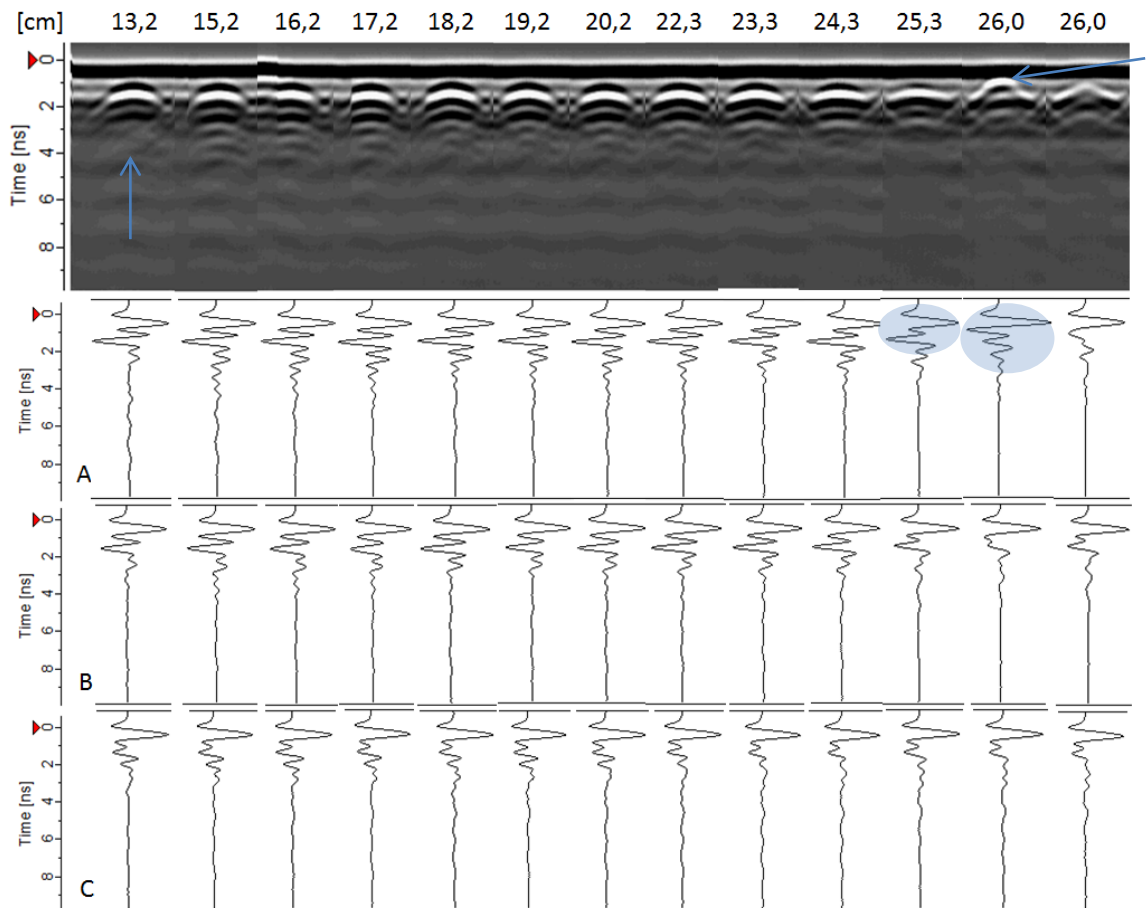
Reunimmaisista onteloista 1 ja 5 ei saanut kunnon dataa koeolosuhteissa laatan poikkisuunnassa mitattaessa, sillä tutkan antennien väli on 6 cm ja kelkan pyörien väli noin 25 cm. Työmaalla tämä ei ole ongelma, kun pinta on jatkuva. Kolmesta keskimmäisestä

ontelosta saatiin mitattua vesi- ja betonimäärät. Näitä tarkastellaan pääasiassa, mutta lisäksi laatta mitattiin onteloiden suuntaisesti onteloiden keskikohtaa pitkin.

4.1.2 Vesi ontelossa

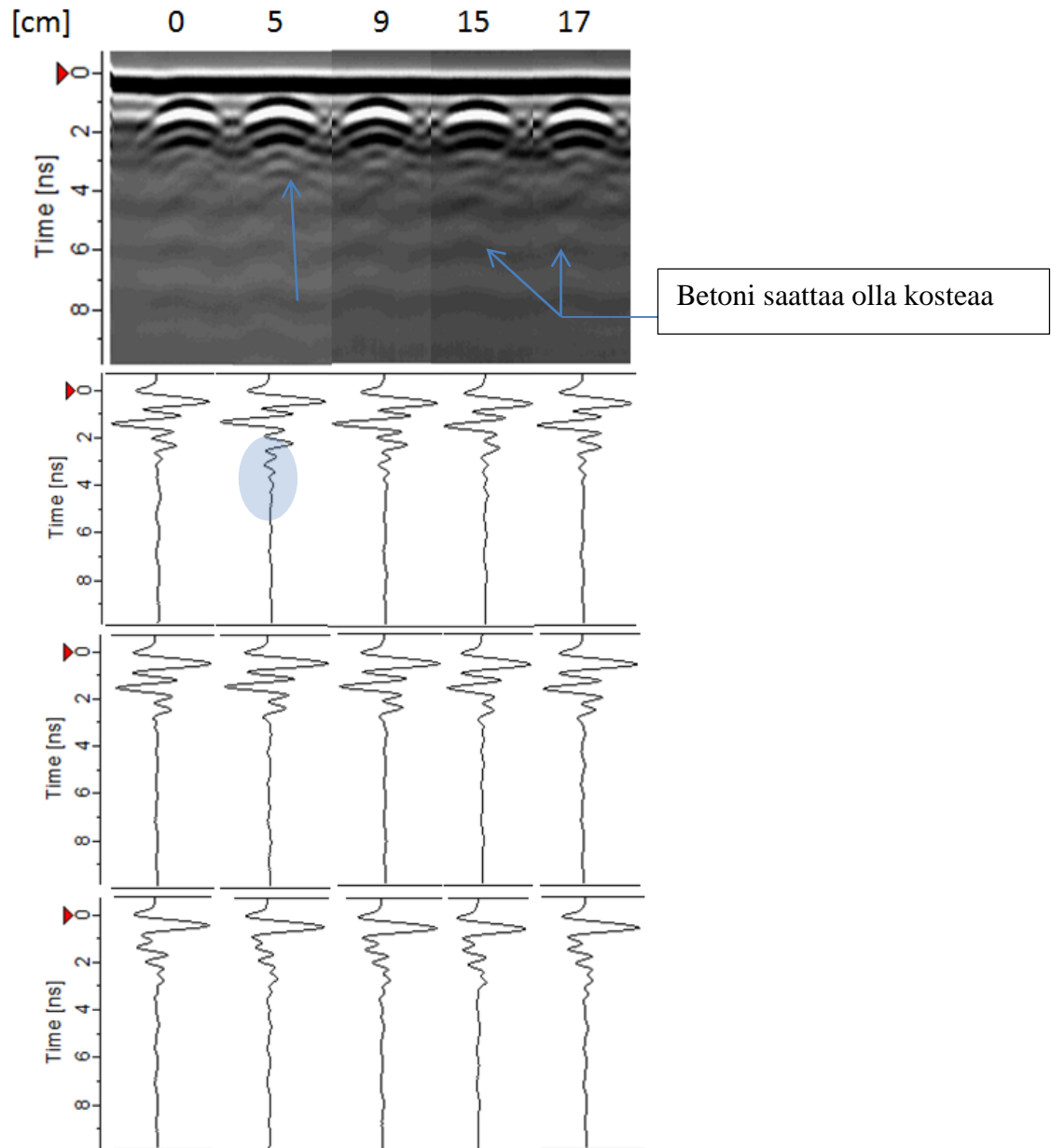


Kuva 4.1.2.a. Veden pinnan korkeuden muutos esitettyinä 4. ontelon tutkakuvina ja profiileina. Tutkakuvan yläpuolella oleva lukema kertoo vedenpinnan korkeuden (cm). Vasemmassa reunassa on tutkan mittausaika kuvaava asteikko. Ensimmäinen profiili on ontelon keskeltä, toisena on profiili 5 cm (+/- 1 cm) ontelon keskikohtasta oikealle ja alimmaisena on profiili onteloiden välisen uuman kohdalta. Tutkakuvassa vesi alkaa näkyä noin 2-3 cm:n kohdalla. 3 cm:n kohdalla tutkakuvassa näkyy veden aiheuttama heijastus (valkoinen/musta/valkoinen) nuolen osoittamalla kohdalla. Veden aiheuttama heijastus alkaa vaimeta taas 11 – 13 cm:n kohdalla (korostettu sinisillä nuolilla kuvissa). Profiilit on skaalattu hieman tutkakuvia pienempään mittakaavaan.



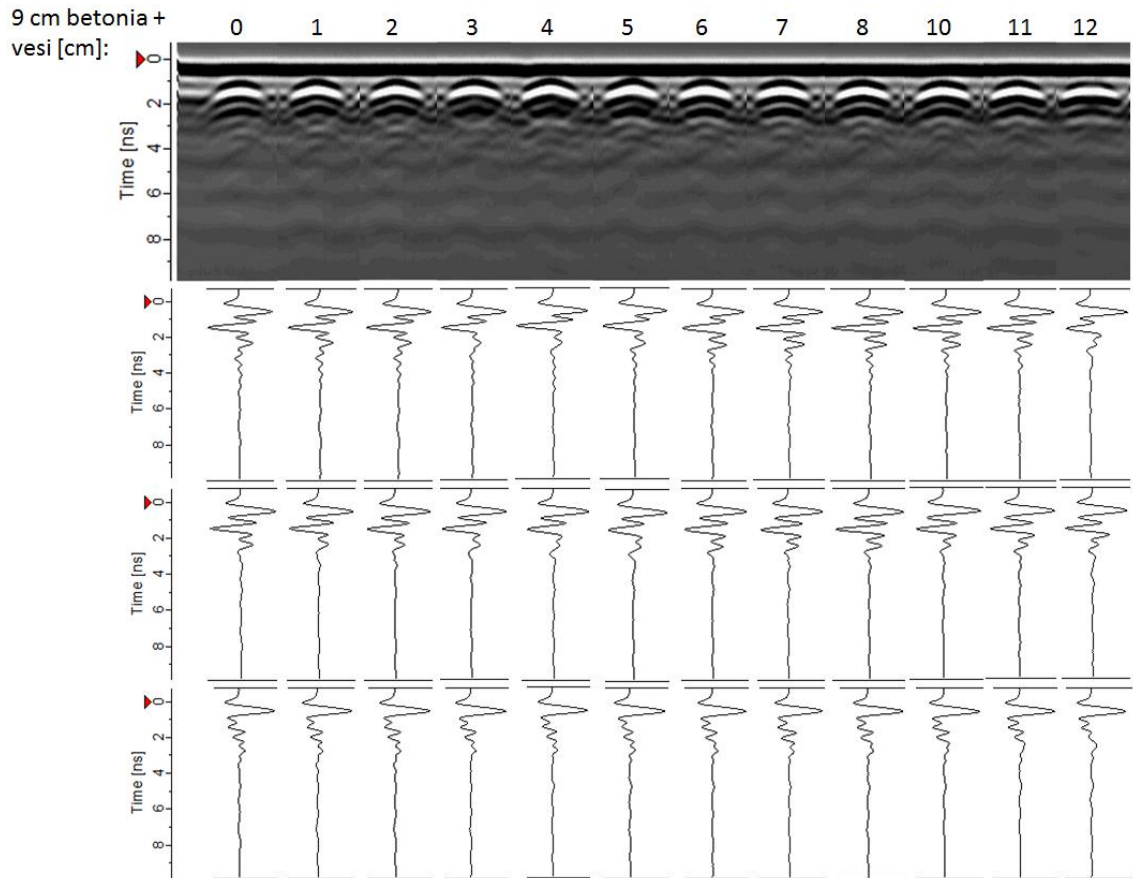
Kuva 4.1.2.b. Toisessa, kolmannessa sekä neljännessä ontelon poikkileikkausta esittävässä tutkakuvassa näkyy heijastuksia, jotka saattavat aiheutua reunimmaisesta ontelon kohdalla asennetusta teräksisestä DEHA-nostoankkurista. Kolmen viimeisen poikkileikkaustutkakuvan kohdalla veden pinta on lähes kiinni ontelolaatan yläkannen betonipinnassa. Toiseksi viimeisessä tutkakuvassa näkyy paksumpi valkoinen raita, joka voi tarkoittaa, että veden pinta on hyvin lähellä ontelon kantta. Eron voi huomata myös sinisellä ympyrällä korostetuista profiileista ontelon keskikohdasta, joista 26 cm:n kohdalla heijastus on positiivinen betonin ja veden rajapinnalla, mikä tarkoittaa, että signaali etenee pienemmän dielektrisyden materiaalista suurampaan, eli betonista veteen.

4.1.3 Betoni ontelossa



Kuva 4.1.3. Kuvassa on tutkakuva ja profiilit koottuna koekappalelaatan eri betonimäärillä täytetyistä kohdista. Ensimmäinen profiili on ontelon keskeltä, toisena on profiili 5 cm (+/- 1 cm) ontelon keskikohdasta oikealle ja alimmaisena on profiili onteloiden välisen uuman kohdalta. Betoni näkyy ontelossa kun tutkakuvia verrataan tyhjiin onteloon. Kuvassa on esitetty tyhjä ontelo sekä betonimäärät 5, 9, 15 ja 17 cm. koekappalelaatasta mitattavissa ollut pienin betonimäärä, 5 cm, näkyy tutkakuvassa heijastuksena nuolen osoittamalla kohdalla. Sinisellä merkityn alueen keskellä näkyy ero myös profiilissa verrattuna tyhjiin onteloon. Myös 5, 9, 15 ja 17 cm:n betonimäärät aiheuttavat erilaisen heijastuksen tyhjiin onteloon verrattuna. Kuvan esittämän datan perusteella voidaan verrata signaalin etenemistä betonissa signaalin etenemiseen vedessä. 15 ja 17 cm:n kohdalla betonin heijastuksissa tulee huomioida, että betoniin on saattanut imeytyä vettä, koska koekappaleen kaatovalun päällä oli vettä lähellä näitä kohtia samassa ontelossa.

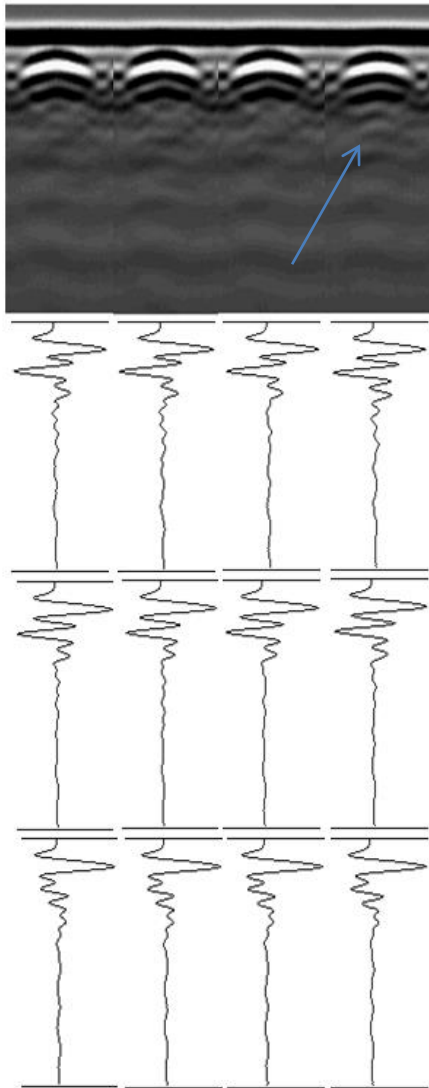
4.1.4 Betonin päällä oleva vesi



Kuva 4.1.4. Kuvassa on tutkakuva ja profiilit ontelosta 2 eri kohdilta tehdyistä mittauksista. Ensimmäinen profiili on ontelon keskeltä, toisena on profiili 5 cm (+/- 1 cm) ontelon keskikohdasta oikealle ja alimmaisena on profiili onteloiden välisen uuman kohdalta. Ontelossa on pohjalla noin 9 cm betonia, jonka päällä vettä. Tutkakuvien yläpuolella oleva lukema kertoo vedenpinnan korkeuden betonin päällä ontelossa. Tässä tapauksessa pulssi etenee seuraavien materiaalien läpi: betoni – ilma – vesi – betoni. Aineistosta pyritään selvittämään, voidaanko betonin päällä oleva vesi havaita. Kun tiedetään tutkalla varmasti havaittava vesimäärä, 3 cm, voidaan tarkastella betonin päällä olevaa 3 cm:n vesikerrosta, jossa nuolen osoittamalla kohdalla heijastus muuttuu edelliseen, 2 cm:n vesikerrokseen nähden.

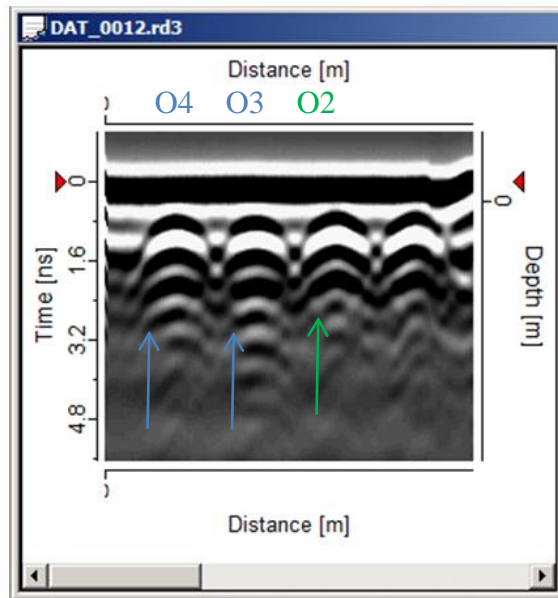
4.1.5 Harjateräs, sähköjohto ja tasoite ontelossa

Tyhjä 2 T10 sähköjohto 10 mm tasoite n. 3 cm (kuiva)



Kuva 4.1.5. Kuvassa on selvitetty aiheuttaako harjateräs ontelon pohjalla tai $\varnothing 10$ mm sähköjohto heijastuksia tutkakuvaan. Lisäksi oikeassa reunassa on tutkakuva ontelosta, jossa on noin 3 cm kerros kuivunutta tasoitetta, jota on jäljitelty sekoittamalla vettä ja sementtiä. Tasoite näkyy heijastuksena tutkakuvassa, mutta harjateräkset ja sähköjohto eivät poikkea tyhjistä ontelosta.

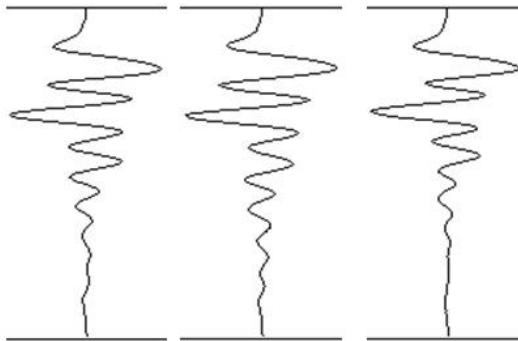
4.1.6 Betonin erottaminen vedestä



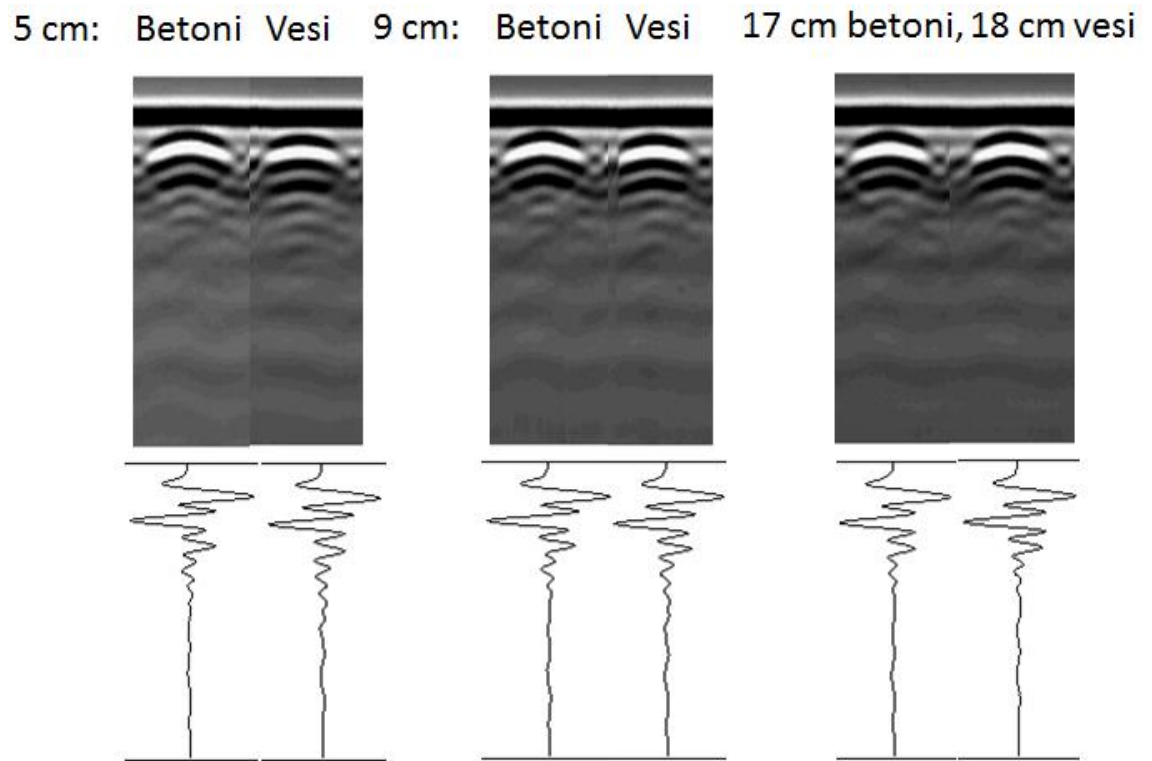
O4: 8 cm vettä

O3: 6 cm vettä

O2: 8 cm betonia

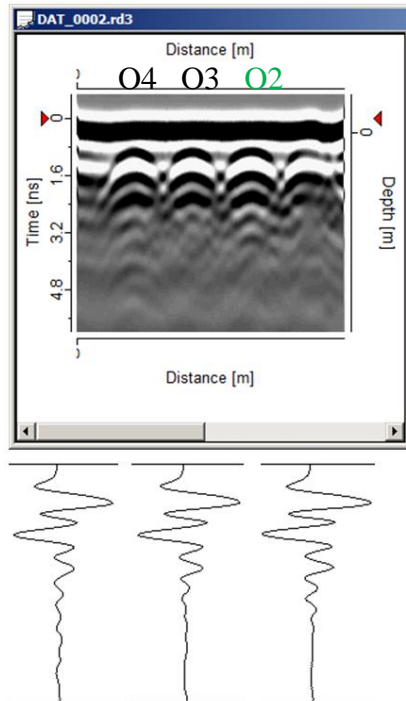


Kuva 4.1.6.a. Veden heijastus näkyy ontelossa 4 selvemmin ja leveämpänä raitana kuin betonin ontelossa 2. Veden läpi radioaalto kulkee huomattavasti hitaammin kuin betonissa. Näytteistystaajuus tässä mittauksessa on noin 30 GHz. Suuri näytteistystaajuus skaalaa tutkakuvaa pystysuunnassa ja tarkentaa näin heijastusten erottamista.



Kuva 4.1.6.b. Kolmannessa kuvassa, jossa vertaillaan 17 cm veden ja betonin heijastuksia ei näy eroa ensimmäisen mustan kaaren etäisyydessä paksuun mustaan viivaan. Tämä saattaa johtua siitä, että betoni tuolla 17 cm kohdalla oli kosteaa, koska kaatoväli siitä eteenpäin oli täytetty vedellä. Toisen viivan kohdalla, jossa heijastus on luultavasti kertaantunut, aikaeron heijastusten välillä voi huomata. Tämä perustuu siihen, että signaali on hitaampi vedessä kuin betonissa.

4.1.7 Kostean tasoitteen erottaminen betonista ja vedestä

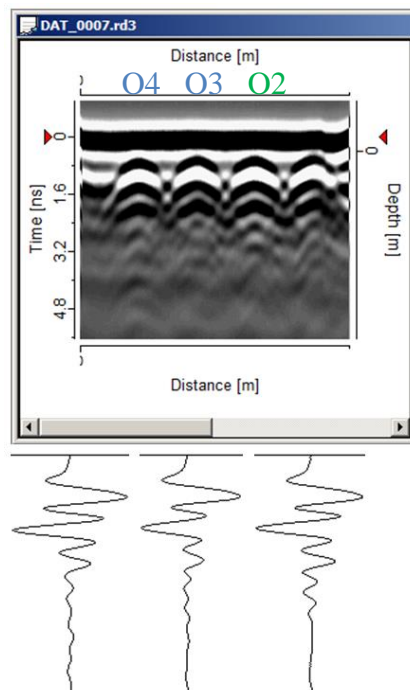


O4: 3 cm kostea tasoite (sementti)

O3: tyhjä

O2: 5 cm betonia

Kuva 4.1.7.a. Kuvasta voidaan todeta, että ontelon pohjalla oleva noin 3 cm:n korkuinen kostea sementtikerros näkyy tutkakuvassa, melko samalla tavalla kuin alemmassa kuvassa 4.1.8.b samalla kohdalla oleva vesi.



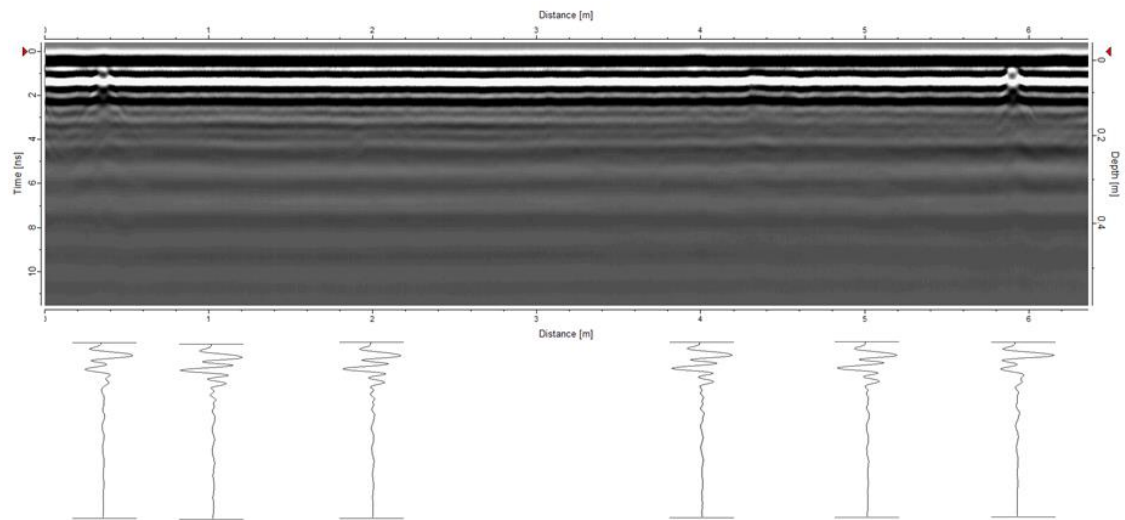
O4: 3 cm vettä

O3: 1 cm vettä

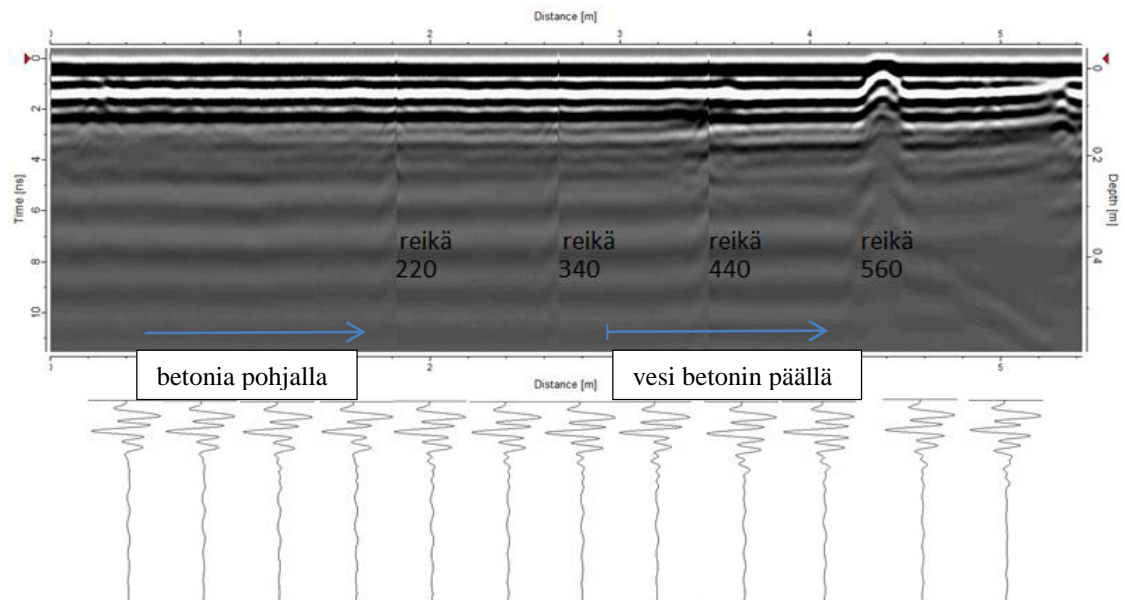
O2: 8 cm betonia

Kuva 4.1.7.b. Veden ja korkeasti vesipitoisen tasoitteen tai laastin erottaminen on näistä tutkakuvista hankalaa. Veden ja betonin dielektrisyys poikkeaa toisistaan selvästi ja niiden heijastusten erottaminen toisistaan on helpompaa.

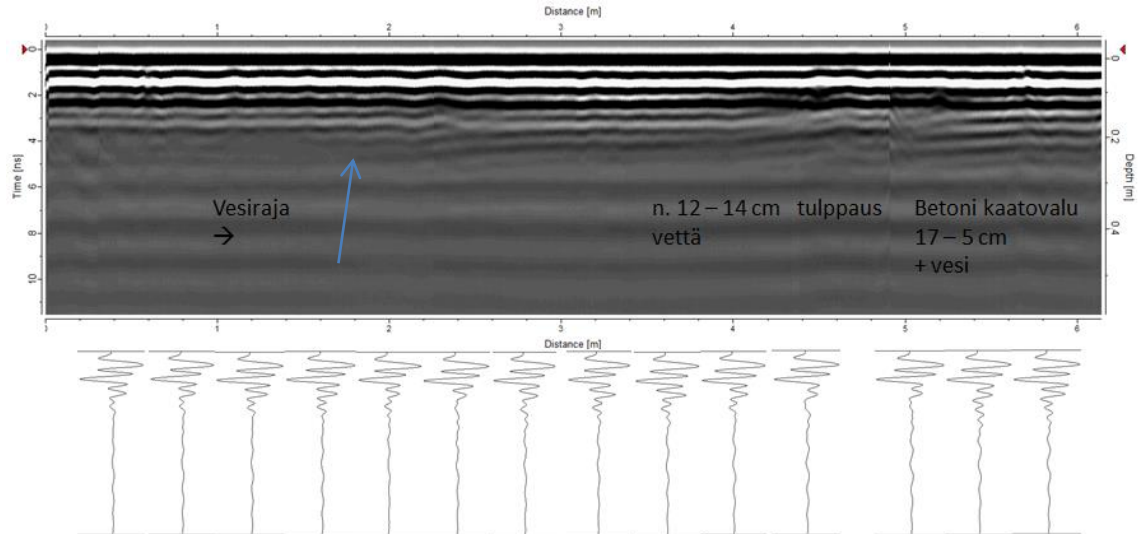
4.1.8 Ontelot pituussuuntaan



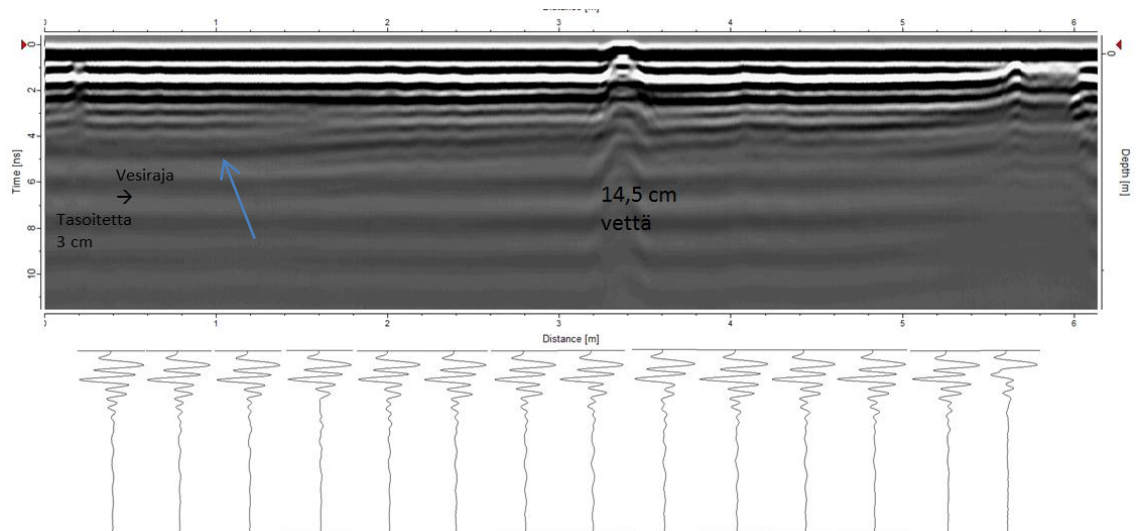
Kuva 4.1.8.a. Ontelo 1 on tyhjä koko matkalta.



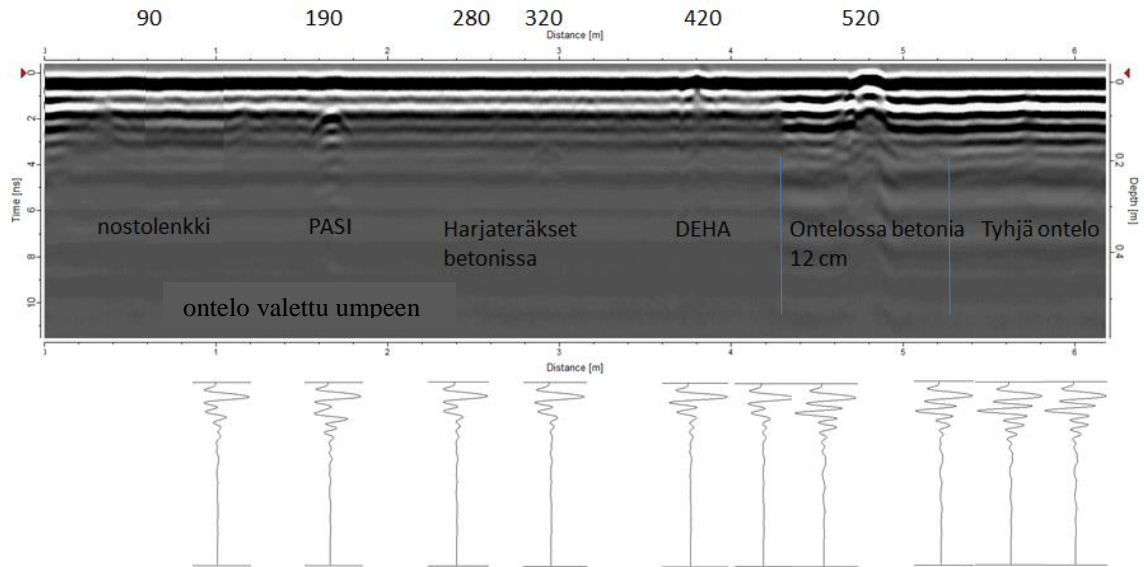
Kuva 4.1.8.b. Ontelo 2:ssa on betonia pohjalla, ja betonin päällä vettä 360 cm laatan pädystä eteenpäin. Kuvaan on merkitty ontelon kohdalla laatan kannessa olevat reiät, joista on valettu betonia, ja niiden sijainti laatan päästä senttimetreinä.



Kuva 4.1.8.c. Ontelo 3:ssa on vettä 140 cm:stä eteenpäin. Vesi alkaa erottua kuvassa selkeästi nuolen kohdalla, jossa sitä on arviolta noin 3-4 cm.



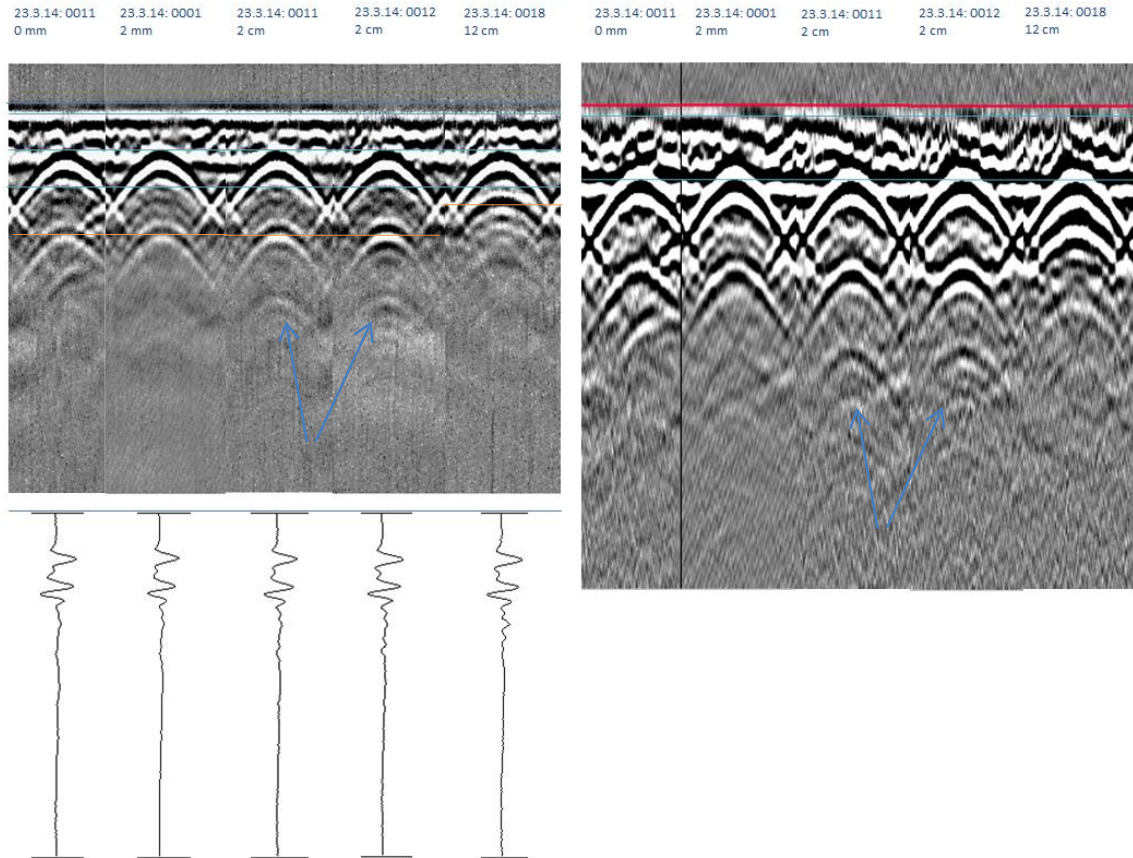
Kuva 4.1.8.d. Ontelo 4 oli täytetty vedellä siten, että veden pinta alkoi 100 cm:n kohdalta ja toisessa päässä ontelo oli täynnä vettä. Ontelon alkupäässä on n. 3 cm kerros kuivunutta laastia n. 60 cm:n matkalla. Tämä ei ole tarkoituksella, vaan käytännön toteutuksen vaihtelevista syistä. Vesirajan sijainti on jouduttu arvioimaan tutkakuvaan noin 20 cm tarkkuudella. Vedenpinnan korkeuden muutos alkaa erottua tutkakuvassa nuolen kohdalla, jossa vettä on noin 3-4 cm.



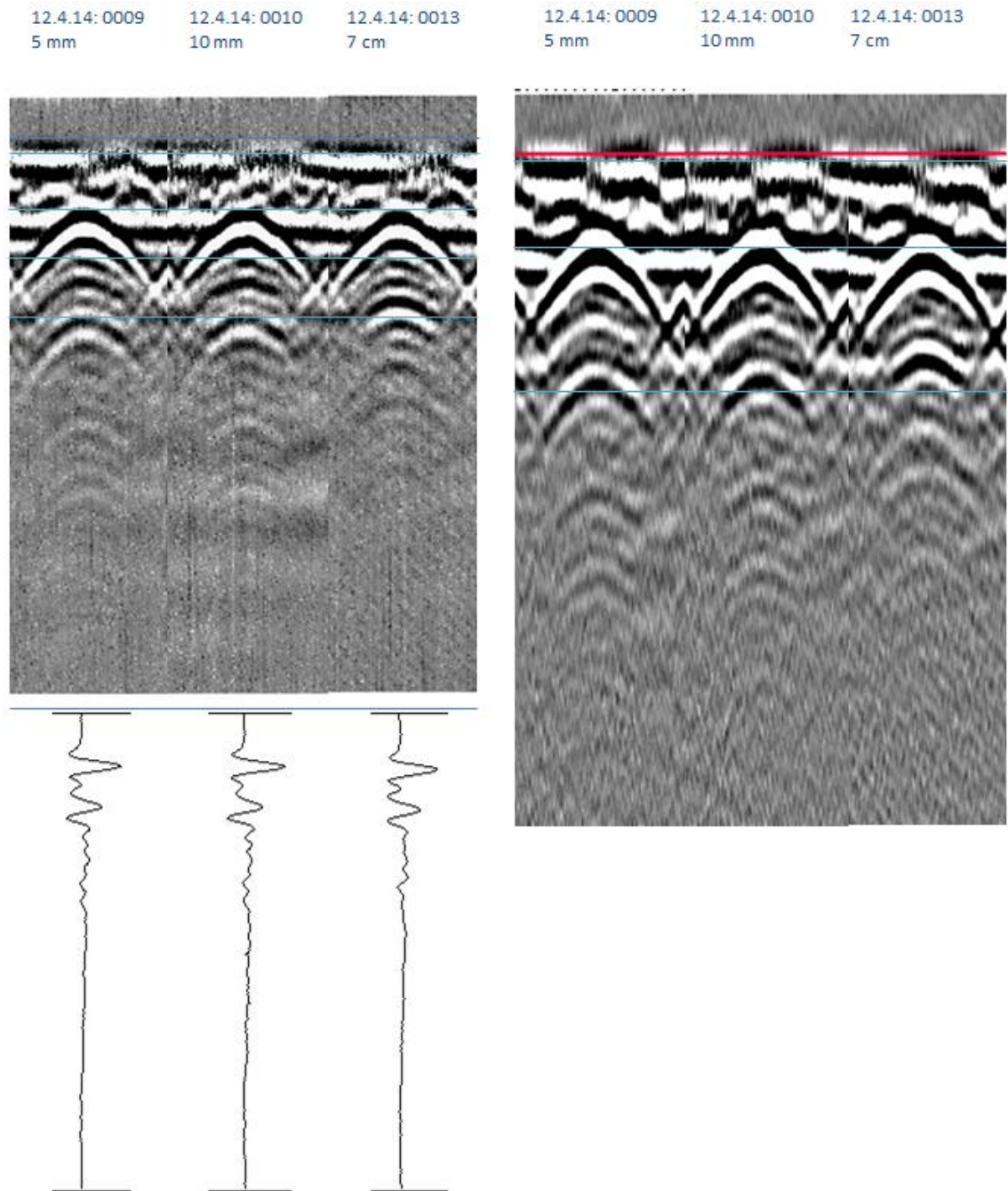
Kuva 4.1.8.e. Ontelossa 5 on teräksisiä ontelolaattavälipohjan kiinnityksiä. Parvekekannake näkyy tutkakuvassa hyvin selkeänä heijastuksena. Betonin keskellä olevat harjateräkset aiheuta heijastusta tutkakuvassa. Kuvasta nähdään hyvin myös miltä tutkakuva näyttää täynnä betonia olevan, puoliksi täynnä betonia olevan sekä tyhjän ontelon osalta pituussuuntaan.

4.1.9 Pienin näkyvä vesimäärä 2,3 GHz antennilla

Ennen tutkimuksen suoritusta on tehty koemittauksia Malå CX (Concrete Imaging System) maatutkalaitteella 2,3 GHz antennilla 320 mm korkealla noin 1 metrin pituisella ontelolaattakoekappaleella eri vesimääristä ontelossa. Kuvissa 4.1.10.a-d on pyritty selvittämään 2,3 GHz antennilla pienintä havaittavissa olevaa vesimäärää. Kuvassa on aineistoa kahtena eri päivänä tehdyistä mittauksista. Aineiston vertailussa on merkitty päivämäärät tutkakuvien yläpuolelle. Koska eri päivinä tehtyjen mittausten tutkakuvien laadussa oli pieniä eroja, on eri päivinä tehtyjen mittausten aineisto esitetty erillisissä kuvissa. Tiedostoista (Liite A) jälkepäin tarkistetut mittaasetukset olivat kuitenkin täsmälleen samat.



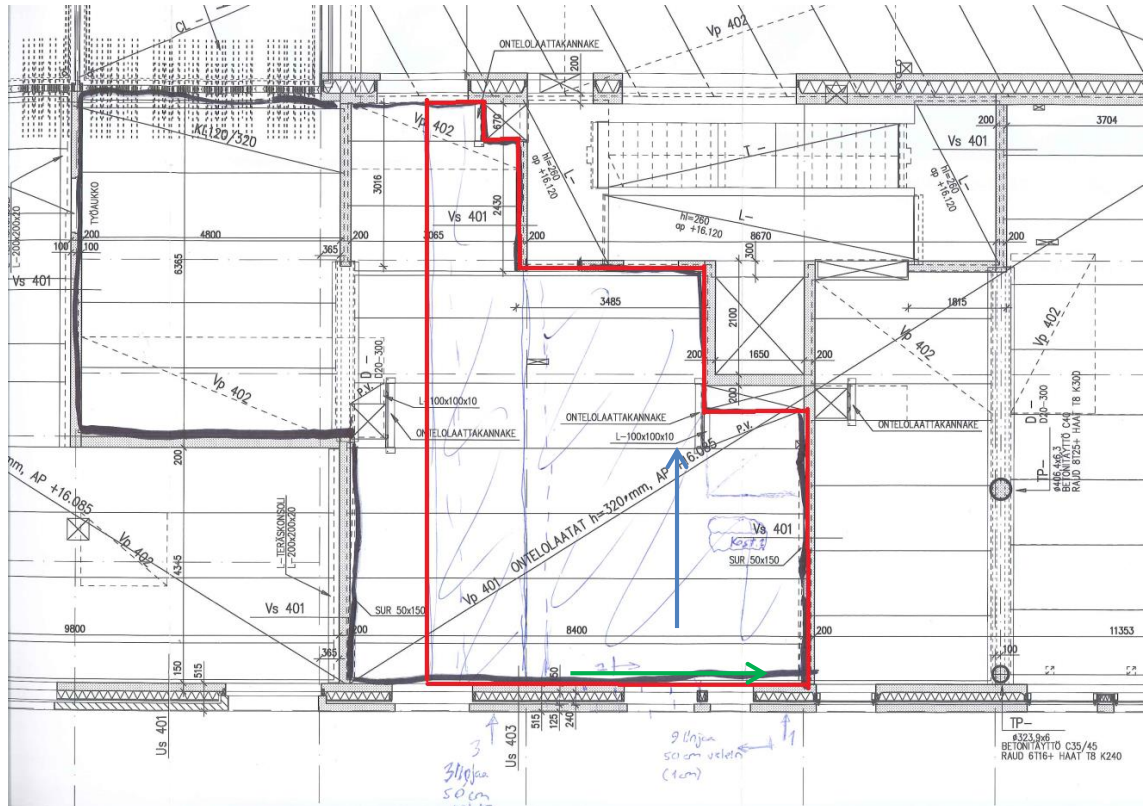
Kuva 4.1.9.a. Kuvaan on koottu aineistoa 320 mm korkean ontelolaattakoeappaleen laboratoriomittauksista 2,3 GHz antennilla. Vasemmanpuoleisessa kuvassa aineisto on esitetty GroundVision -ohjelmasta, käyttämällä suodatuksessa ”DC removal” ja ”subtract mean trace” -suodattimia kuvan laadun parantamiseksi. Profiilit on esitetty tutkakuvien alapuolella ilman suodatusta. Oikeanpuoleisessa kuvassa on sama data esitettynä tiedostoiksi tallennettuina kuvankaappauksina suoraan tutkalaitteen keskusyksikön näytöltä. Kuvan yläpuolelle on merkitty kirjanpidon mukaiset mittausten päivämäärät sekä onteloiden vesimäärät. Heijastusten linjalle piirretyllä oranssilla viivalla pyritään havainnollistamaan eroja signaalin kulkuajoissa eri vesimäärillä. Varsinkin 12 cm:n vesimäärällä ero on huomattava. Verrattaessa 0 ja 2 mm:n vesimääriä 2 cm:n vesimäärään, on vedenpinnan heijastuksen musta kaari tarkasti katsoen hieman ylempänä. 2 cm:n vesimäärä näkyy ontelossa myös voimakkaampana heijastuksena, jonka voi huomata nuolten osoittamalla kohdalla. Heijastus erottuu jopa selkeämmin oikeanpuoleisessa kuvassa, joka on koottu kuvankaappauksista tutkan keskusyksikön näytöltä.



Kuva 4.1.9.b. Kuvassa on esitetty tutkakuvia pienemmistä, 5 ja 10 mm:n vesimääristä sekä selvästi erottuva 7 cm:n vesimäärä. Aineiston perusteella ei huomaa ero 5 ja 10 mm:n vesimäärissä ontelossa, mutta 7 cm vettä eroaa selvästi tyhjästä ontelosta sekä pienemmistä vesimääristä. Aineiston heikkoutena on, että tarpeeksi laadukasta tutkakuvaa tyhjästä ontelosta ei ole saatavilla, jotta sitä voisi verrata pieniin vesimääriin.

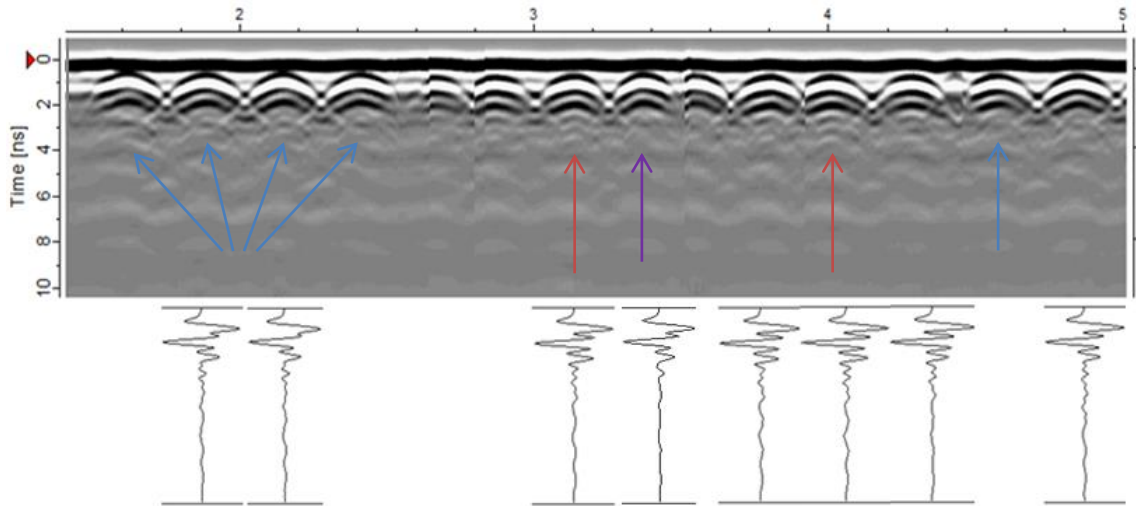
4.2 Työmaamittaukset

4.2.1 Case 1

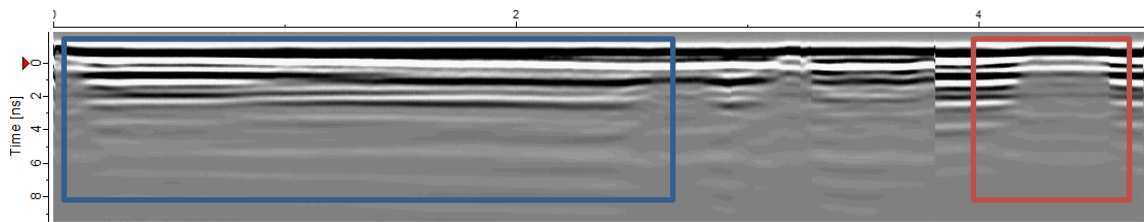


Kuva 4.3.1.a Työmaalla tutkattiin 2. kerroksesta piirustukseen punaisella merkitty alue. Tutkaus suoritettiin puolen metrin välein onteloita vastaan poikkisuuntaan. Lattiatasointia ei ollut tässä vaiheessa ontelolaattastojen päällä ja vesireikien avaaminen oli tekevä.

Kuvassa 4.3.1.b on esitetty tutkakuvana sinisellä nuolella piirustukseen merkitty mitauslinja 2 metrin päästä kuvaan 4.3.2. punaisella merkityn alueen oikeasta alakulmasta katsoen. Ontelolaattaväli pohjassa on käytetty 320 mm korkeita neljäntoista ontelolaattoja.

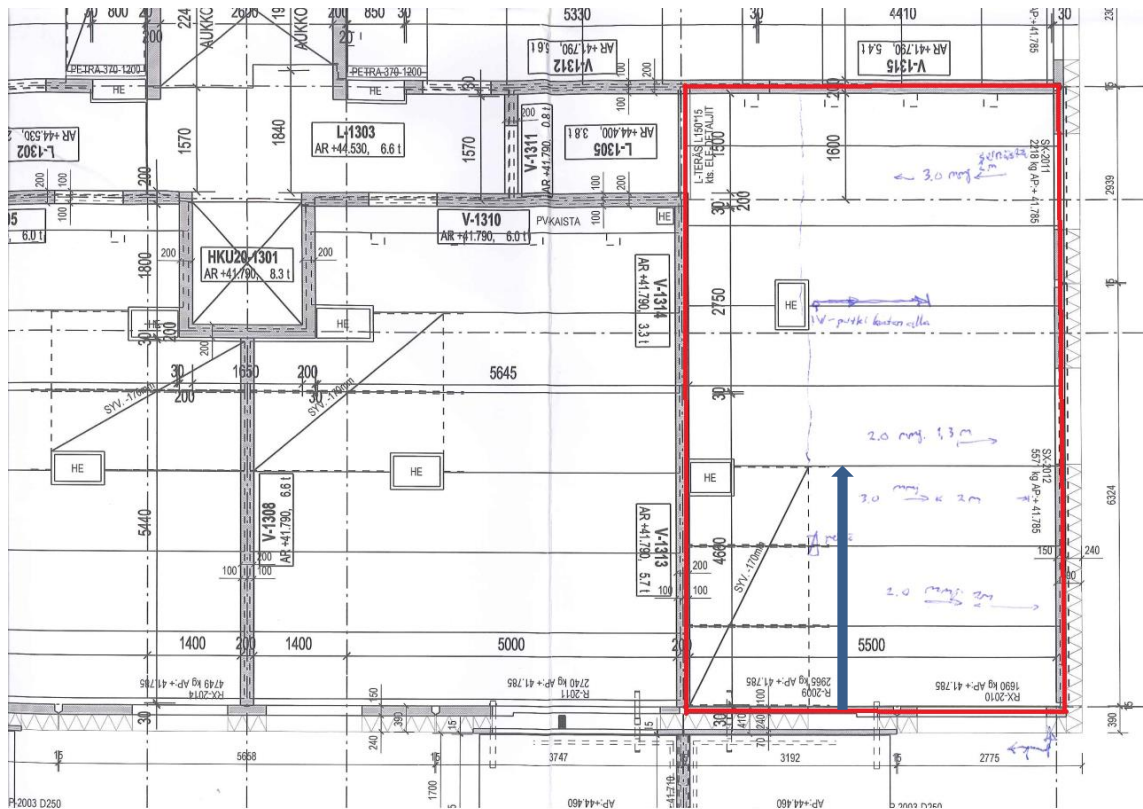


Kuva 4.3.1.b. Tutkakuvaa kuvaan 4.3.1.a sinisellä nuolella merkityn linjan kohdalta ontelolaattaväli pohjasta SRV:n Gaala –kerrostalokohteesta. Pintatasoittamattoman ontelolaattaväli pohjan pinnan epätasaisuudet vaikeuttivat tutkaamista vakiovarusteisella mittapyörällä. Tutkakuvassa näkyy pieniä katkoksia pystylinjoina laataston pinnan ja mittapyörän huonon kontaktin takia. Punaisilla nuolilla merkityissä kohdissa on havaittavissa heijastuksia ontelon sisältä. Sinisillä nuolilla merkityissä kohdissa heijastuksen perusteella ontelossa ei ole mitään, mutta varmuudella sitä ei voi sanoa. DAT_0008, sampling frequency n. 16 GHz. Violetin nuolen kohdalla voi olla



Kuva 4.3.1.c. Tutkakuva ontelon päältä pituussuuntaan kuvaan 4.3.1.a vihreällä nuolella merkityn reunimmaisen ehjän ontelon päältä. Kuvassa näkyvät katkonaiset pystylinjat johtuvat mittapyörän ja laataston pinnan huonosta kontaktista. Pituussuuntaan tutkaamisessa on tärkeää pyrkiä pysymään ontelon keskikohdan päällä. Vertaamalla kuvaa koekappalemittausten kuvaan 4.1.9.e voidaan päätellä, että sinisellä suorakulmiolla merkityllä alueella on oltu lähempänä ontelon keskikohdan päällä, kuin punaisella suorakulmiolla merkityllä alueella, joka muistuttaa kuvan 4.1.9.e betonilla täytettyä ontelo.

4.2.2 Case 2



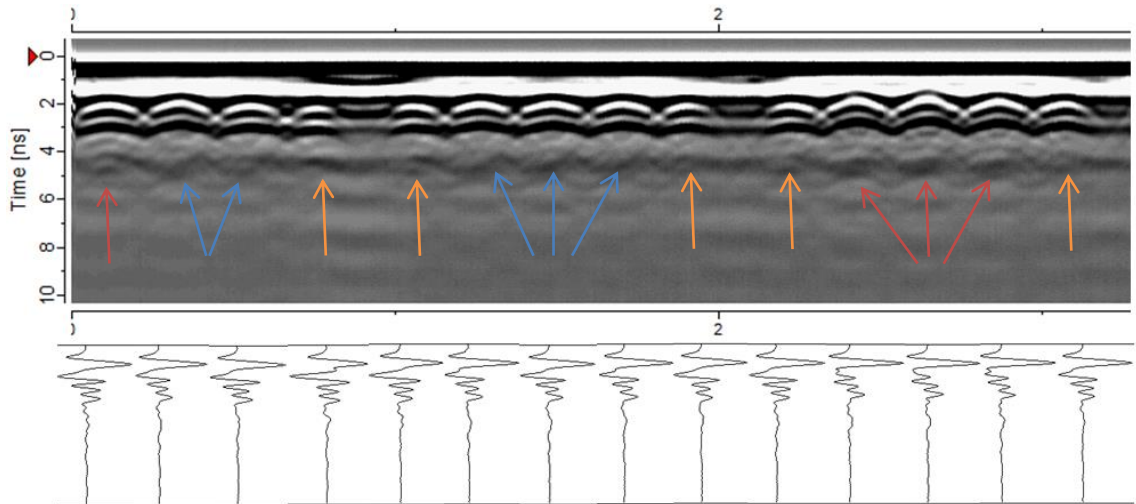
Kuva 4.3.2.a. Työmaalla tutkattiin piirustukseen punaisella merkitty alue. Mittauslinjojen väli oli puoli metriä ja tutkaus suoritettiin onteloita vastaan kohtisuorassa. Ulkoseinän vierellä kuvan alareunassa kokeiltiin myös reunimmaisen ontelon tutkaamista ontelon päältä pituussuuntaan. Kylpyhuonesyvennyksen vierustalla onteloissa oli betonia. Mittausdata nuolen osoittamalta matkalta (3m seinästä) on esitetty mittausdataa kuvassa 4.3.2.d.



Kuva 4.3.2.b. Piirustukseen punaisella on merkitty huone sekä tutkalaitteisto. Tutkalaitteistoon kuuluu akku, näyttö sekä tutka. Työmaalla tutkan liikuttaminen onnistui kävelykeppityylisen jatkovarren avulla. Akku sopii työliivin taskuun ja näyttölaite kulkee mukana vapaassa kädessä. Tutkauksen helpottamiseksi laitteiston mukana kuljettamisessa on kehittämisen varaa. Ontelolaattavälipohjan päällä on lattiatasoite ja onteloiden vesireiät on avattu.



Kuva. 4.3.2.c. Kuvan 4.3.2.b alapuoleisen huoneen katossa oli kostea lietettä ontelon vesireiän ympärillä. Vettä ei kuitenkaan tippunut reiästä. Laatasto tutkattiin yläpuolelisen lattiatasoitteen päältä. Tutkauksen dataa on esitetty seuraavassa kuvassa

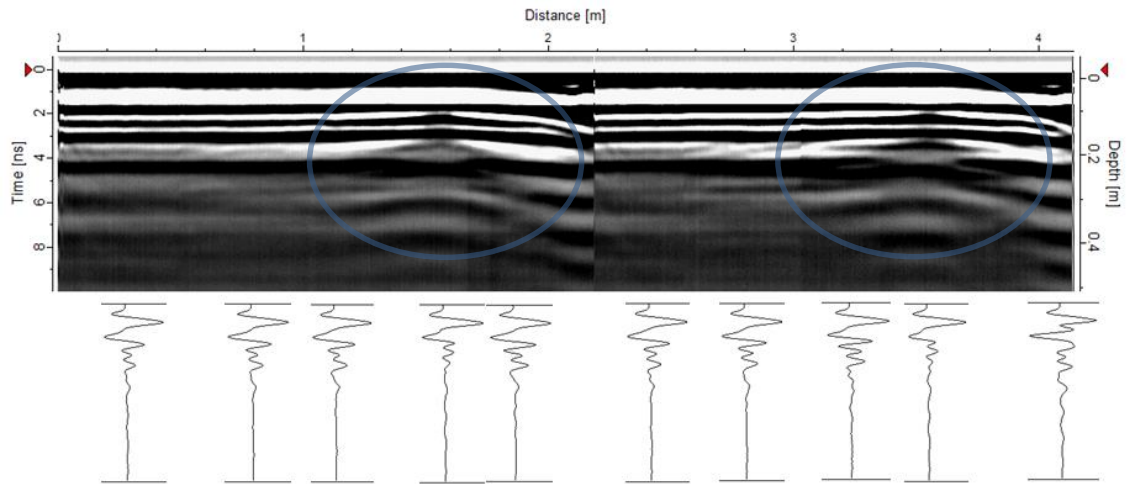


Kuva 4.3.2.d. Mittausdataa GroundVision -ohjelmasta pohjapiirustuskuvan 4.3.2.a nuolen osoittamalta kohdalta kerrostalon ontelolaattavälipohjasta. Välipohja vaikutti kuivalta, joten suuria vesimääriä onteloissa ei ollut syytä olettaa olevan. Punaisilla nuolilla merkittyjen onteloiden kohdalla on havaittavissa heijastuksia ja sinisillä nuolilla merkityt ontelot näyttävät tyhjiltä. Keltaisella on merkitty laattojen reunimmaiseta ontelot, joiden heijastuksesta toinen reuna jää varjoon, mutta on kuitenkin riittävästi tulkittavissa. (?) Tutkakuvassa näkyvä ensimmäinen ontelo on laatan toinen ontelo ulkoseinästä katsottuna (ks. kuvat 4.3.2.a, b ja c). Reunimmainen ontelo ei näy tutkakuvassa seinän vierestä onteloiden poikkisuuntaan tutkattaessa kuvan 4.3.2.b

Toisessa huoneessa havaittiin kosteutta ulkoseinästä katsottuna toiseksi reunimmaisessa ontelossa. Kuvassa 4.3.2.e on esitetty kosteutta sisältävä ontelolaatta alapuolelta.



Kuva 4.3.2.e. Ontelolaataston alapinnassa joitakin oli kosteita kohtia. Ulkoseinästä katsottuna toinen ontelo tutkattiin pituussuuntaan yläpuolelta kuvan nuolen osoittamaan suuntaan edeten. Laatan tutkauksesta on esitetty aineistoa seuraavassa kuvassa 4.3.2.f.



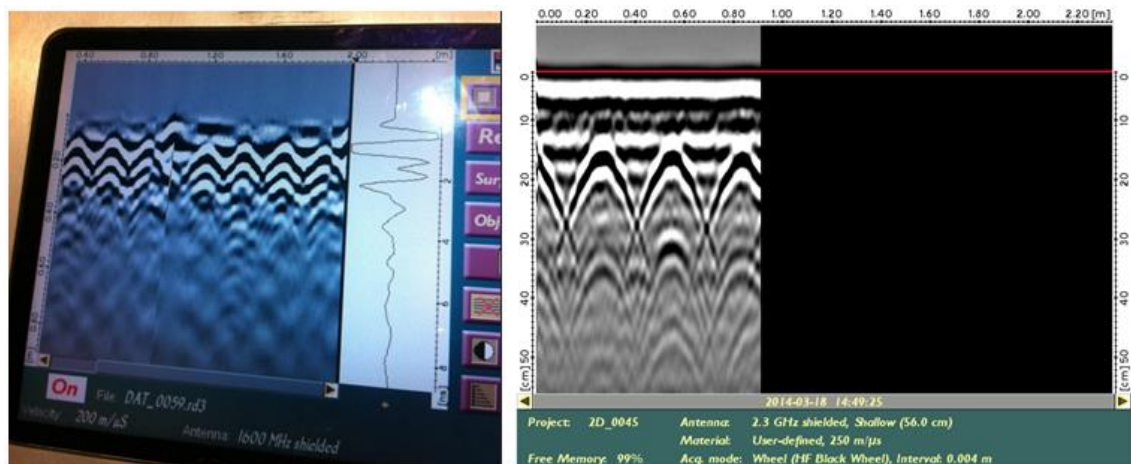
Kuva 4.3.2.f. Ulkoseinästä katsottuna 2. ontelo samanlaisessa huoneessa saman kerroksen toisella puolella tutkattiin pituussuuntaan. Kuvassa näkyy, että ontelo on tutkattu kahteen kertaan. Molemmat on esitetty tutkaussuorituksessa mahdollisten satunnaisten vaihteluiden minimoimiseksi. Tutkakuvan kontrasti on säädetty suureksi, joten heijastukset erottuvat melko hyvin. Heijastukset voivat johtua joko ontelon pohjalla olevasta kosteudesta tai siitä, että tutkauslinja on poikennut ontelon keskeltä sivuun. Tutkalla kuitenkin on mahdollista nähdä ontelon pohjalle koekappalemittausten aineiston perusteella. Tutkakuvan alapuolella olevissa profiileissa on havaittavissa yhdenmukaisuutta sekä vaihtelua.

5. TULOKSET

5.1 Ohjelmiston kehitystarpeet

Kahtena päivänä työmaalla tehtyjen mittausten perusteella keskusyksikön näytöltä voidaan havaita poikkeamia onteloiden välisissä heijastuksissa. Heijastuksista ei kuitenkaan näy onko ontelossa vettä ja kuinka paljon vai aiheuttaako heijastuksen betoni tai jokin muu. Signaalinkäsittelyn avulla voidaan ohjelmistokehitystä lähteä toteuttamaan siten, että veden havaitseminen on tutkakuvasta helpompaa.

Reaaliaikaisesti tutkalaitteen keskusyksikön näytöltä tutkakuvan tarkastelu oli hankalampaa. Laitteen uudemmalla versiolla 2,3 GHz antennilla varustettuna ja laitteen oikeaoppisella kalibroinnilla keskusyksikön tutkakuva on paremmin luettavissa reaaliaikaisesti.



Kuva 5.1. Kuvissa on esitetty tutkakuva keskusyksikön näytöltä. Vasemmanpuoleinen on tämän tutkimuksen koekappalemittauksista, jossa käytössä on ollut 1,6 GHz antenni. Oikeanpuoleinen kuva on kuvankaappaus tutkan keskusyksikön näytöltä tutkimuksen ulkopuolisesta laboratoriokoekappaleesta tehdystä mittauksesta 2,3 GHz antennilla. Jos ontelossa on sopiva määrä vettä tai betonia, on heijastus todella selkeä, kuten kuvasta näkyy. Resoluutio oikeanpuoleisessa kuvassa on selvästi parempi.

Ohjelmiston kehitystarpeita:

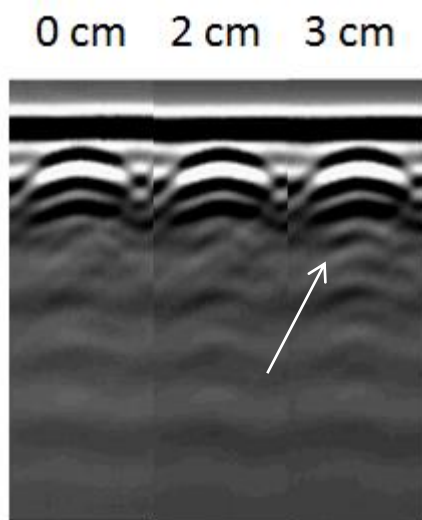
- Veden erottaminen betonista, kosteasta betonista ja teräksestä
- Tutkan erotuskyvyn ja näytön resoluution optimointi

Keskusyksikön näytön tutkakuvan resoluutio on parempi 2,3 GHz keskitaajuudella, kuten kuvasta 5.1 voidaan huomata. Tutkimuksessa kerätyn aineiston perusteella tulisi selvittää voidaanko veden, betonin ja kostean lietteen sekä teräksisten parvekekannak-

keiden ja laatan pintaan kiinnitettyjen nostoankkureiden aiheuttamia heijastuksia erotella matemaattisella signaalinkäsittelyllä ja kehittämällä ohjelmistoa. Tämä edellyttää kuitenkin sitä, että tutkan suorituskyky riittää tarpeeksi pienien vesimäärien havaitsemiseen ontelossa.

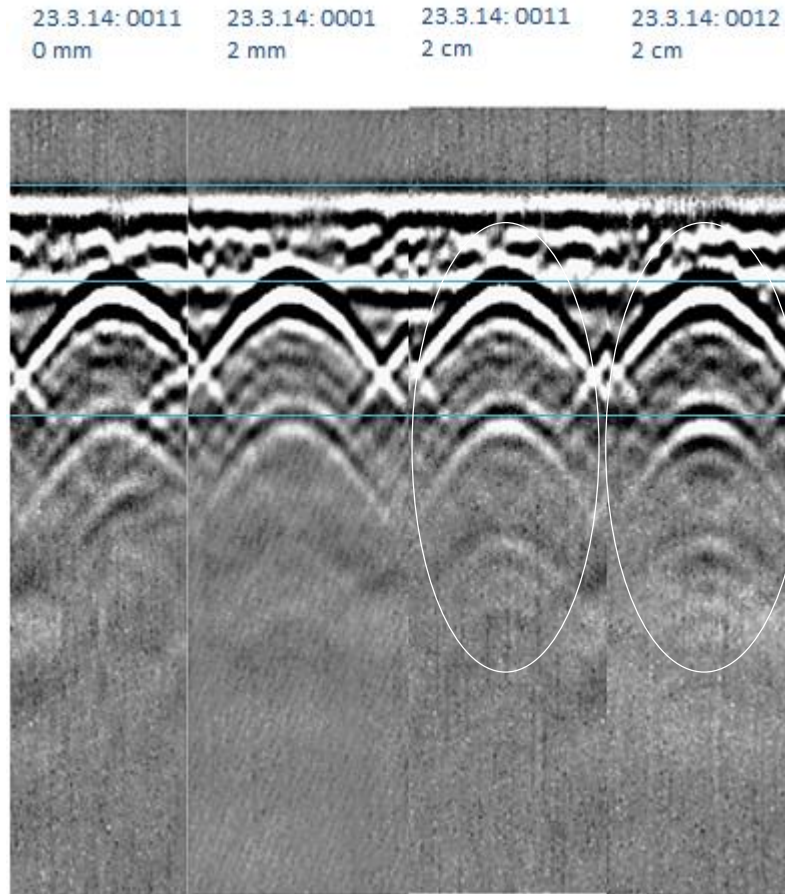
5.1.1 Pienin havaittavissa oleva vesimäärä

Koekappalemittausten aineistosta käy ilmi (kuva 5.1.1.a.), että kun vettä on 2 – 3 cm ontelon pohjalla, se alkaa näkyä, kun aineistoa tarkastelee tietokoneelta jälkeinpäin GroundVision -ohjelmalla. Tutkimuksessa on esitetty aineistoa myös 2,3 GHz antennin keskitaajuudella, jolla resoluutio on parempi. Tämän takia pienimmän havaittavissa olevan vesimäärän määrittämisessä täytyy tarkastella tutkimuksen ulkopuolista aineistoa sekä arvioida tutkan erotuskykyä vedelle teoreettisesti.



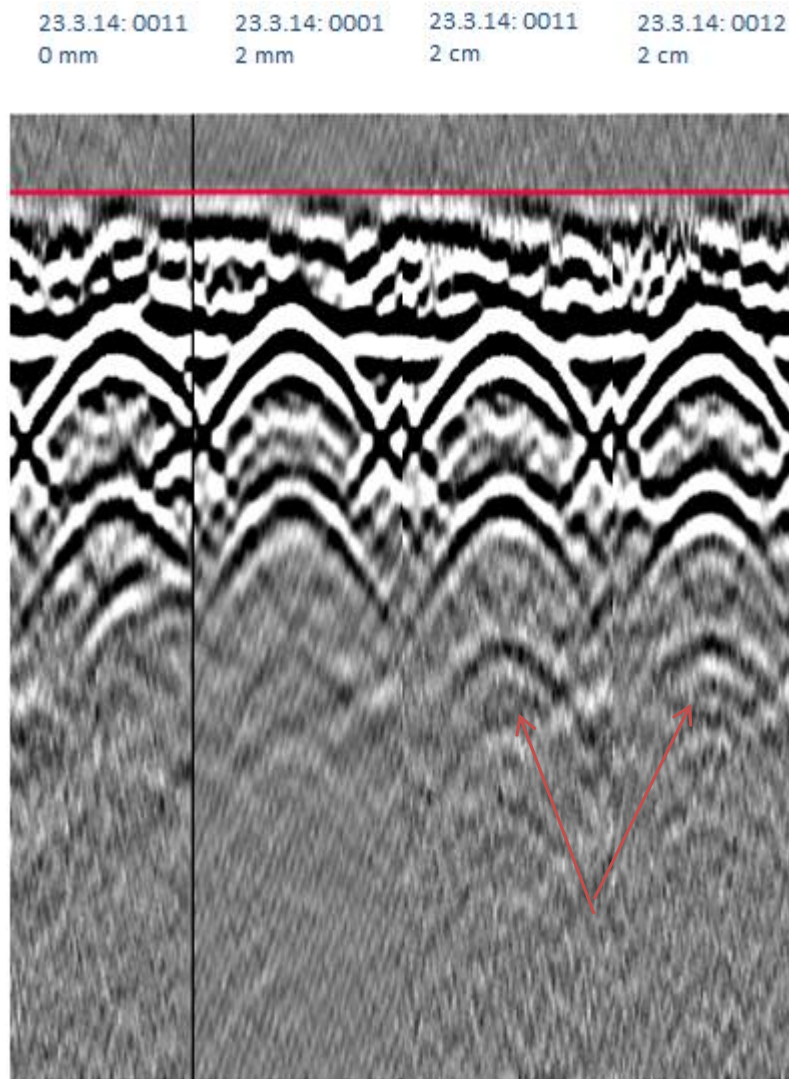
Kuva 5.1.1.a. Koeolosuhteissa 2 – 3 cm vesimäärä alkaa hahmottua tutkakuvassa pulssin keskitaajuudella 1,6 GHz. 3 cm vesimäärä näkyy tyhjäan onteloon verrattaessa jo selkeästi.

Tutkimuksen ulkopuolella toisen tutkijan laboratorio-olosuhteissa tekemissä koemittauksissa testattiin ontelovesien paikantamista Malå:n CX (Concrete Imaging System:llä) 2,3 GHz antennilla. Tutkalaitteella saavutettavissa oleva resoluutio määrittää pienimmän havaittavissa olevan vesimäärän. Resoluutio paranee taajuuden kasvaessa. Kuvassa 5.1.1.b on esitetty 2,3 GHz pulssin keskitaajuudella pienin havaittavissa oleva vesimäärä GroundVision -ohjelman kautta käsitellystä mittaustiedosta. Jos veden heijastus voidaan erottaa tarkasti aineistoa katsomalla, tällöin saadaan tietoa siitä, että tutkan suorituskyky riittää tarpeeksi matalan veden havaitsemiseen ontelossa, joka on yksi askel lähemmäs jatkokehitysprosessin kannattavuutta.



Kuva 5.1.1.b. Tutkakuvat on sijoitettu vierekkäin, jotta niitä voidaan vertailla tarkkaan. Tutkakuvien yläpuolella on onteloiden sisällä olevat vesimäärät. 2 cm:n vesimäärä voidaan erottaa heijastuksen voimakkuudesta sekä heijastuksen korkeuden erosta verrattuna pienempiin vesimääriin tai tyhjään onteloon.

Kuvassa 5.1.1.c on esitetty sama aineisto 2,3 GHz yhdistelemällä kuvankaappauksia tutkan keskusyksikön näytöltä.



Kuva 5.1.1.c. 2 cm:n vesimäärä ontelossa erottuu selvästi hyperbelin muotoisena heijastuksena nuolten osoittamassa kohdassa verrattuna 2 mm:n vesimäärään. Kuvankaappauksena keskusyksikön näytöltä 2 cm vesimäärän aiheuttamat heijastukset erottuvat vielä selvemmin kuin edellisessä kuvassa.

Kuvassa 5.1.1.c osoitettu tulos on lupaava reaaliaikaisen paikantamisen kannalta, koska keskusyksikön näytöltä kuvankaappauksena tallennetuista tutkakuvista vesimäärät erottuvat jostain syystä jopa selkeämmin kuin tietokoneelta esitetystä vastaavassa aineistossa.

2,3 GHz:n antennilla mitatusta aineistosta voidaan sanoa, että 2 cm:n vesimäärä erottuu 320 mm korkean ontelolaatan ontelosta. Sillä, onko laattatyyppeä 320 mm vai 370 mm korkea, ei ole merkitystä ontelovesien paikantamisessa. Tarkempaan tulokseen pienimmän vesimäärän erottamisessa ei tällä aineistolla päästy.

Teoreettinen erotuskyky tutkalle on riippuvainen pulssin leveydestä (ns) sekä tutkattavan materiaalin dielektrisydestä (Majjala, Saarenketo 2000.). Veden korkea dielektrisyysarvo on edullinen tekijä menetelmän kannalta. Teoriassa pienin havaittavissa oleva vesimäärä voidaan laskea seuraavasta kaavasta:

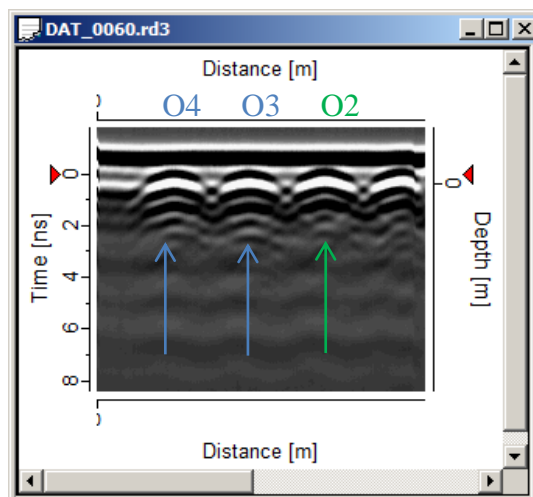
$$h = \frac{\tau \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_r}}$$

jossa τ on pulssin pituus, c on valon nopeus ja ϵ_r on väliaineen dielektrisyysarvo. Pulssin leveyden voidaan sanoa olevan verrannollinen tutkan keskitaajuuteen suhteessa $1/f_c$ (Jol 2008, s. 16). 2,3 GHz antennilla pulssin pituus on 0,435 ns, jolloin laskennallinen erotuskyky vedelle on 7,3 mm. Teoreettista erotuskykyä heikentää hieman käytännössä signaalin hajaantuminen ja vaimeneminen etäisyyden kasvaessa (Cabrera 2011, Jol 2008 s. 15). Signaalin vaimenemista voi kasvattaa myös ontelolaattarakenteen betonin kosteuspitoisuus. Pienten vesimäärien erottamisessa kannattaa tutustua kuviin 4.1.10.a ja 4.1.10.b tutkimuksen aineistossa.

Pienin havaittavissa oleva vesimäärä ei selvinnyt myöskään RoadScannersin tekemistä mittauksista (Liite B), joissa käytössä oli GSSI:n valmistama betoniskanneri 2,6 GHz:n pulssin keskitaajuudella. Liitteessä esitetyssä aineistossa on tehty tasokartta koekappalelaatan suhteellisista ontelovesimääristä. Tämantapainen menetelmä voi tulla kyseeseen ennemmin rakennuksen luovutuksen jälkeisissä kosteusvaurioiden kartoituksissa.

5.1.2 Veden ja betonin erottaminen

Betoni ja vesi eroavat toisistaan sähkömagneettisilta ominaisuuksiltaan. Veden dielektrisyys on suuri, jolloin signaalin eteneminen vedessä on myös hidasta. Betonin dielektrisyysarvo on huomattavasti pienempi (taulukko 2.2.1.). Materiaalin vesipitoisuus nostaa sen dielektrisyysarvoa (Saarenketo, Maijala 2004). Tällöin kostean ja kuivan betonin heijastuksissa on myös eroja.



O4: 8 cm vettä

O3: 6 cm vettä

O2: 9 cm betonia

Kuva. 5.1.2. Koekappalelaatasta tehty tutkimus onteloiden poikkisuunnassa. Sinisillä nuolilla merkityt heijastukset ovat vedenpinnan aiheuttamia ja vihreän nuolen osoittama heijastus on betonista. Veden ja betonin heijastus tutkakuvasa ovat vertailukelpoisia, koska vesimäärä ontelossa 4 ja betonimäärä ontelossa 2 ovat suunnilleen samat. Betonin heijastus tutkakuvasa on kapeampi kuin veden. Heijastuksen muoto riippuu kuitenkin materiaalin lisäksi heijastavan kerroksen paksuudesta.

Betonin ja veden erottamisessa on mahdollista hyödyntää materiaalien sähkömagneettisista ominaisuuksista johtuvia eroja signaalin nopeudessa. Toinen tapa erottaa eri materiaaleja toisistaan on matemaattiset signaalinkäsittelymenetelmät dielektrisen permittiivisyyden kompleksisuuteen perustuen. Kenttien vaihe-eron avulla on mahdollista erottaa materiaaleja toisistaan (Mikhev et. al. 2015). Tämä pätee myös veden ja betonin erottamiseen. Ontelon pohjalla olevan vesipitoisen lietteen erottaminen vedestä on haastavampaa, mutta asia on selvitettävissä jatkotutkimuksissa.

5.2 Ontelovesien paikannus

Kun rakennus on altistunut yhtämittaiselle vesi- tai lumisateelle vesikaton ollessa vielä asentamatta, on todennäköistä, että onteloiden sisällä on vettä. Jos runkovaihe on saatettu valmiiksi suotuisissa olosuhteissa, on todennäköistä, että holvi on kuiva, eikä onteloihin jää vesipesiä vesireikien porauksen jälkeen. Ennen ontelovesien tutkaamista on suositeltavaa kartoittaa ontelovesien esiintymisen riski ja rakennuksen riskipaikat. Kosteuksen voi havaita usein tarkastelemalla ontelolaatasta alapuolelta.

5.2.1 Mittauksen suoritus työmaalla

Ontelovesien paikantaminen maatutkalla voidaan tehdä laatan päältä joko onteloita vasten kohtisuorassa tai onteloiden suuntaisesti kohdissa, joissa ei mahdu tutkaamaan poikisuuntaan. Kantavan seinän viereiset ontelot ovat ongelmallisia, koska niihin voi jäädä vesipesiä laattoihin tehtyjen varausten ja kiinnitysten vierustalle, eikä poikittaissuuntaan tutkaaminen ole mahdollista seinän vieressä. Onteloita vasten kohtisuoraan tutkattaessa riittävä linjojen väli on noin 1 metri. Kuvassa 5.2.1 on esitetty tutkimuksen suorituksen periaate rakenteilla olleen kerrostalon yhdessä asunnossa.

Tutkaus tulisi päästä suorittamaan työmaalla silloin, kun lattiapinta-ala on mahdollisimman esteetön ja pinta on tasainen. Paras aika suorittaa tutkimus on mahdollisimman pian lattiatasoitteiden levityksen jälkeen, kun tasoite on kuivunut eikä kerroksessa ole tiellä ylimääräistä tavaraa. Tutkattaessa on syytä tuntea ontelolaattaväli- ja vesipesien yleisimmät riskipaikat, jotka on listattu tämän tutkimuksen luvussa 2.1.3. Väli- ja vesipesien kuivuutta tulee tarkastella silmämääräisesti ennen tutkimusta.



Kuva 5.2.1. Punaisella on rajattu alue, joka tutkattiin SRV:n kerrostalokohteessa Vantaalla. Nuolilla on kuvattu tutkimuksen suoritusperiaatetta. Seinien viereisiä onteloita ei ole mahdollista tutkata poikkisuuntaan, joten ainoa mahdollinen tapa on tutkata ne pituussuuntaan.

Tutkaamisen suorittaminen on helpointa onteloita vastaan poikkisuunnassa laataston pintatasoitteen päältä, jolloin tutkakuvasta voidaan huomata toistuvia hyperbelin muotoisia heijastuksia onteloiden kohdalla. Poikkisuuntaan tutkaamisen etuna on, että se ei vaadi erityistä tarkkuutta pysyä ontelon keskilinjalla, kuten ontelon päältä pituussuuntaan tutkaaminen. Teräksiset laattojen kansiin kiinnitettävät nostoankkurit ja ulkoseinien vierustoilla sijaitsevat parvekekannakkeet tulee huomioida, koska nekin aiheuttavat antennin alle osuessaan heijastuksen tutkakuvassa.

Ontelonsuuntainen tutkaus tulee kyseeseen varsinkin kantavan väli- tai ulkoseinän viereisen ontelon kohdalla, jossa ontelovesiä useimmiten esiintyy ja poikittaissuuntaan tutkaaminen on liian ahdasta. Siksi menetelmän käytön kannalta on tärkeää että onteloiden pituussuuntainen tutkaaminen olisi mahdollista jatkossa ohjelmistoa kehittämällä.

Ontelon suuntaisessa tutkauksessa tulee varmistaa, että antennit liikkuvat ontelon keskikohdan päällä. Ulkoseinän viereisen ontelon kohdalla on usein metallisia parvekekannakkeita ja betonia ontelossa. Parvekekannakkeiden ja betonin aiheuttama heijastus on kuitenkin erotettavissa veden heijastuksesta kehittämällä ohjelmistoa. Veden pinta ontelon pohjalla on myös todennäköisesti tasainen ja jatkuva, mikä saattaa helpottaa veden erottamista muista heijastuksen aiheuttajista ontelon suuntaisessa tutkauksessa.

Koekappalemittausten aineistosta voidaan todeta, että pituussuuntaan ontelon päältä tutkaamalla vesi erottuu ontelon pohjalta, kun sitä on tarpeeksi. Vesimäärän mittaaminen ja dokumentointi koekappalemittausten aineistossa pituussuuntaan tehdyistä mittaustuksista ei ollut yhtä tarkkaa kuin poikittaissuuntaisilla linjoilla. Pituussuuntaan tutkan erotuskykyä voidaan kuitenkin pitää samana kuin poikittaissuuntaan. Voidaan sanoa, että pituussuuntaan tutkaamalla voidaan löytää ontelosta vettä, jos ohjelmistokehityksellä saadaan vesi erotettua ontelosta esimerkiksi erivärisenä.

Ontelovesien reaaliaikaisessa paikantamisessa voidaan tutkaus tehdä tiheämmin ja useampaan otteeseen sellaisen kohdan päällä, jossa epäillään olevan vettä. Tutkaus kannattaa suorittaa näin, jos vesipesä on pinta-alaltaan pieni, eikä muuten osu tutkan kulkealle linjalle. Kun ontelon sisältä havaitaan vettä, merkitään kohta ja porataan vedenpoistoreikä laatan alapintaan ontelon kohdalle.

5.2.2 Tutkan kalibrointi ja mittausasetukset

Ontelovesien tutkauksessa mittausasetusten säätäminen ja optimointi on tärkeää, jotta saadaan aikaan mahdollisimman selkeä tutkakuva. Mittausasetusten arvot ovat usein riippuvaisia toisistaan, jolloin yhden arvoa muutettaessa toinen tai useampi muuttuu. Esimerkiksi näytteistystaajuus ja mittausaika sekä signaalin nopeus reagoivat keskenään yhtä muutettaessa.

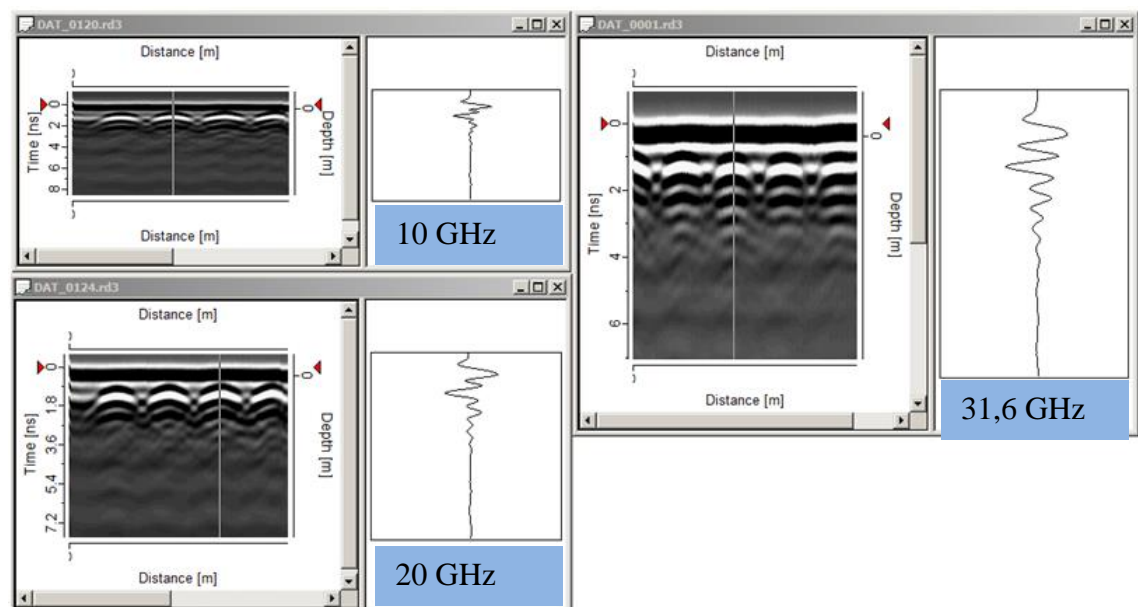
Tässä tutkimuksessa käytössä olleella laitteella asetusten kalibrointi piti tehdä manuaalisesti. Nykyaikaisemmissa laitteissa on usein automatisoitu kalibrointitoiminto. Mittausasetukset tulee optimoida siten, että kuvaa on mahdollisimman helppo lukea keskusyksikön näytöltä. Koemittausten perusteella tutkan kalibroinnissa luettavan datan kannalta tärkeimpiä ovat seuraavat säädöt:

- näytteistystaajuus / näytteiden määrä
- signaalin nopeus väliaineessa
- mittausaika
- distance interval / point interval / time interval
- kontrasti.

Näytteistystaajuus

Näytteistystaajuus (*"Sampling frequency"*) määrittää kuinka monta näytettä tutka tallentaa yhtä pyyhkäisyä kohden. Jol (2008, s. 29) toteaa, että näytteistystaajuuden tulisi olla vähintään kuusi kertainen pulssin keskitaajuuteen nähden. Ohjekirjan mukaan näytteistystaajuudeksi suositellaan kymmenen kertaa lähetinantennin keskitaajuus (Ramac Ground Vision software manual). Lisäksi ohjekirjan mukaan näytteiden lukumäärä (*"number of samples"*) tulisi olla noin 500 parhaan suorituskyvyn kannalta. Suurimassa osassa tutkimuksessa esitetystä datassa näytteiden määrä on kuitenkin 176.

Suuremmalla näytteistystaajuudella on helpompi erottaa lähemmäs olevat rajapinnat. Näytteistystaajuuden kasvattaminen venyttää tutkakuvaa pystysuunnassa korkeammaksi. Optimaalinen arvo, jolla tutkakuvaa on helpoin lukea, kannattaa etsiä kokeilemalla. Käytännössä näytteistystaajuus voi olla reilusti yli suositusten, esimerkiksi kuvan 5.2 perusteella yli 30 GHz näytteistystaajuudella, näytteiden määrän ollessa 456, on tutkakuva jälkeinpäin tietokoneelta tarkastellessa melko selkeä.



Kuva 5.1.3. Kuvassa näkyy näytteistystaajuuden vaikutus tutkakuvaan ja profiliin. 10 GHz näytteistystaajuus on niin pieni, että dataa on vaikea tulkita. 31,6 GHz on huomattavasti selkeämpi, jossa näytteiden määrä (456) on myös lähempänä ohjekirjan suositusta, 500.

Signaalin nopeus

Signaalin arvioitu nopeus väliaineessa määritellään tutkan asetuksista kohdasta *"signal velocity"*. Signaalin nopeuden säätäminen ei käytännössä vaikuta tutkakuvaan, mutta säätämällä signaalin nopeus lähelle todellista arvoa, saadaan tarvittaessa rajapinnan syvyysmitta-asteikko tutkakuvan laidassa vastaamaan toisessa laidassa sijaitsevaa signaalinkulku-aika-asteikkoa (ns) tarkemmin.

Mittausaika

Tutkan mittausaika määritellään keskusyksikön asetuksista kohdasta ”time window”. Mittausaika määrittää kuinka pitkän ajan (ns) signaalin etenemistä väliaineessa tallentuu näytölle. Mittausaika voidaan laskea kaavasta

$$s = v \cdot t = \frac{0,5 \cdot twt \cdot c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

jolloin signaalin edestakaiseen matkaan kulunut aika saadaan jakamalla edestakainen matka signaalin arvioidulla nopeudella:

$$twt = \frac{2 \cdot s}{v}$$

Mittausajan ja signaalin nopeuden arvioinnissa voidaan käyttää taulukkoa 2.2.5. Ensin lasketaan signaalin edestakaiseen matkaan kulunut teoreettinen aika, jonka perusteella voidaan laskennallisesti arvioida signaalin keskinopeutta. Arvioinnissa käytettiin signaalin nopeuden arvona betonissa 100 m/μs. Signaalin nopeus on kuitenkin eri vedessä, ilmassa ja betonissa. Laskennallisesti arvioiden signaalin keskinopeus edestakaisella matkalla laatan yläpinnasta alapintaan ja takaisin 370 mm korkealla ontelolaatalla on tyhjän ontelon kohdalla 183 m/μs, vedellä täyttyneen ontelon kohdalla 41 m/μs ja puoleen väliin vettä sisältävän ontelon kohdalla 67 m/μs. Tutkakuvassa näkyvä heijastus on kuitenkin tyhjän ontelotilan jälkeen ensimmäisen rajapinnan aiheuttama, joka alkaa kertaantua tutkan käyttämän pulssimuodon takia.

Taulukko 2.2.5. Signaalin nopeuksia ja materiaalien dielektrisyysarvoja. Vedessä signaalin nopeus on huomattavasti pienempi kuin betonissa ja ilmassa.

Väliaine	Dielektrisyysarvo, ϵ_r	Nopeus [m/μs]
Ilma	1	300
Vesi	81	33
Betoni	4 - 10	95 - 150

Mittausparametrien ”signal velocity” ja ”sampling frequency” määritetyt arvot vaikuttavat myös mittausaikaan. Mittausaika (”time window”) tulee säätää riittävän suureksi, jotta kaikki oleellinen data tallentuu tutkakuvaan. Toisaalta, jos mittausaika on säädetty liian suureksi, tallentuu tutkakuvaan turhaa dataa. Tutkimuksessa esitetyn aineiston perusteella riittävä mittausaika ontelolaatan tutkaamisessa on noin 5-7 nanosekuntia.

Mittauspisteiden väli

Mittauspisteiden väli (”Point interval”) määrittää etäisyyden mitattujen pisteiden välillä tutkakuvassa. Mitattujen pisteiden esitys tiheämmin tekee tutkakuvasta leveämmän ja ontelolaattojen tutkauksessa helpommin luettavan. Ontelolaattojen tutkaamisessa lyhyt

mittapisteidän väli on tarpeen. Tutkimuksessa suoritetuissa mittauksissa käytettiin pienintä mahdollista arvoa, joka oli 5 mm.

Kontrasti

Kontrastin säätö on merkityksellinen reaaliaikaisen tutkakuvan luettavuuden kannalta. Ontelolaatassa on selkeitä rajapintoja, joiden heijastukset kertaantuvat tutkakuvassa. Onteloiden heijastusten tulee erottua selkeästi, mutta jos kontrastin säätää liian suureksi, voivat kertaantuneet heijastukset näkyä tutkakuvassa turhan voimakkaastikin.

5.2.3 Mittausten dokumentointi

Perussääntönä mittausten dokumentoinnissa on tallentaa tieto siitä, mistä kohtaa rakennuksen välipohjaa data on tallennettu. Mittausten dokumentoinnin tarkoituksena on, että mittaustiedosto voidaan jälkeänpäin yhdistää oikealle sijainnille ja ajankohdalle.

Paikantamalla mittauslinjan aloituspiste piirustukseen saadaan onteloidensuuntainen koordinaatti ja tutkalaitteen mittapyörällä voidaan mitata sen kulkemaa matkaa. Onteloiden muoto näkyy mittausdatassa, joten siitä voi erottaa ontelot ja kokonaisen laatan, josta on apua tarkasteltaessa dataa jälkikäteen. Jos välipohja tutkataan järjestelmällisesti tietyn välisin linjoin, jokaisesta linjasta tallennetaan oma tiedosto, jotta tiedostoja jälkeänpäin tarkastellessa tiedetään mistä kohtaa rakennusta ne ovat. Jotta tiedostoja voi luotettavasti tarkastella jälkeänpäin, tulisi tutkaus suorittaa linjan alusta loppuun siten, että mittapyörä pysyy kosketuksessa pintaa vasten ja sen mittaama matka vastaa todellista matkaa.

Tutkaus voidaan joutua tekemään myös tarkkuutta vaativissa kohdissa useampaan kertaan, jolloin mittausten dokumentointi ei onnistu järjestelmällisten linjojen tapaan. Tutkauksen aikana on mahdollista liittää dataan merkkejä havainnoista tutkan ohjelmiston ”marker” -toiminnolla Useimmissa laitteissa yksinkertaisesti nappia painamalla dataan tallentuu merkki kyseiseen kohtaan.

Videokuvan ja äänitallenteen käyttö on tärkeä osa teiden maatumkatutkimusten dokumentointia. Videokuvaa ja äänitallennusta on mahdollista hyödyntää myös ontelovesien paikannuksen dokumentoinnissa. Kameran voi kiinnittää sopivalle korkeudelle tutkalaitteistoon ja suunnata siten, että antennilaatikon sijainti ja tutkattava kohta sekä tarvittava laajuus ympäristöä näkyvät. Videotallenteen ääniraitaan voi nauhoittaa mittaajan kuvauksia ja kommentteja havaitsemastaan tilanteesta. Videotallenne ja ääniraita voidaan yhdistää mittausdataan ainakin useimmissa teiden maatumkatutkimuksissa. Videoinnin avulla saadaan mittaustilanne dokumentoitua mahdollisia myöhempää kiistakysymyksiä varten.

Dokumentoinnissa olisi tärkeää saada yhdistettyä paikkatieto tallennettavaan mittausdataan. Paikkatiedon yhdistäminen on teiden maatumkatutkimuksissa yleisesti käytetyllä

GPS -paikkatiedolla vaikeaa ontelovesien paikantamisessa, koska rakennuksen sisällä GPS -signaalin tarkkuus kärsii. Paikkatieto voisi olla mahdollista yhdistää mittausdataan esimerkiksi liittämällä kosketusnäyttöinen tablettitietokone tutkalaitteen keskusyksikköön. Tabletille voisi merkitä mittauksen aloituspisteen ja mittapyörä mittaisi siitä kuljetun matkan. Yhdistämällä mittausdata digitaalisesti videoon sekä paikkatietoon ei jäisi epäselvyyksiä mittausten dokumentoinnissa.

5.2.4 Tutkalaitteen soveltuvuus ontelovesien paikantamiseen

Laitteisto koostui akusta, keskusyksiköstä sekä antennilaatikosta, jotka kytkettiin johdoilla toisiinsa. Laitteen liikuttaminen onnistui työmaalla laitetta testattaessa, mutta valmiiksi tuotteeksi siinä on kehitettävää. Yksinkertaisella jatkovarrella, johon saa telineen keskusyksikölle ja akulle, tutkaaminen olisi helpompaa. Lattiaa pitkin liikutettavan antennilaatikon kuljetussysteemi kannattaa pyrkiä pitämään mahdollisimman pienikokoisena, jotta tutkaaminen onnistuu ahtaammissakin paikoissa. Työmaamittausten kokemusten perusteella on tärkeää, että mittapyörän, joka mittaa matkaa ja jonka mittauksen etäisyyden perusteella tutka lähettää pulsseja, kontakti pintaa vasten on hyvä.

Tutkimuksessa käytetyn laitteen etuja oli pieni koko sekä jatkovarsi, jonka avulla antennilaatikkoa oli helppo liikuttaa rakennuksen välipohjan pinnan päällä. Laitteen automaattinen kalibrointitoiminto helpottaisi tutkauksen aloittamista ja tällä tavalla voitaisiin varmistua mittausparametrien optimaalisista säädöistä.

6. POHDINTA

6.1 Tulosten tarkastelu

Tutkimuksen tuloksina saatiin selvitettyä lähtökohdat menetelmän jatkokehitykselle selvittämällä ohjelmiston tärkeimmät kehitystarpeet. Tuloksissa arvioitiin lisäksi menetelmän käyttöä työmaalla, jonka pohjalta selvitettiin tutkimuksessa tärkeimmät huomioitavat asiat, joita ovat mittauksen suoritus tapa, tutkan kalibrointi ja mitta-asetusten säätäminen sekä ohjeita mittausten dokumentointiin.

Tutkimuksessa saatiin tieto siitä, että betonirakenteiden tutkimiseen tarkoitettulla maatutkalla voidaan havaita ainakin 2 cm korkea vedenpinta 370 mm ja 320 mm korkean ontelolaattatyypin ontelosta. Tuloksissa jäi epäselväksi, kuinka paljon pienempi vesimäärä ontelon pohjalta voidaan tarkalleen havaita. Tutkatekniikan sekä signaalinkäsittelyn asiantuntemuksella on merkittävä osuus pienimmän vesimäärän selvittämisessä. Tutkan erotuskykyyn voidaan vaikuttaa laitteen teknisten ominaisuuksien optimoinnilla sekä parantaa pienten vesimäärien erottamista ohjelmistokehityksellä. Ohjelmiston kehittäminen siten, että vesi ja betoni voidaan erottaa toisistaan, on mahdollista matemaattista signaalinkäsittelyä soveltamalla. Ilman ohjelmistokehitystä ja jatkotutkimuksia menetelmä ei ole valmis käytettäväksi.

Kokeelliset mittaukset jouduttiin tekemään laitteella, jossa pulssin keskitaajuus oli 1,6 GHz. Suurempitaajuinen, 2,3 GHz, antennin erotuskyky olisi ollut ontelovesien paikantamisessa tarkempi. 2,3 GHz:n antennilla tutkimusta edeltävästä aineistosta voidaan sanoa, että ainakin 2 cm:n vesimäärä erottuu ontelon pohjalta. Tulos ei ole tyydyttävä ja jättää varaa spekuloinnille.

Teoreettinen erotuskyky tutkalle on riippuvainen pulssin pituudesta sekä tutkattavan materiaalin dielektrisyudesta (Maijala, Saarenketo 2000). Näin ollen veden korkea dielektrisyysarvo on edullinen tekijä menetelmän kannalta. Pienin havaittavissa oleva vesimäärä voidaan laskea seuraavasta kaavasta:

$$h = \frac{\tau \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_r}}$$

jossa τ on pulssin leveys, c on valon nopeus ja ϵ_r on väliaineen dielektrisyysarvo. Pulssin leveyden voidaan sanoa olevan verrannollinen tutkan keskitaajuuteen suhteessa $1/f_c$ (Jol 2008, s. 16). 2,3 GHz antennilla pulssin leveys on 0,435 ns, jolloin laskennallinen erotuskyky vedelle on 7,3 mm. Pulssin teoreettinen leveys on todellisuudessa epätarkka ja pulssin leveytenä voidaan käyttää varman päälle arvoa 1,0 ns.

Tarkastellaan erotuskykyä pulssin leveydellä 1,0 ns toisella teoreettisella mallilla, joka perustuu oletukseen, että kaksi pulssia on erotettavissa, kun niiden välinen aikaero on puoli amplitudia (W). Tässäkin kaavassa pulssin leveys sekä signaalin nopeus väliaineessa määrittävät erotuskyvyn (Jol 2008, s. 16):

$$\Delta r \geq \frac{Wv}{4}$$

Käyttämällä pulssin pituutena 1,0 ns ja signaalin nopeutena vedessä 33 m/ μ s, saadaan erotuskyvyksi 4,1 mm.

Molemmissa erotuskyvyn laskennallisissa arvioissa tulee ottaa huomioon, että teoreettista erotuskykyä heikentää signaalin vaimeneminen ja hajaantuminen etäisyyden kasvaessa (Cabrera 2011, Jol 2008 s. 15). Signaalin vaimeneminen ja hajaantuminenkin ovat arvioitavissa teoreettisesti. Signaalin vaimenemista ja hajaantumista saattaa hieman kasvattaa työmaaolosuhteissa ohut lattiatasoite ontelolaataston päällä. On mahdollista, että käyttötarkoitukseen optimaalisesti valitulla tutkalla voidaan erottaa 1 cm tai jopa pienempikin vesimäärä.

6.2 Virheen arviointi koekappalemittauksissa

Kokeellisesti tehtävissä mittauksissa syntyy aina epätarkkuutta, joka tulee huomioida tulosten esittämisessä. Virheitä on kahdenlaisia: satunnaisia ja systemaattisia. Satunnaiset virheet voivat johtua mittaajan huolimattomuudesta tai sekä kappaleen että mittalaitteen ominaisuuksista. Tämän tutkimuksen koemittausten suorittamiseen liittyi useita tekijöitä, jotka vaikuttivat tulosten täsmällisyyteen.

- satunnaiset virheet
 - betonimäärän mittaus / arviointi
 - vesimäärän mittaus / laskennallinen arviointi
 - tekninen mittaussuoritus (mittapyörän pyörämisen varmistaminen, tarkkuus mittaussuorituksella pysymisessä ja laatan pinnan reikien ja epätasaisuuksien vaikutus dataan)
 - tutkan asetusten vaikutus eri päivinä tehtyjen mittausten esittämisessä
- systemaattiset virheet
 - tutkalaitteen ja ohjelmiston asettamat rajoitteet tutkakuvan ja profiilin tarkkuudelle ja systemaattinen varianssi profiileissa
 - koekappalelaatan kannen reikien, avonaisten onteloiden päiden ja koelaitteen mittastandardipoikkeamien yms. erikoistapauksien mahdollinen näkyminen tutkatatassa

Mittauspöytäkirjassa vihreällä korostetut arvot on mitattu metrimittalla koepaikalla. Näitä voidaan hyödyntää laskennallisten arvojen luotettavuuden arvioinnissa. Onteloiden

vesi- ja erityisesti betonimäärien arvioinnissa on otettava huomioon virheen mahdollisuus tulosten esityksessä. Punaisella värillä korostetut arvot on jouduttu arvioimaan ja niissä tarkkuus ei ole yhtä luotettava kuin muissa. Varsinkin 3 ontelon kaatovalun kohdalla vesi- ja betonimääriä täytyi arvioida.

Tulosten kannalta merkityksellinen asia on vedenpinnan korkeuden mittatarkkuus pienintä tutkalla havaittavaa vesimäärää arvioidessa. Veden pinnan korkeus ontelon pohjalla muuttui laatan kallistuskulmasta johtuen noin 1,0 cm jokaista 20 cm välein sijaitsevaa mittaussuorityn kohden. Vesirajan sijainti mitattiin ontelon päästä ja mahdollinen mittavirhe on +/- 3 cm, joka tarkoittaa vedenpinnan korkeuden ilmoittamisessa vain +/- 1,5 mm. Tähän voidaan yhdistää lisäksi mittaussuorityksessä linjalta poikkeamisen aiheuttama epätarkkuus, joka on +/- 3 cm. Näiden virheiden summautuesssa suurin mahdollinen mittavirhe pienintä tutkalla havaittavissa olevaa vesimäärää arvioidessa on +/- 3mm.

6.3 Tutkimuksen tarkastelu

Tutkimuksen tavoitteet määriteltiin aikaisemmissa tutkimuksissa saavutetun tiedon ja elementtitoimittajan näkemysten pohjalta ensimmäisissä ohjausryhmän kokouksissa. Tärkeimmäksi tavoitteista osoittautui tutkimuksen päätavoite, ohjelmiston kehitystarpeiden määrittely. Kaksi muuta tavoitetta, menetelmän testaus työmaalla sekä mittaus-ten dokumentoinnin konseptointi avasivat tutkimuksen näkökulmaa.

Tavoitteet saavutettiin kirjallisuuskatsauksen ja kokeellisen tutkimuksen avulla. Tutkimuksen alkuvaiheessa tehtiin työmaakäyntejä ja haastateltiin vastaavia mestareita ja työnjohtajia ontelovesiin liittyen. Työmaakäynneillä ja kirjallisuuteen perehtymällä muodostui selvempi kuva tutkittavasta ongelmasta. Yhteistyö TTY:n signaalinkäsittelylaitoksen kanssa korostui tutkimuksen ohjauksessa kohti tavoitteita. Tutkimuksen tavoitteiden määrittely oli osunut oikeaan ja tavoitteisiin vastaaminen tuloksissa oli luonnollista.

Kirjallisuuskatsauksessa määriteltiin tutkittava ongelma ja perehdyttiin impulssitutkan toimintaperiaatteeseen sekä tutkasignaalin teoriaan. Suurimmasta osasta kirjallisuuskatsauksessa saadusta tiedosta ei ollut paljoa hyötyä kokeellisesti suoritettujen empiiristen tutkimusten suorittamisessa. Hyödyllisin tieto tutkimuksen kokeellisen osuuden suorittamista varten hankittiin rakentamisen, tutkatekniikan sekä signaalinkäsittelyn asiantuntijoiden kanssa keskustelemalla ja tutkalaitteen ohjekirjaa lukemalla. Tutkimuksen edessä kirjallisuuskatsausta täytyi päivittää vastaamaan tulosten vaatimaa teoriapohjaa.

Tutkimuksen aineisto kerättiin kahden viikon mittaisena ajanjaksona kokeellisella tutkimuksella Parman Forssan ontelolaattatehtaalla, sekä kahdella tapaustutkimuksella SRV:n kerrostalotyömaalla pääkaupunkiseudulla. Empiirisessä tutkimuksessa kerättiin aineistoa tutkimusta varten valmistetusta ontelolaattakoekappaleesta sekä työmaalta.

Työmaalta sai myös realistista näkemystä todellisista olosuhteista menetelmän kehitystarpeiden määrittelyyn liittyen. Tutkimuksen kokeellista osuutta suorittaessa korostui tutkan käytön opettelu ja mittausasetusten säätäminen.

Ontelolaattakoeappaleella pyrittiin jäljittelemään työmaalla tutkattaessa eteen tulevia tapauksia ja siinä onnistuttiin melko hyvin. Koekappalemittausten suorittamisessa korostui koekappaleen suunnittelu, mutta tämän lisäksi mittaussuorituksen suunnittelu. Koekappaleen suunnittelun ja mittausten onnistuneen toteutuksen välillä piti miettiä mittauksen toteutusta vielä mittauspaikalla niin, että tarvittava aineisto saadaan talteen. Mittausjärjestelyllä saatiin mitattua vesimäärät tehokkaasti halutuun väleihin kalliistamalla laattaa. Betonimäärien tarkka mittaaminen nollasta täyteen onteloon ei ollut yhtä helppoa toteutettavissa. Veden ja betonin heijastusten erottamisen kannalta aineisto on kuitenkin riittävä. Pienimmän tutkalla havaittavissa olevan vesimäärän selvittämisessä on tärkeää kyetä vertaamaan pienten vesimäärien heijastusta tyhjiin onteloihin.

Työmaamittausten suorittamiseen jäi aikaa kaksi päivää, mutta sen voidaan katsoa riittäneen tavoitteiden saavuttamiseksi. Viettämällä aikaa enemmän työmaalla tutkan kanssa olisi työmaalta saatua näkökulmaa voinut syventää. Kahtena päivänä kahdelta eri työmaalta kerätystä aineistosta saatiin kuitenkin kerättyä aineisto, jota jälkepäin tarkastelemalla oli aikaa miettiä tapaustutkimuksen tuloksia. Tuloksina työmaalta saatiin kirjattua, että onteloissa näkyy heijastuksia, mutta veden paikantaminen vaatii ohjelmistokehitystä. Työmaakohteista sai hyvän näkemyksen myös tutkauksen suoritustapaan, tutkauksen edullisimpaan suoritusajankohtaan työvaiheeseen nähden sekä sääolosuhteiden vaikutukseen vertaamalla kahta työmaata, jotka olivat hieman eri rakennusvaiheissa.

Mittausten dokumentoinnin merkitys korostui tutkimuksessa kerätyn aineiston tarkastelussa. Dokumentoinnin konseptin kehittäminen jäi loppuun asti kehittämättä. Teiden maatutkatutkimusten dokumentoinnissa käytetään GPS-paikkatietoa ja videokuvaa. Rakennuksen sisällä tehtävien mittausten dokumentoinnissa on kiinnostavaa tiedostoon liitettävä videokuva ja ääniraita. Näitä ei kuitenkaan testattu, joten kokemuksen perusteella dokumentointimenetelmää ei voi arvioida. Paikkatiedon merkitys mittausten dokumentoinnissa on suuri. Sitä, kuinka tallennetut tiedostot voidaan liittää oikeille paikoille tarpeeksi tarkkaan ja vaivattomasti, ei saatu tutkimuksessa selvitettyä.

Tutkimuksen loppupuolella keskusteltiin asiantuntijan kanssa signaalinkäsittelyn mahdollisuuksista ohjelmistokehityksessä. Signaalinkäsittelyllä on mahdollista saada tarkempaa tietoa ontelolaatan tutkakuvasta, kuin mitä nykyisellä ohjelmistolla pystytään esittämään.

6.4 Jatkotutkimusehdotukset

Ensisijainen jatkotutkimuksen aihe on selvittää tarkasti pienin havaittavissa oleva vesimäärä ontelolaatan ontelosta. Tällöin tulee huomioida, että tutkan tekninen suorituskyky soveltuu parhaiten käyttötarkoitukseen. Signaalinkäsittelyn mahdollisuudet tutkan erotuskyvyn optimoinnissa tulee ottaa huomioon samanaikaisesti. Myös lattiatasoitteen vaikutus ontelon pohjalta havaittavissa olevan vesimäärän määrittämisessä on syytä huomioida.

Mielenkiintoinen jatkotutkimuksen aihe olisi selvittää kuinka veden erottaminen muista heijastuksen aiheuttavista materiaaleista on mahdollista matemaattisella signaalinkäsittelyllä ohjelmistokehitystä ajatellen. Tutkimuksessa voitaisiin käyttää esimerkiksi tässä diplomityössä kerättyä dataa koekappalemittauksista tai ontelolaatan tutkaus on myös mahdollista simuloida tietokoneohjelmalla. Veden erottaminen täytyy onnistua sekä poikittain onteloita vasten, että onteloiden suuntaisesti kantavien seinien vierustalla. Veden erottamista kosteasta betonista voisi myös selvittää tarkemmin. Tutkimuksen tuloksena olisi hyödyllistä saada alustava malli kehitetyn tutkan ohjelmistosta.

Laitteen fyysistä olemusta on syytä vielä kehittää ja laitteen käyttöä työmaalla tulee testata lisää, mutta tämän kaltainen tutkimus kannattaa tehdä vasta ohjelmiston kehitysmahdollisuuksien selvittämisen jälkeen. Ohjelmiston kehityksessä tulee ottaa huomioon rakentamisen sekä signaalinkäsittelyn asiantuntijoiden näkökulmat.

LÄHTEET

RT 14-10984 (2010). Betonin suhteellisen kosteuden mittaust [PDF].

Buyukötstürk, O; Tzu-Yang, Y; Ortega, J (2006). A methodology for determining complex permittivity of construction materials based on transmission-only coherent, wide-bandwidth free-space measurements. Saatavissa: http://web.mit.edu/istgroup/ist/documents/2006_A%20method%20for%20determining%20complex%20permittivity%20of%20construction%20mat%20OB%20TY%20&%20JO.pdf

Cabrera, R (2011). GPR Antenna Resolution [PDF]. Saatavissa: <http://www.geoscanners.com/appnotes/antres.pdf>

Elementtisuunnittelu.fi – Ontelolaatat. Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/runkorakenteet/laatat/ontelolaatat>

GSSI Handbook For RADAR Inspection of Concrete (2006) [PDF].

Hedenstedt, E; Kemppainen, T. (2011). Fuktskydd och planering I byggprojekt – Erfarenheter från Eolshäll. Saatavissa: <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:424360/FULLTEXT01.pdf>

Hämäläinen J. (2012). Rakennustyömaan energiatutkimus [PDF]. Saatavissa: <http://www.tut.fi/cs/groups/public/@1102/@web/@p/documents/liit/mdbw/mdmz/~edisp/p033746.pdf>

Iltä-Sanomat (2013). Uusissa taloissa rakennusvirheitä: asunnon katossa oli 80 sentin märkä läiskä, josta tippui vettä [WWW]. Saatavissa: <http://www.iltasanomat.fi/asuminen/art-1288560569247.html>

Jol, H. M. (2008). Ground penetrating radar theory and applications Elsevier. Saatavissa: http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=3198&VerticalID=0

Koemittaus kerrostalokohteessa (SRV, Gaala, Helsinki) 17.11.2015

Koemittaus kerrostalokohteessa (SRV, Neulanan, Vantaa) 18.11.2015

Koivulahti, J. (2013). Rakennuksen rakennusaikainen kuivattaminen. (Oulun seudun ammattikorkeakoulu). Saatavissa: <http://theseus32-kk.lib.helsinki.fi/bitstream/handle/10024/67527/Jori%20Koivulahti.pdf?sequence=1>

Kukka, J. (2008). Ontelolaattojen ontelovedet. Saatavissa: <http://www.theseus.fi/handle/10024/9520>

Kähkönen, P. (2005) Ontelolaattojen käyttöpientalorakentamisessa. (2005). [PDF].

Maijala, P; Saarenketo, T (2000). Johdanto maatutkamenetelmän historiaan, fysikaaliin perusteisiin ja sovelluksiin. (Kuopio, Maatutkarengas ry. 10 v. seminaarijulkaisu)

Makkonen, T. (2013). Ontelolaattojen kosteudenhallinta. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/65559>

Malå Geoscience Internet-sivusto [WWW]. Saatavissa: http://www.malags.com/products/mala-cx-%28concrete-imaging%29-system.aspx?type=tech_specs

Malå Geoscience Internet-sivusto [WWW]. Using Malå GPR systems with GPS equipment. Saatavissa: http://www.malags.com/getattachment/5a25a027-4531-436c-96c6-f679a8be636c/Using-Mala-GPR-systems-with-GPS-Equipment-%28Using_M

Mikhev, V; Olkkonen, M.-K; Huuskonen, E. (2012). Subsurface target identification using phase profiling of impulse GPR data [PDF].

Mikhev, V; Olkkonen, M.-K; Huuskonen, E. (2015). Discrimination of buried objects in impulse GPR using phase retrieval technique [PDF].

Nieminen, J. (2009). Lämpökameran käyttö rakentamisessa ja ontelolaattojen kosteuskartoituksessa. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/2812>

Ontelolaattakoekappaleen mittaus Parman Forssan elementtitehtaalla 11.-19.11.2015.

Parma ontelolaattojen suunnitteluohje (2013) [PDF]. Saatavissa: <http://www.parma.fi/aineistot-ja-materiaalit/suunnittelu/laatat>

Parma ontelo- ja kuorilaattojen asennus- ja työmaaohje (2015) [PDF]. Saatavissa: <http://www.parma.fi/aineistot-ja-materiaalit/tyoemaa>

Passi, T. (Ratahallintokeskuksen julkaisuja, Helsinki 2007) Maatutkatekniikan hyödyntäminen radan tukikerroksen kunnan arvioinnissa [PDF]. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk_2007a8_maatutkatekniikan_hyodyntaminen_web.pdf

Paulose, A. (1994). High radar range resolution with the step-frequency waveform [PDF]. Saatavissa: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a284611.pdf>

Pochanin, G. (2009). Some advantages in UWB GPR. Saatavissa: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-9253-4_11#page-1

Ramac Ground Vision software manual [WWW]. Saatavissa: <http://www.ingeodav.fcen.uba.ar/Curso/prospeccion%20geofisica/Martingarcia/Georradar/GroundVision%20Manual.pdf>

Saarenketo, T. (2006). Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys. Saatavissa: <http://herkules.oulu.fi/isbn9514282221/isbn9514282221.pdf>

Saarenketo, T., Maijala P. (2004). Rakenteen parantamissuunnittelua edeltävät maatumkatutkimukset – menetelmäkuvaus [PDF]. Helsinki, Tiehallinto. Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100027-v-04rakentparantamissuunn.pdf>

Saarinen, J. (2007). Betonivälipohjan tuotanto- ja kustannustekijöiden vertailu: Ontelolaatta vai paikallavalu? (tutkintotyö, Tampereen ammattikorkeakoulu). Saatavissa: <https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/9639/Saarinen.Juha.pdf?sequence=2>

Salonen, J. (2013) Ontelovesien paikannus maatumka-luotauksella. Saatavissa: <http://www.tut.fi/cs/groups/public/@1912/@web/@p/documents/liit/mdbw/mduw/~edisp/p050632.pdf>

Skolnik, M. I. (1962). An introduction to radar [PDF].

Teriö, O. (2003). Betonivalmisisarakentamisen kosteudenhallinta [PDF].

Water structure and science Internet-sivusto [WWW]. Saatavissa: http://www1.lsbu.ac.uk/water/microwave_water.html

LIITE A: TUTKAN MITTAUSASETUKSET

```

2D_0010.rad - Notepad
File Edit Format View Help
SAMPLES:312
FREQUENCY:35100.000000
FREQUENCY STEPS:15
SIGNAL POSITION:34.89838557
RAW SIGNAL POSITION:47161
DISTANCE FLAG:1
TIME FLAG:0
PROGRAM FLAG:0
EXTERNAL FLAG:0
TIME INTERVAL: 0.000000
DISTANCE INTERVAL:0.0039087948
OPERATOR:
CUSTOMER:
SITE:
ANTENNAS:2.3 GHz shielded=2
ANTENNA ORIENTATION:NOT VALID FIELD
ANTENNA SEPARATION: 0.040000
COMMENT:HF Black wheel=0
TIMEWINDOW: 8.888889
STACKS:2
STACK EXPONENT:1
STACKING TIME:0.048000
LAST TRACE:514
STOP POSITION: 2.009121
SYSTEM CALIBRATION:0.0000018993
START POSITION:0.000000
SHORT FLAG:1
INTERMEDIATE FLAG:0
LONG FLAG:0
PREPROCESSING:0
HIGH:0
LOW:0
FIXED INCREMENT:0.300000
FIXED MOVES UP:0
FIXED MOVES DOWN:1
FIXED POSITION:0.000000
WHEEL CALIBRATION:1535.000000
POSITIVE DIRECTION:1
UNITS:SI
DEPTH UNITS:cm
LENGTH UNITS:m
MATERIAL:User-defined=9

2D_0011.rad - Notepad
File Edit Format View Help
SAMPLES:312
FREQUENCY:35100.000000
FREQUENCY STEPS:15
SIGNAL POSITION:34.88698955
RAW SIGNAL POSITION:47167
DISTANCE FLAG:1
TIME FLAG:0
PROGRAM FLAG:0
EXTERNAL FLAG:0
TIME INTERVAL: 0.000000
DISTANCE INTERVAL:0.0039087948
OPERATOR:
CUSTOMER:
SITE:
ANTENNAS:2.3 GHz shielded=2
ANTENNA ORIENTATION:NOT VALID FIELD
ANTENNA SEPARATION: 0.040000
COMMENT:HF Black wheel=0
TIMEWINDOW: 8.888889
STACKS:2
STACK EXPONENT:1
STACKING TIME:0.048000
LAST TRACE:520
STOP POSITION: 2.032573
SYSTEM CALIBRATION:0.0000018993
START POSITION:0.000000
SHORT FLAG:1
INTERMEDIATE FLAG:0
LONG FLAG:0
PREPROCESSING:0
HIGH:0
LOW:0
FIXED INCREMENT:0.300000
FIXED MOVES UP:0
FIXED MOVES DOWN:1
FIXED POSITION:0.000000
WHEEL CALIBRATION:1535.000000
POSITIVE DIRECTION:1
UNITS:SI
DEPTH UNITS:cm
LENGTH UNITS:m
MATERIAL:User-defined=9

```

LIITE B: SUHTEELLISEN KOSTEUDEN TASOKARTTA KOEKAPPALELAATASTA

