

HELSINGIN YLIOPISTO
HELSINGFORS UNIVERSITET
UNIVERSITY OF HELSINKI

Maisterintutkielma
Ympäristö- ja hydrogeologia

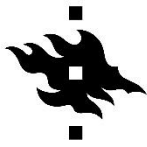
Seismisten taittumisloutaus- ja maatutkaloutausmittausten käyttö
kalliorakennusprojekteissa

Satu Joronen

Lokakuu 2022

Ohjaaja:
Emilia Koivisto, Ph.D

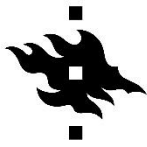
Geologian ja geofysiikan maisteriohjelma
Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta



HELSINGIN YLIOPISTO
HELSINGFORS UNIVERSITET
UNIVERSITY OF HELSINKI

MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA
MATEMATISK-NATURVETENSKAPLIGA FAKULTETEN
FACULTY OF SCIENCE

Tiedekunta Matemaattis-luonnontieteellinen		Koulutusohjelma Geologia ja geofysiikka	
Opintosuunta Ympäristö- ja Hydrogeologia			
Tekijä Satu Joronen			
Työn nimi Seismisten taittumisloutaus- ja maatulvaluotausmittausten käyttö kalliorakennusprojekteissa			
Työn laji Pro gradu	Aika 10/2022	Sivumäärä 99	
Tiivistelmä			
<p>Heikkousvyöhykkeet saattavat vaikuttaa kalliorakennusprojekteissa ympäristöön, turvallisuuteen ja kustannuksiin. Geofysiikan menetelmien avulla voidaan pyrkiä paikantamaan heikkousvyöhykkeitä jo esitutkimusvaiheessa. Tässä tutkimuksessa tutustutaan tapaustutkimuksena kahden Länsimetron aseman (Keilaniemi ja Otaniemi) alueen ensimmäisen rakentamisvaiheen maatulka- ja seismisiin taittumisloutausaineistoihin sekä louhintojen aikana tehtyjen geologisten kartoitusten aineistoihin. Maatulvaluotaukset ja seismiset taittumisloutauksset ovat kustannustehokas tapa tutkia maa- ja kallioperää. Ne perustuvat maakamaraan lähetettävien ja siellä kulkevien aaltojen havaitsemiseen takaisin maanpinnalla.</p> <p>Tässä tutkimuksessa käsiteltiin Länsimetron geofysiikan aineistot uudelleen pyrkimyksenä parantaa niiden pohjalta tehtävää tulkintaa nimenomaan heikkousvyöhykkeiden osalta. Seismisestä aineistosta tuotettiin tomografisia nopeusmalleja ja maatulka-aineistolle pyrittiin tekemään käsittelyt niin, että erityisesti kallion sisäiset rakenteet olisivat tulkittavissa. Tutkimusta tehdessä havaittiin, että saatavilla oleva taittumisloutausaineisto ei mahdollisesti täysin sovellu seismisen tomografian tarkoitukseen. Aineiston uudella käsittelyllä saatiin kuitenkin kohtalaisia tuloksia aikaan.</p> <p>Kaikista tämän tutkimuksen alueelta kartoitetuista heikkousvyöhykkeistä kahdeksan osui tarkastelussa olevien geofysiikan tutkimuslinjojen kohdalle. Näistä kahdeksasta heikkousvyöhykkeestä 75 % havaittiin geofysiikan menetelmillä. Geofysiikan menetelmillä havaittiin myös muita mahdollisia kallion sisäisiä rakenteita, joita tunnelin kartoituksen yhteydessä ei kuitenkaan havaittu. Anomaliaita havaittiin sekä seismisen tomografian että maatulvaluotauksen tuloksissa. Nämä anomaliait voitaisiin tulkita heikkousvyöhykkeiksi, mutta referenssitiedon puutteen takia heijasteiden- tai nopeuspoikkeamien lähteet jäivät varmistamatta.</p> <p>Tärkein tämän tutkimuksen johtopäätös on, että geofysiikan menetelmillä voidaan havaita heikkousvyöhykkeitä ja geofysiikan menetelmiä olisikin syytä hyödyntää kalliorakennusprojektien kallioperäselvityksissä entistä enemmän. Geofysiikan menetelmien tarkka käyttötarkoitus on kuitenkin syytä huomioida jo mittausten suunnittelussa, jotta mitattu aineisto saadaan parhaiten hyödynnettyä.</p>			
Avainsanat Geofysiikka, maatulka, GPR, seisminen, taittumisloutaus, insinöörigologia, heikkousvyöhykkeet, rikkonaisuus, kalliorakentaminen			
Säilytyspaikka			
Muita tietoja			



HELSINGIN YLIOPISTO
HELSINGFORS UNIVERSITET
UNIVERSITY OF HELSINKI

MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA
MATEMATISK-NATURVETENSKAPLIGA FAKULTETEN
FACULTY OF SCIENCE

Faculty Faculty of science		Degree programme Geology and geophysics	
Study track Environmental geology and hydrogeology			
Author Satu Joronen			
Title The use of seismic refractions and ground penetrating radar in rock construction			
Level Pro gradu	Month and year 10/2022	Number of pages 99	
Abstract <p>Weak zones in bedrock might have an impact on the environment, safety and costs of rock construction projects. It is possible to locate them already in the pre-investigation stage with geophysical measurements. This study utilizes ground penetrating radar (GPR) data, seismic refraction data and the data from geological mapping aggregated during the first stage of the West Metro project, more specifically from two of its station areas (Keilaniemi and Otaniemi). The GPR and seismic refraction surveys are cost-effective ways to investigate the ground and the bedrock. Both methods are based on detecting waves – seismic and electromagnetic, respectively – on the surface after they have been transmitted and have travelled through the ground.</p> <p>In this study the West Metro geophysical data was re-examined with new methods to improve the analysis, specifically, the detection of the weak zones. Tomographic velocity models were produced from the seismic data. The processing of the GPR data was done so that especially the bedrock structures would be interpretable. It was noticed in the early stage of this study that the available refraction data was not necessarily suitable for seismic tomography. Despite this, processing of the data with new methods did produce new, improved results.</p> <p>From all the weak zones that were mapped in this study, eight were located close to the reviewed geophysical survey lines. From those eight, 75 % were detected with geophysical methods. Also, other possible structures of the bedrock were discovered with geophysical methods but were not detected during the geological mapping. Anomalies were detected in both the seismic tomography and the GPR results. These anomalies could be interpreted as weak zones. However, without reference data, the interpretation of the source of the GPR reflections and the seismic velocity deviations can not be confirmed.</p> <p>The most important conclusion of this study is that by using geophysical measurements it is possible to detect weak zones, and that such measurements should be used more in rock construction projects for bedrock assessments. The exact purpose for the use of geophysical methods should be taken into account already when planning the geophysical surveys to ensure best possible data for the purpose.</p>			
Keywords Geophysics, ground penetrating radar, GPR, seismic refraction, engineering geology, fault zones, weak zones, rock construction			
Where deposited			
Additional information			

Sisällys

1. JOHDANTO.....	3
2. TUTKIMUSALUE JA TAUSTA	6
3. MENETELMÄT	10
3.1 Maatutkaluotaus	10
3.1.1 Teoreettinen tausta	10
3.1.2 Menetelmän hyödyntäminen käytännössä.....	12
3.2 Seisminen taittumisloutaus.....	14
3.2.1 Teoreettinen tausta	14
3.2.2 Menetelmän hyödyntäminen käytännössä.....	18
4. AINEISTO.....	21
4.1 Maatutkaluotaus	21
4.1.1 Maatutkaluotausaineiston alkuperäinen käsittely.....	23
4.1.2 Maatutkaluotauksen alkuperäiset tulokset	24
4.2 Seisminen taittumisloutaus.....	24
4.2.1 Seismisen aineiston alkuperäinen käsittely.....	26
4.2.2 Seismiikan alkuperäiset tulokset	27
4.3 Kallionäyttekairaukset	28
4.4 Kalliopintamalli.....	30
4.5 Geologinen kartoitus.....	31
5. TULOKSET	34
5.1 Maatutkaluotaus	34
5.1.1 Aineiston uudelleen käsittely	34
5.1.2 Aineiston uudelleen käsittelyn tulokset	36
5.2 Seisminen taittumisloutaus.....	46
5.2.1 Aineiston uudelleen käsittely	46
5.2.2 Aineiston uudelleen käsittelyn tulokset	50
6. TULOSTEN TARKASTELU.....	61
6.1 Alkuperäisten tulosten vertailu tausta-aineistoon.....	61
6.2 Uudelleen käsiteltyjen tulosten vertailu tausta-aineistoon	71
6.3 Keskustelu.....	82
6.3.1 Tutkimuksen haasteet	82
6.3.2 Tutkimuksen onnistumiset ja yleiset havainnot	84
6.3.3 Tutkimustulosten vertailu kirjallisuuteen	89
6.3.3 Suosituksia geofysiikan aineistojen tehokkaampaan käyttöön	91
7. JOHTOPÄÄTÖKSET	94
8. KIITOKSET	95
VIITTELUETTELO.....	96
LIITTEET.....	97

1. JOHDANTO

Kalliorakennusprojekteissa ennakkoon tehtäviä kallio- ja maaperätutkimuksia hyödynnetään suunnittelutyön alkuvaiheessa (Tammenmaa et al. 2008, Tarvainen ja Sipola 2007). Kallion rakenteilla ja ennen kaikkea heikkousvyöhykkeillä on merkittävä vaikutus kalliorakennusprojekteissa esimerkiksi tunnelin sijaintia, kustannuksia ja ympäristövaikutuksia arvioitaessa (Pajunen et al. 2007). Kallion rakenteita voidaan selvittää geofysiikan menetelmillä. Geofysiikan mittausten suurimpia etuja ovat muun muassa maastotutkimusten kustannusten alhaisuus ja niiden maankamaraa vahingoittamaton menetelmä (Turunen 1993). Kalliorakennusprojekteissa seismiset taittumislouotukset ja maatulkuotukset ovat geofysiikan menetelmistä yleisimmin käytettyjä. Niitä käytetään kalliopinnan ja heikkousvyöhykkeiden havaitsemiseen erilaisissa kalliorakennuskohteissa, kuten kaivosten ja tunneleiden linjausten sijainnin suunnittelussa, turvallisuuden parantamiseen sekä erilaisissa rakosysteemiselvityksissä pilaantuneilla maa-alueilla ja ydinjätteiden loppusijoituskohteissa (mm. Seol et al. 2001, Leihnman et al. 2008, Markovaara-Koivisto et al. 2014, Baek et al. 2017, Huotari ja Wennerström 2017, Molron et al. 2020). Geofysiikan menetelmien lisäksi kalliorakenteita tutkitaan kallionäytekairausten avulla.

Eri geofysiikan menetelmät mahdollistavat kohtalaisen yksinkertaisia keinoja mallintaa kattava kuva kallioperän rakenteista, raoista ja heikkousvyöhykkeistä (Leihnman et al. 2008). Suomessa myös Geologian tutkimuskeskus (GTK) on tehnyt selvityksen geofysiikan menetelmien mahdollisuuksista ja esteistä kalliorakennuskohteissa (Huotari ja Wennerström 2017). Suunnittelun alkuvaiheessa tehtyjen tulkintojen arvioimisesta löytyy jonkin verran tietoa kirjallisuudesta (Elminen et al. 2012). Kaikkineen kirjallisuudesta löytyy kuitenkin niukasti tutkimustietoa siitä, missä määrin geofysiikan menetelmiä on tulkintojen lähtötietoina käytetty ja kuinka luotettavia geofysikaalisten esitutkimusten perusteella tehtävät tulkinnat kalliorakenteista todellisuudessa ovat.

Geofysiikan mittausten pohjalta tehtäviin tulkintoihin vaikuttaa moni asia esimerkiksi mittausten toteutus, aineiston käsittely ja valitut parametrit. Tämän takia geofysiikan menetelmillä ei välttämättä päästä tarkkoihin arvioihin rakojen ja heikkousvyöhykkeiden sijainneista. Käytännön työssä on havaittu, että esitietojen perusteella tehdyissä

tulkinnoissa voi olla epätarkkuuksia useita kymmeniä metrejä (alan asiantuntijoiden kommentti) ja näillä epätarkkuuksilla voi olla merkittäviä vaikutuksia kalliorakennusprojektien edistymiselle. Tämä tutkimus perustuu olettamukseen, että testaamalla geofysiikan aineistojen uudenlaisia käsittelymenetelmiä aineistoista saadaan kalliorakenteita tulkittua tarkemmin. Päämääränä on löytää keinoja geofysiikan aineistojen tehokkaampaan ja luotettavampaan käyttöön kalliorakennusprojektien esitutkimus- ja suunnitteluvaiheessa.

Tässä työssä tutkitaan tapaustutkimuksena Länsimetron aineistoja. Esitutkimuksia liittyen Länsimetron suunnitteluun ja rakentamiseen tehtiin useassa otteessa ennen rakentamisen aloitusta. Alueella suoritettiin seismisiä taittumisloutauksia ja maatutkaloutauksia vuonna 2007. Rakentamisen aikana, tunnelien louhintojen edetessä suoritettiin geologisia kartoituksia. Geologisten kartoitusten yhteydessä kartoitettiin myös heikkousvyöhykkeiden sijainnit. Tämän tutkimuksen tarkoitus on analysoida, kuinka geofysiikan aineistoja on aiemmin hyödynnetty kallioperän heikkousvyöhykkeiden ja rakenteiden tulkinnassa. Erityisesti tarkoituksena on geofysiikan aineistoja ja geologisia kartoituksia vertailemalla selvittää esitutkimusten perusteella tehtyjen tulkintojen tarkkuus sekä mahdollisiin virheellisiin tulkintoihin johtaneet syyt. Kaikkineen tavoitteena on kehittää analyysiprosessia hyödyllisemmäksi ja luotettavammaksi kalliorakennusprojektien tarpeisiin. Tämän vuoksi alkuperäiset geofysiikan raaka-aineistot käsiteltiin uudelleen pyrkien parantamaan niiden pohjalta tehtävää tulkintaa. Taittumisloutausaineistosta tuotettiin seismisiä tomografisia inversiomalleja. Länsimetron seismiselle aineistolle tämän kaltainen prosessointi tehtiin ensimmäistä kertaa ja maatutka-aineiston uudelleen käsittely tehtiin niin, että nimenomaan rakenteita päästään tulkitsemaan paremmin.

Tässä työssä kuvataan aluksi tutkimusalueen yleispiirteitä ja alueen aiempia tutkimuksia. Tämän jälkeen esitellään seismisen taittumisloutaus- ja maatutkaloutaus menetelmien peruseriaatteet. Tutkimuksen aineisto on Länsimetro Oy:n omistamaa aineistoa ja sen sisältö esitellään menetelmäosion jälkeen. Aineiston kuvauksen yhteydessä kuvataan myös alkuperäinen geofysiikan aineiston käsittely ja tulokset. Aineiston kuvauksen jälkeen esitetään sen uudelleen käsittelyn menetelmät, vaiheet ja tulokset. Tulosten jälkeen sekä alkuperäisaineistoja että uudelleen käsiteltyjä aineistoja tarkastellaan

referenssiaineiston kanssa. Tulosten tarkastelun viimeisessä osassa, keskusteluosiossa, kuvataan tutkimuksen haasteita, onnistumisia, vertaillaan tämän tutkimuksen tuloksia kirjallisuuteen ja lopuksi tehdään suosituksia geofysiikan mittausten tehokkaampaan käyttöön kalliorakennusprojekteissa. Työn lopussa on esitettyä johtopäätökset.

Tässä tutkimuksessa havaittiin, että eri geofysiikan menetelmiä ristiin vertaamalla kallion sisäisiä rakenteita, kuten heikkousvyöhykkeitä voidaan havaita. Tarkkaa heikkousvyöhykkeen laajuutta ei kuitenkaan saada tässä tutkimuksessa käytössä olevalla aineistolla määriteltyä tämän tutkimuksen ympäristössä. Maatutkaluotaus tulosten avulla kalliopinnan sijainti saatiin arvioitua kohtalaisella tarkkuudella. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin, että vaaka tai lähes vaaka-asentoiset heikkousvyöhykkeet havaitaan paremmin. Tämän tutkimuksen havaintojen perusteella, tässä tutkimuksessa käytettäviä geofysiikan aineistoja ja alkuperäisiä tuloksia ei kovin suuressa määrin oltu hyödynnetty kallioperän rikkonaisuusarvioinneissa ja heikkousvyöhyketulkinnoissa, joten esiselvitysten perusteella tehtyjen tulkintojen epätarkkuus ja siihen johtaneet seikat jäivät hieman epäselväksi. Näin ollen paranneltua analyysiprosessia ei saatu täysin muodostettua ja geofysiikan menetelmien hyödyntämiseen jäi kehitettävää. Mikäli geofysiikan aineistot saataisiin laajemmin tehokkaampaan käyttöön kalliorakennusprojekteissa, voisi vaikutus kalliorakennusprojekteissa olla merkittävä. Mikäli luotettavammilla geofysiikan tutkimuksilla päästään kiinni kallioperän heikkousvyöhykkeisiin tarkemmin, voitaisiin kalliimpien menetelmien käyttöä vähentää ja esitutkimuksista saataisiin näin kustannustehokkaampia.

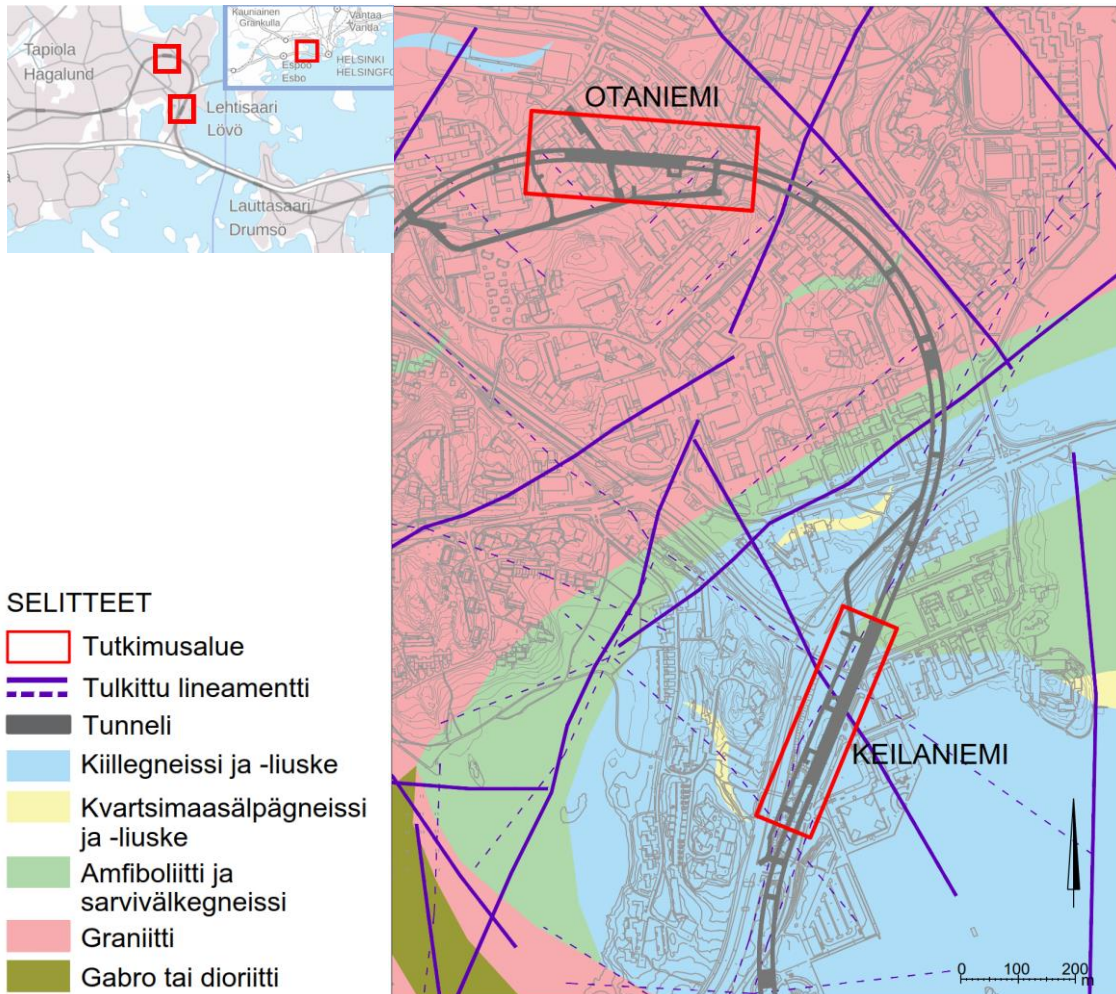
2. TUTKIMUSALUE JA TAUSTA

Tutkimusalue sijaitsee pääkaupunkiseudulla Etelä-Suomessa, jossa Länsimetron ensimmäisessä rakentamisvaiheessa rakennettiin 13,9 km pituiset metrotunnelit Ruoholahdesta Matinkylään (Länsimetro Oy 2008). Geologisesti alue kuuluu Svekofennisen orogonian aikana syntyneeseen Etelä-Suomen granitoidivyöhykkeeseen. Etelä-Suomen granitoidivyöhyke on noin 150 kilometriä leveä vyöhyke, joka kulkee halki Etelä-Suomen. Länsimetron alueella se on koillis-lounassuuntainen. Granitoidivyöhyke on syntynyt ja kehittynyt monivaiheisen prosessin tuloksena, kun Svekofennisen orogonian varhaisemmassa vaiheessa syntyneet hauraat rakenteet kiinnittyivät tiiviisti toisiinsa metamorfisten reaktioiden ja sulamisen vaikutuksesta. Sen tektonista kehitystä voidaan luonnehtia vinopuristusten aiheuttamilla rakenteilla, kun samanaikaisesti paikallisesti toisaalla muodostui puristusrakenteita ja toisaalla vetorakenteita. Pajunen et al. (2007) mukaan Länsimetron alueen kallioperässä on havaintojen mukaan nähtävissä kaikki Svekofennisen kallioperän litologiset ja rakenteelliset piirteet. Osa alueen liikuntosaumoista on pysytellyt aktiivisina, vaikka orogonian päävaiheet ovatkin hiipuneet jo 1,8 miljardia vuotta sitten (Pajunen et al. 2007).

Tässä tutkimuksessa perehdytään Länsimetron kahden metroaseman, Otaniemen ja Keilaniemen, alueiden kallioperään (pohja-aineisto esitelty kappaleessa 4.). Geofysiikan aineistoja tämän tutkimuksen käyttöön oli saatavilla vain metroasemien läheisyydestä, joten tutkimusalueet rajautuivat sen mukaan. Länsimetron alueen kallioperää on tutkittu useassa eri vaiheessa (Pajunen et al. 2007, Ikävalko et al. 2007, Ikävalko ja Mattila 2009a, 2009b). Vuonna 2007 Geologian tutkimuskeskus (GTK) teki kaksiosaisen kallioperäselvityksen Länsimetron linjauksen alueelta. Pohja-aineistona käytettiin laajasti erilaisia aineistoja kuten: kartoitushavainnot, maa- ja kallioperäkartoja, lentogeofysikaalista aineistoa, maanmittauslaitoksen korkeusmallia ja kohteellisia geofysikaalisia aineistoja vuosilta 1974, 1998 ja 2000 (Pajunen et al. 2007, Ikävalko et al. 2007). GTK:n kaksiosaisessa kallioperäselvityksessä keskityttiin kalliorakentamisen kannalta oleellisiin heikkousrakenteisiin ja ongelma-alueisiin. GTK:n kaksiosaisen kallioperäselvityksen jälkeen Länsimetron kalliorakentamiseen vaikuttavien tekijöiden selvitystä jatkettiin geofysikaalisten mittausten ja kallionäytekairausten avulla. Vuonna 2007 ja 2008 alueella suoritettiin maatutka- ja seismisiä taittumisloutausmittauksia ja

vuosina 2008–2009 tehtiin kallionäytekairauksia. GTK laati Länsimetro Oy:lle vuonna 2009 päivityksen alueen kallioperästä ja sen rikkonaisuudesta. Päivityksessä huomioitiin uusien kallioperätutkimusten tulokset, tutkimusreikien videotutkimukset, sekä maastossa tehtyjen geofysiikan mittausten tulokset (Ikävalko ja Mattila 2009a, 2009b). Selvityksessä tarkennettiin muun muassa aiemmin määritettyjä ongelma-alueita ja pyrittiin selvittämään geologisten lineamenttien suuntia. Kairareikävideointien perusteella todettiin, että osa rikkonaisista alueista muodostuivat joko tiheästä pystyrakoilusta tai vahvasta vaakarakoilusta (Ikävalko ja Mattila 2009a, 2009b). Myöhemmin vuonna 2010 selvitystä tarkennettiin edelleen kallionäytekairaustulosten avulla ja alueesta muodostettiin myös heikkousvyöhyketulkinnat (Ikävalko ja Westerlund 2010).

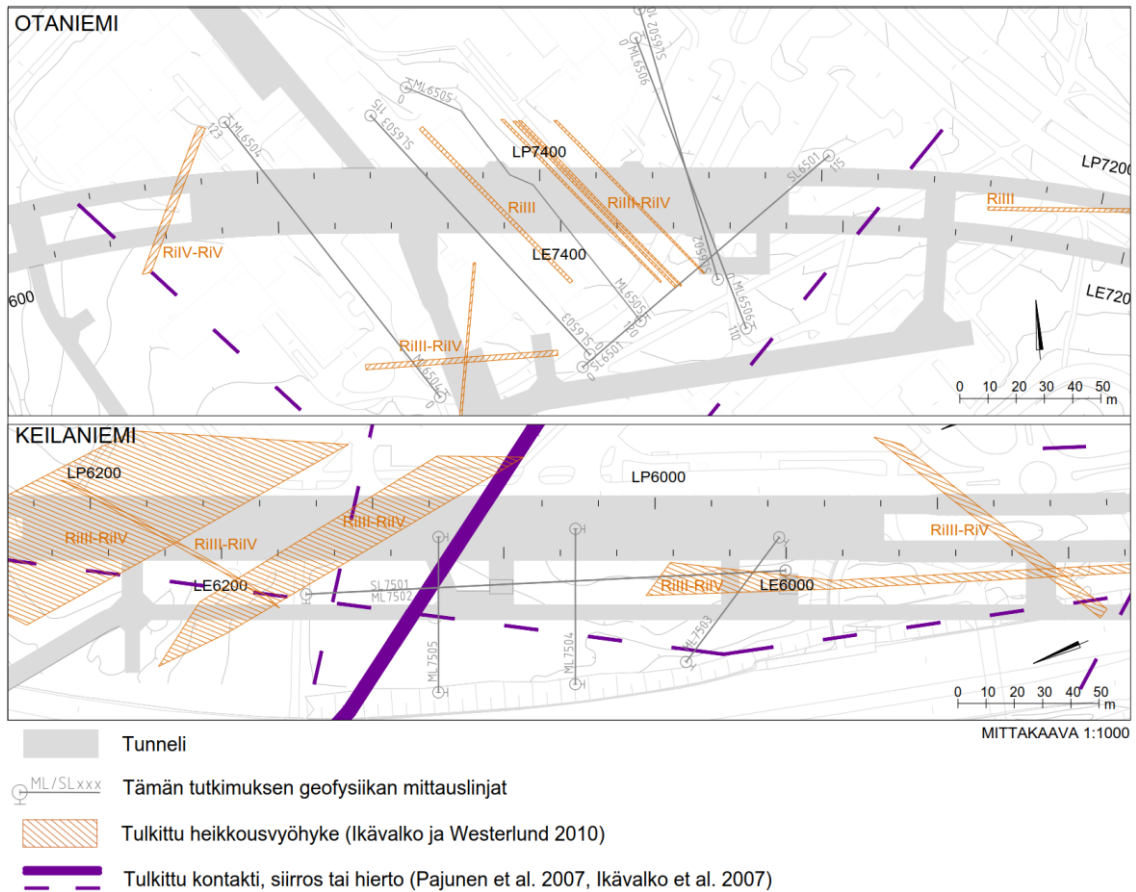
Kuvassa 1 on esitetty tutkimusalueiden sijainnit ja alueen kallioperää. Punaiset suorakulmiot toimivat tässä tutkimuksessa esitettävien muiden karttojen aluerajauksina. GTK:n selvityksen (Ikävalko ja Mattila 2009a, 2009b) mukaan Otaniemen ja Keilaniemen alueen kallioperässä esiintyy kahdenlaista pääkivilajia, joiden kontakti on havaittavissa Kuvassa 1. Kontaktin pohjoispuolella esiintyy melko harvarakoisia graniitteja, joiden liuskeisuusaste on kohtalaisen voimakas ja jotka ovat ulkoasultaan muuttuneet gneissimäiseksi. Paikoin graniitti on massarakenteisempaa. Paikoin esiintyy pegmatiittimäisiä erkaumia. Otaniemen aseman alueella kalliolaatua luonnehditaan yleisesti melko hyväksi (Ikävalko ja Westerlund 2010). Aseman läheisyydessä pääkivilajina esiintyy massarakenteinen graniitti, eikä gneissi- ja liuskeosueita juuri esiinny. Aiempien tutkimusten ja Länsimetron suunnitelmissa esitetyn tiedon mukaan Otaniemessä tunnelin kohdalla on irtomaa-aineista kallion päällä suurelta osin 2–4 metriä, mutta paikoitellen 5–10 metriä. Kontaktin eteläpuolella liuskeisuus kasvaa ja pääkivilajina esiintyvät gneissit ja kiilteet (Kuva 1). Keilaniemen aseman alueella esiintyy pääosin kiillegneissia ja -liusketta, joiden liuskeisuusaste on voimakas (Ikävalko ja Westerlund 2010). Alueen kallioperässä on havaittavissa kaakko-luodesuuntaisia lineamenttejä. Tätä tukee useammasta kallionäytekairauksesta tehty havainto (Ikävalko ja Westerlund 2010). Aiempien tutkimusten ja Länsimetron suunnitelmissa esitetyn tiedon mukaan Keilaniemessä tunnelin kohdalla on irtomaa-ainesta kallion päällä 2–6,5 metriä.



Kuva 1 Tutkimusalueiden sijainnit ja alueenkallioperä. Tulkitut lineamentit ja kivilajit kallioperäselvityksen mukaan (Pajunen et al. 2007, Ikävalko et al. 2007). Taustakartat luotu avoimesta aineistosta © Maanmittauslaitos.

Tarkennetussa kallioperäselvityksessä (Ikävalko ja Westerlund 2010) esitettiin Länsimetron linjaukselle osuvat heikkousvyöhykkeet ja niiden Ri-luokat (Kuva 2). Ri-luokat kuvaavat kalliionrikkonaisuuden rakennetyyppejä (Korhonen 1974, Palménin 1999 mukaan). Lisäksi Kuvassa 2 on esitetty GTK:n kaksiosaisen kallioperäselvityksen tulokset geologisista lineamenteista, kuten kivilajikontakteista, hierroista ja siirroksista. Otaniemen aseman läheisyydessä on alkuperäisen kallioperäselvityksen mukaan kaksi lineamenttia, jotka eivät ole yhteneviä tarkennetun kallioperäselvityksen yhteydessä tehdyn heikkousvyöhyketulkinnan kanssa (Kuva 2). Myös Keilaniemen aseman poikki on tulkittu alkuperäisen kallioperäselvityksen mukaan menevä lineamentti, mutta kuten Otaniemessäkin, tarkennetun kallioperäselvityksen mukaan tulkittu lineamentti ja heikkousvyöhyketulkinta eivät ole yhden mukaisia. Lineamenttien läheisyydessä

tehdyissä kallionäyttekairauksissa ei havaittu merkittäviä heikkousvyöhykkeitä (Ikävalko ja Westerlund 2010), mikä on mahdollisesti vaikuttanut siihen, että tulkitut lineamentit on jätetty heikkousvyöhyketulkinnassa huomioimatta.



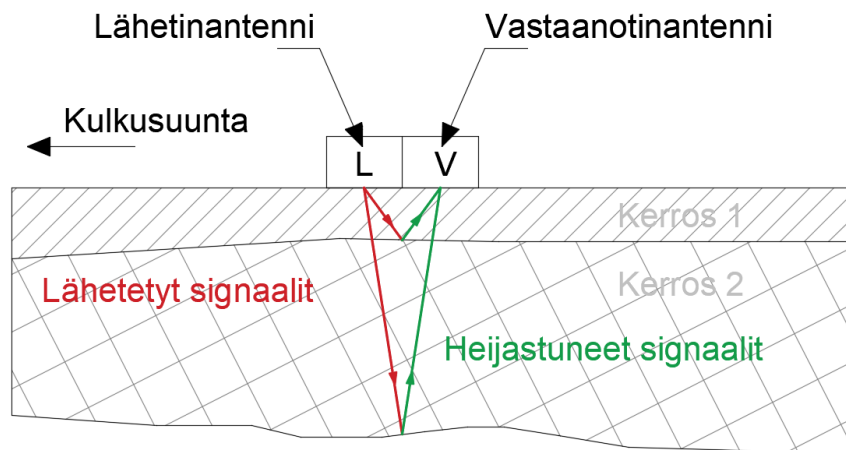
Kuva 2 GTK:n kaksiosaisessa kallioperäselvityksessä ja tarkennetussa kallioperäselvityksessä esitetyt tulkitut rakenteet.

3. MENETELMÄT

3.1 Maatutkaluotaus

3.1.1 Teoreettinen tausta

Maatutkaluotaus on sähkömagneettinen menetelmä, jossa käytetään korkea taajuisia (10–4000 MHz) radioaaltoja (Milsom 2010). Menetelmä perustuu sähköisiltä ominaisuuksiltaan erilaisten kohteiden pinnoilta tapahtuvaan aaltojen heijastumiseen ja maankamarassa kulkeneiden aaltojen kulkuajojen sekä amplitudien mittaamiseen. Maatutkaluotaimen lähetinantenni lähettää signaalin maankamaraan ja vastaanotinantenni tallentaa signaalin kulkuajan ja amplitudin, jonka perusteella maankamaraa ja sen rajapintoja voidaan tarkastella (Kuva 3).



Kuva 3 Havainnekuva maatutkaluotauksen peruseriaatteesta. Lähetinantennista lähetetyt signaalit punaisella ja vastaanotintessa havaittavat heijastuneet signaalit vihreällä.

Maatutkaluotauksessa tehdään oletus, että väliaine ei ole magneettista ja että maatutkasignaalien heijastumiseen, dispersioon ja vaimenemiseen vaikuttaa siten pelkästään materiaalien sähköiset ominaisuudet, erityisesti suhteellinen permittiivisyys (dielektrisyys). Suhteellinen permittiivisyys määrittää aineen kyvyn välittää sähkökenttää (Milsom 2010). Selvittämällä aallon nopeus väliaineessa, voidaan heijastusten aikaeroista laskea aallon kulkemamatka. Kun tunnetaan aallon maankamarassa kulkema matka,

voidaan niiden avulla määrittää väliainekerrosten paksuudet (Peltoniemi 1988). Koska menetelmässä oletetaan, että materiaalien magneettisuus voidaan jättää huomiotta, sähkömagneettisen aallon nopeus (V) väliaineessa voidaan laskea kaavalla (1), jossa c on valon nopeus tyhjiössä ja ϵ_r on suhteellinen permittiivisyys.

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

Kun maatutkasignaali kohtaa suhteellisen permittiivisyyden muutoksia osa signaalista heijastuu. Materiaalien suhteellisten permittiivisyys erojen kontrastit vaikuttavat siihen kuinka eri materiaalien rajapintoja voidaan havaita. Heijastuskerroin kuvaa rajapinnasta heijastuneen aallon amplitudia suhteessa rajapintaan saapuvan aallon amplitudiin ja se määrytyy useimmilla geologisilla materiaaleilla lähes kokonaan vesipitoisuuden vaihteluiden mukaan (Milsom 2010). Yleistäen heijastuskerroin saadaan laskettua seuraavalla kaavalla (2), jossa RC on heijastuskerroin (eng. reflection coefficient), ϵ_{r1} ja ϵ_{r2} ovat rajapinnan yläpuolisen ja alapuolisen kerroksen suhteellisia permittiivisyyksiä ja V_1 ja V_2 näiden kerrosten nopeuksia (Milsom 2010). Onnistunut maatutkaluotaus vaatii yleensä, että heijastuskerroin on suurempi kuin 0,01 ja että kohteen lateraalinen jatkuvuus on vähintään kymmenesosa sen syvyydestä (Milsom 2010).

$$RC = \frac{(\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}})}{(\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}})} = \frac{(V_1 - V_2)}{(V_2 + V_1)} \quad (2)$$

Maatutkasignaalien kulkua maankamarassa ja heijastusten voimakkuutta säätelee myös heijastavan kohteen pinta (Milsom 2010). Sileiltä pinnoilta saadaan voimakkaimmat vasteet ja vastaavasti karheat pinnat sirottavat aallon energiaa vähentäen kohteen heijastavuutta. Lisäksi maatutkaimen lähettämä signaali (aallon amplitudit) vaimenee edetessään maankamarassa. Signaalin vaimentuminen riippuu materiaalin sähköisistä ominaisuuksista, erityisesti sähkönjohtavuudesta (Peltoniemi 1988). Mikäli materiaalilla

on korkea sähkönjohtavuus se vaimentaa signaalia merkittävästi (Milsom 2010). Savisella maaperällä aallon vaimentuminen on niin suurta, että signaali pienenee nopeasti havaittavan signaalitason alapuolelle (Milsom 2010). Maatutkan suurin käytännön rajoitus onkin tutka-aaltojen kykenemättömyys läpäistä hyvin sähköä johtavia materiaaleja kuten esimerkiksi savea tai grafiittia (Peltoniemi 1988). Korkeammat taajuudet vaimenevat nopeammin, mikä vaikuttaa syvyyssulottumaan korkeampia taajuuksia käytettäessä.

Mittauksessa käytettävä mittaustaajuus määrää mittauksen erotuskyvyn. Vertikaali erotuskyky on maatutkaluotauksessa merkitsevämpi (Reynolds 2011). Se määrää minkä kokoisia kallio- ja maaperän rakenteita on erotettavissa toisistaan (Peltoniemi 1988). Erotuskyky määräytyy aallon pituuden mukaan. Aallon pituus on jokaiselle taajuudelle ominainen. Aallon pituus (λ) saadaan laskettua nopeuden (V) ja taajuuden (f) avulla, kaavalla 3.

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (3)$$

Aallon pituus on sitä lyhyempi mitä korkeampaa taajuutta käytetään. Teoriassa vertikaalinen erotuskyky on neljäsosa aallon pituudesta (Reynolds 2011). Esimerkiksi jos oletetaan, että signaalin nopeus graniittisessa kalliassa on $0,1 \text{ m ns}^{-1}$ (Taulukko 1), on 100 MHz:n taajuuden aallon pituus 1 m. Näin ollen vertikaalinen erotuskyky on teoriassa 0,25 metriä. Vastaavalla nopeudella laskettuna 500 MHz taajuudella erotuskyvyksi saadaan teoriassa 0,05 metriä. Toisin sanoen pienempien kohteiden havaitsemiseen käytetään korkeampia taajuuksia, kun taas syvemmällä olevia kohteita voidaan havaita matalilla taajuuksilla, mikäli ne ovat riittävän isoja (Milsom 2010). Erotuskykyä pienempiä kohteita voidaan kuitenkin havaita, mikäli niiden suhteellisten permittiivisyyksien kontrasti on riittävän suuri (Milsom 2010).

3.1.2 Menetelmän hyödyntäminen käytännössä

Maatutka-aineiston heijasteet kuvaavat maankamaran rajapintoja. Kalliassa paikallinen vaihtelu voi olla huomattavaa (Peltoniemi 1988). Ehjässä kalliassa suhteellisen

permittiivisyyden vaihtelut ovat pieniä yleisimmillä kivilajeilla Suomessa (Taulukko 1). Kallion mineralogiset muutokset ja vesipitoisuuden vaihtelut kasvattavat sekä suhteellista permittiivisyyttä että sähkönjohtavuutta rako- ja ruhjevyyhykkeitä (Peltoniemi 1988). Esimerkiksi voimakkaasti rikkonaisen graniittisen kallion suhteellinen permittiivisyysarvo voisi olla kaksi kertaa suurempi kuin ehjän vastaavan (Peltoniemi 1988).

Taulukko 1. Joidenkin materiaalien, kivien ja mineraalien maatulkuutuksessa vaikuttavia fysikaalisia ominaisuuksia. Muokattu Reynoldsin (2011) ja Milsomin (2010) pohjalta.

Materiaali	Suhteellinen permittiivisyys (ϵ_r)	Nopeus (V) (mm ns ⁻¹)	Sähkönjohtavuus (σ) (mS m ⁻¹)
Ilma	1	300	0
Vesi	80–81	33	0.5
Merivesi	81–88	10	3000
Lumi	1.4–3	194–252	~0.05
Jää*	3–4	150–172	5x10 ⁻⁸
Sora*	3.5–17.5	72–160	0.007–10
Hiekka*	3–32	53–173	0.0001–10
Siltti*	2.5–30	55–190	1–100
Savi*	2–40	47–212	2–1000
Moreeni	7–34	51–113	2.5–10
Turve	57–80	33–40	<_40
Maaperä (keskiarvo)	16	75	5
Graniitti	4–8	106–120	10 ⁻³ –10 ⁻⁵
Kalkkikivi	4–15	77–122	10–100
Dolomiitti	6.8–8	106–115	
Basaltti	8	106	
Gabro	7..4	110	
Anortosiitti	7.2—8	106–112	
Maasälpä-pyrokseeniitti	7.6–8.6	102–109	
Kromiitti	11.7–12.2	86–90	
Liuskekivi	6–9	100–122	10–100
Hiekkakivi	4–7	113–150	10 ⁻³ –10 ⁻⁷
Kvartsi	4.maalis	145	1–100
Betoni	4–30	55–150	1–100
Asfaltti	3–5	134–173	

*laaja hajonta johtuu siitä, että luvuissa mukana esimerkiksi märän- ja kuivan materiaalin luvut yhdistettynä.

Lisäksi mittauksia tehtäessä on otettava huomioon, että taustakohinaa syntyy useista ei toivotuista sekä sisäisistä että ulkoista lähteistä (Milsom 2010). Maatutkaluotaustuloksiin aiheuttavat häiriöitä kaikki johteet kuten metalliputket, -aidat, -rakenteet, sähkö- ja puhelinlinjat ja rautatiekiskot (Tarvainen ja Sipola 2007). Maatutkaluotauksessa myös suora signaali antennien välillä aiheuttaa aina häiriökentän. Mikäli rajapinta on matalammalla kuin käytetty antenniväli, sitä ei saada esille (Tarvainen ja Sipola 2007). Lisäksi hankala maasto voi heikentää tulosten laatua. Antennia vedetään pitkin luotauslinjaa, jolloin epätasainen maasto ja jyrkkä topografia vaikeuttavat mittausta ja antennin kallistelu voi näkyä tuloksissa laatua heikentävästi. Linjoille sattuvia jyrkkiä kallioseinämiä, risukkoja ja isoja kiviä joudutaan usein kiertämään.

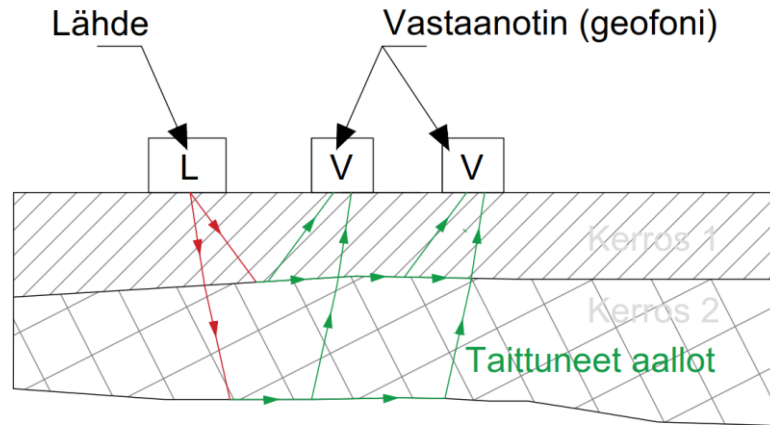
Heijastavan kohteen kaade antenniin nähden vaikuttaa vastaanotetun signaalin voimakkuuteen (Milsom 2010) ja tämä on syytä ottaa huomioon, mikäli maaperässä olevien heijastavien kohteiden kaadetta ei tunneta. On mahdollista, että tietyssä suunnassa kaatuvaa kohdetta ei havaita ollenkaan. Tutkimuksia maatutkan käytöstä heikkousvyöhykkeiden, siirrosten ja muiden rakentamisen kannalta merkittävien rakosysteemien havaitsemiseen löytyy kirjallisuudesta runsaasti (mm. Seol et al. 2001, Leihman et al. 2008, Markovaara-Koivisto et al. 2014, Molron et al. 2020). Rakojen koko sekä rakotäytteet heikkousvyöhykkeissä ja rakosysteemeissä vaikuttavat merkittävästi fluidien kulkeutumiseen kallio- ja maaperässä (mm. Markovaara-Koivisto et al. 2014, Molron et al. 2020). Erityisesti pilaantuneiden maiden alueilla ja käytetyn ydinjätteen sijoituskohteiden tutkimuksissa rakojen havaitseminen on kriittistä (Baek et al. 2017).

3.2 Seisminen taittumisloutaus

3.2.1 Teoreettinen tausta

Seismit taittumisloutauksia perustuvat maankamarassa kulkevien seismisten aaltojen kulkuajojen mittaamiseen (Milsom 2010). Seismissä taittumisloutauksissa tuotetaan esimerkiksi dynamiitin tai pudotuspainon avulla maankamarassa eteneviä kimmoaaltoja. Lähteestä etenevä seismisen aallon energia välittyy massapartikkelien liikkeen avulla ja aallot rekisteröidään vastaanottimilla, geofoneilla (Kuva 4). Geofoni on ilmaisilaite,

joka muuttaa seismisen aallon energian sähköiseksi signaaleiksi. Geofonin sisällä on magneettinen kela, johon indusoituu jännitettä (Milsom 2010).



Kuva 4 Havainnekuva seismisten taittumisloukausten peruseriaatteesta, punaisella kuvattu lähteestä lähtevät seismiset aallot ja vihreällä rajapinnoilta kriittisesti taittuneet ja vastaanottimella rekisteröitävät aallot.

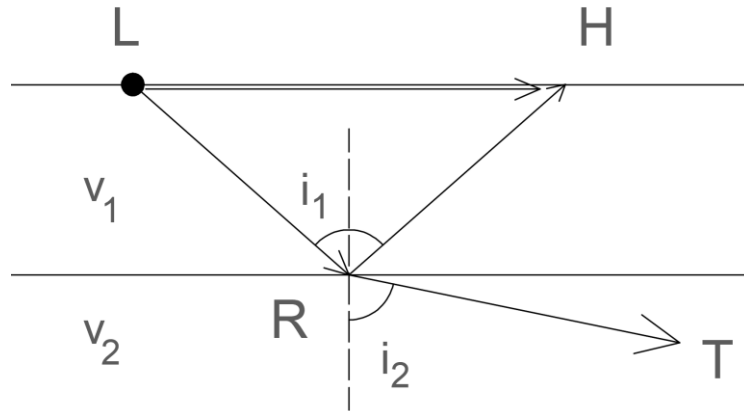
Maankamarassa esiintyviä seismisiä aaltoja ovat pinta-aallot ja runkoaallot. Runkoaaltoja ovat P- eli pitkittäisaallot, joiden liike muodostuu veto- ja puristusjännityksen aiheuttamasta siirtymästä aallon etenemissuunnassa, ja S- eli poikittäisaallot, joiden liike on kohtisuorassa aallon kulkusuuntaan nähden (Reynolds 2011). Seismisissä mittauksissa hyödynnetään erityisesti P-aaltojen kulkeutumista maankamarassa. Koska P-aaltojen nopeus (V_p) on suurin, havaitaan sen aiheuttamat signaalit ensimmäisenä. Samasta aaltolähteestä edenneet seismiset aallot saapuvat geofonille nopeusjärjestyksessä ja erillisinä signaaleina (Milsom 2010). P-aallon nopeus on suurempi kuin S-aallon (V_s), jonka nopeus on suurempi kuin pinta-aallon nopeus (V_r). P-aaltojen nopeus (V_p) saadaan laskettua kaavalla (4). Puristuskerroin (K) kuvaa nesteen kokoonpuristuvuutta, μ materiaalin leikkauskerrointa ja ρ tiheyttä (Xie 2015).

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (4)$$

Kimmovakiot kasvavat useimmilla aineilla tiheyden kasvaessa, jonka vuoksi tiheillä materiaaleilla on usein korkeat nopeudet. Seisminen nopeus rapautuneessa kalliassa on alhaisempi kuin ehjässä, koska rapautuminen lisää huokoisuutta (Milsom 2010). Maankamara on heterogeeninen eli koostuu tiheys- ja tilavuus ominaisuuksiltaan vaihtelevista osista ja seismisissä luotauksissa oletetaan maankamaran olevan kerroksellinen siten, että seisminen nopeus kasvaa alaspäin mentäessä (Peltoniemi 1988). Materiaalien elastiset ominaisuudet vaikuttavat siihen kuinka seisminen aalto käyttäytyy. Maankamarassa kulkeva seisminen aalto heijastuu ja taittuu optiikan peruslakien mukaisesti kohdatessaan elastisilta ominaisuuksiltaan erilaisten aineiden rajapintoja. Aallon taittuminen tapahtuu Snelliuksen lain (5) mukaisesti eri materiaalien rajapinnoilta, jossa i_1 ja i_2 kuvaavat rajapinnalle saapuvan ja lähtevän aallon kulmia. V_1 ja V_2 kuvaavat näiden eri kerrosten nopeuksia (Kuva 5):

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (5)$$

Kerroksellisessa maassa, aallon lähdepisteestä (L) säteisesti etenevä aalto voidaan rekisteröidä havaintopisteessä (H) joko suorana säteenä (LH) tai rajapinnasta (R) heijastuneena säteenä (LRH) (Kuva 5). Heijastumisen lisäksi osa aallosta taittuu ja muuttaa suuntaansa (T) jatkaen matkaa väliaineeseen 2 (LRT). Alemman kerroksen nopeuden (V_2) ollessa suurempi kuin ylemmän (V_1) aalto taittuu rajapintaa kohti jatkaen matkaa väliaineeseen 2 (LRT). Seismisiä taittumisloukausaineistoja tarkasteltaessa oletetaan, että alemman kerroksen nopeus on suurempi kuin sen yläpuolella olevan (Milsom 2010). Mikäli näin ei ole kerrosta ei voida havaita taittumisloukauksilla.



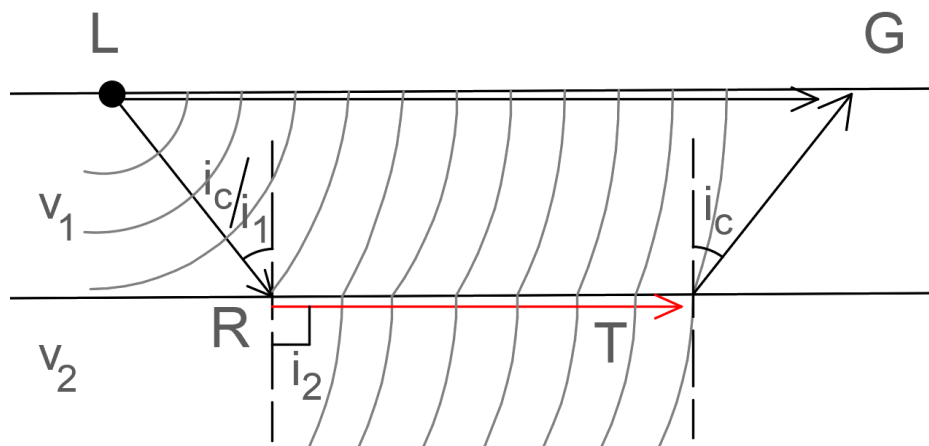
Kuva 5 Seismisen aallon käyttäytyminen kerroksellisessa heterogeenisessä maassa. Kuvassa seismisen aallon lähde (L), havaintopiste (H), rajapinta (R), taittuva aalto (T), eri kerrosten nopeuden (v_1 ja v_2) sekä saapuvan ja lähtevän aallon kulmat (i_1 ja i_2).

Rajapintaan saapuvan seismisen aallon tulokulman i_1 kasvaessa syntyy tilanne, jossa i_2 saavuttaa arvon 90° ja näin aalto etenee pitkin rajapintaa nopeudella v_2 (Peltoniemi 1988). Tulokulman i_1 arvo, jolloin yllä mainittu tilanne saavutetaan, kutsutaan kriittiseksi tulokulmaksi (i_c), jonka arvo saadaan laskettua kaavalla (6):

$$i_c = \text{Arcsin} \frac{v_1}{v_2} \quad (6)$$

Taittumisluku hyödyntää nimenomaan rajapinnoille kriittisellä tulokulmalla saapuneita aaltoja, jotka matkaavat rajapintoja pitkin. Mikäli aalto saapuu rajapinnalle i_c kulmaa suuremmassa kulmassa, aalto ei taitu vaan aallon kaikki energia heijastuu (Milsom 2010). Rajapintaa pitkin kriittisesti taittuvan aallon kulku on esitetty Kuvassa 6. Pisteestä L lähtenyt aalto saavuttaa rajapinnan (R) kriittisessä tulokulmassa (i_c) jolloin taittunut aalto (T) on yhdensuuntainen rajapinnan kanssa, toisin sanoen lähtee matkaamaan rajapintaa pitkin. Taittuneen aallon muodostama uusi aaltorintama (RT) etenee rajapinnassa alemman kerroksen (v_2) nopeudella. Osa aallon energiasta palaa pintaan (TG) tasomaisena uutena aaltorintamana lähtien rajapinnalta samassa kulmassa kuin se alun perin rajapinnalle saapui eli kriittisessä kulmassa i_c (Milsom 2010).

Lähtöpisteestä L havaintopisteeseen G nopein reitti on LRTG (Kuva 6). Palatessaan rajapinnalta pinnalle, havaintopisteeseen G, aaltorintama kulkee ylemmän kerroksen läpi nopeudella V_1 matkattuaan rajapintaa pitkin alemman kerroksen nopeudella V_2 . Kaikkineen tietyllä etäisyydellä lähdepisteestä L rajapintaa pitkin matkannut aaltorintama on havaintopisteessä G suoraa aaltoa nopeampi pidemmästä matkapolusta huolimatta (Milsom 2010). Kulku aika reitille LRTG saadaan, kun otetaan summa reitin LRTG kaikkien osien (LR+RT+TG) kulkuajoista kyseisillä nopeuksilla.



Kuva 6 Seismisen aallon eteneminen ja käyttäytyminen rajapinnalla. Aaltorintamat harmaalla ja kriittisesti taittuneen aaltorintaman säde punaisella. Lyhenteet selitety tekstissä.

3.2.2 Menetelmän hyödyntäminen käytännössä

Kuten Kuvan 6 avulla todettiin, tietyllä etäisyydellä lähteestä rajapinnan suuntaisesti kulkenut, rajapintaa pitkin kriittisesti taittunut aalto saapuu havaintopaikkojen geofoneille ensimmäisenä. Nämä ensimmäiseksi saapuneiden aaltojen signaalit saadaan poimittua tuloksista ja laskettua niiden kulkuajojen avulla rajapintojen syvyydet sekä seismiset nopeudet eri kerroksissa. Tuloksia voidaan täten hyödyntää maankamaran sisäisten rakenteiden tarkastelussa. Kallioperän seismiset nopeudet ovat keskimäärin kolme kertaa suurempia kuin irtomaalla (Taulukko 2). Sedimenttikivissä P-aallon nopeus on yleensä yli 2500 ms^{-1} , ja sen päällä on usein rapautunut kerros, jossa nopeus on alle 2000 ms^{-1} . Nopeus kuitenkin kasvaa syvyyden kasvaessa ja pintakallion rapautumisen

vähenevän myötä (Milsom 2010). Suomessa yleisimpien kivilajien graniitin ja gneissin seismisen P-aallon nopeus vaihtelee välillä 3500–7600 ms⁻¹, riippuen kirjallisuuslähteestä (Taulukko 2). Taulukon 2 kirjallisuuslähteiden 1 on koottu kokemukseräisesti GTK:n tutkijoiden toimesta (Lehtimäki 2005), ja kirjallisuuslähteet 2 ja 3 ovat ulkomaalaisia kirjallisuuslähteitä.

Taulukko 2. P-aallon nopeuksia (Vp) maankamarassa eri kirjallisuuslähteiden mukaan. (1 = Lehtimäki 2005, 2 = Kahraman 2007, 3 = Reynolds 2011)

Materiaali	Seismisen P-aallon nopeus eri lähteiden mukaan (ms ⁻¹)		
	1	2	3
Savi	1000–1700		1000–2500
Hiekka	1200–1800		200–2000*
Sora	1300–2000		400–2300
Hiekkamoreeni	1500–2300		
Kova moreeni	1700–2800		
Graniitti	4600–5700	3870–7430	4600–6200
Gneissi	4600–5700	4010–5980	3500–7600
Kiilleliuske		3420–5280	2000–4100
Amfiboliitti	5500–6000	3730–5610	
Gabro	5700–6700		6400–7000
Migmatiitti		5500–7560	
Basalti		4380–6150	5500–6500
Andesiitti		5120–6460	
Kalkkikivi		5110–7650	1700–7000**
Kvartsiitti		5150–7170	
Marmori		3400–7910	3780–7000
Hiekkakivi	2800–3500	4670–6250	1400–4500
Serpentiniitti		5460–7170	5500–6500

* mukana eri tyyppistä hiekkaa kuten löyhä ja kuiva **mukana kova ja pehmeä

On todettu, että seisminen nopeus irtomaassa kasvaa, kun vesipitoisuus kasvaa. Vastaavasti on todettu, että rapautuneessa tai ruhjoutuneessa kalliassa seisminen nopeus pienenee (Peltoniemi 1988), tätä tukee myös GTK:n tutkijoiden kokemukseräisesti tehdyt havainnot kallion rikkonaisuuden vaikutuksesta seismisen P-aallon nopeuteen (kirjallisuuslähteiden 1, Taulukko 3). Taulukkoon 3 on koottu kallion rikkonaisuuden

vaikutus P-aallon seismiseen nopeuteen. Kokemusperäisesti koottujen tietojen mukaan hieman rikkonaista kalliota voi olla hankala havaita tutkimalla ainoastaan P-aallon nopeutta, koska P-aallon nopeus rikkonaisessa, hieman rikkonaisessa ja ehjässä kalliassa vaihtelee osin samoissa nopeusväleissä (Taulukot 2 ja 3).

Taulukko 3. Kallion rikkonaisuuden vaikutus seismisen P-aallon nopeuteen eri kirjallisuuslähteiden mukaan (1 = Lehtimäki 2007, 2 = Tammenmaa et al. 2008).

Seismisen P-aallon nopeus (ms ⁻¹)	Rikkonaisuustulkinta eri lähteiden mukaan	
	1	2
>5000		Ehjä kallio
4500–5000	Vähän rikkonainen	Kalliorakoja on. Määrä riippuu kivilajista
4000–4500	Rikkonainen	Hiukan rikkonainen kallio
3500–4000	Erittäin rikkonainen	Rikkonainen ja hyvin rikkonainen kallio, poimuttunut tai osaksi rapautunut
3000–3500	Täysin ruhjoutunut	
2500–3500		Voimakkaasti poimuttunut ja rapautunut kallio
2700–4000	Rapakallio	
<2500		Kokonaan rikkoutunut kallio

Taittumislouotuksilla voidaan kartoittaa matalan syvyyden rajapintoja esimerkiksi kalliopinnan syvyyttä ja irtomaapeitteen laatua (Peltoniemi 1988). Seismisissä taittumislouotuksissa geofoniväli määrää mittauksen erotuskyvyn. Geofoniväliä ohuemman ensimmäisen kerroksen paksuus- ja nopeustulkinnat ovat hyvin epävarmoja (Peltoniemi 1988). Rajapintojen syvyydet voidaan laskea mitattujen seismisten aaltojen kulkuajojen, eli ensimmäisenä geofonille saapuneiden aaltojen kulkuajojen avulla. Koska oletetaan, että nopeus kasvaa alaspäin mentäessä, rajapinnoilta pinnalle saapuvat taittuneet aallot tulevat syvemmiltä rajapinnoilta silloin kun etäisyys lähdepisteeseen kasvaa (Milsom 2010). Geofonin kela on useimmiten asennettu siten, että se on vapaa värähtelemään pystysuunnassa ja näin se on mahdollisimman herkkä havaitsemaan rajapinnoilta saapuvat taittuneet aallot (Milsom 2010).

4. AINEISTO

Länsimetron alueen kallioperää on tutkittu monessa eri vaiheessa ja geofysikaalisia tutkimuksia, etenkin seismisiä taittumislouotuksia, on tehty Länsimetron alueella useaan otteeseen (Pajunen et al. 2007, Ikävalko et al. 2007). Tässä tutkimuksessa keskitytään Länsimetron ensimmäisen rakentamisvaiheen aikaisiin geofysiikan aineistoihin niiltä osin kun raaka-aineistoa oli saatavilla. Suomen Malmi Oy (SMOY) teki vuonna 2007 maatutkaluotuksia ja seismisiä taittumislouotuksia Länsimetron suunnitelmalinjaukselta. Aiemmin tehtyjen ja myöhemmin vuonna 2008 täydennettyjen geofysiikaalisten mittausten raaka-aineisto ei ollut käytössä tätä tutkimusta varten. Tässä tutkimuksessa käytetyt Länsimetron ensimmäisen vaiheen geofysiikan maastotutkimukset ja aineistojen alkuperäisen käsittelyn sekä aineiston pohjalta tehdyn tulkinnan on tehnyt Suomen Malmi Oy vuonna 2008 (yritys ei ole enää toiminnassa). Tämän työn kaikki aineisto, pois lukien geofysiikaalisen raaka-aineisto, joka saatiin Espoon kaupungilta, on kerätty Länsimetron projektipankin arkistoista, Kalliosuunnittelu Oy Rockplan Ltd:n avulla. Aineiston omistajalta, Länsimetro Oy:ltä saatiin lupa tämän tutkimuksen aihealueen aineiston käyttöön.

4.1 Maatutkaluotaus

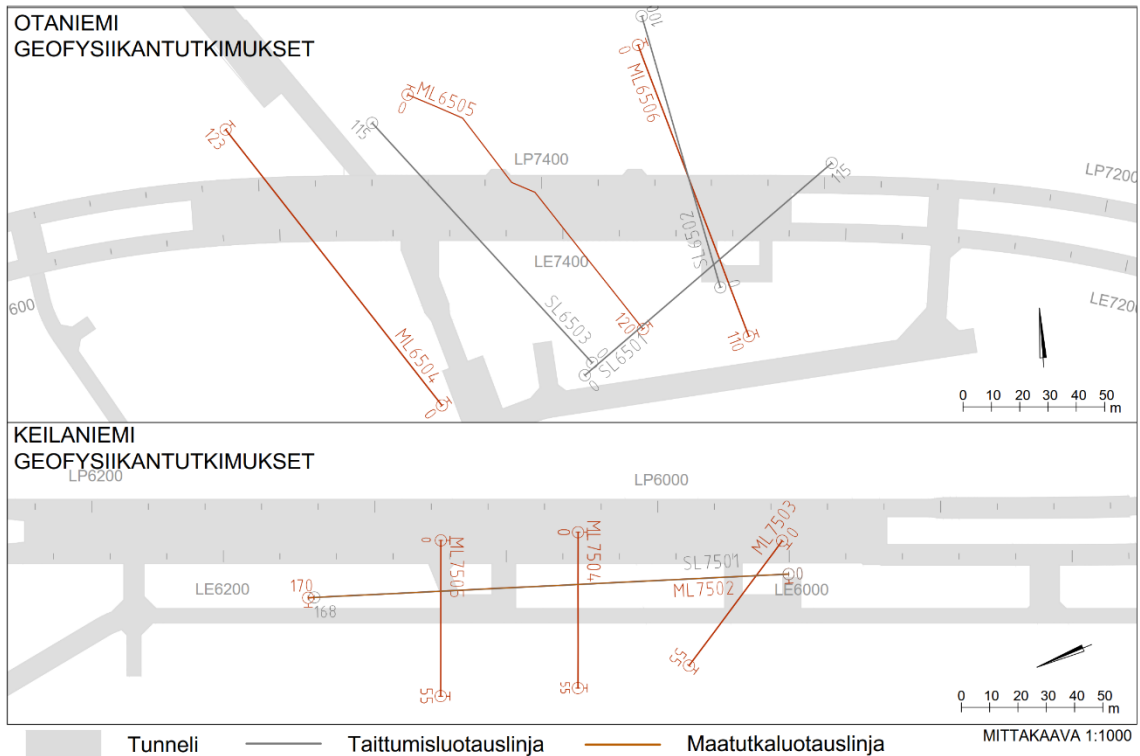
Käytettävä mittausaineisto on kerätty lokakuussa 2007. Maatutkaluotausmittaukset suoritettiin MALÅ:n RAMAC/GPRTM-laitteistolla, jonka antennit ovat suojattuja, joten ne soveltuvat hyvin kaupunkikäyttöön (MALÅ 2022). Kaikkineen mittauksissa käytettiin kohteesta riippuen 50, 100 ja 250 MHz:n taajuudella toimivia antennejä (Taulukko 4). MALÅ:n 250 MHz:n taajuudella toimivassa mittalaitteessa lähetin ja vastaanotin ovat 0,36 metrin päässä toisistaan. 100 MHz:n laitteessa ne ovat 0,5 metrin ja 50 MHz:n laitteessa kahden metrin päässä toisistaan (Taulukko 4). Mittausten otanta oli 0,2–0,9 ns riippuen käytetystä taajuudesta. Mittausten alueella esiintyi erilaisia häiriöitä kuten putkia, johtoja ja aitoja. Häiriöt on merkattu alkuperäisten tulosten yhteyteen (Liite 1). Mittausten tarkoituksena oli selvittää kalliopinnan sijaintia ja kallion sisäistä rakennetta (Tarvainen ja Sipola 2007). Keilaniemen aseman alueella maatutkalinjoja oli neljä ja Otaniemessä kolme. Mittausaineistoa saatiin tämän tutkimuksen alueelta yhteensä 692 metriä, Keilaniemestä 335 metriä ja Otaniemestä 357 metriä (Taulukko 4, Kuva 7).

Osa linjoista saatiin mitattua yhtenä mittauksena, mutta osa jouduttiin erilaisten esteiden vuoksi jakamaan osiin (Liite 1).

Taulukko 4 Keilaniemen ja Otaniemen metroasemien läheisyydessä kerättyjen maatutkaluotausaineistojen mittausparametrejä.

Linja	Linjan pituus (m)	Sijainti	Mittaus- taajuus (MHz)	Lähettimen ja vastaanottimen etäisyys (m)	Matkan mittausmenetelmä	Mittausten otanta (ns)
ML6504	146,6	Otaniemi	100	0,5	Matkapyörä	0,19
	149,6		250	0,36	Matkapyörä	0,3
ML6505	90,5	Otaniemi	50	2	Lankamitta	0,5
	99,2		100	0,5	Matkapyörä	0,19
	110,9		250	0,36	Matkapyörä	0,3
ML6506	73,9	Otaniemi	50	2	Lankamitta	0,5
	88,2		100	0,5	Matkapyörä	0,19
	89,7		250	0,36	Matkapyörä	0,3
ML7502	141,2	Keilaniemi	100	0,5	Matkapyörä	0,99
	166,6		250	0,36	Matkapyörä	0,42
ML7503	43,8	Keilaniemi	100	0,5	Matkapyörä	0,99
	57,5		250	0,36	Matkapyörä	0,42
ML7504	52,3	Keilaniemi	100	0,5	Matkapyörä	0,99
	52,9		250	0,36	Matkapyörä	0,42
ML7505	49,2	Keilaniemi	100	0,5	Matkapyörä	0,99
	55,4		250	0,36	Matkapyörä	0,42

Otaniemessä kaikki maatutkamittauslinjat kulkevat poikittain suhteessa tunneliin ja risteävät tunnelilinjauksen kanssa vinosti (Kuva 7). Keilaniemessä mittauslinja ML7502 kulkee lähes tunnelin suuntaisesti, keskimäärin 8 metrin päässä tunnelilinjauksesta ja maatutkalinjat ML7504–ML7505 kulkevat poikittain, lähes kohtisuoraan tunnelilinjaukseen nähden. Linja ML7503 kulkee vinosti suhteessa tunnelilinjaukseen ja linjaan ML7502.



Kuva 7 Maatutkaluotausten sijainnit Otaniemessä ja Keilaniemessä. Aluerajaus on esitetty Kuvassa 1.

4.1.1 Maatutkaluotausaineiston alkuperäinen käsittely

Aineisto käsiteltiin alun perin ReflexW-ohjelmalla. Aineiston käsittelyssä käytettiin erilaisia suodattimia pyrkimyksenä saada rajapinnat näkymään mahdollisimman hyvin. Suodattimien avulla aineistolle tehtiin alla mainitut käsittelyt (Tarvainen ja Sipola 2007):

- Aikariippuvaisen vastaanottimen aiheuttaman häiriön poisto (eng. DC shift)
- Nollahetken siirto oikealle kohdalle
- Häiriötaajuuksien poisto (FK suodatin)
- Keskiarvoistetun rekisteröinnin poisto suoran aallon vaimentamiseksi (eng. Background removal)
- Korkeiden ja matalien häiriötaajuuksien poisto (eng. Bandpass frequency filter)
- Matalataajuuksien häiriöiden poisto (eng. Dewow filter)
- Amplitudien korjaaminen (eng. Energy decay filter)

4.1.2 Maatutkaluotauksen alkuperäiset tulokset

Aineiston käsittelyn jälkeen aineiston pohjalta tehtiin tulkinta kalliopinnan sijainnista. Lisäksi pyrittiin paikantamaan kalliiossa mahdollisesti olevia rakoja ja rikkonaisuusvyöhykkeitä (Tarvainen ja Sipola 2007). Kaikkien linjojen alkuperäiset tulokset on esitetty Liitteessä 1. Otaniemessä, Linja ML6504 on noin 150 metriä pitkä ja mittausprofiiliin on tulkittu kalliokontakti noin 116 metrin matkalle. Maatutkaprofiiliin on tulkittu myös kallion sisäisiä rakenteita (Liite 1). Linja ML6505 on 100 metriä pitkä ja se mitattiin kahdessa osassa. Maatutkaprofiiliin on tulkittu todennäköiset sivilisaation häiriöt, kallion sisäiset rakenteet ja kalliopinta koko profiilin matkalta. Linjan alussa kallion sijainti on ollut epävarmaa, joten siitä on tehty kaksi eri tulkintaa (Liite 1). Linja ML6506 on 110 metriä pitkä ja mittaukset tehtiin kahdessa osassa. Mittausprofiilin ensimmäisestä osasta tulkittiin kalliopinta sekä mahdollinen kallion sisäinen rakenne, mutta toisesta osasta ei tehty tulkintoja (Liite 1).

Keilaniemessä linja ML7502 on 170 metriä pitkä ja maatutkaprofiilista tulkittiin kalliopinnan sijainti, kallion sisäisiä rakenteita ja sivilisaation häiriöitä. Lisäksi samalta linjaukselta tehdyn seismisen luotauksen (SL7501) perusteella tulkittu kalliopinnan sijainti lisättiin linjan ML7502 tuloksiin. Kalliopinnat olivat osin tulkittu samoin, mutta niissä oli myös eroavaisuuksia (Liite 1). Lisäksi eri taajuudella tehtyjen mittausten tuloksissa oli tulkinnoissa eroja. Kallion sisäisiä rakenteita linjalla ML7502 tulkittiin olevan useampi. Linja ML7503 on 55 metriä pitkä ja maatutkaluotauksen mittausprofiilista tulkittiin kalliopinnan lisäksi kaksi kallion sisäistä rakennetta, joista toisen tulkittiin olevan mahdollisia irtokiviä tai rikkonaista kalliopintaa. Toinen sisäinen rakenne tulkittiin mahdolliseksi ruhjeeksi tai voimakkaaksi kivilajikontaktiksi (Liite 1). Linja ML7504 on 55 m pitkä ja linjan alkupäästä ei tehty tulkintaa. Kalliopinnan sijainti tulkittiin metrivilille 24–51. Kalliopinnan kanssa saman suuntaiset heijastumat metrivilillä 29–50 tulkittiin joko pintakallion heijastumiksi tai raoksi. Myös linja ML7505 on 55 metriä pitkä ja kalliopinnan lisäksi tuloksista tulkittiin kaksi aluetta, jossa on todennäköisesti vettä johtavaa rakoilua.

4.2 Seisminen taittumisloutaus

Kallioperän rakennetta selvitetiin maatutkaluotausten lisäksi seismisillä taittumisloutauksilla. Seismisiä taittumisloutauksia suoritettiin Otaniemessä lokakuussa

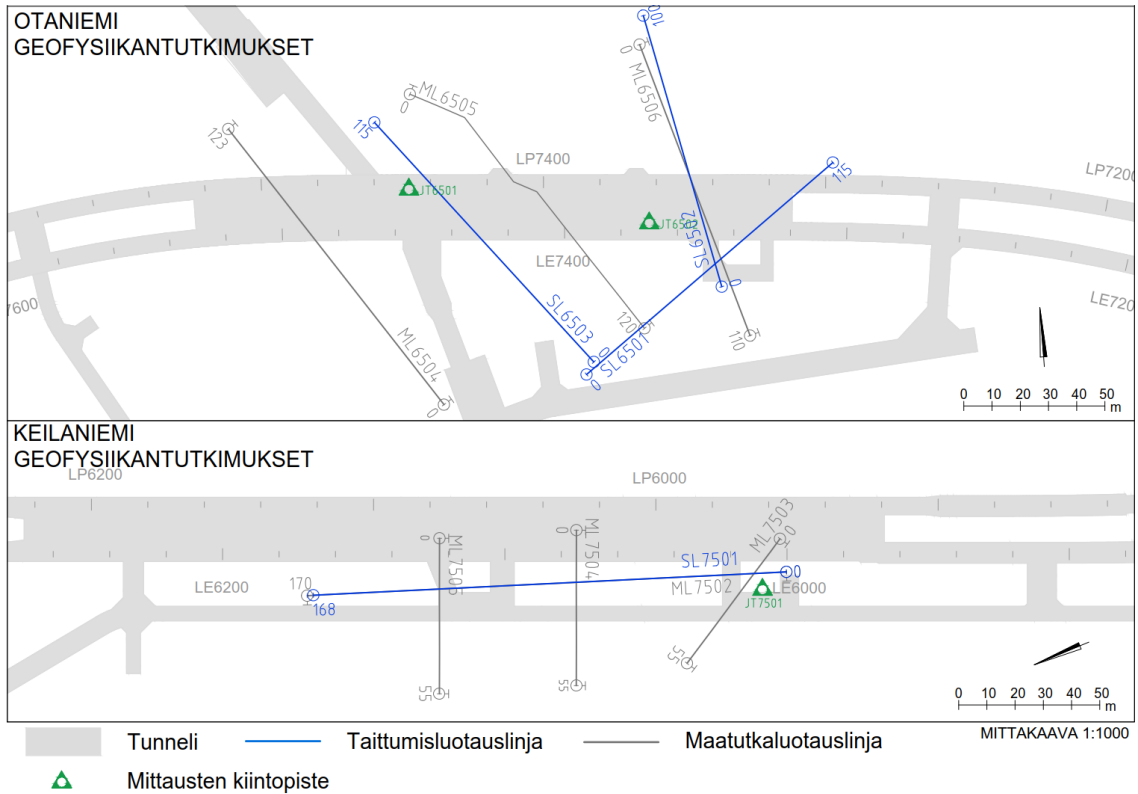
2007 ja Keilaniemessä syyskuussa 2007 (Tammenmaa et al. 2008). Mittaukset suoritettiin 24-kanavaisella ABEM MK-6- rekisteröintilaitteistolla ja luotauksissa käytettiin viiden metrin geofoniväliä (Taulukko 5). Seismisten aaltojen lähteenä käytettiin Otaniemessä pudotuspainoa ja Keilaniemen alueella dynamiittia (Tammenmaa et al. 2008). Sekä lähteiden määrä että lähteiden etäisyys toisiinsa vaihteli mittauslinjoilla (Taulukko 5). Tässä tutkimuksessa käytettävää raaka-aineistoa kerättiin Otaniemestä kolmelta linjalta, yhteensä 330 metrin matkalta ja Keilaniemestä yhdeltä linjalta yhteensä 168 metriä (Taulukko 5, Kuva 8).

Taulukko 5. Keilaniemen ja Otaniemen metroasemien läheisyydessä mitatut ja tässä tutkimuksessa käytetyt seismiset taittumislouotusaineistot (Plv 5800–6300 ja 7200–7600)

Linjan nimi	Sijainti	Linjan pituus (m)	Seismisenaallon lähde	Lähteiden määrä (eri sijainnit, kpl)	Lähteiden etäisyys (m)	Geofoniväli (m)
SL6501	Otaniemi	115	Pudotuspaino	12	2–40	5
SL6502	Otaniemi	110	Pudotuspaino	7	12,5–25	5
SL6503	Otaniemi	115	Pudotuspaino	7	12,5–30	5
SL7501	Keilaniemi	168	Räjähde	13	7,5–40 *	5

*Kaksi lähettä samalla sijainnilla ja näiden välinen etäisyys (0 m) on jätetty tästä pois

Mittauslinjat paikannettiin maastoon GPS-laitteen avulla ja niiden korkeusvaihtelut mitattiin RRKM-20 hydrostaattisella letkuvaa'alla. RRKM-20-laitteiston tarkkuus on +/- 10 cm km⁻¹ ja vaaituksia suoritettiin 20 metrin välein (Tammenmaa et al. 2008). Korkeusvaaituksella saadut suhteelliset korkeudet sidottiin alueilla sijainneisiin tunnettuihin pisteisiin, Otaniemessä pisteisiin JT6501 ja JT6502, ja Keilaniemessä pisteeseen JT7501 (Kuva 8). Otaniemessä kaikki linjat kulkevat poikittain suhteessa tunneliin ja risteävät tunnelinlinjauksen kanssa vinosti (Kuva 8). Kaikki Otaniemen linjat sijaittivat johtolinjojen tai viemäreiden päällä (Tammenmaa et al. 2008). Keilaniemen taittumislouotuslinja kulkee lähes tunnelin suuntaisesti keskimäärin 8 metrin päässä tunnelinlinjauksesta.



Kuva 8 Seismisten taivutusluotauslinjojen sijainnit Otaniemessä ja Keilaniemessä. Linjojen topografia sidottu kairauksiin JT7501 (SL7501), JT6501 (SL6503) ja JT6502 (SL6501, SL6502). Aluerajaus on esitetty Kuvassa 1.

4.2.1 Seismisen aineiston alkuperäinen käsittely

Alkuperäisessä tulkinnaassa käytettiin GRM-menetelmää (eng. The Generalized Reciprocal Method) (Tammenmaa et al. 2008). GRM-menetelmässä kerrosten yläpinnoilta taivuneiden ja geofoneihin saapuneiden taivuneiden aaltojen aika-matkakuvaajasta saadaan laskettua kerrosten nopeudet, joiden avulla kerrosten paksuudet voidaan arvioida (Tammenmaa et al. 2008). GRM-menetelmän avulla saatiin laskettua kalliopinnan syvyys jokaisen geofonin kohdalla ja tämän perusteella tulokset interpoloitiin 1 metrin pistevälille (Tammenmaa et al. 2008). Kallionopeuksien ja ruhjeiden paikantamista pidettiin epäluotettavana, koska mittaustulosten kannalta ongelmia aiheuttivat linjojen sijainti täyttömailla ja pinnan alla olleet rakenteet (Tammenmaa et al. 2008).

4.2.2 Seismiikan alkuperäiset tulokset

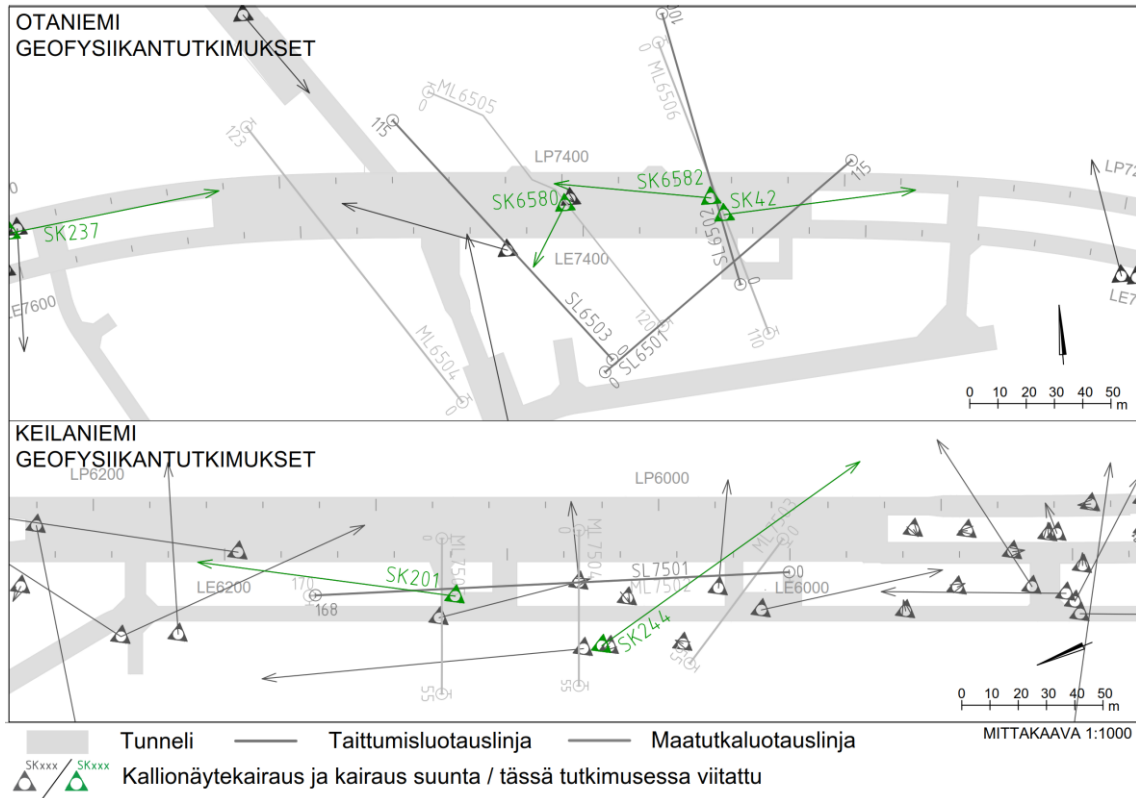
Kaikkien seismisten mittausten alkuperäiset tulokset on esitetty Liitteessä 2. Alkuperäiset tulkinnat kallion rikkonaisuudesta perustuvat Tammenmaan et al. (2008) mukaan P-aallon seismiseen nopeuteen rikkonaisessa kalliassa (kirjallisuuslähde 2, Taulukko 3). Taulukon 3 seismiset P-aallon nopeudet rikkonaisessa kalliassa on muodostettu Tammenmaan et al. mukaan kokemusperäisistä tiedoista. Taulukkoon kerätyt P-aallon nopeudet ja nopeuksia vastaava kallion rikkonaisuus on Tammenmaan et al. (2008) mukaan tyypillisiä nopeuksia Suomessa yleisille kivilajeille, kuten graniitille ja gneissille. Kokemusperäisesti on myös todettu, että maapeitteen paksuus vaikuttaa tulosten tarkkuuteen kallionpinnan syvyyden määrittämisessä (Tammenmaa et al. 2008). Kun maapeite on alle 10 metriä, virhemarginaali on +/- 1 metriä. Jos maapeite on yli 10 metriä, virhemarginaali on todettu olevan +/- 10 % (Tammenmaa et al. 2008). Tammenmaa et al. (2008) tulkitsivat ruhjeiksi sellaiset mittausprofiilin osat, joissa kallionopeus oli alhaisempi kuin 4000 ms^{-1} ja erotusaikamurtoviivaan sopimattomat linjan osat, joiden kulkuajoja ei voitu selittää topografialla.

Otaniemessä mittausraportin (Tammenmaa et al. 2008) mukaan luotettavimmat tulokset saatiin linjalta SL6501. Tammenmaa et al. (2008) totesi mittausraportissaan myös, että ohuet maakerrokset suhteessa pisteväleihin aiheuttivat tuloksiin epävarmuutta. Linja SL6501 on 115 metriä pitkä ja seismisen aallon nopeus vaihteli mittaustulosten mukaan $3500\text{--}5550 \text{ ms}^{-1}$ (Liite 2). Linjan tuloksissa yhdeksän metrin matkalla, linjan loppuosalla, seisminen nopeus oli 3500 ms^{-1} . Tammenmaan et al. (2008) esittämän mukaan tämä voidaan tulkita rikkonaiseksi kallioksi (Taulukko 3). Linja SL6502 on 100 metriä pitkä, jossa seismisen aallon nopeus kalliassa vaihteli $3350\text{--}6200 \text{ ms}^{-1}$. Mittausprofiilissa oli kaksi selkeästi alhaisemman nopeuden aluetta. Toinen niistä oli ennen linjan puoltaväliä, jossa seisminen nopeus oli 3350 ms^{-1} (Liite 2). Tammenmaa et al. (2008) tämä voidaan tulkita voimakkaasti poimuttuneeksi ja rapautuneeksi kallioksi. Toinen alhaisen nopeuden kohta oli linjan lopussa, jossa seisminen nopeus mittaustulosten mukaan oli 4500 ms^{-1} (Liite 2), mikä Tammenmaan et al. (2008) mukaan saattaa viitata hieman rikkonaiseen kallioon riippuen kivilajista. Linja SL6503 on 115 metriä pitkä ja mittaustulosten mukaan seisminen aallon nopeus ei vaihdellut linjan matkalla ollenkaan. Seisminen nopeus oli koko linjan matkalla hieman alle 6000 ms^{-1} , mikä viittaa täysin ehjään kallioon (Taulukko 3). Keilaniemessä seismisiä luotauksia tehtiin vuonna 2007

yksi (SL7501) ja mittausraportissa (Tammenmaa et al. 2008) todettiin tulosten olevan yleisesti melko hyviä. Linja SL7501 on 168 metriä pitkä, jossa alkuperäisten GRM-menetelmään perustuvien laskelmien mukaan kallionnopeus vaihteli 5000–5500 ms⁻¹ (Liite 2). Alhaisin nopeus, 5000 ms⁻¹, oli ennen linjan puoltaväliä ja Tammenmaan et al. (2008) mukaan se kuvastaa joko ehjää tai hieman rakoilevaa kalliota riippuen kivilajista (Taulukko 3).

4.3 Kallionäytekairaukset

Kallionäytekairauksia Espoossa Länsimetron alueella on tehty vuosina 2007–2012, yhteensä lähes 360 kappaletta (Westerlund 2011). Kairauksia ovat suorittaneet: Destia, Geokeskus, Geotek, Pöyry ja SMOY. Kallionäytekairaukset valokuvattiin, kairausnäytteet suunnattiin, tehtiin vesimenekkimittauksia ja tehtiin rakennusgeologiset raportit (SMOY 2008, 2009a, 2009b, Destia ja Pohjatekniikka Oy 2009). Kallionäytekairausten lisäksi osasta on tehty reikäkuvaukset, joihin Länsimetron kallioperäselvityksissä ja tulkinnoissa myös viitataan. Keilaniemen ja Otaniemen metroasemien alueella kallionäytekairauksia on tehty reilu 30 kappaletta (Kuva 9). Kallionäytekairausaineistosta kallioperäselvitykseen (Ikävalko ja Mattila 2009a, 2009b) on hyödynnetty loppuraporttien lisäksi tutkimusraporttien Excel-muotoisia taulukoita, valokuvia ja videokuvausmateriaalia. Kallionäytekairauksilla pyrittiin läpäisemään ja siten varmentamaan aiemmin tulkittuja siirroksia, kontakteja tai hiertovyöhykkeitä (Ikävalko ja Westerlund 2010).



Kuva 9 Kallionäytekairausten sijainnit suhteessa geofysiikan tutkimuslinjoihin. Vihreällä merkittynä ne kairaukset, jotka on lueteltu Taulukossa 6. Alerajaus on esitetty Kuvassa 1.

Myöhemmin tässä tutkimuksessa viitataan muutamaamaan kallionäytekairaukseen ja niistä tehtyihin heikkousvyöhykehavaintoihin. Nämä kairaukset on esitetty vihreällä Kuvassa 9 ja tarkemmat tiedot Taulukossa 6. Taulukossa 6 mainittavien kairausten heikkousvyöhykkeitä ei saatu suunnattua (SMOY 2008, 2009a, 2009b, Destia ja Pohjatekniikka Oy 2009).

Taulukko 6 Luettelo kallionäytekairauksista, joihin tässä tutkimuksessa on viitattu ja niiden heikkousvyöhyke (Hv) havainnot.

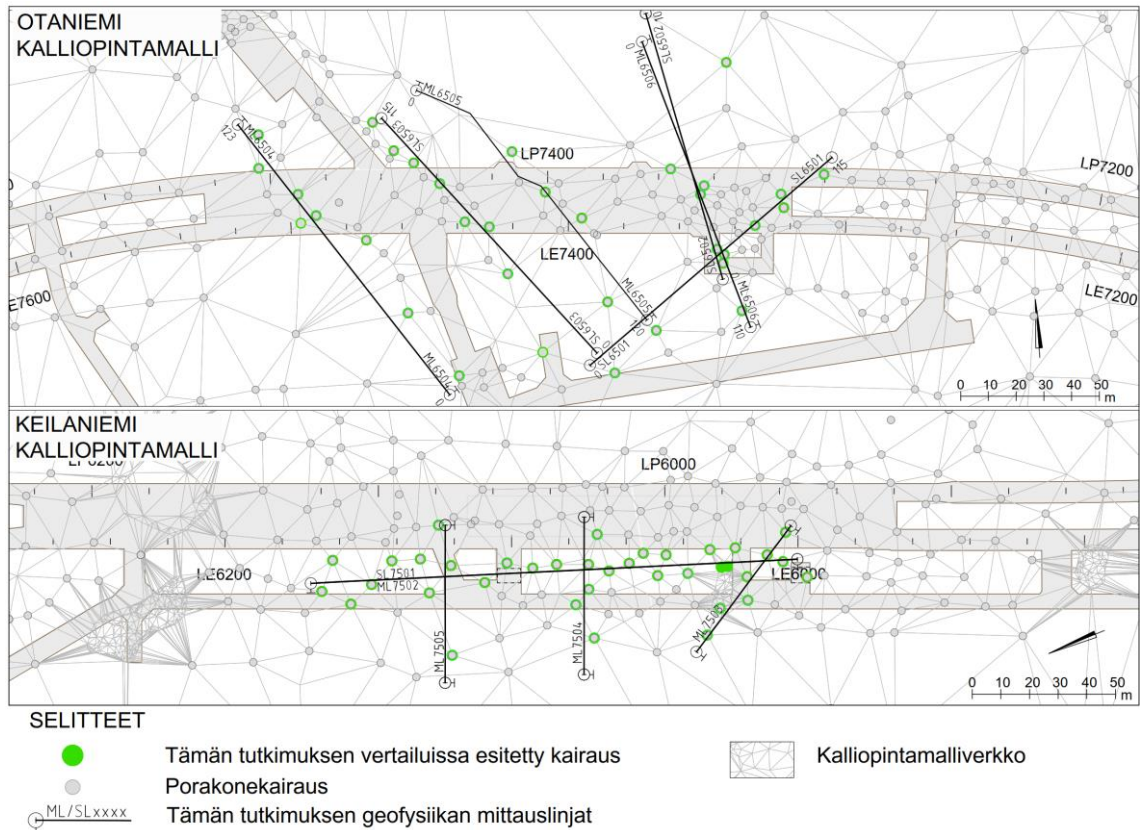
Nimi	Sijainti	Geofysiikanlinja*	Hv:n syvyys (m)	Hv:n suunta (°)	Rakojen kaade (°)	Viite (Raportti)
SK42	Otaniemi	SL6501	19,3–20,0 29,2–29,6 31,7–32,0 69,2–69,6	–	20–45	SMOY 2009a
SK6580	Otaniemi	ML6505	18,93–21,04	–	40–45	SMOY 2008
SK6582	Otaniemi	SL6502/ML6506	6,50–7,00 26,60–26,90 41,85–42,25 44,05–44,60	–	20–40	SMOY 2008
SK237	Otaniemi	ML6504	74,0–77,6	–	15–75	SMOY 2009b
SK201**	Keilaniemi	SL7501/ML7502	27,1–35,0 57,0–64,1 77,0–82,0 98,2–100,1	–	5–60	Destia ja Pohjatekniikka Oy 2009
SK244**	Keilaniemi	SL7501/ML7502	17,0–23,73 40,65–66,20 76,18–77,04 90,68–93,66 107,60–115,70	–	10–70	SMOY 2009b

*Geofysiikan linja, jonka läheisyydessä kairaus sijaitsee

**Useampia heikkousvyöhykkeiden syvyyksiä yhdistetty (kairauksessa yli 10 havaintoa)

4.4 Kalliopintamalli

Länsimetron suunnitelmakuvissa esitetty kallio-pintamalli on 3D-kolmioverkko. Kolmioverkko on muodostettu muun muassa porakonekairausten kalliohavaintojen avulla. Kuvassa 10 on esitetty kallio-pintamallia Otaniemestä ja Keilaniemestä. Kallio-pintamallissa käytetyt porakonekairaukset ovat 1–20 metrin päässä toisistaan ja maksimissaan 30 metrin päässä geofysiikan linjoista. Suurin osa käytetyistä kolmioverkon lähtötietopisteistä on alle 5 metrin päässä geofysiikan linjoista. Kuvaan on merkattu harmailla ympyröillä kaikki alueella tehdyt porakonekairaukset (Kuva 10). Porakonekairaukset, jotka on korostettu vihreällä, ovat kairauksia, joiden kallion syvyyshavainto on esitetty aineiston uudelleen käsiteltyjen tulosten tarkasteluosion kuvissa (kappale 6.2).

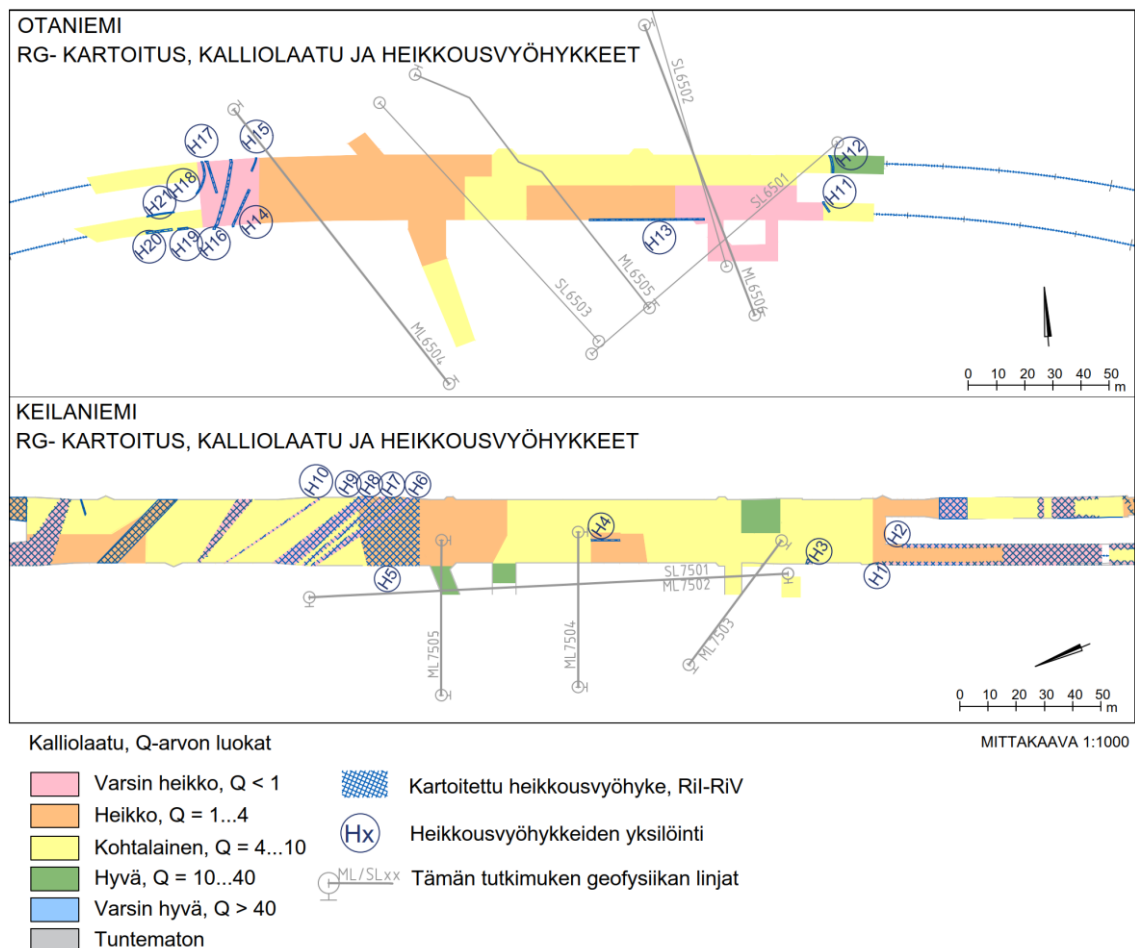


Kuva 10 Kalliopintamalli ja porakonekairausten sijainnit asemien läheisyydessä. Vihreällä korostettuna ne kairaukset, jotka on esitetty vertailukuivissa kalliopintamallin lisäksi. Auerajaus on esitetty Kuvassa 1.

4.5 Geologinen kartoitus

Geologinen kartoitus suoritettiin GTK:n geologien ja urakkaosuudesta vastaavan suunnittelukonsultin toimesta. Kartoitukset tehtiin molemmista tunneleista niiden koko matkalta pääsääntöisesti ennen turvaruiskubetonointia. Kartoitusta tehtiin mahdollisuuksien mukaan noin 3–50 metrin jaksoissa (Wennerström et al. 2018). Paikannus tunnelissa tapahtui viiden metrin välein merkattujen tunnelin paalulukemien avulla (Wennerström et al. 2018). Geologisen kartoituksen yhteydessä havainnoitiin rakennusgeologisesti (RG) oleelliset asiat, kuten kalliolaatuparametrit, ruhjeet ja heikkousvyöhykkeet. Korhosen (1974, Palménin 1999 mukaan) mukaan heikkousvyöhykkeet on jaoteltu niiden rakenteen mukaan viiteen eri luokkaan: halkeamarakenteinen (RiI), rakorakenteinen (RiII), murrosrakenteinen (RiIII), ruhjerakenteinen (RiIV) ja savirakenteinen (RiV). Kalliolaatuparametrit eli niin sanotut Q-parametrit ovat kalliorakennesuunnittelussa käytettäviä numeerisia arvoja, joiden avulla kallion laatua ja sen kalliomekaanisia ominaisuuksia arvioidaan

(Barton et al. 1974). Q-parametreissa arvioitavia asioita ovat rakoiluaste ja rakosuuntien määrä, rakopintojen karheus, rakojen rapautuneisuus-aste, rakojen kosteus sekä kallion jännitetila. Q-parametrien avulla lasketaan kullekin määrätylle alueelle kalliolaatu luokitus, numeerinen Q-arvo, jota käytetään muun muassa tunnelin lujitussuunnittelussa (Barton et al. 1974). Q-parametrien lisäksi RG-kartoituksessa arvioidaan osasten järjestäytyneisyyttä eli tekstuuria, määritetään päärakosuunnat, satunnaiset rakosuunnat, paksut rakotäytteet, vesivuodot ja muut kalliomekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät kuten kivilajikontaktit (Korhonen 1974, Palménin 1999 mukaan). RG-kartoituksen perusteella kalliolaatu Otaniemen alueella jakaantuu melko tasaisesti kohtalaiseen, heikkoon ja hyvin heikkoon kallioon (Kuva 11). Keilaniemessä kalliolaatu RG-kartoituksen perusteella on pääosin kohtalaista ja heikkoa, mutta heikkousvyöhykkeiden kohdalla ympäröivä kalliolaatu on Q-parametrien avulla arvioitu hyvin heikoksi.



Kuva 11 Kartta rakennegeologisesta kartoituksesta ja sen perusteella määritetystä kalliolaadusta, Q-arvojen mukaan. Heikkousvyöhykkeet nimikoitu ja merkattu ruuturasterilla kalliolaatuluokituksen päälle. Heikkousvyöhykkeiden havaintotiedot esitetty Taulukossa 7. Alerajaus on esitetty Kuvassa 1.

Molemmilla tutkimusalueilla tehtiin RG-kartoituksen yhteydessä useampi heikkousvyöhykehavainto. Havaintotietojen mukaan suurin osa heikkousvyöhykkeistä kuuluu murros- ja ruhjerakenteisiin heikkousvyöhykkeisiin (Taulukko 7). Valtaosa Keilaniemen ja Otaniemen kartoitetuista heikkousvyöhykkeistä ovat joko vaaka- tai lähes vaaka-asentoisia, joiden kaade on 0–10 ° tai pysty tai lähes pystyasentoisia, joiden kaade on 85–90 ° (Taulukko 7).

Taulukko 7 Tämän tutkimuksen alueilta, Keilaniemessä ja Otaniemessä tehtyjen heikkousvyöhykkeiden (Hv) havaintotiedot.

Yksilöinti numero	Alue	Hv:n leveys (m)	Kaade (°)	Kaateen suunta (°)	Ri-luokka *	Ympäröivä kalliolaatu
H1	Keilaniemi	1,1	0	200	III	Heikko
H2	Keilaniemi	1,2	0	200	IV	Heikko
H3	Keilaniemi	1	50	130	III	Kohtalainen
H4	Keilaniemi	10,3	0	200	I	Heikko
H5	Keilaniemi	18,2	0	200	I	Heikko
H6	Keilaniemi	2,1	90	167	III	Heikko/Kohtalainen
H7	Keilaniemi	1,6	90	163	III	Heikko/Kohtalainen
H8	Keilaniemi	3,8	90	165	III	Heikko/Kohtalainen
H9	Keilaniemi	1,9	90	71	III	Heikko
H10	Keilaniemi	0,6	85	169	III	Kohtalainen
H11	Otaniemi	0,5	85	148	II	Kohtalainen
H12	Otaniemi	0,5	65	334	IV	Kohtalainen
H13	Otaniemi	40,8	10	56		Heikko/Varsin heikko
H14	Otaniemi	0,7	75	31	IV	Varsin heikko
H15	Otaniemi	0,4	80	27	IV	Varsin heikko
H16	Otaniemi	0,8	75	19	IV	Varsin heikko
H17	Otaniemi	0,6	75	322	IV	Varsin heikko
H18	Otaniemi	0,6	80	347	IV	Varsin heikko
H19	Otaniemi	3,5	0	200	III	Kohtalainen
H20	Otaniemi	9,2	0	200	III	Kohtalainen
H21	Otaniemi	9,8	0	200	V	Kohtalainen

* RiI = halkeamarakenteinen, RiII = rakorakenteinen, RiIII = murrosrakenteinen, RiIV = ruhjerakenteinen, RiV = savirakenteinen

5. TULOKSET

5.1 Maatutkaluotaus

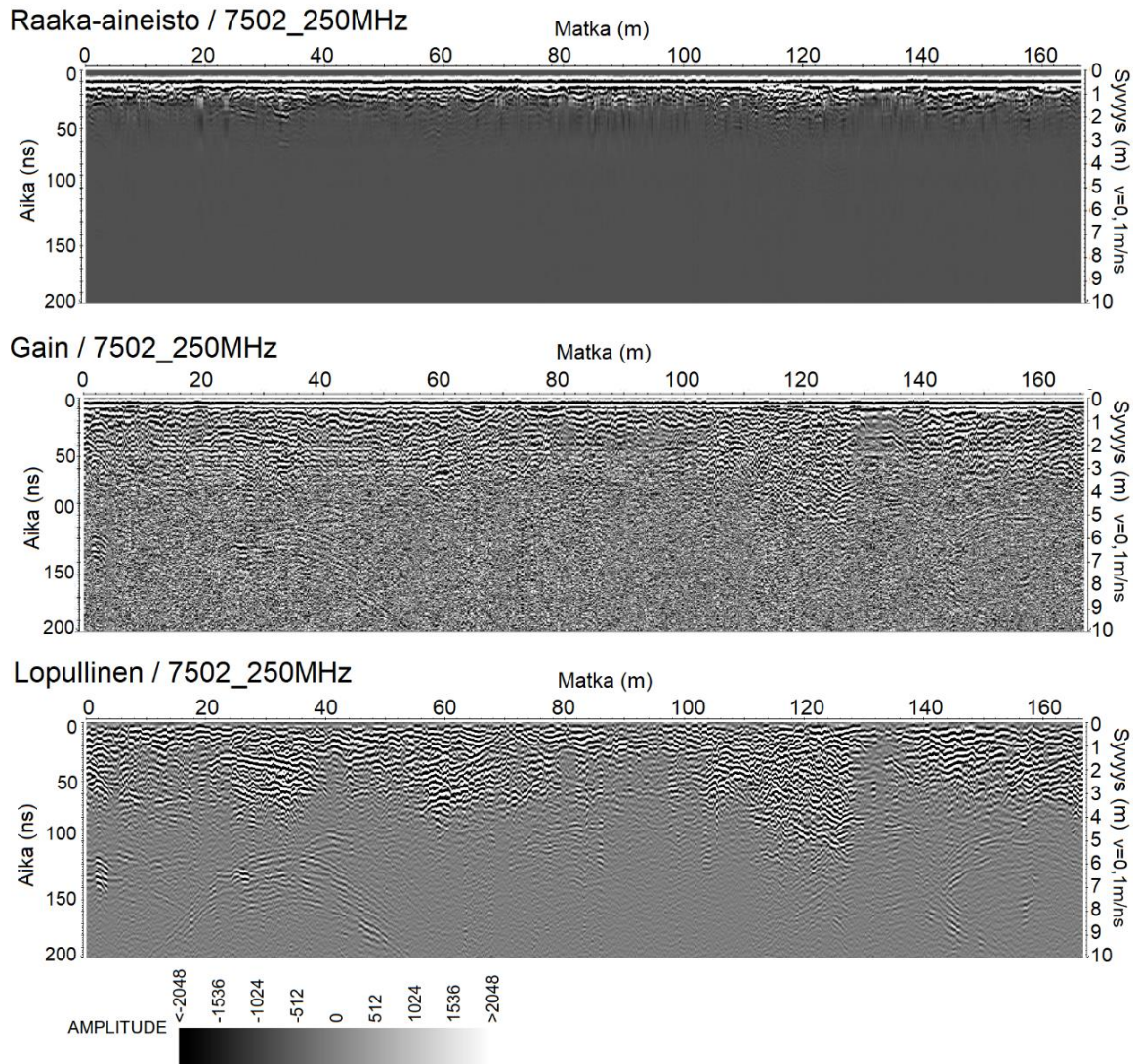
5.1.1 Aineiston uudelleen käsittely

Aineistojen uudelleen käsittely tehtiin ReflexW-ohjelmalla. Kaikilla linjoilla (ML7502-ML7505, ML6504-ML6506) käytettiin samoja käsittelyvaiheita. Parametrit kuitenkin vaihtelivat riippuen taajuudesta ja aineiston laadusta. Maatutka-aineistoa käsiteltäessä käytettiin oletusarvoista aaltojen nopeutta maankamarassa ($0,1 \text{ m ns}^{-1}$), sillä tarkempaa tietoa aallon nopeuksista ei ollut saatavilla. Aikasyvyyskonversiossa käytetty nopeus on suoraan verrannollinen rajapintojen ja rakenteiden syvyyteen. Linjojen tarkka topografia ei ollut tiedossa. Aineiston signaali-kohinasuhdetta ja visuaalista laatua pyrittiin parantamaan seuraavilla toiminnoilla:

1. Vastanottimen elektroniikasta aiheutuvan amplituditason siirtymän korjaus (eng. Subtract DC shift)
2. Vastanottimen elektroniikasta aiheutuvan matalataajuisten häiriön poisto (eng. Subtract mean "dewow")
3. Nollahetken korjaus (eng. Static correction)
4. Amplitudien vahvistus manuaalisesti (eng. Manual y gain)
5. Keskiarvoisen rekisteröinnin poisto suorien aaltojen vaimentamiseksi (eng. Subtracting average)
6. Matala- ja korkeataajuisten häiriötaajuuksien poisto (eng. Bandpass frequency filter)
7. Keskimääräinen xy-suodatin (eng. Average xy filter)
8. Fk-migraatio (eng. Fk migration, Stolt)

Maatutkalaitteisto itsessään aiheuttaa erilaisia ylimääräisiä signaaleja aineistoon ja nämä saatiin poistettua aineistosta kahdella lähes automaattisella suodatuksella (1. eng. Subtract DC shift ja 2. Subtract mean "dewow"). Staattisella korjauksella (3.) saatiin poistettua mahdollinen aikaviive aineistosta ja korjattua aineiston nollahetki. Aikaviive vaihteli linjoilla 2–10 ns ja rekisteröinnit siirrettiin määritetyn korjausarvon (poistettava aikaikkuna) verran. Gain-funktiolla (4.) vahvistettiin aallon amplitudeja. Vahvistusta

kokeiltiin eri funktioilla, mutta paras tulos saatiin vahvistamalla aallon amplitudeja ajan suhteen (y-suunta) manuaalisesti. Manuaalisesti vahvistetut amplitudit aiheuttivat aineistoon taustakohinaa, mutta samalla korjaus toi esiin todellisia heijastuksia (Kuva 12).



Kuva 12 Esimerkki aineiston käsittelyn vaikutuksista. Yläkuvassa on raaka versio 250 MHz:n taajuuden aineistosta. Keskellä on kuva aineistosta amplitudien vahvistamisen jälkeen (prosessointi vaihe 4, eng. manual y gain) ja alakuvassa on valmis, käsitelty aineisto.

Amplitudien vahvistamisen jälkeen aineiston taustakohinaa vähennettiin poistamalla keskiarvoinen signaali (5. eng. Subtracting average). Aineistolle tehtiin niin sanottu liukuva taustan poisto. Tällä suodattimella saatiin aineiston pintakerroksia selkeämmäksi poistamalla ilma-aalto ja maanpintaa pitkin matkannut suora aalto. Kaistanpäästösuodattimella (6. eng. Bandpass frequency filter) rajattiin suodattimen

läpäisevät taajuudet tietyille vaihteluvälille. Tämän suodattimen läpäisevät taajuusalueet ovat jokaiselle mittaustaajuudelle ominaiset. Esimerkiksi 100 MHz:n mittauksissa maankamarasta heijastuneet signaalit vaihtelevat oletetusti keskitaajuuden molemmilla puolilla ± 50 MHz. Taajuusalue, joka määrää mitkä taajuudet läpäisevät suodattimen mukautettiin sen mukaan. Taajuusalueiden reunat määrättiin loiviksi niin, että esimerkiksi 100 MHz:n taajuudella mitatun aineiston taajuusalueen alemmat rajat olivat 40 ja 50 MHz ja taajuusalueen ylemmät rajat 140- ja 150 MHz. Keskiarvoinen xy-suodatin (7. eng. Average xy filter) toimii sekä x-, että y-suunnassa ja sillä saatiin vaimennettua taustakohinaa molemmissa suunnissa.

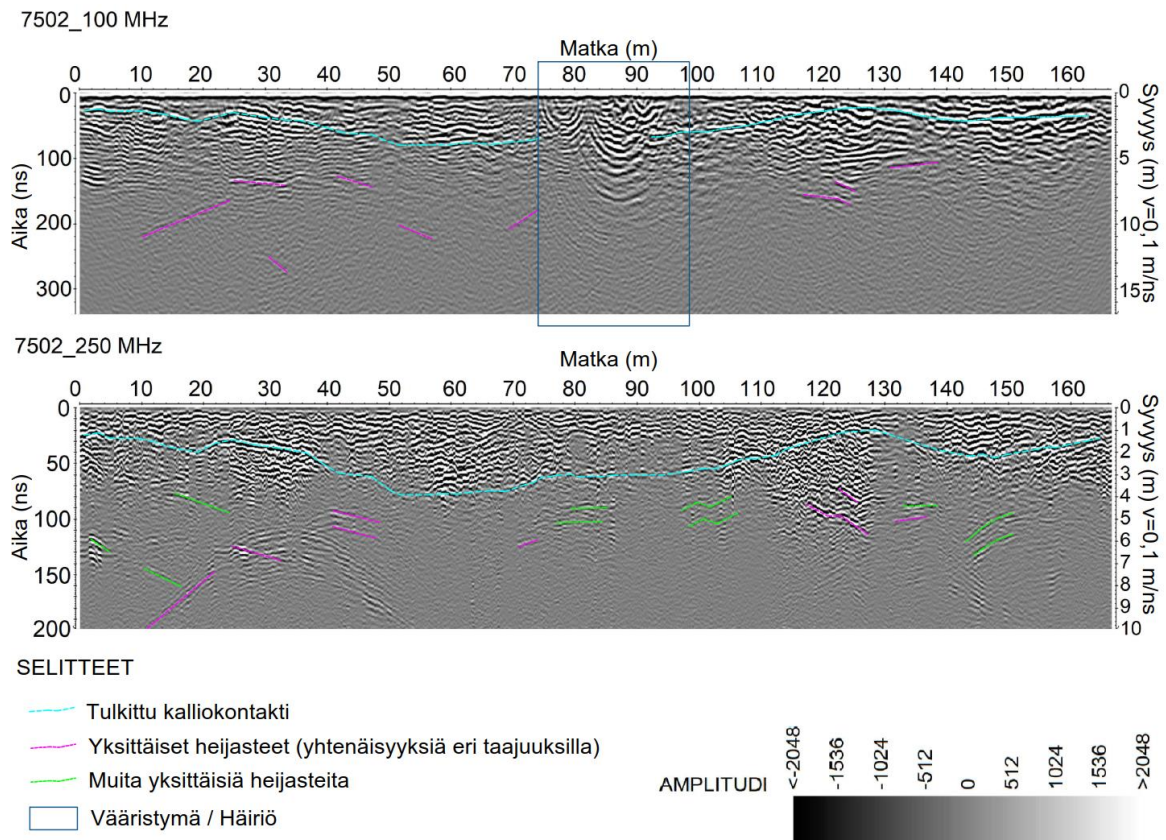
Lopuksi kaikille linjoille tehtiin migraatio (8.). Mikäli aineistossa esiintyy diffraktioita, migraatio pyrkii jäljittämään nämä lähteisiinsä. Mittausprofiilissa, joka on mitattu niin että lähetin ja vastaanotin on samassa paikassa, havaittu kalteva heijastuma ei suoraan edusta rajapintojen todellista asentoa. Migraation tarkoituksena on tuottaa kuva heijastavan rajapinnan todellisesta asennosta. Migraation toteuttamiseksi on kehitetty useita erilaisia algoritmeja. Tässä päädyttiin tekemään fk-migraatio (Stolt -migraatio) vakionopeudella $0,1 \text{ m ns}^{-1}$. Vaikka migraatio saattaa toisinaan olla yksi tärkeimmistä prosessointivaiheista, tämän tutkimuksen aineistoille ainoastaan osaan 100 MHz:n taajuudella tehtyjen mittausten tuloksiin saatiin aikaan parannuksia migraation avulla. Esimerkiksi linjan ML7502 keskelle se aiheutti häiriötä, mutta samalla se onnistui parantamaan linjan alku- ja loppupään luettavuutta (Kuva 13).

5.1.2 Aineiston uudelleen käsittelyn tulokset

Yleisesti ottaen selkeimmät ja tulkittavimmat tulokset saatiin 250 MHz:n taajuudella tehdyistä mittauksista. Maatutkaprofiileihin on tulkittu kalliokontakti vertailemalla eri taajuuksien tuloksia. Tulkittu kalliokontakti on merkattu kuviin turkoosilla. Lisäksi profiileista pyrittiin tulkitsemaan kallion sisäisiä rakenteita, paikoin samat heijastavat rajapinnat nähtiin kaikilla eri taajuuksilla ja paikoin vain osassa. Nämä heijasteet on korostettu profiileihin eri väreillä (Kuvat 13–19). On kuitenkin syytä huomioida, että sisäinen rakenne ei aina merkitse heikkousvyöhykettä. Eri taajuuksien maatutkaprofiileissa on eri syvyys mittakaava, koska taajuus vaikuttaa syvyyden ulottumaan. Esimerkiksi linjalla ML7502 100 MHz:n taajuudella heijastavia rajapintoja

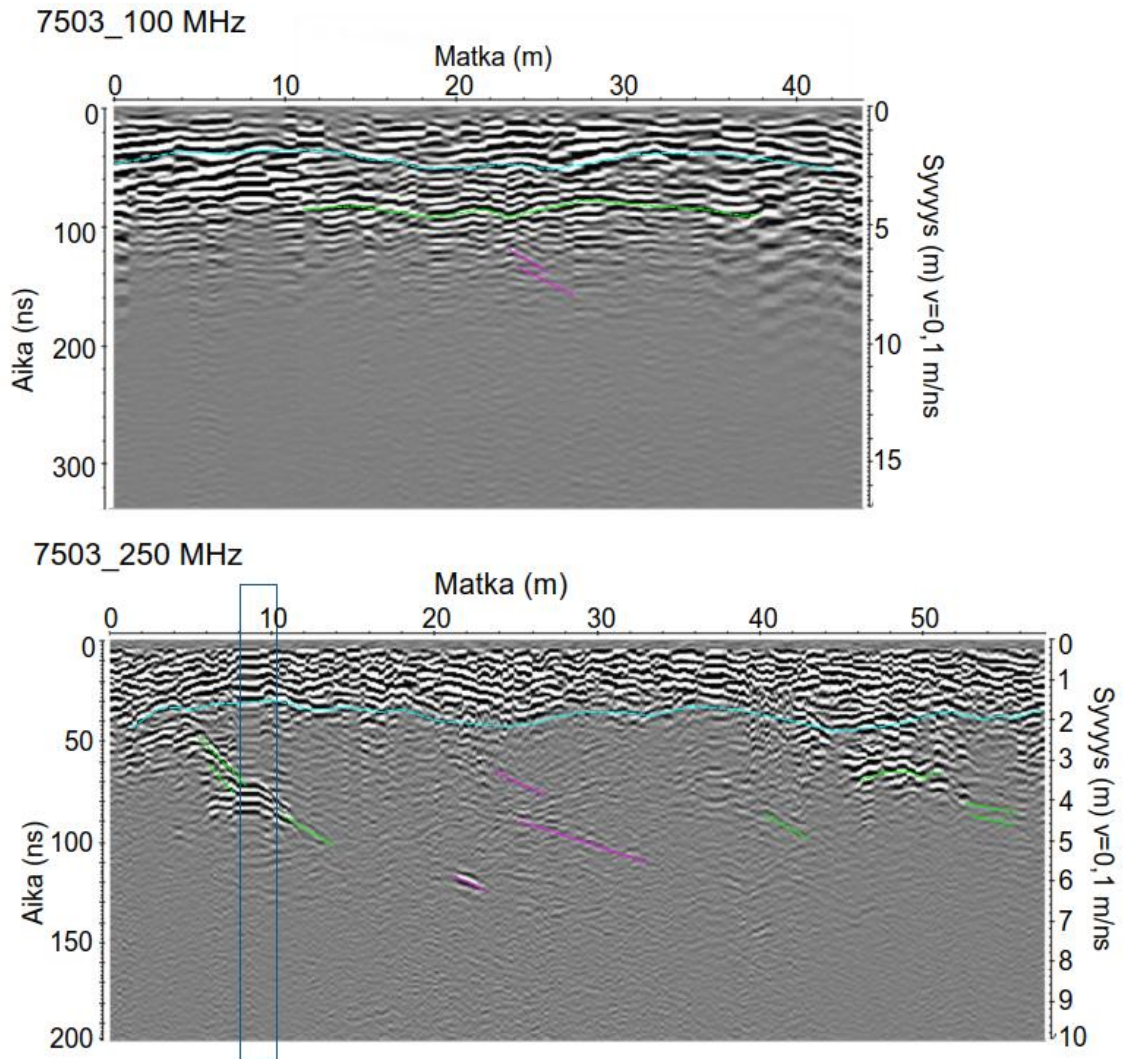
voidaan havaita noin 15 metriin asti ja 250 MHz:n taajuudella noin 10 metriin asti (Kuva 13).

Keilaniemen linjalla ML7502 mittaukset tehtiin 100 ja 250 MHz:n taajuuksilla. Molempien taajuuksien profiileissa mahdollisesti kalliokontaktia kuvastavat heijasteet ovat lähes samalla syvyydellä (1–4 metriä), joten kalliokontakti saatiin tulkittua molempiin kuviin samalla tavalla. Kuvaan 13 on väreillä korostettu yksittäisiä heijasteita. Nämä heijasteet voitaisiin tulkita esimerkiksi kivilajikontakteiksi, heikkousvyöhykkeiksi tai muiksi rakosysteemeiksi. Myös muut kallion sisäiset rakenteet, jossa suhteellisen permittiivisyyden muutokset ovat riittävän suuria voivat aiheuttaa näitä yksittäisiä heijasteita. Useat yksittäiset heijasteet kuvan molempien taajuuksien profiileissa osuu samoille sijainneille (Kuva 13).



Kuva 13 Lähes tunnelin suuntaisesti kulkevan maatulkin ML7502 tulokset 100 ja 250 MHz:n taajuuksilla. Tulkintaa on selitetty tekstissä. Linjan sijainti on esitetty Kuvassa 7.

Kuvassa 14 on esitetty tunnelia ja samalla linjaa ML7502 vinosti ristiin kulkevan maatumkaluotauslinjan ML7503 maatumkaluotauksen uudelleen käsittelyn aineiston tulokset ja tulkinnat. Keilaniemen linjan ML7503 mittaukset tehtiin 100 ja 250 MHz:n taajuudella. Kalliokontakti tulkittiin kuvia ristiin vertailemalla. Kalliokontakti tulkittiin kulkevan keskimäärin kahden metrin syvyydellä (Kuva 14). 100 MHz:n profiilissa kalliokontaktia kuvastava heijaste oli vahva ja lähes selkeä koko linjan matkalta, kun taas 250 MHz:n profiilissa kalliokontaktia kuvastava rajapinta ilmeni heijasteiden nopeana vaimenemisena. Paikoin 250 MHz:n profiilissa kalliokontaktin heijasteet katosivat kokonaan, jolloin tulkinnassa luotettiin yksin 100 MHz:n tuloksiin. Lisäksi molempiin profiileihin on korostettu muita yksittäisiä ja selkeitä heijasteita. Näissä yksittäisissä heijasteissa on profiilien välillä eroja. Ainoastaan profiilin keskivaiheilla näkyy molemmissa tuloksissa vastaavan näköisiä heijasteita (Kuva 14).



SELITTEET

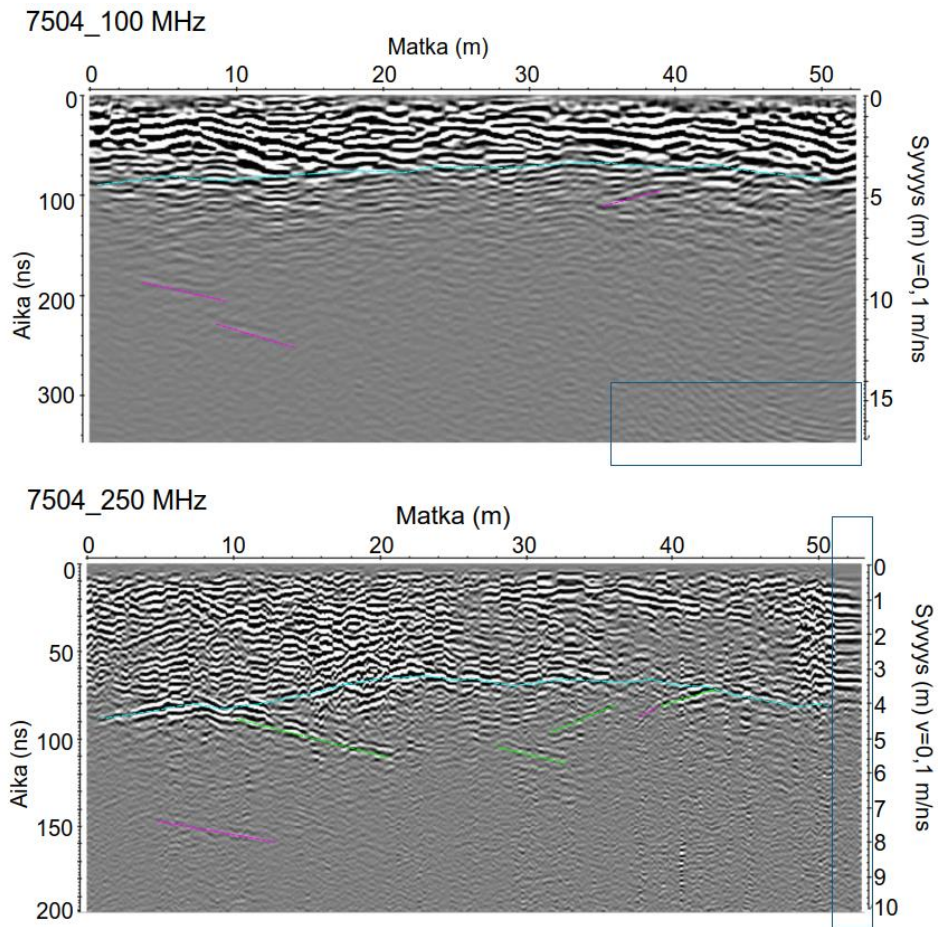
- Tulkittu kalliokontakti
- Yksittäiset heijasteet (yhtenäisyyksiä eri taajuuksilla)
- Muita yksittäisiä heijasteita
- Vääristymä / Häiriö



Kuva 14 Tunnelia vinosti risteävän maatutkalinjan ML7503 tulokset 100 ja 250 MHz:n taajuuksilla. Tulkintaa on selitetty tekstissä. Linjan sijainti on esitetty Kuvassa 7.

Linja ML7504 kulkee poikittain linjan ML7502 kanssa. Toisin kun linjalla ML7503, tässä 100 MHz:n profiilissa kalliokontaktia kuvastavat heijasteet eivät olleet yhtä selkeitä vaan tulkinnassa nojattiin enemmän 250 MHz:n taajuuden tuloksiin. 250 MHz:n tulosten avulla löydettiin vastaavat heijastavat rajapinnat myös 100 MHz:n profiilista. Kalliokontakti tulkittiin kulkevan 3–4 metrin syvyydellä (Kuva 15). Muita yksittäisiä ja selkeitä heijasteita korostettiin väreillä. Osa heijasteista havaittiin molemmissa

profiileissa, mutta heijasteet poikkesivat syvyysuunnassa noin metrin toisistaan (Kuva 15).



SELITTEET

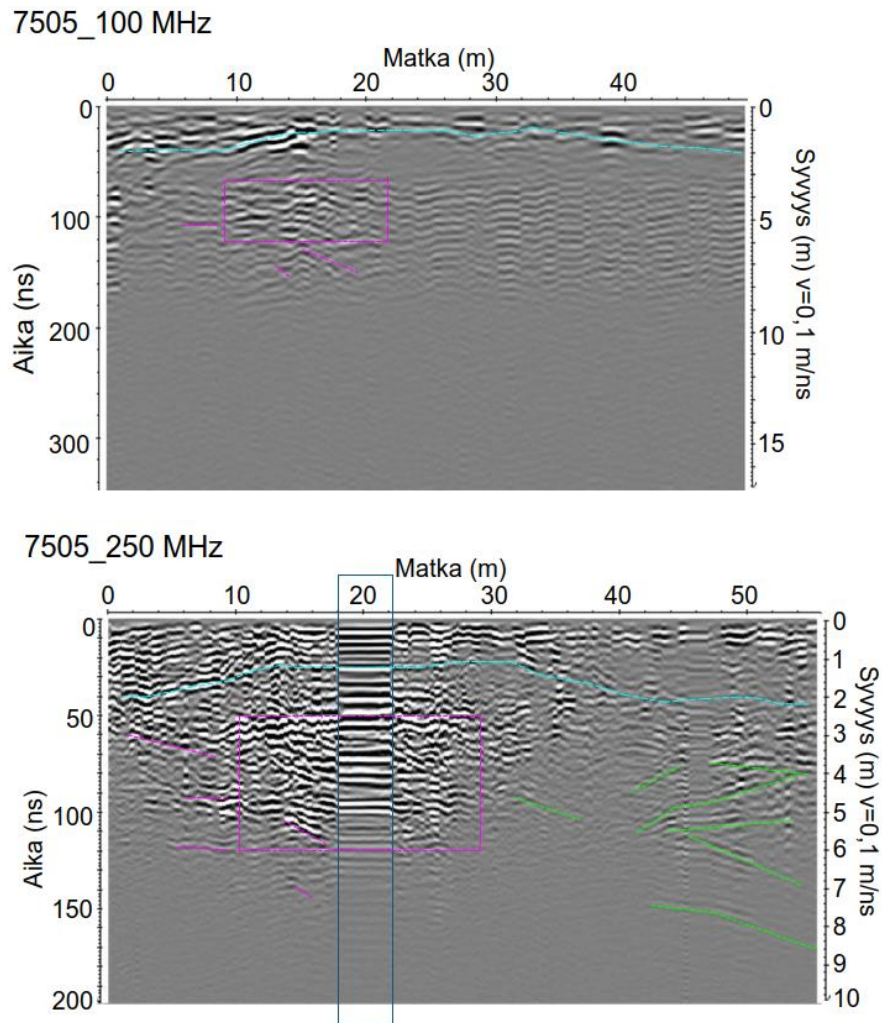
- - - Tulkittu kalliokontakti
- Yksittäiset heijasteet (yhtenäisyyksiä eri taajuuksilla)
- Muita yksittäisiä heijasteita
- Vääristymä / Häiriö



Kuva 15 Lähes poikittain tunnelia vastaan olevan maatutkalinjan ML7504 tulokset 100 ja 250 MHz:n taajuudella. Tulkintaa on selitetty tekstissä. Linjan sijainti on esitetty Kuvassa 7.

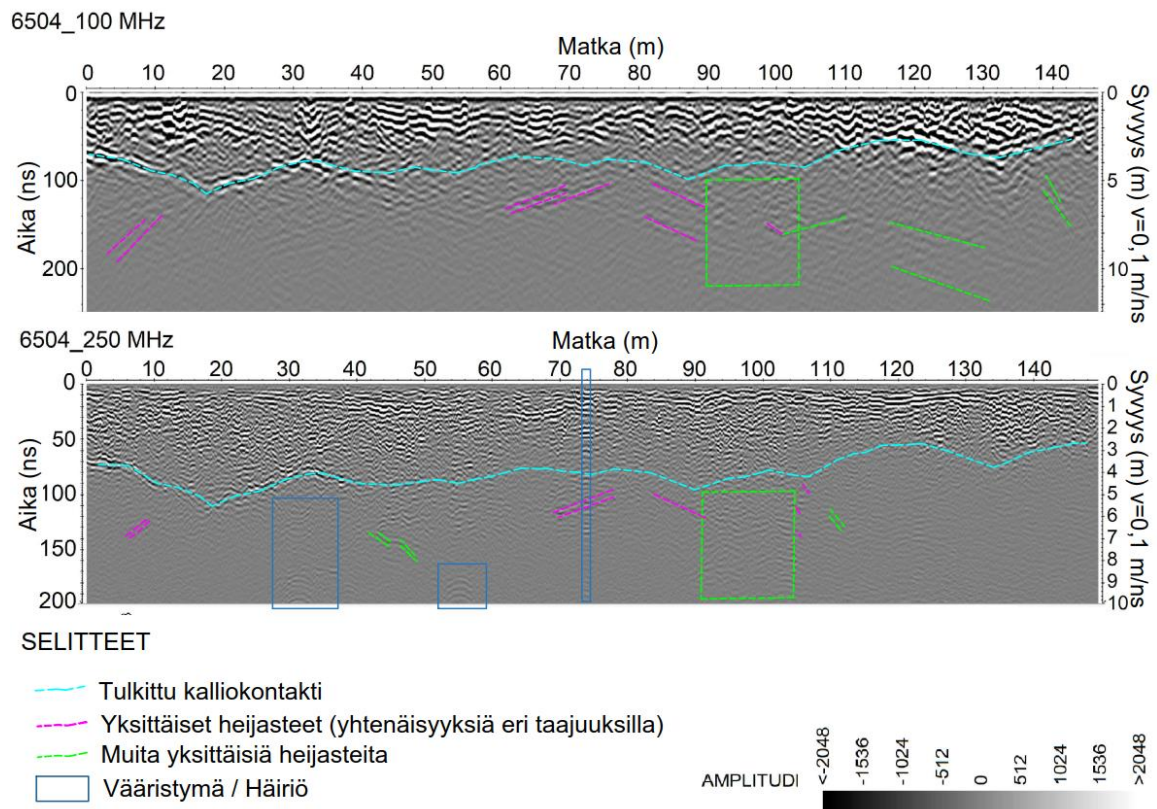
Linja ML7505 kulkee poikittain linjaa ML7502 vasten. 100 MHz:n profiilissa heijasteet ovat vaimentuneet melko nopeasti ja ainoat selkeät heijasteet tulkittiin kalliokontaktiksi. Kalliokontakti löydettiin yhteen sovittamalla ja vertaamalla kontaktia kuvastavia heijasteita sekä 100 että 250 MHz:n tuloksista. Kaikissa kohdissa heijasteet eivät olleet täysin yksiselitteisiä. Kalliokontakti tulkittiin kulkevan 1–2 metrin syvyydellä (Kuva 16). 250 MHz:n profiilissa havaitaan huomattavan paljon myös yksittäisiä heijasteita tulkitun

kallion alapuolella. Osa näistä heijastavista pinnoista on havaittavissa myös 100 MHz:n profiilissa, mutta kuten muillakin Keilaniemen linjoilla, 100 MHz:n tuloksissa mahdollisia kallion sisäisiä rakenteita on hankalampi havaita.



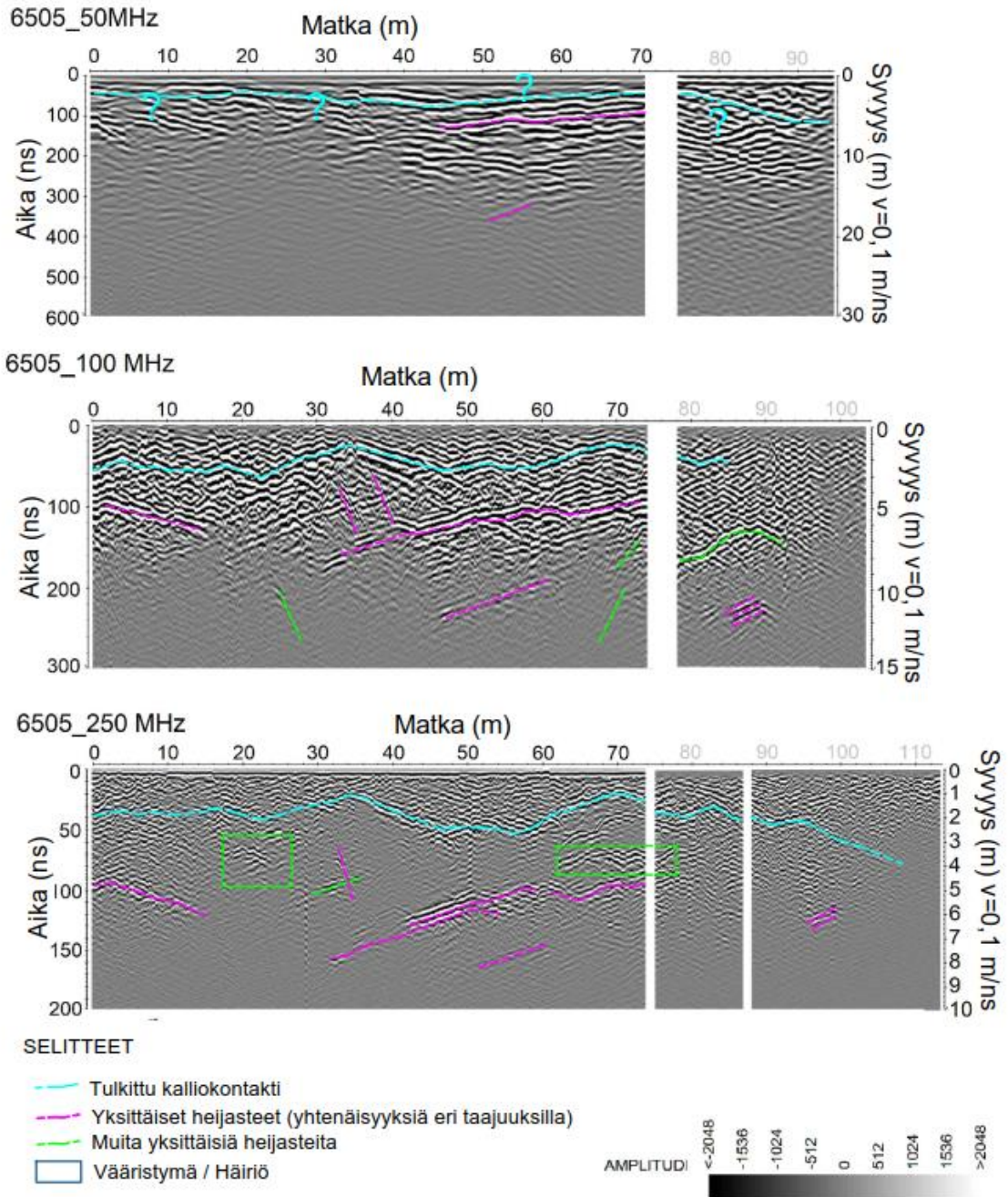
Kuva 16 Lähes poikittain tunnelia vastaan olevan maatutkalinjan ML7505 tulokset 100 ja 250 MHz:n taajuuksilla. Tulkintaa on selitetty tekstissä. Linjan sijainti on esitetty Kuvassa 7.

Otaniemessä maatumkalinjoja mitattiin kolme. Pisin linja, ML6504, mitattiin 100 ja 250 MHz:n taajuuksilla ja sen uudelleen käsitelty aineisto ja tulokset on esitetty Kuvassa 17. Kalliokontaktia kuvastavat heijasteet olivat 100 MHz:n profiilissa paikoin vahvoja ja paikoin hyvin heikkoja. Kalliokontaktin tulkinnassa nojattiin enemmän 100 MHz:n tuloksiin, koska 250 MHz:n profiilissa kalliokontaktia kuvaavia heijasteita ei varmuudella löydetty, pois lukien profiilin alkuosan selkeitä heijasteita. Kalliokontakti tulkittiin kulkevan 2,5–5,5 metrin syvyydessä. Syvemmältä tulevissa yksittäisissä heijasteissa on linjan ML6504 tuloksissa samankaltaisuuksia, tosin syvyydessä nämä hieman poikkeavat. Molempien taajuuksien tuloksissa, erityisesti 250 MHz:n taajuuden profiilissa havaitaan laaja alue, jossa paljon heijastavia rajapintoja. Tämä alue alkaa heti tulkitun kalliokontaktin alapuolelta ja ulottuu 10 metrin syvyyteen asti. Myös sellaisia heijasteita, jotka näkyvät vain toisessa profiilissa oli useampia (Kuva 17).



Kuva 17 Otaniemien tutkimusalueen länsiosassa, tunnelin kanssa vinosti risteävän maatumkaluotauslinjan ML6504 tulokset 100 ja 250 MHz:n taajuuksilla. Tulkintaa on selitetty tekstissä. Linjan sijainti on esitetty Kuvassa 7.

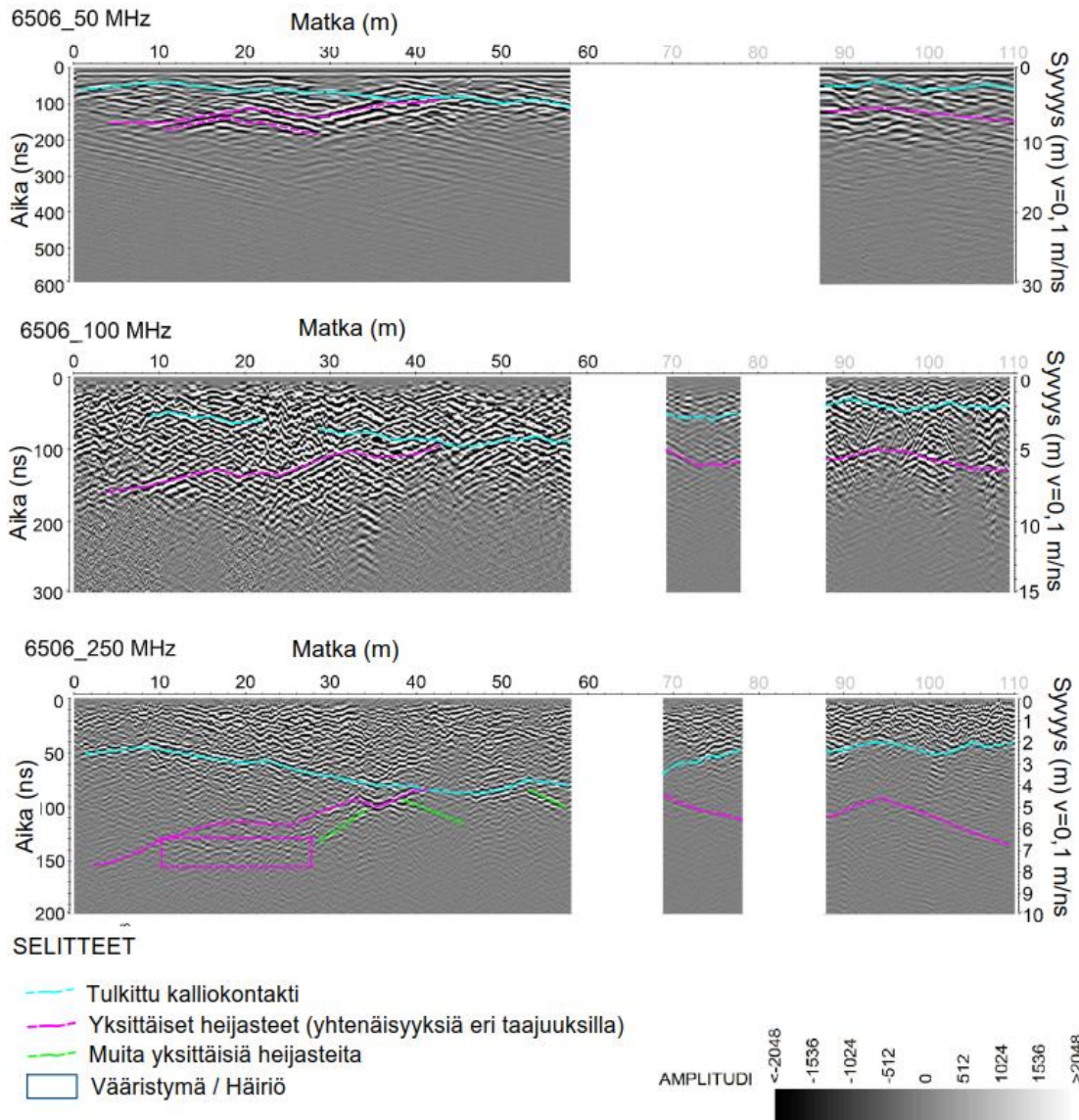
Linjan ML6505 mittaukset tehtiin 50, 100 ja 250 MHz:n taajuudella. Mittaukset suoritettiin osissa erilaisten esteiden vuoksi. Esteet on kuvattu alkuperäisten tulosten yhteydessä Liitteessä 1. Etäisyydet 75 metrin jälkeen ovat arvioita, koska tarkka sijaintitieto puuttui. Kalliokontakti tulkittiin vertailemalla 100 ja 250 MHz:n tuloksia. Kalliokontakti tulkittiin kulkevan 1–3 metrin syvyydessä (Kuva 18). 100 MHz:n tuloksissa kalliokontaktia kuvastavat heijasteet sekoittuvat taustaan linjan loppuosalla, minkä vuoksi tulkinta jätettiin tekemättä. 50 MHz:n profiilissa kalliokontaktia kuvastavat heijasteet poikkesivat muista. Siinä kalliokontaktia ei saatu sovitettua yhteneväksi muiden profiilien kanssa, minkä vuoksi se merkittiin kuvaan kysymysmerkein (Kuva 18). Yksittäisiä heijasteita havaitaan eniten 250 MHz:n profiilissa ja vastaavia heijasteita löytyy myös muissa eri taajuuden profiileissa.



Kuva 18 Otaniemen tutkimusalueen keskiosassa, tunnelin kanssa vinosti risteävän maatutkalinjan ML6505 tulokset 50, 100 ja 250 MHz:n taajuuksilla. Tulkintaa on selitetty tekstissä. Linjan sijainti on esitetty Kuvassa 7.

Samoin kuin linjan ML6505, myös linjan ML6506 tulokset mitattiin kolmella eri taajuudella. Linjalla oli myös esteitä ja mittaukset jouduttiin suorittamaan osissa. Etäisyydet 60 metrin jälkeen ovat arvioita, koska tarkkoja sijaintitietoja ei ollut saatavilla. Kalliokontakti tulkittiin ristiin vertailemalla kaikkia kolmea profiilia. Tulkinnassa nojattiin pääsääntöisesti 250 MHz:n, mutta myös 50 MHz:n tuloksiin. Kalliokontakti

tulkittiin kulkevan 2–4 metrin syvyydellä (Kuva 19). 100 MHz:n profiiliin kalliokontakti sovitettiin muiden taajuuksien avulla. Koko mittauslinjalle kalliopinnan sovitusta ei saatu tehtyä, koska vastaavia heijastavia rajapintoja ei löytynyt. Lisäksi kaikkien profiilien loppuosassa kalliokontaktia kuvastavat heijasteet eivät sovi toisiinsa. Myöskään yksittäisten heijasteiden sijainnit eivät profiilien loppuosissa täysin sovi yhteen. On mahdollista, että mittausten eri osien sijainnit eivät ole kohdallaan. Lisäksi 50 ja 100 MHz:n profiileissa on havaittavissa melko säännöllinen ruutukuviointi, mikä on mahdollisesti sellaista häiriötä, jota ei saatu suodatuksilla poistettua (Kuva 19). Häiriö saattaa peittää alleen todellisia heijasteita. Tulkitun kalliokontaktin alapuolella on havaittavissa kaikkien taajuuksien profiileissa selkeät heijasteet, jotka lähtevät tulkitusta kalliokontaktista loivasti alaspäin sekä linjan alussa että lopussa. Heijasteet eivät ole täysin yhtä selkeät kuin tulkitun kalliokontaktin, mutta on mahdollista, että nämä heijasteet kuvastavat kalliokontaktia eikä kallion sisäisiä rakenteita. Muita yksittäisiä heijasteita, joita voisi verrata keskenään ei linjan ML6506 tuloksista löytynyt (Kuva 19).



Kuva 19 Otaniemen tutkimusalueen itäosassa, tunnelin kanssa vinosti risteävän maatutkalinjan ML6506 tulokset 50, 100 ja 250 MHz:n taajuuksilla. Tulkintaa on selitetty tekstissä. Linjan sijainti on esitetty Kuvassa 7.

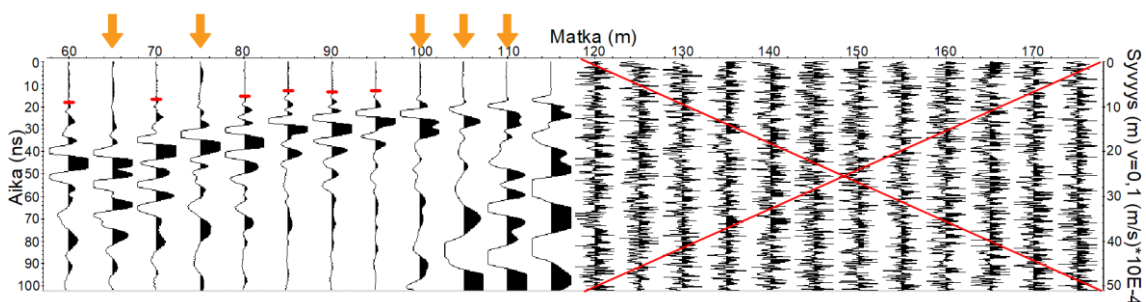
5.2 Seisminen taittumisloutaus

5.2.1 Aineiston uudelleen käsittely

Seismisen taittumisloutausaineiston uudelleen käsittelyn tarkoituksena oli hyödyntää kerättyä aineistoa uudella tavalla. Käsittely ja tulkinat tehtiin ReflexW-ohjelmalla ja kaikkiin linjoihin sovellettiin samaa proseduuria. Käsittelyssä käytettiin hyväksi P-aaltojen ensimmäisiä vastaanottimelle saapuneita signaaleita. Vastaanottimille ensimmäiseksi saapuvat signaalit (suorat ja taittuneet aallot) havaitaan aineistoista

yleensä selkeästi, minkä vuoksi signaalin poimiminen ja tallentaminen on useimmiten yksiselitteistä ja yksinkertaista. Kaikki tässä tutkimuksessa käytettävät, vastaanottimille saapuneet ensimmäiset signaalit poimittiin aineistoista manuaalisesti. Vastaanottimia oli viiden metrin välein ja lähettä lähimpinä olleiden vastaanottimien ensimmäisten saapujien signaalit jätettiin poimimatta, koska niiden erottaminen aineistosta oli hankalaa.

Jokaisen linjan aineistossa oli häiriötä ja epäselvyyttä ensimmäisen aallon tuottamasta signaalista. Näin ollen vaikuttaa, että käytetty lähde ei ole ollut riittävän voimakas tuottamaan selkeitä ensimmäisiä signaaleja tässä tutkimuksessa käytettävään tarkoitukseen. Aineistossa olevien häiriöiden vuoksi ensimmäisen saapujan signaali ei ollut joka vastaanottimelta yksiselitteisesti poimittavissa. Tämä aiheutti epävarmuutta jatkokäsittelyyn. Ensimmäisiä signaaleja poimittiin käyttämällä useampaa eri skaalausta tuloksista. Osasta aineistoista ensimmäiset saapujat saatiin poimittua kohtalaisella varmuudella, mutta paikoitellen aineistoissa oleva häiriö teki poiminnoista epäluotettavia (Kuva 20). Linjan SL7501 kolmestatoista lähteestä linjan alkuosalle sijoittuvat lähteet 8–13 olivat lähes täysin häiriöisiä, kuten Kuvassa 20 oikealla. Lähteen numero 13 sijainti oli tuntemattomasta syystä sama kuin lähteellä numero 8, mutta tulokset hieman poikkesivat, minkä vuoksi toinen (nro.13) jätettiin jatkokäsittelystä pois. Linjan SL7501 käsittelyssä ja tulosten tuottamisessa käytettiin lähteitä 1–12 (Taulukko 5). Muilla linjoilla käytettiin kaikkien lähteiden tuloksia.



Kuva 20 Esimerkki kuva ensimmäisten signaalien poimisesta (punaiset vaaka viivat). Osa vastaanottimien signaaleista olivat täysin häiriöisiä (ylivedetty punaisella ruksilla) ja osassa (oranssilla nuolella merkattu) ensimmäisiä saapujia ei saatu poimittua taustakohinan ja häiriöiden aiheuttaman epävarmuuden takia. Vaaka-akselilla viiden metrin välein olevat vastaanottimien etäisyydet ja pysty akseli kuvaa aikaa (ms).

Ensimmäisten signaalien perusteella saatiin tietoon aaltojen kulkuajat, joiden pohjalta aineistosta tuotettiin inversiomalli seismisen tomografian avulla. Seisminen tomografinen inversio on laskennallinen malli, jonka tuottamiseksi kriittisesti taittuneiden aaltojen matka-aikahavaintotietoa verrataan alustavaan nopeusmalliin. Nopeusmallia muokataan, kunnes mallin kulku aikaennusteiden ja kulku aikahavaintojen välille löytyy paras mahdollinen sovitus (Sandmeier 2020). Tomografisen inversion aloitusmallina testattiin useampaa yksikerros- ja kaksikerros mallia. Yksikerroksisia inversiomalleja tuotettiin käyttäen aloitusmallina yksinkertaista homogeenista mallia eri aloitusnopeuksilla, joissa oli melko suuri nopeuden pystygradientti. Yksikerros mallien aloitusmalleissa käytettiin nopeuden pystygradienttina $50 \text{ ms}^{-1} \text{ per m}$ ja aloitusnopeuksina testattiin 300 , 500 ja 800 ms^{-1} . Yleisen säännön mukaan tomografia-algoritmi toimii parhaiten, jos aloitusnopeus on riittävän pieni ja pystygradientti riittävän voimakas. Näin suuret nopeusvaihtelut ovat mahdollisia (Sandmeier 2018). Inversiomalleja testattiin myös luomalla kaksikerroksinen aloitusmalli, jossa ensimmäinen kerros ulottui neljän metrin syvyyteen aloitusnopeudella 500 ms^{-1} ja pystygradientilla 50 ms^{-1} . Toisen kerroksen aloitusnopeudeksi asetettiin 5000 ms^{-1} ja pystygradientiksi 100 ms^{-1} . Kaksikerros mallissa toisen kerroksen aloitusnopeus ja syvyys määräytyivät kalliopintamallista poimitun tiedon perusteella. Tämän tutkimuksen molemmilla alueilla kalliopinta on suurelta osin jo 2–5 metrin syvyydellä.

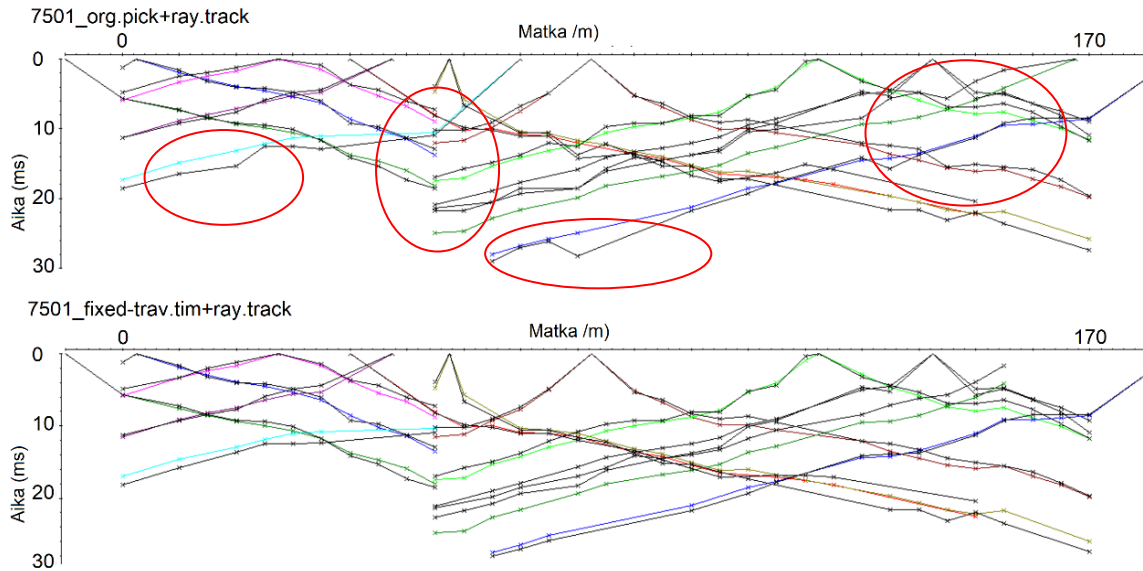
Aloitusmallin lisäksi inversion tulokseen vaikuttavia tekijöitä ovat inversioprosessia ohjaavat parametrit. Testaamalla eri parametrejä havaittiin, että merkittävimpiä olivat mallin solukoko, horisontaaliakselin suunnassa solujen keskiarvoistamiseen käytetyt parametrit, mallien A ja B vaihdot sekä laskennassa käytettävät seismiset minimi- ja maksimi nopeudet (Taulukko 8). Mallien (A ja B) vaihtoparametrit vaikuttavat siihen sallitaanko inversion tehdä muutoksia malliin. Mikäli inversiomallia ei saada sovitettua mallin A arvolla, alkaa laskenta käyttää mallin B arvoa. Muutoksia rajoitetaan, kun arvo on pienempi kuin yksi, ja mikäli arvo on yli yksi laskennassa sallitaan muutokset. Tässä tapauksessa sallittiin pienet muutokset mallissa A, rajattuna kuitenkin maksimissaan 200 prosenttiin aloitusmallista (eng. max.def.change). Sallimalla pienet muutokset malliin saatiin sädepolkuanalyysin perusteella paras sovitus mallin kulku aikaennusteiden ja kulku aikahavaintojen välille. Seismisen taittumislouotauksen tomografiassa käytetään kaarevan säteen algoritmia, jonka vuoksi mallin laskentaparametreissa tulee käyttää

arvoa 1. Solukoon (eng. Space increment) tulee olla huomattavan paljon pienempi kuin geofonivälin. Solukoko vaikuttaa siihen, kuinka pienipiirteisiä tuloksia voidaan saada. X-akselin suunnassa solujen keskiarvoistamisen (eng. Average X) parametriksi valittiin hieman alle puolet lähimpien lähteiden välisistä etäisyyksistä, jotta tulosten nopeusvaihtelut ovat pehmeämpiä. Kaikkien linjojen tomografisen inversion parametrit olivat yhtenevät. (Taulukko 8).

Taulukko 8 Seismisessä taittumisloudatausaineiston tomografisessa inversiossa käytetyt parametrit

Selite	Arvo
Selukoko (eng. Space increment) (m)	0,5
Enimmäismäärä iteraatioita (eng. Max.iterations)	50
Enimmäisaika (eng. Max. Time) (s)	1000
Kynnys (eng. Threshold)	0,001
A-mallin vaihto (eng. Modelchange A)	1,1
B-mallin vaihto (eng. Modelchange B)	0,8
Konvergenssihaku (eng. Convergence search)	5
Oletusarvoinen enimmäismuutos (eng. Max.def.change) (%)	200
Matka-aikatietojen oletusvaihtelu (eng. Def.data-variance)	0,01
Säteen alueen enimmäiskoko (eng. Max. beam width)	10
Kaarevan säteen alku (eng. Start curved ray)	1
X-keskiarvo (eng. Average X)	10
Z-keskiarvo (eng. Average Z)	0
Pienin nopeus (eng. Min. velocity) (ms ⁻¹)	200
Suurin nopeus (eng. Max. velocity) (ms ⁻¹)	6000

Seismisen tomografian tuloksille tehtiin sädepolkuanalyysi (eng. ray tracking), jonka avulla voitiin tarkastella ensimmäisten saapujien kulkuajkojen ja tomografian tuottaman nopeusmallin ennustamien kulkuajkojen eroja. Samalla pyrittiin löytämään mallin mahdolliset epävarmuudet ja virheet. Linjalle SL7501 55 metrin etäisyydelle tuli katkokset johtuen lähteiden 8–12 täysin häiriöisistä loppuosista (Kuva 21). Linjan SL7501 loppupäässä olevien signaalien poimintoja jouduttiin epävarmuuksien vuoksi poistamaan. Lisäksi yksittäisiä selkeitä virheitä korjattiin kaikilla linjoilla. Näiden muokkausten jälkeen tomografiset inversiomallit laskettiin uudelleen käyttäen samoja aloitusmalleja ja parametrejä kuin ensimmäisellä kerralla ennen korjauksia.



Kuva 21 Linjan SL7501 kulkuajkojen sovitus. Värikkäät kulkuajat ovat mallin ennustamia kulkuajkoja ja mustat poimittujen ensimmäisten signaalien kulkuajkoja. Yläkuva: Kulkuajkojen sovitus ennen muokkausta, kuvassa ympyröity selkeät virhekohtat, joita on korjattu. Alakuva: Kulkuajkojen sovitus virheiden korjauksen ja muokkauksen jälkeen.

5.2.2 Aineiston uudelleen käsittelyn tulokset

Seismisten taittumisluoatausten tomografisten inversioiden tulokset laskettiin useampaan kertaan testaamalla eri aloitusmalleja. Vaikka ensimmäisten saapuneiden signaalien selkeästi epävarmat poiminnat jätettiin pois, ei mallia saatu täydellä varmuudella sovitetuista poimintojen kanssa. Mallin laskennassa käytettävien iteraatioiden määrä oli asetettu viiteenkymmeneen, mutta laskenta lopetettiin jo 12–34 yrityksen jälkeen riippuen aloitusmallista (Taulukko 9). Laskenta lopetettiin, koska inversio ei saanut poimittujen signaalien kulkuajkoja ja mallien ennusteita tuotua enää lähemmäs toisiaan. Sädepolkuanalyysin perusteella yksikerrosmalli aloitusnopeudella 500 ms^{-1} ja pystygradientilla 50 ms^{-1} per metri sekä kaksikerrosmalli antoivat parhaan tuloksen (Taulukko 9). Absoluuttinen aikaero sädepolkuanalyysin tuloksissa antaa arvion siitä, kuinka hyvin mallien ja ennusteiden kulkuajkasuorat yleisesti sopeutuvat toisiinsa ja RMS-poikkeama määrittelee mallin ja ennusteiden välisten erojen keskineliön neliöjuuren (eng. the Root Mean Square deviation) (Sandmeier 2020).

Taulukko 9 Seismisen tomografian tulokset kaikilta linjoilta ja niiden sädepolkuanalyysin laskemat kulku-aikaerot. Nimisarakkeen numeroyhdistelmä muodostuu linjan numerosta ja aloitusnopeudesta pystygradientilla 50 ms^{-1} per metri. 2k on kaksikerrosmalli. Korostettuna sädepolkuanalyysin perusteella paras tulos sekä absoluuttisen aikaeron että RMS-poikkeaman perusteella.

Tutkimuslinja	Nimi	Iteraatioiden määrät ennen lopetusta	Sädepolkuanalyysi	
			Absoluuttinen aikaero	RMS poikkeama
SL7501	7501_300	24	0,58713	0,76547
	7501_500	16	0,54848	0,73084
	7501_800	14	0,59073	0,79185
	7501_2k	34	0,67811	0,84372
SL6501	6501_300	12	1,53069	2,09343
	6501_500	14	1,4586	2,025
	6501_800	13	1,47738	1,97625
	6501_2k	12	1,20422	1,64261
SL6502	6502_300	22	0,55997	0,75828
	6502_500	25	0,55923	0,71672
	6502_800	16	0,65535	0,85589
	6502_2k	20	0,55181	0,73873
SL6503	6503_300	20	0,58903	0,78275
	6503_500	24	0,66206	0,87896
	6503_800	14	0,68536	0,84741
	6503_2k	22	0,55176	0,71149

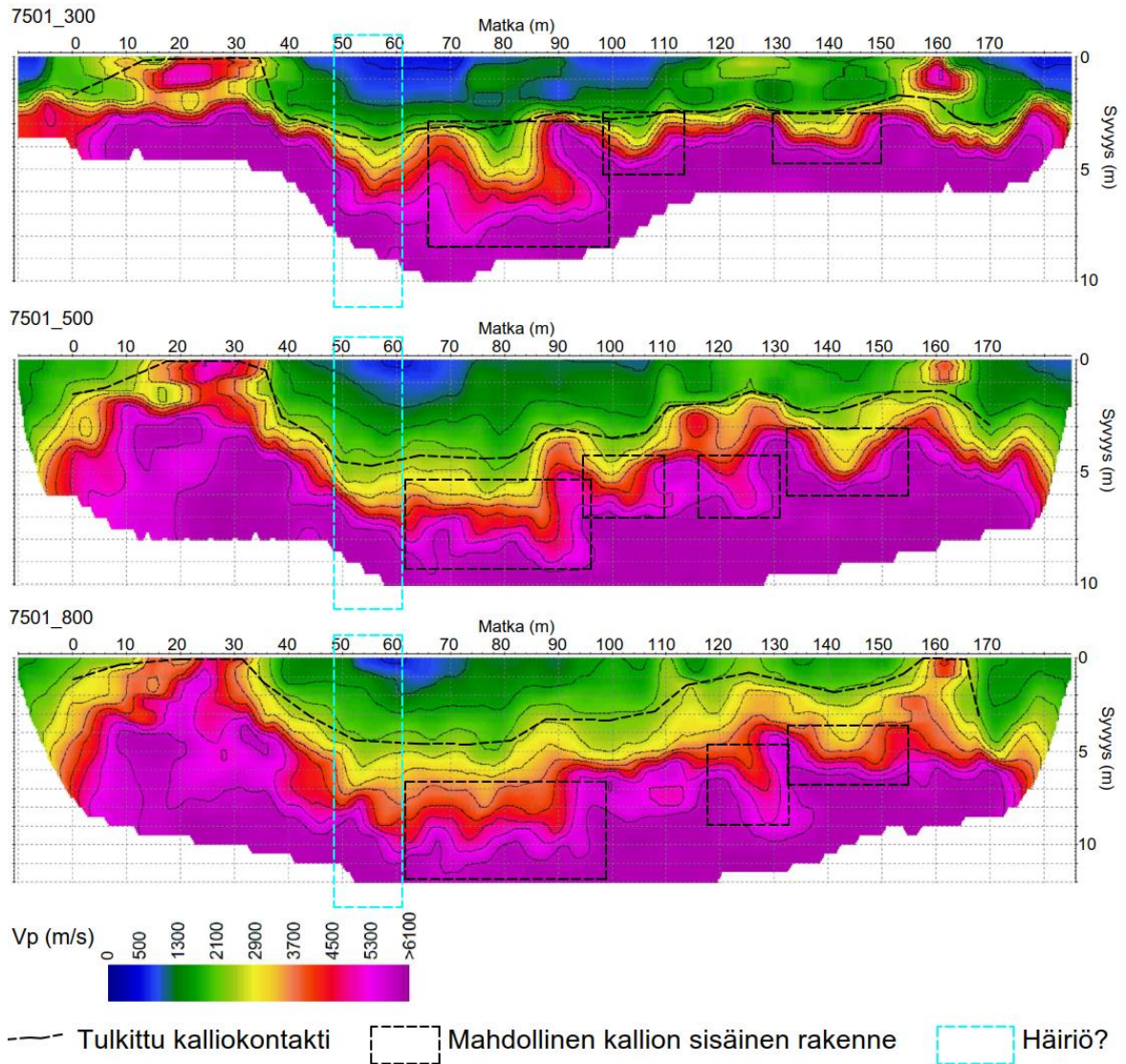
Kalliokontakti tulkittiin 2500 ms^{-1} seismisen nopeuden rajapinnalle tausta-aineiston perusteella (Taulukon 3 ja kairaushavaintojen mukaan). Kallion seisminen nopeus vaihtelee muun muassa kallion rikkonaisuuden määrästä vuoksi, eikä kaikkialla näin alhainen nopeus välttämättä tarkoita kalliota. Esimerkiksi kovassa moreenissa ja sorassa on seismisen P-aallon nopeus voi olla yli 2500 ms^{-1} (Taulukko 2). Tomografiaprofiileissa nopeuksien vaihtelut olivat horisontaalissa suunnassa paikoin jyrkkiä eikä oletettavasti kalliopinta vaihtelee vastaavasti, vaan nopeuden vaihtelut aiheutuvat muista syistä. Tämän vuoksi kuvissa tulkitut kalliokontaktit eivät täysin vastaa 2500 ms^{-1} rajapintaa. Kalliokontakti tulkittiin jokaiseen profiiliin erikseen, sovittamatta tulkintoja toisiinsa, koska haluttiin tehdä vertailua eri tomografiaprofiilien eroista. Myöhemmissä tarkasteluissa (Kappale 6.2) esitetään vain yksi tomografiaprofiili, ottaen kuitenkin huomioon eri tomografiaprofiileissa havaittavat yhtenevät piirteet. Kuvissa 22–26

vihertävällä alueella kulkee seismisen nopeuden 2500 ms^{-1} rajapinta ja tulkittu kallionkontakti on merkitty kuviin mustalla katkoviivalla. Oletus on, että sinisen ja vihreän sävyt kuvaavat pintakerrosta. Syvemmällä on punaisella alueella seismisen nopeuden 5000 ms^{-1} rajapinta. Oletus on, että seisminen nopeus 5000 ms^{-1} kuvaa varmasti kiinteää ja ehjää kalliota (Taulukko 3). Vihertävän ja punaisen alueen väliin jäävät nopeusalueet kuvastavat todennäköisesti joko ehjää tai rikkonaista kalliota. Mustilla suorakulmioilla on korostettu anomaaliset alueet, jossa seismiset nopeudet poikkeavat ympäristöönsä nähden. Nämä anomaliat saattavat kuvastaa kallion sisäisiä rakenteita (Kuvat 22–26).

Kuvassa 22 on esitetty Keilaniemen seismisen taittumisloutauslinjan SL7501 tomografisen inversion tulokset, jotka on tuotettu kolmen eri yksikerroksisen aloitusmallin avulla (Taulukko 9). Kuvasta havaitaan, että mitä suurempi aloitusnopeus on, sitä paksumpi pintakerroksen ja varmasti kiinteän kallion välinen välikerros on. Lisäksi havaitaan, että mitä suurempi aloitusnopeus on sitä syvemmillä korkeita (yli 5300 ms^{-1}) nopeuksia havaitaan. Kaikkia kolmea kuvaa vertaamalla voi havaita yhteneviä piirteitä. Linjan sekä alku että loppupäässä on korkeampia nopeuksia lähempänä pintaa. Kuvia vertaamalla havaitaan myös, että keskellä taittumisloutauslinjaa oletettu pintamaakerros ulottuu syvimmälle (Kuva 22). Mallien reunoilla on havaittavissa vääristymiä. Kulkuaikoihin tulleiden katkosten kohdalla (turkoosi suorakulmio, Kuva 22) havaitaan nopeusvaihteluja, mutta ne eivät poikkea vahvasti muusta aineistosta. Ylimmässä kuvassa (7501_300, Kuva 22) katkosten kohdalla nopeudet hieman laskevat, alimmassa kuvassa (7501_800, Kuva 22) nopeusvaihtelut kasvavat niin, että ne muodostavat pienen piikin ylös ja keskimmaisessä (7501_500, Kuva 22) seismiset nopeudet laskevat tasaisemmin (Kuva 22). Nopeusvaihteluiden rajat ovat muutenkin hyvin epäsäännöllisiä ja vaihtelevia koko linjalla, kaikissa eri inversiomalleissa (Kuva 22).

Kalliokontakti tulkittiin kulkevan kaikissa kolmessa profiilissa lähes samalla syvyydellä, noin 1,5–4,5 metriä maan pinnan alapuolella. Poikkeuksen tekee linjan alkuosassa oleva kohta, jossa kallio näyttäisi ulottuvan pintaan. Myös alimmassa kuvassa (7501_800, Kuva 22) linjan loppuosassa kallio näyttäisi ulottuvan pintaan, mutta tämä

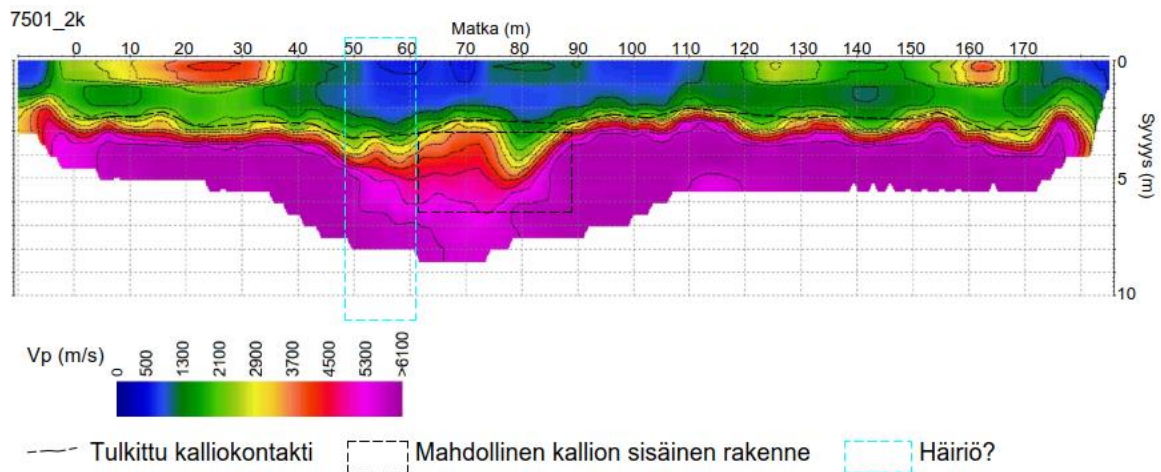
poikkeaa muista tulkinnoista. Kaikissa kolmessa tomografiaprofiilissa havaitaan anomaalisia alueita. Näistä anomaliaista kaksi havaitaan kaikissa kolmessa profiilissa samalla sijainnilla, ainoastaan syvyydet vaihtelevat. Näillä kahdella alueella nopeudet laskevat melko jyrkästi 2000 ms^{-1} (Kuva 22).



Kuva 22 Keilaniemen taittumisloutauslinjan SL7501 seismisen tomografian tulokset 300 , 500 ja 800 ms^{-1} aloitusnopeudella ja 50 ms^{-1} per metri pystygradientilla (Taulukko 9). Tulkintaa on selitetty tekstissä. Linjan sijainti esitetty Kuvassa 8.

Kuvassa 23 esitetään linjan SL7501 seismisen tomografian tulos kaksikerroksista aloitusmallia käyttäen. Kuvasta havaitaan, että oletettu pintakerros on 2–3 metrin syvyinen koko linjan matkalta. Toisin sanoen, tulkittu kalliokontakti on 0,5–1,5 metriä korkeammalla kuin yksikerrosmalleista tulkittu kalliokontakti. Linjan alku- ja

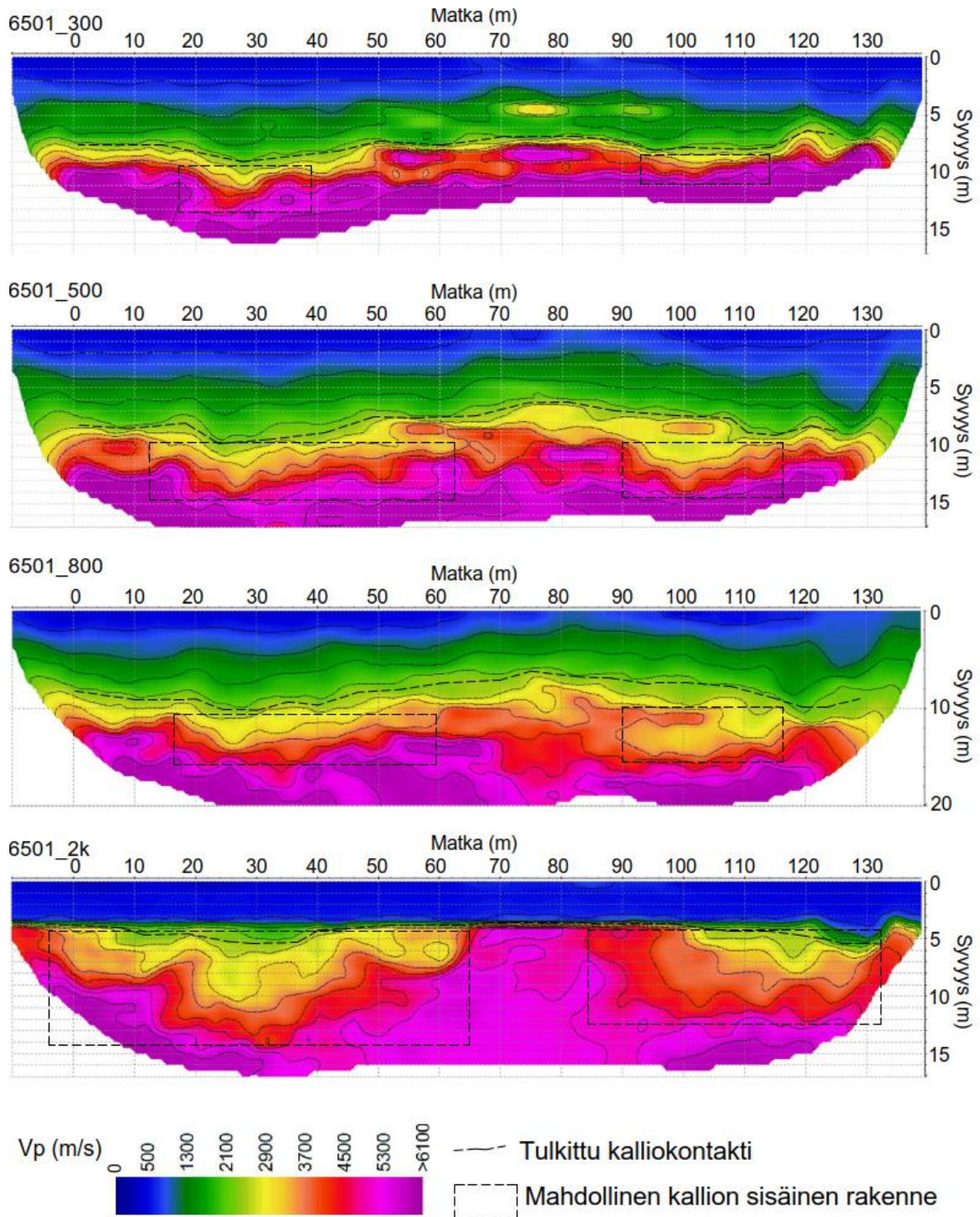
loppupäässä on pintakerroksen seassa irralliset alueet, jossa seisminen nopeus näyttäisi olevan yli 4000 ms^{-1} . Toisin kuin yksikerrosmallien kuvissa, tässä välikerros on huomattavasti ohuempi. Varmasti kiinteän kallion rajapinnan syvyys eroaa yksikerrosmalleista, ollen lähempänä pintaa noin 3–4 metrin syvyydessä. Kuten yksikerrosmalleissa, myös tässä havaitaan anomaliaa linjan puolen välin tienoilla, mutta muualla profiilissa nopeuden vaihtelut ovat hyvin maltillisia (Kuva 23). Häiriöisen aineiston vuoksi tulleet katkokset kulkuajakoihin (Kuva 21) näkyvät mittausmetrillä 50–60 toisaalta kasvavana nopeutena ja toisaalta syvemmällä laskevana nopeutena (Kuva 23).



Kuva 23 Linjan SL7501 seismisen tomografian tulos kaksikerroksista aloitusmallia käyttäen (Taulukko 9). Tulkintaa on selitetty tekstissä. Linjan sijainti on esitetty Kuvassa 8.

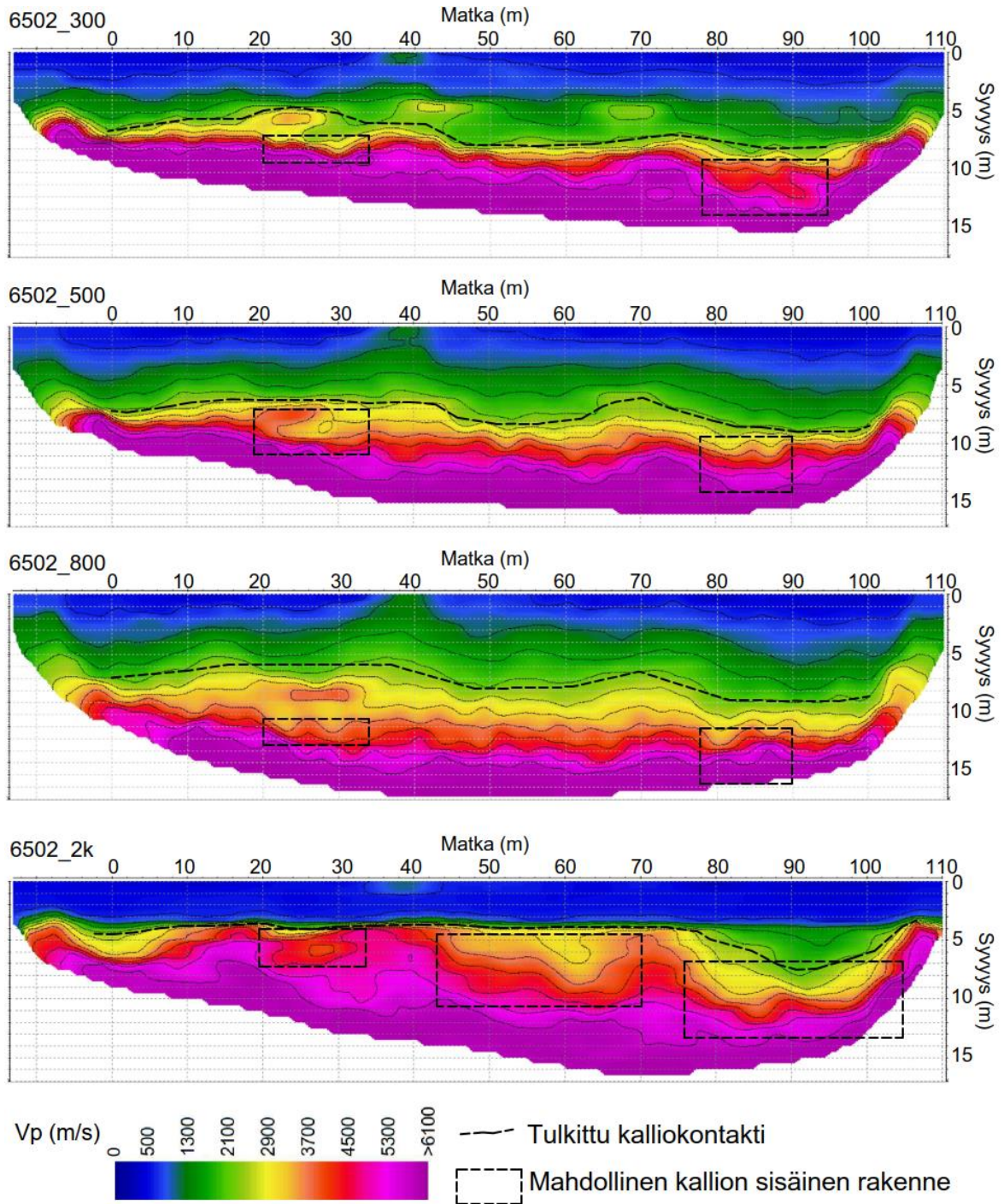
Kuvassa 24 on esitetty Otaniemessä tehdyn linjan SL6501 seismisen tomografian tulokset kaikilla samoilla aloitusmalleilla laskettuna kuin Keilaniemen linjalla SL7501. Linjalla SL6501 yksikerrosmallien inversioissa tulkittu kalliokontakti on lähes yhteneväisen muotoinen ja sijaitsee 6–10 metrin syvyydessä. Poikkeuksena 6501_300 (Kuva 24), jossa kallionpinta on pienipiirteisempi ja sijoittuu 7–9 metrin syvyydelle. Kaksikerrosmallin tomografiaprofiilissa kalliokontakti on melko suora ja huomattavasti lähempänä pintaa, sijoittuen 4–5 metrin syvyydelle. Kaksikerrosmallisissa pintakerroksen nopeudet nousevat nopeasti noin 3,5 metrin syvyydessä 1000 ms^{-1} :sta 2500 ms^{-1} :iin, mikä näyttäytyy tomografiaprofiilissa sinisenä lähes palkkimaisena pintakerroksena (Kuva 24).

Varmasti kiinteän kallion rajapinnalla nopeusvaihtelut kasvavat mitä suurempi aloitusnopeus yksikerrosmalleissa on, mutta muoto on melko samanlainen. Varmasti kiinteän kallion rajapinta on kaksikerrosmallisissa huomattavasti suuripiirteisempi. Pintakallion nopeudet ($2500\text{--}5000\text{ ms}^{-1}$), ennen varmasti kiinteää kalliota, vaihtelevat kaksikerrosmallisissa 5–13 metrin syvyydessä. Yksikerrosmalleissa pintakallion nopeusvaihtelut sijoittuvat noin 10–15 metrin syvyydelle. Kaikissa linjan SL6501 tomografiaprofiileissa selkeät anomaliat kuitenkin korostuvat samoilla alueilla, mustat laatikot Kuvassa 24.



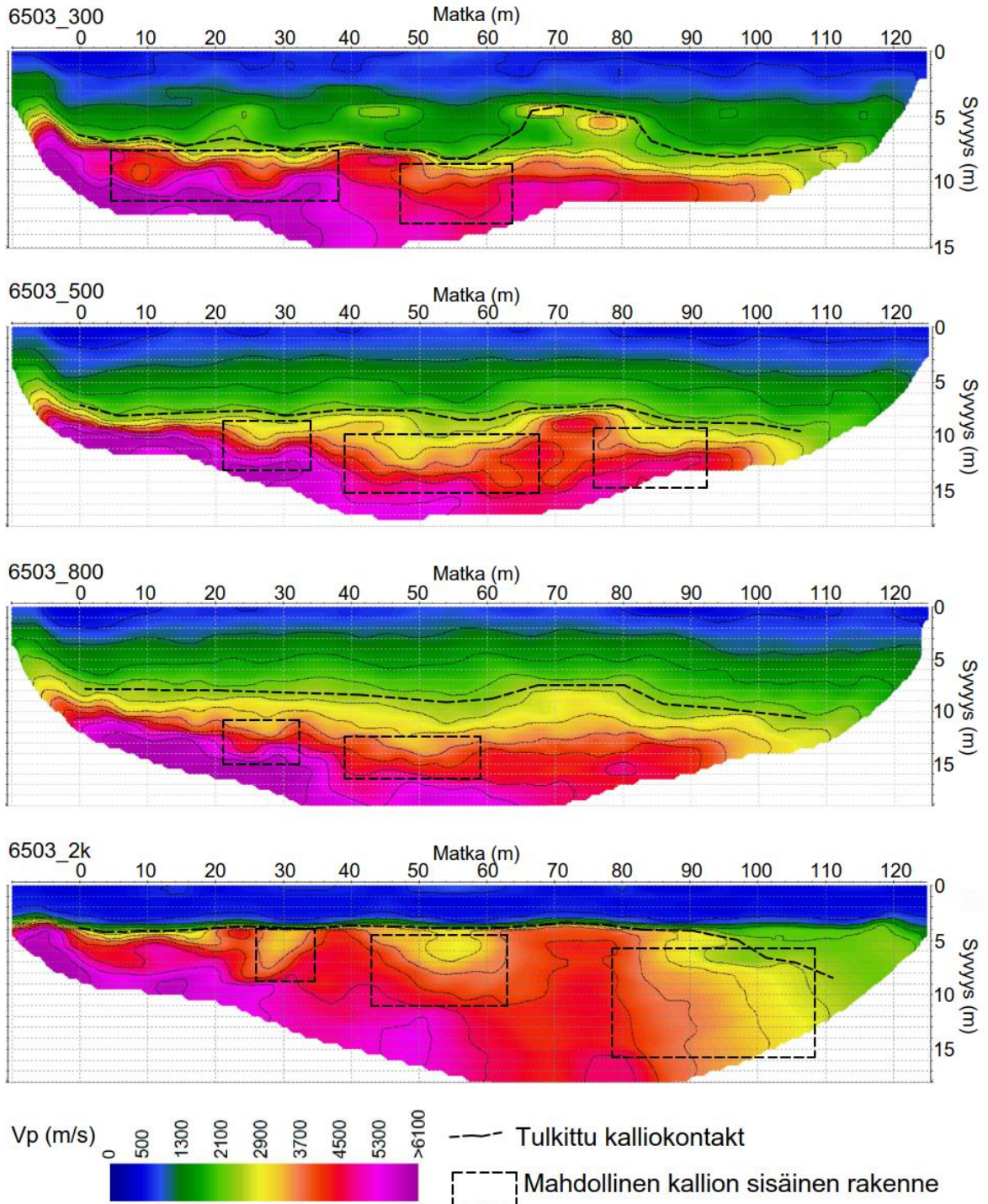
Kuva 24 Linjan SL6501 seismisen tomografian tulokset kolmella yksikerrosmallilla ja kaksikerrosmallilla luotuna. Yksikerrosmalleissa aloitusnopeudet olivat 300, 500 ja 800 ms^{-1} ja pystygradientti 50 ms^{-1} per metri. Kaksikerrosmallissa inversio luotiin aloitusnopeuksilla 500 ms^{-1} /50 ms^{-1} ja 5000 ms^{-1} /100 ms^{-1} (Taulukko 9). Tulkintaa on selitetty tekstissä. Linjan sijainti on esitetty Kuvassa 8.

Samoin kuin linjalla SL6501, myös SL6502 tomografiaprofiileissa yksikerrosmallien tuloksissa tulkittu kalliokontakti on lähes saman muotoinen ja sijoittuu samalle syvyydelle maanpinnalta, noin 6–9 metriin. Poikkeuksena 6502_300 (Kuva 25), jossa tulkittu kalliokontakti eroaa noin puolella metrillä ja on pienipiirteisempi. Kaksikerrosmallin inversiossa tulkittu kalliokontakti on jälleen melko suora, ollen neljän metrin syvyydellä, pois lukien linjan loppuosalla, jossa rajapinta sukeltaa noin kahdeksan metrin syvyydelle. Myös linjalla SL6502, erityisesti linjan alkuosalla, nopeudet nousevat nopeasti noin 3,5 metrin syvyydessä 1000 ms^{-1} :sta 2500 ms^{-1} :iin, mikä näyttäytyy tomografiaprofiilissa sinisenä lähes palkkimaisena pintakerroksena (6502_2k, Kuva 25). Syvemmällä tulkitussa kalliossa havaitaan anomalioita, joista kaksi toistuvat kaikissa neljässä tomografiaprofiilissa (mustat laatikot, Kuva 25). Anomaliat sijoittuvat kuitenkin eri syvyyksille ja näyttäytyvät hieman eri muotoisina eri profiileissa.



Kuva 25 Linjan SL6502 seismisen tomografian tulokset kolmella yksikerrosmallilla ja kaksikerrosmallilla luotuna. Yksikerrosmalleissa aloitusnopeudet olivat 300, 500 ja 800 ms^{-1} ja pystygradientti 50 ms^{-1} per metri. Kaksikerrosmallissa inversio luotiin aloitusnopeuksilla 500 ms^{-1} /50 ms^{-1} ja 5000 ms^{-1} /100 ms^{-1} (Taulukko 9). Tulkintaa on selitetty tekstissä. Linjan sijainti on esitetty Kuvassa 8.

Linjan SL6503 yksikerrosmallien tuloksissa tulkittu kalliokontakti eli seismisen nopeuden noin 2500 ms^{-1} rajapinta on 7,5–9 metrin syvyydellä, pois lukien ylimmässä profiilissa (6503_300, Kuva 26), jossa hieman linjan keskivaiheen jälkeen nopeudet nousevat hetkellisesti. Kaksikerrosmallin tuloksissa tulkittu kalliokontakti on jälleen suurimmalta osin lähes suora ja noin 4 metrin syvyydessä (6503_2k, Kuva 26). Kuten muilla Otaniemien linjoilla myös linjalla SL6503 kaksikerrosmallissa seismiset nopeudet nousevat 3,5 metrin syvyydessä nopeasti, mikä näyttäytyy lähes sinisenä palkkimaisena pintakerroksena. Poikkeuksen tekee linjan loppuosalla tapahtuva tulkitun kalliokontaktin sukellus noin kahdeksan metrin syvyyteen. Kaikissa tomografia profiileissa on kuitenkin yhteneviä piirteitä. Linjan alusta noin puoleen väliin asti syvemmällä voidaan havaita seismisiä nopeuksia, jotka ovat yli 5000 ms^{-1} , kun linjan loppu osalla niitä ei ole (Kuva 26). Anomaalisia nopeusvaihteluiden kohtia, jotka ovat lähes samoilla sijainneilla, voidaan havaita profiileissa kaksi. Ainoastaan näiden anomalioiden muoto ja syvyydet vaihtelevat.



Kuva 26 Linjan SL6503 seismisen tomografian tulokset kolmella yksikerrosmallilla ja kaksikerrosmallilla luotuna. Yksikerrosmalleissa aloitusnopeudet olivat 300, 500 ja 800 ms^{-1} ja pystygradientti 50 ms^{-1} per metri. Kaksikerrosmallissa inversio luotiin aloitusnopeuksilla 500 ms^{-1} /50 ms^{-1} ja 5000 ms^{-1} /100 ms^{-1} (Taulukko 9). Tulkintaa on selitetty tekstissä. Linjan sijainti on esitetty Kuvassa 8.

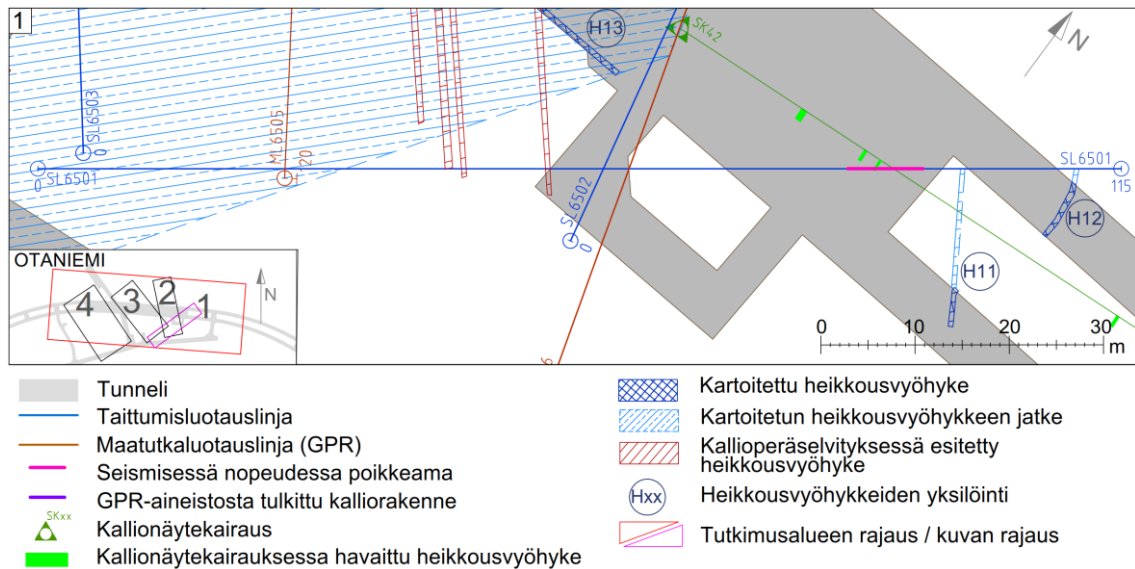
6. TULOSTEN TARKASTELU

6.1 Alkuperäisten tulosten vertailu tausta-aineistoon

Alkuperäisten aineistojen vertailussa pyrittiin löytämään paikkoja, joissa alkuperäisillä geofysiikan tulkinnoilla on havaittu heikkousvyöhyke ja selvittämään kuinka tarkasti nämä alkuperäiset tulkinnot vastaavat todellisuudessa havaittuja heikkousvyöhykkeitä. Lisäksi pyrittiin selvittämään missä määrin geofysiikan aineistoja on hyödynnetty kallioperäselvityksissä ja kallioperän rikkonaisuuden arvioinneissa. Maatutkaluotausten ja taittumislutausten tulkintoja verrattiin toisiinsa sekä geologisen kartoituksen- ja källionäytekairausten havaintoihin. Lisäksi verrattiin tarkennetun kallioperäselvityksen (Ikävalko ja Westerlund 2010) tulkittuja heikkousvyöhykkeitä geologisen kartoituksen yhteydessä havaittuihin heikkousvyöhykkeisiin.

Otaniemessä linjan SL6501 läheisyydessä havaittiin tunnelin geologisen kartoituksen yhteydessä kaksi kapeaa heikkousvyöhykettä. Toinen niistä oli tunnelin holvissa ja seinällä havaittu lähes pystyasentoinen (300/85) heikkousvyöhyke, noin 13 metrin päässä linjasta SL6501 ja toinen huomattavasti vinompi asentoinen (116/65) heikkousvyöhyke tunnelin koko halkaisijan alueella noin 1,5 metrin päässä linjasta SL6501 (Kuva 27). Alkuperäisten seismisten tulosten mukaan linjalla SL6501 oli yksi kohta, metrivelillä 85–94, mikä voitiin tulkita ruhjeiseksi kallioksi (Liite 2). Tämä kohta on korostettu Kuvassa 27. Samalla kohdalla sijaitsevaan tunnelin suuntaiseen källionäytekairaukseen SK42 on myös merkattu heikkousvyöhykkeitä (Taulukko 6 ja Kuva 27). Heikkousvyöhykkeitä ei ole saatu suunnattua källionäytekairauksesta (SMOY 2009b). Mikäli ei ota huomioon mahdollista suunnan muutosta ja kartoitettuja heikkousvyöhykkeitä lineaarisesti ekstrapoloi jatkumaan samassa suunnassa lähes pystyasentoinen heikkousvyöhyke osuisi noin viiden metrin päähän seismisen aineiston perusteella tulkitusta ruhjeisesta kalliosta. Toinen vinompi kartoitettu heikkousvyöhyke osuu 16 metrin päähän tulkitusta ruhjeisesta kalliosta (Kuva 27). Ekstrapoloitujen heikkousvyöhykejatkemien kohdalla seisminen nopeus oli alkuperäisten tulosten mukaan 5500 ms^{-1} (Liite 2). Kallioperäselvityksen ja aiempien tulkintojen mukaan seismisen aineiston perusteella tulkitun ruhjeisen källion kohdalle tai läheisyyteen ei ole tulkittu heikkousvyöhykettä (Ikävalko ja Westerlund 2010). Lähellä linjan keskiosaa kulkee tarkennetun kallioperäselvityksen mukaan

muutama linjan SL6501 kanssa risteävä heikkousvyöhyke. Nämä tulkinnot ovat lähimmillään 31 metrin päässä seismisen aineiston perusteella tulkitusta ruhjeisesta kalliosta. Kallioperäselvityksen tulkintojen kohdalla seisminen nopeus on alkuperäisten laskelmien mukaan 5600 ms^{-1} .

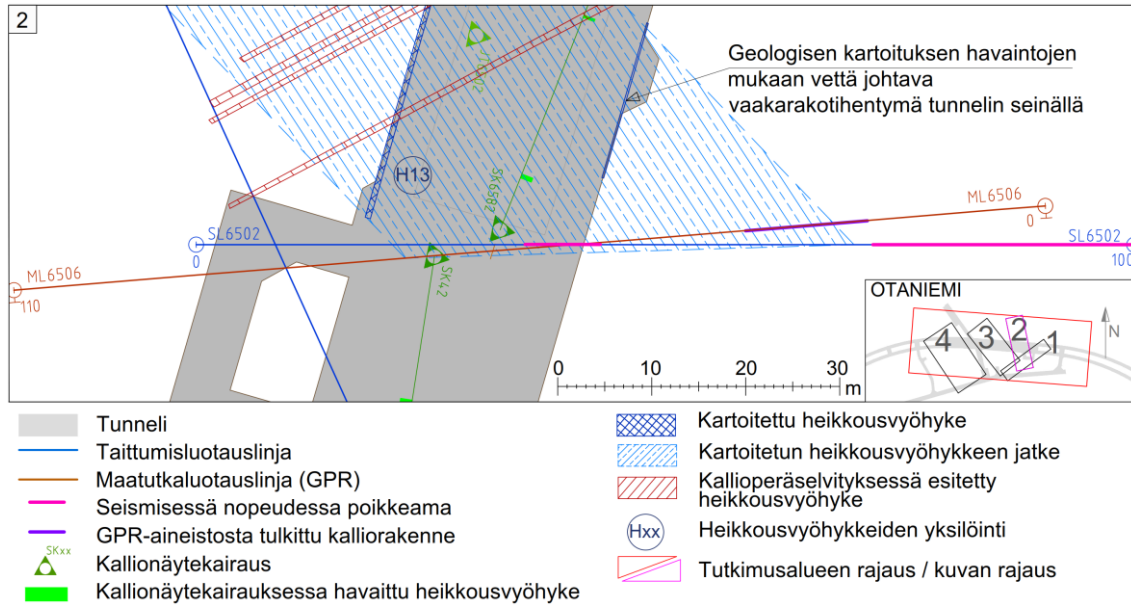


Kuva 27 Linja SL6501 sinisellä, johon korostettuna alhaisen nopeuden kohta. RG-kartoituksessa tehdyt havainnot ja niiden ekstrapoloidut jatkeet esitetty sinisellä rasterilla. Tulkintaa on selitetty tekstissä. Seismisten mittausten alkuperäiset tulokset on esitetty Liitteessä 2 ja heikkousvyöhykkeiden yksilöinti Taulukossa 7.

Linjat SL6502 ja ML6506 risteävät toistensa kanssa ja (Kuva 28). Linjalla SL6502 alhaisin seismisen aallon nopeus 3350 ms^{-1} saatiin mittalinjan metrivalilla 34–43 (Liite 2), mikä voidaan tulkita voimakkaasti ruhjeiseksi kallioksi (Taulukko 3). Seismisen aineiston perusteella tulkitun ruhjeisen kallion kohdalla, risteävässä maatutkalinjan ML6506 tuloksissa ei ole tehty tulkintoja kalliionsisäisistä rakenteista. Myöskään tarkennetussa kallioperäselvityksessä ei ole tällä kohdin merkintää heikkousvyöhykkeestä (Ikävalko ja Westerlund 2010). Geologisen kartoituksen mukaan kyseisellä kohdalla tunnelissa oli havaittavissa vaakarakoilua, mutta ei heikkousvyöhykettä. Geologisen kartoituksen mukaan linjojen vieressä tunnelin toisella seinällä on merkintä lähes vaaka-asentoisesta heikkousvyöhykkeestä (RiIII vyöhyke, 055/10) (Taulukko 7 ja Kuva 28). Mikäli tätä lähes vaaka-asentoista heikkousvyöhykettä (H13, Kuva 28) ekstrapoloi havaintojen suunnassa tunnelin sisään kohti geofysiikan linjoja osuu taittumislutauksilla tulkittu ruhjeisen kallion alue

heikkousvyöhykkeen kohdalle, mutta kapeampana (Kuva 28). Lisäksi noin 20 metrin päässä tästä kohdasta tunnelin toisella seinällä geologisessa kartoituksessa havaittiin myös vahvasti vettä johtava vaakarakotihentymä. Tämä vaakarakotihentymä saattaa kuulua samaan rakosysteemiin kuin toisella seinällä havaittu heikkousvyöhyke.

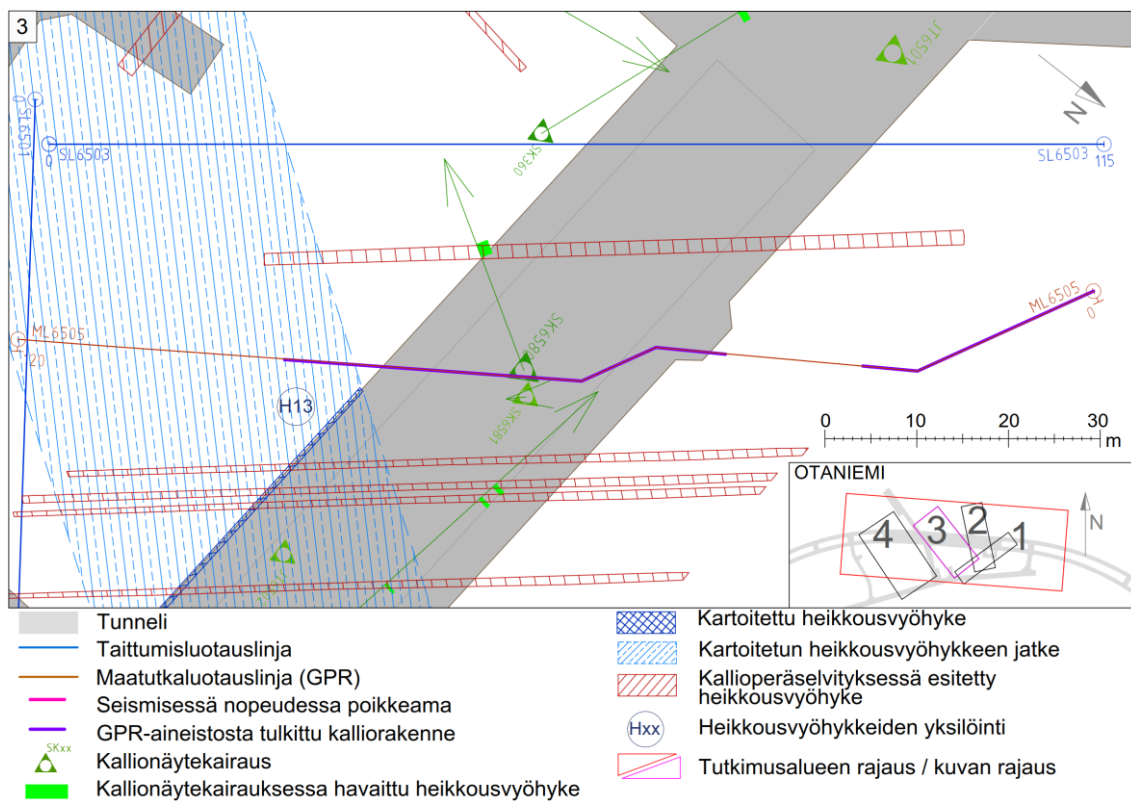
Toinen havainto linjalta SL6502 oli 72 metrin kohdalta linjan loppuun asti oleva alue, jossa oli hieman alhaisempi seisminen nopeus (Liite 2). Laskelmien mukaan seisminen nopeus linjan lopussa oli 4500 ms^{-1} , mikä saattaa Tammenmaan et al. (2008) mukaan viitata hieman rikkonaiseen kallioon riippuen kivilajista (Taulukko 3). Tämä seismisten tulosten perusteella tulkittu mahdollinen rikkonainen kallio, ei osu heikkousvyöhykkeen kohdalle, vaan noin 2 metrin päähän siitä. Lähes saman suuntaisesti kulkevan maatumkalinjan ML6506 tuloksissa oli tulkinta kallionsisäisestä rakenteesta (Liite 1), joka osuu hyvin yhteen ekstrapoloitun heikkousvyöhykehavainnon kanssa. On oletettavaa, että heijasteet maatumkaprofiilissa johtuvat tästä heikkousvyöhykkeestä (H13, Kuva 28). Maatumkaprofiiliin tulkittu sisäinen rakenne on kuitenkin kapeampi kuin heikkousvyöhykkeen ekstrapoloitu jatke. Lisäksi linjan ML6506 eri taajuuksilla tehtyjen mittausten tuloksissa on eroa sisäisen rakenteen sijainnissa (Liite 1). Heikkousvyöhykkeen H13 ekstrapoloitu jatke osuu linjan ML6506 metrivalille 22–68, mutta 50 MHz:n taajuuksilla tehtyjen mittausten tuloksissa kallionsisäinen rakenne sijoittuu linjametrivalille 19–32, 100 MHz:n taajuuksilla 22–35 ja 250 MHz:n tuloksissa sitä ei ole tulkittu ollenkaan. Linjojen SL6502 ja ML6506 vierestä lähtee kaksi kairaus (SK6582 ja SK42), molemmat suunnattuna lähes 90 astetta linjoista poispäin ja erisuuntiin keskenään. Rikkonaisuusvyöhykkeitä havaittiin yhteensä seitsemän eri syvyyksillä (Taulukko 6 ja SMOY 2008, 2009b). Kairauksista Ri-vyöhykkeiden rakosuuntia ei saatu suunnattua. Kairauksessa SK6582 havaitut heikkousvyöhykkeet ovat lähimmillään noin 7 metrin päässä geofysiikan linjoista ja noin 15 metrin päässä tunnelista havaitusta heikkousvyöhykkeestä.



Kuva 28 Kartta tulosten vertailusta. Linja SL6502 sinisellä ja ML6506 ruskealla. Linjoihin korostettuna väreillä poikkeamat tuloksissa. RG-kartoituksessa havaittu heikkousvyöhyke ja sen ekstrapoloitu jatke esitetty sinisellä rasterilla. Tulkintaa on selitetty tekstissä. Seismisten mittausten alkuperäiset tulokset on esitetty Liitteessä 2, alkuperäiset maatutkatulokset Liitteessä 1 ja heikkousvyöhykkeiden yksilöinti Taulukossa 7.

Linjan SL6503 ja ML6505 läheisyydestä tehtiin geologisen kartoituksen mukaan vain yksi havainto heikkousvyöhykkeestä (H13, Kuva 29). Havainto on samaa heikkousvyöhykettä kuin aiemmin mainittu, Kuvassa 28 näkyvä kartoitettu heikkousvyöhyke. Lisäksi linjojen läheisyydestä on tehty useampi heikkousvyöhyke tulkinta kallioperäselvityksen mukaan (Ikävalko ja Westerlund 2010). Havainto ja tulkinta eivät kuitenkaan ole yhteneviä. Tunnelin poikki menevän seismisen taittumisloutauslinjan SL6503 mittausten mukaan kallionopeus koko linjalla oli 5900 ms^{-1} , mikä viittaa ehjään kallioon. Lähes linjan SL6503 suuntaisesti, hieman mutkitellen keskimäärin 30 metrin päässä seismisten luotausten mittalinjasta kulkee maatutkalinja ML6505, jossa Tarvainen ja Sipola (2008) tulkintojen mukaan on lähes koko linjan matkalta useampia erillisiä kallionsisäisiä rakenteita (Kuva 29). Linjalla oli esteitä, joten kaikki taajuudet mitattiin osissa ja lisäksi linjan viimeiset 20 metriä jäi mittaamatta jyrkän topografian vuoksi (Tarvainen ja Sipola 2008). Maatutkaluotaustulosten mukaan eri taajuuksilla tehtyjen mittausten tulokset eivät olleet yhteneviä, mutta yhdistämällä kaikilla taajuuksilla tehtyjen mittausten tulokset vain metriväleillä 27–42 ja 91–100 ei ollut merkintöjä kallion sisäisistä rakenteista (Liite 1).

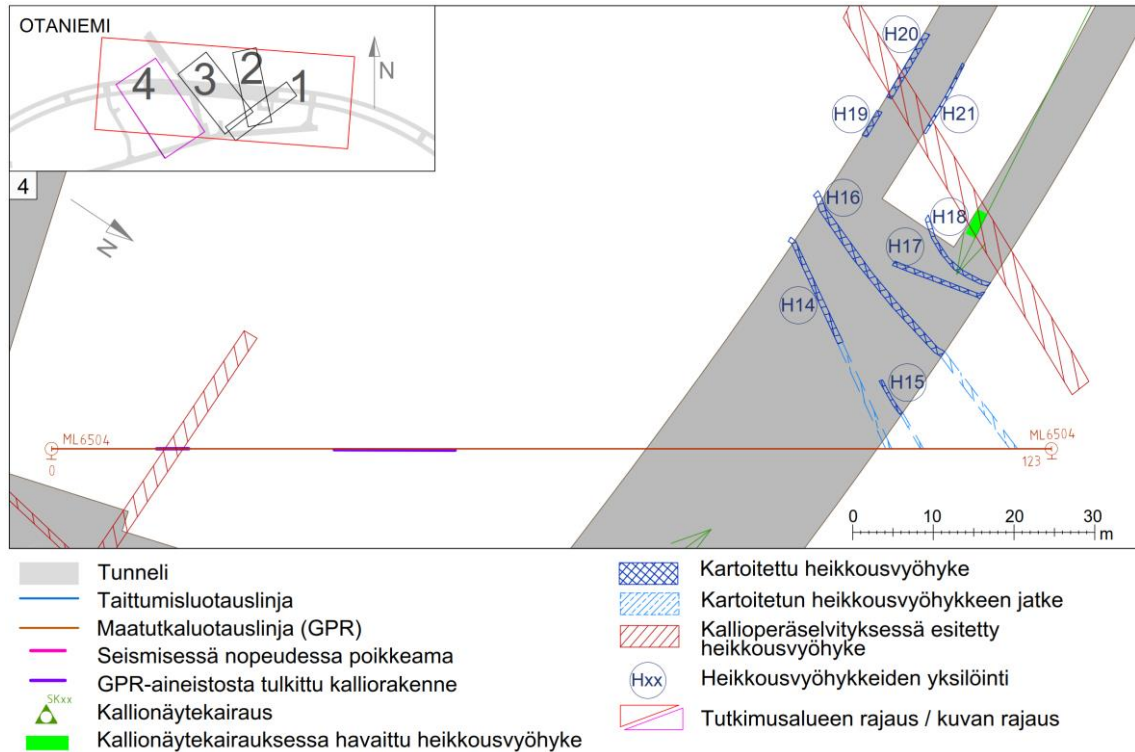
Tunnelista kartoitetun heikkousvyöhykkeen ekstrapoloitu jatke osuu linjan ML6505 metrivalille 83–120 (Kuva 29). Linjalta ML6505 on useampia merkintöjä sisäisistä rakenteista, mutta ne eivät osu yhteen havaintojen kanssa. Geologisen kartoituksen mukaan kalliolaatu oli tällä kohdin heikkoa tai kohtalaista (Kuva 11). Maatutkalinjan läheisyydessä tehdyissä kallionäytekairauksissa ei ole havaintoa heikkousvyöhykkeestä (Kuva 29). Geofysiikan mittalinjojen välissä menee yksi kallioperäselvityksen heikkousvyöhykkeistä (Kuva 29). Kallionäytekairaukseen SK6580 on merkattu yksi heikkousvyöhyke, joka on luokiteltu RiIII-vyöhykkeeksi. Heikkousvyöhyke sijaitsee noin 19–21 metrin syvyydellä ja rakoilun kaade on 35–45° (SMOY 2008). Kallioperäselvityksen tulkittu heikkousvyöhyke on samalla kohdalla kuin kairauksen SK6580 heikkousvyöhyke. Tunnelin geologisessa kartoituksessa ei tehty havaintoa heikkousvyöhykkeestä täällä kohdin.



Kuva 29 Kartta tulosten vertailusta. Linja SL6503 sinisellä ja ML6505 ruskealla, joihin korostettuna poikkeamat tuloksissa. RG-kartoituksessa havaittu heikkousvyöhyke ja sen ekstrapoloitu jatke esitetty sinisellä rasterilla. Tulkintaa on selitetty tekstissä. Seismisten mittausten alkuperäiset tulokset on esitetty Liitteessä 2, alkuperäiset maatutkatulokset Liitteessä 1 ja heikkousvyöhykkeiden yksilöinti Taulukossa 7.

Linjan ML6504 läheisyydessä oli geologisen kartoituksen yhteydessä tehty useampi havainto heikkousvyöhykkeistä noin 1,5–25 metrin päässä linjasta ML6504. Kolme näistä heikkousvyöhykkeistä (H14, H15 ja H16) osuu linjalle ML6504, mikäli havaintoja ekstrapoloi havaintojen suunnan mukaisesti (Kuva 30). Geologisen kartoituksen mukaan heikkousvyöhykkeet ovat lähes pystyasentoisia (Taulukko 7) ja ne risteävät mittalinjan kanssa mittaustetrillä 103, 107 ja 120. ML6504 mittaustuloksissa ei ole merkintöjä kallionsisäisistä rakenteista. Myöskään kallion sijaintia ei ole saatu tulkittua koko mittalinjan matkalta (Liite 1).

Kallioperäselvityksen mukaan linjan ML6504 läheisyydessä on kaksi tulkittua heikkousvyöhykettä, joista toinen risteää maatulokalinjan ML6504 kanssa metrivelillä 14–16 (Kuva 30). Maatulokaluotauksen tuloksissa oli tulkittu kaksi kallion sisäistä rakennetta, joista toinen osuu samalle kohdalle kuin kallioperäselvityksen (2010) yhteydessä tulkittu heikkousvyöhyke. Maatulokaluotauksen tuloksissa tulkittu kallion sisäinen rakenne on noin 2 metriä leveämpi kuin kallioperäselvityksen tulkinta (Kuva 30). Kallioperäselvityksen tulkinnan mukaan heikkousvyöhyke on pystysuuntainen RiIII-vyöhyke (Ikävalko ja Westerlund 2010). Tätä tulkintaa tukee kallionäyttekairauksesta tehty havainto heikkousvyöhykkeestä (Hinkkanen ja Klockars 2009). On mahdollista, että linjan ML6504 tulkintaa on käytetty hyväksi kallioperäselvityksen tulkinnoissa tältä osin. Hieman kauempana linjasta ML6504 on kallioperäselvityksessä tulkittu tunnelin poikki kulkeva heikkousvyöhyke (Kuva 30). Tätä tulkintaa tukee havainto kairauksesta SK237, jonka mukaan syvyydeltä 74,0–77,6 on tehty havainto ruhjerakenteisesta heikkousvyöhykkeestä (Taulukko 6). Kairaus SK237 on lähes tunnelin suuntainen ja sen alkupiste on noin 70 metrin päässä tulkitusta heikkousvyöhykkeestä. Tulkitun heikkousvyöhykkeen läheisyydessä ja osin samalla kohdalla tunnelista on geologisen kartoituksen yhteydessä tehty havaintoja vaaka-asentoisista heikkousvyöhykkeistä (H19, H20 ja H21 Kuvassa 30). Tunnelista tehdyt havainnot heikkousvyöhykkeistä oli kallioperäselvityksen tulkittua heikkousvyöhykettä leveämpiä (Kuva 30).



Kuva 30 Kartta tulosten vertailusta. Linja ML6504 ruskealla, johon korostettuna poikkeamat tuloksissa. RG-kartoituksen havainto heikkousvyöhykkeestä ja sen ekstrapoloitu jatke esitetty sinisellä rasterilla. Maatutkaluotausten alkuperäiset tulokset on esitetty Liitteessä 1 ja heikkousvyöhykkeiden yksilöinti Taulukossa 7.

Keilaniemessä on tarkennetun kallioperäselvityksen mukaan useampia melko laajojakin murros- ja ruhjerakenteista heikkousvyöhykkeitä (Ikävalko ja Westerlund 2010). Myös geologisessa kartoituksessa tehtiin useampi havainto heikkousvyöhykkeistä Keilaniemen alueella. Sekä geofysikaalinen aineisto, että kallioperäselvityksen tulkinnot ovat osin ristiriidassa geologisen kartoituksen kanssa (Kuva 31). Keilaniemessä linjat SL7501 ja ML7502 kulkevat samaa mittalinjaa lähes tunnelin suuntaisesti (Kuva 6 ja 7). Linjalla SL7501 kallion seismisen aallon nopeus viittasi suuremmalta osin ehjään kallioon, mutta linjan ML7502 tuloksiin on tulkittu useampi kallion sisäinen rakenne. Havaituista heikkousvyöhykkeistä kaksi (H4 ja H5) olivat vaaka-asentoisia niin, että mikäli niitä ekstrapoloi havaintojen suunnassa ne risteävät geofysiikan linjojen kanssa linja metreillä 60–70 (H4) ja 131–150 (H5). Geofysiikan tulkinnot ja tunnelista tehty havainto eivät kuitenkaan ole täysin yhteneviä (Kuva 31). Heikkousvyöhykkeen H4 kohdalla seisminen nopeus on aiempien tulosten mukaan 5000 ms^{-1} , mikä ei viittaa kovinkaan rikkonaiseen kallioon (Taulukko 3). Kun taas maatutkaluotauksen tuloksiin on tulkittu kallion sisäinen rakenne noin 10 metriä aiemmin, metrivelillä 51–61. Heikkousvyöhykkeen H5 kohdalla

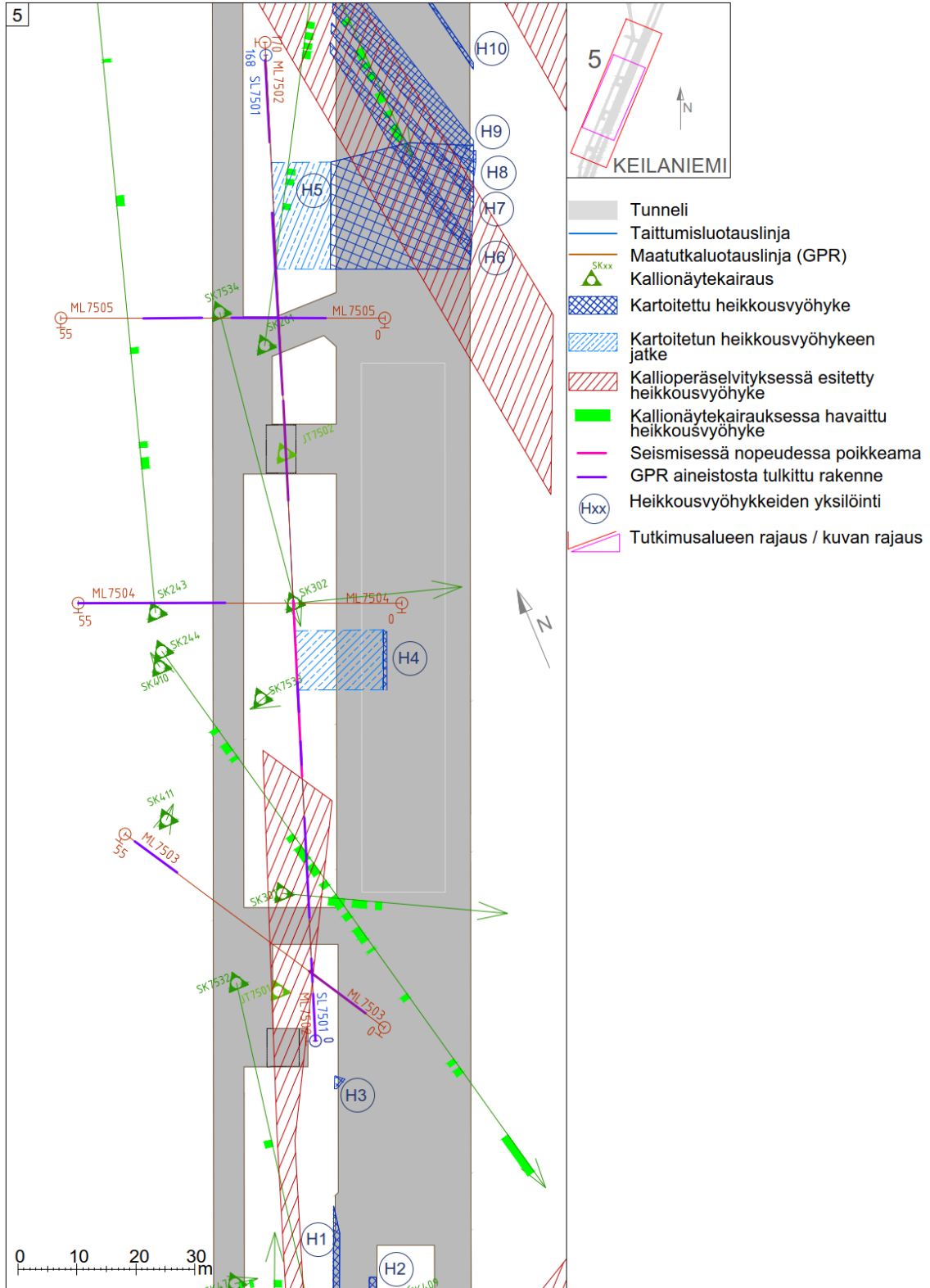
kallion seisminen nopeus oli aiempien tulosten mukaan 5500 ms^{-1} , mikä viittaa täysin ehjään kallioon (Taulukko 3). Maatutkalinjan tuloksissa on kuitenkin tulkittu olevan kallion sisäisiä rakenteita linjametreillä 110–141 (Liite 1). Maatutkaluotauksesta tehty tulkinta on noin 10 metriä leveämpi kuin tehty havainto ja lisäksi se on noin 10 metriä eri kohdassa kuin maatutkaluotauksen tuloksiin tulkittu. Maatutkaluotauksen tuloksiin on tulkittu myös muita kallion sisäisiä rakenteita, joista ei ole tehty havaintoa tunnelin geologisen kartoituksen yhteydessä (Kuva 31).

Linjojen ML7502 ja SL7501 kanssa risteävät maatutkalinjat ML7503, ML7504 ja ML7505 (Kuva 31). Maatutkalinjan ML7503 tuloksissa havaittiin mahdollista rikkonaista kalliota sekä linjan alussa että lopussa. Linjan ML7503 alkuun tulkittu rikkonainen kallio risteää linjan SL7501 kanssa kohdassa, jossa seismisen aallon nopeus kalliiossa on 5300 ms^{-1} . Linjojen risteyskohdassa sekä linjalle ML7502 että ML7503 on tulkittu kallion sisäisiä rakenteita. On mahdollista, että kyseessä on heikkousvyöhyke, jota ei mahdollisesti kaateen ja suunnan vuoksi havaittu geologisessa kartoituksessa. Toisaalta on mahdollista, että tulkitut sisäiset rakenteet ovat siirroksia, kivilajikontakteja tai muita rakosysteemejä, joita ei ole määritetty heikkousvyöhykkeiksi. Linjojen ML7502 ja ML7502 risteyskohdassa olevat tulkinnat kallion sisäisistä rakenteista sijaitsevat tarkennetun kallioperäselvityksen (Ikävalko ja Westerlund 2010) mukaisen kapean tunnelin suuntaisen heikkousvyöhykkeen reunassa (Kuva 31). Tulkitun heikkousvyöhykkeen laajuus, suunta ja sijainti ovat ristiriidassa muun referenssiaineiston kanssa. On epäselvää, miksi kyseiselle kohdalle on tulkittu heikkousvyöhyke.

Tunnelin poikittaisessa maatutkauslinjan ML7505 tuloksissa oli myös tehty tulkintaa kallionsisäisistä rakenteista (Liite 1). Linjojen ML7505 ja ML7502 risteyskohdassa on molempien tuloksiin tulkittu kalliosisäisiä rakenteita. Tämä linjojen ML7502 ja ML7505 risteyksessä oleva tulkinta kallion sisäisestä rakenteesta osuu melko hyvin (noin 2 metrin päähän) GTK:n kaksiosaisessa kallioperäselvityksessä esiteltyyn kaakko-luode suuntaiseen kontaktiin, siirrokseen tai hiertoon (Kuva 2). Tällä kohdin seismisellä linjalla kallion nopeus oli aiempien tulosten mukaan 5500 ms^{-1} . Kallioperäselvityksessä heikkousvyöhyketulkintaa ei tällä kohdalla ole merkitty (Ikävalko ja Westerlund 2010). Lähin kallioperäselvityksessä tulkittu heikkousvyöhyke on noin 30 metrin päässä, jossa samalla kohdalla on tunnelista kartoitettuja heikkousvyöhykkeitä (Kuva 31). Tunnelin

poikittaisessa maatutkalinjassa ML7504 oli merkintä kallion sisäisestä rakenteesta, mutta referenssiaineiston puutteen vuoksi tarkastelua ei voi tehdä.

Muita kartoitettuja heikkousvyöhykkeitä (H6-H10) ei voitu verrata geofysiikan aineistoon, mutta kallioperäselvityksen mukaan ne on saatu lävistettyä ja todennettua useammalla kallionäytekairauksella. Kartoitetut heikkousvyöhykkeet, kallionäytekairauksista tehdyt havainnot ja kallioperäselvityksen (Ikävalko ja Westerlund 2010) tulkinnat korreloivatkin keskenään melko hyvin (Kuva 31). Myös Keilaniemen alueen eteläisessä päässä tehtiin muutama havainto heikkousvyöhykkeistä geologisen kartoituksen yhteydessä (H1-H3 Kuvassa 31). Nämä heikkousvyöhykkeet sijaitsivat sivussa geofysiikan aineistoista ja muusta referenssiaineistosta, joten vertailua ei voitu tehdä (Kuva 31).



Kuva 31 Kartta tulosten vertailusta Keilaniemessä. Maatutkalinjat ML7502, ML7503, ML7504 ja ML7505 ruskealla. Seisminen linja SL7501 sinisellä, mutta kulkee täysin saman suuntaisesti kuin ML7502. Geofysiikan mittauslinjojen päälle korostettuna poikkeamat tuloksissa. RG-kartoituksen havainnot heikkousvyöhykkeistä ja niiden ekstrapoloidut jatkeet esitetty sinisellä rasterilla. Seismisten mittausten alkuperäiset tulokset on esitetty Liitteessä 2 ja heikkousvyöhykkeiden yksilöinti Taulukossa 7.

6.2 Uudelleen käsiteltyjen tulosten vertailu tausta-aineistoon

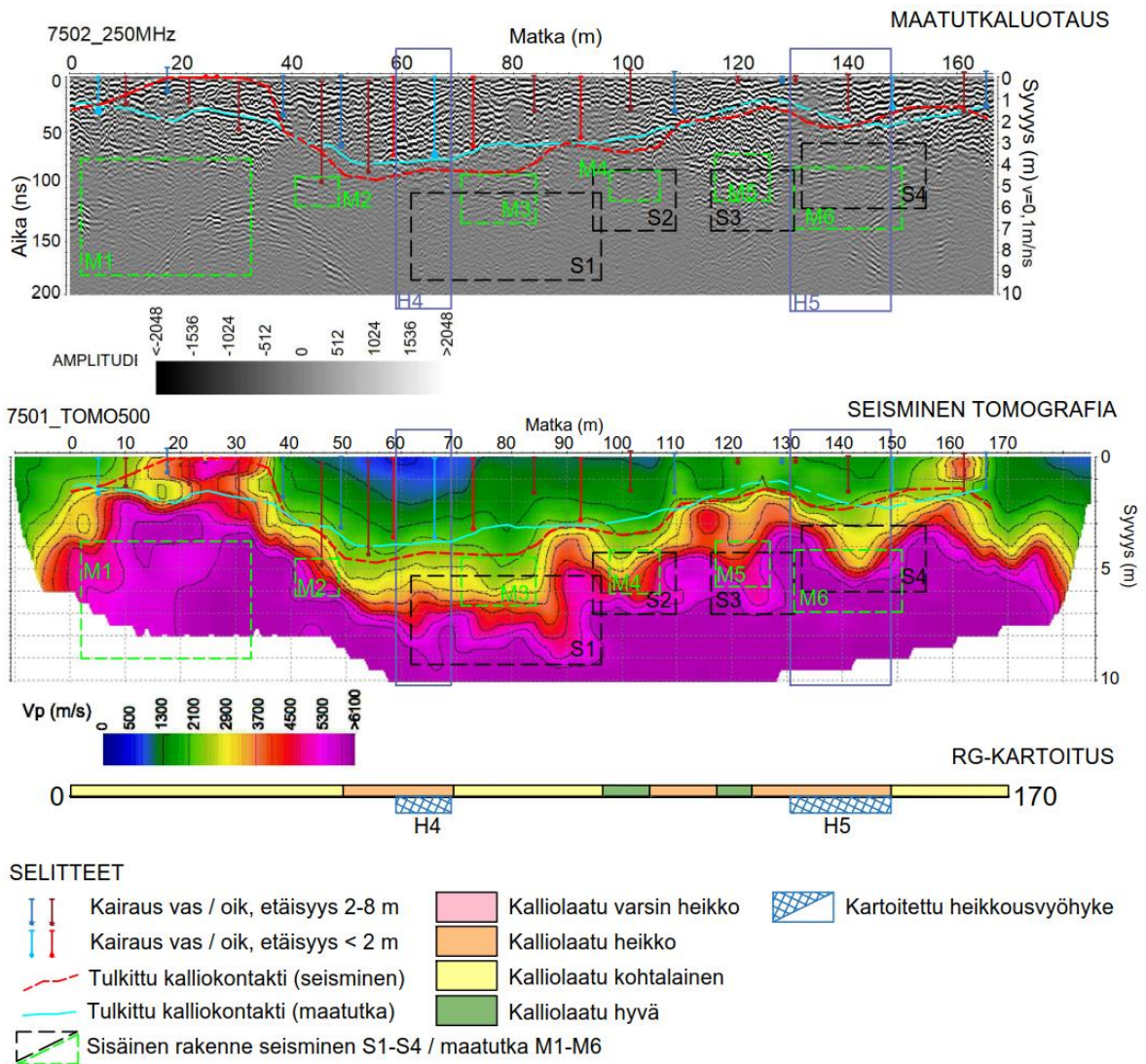
Vertailemalla samalta linjalta seismisen tomografian tuloksia, jotka on tuotettu laskemalla inversio eri aloitusmalleilla, havaitaan, että malleissa on yhteneväisyyksiä, vaikka ne osin poikkeavatkin toisistaan (Kuva 22–26). Seismisen nopeuden vaihtelut muodostavat samankaltaisen muodon, joskin ovat yksityiskohtaisilta piirteiltään erilaisia. Koska inversio antaa eri aloitusmalleilla samankaltaisia tuloksia, voidaan malleja erityisesti yhteneviltä osin pitää luotettavina. Sädepolkuanalyysin mukaiset nopeusmallien erot olivat pieniä (Taulukko 9), minkä vuoksi tulososiossa vertailtiin kaikkia eri malleja rinnakkain. Rajapintojen korkeudet kuitenkin vaihtelevat eri tomografiaprofiileissa. Tässä tarkasteluosiossa on käytetty seismisistä tuloksista vain yksikerrosmallien tuloksia, koska tomografiset inversiot antoivat ristiriitaisia tuloksia yksi- ja kaksikerrosmalleilla. Lisäksi yksikerrosmallit antoivat vertailuissa luotettavampia tuloksia (kappale 5.2.2). Tässä päädyttiin käyttämään kaikissa tarkasteluissa samalla aloitusnopeudella tuotettua inversiota, jossa aloitusnopeus oli 500 ms^{-1} ja pystygradientti 50 ms^{-1} per metri, koska yksikerrosmalleista tämä antoi sädepolkuanalyysin perusteella parhaan tuloksen (Taulukko 9).

Kuten uudelleen käsiteltyjen tulosten (Kappale 5.2.2) yhteydessä todettiin, seisminen nopeus 2500 ms^{-1} saattaa indikoida täysin rikkonaista kalliota (Taulukko 3). Tässä tutkimuksessa se tulkittiin olevan kalliokontakti. Maatutkaprofiileissa kalliokontakti tulkittiin vertailemalla eri taajuudella tehtyjen mittausten tuloksia. Kallion rikkonaisuudeksi tai muuksi kallion sisäiseksi rakenteeksi tässä tarkastelussa tulkittiin molempien menetelmien profiileista alueet, jotka jollain tapaa ovat anomaalisia, eli poikkeavat ympäristöstään. Etenkin sellaiset anomaaliset alueet, jotka havaittiin kaikilla eri taajuuksilla ja eri aloitusmallien profiileissa. Nämä mahdolliset kallion sisäiset rakenteet on merkattu tarkasteluosion kuvissa suorakulmioilla ja numero-kirjainyhdistelmillä M1-M15 (maatutka) ja S1-S12 (seisminen). Tarkasteluosion kuvissa on lisäksi esitetty geofysiikan tulkitut kalliokontaktit, läheisten porakonekairausten sijainnit ja kalliohavaintojen syvyys. Kalliopinnan vertailua tehtiin pääsääntöisesti geofysiikan tulkintojen ja porakonekairausten välillä, koska kalliopintamalli oli luotu interpoloimalla porakonekairausten tuloksista. Vertailussa käytetyt porakonekairaukset valittiin sijainnin mukaan niin, että niitä otettiin molemmilta puolilta ja mahdollisimman läheltä geofysiikan linjoja (Kuva 10). Näin saatiin paras arvio siitä millä kohdin

kalliopinta kulkee geofysiikan linjojen kohdalla. Mitä kauempana geofysiikan linjoista kairaukset ovat sitä epäluotettavampaa niitä on suoraan verrata geofysiikan tulkintoihin. Uudelleen käsitellyt tulokset on pyritty esittelemään vertailukelpoisesti päällekkäin läheisen toisen geofysiikan linjan kanssa. Osa linjoista jätettiin pois tulkinnasta, koska linjojen sijainneissa oli liikaa epävarmuuksia.

Keilaniemen linjojen SL7501 ja ML7502 vertailu tausta-aineistoon on esitetty Kuvassa 32. Kuvasta 32 havaitaan, että sekä seismisessä tomografiaprofiilissa että maatutkaprofiilissa tulkittu kalliokontakti myötäilee kairausten kalliohavaintoja melko hyvin. Molemmissa geofysiikan profiileissa tulkittu kalliokontakti eroaa kairaushavainnoista 0–1,5 metriä. Maatutkaprofiilin ja tomografiaprofiilin tulkittu kalliokontakti muodostavat kuitenkin keskenään hieman eri muodon ja eroavat toisistaan 0–1,5 metriä. Maatutkaprofiilissa tulkittu kalliokontakti myötäilee kairausten kanssa samaa pinnan muotoa paremmin (Kuva 32). Tunnelin geologisen kartoituksen yhteydessä tehtyjen heikkousvyöhykkeiden (H4 ja H5) ekstrapoloidut jatkeet osuvat linjojen SL7501 ja ML7502 kohdalle (Kuvat 31 ja 32). Näiden heikkousvyöhykkeiden kohdalla havaitaan anomalioita tomografiaprofiilissa. Samankaltaista nopeuksien vaihtelua on kuitenkin myös muualla seismisen tomografiaprofiilin matkalla (S1–S4/7501_500, Kuva 32). Tulkinnat S1 ja S4 korostuvat kuitenkin kaikissa eri aloitusmallin tomografiaprofiileissa (Kuva 22). Tämän perusteella voisi päätellä, että tulkintojen S1 ja S4 kohdalla kallio on rikkonaista. Maatutkaluotausprofiilissa ensimmäisen heikkousvyöhykkeen (H4) kohdalla tutka-aallot ovat vaimentuneet lähes heti kalliokontaktin alapuolella ja profiilissa näkyy vain hyvin heikkoja heijasteita. Heikkousvyöhykkeen H4 kohta ei näin ollen täysin yksiselitteisesti erotu geofysiikan aineistosta. Toisen heikkousvyöhykkeen (H5) kohdalta heijasteita on saatu myös kalliopinnan alapuolelta. Nämä heijasteet havaitaan osin molempien tehtyjen taajuuksien tuloksissa (Kuva 13). Lisäksi heijastavan rajapinnan kaade viittaa kartoitettuun lähes vaaka-asentoiseen heikkousvyöhykkeeseen. On siis huomionarvoista, että heikkousvyöhykkeen H5 kohta havaitaan molemmissa geofysiikan profiileissa (M6 ja S4, Kuva 32). Tulkintojen syvyydet kuitenkin eroavat eikä syvyyttä voida verrata kartoitetun heikkousvyöhykkeen syvyyteen, koska tunnelin holvi on yli 10 metrin syvyydessä. Geofysiikan profiileista tehdyt tulkinnat ovat horisontaalisti hyvin lähellä, keskimäärin kahden metrin etäisyydellä, kartoitettua heikkousvyöhykettä H5.

Molemmissa geofysiikan profiileissa on muitakin anomaalisia alueita, jotka korreloivat melko hyvin keskenään (Kuva 32). Näillä kohdilla ei kuitenkaan ole geologisen kartoituksen yhteydessä havaittu heikkousvyöhykkeitä. On oletettavaa, että nämä anomaliat geofysiikan tuloksissa johtuvat kallion sisäisistä rakenteista ja rakesysteemeistä, mutta niitä ei ole joko tunnelista havaittu tai niitä ei olla määritetty heikkousvyöhykkeiksi (Kuva 32).

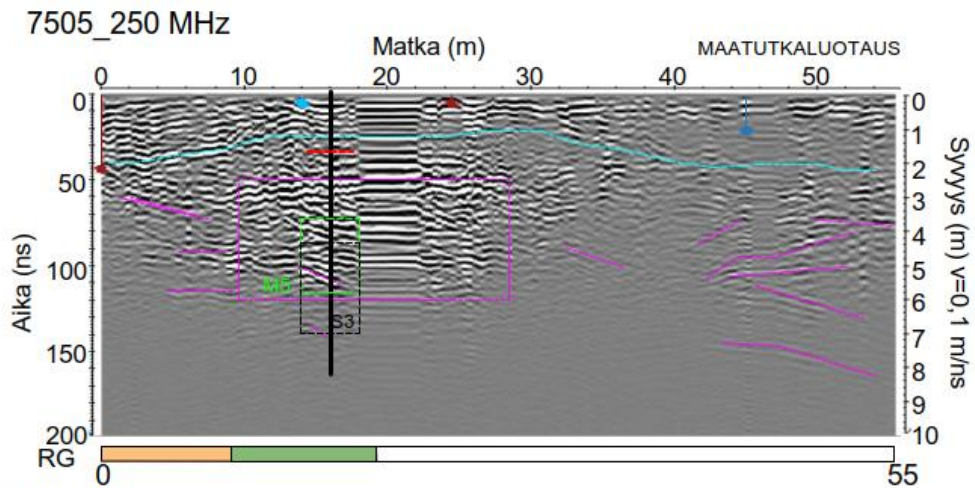
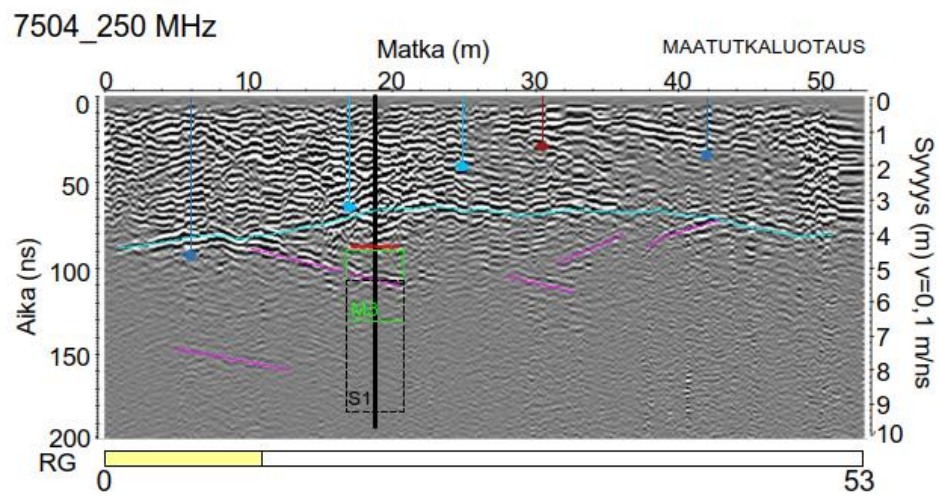
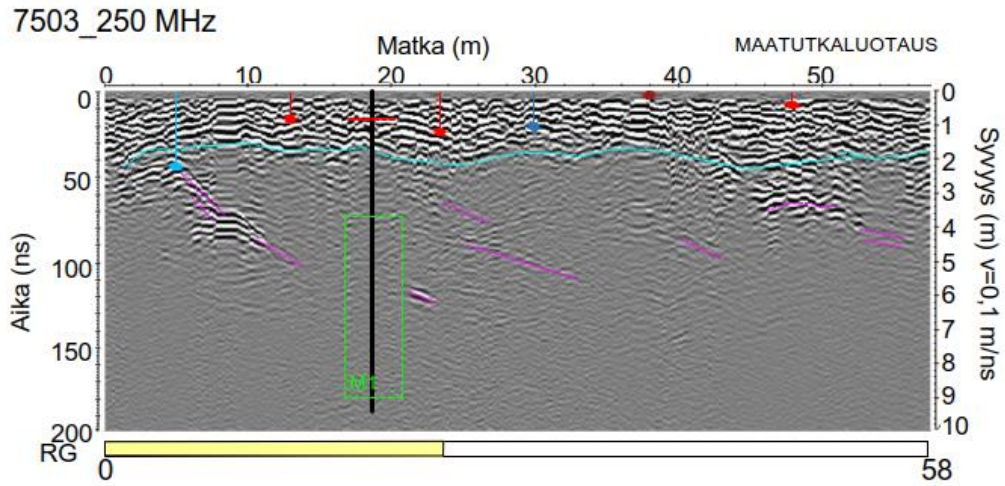


Kuva 32 Keilaniemen linjojen SL7501 ja ML7502 vertailu muuhun aineistoon. Tulkintaa on selitetty tekstissä.

Maatutkalinjoilla ML7503, ML7504 ja ML7505 tulkittu kalliokontakti ei ole täysin yhtenevä kairaushavaintojen kanssa. Kalliopinnan muoto on pitkälti samankaltainen, mutta syvyyksissä on eroja 0,2–2 metriä riippuen profiilista (Kuva 33). Linjalla ML7503

tulkittu kalliokontakti eroaa kairaushavainnoista 0,5–1,5 metriä, linjalla ML7504 0,2-2 metriä ja linjalla ML7505 0,2-1,5 metriä. Aineiston käsittelyssä käytetty aallon nopeus (Kappale 5.1.1) vaikuttaa tulkittavien rajapintojen syvyyteen. On hyvin mahdollista, että arvioitu nopeus $0,1 \text{ mns}^{-1}$ ei kuvaa todellista nopeutta maankamarassa kaikkialla tämän tutkimuksen alueella. Maatutka-aallon nopeus on suoraan verrannollinen syvyyteen ja muuttamalla nopeutta on mahdollista, että maatutkalinjalta tulkitut kalliokontaktit sopivat paremmin yhteen kairaushavaintojen kanssa. Linjojen ML7503, ML7504 ja ML7505 kohdalle ei osunut kartoitettujen heikkousvyöhykkeiden ekstrapoloituja jatkeita, joten tutkimuksen tarkoituksen mukaista vertailua ei näiden linjojen profiileista voinut tehdä.

Tulkittujen kalliopintojen alapuolelta havaittiin kuitenkin paikoin vahvojakin heijastavia rajapintoja, jotka näkyivät eri taajuuksilla tehdyissä profiileissa, joista osa voitaisiin tulkita heikkousvyöhykkeiksi, rikkonaiseksi pintakallioksi tai muuksi rakosysteemiksi, mutta referenssiaineiston puutteen vuoksi tulkinta on spekulointia (Kuva 33). Huomionarvoista on kuitenkin linjan ML7505 profiilissa noin 10–20 metrin etäisyydellä olevat vahvat heijasteet kalliopinnan alapuolella, jotka jatkuvat noin kuuden metrin syvyydelle (Kuva 33). Kohta risteää seismisen linjan SL7501 ja maatutkalinjan ML7502 kanssa. Näiltä linjoilta tehtiin tulkinta mahdollisesta kallion sisäisestä rakenteesta (M5 ja S3, Kuvat 32 ja 33). Kuvasta 2 havaitaan, että tällä kohtaa, linjan ML7505 ja ML7502 risteuksen halki kulkee GTK:n kaksiosaisen kallioperäselvityksen mukainen tulkittu lineamentti. On siis hyvin todennäköistä, että tällä kohdin kalliossa on mahdollisesti heikkousvyöhyke tai muu sisäinen rakenne, mutta rakennetta ei ole jostain syystä havaittu tunnelissa.



SELITTEET

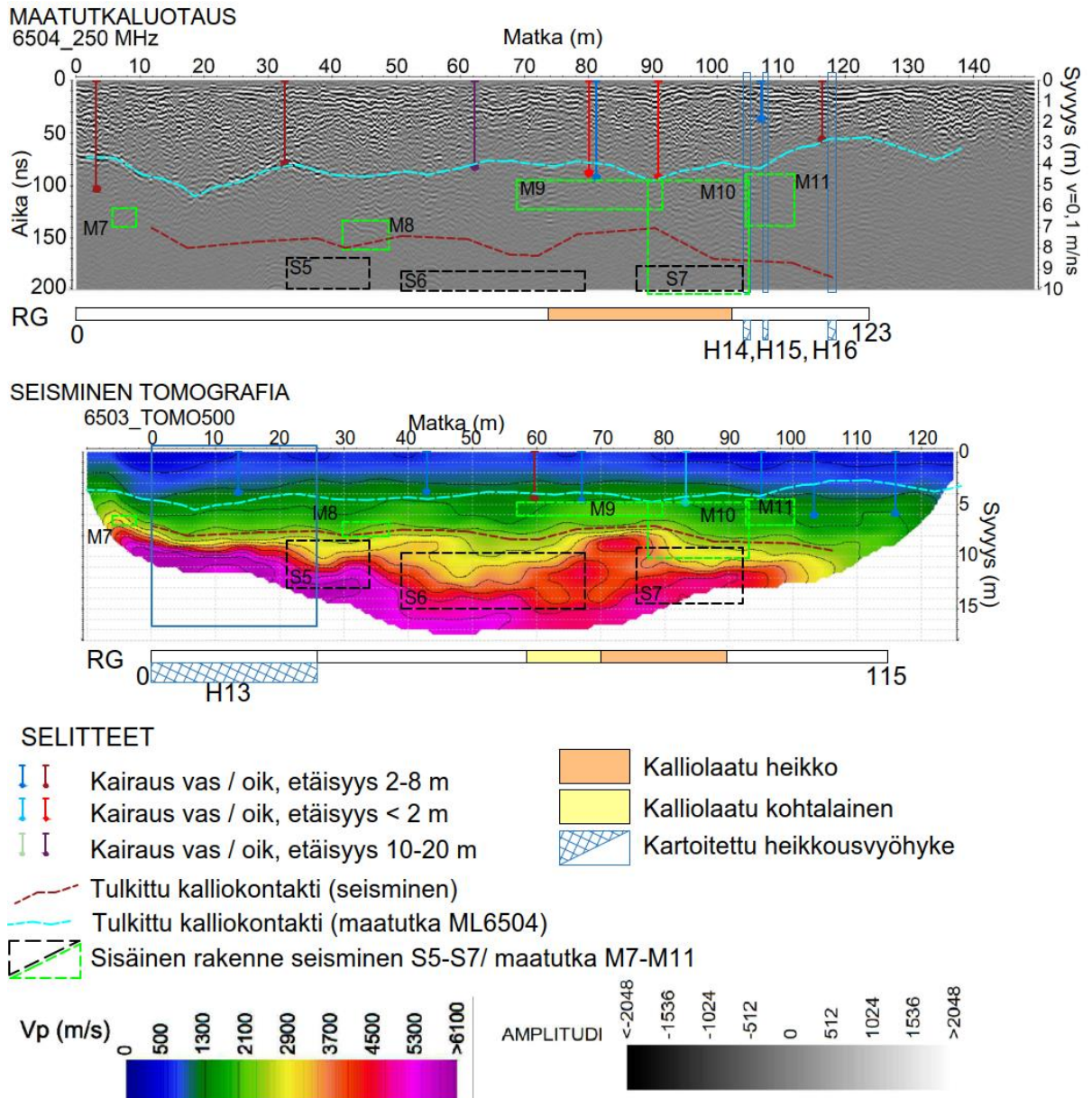
- | | |
|--|------------------------------------|
| ↓ ↑ Kairaus vas / oik, etäisyys 2-8 m | Orange box Kalliolaatu heikko |
| ↓ ↑ Kairaus vas / oik, etäisyys < 2 m | Yellow box Kalliolaatu kohtalainen |
| + SL7501 risteyskohta ja tulkittu kallio | Green box Kalliolaatu hyvä |
| Green box Sisäinen rakenne SL7501 S1-S4 / ML7502 M1-M6 | |
| Cyan line Tulkittu kalliokontakti | |
| Purple line Sisäinen rakenne | |

Kuva 33 Keilaniemen linjojen ML7503, ML7504 ja ML7505 vertailu muuhun aineistoon. Tulkintaa on selitetty tekstissä.

Otaniemessä geofysiikan linjat menivät ristiin ja poikittain toistensa kanssa, joten suoraan toistensa kanssa vertaamista ja tulkintaa ei voinut tehdä. Lisäksi maatulkuotukset tehtiin pitkälti osissa ja eri osien sijainnit eivät olleen tarkassa tiedossa. Niiden sijainnit arvioitiin alkuperäisten tulosten avulla. Kuvassa on 34 vertaillaan linjojen ML6504 ja SL6503 profiileja. Linjat ovat lähes saman suuntaisia 42–49 metrin etäisyydellä toisistaan. Linjojen nollakohdat eivät ole täysin samalla kohdalla (Kuvat 7 ja 8). Noin 20 metrin päässä linjasta SL6503 sijaitsevan linjan ML6505 tulokset jätettiin tästä vertailusta pois, koska sen aineisto oli kerätty pienissä osissa ja linjan loppuosien sijaintien tarkka määrittäminen oli hankalaa. Lisäksi linjan paalutus kulki päinvastaiseen suuntaan linjoihin ML6504 ja SL6503 nähden ja linjan loppuosa olisi ollut vertailujen kannalta merkittävämpi, koska linjan loppuosalle osui kartoitetun heikkousvyöhykkeen (H13) ekstrapoloitu jatke.

Kuvasta 34 havaitaan, että seismisen tomografian tulokset eivät ole täysin yhteneviä kairaushavaintojen kanssa. Tulkittu kalliokontakti eli seismisen nopeuden 2500 ms^{-1} rajapinta, ja kairausten kalliohavaintojen muodostama muoto on lähes samankaltainen, mutta syvyydessä ne poikkeavat toisistaan 2–3 metriä. Maatulkuotuksen profiilista tulkittu kalliokontakti seuraa melko hyvin kairausten havaintoja. Niiden syvyys poikkeaa toisistaan maksimissaan yhden metrin. Kuten linjoilla ML7503-ML7505, myös tässä kalliokontaktin syvyysvirhe voi johtua maatulkuotusaineiston käsittelyssä käytetystä aallon nopeudesta ($V=0,1 \text{ m ns}^{-1}$). On mahdollista, että virhe saataisiin korjattua muuttamalla käytettyä aallon nopeutta. Maatulkuotusprofiilin ja tomografiaprofiilin tulkitut kalliokontaktit eroavat toisistaan syvyys suunnassa 2–4 metriä. Maatulkuotuslinja ja seisminen taittumislouotuslinja kulkevat kuitenkin etäällä toisistaan, eikä voi siksi suoraan verrata keskenään. Geofysiikan linjoille ei osu myöskään samoja tunnelista kartoitettuja heikkousvyöhykkeitä. Taittumislouotuslinjan SL6503 alkuosaan osuu tunnelista kartoitetun heikkousvyöhykkeen (H13) ekstrapoloitujatke (Kuva 29). Tämä ei kuitenkaan näy linjan SL6503 tomografiaprofiilissa. Maatulkuotuslinjan ML6504 loppuosalle osuu kolmen tunnelista kartoitetun heikkousvyöhykkeen jatke (H14, H15 ja H16, Kuvat 30 ja 34). Heikkousvyöhykkeiden H14 ja H15 kohdalla on tulkittu maatulkuotuksen profiilista mahdollisia sisäisiä rakenteita. Osa tulkinnoista näkyy eri taajuuksien profiileissa ja osa vain toisessa (Kuva 17).

Tomografiaprofiiliin ja maatumkaluotausprofiiliin merkatut tulkinnat mahdollisista sisäisistä rakenteista (M7-M11 ja S5-S7) eivät suuremmalta osin korreloi keskenään sijainneilta eikä syvyyksiltä (Kuva 34). Kuten aiemmin todettiin, geofysiikan linjojen välisen etäisyyden vuoksi tulokset eivät ole suoraan verrattavissa. Poikkeuksen tekevät tulkinnat S7 ja M10, jotka sijaitsevat geofysiikan linjojen profiileissa noin metrivälillä 90–105 (Kuva 34). Geologisen kartoituksen mukaan kallio on tällä kohdin heikkoa. On mahdollista, että nämä anomaliat geofysiikan tuloksissa johtuvat heikkousvyöhykkeen rakosysteemeistä, mutta niitä ei ole joko tunnelista havaittu tai niitä ei ole määritetty heikkousvyöhykkeiksi.

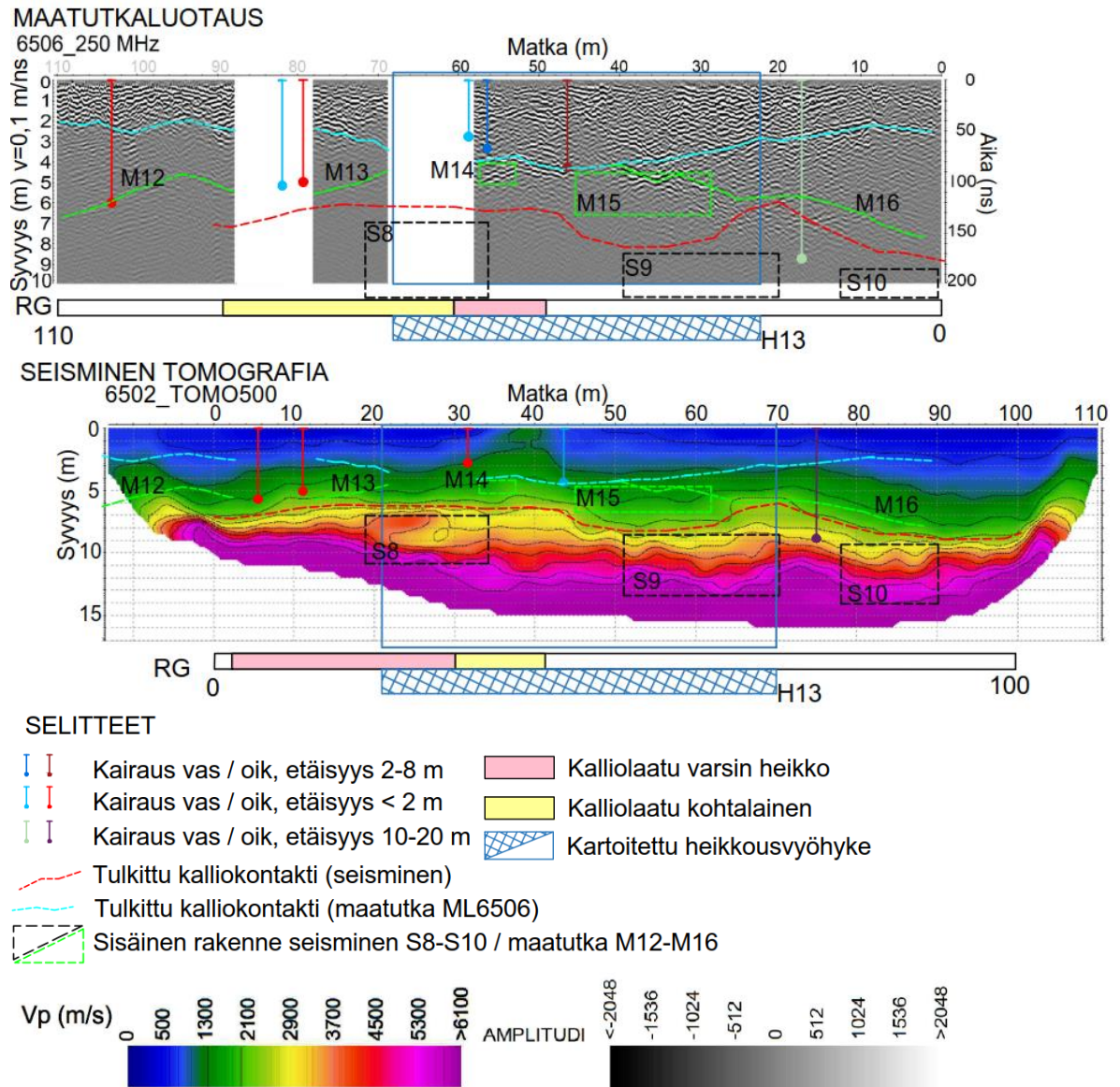


Kuva 34 Otaniemen linjojen ML6504 ja SL6503 vertailu muuhun aineistoon. Tulkintaa on selitetty tekstissä.

Linjat ML6506 ja SL6502 menevät lähes päällekkäin, hieman ristiin toisiinsa nähden (Kuvat 7 ja 8). Linjojen paalutukset menevät erisuuntaisesti ja Kuvaan 35 maatutkalinjan ML6506 profiili käännettiin tarkastelun helpottamiseksi toisin päin. Seismisen tomografian perusteella tulkittu kalliopinnan muoto on osin yhtenevä kairaushavaintojen kanssa, mutta syvyydessä se eroaa 1–3 metriä. Maatutkaprofiili oli monitulkintainen (Kuva 19) ja tulkittu kalliokontakti eroaa kairaushavainnoista 0,5–4 metriä (Kuva 35). Kaikkien eri taajuuksien profiileissa on niin sanotun kalliopinnan alapuolella yhteneviä heijasteita, jotka lähtevät kalliopinnasta viivostasi alaspäin linjan alussa ja lopussa (M12,

M13 ja M16, Kuva 35). Näistä tulkituista heijasteista, erityisesti M12 ja M13 osuvat täysin yhteen läheisten kairausten kanssa. Linjan alkuosalta lähin kairaus on yli 10 metrin päässä, joten vertailua ei näin ollen ole luotettavaa tehdä. Mutta huomion arvoista on, että seismisen tomografian tulkinnan mukaan kalliokontakti sijaitsee noin metrin päässä maatumkaluotausprofiilista tehdystä tulkinnasta M16 (Kuva 35). On siis oletettavaa, että kalliokontakti on syvemmällä linjojen alku ja loppuosalla kuin alun perin tulkittiin.

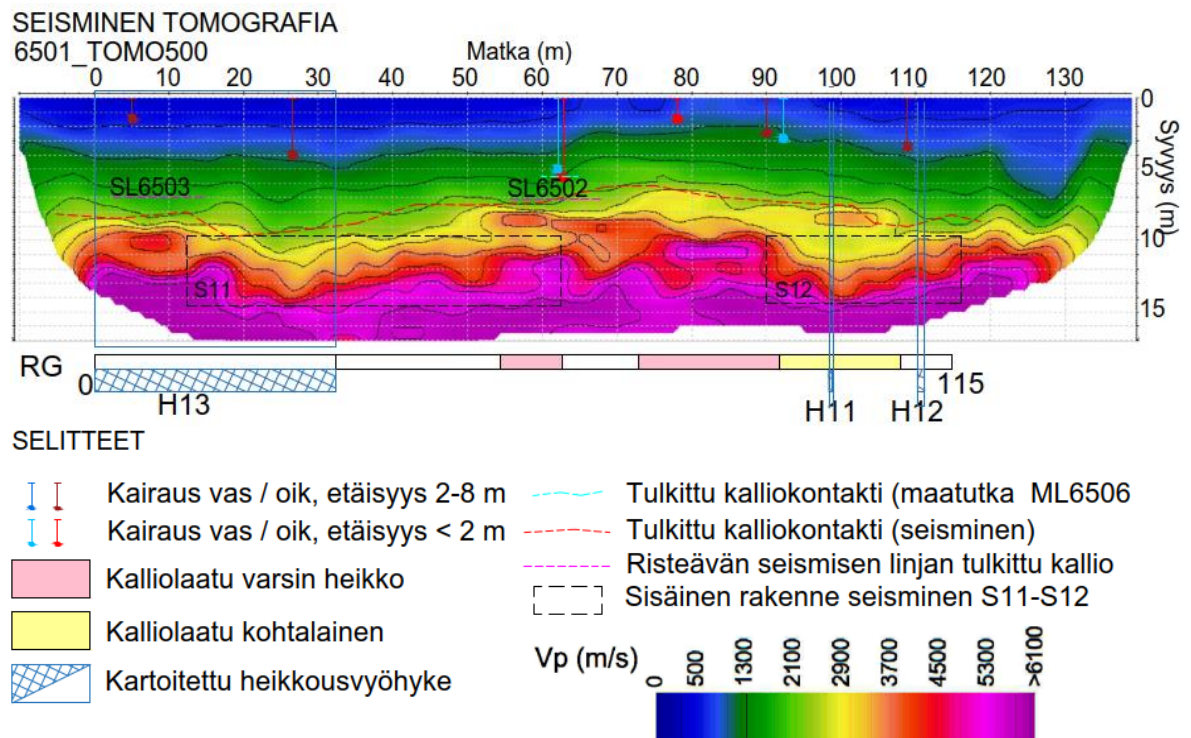
Tunnelista tehty havainto lähes vaaka-asentoisesta heikkousvyöhykkeestä ekstrapoloitiin havaintosuunnan mukaisesti ja se osui molempien linjojen keskivaiheille (Kuva 28 ja 35). Seismisessä tomografiaprofiilissa heikkousvyöhykkeen kohdalla on havaittavissa alkuun pieni muutos nopeuksissa (S8), minkä jälkeen nopeus pysyy melko tasaisena hetken aikaa ja lopulta hieman heilahtelee (S9). Toisin sanoen heikkousvyöhykkeen molemmat reunat havaitaan anomalioina tomografiaprofiilissa. Katkonaisen maatumkaluotauksen takia tomografiaprofiilissa näkyvän anomalian, S8, kohdalta ei ole maatumka-aineistoa. Muutoin heikkousvyöhykkeen kohdalla näkyy maatumkaprofiilissa heijasteita melko lähellä pintaa (M14 ja M15, Kuva 35). Tomografiaprofiilissa havaitaan lisäksi linjan loppuosalla hieman anomaalinen alue (S10), mutta maatumka-aineistosta tälle ei saatu referenssiä, koska 250 MHz:n syvyysulottuma ei ollut riittävä, eikä 50 ja 100 MHz:n tuloksista niitä muista syistä havaittu (Kuva 19).



Kuva 35 Otaniemen linjojen ML6506 ja SL6502 vertailu muuhun aineistoon. Tulkintaa on selitetty tekstissä.

Viimeisessä vertailukuvassa on esitetty linja SL6501 (Kuva 36). Kuvasta havaitaan, että tulkittu kalliokontakti on syvemmällä kuin kairausten havainnot. Tulkittu kalliokontakti ja kairausten havainnot eroavat toisistaan 2–4,5 metriä. Tulkitun kalliokontaktin muoto on kuitenkin lähes sama kuin kairaushavaintojen. Kuvaan on myös merkitty risteävien linjojen tulkintoja (Kuva 36). Tulkittu kallio linjalla SL6502 on täysin samalla korkeudella ja linjalla SL6503 noin metrin korkeammalla kuin linjan SL6501 tomografiaprofiilista tulkittu kalliokontakti. On epäselvää miksi taittumisloudatauslinjojen SL6501 ja SL6503 tomografinen inversio tuotti erilaiset nopeusmallit. Myös maatutkalinjan ML6506 tulkittu kallio eroaa linjan SL6501 tulkinnasta. Linjan ML6506

profiilit olivat monitulkintaisia, minkä vuoksi kalliopinnasta on tässä kaksi syvyyttä (Kuva 36). Linjan SL6501 loppuosaan osuu kaksi kapeaa, tunnelista kartoitettujen heikkousvyöhykkeiden H11 ja H12 ekstrapoloitua jatketta (Kuvat 27 ja 36). Samalla kohtaa, tomografian profiilissa on leveä anomaalinen alue (S12, Kuva 36). On mahdollista, että nämä kapeat lähes pystysuuntaiset heikkousvyöhykkeet aiheuttavat tomografian tuloksiin laajemman nopeuksien vaihteluiden kohdan. Profiilissa havaitaan myös toinen melko leveä anomaalinen alue, jossa seismiset nopeudet vaihtelevat poikkeuksellisen paljon (S11, Kuva 36). Linjan alkuosaa sivuaa tunnelista kartoitetun heikkousvyöhykkeen H13 ekstrapoloitu jatke. On mahdollista, että heikkousvyöhyke H13 aiheuttaa linjan SL6501 tuloksiin tulkitun poikkeama kohdan S11.



Kuva 36 Otaniemen linjan SL6501 vertailu muuhun aineistoon. Tulkintaa on selitetty tekstissä.

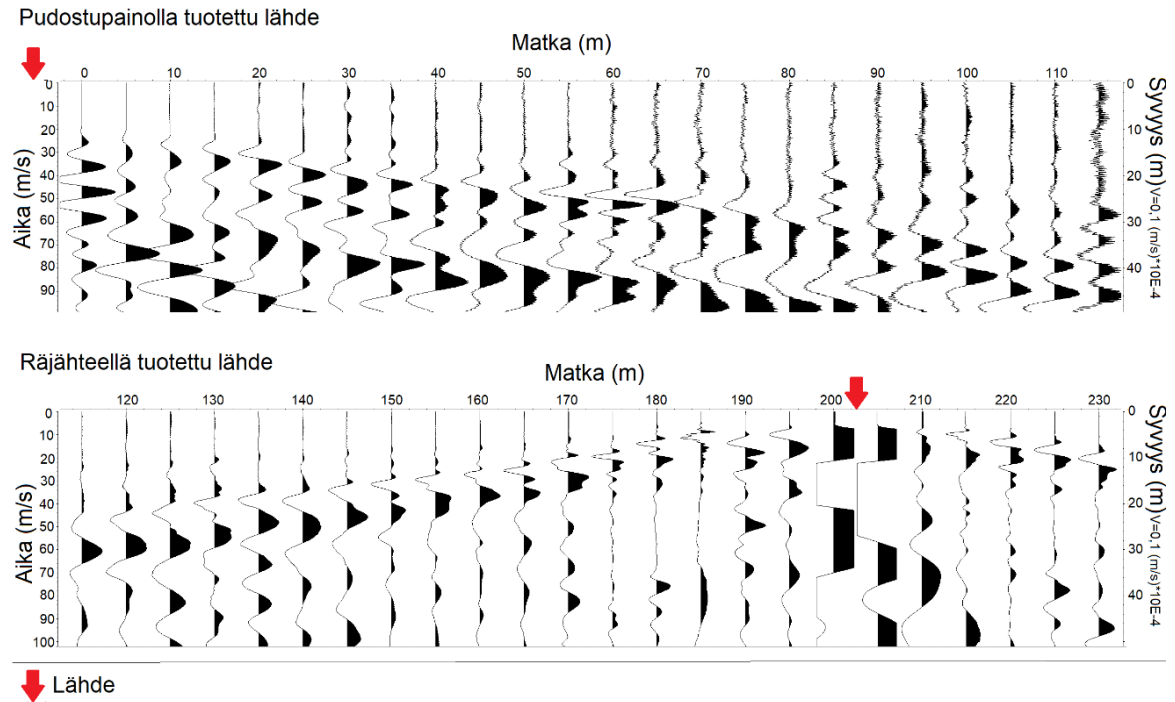
6.3 Keskustelu

6.3.1 Tutkimuksen haasteet

Geofysiikan menetelmien pohjalta tehtävään tulkintaan vaikuttaa moni asia. Maastotutkimusten toteutus, aineiston käsittely ja valitut parametrit voivat aiheuttaa epätarkkuutta aineistojen pohjalta tehtävään tulkintaan. Yksi merkittävimmistä maastotutkimusaineiston pohjalta tehtävään tulkintaan vaikuttavista tekijöistä on maankamarassa kulkevan aallon nopeus. Mikäli nopeutta ei pystytä luotettavasti arvioimaan, niin maastotutkimusaineiston pohjalta tulkittujen rajapintojen ja rakenteiden syvyyksissä voi olla virhettä. Tässä tutkimuksessa maastotutkimusaineiston käsittelyvaiheessa käytettiin maastotutkimusaineiston nopeutena oletusarvoista nopeutta $0,1 \text{ m ns}^{-1}$, mutta kuten tarkastelussa huomattiin, kalliopinnan syvyydet eivät olleet aina täysin yhteneviä referenssiaineiston kanssa. Käytetty nopeus vaikuttaa rajapintojen syvyyteen ja on hyvin mahdollista, että arvioitu nopeus $0,1 \text{ m ns}^{-1}$ ei kuvaa todellista nopeutta maankamarassa kaikkialla tämän tutkimuksen alueella. Maastotutkimusaineiston kulkema matka on suoraan verrannollinen sen nopeuteen, joten muuttamalla aikasyvyyskonversiossa käytettävää nopeutta tulkitut rajapinnat saattaisivat olla yhteneviä kairaushavaintojen kanssa. Esimerkiksi $0,01 \text{ m ns}^{-1}$ nopeuden muutos vaikuttaa syvyyteen puolella metrillä. Maastotutkimusaineiston perusteella tulkittujen rakenteiden syvyyksiä ei voitu myöskään luotettavasti tarkastella kartoitushavaintojen kanssa, koska tunnelin holvi sijaitsi syvemmillä, kun mikä 250 MHz :n taajuudella tehtyjen mittausten syvyys ulottuma. 50 ja 100 MHz :n tuloksista rakenteita ei pystytty kovin luotettavasti tulkitsemaan.

Seismisen aineiston käsittelyssä suurimmaksi ongelmaksi ilmeni aineiston laatu ja sen soveltuvuus tomografian tarkoitukseen. Aineistosta oli hankala ja paikoin mahdotonta havaita vastaanottimelle saapunut ensimmäinen saapuja. Mitä kauemmas lähteestä mentiin sitä epävarmempia ja häiriöisempiä vastaanottimien saamat signaalit olivat ja ensimmäisten saapuvien aaltojen poiminta perustui lähinnä arvioihin (Kuva 37). Kuvassa 37 on esitetty sekä pudotuspainolla että räjähteellä tuotetun seismisen aallon tulokset. Lähteen sijainti on merkitty punaisella nuolella (Kuva 37). Pudotuspainolla tuotetun kuvan lähde sijaitsi metrillä -10 ja räjähteellä tuotettu lähde metrillä $202,5$. Pudotuspainolla tuotetuissa aineistoissa taustakohina oli huomattavasti suurempaa kuin

räjähteellä tuotetussa (Kuva 37). Tämän perusteella on selvää, että seismisiä tutkimuksia tehdessä olisi syytä valita riittävän voimakas lähde seismisen aallon tuottamiseksi. Aineiston laatu vaikutti luotettavuuteen jo käsittelyvaiheessa. Tomografian hyödyntäminen seismisestä aineistosta oli epävarmaa ja perustui pitkälti kokeilu ja erehdys menetelmään. Kaikki työvaiheet tehtiin useampaan kertaan, pyrkimyksenä löytää paras mahdollinen sovitus.



Kuva 37 Esimerkki kuva pudotuspainon ja räjähteen tuottaman lähteen eroista. Punainen nuoli esittää lähteen sijaintia. Ylemmässä kuvassa lähteen etäisyys on -10 metriä ja alemmassa kuvassa 202,5 metriä. Pudotuspainolla tuotettu aineisto oli huomattavasti häiriöisempää ja signaalien poimiminen viimeisiltä vastaanottimilta usein mahdotonta häiriöiden takia.

Muita tämän tutkimuksen haasteita oli vertailuaineistojen ja geofysiikan aineistojen yhteen sovittaminen. Geofysiikan aineistojen puutteelliset tiedot muun muassa sijainti- ja korkeustiedoissa hankaloitti tulosten vertailua referenssiaineiston kanssa. Sijainti- ja korkeustietojen puute aiheutti epävarmuuksia tulosten kohdistuksiin ja täten tulkintaan. Samasta syystä osaa maatutkaluotausaineiston tuloksista ei voitu luotettavasti hyödyntää tulosten tarkasteluissa.

6.3.2 Tutkimuksen onnistumiset ja yleiset havainnot

Tämän tutkimuksen tarkoitus oli selvittää erityisesti se, kuinka tarkasti geofysiikan mittauksilla päästään käsiksi kallion sisäisiin rakenteisiin. Kuten alkuperäisten tulosten tarkastelussa huomattiin, heikkousvyöhykkeitä havaittiin jo alkuperäisissä geofysiikan tuloksissa, joskin vaihtelevalla tarkkuudella. Kaikkiaan geologisen kartoituksen yhteydessä havaittuja heikkousvyöhykkeitä tutkimuksen alueilla oli 21 (Taulukko 7), joista kahdeksan osui (ekstrapoloituna) geofysiikanlinjojen kohdalle. Alkuperäisten seismisten menetelmien tulosten perusteella havaittiin neljä poikkeamaa, jossa kallion seisminen nopeus viittasi rikkonaiseen kallioon. Näistä neljästä kolmen kohdalle osui geologisen kartoituksen yhteydessä tehty havainto heikkousvyöhykkeestä (Taulukko 10). Tulkinta ei kuitenkaan ollut täysin yhtenevä kartoituksen kanssa, joten päätelmä seismisten tulosten avulla havaituista heikkousvyöhykkeistä ei ole täysin yksiselitteinen. Pystyasentoinen heikkousvyöhyke havaittiin 5 metrin tarkkuudella ja vaaka-asentoisissa heikkousvyöhykkeissä kartoitettu heikkousvyöhyke oli huomattavasti leveämpi kuin mitä alkuperäinen tulkinta antoi ymmärtää (Taulukko 10). Seismisille linjoille osuvat kartoitetut heikkousvyöhykkeet (H4, H5, H11, H13) olivat 0,5–40,8 metriä leveitä (Taulukko 7). Käytetty geofoniväli (5 m) määrittää erotuskyvyn ja tätä ohuempien kerrosten paksuus- ja nopeustulkinnat ovat hyvin epävarmoja. On mahdollista, että kapeimmat heikkousvyöhykkeet eivät tästä syystä näkyneet alkuperäisissä tuloksissa.

Maatutkaluotausten alkuperäisistä tuloksista tulkittiin useita kallion sisäisiä rakenteita ja rakosysteemejä. Maatutkalinjojen kohdalle osui geologisen kartoituksen havaintojen mukaan 7 heikkousvyöhykettä, joista neljä havaittiin maatutka-aineiston tuloksissa. Suurin osa kartoitetuista heikkousvyöhykkeistä oli vaaka tai lähes vaaka-asentoisia ja nämä havaittiin alkuperäisissä maatutkaluotauksen tuloksissa 3,5–29 metrin tarkkuudella (Taulukko 10). Linjalle ML6504 ekstrapoloitua kolmea lähes pystyasentoista (kaade 75–80°) heikkousvyöhykettä ei havaittu maatutkalla. Nämä heikkousvyöhykkeet (H14, H15, H16) olivat 0,4–0,8 metriä leveitä (Taulukko 7). Teoriassa 0,1 m ns⁻¹ nopeuden avulla laskettuna 100 MHz:n taajuudella tehtyjen mittausten tuloksista on mahdollista havaita 0,25 metriä paksuja rakenteita ja 250 MHz:n taajuudella vielä pienempiä. Toisin sanoen maatutkaluotauksen erotuskyky ei ollut rajoitteena heikkousvyöhykkeiden havaitsemisessa. Heijastavan kohteen kaade antenniin nähden vaikuttaa vastaanotetun signaalin voimakkuuteen (Milsom 2010). Mikäli heijastavan kohteen kaade on

epäsopivassa kulmassa, niin aalto heijastuu vain vähän tai ei ollenkaan (Milsom 2010). Joten on mahdollista, että tästä syystä ne eivät näkyneet mittaustuloksissa.

Tämän tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli myös analysoida, että missä määrin geofysikaalisia mittauksia on hyödynnetty kallion rikkonaisuuden arvioinneissa. Tämä tutkimus perustui olettamukseen, että geofysiikan mittauksia on hyödynnetty kallioperäselvityksissä ja että selvittämällä geofysiikan tulkintojen tarkkuus, löydetään samalla syitä mahdollisille epätarkkuuksille. Näin geofysiikan aineistojen käsittely- ja tulkintaprosessia olisi voinut pyrkiä kehittämään ja parantamaan. GTK:n kaksiosainen kallioperäselvitys oli tehty ennen tässä tutkimuksissa käytettyjä geofysiikan mittauksia. Myöhemmin tehdyissä tarkennetuissa kallioperäselvityksissä ei mainita selkeästi, missä määrin ja miltä osin geofysiikkaa on hyödynnetty. Geofysiikan aineistojen käyttö heikkousvyöhykkeiden paikantamisessa pyrittiin selvittämään vertailemalla kallioperäselvityksen tulkintoja ja geofysiikan tulkintoja. Alkuperäisten tulosten tarkastelun ja vertailun perusteella voidaan todeta, että geofysiikan mittauksia ei ole suuressa määrin hyödynnetty lähtötietoina kallioperäselvityksessä (Taulukko 10). Näin ollen on vaikeaa löytää selityksiä sille, miksi joillakin alan asiantuntijoilla on käsitys, että geofysiikan perusteella tehdyissä tulkinnoissa on epätarkkuuksia. Käsitys ei näin ollen perustu todellisuuteen, koska tämän tutkimuksen perusteella näyttäisi, että geofysiikan aineistoja ei ole hyödynnetty kunnolla.

Taulukko 10 Yhteenveto alkuperäisten tulosten (kappale 6.1) vertailusta. Taulukossa vertaillaan onko geofysiikan tulkintojen kohdalla tehty kallioperäselvitykseen (kps) heikkousvyöhyketulkintoja ja onko geofysiikan menetelmillä havaittu kartoitettuja heikkousvyöhykkeitä (hv). Kartoitetut heikkousvyöhykkeet esitetty tarkemmin Kuvassa 11 ja Taulukossa 7.

Geofys. Linja	Onko tulkittu hv geofys. (kyllä=x)	Onko geofys. käytetty kps (kyllä=x)	Onko kartoitettu hv havaittu (kyllä=x)	Kartoitetun hv:n asento	Tulkinnan ja havainnon ero (m)	Lisätiedot
SL6501	x		x	pysty	5	Geofys tulkinnan sijainti eroaa kartoitetusta. Toista kartoitettua hv:ta ei havaittu
SL6502	x		x	lähes vaaka	40	Geofys. tulkinta kapeampi kuin kartoitettu
SL6503				lähes vaaka		Kartoitettuja havaintoja ei havaittu geofys. menetelmillä
SL7501	x		x	vaaka	20	Geofys. tulkinta leveämpi kuin kartoitettu havainto. Sijainti täsmää
ML6504	x	x		lähes pysty		Kartoitettuja havaintoja ei havaittu geofys. menetelmillä
ML6505	x		x	lähes vaaka	29	Geofys. tulkinta osuu vain reunasta kartoitettuun havaintoon
ML6506	x		x	lähes vaaka	3,5 ja 32	Geofys. tulkinta kapeampi kuin kartoitettu ja sijainti 3,5 m eri. Eri taajuuksien tuloksissa eroja.
ML7502	x	x	xx	vaaka	3,5–5 21–12	Kaksi kartoitushavaintoa osuu geofys. tulkintojen kanssa, mutta sijainti laajuus eroavat. Kps tulkinta täsmää osin
ML7503	x					Ei kartoitus havaintoja
ML7504	x					Ei kartoitus havaintoja
ML7505	x					Ei kartoitus havaintoja

Aineiston uudella käsittelyllä haluttiin testata, että saadaanko näin tuloksista tarkempia. Haluttiin myös pyrkiä kehittämään geofysiikan aineistojen hyödynnettävyyttä. Aineiston uudelleen käsittely antoi vaihtelevia tuloksia kalliokontaktin määrittämisen suhteen. Paikoin kalliokontakti saatiin geofysiikan menetelmillä kohtalaisen tarkasti määriteltä (Taulukko 11). Tämän tutkimuksen perusteella näyttää siltä, että kalliokontaktin saa ainakin tämän työn ympäristössä maatumaluuksella tulkittua varmemmin kuin seismisen tomografian perusteella (Taulukko 11).

Heikkousvyöhykkeiden havaitseminen uudelleen käsittelyn ja tulkinnan jälkeen antoi parempia tuloksia. Kuten aiemmin todettu, kaikkia kartoitettuja heikkousvyöhykkeitä ei saatu ekstrapoloitua geofysiikan linjoille, joten niiden tarkasteleminen ja vertaaminen jäi pinnalliseksi. Kahdeksasta heikkousvyöhykkeestä, jotka osuivat geofysiikan linjoille, uudelleen käsittelyn ja tulkinnan avulla havaittiin kuusi, joista kaksi hieman epävarmasti (Taulukko 11). Näistä kahdeksasta heikkousvyöhykkeestä osa näkyi useamman geofysiikan linjan tuloksissa.

Tomografian tuloksissa havaittiin useampia anomalioita, jotka voitaisiin tulkita kallion sisäisiksi rakenteiksi kuten heikkousvyöhykkeiksi. Yksin tomografian perusteella ei voinut päätellä anomalioita aiheuttavien kohteiden laajuutta tai esimerkiksi rakenteen kaadetta. Huomion arvoista kuitenkin on, että sekä pysty- että vaaka-asentoiset rakenteet aiheuttivat tuloksiin anomalioita. Maatutkaluotausmittausten tuloksissakin havaittiin useampia kohteita, jotka voitaisiin tulkita sisäisiksi rakenteiksi. Sisäinen rakenne ei kuitenkaan aina tarkoita heikkousvyöhykettä. Maatutkaluotauksen tuloksissa heijastavan kohteen kaadetta voidaan arvioida. Vaaka- ja lähes vaaka-asentoiset rakenteet aiheuttavat tuloksiin vahvempia heijasteita, kun taas pysty ja lähes pysty asentoiset saattavat jäädä helpommin huomaamatta. Tämän vuoksi eri taajuuksilla tehtyjen mittausten tuloksia on syytä verrata keskenään, jotta havaitaan paremmin myös lähes pystyasentoisia heijastavia rajapintoja. Tämän tutkimuksen yksi merkittävä ja samalla ilmeinen havainto oli, että useamman menetelmän ristiin vertailun avulla saadaan parempia tuloksia ja mahdolliset sisäiset rakenteet havaitaan varmemmin.

Taulukko 11 Yhteenveto uudelleen käsiteltyjen aineistojen havainnoista. Taulukossa vertaillaan kappaleessa 6.2 esiteltyjä uudelleen käsiteltyjen aineistojen tuloktujen tuloksia kalliopinnan syvyyden, muodon ja havaittujen heikkousvyöhykkeiden osalta (hv= heikkousvyöhyke ja kk=kalliokontakti). Havaittujen heikkousvyöhykkeiden tarkemmat tiedot on esitetty Kuvassa 11 ja Taulukossa 7.

Geofys. linja	Kalliopinnan ero (m) geofys. vs kairaus	Kk muoto sama? (Kyllä=x)	Kk syvyys sama (kyllä=x)	Havaittu hv (sulussa epävarma)	Lisätiedot
SL6501	2–4,5	x		H11 ja H12	Hv:n kohdalla leveä nopeuspoikkeama
SL6502	1–3	x		H13	tulkinnat osuvat hv:n reunoille, mutta ei kata koko aluetta.
SL6503	2–3	x		–	H13, ei näy profiilissa
SL7501	0–1,5	x		H5	Hv:n tulkittu sijainti 2 m eri kohdassa ja kokonaisuus n.3 m leveämpi. H4 näkyy hyvin epävarmasti seismisessä
ML6504	0–1	x	x	(H14 ja H15)	H16 ei näy profiilissa ja H14 ja H15 hieman epävarmat
ML6505	–			–	Ei mukana vertailussa
ML6506	0–1	x	x	(H13)	Aineiston puuteen vuoksi ei täysin vertailtavissa.
ML7502	0–1,5	x	x	H5	heijasteet ei yhden suuntaisia, ja tuloksissa myös muita vastaavan kaltaisia
ML7503	0,5–1,5	x		–	
ML7504	0,2–2		(x)	–	Kk osin yhtenevä referenssiaineiston kanssa
ML7505	0,2–1	x		–	Linjojen risteyskohdassa mahdollinen hv, joka tulkittu kallioperäselvityksessä

Lisähavaintona tätä tutkimusta tehdessä tehtiin havainto, että alkuperäisellä seismisellä menetelmällä, GRM-menetelmällä, lasketut seismiset nopeudet kalliiossa olivat korkeampia kuin tomografisen inversion tuottamat nopeudet. Alkuperäisten tulosten mukaan esimerkiksi Keilaniemessä linjalla SL7501 metrillä 65 2,6 metrin syvyydellä (tulkittu kallio) seismiseksi nopeudeksi on saatu 5000 ms^{-1} , kun tomografian perusteella tulos samalla sijainnilla, 4 metrin syvyydessä (tulkittu kallio) seisminen nopeus oli 2500 ms^{-1} . Toisessa vertailu kohdassa linjalla SL7501 metrillä 150 alkuperäisten tulosten mukaan kalliokontakti oli 1,7 metrin syvyydellä ja seisminen nopeus 5500 ms^{-1} , kun tomografian perusteella tulkittu kalliokontakti oli lähes samalla syvyydellä (1,5 m), mutta nopeus 2500 ms^{-1} . Uudelleen käsittelyssä nopeudet laskettiin ensimmäisten saapuneiden

signaalien perusteella. Alkuperäisten tulosten laskentaperusteet eivät näy aineistossa, joten syy nopeuseroihin ei selvinnyt.

6.3.3 Tutkimustulosten vertailu kirjallisuuteen

1980-luvulta lähtien maatutkaluotausta on käytetty erilaisissa maa ja kallioperän tutkimuksissa. Kirjallisuudesta löytyy monenlaisia sovellutuksia sen käytöstä (esim. Seol et al. 2001, Porsani et al. 2006, Leihnman et al. 2008, Markovaara-Koivisto et al. 2014, Baek et al. 2017, Molron et al. 2020). Esimerkiksi Porsani et al. (2006) käyttivät tutkimuksissaan 25, 50 ja 100 MHz:n antennoja ja havaitsivat kallion sisäisiä rakenteita aina 25 metrin syvyyteen asti. Porsani et al. (2006) totesivat kuitenkin, että 100 MHz:n antennilla tulkittavia heijasteita saatiin noin 15 metrin syvyydeltä. Tämä tukee hyvin tässä tutkimuksessa tehtyä havaintoa, jonka mukaan 100 MHz:n taajuuden tuloksissa heijasteita havaittiin 15 metrin syvyydelle asti. Tämän tutkimuksen Maatutkaluotausaineiston uudelleen käsittelyssä havaittiin, että eri taajuudella tehtyjen mittausten tulokset monin paikoin tukivat toisiaan (Kappale 5.1.2). Yleisesti 100 MHz:n tulosten profiileista kalliokontakti oli selkeimmin tulkittavissa, mutta kallion sisäiset rakenteet havaittiin parhaiten 250 MHz:n tuloksissa. 50MHz:n tulokset olivat kaikin puolin aiempiin verrattuna heikoimmat. Syvyysero tulkittujen heijasteiden välillä eri taajuuksien tuloksissa oli vähimmillään puoli metriä ja enimmillään kaksi metriä, mikäli ei ota huomioon linjan ML6505 tuloksia, jotka olivat huomattavasti epätarkemmat.

Useamman eri tutkimuksen mukaan maatutkalla voidaan havaita valtaosa raoista, mutta niiden havaitsemiseen vaikuttaa muun muassa rakotäyte ja raon kaade. Molronin et al. (2020) tekemän tutkimuksen mukaan raot, jotka olivat vaaka- tai lähes vaaka-asentoisia voitiin havaita maatutkalla melko varmasti. Molronin et al. (2020) mukaan maatutkalla voitiin havaita 80 % avoimista raoista, joiden kaade oli alle 25 astetta. Samassa tutkimuksessa todettiin, että kaikista alle 25 astetta kaatuvista raoista havaittiin vain 42 prosenttia ja kaikista raoista riippumatta siitä minkä asentoinen rako on tai mitä sen rakotäyte on, havaittiin vain 5,5 %. Kahdessa eri tutkimuksessa todettiin, että täysin pystyasentoisia kapeita rakenteita ei voida havaita maatutkalla (Seol et al. 2001, Porsani et al. 2006). Toisaalta Porsani et al. (2006) mukaan lähes pystyasentoisista rakenteita voidaan havaita, mikäli ne ovat riittävän isoja ja rakotäyte on vesipitoisempaa, kuten esimerkiksi savea. Seol et al. (2001) mukaan esimerkiksi siirroksen kaade saadaan selville

maatutkaluotausten avulla, mikäli kaade on vaaka tai maksimissaan 45 asteen kulmassa. He korostivat tutkimuksessaan myös erilaisten visualisointien tärkeyttä tulkitsemisen helpottamiseksi (Seol et al. 2001). Tämän tutkimuksen lähes pystyasentoiset heikkousvyöhykkeet voitiin havaita ristiin vertailemalla seismisen tomografian tuloksia. Yksin maatutkalla tulkinta olisi ollut melko epävarmaa.

Markovaara-Koiviston et al. (2014) mukaan rakotäyte vaikutti vahvasti rakojen havaitsemiseen maatutkalla. Heidän mukaansa ilmatäytteinen rako on vaikeampi havaita maatutka-aineistosta kuin vesitäytteinen. Markovaara-Koiviston et al. (2017) mukaan vesitäytteisistä raoista voidaan havaita ne, mitkä ovat kullekin taajuudelle teoriassa mahdollista, eli raot, joiden koko on neljäs osa maatutkasignaalin aallonpituudesta. Ilmatäytteisiä rakoja ei havaittu yhtä hyvin (Markovaara-Koivisto et al. 2017). Tässä tutkimuksessa ei havaittu rakotäytteen vaikutusta sisäisen rakenteen havaitsemiseen. Rakotäytettä kuvasti tässä tutkimuksessa Ri-luokitus, vaikka varsinainen rakotäyte ei Ri-luokitukselta selviäkään. Maatutkalla havaittiin vaaka-asentoisista heikkousvyöhykkeistä halkeamarakenteinen (RiI) ja lähes pystyasentoisista ruhjerakenteinen (RiIV), mutta myös osa näitä vastaavista jäi havaitsematta. Savirakenteisia (RiV) heikkousvyöhykkeitä ei osunut maatutkalinjojen kohdalle, joten siltä osin vertailua ei voitu tehdä.

Seismisiä luotauksia on käytetty pitkään insinööri-geologiassa (Peltoniemi 1988). Seismisen tomografian käyttö on lisääntynyt pohjarakentamisen selvityksissä (Palmer 2009). Perinteisiin menetelmiin nähden aineiston käsittely on tomografian tarkoituksiin nopeampaa ja tulokset ovat visuaalisesti selkeämmin luettavissa (Palmer 2009). Tässä tutkimuksessa haluttiinkin selvittää, minkälaisia tuloksia uudella aineiston käsittelymenetelmällä saadaan aikaan. Seismisen tomografian hyödyntäminen vaatii kuitenkin jo aineiston keräämisvaiheessa toisenlaista huomioita eikä saatavilla ollut seisminen aineisto mahdollisesti täysin sovelnut tomografian tuottamiseen. Lisäksi Lehmann et al. (2008) mukaan lähteen ja geofonien väliset etäisyydet tulisi asettaa pienemmäksi, jotta saadaan muodostettua kattavampi jatkuva seisminen nopeusjakauma maankamarasta. Tätä tutkimusta tehdessä havaittiin, että seismisen tomografian yksikerrosmalli tuotti paremman tuloksen. Tätä havaintoa tukee Palmerin (2009) tekemän tutkimuksen johtopäätös, jossa todettiin, että seismisen tomografian yksikerrosmallit

tuottavat hyödyllisiä tuloksia pohjarakentamisen tarkoituksiin. Tämän tutkimuksen seismisen tomografian tuloksille sädepolkuanalyysi antoi lähes kaikissa tilanteissa alle 2 prosentin poikkeaman (Taulukko 9), mikä on Sandmeier (2018) mukaan raja luotettavan tuloksen saamiseksi. Eräässä tutkimuksessa (Rinaldi et al. 2019) saatiin kirjoittajien mukaan lähes 18 prosentin RMS-poikkeamalla kohtalainen tulos. Rinaldi et al. (2019) mukaan poikkeaman suuruudesta huolimatta seismisen tomografian tuottamat nopeuskerrokset vastasivat kallionäytekairauksista mitattuja nopeuksia. Tässä tutkimuksessa kalliokontaktin syvyys ei kuitenkaan vastannut kairausten havaintoja. Seisminen taittumisluotaus perustuu olettamukseen, että seisminen nopeus maankamarassa kasvaa alaspäin mentäessä. On mahdollista, että tutkimuksen alueella maankamarassa on kerroksia, jossa erittäin rikkonaisen kallion päällä on kerros hyvin tiivistä maa-ainesta, jonka P-aallon nopeus on suurempi kuin alla olevan rikkonaisen kallion. Toinen vaihtoehto on, että tutkimuksen alueella on maankamarassa nopeuskerroksia, joita seisminen menetelmä ei ole erotuskyvyn rajoissa havainnut. Näiden esimerkkien tilanteissa seismisiin tuloksiin voi aiheutua virheitä.

Aiempi tutkimustieto ja kirjallisuus viittaavat vahvasti siihen, että seismisillä luotauksilla ja maatulokaluotauksilla saadaan tarkkojakin tuloksia aikaan sisäisten rakenteiden paikantamisessa. Myös tämän tutkimuksen tulosten perusteella voidaan todeta, että geofysiikan avulla – oikein hyödynnettynä – voidaan havaita sisäisiä rakenteita. Toisaalta tätä tutkimusta tehdessä epävarmuuksia ja epätarkkuuksia aiheuttavia tekijöitä oli jonkun verran, jonka vuoksi tuloksiin on syytä suhtautua varauksella. Myös heikkousvyöhykkeiden laajuutta ei saatu tarkasti arvioitua, vaikka suuntaa antavia arvioita voitiinkin tehdä. Lisäksi on syytä huomioida, että todellisuudessa geologiset rakenteet eivät välttämättä ole suorina, jatkuvia elementtejä ja lineaarisesti ekstrapoloitavissa. Tämän vuoksi tässä tutkimuksessa käytetty tarkastelumenetelmä ei välttämättä anna täysin luotettavia tuloksia, kun kartoitettu rakenne ei ole suoraan geofysiikan linjojen kohdalta.

6.3.3 Suosituksia geofysiikan aineistojen tehokkaampaan käyttöön

Kalliosuunnitteluprojekteissa geofysiikan menetelmien tehokas käyttö vaatii aktiivista keskustelua suunnittelijan ja maastotutkimuksen tekijän kesken jo projektien alkuvaiheissa. Geofysiikan mittaukset tulisi suunnitella niin, että referenssiaineistoja

voidaan hyödyntää tulkinnassa mahdollisimman tehokkaasti. Esimerkiksi siten, että mittauslinjat kulkevat sellaisten referenssipisteiden yli, joita voidaan käyttää syvyyksien kalibrointiin. Maastotutkimuksia suunniteltaessa olisi suotavaa suunnitella mittalinjat siten, että kukin mittalinja saadaan suoritettua yhtenä mittauksena, mikäli se on mahdollista. Palasista muodostuvan mittalinjan tulokset saattavat olla hankalasti tulkittava ja aineiston käsittelyyn käytettävä työmäärä kasvaa, koska jokainen palanen käsitellään erikseen. Mikäli yhtenäisten linjojen mittaaminen ei ole mahdollista on tulkintojen tarkkuuden kannalta erityisen tärkeää, että sijaintitiedot ja mittausaineisto tulee dokumentoitua tarkasti. Tarkasti dokumentoitua aineistoa on myös mahdollista hyödyntää jatkossa paremmin. Lisäksi tulkinnan kannalta olisi hyvä, että mittauksia suoritettaisiin samoilta linjoilta eri menetelmiä käyttäen ja esimerkiksi kohtisuoraan toisiaan vasten riittävän tiheästi, jotta kallioperästä saadaan mahdollisimman hyvä kuva mahdollisimman kolmiulotteisesti. Mahdollisuuksien mukaan olisi myös hyvä, mikäli tulkintaa geofysiikan aineistoista voitaisiin tehdä 3D-ympäristössä. Tärkeimpänä huomiona jatkossa kuitenkin olisi ottaa geofysiikan mittaukset mukaan kallioperäselvityksiin enemmissä määrin.

Maatutkaluotausmittausten ja sen pohjalta tehtävän tulkinnan yksi merkittävimmistä tekijöistä on maankamarassa kulkevan aallon nopeus. Nopeus vaikuttaa tulkittavien rajapintojen syvyyteen ja voi aiheuttaa virheitä tulkintaan, mikäli nopeus on arvioitu väärin. Tässä tutkimuksessa käytetty arvo oli yleisesti käytetty arvio, jota käytettiin paremman tiedon puutteessa. Tämä huomioiden maastotutkimuksia suunniteltaessa on suotavaa suunnitella mittalinjat joko niin, että mittalinja kulkee tunnettujen kairausten kautta, jotta niiden avulla saadaan syvyydet kalibroitua. Toinen vaihtoehto on tehdä maastotutkimuksen yhteydessä esimerkiksi CMP (eng. common mid-point) -mittauksia. CMP-mittausten avulla saadaan kattavampi ja usein parempi arvio maankamaran nopeuksista ja tätä aineistoa voidaan käyttää GPR aineiston aikasyvyyskonversiossa (Jacob ja Urban 2015). Mikäli käytössä on tarkempi arvio nopeudesta tai syvyydet saadaan muulla tavoin kalibroitua, ovat maatutkalla tehtävät tulkinnat luotettavampia. Maatutkaluotausaineiston lopputuloksen kannalta on lisäksi tärkeää tehdä havaintoja samalla kuin aineistoa käsitellään. Käsittelyn eri vaiheissa on mahdollista löytää aineistosta piirteitä, joita voi tuoda esille tulkinnan helpottamiseksi. Maatutkaluotausaineiston pohjalta tehtävässä tulkinnassa on tärkeää yhteen sovittaa eri taajuuksella tehtyjä mittauksia ja käyttää tulkinnan apuna mahdollisia referenssiaineistoja.

Seismisiä taittumisluotauksia tehdessä on suositeltavaa, että seismisen aallon lähde on riittävän voimakas, jotta ensisaapujat voidaan tunnistaa taustakohinasta riittävällä varmuudella. Epävarmoissa tilanteissa lähde on syytä testata ennen kuin suoritetaan kaikki mittaukset riittämättömillä lähteillä. Jälkikäteen aineistoa ei voi parantaa, mikäli aineisto on jo mittausvaiheessa suoritettu liian heikoilla lähteillä. Lisäksi seismisissä mittauksissa käytettävä geofoniväli tulisi sovittaa pienemmäksi, mikäli arvellaan referenssitiedon perusteella kallion olevan lähellä pintaa. Geofoniväli määrittää seismisen aineiston resoluution ja mikäli rakenteen paksuus on alle geofonivälin, ei sitä voida luotettavasti määrittää. Erityisesti jos seismistä aineistoa halutaan käyttää myös tomografian tuottamiseen, geofonivälin tulisi olla tiheämpi.

Lisäksi olisi syytä pohtia olisiko muista geofysiikan menetelmistä tukea heikkousvyöhykkeiden paikantamisessa. Magneettinen menetelmä yhdessä seismisten taittumisluotausaineiston kanssa on joidenkin tutkimusten mukaan antanut hyviä tuloksia (Hanafy et al. 2010). Magneettisen aineiston antama informaatio tulee suoraan kallioperästä, joten se antaa tietoa kivilajivaihteluista, kallioperän rakenteista ja rikkonaisuudesta, mutta se on melko herkkä sivilisaation häiriöille kuten metalliputkille ja aidoille (Huotari ja Wennerström 2017). Metalliputket ja aidat on usein kuitenkin asetettu hyvin lähelle pintaa, joten niiden vaikutus mittaustuloksiin voi olla vaihdella (Milsom 2010).

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän tutkimuksen perusteella maatumkaluotaukset soveltuvat kallion sijainnin paikantamiseen. Tomografian soveltuvuutta kalliopinnan paikantamiseen tulisi tutkia uudelleen toisenlaisella aineistolla. Heikkousvyöhykkeitä voidaan paikantaa sekä seismisen tomografian että maatumkaluotauksen avulla ja näitä menetelmiä tulisi enemmän hyödyntää kallioperäselvityksissä. Useampaa aineistoa ristiin vertaamalla saadaan heikkousvyöhykkeitä ja muita sisäisiä rakenteita tulkittua paremmin. Aineistojen pohjalta tehtävä tulkinta vaatii referenssiaineistoa, jonka avulla geofysiikan tulokset voidaan kalibroida. Geofysiikan mittaukset tulisi suunnitella riittävän laajoina siten, että eri menetelmien mittauslinjoja on sekä päällekkäin että ristiin keskenään. Näin saadaan muodostettua mahdollisimman hyvä kuva kallioperästä ja mahdolliset sisäiset rakenteet ovat selkeämmin tulkittavissa. Geofysiikan aineiston laatu ja niiden dokumentointi nousi merkittävään rooliin tässä tutkimuksessa. Geofysiikan aineiston laatuun tulisi panostaa jo maastotutkimuksia tehdessä, jotta aineiston uudelleenkäyttö olisi paremmin mahdollista. Aiemmat aiheesta tehdyt tutkimukset viittaavat vahvasti siihen, että seismisillä menetelmillä ja maatumkaluotauksilla päästään hyviin tuloksiin kallion sisäisten rakenteiden havaitsemisessa. Tässäkin tutkimuksessa tulokset olivat lupaavia, mutta tämän tutkimuksen kaltaista vertailevaa tutkimusta ja prosessin kehitystä olisi hyvä jatkaa toisenlaisella aineistolla. Laadukkaamman aineiston avulla geofysiikan menetelmistä on mahdollista saada tehokkaampia ja menetelmien potentiaali saadaan paremmin kalliorakennusprojektien käyttöön.

8. KIITOKSET

Kiitän silloista esihenkilöäni Paula Kajavaa aihealueen ehdotuksesta ja ohjaajani Emilia Koivistoa aiheen visioinnista. Emilia oli tärkeänä tukena työn alkuvaiheesta aivan loppuun asti, vaikka hänen oma työkuvansa matkalla vaihtuikin. Hän jaksoi puskea minua eteenpäin tsemppaavilla sanoilla ja kehitysehdotuksilla, kun ajoittain meinasin lannistua. Olen lisäksi kiitollinen, että sain käyttööni laajennetun yliopistolisenssin, jotta seismisen tomografian hyödyntäminen ReflexW-ohjelmistolla oli mahdollista. Minulle tärkeää oli saada tehdä tutkimukseni aiheesta, josta olen aidosti kiinnostunut, joten kiitän työnantajaani Kalliosuunnittelu Oy Rockplan Ltd:tä tämän mahdollistamisesta ja Länsimetro Oy:tä aineiston tarjoamisesta.

Haluan myös kiittää perhettäni. Ensiksi puolisoani, joka tuki, tsemppasi ja rauhoitti aina kun sitä tarvitsin. Suuren kiitoksen haluan esittää myös vanhemmilleni. Tämä projekti sai alkunsa, kun kuopuksemme oli 3 kuukautta vanha ja tuli päätökseen hänen ollessa lähes kaksivuotias. Olen kiitollinen, että vanhempani tarjosivat minulle vanhempainvapaalla ollessani mahdollisuuksia tehdä tutkimustani rauhassa muutoinkin kuin keskellä yötä. Viimeiseksi haluan kiittää myös siskoani ja kaikkia ystäviäni, jotka jaksoivat kuunnella selityksiäni seismisten aaltojen käyttäytymisestä, aaltojen vaimenemisesta, kallioperän jännitystiloista, Q-parametreista ja niin edelleen. Te olitte korvaamaton henkinen apu minulle. Kiitos.

VIITELUETTELO

- Baek, S.H., Kim, S.S., Kwon, J.S. ja Um, E.S. 2017. Ground penetrating radar for fracture mapping in underground hazardous waste disposal sites: a case study from an underground research tunnel, South Korea. *Journal of Applied Geophysics* 141, 24–33. doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.03.017.
- Barton, N., Lien, R. ja Lunde, J. 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design Tunnel Support. Springer-Verlag, *Rock Mechanics* 6, 189–236.
- Destia ja Pohjatekniikka Oy 2009. Länsimetro tutkimusraportti, Kallionäyttekairaus SK-201, -210, -211, -212, -228, -229, -230 ja -231. 18.05.2009, Espoo.
- Elminen, T., Ikävalko, O., Kuivamäki, A., Laine, M., Wennerström, M. ja Vaarma, M. 2012. Kallioperän rakennettavuuteen liittyvien tulkintojen arviointi pääkaupunkiseudulla tunnelikartoitusten ja -tutkimusten perusteella, johtopäätökset. Geologian tutkimuskeskus, arkistoraportti 11/12.
- Hanafy, S.M., Aboud, E. ja Mesbah, H.S.A. 2010. Detection of subsurface faults with seismic and magnetic methods. *Saudi Society for Geosciences, Springer*, 163–172 doi10.1007/s12517-010-0255-6.
- Hinkkanen, H. ja Klockars, J. 2009. Länsimetro, tutkimusohjelma KR 1700 344 TU KAT2, Kallionäyttekairaukset. Pöyry Environment Oy, 1.12.2009, raportti nro: 67090015.BGK1.KON.
- Ikävalko, O ja Mattila, J. 2009a. Länsimetron kallioperän rikkonaisuusarviointi Espoon alueella 2008. 29.1.2009, Geologian tutkimuskeskus.
- Ikävalko, O ja Mattila, J. 2009b. Länsimetron kallioperäselvitys, Länsimetron kallioperätulkintojen tarkennus Espoon alueella uusien tutkimustulosten perusteella 2008. 16.3.2009, Geologian tutkimuskeskus.
- Ikävalko, O., Pajunen, M., Wennerström, M., Elminen, T., Arkimaa, H., Wasenius, P., ja Ajlani, M. 2007. Länsimetron kallioperän rikkonaisuusarviointi Matinkylän ja Ruoholahden välillä. Osa II. Kallioperän ongelmakohtien ja rakoiluominaisuuksien kuvaus. Geologian tutkimuskeskus, raportti K21.42/2007/34.
- Ikävalko, O. ja Westerlund, G. 2010. Länsimetron kallioperätulkintojen tarkennus uusien tutkimustulosten perusteella 2010. 12.11.2010. Geologian tutkimuskeskus ja Rockplan.
- Jacob, R. W. ja Urban, T. M. 2015. Ground-Penetrating Radar V ating Radar Velocity Determination and Pr elocity Determination and Precision ecision Estimates Using Common-Mid-Point (CMP) Collection with HandPicking, Semblance Analysis, and Cross-Correlation Analysis: a Case Study and Tutorial for Archaeologists. *Bucknell University. Faculty Journal Articles*.
- Kahraman, S. 2007. The correlations between the saturated and dry P-wave velocity of rocks. *Ultrasonics, Vol 46, Issue 4*, 341–348. doi.org/10.1016/j.ultras.2007.05.003.
- Korhonen, K-H., Gardemeister, R., Jääskeläinen, H., Niini, H. ja Vähäsarja, P. 1974. Rakennusalan kallioluokitus. raportti VTT GEO 12, 78 s.
- Lehmann, B., Orłowsky, D. ja Misiek, R. 2008. Eksploration of Tunnel Alignment using Geophysical Methods to Increase Safety for Planning and Minimizing Risk. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 43, 105–116. DOI 10.1007/s00603-009-0028-2.
- Lehtimäki, J. 2005. Refraktioseismiset luotaukset Kempeleellä 2003, 24.01.2005, Geologian tutkimuskeskus, Arkistoraportti Q18/23/3422052003/1.
- Länsimetro Oy, 2008. Länsimetron hankesuunnitelma, suunnitelmaraportti, 14.3 2008.
- Malä 2022. Sivulla vierailtu 1.8.2022. <http://www.guidelinegeo.com/ground-penetrating-radar-gpr/>
- Markovaara-Koivisto, M., Hokkanen, T. ja Huuskonen-Snicker, E. 2014. The effect of fracture aperture and filling material on GPR signal. *Engineering Geology Environment* 73, 815–823. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0566-4>.
- Molron, J., Linde, N., Baron, L., Selroos, J.-O., Darcel, C. ja Davy, P. 2020. Which fractures are imaged with Ground Penetrating Radar? Results from an experiment in the Äspö Hardrock Laboratory. Elsevier, Sweden. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105674>.
- Pajunen, M., Wennerström, M., Ikävalko, O., Elminen, T., Arkimaa, H., Wasenius, P., ja Ajlani, M. 2007. Länsimetron kallioperän rikkonaisuusarviointi Matinkylän ja Ruoholahden välillä. Osa I. Kallioperän Geologinen kehitys sekä kallioperän hierto- ja siirrosvyöhykkeiden kuvaus ja luokittelu. Geologian tutkimuskeskus, raportti K21.42/2007/33.
- Palmén, J.A. 1999. Kaivosgeologinen kallioluokitus. Vuorimiesyhdistyksen julkaisuja A114. Tekniikan lisensiaatin tutkintotyö, Teknillinen korkeakoulu, Materiaali- ja kalliotekniikan osasto, Insinöörigeologian ja geofysiikan laboratorio. Otaniemi.
- Palmer, D. 2009. Exploiting Lateral Resolution of Near-Surface Seismic Refraction Methods. *Journal of Earth Science, Vol. 20, No. 3*, 526–545. doi: 10.1007/s12583-009-0044-x

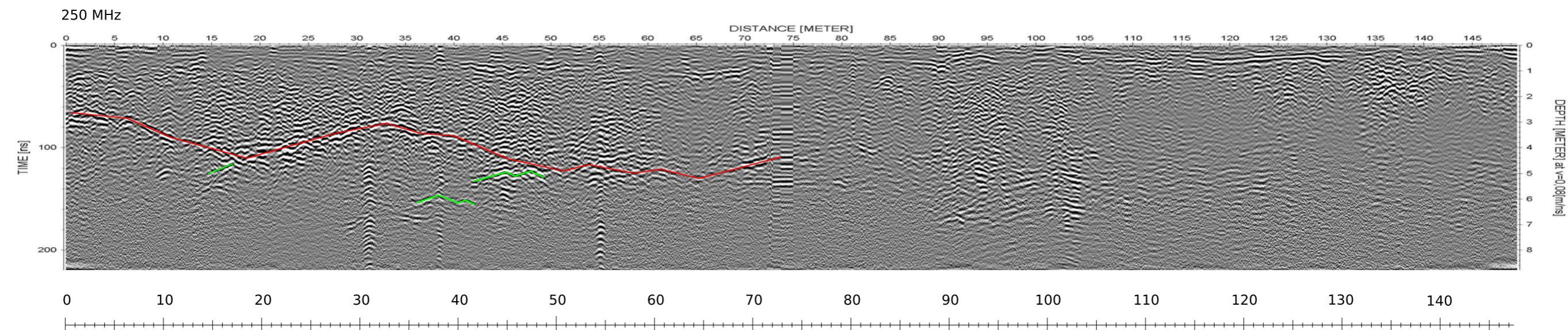
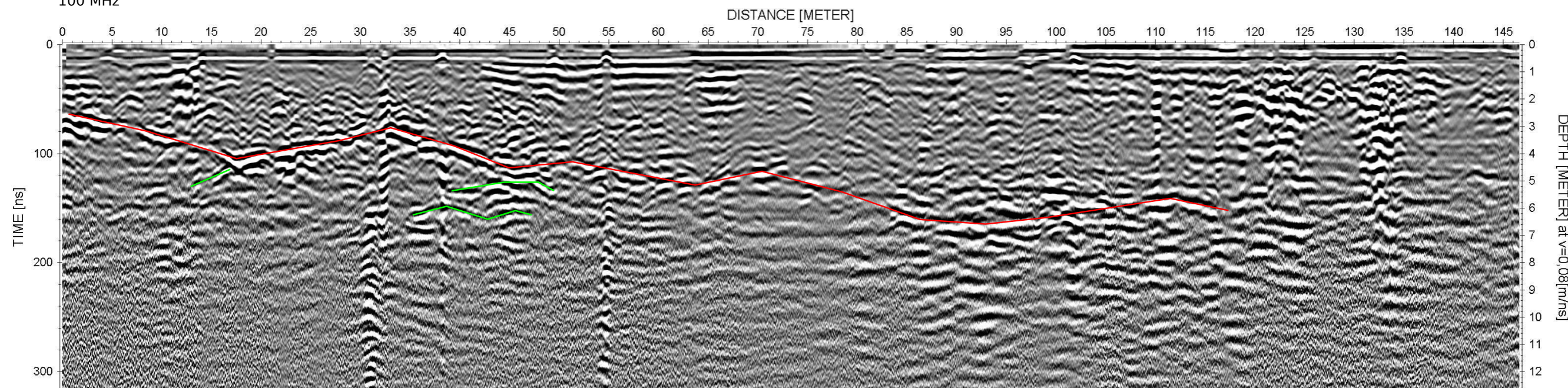
- Porsani, J. L., Sauck, W.A. ja Júnior, A.O.S. 2006. Gpr for mapping fractures and as a guide for extraction ornamental granite from a quarry: a case study from southern Brazil. Elsevier 58, 177-187 doi:10.1016/j.jappgeo.2005.05.010
- Reynolds, J.M. 2011. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. 2nd Edition. John Wiley & Sons, UK
- Rinaldi, V.A., Ibarra, H.I., Viguera, R.F. ja Harasimiuk, J.C. 2019. Application of seismic tomography for detecting structural faults in a Tertiary Formation. E3S Web of Conferences 92, Glasgow. doi.org/10.1051/e3sconf/20199218008.
- Sandmeier, K.J. 2020. ReflexW, version 9.5. Windows™ XP/7/8/10-program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. Copyright 1999-2020, Germany
- Sandmeier 2018. Introduction to the interpretation of seismic refraction data with ReflexW. geophysical research. REFLEXW guide 12/2018
- SMOY 2008, Länsimetron kallionäytekairaukset Espoossa vuosina 2007–2008. 8.5.2008, Suomen Malmi Oy, raportti nro: 114/1801/08/EP, JJ.
- SMOY 2009a, Länsimetron suunnittelualan kallionäytekairaus 2008. 23.03.2009, Suomen Malmi Oy, raportti nro: 114/1801 IV/08/JJ.
- SMOY 2009b, Länsimetron suunnittelualan kallionäytekairaus 2009. Reiät SK232, SK233, SK234, SK237, SK238, SK243, SK244. Suomen Malmi Oy, raportti nro: 114/1912 I/09/JJ
- Tammenmaa, J., Tarvainen, A.M. ja Sipola, V. 2008. Länsimetron suunniteluun liittyvät seismiset luotaukset Espoossa syys-lokakuussa 2007. 21.2.2008, Suomen Malmi Oy, raportti, 6 s.
- Tarvainen, A.M. ja Sipola, V. 2007. Länsimetron suunniteluun liittyvät maatumkaluotaukset Espoossa loka-tammikuussa 2007–2008. Suomen Malmi Oy, raportti, 26.2.2007, 7 s.
- Turunen, P. 1993. Geofysikaalisten menetelmien käytöstä ympäristötutkimuksessa. Geologian tutkimuskeskus, Pohjois-Suomen aluetoimisto, raportti Q10.2/1993/1.
- Wennerström, M., Laxström, H., Vaarma, M., Laine M., Gallo, A. ja Kuivämäki, A. 2018. Länsimetron tunnelin geologinen kartoitus välillä Ruoholahti-Matinkylä. 31.12.2018, Geologian tutkimuskeskus, Työraportti 98/2018.
- Westerlund, G. 2011. Kallionäytekairausten raporttiluettelo, raportointitilanne 30.6.2011. Länsimetro, Rockplan.
- Xie, C.G. 2015. Applications of tomography in oil-gas industry–Part 1. Series in Electronic and Optical Materials, Industrial Tomography, Woodhead Publishing 2015, 591-632. doi.org/10.1016/B978-1-78242-118-4.00022-8

LIITTEET

- Liite 1 Maatumkaluotausten alkuperäiset tulokset ja tulkinnat (Tarvainen ja Sipola 2007)
- Liite 2 Seismisten taittumislouotausten alkuperäiset tulokset ja tulkinnat (Tammenmaa et al. 2008)

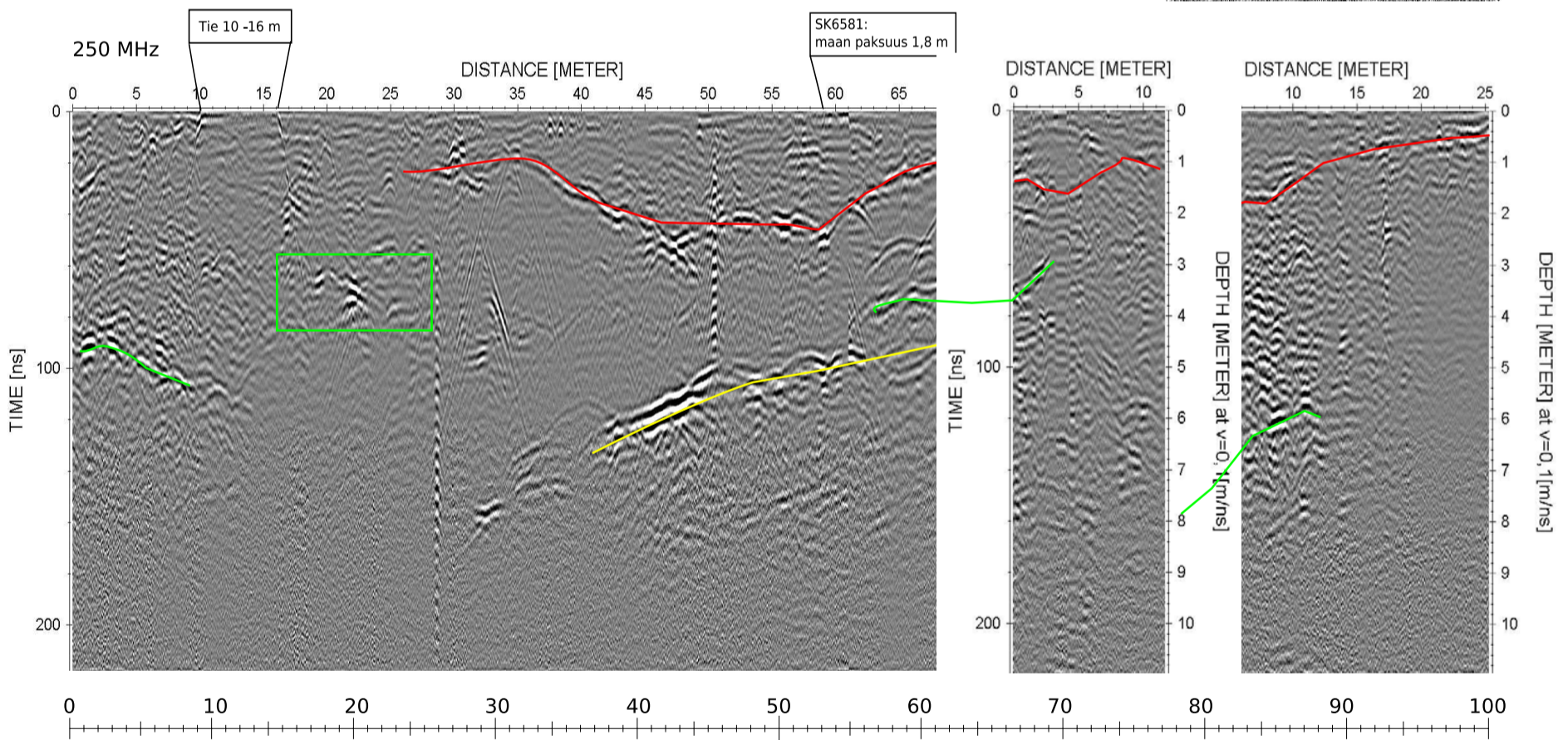
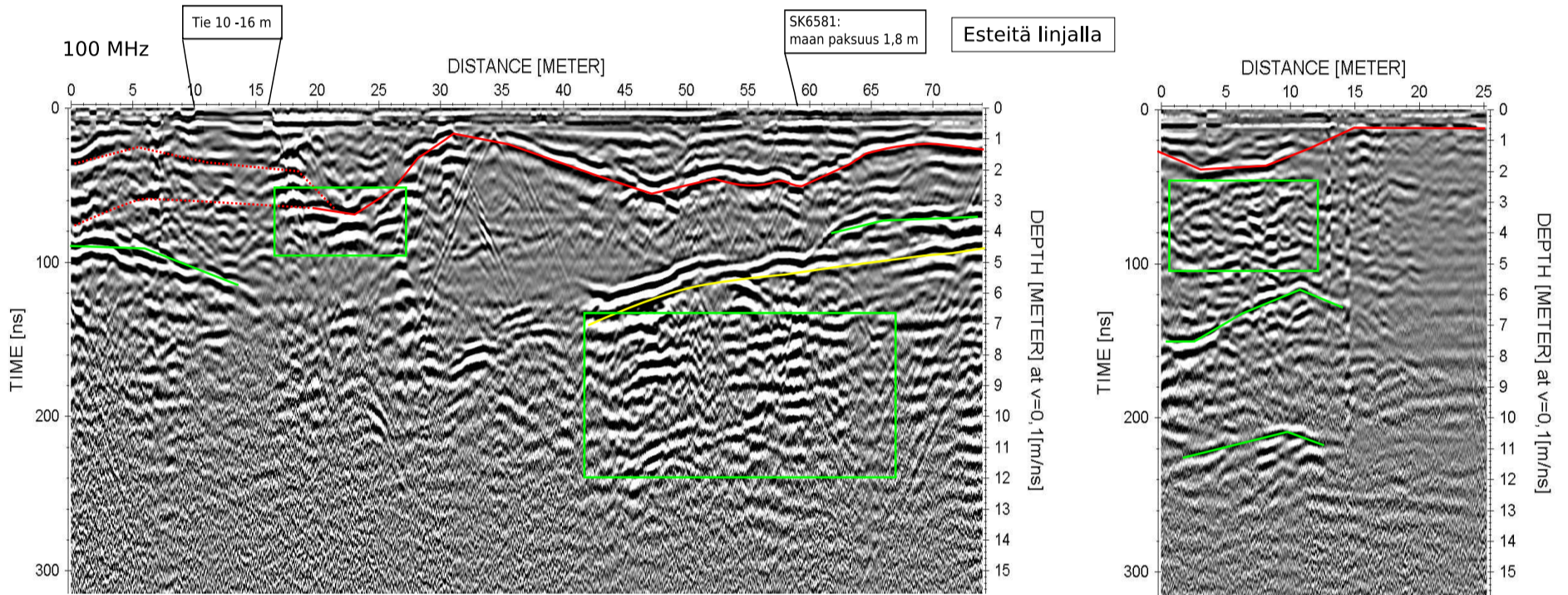
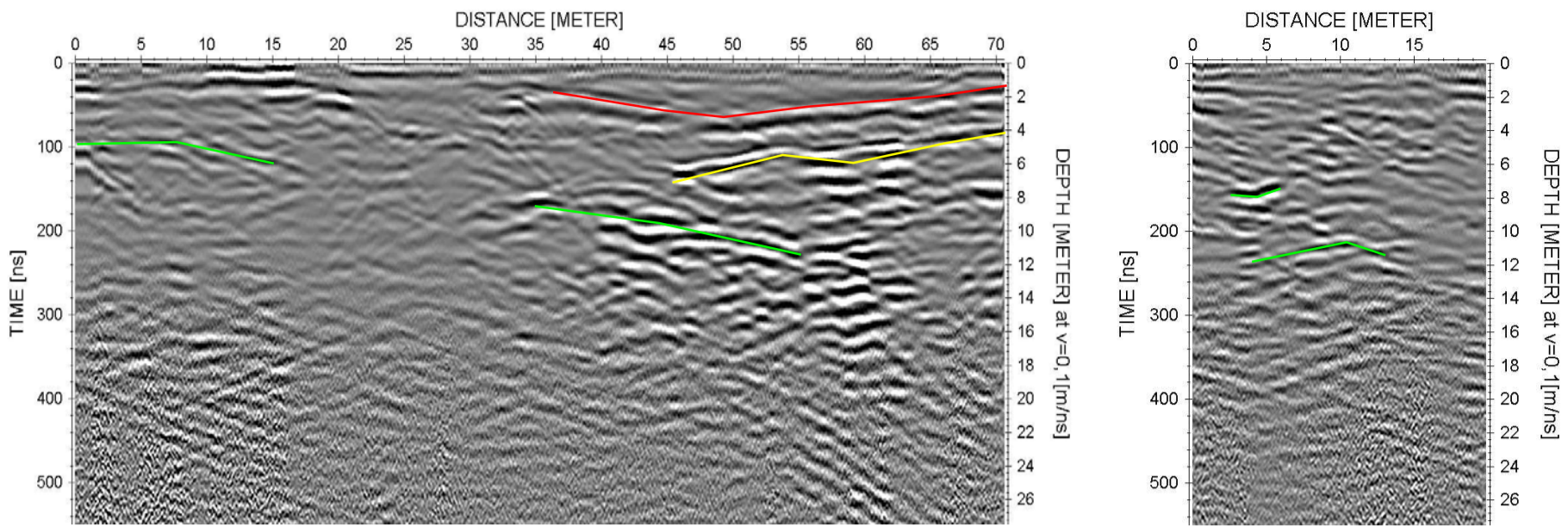
LIITE 1, Maatutkaluotausten alkuperäiset tulokset ja tulkinnat (Tarvainen ja Sipola 2007)

OTANIEMI
Linja ML6504
100 MHz



- Tulkittu kalliopinta
- Todennäköinen sivilisaatiohäiriö
- Kallion sisäisiä rakenteita
- Kirjoitettuun mahd. selitykseen

OTANIEMI
Linja ML6505
50 MHz



11,15 m

Jyrkän topografian vuoksi linjan loppua ei voitu mitata

Topografia

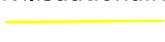
8,34 m

Tulkittu kalliopinta



Keltaisella merkitty piirre on todennäköisesti peräisin viereisen kellarin rakenteista. Sitä ympäröivät vihreällä merkityt piirteet saattavat olla peräisin samasta lähteestä.

Todennäköinen sivilisaatiohäiriö

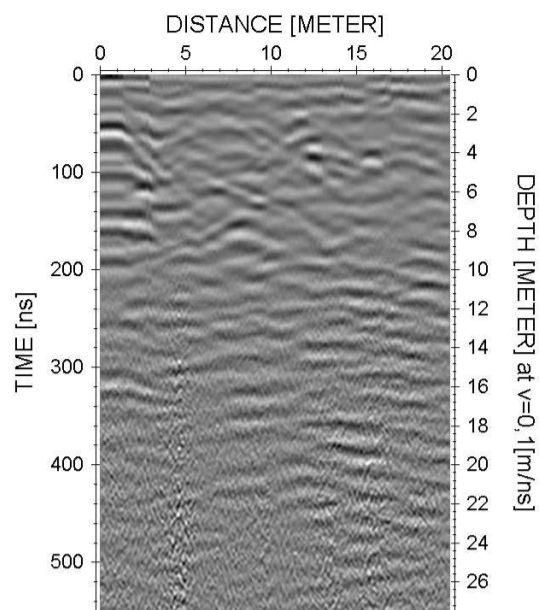
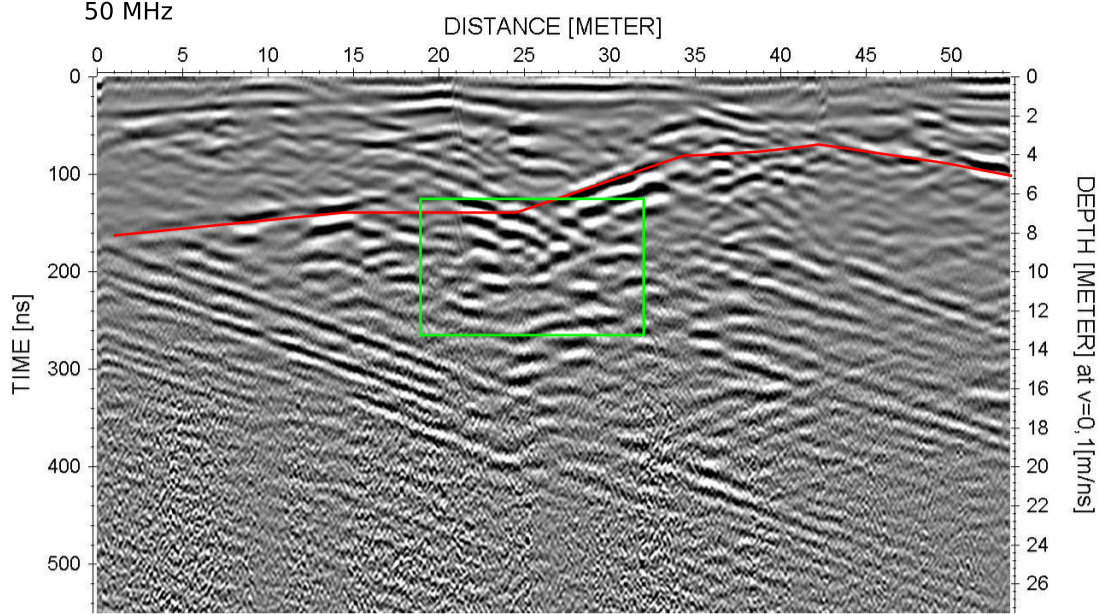


Kallion sisäisiä rakenteita

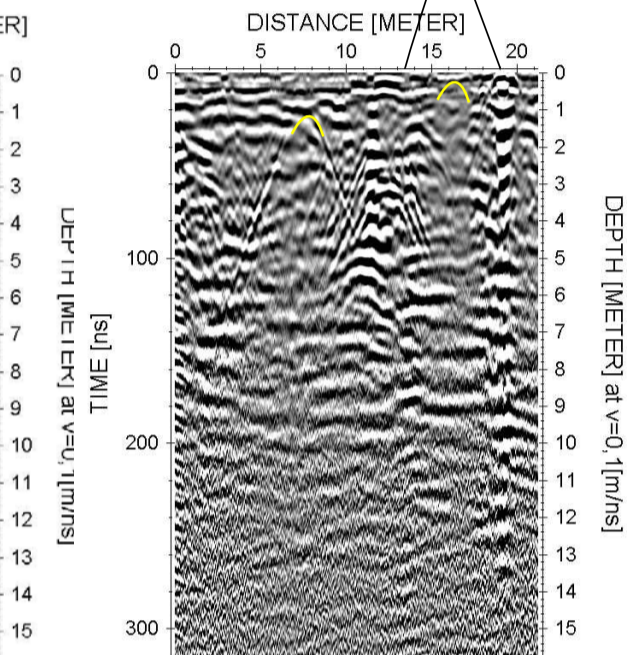
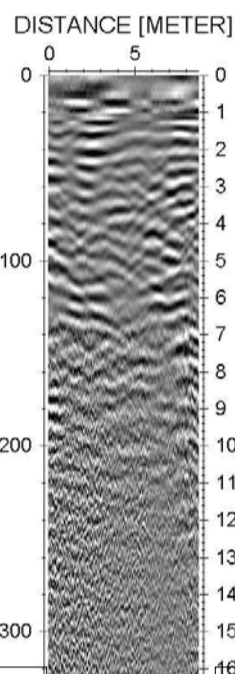
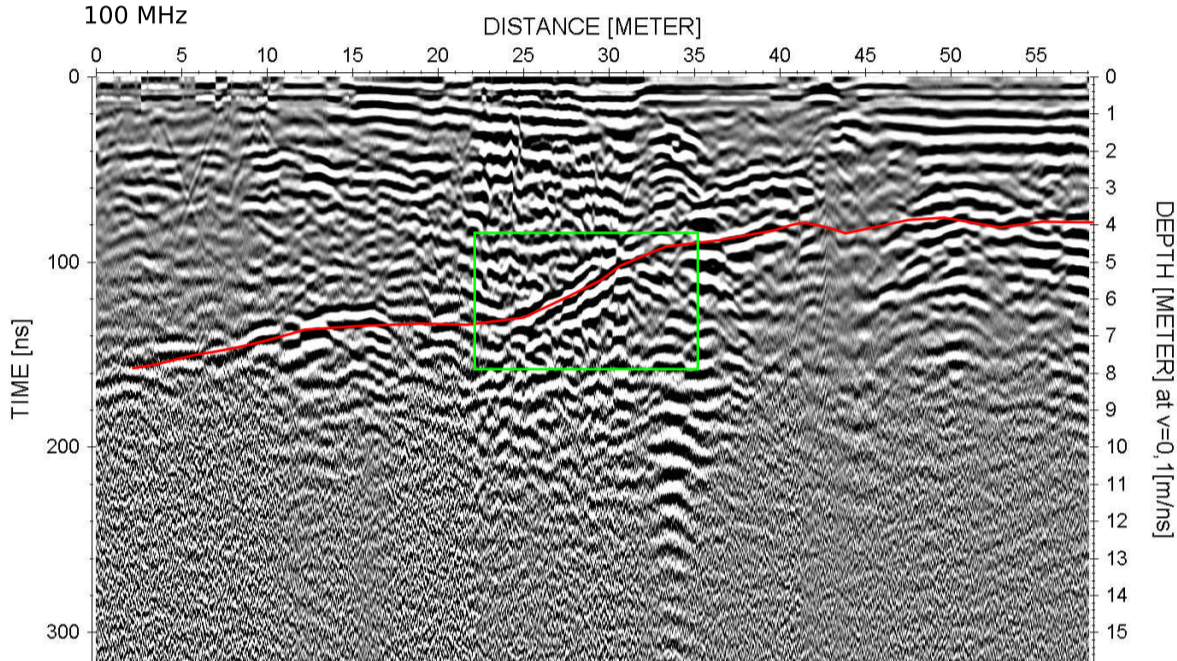


Kirjoitettuna mahd. selitys

OTANIEMI
Linja ML6506
50 MHz



100 MHz



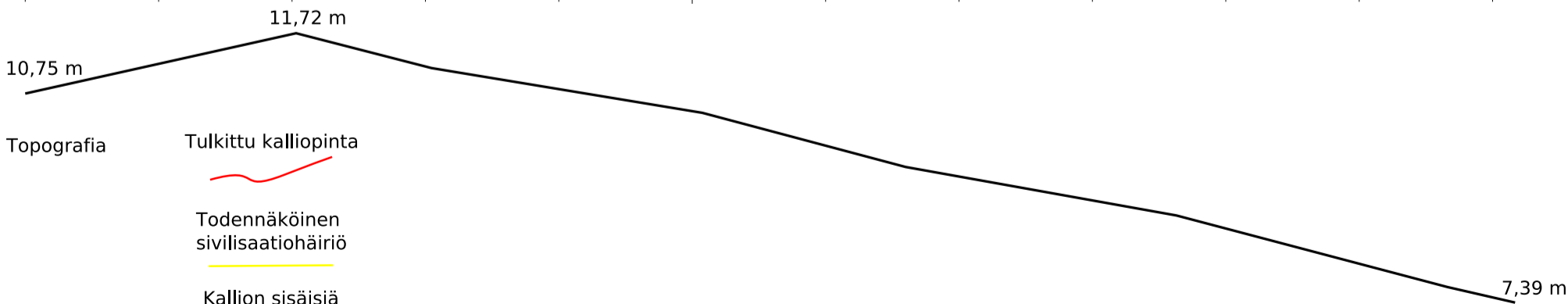
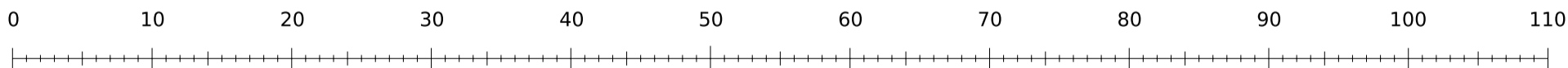
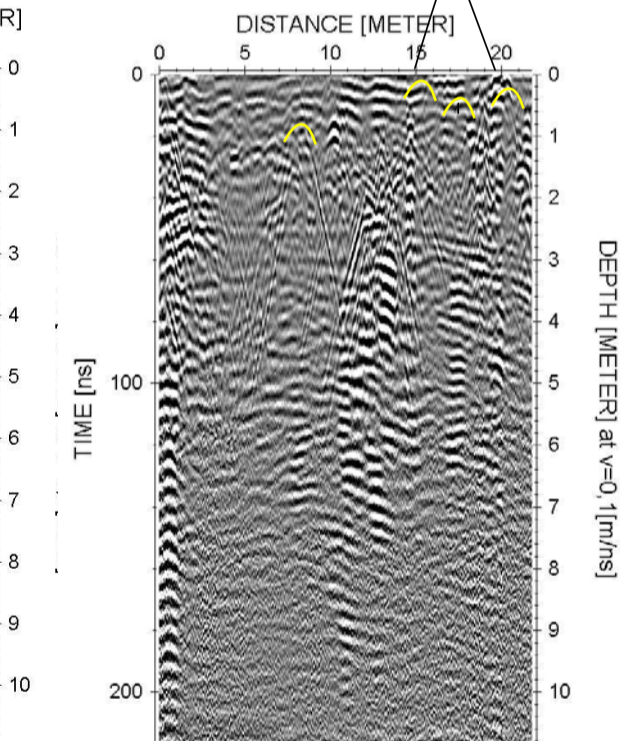
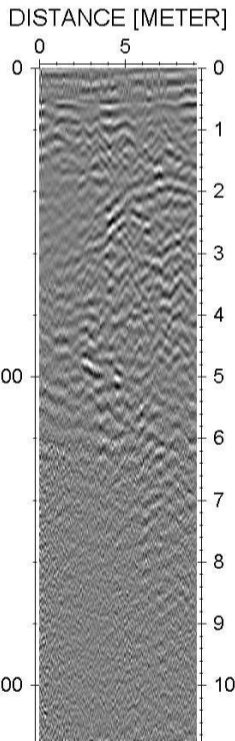
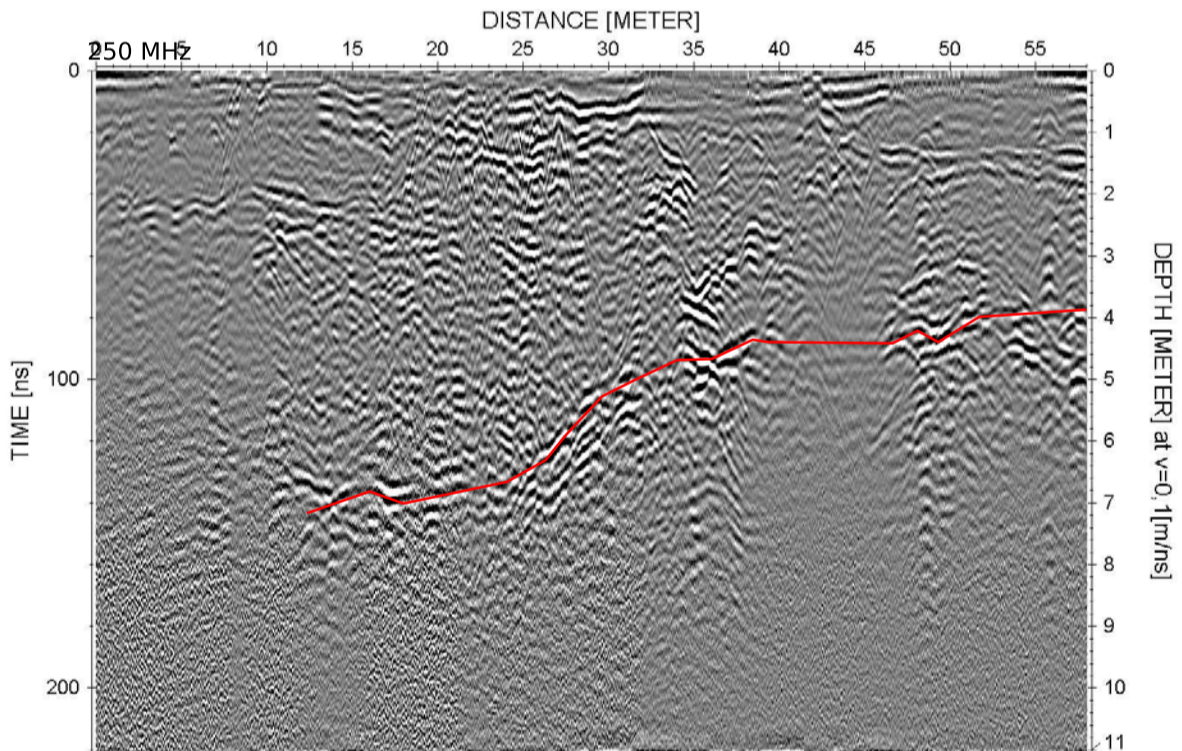
Puskia ja autoja

Puskia ja autoja

Kaivon kansi

Kaivon kansi

250 MHz

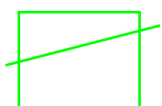


Topografia

Tulkittu kalliopinta

Todennäköinen sivilisaatiohäiriö

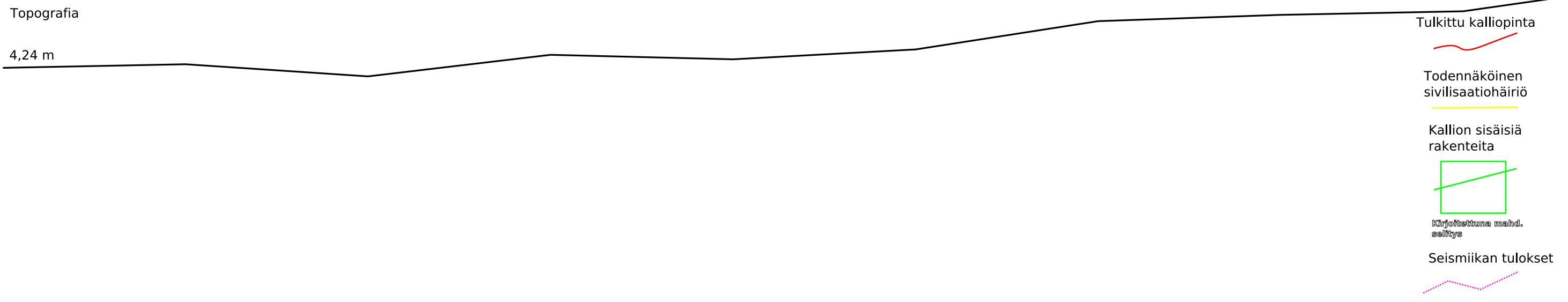
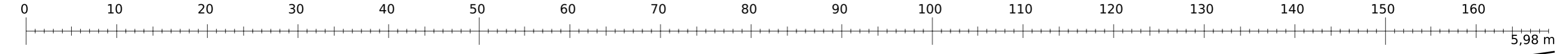
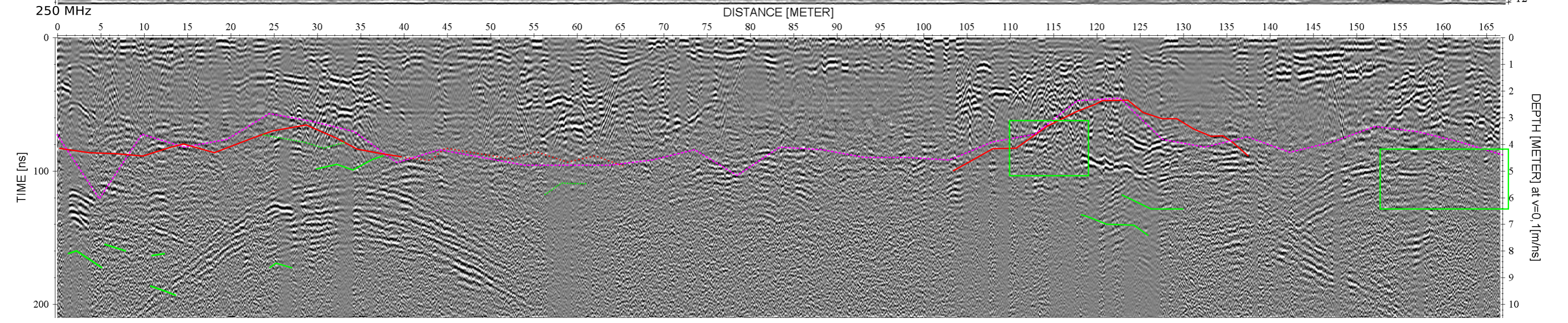
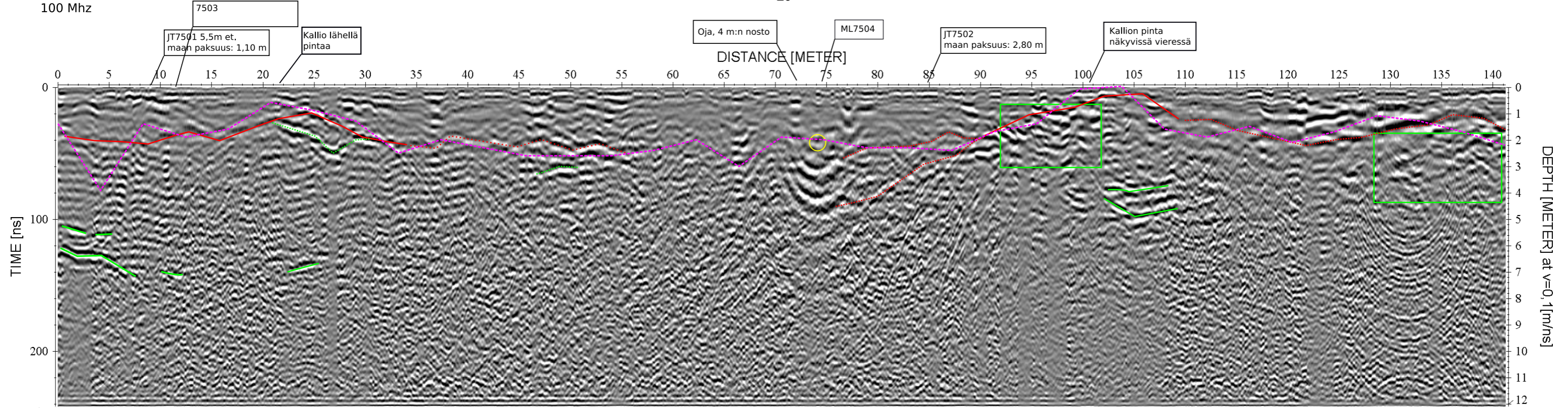
Kallion sisäisiä rakenteita



Kirjoitettuna maahd. selitys

KEILANIEMI
 Linja ML7502, mitattu seismistä linjaa SL7501 pitkin
 100 Mhz

20

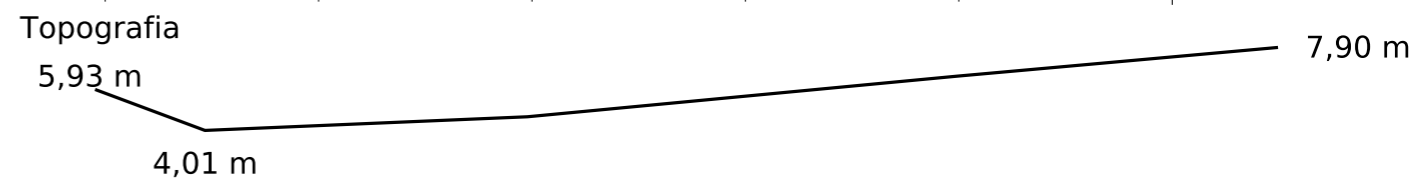
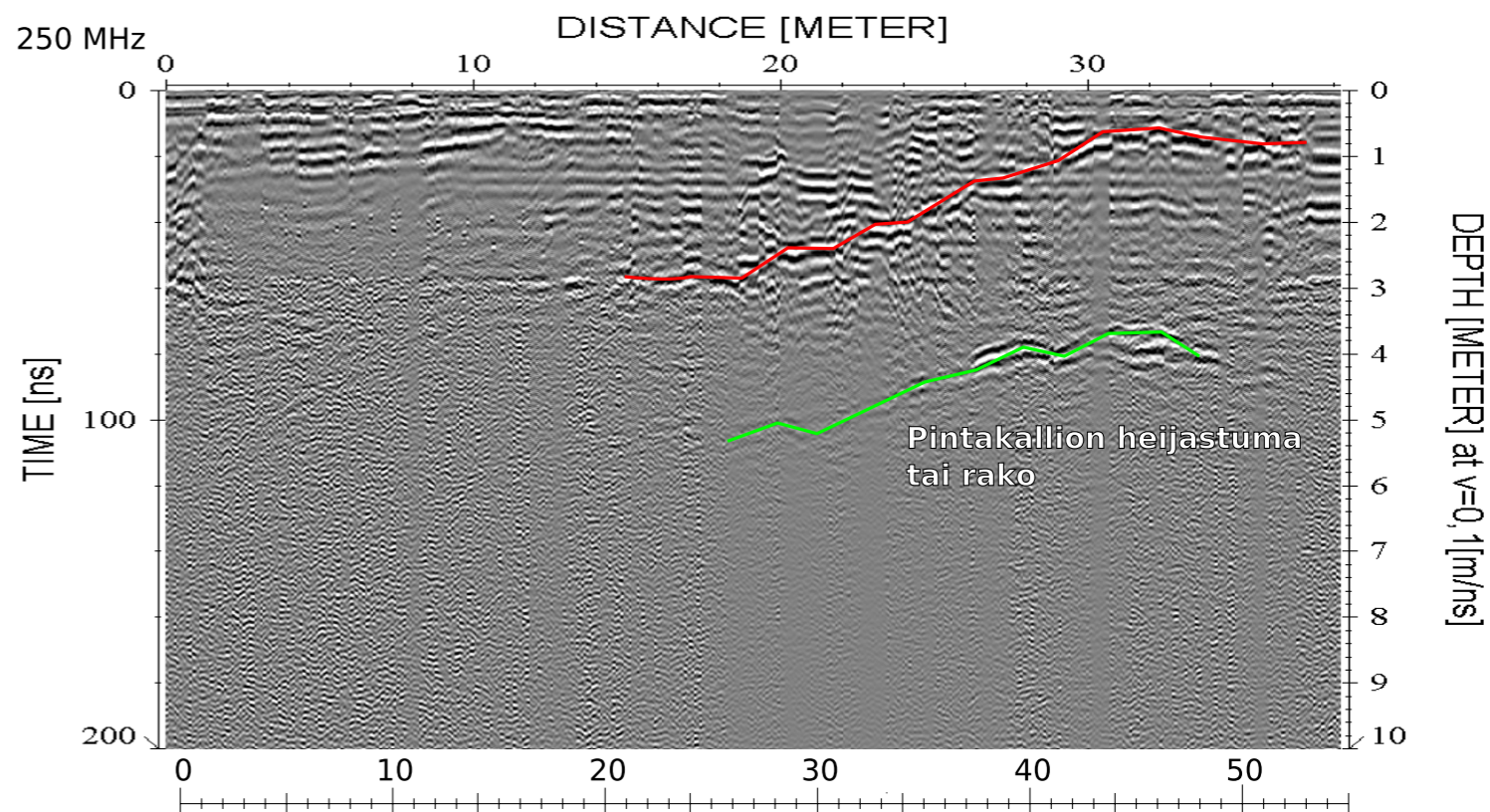
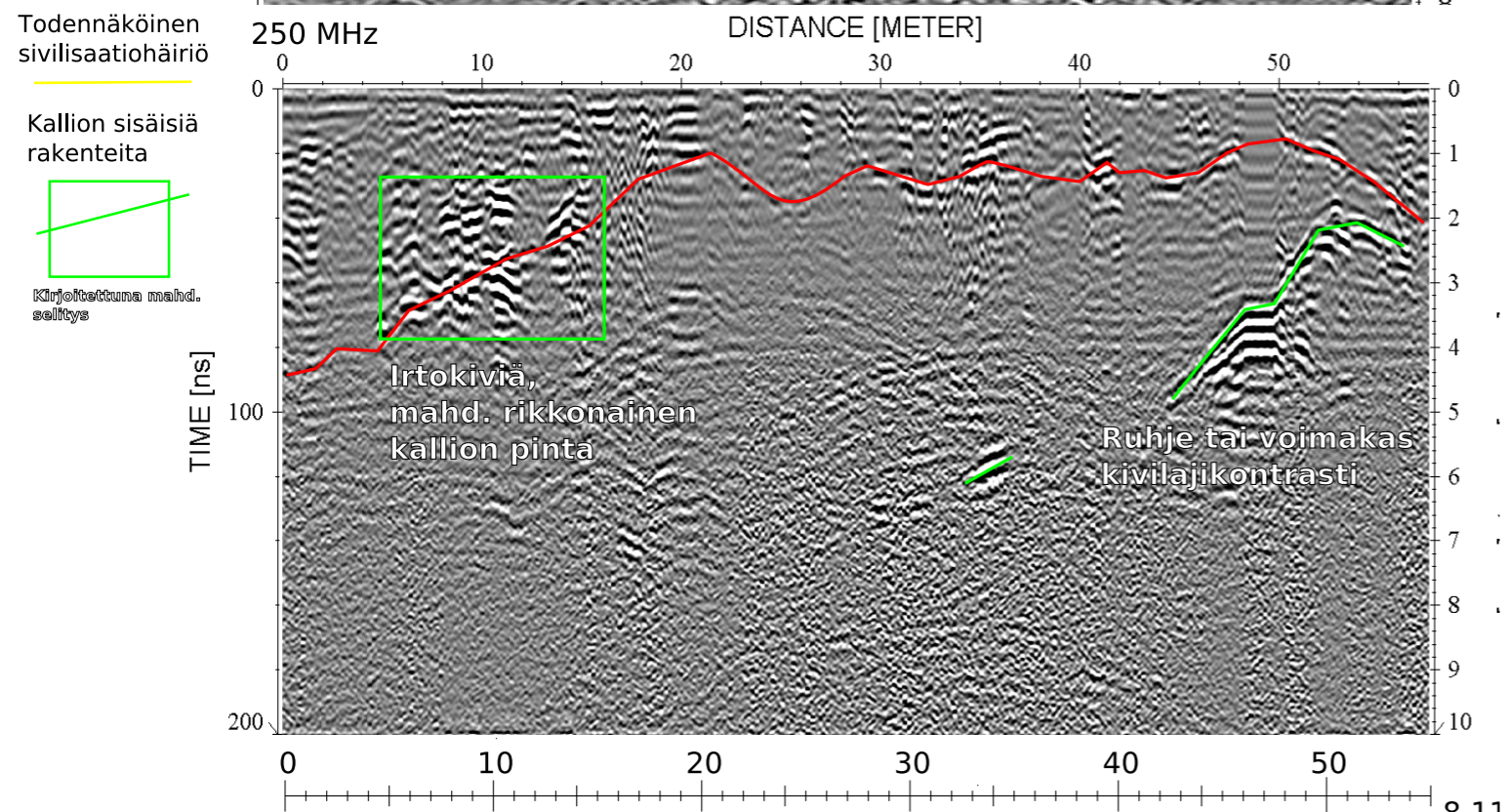
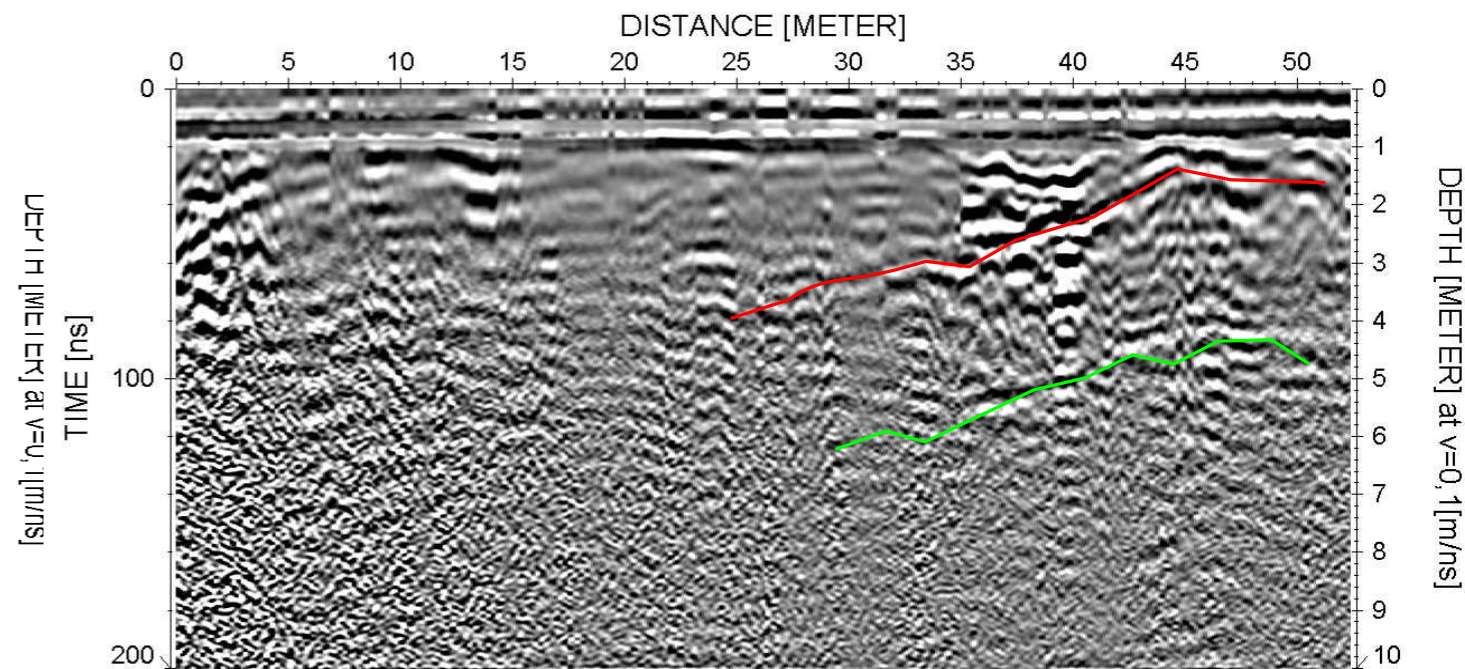
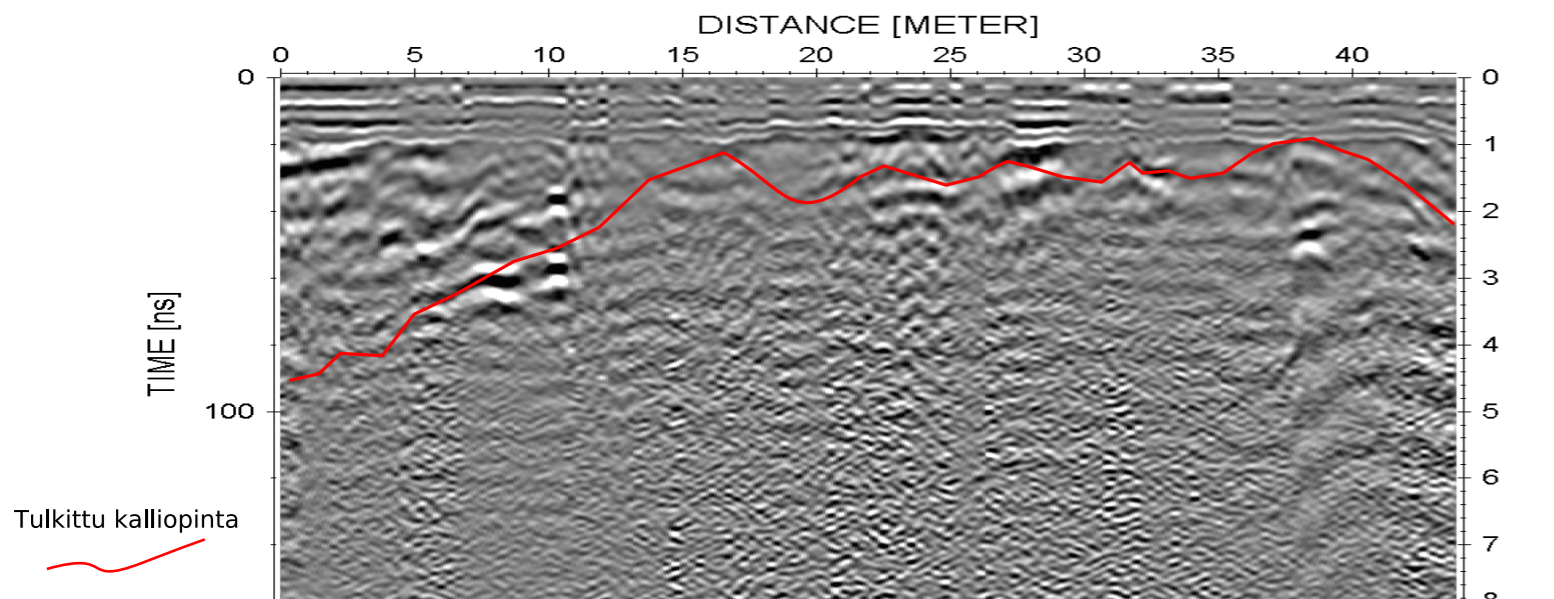


KEILANIEMI
Linja ML7503
100 MHz

Linjan todellinen pituus 55 metriä
15,6 m: 7501, 11,3 metriä
19 m: JT 7501 6 metrin päässä
(maata 1.1 m)

KEILANIEMI
Linja ML7504
100 MHz

Linjan todellinen pituus 55 metriä
18,4 m: 7501 74,6 m

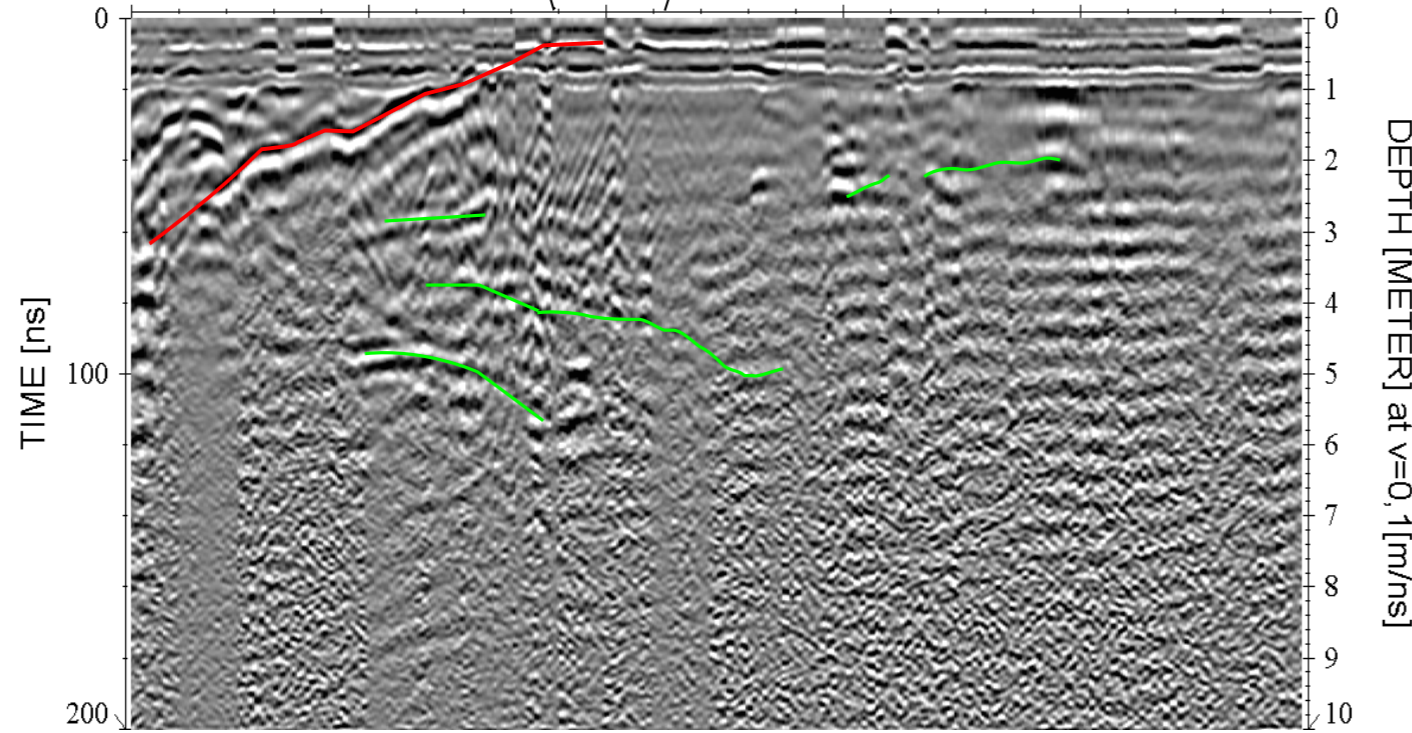


KEILANIEMI
Linja ML7505
100 MHz

Kallion pinta
näkyvissä

DISTANCE [METER]

Linjan todellinen pituus 55 metriä
17,9m: 7501 123,2 m



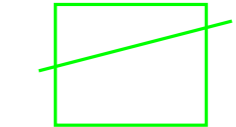
Tulkittu kalliopinta



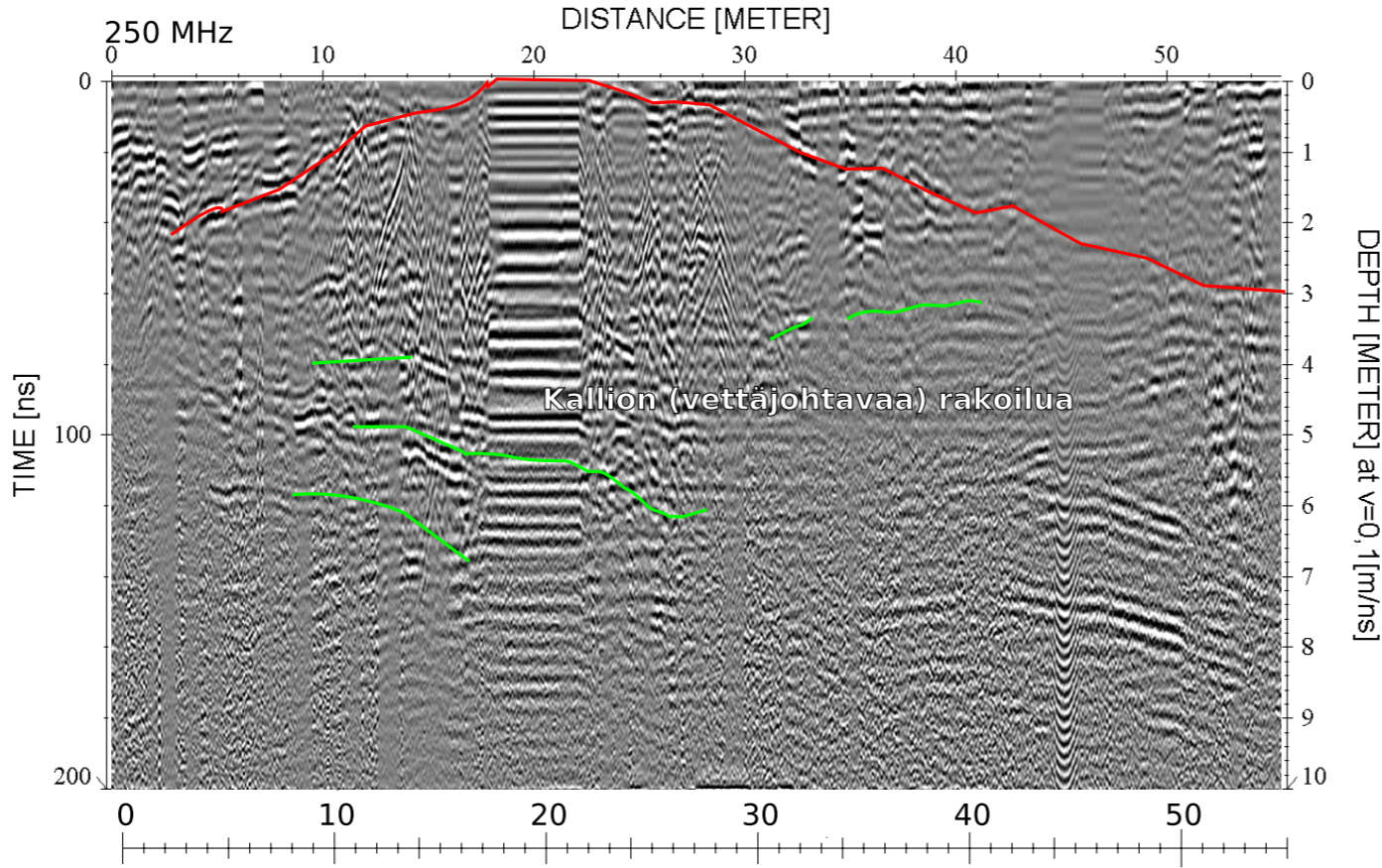
Todennäköinen sivilisaatiohäiriö



Kallion sisäisiä rakenteita



Kirjoitettuna mahd. selitys



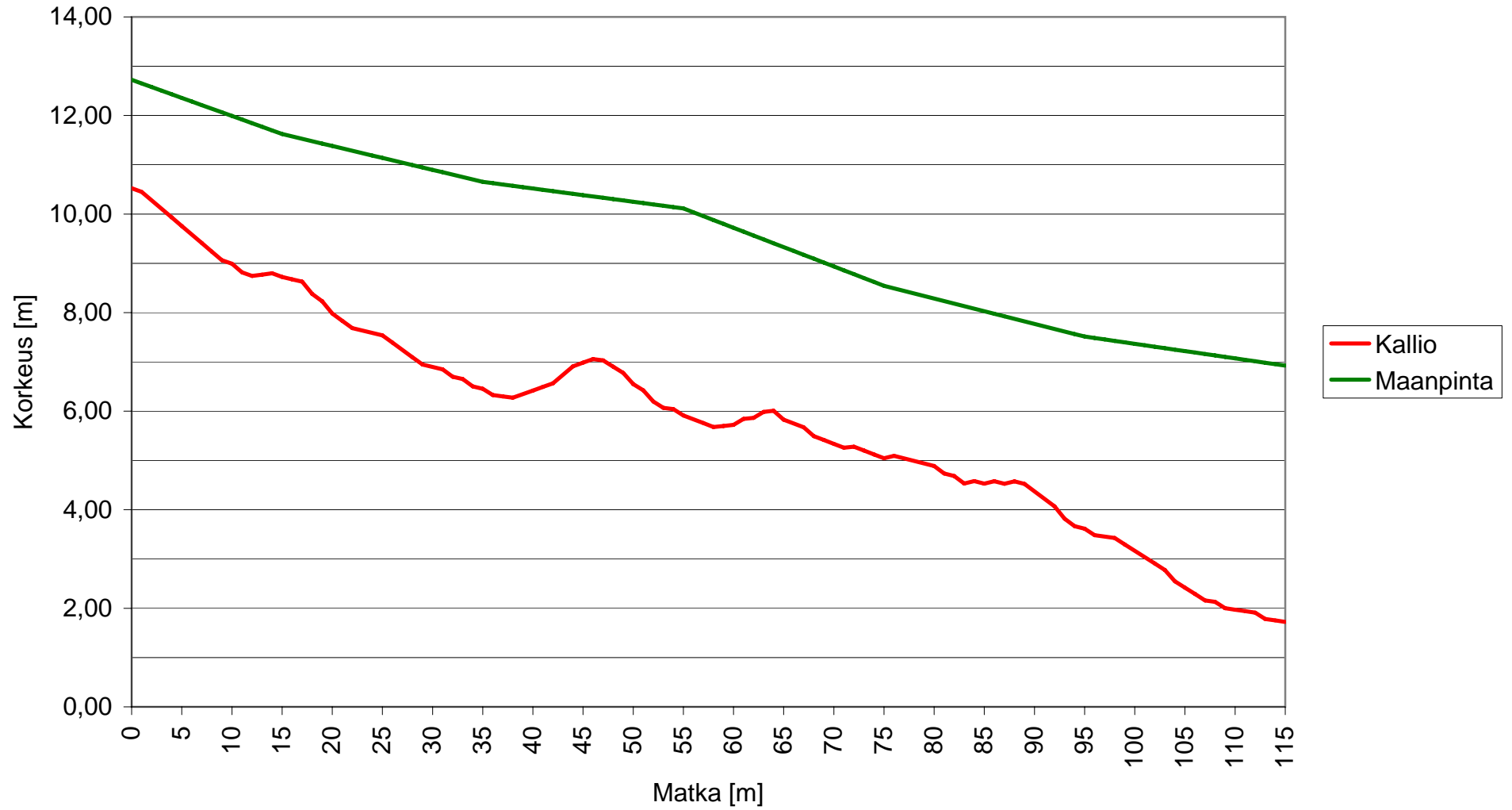
Topografia

4,62 m

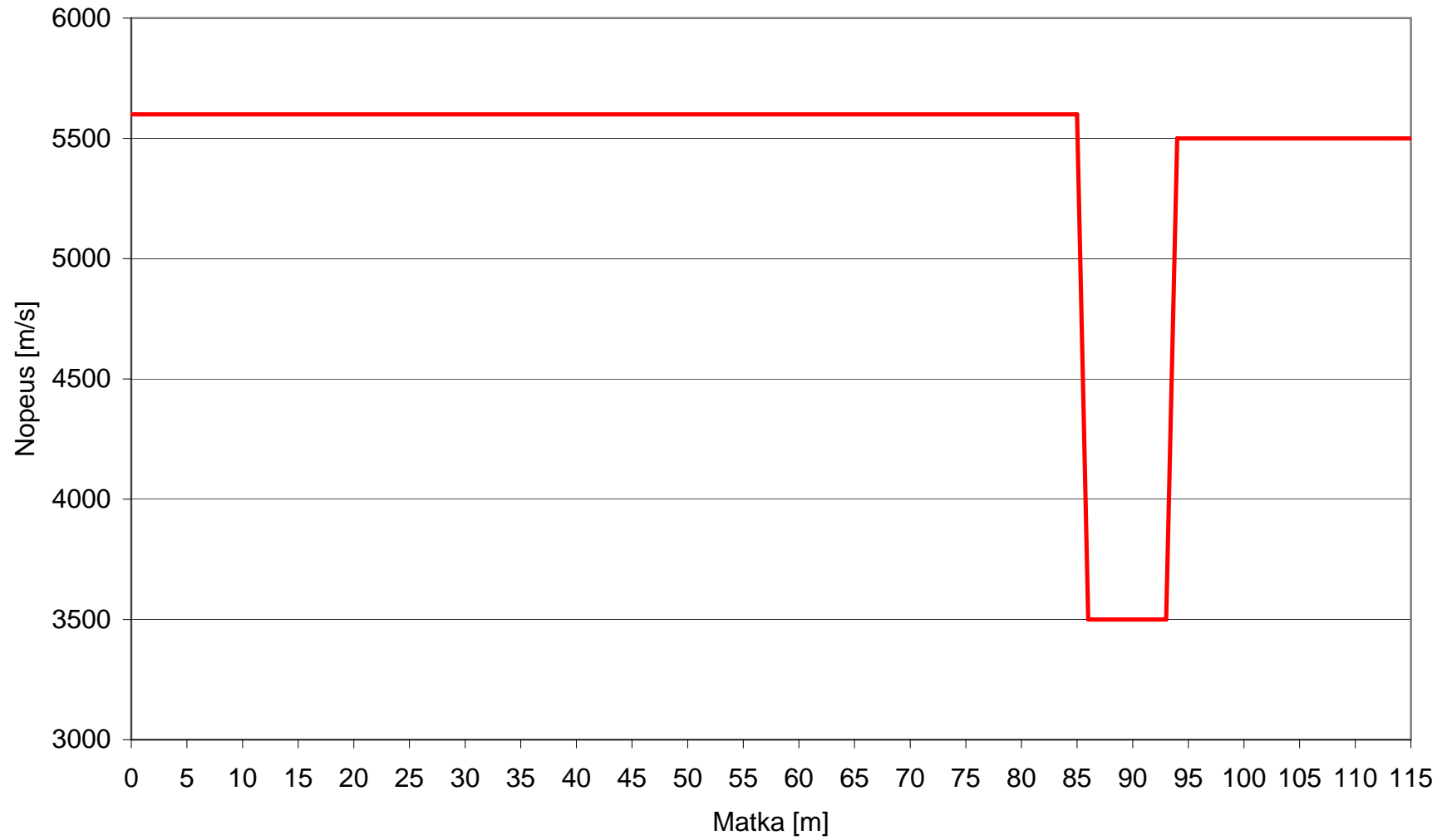
5,44 m



Otaniemi, linja SL6501: Korkeudet merenpinnasta

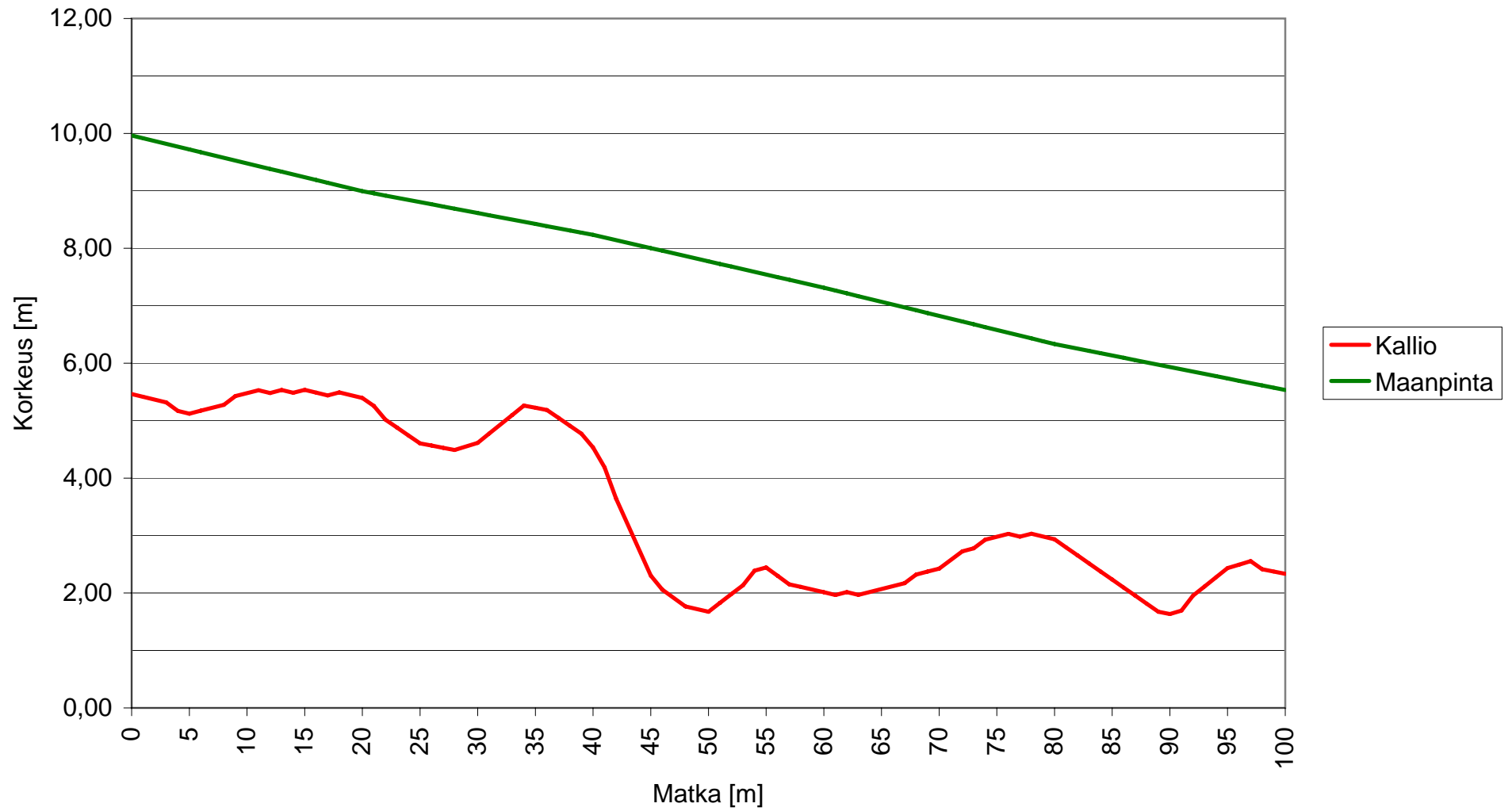


Otaniemi, linja SL6501: Seismisen aallon nopeus kalliossa

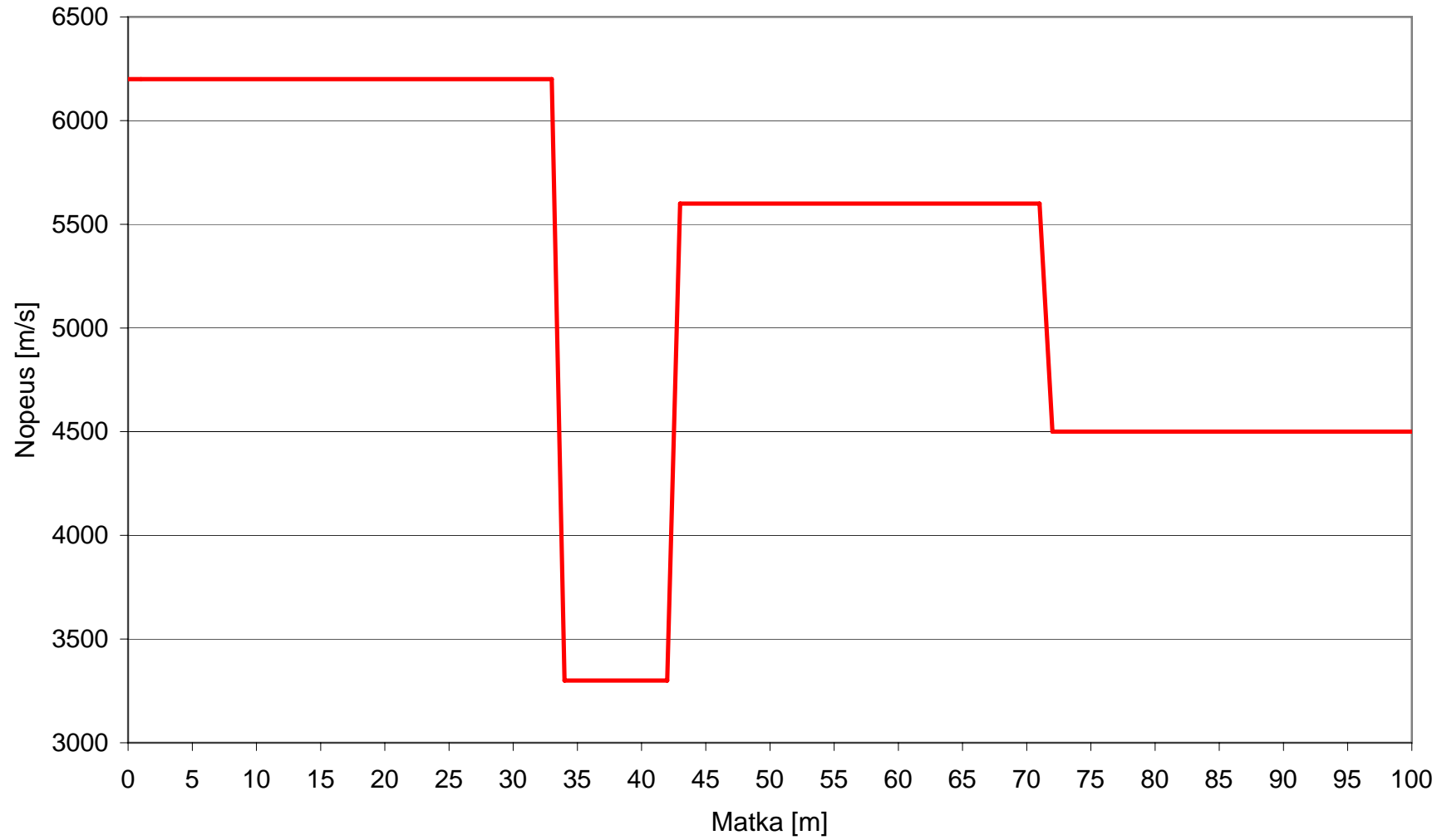


Kallio

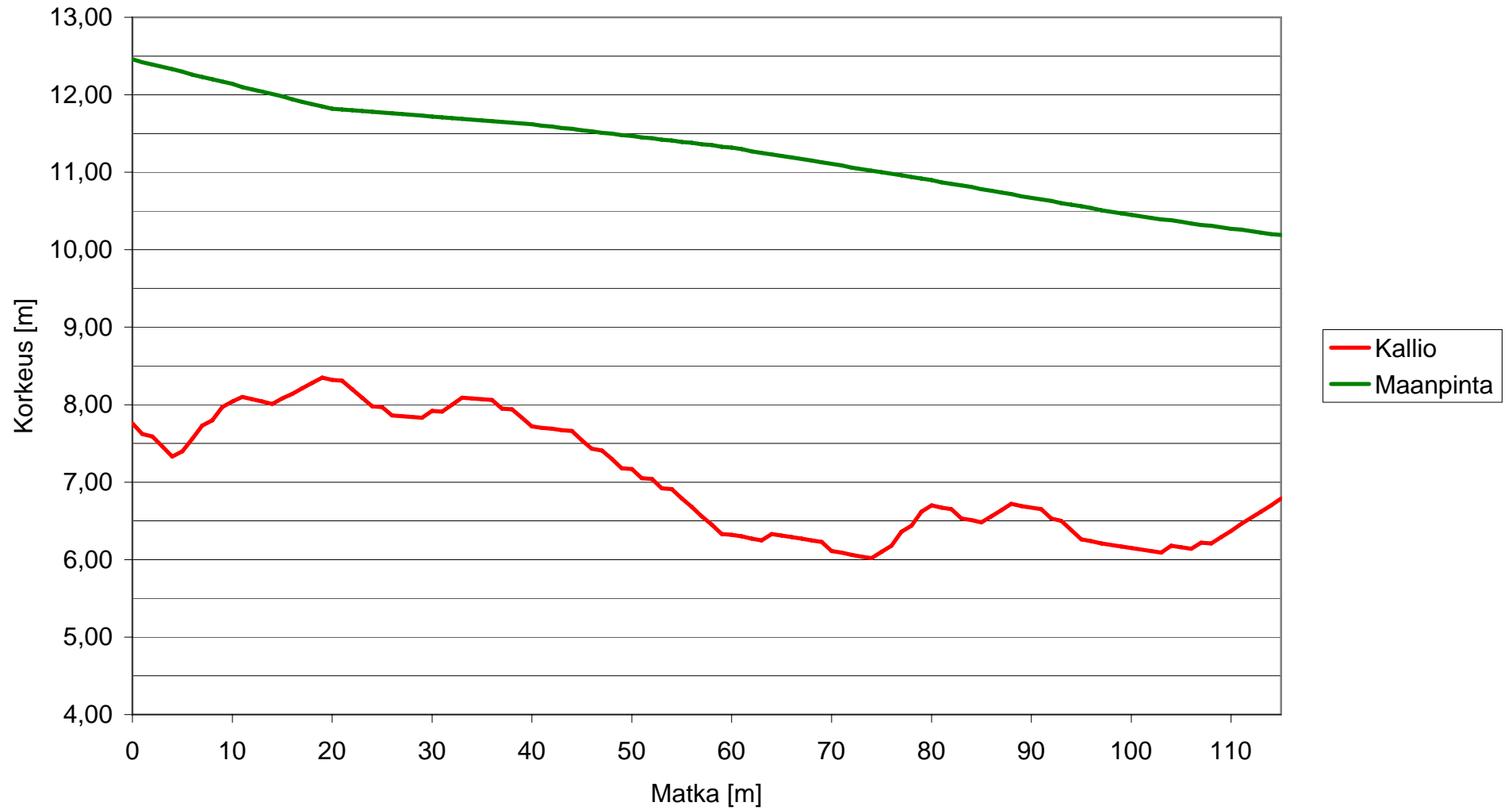
Otaniemi, linja SL6502: Korkeudet merenpinnasta



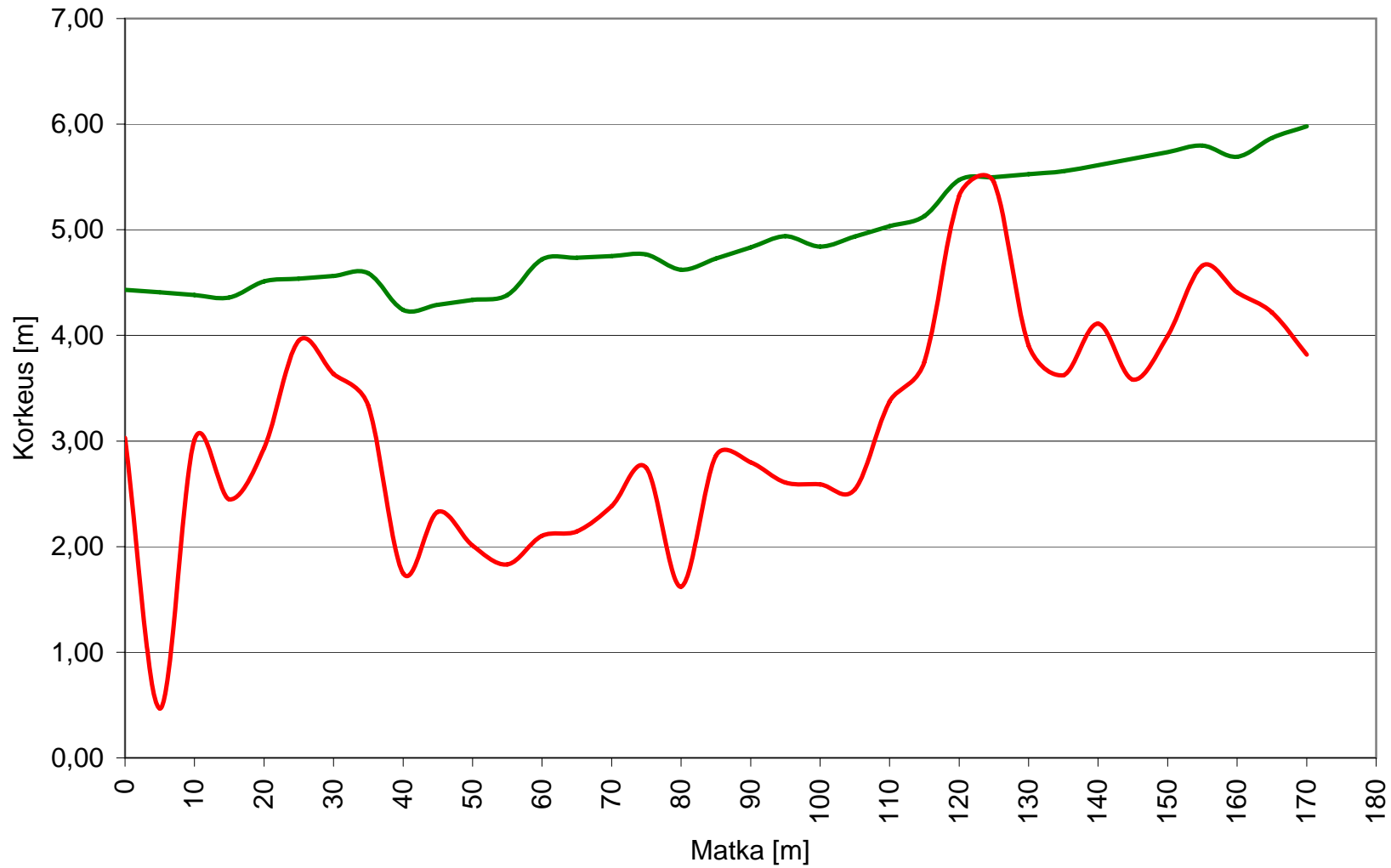
Otaniemi, linja SL6502: Seismisen aallon nopeus kalliolla



Otaniemi, linja SL6503: Korkeudet merenpinnasta



Keilaniemi, linja SL7501: Korkeudet merenpinnasta



Keilaniemi, linja SL7501: Seismisen aallon nopeus kalliosta

