

OPINNÄYTETYÖ

JARMO PETÄJÄJÄRVI
TONY VAARALA
2012

**LASERKEILAIMEN KÄYTTÖ
TUNNELIMITTAUKSISSA**



Rovaniemen
ammattikorkeakoulu
University of Applied Sciences
LUC

MAANMITTAUSTEKNIikka



ROVANIEMEN AMMATTIKORKEAKOULU

TEKNIikka JA LIIKENNE

Maanmittaustekniikka

Opinnäytetyö

LASERKEILAIMEN KÄYTTÖ TUNNELIMITTAUKSISSA

Jarmo Petäjäjärvi & Tony Vaarala

2012

Toimeksiantaja JT-Mittaus Oy

Ohjaaja Laurila Pasi

Hyväksytty _____ 2012 _____

Työ on kirjastossa lukusalikappale

Tekijä	Jarmo Petäjäjärvi, Tony Vaarala	Vuosi	2012
Toimeksiantaja	JT-Mittaus Oy		
Työn nimi	Laserkeilaimen käyttö tunnelimittauksissa		
Sivu- ja liitemäärä	34		

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan Leican HDS 6000 laserkeilaimen ja Trimble VX Spatial Station robottitakymetrin työskentelyominaisuuksia tunnelimittauksissa ja kumpi soveltuu paremmin laserkeilaukseen tunnelissa. Insinöörityössä käydään läpi myös kahden aineiston käsittely ohjelman ominaisuuksia ja minkälaista laserkeilaus aineistoa niistä saadaan.

Työssä käydään läpi kahden laserkeilaimen skannausnopeutta, niiden käytön vaatimia kalusto määriä ja kuinka kauan laserkeilaus vie aikaa tunnelissa ja kuinka pitkiä matkoja tässä tietyssä ajassa voidaan skannata.

Leican HDS 6000 laserkeilain soveltuu paremmin tunnelien laserkeilaukseen sen skannaus nopeuden ansiosta ja sillä voi laserkeilata nopeasti pitkiä tunneli osuuksia taaten silti tarkan laadun skannaus aineistossa.

Avainsanat: Laserkeilaus, laserkeilain vs. takymetri, aineiston käsittely, työskentelytehokkuus

Author	Jarmo Petäjäjärvi, Tony Vaarala	Year	2012
Commissioned by	JT-Mittaus Oy		
Subject of thesis	Use of a Laser Scanner in Tunnel Measurements		
Number of pages	34		

This thesis examined how the working properties of the Leica HDS 6000 laser scanner and the Trimble VX Spatial Station robot total station will work in the tunnel measurement and which one is more suitable for laser scanning in the tunnel. This thesis also studied how to deal with two material handling capabilities programs and what type of laser scanning data they provide.

The thesis covered the scanning speed of two laser scanners, the number of equipment when scanning with these two scanners and the amount of time needed for laser scanning in the tunnel and the distances that can be scanned in a given period of time.

The Leica HDS 6000 laser scanner is more suitable for tunnels in the laser scanning because of the scanning speed. With this scanner it is possible to scan a long tunnel sections quickly. In addition to these two good properties it is still possible to get the exact quality of the scan data.

Key words: laser scanning, laser scanner vs. total station, material handling, working properties

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	1
1.1 LÄNSIMETRO	1
1.2 KEHÄRATA	2
2 JT-MITTAUS OY	4
2.1 KALUSTO JA REFERENSSIT	4
3 TUNNELI	6
3.1 TUNNELIRAKENTAMINEN JA TUNNELIN MITTAUSPISTEISTÖ	6
3.2 TUNNELIRAKENTAMISEN VAIHEET	8
4 LASERKEILAUS	12
4.1 LASERKEILAIN YLEISESTI	12
4.2 LASERKEILAINEN TOIMINTAPERIAATTEET	12
4.2.1 <i>Pulssilaser</i>	13
4.2.2 <i>Monipistelaser</i>	13
4.2.3 <i>Vaihe-erolaser</i>	15
4.2.4 <i>Jatkuva-aaltainen pulssilaser</i>	17
4.3 LASERKEILAUKSEN LAATU	17
4.3.1 <i>Yksittäisen mitatun pisteen laatu</i>	17
4.3.2 <i>Pistepilven tiheys</i>	18
4.3.3 <i>Erikseen mitattujen pistepilvien yhdistäminen</i>	18
4.4 TUNNELEIDEN LASERKEILAUS	19
4.4.1 <i>Huomioitavat asiat ja ongelmat</i>	19
4.5 LASERKEILAUS TUNNELISSA JA SIITÄ SAATAVA AINEISTO	20
5 LASERKEILAIN VS. TAKYMETRI	22
5.1 TAKYMETRIN VAHVUUDET JA HEIKKOUEDET	22
5.2 LASERKEILAIMEN VAHVUUDET JA HEIKKOUEDET	24
5.3 VERTAILUN JOHTOPÄÄTÖS	25
6 AINEISTON KÄSITTELY	26
6.1 KÄSITTELY OHJELMISTOT	26
6.2 PISTEPILVEN KÄSITTELY	27
6.2.1 <i>Leica</i>	27
6.2.2 <i>Trimble</i>	30
7 TYÖSKENTELYTEHOKKUUS	31
7.1 JOHTOPÄÄTÖS	31
LÄHTEET	33

1 JOHDANTO

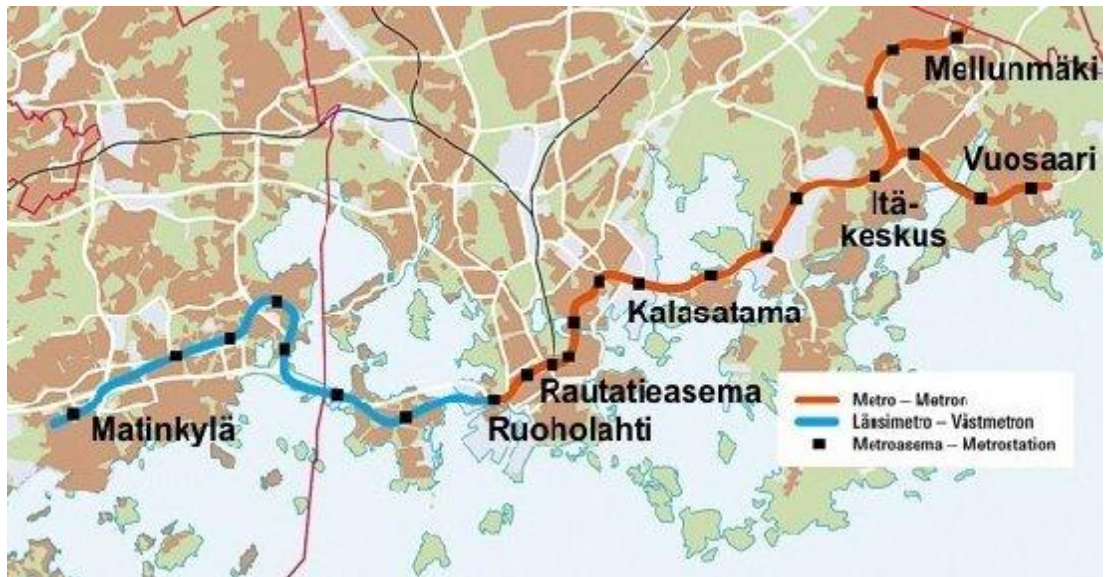
Tutkielman aiheena on laserkeilaimen hyödyntäminen tunnelimittauksissa. Lisäksi tutkimme Leican HDS 6000 laserkeilaimen ja Trimble VX Spatial Station robottitakymetrin laserkeilausominaisuuksia ja työskentelytehokkuutta tunneleissa.

Opinnäytetyöaihe saatiin kesällä Kehäradan ja Länsimetron tunnelityömailla tehtyjen laserkeilausten pohjalta. Meidän työtehtävämme oli käydä laserkeilaamassa tunnelissa louhittuja alueita. Mittauksissa oli aikaisemmin käytetty Trimblen VX Spatial Station robottitakymetri ja meillä oli Leican HDS 6000 laserkeilain. Päätimme tehdä opinnäytetyön, jossa tutkimme laserkeilaimen käyttöä tunnelimittauksissa ja miten nämä kaksi mittauskojetta soveltuvat tunnelimittaukseen.

Opinnäytetyössä tehtyjen tutkimusten tulokset saimme kesällä 2011 suoritettujen laserkeilaustöiden pohjalta. Tutkimusaineiston saimme JT-Mittauksen omistajilta sekä mittamieheltä, joka mittasi Trimblen VX Spatial Station robottitakymetrillä ja asiantuntijahaastattelujen kautta.

1.1 Länsimetro

Länsimetron jatkamisella länteen pyritään vähentämään pääkaupunkiseudun Kehä I:llä tapahtuvaa autoliikennettä. Länsimetron avulla metrolinnoitus etenee Ruoholahdesta Lauttasaaren kautta Espoon Matinkylään (Kuvio 1). Länsimetron valmistuttua metrot kuljettavat yli 100 000 matkustajaa päivässä. Joukkoliikenteestä on hyötyä asukkaille, turisteille, koululaisille, opiskelijoille, työntekijöille ja yrityksille.



Kuvio 1. Länsimetro kartta (www.lansimetro.fi/fi/metrohanke, 2012.)

Länsimetron tunnelityömaat työllistävät tuhansia ihmisiä. Se on Suomen suurin infrahanke, joka käsittää seitsemän uutta asemaa ja kaksi melkein 14 kilometrin pituista tunnelia. Tunnelityömailta louhitaan noin kolme miljoonaa kuutiota kallioulouhetta. Asemien lisäksi louhitaan 15 pystykuilua, jotka on suunniteltu savunpoistoa, ilmanvaihtoa, paineentasausta ja hätäpoistumista varten. Huoltoa ja rakentamista varten on suunniteltu yhdeksän ajotunnelia. (Länsimetro, 2012.)

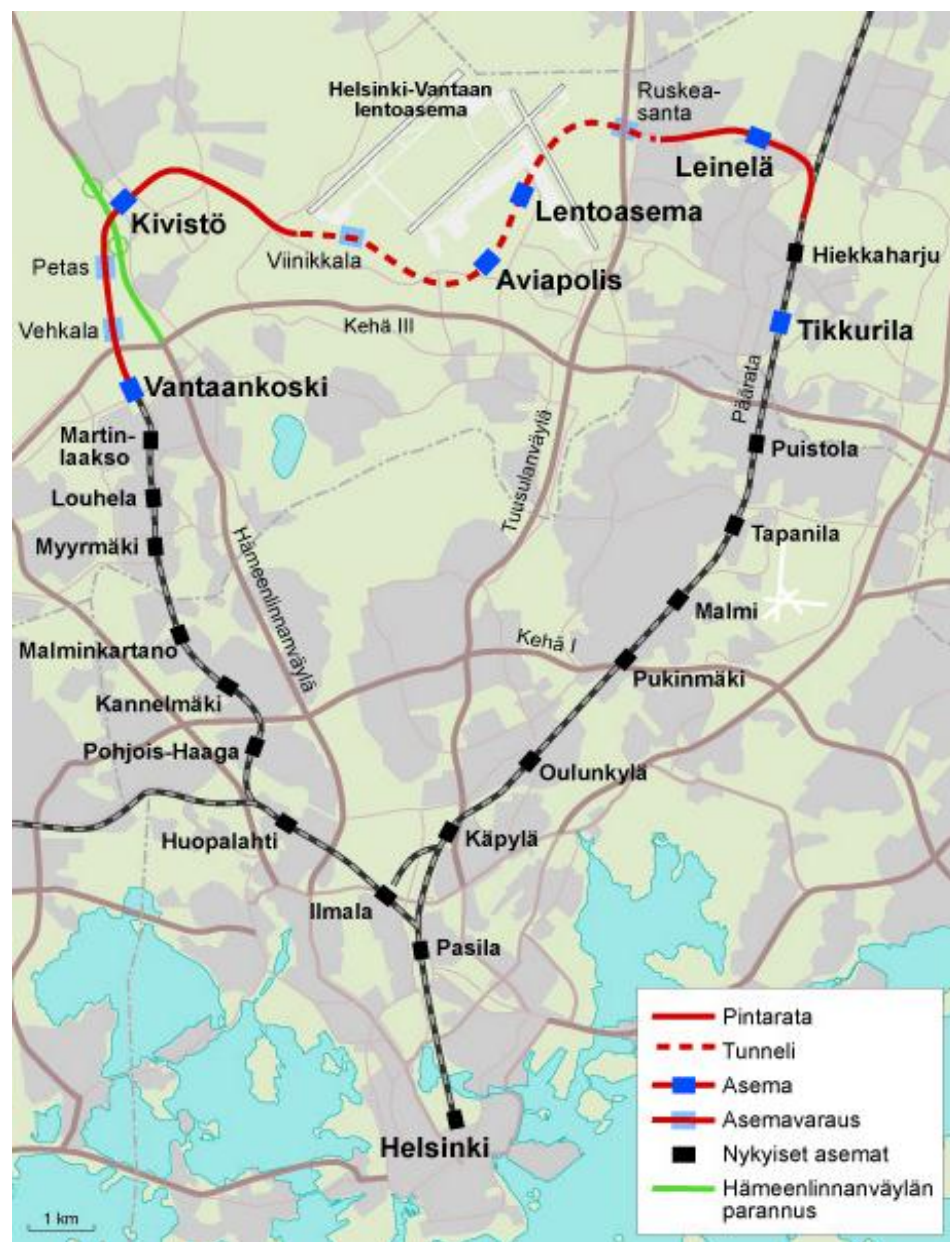
1.2 Kehärata

Kehäradan tarkoituksena on muodostaa joukkoliikenteen runkoyhteys Helsinki-Vantaan lentoaseman kautta pääradan ja Vantaankosken radan välille (Kuvio 2). Kehärata liittyy tärkeänä osana pääkaupunkiseudun kaupunkirataverkkoon, mikä parantaa koko asuinseudun joukkoliikennetarjontaa. Rata tulee yhdistämään sitä koskevan seudun asuin- ja työpaikka-alueen ja on samalla raideyhteys kansainväliselle Helsinki-Vantaan lentoasemalle.

Kehärata on 18 kilometriä pitkä ja se tuo raideliikenteen yhteyteen uusia alueita Vantaalla. Liityntäliikenne mahdollistaa junaliikenteen hyödyntämisen kauempaakin Uudeltamaalta. Kehäradan ideana on vähentää linja-auto- ja henkilöautoliikenteen tarvetta ja niiden aiheuttamia ympäristöhaittoja sekä tätä kautta edistää EU:n ilmastopoliittisia tavoitteita. (Liikennevirasto, 2012.)

Kehäradan tiedot lukuina

- kustannusarvio on 605 M€
- kaksiraiteinen henkilöliikenteen rata
- radan mitoitussnopeus 120 km/h
- radan pituus 18 km
- uusia asemia 4 kpl ja asemavarouksia 4 kpl
- liityntäpysäköintipaikkoja 1. vaiheessa autoille noin 500, lisäksi rakennetaan polkupyöräpaikkoja. Pysäköintipaikkoja lisätään tarpeen mukaan. (Liikennevirasto, 2012.)



Kuvio 2. Kehärata kartta

(http://portal.liikennevirasto.fi/portal/page/portal/f/hankkeet/kaynnissa/keharata/reitti_ja_asetat/Keh%E4rata.jpg, 2012.)

2 JT-MITTAUS OY

JT-Mittaus Oy on perustettu vuonna 2004 kolmen maanmittausinsinöörin toimesta. Yrityksen päätoimipaikka sijaitsee Järvenpäässä. JT-Mittaus Oy tarjoaa mittauspalveluita rakennusmittausten, kartoitusten ja laadunvalvonnan tarpeisiin sekä laserkeilausmittauksia. Rakennusmittausten osaamisalueina ovat tienrakennusten, rautateiden, tunneleiden ja maanrakennusmittaukset sekä pisteverkkojen rakentaminen ja jonomittausten suorittaminen. Kartoituspalvelu tarjoaa maastomalleja, kaapelikartoituksia ja alueiden pinta-ala- sekä tilavuuskartoituksia. Laadunvalvonnassa tarjotaan kantavuuskokeita, massa- ja määrälaskentoja, asiantuntijapalveluita ja valvontamittauksia. Laserkeilaus tarjoaa laajan kolmiulotteisen mallintamisen tunneleissa, kaivoksissa, silloissa ja rakennuksissa. (JT-Mittaus Oy, 2012.)

Mittauspalvelu kattaa lähes koko Suomen painottuen kuitenkin pääkaupunkiseudulle. Suurimmat työmaat ovat olleet Kehä III:n parannus, Kehäradan tunnelimitaukset Lentoaseman tunnelissa (Helsinki-Vantaa lentoasema) ja Ruskeasannan tunnelissa. Uusimpana suurena työmaana ovat usean Länsimetron työmaa-alueen tunnelimitaukset. Yhteistyökumppaneina toimii suuria suomalaisia rakennusyhtiöitä kuten YIT, Skanska, SRV, VR-Rata Oy sekä Euroopan suurimpiin rakennusyhtiöihin kuuluva itävaltalainen Strabag-konserni. JT-Mittaus työllistää vakituisesti noin 10 henkilöä ja kesäisin maanmittausalan ja rakennusalan opiskelijoita 3-5 henkilöä

2.1 Kalusto ja referenssit

Yrityksen kalustoon kuuluu useita Trimble S6-sarjan takymetriä sekä Trimblen S8-sarjan ja Leica 1200-sarjan takymetri. Uusimpana hankintana on Leica HDS 6000 laserkeilain ja Leican Cyclone ohjelmisto.

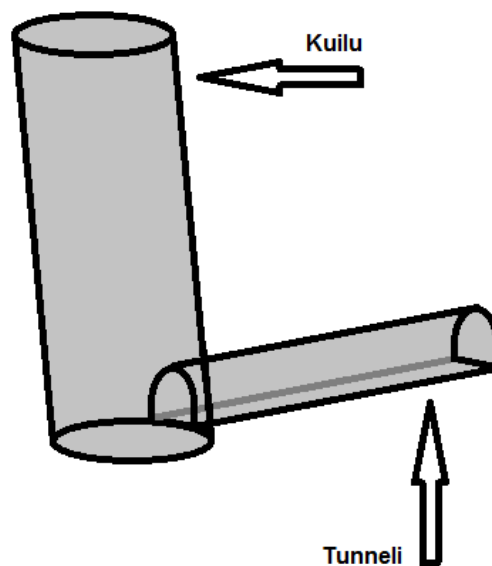
Ohjelmistona JT-Mittaus Oy:ssä käytetään pääsääntöisesti 3D-Win maanmittausohjelmisto ja Autodeskin AutoCAD LT2011 -ohjelmaa, tekstinkäsittely- ja taulukkolaskentaohjelmat ovat myös käytössä. Lisäksi AutoCAD -ohjelmaan on hankittu TMS lisäohjelma, jota käytetään tunnelimitausten käsittelyssä. Laserkeilaimen aineiston käsittelyyn on omana ohjelmana Leica Cyclone. (JT-Mittaus Oy, 2011.)

JT-Mittaus Oy on vuosien varrella saanut suuria työmaita mitattavaksi. Näitä ovat mm. Länsimetron tunnelilouhintamittaukset usealla eri työmaalla, Kehäradan louhintamittaukset Lentoaseman (Helsinki-Vantaa lentoasema) ja Ruskeasannan työmailla sekä E18-motoritien useat tunnelit, Ratahallintokeskuksen useiden junatunneleiden mittaukset ja Vuosaaren sataman tunneleihin liittyvät mittaukset.

Ajallisesti historia tunnelimittauksista on lyhyt, mutta tästä huolimatta JT-Mittaus Oy:llä on paljon kokemusta tunnelimittauksesta. Yritys on hankkinut uutta kalustoa, jotta se pystyy suorittamaan yhä vaativampia tunnelimittauksia ja tarjoamaan mittauspalveluita näihin.

3 TUNNELI

Yleensä tunnelit rakennetaan kallion tai jonkin muun maa-aineksen sisään. Rakentaminen voidaan myös tehdä maanpinnan päälle esimerkiksi elementeillä, jotka yhdessä muodostavat tunnelin. Tunnelit voivat olla vaakasuoria tai vaakasuorasta jonkin verran poikkeavia. Pystysuoria ja pystysuorasta hieman poikkeavia tunneleita kutsutaan kuiluiksi (Kuvio 3). Tunneleiden yleisimmät käyttökohteet ovat liikenneväylät, väestönsuojat, varastotilat, parkkihallit, vesihuollon ja voimalaitoksien tarpeisiin tehdyt rakennelmat. (Wikipedia, 2012.)



Kuvio 3. Vinokuilu ja vaakasuorasta poikkeava tunneli.

3.1 Tunnelirakentaminen ja tunnelin mittauspisteistö

Tunnelit rakennetaan yleensä kolmella eri menetelmällä poraus-, räjäytys- tai kaivumenetelmällä. Tunnelit joudutaan usein vahvistamaan väliaikaisilla tai pysyvillä maarakenteen vahvistusmenetelmillä. Tunnelin vahvistusmenetelmiä ovat esimerkiksi kallion pulttaaminen, ruiskubetonointi tai tunnelin seinät voidaan vahvistaa erilaisia elementtiratkaisuja käyttäen. Väliaikainen vahvistusmenetelmä voidaan suorittaa siten, että maaperä jäädytetään ennen kaivamista. Vahvistamismenetelmien tarkoituksena on estää työ- ja käytönaikaiset romahdukset sekä irtokivien putoamiset seiniltä ja katosta. (Wikipedia, 2012). Kuviossa neljä näkyy, että tunnelin seinillä on käytetty vahvistusmenetelmänä ruiskubetonointia.



Kuvio 4. Kehäradan tunneli. (<http://www.vantaansanomat.fi/artikkeli/96589-keharadan-tunnelin-louhintatyo-lahes-valmis>, 2012.)

Maanalaiset työt edellyttävät maanpäällistä kiintopisteverkkoa. Maanpäällisiä taso- ja korkeuskiintopisteitä käytetään maanalaisen rakentamisen sijainnin ja suunnan saamiseksi. Kun rakentamisen on laajaa ja suurta tarkkuutta vaativaa, kuten esimerkiksi metrotunnelin rakentaminen. Tarkkuudelle asetetut vaatimukset voivat olla niin suuria, että olemassa oleva kiintopisteverkko ei täytä vaatimuksia. Tällaisessa tapauksessa on pisteverkko tarkistettava ja tehtävä yhtenäiseksi. (Salmenperä, 2003. 145.)

Ennen tunnelissa tehtäviä työmittauksia on tunnelissa oltava hyvät mittalaitteen orientointipisteet. Nämä tuodaan tunneliin verkkomittausperiaatteella ja verkkomittauksen jälkeen halutut tankopisteet lasketaan tasoituslaskenta menetelmällä. Orientointipisteissä ei saa olla kuin muutaman millimetrin heitto tasoituslaskennan jälkeen, jotta niihin voi luottaa. Tunneleissa suunnistaminen ilman mittavälineiden apua on mahdotonta. Tunneliin mittauspisteverkon suunnittelu- ja toteutusvaiheessa on tärkeä keskittyä seuraaviin asioihin.

- Miten mittauspisteverkko onärkevin mitata, etäisyydet on oltava mahdollisimman pitkät ulkona tehtävässä verkossa (100m on hyvä matka) ennen tunneliin menoa.

- Mittauspisteverkon muodostavat kolmiot. Kolmioissa olevat pisteet tulee näkyä jokaiselta pisteeltä, jotka muodostavat kolmion. Mahdolliset esteet mitattavien pisteiden välillä hankaloittavat verkon tekoa todella paljon. Pisteiden välille joudutaan joskus tekemään jalkapisteitä, jolloin tarkkuus voi pisteiden välillä huonontuu.
- Koje jolla tähykset mitataan kiinni, pitää olla kulmanmittaustarkkuudeltaan mahdollisimman tarkka, koska tunnelissa olevien pisteiden välille syntyvät kulmat ovat pieniä.
- Tunneliin mitattu verkko lasketaan erillisellä tietokoneohjelmalla, minkä avulla halutut mittapisteet saadaan tasoituslaskettua ja niitä voidaan sen jälkeen käyttää tunnelimittauksessa. (JT-Mittaus Oy, 2011.)

3.2 Tunnelirakentamisen vaiheet

Tunneli rakennetaan yleensä vaiheittain. Tilaa on yleensä vähän ja turvallisuus on otettava huomioon. Louhinta-alueen läheisyydessä oleva asutus pitää ottaa huomioon. Asutusalue ja sen asukkaat otetaan huomioon räjähtävän räjähdysaineen määrää rajoittamalla, tällä rajoitetaan räjähdyksestä aiheutuvaa tärinää ja melua. Kallioon porataan porausjumbolla reiät, panostuksen ja räjäytysaineen määrät riippuvat kohteesta. Rakentamisen vaiheet käydään läpi seuraavassa kuvasarjassa. Kuvasarja kuvaa Pohjoismaissa yleisimmin käytettyä poraus- ja räjäytysmenetelmän työkierrosta tunnelinlouhinnassa. (Lemminkäinen Infra Oy, 2012.)



Kuvio 5. Tunnelin poraus. Tunnelia louhitaan eteenpäin poraamalla tunnelin perään panostus- ja avausreiät (<http://www.finnpark.fi/phamppi/kuinka/tunnelilouhinnan-tyovaiheet>, 2012.)



Kuvio 6. Räjätys. Poratut reiät panostetaan räjäytysaineella ja reiät ajastetaan räjähtämään halutussa järjestyksessä, Yleensä räjäytys kestää noin 6-8 sekuntia (<http://www.finnpark.fi/phamppi/kuinka/tunnelilouhinnan-tyovaiheet/>, 2012.)



Kuvio 7. Lastaus. Räjähdyksen jälkeen tunneli tuuletetaan puhtaaksi ampumisen aikana syntyneistä kaasuista. Tämän jälkeen irtonainen kiviaines kuljetetaan pois tunnelista (<http://www.finnpark.fi/phamppi/kuinka/tunnelilouhinnan-tyovaiheet/>, 2012.)



Kuvio 8. Rusnaus. Tunnelin rusnauksessa irtonaiset ja löyhästi kiinni olevat kivet irrotetaan tunnelin katosta, seinistä ja tunnelin perästä (<http://www.finnpark.fi/phamppi/kuinka/tunnelilouhinnan-tyovaiheet/>, 2012.)



Kuvio 9. Betonointi. Tunneli vahvistetaan ruiskubetonoinnilla ja injektoinnilla, joiden avulla tunnelista saadaan kestävämpi ja estetään pienten kivien putoaminen katosta ja seiniltä (<http://www.finnpark.fi/phamppi/kuinka/tunnelilouhinnan-tyovaiheet/>, 2012.)

4 LASERKEILAUUS

4.1 Laserkeilain yleisesti

Laserkeilaus täydentää maanmittausta yksityiskohtaisella mittausmenetelmällä, jonka avulla pystytään keräämään tietoa ympäröivästä maailmasta monipuolisesti ja nopeasti. Laserkeilain on koje, jolla mitataan kohteita itse koskematta kohteeseen. Mittausmenetelmä muistuttaa monella tavalla takymetrin prismatonta mittausta. Mittalaitteessa olevasta nollapisteestä lähetetään lasersäde, jonka avulla mitataan kohteen etäisyys mittalaitteesta. (Joala 2006, 1.)

Mittaamalla mittauskohde laserkeilaimella saadaan kohdetta esittävä miljoonien pisteiden muodostama kolmiulotteinen pistepilvi. Pisteistä voidaan muodostaa kohdetta kuvaavia kolmioverkkoja, korkeuseroja kuvaavia esityksiä, poikkileikkauksia ja vaakaleikkauksia. Pistepilvellä voidaan tehdä vertailuja teoreettisiin pintoihin tai profiileihin. Rakenteita voidaan mallintaa kolmiulotteisia geometria muotoja apuna käyttäen, jotka on mahdollista siirtää CAD-sovellukseen jatkotyöskentelyä varten. (JT-Mittaus Oy, 2012.)

4.2 Laserkeilainten toimintaperiaatteet

Opinnäytetyötä koskevissa mittauksissa on käytetty kahdella eri toimintaperiaatteella toimivaa laserkeilainkojetta. Toimintaperiaatteeltaan nämä ovat pulssilaser ja vaihe-erolaser. Trimble VX on pulssilaseria käyttävä takymetri ja Leica HDS 6000 on vaihe-erolaseria käyttävä laserkeilain. On olemassa myös muulla toimintaperiaatteella toimivia laserkeilaimia, kuten monipistelaser ja jatkuva-aaltainen pulssilaser.

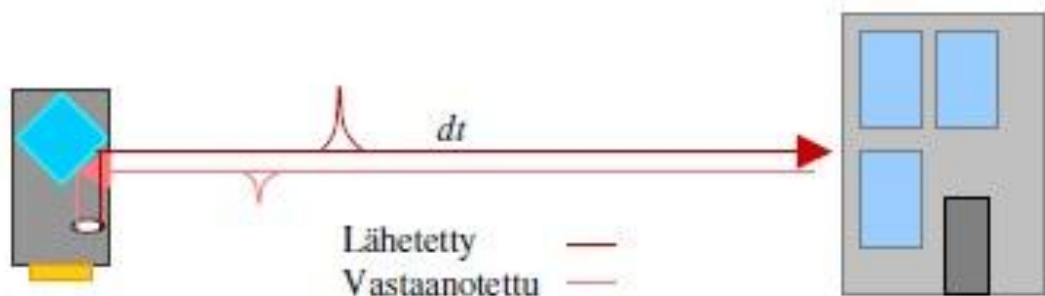
Yleisimmin käytetyt 3D-skannerien mittaustekniikat perustuvat analogiseen signaalinkäsittelytekniikkaan. Tällaista mittaustekniikkaa käytetään 2D- ja 3D-laserskannerien sekä takymetriensä kanssa. Ilmalaserkeilain keilain eroaa edellä mainituista mittalaitteista siten, että siinä analogisella signaalinkäsittelyllä voidaan tulkita kahdesta viiteen eri mittauskohdetta yhdestä lähetetystä pulssista. Digitaaliseen signaalinkäsittelytekniikkaan perustuva mittaustekniikka mahdollistaa rajattoman määrän mitattuja pisteitä, joko yhdestä reaaliaikaisesti lähetetystä mittauspulssista tai siitä tehdyn jälkilaskennan avulla. Tämän seurauksena jokaisesta jälkilasketusta

pisteestä saadaan lisätietoa sen kohtauskulmasta ja materiaasta. Suomeksi tästä mittaustekniikasta on vakiintumassa nimike ”monipulssilaser”. Tarkemmin ilmaistuna tämä tarkoittaa tekniikkaa, joka perustuu palautuvan signaalin digitointiin ja analysointiin. Kyseinen tekniikka auttaa tunnistamaan rajattoman määrän signaalin kohtaamia esteitä ja pintoja ja samalla se myös tallentaa niiden ominaisuustietoa. (Heinonen, 2012.)

4.2.1 Pulssilaser

Pulssi- eli aikaerolaserit toimivat lähettämällä laserpulssin kahden suuntakulman määrittämään suuntaan. Pulssin edestakainen kulku-aika mitataan laserista kohteeseen (Kuvio 10). Aikaeron perusteella lasketaan etäisyysmittaustulos seuraavaa kaavaa käyttäen $r = \frac{dt \times c}{2}$ (r = etäisyys, dt = pulssin mitattu kulku-aika ja c = valon nopeus). Mittaustapahtuman tarkkuus riippuu laserkeilaimen ajanmäärittelyn tarkkuudesta, sekä kohteen ja pulssin ominaisuuksista.

Kolmiulotteinen näkemä ympäristöstä saadaan muodostettua lähettämällä laser eri suuntiin. Etäisyydet saadaan mitattua suurella vaihteluvälillä, joka on muutamasta metristä yli kilometriin, mutta yleensä havaintojen toistotaajuus on muutamia tuhansia havaintoja sekunnissa. (Kukko, 2005. 7.)



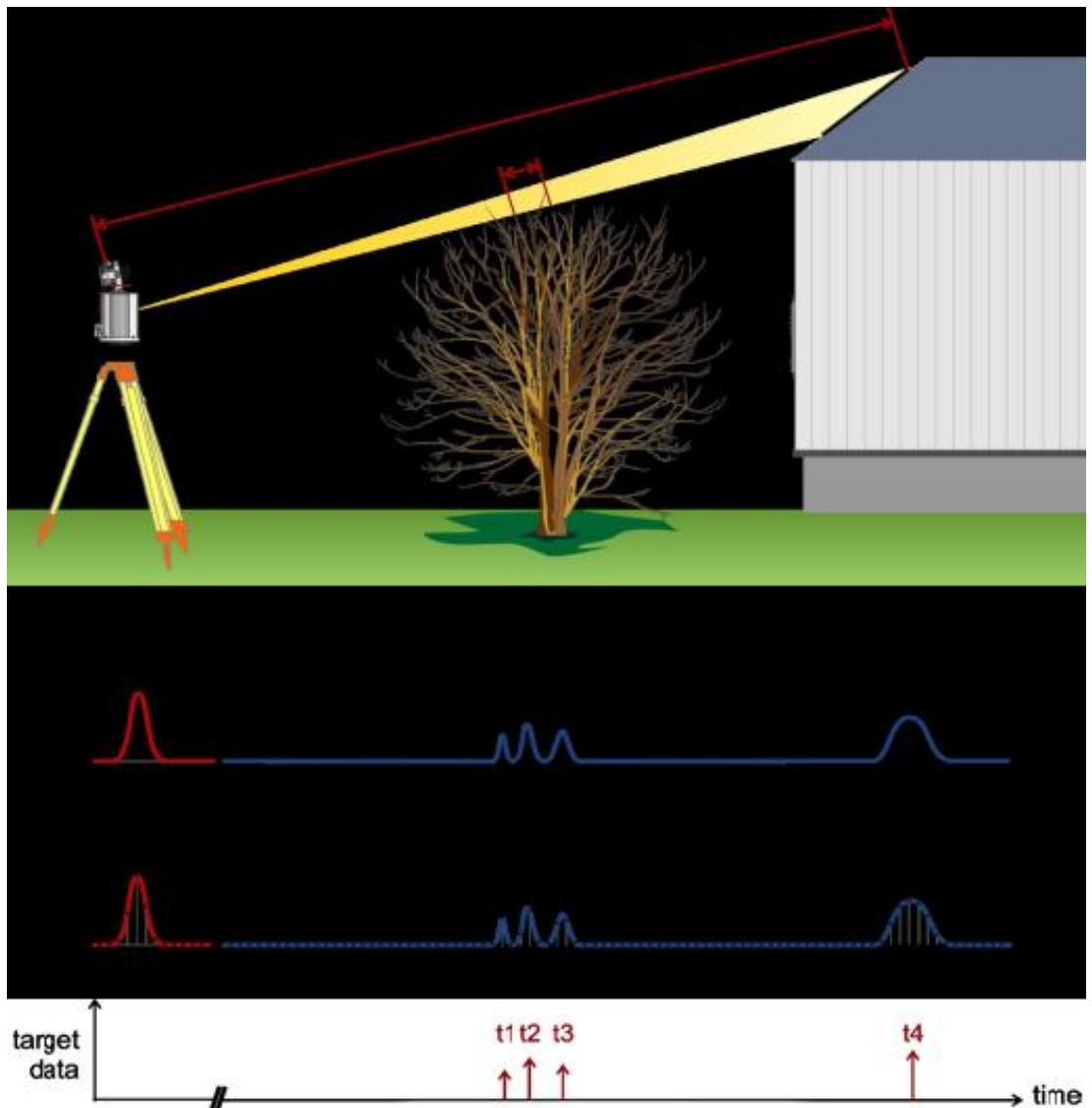
Kuvio 10. Pulssilaserin toiminta (Kukko, 2005. 7)

4.2.2 Monipistelaser

Digitaalinen pulssilaser, jonka toiminta perustuu täyden aallonmuodon analysointiin ja digitointiin. Digitaalinen mittauspulssin käsittely on tuonut pulssilaserin yhdeksi nopeimmista mittaustekniikoista myös 3D-maalaser skannereissa. Ennen ainoa tekniikka mitä voitiin käyttää pitkien mittausetäisyyksien saavuttamiseksi, oli 2D ilmalaser skanneri, joka toimi

pulssilasertekniikalla. Nykyään myös maalaserkeilaimella voidaan mitata pitkiä etäisyyksiä.

Monipistelaser käyttää mittausalgoritmia, joka perustuu digitaaliseen signaalin käsittelyyn ja tällä tavoin mahdollistetaan todella nopea ja tarkka mittaaminen laserkeilaimella. Aikaisemmin mittaustekniikkaan on kuulunut, että mitattavan kohteen mittausta keskiarvoitettiin, joka vie jonkin verran aikaa. Nykyisin tällä tekniikalla saavutetaan suuri tarkkuus analysoimalla palautuneen signaalin muotoa jokaisen kaiun kohdalla erikseen ja vertailemalla sitä mittalaitteen muistiin tallennettuihin palautuviin signaaleihin, jotka muodostavat muotokirjaston (Kuvio 11). Kohteen etäisyys määritetään analysointitoiminnolla, joka hakee kirjastosta lähinnä samaa muotoa olevan signaaliprofiilin ja käyttää tälle muodolle määritettyä laskenta-algoritmia.



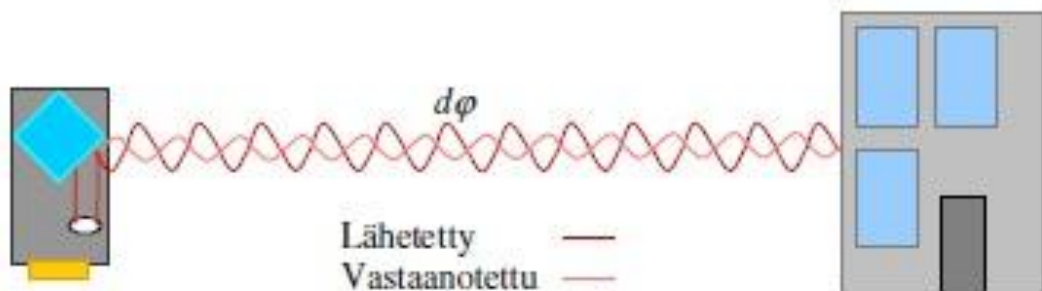
Kuvio 11. Monipistelaser, kaiun digitointi (Heinonen, 2012.)

Mittausalgoritmin on kehittänyt Riegl Laser Measurement System GmbH, joka lupaa algoritmilleen toistotarkkuudeksi jopa 3 mm 100 metrin etäisyyteen saakka ja todelliseksi tarkkuudeksi referenssiin verrattuna 5 mm ja matkan ylittäessä 100 metriä arvot heikentyvät 1 mm jokaista 200 metriä kohden. Tekniikan avulla laserkeilaimiin voidaan lisätä täyden aallonpituuden taltionti, jolloin käyttäjällä on mahdollisuus jälkilaskennan avulla analysoida signaalin muotoja ja hakea haluamansa materiaaliin pisteet aineistosta, kuten kallion pinta. (Heinonen, 2012; Nordic Geo Center Oy, 2012.)

4.2.3 Vaihe-erolaser

Vaihe-erolaser toimii lähettämällä jatkuvaa signaalia, jonka intensiteetti on moduloitu siniaallolla tai jollain monimuotoisemmalla aaltomuodolla, jossa on useampia eri kanta-aallonpituuksia. Kuten aikaerolaserissa signaali heijastuu kohteesta ja lähetetyn ja vastaanotetun signaalin välinen vaihe-ero mitataan (Kuvio 12). Useamman aallonpituuden moduloinnilla saadaan kanta-aallon kokonaislukutuntematon ratkaistua luotettavasti. Etäisyyshavainto saadaan vaihe-eron ja kokonaislukutuntemattoman avulla.

Ympäristöstä saadaan muodostettua kolmiulotteinen näkemä samalla tavoin kuin pulssilaserillakin. Vaihe-erolasereiden toistotaajuus on huomattavasti suurempi, kuin pulssilaserissa. Vaihe-erolaserissa päästään jopa 250 kHz taajuuksiin, ja etäisyysresoluutio on parempi kuin pulssilaserissa. Mittausetäisyys on suurimmillaan rajoittunut alle 100 metriin. (Kukko, 2005. 7.)



Kuvio 12. Vaihe-erolaserin toiminta (Kukko, 2005. 7.)

Vaihe-ero mittaustapana eroaa takymetrin ja laserkeilaimen välillä, josta johtuen takymetrillä tehtävä mittaus kestää suhteellisen kauan, jopa useamman sekunnin verrattuna laserkeilaimella tehtävään mittaukseen. Takymetrillä tehtävässä mittauksessa tähtäys pysyy paikallaan ja tästä

johtuen etäisyys pystytään määrittämään usealla eri pituuden omaavalla yksikköjanalla, yleensä yksikkö janoja on neljä kappaletta. Yleisimmin käytetyt yksikköjanan pituudet ovat takymetreissä, ensimmäinen yksikköjana 10 kilometriä, toinen kaksi kilometriä, kolmas noin 400 metriä ja neljäs yksikköjana 2 metrin luokkaa tai jopa alle.

- Ensimmäinen yksikköjana on janoista pisin, jolla mitataan karkea matka tähtäyspisteeseen. Tämän jälkeen tiedetään kuinka monta kokonaista seuraavan yksikköjanan pituutta on mitattavalla kokonaismatkalla.
- Toisena olevalla yksikköjanalla mitattaessa saadaan laskettua, kuinka monta kokonaista kolmannen yksikköjanan pituutta on mitattavalla kokonaismatkalla.
- Kolmannella yksikköjanalla mitattaessa saadaan tietoon, kuinka monta neljännen yksikköjanan eli hienomittausyksikköjanan pituutta on mitattavalla kokonaismatkalla.
- Hienomittausyksikköjana on lyhin yksikköjanoista, jolla etäisyys saadaan määritettyä tarkimmin yksikköjanoista. Mittauksia suoritetaan tähtäyspisteeseen kymmeniä tuhansia toistoja. Toistoista poistetaan yksittäiset havainnot laskenta-algoritmin avulla ja havainnoista lasketaan etäisyys painotettuna keskiarvona.

(Heinonen, 2012.)

Laserkeilaimille ilmoitetut maksimi mittauspistemäärät esimerkiksi 500 000 pistettä/sekunti ilmoitetaan aina laserkeilaimen peilin pyöriessä maksimi nopeudella ja laserkeilaimen mitatessa samaa poikkileikkausta jatkuvasti. Esimerkin laserkeilaimelle ilmoitettu maksimi mittauspistemäärä tarkoittaa käytännössä sitä, että laserkeilain pystyy vastaanottamaan 500 000 mittauspulssia sekunnissa. Laserkeilaimella mitattaessa ei kohdetta mitata usealla aallonpituudella toisin kuin takymetrillä. Tämä johtuu siitä, että mittaus säde ei pysy paikallaan mittauskohteessa vaan liikkuu mitattavan kohteen pinnalla nopeasti. Jos halutaan tarkkuuttaa etäisyysmittaukseen pitää peilin pyörimisnopeutta hidastaa, tällöin laserkeilain ehtii mitata useamman pisteen, jotka ovat toisiaan lähellä. Keskiarvotuksella saadaan useasta pisteestä parempi tulos. Peilin pyörimisnopeuden hidastamisella

saadaan myös pienennettyä mittaustuloksiin syntyvää kohinaa. (Heinonen, 2012.)

4.2.4 Jatkuva-aaltainen pulssilaser

Jatkuva-aaltainen pulssilaser eli Pulsed Wave on pulssilaserin- ja vaihe-erolaserin –tekniikoiden yhdistelmä. Toiminta perustuu siihen, että samasta aallosta rekisteröidään aikaerotekniikalla eli pulssilasertekniikalla edestakainen kulkuaika, jolla saadaan määritettyä karkea etäisyys kohteeseen. Jatkuva-aaltotekniikalla eli vaihe-erotekniikalla samasta aallosta rekisteröidään taajuuden vaihe-ero, jolla saadaan määritettyä tarkka etäisyys. Eli yksinkertaisemmin pulssiaikaeromittauksella saadaan määritettyä nopeasti etäisyys kohteeseen desimetrin tarkkuudella ja tällöin voidaan käyttää lyhyttä yksikköjanaa vaihe-eromittauksessa, jonka pituus on alle yhden metrin. Lyhyellä yksikköjanalla saadaan tuotettua tarkka lopputulos hienomittauksessa. Mittaustekniikan etuna on se, että etäisyydenmittaustarkkuus säilyy hyvänä koko matkan. (Heinonen, 2012.)

4.3 Laserkeilauksen laatu

Laserkeilauksen mittaustuloksena saadaan pistepilvi. Yleensä pistepilvi mitataan, koska halutaan mallintaa mitattu kohde. Laserkeilausprojektin laatuun vaikuttavat laadun seuraavat kriteerit:

- yksittäisen mitatun pisteen laatu
- pistepilven tiheys
- erikseen mitattujen pistepilvien yhdistäminen.

(Joala, 2006. 3.)

4.3.1 Yksittäisen mitatun pisteen laatu

Mitattujen pisteiden hajonta on yksi tärkeimmistä vaikuttavista tekijöistä. Tähän vaikuttaa mittaussäteen osumiskulma kohteeseen. Tämän seurauksena kohteiden mallinnuksessa on erittäin tärkeää seurata jäännösvirheitä. Mittausmatkan kasvaessa kohteen ja mittalaitteen välillä palaava signaali heikkenee. Mitattavan kohteen pinnan ominaisuudet vaikuttavat paluusignaalin voimakkuuteen. Esim. mittaussignaali palautuu eri tavalla rapatusta seinästä kuin maalatusta pinnasta tai ruosteisesta teräksestä. Kohteen kaarevuus vaikuttaa myös palautuvan signaalin voimakkuuteen.

Osa laserkeilaimista tallentaa mitatun pisteen koordinaattien lisäksi myös paluusignaalin voimakkuuden. Paluusignaalin voimakkuutta voidaan visuaalisesti esittää tietokoneen näytöllä jokaisen pisteen kohdalla värierona tai harmaasävyn erona. Intensiteettiä (palautuvan signaalin voimakkuutta) hyödyntäen voidaan tasomaiselta pinnalta erottaa myös tekstuuria (kuvioita ja tekstejä). Jotkut mittalaitteiden valmistajat esittävät tietokoneen näytöllä sävyerot matkan funktiona, jolloin tasomaiset kohteet näyttävät katsojalle samanvärisinä (tekstuuri ei erotu). Värieron käyttö on osoittautunut käytännössä monipuoliseksi ja miellyttäväksi. Sisäisen kameran avulla voidaan määrittää jokaiselle pisteelle niiden oikea väri tai liittää ulkoisella kameralla kuvatun valokuvan avulla värit pistepilven pisteille. (Joala, 2006. 3.)

4.3.2 Pistepilven tiheys

Yleensä pistepilvi mitataan jatkokäsittelyä varten, koska pistepilveä käytetään kohteen mallintamiseen. Laatuun vaikuttavat mallintamisessa pistepilven pisteiden keskinäinen välimatka. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että tiheämpi pistepilvi, sitä tarkemmin voidaan mallintaa sen sisältämiä tasoja ja pintoja. Kuitenkaan ei saa unohtaa, että tiheä pistepilvi ei ole silti tarkka jos mitatun pistepilven pisteiden tarkkuus on huono. Pisteiden tiheys pistepilvessä heikkenee matkan funktiona. (Joala, 2006. 3.)

4.3.3 Erikseen mitattujen pistepilvien yhdistäminen

Yleensä yhdeltä mittausasemalta tehty mittaus ei riitä, koska kohteista jää usein alueita piiloon, pitää skannaus suorittaa useammalta mittausasemalta. Mitatut pistepilvet voi yhdistää monin eri tavoin yhdeksi suureksi pistepilveksi.

Yhteisten tähysten käyttö on tarkin menetelmä pistepilvien yhdistämiseksi, eli pistepilvissä täytyy olla vähintään kolme yhteistä tähystä, joiden avulla pistepilvet saadaan yhdistettyä samaan koordinaatistoon. Tähysten keskipisteet täytyy näkyä mitatussa pistepilvessä, jotta ne saadaan yhdistettyä. Yleensä tähykset ovat tasomaisia, pallomaisia tai puolipalloja. Tähysten keskipisteiden määrittäminen tapahtuu pistepilvestä ns. automaattisesti ja keskipisteet voidaan mitata tarvittaessa takymetrillä koordinaattijärjestelmään, jos pistepilvi halutaan koordinaattijärjestelmään.

Tällä menetelmällä yhdistämisessä saavutetaan parhaimmillaan 1-3 mm tarkkuus.

Yhdistämiseen voidaan myös käyttää mallinnetuissa kohteissa näkyviä yhteisiä pisteitä. Yhdistämistapa vaatii kahdelta yhdistettävältä pistepilveltä, että niillä on vähintään kolmasosa yhteistä peittoa mitatusta alueesta. Pistepilvistä näytetään vähintään kolme yhteistä pistettä, joiden avulla suoritetaan pistepilvien likiarvosovitus. Pistepilvet muutetaan samaan koordinaatistoon parhaalla mahdollisella tavalla, jossa minimoidaan jäännösvirheet. Yhdistystavalla saavutetaan 5-10 mm yhdistämistarkkuus. Isojen mittausprojektien pistepilvet yhdistetään käyttäen edellä mainittuja yhdistysmenetelmiä ja niiden yhdistelmiä. (Joala, 2006. 4.)

4.4 Tunneleiden laserkeilaus

4.4.1 Huomioitavat asiat ja ongelmat

Tunneleista tarvitaan nykyisin tarkkaa tietoa sijainnista, suunnasta ja muodosta. Laserkeilauksella tarkastetaan onko louhinta suoritettu suunnitelmaprofiilin mukaisesti. Laserkeilauksesta voidaan myös tarkastaa louhinnan kuutiomäärät, koska louhinnan etenemiselle on asetettu tietyt louhintatoleranssit. Lisäksi tarkat mallit tunnelista helpottavat lopullisen suunnittelun tekemistä ns. sisustus-suunnittelua. Sisustus-suunnitelmaa tehdessä pitää olla varma siitä, että kaikki rakennelmat mahtuvat tunnelin sisälle niille sovittuihin paikkoihin. (Mättö, 2012.)

Tunneleita rakennettaessa tehdään suunnitelmat tunnelin sijainnista ja tunnelin poikkileikkaukselle sopivasta profiilista. Profiilit määrittelevät louhittavan alueen ja tunnelin muodon sekä tunnelin teoreettisen tilavuuden ja mitat. Laserkeilauksen tarkoituksena on seurata louhinnan kulkua eli onko louhittu liikaa vai liian vähän suhteessa profiilin määrittelemiin mittoihin. Tunnelin profiili määrittelee sen, onko louhinta liian vähäistä vai onko sitä liikaa. Louhitun tunnelin pitää seurata sovittujen toleranssien puitteissa teoreettisen profiilin muotoja.

Tunneleiden laserkeilauksessa on hyvä, että tunneliin on tehtynä pisteverkko, jotta skannattu pistepilvi saadaan oikeaan koordinaatistoon ja siitä saatavaa aineistoa voidaan verrata suunnitelmiin. Erityisen tärkeää skannauksessa on,

että skannattava alue on tyhjä ja siellä ei ole ylimääräistä liikennettä, jotta pistepilveen syntyy mahdollisimman vähän hajapisteitä ja tähykset eivät liiku eivätkä peity. Ylimääräiset hajapisteet voivat peittää skannattavan tunnelin seinää ja/tai kattoa, jolloin se hankaloittaa myöhemmin tehtävää pistepilven käsittelyä. Tunnelin lattialla mahdollisesti olevat vesilammikot eivät haittaa skannausta, koska tunnelin lattiatasoa ei verrata skannatusta pistepilvestä suunnitelmaan. Skannattava alue pitää olla vähintäänkin rusnattu, jos sitä ei ole betonoitu. Tunnelissa työskennellessä täytyy aina noudattaa turvallisuusmääräyksiä ja työmaaperehdytys tulee olla suoritettuna.

4.5 Laserkeilaus tunnelissa ja siitä saatava aineisto

Tunnelin skannaaminen aloitetaan levittämällä tähykset noin viiden metrin välein skannattavalle alueelle tunnelin molemmille seinustoille. Tähykset asetetaan siten, että ne ovat mahdollisimman kohtisuorassa tunnelin keskilinjaan nähden, jotta tähysten ristikot näkyvät mahdollisimman hyvin pistepilvessä (Kuvio 13). Tunnelin peräseinälle voidaan sijoittaa kaksi tähystä, jos skannattava alue ulottuu tunnelin peräseinään asti. Näin saadaan pistepilviin ainakin kaksi tähyistä, jotka näkyvät selkeästi vielä kolmen skannausaseman päästä. Seinustoille maalataan spraymaalilla selkeät numerot tähyksille, etteivät ne sekoitu keskenään pistepilviä yhdistettäessä. Tähysten sijainnit mitataan koordinaatistoon takymetrillä. Vähimmäisvaatimuksena tähysten mittauksessa on mitata koordinaatistoon skannattavan alueen alusta ja lopusta kummastakin vähintään neljä tähyistä, jos skannausasemia on useampia kuin kaksi. Vähimmäismäärää käyttäen mitatun ja käsitellyn aineiston sijaintitarkkuus koordinaatistossa pysyy kohtuullisena. Koordinaatistoon mitattavien tähysten määrää riippuu skannattavan alueen pituudesta. On kuitenkin suositeltavaa mitata kaikki tähykset koordinaatistoon, koska se helpottaa aineiston käsittelyä myöhemmin. Skannaaminen aloitetaan ensimmäisten tähysten kohdalta ja laserkeilainta siirretään eteenpäin jokaisen skannauksen jälkeen 15-20 metriä. Laserkeilain mittaa suhteellisen tiheää pistepilveä vielä 50 metrin päähän, mutta tunnelin muodon vuoksi skannausasemien välit on hyvä pitää edellä mainituissa mitoissa. Skannausasemien välin pidentyessä alkaa pistepilvien väliin muodostua alueita, joissa pistetiheys harvenee liian pieneksi. Viimeisen skannausaseman sattuessa tunnelin perään on

peräseinän ja skannerin väliin jätettävä noin viisi metriä. Tällä tavoin vältetään jatkuva työskenteleminen vaara-alueella.



Kuvio 13. Laserkeilaus (JT-Mittaus Oy, 2011)

Pistepilven avulla saadaan yksityiskohtaista tietoa mitatusta kohteesta. Aineistosta voidaan laskea tunnelin tilaavuus sekä mahdolliset yli- ja alilouhinnat. Mikäli mittaukset on suoritettu ennen ja jälkeen ruiskubetonointia voidaan laskea, täyttyykö betonoinnille määrätty paksuus seinillä ja katossa. Pistepilvestä voidaan myös etsiä tunneliin tehdyt pulttaukset ja injektioinnit.

5 LASERKEILAIN VS. TAKYMETRI

Tunnelimittausten vaatimukset ovat kasvaneet ja yhä useammin halutaan tarkempaa tietoa mitattavasta kohteesta. Tämän seurauksena markkinoille on tuotu tarkkaan mittaukseen soveltuvia laitteita. Näitä ovat mm. uudet nopeat laserkeilaimet.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on verrata laserkeilainta ja takymetriä keskenään vain tunnelissa tehtävään mittauksiin. Tutkimuksessa tarkastellaan Leica HDS 6000 laserkeilaimen ja Trimble VX -robottitakymetrin ominaisuuksia ja niiden vahvuuksia ja heikkouksia tunnelimittauksissa.

Laserkeilaus vastaa tarkkuudeltaan takymetrimittauksia, mutta vie vähemmän aikaa ja antaa yhtäjaksoista dataa mitattavasta pinnasta. Tiheällä skannauksella voidaan erottaa ja tallentaa kohteesta pienetkin yksityiskohdat. Laserkeilaukseen voidaan yhdistää panoraamavalokuvaus, joka antaa lisäinformaatiota kohteesta. Pistepilven käyttömahdollisuudet visualisoinnissa, mallintamisessa ja suunnittelussa ovat näin lähestulkoon rajattomat. (JT-Mittaus Oy, 2011.)

5.1 Takymetrin vahvuudet ja heikkoudet

Trimble VX Spatial Station on monipuolinen mittauskoje, jossa on samassa kojeessa takymetri ja 3D-skanneri.

Taulukko 1. Trimble VX SpatialStation tekniset tiedot. (Geotrim Oy, 2012.)

Laserkeilaus	Kantama	1 m – 250 m
	Nopeus	15 pist/s, tyypp. 5 pist/s
	Minimi pistetila	10 mm
	Keskivirhe	3 mm @ ≤150 m
	<i>Yhden 3D-pisteen tarkkuus</i>	10 mm @ ≤150 m
	Kulman tarkkuus	1" (0,3 mgon)
	Automaattinen tasauksen kompensattori	Kyllä
Muu etäisyysmittaus		
Tarkkuus (RMSE)	Prismamoodi vakio	2 mm + 2 ppm
	Prismamoodi seuranta	4 mm + 2 ppm
	DR-moodi vakio	2 mm + 2 ppm
	DR-moodi seuranta	4 mm + 2 ppm
Mittauksen kesto	Prismamoodi vakio	1,2 s
	Prismamoodi seuranta	0,4 s
	DR-moodi vakio	1–5 s
	DR-moodi seuranta	0,4 s
Kantama	Prismamoodi 1 prisma	2500 m
	Prismamoodi 1 LR	5500 m
	DR-moodi	1300 m (White Card, hyvä näkyvyys)
		600 m (Gray Card, hyvä näkyvyys)

	Jatkettu kantama	2000-2200 m (White Card)
	Jatkettu kantama, tarkkuus	10 mm + 2 ppm
Robottikäyttö	Kantama passiiviprismoiin	500-700 m
	Trimble MultiTrack Target	800 m
	Autolock-kohdistustarkkuus	<2 mm / 200 metrillä
Yleistä	Servojärjestelmä	MagDrive
	Liike- ja seurantanopeus	115 astetta /s (128 gon/s)
	Kääntymisaika 1 puolelta 2 puolelle	2,6 s
	Liikeruuvit	Servo, päättymätön hienosäätö
	Optinen luoti	Sisäänrakennettu
	Kaukoputken suurennus	30x
Kamera	Resoluutio	2048 x 1536 pikseliä
	Digitaalinen zoom	4-portainen (1x, 2x, 4x, 8x)
	Video	5 kuvakehystä /s
Ympäristö	Käyttölämpötila / IP	-20 °C... +50 °C /IP55
Virta & yleistä	Virtalähde	Ladattava Li-Ion akut 11,1 V, 4,4Ah
	Toiminta-aika 1 akulla	Noin 5 tuntia
	Toiminta-aika robottina	12 tuntia
	Paino, koje	5,25 kg 5,25 kg
EDM	Valon lähde	Pulssi, Laserdiodi 905 nm
	Laserosoitin	Laserluokka 2
Säteen hajonta	Prisma ja DR-moodi Vaaka	4 cm/100 m
	Prisma ja DR-moodi Pysty	8 cm/100 m

Kesällä töiden ohessa tehdyn keskustelun pohjalta, saimme tietoa Trimble VX Spatial Station takymetrin tunnelin skannauksen nopeudesta. Suurinta pistetiheyttä käytettäessä päästiin etenemään tunnelissa eteenpäin noin viisi metriä kahdeksassa tunnissa. (Järvenpää, 2011.)

Aineistoa ei tarvitse muuttaa erikseen koordinaattijärjestelmään, koska mitattava aineisto mitataan kojeen orientoinnin jälkeen koordinaattijärjestelmässä, jolloin aineiston käsittelystä säästyy aikaa.

Vahvuudet

- Mittauskaluston määrä pysyy pienenä, kun ei tarvita erillisiä tähyksiä ja laserkeilainta.
- Tunnelin profiilin suurpiirteinen tarkastaminen ja mittaaminen heti katkon jälkeen.
- Sisäänrakennettu kamera.
- Kantama 1-250 metriä.
- Mitatut pisteet ovat heti oikeassa koordinaatistossa.

Heikkoudet

- Skannauksen nopeus maksimissaan 15 pistettä/sekunti.

- Tarkasti mitattavan profiilin skannauksessa menee aikaa useita tunteja ja edetään vain muutama metri.
- Hitaus; yhden perusteellisen skannauksen mittaus kestää useita tunteja.

5.2 Laserkeilaimen vahvuudet ja heikkoudet

Leica HDS 6000 on laserkeilain, jonka skannaus perustuu vaihe-eron mittaamiseen.

Taulukko 2. Leica HDS 6000 tekniset tiedot (Leica HDS 6000)

Laitetyyppi	Kompakti, vaihe-eroon perustuva, kaksiakselinen sensori, ultranopea laserkeilain maamittaussuokan tarkkuudella ja täydellä näkökentällä												
Käyttöliittymä	Laitteen kosketuspaneeli tai ulkoinen notebook tai Tablet PC, tai PDA												
Tiedon tallennus	Integroitu kovalevy												
Yksittäisen mittauksen tarkkuus	Sijainti*	6 mm, 1 m 25 m:n kantama; 10 mm 50 m:n kantama											
	Etäisyys*	≤4 mm 90% heijastuksessa 25 m; ≤5 mm 18% heijastuksessa 25 m ≤5 mm 90% heijastuksessa 50 m; ≤6 mm 18% heijastuksessa 50 m											
	Kulma (Vaaka/pysty)	125 μrads/125 μrads (7.9mgon/7.9 mgon) yksi sigma											
Pisteen koko	3 mm ulos (Gaussian) + 0.22 mrad aukeama; 8 mm @25 m; 14 mm @50 m;												
Mallinnetun pinnan tarkkuus**/kohina	2 mm 25 m:llä; 4 mm 50 m:llä, 90% heijastus; yksi sigma 3 mm 25 m:llä; 7 mm 50 m:llä, 18% heijastus; yksi sigma												
Tähyksen mittaus***	2 mm keskipoikkeama												
Kaksi-akselinen sensori	Valittavissa on/off; Resoluutio 3.6"												
Laserkeilausjärjestelmä	Kantama Keilausnopeus	79 m ambiguteetti intervalli 79 m @90%; 50 m @18% heijastus Jopa 500 000 pistettä/s., maksimi etäisyysmittausnopeus											
	Keilaustiheys "Esikatselu" Keskitiheä (4x) Tiheä (8x) Supertiheä (16x) Ultratiheä (32x)	<table border="1"> <tr> <td>@10 m</td> <td>@50 m</td> </tr> <tr> <td>50,6 x 50,6 mm</td> <td>250 x 250 mm</td> </tr> <tr> <td>12,6 x 12,6 mm</td> <td>62 x 62 mm</td> </tr> <tr> <td>6,3 x 6,3 mm</td> <td>31,4 x 31,4 mm</td> </tr> <tr> <td>3,1 x 3,1 mm</td> <td>15,8 x 15,8 mm</td> </tr> <tr> <td>1,6 x 1,6 mm</td> <td>7,9 x 7,9 mm</td> </tr> </table>	@10 m	@50 m	50,6 x 50,6 mm	250 x 250 mm	12,6 x 12,6 mm	62 x 62 mm	6,3 x 6,3 mm	31,4 x 31,4 mm	3,1 x 3,1 mm	15,8 x 15,8 mm	1,6 x 1,6 mm
@10 m	@50 m												
50,6 x 50,6 mm	250 x 250 mm												
12,6 x 12,6 mm	62 x 62 mm												
6,3 x 6,3 mm	31,4 x 31,4 mm												
3,1 x 3,1 mm	15,8 x 15,8 mm												
1,6 x 1,6 mm	7,9 x 7,9 mm												
Laserluokka	3R (IEC 60825-1)												
Valaistus	Toimii niin kirkkaassa auringonvalossa kuin täydellisessä pimeydessäkin												
Virtalähde	24 V DC; integroitu Li-ion-akku (1,5 h) ja/tai valinnaisena ulkoinen DC-virtalähde (4 h) tai AC.												
Virrankulutus	50W												
Lämpötilat	Käyttö: 0°C — +40°C; Varastointi: -20°C — +50°C												

Laserkeilauksesta saadut kokemukset perustuvat kesällä työharjoittelun aikana suoritettuihin skannaustöihin. Mittaukset suoritettiin Leica HDS 6000 laserkeilainta käyttämällä ja tähyksen mittaukset suoritettiin Trimble S6

takymetrillä. Laserkeilaimella 100 metrin skannaukseen aikaa kuluu noin kaksi tuntia. (JT-Mittaus Oy, 2011.)

Vahvuudet

- Skannausnopeus, yhden keilausaseman mittaaminen kestää muutamia minutteja, riippuen keilaustiheydestä. Tiheällä keilauksella aikaa tähän kuluu 3m 22s.
- Pistepilvi on tiheä, jolloin se antaa lähes todellisen mallin mitatusta alueesta.

Heikkoudet

- Mittauskaluston määrä on suuri, jos mitattava pistepilvi halutaan johonkin todelliseen koordinaatistoon.
- Koje ei sovellu merkintämittauksiin.

5.3 Vertailun johtopäätös

Vertailussa olevat laitteet ovat täysin erilaisia mittauslaitteita ja niiden toimintaperiaatteet ovat erilaisia. Laserkeilaimen ja takymetrin vertailun johtopäätöksenä voidaan sanoa laserkeilaimen olevan parempi vaihtoehto skannaukseen jos tarvitaan paljon tietoa yhdellä kertaa ja nopeasti. Takymetri on parempi vaihtoehto, jos tietoa pitää saada yleispiirteisemmin ja kaluston määrä halutaan pitää pienenä.

6 AINEISTON KÄSITTELY

6.1 Käsittely ohjelmistot

Aineistojen käsittely tehdään tietokoneella ja tähän tarkoitukseen tarkoitetuilla tietokoneohjelmilla. Ohjelmistot vaativat tietokoneelta paljon laskenta tehoa, koska tiedostojen pistepilvet voivat sisältää miljoonia yksittäisiä pisteitä ja niiden käsittelyssä pistepilvet harvennetaan sopivalle pistevälille. (JT-Mittaus Oy, 2011.) Leican laserkeilaimella mitatuttujen pistepilvien käsittelyyn ja laskentaan käytettiin työharjoittelun aikana Leica Cyclone ja Amberg TMS (Tunnel Measurement Systems) ohjelmistoja ja apuna käytettiin Autodesk AutoCAD 2011 -ohjelmaa. Trimble VX -robottitakymetrillä mitatut pistepilvet on käsitelty Trimble Real Works Advance ohjelmalla, jonka apuna on käytetty Micro-Station V8 2004 -ohjelmaa. (Järvenpää, 2012.)

Taulukko 3. Leica Cyclone järjestelmävaatimukset. (Leica, 2012.)

Proessori	2GHz Tuplaydin prosessori tai parempi (Suositus 2,5 GHz neliydin i7 tai parempi)
Muisti	2 Gt tai (4 Gt Windows Vista tai Windows 7) (Suositus 4 Gt 32 bit käyttöjärjestelmä ja 8 Gt tai enemmän 64 bit käyttöjärjestelmä)
Näytönohjain	SVGA tai OpenGL -näytönohjain viimeisimmillä ajureilla (Suositus Nvidia Geforce250 tai ATI 6850 tai parempi, vähintään 1 Gt muistia)
Käyttöjärjestelmä	Windows XP 32bit tai 64bit (SP2 tai parempi), Microsoft Vista tai Windows 7 32bit tai 64bit (Suositus Microsoft Windows 7 64bit)
Muut	Kiintolevy tilaa vähintään 40 Gt (Suositus 1 Tt SATA)

Taulukko 4. Trimble Real Works -ohjelmiston järjestelmävaatimukset.

(Trimble, 2012.)

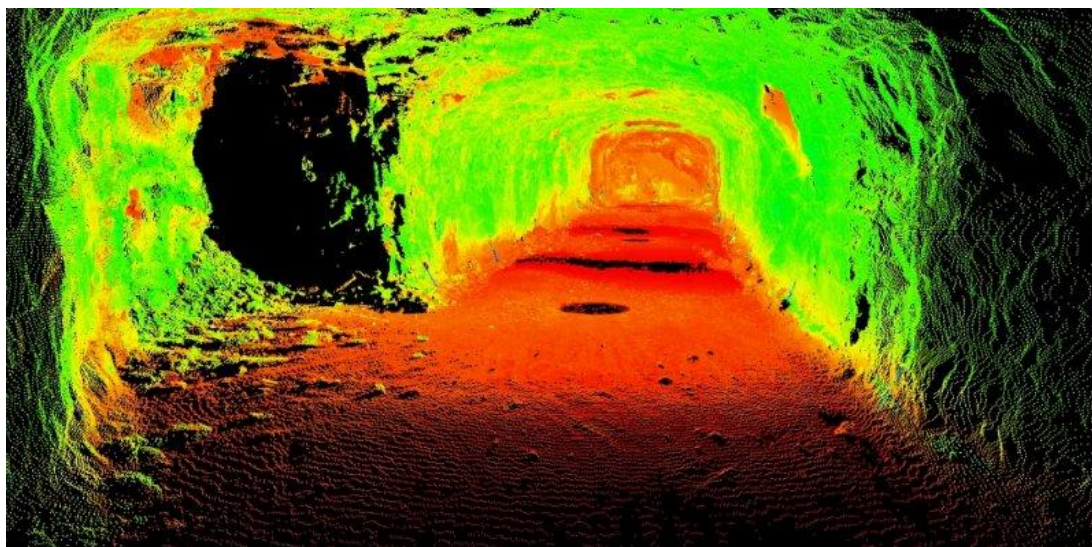
Proessori	Intel Pentium 4 tai uudempi, tai vastaava 2GHz suoritin (Suositus 3GHz tai enemmän)
Muisti	2 Gt RAM (Suositus 4 Gt)
Näytönohjain	256 Mt 3D Open GL –näytönohjain
Käyttöjärjestelmä	Microsoft Windows XP (Professional tai Home Edition, joka SP1 tai SP2) tai Microsoft Vista
Muut	CD-ROM asema Kolminäppäinen hiiri

6.2 Pistepilven käsittely

6.2.1 Leica

Pistepilvet (Kuvio 14) käsitellään Leica Cyclone ja Amberg TMS (Tunnel Measurement Systems) -ohjelmistoilla. Mitatuille tähyksille tehdään formaatti muunnos 3D-Win -ohjelmistolla, joka siirretään Leica Cyclone ohjelmistoon muunnoksen jälkeen. Pistepilvet ja tähykset laitetaan Leica Cyclone -ohjelmistossa samaan projektikansioon, jonka sisällä suoritetaan käsittely ja rekisteröinti. Pistepilvet voidaan yhdistää yhdeksi pistepilveksi automaattisesti tai osoittamalla itse yhteisiä tähyksiä ja/tai pisteitä pistepilvistä. Yhdistämisessä käytettiin yhteisiä tähyksiä, jotka osoitettiin itse tietokoneen ruudulla yhdistettäväksi tarkoitetuista pistepilvistä.

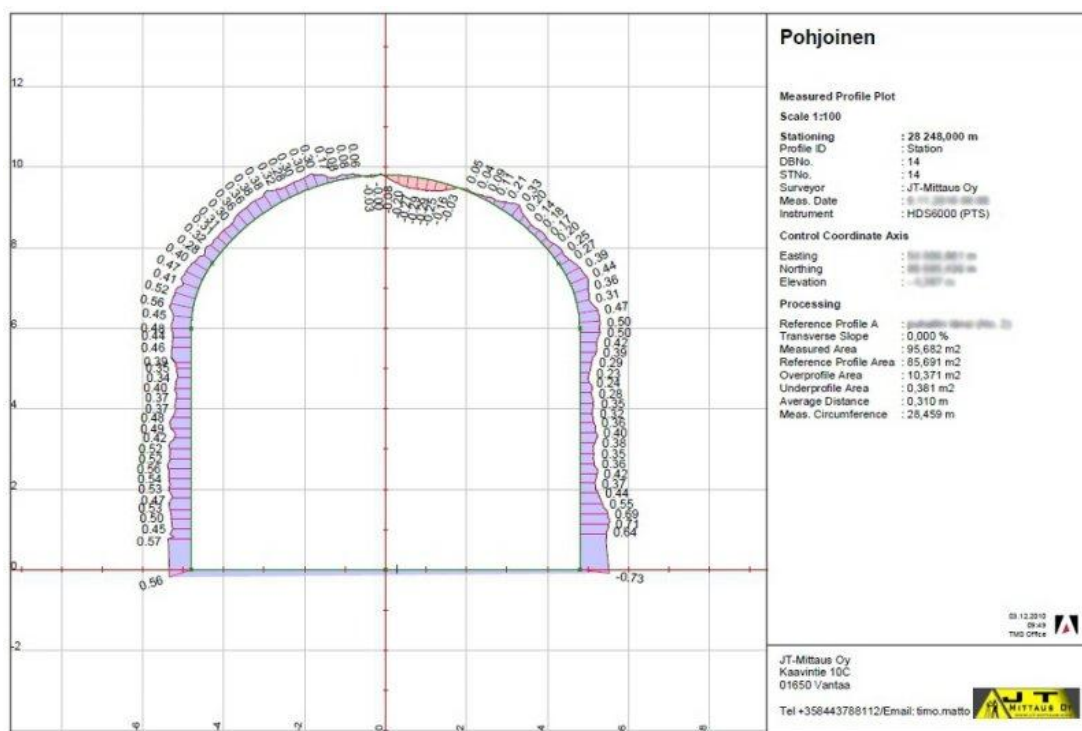
Automaattisen tähysten tunnistamisen kanssa oli ongelmana se, että pistepilvet eivät yhdistyneet oikein. Ohjelmassa oli laskennallinen virhe, joka on korjattu uusiin ohjelmistoversioihin (Joala, 2012).



Kuvio 14. Pistepilvi

Käsittelyn ja rekisteröinnin jälkeen tiedot viedään Amberg TMS -ohjelmistoon, jossa skannattua pistepilveä verrataan suunnitelmaan. Amberg TMS -ohjelmistosta saadaan tunnelista värikartta, josta selviää mahdolliset yli- ja alilouhinnat. Lisäksi saadaan poikkileikkaukset (Kuvio 15) tietyltä paalulukemalta. Värikarttaa (Kuvio 16) varten on ohjelmistolle määritettävä väriarvot, jotka auttavat ymmärtämään kuvalta yli- ja alilouhinnat. Ennen vertailua tehdään ohjelmaan suunnitelmien mukaiset mittalinjat, geometria ja profiilit. (JT-Mittaus Oy, 2011.)

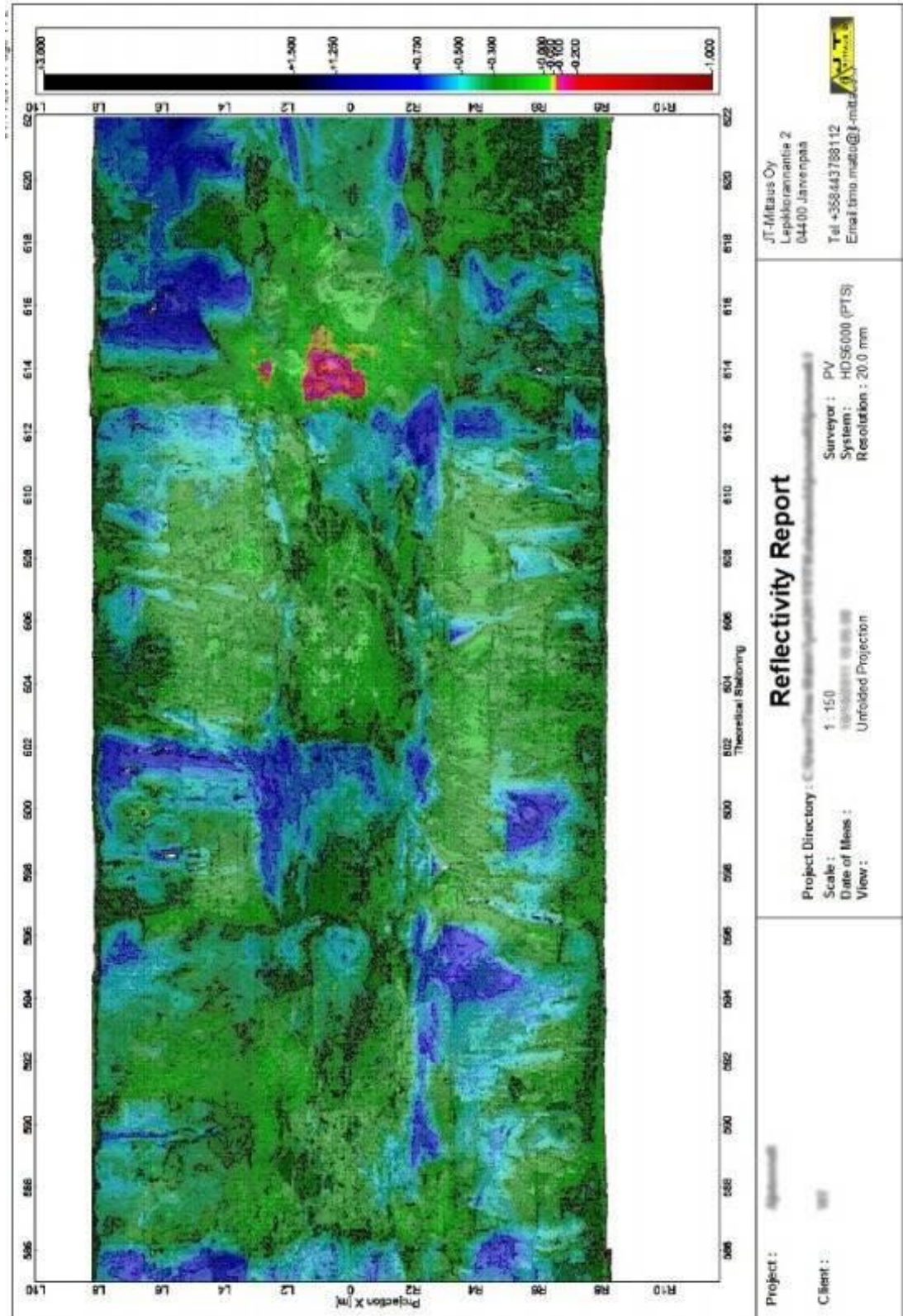
Poikkileikkaus kuvassa (Kuvio 15) on tiedot poikkileikkauksen sijainnista koordinaattijärjestelmässä ja mittalinjan paalulukemin. Tulosteesta saadaan myös profiilin teoreettinen pinta-ala ja louhitun alueen pinta-ala. Lisäksi saadaan pinta-alat profiiliin nähden eli profiiliin ylittävät ja alittavat pinta-ala tiedot. Poikkileikkauksessa verrataan louhittua tunnelia sille erikseen määritellylle profiilille. Vertailussa käy ilmi selkeästi numeerisin arvoin ja pylväiden avulla ilmaistuna kuinka paljon on yli- ja alilouhintaa kyseisellä paalulukemalla. Esimerkiksi tunnelin katossa kaksi metriä mittalinjasta vasemmalle on louhinta ylittänyt suunnitelman mukaisen profiilin 0.30 metrillä. Vastaavasti mittalinjasta alkaen mittalinjan oikealla puolella kahden metrin etäisyydelle asti on alilouhintaa, joka täytyy louhia pois.



Kuvio 15. Poikkileikkaus (JT-Mittaus Oy, 2012.)

Värikarttakuvassa (Kuvio 16) on tunnelin vaippa levitetty tasoksi. Kuvasta selviää mittakaava, resoluutio, paaluväli jolta värikartta on tehty ja etäisyydet mittalinjasta. Lisäksi kuvassa on aina värien selvitysosa. Kuvassa on väriarvoin esitetty louhitun tunnelin vaipan vertailu suunnitelman mukaiseen tunnelin muotoon, joka voi sisältää useamman kuin yhden määritellyn profiilin. Väreille voi itse määrittää arvot ja tässä tapauksessa on punaiselle annettu arvo -1.000 metriä ja tummansiniselle arvo +1.200 metriä. Esimerkiksi paalulukemalla 614 metriä on mittalinjasta alkaen vasemmalle

puolelle tunnelin kattoa kahden metrin matkalla alilouhintaa 0.100 metristä 0.200 metriin, tämä näkyy kuvassa vaaleanpunaisella ja punaisella sävyllä. Värikarttakuvalla voidaan katsoa kerralla pidemmältä matkalta selkeästi onko tunneli louhittu suunnitelman mukaiseen muotoon.



Kuvio 16. Värikartta (JT-Mittaus Oy, 2012.)

6.2.2 Trimble

Pistepilvet käsitellään Trimble RealWorks -ohjelmalla, jolla suoritetaan mahdolliset laskennat ja vertaukset suunnitelmaan. Ennen vertailua suunnitelmaan, pitää tehdä mittalinja ja geometria eli 3D-polku ja liittää polkuun tunneliprofiilit, jotka tehdään CAD -ohjelmalla. Tässä tapauksessa on käytetty Micro-Station V8 2004 -ohjelmistoa. Suurin aineiston käsittelyyn vaikuttava tekijä on pisteiden määrä pistepilvessä. Trimblen VX:llä skannatun aineiston jälkikäsittelyssä ongelmaksi muodostuu se, että kaikkia tarvittavaa tietoa ei saada, kun tunnelin vaippa levitetään tasokuvaksi. Näitä tietoja ovat mittalinjat, sijaintitiedot, tunnelin seinien alareunat ja kainalot. (Järvenpää, 2012.)

7 TYÖSKENTELYTEHOKKUUS

Työskentelytehokkuudessa on pyritty huomioimaan laitteiden käyttöä yleisesti tunnelissa ja niiden vaatimien mittauskaluston määrää. Työn suorittamisen nopeus ja kokonaistyöhön kuluva aika ovat tärkeä osa työskentelytehokkuutta.

Takymetrillä kului aikaa noin viiden metrin pituisen tunnelin skannaukseen kahdeksan tuntia. Aineiston käsittelyyn kuluu aikaa noin 15-30 minuuttia, kun aineistoa on 50 metrin matkalta ratatunnelia pistetiheydeltään 10-20 mm. Käsittelyaika muodostuu pistepilven siirrosta ja aineiston vertaamisesta suunnitelmiin, mahdollisesta laskennasta ja vertailupohjan tekemisestä. (Järvenpää, 2012.)

Laserkeilaimella tehtävään työhön kuluva aika riippuu paljon skannattavan alueen pituudesta ja työn suorittajasta. Halutaanko nopeuttaa tunnelissa tehtävää työtä vai tekeekö tunnelissa enemmän työtä ja näin nopeuttaa käsittelyvaihetta. Yleensä skannattavan alueen pituus on 50-100 metriä ja 100 metrin skannaukseen kuluu aikaa yhteensä noin kaksi tuntia. Aineiston käsittely ja pistepilvien yhdistäminen ja niiden käsittelyyn kuluu aikaa kaksi - neljä tuntia. Yhteenlaskettuna laserkeilaimella tehtyyn työhön kuluu aikaa noin viisi tuntia, kun skannattava alue on 100 metriä pitkä.

7.1 Johtopäätös

Leica HDS 6000 on reilusti nopeampi, kuin Trimble VX, kun skannaus suoritetaan vaaditulla pistetiheydellä skannauksen pistetiheyden ollessa vähintään 10 millimetriä. Laserkeilain vaatii kuitenkin takymetrin mukaan mittauksiin ja tämä on huomioitu työskentelytehokkuudessa. Leican HDS 6000 laserkeilaimen skannaukseen kuluvat työtunnit ovat vain murto-osa siitä, mitä Trimblen VX Spatial Station takymetrillä menee yhtä pitkän tunnelin pätkän mittaukseen. Laserkeilaukset pystytään suorittamaan nopeasti myös yhden henkilön voimin Leican HDS 6000 laserkeilaimella, vaikka mukana täytyy olla myös takymetri ja tähykset. Työn nopea suorittaminen vaatii kuitenkin järjestelmällisyyttä, työn hyvää etukäteissuunnittelua ja sitä ettei työtä jouduta keskeyttämään kesken kaiken.

Skannaus laserkeilaimella on myös kannattavampi rakennusyrittäjälle, jos yrityksen mittaryhmältä ei löydy kuin takymetri, missä on laserkeilausominaisuus. Tunneleissa riittää muutakin mittaamista, kuin pelkkää laserkeilattavaa aluetta, joten rakennusyrittäjän mittaryhmällä olisi todella haasteellista pysyä työmaan perässä, jos he joutuvat suorittamaan laserkeilaukset takymetrillä. Tunnelityömaat etenevät nopeaan tahtiin, koska työmaille annetaan tarkat aikarajat, mihin mennessä tietyt työvaiheet tulee olla tehtynä. Rakennusyrittäjälle tulee rahallisia menetyksiä, jos ne eivät pysty suorittamaan työtehtäviä vaadittuun päivämäärään mennessä. Tunnelityömaiden eri työvaiheista halutaan aina kartoitusmittaukset työmaan pöytäkirjoihin. Laserkeilaimen avulla pystytään kartoittamaan nopeasti suuria tai pitkiä alueita ja eri työvaiheita, jolloin työmaalle ei tule työnseisauksia sen johdosta, että jotain aluetta ei ole kartoitettu.

Johtopäätöksenä voidaan sanoa, että Trimble VX Spatial Station on sovelias skannaukseen silloin, kun pistepilvi saa olla todella harva, vaikka sillä saadaan mitattua alle 10 mm:n pistetiheydellä. Tunneleiden täysipitoiseen skannaukseen Trimble VX ei sovellu sen mittauksen hitaudesta johtuen. Trimble VX Spatial Station on selkeästi suunniteltu muunlaiseen kartoittamiseen, eli esimerkiksi kasan kuutioiden mittaamiseen ja rakennusten julkisivujen ja muiden rakenteiden mittaamiseen, joissa ei tarvita miljoonia pistetietoja. (Järvenpää, 2012.)

Leica HDS 6000 on tarkkuutensa ja nopeasti suoritettavan skannauksen ansiosta parempi vaihtoehto tunneleiden täysimittaiseen skannaamiseen. Vaikka on olemassa takymetrin ja laserkeilaimen yhdistelmiä on skannaustyö mielekkäämpää ja nopeampaa suorittaa pelkällä laserkeilaimella.

LÄHTEET

- Finnpark Oy. 2012. Tunnelilouhinnan työvaiheet, Osoitteessa:
<http://www.finnpark.fi/phamppi/kuinka/tunnelilouhinnan-tyovaiheet/http://www.finnpark.fi/phamppi/kuinka/tunnelilouhinnan-tyovaiheet>. 7.2.2012
- Geotrim Oy. 2012. Trimble VX Spatial Station, Osoitteessa
<http://www.geotrim.fi/shop/trimble-vx-spatial-station/?navdisp=504>. 6.2.2012
- Heinonen, H. 2012 Haastattelu 14-15.3.2012.
– 2012. Sähköposti keskustelu 22.3.2012.
- Joala, V. 2006. Laserkeilauksen perusteita. Luentomoniste 30.11.2006
– 2012. Haastattelu 19.3.2012
- JT-Mittaus Oy. 2011. Työharjoittelu kesältä 2011
– 2012. Internetsivusto www.jt-mittaus.fi. 3.2.2012
- Järvenpää, T. 2011. YIT:n Länsimetrotyömaan mittamies, haastattelu 30.8.2011
– 2012. Sähköposti keskustelu 23.2.2012
- Kukko, A. 2005. Laserkeilaimen valinta lähifotogrammetrisiin mittauksiin – Fotogrammetrian erikoistyö, Osoitteessa
http://foto.hut.fi/opetus/290/julkaisut/Antero_Kukko/Laserkeilaimen_valinta_lahifotogrammetrisiin_mittauksiin.pdf. 7.2.2012
- Leica Geosystems. 2012. Leica Cyclone, Osoitteessa: http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-Cyclone_6515.htm. 24.2.2012
– 2012. Leica HDS 6000 Esite, Osoitteessa
http://www.surveyequipment.com/PDFs/Leica_HDS6000_brochure.pdf. 7.2.2012
- Lemminkäinen Infra Oy. 2012. Näin teemme tunnelia, Osoitteessa:
http://www.lemminkaineninfra.fi/fi/Tuotteet_ja_palvelut/Kalliorakentaminen/Nain_teemme_tunnelia. 21.4.2021
- Liikennevirasto. 2012. Kehärata, Osoitteessa:
portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/fi/Hankkeet/keharata. 16.3.2012
- Länsimetro, 2012. Länsimetro, Osoitteessa: www.lansimetro.fi. 16.3.2012
- Mättö, T. 2012. JT-Mittaus Oy:n Mittaus- ja laskentapäällikkö, Sähköposti keskustelu 24.3.2012

- Nordic Geo Center Oy. 2012. Maastolaserskannerit, Osoitteessa:
http://www.geocenter.fi/?page_id=149. 21.4.2012
- Salmenperä, H. 2003. Runko- ja kartoitusmittaukset opetusmoniste 1/2003.
Tampere: Geoinformatiikka Tampereen teknillinen yliopisto
- Sivén, J. 2010. Viikin uuden väestönsuojan tunnelimittaukset, Opinnäytetyö.
Metropolian ammattikorkeakoulu: Maanmittaustekniikan
koulutusohjelma
- Trimble. 2012. Real Works, Osoitteessa:
http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-429608/022504-107A_PPP_RealWorksSurvey_TN_0409_Ir.pdf.
24.2.2012
- Vantaansanommat. 2012. Kehäradan tunnelin louhintatyö lähes valmis,
Osoitteessa: <http://www.vantaansanommat.fi/artikkeli/96589-keharadan-tunnelin-louhintatyo-lahes-valmis>. 20.3.2012
- Wikipedia. 2012. Tunneli rakentaminen, Osoitteessa:
http://fi.wikipedia.org/wiki/Tunneli#Tunnelien_rakentaminen.
10.2.2012