

TIMO CRONVALL
PASI KRÄKNÄS
TOMMI TURKKA

Laserkeilauksen käyttö liikennetunneleiden kunnossapidon hallinnassa



Timo Cronvall, Pasi Kråknäs, Tommi Turkka

Laserkeilauksen käyttö liikennetunneleiden kunnossapidon hallinnassa

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 41/2012

Liikennevirasto
Helsinki 2012

Kannen kuva: Mitattu ja käsitelty pistepilvi Tottolan tunnelista, VR Track Oy

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-193-1

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 020 637 373

Cronvall Timo, Kråknäs Pasi ja Turkka Tommi: Laserkeilauksen käyttö liikennetunneleiden kunnossapidon hallinnassa. Liikennevirasto, rakennuttamisosasto. Helsinki 2012. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 41/2012. 79 sivua. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-193-1.

Avainsanat: laserkeilaus, rautatietunnelit

Tiivistelmä

Projektin tavoitteena oli selvittää viime aikoina nopeasti kehittyneen uuden mittaus- tekniikan käyttömahdollisuudet liikenneväylien rakenteiden kunnan ja toiminnallisuuden hallinnassa. Projektin kohteena olivat Rantaradan kallioleikkaukset ja tunnelit.

Hankkeessa todettiin, että maalaserkeilaus ja sen avulla tehtävät seurantamittaukset soveltuvat käytettävyyden ja tarkkuuden osalta hyvin infrarakenteiden seurantamittauksiin. Menetelmällä voidaan mitata ns. hitaita muodonmuutoksia, joissa ei tapahdu nopeaa palautumista alkutilaan (vrt. junaliikenteen paineiskusta aiheutuvat nopeat muutokset). Mahdollisia mitattavia kohteita voivat olla esimerkiksi:

- kallioleikkausten seinäpinnat
- tunneleiden verhousrakenteet
- pengert- ja luiskarakenteet
- sillat ja tukimuurit.

Mittausten tekeminen edellyttää, että seurattavalla alueella on hyvässä kunnossa oleva mittausperusta ja luotettavat kiintopisteet kohteen läheisyydessä. Peräkkäisten mittausten eroja voidaan verrata suoraan tuotettujen pistepilviaineistojen perusteella ja vertailusta saadaan tarkasti määritettyä siirtyneen alueen sijainti, laajuus ja siirtymän suuruus. Jatkossa nyt kehitettyä mittaus- ja seurantamenetelmää käyttää voidaan erityyppisten kriittisten rakenteiden seurantaan edellä olevan esimerkkilistan mukaisesti.

Kallioleikkausten yläreunojen vedenhallintatoimenpiteiden osalta tulokset olivat vaihtelevia. Käytännössä työssä tehtiin maastomallin mittaus leikkausten yläreunoille ja siellä, missä kasvillisuutta ei ollut esteenä, saatiin hyviä tuloksia. Mittaustulosten perusteella pystyttiin laatimaan maastomallit, joita voidaan käyttää pintavesien valuma-alueiden karkeaan määrittämiseen. useimmissa kohteissa veden ohjaustoimenpiteiden (niskaajat, tukimuurit, yms.) suunnittelu edellyttää vielä täydennysmittauksia peitteisten maanpintojen selvittämiseksi.

Kun laserkeilaus ja valokuvaus suunnitellaan etukäteen huolella, saadaan tuotettua aineistoa jota käyttäen kalliorakennussuunnittelija voi toimistolla tehdä leikkausten yläreunojen halkeama- ja lohkaroitumistarkastelun. Tarkastelun tuloksen pystytään parhaissa tapauksissa jo tekemään korkeiden leikkausosuuksien korjaustarpeen määrittely, joka käydään sitten vielä lopullisesti varmistamassa maastokäynnillä. Tällöin maastokäynnillä on jo mukana tulkittu aineisto ja käynnin aikana pystytään keskittymään korjaustarpeen ja -menetelmien määrittämiseen.

Projektin tuloksena on tuotettu myös erittäin tarkka mittausaineisto tunneleista ja kallioleikkauksista. Sitä voidaan jatkossa käyttää esimerkiksi rakennemallien laatimiseen sekä tarkan mittatiedon hakemiseen tarvittaessa. Mittausaineistoa voidaan myös käyttää lähtötietona, mikäli Rantaradan tunneleista ja kallioleikkauksista ryhdytään kokoamaan tuotemalleja.

Cronvall Timo, Kråknäs Pasi ja Turkka Tommi: Användningen av laserskanning vid styrning av underhåll av trafiktunnlar. Trafikverket, byggherreverksamhet. Helsingfors 2012. Trafikverkets undersökningar och utredningar 41/2012. 79 sidor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-193-1.

Sammanfattning

Målet med projektet är att utreda användningsmöjligheterna av den under den senaste tiden snabbt utvecklade mätningstekniken i styrningen av skicket och funktionerna hos trafikledernas konstruktioner. Som objekt för projektet användes bergsskärningarna och tunnlar längs Kustbanan.

I projektet konstaterades att marklaserskanningar och mätningar som utförs i samband med den lämpar sig på grund av dess användbarhet och noggrannhet utmärkt till uppföljningsmätningar av infrastrukturkonstruktioner. Med hjälp av metoden kan man mäta s.k. långsamma förändringar som inte följs av en snabb återhämtning till startläget (jfr snabba ändringar som förorsakas av tågtrafikens tryckstötter). Möjliga objekt där mätningen exempelvis kunde utnyttjas:

- bergsskärningarnas väggytor
- tunnlarbans beklädnadskonstruktioner
- banvalls- och släntkonstruktioner
- roar och stödmurar.

Genomförande av mätningarna förutsätter att mätningsskiktet på området som uppföljs är i bra skick och att det finns tillförlitliga riktpunkter i närheten av objektet. Skillnaderna mellan mätningar som utförs efter varandra kan jämföras direkt utgående från punktmolnmaterialet och av jämförelsen framgår noggrant specificerat områdets placering, omfattning och dimensionen på förskjutningen. I fortsättningen kan den nu utvecklade mätning- och uppföljningsmetoden utnyttjas vid uppföljningen av olika sorters kritiska strukturer i enlighet med den ovannämnda exempellistan.

För vattenstyrningsåtgärdernas del vid bergsskärningar var resultaten varierande. I praktiken gjordes mätningen vid terrängmodellens övre kanter och där var växtligheten inte var något hinder fick man bra resultat. Utgående från mätningens resultat kunde man uppgöra terrängmodeller som kan användas vid grovt fastställande av ytvattens avrinningsområden. På de flesta platser förutsätter planerandet av vattnets styrningsåtgärder (samlingsdiken, stödmurar mm.) ännu kompletterande mätningar för utredande av kompakta marktyper.

När laserskanningen och fotograferingen planeras noggrant i förväg produceras material som bergsbyggnadsplaneraren kan utnyttja på byrån för att utföra kontrollen av sprickningar och rösen. Utgående från resultatet av kontrollen kan man i bästa fall redan fastställa repareringsbehovet av höga skärningsdelar, som sedan slutligen ännu säkerställs under ett terrängbesök. Då har man på terrängbesöket redan tillgång till det analyserade materialet och under besöket kan man koncentrera sig på fastställande av behovet av och metoderna för reparation.

Som resultat för projektet har också väldigt noggrant mätningsskiktet över tunnlar och bergsskärningarna framställts. Detta kan i fortsättningen användas för bl.a. uppgörande av strukturmodeller samt för att söka fram exakta måttuppgifter vid behov. Mätningsskiktet kan också användas som utgångsläge om man börjar uppgöra produktmodeller över Kustbanans tunnlar och bergsskärningar.

Cronvall Timo, Kråknäs Pasi ja Turkka Tommi: Laser scanning in maintenance management of traffic tunnels. Finnish Transport Agency, Construction Management. Helsinki 2012. Research reports of the Finnish Transport Agency 41/2012. 79 pages. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-193-1.

Summary

The purpose of the project was to assess the possibility to use a new measurement technique which has seen a rapid evolution in recent times in managing the structural condition and functions of transport routes. The project focused on the rock cuts and tunnels of the Helsinki-Turku line.

The findings state that ground laser scanning and follow-up surveys performed with it are well suited in terms of usability and accuracy to infrastructure follow-up surveys. The technique can be used to measure 'slow transformations' which do not involve the quick return to the initial condition (cf. quick changes due to pressure shock). Other surveyed targets may be:

- Wall surfaces of rock cuts
- Tunnel lining structures
- Embankments and slopes
- Bridges and supporting walls

Surveying requires that the surveyed area has a proper basis for survey and reliable reference points in the proximity of the target. The differences between consecutive surveys can be directly compared on the basis of produced point clouds and with the comparison the dislocated area's location, scope and volume can be accurately determined. From now on the developed survey and follow-up technique can be used to monitor a wide range of critical structures as listed above.

For the drainage solutions at the top of rock cuts the results were mixed. The work involved measuring the terrain model at the top of the rock cut. At those places where there was no vegetation good results were obtained. We were able to use the results to calculate terrain models to be used in determining the surface water drainage area. At most sites planning of water drainage solutions (back drains, supporting walls etc.) requires additional surveys to analyse covered ground surface areas.

When laser scanning and photographing are carefully planned rock engineering specialists can use the obtained material at the office to analyse fissures and fragmentation at the top of the rock cut. In the best-case scenario, with the results from the survey, the renovation requirements of high rock cut sections can be determined. The renovation requirements can then be ascertained with a site investigation. The analysed material is brought along on the site investigation and the main effort can be focused on determining repair needs and methods.

The results of the project moreover produce very accurate survey data on tunnels and rock cuts. The data can then be used e.g. to make structural models and to retrieve accurate survey data, if required. The survey data can moreover be used as initial data if BIM-models are produced from Helsinki-Turku line tunnels and rock cuts.

Esipuhe

Projektin tavoitteena oli selvittää viime aikoina nopeasti kehittyneen uuden mittaus- tekniikan käyttömahdollisuudet liikenneväylien kalliorakenteiden kunnan ja toiminnallisuuden hallinnassa. Projekti kuuluu Liikenneviraston tehokas väylänpito painopistealueeseen ja pohja- ja alusrakenteet hankkeeseen.

Rantaradan tunneleita on tutkittu useassa eri hankkeessa. Tunneleihin asennetun veden- ja lämmöneristerakenteen ongelma on junaliikenteen aiheuttamien paineen- vaihtelujen kesto, kun polyeteenilevyjen väliset tehdassaumat ja paikalla rakennetut limisaumat rikkoutuvat junaliikenteen aiheuttamien paineiskujen vaikutuksesta. VTT:n tekemien tutkimusten perusteella tiedetään myös se, että kovina talvina pakkaneen ulottuu myös verhousrakenteen taakse ja on arvioitu että siitä todennäköisesti aiheutuu paannejään muodostumista verhousrakenteen taakse, mikä voi aiheuttaa ylimääräisiä kuormituksia verhousrakenteille. Tämän mahdollisen jäänmuodostuksen aiheuttamia muodonmuutoksia verhousrakenteessa selvitettiin lämpimään aikaan ja pitkän pakkaskauden jälkeen tehdyillä laserkeilauksilla.

Rataverkolla on runsaasti korkeita kallioleikkauksia, joiden yläosien tarkastaminen ei ole mahdollista lähietäisyyksiltä. Laserkeilaustulosten hyödyntämisen mahdollisuuksia tutkittiin kallioleikkausten yläreunojen mallintamisen avulla.

Rautatietunneleiden yleinen ongelma on se, että tunnelin suuaukkoa ympäröivät pintavedet valuvat kallioleikkaukseen ja leikkauksen otsapinnalle tai seinämille jäätyessään muodostavat turvallisuusriskejä rautatieliikenteelle. Tässä tutkimuksessa arvioitiin arvioitiin myös tunneleita ympäröivän alueen maastomallien laadintaa sekä pintakuivatuksen parantamismahdollisuuksia laserkeilatun maastomallin avulla.

Työn tilaajana oli Liikennevirasto ja hankkeen vastuhenkilö oli aluepäällikkö Erkki Mäkelä.

Työn suorittamisesta vastasi VR Track Oy/Suunnittelu ja siellä vastuuhenkilöitä olivat:

- suunnittelupäällikkö, tekn.lis. Timo Cronvall, projektipäällikkö ja raportin kirjoittaminen
- kehitysinsinööri, dipl.ins. Pasi Kråknäs, tulosten laadunvarmistus ja raportin kirjoittaminen
- suunnittelija, dipl.ins. Tommi Turkka, maastotöiden koordinointi, pistepilviaineiston käsittely ja raportin kuvat
- kartoittaja Petri Kaihia, maastomittaukset.

Helsingissä lokakuussa 2012

Liikennevirasto
Rakennuttamisosasto

Sisällysluettelo

1	LÄHTÖKOHDAT JA TAVOITTEET	9
2	LASERKEILAUKSEN PERIAATTEET	10
2.1	Laserkeilain	10
2.2	Laserkeilaimien luokittelu	12
2.3	Laserkeilausperiaatteet eri pääluokissa	13
2.3.1	Ilmalaserkeilaus	13
2.3.2	Mobiililaserkeilaus.....	14
2.3.3	Maalaserkeilaus.....	16
2.3.4	Teollisuuslaserkeilaus.....	17
2.4	Maalaserkeilauksen perusteet	17
2.5	Laserkeilauksen laatuun vaikuttavat tekijät.....	19
2.5.1	Mitatun pistepilven hajonta ja intensiteetti	19
2.5.2	Mitatun pistepilven tiheys.....	19
2.5.3	Mitattujen pistepilvien yhdistämistavat	20
2.6	Laserkeilaimien parametrit.....	20
2.7	Laserkeilauskohteet.....	21
2.8	Laserkeilausprojekti ja sen suunnittelu	21
2.9	Maalaserkeilauskeilausaineistojen käsittely.....	22
2.10	Laserkeilauksen uusia suuntauksia	24
3	TUNNELEIDEN LASERKEILAUUS	25
3.1	Yleistä	25
3.2	Kiintopisteet.....	26
3.3	Laserkeilauksen parametrit.....	27
3.3.1	Tunnelit.....	27
3.3.2	Kalliroleikkausten yläpinnat.....	27
4	LASERKEILAUSSAINEISTON KÄSITTELY.....	28
4.1	Yleistä	28
4.2	Käytetyt ohjelmistot	28
4.2.1	RiScan Pro (Riegl).....	28
4.2.2	TerraSolid: TerraScan ja TerraModeller.....	29
4.2.3	SiRailScan (Technet-Rail 2010 GmbH).....	29
4.2.4	PointCloud (Kubit GmbH).....	29
4.3	Mittaustulosten käsittely	29
4.3.1	Georeferointi.....	29
4.3.2	Pistepilvien värjäys.....	30
4.3.3	Suodatus.....	30
4.3.4	Aineiston yhdistäminen ja jakaminen	31
4.3.5	Pistepilviaineistojen vertailu	31
4.3.6	Maanpinnan luokittelu	32
4.3.7	3D Mallintaminen valokuvia ja pintoja käyttäen.....	32
5	TUNNELEIDEN LASERKEILAUKSET	34
5.1	Lillgård.....	34
5.2	Riddarbacken	34
5.3	Bäljens.....	34
5.4	Köpskog.....	36
5.5	Åminne	37

5.5.1	Högbacka	38
5.5.2	Kaivosmäki	43
5.5.3	Haukkämäki	43
5.5.4	Tottola44	
5.5.5	Pepallonmäki.....	46
5.6	Yhteenveto tunnelimittauksista.....	48
6	KALLIOLEIKKAUSTEN LASERKEILAUKSET	49
6.1	Lillgårdin tunnelin 1. suuaukko	49
6.2	Åminnen tunnelin 2. suuaukko.....	51
6.3	Kaivosmäen tunnelin 1. suuaukko	53
6.4	Kaivosmäen ja Haukkämäen välinen kallioleikkaus.....	55
6.5	Harmaamäen tunnelin 2. suuaukko	57
6.6	Pepallonmäen tunnelin 1. suuaukko.....	59
6.7	Pepallonmäen tunnelin pohjoinen suuaukko	62
6.8	Maanpinnan täydentäminen Maanmittauslaitoksen pistepilviaineistolla	64
6.8.1	Ilma- ja maastolaserkeilauksella tuotettujen aineistojen väliset eroavaisuudet	64
6.8.2	Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineisto	64
6.8.3	Aineistojen vertailu	65
6.8.4	Maastossa mitatun aineiston täydentäminen ja laajentaminen.....	68
6.9	Kallioleikkausten seinämien kuntoarvio	69
6.10	Yhteenveto kallioleikkausten keilauksista.....	76
7	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	77
	LÄHDELUETTELO	79

1 Lähtökohdat ja tavoitteet

Projektin tavoitteena oli selvittää viime aikoina nopeasti kehittyneen uuden mittaus- tekniikan käyttömahdollisuudet liikenneväylien kalliorakenteiden kunnon ja toiminnallisuuden hallinnassa.

Projektin kohteena olivat Rantaradan kallioleikkaukset ja tunnelit. Projekti jakautuu viiteen (5) osakokonaisuuteen:

- Selvitetään, voidaanko menetelmää käyttää tunneleiden verhousrakenteiden takana mahdollisesti esiintyvien jäätyiskohtien tunnistamiseen.
- Tutkimuksessa selvitetään, voidaanko menetelmää käyttää tehokkaasti leikkausten yläreunojen kuivatusratkaisujen parantamismahdollisuuksien ja sitä kautta leikkauksen seinille muodostuvan paannejään vähentämisen suunnitteluun.
- Selvitetään laserskannaustekniikan käyttömahdollisuudet kallioleikkausten kuivatusratkaisujen toiminnallisuuden ja kehittämismahdollisuuksien osalta.
- Selvitetään laserskannaustekniikan käyttömahdollisuudet kallioleikkausten seinämien kuntoarvioinnissa.

Projektin tuloksia hyödynnetään ensimmäisessä vaiheessa Rantaradan tunneleiden ja kallioleikkausten kuntoarvioinnissa ja toiminnallisuuden parantamiseen tähtäävien toimenpiteiden arvioinnissa. Näistä saatujen kokemusten perusteella kehitettyä menetelmää ja työ-tapoja voidaan soveltaa myös muihin kalliorakennekohteisiin rautatie- ja tieverkoilla.

Rantaradan tunneleita on tutkittu useassa eri hankkeessa. Tunneleista tiedetään, että niihin asennetun veden- ja lämmöneristerakenteen ongelmat ovat junaliikenteen aiheuttamien paineenvaihtelujen kesto ja palosuojauksen puuttuminen useimmissa tunneleissa. Polyeteenilevyjen väliset tehdassaumat ja paikalla rakennetut limisaumat rikkoutuvat junaliikenteen aiheuttamien paineiskujen vaikutuksesta. Saumat ovat pääosin pettäneet sellaisissa kohdissa, joissa sauman läheisyydessä ei ole ollut eristerakenteen kiinnitykseen käytettyä ankkuria. Tämä on mahdollistanut sauman liian suuret liikkeet paineiskujen vaikutuksesta.

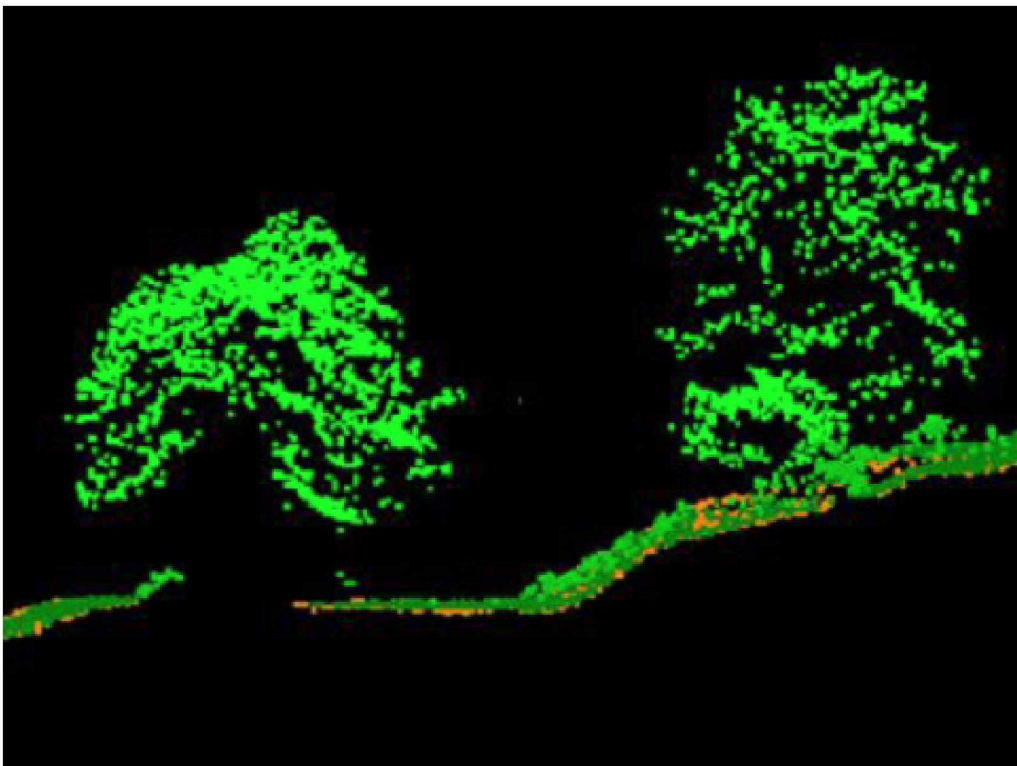
VTT:n tekemien tutkimusten perusteella tiedetään myös se, että kovina talvina pakkakanen ulottuu myös verhousrakenteen taakse. Tästä voi aiheutua veden jäätymistä ja nyt oli tarkoitus selvittää mahdollisia jäätyviä alueita sekä tutkia aiheutuuko jäätymisestä kuormituksia verhousrakenteille.

Paannejään muodostuminen on ongelmana osassa kallioleikkauksia. Hankkeessa selvitetään, pystytäänkö pistepilviaineistoa hyödyntämään vuotovesien virtauksen hallinnan suunnitteluun. Samaten tutkitaan mahdollisuuksia käyttää laserkeilausta kallioleikkausten kuntoarvion laatimiseen.

2 Laserkeilauksen periaatteet

2.1 Laserkeilain

Laserkeilaus täydentää koordinaattimittausmaailman uudella korkean yksityiskohtaisella mittausmenetelmällä, jolla pystytään keräämään ympäröivästä maailmasta tietoa monipuolisemmin ja nopeammin. Laserkeilain on mittalaite, jolla pystytään mitaamaan pisteitä koskematta kohteeseen, jolloin hankalasti saavutettavien tai vaarallisten kohteiden mittaus voidaan suorittaa turvallisesti. Laserkeilaimella mitataan kohteesta kolmiulotteinen näkemä nk. pistepilvi. Pistepilvessä on tuhansia tai jopa miljoonia pisteitä, joilla jokaisella on x-, y ja z-koordinaatit.



Kuva 1. Laserkeilauspistepilvi. Lähde: © Hannu Hyyppä 2004

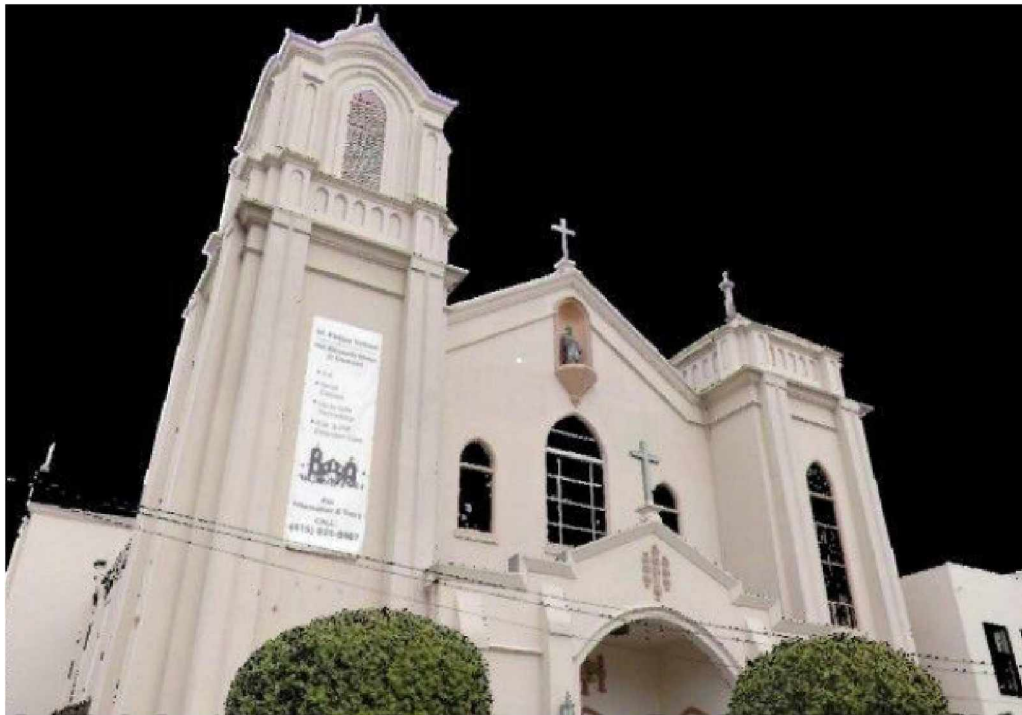
Mittausmenetelmä muistuttaa monessa suhteessa mittausta prismattomalla takymetrillä. Laserkeilain koostuu lasertykistä, joka tuottaa lasersäteen, keilainosasta, joka poikkeuttaa lasersädettä ja ilmaisinosasta, joka tulkitsee vastaanotetun signaalin ja määrittää sen perusteella etäisyyden kohteeseen. Etäisyyden määrittäminen perustuu valon kulku-aikaan, vaihe-eroon, näiden yhdistelmään tai kolmiomittaukseen laityypistä riippuen. Mittaustieto tallentuu keilaimen sisäiseen muistiin tai suoraan tietokoneelle.

Mittalaitteessa on nollapiste, josta lähtee liikkeelle lasersäde, jonka avulla mitataan kohteen etäisyys mittalaitteesta. Valon kulku-aikaan perustuvissa laserkeilaimissa mitataan etäisyys aikana, jonka valosignaali kulkee mittalaitteesta kohteeseen ja takaisin. Koska tiedetään valosignaalin (lasersäteen) lähtökulmat (sekä vaaka- että pystysuunnassa) ja matka, voidaan laskea jokaiselle mitatulle pisteelle koordinaatit. Koor-

dinaattien lisäksi järjestelmä tallentaa jokaiselle pisteelle myös intensiteettiä ja paluusignaalin voimakkuuden pohjalta.

Laserkeilaimet pystyvät tallentamaan takaisin palaavan lasersäteen intensiteetin. Intensiteetin perusteella jokainen piste saa sävyarvon, mikä helpottaa aineiston tulkin-
taa. Intensiteettiin vaikuttaa muun muassa kohteen väri, materiaali, pinnan tasaisuus ja säteen osumiskulma. Jos mitattavan kohteen pinnassa ei ole juurikaan korkeuseroja, intensiteettitiedon avulla siitä saadaan erottumaan esimerkiksi mahdolliset kuviot.

Laserkeilaimissa on usein lisävarusteena digitaalikamera, jolla mittauksen yhteydessä otetaan kuvia. Digitaalikuvat voidaan liittää pistepilviaineistoon, jolloin pinnoista saadaan teksturoitua luonnollisempaan näköisiä. Pistepilviin voidaan liittää myös eri aikoina otettuja kuvia tai satelliittikuvia. Yhdistetyn mittausjärjestelmän etu kuitenkin on, että laserpisteille voidaan määrittää yksilölliset väriarvot digitaalikuvien pohjalta. Väriarvojen myötä pistepilvistä saadaan havainnollisempia.



*Kuva 2. Pistepilveen on saatu oikeat värit liittämällä siihen digitaalikuva.
Lähde:www.leica.fi.*

Mittauksen tarkkuuteen vaikuttavat näkyvyyttä heikentävät asiat, kuten lumi ja vesisade sekä pöly. Virheellisiä tuloksia saadaan, jos lasersäteet heijastuvat ennen aikaisesti pois, absorboituvat tai poikkeutuvat. Tällaisissa olosuhteissa laserkeilauksen tekeminen voi käydä mahdottomaksi. Mittauksen onnistumiseen vaikuttavat myös mitattavan kohteen muoto, väri, pintamateriaali ja asento suhteessa keilaimen. Mit-
taaminen kohti valonlähdettä on ongelmallista.

2.2 Laserkeilaimien luokittelu

Pulssilaser

Pulssilaser lähettää katkonaista lasersädettä, jonka edestakainen kulku-aika mitataan laitteen ja kohteen välillä. Tämän jälkeen kohteen etäisyys voidaan määrittää pulssin kulkuajan ja valonnopeuden avulla. Pulssilasereilla voidaan mitata etäisyyksiä suurella vaihteluvälillä. Laitteen etäisyys kohteesta voi olla muutamasta metristä yli kilometriin, tyypillisesti satoja metrejä. Mittausetäisyyteen vaikuttavat lähetetyn pulssin teho ja toistotaajuuden määräämä enimmäiskulku-aika. Pulssilaserin käytön rajoituksena on vain muutamien tuhannen havainnon toistotaajuus. Toistotaajuudella tarkoitetaan mittaushavaintojen määrää sekunnissa.

Vaihe-erolaser

Vaihe-erolaser lähettää jatkuvaa signaalia, jonka intensiteettiä moduloidaan siniaalloilla tai useampia eri kanta-aallonpituuksia sisältävällä signaalilla. Laserkeilain määrittää lähetetyn ja kohteesta heijastuneen ja vastaanotetun signaalien välisen vaihe-eron. Kanta-aalto voidaan ratkaista useamman aallonpituuden moduloinnilla. Etäisyshavainto saadaan ratkaistua vaihe-eron ja kokonaislukutuntemattoman avulla. Vaihe-erolaserilla saadaan tyypillisesti jopa 250 000 mittausta sekunnissa (250 kHz taajuus). Suurin mittausetäisyys on pääsääntöisesti alle 100 m. Mittausetäisyyteen vaikuttaa sekä lähetysteho että kanta-aallon modulaatio.

Optiseen kolmiomittaukseen perustuva laser

Optiseen kolmiomittaukseen perustuvat Laserkeilaimet tuottavat valopisteen, joka suunnataan mitattavan kohteen pintaan. Kohteesta takaisin heijastuva valopiste kulkee linssin lävitse sensorin pinnalle, jossa sen sijainti rekisteröidään. Kohteen etäisyys lasketaan valonlähteen ja sensorin välisen etäisyyden ja havaittavan valon saapumiskulman perusteella. Tähän menetelmään perustuvia laserkeilaimia käytetään erityisesti vaativissa teollisuusmittauksissa, joissa mittaustarkkuuden on oltava hyvä. Laitteen käytön rajoituksena on lyhyt mittausetäisyys ja suuret katvealueet.

Laserkeilaimet voidaan luokitella kolmeen pääluokkaan:

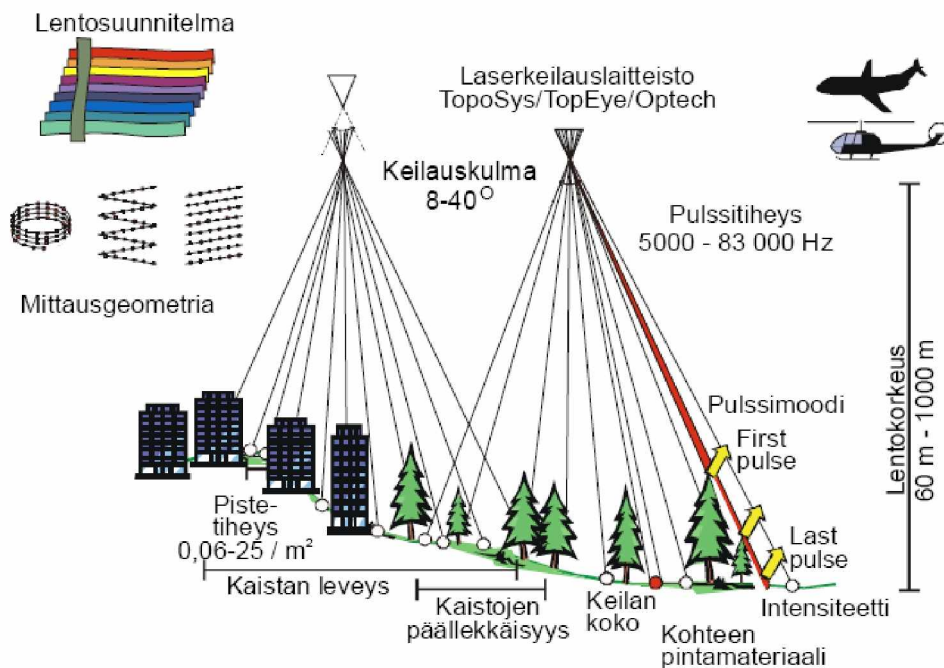
- **Kaukokartoitus-laserkeilaimet**, joita käytetään lentokoneista, helikoptereista tai avaruusaluksilta. Mittausetäisyys näissä laitteissa on 0,1–100 km ja mitatun pisteen tarkkuus on joitakin senttimetrejä (tyypillisesti >10 cm)
- **Mobiililaserkeilaimet**, eli ajoneuvoon asennetut laserkeilauslaitteistot joilla voidaan mitata laajojakin alueita lyhyessä ajassa. Mittaus on tarkempaa kuin ilmasta tehtävä laserkeilaus, sillä keilaimien ja maanpinnan välinen etäisyys on paljon pienempi. Myös pistetiheys on moninkertainen. Mittausetäisyys vaihtelee muutamasta metristä noin 100 metriin. Laitteistolla saavutettava tarkkuus on 1–3 cm luokkaa.
- **Maalaserkeilaimet** (terrestriaaliset laserkeilaimet), joita käytetään mittauksiin matkoille 1–300 m ja joissa mittaustarkkuus on alle 2 cm;
- **Teollisuuslaserkeilaimet**, joilla mitataan pieniä kohteita alle millimetrin tarkkuudella ja alle 30 m:n etäisyydeltä.

2.3 Laserkeilausperiaatteet eri pääluokissa

2.3.1 Ilmalaserkeilaus

Ilmalaserkeilausta (kuva 3) tehdään helikopterista tai lentokoneesta. Laserkeilaimen lisäksi järjestelmään kuuluu paikannuslaitteisto (GPS) ja koneen asentoa seuraava inertiajärjestelmä (IMU). Yhdistämällä laitteiden tuottama tieto saadaan selville etäisyydet ja pisteiden sijainti valitussa koordinaattijärjestelmässä. Lasermittaustaliteisto tallentaa lennon aikana saadut tiedot myöhempää käsittelyä varten.

Mitattavasta kohteesta riippuen lentokorkeus on yleensä 60–1 500 m. Mittaukset tehdään nauhamaisina lentolinjoina, joiden leveys voi olla jopa pari sataa metriä. Vierekkäiset lentolinjat suunnitellaan niin, että linjoissa on hieman päällekkäisyyttä. Pulssitiheys on 7 000–125 000 mittausta sekunnissa ja pistetiheys tyypillisesti 0,06–25 pistettä neliömetrillä. Pistetiheys vaikuttaa siihen, mitä pistepilvistä on mahdollista määrittää ja havaita. Kun pisteitä on paljon neliömetrillä, saadaan hyvä erotuskyky, jolloin on mahdollista mitata yksittäisten kohteiden ominaisuuksia.



Kuva 3. Ilmalaserkeilaimen tyypilliset parametrit. © Hannu Hyypä, 2007

Laserkeilan koko maanpinnalla on suurempi kuin pelkkä piste, jolloin on mahdollista, että se osuu moniin kohteisiin. Monet laserkeilaimet pystyvät vastaanottamaan useamman kaiun yhdestä havainnosta. Yleensä tallennetaan ensimmäinen kaiku, joka kuvaa lähinnä laitetta olevaa kohdetta, ja viimeinen kaiku, joka kuvaa kauimpana sijaitsevaa kohdetta. Näin ensimmäinen kaiku voidaan saada vaikka puun latvasta ja viimeinen maanpinnasta.



Kuva 4. Kun tallennetaan sekä ensimmäinen että viimeinen kaiku, voidaan saada tietoa esimerkiksi puiden korkeudesta ja maanpinnasta. Lähde: Jussi Silvennoinen, Laserkeilaus suunnistuskartoituksessa -luentomateriaali.

Ilmalaserkeilauksella voidaan saavuttaa jopa parempi kuin 10 cm:n tarkkuus. Tarkkuuteen vaikuttaa muun muassa lentokorkeus ja -nopeus, pulssitiheys, keilauskulma, laserkeilan leviäminen, sijainnin ja asennon määrittelyn tarkkuus ja mitattavan kohteen ominaisuudet. Ilmalaserkeilaukseen yhdistetään usein kohteen digitaalikuvaus. Maanpinnan muotojen ja korkeusvaihteluiden lisäksi pistepilvistä tuotettavissa maaleissa halutaan usein kuvata myös jo olemassa olevia yksilöllisiä kohteita ja piirteitä, kuten puita, siltoja ja taloja. Paras ajankohta mittausten tekemiseen on kevät tai syksy, kun puissa ei ole vielä lehtiä, aluskasvillisuutta on vähän eikä lunta ole maassa. Maanpinnanmittaaminen onnistuu kuitenkin peitteisiltäkin alueilta kuten metsistä, koska usein lasersäteestä edes joku osa pääsee kulkemaan puuston läpi. Useimmiten ilmalaserkeilaamalla mitataan maanpintaa ja maanpinnalla olevia kohteita.

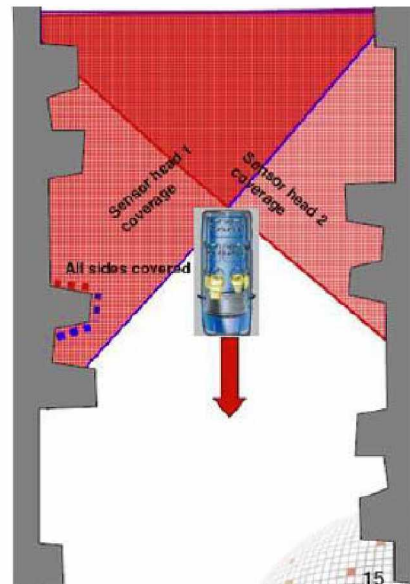
2.3.2 Mobiililaserkeilaus

Laserkeilaus voidaan suorittaa myös liikkuvasta ajoneuvosta. Tällöin puhutaan mobiilista laserkeilauksesta (MLS, mobile laser scanning). Mittaus perustuu yhteen tai kahteen 360° laserkeilaimeen ja paikantavaan GNSS-Inertia-laitteistoon. Näiden lisäksi laitteistoon voidaan yhdistää digitaalisia kameroita tai videokameroita.

Inertia-laitteiston ansiosta ajoneuvon kallistelu ajon aikana ei vaikuta yksittäisen pisteen x-, y-, z-koordinaattien tarkkuuteen. Kaikkien eri sensoreiden keskinäiset sijainnit inertialaitteiden keskipisteeseen nähden on määritelty erittäin suurella tarkkuudella. Laserkeilausajoneuvossa keilaimet on sijoitettu mahdollisimman ylös (korkeus maanpinnasta 3,5 m), jotta myös tieluiskien alareunat saataisiin mitattua.



Kuva 5. Mobiililaserkeilain, VR Track Oy 2011



Kuva 6. Mobiililaserkeilausken keilauskuvio

2.3.3 Maalaserkeilaus

Maalaserkeilaimella mittaus tapahtuu maanpinnalta. Usein mittaus suoritetaan paikallaan olevalla laitteella, mutta keilain voidaan kiinnittää myös liikkuvaan ajoneuvoon kuten autoon tai veneeseen. Tällöin voidaan puhua liikkuvasta kartoituksesta.



Kuva 7. Maalaserkeilain, VR Track Oy 2012

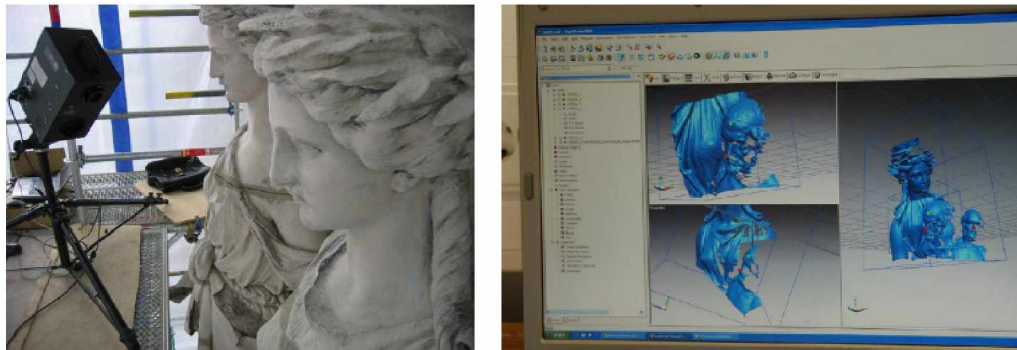
Maalaserkeilausjärjestelmä koostuu keilaimesta, pakkokeskitysalustasta ja jalustasta, virtalähteestä (akku tai verkkovirta) ja tietokoneesta. Joissakin järjestelmissä tietokoneetta ei tarvita vielä mittauspaikalla, vaan tieto tallentuu laserkeilaimen sisäiseen muistiin. Tietokoneella voidaan laserkeilauksen aikana valvoa ja ohjata mittaus tapahtumaa. Maalaserkeilain mittaa pisteitä säännölliseen ruudukkoon. Lähellä keilainta pisteitä saadaan tiheämmin ja kauempana ne harvenevat. Laitteesta riippuen ruudukon tiheyttä voidaan säätää. Maalaserkeilaimilla voidaan toimintaperiaatteesta riippuen saavuttaa jopa useiden satojen tuhansien pisteiden mittausnopeus (500 000 pistettä sekunnissa).

Mittausetäisyys vaihtelee laitteesta riippuen metristä useisiin satoihin metreihin. Maalaserkeilainten tarkkuus on parhaimmillaan alle 1 cm. Laserkeilaimen tekniset ominaisuudet määrittävät mihin se soveltuu. Soveltuvuutta voidaan arvioida esimerkiksi mittausetäisyyden, kulmaresoluution, lasersäteen divergenssin (säteen hajomiskulman) ja keilauskulman perusteella. Kulmaresoluutio määrää keilaimen kyvyn toistaa kohteen yksityiskohtia. Mitä hienompi laitteen keilauskulman jako on, sitä tiheämmin pisteitä saadaan ja sitä paremmin pienetkin kohteet erottuvat. Keilauskulma vaikuttaa mittausprosessin läpivientiaikaan merkittäväällä tavalla, koska kapealla näkemällä varustetulla keilaimella mittaaminen lisää työmäärää keilaimen siirtelyn ja kääntelyn vuoksi. Kohteesta riippuen mittauspisteitä tarvitaan useita. Laitetta siirretään sopiviin paikkoihin, jotta kohde saadaan mitattua joka puolelta eikä katvealueita jää. Maalaserkeilain tallentaa pisteet omaan sisäiseen koordinaatistoonsa. Jos pistepilvet halutaan johonkin tiettyyn koordinaattijärjestelmään, täytyy apuna käyttää tähyksiä ja takymetrimittauksia. Tähykset ovat usein pallon muotoisia ja niitä sijoitetaan mitattavalle alueelle useita siten, että eri mittauksilla saadaan tuloksia myös muutamasta samasta tähyksestä. Tähysten keskipisteet mitataan takymetrillä, jolloin

laserkeilaimen tuottamat pistepilvet voidaan myöhemmin muuntaa haluttuun koordinaatistoon.

2.3.4 Teollisuuslaserkeilaus

Teollisuuslaserkeilainkin on periaatteessa maalaserkeilain, mutta se on tarkoitettu erityisesti pienien kohteiden erittäin tarkkaan mittaamiseen. Teollisuuskeilaimen eli niin sanotun 3D-esineskanerin yleisin toimintaperiaate on pyyhkäistä lasersäteellä kohdetta ja ohjata heijastunut valo objektiivin kautta sensoreille, jolloin muodostetaan pistepilvi. Esineskanerin toiminta perustuu siten optiseen kolmiomittaukseen. Esineskanerin mittaustarkkuus voi olla jopa alle 1 mm. Mittaus tapahtuu maksimissaan alle 30 m:n etäisyydeltä. Laitteet soveltuvat esimerkiksi metalliteollisuuden pienten objektien mittaamiseen, lääketieteen tarpeisiin, arkeologian sovelluksiin sekä useilla muillakin aloilla erilaisten pintojen ja muotojen muutosten seuraamiseen.



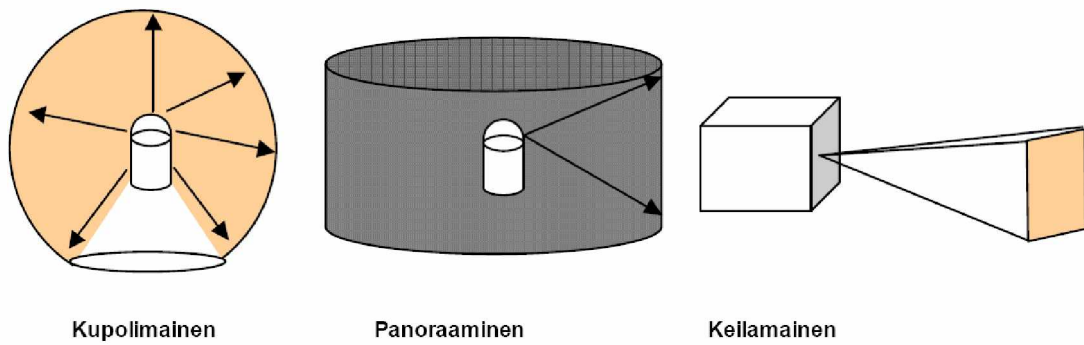
Kuva 8. Teollisuuslaserkeilain ja julkisivun mallinnusta. © Hannu Hyyppä ja Peter Korhonen Mitaten Oy 2006.

2.4 Maalaserkeilauksen perusteet

Maalaserkeilaimet voidaan toimintaperiaatteen mukaan jakaa neljään eri tyyppiin: kupolimaisesti, panoraamisesti tai keilamaisesti mittaaviin ja optiseen kolmiomittaukseen perustuviin laitteisiin. Kuvassa 9 on esitetty näistä kolmen ensimmäisen mittaustavat. Yleisin mittaustapa on kupolimainen, jolloin ainoastaan pieni alue laitteen alapuolella jää mittaamatta.

Jatkossa käsittelemme maalaserkeilaimia ja niiden ominaisuuksia. Maalaserkeilaimet voidaan toimintaperiaatteen pohjalta jakaa neljään eri tyyppiin:

- Kupolimainen mittaustapa (näitä sanotaan myös laserskannereiksi)
- Panoraaminen mittaustapa
- Keilamainen mittaustapa
- Optinen kolmiomittaus



Kuva 9. Laserkeilaimien tyyppejä.

Nykyisin enemmistö käytettävistä keilaimista on kupolimaisesti mittaavia, joten mitaamatta jää vain pieni alue laitteen alapuolelta (tekninen rajoite). Puutteena on ollut se rajoite, että mitattavien pisteiden välimatka kasvaa etäisyyden funktiona, jolloin yksityiskohtaisten mittauksien suorittaminen jo yli 20 metrin etäisyydellä on ollut hankalaa.

Monet laitteet kuitenkin pystyvät "fokusoimaan" mittausaluetta myös pitkille matkoille, eli pistepilven tiheys matkan mukaan ei paljonkaan heikkene. Näissä tapauksissa pitenee vain mittausaika.

Panoraamisesti mittaavien laitteiden rajoitteena on mittausrajoitus ylöspäin (tunnellit, rakennuksien sisätilat).

Optinen kolmiomittaus, mittausmenetelmistä harvinaisin, on pisteenmittauksessa tarkka, mutta rajoituksena on lyhyt mittausetäisyys ja muihin menetelmiin verrattuna isot katvealueet.

Laserkeilaimessa käytettävän etäisyysmittausmenetelmän pohjalta voidaan keilaimet luokitella kahteen isoimpaan ryhmään:

- valon kulkuaikaan perustuvat keilaimet
- vaihe-erokeilaimet

Valon kulkuaikaan perustuvat keilaimet ovat hitaampia, mutta mittaavat pitempiä matkojakin tarkasti ja pitkiltä matkoiltakin saadaan tiheitä pistepilviä. Vaihe-erokeilaimet ovat nopeita (jopa 500 000 pistettä sekunnissa mittaavat laitteet), mutta niiden etäisyysmittauksen maksimi jää nykyisin vielä alle 80 metrin, pistepilvien tiheyttä ei voida paljon säätää (esim. mitata kaukaisille kohteille tiheä pistepilvi). Myös mitattavan pistepilven laatu, erityisesti kohteiden reunoissa ei ole kulkuaikaan perustuviin laitteisiin verrattuna yhtä laadukas.

2.5 Laserkeilauksen laatuun vaikuttavat tekijät

Laserkeilauksen tuloksena saadaan pistepilvi. Yleisin syy mitata pistepilvi on mallintaa mitattu kohde. Tästä näkökulmasta laserkeilausprojektin laatuun vaikuttaa kolme tärkeää laadun kriteeriä:

- yksittäisen mitatun pisteen laatu
- pistepilven tiheys
- erikseen mitattujen pistepilvien yhdistämisen laatu

2.5.1 Mitatun pistepilven hajonta ja intensiteetti

Yksi tärkeä vaikuttava tekijä on mitattujen pisteiden hajonta. Tähän vaikuttaa paljon mittaussäteen osumiskulma kohteelle. Kohteiden mallintamisessa on näin ollen erittäin tärkeää jäännösvirheiden seuranta.

Mittausmatkan kasvaessa kohteelta mittalaitteeseen palaava signaali heikkenee. Paluusignaalin voimakkuus riippuu myös mitattavan kohteen pinnan ominaisuuksista. Esim. mittaussignaali palautuu eri tavalla rapatusta seinästä kuin maalatusta pinnasta tai ruosteisesta teräksestä. Myös kohteiden kaarevuus vaikuttaa palautuvan signaalin voimakkuuteen. Osa keilaimista tallentaa mitatun pisteen koordinaattien lisäksi myös palautuvan signaalin voimakkuuden. Paluusignaalin voimakkuus voidaan visuaalisesti esittää tietokoneen näytöllä jokaisen pisteen kohdalla värierona tai harmaasävyn erona. Käyttäen hyväksi intensiteettiä (palautuvan signaalin voimakkuutta) voidaan tasomaiselta pinnalta erottaa myös tekstuuria (kuvioita, tekstejä).

Osa mittalaitteiden valmistajista esittää tietokoneen näytöllä sävyeroja matkan funktiona, jolloin tasomaiset kohteet näyttäytyvät katsojalle samanvärisinä (tekstuuri ei erotu). Värieron käyttö on osoittautunut käytännössä monipuolisemmaksi ja miellyttävämmäksi.

Mittalaitteesta voidaan sisäisen kameran avulla määrittää jokaiselle pisteelle oikea väri tai liittää ulkoisella kameralla kuvatun valokuvan avulla värit pistepilven pisteille.

2.5.2 Mitatun pistepilven tiheys

Pistepilvet mitataan yleensä jatkokäsittelyä varten, eli pistepilviä käytetään kohteen mallintamisessa. Mallintamisen laatuun vaikuttaa suoranaisesti mallintamisessa käytettävän pistepilven pisteiden keskinäinen välimatka. Nyrkkisääntönä on, että mitä tiheämpi on mitattu pistepilvi, sitä tarkemmin pystytään mallintamaan putkistoja, reunoja jne. Ei saa kuitenkaan unohtaa, että tiheästä pistepilvestä ei ole paljon iloa jos mitatun pistepilven pisteiden tarkkuus on huono.

Pistepilven tiheys heikkenee matkan funktiona. Vaihe-eromenetelmällä toimivien laitteiden kohdalla voidaan sanoa, että parhaimmillaan ne kykenevät 50 m matkalta mitata pistepilviä 8 mm:n ruutuun. Valon kulkuaikaan perustuvilla laitteilla pystytään kohteita mittaamaan pari kolme kertaa tiheämmin.

2.5.3 Mitattujen pistepilvien yhdistämistavat

Koska kohteen mittauksessa yleensä tarvitaan tietoa myös yhdeltä kojepisteeltä mitattuna piiloon jäävistä alueista, on mitattava monelta kojeasemalta. Mitattujen pistepilvien yhdistämiseksi yhdeksi isoksi pistepilveksi on olemassa useita eri menetelmiä. Tarkin yhdistämismenetelmä on yhteisten tähyksien käyttö. Jokaisesta mitatusta pistepilvestä pitää löytyä ainakin kolme yhteistä koodattua tähyistä, joiden avulla pistepilvet yhdistetään samaan koordinaatistoon. Tähyksien keskipisteet on mitattava keilaimella. Tähykset ovat yleensä tasomaisia (prisma, tarratähys), pallomaisia tai puolipalloja. Niiden keskipisteiden määrittäminen keilaimen pistepilvestä tapahtuu automaattisesti. Tähyksien keskipisteet mitataan yleensä takymetrillä ympäröivässä koordinaatistossa yhdistettyjen pistepilvien siirtämiseksi tarvittavaan koordinaattijärjestelmään. Pistepilvien yhdistäminen tapahtuu kyseisellä menetelmällä parhaimmillaan 1–3 mm tarkkuudella. Pistepilviä voidaan yhdistää myös käyttäen yhteisiä mallinnettuja kohteita. Kahdessa erikseen mitatussa pistepilvessä mallinnetaan yhteisiä kohteita (tasoja, lieriöitä, rakennuksen kulmia tms. selkeästi pistepilvestä erotettavia kohteita...). Niille annetaan koodit ja niitä käytetään pistepilvien yhdistämisessä. Pistepilvien yhdistämisessä kohteiden mallintamisella ei kuitenkaan saavuteta aivan samaa tarkkuutta kuin tähyksien keskipisteet mittaamalla.

Käytettävissä on myös pistepilvien yhdistämismenetelmä pistepilvien yhteisten alueiden avulla. Tämä menetelmä vaatii, että kahdessa keskenään yhdistettävässä pistepilvessä olisi ainakin kolmasosa yhteistä peittoaa. Kummassakin pistepilvessä osoitetaan vähintään kolmelle yhteiselle pisteelle (osoitustarkkuus pisteparille kahdessa pistepilvessä alle 10 cm), joita käytetään kahden pistepilven likiarvosovitukseen. Sen jälkeen voidaan sovittaa mittaussovellus parhaimmalla tavalla (jäännösvirheet minimoiden) molemmat pistepilvet samaan koordinaatistoon. Pistepilvien yhdistämistarkkuus kyseisellä menetelmällä käytännössä on 5–10 mm.

Isoimmissa projekteissa on tavallista, että mitatut pistepilvet yhdistetään edellä mainittujen menetelmien kombinaationa.

2.6 Laserkeilaimien parametrit

Laserkeilaimien mittauseräparametrit voidaan jakaa kahteen pääryhmään: fyysiset ja mittaustekniset.

Fyysiset parametrit ovat maksimi mittauseräisyys, yhden pisteen mittauseräisyys, mittauseräisyysnopeus, kulmaluvun tarkkuus, kulman minimiaskel, paino, toiminta-aika, näkökenttä, kahden pisteen välinen minimimatka pistepilvessä esim. 50 m matkalla, lasersäteiden läpimitta esim. 50 m matkalla, jne.

Mittausteknisiä parametreja ovat mittauksien lukumäärä yhdellä mittauksella, tähyksien mittauseräisyys, käytettävien pistepilvien yhdistämismenetelmät, mittauksien suodatusmahdollisuudet (intensiteetin tai etäisyyksien perusteella), mahdollisuus mitata suoraan ylös tai alas, jne.

Mittauseräisyyden valmistajat määrittelevät mittalaitteen parametrit poikkeavilla periaatteilla, koska yleistä standardia tähän ei vielä ole. Tästä syystä tarvitaan testejä mittalaitteiden todellisten ominaisuuksien toteamiseksi. Hyvälaatuinen testirata kei-

laimien mittaustarkkuuden ja mallinnuskyvyn toteamiseksi on Etelä-Karjalan Ammatikorkeakoulussa Lappeenrannassa.

2.7 Laserkeilauskohteet

Laserkeilausta käytetään hyvin laajasti. Pääasialliset syyt keilausmenetelmän käyttöön ovat:

- Mitattavasta kohteesta ei ole piirustuksia ollenkaan (kirkot...)
- Mitattavasta kohteesta tarvitaan kolmiulotteista tietoa
- Vaaralliset kohteet (sähkölaitokset, louhokset...)
- Tarvitaan yksityiskohtaista tietoa kohteesta ja tietoa tarvitaan nopeasti
- ”Lahjomaton” laadunvalvonta

Tyypillisiä laserkeilauskohteita ovat:

- Tuotantolaitokset (saneeraus, älykkäät laitosmallit...)
- Arvorakennukset
- Sillat, tiet, tunnelit
- Muistomerkit
- Laivat, rautatiet...
- Vaikeasti tavoitettavat kohteet (kallioseinämät, korkeat rakenteet...)
- Maanmittaus

Uusia käyttökohteita lisääntyy jatkuvasti.

2.8 Laserkeilausprojekti ja sen suunnittelu

Laserkeilausprojektin voi jakaa seuraaviin vaiheisiin:

1. Suunnittelu, esivalmistelut
2. Keilaus
3. Tähyksien mittaus
4. Mitattujen pistepilvien yhdistäminen
5. Georeferointi (pistepilvien siirto tavoitekoordinaatistoon)
6. Mallinnus
7. Mallin siirto suunnittelujärjestelmään

Suunnitteluvaiheessa kannattaa tutustua jo etukäteen mitattavaan kohteeseen. Näin voidaan selvittää esim. tarvittavien asemapisteen sijainnit. Tilaaajan kanssa pitää sopia valmiin mallin siirtoformaattit, täydellisyytaso, yksityiskohtaisuustaso sekä tarkkuusvaatimukset. Usein ei tarvita esim. koko laitoksen mallia vaan vain pieni osa. Silloin voidaan loput mittauksista siirtää tilaajalle pistepilvenä. Liian yksityiskohtainen mittaus tuo lisäkustannuksia (mittauksiin kuluva aika, enemmän asemapisteitä). Liian harvaan mitattu pistepilvi ei anna riittävästi tietoa mallinnettavasta kohteesta. Eli aina on löydettävä kompromissi.

Esivalmisteluihin sisältyy tarvittavan koordinaatiston määrittäminen (tarvittaessa mitataan takymetrillä jonoja) sekä pistepilvien yhdistämisessä tarvittavien tähyksien asettelu kohteeseen.

Keilausprosessi yleensä on yksinkertainen. Tarvitaan mittausalueen (mittaussektorin) määrittäminen, pistepilven tiheyden määrittäminen jne. Samanaikaisesti keilauksen aikana voidaan suorittaa pistepilvien yhdistämisessä käytettävien tähyksien mittaus takymetrin avulla (yleensä prismaton takymetri).

Monet projektit ovat epäonnistuneet mitattujen pistepilvien yhdistämisessä tulleiden virheiden vuoksi. Pistepilvien rekisteröintiin pitää suhtautua erittäin vakavasti ja se on suoritettava huolellisesti. Pistepilvien yhdistämisen yhteydessä tai sen jälkeen voidaan siirtää mittaukset tarvittavaan koordinaatistoon (georeferointi). Georeferointi voidaan tehdä myös asemapisteen pystytyksen yhteydessä joko tunnetun asemapisteen menetelmällä tai laitteissa, joissa on kompensattori, vapaan asemapisteen menetelmällä.

Mallinnuksessa mallinnetaan mitattu kohde kolmiulotteiseksi malliksi. Käytettävissä on matemaattiset mallit (taso, sylinteri, jne.), luonnolliset mallit (esim. maastomalli). Jokainen mittaus ja mallinnus tuottaa jonkun verran virhettä verrattuna todellisuuteen. Mallinnuksen yhteydessä voidaan sovittaa mallinnetut kohteet standarditaulukoihin (putket, mutkat jne.). Hankalia kohteita (venttiilit, supistimet, jt.) voidaan lisätä jo mallinnettujen kohteiden lisäksi.

Mallit siirretään jatkokäsittelyä varten usein suunnittelujärjestelmiin, vaikka myös mallinnusohjelmissa on usein 3D-suunnitteluominaisuuksia eli kohteita voidaan suunnitella suoraan pistepilveen. Toinen vaihtoehto on mitattujen pistepilvien tuonti suoraan suunnitteluohjelmiin ohjelmallisten lisämoduulien avulla.

2.9 Maalaserkeilauskeilausaineistojen käsittely

Maalaserkeilainaineiston käsittely vaatii yleensä useamman sovellusohjelman, koska kohdetta keilattaessa maalaserkeilaimella tarvitaan useita eri suunnista keilattuja pistepilviä. Maalaserkeilausaineistot ja teollisuuskeilausaineistot käsitellään yleensä ensin keilaimen laitevalmistajan omalla ohjelmistolla, jonka jälkeen pistepilveä voidaan mallintaa keilausta varten suunnitelluilla ohjelmistoilla.

Maalaserkeilainohjelmistot sisältävät useita toimintoja, joista tärkeimmät ovat:

- Pistepilvien suodatus (kohina ja väärät pisteet poistetaan)
- Pistepilvien yhdistäminen eli rekisteröinti (tähyspallojen, tähyksien, mittausten tai objektien avulla)
- Siirto haluttuun koordinaatistoon (georeferointi)
- Pistepilvien tulkitseminen (reunojen irrotus, tasojen etsiminen, rautalankamallit)
- Pinnan kolmiointi
- Mallin yksinkertaistaminen
- Pinnan teksturointi
- 3D-mallinnus
- Tiedonsiirto jatkojalostukseen.

Ensimmäinen toimenpide kunkin keilatun 3D-pistepilven rekisteröimisen yhteydessä on pisteaineiston suodattaminen. Pistepilven suodatuksessa poistetaan aineistosta väärin rekisteröityneet pisteet ja kohinaa. Eli pistepilvet ”siivotaan” kaikista ylimääräisistä kohteista, jotka ovat jääneet pistepilveen ja jotka muuten vääristäisivät kohteen todellista muotoa. Perussuodatuksia ovat muun muassa hajapisteiden poisto ja kohinan poisto intensiteetin perusteella.

Kun pisteaineiston alustava suodatus on saatu suoritettua, seuraava työvaihe on täysin turhien pisteiden rajaaminen pois käsiteltävästä aineistosta. Tämän toimenpiteen tarkoituksena on vähentää käsittelyn kohteena olevan aineiston määrää mahdollisimman pieneksi, jolloin sen käsittely on helpompaa.

Maalaserkeilauksen yhteydessä rekisteröinnillä tarkoitetaan samasta kohteesta eri suunnista keilattujen laseraineistojen yhdistämistä suhteessa kohteeseen ja toisiinsa. Tämä toimenpide voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, joista tunnetuin ja käytetyin lienee pintojen yhteensovitus käyttäen ICPmenetelmää (Iterative Closest Point), jonka perusajatuksena on etsiä kahden likimääräisesti lähekkäin kohdistetun kolmiulotteisen pinnan mahdollisimman pientä sijainnillista eroa iteratiivisen laskentaprosessin avulla.

Käytännössä ICP-menetelmä toimii siten, että toiselta pinnalta valitaan joukko pisteitä, joiden sijaintia verrataan likimääräisesti lähelle kohdistetulla toisella pinnalla sijaitseviin oletettuihin vastinpisteisiin. Tämän jälkeen vastinpisteiden väliset etäisyydet mitataan ja lasketaan yhteen etäisyyksien neliösumma. Seuraavaksi pintojen välistä keskinäistä asentoa muutetaan hieman ja vastinpisteiden etäisyyksien laskenta suoritetaan uudelleen. Iteraatiokierrosten tarkoituksena on päästä vastinpisteiden etäisyyksien pienempää neliösummaa ja samalla pintojen keskinäisen sijainnin parempaa vastaavuutta kohti.

Vaihtoehtoinen lähestymistapa pistepilvien keskinäiseen kohdistamiseen on LS3D-menetelmä (Least Squares 3D Surface Matching). Menetelmän ajatuksena on käyttää pintojen yhteensovitukseen perustuvien menetelmien sijaan aitojen 3D-pistepilvien yhteensovitusta.

Toinen tapa laseraineistojen rekisteröintiin on erityisten muodoltaan ja kooltaan tunnettujen tähysten (mm. pallo tai taso) käyttäminen. Yleisimmät laserkeilauksessa käytettävät tähykset ovat joko tasomaisia tai pallomaisia. Tällöin pistepilvissä tulee olla vähintään kolme yhteistä tähystä, jotta ne voidaan yhdistää samaan koordinaatistoon. Tähyksinä voidaan käyttää myös mittausstilassa erilaisia rakenteita, kuten tiilenpäitä seinissä tai ikkunan pieliä. Tähysten käyttö onkin varsin yleinen ja varma tapa rekisteröidä pistepilvet onnistuneesti. Jotkut ohjelmistot osaavat yhdistää pistepilviä täysin automaattisesti käyttäen keilauksen aikana määriteltyjä tähyksiä. Tähykset voidaan myös mitata takymetrillä todelliseen koordinaatistoon, jolloin koko työ voidaan siirtää haluttuun koordinaattijärjestelmään. Tämän jälkeen yhdistetty pistepilvi voidaan georeferoida syöttämällä ohjelmalle tähysten paikkojen takymetrillä mitatut koordinaatit. Jos laserkeilauksen yhteydessä on otettu digitaalikuvia, niiden perusteella voidaan pisteille antaa todelliset värit.

Pistepilvestä voidaan tehdä kolmioverkko ja pintamalleja. Toisinaan pistepilvet sisältävät pisteitä turhan tiheästi, jolloin aineiston käsittely vaikeutuu. Pisteistön tiheyttä voidaan säätää erilaisilla harvennustoiminnoilla ilman, että mallin muoto kärsii. Jos-

kus pintamalliin jää aukkoja, joita voidaan täyttää ja poistaa ohjelmistojen toiminnoilla.^{3,4}

Pistepilvet tai valmiit mallit voidaan edelleen siirtää muihin suunnitteluohjelmiin.

2.10 Laserkeilauksen uusia suuntauksia

Kuten muutkin mittausjärjestelmät, laserkeilaus kehittyy kovaa vauhtia. Uusia piirteitä ovat:

- Langattomat laserkeilaimet
- Mittaus liikkuvalla alustalla
- Mittausnopeuden jatkuva kasvu
- Kompensaattorin käyttö
- Ohjelmistojen jatkuva kehittyminen

3 Tunneleiden laserkeilaus

3.1 Yleistä

Rantaradan tunnelit sijaitsevat Kirkkonummi-Turku välin sähköistetyllä radalla pääosin 1980-luvun lopulla ja 1990-luvun alussa rakennetuilla yksiraiteisilla rataoikaisuilla.

Tunneleiden vapaa poikkileikkaus ei täytä voimassa olevan RATO 18 mukaista vaatimusta vapaasta poikkileikkauksalasta. Tästä johtuu, että tunneleiden rakenteisiin kohdistuu kaluston suurentuneesta koosta ja suuremmista liikennöintinopeuksista johdettujen rakentamisaikaa suurempia kuormituksia.

Tunneleissa ja tunneleiden suuaukkojen otsapinnoilla on veden- ja lämmöneristeenä 50 mm paksuisista polyeteenilevyistä rakennettu eristerakenne, joka on kiinnitetty kalliota vasten sähkösinkityillä ankkureilla ja aluslevyillä. Eristelevyt on yhdistetty toisiinsa sekä liimatuilla puskusaumoilla että polyuretaanilla vahvistetuilla liimasaumoilla.

Eristerakenteen on tarkoitus ohjata kallioista tulevat vuotovedet esteettä tunneleiden pohjalla olevaan salaoja- ja viemärijärjestelmään, jota pitkin vuotovedet kulkeutuvat pois tunneleista. Veden vapaa virtaus ei kaikilla osin toteudu, sillä paikoin verhousrakenne on kiristetty tiukasti suoraan kallionpintaan.

Eristerakenteen polyeteenilevyjen paksuus on 50 mm, mikä ei viime vuosina liikenne-tunneleihin liittyen tehtyjen tutkimusten mukaan riitä lämmöneristeeksi Suomen olosuhteissa. Kylmät talvet ja erityisesti rikkoutuneet eristerakenteet aiheuttavat sen, että vesi jäätyy eristerakenteen takana olevalla kallion pinnalla. VTT:n tekemien lämpötilamittausten (liite 2) perusteella talvi 2009–2010 oli erityisen kylmä, jonka johdosta ehjänkin eristerakenteen takana tapahtui jäätymistä.

Rantaradan tunneleissa (taulukko 1) suoritettiin laserkeilauksia vuosina 2010–2011 siten, että kaikki tunnelit keilattiin sekä lämpimään aikaan että talvella pidemmän pakkasjakson jälkeen. Keilaukset suoritti VR Track Oy/Suunnittelu siten, että tunneleissa tehtiin keilaukset Riegl VZ-1000 maalaserkeilaimella 20 metrin välein.

Taulukko 1. Laserkeilatut tunnelit

Tunneli	Pituus (m)	KM alku	KM loppu	Rak. Vuosi	Rataosa
Lillgård	187	46+791	46 + 977	1985	1201 Kirkkonummi - Karjaa -Turku
Riddarbacken	286	47+769	48+043	1985	1201 Kirkkonummi - Karjaa -Turku
Bäljens	295	88+920	89+230	1991	1201 Kirkkonummi - Karjaa -Turku
Köpskog	45	90+490	90+535	1991	1201 Kirkkonummi - Karjaa -Turku
Åminne	108	92+390	92+500	1991	1201 Kirkkonummi - Karjaa -Turku
Högbacka	200	94+365	94+565	1991	1201 Kirkkonummi - Karjaa -Turku
Kaivosmäki	97	113+962	114+060	1990	1201 Kirkkonummi - Karjaa -Turku
Haukkämäki	436	114+304	114+740	1990	1201 Kirkkonummi - Karjaa -Turku
Tottola	520	139+249	139+777	1959	1201 Kirkkonummi - Karjaa -Turku
Pepallonmäki	530	152+420	152+950	1993	1201 Kirkkonummi - Karjaa -Turku

Kuivatusratkaisujen tutkimista ja leikkauksien kuntoarviointia varten suoritettiin tunneleiden suuaukkojen kallioleikkausten yläpintojen laserkeilaus taulukon 2 mukaisissa tunneleissa.

Taulukko 2. Tunnelit, joiden suuaukkojen yläosat laserkeilattiin ja valokuvattiin.

Tunneli	Pituus (m)	KM alku	KM loppu	Rak. Vuosi	Yläpinta etelä	Yläpinta pohjoinen
Lillgård	187	46+791	46+977	1985	x	
Åminne	108	92+390	92+500	1991		x
Kaivosmäki	97	113+962	114+060	1990	x	x
Haukkämäki	436	114+304	114+740	1990	x	x
Harmaämäki	267	115+150	115+418	1990	x	x
Tottola	520	139+249	139+777	1959	x	x
Pepallonmäki	530	152+420	152+950	1993	x	x

3.2 Kiintopisteet

Lähtöpisteinä käytettiin Destian (ent. Tielikelaitos) vuonna 2005, Kirkkonummi-Turku välille, mittaamia 4. ja 5. luokan kiintopisteitä. Kiintopisteiden koordinaattijärjestelmä on Kartastokoordinaattijärjestelmä kaista kaksi (KKJ2) ja korkeusjärjestelmä pisteillä on N60. Tunneleissa ei ollut käytettävissä kiinteitä mittapisteitä.

3.3 Laserkeilauksen parametrit

3.3.1 Tunnelit

Tunneleihin mitattiin kartoitusmittauksena laserkeilauksen asemapisteitä 20 metrin välein siten että ensimmäinen piste ja viimeinen piste sijaitsivat tunnelin ulkopuolella. Pisteet merkittiin ratapölkkyihin ja molemmat laserkeilaukset suoritettiin näiltä samoilta pisteiltä. Tässä lähdettiin siitä oletuksesta, että pölkkyt eivät käytännössä siirry mittausten välillä ja tulosten perusteella oletus oli oikea. Mikäli kohteiden seuranta- ja mittauksia jatketaan tulevaisuudessa, on tarkoituksenmukaista mitata ja rakentaa tunneleiden sisälle uudet kiintopisteet näitä mittauksia varten.

Laserkeilausaineiston rekisteröinti koordinaatistoon suoritettiin tunnetun pisteen menetelmällä.

Laserkeilaukset suoritettiin panoraama-mittauksena jolloin keilain pyörähtää ja mittaa akselinsa ympäri täyden ympyrän. Mittauksen vaaka- ja pystypistetiheytenä käytettiin 0.08 astetta, joka vastaa 100 metrin päässä n. 14 senttimetrin pistetiheyttä.

3.3.2 Kallioleikkausten yläpinnat

Kallioleikkausten päälle mitattiin kartoitusmittauksilla laserkeilauksen asemapisteitä siten, että pyrittiin kattamaan mahdollisimman laajalti maanpintaa sekä että samalla saataisiin mitattua leikkausten yläreunat mahdollisten halkeamien paikantamiseksi. Laserkeilaukset suoritettiin panoraama-mittauksina. Mittauksen vaaka- ja pystypistetiheytenä käytettiin 0.08 astetta. Laserkeilauksen lisäksi asemapisteillä otettiin myös valokuvat.

4 Laserkeilausaineiston käsittely

4.1 Yleistä

Maalaserkeilaimella mitattu pistepilviaineisto on keilaimen omassa koordinaattijärjestelmässä. Mitattu pistepilvi sisältää paljon pisteitä joita ei jatkokäsittelyn kannalta tarvita tai ne ovat virheellisiä. Aineiston käyttö edellyttää yleensä pistepilvien georeferointia, yhdistämistä sekä ylimääräisten pisteiden suodattamista. Esikäsittelyvaiheessa on tärkeää huomioida jatkokäsittelyn tarpeet. Aineiston jatkokäsittely määräytyy tehtävän mukaan. Se voi sisältää esimerkiksi pistepilviaineiston luokittelua tai mallintamista.

Laserkeilatun aineiston käsittelyssä oman haasteensa muodostaa aineiston suuri koko. Rantaradan tunneleiden ja kalliroleikkausten kaikkien keilausten tuottaman pistepilviaineiston (raakadata ja käsitelty aineisto) määrä on noin 219 Gt. Aineisto on talletettu VR Track Oy/Mittauspalvelun palvelimelle Riihimäkeen.

4.2 Käytetyt ohjelmistot

Pistepilviaineiston käsittelyyn on tarjolla lukematon määrä erilaisia ohjelmistoja. Ohjelmistot vaihtelevat laitevalmistajien aineiston keräämiseen ja esikäsittelyyn suunnatuista hyvinkin erikoistuneisiin ohjelmistoihin. Pääsääntönä voidaan pitää että yhdellä ohjelmistolla ei pysty kaikkea tarvittavaa tekemään.

Laitevalmistajien omat ohjelmistot pystyvät hyödyntämään kaikkea mittauksen yhteydessä kerättyä tietoa tehokkaimmin. Aina ei välttämättä edes pystytä kaikkea tietoa tallentamaan järkevästi siirtoformaattiin. Työn suunnittelussa kannattaa tarkasti miettiä mitkä työvaiheet suoritetaan valmistajan ohjelmistossa ennen aineiston vieniä jatkokäsittelyohjelmistoon.

4.2.1 RiScan Pro (Riegl)

Riegl on itävaltalainen yritys joka valmistaa erilaisia laseriin pohjautuvia mittalaitteita sekä niihin liittyviä ohjelmistoja. Ohjelmisto toimitetaan mittauslaitteen mukana ja se on nimeltään Rieglin skannerilla tuotetun maalaserkeilausaineiston käsittelyyn tarkoitettu ohjelmisto.

Ohjelmiston tärkeimmät ominaisuudet ovat: mittauksen ja valokuvauksen hallinta, mitatun pistepilviaineiston rekisteröinti, suodattaminen ja visualisointi. Ohjelma sisältää myös jonkin verran perustoiminnallisuutta mallinnukseen liittyen.

Tässä hankkeessa ohjelmistoa käytettiin:

- Pistepilviaineiston rekisteröintiin
- Pistepilvien ja valokuvien yhdistämiseen

4.2.2 TerraSolid: TerraScan ja TerraModeller

Terrasolid Oy on suomalainen ohjelmistoalan yritys jonka ohjelmistot keskittyvät ilma- ja mobiililaserkeilaus aineistojen käsittelyyn. Terrasolidin ohjelmistot ovat laitevalmistaja riippumattomia. Tuotepaketit kattavat erilaiset tehtävät datan kalibroinnista, luokitteluun, mallinnukseen ja kuvien käsittelyyn. TerraScan on pistepilvien käsittelyyn ja luokitteluun kehitetty ohjelmisto. TerraModeller on pintamallien muodostamiseen kehitetty ohjelmisto.

Tässä hankkeessa ohjelmistoa käytettiin:

- Pistepilviaineiston luokitteluun
- Kallioleikkausten pinta- ja korkeuskäyrämallien tuottamiseen

4.2.3 SiRailScan (Technet-Rail 2010 GmbH)

Technet-Rail 2010 GmbH on saksalainen ohjelmistoalan yritys jonka tuotteet keskittyvät maastomittauksiin sekä näihin liittyviin rautatiesovelluksiin.

SiRailScan on pistepilvien käsittelyyn kehitetty laitevalmistaja riippumaton ohjelmisto. Ohjelmistossa on monipuolista toiminnallisuutta aineiston rekisteröinnistä perusmallinnukseen. Erityispiirteenä ohjelmistossa on rautatiemaailmaan erikoistunutta toiminnallisuutta, kuten aukean tilan ulottuman analysointi pistepilviltä.

Tässä hankkeessa ohjelmistoa käytettiin:

- Eri keilauskertojen pistepilviaineistojen vertailuun
- Vertailun tulosten visualisointiin

4.2.4 PointCloud (Kubit GmbH)

Kubit GmbH on saksalainen ohjelmistoalan yritys. Yrityksen ohjelmistot keskittyvät rakennetussa ympäristössä mitatun aineiston hyödyntämiseen.

PointCloud on yrityksen pistepilviltä ja valokuvilta mallintamiseen kehitetty ohjelmisto. Ohjelmiston avulla pistepilviaineistoon liitettyiltä valokuvilta voidaan suoraan digitoida esimerkiksi rakenteiden taiteviivoja ja vaurioita.

Tässä hankkeessa ohjelmistoa käytettiin:

- Kallioleikkausten yläreunojen digitointiin
- Kallioleikkausten yläosien rakoilun digitointiin

4.3 Mittaustulosten käsittely

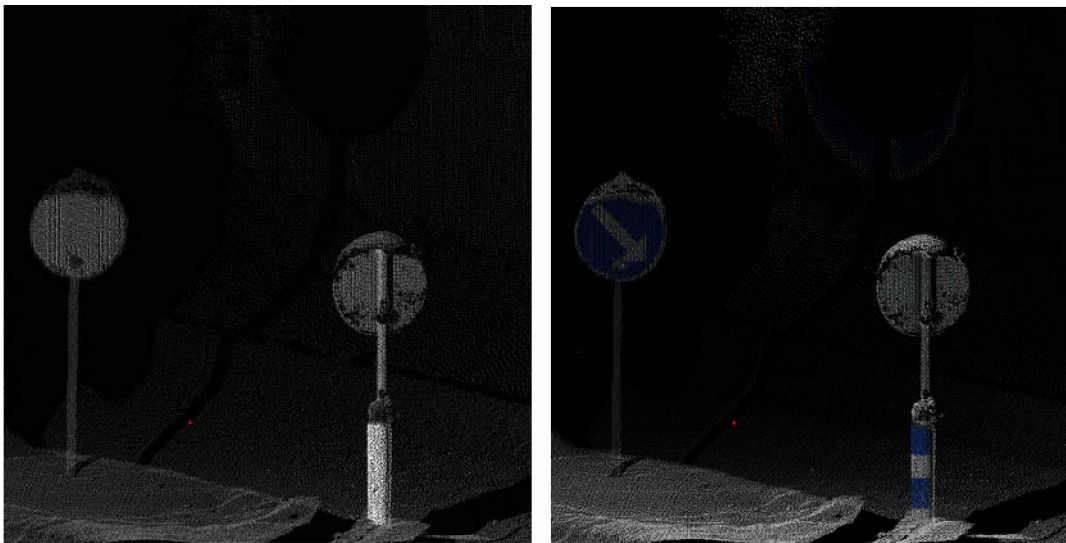
4.3.1 Georeferointi

Pistepilvet rekisteröidään koordinaatistoon ja samalla mahdollistetaan niiden yhdistäminen. Rekisteröinti tehtiin tässä työssä tunnetun pisteen menetelmällä. Laserkeilain sijaitsee tunnetulla pistellä ja sillä on näkyvyys yhteen tunnetulla pisteellä sijaitsevaan tähykseen. Ohjelmassa annetaan asemapisteelle ja tähykselle XYZ koordinaatit, joiden perusteella se laskee mitatuille laserpisteille koordinaatit haluttuun järjes-

telmään. Tässä vaiheessa on tarpeen tarkastaa että georeferoidut pistepilvet sopivat keskenään yhteen. Jos esimerkiksi asemapisteidien tai tähysten mittauksissa on tapahtunut virheitä ne näkyvät selkeästi aineistojen "hammastuksena".

4.3.2 Pistepilvien värjäys

Omana vaiheenaan työvirrassa on pistepilvien värjääminen keilauksen yhteydessä otettuja valokuvia käyttäen. Kamera pitää kalibroida aina kun se kuljetusta varten on irrotettu ja kiinnitetty keilaimen yhteyteen. Keilauksen yhteydessä otettujen valokuvien sijainti tunnetaan, kalibroinnin johdosta, tarkasti mitattuun pistepilveen nähden. Pistepilvi voidaan ohjelmallisesti värjätä orientoinniltaan tunnettujen kuvien perusteella. Valokuvien väriarvoilla varustettua pistepilveä on joissain tapauksissa selkeämpi tulkita kuin esimerkiksi intensiteettiarvoilla värjättyä pistepilveä.



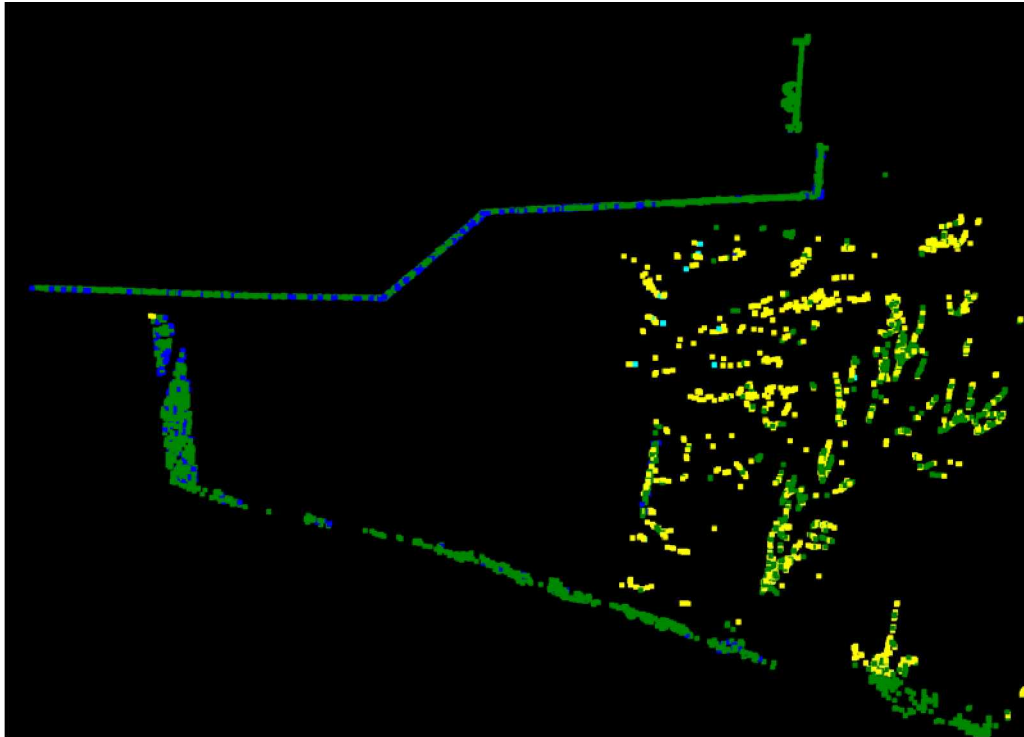
Kuva 10. Vasemmalla intensiteettikuva kohteesta ja oikealla RGB kuva samasta kohteesta.

4.3.3 Suodatus

Poistetaan keilausasetmittain pisteet joita ei haluta mukaan jatkokäsittelyyn. Näin saadaan vähennettyä käsiteltävää pistemäärää sekä saadaan poistettua virheellisesti mitattuja pisteitä. Tässä työssä pisteitä suodatettiin etäisyyden perusteella ja monipisteheijastuksista mukaan valittiin vain tehtävän kannalta tarpeelliset heijastukset.

Tunneleiden mittausaineistoista suodatettiin etäisyyden perusteella pisteet yli 25 metrin päästä asemapisteestä. Asemapisteeet sijaitsivat 20 metrin välein joten pitemmältä mitatuista pisteistä ei saada mitään lisäarvoa vertailua silmällä pitäen. Heijastuksen mukaan valittiin vain pisteet joilla yksi paluu heijastus ja monipisteheijastuksista vain ensimmäinen. Kun on haluttu saada mittauksia ns. kovalta pinnalta, muut pulssin paluuheijastukset ovat hyvin suurella todennäköisyydellä virheellisiä heijastuksia.

Leikkausten yläpinnoilla asemapisteeet sijaitsivat kauempana toisistaan, kuin tunneleissa, joten näistä suodatettiin pisteet jotka ovat yli sadan metrin päässä asemapisteeeltä. Leikkauksissa otetaan mukaan pulssin ainoa paluu sekä viimeinen paluu. Viimeinen heijastus on saattanut lävistää kasvillisuuden ja heijastuu mahdollisesti kovalta pinnalta (maanpinnalta).



Kuva 11. Monipisteheijastustuksilla värjätty pistepilvi. Vihreällä yksi paluu, keltaisella ensimmäinen paluu, sinisellä viimeinen paluu ja turkoosilla ensimmäisen ja viimeisen väliset paluut.

4.3.4 Aineiston yhdistäminen ja jakaminen

Usein on hyödyllistä jakaa aineisto asemapistleistä riippumattomiin tiedosto kokonaisuuksiin. Tässä työssä tunneleissa mitatut pistepilvet yhdistettiin ja leikattiin jatkokäsittelyn kannalta järkeviksi kokonaisuuksiksi. Yhtenä tärkeänä tekijänä tässä on muodostuvien tiedostojen koko. Tässä työssä pyrittiin pitämään yhden tiedoston sisältämä pistemäärä noin 30 miljoonassa pisteessä. Tämän kokoinen tiedosto toimii sujuvasti käytetyillä tietokoneilla ja ohjelmilla.

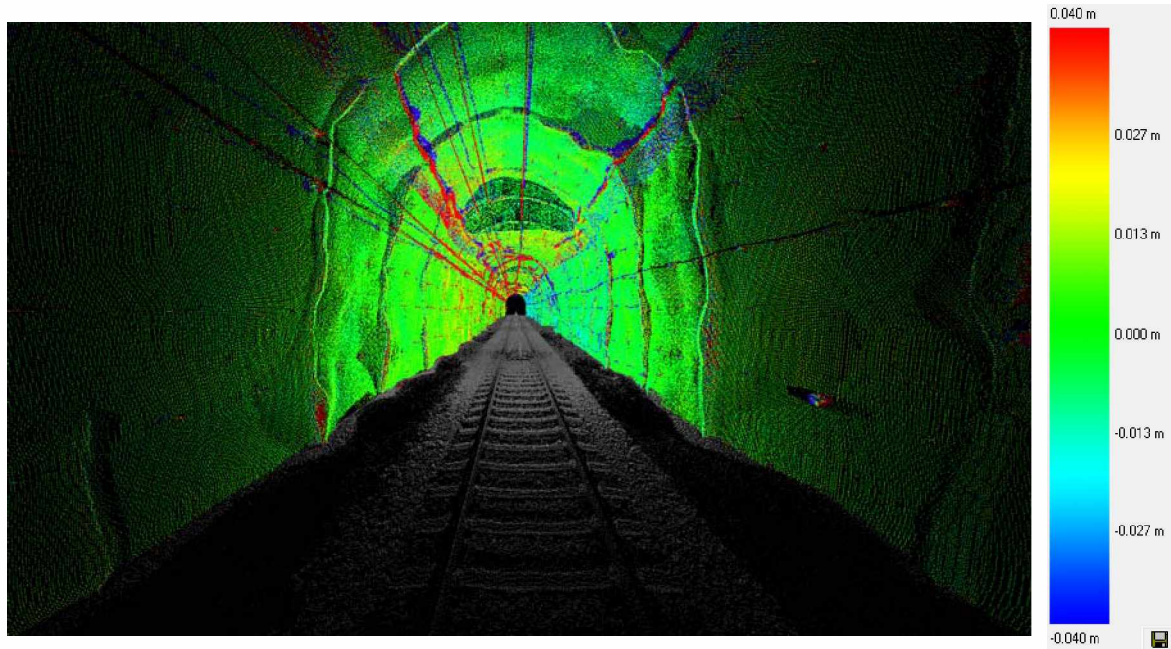
Tunnelien aineistot jaoteltiin vielä vertailua silmällä pitäen vasempaan seinämään, oikeaan seinämään, lattiaan sekä kattoon.

4.3.5 Pistepilviaineistojen vertailu

Verrattiin eri ajankohtina mitattuja aineistoja keskenään. Vertailu suoritettiin pistepilvipohjaisesti. Menetelmä perustuu SiRailScan ohjelmiston käyttämään lähimmän naapurin menetelmään. Toiminnan edellytyksenä on että vertailuun viedään aina samoin orientoituja aineistoja, tässä tapauksessa vertailtavat seinämät ja katto on eroteltu omiin tiedostoihinsa. Vertailussa käytettiin referenssinä lämpimällä mitattua aineistoa. Ohjelmassa ei voi vaikuttaa laskennan suuntaan, joten erot näkyvät aineistossa erivärisinä katossa, vasemmalla ja oikealla seinämällä. Katossa ja vasemmalla seinämällä talven pullistumat näkyvät väripaletin sinisessä päässä ja oikealla punaisessa päässä.

Vertailun lopputuloksena saadaan värjätty pistepilvi jossa pisteen väriarvo kertoo kuin läheltä vertailtavasta aineistosta löytyi lähin piste. Paikannettiin visuaalisesti

värjättyllä pistepilvellä alueet jotka poimittiin lähempään tarkasteluun. Tarkasteluun poimittiin erityisesti yli neljä senttimetriä suuret erot aineistojen välillä. Poimittujen kohteiden lähempi tarkastelu tehtiin pistepilvien poikki- ja tasoleikkauksilla. Lisäksi pullistumille laskettiin pinta-ala ja mahdollista olisi laskea myös pullistuman tilavuus.



Kuva 12. Esimerkki värjätystä pistepilvestä Åminnen tunnelista.

4.3.6 Maanpinnan luokittelu

Mitatussa pistepilviaineistossa ei ole tietoa mitä kohdetta pisteet kuvaavat. Aineiston tehokas käyttö edellyttää että tämä tieto olisi olemassa. Kallioleikkausten kuivatusratkaisuihin liittyen aineistosta täytyy määritellä pisteet jotka on mitattu maanpinnasta. Näiden perusteella voidaan muodostaa maanpintamalli jota käyttäen voidaan suorittaa erilaisia veden virtaukseen liittyviä analyysejä.

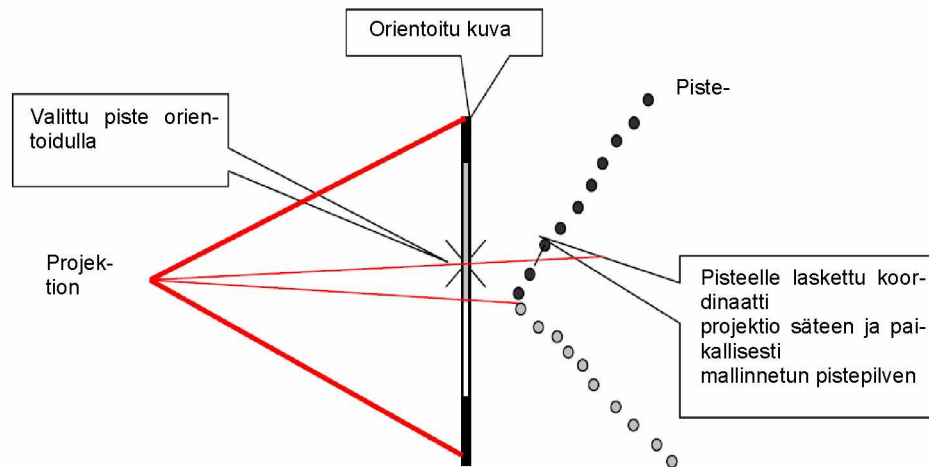
Luokittelu tehtiin TerraScan-ohjelmistolla. Luokittelu suoritetaan iteratiivisella prosessilla jossa luokittelu tehdään pisteiden keskinäisen sijainnin perusteella. Luokittelurutiini hakee ensin määritellystä ruutukoosta alimmat pisteet ja olettaa näiden olevan maanpinta pisteitä. Rutiini lähtee tästä kasvattamaan maanpinta pisteiden lukumäärää määrättyjen parametrien perusteella ja pysähtyy kun soveltuvia pisteitä ei enää löydy.

Tällainen luokittelu jättää aina hieman korjaamisen varaa lopputulokseen, joten se vaati aina tehtäväksi myös visuaalisen tarkastelun ja sekä tähän perustuvan luokittelun parantamisen. Kohtisuorien kohteiden kuten kallioleikkausten lähellä automaattisella prosessilla ei päästä haluttuun tulokseen vaan näissä kohteissa vaaditaan mitattava visuaaliseen tarkasteluun perustuvaa uudelleen luokittelua.

4.3.7 3D Mallintaminen valokuvia ja pintoja käyttäen

Keilauksen yhteydessä otetut valokuvat tarjoavat yleensä kohteen yksityiskohdista tarkempaa tietoa kun mitattu pistepilvi aineisto. Kohteen yksityiskohtien mallintamiseen on kehitetty useita erilaisia tekniikoita. Käytetyllä ohjelmistolla 3D piirtämisen voi suorittaa orientoidun valokuvan ja pistepilven avulla. Menetelmä perustuu orien-

toidulta valokuvasta määräytyvään projektio säteeseen sekä pistepilveltä paikallisesti lasketun pintamallin hyödyntämiseen, kuten kuvassa X on esitetty.



Kuva 13. 3D Piirtomenetelmän periaate. (Kubit: PoinCloud manual 2011)

5 Tunneleiden laserkeilaukset

5.1 Lillgård

Tunneli laserkeilattiin lämpimän aikaan 8.11.2010 sekä kylmän aikaan 13.3.2011. Tunnelin verhousrakenteessa ei mittauksen perusteella esiintynyt mainittavia muutoksia lämpimän ja kylmän ajankohdan välillä.

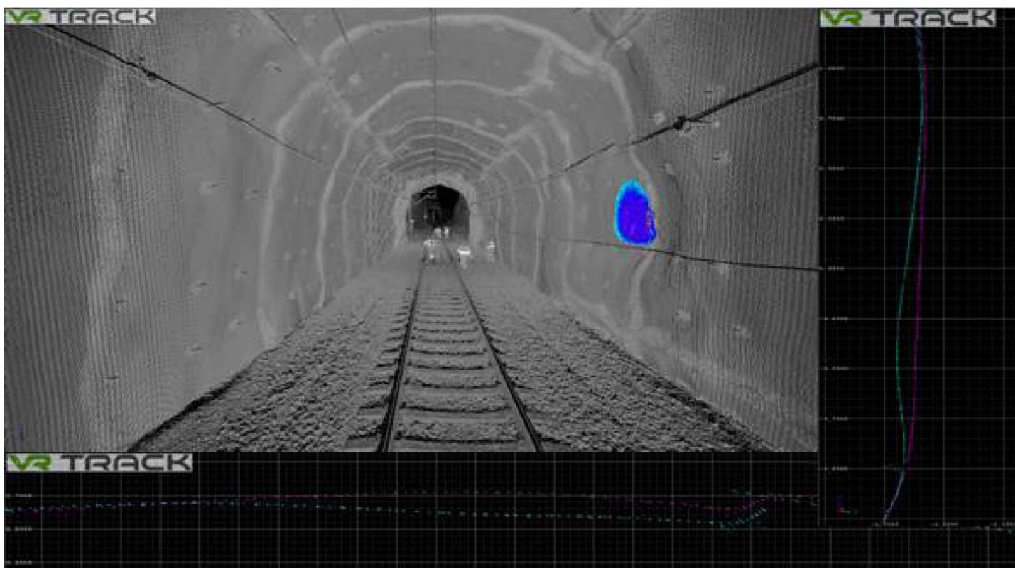
5.2 Riddarbacken

Tunneli laserkeilattiin lämpimän aikaan 9.11.2010 sekä kylmän aikaan 10.3.2011. Tunnelin verhousrakenteessa ei mittauksen perusteella esiintynyt mainittavia muutoksia lämpimän ja kylmän ajankohdan välisessä vertailussa.

5.3 Bäljens

Tunneli laserkeilattiin lämpimän aikaan 11.11.2010 sekä kylmän aikaan 15.3.2011. Tunnelin verhousrakenteessa havaittiin kahden ajankohdan mittausten välillä muutoksia kahdessa kohdassa.

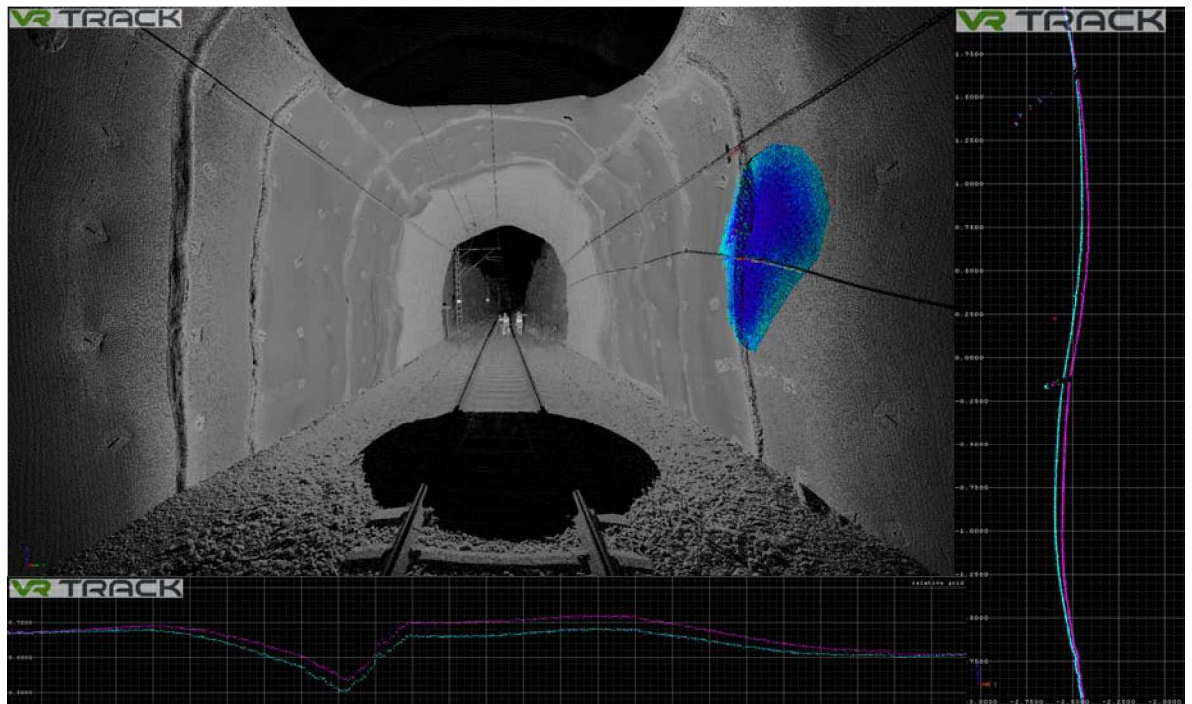
Ratakilometrillä 89+187.61 tunnelin oikean seinän verhousrakenteessa havaittiin pullistuma. Kohde (kuva 14) sijaitsee kiskon selästä mitatussa korkeudessa 2.80 metriä ja sen etäisyys radan keskilinjasta on 3.80 metriä. Havainnossa maksimimuutos aineistojen välillä on ~ 85 millimetriä siten, että kylmällä verhousrakenteella on pullistunut tunnelin sisäpuolelle. Havainnon ympärysmitta on 4.85 m ja pinta-ala on ~ 2 m².



Kuva 14. Pullistuma kohdalla Km 89 + 187.6. Kuvan oikeassa reunassa on poikki-leikkaus kohteesta. Kuvan alareunassa on tasoleikkaus kohteesta. Leikkauksissa on esitetty turkoosilla kylmän aikaan mitattu ja punaisella lämpimän aikaan mitattu.

Havaittu pullistuman on niin suuri, että se aiheuttaa ylimääräisiä kuormituksia verhouksrakenteelle ja etenkin sen limi- ja puskusaumoille. Polyeteenilevy itsessään on sen verran joustavaa materiaalia, että se ei rikkoudu tällaisilla siirtymillä. Saumat ovat epäjatkuvuuskohtia, joihin kohdistuu muutenkin ylimääräisiä kuormituksia junaliikenteen aiheuttamien paineiskujen kautta. Nyt mitatun pullistuman suuruinen siirtymä johtaa todennäköisesti usein toistuessaan saumojen rikkoutumiseen.

Ratakilometrillä 89+199.34 tunnelin oikean seinän verhouksrakenteessa havaittiin pullistuma. Kohde (kuva 15) sijaitsee kiskon selästä mitatussa korkeudessa 2.80 metriä ja sen etäisyys radan keskilinjasta on 3.47 m. Havainnossa maksimi muutos aineistojen välillä on ~ 45 millimetriä siten, että kylmällä verhouksrakenne pullistuu tunnelin puolelle. Havainnon ympärysmitta on ~ 7.4 metriä ja pinta-ala on ~ 3,9 m².



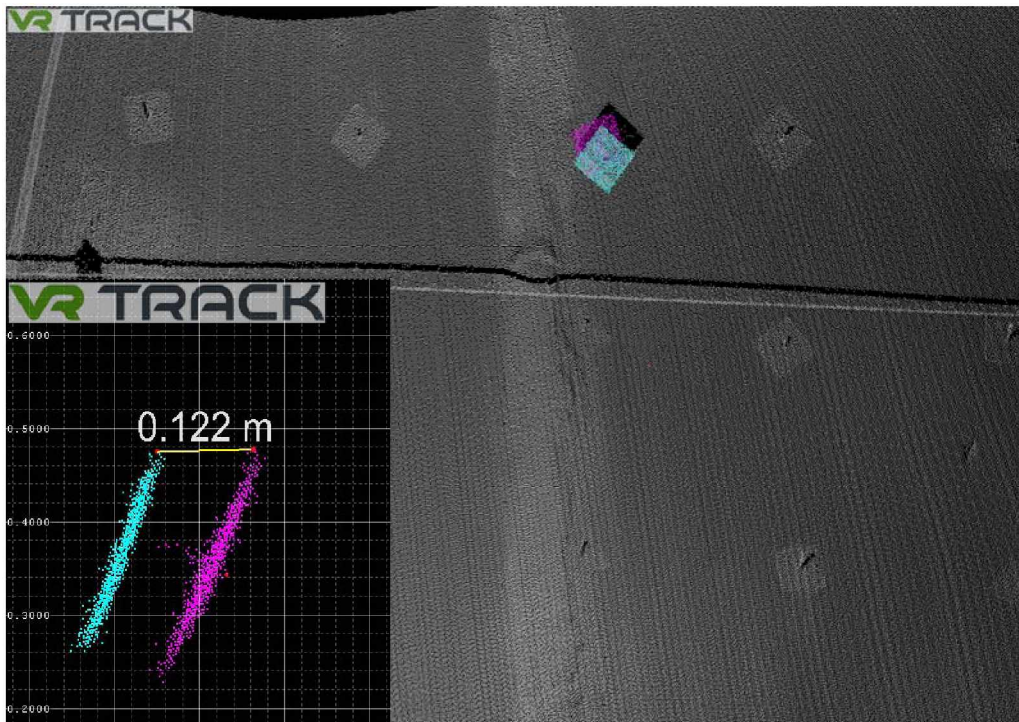
Kuva 15. Pullistuma kohdalla Km 89+199.3. Kuvan oikeassa reunassa on poikkileikkaus kohteesta. Kuvan alareunassa on tasoleikkaus kohteesta. Leikkauksissa on esitetty turkoosilla kylmän aikaan mitattu ja punaisella lämpimän aikaan mitattu.

Havaittu pullistuman on niin suuri, että se aiheuttaa ylimääräisiä kuormituksia verhouksrakenteelle ja etenkin sen limi- ja puskusaumoille. Polyeteenilevy itsessään on sen verran joustavaa materiaalia, se ei rikkoudu tällaisilla siirtymillä. Saumat ovat epäjatkuvuuskohtia, joihin kohdistuu muutenkin ylimääräisiä kuormituksia junaliikenteen aiheuttamien paineiskujen kautta. Nyt mitatun pullistuman suuruinen siirtymä johtaa todennäköisesti usein toistuessaan saumojen rikkoutumiseen.

5.4 Köpskog

Tunneli laserkeilattiin lämpimän aikaan 11.11.2010 sekä kylmän aikaan 9.3.2011. Tunnelin verhousrakenteessa ei mittauksen perusteella esiintynyt mainittavia muutoksia lämpimän ja kylmän ajankohdan välillä. Yhdessä pisteessä havaittiin verhousrakenteen kiinnitykseen käytetyn aluslevyn löystyneen mittausten välisenä aikana.

Tunnelissa havaittiin ratakilometrillä 90+522.63 vasemmalla seinän aluslevyn liikkuminen (kuva 16). Liikkuneen aluslevyn korkeus kiskon selästä 5.47 m ja etäisyys radan keskilinjasta 2.82 m. Levy on liikkunut ~ 120 millimetriä.



Kuva 16. Havaittu aluslevyn siirtymä tunnelin keskilinjaa kohti. Turkoosilla kylmällä mitattu ja punaisella lämpimällä mitattu.

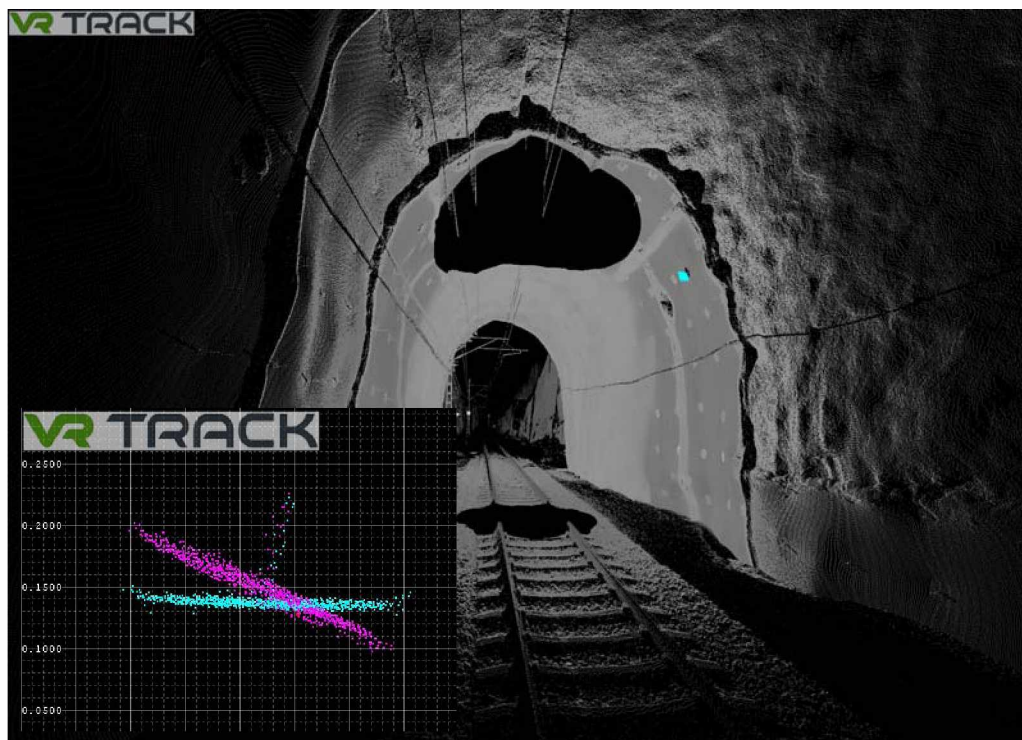
Aluslevyn löystymiseen voi olla monia syitä, joista yleisimmät liittyvät kiinnitysmutterin löystymiseen esimerkiksi värinän vaikutuksesta.

Kuvasta 16 nähdään että löystynyt aluslevy sijaitsee aivan polyuretaanilla vahvistetun verhousrakenteen sauman vieressä. Löystynyt aluslevy mahdollistaa sauman levyjen liikkumisen paineiskujen kuormituksesta ja voi johtaa pitkällä aikavälillä sauman rikkoutumiseen.

5.5 Äminne

Tunneli laserkeilattiin lämpimän aikaan 14.11.2010 sekä kylmän aikaan 14.3.2011. Tunnelin verhousrakenteessa ei mittauksen perusteella esiintynyt mainittavia muutoksia lämpimän ja kylmän ajankohdan välillä. Yhdessä pisteessä havaittiin verhousrakenteen kiinnitykseen käytetyn aluslevyn löystyneen mittausten välisenä aikana.

Tunnelissa havaittiin ratakilometrillä 92 + 453.46 (kuva 17) tunnelin oikean seinän aluslevyn liikkuminen. Aluslevyn korkeus kiskon selästä on 5.10 m ja etäisyys radan keskilinjasta 3.2 m.



Kuva 17. Havaittu aluslevyn muutos. Turkoosilla kylmällä mitattu ja punaisella lämpimällä mitattu.

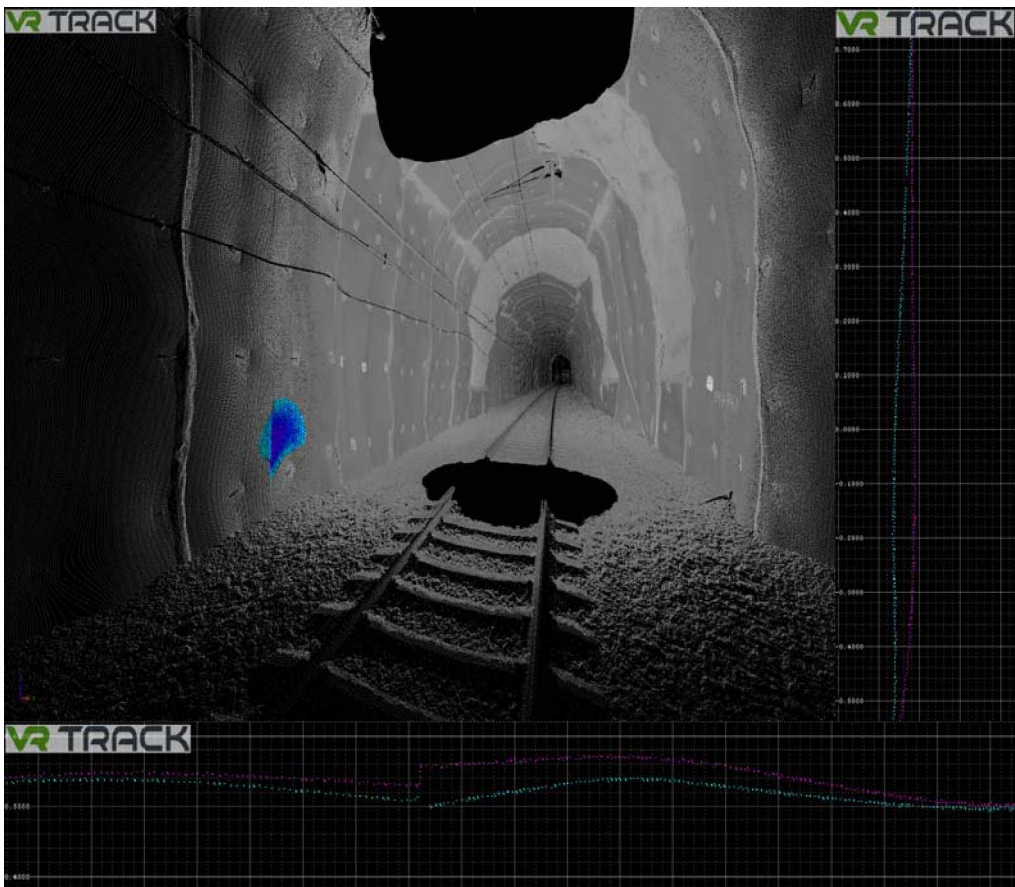
Aluslevyn löystymiseen voi olla monia syitä, joista yleisimmät liittyvät kiinnitysmutterin löystymiseen esimerkiksi tärinän vaikutuksesta.

Kuvasta 17 nähdään että löystynyt aluslevy sijaitsee aivan polyeteenilevyjen liimatun puskusauman vieressä. Mikäli levy löystyy vielä lisää, voi seurauksena olla sauman levyjen liikkumisen paineiskujen kuormituksesta, mikä voi johtaa pitkällä aikavälillä sauman rikkoutumiseen.

5.5.1 Högbacka

Tunneli laserkeilattiin lämpimän aikaan 15.11.2010 sekä kylmän aikaan 8.3.2011. Tunnelin verhousrakenteessa havaittiin kahden ajankohdan mittausten välillä muutoksia viidessä kohdassa.

Ratakilometrillä 94+436.5 tunnelin vasemmalla seinällä havaittiin verhousrakenteessa pullistuma. Kohde (kuvat 18 ja 19) sijaitsee kiskon selästä mitatussa korkeudessa 1.05 metriä ja etäisyys keskilinjasta on 3.44 metriä. Havainnossa maksimi muutos aineistojen välillä on ~ 40 millimetriä siten, että kylmällä verhousrakenteen pullistuu tunnelin puolelle. Havainnon ympärysmitta on ~ 3.4 m ja pinta-ala on ~ 0.7 m².



Kuva 18. Havainnosta RKM 94+436.5. Kuvan vasemmassa reunassa on poikkileikkaus kohteesta. Kuvan alareunassa on tasoleikkaus kohteesta. Leikkauksissa on esitetty turkoosilla kylmän aikaan mitattu ja punaisella lämpimän aikaan mitattu.

Havaittu pullistuman on niin suuri, että se aiheuttaa ylimääräisiä kuormituksia verhousrakenteelle ja etenkin sen limi- ja puskusaumoille. Polyeteenilevy itsessään on sen verran joustavaa materiaalia, se ei rikkoudu tällaisilla siirtymillä. Saumat ovat epäjatkuvuuskohtia, joihin kohdistuu muutenkin ylimääräisiä kuormituksia junaliikenteen aiheuttamien paineiskujen kautta.

Tässä kohdassa verhousrakenteen siirtymä on rikkonut saumarakenteen ja pullistuman johdosta syntyneen halkeaman pituus on ~ 1.2 m.



Kuva 19. Intensiteettikuva pullistumasta. Valkoisella viivalla kuvattu pullistuman rajaus. Kuvassa näkyy vaaleana viivana myös rikkoutunut sauma

Ratakilometrillä 94+513.75 tunnelin vasemmalla seinällä havaittiin verhousrakenteessa pullistuma. Kohde (kuvat 20 ja 21) sijaitsee kiskon selästä mitatussa korkeudessa 2.35 metriä ja sen etäisyys radan keskilinjasta on 5.73 metriä. Havainnossa maksimi muutos aineistojen välillä on ~ 140 millimetriä siten, että kylmällä verhousrakenne pullistuu tunnelin puolelle. Havainnon ympärysmitta on ~ 9.3 m ja pinta-ala on ~ 6 m².

Havaittu pullistuman on niin suuri, että se aiheuttaa ylimääräisiä kuormituksia verhousrakenteelle ja etenkin sen limi- ja puskusaumoille. Polyeteenilevy itsessään on sen verran joustavaa materiaalia, se ei rikkoudu tällaisilla siirtymillä. Saumat ovat epäjatkuvuuskohtia, joihin kohdistuu muutenkin ylimääräisiä kuormituksia junaliikenteen aiheuttamien paineiskujen kautta.

Tässä kohdassa verhousrakenteen siirtymä on rikkonut saumarakenteen ja pullistuman johdosta syntyneen halkeaman pituus on ~ 3.5 m.

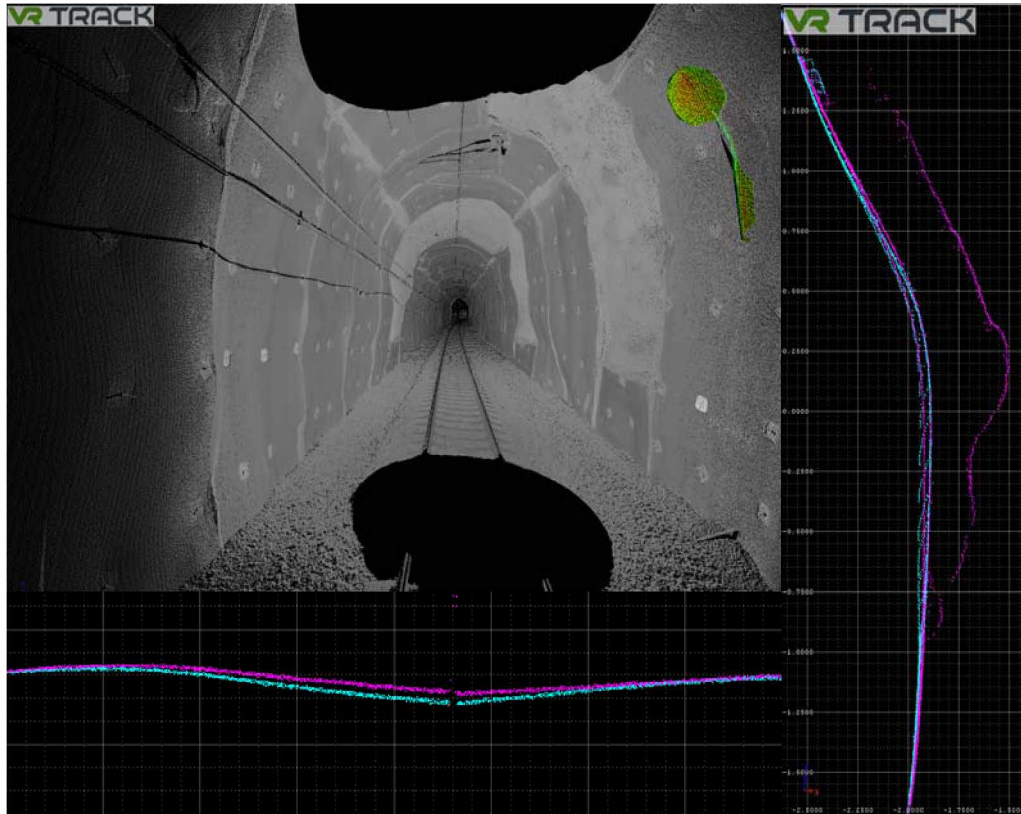


Kuva 20. Havainnosta Km 94+513.8. Kuvan vasemmassa reunassa on poikkileikkaus kohteesta. Kuvan alareunassa on tasoleikkaus kohteesta. Leikkauksissa on esitetty turkoosilla kylmän aikaan mitattu ja punaisella lämpimän aikaan mitattu.



Kuva 21. Intensiteettikuva pullistumasta. Valkoisella viivalla kuvattu pullistuman rajaus. Kuvassa näkyy selkeästi myös rikkoutunut sauma.

Ratakilometrillä 94+439.31 tunnelin oikealla seinällä havaittiin pullistuma. Kohde (kuvat 22 ja 23) sijaitsee kiskon selästä mitatussa korkeudessa 5.2 metriä ja etäisyys keskilinjasta 3.1 metriä. Havainnossa maksimi muutos aineistojen välillä on ~ 30 millimetriä siten, että kylmällä verhousrakenne pullistuu tunnelin puolelle. Havainnon ympärysmitta on ~ 6 m ja pinta-ala on ~ 1 m².



Kuva 22. Havainnosta Km94+439.3. Kuvan vasemmassa reunassa on poikkileikkaus kohteesta. Kuvan alareunassa on tasoleikkaus kohteesta. Leikkauksissa on esitetty turkoosilla kylmän aikaan mitattu ja punaisella lämpimän aikaan mitattu.



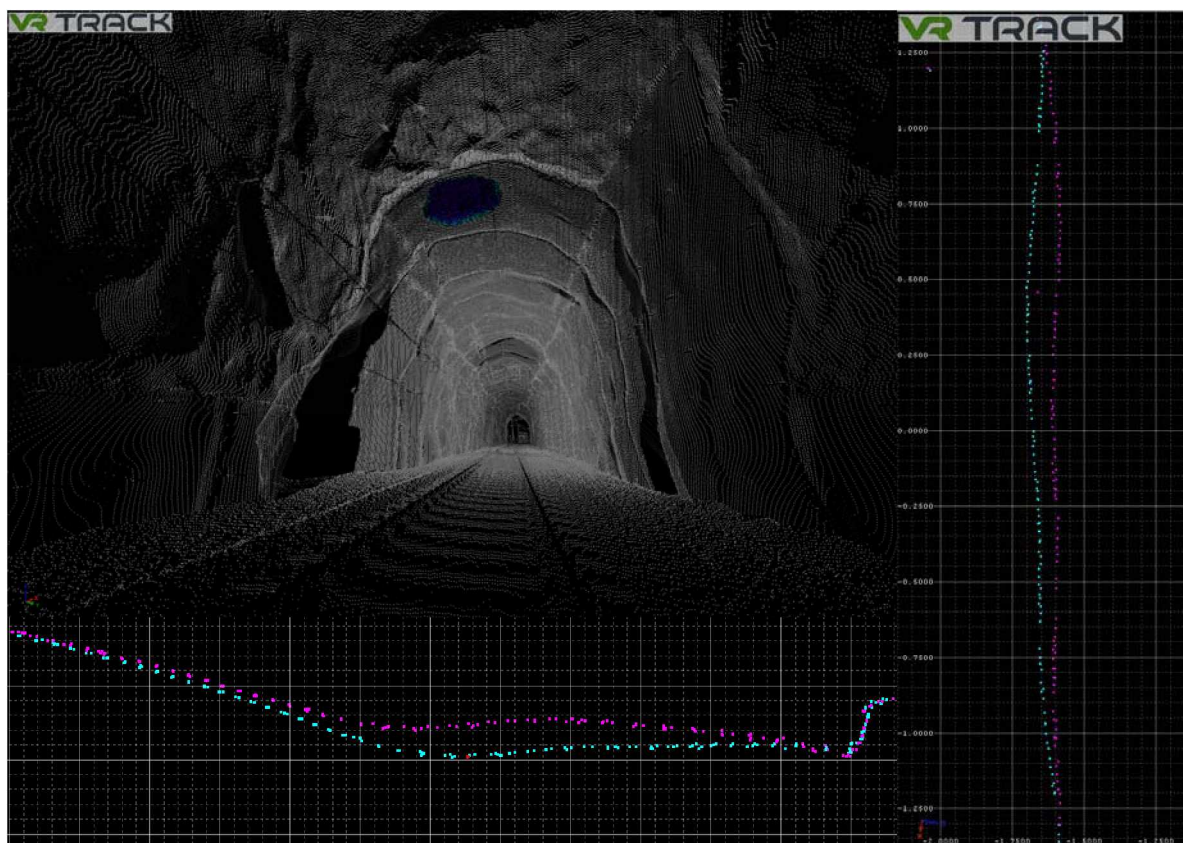
Kuva 23. Intensiteettikuva pullistumasta. Valkoisella viivalla kuvattu pullistuman rajaus. Kuvassa näkyy selkeästi myös rikkoutunut sauma.

Havaittu pullistuman on niin suuri, että se aiheuttaa ylimääräisiä kuormituksia verhourakenteelle ja etenkin sen limi- ja puskusaumoille. Polyeteenilevy itsessään on sen verran joustavaa materiaalia, se ei rikkoudu tällaisilla siirtymillä. Saumat ovat epäjatkuvuuskohtia, joihin kohdistuu muutenkin ylimääräisiä kuormituksia juna liikenteen aiheuttamien paineiskujen kautta.

Tässä kohdassa verhourakenteen siirtymä on rikkonut saumarakenteen ja pullistuman johdosta syntyneen halkeaman pituus on ~ 2.3 m.

Ratakilometrillä 94+ 458.8 tunnelin holvissa havaittiin pullistuma. Kohde sijaitsee (kuva 24) kiskon selästä mitatussa korkeudessa 6.6 metriä ja etäisyys radan keskilinjasta on 1.2 metriä. Havainnossa maksimi muutos aineistojen välillä on ~ 70 millimetriä siten, että kylmällä verhourakenne pullistuu tunnelin puolelle. Havainnon ympärysmitta on 7.4 m ja pinta-ala on ~ 4.7 m².

Havaittu pullistuman on niin suuri, että se aiheuttaa ylimääräisiä kuormituksia verhourakenteelle ja etenkin sen limi- ja puskusaumoille. Polyeteenilevy itsessään on sen verran joustavaa materiaalia, se ei rikkoudu tällaisilla siirtymillä. Saumat ovat epäjatkuvuuskohtia, joihin kohdistuu muutenkin ylimääräisiä kuormituksia juna liikenteen aiheuttamien paineiskujen kautta.

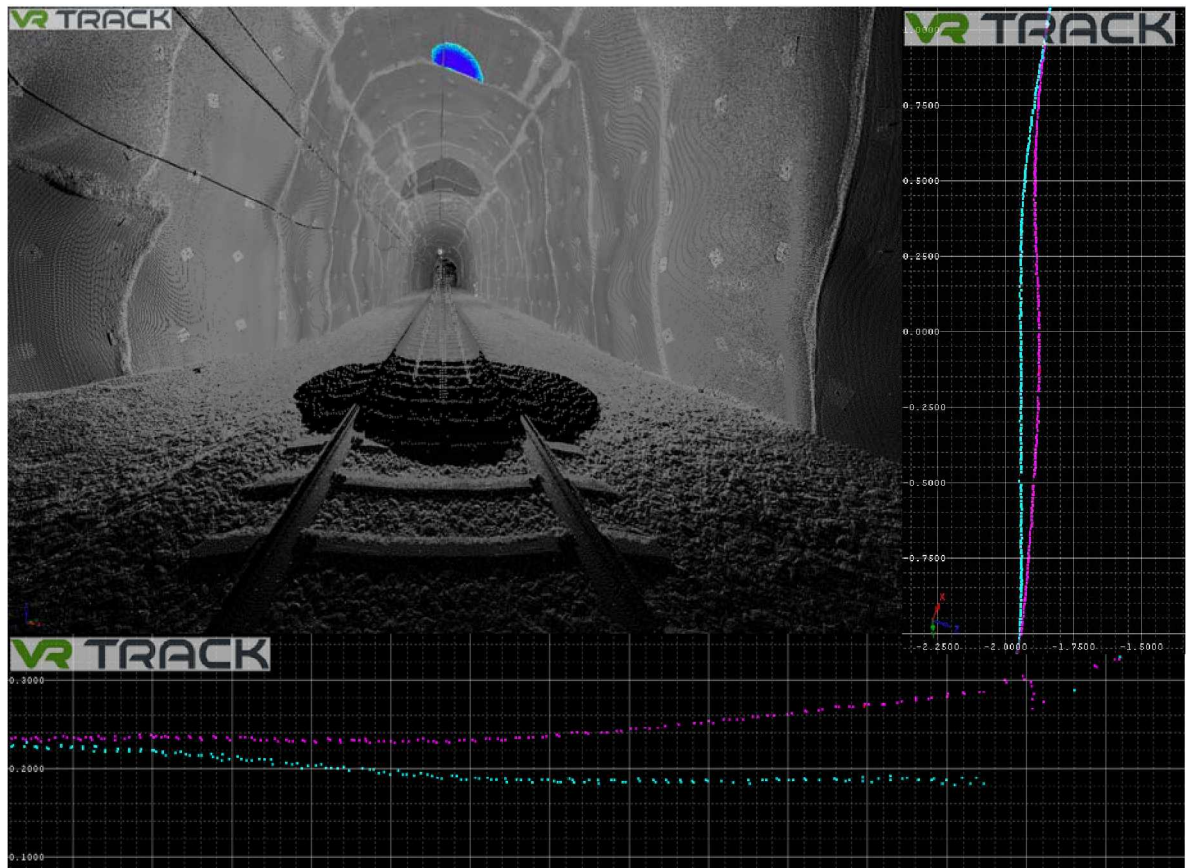


Kuva 24. Havainnosta Km 94 + 458.8. Kuvan vasemmassa reunassa on poikki-leikkaus kohteesta. Kuvan alareunassa on pituusleikkaus kohteesta. Leikkauksissa on esitetty turkoosilla kylmän aikaan mitattu ja punaisella lämpimän aikaan mitattu.

Ratakilometrillä 94 + 466.45 tunnelin holvissa havaittiin pullistuma. Kohde (kuva 25) sijaitsee kiskon selästä mitatussa korkeudessa 7.3 metriä ja etäisyys keskilinjasta on 0.3 metriä. Havainnossa maksimi muutos aineistojen välillä on ~ 90 millimetriä siten,

että kylmällä verhousrakenne pullistuu tunnelin puolelle. Havainnon ympärysmitta on noin 5 m ja pinta-ala on $\sim 1.6 \text{ m}^2$.

Havaittu pullistuman on niin suuri, että se aiheuttaa ylimääräisiä kuormituksia verhousrakenteelle ja etenkin sen limi- ja puskusaumoille. Polyeteenilevy itsessään on sen verran joustavaa materiaalia, se ei rikkoudu tällaisilla siirtymillä. Saumat ovat epäjatkuvuuskohtia, joihin kohdistuu muutenkin ylimääräisiä kuormituksia junaliikenteen aiheuttamien paineiskujen kautta.



Kuva 25. Havainnosta Km 94+466.5. Kuvan vasemmassa reunassa on poikkileikkaus kohteesta. Kuvan alareunassa on pituusleikkaus kohteesta. Leikkauksissa on turkoosilla esitetty kylmän aikaan mitattu ja punaisella lämpimän aikaan mitattu.

5.5.2 Kaivosmäki

Tunneli laserkeilattiin lämpimän aikaan 15.11.2010 sekä kylmän aikaan 7.3.2011. Tunnelin verhousrakenteessa ei mittauksen perusteella esiintynyt mainittavia muutoksia lämpimän ja kylmän ajankohdan välillä.

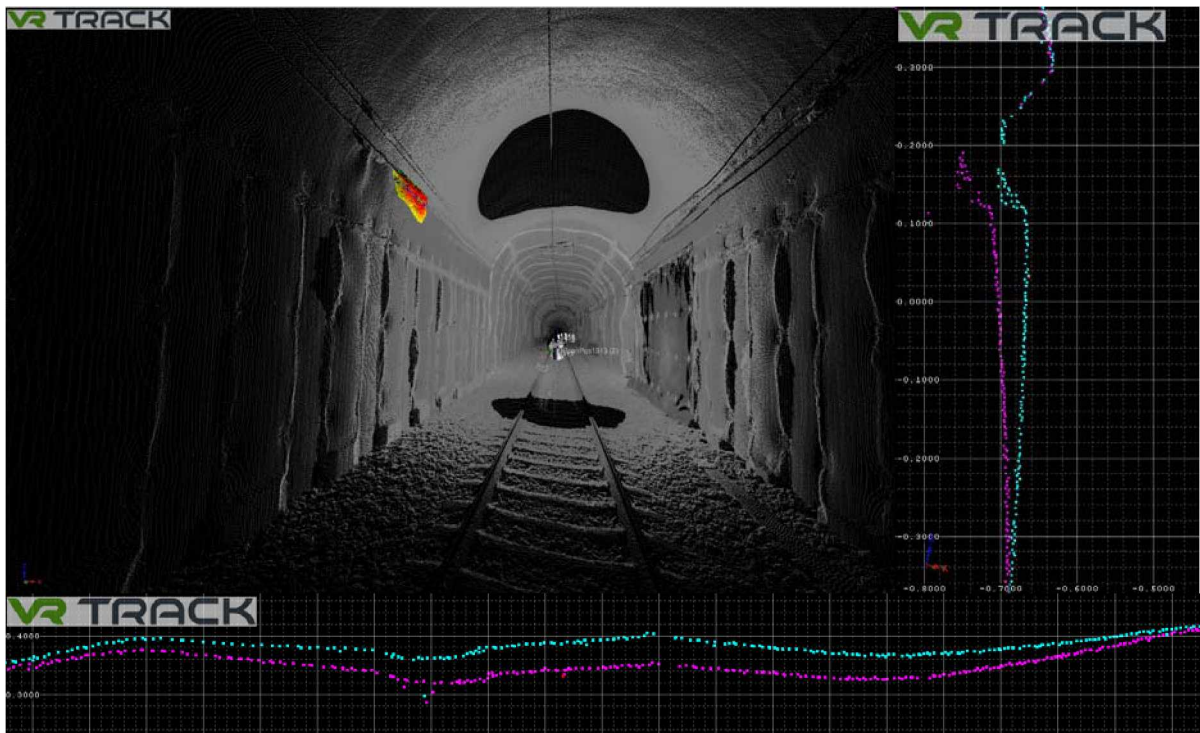
5.5.3 Haukkamäki

Tunneli laserkeilattiin lämpimän aikaan 19.11.2010 sekä kylmän aikaan 7.3.2011. Tunnelin verhousrakenteessa ei mittauksen perusteella esiintynyt mainittavia muutoksia lämpimän ja kylmän ajankohdan välillä.

5.5.4 Tottola

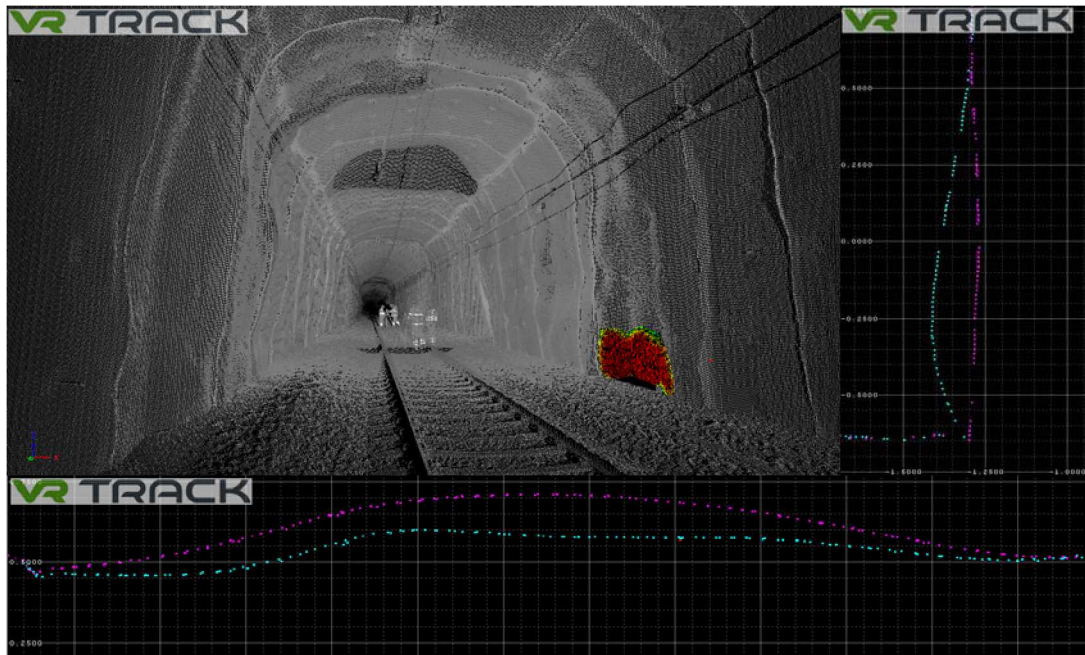
Tunneli laserkeilattiin lämpimän aikaan 5.9.2011 sekä kylmän aikaan 1.3.2011. Tunnelin verhousrakenteessa havaittiin kahden ajankohdan mittausten välillä muutoksia neljässä kohdassa. Leikkauksissa on esitetty turkoosilla kylmän aikaan mitattu ja punaisella lämpimän aikaan mitattu verhousrakenteen pinta.

Ratakilometrillä 139+314.2 tunnelin vasemmalla seinällä havaittiin muutos. Levyjen liitos on auennut. Kohde (kuva 26) sijaitsee kiskon selästä mitatussa korkeudessa 4.2 metriä ja etäisyys keskilinjasta -2.8 metriä. Havainnossa maksimi muutos aineistojen välillä on ~ 50 millimetriä siten, että lämpimällä mitatussa aineistossa liitos on auennut. Havainnon ympärysmitta on 4 metriä ja pinta-ala on ~ 0.74 m².



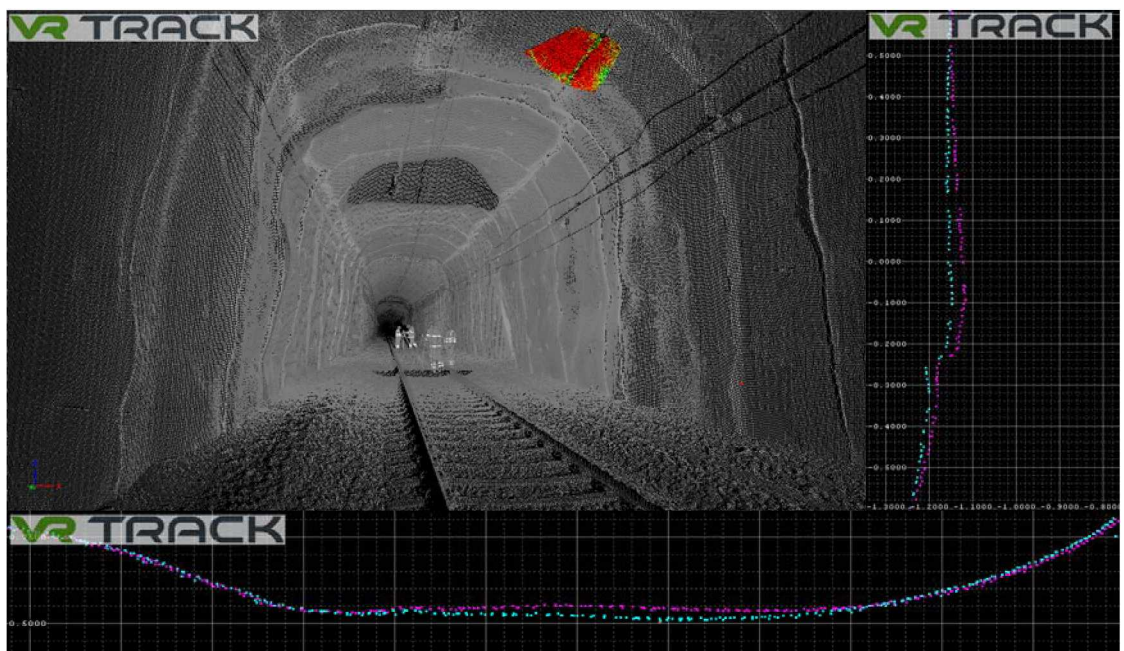
Kuva 26. Km 139+314.2. Kuvan oikeassa reunassa on poikkileikkaus kohteesta. Kuvan alareunassa on tasoleikkaus kohteesta.

Ratakilometrillä 139 + 188.2 tunnelin oikean seinän havaittiin pullistuma. Kohde (kuva 27) sijaitsee kiskon selästä mitatussa korkeudessa 0.3 metriä ja etäisyys keskilinjasta 3.5 metriä. Havainnossa maksimi muutos aineistojen välillä on ~ 100 millimetriä siten, että lämpimällä verhousrakenne pullistuu tunnelin puolelle. Havainnon ympärysmitta on 6.8 metriä ja pinta-ala on ~ 2.54 m².



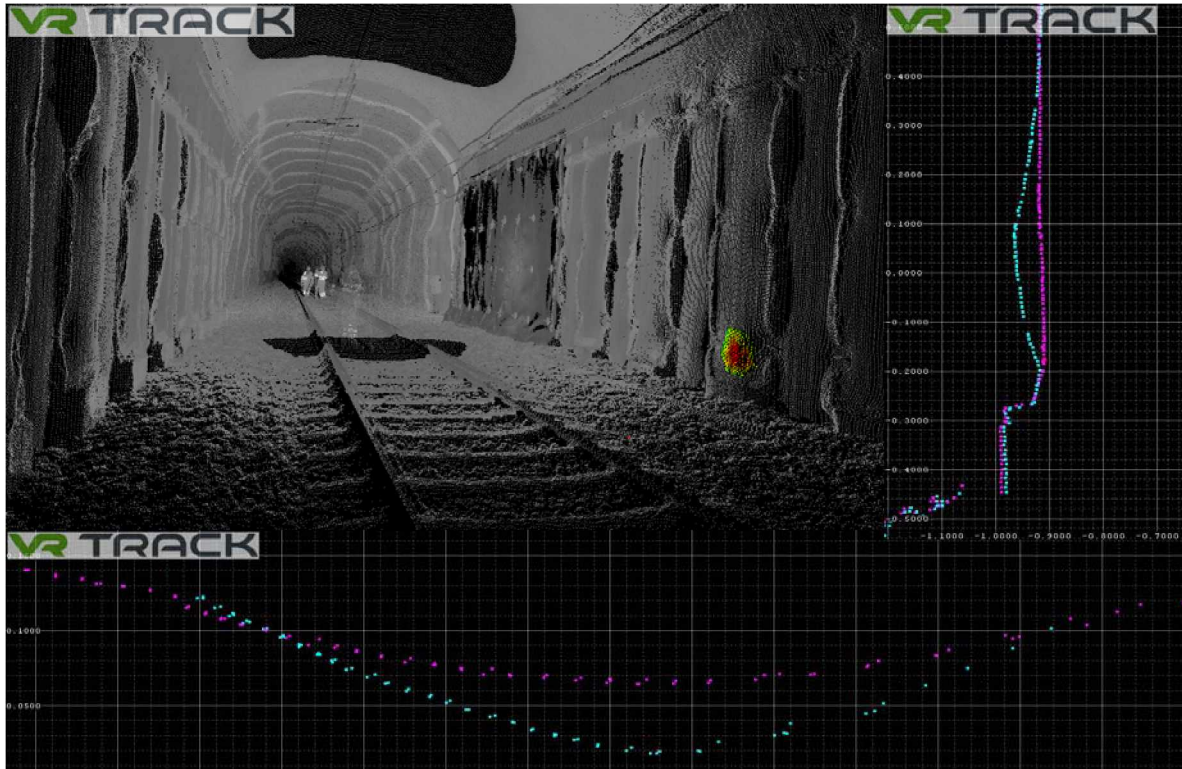
Kuva 27. Havainnosta Km 139 + 188.2. Kuvan oikeassa reunassa on poikkileikkaus kohteesta. Kuvan alareunassa on tasoleikkaus kohteesta.

Ratakilometrillä 139 + 187.5 tunnelin holvissa havaittu pullistuma. Korkeus kiskon- selästä on 6.2 metriä ja etäisyys keskilinjasta 1.8 metriä. Talvella mitattu pullistuma on ~ 40 millimetriä tunnelin puolelle. Havainnon ympärysmitta on 5 metriä ja pinta- ala on ~ 2.33 m².



Kuva 28. Havainnosta Km 139 + 187.5. Kuvan oikeassa reunassa on poikkileikkaus kohteesta. Kuvan alareunassa on tasoleikkaus kohteesta.

Ratakilometrillä 139 + 312 tunnelin oikean seinän havaittiin pullistuma. Kohde sijaitsee kiskon selästä mitatussa korkeudessa 0.5 metriä ja etäisyys keskilinjasta 2.8 metriä. Havainnossa maksimi muutos aineistojen välillä on ~ 50 millimetriä siten, että kylmällä verhousrakenteen pullistuu tunnelin puolelle. Havainnon ympärysmitta on 1.7 metriä ja pinta-ala on ~ 0.18 m².



Kuva 29. Havainnosta Km 139 + 312. Kuvan oikeassa reunassa on poikkileikkaus kohteesta. Kuvan alareunassa on tasoleikkaus kohteesta.

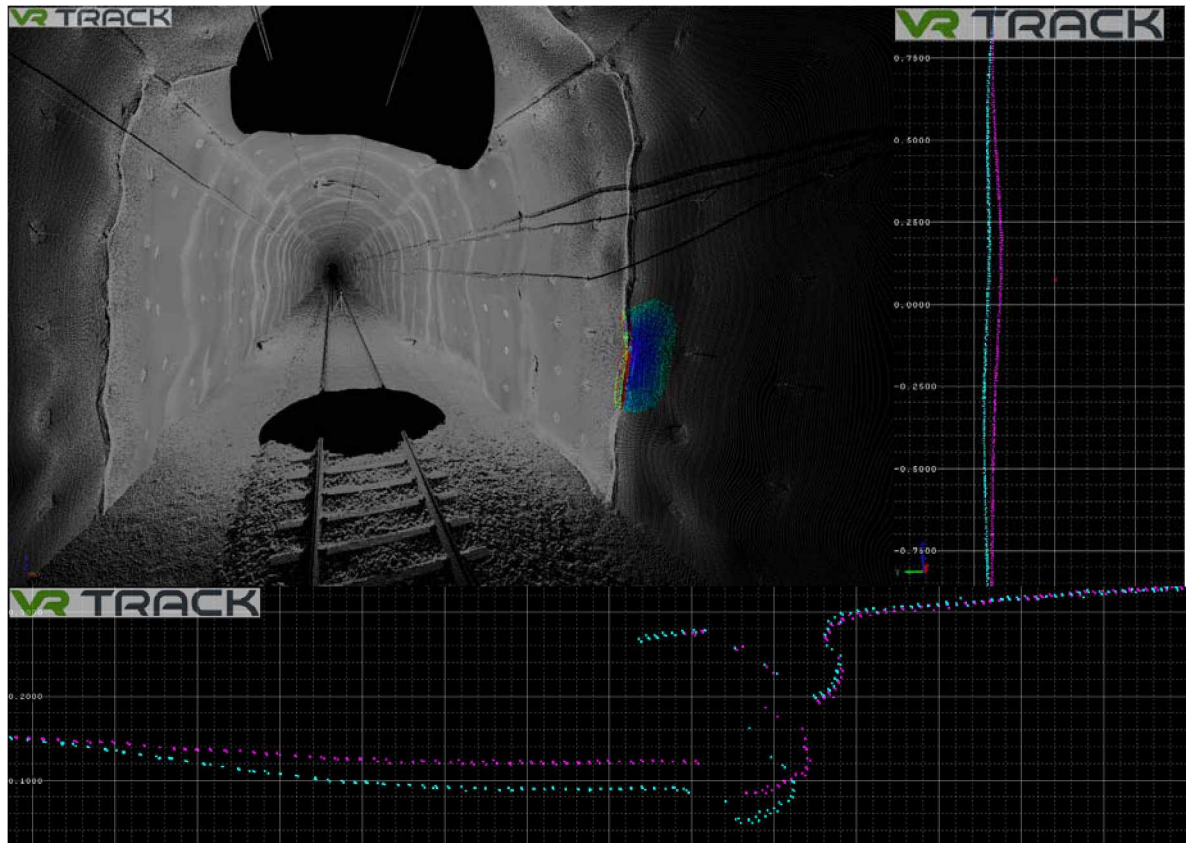
Tunnelissa havaitut pullistumat ovat niin suuria, että ne aiheuttavat ylimääräisiä kuormituksia verhousrakenteelle ja etenkin sen limi- ja puskusaumoille. Polyeteenilevy itsessään on sen verran joustavaa materiaalia, se ei rikkoudu tällaisilla siirtymillä. Saumat ovat epäjatkuvuuskohtia, joihin kohdistuu muutenkin ylimääräisiä kuormituksia junaliikenteen aiheuttamien paineiskujen kautta.

5.5.5 Pepallonmäki

Tunneli laserkeilattiin lämpimän aikaan 6.9.2011 sekä kylmän aikaan 3.3.2011. Tunnelin verhousrakenteessa havaittiin kahden ajankohdan mittausten välillä muutoksia neljässä kohdassa.

Ratakilometrillä 152 + 694.9 tunnelin oikean seinän havaittiin pullistuma. Kohde sijaitsee kiskon selästä mitatussa korkeudessa 2.3 metriä ja etäisyys keskilinjasta 3.5 metriä. Havainnossa maksimi muutos aineistojen välillä on ~ 35 millimetriä siten, että kylmällä verhousrakenteen pullistuu tunnelin puolelle. Havainnon ympärysmitta on 4.6 metriä ja pinta-ala on ~ 1.24 m².

Havaittu pullistuman on niin suuri, että se aiheuttaa ylimääräisiä kuormituksia verhouksrakenteelle ja etenkin sen limi- ja puskusaumoille. Polyeteenilevy itsessään on sen verran joustavaa materiaalia, se ei rikkoudu tällaisilla siirtymillä. Saumat ovat epäjatkuvuuskohtia, joihin kohdistuu muutenkin ylimääräisiä kuormituksia junaliikenteen aiheuttamien paineiskujen kautta.



Kuva 30. Havainnosta RKM 152 + 694.9. Kuvan oikeassa reunassa on poikkileikkaus kohteesta. Kuvan alareunassa on tasoleikkaus kohteesta. Leikkauksissa on turkoosilla esitetty kylmän aikaan mitattu ja punaisella lämpimän aikaan mitattu.

5.6 Yhteenvedo tunnelimittauksista

Tunneleissa havaittiin verhousrakenteen siirtymiä eri ajankohtien mittausten välillä. Suurimmat siirtymät olivat noin 140 mm suuruisia. Kaikkiaan siirtymiä havaittiin 17 eri kohdassa kuudessa eri tunnelissa (taulukko 3).

Taulukko 3. Laserkeilauksissa havaitut siirtymät verhousrakenteissa

Tunneli	Sijainti	Korkeus KV-tasosta [m]	Etäisyys keskilinjasta (- vas / + oik)	Siirtymä [mm]	Pintala [m ²]	HUOM
Bäljens	89 + 199.34	2.81	3.47	~45	3.86	
Bäljens	89 + 187.61	2.81	3.81	~85	2.01	
Köpskog	90 + 522.63	5.47	-2.82	~110		kiinnityslevy liikkunut
Aminne	92 + 453.20	4.33	3.26	~25		
Högbacka	94 + 436.53	1.05	-3.44	~40	0.73	
Högbacka	94 + 458.64	3.36	-4.22	~30	0.86	
Högbacka	94 + 513.75	2.35	-5.73	~140	6.04	
Högbacka	94 + 439.31	5.20	3.10	~30	0.99	Sauma auki? 0.5m syvyys.
Högbacka	94 + 458.80	6.61	-1.17	~70	4.65	
Högbacka	94 + 466.45	7.30	0.27	~90	1.64	
Tottola	139 + 134.25	6.10	-2.33	~25	0.74	
Tottola	139 + 314.21	4.19	-2.77	~50	0.81	Sauma rikkoutunut maaliskuu-syyskuu välillä
Tottola	139 + 321.00	4.10	-2.79	~30	1.09	
Tottola	139 + 188.15	0.31	3.54	~100	2.54	
Tottola	139 + 187.52	6.2	1.83	~40	2.33	
Tottola	139 + 312.01	0.53	2.77	~50	0.18	
Pepallonmäki	152 + 694.92	2.3	3.52	~35	1.24	Eloa sauman kohdalla

Suurimmillaan verhousrakenteen pullistuma tunnelin sisään oli noin 140 mm ja suurimman liikkuneen alueen pinta-ala oli noin 6 m².

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että verhousrakenteen takana tapahtuu jäänmuodostusta, joka kuormittaa verhousrakennetta. Kuormitus verhousrakenteelle syntyy siitä, että aluslevykiinnitykset rajoittavat rakenteen siirtymää ja siten sekä ankkureille, aluslevyille ja verhousrakenteen saumarakenteille aiheutuu ylimääräisiä kuormituksia.

6 Kallioleikkausten laserkeilaukset

Tunneleiden suuaukkojen kallioleikkausten laserkeilauksella oli tarkoitus tutkia leikkausten yläreunojen kuivatusratkaisujen parantamismahdollisuuksia, kallioleikkausten kuivatusratkaisujen toiminnallisuutta ja kallioleikkausten seinämien kuntoarvioinnin mahdollisuuksia.

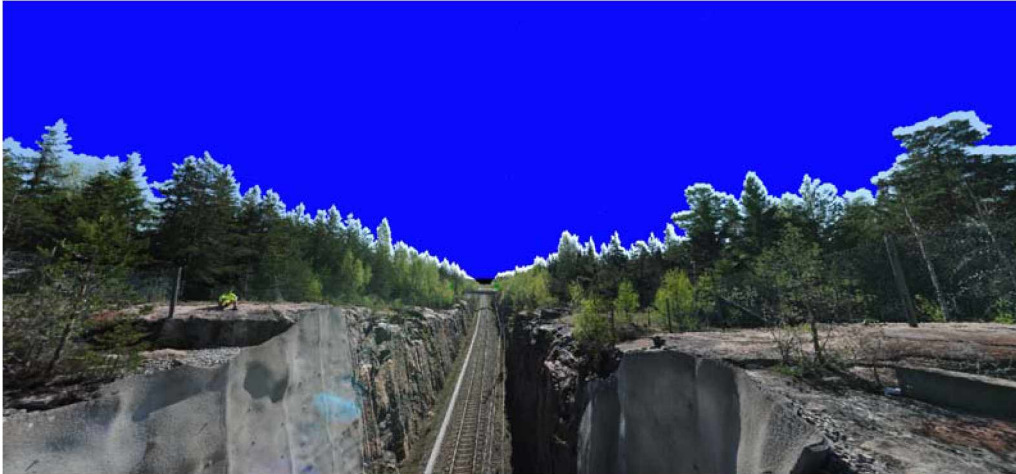
Laserkeilaukset tehtiin lähes kaikilla tunneleiden suuaukoilla. Aineiston laajuudesta ja tietojen käsittelyn hitaudesta johtuen tässä raportissa ei ole esitetty kaikkien leikkausten osalta tuloksia. Raportissa esitetään esimerkkinä kohteita joissa keilaus on onnistunut ja sitten niitä joissa keilaus ei ole onnistunut parhaalla mahdollisella tavalla.

6.1 Lillgårdin tunnelin 1. suuaukko

Maksimissaan 12 m korkea kallioleikkaus on noin 200 m pitkä. Leikkauksen otsapinnan kiertää matala betonimuuri. Leikkauksessa ei ole esiintynyt paanejääongelmia. Leikkauksen yläpinnalla on tiheää kasvillisuutta lähes koko leikkauksen matkalta.

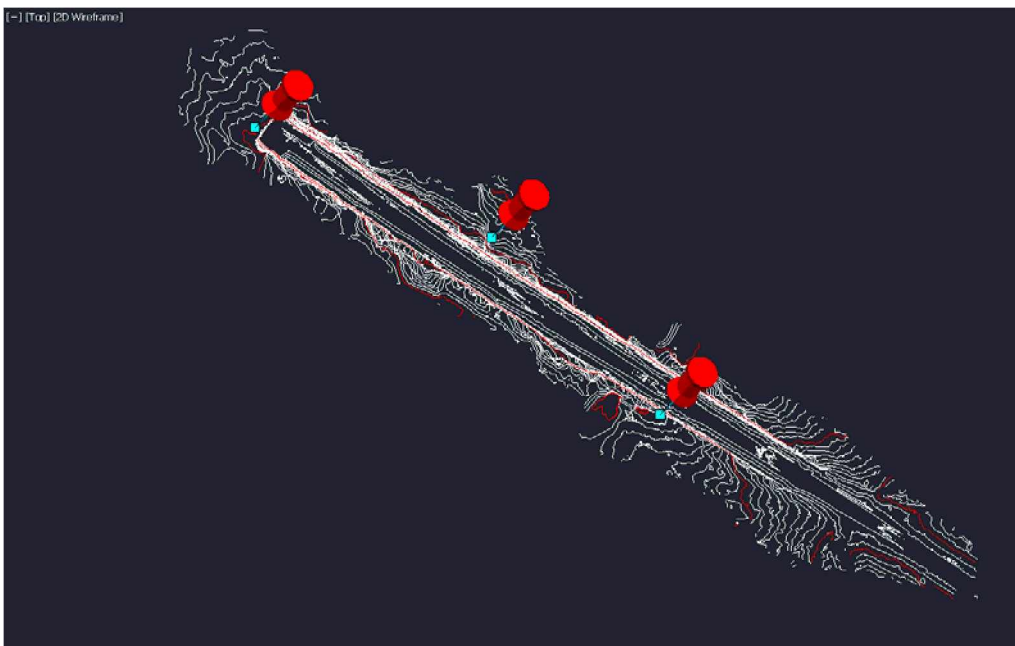


Kuva 31. Valokuva Lillgårdin tunnelin 1. suuaukon kallioleikkauksesta.



Kuva 32. Pistepilviaineistosta muodostettu kuva Lillgårdin tunnelin 1. suuaukon kallioleikkauksesta. Näkymä on tunnelin otsapinnan päältä Helsinkiin päin.

Leikkauksen yläpinnalta on mittaus suoritettu kolmelta eri asemapisteltä (kuva 33). Maanpintaa aineistoon on tallentunut hyvin kapealta alueelta leikkauksen ympäriltä. Syynä tähän on tiheä kasvillisuus sekä osittain jyrkkien maastomuotojen aiheuttamat katveet keilausaineistossa. Laajemman maanpintatiedon mittaaminen esimerkiksi maastomallia varten edellyttää takymetri- ja/tai GNSS-mittauksen käyttöä laserkeilauksen lisäksi.



Kuva 33. Lillgårdin tunnelin eteläisen suuaukon kallioleikkauksen korkeuskäyrät. Kuvaan on merkitty nuppineuloilla laserkeilauksessa käytetyt asemapistet.

Kun näihin leikkauksen päältä suoritettuihin keilauksiin yhdistetään tunnelin laserkeilauksen tulokset, pystytään keilausaineistosta määrittämään kallioleikkauksen mitat hyvin tarkasti ja laatimaan esimerkiksi poikkileikkaukset halutuilta kohdilta. Leikkauksen sivuajat olivat niin täynnä kasvillisuutta ja lisäksi ojissa oli myös vettä, joten leikkausojien pohjaa ei keilausaineistosta pystytty määrittämään.

Leikkauksen yläpinnan maastomuotojen aiheuttamat katveet pystytään välttämään huolellisemmalla keilausasemien sijainnin suunnittelulla sekä useamman keilaus-
aseman käytöllä. Tässä huomataan selkeästi miten asemapisteen lukumäärä ja sijainti vaikuttaa aineiston kattavuuteen.

6.2 Åminnen tunnelin 2. suuaukko

Maksimissaan 14 m korkea kallioleikkaus on lähes 300 metriä pitkä. Leikkauksessa ei ole esiintynyt paannejäaongelmia. Leikkauksen yläpinnalta on mittaus suoritettu kymmeneltä eri asemapistestä. Leikkauksen yläpinnalla kasvillisuus ei ole häiritsevän tiheää.

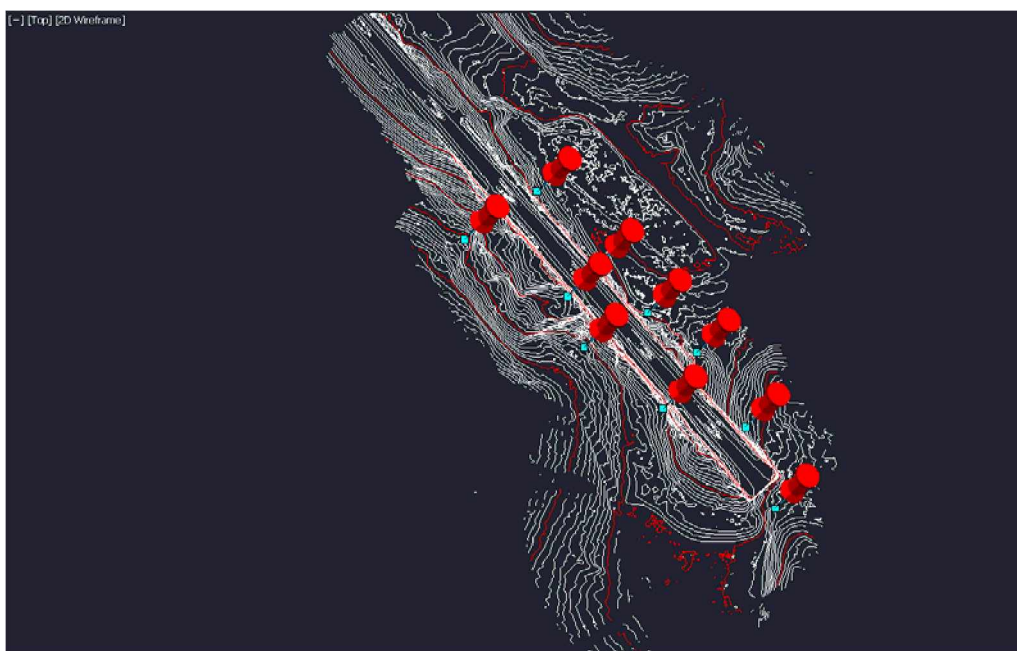


Kuva 34. Valokuva Åminnen tunnelin 2. suuaukon kallioleikkauksesta.



Kuva 35. Pistepilviaineistosta muodostettu kuva Åminnen tunnelin 2. suuaukon kallioleikkauksesta. Näkymä on tunnelin otsapinnan päältä Turkuun päin.

Leikkauksen yläpinnalta on mittaus suoritettu kymmenestä eri asemapistestä (kuva 36). Maanpintaa aineistoon on tallentunut hyvin ja korkeuskäyrämalli ulottuu parhaimmillaan noin 40 m etäisyydelle leikkauksen reunasta. Tätä laajemman maanpintatiedon mittaaminen esimerkiksi maastomallia varten edellyttää takymetri- ja/tai GNSS-mittauksen käyttöä laserkeilauksen lisäksi.



Kuva 36. Åminnen tunnelin 2. suuaukon kallioleikkauksen korkeuskäyrämalli. Kuvaan on merkitty nuppineuloilla laserkeilauksessa käytetyt asemapistet.

Maastomalliaineiston perusteella voidaan todeta, että kallioleikkauksen ympärillä ei ole mitään erityisiä valuma-alueita, mutta maasto leikkauksen kaikilla puolilla viettää tasaisesti leikkausta kohti. Mitattua aineisto voidaan tarvittaessa hyödyntää mahdollisten vettä ohjaavien rakenteiden (tukimuuri tai niskaoja) suunnittelussa.

Leikkauksen yläpinnan maastomuotojen aiheuttamat katveet on saatu hyvin huomioitua huolellisella keilausasemien sijainnin suunnittelulla sekä useamman keilausase-
man käytöllä. Leikkauksen sivuojat ovat niin täynnä kasvillisuutta ja lisäksi ojissa oli
myös vettä, joten leikkausojien pohjaa ei keilausaineistosta pystytty määrittämään.

6.3 Kaivosmäen tunnelin 1. suuaukko

Maksimissaan 14 m korkea kallioleikkaus on noin 50 metriä pitkä. Leikkauksessa ei
ole esiintynyt paannejääongelmia. Yläpinnalla leikkauksessa kasvillisuus on häiritse-
vää leikkauksen oikealla reunalla, kun taas vasemmalla reunalla kasvillisuus ei ole
häiritsevää. Leikkauksen yläpinnalta on mittaus suoritettu kahdelta eri asemapistees-
tä. Maanpinta saadaan tulkittua n. 40 metrin päähän leikkauksen vasemmalla reunas-
ta, kun taas oikealla reunalla maanpintaa ei saada pitkälle reunasta tulkittua. Tämä
johtuu kasvillisuudesta sekä valittujen asemien sijainnista ja lukumäärästä.



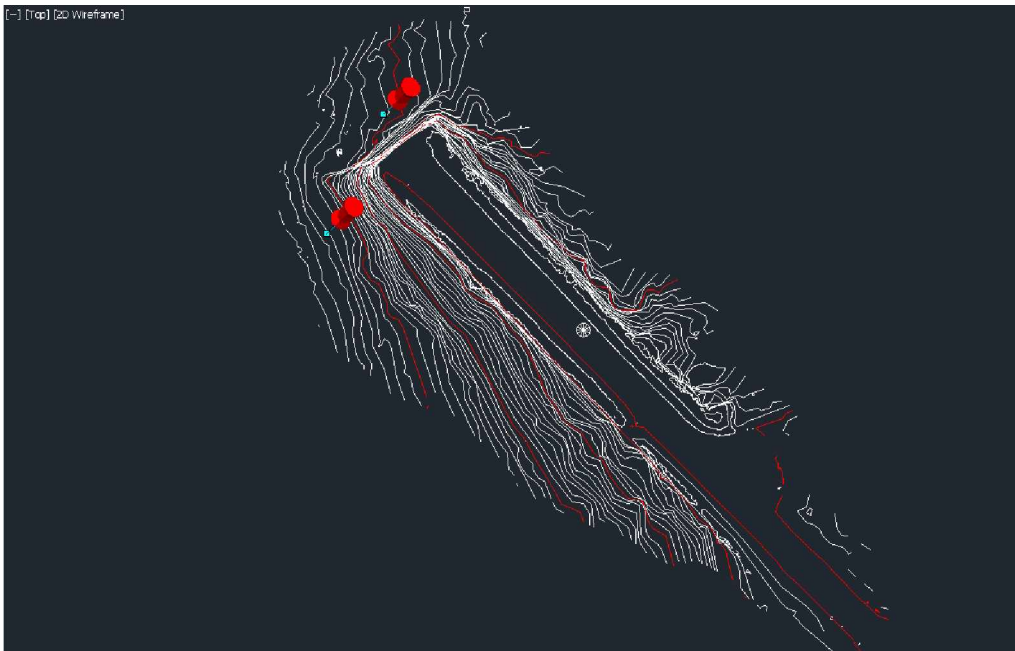
Kuva 37. Valokuva Kaivosmäen tunnelin 1. suuaukon kallioleikkauksesta.



Kuva 38. Pistepilviaineistosta muodostettu kuva Kaivosmäen tunnelin 1. suuaukon kallioleikkauksesta. Näkymä on tunnelin otsapinnan päältä Helsinkiin päin.

Leikkauksen yläpinnalta on mittaus suoritettu kolmelta eri asemapisteltä (kuva 39). Maanpintaa leikkauksen ympäriltä on tallentunut vasemmalla puolella noin 40 m päästä ja oikealla puolella hyvin kapealta alueelta. Syynä tähän on tiheä kasvillisuus oikealla puolella. Laajemman maanpintatiedon mittaaminen esimerkiksi maastomallia varten edellyttää takymetri- ja/tai GNSS-mittauksen käyttöä laserkeilauksen lisäksi.

Leikkauksen sivuojat ovat niin täynnä kasvillisuutta ja lisäksi ojissa oli myös vettä, joten leikkausojien pohjaa ei keilausaineistosta pystytty määrittämään.



Kuva 39. Kaivosmäen tunnelin eteläisen suuaukon kallioleikkauksen korkeuskäyrät. Kuvaan on merkitty nuppineuloilla laserkeilauksessa käytetyt asemapistet.

Maastomalliaineiston perusteella voidaan todeta, että kallioleikkauksen ympärillä ei ole mitään erityisiä valuma-alueita. Maasto leikkauksen vasemmalla puolella viettää tasaisesti leikkausta kohti ja oikealla puolella leikkauksesta poispäin. Mitattua aineisto voidaan tarvittaessa hyödyntää mahdollisten vettä ohjaavien rakenteiden (tukimuuri tai niskaoja) suunnittelussa leikkauksen vasemmalle puolelle.

Leikkauksen yläpinnankasvillisuuden aiheuttamat katveet pystytään välttämään huolellisemmalla keilausasemien sijainnin suunnittelulla sekä useamman keilausaseman käytöllä. Tässä huomataan selkeästi miten asemapisteen lukumäärä ja sijainti vaikuttaa aineiston kattavuuteen.

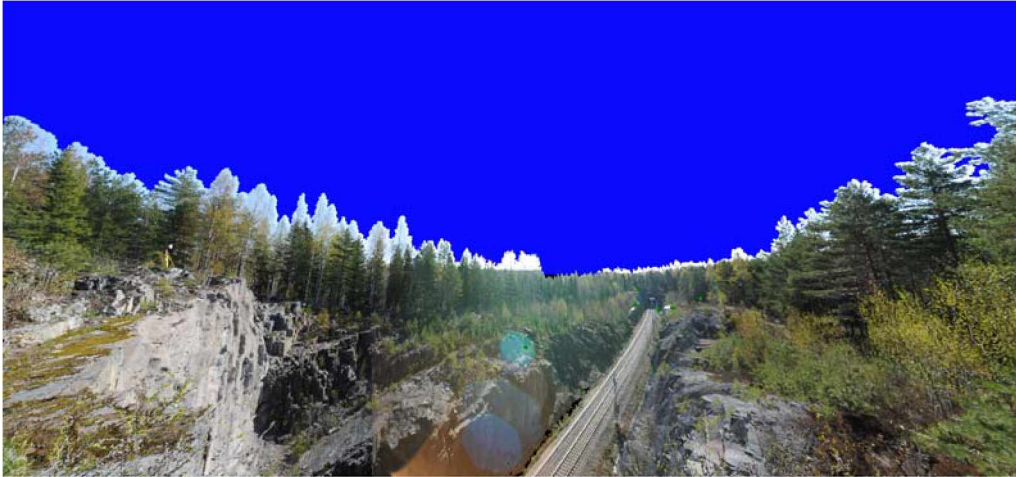
6.4 Kaivosmäen ja Haukkamäen välinen kallioleikkaus

Kaivosmäen tunnelin 2. kallioleikkaus ja Haukkamäen tunnelin 1. kallioleikkaus sijaitsevat yhtenäisessä noin 244 m pitkässä avoleikkauksessa, jonka seinien maksimikorkeus on 20 m. Leikkaus on mitattu 11 asemapisteeltä.

Pintavedet on pistemäisesti johdettu leikkauksen päällä olevan maapenkereen, läpi suoraan leikkaukseen. Otsapinnan päällä ei ole pintavesien hallintajärjestelmää, vaan pintavedet pääsevät valumaan suoraan otsapinnalle. Tästä aiheutuu paannejäön ongelmia talvisin.



Kuva 40. Valokuva Kaivosmäen tunnelin 2. suuaukon kallioleikkauksesta.



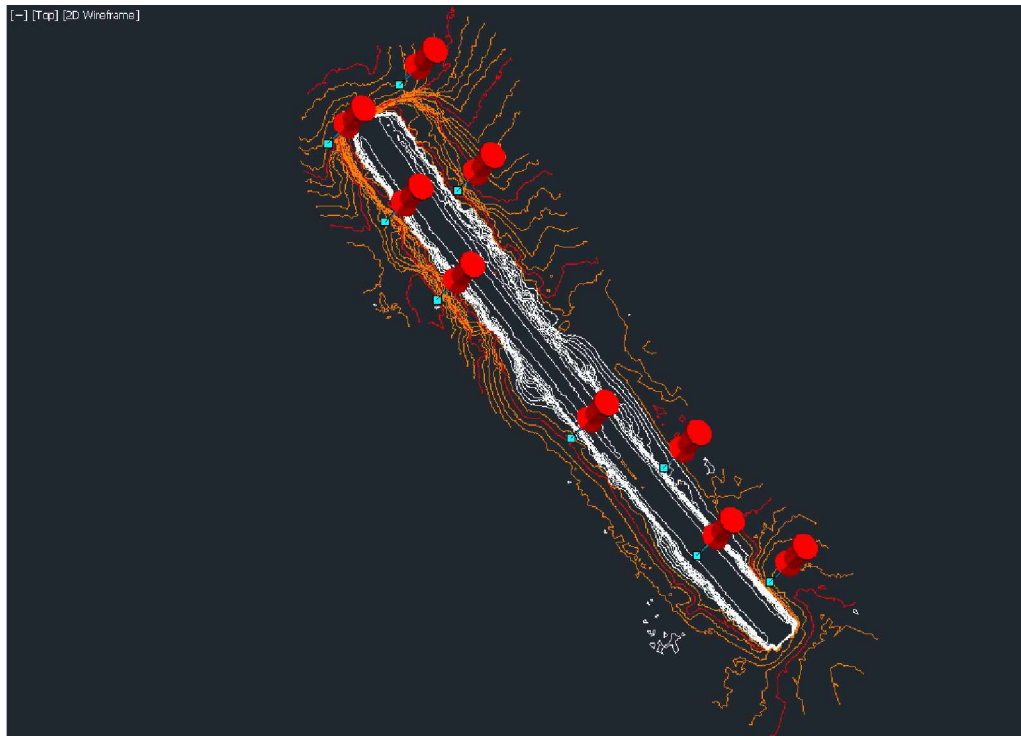
Kuva 41. Pistepilviaineistosta muodostettu kuva Kaivosmäen tunnelin 1. suuaukon kallioleikkauksesta. Näkymä on tunnelin otsapinnan päältä Turkuun ja Haukkamäen tunneliin päin.

Haukkamäen tunnelin suuaukko on erittäin rikkonaisessa kalliiossa ja leikkauksen vasen seinä on kokonaan verkotettu n. 50 m matkalla.



Kuva 42. Valokuva Haukkamäen tunnelin 1. suuaukon kallioleikkauksesta.

Leikkauksen sivuojat ovat niin täynnä kasvillisuutta ja lisäksi ojissa oli myös vettä, joten leikkausojien pohjaa ei keilausaineistosta pystytty määrittämään.



Kuva 43. Kaivosmäen ja Haukkamäen tunnelien välisen kallioleikkauksen korkeuskäyrät. Kuvaan on merkitty nuppineuloilla laserkeilauksessa käytetyt asemapistet.

Mitatun maastomalliaineiston perusteella voidaan todeta, että kasvillisuus muodostaa leikkauksen ympärille niin tiheän esteen että maanpintaa on saatu määritettyä vain kapealta alueelta leikkauksen reunan läheltä. Leikkaus on keilattu usealta asemapisteltä, mutta sillä ei ole ollut vaikutusta kasvillisuuden läpäisyn suhteen.

Maasto molempien tunneleiden suuaukoilla ja leikkauksen vasemmalla puolella viettää leikkausta kohti ja leikkauksen oikealla puolella maasto viettää molemmilta suunnilta leikkauksen keskiosaa kohti.

Mitattua aineisto voidaan tarvittaessa hyödyntää mahdollisten vettä ohjaavien tukimuurien suunnittelussa, mutta niskaojien ja muun maaston muotoilun suunnitteluun aineisto ei ole riittävää ja sitä pitäisi täydentää takymetri- ja/tai GNSS-mittauksilla.

6.5 Harmaamäen tunnelin 2. suuaukko

Harmaamäen tunnelin 2. kallioleikkauksessa tunnelin otsapinta on noin 20 m korkea luonnonkalliopinta. Leikkaus on hyvin lyhyt ja seinien maksimikorkeus on noin 14 m. Leikkauksen päällä ei esiinny häiritsevää kasvillisuutta.



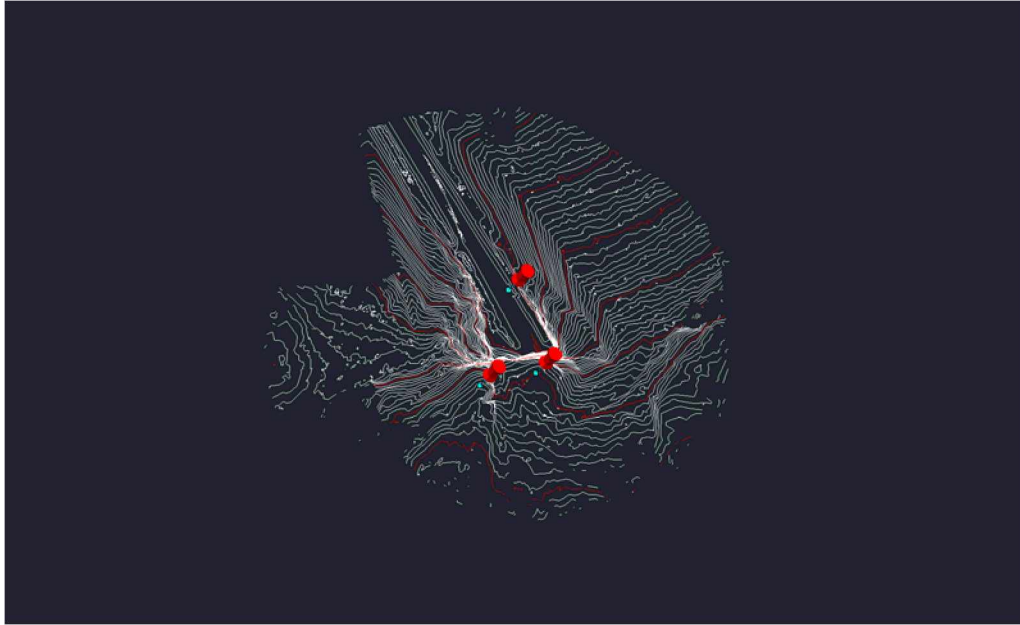
Kuva 44. Valokuva Harmaamäen tunnelin 2. suuaukon kallioleikkauksesta



Kuva 45. Pistepilviaineistosta muodostettu kuva Harmaamäen tunnelin 2. suuaukon kallioleikkauksesta. Näkymä on tunnelin otsapinnan päältä Turkuun päin.

Leikkauksen yläpinnalta on mittaus suoritettu kolmelta eri asemapisteestä (kuva 46). Maanpintaa leikkauksen ympäriltä on tallentunut vasemmalla puolella noin 40 m päästä ja vasemmalla puolella osittain melko kapealta alueelta.

Leikkauksen sivuojat ovat niin täynnä kasvillisuutta ja lisäksi ojissa oli myös vettä, joten leikkauksien pohjaa ei keilausaineistosta pystytty määrittämään.



Kuva 46. Harmaamäen tunnelin pohjoisen suuaukon kallioleikkauksen korkeuskäyrät. Kuvaan on merkitty nuppineuloilla laserkeilauksessa käytetyt asemapistet.

Maasto suuaukolla viettää oikealla puolella radan suuntaisesti ja sekä tunnelin päällä että leikkauksen vasemmalla puolella leikkausta kohti.

Maastomalliaineiston perusteella voidaan todeta, että kallioleikkauksen ympärillä maasto leikkauksen kaikilla puolilla viettää tasaisesti leikkausta kohti. Mitattua aineisto voidaan tarvittaessa hyödyntää mahdollisten vettä ohjaavien rakenteiden (tukimuuri tai niskaoja) suunnittelussa.

Leikkauksen yläpinnan maastomuotojen aiheuttamat katveet on onnistuttu hyvin huomioimaan huolimatta vain kolmen keilausasemien käytöstä.

6.6 Pepallonmäen tunnelin 1. suuaukko

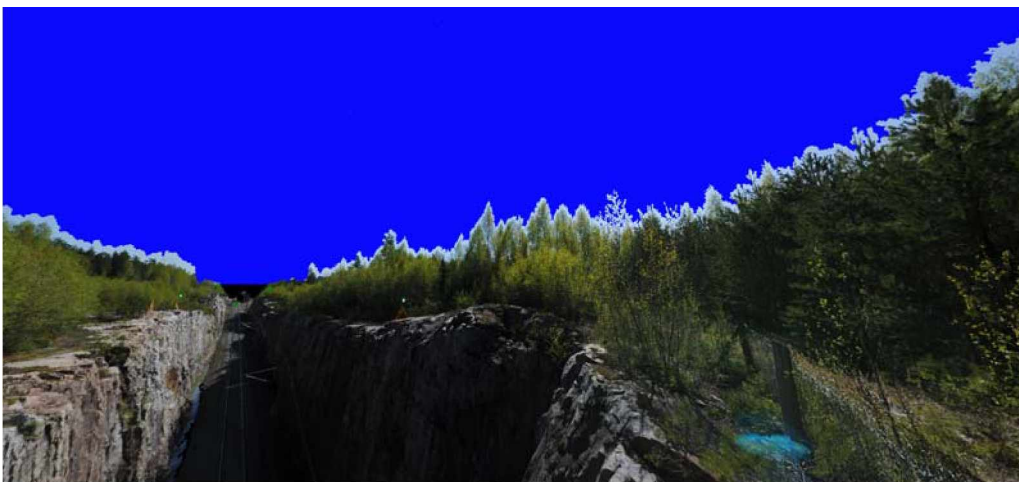
Maksimissaan noin 15 m korkean Pepallonmäen tunnelin 1. kallioleikkauksen pituus on noin 280 m. Leikkauksen yläpinta mitattiin seitsemältä asemapisteeltä.



Kuva 47. Valokuva Pepallonmäen tunnelin 1. suuaukon kallioleikkauksesta

Leikkauksen reunoilla alkoi tiheä häiritsevä kasvillisuus noin 5 metrin päässä leikkauksen reunasta, minkä vuoksi maanpinta saatiin luotettavasti tulkittua vain aivan leikkauksen lähialueelta.

Leikkauksen sivuojat ovat niin täynnä kasvillisuutta ja lisäksi ojissa oli myös vettä, joten leikkausojien pohjaa ei keilausaineistosta pystytty määrittämään.



Kuva 48. Pistepilviaineistosta muodostettu kuva Pepallonmäen tunnelin 1. suuaukon kallioleikkauksesta. Näkymä on tunnelin otsapinnan päältä Helsinkiin päin.

Korkea ja kapea leikkaus muodosti haasteen etenkin keilauksen yhteydessä otettujen valokuvien laadulle. Kuvasta 48 havaitaan myös, että luonnonvalon olosuhteet olivat hankalat ja leikkauksen vasen reuna sekä radan taso on jäänyt lähes täysin varjoon.

Varjossa olevalta alueelta pystytään määrittämään kallioleikkauksen mittatiedot, mutta väritieto jää pistepilviaineistosta puuttumaan. Vertailun vuoksi kuvassa 49 on esitetty samasta kuvakulmasta otettu valokuva.



Kuva 49. Valokuva Pepallonmäen tunnelin 1. suuaukon kallioleikkauksesta. Näkymä on tunnelin otsapinnan päältä Helsinkiin päin.



Kuva 50. Pepallonmäen tunnelin eteläisen pohjoisen suuaukon kallioleikkauksen korkeuskäyrät. Kuvaan on merkitty nuppineuloilla laserkeilauksessa käytetyt asemapisteet.

Mitatun maastomalliaineiston perusteella voidaan todeta, että kasvillisuus muodostaa leikkauksen ympärille niin tiheän esteen että maanpintaa on saatu määritettyä vain kapealta alueelta leikkauksen reunan läheltä. Leikkaus on keilattu usealta asemapisteeltä, mutta sillä ei ole ollut vaikutusta kasvillisuuden läpäisyn suhteen.

Maastonmuodoista ei keilausaineiston perusteella voi ottaa kantaa kovin laajalta alueelta ja siten valuma-alueiden määrittelyä ei keilaustiedon perusteella pystytä tekemään. Mitattua aineistoa pitäisi täydentää takymetri- ja/tai GNSS-mittauksilla.

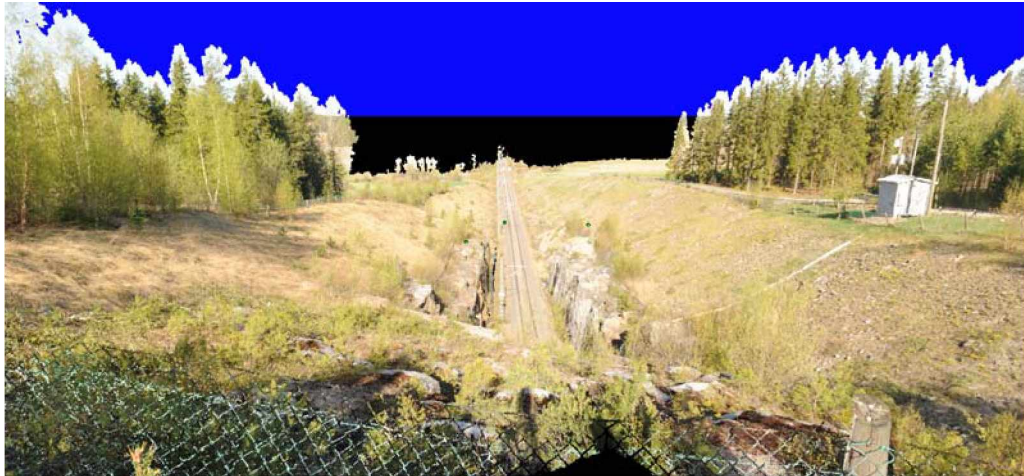
6.7 Pepallonmäen tunnelin pohjoinen suuaukko

Pepallonmäen tunnelin 2. kallioleikkaus on noin 80 m pitkä ja sen korkeus on enimmillään noin 80m. Leikkauksen ympärillä kulkee n. 50 cm korkea betonitukimuri, jonka takana on enimmillään n. 10 m korkea maaluiska (~1:1). Tukimuurin juurelle kerääntyvät pintavedet on johdettu leikkaukseen molemmilla puotilla tukimuurin läpi kulkevista viemäriputkesta.



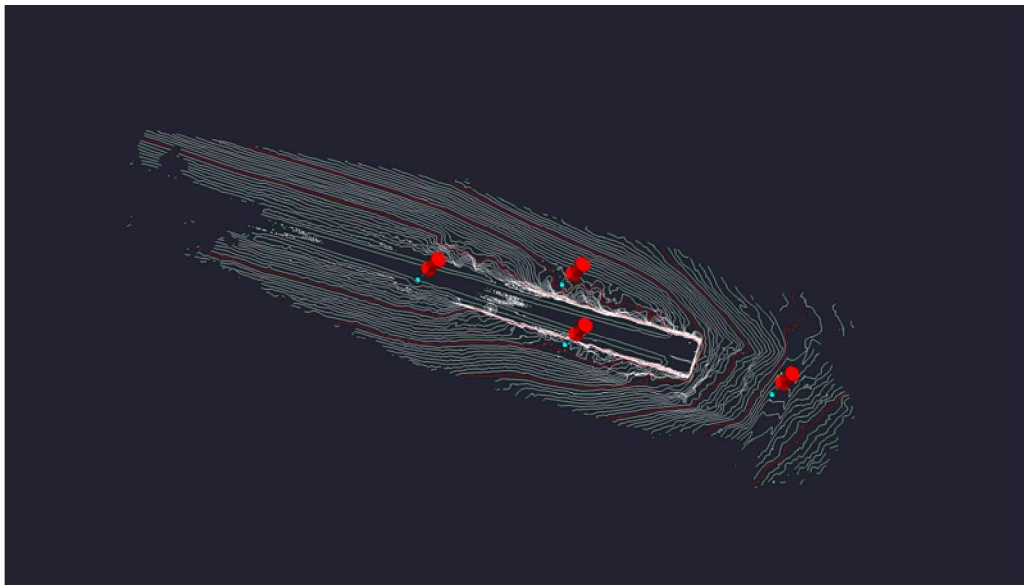
Kuva 51. Valokuva Pepallonmäen tunnelin 2. suuaukon kallioleikkauksesta.

Leikkauksen sivuojat ovat niin täynnä kasvillisuutta ja lisäksi ojissa oli myös vettä, joten leikkauksien pohjaa ei keilausaineistosta pystytty määrittämään.



Kuva 52. Pistepilviaineistosta muodostettu kuva Pepallonmäen tunnelin 2. suuaukon kalliroleikkauksesta. Näkymä on tunnelin otsapinnan päältä Turkuun päin.

Kalliroleikkaus mitattiin neljältä asemapisteltä. Kasvillisuus ei ollut leikkauksen yläpinnalla häiritsevän tiheää. Maanpinta saatiin tulkittua noin 20 päähän leikkauksen reunoista.



Kuva 53. Pepallonmäen tunnelin pohjoisen suuaukon kalliroleikkauksen korkeuskäyrät. Kuvaan on merkitty nuppineuloilla laserkeilauksessa käytetyt asemapistet.

Kalliroleikkauksen molemmilla puolilla on korkea maaluiska joka viettää kalliroleikkauksen päin. Se on saatu maaston avonaisuuden ansiosta hyvin keilattua.

6.8 Maanpinnan täydentäminen Maanmittauslaitoksen pistepilviaineistolla

Maalaserkeilaimella mitatun pistepilviaineiston täydentämistä Maanmittauslaitoksen (jatkossa MML) ilmalaserkeilausaineistolla tehtiin testimuotoisesti yhden tunnelin suuaukoilta. Tässä yhteydessä suoritettiin maastokeilaimella mitatun ja luokitellun maanpinnan täydentäminen ja laajentaminen MML:n tuottamalla pistepilviaineistolla siten, että pystytään vertaamaan aineistojen yhteensopivuutta sekä aineistojen tarkkuuseroista aiheutuvia virhemahdollisuuksia aineistojen yhdistämisessä.

6.8.1 Ilma- ja maastolaserkeilauksella tuotettujen aineistojen väliset eroavaisuudet

Suurimmat erot pistepilviaineistoissa tehtävään liittyviä mittausalustoja käyttäen ovat:

- Mittausmatka
- Pistetiheys
- pulssin osumiskulma

Mittausmatka määritellään etäisyytenä laserkeilaimesta kohteeseen josta pulssi palautuu. Ilmasta mitatussa aineistossa mittausmatka ei tässä tapauksessa vaihtelee suhteessa merkittävästi. Maastossa mitatussa aineistossa mittausmatkan vaihtelu on suhteellisesti suurempaa. Mittausmatkan kasvaessa mittaustuloksen tarkkuus pienee.

Pistetiheys määritellään yleisesti neliömetrin alueelle osuvien pisteiden lukumääränä. Pistetiheys on ilmasta mitatussa aineistossa tasainen kohde-alueella. Maastossa mitatussa aineistossa pistetiheys vaihtelee huomattavasti riippuen mittausmatkasta. Pistetiheys määrää kuinka pieniä yksityiskohtia voidaan luotettavasti kuvata.

Osumiskulma on pulssin suunnan ja kohteen tangentti tason välinen kulma. Osumiskulman arvo vaihtelee 0 - 90 asteen välillä. Kun ollaan kiinnostuneita maanpinnasta, ilmasta mitatulla aineistolla pulssin osumiskulma on verrattain suuri. Vastaavasti maastossa mitatussa aineistossa osumiskulmat ovat pieniä. Osumiskulma vaikuttaa takaisin siroutuvan pulssin voimakkuuteen.

Maastossa mitattuun aineistoon muodostuu maaston muodoista sekä puustosta johtuen katvealueita. Monimuotoisessa maastossa näitä muodostuvia katvealueita on hyvin työlästä paikata täydellisesti, vaikka käytettäisiin lukuisaa joukkoa täydentäviä mittausasemia. Ilmasta suoritettussa mittauksessa mitataan lähes kohtisuoraan maanpintaa kohti, jolloin vastaavia katvealueita ei aineistossa esiinny.

6.8.2 Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineisto

MML:n laserkeilausaineisto on mitattu noin 2000 metrin korkeudelta lentokoneesta. Mittauksessa on käytetty avauskulmaa +/- 20 astetta. Laserpulssin jalanjälki on noin 50 senttimetriä maastossa ja aineiston pistetiheys on vähintään puoli pistettä neliömetrillä. Pisteiden keskivirhe korkeussuunnassa on noin 15 senttimetriä ja tasotarkkuuden keskivirhe on enintään 60 senttimetriä yksittäiselle kohteelle.

Jokaisesta pisteestä on tallennettu seuraavat tiedot:

- pisteen luokka
- lentojonon numero
- lähtöpulssin aikaleima
- X-, Y-, Z-koordinaatit
- intensiteetti-arvo
- pulssin numero

Aineisto on automaattisesti luokiteltu sekä tarkastettu stereomallivusteisesti. Stereomallivusteisessa tarkistuksessa automaattisesti luokittelua tarkennetaan interaktiivisesti ilmakuvastereomallien avulla. Aineiston on TM35/ETRS89 tasokoordinaattijärjestelmässä ja N2000 korkeusjärjestelmässä. Aineistoa tilataan ja luovutetaan UTM lehtijaon 3x3 km mukaisina karttalehtinä. Aineiston jakelumuoto on LAS.

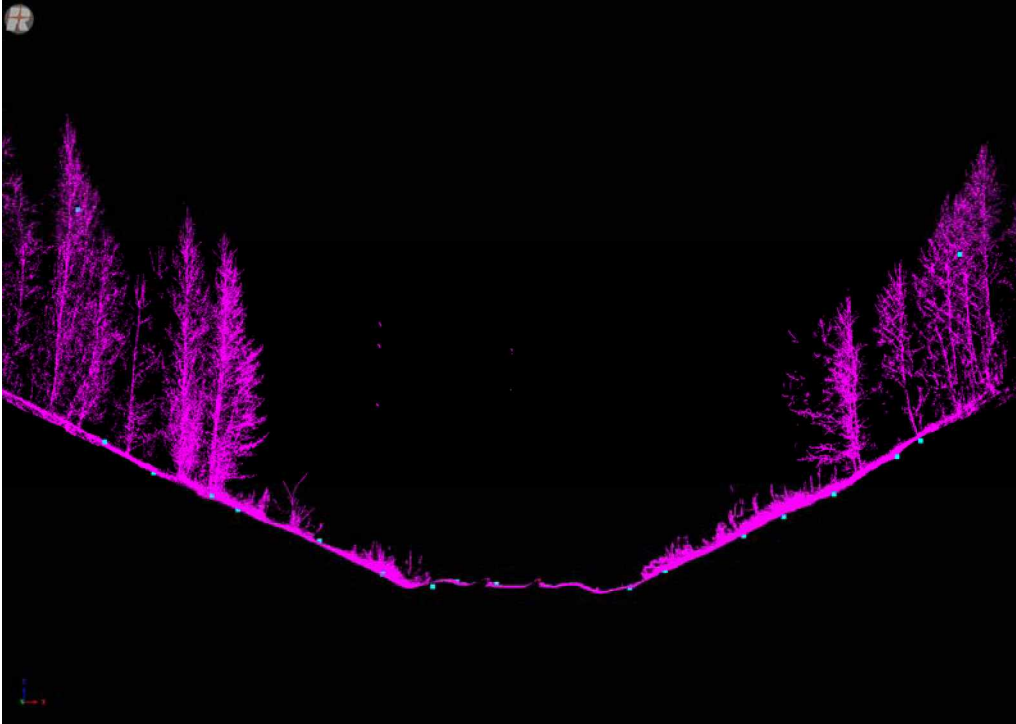
Testauksen kohteeksi valittiin Tottolan tunnelin suuaukot. Kohdealue sijaitsee UTM lehtijaon mukaisella lehdellä L3343B1. Kohdealue on laserkeilattu maalaserkeilaimella vuonna 2011. Analyysin kohteena olevat pistepilviaineistot ovat eri koordinaattijärjestelmissä. Muunnetaan MML:n aineisto KKJ2 / N60 järjestelmään. Muunnokseen ei ollut käytettävissä paikallisia muunnosparametreja. Muunnos suoritettiin tasokoordinaatiston osalta JHS 154:ssä määritellyllä affiinisella muunnoksella. Menetelmällä päästään keskimäärin parempaan kuin 10 senttimetrin neliökeskivirheen tarkkuuteen. Korkeusjärjestelmä muunnettiin käyttäen Geodeettisen laitoksen suorittaman kolmannen tarkkavaaituksen korkeuskiintopisteitä. Korjaus testialueelle oli näiden mukaisesti laskettuna -28 senttimetriä.

6.8.3 Aineistojen vertailu

Aluksi suoritettiin aineistojen välillä visuaalista tarkastelua RiScan Pro ohjelmistolla. Molemmat aineistot luettiin kuvaruudulle, ne värjättiin toisistaan selkeästi poikkeavilla väreillä ja kasvatettiin MML:n aineiston pistekokoa. Tarkastelu suoritettiin poikkeileikkausten kautta. Tarkastelussa todentui jo aineistojen määritysten kautta esiin nousseet seikat:

- MML:n aineisto on liian harvaa yksityiskohtaiseen maaston kuvaamiseen
- Ilmasta käsin suoritettulla mittauksella päästään luotettavammin käsiksi maanpintaan.

Kasvillisuuden vaikutus tulkittuun maanpintaan tulee selkeimmin näkyville maastossa mitatussa aineistossa kun mittausmatka kasvaa. Mittausmatkan kasvaessa entistä harvempi pulssi palautuu maanpinnasta sekä maanpinnan muotojen vaihtelun seurauksena alimmat mitatut pisteet eivät kuvaa maanpintaa vaan kasvillisuutta. Kuvassa 49. on esitetty näkymä aineistojen visuaalisesta tarkastelusta.



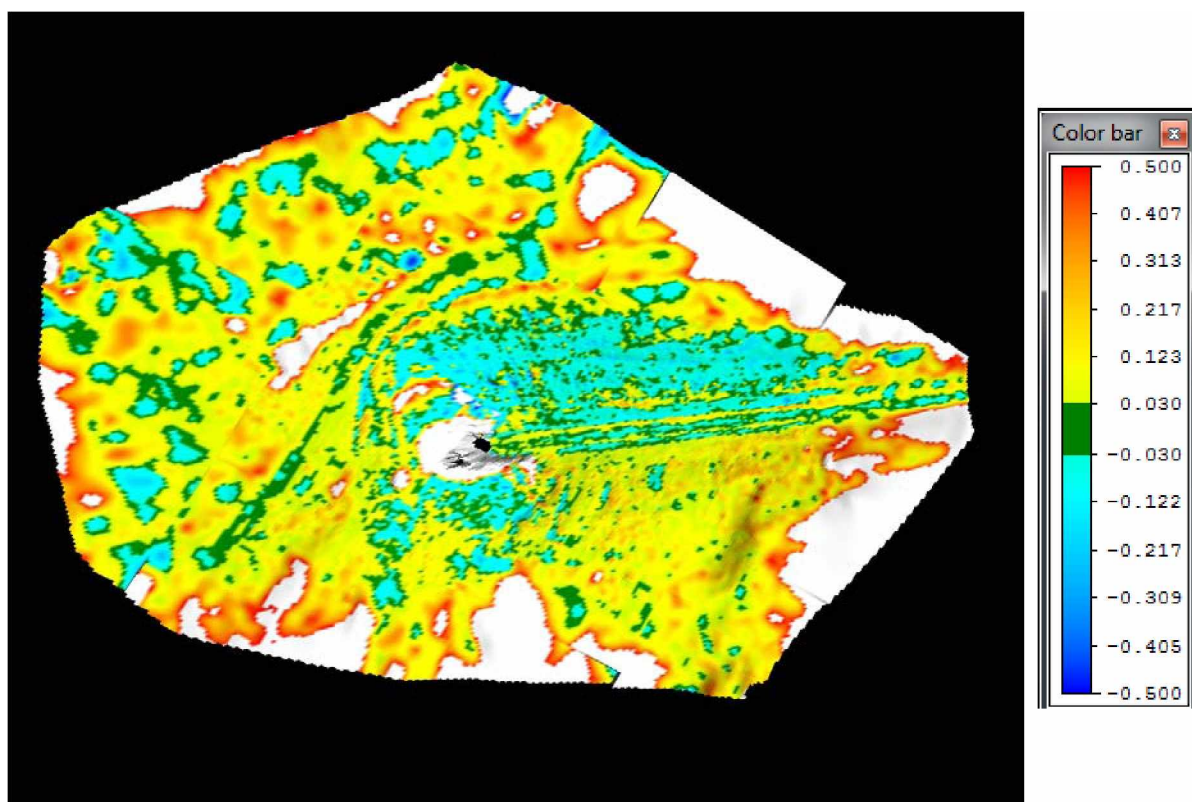
Kuva 54. Maanmittauslaitokset pistepilvi-aineistoa (turkoosi) ja maakeilain aineistoa (punainen) samassa poikkileikkauksessa.

Vertailusta (kuva 54) nähdään, että MML:n aineistossa pisteet osuvat melko hyvin maanpintaan kun taas maalaserkeilaimella mitatussa aineistossa on runsaasti kasvillisuutta, joka pitää erikseen siivota pois jotta maanpintaan päästään tarkasti käsiksi. Samalla voidaan todeta, että maalaserkeilaimella päästään paremmin kiinni maaston yksityiskohtaisiin muotoihin (taitekohdat, ojat, painanteet, yms.).

Seuraavassa vaiheessa vertailua suoritettiin laskennallisesti. Tässä pistepilvien välinen vertailu ei tuota kovin hyvää tulosta koska MML:n aineisto on harvaa verrattuna maastossa mitattuun aineistoon. Helpommin esitettävään tulokseen päästään muodostamalla luokitelluista maanpinnan pisteistä pintamallit ja lasketaan näiden välisiä eroja. Tarkastelu suoritettiin RiScan Pro ohjelmistolla. Laskennassa määritettiin MML:n aineisto referenssiksi johon maastossa mitattua aineistoa verrattiin. Lopputuloksena laskennasta saadaan värikoodattu pintamalli. Värikoodaukseen määriteltiin neutraali alue ± 3 senttimetriä, eli mallien välisten erojen osuessa tähän haarukkaan väri on muuttumaton. Värikoodaus määriteltiin välille ± 50 senttimetriä, tämän välin ulkopuolelle osuvat erot esitetään lopputuloksessa valkoisella värillä.

Eromittamalla tarkastellessa ensimmäisenä huomio kiinnittyi runsaaseen määrään yli puolen metrin eroja. Nämä kohteet sijaitsevat pääsääntöisesti kallioleikkausten terävien reunojen ympärillä sekä maastossa mitatun mallin ulkoreunoilla. Kallioleikkausten terävillä reunoilla suuret erot selittyvät sillä että MML aineiston maanpinnan luokittelua ei parannettu visuaalisen tarkastelun kautta. Tämän seurauksena kallioleikkausten reunoilla maanpinta luokituu virheellisesti. Toisaalta MML:n aineisto on niin harvaa että kallioleikkausten todellista reunaa ei pystytä tältä aineistolta tarkasti määrittämään, joten jo sitä kautta reunoilla esiintyisi suuria eroja uudelleen luokittelusta huolimatta. Maastossa mitatun mallin reunoilla esiintyvät suuret erot selittyvät edellä käsitellyn mittausetäisyyden kasvun ja maanpinnan muotojen vaihtelun muka-

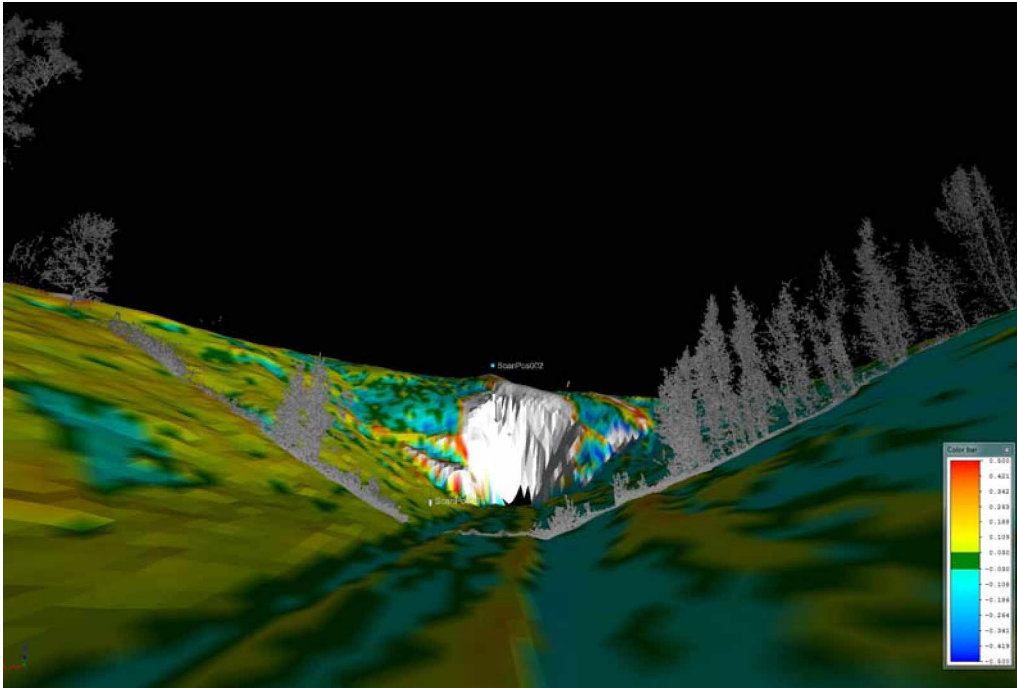
naan tuomista virheellisestä luokittelusta. Lisäksi suuria eroja esiintyy maastossa mitatun aineiston katvealueilla.



Kuva 55. Tottolan tunnelin pohjoiselta suuaukolta lasketut eromitat. Valkoisilla alueilla erot suurempia kuin 0.5 metriä. Asteikko kuvaa miten maastossa mitattu aineisto sijoittumista ilmasta mitatun aineiston suhteen korkeussuunnassa.

Tarkastelussa huomio kiinnittyi myös runsaaseen suurten positiivisten arvojen esiintymiseen. Näillä alueilla maastossa mitattu aineisto siis on MML:n aineistoa korkeammalla. Tähän lähdettiin etsimään selitystä kasvillisuudesta. Luettiin eromittamallin päälle maastossa mitattua pistepilviaineistoa ja verrattiin pistepilviaineistoa poikki-leikkauksin eromittamalliin.

Tarkastelussa huomattiin että alueet, joilla esiintyy tiheää aluskasvillisuutta, saivat eromittamallissa positiiviset arvot. Vastaavasti kun tiheää aluskasvillisuutta ei esiinny niin eromittamallilla arvot olivat negatiivisia. Tästä tarkastelusta on esitetty esimerkki kuvassa 56. Tarkastelu tukee käsitystä siitä, että maakeilaimien suorituskyvystä maanpinnan mittaamisen suhteen tiheään aluskasvillisuuden alueilla.



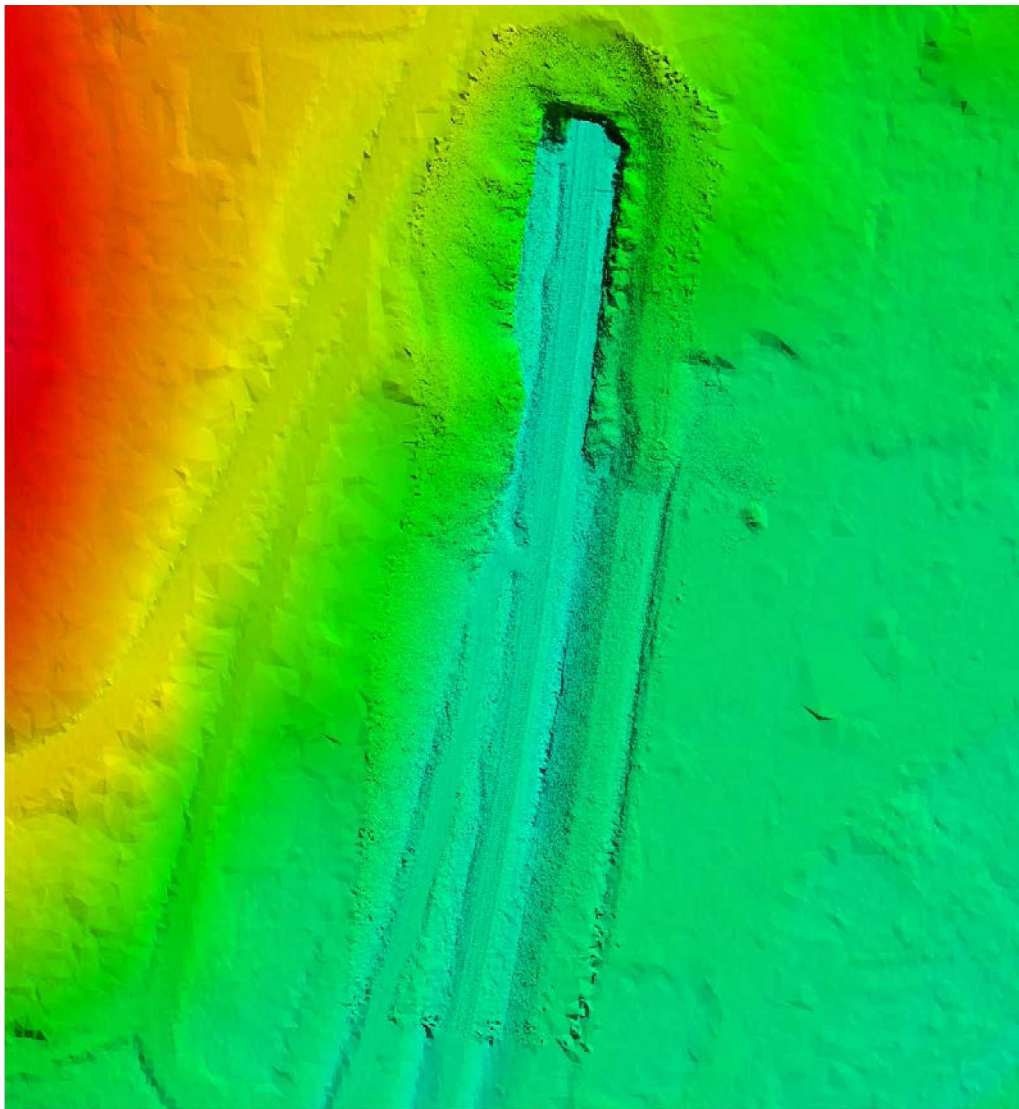
Kuva 56. Eromittamalli ja pistepilvi samassa näkymässä. Tiheän aluskasvillisuuden alueilla maastossa mitattu aineisto on ilmasta mitatun aineiston yläpuolella

6.8.4 Maastossa mitatun aineiston täydentäminen ja laajentaminen

Testin perusteella maastossa mitatun aineiston täydentäminen ja laajentaminen ilmalaserkeilauksesta saaduilla aineistoilla on teknisesti mahdollista. Tämän yhteydessä on suositeltavaa tehdä aineistojen yhteensovittaminen. Tässä tapauksessa sovittamisen yhteydessä pyritään parantamaan sijainniltaan epätarkemman aineiston tarkkuutta tarkempaa aineistoa hyväksi käyttäen

Maastossa mitatun aineiston katvealueiden täydentämistä MML:n aineistolta ei katsottu järkeväksi. Katvealueet ovat sen verran pieniä että harvalta MML:n aineistolta ei saada järkevästi täydentäviä pisteitä. MML:n aineistolta rajattiin pisteet pois tarkemman aineiston kohdalta ja aineistot yhdistettiin. Esimerkki yhdistetystä aineistosta on esitetty kuvassa 57. Kuvasta huomataan selkeästi missä kohtaa tarkempi aineisto alkaa.

Eri mittakaavaisten aineistojen yhdistämisen yhteydessä tulisi erityistä huomiota kiinnittää aineistoihin liittyvien metatietojen tallentamiseen. Huolellisesti täydennettyjen ja ylläpidettyjen metatietojen kautta loppukäyttäjät saavat selkeän kuvan aineiston ominaisuuksista.



Kuva 57. Maastossa mitatun ja MML:n aineistojen yhdistämisen kautta muodostettu maanpinnan korkeusmalli.

Tämän yhden testin ja vertailun perusteella voidaan todeta, että molemmissa tutkituissa aineistoissa on omat hyvät ja huonot ominaisuutensa. Kumpikaan aineistoista ei ole optimaalinen maanpinnan esittämiseen tällaisessa tapauksessa. Maanmittauslaitoksen aineisto on liian yleispiirteistä tarkempaa suunnittelua silmälläpitäen. Maanpinnan muotoja ajatellen sen mittaustapa soveltuu paremmin maanpinnan mitaamiseen. Maastossa mitattua aineistoa käyttäen päästään käsiksi hienojakoisempiin yksityiskohtiin, mutta mittaustavasta johtuen se on herkempi kasvillisuuden vaikutukselle. Maastossa mitattaessa tärkeän rooliin nousee myös mittauksen ajankohta sekä asemien sijainti ja lukumäärä.

6.9 Kallioleikkausten seinämien kuntoarvio

Rantaradalla on useita kallioleikkauksia, joiden yläosien tarkastaminen on erittäin hankalaa leikkausten korkeudesta johtuen. Tarkka kartoitus edellyttää pääsääntöisesti nostokorilla varustetun kaluston käyttöä ja usein senkään kanssa ei tavoiteta kaikkia leikkauksen yläreunoja, koska radan sähköistyksen johtimet rajoittavat nostoka-

luston käyttöä leikkauksissa. Toisena vaihtoehtona on silmämääräisten havaintojen tekeminen leikkauksen vastakkaiselta yläreunalta, mutta tässä tapauksessa tarkastelu-
lletäisyys (usein yli 10 m) aiheuttaa epätarkkuuksia havaintoihin. Laserkeilauksen ja
valokuvauksen yhdistämisellä, on mahdollista tehdä mittatarkkoja havaintoja myös
näiltä muuten hankalasti tarkastettavilta alueilta.

Laserkeilausaineiston perusteella tehtävän kuntoarvion yhteydessä oli tarkoitus tulki-
ta mahdollisia halkeamia leikkausten yläosissa. Halkeamat ovat usean niin ohuita,
että ne eivät selkeästi erotu pistepilviaineiston pohjalta tehtävässä tulkinnassa. Täl-
laisten kohteiden tulkitseminen puhtaasti pistepilviltä vaatisi todella tiheää piste-
aineistoa. Halkeamien tulkintaa silmälläpitäen tarpeeksi tiheän pistepilviaineiston
mittaaminen ei kuitenkaan ole tarkoituksenmukaista tämän tyyppisissä kohteissa.
Mittaukseen käytettävä aikaa kasvaa sekä pistepilvien koko tietojärjestelmissä muo-
dostuu kohtuuttoman suureksi.

Halkeamat pystytään tulkitsemaan kohteesta otetuilta tarkoilta valokuvilta. Nyky-
aikaiset ohjelmistoratkaisut tarjoavat mahdollisuuden tuottaa kolmiulotteista koor-
dinaatistoon sidottua tietoa valokuvilta tai vaihtoehtoisesti valokuvia ja pistepilveä
käyttäen. Menetelmät edellyttävät että tulkintaan käytettävien valokuvien sisäiset ja
ulkoiset orientoinnit tunnetaan. Tässä työssä valittiin käytettäväksi valokuvien ja pis-
tepilvien avulla tapahtuvaa tulkintaa, kappaleessa 4.3.7 esitetyllä menetelmällä.

Yksinkertaisin tapa orientoitujen valokuvien tuottamiseen on ottaa ne keilauksen yh-
teydessä keilaimen liitetyllä kalibroidulla kameralla. Keilauksen yhteydessä otettu-
jen kuvien oikean sijainnin määrittäminen pistepilveen nähden edellyttää erillistä ke-
vyttä kalibrointi prosessia, jossa haetaan vastinpisteitä pistepilveltä ja valokuvilta.
Kalibrointi prosessi suoritetaan aina kun kamera kiinnitetään keilaimen.

Käytetty ohjelmisto mahdollistaa myös erikseen otettujen kuvien orientoinnin tunnet-
tujen pisteiden avulla. Tällöin tukipisteitä tulee olla minimissään neljä kappaletta ku-
valla, jos tunnetaan kameraparametrit. Tällä tavalla sopivat valokuvat voidaan hank-
kia myös keilauksesta eroteltuna toimintona, jos esimerkiksi keilauspäivänä ei säästä
johtuen pystytä ottamaan riittävän laadukkaita valokuvia. Tällaisessa tapauksessa
tukipisteet tulisi käytännössä merkitä maastoon ja mitata niiden koordinaatit, jotta
päästäisiin tyydyttävään lopputulokseen.

Laserkeilauksen ja valokuvauksen yhdistelmällä on mahdollista tehdä havaintoja hal-
keamien näkyvistä osista kuten sijainnista, pituudesta sekä muodosta. Joissain tapa-
uksissa on mahdollista myös määrittää halkeaman suunta (kulku/kaade). Koska me-
netelmä perustuu valokuvien käyttöön, edellytyksenä on että kohteet ovat kokonai-
suudessaan näkyvissä, valaistusolosuhteet ovat mahdollisimman hyvät, kohde on ku-
vattu tarkoituksenmukaisesta kulmasta ja kuvien resoluutio on tarpeeksi korkea.

Kallioleikkauksissa esiintyy jonkin verran kasvillisuutta. Paikoitellen on mahdollista
että kasvillisuus peittää taakseen ainakin osan tulkittavasta kohteesta. Tämä on kui-
tenkin hyvin paikallinen ilmiö eikä tutkituissa kohteissa aiheuttanut suurempia ong-
elmia. Pistepilveltä nämä kasvillisuuskohteet tulisi kuitenkin pyrkiä poistamaan jot-
ta ne eivät aiheuta digitoidun aineiston sijaintiin virheitä. Kuvassa 58 on esitetty tyy-
pillinen tilanne kasvillisuuden aiheuttama tilanne.



Kuva 58. Kasvillisuudesta johtuvaa peitteisyyttä kallioleikkauksissa.

Kuvaamalla kohde eri vuorokauden aikaan saadaan kohteen valaistusolosuhteisiin suuria eroja. Kohteen kuvaus pitäisi suorittaa sellaiseen vuorokauden aikaan että valaistusolosuhteet ovat kuvauksen kannalta optimaaliset. Tämä tarkoittaa vähintään sitä että kohdetta ei kuvattaisi aurinkoa vastaan. Kuvassa 58 on esitetty kaksi erilaisissa olosuhteissa tallennettua kuvaa. Heikoissa olosuhteissa tallennettuja kuvia voidaan parantaa jälkikäteen ohjelmallisesti, mutta tulos ei vastaa optimaalisissa olosuhteissa tallennettuja valokuvia.



Kuva 59. Kaksi keilauksen yhteydessä otettua valokuvaa. Vasemmalla puolella on esimerkki oikeanlaisista valaistusolosuhteista ja oikealla puolella esimerkki tulkinnan kannalta erittäin huonosta kuvasta.

Kohteen kuvausta suoritettaessa tulisi pitää mielessä että mitä tietoa kuvilta on tarkoitus saada tulkittua. Optimaalinen tilanne halkeaminen tulkintaa silmälläpitäen on että kuvat on otettu kohtisuoraan kallioleikkauksen seinämää vasten. Kuvauskulman pienenentyessä halkeamien ja muiden kohteiden tulkittavuus kuvilta heikkenee. Kuvas-

sa 60 on esitetty tilanne jossa kuvauskulma on halkeamien tulkintaa silmälläpitäen epäedullinen. Lisäksi tässä etäisyys kohteeseen kasvaa niin suureksi että tulkinta hankaloituu, vaikka kuvaa suurennettaisiin.



Kuva 60. Halkeamien tulkintaa silmälläpitäen epäedullinen kuvakulma ja kuvaus-etäisyys.

Kuvausasemia pitäisi, tätä menetelmää käyttäen, tässä toiminta ympäristössä ja käytetyllä kalustolla, olla noin 20 - 30 metrin välein molemmin puolin leikkauksen reunoja. Keilauksen yhteydessä tehtävässä kuvauksessa tulisi huomioida myös etäisyys kohteeseen ja kamerassa käytetty objektiivi. Objektiivia vaihtamalla saadaan riittäviä kuvia kauempaa mutta kuva-ala pienenee.

Menetelmää testattiin kahdella eri kohdealueella: Pepallonmäen tunnelin ensimmäisen suuaukon kallioleikkauksessa sekä Åminnen tunnelin ensimmäisen suuaukon kallioleikkauksessa. Valokuvat otettiin kallioleikkausten yläreunojen keilauksen yhteydessä. Kun katsotaan esimerkiksi kuvaa 53, Pepallonmäen korkeuskäyristä sekä asemapisteistä voidaan olettaa, että asemapisteitä on liian vähän halkeamien digitointia silmälläpitäen.

Ensimmäisessä vaiheessa tehtiin halkeamien tulkinta Pepallonmäen tunnelin ensimmäisen suuaukon kallioleikkauksista. Asemapisteiltä tehtyjä kuvauksia tarkastellessa todettiin ensimmäisenä, että kallioleikkauksen vasen puoli oli mittauksen ja kuvauksen aikana varjon puolella ja oikealla puolella valaistusolosuhteet olivat hyvät. Tarkastelun yhteydessä todennettiin, että kuva-aineiston kattavuuden kannalta asemapisteitä oli liian harvassa. Yhdeltä asemapisteeltä voitiin digitoinnissa käyttää 1-2 valokuvaa. Yhden asemapisteen käyttökelpoiset kuvat kattoivat noin 30 metrin levyisen alueen kallioleikkauksesta. Edellisistä huomioista johtuen todettiin, että kuva-aineisto ei ollut riittävän laadukasta yläreunojen kattavan kuntoarvioinnin tekemiseen.

Käsiteltävästä aineistosta karsittiin pois valaistusolosuhteiltaan heikot asemat. Tulkintaa ja digitointia tehtiin jäljelle jääneiden asemien perusteella. Kuvilta tulkittiin ja

digitoitiin halkeamien lisäksi myös leikkauksen yläreuna. Digitoinnin jälkeen verrattiin tuotettua aineistoa intensiteetti arvolla värjättyyn pistepilveen. Tässä huomattiin että tässä kohteessa kameran kalibroinnissa pistepilven suhteen oli tapahtunut jokin virhe. Kuvien ja pistepilven välillä oli noin 20 cm siirtymä korkeussuunnassa ja noin kahden sentin siirtymä vaaka suunnassa. Näitä kuvien kalibrointiparametreja korjattiin jälkikäteen määrittämällä kuvilta ja pistepilveltä vastinpisteitä. Vastinpisteet ovat optimaalisessa tapauksessa molemmilta aineistoilta selkeästi erottuvia kohteita. Tässä toimintaympäristössä tarkkojen vastinpisteiden hakeminen oli haasteellista ja optimaaliseen tulokseen oli lähes mahdotonta päästä. Valokuvien sijaintia pistepilveen nähden saatiin parannettua alle viiteen senttimetriin korkeussuunnassa.

Tunnelin suuaukolta otetussa esimerkkivalokuvassa (kuva 61) näkyy, että halkeamat pystytään kartoittamaan hyvällä tarkkuudella. Useista halkeamista pystytään havaitsemaan myös halkeaman suunta sekä niiden muodostamat mahdolliset kalliolohkot.



Kuva 61. Pistepilviaineistosta muodostettu kuva Pepallonmäen tunnelin yläreunasta ja siitä digitoituja kallioleikkauksen rakenteita.

Kun laserkeilaamalla ja valokuvaamalla tuotettu aineisto on kalliorakennussuunnittelijan käytössä, pystytään toimisto-olosuhteissa laatimaan halkeamien ja niiden muodostamien kalliolohkojen kartoituksen. Mikäli keilausaineistoa ja valokuvia on riittävän tiheässä, pystytään aineistoa tarkastelemaan toimistolla myös kolmiulotteisesti, jolloin saadaan vielä lisää informaatiota ja pystytään vielä tarkemmin määrittämään riskikohteet.

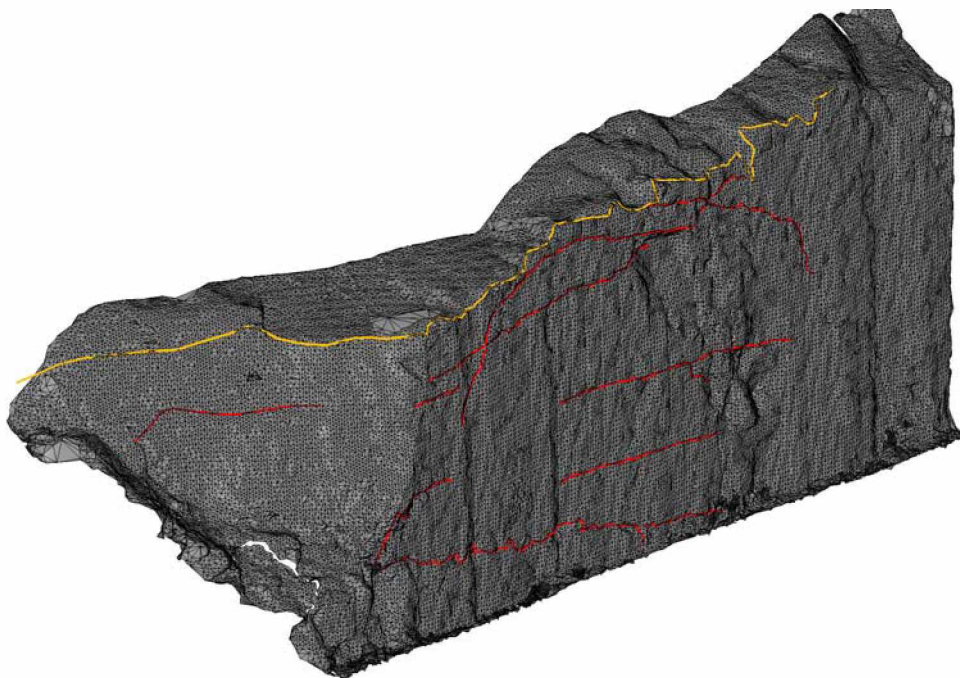
Havaintojen lopullinen riskien ja korjaustarpeen arviointi voidaan sitten tehdä maastokäynnillä, jossa toimistolla tehty tarkastusaineisto on maastossa mukana esim. kannettavalla tietokoneella tai tablettitietokoneella. Tällöin voidaan myös määrittää lopulliset korjattavat kohteet sekä myös tehdä jo alustavaa suunnittelua korjaustarpeista. Toisena kohteena käytettiin Äminen tunnelin ensimmäistä suuaukkoa. Tässä kohteessa tehtiin vastaavat huomiot aineiston käytettävyyden suhteen kuin Pepallonmäen aineistolla: asemapistettä on liian harvassa ja leikkauksen vasemmalla puolella kuvien valaistusolosuhteet ovat heikot. Kuvien kalibrointi pistepilven nähden oli kunnossa.

Kohteesta tulkittiin ja digitoitiin vastaavat kohteet kuin Pepallonmäen kohteessa. Kuvassa 62 on esitetty tulos kuvassa havaittujen halkeamien ja leikkauksen yläreunan digitoinnista.



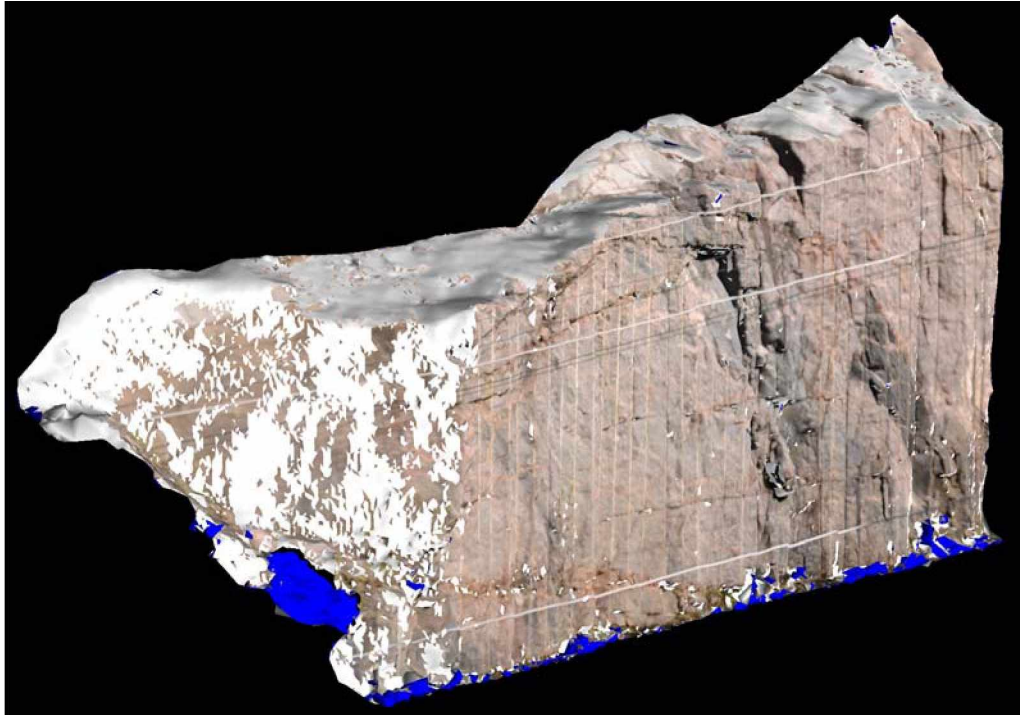
Kuva 62. Kuvassa kallioleikkauksen leikkauksen yläreuna vihreällä ja halkeamat punaisella.

Yhdeltä asemapisteeltä mitatusta pisteaineistosta muodostettiin kolmioverkkomuotoinen pintamalli (kuva 63), joka tuotiin AutoCAD ympäristöön ja lisättiin siihen sekä digitoituidut halkeamat että yläreunan tiedot.



Kuva 63. Åminnen tunnelin kallioleikkauksesta tuotettu pintamalli. Kuvassa keltaisella on esitetty kallioleikkauksen yläreuna ja punaisella tulkitut halkeamat.

Tämä mahdollistaa halkeamien havainnollistamisen ilman erityisiä pistepilvien käsittelyyn suunnattuja ohjelmistoja. Kohteiden havainnollistamisen kannalta mielenkiintoisen vaihtoehdon tarjoavat myös valokuvalla teksturoidut pintamallit. Kattavien teksturoitujen pintamallien tekeminen tämän työn yhteydessä ei onnistunut käytettävissä olevasta kuva-aineistosta johtuen. Teksturoidut pintamallit mahdollistaisivat myös kohteiden tulkinnan ja digitoinnin ilman pistepilvikäsittelyyn suunnattua ohjelmistoa. Kuvassa 64 on esitetty Åminnestä yhdeltä asemapisteeltä muodostettu teksturoitu pintamalli.



Kuva 64. Teksturoitu pintamalli Åminnen ensimmäiseltä suuaukolta. Valkoisella värillä on esitetty kolmiot joihin ei saatu olemassa olevalta kuva-aineistolta tekstuuri pintaa.

Jos kallioleikkauksista halutaan tällä tekniikalla kerätä tietoa, maastossa tehtävä työ tulee suunnitella tarkemmin. Tulkintaa tehdessä huomattiin että käyttökelpoista pisteaineistoa saadaan mitattua yhdeltä asemapisteeltä n. 80 m matkalta kallioleikkauksesta ja asemapisteen käyttökelpoiset kuvat kattavat noin 30 m levyisen alueen. Tämän perusteella voisi mittauksen toteuttaa seuraavasti:

1. Keilaus ja kuvaus suoritetaan n. 80 metrin asemapisteväleihin.
2. Keilausasemien välit katetaan erillisellä valokuvauksella
3. Keilausasemien väleille mitataan kohdistuspisteitä erikseen otettujen valokuvien orientointia varten.

Tällä tavalla on mahdollista kerätä riittävän tiheä pistepilviaineisto sekä kohteen kattava rekisteröitävissä oleva kuva-aineisto.

6.10 Yhteenveto kallioleikkausten keilauksista

Osassa leikkauksia keilausasemia oli liian harvassa ja siksi aineistoon jäi paljon varjoja. Lisäksi maasto (paljon kasvillisuutta, isoja kiviä) oli hyvin haastavaa tälle mitausmenetelmälle, joten keilausasemien määrä ja sijainti tulee miettiä tarkemmin. Kallioleikkaukset ovat haasteellisia kohteita myös pisteiden automaattiselle luokittelulle, sillä niissä on rakenteellisesti pystysuoria seiniä, negatiivisia kulmia ja äkillisiä jyrkkiä maastonmuotoja.

Kallioleikkausten yläpinnat saatiin kaikissa mitatussa kohteissa mallinnettua, mutta osassa leikkauksia aineistoa saatiin vain kapealta kaistaleelta leikkauksen reunan läheltä. Syynä tähän oli pääsääntöisesti se, että leikkauksen ympärillä oli niin tiheää metsää, että lasersäde ei läpäissyt sitä.

Kuivatusojien kulun mittaaminen ei onnistunut keilaamalla, sillä ojissa oli kasvillisuutta ja vettä. Näistä vesi oli tulkinnalle haitallisin, sillä käytetty 1-luokan lasersäde ei läpäise vettä ja siten ojien pohjan mittatieto jäi saamatta. Ojat tulisi mitata perinteisillä mittausmenetelmillä, jonka jälkeen niiden pohjan korkeusasematieto voidaan yhdistää pistepilviaineistosta laadittuun maastomalliin.

Laserkeilausaineistosta voidaan digitoida kallion rakenteita (rakoja, ruhjevyöhykkeitä, yms.) mutta sitä varten keilauksen suunnittelu pitää tehdä eri tavalla kuin maastomallin mittausta varten suoritettavassa keilauksessa. Nyt havaittiin, että pääsääntöisesti keilausasemia oli liian harvassa ja siten aineiston tulkinta onnistui vain satunnaisissa paikoissa. Samaten huomattiin, että luonnon valo-olosuhteilla oli suuri merkitys tulokseen, sillä kirkas auringonvalo ja voimakkaat varjot aineistossa vaikuttavat lopputulokseen samalla lailla kuin normaalissa valokuvauksessa.

Kun laserkeilaus ja valokuvaus suunnitellaan etukäteen huolella, saadaan tuotettua aineistoa jota käyttäen kalliorakennussuunnittelija voi toimistolla tehdä leikkausten yläreunojen halkeama- ja lohkaroitumistarkastelun. Tarkastelun tuloksen pystytään parhaissa tapauksissa jo tekemään korkeiden leikkausosuuksien korjaustarpeen määrittely, joka käydään sitten vielä lopullisesti varmistamassa maastokäynnillä. Tällöin maastokäynnillä on jo mukana tulkittu aineisto ja käynnin aikana pystytään keskittymään korjaustarpeen ja -menetelmien määrittämiseen.

7 Johtopäätökset

Projektin tavoitteena oli selvittää viime aikoina nopeasti kehittyneen uuden mittaus- tekniikan käyttömahdollisuudet liikenneväylien kalliorakenteiden kunnon ja toiminnallisuuden hallinnassa.

Projektin kohteena olivat Rantaradan kallioleikkaukset ja tunnelit. Projekti jakautui viiteen osakokonaisuuteen:

- Selvitetään, voidaanko menetelmää käyttää tunneleiden verhousrakenteiden takana mahdollisesti esiintyvien jäätyiskohtien tunnistamiseen
- Tutkimuksessa selvitetään, voidaanko menetelmää käyttää tehokkaasti leikkausten yläreunojen kuivatusratkaisujen parantamismahdollisuuksien ja sitä kautta leikkauksen seinille muodostuvan paannejään vähentämisen suunnitteluun.
- Selvitetään laserskannaustekniikan käyttömahdollisuudet kallioleikkausten kuivatusratkaisujen toiminnallisuuden ja kehittämismahdollisuuksien osalta.
- Selvitetään laserskannaustekniikan käyttömahdollisuudet kallioleikkausten seinämien kuntoarvioinnissa.

Tunneleiden osalta projekti onnistui hyvin. Tunnelit mitattiin sekä lämpimällä kelillä että pidemmän pakkasjakson jälkeen ja näiden kertojen keilaustuloksia verrattiin toisiinsa. Tunneleista havaittiin useita kohtia, joissa verhousrakenne oli talviaikaan selkeästi siirtynyt tunnelin keskustaa kohti ja muutamassa tapauksessa tällaiseen kohdassa oli eristerakenteen sauma rikkoutunut. Syynä tähän on mitä todennäköisimmin verhousrakenteen takana tapahtuva kallion pintaa pitkin valuvien vesien jäätyminen. Siten voidaan todeta että selvityksen perusteella junaliikenteen paineiskut eivät ole ainoa rakenteita kuormittava ja vaurioita aiheuttava tekijä.

Kallioleikkausten yläreunojen vedenhallintatoimenpiteiden osalta tulokset olivat vaihtelevia. Käytännössä työssä tehtiin maastomallin mittaus leikkausten yläreunoille ja siellä, missä kasvillisuutta ei ollut esteenä, saatiin hyviä tuloksia. Monessa kohteessa leikkausten päällä oleva kasvillisuus on rautatiealueella vesottu siten, että katkaisukorkeus on n. 30–40 cm korkeudella maanpinnasta vesomisjäte on jätetty paikalleen. Tämä vesomisjäte muodostaa paikoin niin tiiviin kerroksen, että maanpintaa ei sen kohdalla suoritetuissa keilauksissa saada luotettavasti määritettyä. Samaten leikkauksen ympärillä kasvava tiheä puusto esti useassa tapauksessa maastomallin määrittämisen laajemmalla alueella.

Kallioleikkausten kuivatusten osalta todettiin, että mittaustuloksista ei saada ojien pohjia ja kuivatusreittejä määritettyä, sillä ojissa oli kasvillisuutta ja vettä. Näistä vesi oli tulkinnalle haitallisin, sillä käytetty 1-luokan lasersäde ei läpäise vettä ja siten ojien pohjan mittatieto jäi saamatta. Ojat tulisi mitata perinteisillä mittausmenetelmillä, jonka jälkeen niiden pohjan korkeusasematieto voidaan yhdistää pistepilviaineistosta laadittuun maastomalliin.

Laserkeilausaineistosta voidaan digitoida kallion rakenteita (rakoja, ruhjevyöhykkeitä, yms.) mutta sitä varten keilauksen suunnittelu pitää tehdä eri tavalla kuin maastomallin mittausta varten suoritettavassa keilauksessa. Nyt havaittiin, että pääsääntöisesti keilausasemia oli liian vähän ja samaten huomattiin että luonnon valolosuhteilla oli suuri merkitys tulokseen. Kirkas auringonvalo ja voimakkaat varjot

aineistossa vaikuttavat lopputulokseen samalla lailla kuin normaalissa valokuvauksessa.

Kun laserkeilaus ja valokuvaus suunnitellaan etukäteen huolella, saadaan tuotettua aineistoa jota käyttäen kalliorakennussuunnittelija voi toimistolla tehdä leikkausten yläreunojen halkeama- ja lohkaroitumistarkastelun. Tarkastelun tuloksen pystytään parhaissa tapauksissa jo tekemään korkeiden leikkausosuuksien korjaustarpeen määrittely, joka käydään sitten vielä lopullisesti varmistamassa maastokäynnillä. Tällöin maastokäynnillä on jo mukana tulkittu aineisto ja käynnin aikana pystytään keskittymään korjaustarpeen ja -menetelmien määrittämiseen.

Riskikohteiksi luokitelluissa kallioleikkauksissa olisi jatkossa mahdollista käyttää samaa menetelmää kuin mitä nyt toteutettiin tunneleissa. Kallioleikkausten yläreunat voitaisiin keilata eri ajankohtina ja tuotettuja pistepilviaineistoja voitaisiin verrata keskenään. Tällä tavalla pystyttäisiin havaitsemaan mahdolliset siirtymät hyvissä ajoin.

Projektin tuloksena on tuotettu myös erittäin tarkka mittausaineisto tunneleista ja kallioleikkauksista. Sitä voidaan jatkossa käyttää esimerkiksi rakennemallien laatimiseen sekä tarkan mittatiedon hakemiseen tarvittaessa.

Mittausaineistoa voidaan myös käyttää lähtötietona, mikäli Rantaradan tunneleista ja kallioleikkauksista ryhdytään kokoamaan tuotemalleja.

Lähdeluettelo

- Ahlavuo, Marika - Hyyppä, Hannu, Laserkeilaus on tulevaisuuden tarkkaa 4D-paikkatietoa. *Maankäyttö* 4 (2007), s. 50–51.
- Alho, Petteri - Hyyppä, Hannu - Hyyppä, Juha, Laserkeilaamalla maastomallit tulvakartoitukseen. *Positio* 3 (2008), s. 11–14.
- Erving, Anna, Maalaserkeilausaineiston käsittely. TKK, Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen tutkimusryhmä. 2008.
- Greaves, Tom - Jenkins, Bruce, Laser Scanning Changes the Rules. *The American Surveyor* May/June (2004).
- Haggrén, Henrik - Rönholm, Petri, Optinen 3D-mittaus ja laserkeilaus. Luentomateriaali. Saatavissa www.foto.hut.fi/opetus301_10_2004.pdf. [viitattu 7.4.2008].
- Hyyppä, Juha - Hyyppä, Hannu, Laserkeilaus. Geodeettinen laitos. 2007.
- Joala, Vahur, Laserkeilauksen perusteita. *Luentomoniste*. 30.11.2006. [viitattu 7.4.2008]
- Joala, Vahur, Terrestriaalinen laserkeilaus. *Luentomoniste*. 2007.
- Järvinen, Jaakko, Laserkeilaimilla tuotettujen keilausaineistojen yhdistäminen. Diplomityö. TKK. Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio. 2007.
- Kankainen, Jouko - Lindholm, Mika - Erke, Juhani, Infraprojektin osittelu.
- Koski, Jarkko, Laserkeilaus - uusi ulottuvuus paikkatiedon keräämiseen. *Maankäyttö* 4 (2001), s. 24 - 26.
- Kukko, Antero, Laserkeilaimen valinta lähifotogrammetrisiin mittaustehtäviin. Erikoistyö. TKK. Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio. 2005.
- Leica Keilausuutiset 2 (2005).
- Mikkonen, Martti, Laserkeilaus kalliorakentamisessa. Laserkeilauksen soveltaminen rakentamiseen Seminaari. Oulu. 24.4.2006.
- Mononen, Jyrki, Laserkeilaus pintojen muutosten mittaamisessa. 24.1.2005. [viitattu 25.2.2008].
- Ruohonen, Sanna, FARO LS 880 -laserkeilain vapaan keilainaseman menetelmässä. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Yhdyskuntatekniikka. Tampere. 2007
- Rönholm, Petri, Laserkeilaus-opintojaksoluennot. TKK. Maanmittaustieteiden laitos. 2008.
- Silvennoinen, Jussi, Laserkeilaus suunnistuskartoituksessa. 2008.

