

ATU-keilauksen hyödyt raitiotie hankkeissa



Ylemmän ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Tulevaisuuden liikennejärjestelmät

Kevät 2023

Pyry Vilkkö

Tulevaisuuden liikennejärjestelmät

Tekijä Pyry Vilkkö

Työn nimi ATU-keilauksen hyödyt raitiotie hankkeissa

Ohjaaja Oskar Eklöf, Jore Aitamurto

Tiivistelmä

Vuosi 2023

Raide-Jokerin puolesta heräsi kysymys keväällä 2022, että täyttääkö Raide-Jokerille rakennettu rata-alue varmasti ennalta suunnitellun ATU-alueen vaatimukset. Ongelman ratkaisuksi päätettiin tehdä ATU-keilaus mobiililaserkeilaimen avulla. Tutkimuksessa pohdittiin myös muita tutkimusmenetelmiä työn tekemiseksi.

Laserkeilaus suoritettiin seitsemässä osassa, joista yksi oli testikeilaus. Testikeilauksen tarkoituksena oli testata keilauksessa käytetyn laitteiston yhteensopivuus, sekä määrittää tarkkeiden oikea koko ja määrän riittävyys keilausta varten. Laserkeilaus tehtiin kiskopyörämönkijää apuna käyttäen, jotta laserkeilaus saatiin mallintamaan raitiovaunua kiskoilta käsin. Laserkeilausmateriaalista tehtiin kolmiulotteinen pistepilvi.

Pistepilvella tehtiin törmäyskuvatarkastelu mahdollisten esteiden ja rakennusvirheiden löytämiseksi. Kaikista ATU-rikkeistä Sweco Infra & Rail Oy keräsi yhteisen raportin Raide-Jokerille. Raportin pohjalta pystyttiin korjaamaan siinä esiin tulleet virheet ja varmistamaan ATU:n riittävyys. Opinnäytetyön perusteella ATU-keilauksen avulla pystyttiin ratkaisemaan ongelma ja tekninen koeliikenne pystyttiin aloittamaan aikataulussa.

Suomessa pistepilviaineistoa on käytetty jo pitkään erilaisissa mallinuksissa, kuten tunneli- ja kalliorakentamisessa, mutta raitiotierakentamiseen ja ATU-tarkastelussa ei mahdollisesti koskaan aikaisemmin. Itse uskon, että pistepilvimallinnus tulee yleistymään tulevaisuudessa rakennushankkeissa.

Avainsanat Laserkeilaus, ATU, pistepilvi, Raide-Jokeri.

Sivut 49 sivua ja liitteitä 4 sivua

On behalf of Raide-Jokeri, a question arose in the spring of 2022 whether the track area built for Raide-Jokeri definitely meets the requirements of the pre-planned MMD area. To solve the problem, it was decided to conduct a mobile laser scanning of the MMD area. Other research methods were also considered for the work.

The laser scanning was carried out in seven parts, one of which was a test scanning. The purpose of the test scanning was to test the functionality of the scanning and to determine the correct size and quantity of points needed for the scanning. Laser scanning was carried out using a rail bike ATV to follow the tram tracks. The laser scanning material was used to create a three-dimensional point cloud.

The point cloud was analyzed for collision images to find possible obstacles and construction errors. Sweco Infra & Rail Oy collected a common report for Raide-Jokeri about all MMD violations. Based on the report, the errors that emerged were corrected and the adequacy of the MMD was ensured. The problem was solved using the MMD-scanning, and the technical trial runs were able to start on time.

In Finland, point cloud data has been used extensively in various modeling applications such as tunnel and rock construction, but possibly never in tram construction and MMD analysis. I believe that point cloud modeling will become more common in future construction projects.

Keywords Laser scanning, Maximum moving dimensions, Point cloud, Raide-Jokeri

Pages 49 pages and appendices 4 pages

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
1.1	Raide-Jokeri ja allianssimalli	1
1.2	Opinnäytetyön tavoitteet.....	3
1.3	Opinnäytetyön rajaus.....	4
2	Tutkimusmenetelmän valinta.....	5
2.1	Raide-Jokerin rata-alueen ongelman esittely.....	5
2.2	Eri tutkimusmenetelmien esittely	6
2.2.1	Mobiililaserkeilaus.....	6
2.2.2	Dronella kuvaaminen.....	8
2.2.3	Takymetri	12
2.2.4	Havainnointi	15
2.3	Kilpailutus	16
3	ATU-keilaus.....	18
3.1	Aukean tilan ulottuma ja ATU-keilaus	18
3.2	Mittausvälineiden ja mönkijän esittely.....	20
3.3	Laserkeilauksen valmistelu.....	22
3.4	Mobiililaserkeilauksen toteutus	24
4	Laserkeilauksen tulokset	30
4.1	Pistepilvi	30
4.2	Pistepilvimateriaalin käyttö Raide-Jokerilla	32
4.3	ATU-tarkastelu raportti	33
4.4	Raportin ja rakentamisen yhteydessä löytyneet korjattavat kohteet.....	37
5	ATU-keilauksen hyödyt kustannuksissa	39
6	Aineiston hyödyt tulevissa hankkeissa.....	41
7	Yhteenveto	45
	Lähteet	47

Liitteet

Liite 1. Raide-Jokerin suunnitteluperusteet

Lyhenteet

ATU	Aukean tilan ulottuma, tarkoitetaan rata-aluetta, jonka sisäpuolella ei saa olla kiinteitä rakenteita eikä laitteita.
ATU-keilaus	Rata-alueesta tehtävää mobiililaserkeilausta.
ATU-riike	ATU-tarkastelulla löydetty poikkileikkauskuva.
ATU-tarkastelu	Pistepilvimateriaalille tehtävä tarkastus estemaskia käyttäen.
FAT	Factory Acceptance Test, tilaajan ja järjestelmätoimittajan yhdessä toteuttama dokumentoitu toiminnallinen tarkastus
GNSS	Global Navigation Satellite System, maailmanlaajuinen paikallistamisjärjestelmä.
GPS	Global Positioning System, maailmanlaajuinen paikallistamisjärjestelmä.
HCS-V	Hanning & Kahl Communication System, vaihteenkääntämisessä käytettävä järjestelmä.
IMU	Inertial Measurement Unit, laite, joka mittaa omaa sijaintiaan
TLJ	Tilapäiset liikennejärjestelyt.
UAV	Unmanned Aerial Vehicle, miehittämätön ilma-alus

1 Johdanto

1.1 Raide-Jokeri ja allianssimalli

Raide-Jokeri on pikaraitiotie Helsingin Itäkeskuksesta Espoon Keilaniemeen, joka samalla korvaa nykyisen 550-bussilinjan. Pikaraitiotien pituus on 25 kilometriä, josta radasta 16 kilometriä sijoittuu Helsinkiin, 9 kilometriä Espooseen ja yksi varikko Helsingin Roihupellossa. Radalla varrella on yhteensä 32 pysäkkiä ja 2 päätepysäkkiä.

550-bussilinja on yksi Helsingin ruuhkaisimmista bussilinjoista ja sen vuoroväli ruuhka-aikana on noin viisi minuuttia. Muutokset kaupungeissa ja tiivistyvä asumisrakentaminen lisäävät joukkoliikenteen tarvetta kaupungeissa. Matkustajamäärien kasvu tulevaisuudessa vaatii joukkoliikenteeltä suurempaa kuljetuskapasiteettia. Näin ollen Helsingin kaupunki, Espoon kaupunki ja Helsingin kaupungin liikennelaitos HKL nykyinen Pääkaupunkiseudun Kaupunkiliikenne Oy päättivät rakentaa n. 400 miljoonaa euroa maksavan raitiotielinjan korvaamaan 550-bussilinjan. (Mikä on Raide-Jokeri?, 2021)

550-bussilla matkustetaan arkipäivisin yli 40 000 matkaa päivässä. Tulevaisuudessa on arvioitu matkustamisen lisääntyvän yli 91 000 matkaan arkipäivässä. Tämä jos joku lisää tarvetta pikaraitiotielle. Raide-Jokeri pystyy liikennöidessään kuljettamaan kerralla raitiovaunussa noin kolmen bussin verran ihmisiä. (Mikä on Raide-Jokeri?, 2021)

Raide-Jokerin rakentaminen on alkanut kesällä 2019 ja rakentamisen on tarkoitus valmistua keväällä 2023. Liikennöinti linjalla on tarkoitus aloittaa syksyllä 2023, mutta lopullisesta aikataulusta päättää Helsingin seudun liikenne HSL. Ennen tilaajille luovutusta radalla sekä varikolla suoritetaan tekninen koeliikenne. Teknisen koeliikenteen aikana rata-alueella testataan raitiotien, sähkö- ja teknisten järjestelmien, liikennevalojen ja kameravalvontalaitteiden toiminnallisuus ja todennetaan ne toimivaksi.

Raide-Jokerin rakentaminen toteutetaan allianssimallilla. Allianssihankeissa mukana olevista osapuolista muodostuu yksi organisaatio, jotka suunnittelevat ja toteuttavat hankkeen yhdessä jakaen riskit ja hyödyt. Allianssissa suunnittelijat, urakoitsijat ja tilaajaorganisaatio toimivat yhdessä ja yritysten rajat katoavat. Allianssi mahdollistaa nopeamman viestinnän ja parantaa yhteistyötä eri osapuolten kanssa. Ennen töiden aloitusta tehdään allianssisopimus, joka sitoo yritykset yhteisiin sovittuihin ehtoihin. Allianssin sisällä kaikki suunnittelu- ja rakennusvirheet ovat yhteisiä ja kulut menevät kaikkien rahoista.

Raide-Jokerin tilaajaorganisaation muodostavat Helsingin kaupunki, Pääkaupunkiseudun Kaupunkiliikenne Oy entinen HKL ja Espoon kaupunki. Urakoitsijoina toimii NRC Group Finland Oy ja YIT Suomi Oy. Suunnittelijatoimistoina toimivat Sitowise Oy, Ramboll Finland Oy ja Sweco Finland Oy. Alla oleva kuvassa 1. havainnollistaa Raide-Jokerin allianssin osapuolia.

Kuva 1. Raide-Jokerin allianssimalli. (Perehdytysmateriaali 2021, 2021)



1.2 Opinnäytetyön tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia pistepilvi tietomallinnusta. Miten pistepilven avulla voidaan helpottaa raitiotie hankkeiden suunnittelua tulevaisuudessa ja käynnissä olevaan rakentamiseen osa-alueisiin (kustannukset, resurssit ja aikataulu). Pistepilvi-aineisto olisi pitänyt olla käytössä ennen rakentamista, jos sitä olisi haluttu käyttää suunnittelun apuna. Tarkastelussa käytetään Raide-Jokerilla tehtävän ATU-keilauksessa saatua pistepilvimateriaalia. Pistepilvi muodostaa värillisen kolmiulotteisen kuvituksen rata-alueesta kuvaus hetkeltä. Pistepilvi kuvataan Trimble MX9 - mobiililaserkeilaimella, joka on kiskopyörillä varustetun mönkijän päälle kiinnitettynä.

Kuvattua pistepilvimateriaalia vertaillaan myös törmäystarkasteluissa ennalta määritettyyn ATU-alueeseen. Törmäystarkastelun avulla pyritään tunnistamaan esimerkiksi korjattavia kohteita Raide-Jokerin rakentamalta rata-alueelta. Törmäystarkastelu tehdään Raide-Jokerin allianssikumppanin Swecon toimesta. Sweco koostaa raportin mikä sitten käydään läpi allianssin rakentamisesta vastaavien osapuolten kanssa ja tehdään tarvittavat muutokset työmaalla.

Työn aikana pyritään selvittämään pistepilvimateriaalin käyttömahdollisuuksista projektin jälkeen. Tällä hetkellä materiaali on Raide-Jokeri allianssin omaisuutta ja sille on tarkoitus selvittää omistaja projektin loputtua. Pistepilvimateriaalin käyttömahdollisuudet tulevaisuudessa on rajattomat, sillä materiaali muuntautuu monenlaiseen muotoon. Esimerkiksi pistepilvimateriaalia voidaan käyttää tulevien raitiovaunu hankkeiden suunnittelun apuna hahmottamaan etäisyyksiä ja rakentamisessa käytettyjä materiaaleja. Työ tehdään yhteistyössä Swecon ja heidän alihankkijanansa toimineen Geotrim Oy:n kanssa, jonka toimittamaa aineistoa hyödynnetään tutkimuksessa.

Seuraavia tutkimuskysymyksiä pyritään selvittämään opinnäytetyön aikana:

- Onko olemassa muita vaihtoehtoja ATU-keilaukselle?
- Mitä hyötyä on ATU-keilauksesta Raide-Jokerin rakentamisen/käyttöönoton kustannuksiin?
- Miten keilausmateriaalia voitaisiin käyttää projektin jälkeen?

1.3 Opinnäytetyön rajaus

Opinnäytetyön tutkimusmenetelminä käytetään kirjallisuuskatsausta, mittaustuloksia, haastatteluja ja havainnointia maastossa. Tutkimuksessa hyödynnetään Raide-Jokerin sisäistä projektidokumentaatiota ja projektinhallintajärjestelmään, jonne on tallennettu yli 100 000 tiedostoa. Kaikkea käytössä olevaa materiaalia ei voida työssä käyttää, sillä osa materiaalista on liikesalaisuuksia ja ei julkista materiaalia.

Opinnäytetyö on rajattu käsittelemään mönkijällä tehtävää laserkeilausta ja sen hyödyntämistä infra-alan rakentamisen apuna. Muita keilaus- ja mittaustapoja käsitellään vain esittely mielessä ja niihin ei syvennyttä tarkemmin tässä opinnäytetyössä. Tässä opinnäytetyössä ei käsitellä kaikkia pistepilvimateriaalin käyttötarkoituksia, sillä ne eivät liity tällä hetkellä rakennettavaan Raide-Jokeri projektiin. Opinnäytetyössä esitetyt kustannuslaskelmat tehdään arviointina. Apuna arvioinnissa käytetään projektin rakentamisessa tulleita todellisia rakennuskuluja. Työn lopputulosten pohdinta esitellään työn viimeisessä luvussa.

2 Tutkimusmenetelmän valinta

2.1 Raide-Jokerin rata-alueen ongelman esittely

Raide-Jokerin tuotannon puolesta heräsi kysymys vuoden 2022 keväällä, että täyttääkö Raide-Jokerin rata-alue varmasti ennalta suunnitellun ATU-ulottuman. ATU tulee sanoista aukean tilan ulottuma, joka tarkoituksena on turvata raitiovaunun tai junan turvallinen ja esteetön liikkuminen raiteilla. Aukean tilan ulottumalla tarkoitetaan rata-aluetta, jonka sisäpuolella ei saa olla kiinteitä rakenteita eikä laitteita. (Mäkelä, 2023)

Raide-Jokerilla ryhdyttiin pohtimaan ratkaisua ATU-ulottuman lopputarkasteluun. Vaikka ATU-ulottuma on meillä Raide-Jokerilla tarkoin määritelty tilaajien hyväksymissä suunnitteluohjeissa ja suunnitteluohjeiden perusteella suunnittelutoimistot suunnittelevat radan sijainnin ja pysäkkialueet täyttämään vaaditun ATU-alueen. Tämän lisäksi tilaaja vielä hyväksyy kaikki rakennussuunnitelmat ennen kuin aloitetaan itse rakentaminen. Raide-Jokerin tuotannon puolesta todettiin, että olisi silti hyvä tehdä kattava lopputarkastelu rata- ja pysäkkialueista. (Mäkelä, 2023)

Raide-Jokerin tilaajat eivät ole erikseen vaatinut ATU-ulottuman tarkastamista ennen koeliikenteen aloittamista, mutta meillä Raide-Jokerilla haluttiin sellainen tehdä. Tuotannon puolesta todettiin, että ATU-tarkastelulle olisi tarvetta, jotta voidaan varmistaa koeliikenteen mutkaton aloitus marraskuussa 2022.

Ennen kuin ideaa päätettiin alkaa kilpailuttamaan urakoitsijoilla, päätettiin asiasta kysyä ennakkopäätös allianssin projektiryhmältä. Ennako päätöksestä tuli hyväksyntä idealle allianssin projektiryhmältä ja tämän jälkeen lähdettiin selvittämään erilaisia ratkaisuja ATU-ulottuman tarkastamiseksi. (Mäkelä, 2023)

2.2 Eri tutkimusmenetelmien esittely

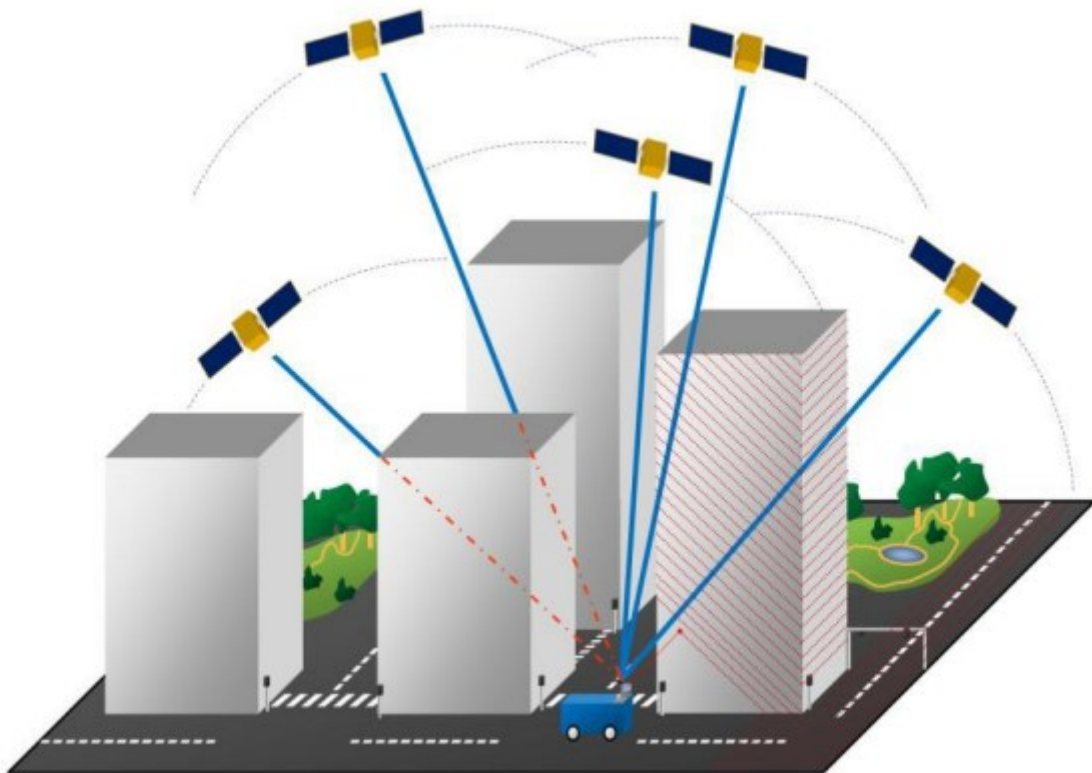
2.2.1 Mobiililaserkeilaus

Laserkeilain on mittalaite, jolla voidaan mitata yksittäisiä pisteitä, jotka muodostavat yhdessä pistepilviä. Mittalaitteessa on nollapiste, joka lähettää lasersädettä, minkä avulla mitataan kohteen etäisyys ja suunta mittalaitteesta. Laserkeilauksessa kohteiden pintaa mitataan kolmiulotteisesti reaaliajassa. Laserkeilaus on optinen mittaussuunnitelma, joten mitattavan kohteen tulee olla näkyvä mittalaitteelle. Katvealueilta vältytään, mikäli kohde mitataan useasta suunnasta. Laserkeilattu mittaussuunnitelma on yhdistettävä toisiinsa, jotta se olisi samassa koordinaatistossa. Mittaussuunnitelma on georeferoitava, mikäli aineisto halutaan saada tunnettuun koordinaattijärjestelmään esimerkiksi EUREF-FIN. Georeferoidun aineiston pystyy kohdistamaan kartalle parin sentin tarkkuudella todellisuudesta. (Siivola, 2013)

Laserkeilaus voidaan tehdä staattisesti tai mobiilisti. Staattisessa laserkeilauksessa keilain mittaa paikallaan jalustan päältä. Mobiililaserkeilauksessa keilain asennetaan liikkuvan jalustan päälle ja mittaus tapahtuu liikkeessä. Jalustana voidaan käyttää esimerkiksi autoa, raitiovaunua tai lennokkia. Mobiililaserkeilain käyttää keilaukseen GNSS/IMU-järjestelmää. Laserkeilaimen sijainti saadaan selville Global Navigation Satellite System eli GNSS-paikantimen ja Inertial Measurement Unit eli IMU-inertiamittaussuunnitelman avulla. GNSS tarkoittaa eri maiden ylläpitämää paikannusjärjestelmien kokonaisuutta. (Siivola, 2013)

Näitä paikannusjärjestelmiä ovat muun muassa Euroopan unionin Galileo, Venäläinen Glonass, sekä Yhdysvaltojen GPS-järjestelmä. IMU on laite, joka mittaa omaa sijaintiaan liikkeessä tapahtuvien muutosten mukaan, kun laitteen lähtöpiste tunnetaan. Sijainti mitataan asennon, nopeuden ja painovoiman muutoksesta, käyttäen apuna kiihtyvyyssantureita ja gyroskooppeja. Alla olevassa kuvassa 2. havainnointikuva mobiililaserkeilauksesta. (Siivola, 2013)

Kuva 2. Laserkeilaimen toimintaperiaate. (Siivola, 2013)



Laserkeilaimet pystyvät mittaamaan myös täysin pimeässä, sillä kyseessä on aktiivinen mittaustapa, jossa laserkeilain lähettää säteen mitattavan kohteen pintaan ja mittaa sen paluusäteen heijastumista kohteesta. Jos laserkeilaimen yhteydessä on kamera, voidaan mitattava kohde kuvata samanaikaisesti ja kuvauksessa saatu pistepilvimateriaali voidaan jälkikäsitellyssä värjätä oikean väriseksi. Pistepilvi on kolmiulotteinen aineisto kuvattua kohteesta ja koostuu miljoonista yksittäisistä pisteistä. (Siivola, 2013)

Mobiililaserkeilaimen käyttö Raide-Jokeri projektissa on varteen otettava vaihtoehto, sillä sen helppo liikutettavuus lisää käytettävyyttä ja sillä saadaan tehtyä kolmiulotteinen pistepilvimateriaali. Pistepilvimateriaalin avulla pystytään myös tekemään ATU-tarkastelu rata-alueelle.

2.2.2 Dronella kuvaaminen

Droneja käytetään erityisesti valo- ja videokuvauksiin, sekä alueiden kartoittamiseen. Alla olevassa kuvassa 3. on esitetty DJI mini 3 Pro -drone ja kauko-ohjain. Drone on vakiintunut termi puhuttaessa miehittämättömästä ilma-aluksesta (UAV, Unmanned Aerial Vehicle). Pienemmät dronet ovat etänä ohjattavia yleensä neliroottorisia lentoaluksia. Dronea ohjataan kauko-ohjaimella, jossa on joko kiinteä näyttö tai siirrettävä näyttö kuten puhelin tai tabletti. Dronet on varustettu kameralla ja GPS-paikantimella, jonka avulla lennättäjä pystyy näkemään ohjaimen näytöltä dronen sijainnin taivaalla reaaliajassa.

Kuva 3. DJI mini 3 Pro -drone ja kauko-ohjain. (Gigantti Oy Ab, 2023)

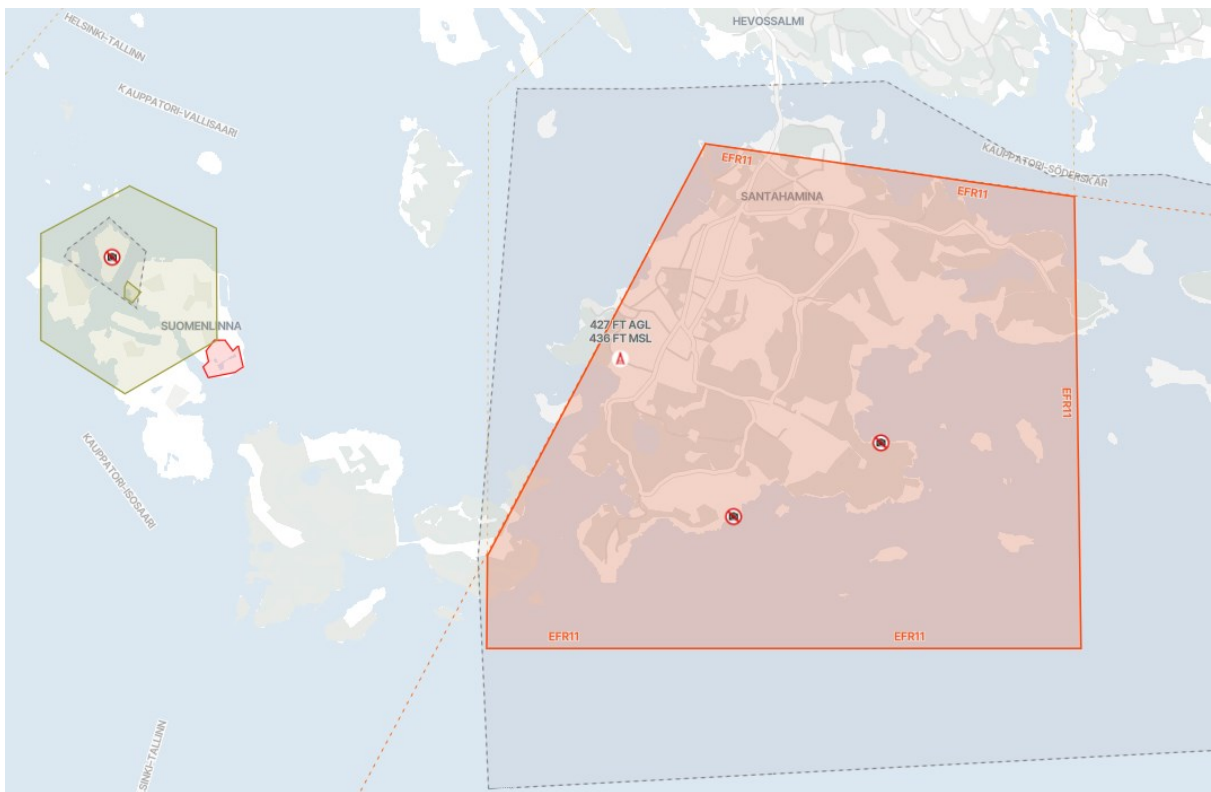


Dronen lennättäminen on kansainvälisesti valvottua toimintaa. Ilmailun asetuksista vastaa Euroopan alueella Euroopan unionin lentoturvallisuusvirasto (EASA, European Union Aviation Safety Agency). EASA-asetuksien johdosta droneja lennättävien ammattilaisten ja harrastajien täytyy perehtyä lentämistä koskeviin säädöksiin, rekisteröityä operaattoriksi, sekä suorittaa paikallisen viranomaisen järjestämä verkkokoe osoitteessa www.droneinfo.fi. Suomessa drone säädöksiä ja lentämistä valvoo Traficom. (Forsell, 2022)

Dronella tehtävää laserkeilausta suunnitellessa on ensin selvitettävä, onko kartoitusta mahdollista tehdä droneilla? Mikäli alueella on paljon asutusta ja puita, voi maaston kuvaaminen dronella olla todella haastavaa. Paras paikka lennätykselle on aukea ja vähän liikennöity alue. Operaattorin eli lentäjän tulisi sijoittua mahdollisimman korkealle paikalle kuvattavassa kohteessa, parhaan lentoyhteyden takaamiseksi. Lisäksi avoimen kategorian droneissa täytyy olla koko lennätyksen ajan näköyhteys eli VLOS (Visual Line of Sight). Useimpien droneiden lentokantama ohjaimen on jopa kahdeksan kilometriä, mutta omakohtaisella kokemuksella yhteys droneeseen saattaa pätkiä jo 250 metrin jälkeen taajamassa lentäessä. (Forsell, 2022)

Hyvä myös muistaa, että dronella on kiellettyä lentää joillakin alueilla Suomessa. Lentokieltoalueita on esimerkiksi lentokentän, sairaaloiden, puolustusvoimien ja valtion omistamien virastoalueiden läheisyydessä. Lentokieltoalueet ovat Geo-aitoja eli ilmatilassa olevia virtuaalisia aitoja, joita ei voi läpäistä dronella ilman lupaa. Geo-aidat ovat ohjelmallisesti rajoitettuja alueita, minkä sisälle halutessaan on pyydettyä lupa alueen toimijoilta ja valvovalta viranomaiselta Traficomilta. Traficomien ylläpitämältä Droneinfo-sivustolta löytyy viimeisimmät tilapäiset lentorajoitukset. Alla olevassa kuvassa 4. on esitetty Aviamaps-verkkosivustolta kuva lentorajoituksista. Tämän kartan pystyy myös lentäjä näkemään ohjaimen omasta kartasta kätevästi lennon aikana. (Forsell, 2022)

Kuva 4. Aviamaps-kartta lentorajoituksista. (Aviamaps, 2023)



Ennen kartoittamista dronella on tehtävä lennonsuunnittelu, jossa tulee perehtyä kartoitettavaan alueeseen. Alue tulee tarkistaa onko siellä mahdollisia lentoaluerajoituksia ja selvittää tarvitseeko alueella lentämiseen hakea erillistä lupaa. Kartoitettava alue kannattaa rajata tarvittavan lyhyiksi lentomatkoiksi, ettei lentomatka lennättäjän ja dronen välillä ei kasva liian suuriksi. Mikäli kartoitettava alue on pitkä, kannattaa lentäjän välillä vaihtaa paikkaa ja jatkaa siitä kartoittamista. (Forsell, 2022)

Tässä opinnäytetyössä ei tehdä omia dronella tehtyjä lentoja, vaan pohjamateriaalina käytetään Niko Forsellin (2022) tekemää opinnäytetyötä "Laserkeilaavan dronen hyödyntäminen suunnittelussa" havainnollistamaan dronella kartoitusta. Opinnäytetyössä oli käytössä DJI Matrice 300 RTK -drone, jonka avulla alue voidaan kuvata lämpökameralla, laserkeilaimella, zoom-kameralla tai kameraan vaihdettavilla objektiiveilla. Dronessa on käytössä kaksi litumpolymeeriakkua (5935mAh/akku), joilla saavutetaan noin 40 minuutin lentoaika. DJI Matrice 300 RTK on IP45-luokiteltu ja käyttölämpötila -20 °C asteesta aina +50 °C asteeseen. (Forsell, 2022)

Kuva 5. Aviamaps-kartta. (Prismatech OÜ, 2022)



Tässä esimerkissä on käytetty DJI Matrice 300 RTK -dronen kiinnitetyllä DJI Zenmuse L1 -laserkeilaimella tehty laserkeilaus. DJI Zenmuse L1-laserkeilain pystyy tuottamaan 240 000 pistettä sekunnissa. DJI Zenmuse L1:n on yhteensopiva dronen kanssa ja kuvattu keilaus data välittyy dronen ohjaimeen, mikä mahdollistaa pilotin näkemään pistepilven muodostumisen reaaliajassa. Laserkeilaus on hyvä tehdä kirkkaassa sääolosuhteessa, sillä lumi ja vesisade saattaa vääristää kuvattua materiaalia. DJI Zenmuse L1 sisältää myös kameran, joka mahdollistaa pistepilven muuttamisesta värilliseksi jälkikäsitellyssä. Värillinen pistepilvi helpottaa eri objektien tunnistamista pistepilviaineistosta. (Forsell, 2022)

Laserkeilaimella tuotettujen aineistojen laatu on niin korkealaatuista, että aineistosta voidaan erottaa mm. pylviä, kaivonkansia, liikennemerkkejä ja rakennuksien sijainteja. Dronella tehtävä laserkeilaus vähentää mittaamisaikaa ja toimii melko hyvin. Mutta esimerkiksi syvät ojat ja katetut tilat täytyy mitata perinteisellä menetelmällä. (Forsell, 2022)

Tässä esimerkissä kuvassa 6. on drone-keilaus tehty Kirkkonummelta. Kohteessa on metsää, rakennuksia sekä eri tieosuuksia. Keilauspaikka toimi erinomaisesti esimerkkinä kaupungissa tehtävästä keilauksesta. (Forsell, 2022)

Kuva 6. Pistepilvimateriaali dronella kuvattuna. (Forsell, 2022)



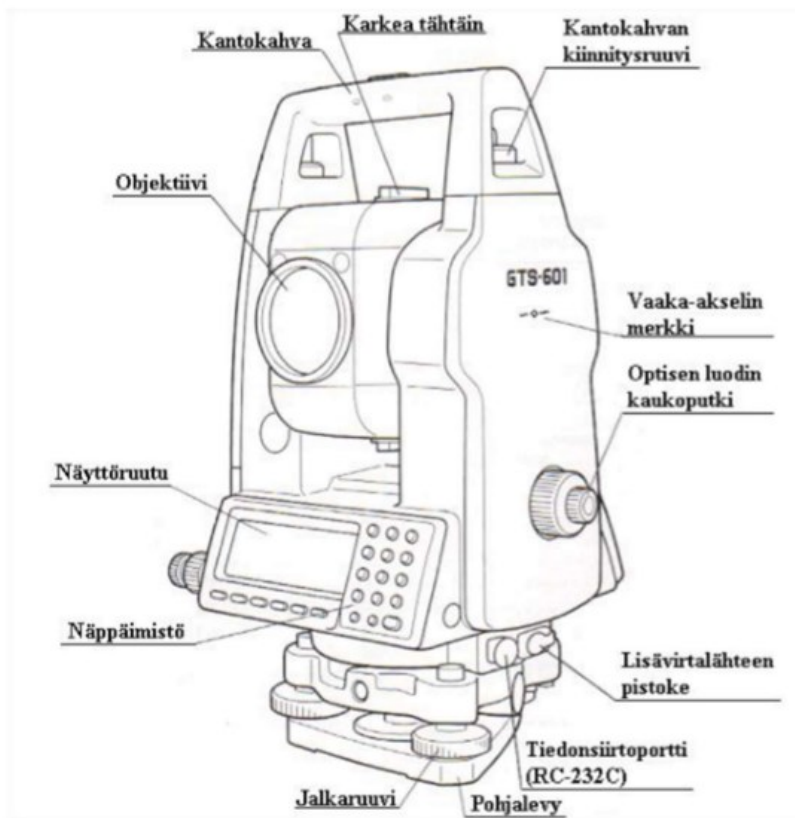
Kartoituksen jälkeen aineistot tyhjennetään laserkeilaimesta ja kamerasta tietokoneelle. Dronella tehtävä laserkeilaus on erinomainen vaihtoehto tehtäessä pistepilviaineisto. Raide-Jokerilla on koko hankkeen ajan tehty dronekartoitusta ilmakuvia varten ja samalla saatu myös pistepilviaineistoa. ATU-tarkasteluun aineisto ei silti sovellu, sillä dronella olisi pitänyt lentää ajolankojen alapuolella kivetyksien ja esteiden löytämiseksi. Ajolankojen alapuolella lentäminen olisi ollut hyvinkin haastavaa alan ammattilaiseltakin.

2.2.3 Takymetri

Takymetri on elektroninen kulmia ja etäisyyksiä mittava kone. Takymetrillä mitataan vaakaja pystykulmien lisäksi myös etäisyyttä kohteeseen. Takymetri on satelliittimittalaitteiden ohella suosituin maanmittauksessa käytettävä työkalu. Takymetriä käytetään poikkeustapauksia lukuunottamatta jokaisella työmaalla etäisyyksien ja pintojen oikean korkeuden mittaukseen. (Laine, 2018)

Takymetrilaitteisto koostuu tasaalustasta, takymetrilaitteesta, kartoitusprismasta, maastotallentimesta ja kartoitussauvasta. Takymetri on kiinni tasaalustassa, jonka jalkaruuvien ja tasaimen avulla koneen tähtäysakseli saadaan asetettua vaakatasoon. Tasaalustassa on myös usein optinen luoti, jonka avulla takymetri saadaan keskitettyä eli asetettua tarkalleen halutun pisteen päälle. Tasaalustassa on pyörivä vaakakehä, minkä avulla takymetri pystyy mittaamaan vaakakulmia ja takymetrissä itsessään on pystykehä, minkä avulla laite pystyy mittaamaan pystykulmia. Alla olevassa kuvassa 7 on tarkempi kuva takymetristä. (Laine, 2018)

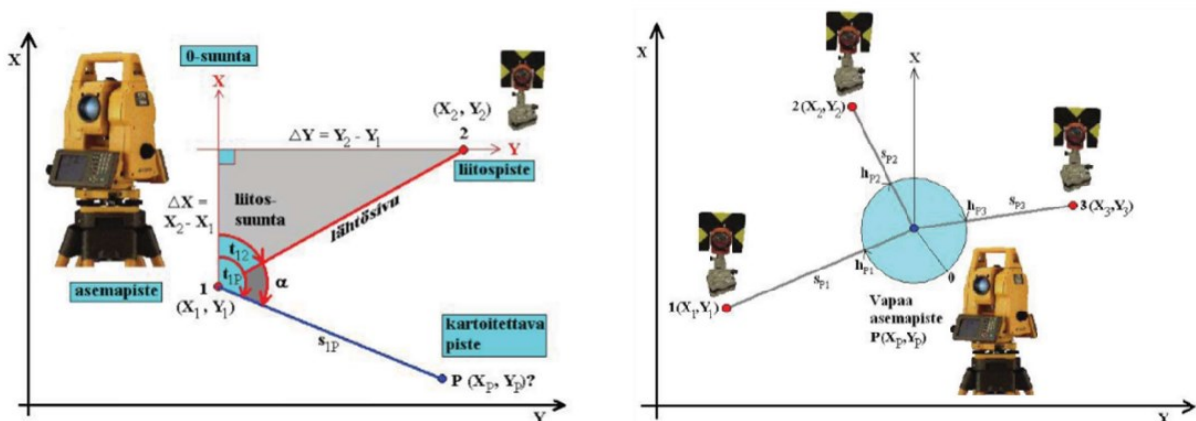
Kuva 7. Takymetri. (Laine, 2018)



Takymetrimittaukset aloitetaan takymetrin orientoimisella. Takymetrin orientoiminen tarkoittaa takymetrilaitteen kohdistamista haluttuun koordinaatistoon. Orientoimiseen tarvitaan vähintään kahta koordinaateiltaan tunnettua kiintopistettä. Orientoimisen jälkeen takymetri on valmis mittaamaan. (Laine, 2018)

Takymetrin orientoimiseen on kaksi eri taktiikkaa, tunnetun pisteen orientointi tai vapaan asemapisteen orientointi. Tunnetun pisteen orientoinnissa tarvitaan vain yksi tunnettu koordinaateiltaan tunnettuun kiintopiste. Tunnetulle pisteelle orientoimisessa joudutaan mittaamaan takymetrin ja kiintopisteen välinen korkeusero. Yleensä mittaamiseen käytetään mittanauhaa tai laseretäisyysmittaria, minkä vuoksi kyseinen toimenpide on melko epämääräinen. Kun mittaustuloksen halutaan olla millimetrin tarkkaa, suositellaan käytettäväksi vapaan asemapisteen orientointia. Vapaan asemapisteen orientoinnissa tarvitaan kahta tai useampaa koordinaateiltaan tunnettua kiintopistettä. Vapaan asemapisteen orientoinnissa ei tarvitse mitata takymetrin objektiivin ja kiintopisteen välistä korkeuseroa, vaan takymetriin tehtyjen suunta- ja etäisyyshavaintojen avulla laite pystyy itse laskemaan koordinaatit ja tähtäyssuunnan. (Laine, 2018)

Kuva 8. Tunnetun pisteen orientointi ja vapaan asemapisteen orientointi. (Laine, 2018)



Takymetrin kanssa käytetään usein kartoitussauvaa. Kartoitussauvan päähän kiinnitetään kartoitusprisma ja varteen tarvittaessa maastotallennin. Kartoitusprisma voidaan asettaa myös kiinteään tasausalustaan, jolloin mittaustulos on tarkempi. Takymetri mittaa infrapunasäteellä mittausrisman ja takymetrin signaalin vaihe-eroa. Näin takymetri saa laskettua pisteiden välisen etäisyyden. Maastotallennin on laite, joka on yhteydessä takymetriin Bluetoothin tai radion välityksellä. Laitteen avulla ohjataan takymetrin toimintaa ja tehdään kaikki mittaukset. Tiedonsiirto tietokoneelle onnistuu kätevästi, sillä kaikki mittaustulokset tallentuvat maastotallentimen muistiin. (Laine, 2018)

Takymetri on käytössä Raide-Jokerilla erilaisissa rakentamiseen liittyvissä mittaus kohteissa. Lisäksi takymetrin avulla mitattiin ATU-keilauksessa käytettyjen tähysten tarkat sijainnit. Takymetri tuntuu mielestäni hieman työläältä ratkaisulta tarkastamaan koko Raide-Jokerin rata-alue ennalta suunnitellun ATU:n varmistamiseksi, sillä mitattavia kohteita olisi lukuisia.

2.2.4 Havainnointi

Tässä opinnäytetyössä ei esitellä kaikkea mitä havainnoilla pystytään saavuttamaan, mutta havainnollistetaan sen käyttömahdollisuuksia. Työmaan havainnointi on prosessi, jossa tarkkaillaan ja dokumentoidaan työmaan edistymistä ja onko rakennettu suunnitelmien mukaisesti. Huolellinen työmaan havainnointi varmistaa, että työmaa etenee suunnitellun aikataulun mukaisesti, laatuvaatimukset täyttyvät ja mahdolliset ongelmat voidaan ratkaista ajoissa. Se on tärkeä osa rakennusprojektin hallintaa parhaan lopputuloksen saamiseksi. Työmaan havainnointiin kuuluu useita tehtäviä kuten työmaa-alueen tarkastus, työmaan edistymisen seuranta, laadunvalvonta ja työmaan dokumentointi.

Laadunvalvonta on tärkeä osa työmaan havainnointia, ja se sisältää tarkastuksia ja testejä, joilla varmistetaan, että rakennus täyttää laatuvaatimukset. Laadunvalvonnassa havainnoidaan ja dokumentoidaan myös kaikki mahdolliset virheet ja poikkeamat suunnitellusta, jotta ne voidaan korjata ja parantaa työmaan tuottavuutta. Laadunvalvonta on myös tärkeä osa riskienhallintaa ja auttaa välttämään rakennus vikoja tai epäonnistumisia, jotka voivat aiheuttaa merkittäviä kustannuksia ja maine haittoja rakentavalle yritykselle.

Yksi todella suosittu rakentamisessa käytetty laadunvalvontamenetelmä on mittauspöytäkirjat. Mittauspöytäkirjalla tarkoitetaan dokumenttia, missä esimerkiksi voidaan mitata tietyn kohteen etäisyyttä mittauspisteestä ja vertailla tuloksia rakennussuunnitelmiin. Esimerkiksi kohteessa voidaan mitata katukiveyksien etäisyyttä rataan kohden. Kun kohde vastaa suunnitelmia voidaan todeta, että tarkastuskohde on kunnossa. Mittauspöytäkirjoja käytetään paljon myös sähkörakentamisessa, sillä kaikki asennetut kaapelit pitäisi mitata vastusmittarilla ja todeta samalla ehjiksi varmistaakseen, ettei kaapelissa vaurioita.

Laadunvalvonnan tärkein tavoite on varmistaa, että tuotteen tai palvelun laatu on mahdollisimman hyvä ja vastaa asiakkaiden tarpeita. Tämä johtaa tyytyväisiin asiakkaisiin, parempiin tuotantoprosesseihin ja lisääntyneeseen liiketoiminnan kannattavuuteen.

Havainnointi on loistava ratkaisu pienten alueiden tai työmaiden laadunvalvontaan, mutta suurilla työmailla se voi tuoda ongelmia mukanaan. Esimerkiksi mikäli työmaa on 50 km pitkä voi jalan tehtävä jatkuva mittailu ja laadunvarmistus on työlästä ja aikaansa vievää. Kaikki riippuu kohteen laadun tasosta. Mikäli yksittäiset mittaustulokset paikoitellen riittää havainnointi voi olla oiva ratkaisu siihen, mutta mikäli pitää varmistaa esimerkiksi ajoradan leveys 50 km matkalta työ on jo todella raskasta ja aikaansa vievää.

Lopputarkastuksessa käytetään usein myös laadunvalvonta dokumentaatioita, kuten mittauspöytäkirjoja ja kuvia, joiden avulla voidaan varmistaa, että kaikki määräykset on noudatettu ja että kaikki tarvittavat tiedot on kerätty ja dokumentoitu. Työmaan lopputarkastus on tärkeä vaihe, joka varmistaa projektin onnistumisen ja laadukkaan lopputuloksen. Sen avulla voidaan varmistaa, että kaikki tehdyt työt täyttävät määräykset ja että projektin lopputulos vastaa alkuperäisiä suunnitelmia.

Havainnointi olisi myös varteenotettava ratkaisu Raide-Jokerille ja laadunvalvontaa Raide-Jokerilla tehdäänkin jo. Pitkä rata-alue voi tuottaa haasteen luotettavan tuloksen saamiseksi, mutta jos vain paikoitellen tehtävä mittaus riittää on havainnointi siihen hyvä. Havainnoinnin avuksi voisi kehitellä apuvälineitä työn teon avuksi, kuten radalla kulkeva mittauskärry. Tätäkin tutkimusmenetelmää pohdittiin tehtäväksi Raide-Jokerilla, mutta kysymykseksi jää onko se riittävän kattava ja voiko jotain jäädä vahingossa huomioimatta.

2.3 Kilpailutus

Tutkittuaan eri kuvaus- ja havainnointimenetelmiä Raide-Jokerilla ja päätettiin tehdä ATU-tarkastelu käyttämällä mobiililaserkeilainta, jotta varmistutaan siitä, että rakennettu rata on määräysten mukainen ja turvallinen käyttää. Raitiovaunun ATU-ulottumat pystytään määrittämään ATU-tarkastelulla, joka voidaan tehdä keilausmateriaalista. ATU-keilaus pystytään suorittamaan käyttäen projektilla olevaa kiskopyörämönkiää.

Kiskopyörämönkijällä kuljetaan radan päällä, joten keilausmateriaali vastaa todellista kuvaa rakennetusta raiteesta. Lisäksi ATU-keilaus on suoritettavissa nopeasti ja toimii luotettavana mittaustapana. Joten päätimme tehdä kilpailutuksen ATU-keilauksen tekemisestä.

ATU-keilauksesta julkistettiin kilpailutus, jossa Raide-Jokerin mittauspäällikkö lähetti urakkatarjouspyynnön eri alan toimijoille sähköpostilla. ATU-keilaus tuli suorittaa 2022 toukokuu-marraskuu välisenä aikana, jotta se ehtisi valmiiksi ennen koeliikenteen aloitusta. Raide-Jokerin koeliikenne oli tarkoitus aloittaa marraskuussa 2022, mikäli kaikki radalla tehtävät työt saataisiin valmiiksi. Lisäksi ATU-tarkastuksessa esiin tulevien puutteiden korjaamiseen jäisi aikaa. (Mäkelä, 2023)

Kilpailutuksessa oli haasteena löytää sopiva yritys, joka voisi tehdä ATU-keilauksen, sillä kaupunkialueella tehtyjä ATU-keilauksia on tuskin koskaan aikaisemmin tehty. Lopulta saimme vain kaksi tarjousta, joista valitsimme toisen. Tarjouksen antoivat MittausGroup Oy ja Sweco Infra & Rail Oy. MittausGroupilla oli referensseinä Länsimetrossa tehdyt mittaukset ja Swecolla VR ratapihoilla tehdyt mittaukset. Referenssien perusteella kumpikin yritys sopisi varmasti tähän työhön. Tarjouksia ja sopimushintoja en pysty tässä opinnäytetyössä kertomaan, sillä todelliset sopimuksiin sidotut hinnat ovat liikesalaisuus. (Mäkelä, 2023; Lähipiiritransaktio ATU-keilaus Sweco, 2022)

Kummatkin tarjoukset olivat kattavia ja niiden avulla saataisiin tehtyä vaadittu ATU-keilaus. Allianssinprojektiryhmä valitsi Sweco Infra & Rail Oy:n tarjouksen, vaikka kyseessä on lähipiiritransaktio. Lähipiiritransaktiolla tarkoitetaan sisäpiirin hankintaa, sillä Sweco on mukana Raide-Jokerissa yhtenä allianssikumppanina. Perusteluina hankinnalle oli kilpailutuksessa selkeästi halvempi hinta kuin MittausGroupilla. Muina perusteluina oli kokemus kyseisestä mittaustavasta muissa projekteissa ja tarjousmenettely oli ammattitasoisempaa. Swecon alihankkijana toimii GeoTrim Oy, joka suorittaa itse ATU-keilauksen. (Lähipiiritransaktio ATU-keilaus Sweco, 2022)

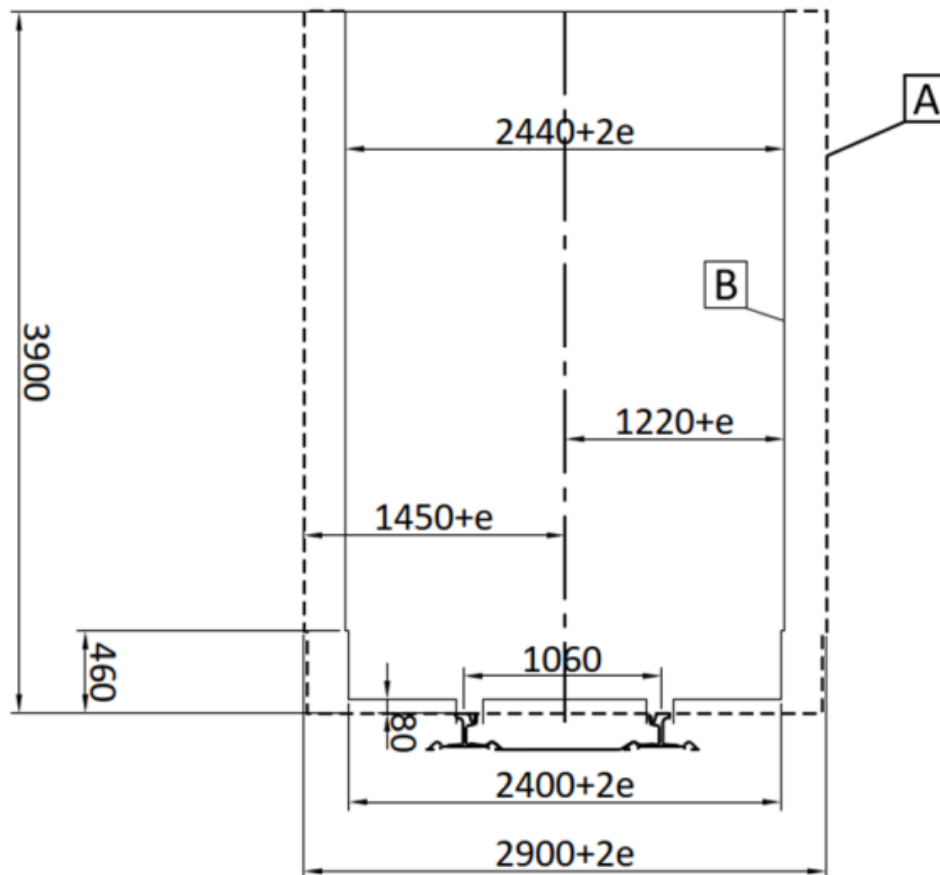
3 ATU-keilaus

3.1 Aukean tilan ulottuma ja ATU-keilaus

Aukean tilan ulottuman tarkoituksena on turvata raitiovaunun tai junan turvallinen ja esteetön liikkuminen raiteilla. Aukean tilan ulottumalla tarkoitetaan rata-aluetta, jonka sisäpuolella ei saa olla kiinteitä rakenteita eikä laitteita. Radan aukeasta tilan ulottumasta käytetään kirjainlyhennettä ATU.

“Aukean tilan ulottuma mitoitetaan raiteen keskilinjaa vastaan kohtisuorassa tasossa, leveyssuunnassa vaakasuoraan raiteen pystysuorasta keskilinjasta ja korkeussuunnassa pystysuoraan raiteen kiskon selän korkeudesta (ksk) lukien.” On suora lainaus Väyläviraston Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 2 Radan geometria, 2022 ohjeesta aukean tilan ulottumalle. Radan aukea tilan tulee olla leveämpi kaarteissa ja vaihteissa kuin suorilla osuuksilla, jotta rakenteet ja laitteet eivät osu radalla kulkevaan raitiovaunuun. Tarkemmat mitat ATU:n määrittämiseen tulee projektin suunnitteluohjeesta tai tilaajan antamien vaatimusten mukaan. Raide-Jokerilla käytetyt ATU:n mitat tulevat yleisestä suunnitteluohjeesta, joka on liitteenä 1. tässä opinnäytetyössä. Ohjeita löytää myös esimerkiksi Helsingin kaupungin nettisivuilla olevasta raitioteiden suunnitteluohjeesta. Ohjeessa määritellään tarkasti, miten kaupungissa ATU tulisi suunnitella. Esimerkki raitiovaunun vaatiman aukean tilan ulottumasta Helsingin kaupungin ohjeistuksessa suoralla rata-alueella esitetty kuvassa 9. Mittayksikkönä kuvassa toimii millimetri. (Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 2 Radan geometria, 2022 ja Raitiotien tilavaatimukset, 2023)

Kuva 9. Aukean tilan ulottuma suoralla rata-alueella. (Raitiotien tilavaatimukset, 2023)



- A Aukean tilan ulottuma (ATU)
 B Raitiovaunun rungon äärimitat

e = ulottuman kaarrelevitys

ATU-keilauksella tarkoitetaan rataosuudesta tehtävää mobiililaserkeilausta.

Mobiililaserkeilaus on ajoneuvosta tai kulkuvälineestä suoritettava laserkeilaus.

Laserkeilauksella saadaan aikaan pistepilvimateriaalia, jota voidaan tarkastella

yhteensopivilla sovelluksilla ja pilvipalvelu työkaluilla. Esimerkiksi radan rakentamiseen tai kunnossapito tarpeisiin soveltuvaksi kartaksi.

Laserkeilaus perustuu yhteen tai useampaan laserkeilaimeseen ja GNSS-vastaanottimeen sekä inertiamittausyksikköön (IMU). Lisäksi keilauslaitteistoon on yhdistetty kameroita kuvaamaan ajoreitin ympäristöä. Kameroiden avulla pystytään värjäämään keilausaineisto vastaamaan luonnollista väritystä. (Siivola, 2013)

3.2 Mittausvälineiden ja mönkijän esittely

Raide-Jokerin rata laserkeilattiin Trimblen MX9 mobiililaserkeilaimella. Trimble Inc on yhdysvaltalainen vuonna 1978 perustettu GPS-järjestelmiä, maanmittauskojeita ja ohjelmistoja valmistava yritys. Trimble MX9 on mobiilikartoituslaitteiden viimeisintä premium-luokkaa ja se on maailmanlaajuisesti todella suosittu. (Trimble MX9, 2023)

Trimble MX9 GNSS/IMU-järjestelmän avulla, laite tallentaa 200 Hz taajuudella liikkuvan alustan asennon ja sijainnin. Tukiasemien avulla voidaan kuvattu materiaali keskittää senttien tarkkuuteen kartalle. Trimble MX9 pystyy laserkeilauksen aikana kuvaamaan myös laadukasta 30 megapikselin HDR-tasosta 360-kuvamateriaalia. Lisäksi laitteesta löytyy kolme viiden megapikselin erilliskameraa, jotka voidaan asettaa kuvaamaan jotain tiettyä kohtaa maastosta esimerkiksi tietä tai ojaa. (Trimble MX9, 2023)

Trimble MX9 on suunniteltu siten, että laitteiston asentaminen ja irrottaminen tapahtuu helposti ja nopeasti. Laitteisto painaa vain 37 kg, mikä mahdollistaa sen asentamisen yksinään esimerkiksi ajoneuvoon. Laitteeseen on saatavilla paljon valmistajan tekemiä kiinnikkeitä, joilla laitteen pystyy kiinnittämään tukevasti ajoneuvoon. (Trimble MX9, 2023)

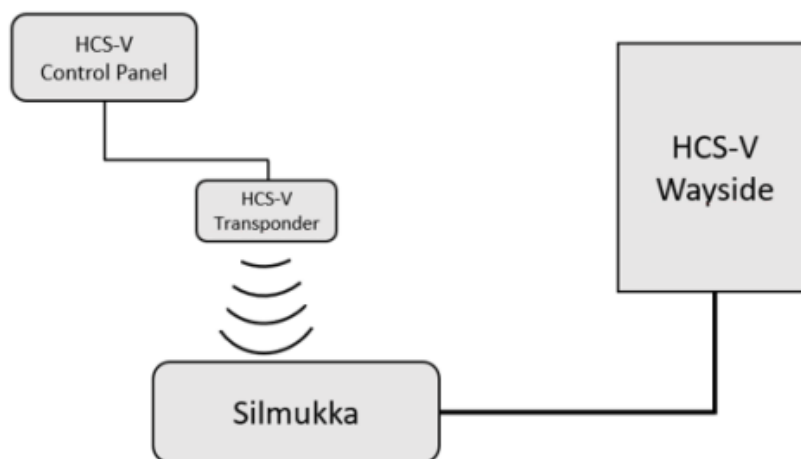
Raide-Jokerin raitiotien kiskoprofiilina käytetään nurmi- ja asfalttipinnalla urakiskoja ja sepelirataosuuksilla, sekä joillakin nurmiosuuksilla käytetään Vignole-kiskoja. Raide-Jokeri on vuokrannut käyttöönsä NRC Groupin omistaman Polaris Sportsman 570 mönkijän, mihin on kiinnitetty 340 mm kiskopyörät. Kiskopyörämönkijän raideleveys on yksi metri, joka on sama kuin Helsingin kantakaupungin radan. Oheisessa kuvassa 10. on tarkemmat speksit mönkijän mitoista. (Kiskopyörämönkijän käyttöohjeet, 2020)

Kuva 10. Kiskopyörämönkijän tiedot. (Kiskopyörämönkijän käyttöohjeet, 2020)

Base vehicle	
Dimensions:	L x W x H 2000 x 1600 x 1400 mm on track
Weight:	Net weight (unladen): 330 kg
Power:	approx. 44 hp, AWD
Speed, paved road:	approx. 15 km/h
Speed, unpaved road:	max. 5 km/h
Payload on-road/off-road:	max. 1 person (suspension is limited and rigid at rear)
Track equipment	
Track wheels:	Ø 340 mm HKL Jokeri line profile (steel)
Operation:	Manual operation for putting track equipment into operation
Weight:	350 kg (incl. ballast for traction)
Speed on-track:	max. 20 km/h
Payload on-track:	max. 2 people + 100 kg (luggage rack) or 2x trailers

Kiskopyörämönkijään on asennettu Hanning & Kahl HCS-V -järjestelmä, minkä avulla on mahdollista kääntää kiskoja vaihteita. Järjestelmään kuuluvat mönkijän ohjaamossa oleva kääntövipu, mönkijän pohjassa oleva HCS-V Transponder (lähetin), kiskoja välissä oleva silmukka (vastaanotin), sekä vaihteenohjauskeskuksessa sijaitseva HCS-V Wayside-laitteisto katso kuva 11. (Lappalainen, 2021)

Kuva 11. Kiskokääntölaitteen toimintaperiaate. (Lappalainen, 2021)



Mönkijän kuljettaja antaa kääntövivusta komennon, joka välittyy mönkijän pohjassa olevalle lähettimelle. Kun mönkijä ajaa silmukan yli, silmukka vastaanottaa lähettimeltä tulleen käskyn vaihtaa kiskoja vaihteen asentoon.

Kiskojen välissä olevat silmukat on kytketty vaihteenohjauskeskuksessa sijaitsevaan HCS-V Wayside-laitteistoon, joka välittää kuljettajan antaman komennon vaihteenohjausjärjestelmälle. Vaihteenohjausjärjestelmä kääntää vaihteen komennon mukaiseen asentoon.

Kiskopyörämönkijä mukailee ratikkaa ja sillä pystyy tekemään testejä eri järjestelmille simuloimalla ratikan toimivuutta. Mönkijää käytetään Raide-Jokerilla muun muassa vaihteenohjauksen testaukseen, liikennevalojen FAT-testeihin, kiskojen tasaisuuden mittaukseen ja ATU-keilaukseen.

3.3 Laserkeilauksen valmistelu

ATU-keilauksen valmistelu alkoi suunnittelemalla laserkeilattavat alueet. Raide-Jokerin ATU-keilauksesta tehtiin ajosuunnitelma, minkä perusteella osattiin rajata sopivan mittaisiin keilaus ajoihin. Raide-Jokerin 25 km pitkä rata-alue jaettiin seitsemään eri keilausalueeseen. Keilattavat alueet olivat testikeilaus, Espoo kahdessa osassa, Helsinki kahdessa osassa, Pääte pysäkit ja Varikkoalue. Jokaisesta keilauksesta tehtiin myös TLJ-suunnitelma eli tilapäinen liikennejärjestely, jossa tutkailtiin keilattavan alueen turvallisuuden riskitilanteet. TLJ-suunnitelmat tekee projektin TLJ-suunnittelija yhdessä projektin mittauspäällikön kanssa.

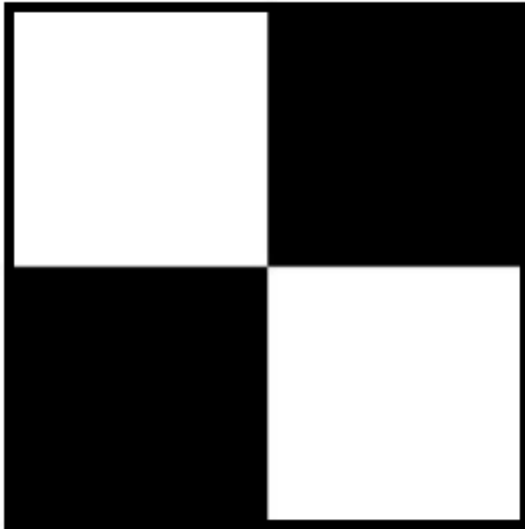
Suurimpana riskitilanteena pidettiin rata-alueen ja jalkakäytävän/ajoväylän risteävät ylityskohdat. Risteyksissä oli otettava erityisesti huomioon, että kiskopyörämönkijä kulkee raitiovaunukiskoja pitkin eikä ajoväylällä. Tämä tarkoittaa sitä, että pienen mönkijän havaitseminen raiteella olisi hankalampaa kuin raitiovaunun. Lisäksi kuvaukset suoritettiin siihen aikaan, että alueella ei vielä ollut raitiovaunuja ajanut kiskoja pitkin. Ihmisille ja autoilijoille kiskoilla menevä kiskopyörämönkijä olisi uusi tuttavuus, joka tarkoittaa erityistä varovaisuutta turvallisuussuunnittelussa. Estääkseen onnettomuudet risteyskohdissa, jokaista keilausta varten varattiin kolmesta kuuteen liikenteenohjaajaa. Liikenteenohjaajat pysäyttivät jalkakäytävän ja ajoväylän siksi ajaksi, että kiskopyörämönkijä pääsee ajamaan ohi pysähtymättä. Tämä oli todella tärkeää, jotta keilaus sujuu ongelmitta.

Raide-Jokerin kohteiden mittaamiseen tarvitaan useampia laserkeilauksia. Pistepilvet pystytään yhdistämään yhdeksi suureksi pistepilveksi, kun ne ovat liitetty samaan koordinaatistoon. Tähykset ovat apuvälineitä, joita käytetään apuna pistepilvien loppukäsittelyssä. Kaikkien käytettyjen tähyksien tarkat sijainnit on mitattu takymetrillä. Tähysten avulla pistepilvimateriaalit voidaan parhaimmillaan yhdistää toisiinsa 1–3 mm tarkkuudella ja kohdistaa samaan koordinaatistoon. Tähykset ovat yleensä väriltään heijastinpohjaisia tai mustavalkoisia, sekä muodoltaan pallomaisia tai neliön mallisia mittapisteitä laserkeilaimelle (katso kuvat 12. ja 13). Raide-Jokerin laserkeilauksessa käytettiin pääsääntöisesti mustavalkoisia neliön mallisia tarroja, joita oli liimattu noin 80–100 metrin välein pitkin rata-aluetta ratasähköpylväisiin. Varikolla rakennuksen sisäpuolella tehtiin laserkeilaus eri keilaimella ja orientoitiin kuvan 12 kaltaisilla tähyksillä, eikä käytetty GNSS-mittausta.

Kuva 12. Heijastinpohjainen tähyks. (Tähyks YBRT-K, 2023)



Kuva 13. Mustavalkoinen tähys.



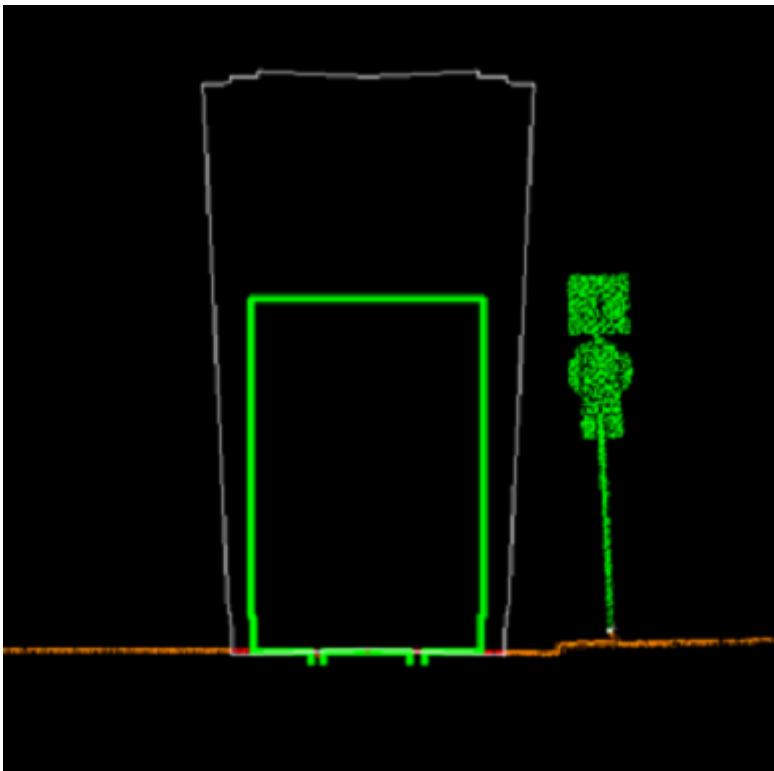
3.4 Mobiililaserkeilauksen toteutus

ATU-keilaukset aloitettiin aina kokoontumalla aloituspaikkaan käyden päivän kuvaussessio läpi. Paikalle tuli vähintään Raide-Jokerin mittauspäällikkö, TLJ-suunnittelija, mönkijän kuljettaja, liikenteenohjaajat ja GeoTrimmin keilauspäällikkö. Kiskopyörämönkijä ajettiin pääsääntöisesti varikolta kuvauspaikalle. Samalla kun käytiin päivän ohjelmaa läpi aloituspaikalla, GeoTrimmin porukka asetti laserkeilaimen kiinni kiskopyörämönkijään. Kun kiinnitykset oli saatu valmiiksi, aloimme olla valmiita kuvauksen aloittamiseen. Jouduimme kuitenkin odottamaan vielä hetken laserkeilaimen lämpenemistä ja verkkoyhteyden muodostumista. Kun kaikki oli valmista ja liikenteenohjaajat olivat paikoillaan oikeissa risteyksissä, mittauspäällikkö antoi luvan liikkeelle lähtöön.

Ensimmäinen ATU-keilaus oli testikeilaus, jonka tarkoituksena oli testata keilauksessa käytetyn laitteiston yhteensopivuus, sekä määrittää tarkkeiden oikea koko ja määrän riittävyys keilausta varten. Testikeilaus suoritettiin 25.4.2022 Espoossa E10-E11 alueella. Alue oli vähän liikennöidyllä alueella, jossa kulki vain busseja ja autoja omakotitaloalueelle. Alue sopi hyvin testikeilaukseen, sillä siinä oli mukana suorita osuuksia, mutka ja raitiovaunun pysäkkialue. (Raide-Jokerin ATU-tarkastelu loppuraportti, 2023)

Testikeilauksen aikana selvitettiin riittääkö pienet tähykset keilauksen kohdistamiseen, mutta ne todettiin liian pieniksi, sillä niihin ei osunut keilauksessa riittävästi keilauspisteitä ja vaihdettiin isompiin tarramallisiin tyhyksiin (katso kuva 13). Tähyksiä liimattiin ratasähköpylväisiin noin 80–100 metrin välein. Kaikki tähystarrat mitattiin takymetrillä tarkasti Raide-jokerin mittausperustan pisteistä. Testikeilauksen aineiston avulla luotiin koko radan ATU-tarkastelun maskit (katso kuva 21). ATU-maskia käytetään linjan ja varikon tarkastelun tukena. Kuvassa 14 alhaalla on ATU-tarkastelun tulos. Valkoisella on esitetty ATU:n ääriiviivat ja vihreällä raitiovaunun ääriimitat. (Raide-Jokerin ATU-tarkastelu loppuraportti, 2023)

Kuva 14. ATU-tarkastelun tulos. (Raide-Jokerin ATU-tarkastelu loppuraportti, 2023)



Toinen ATU-keilaus suoritettiin Espoossa Aalto-yliopistolta Vermoon (kuva 15). Espoon ATU-keilaus suoritettiin yhdellä kertaa lukuunottamatta Keilaniemen pääte pysäkkiä. Alhaalla kuva 15. havainnollistaa keilausalueetta. Keilausalueella tuli huomiona, että radan ympäristössä näkyi paljon korkeahkoa ruohikkoa ja muuta kasvillisuutta sekä mahdollisia työvälineitä. Näin ollen keilausmateriaali ei ollut niin tarkkaa, kuin olisi toivottu. Muulta osin keilaus sujui ongelmitta. (Raide-Jokerin ATU-tarkastelu loppuraportti, 2023)

Kuva 15. Toinen ATU-keilausalue (Raide-Jokerin ATU-tarkastelu loppuraportti, 2023)



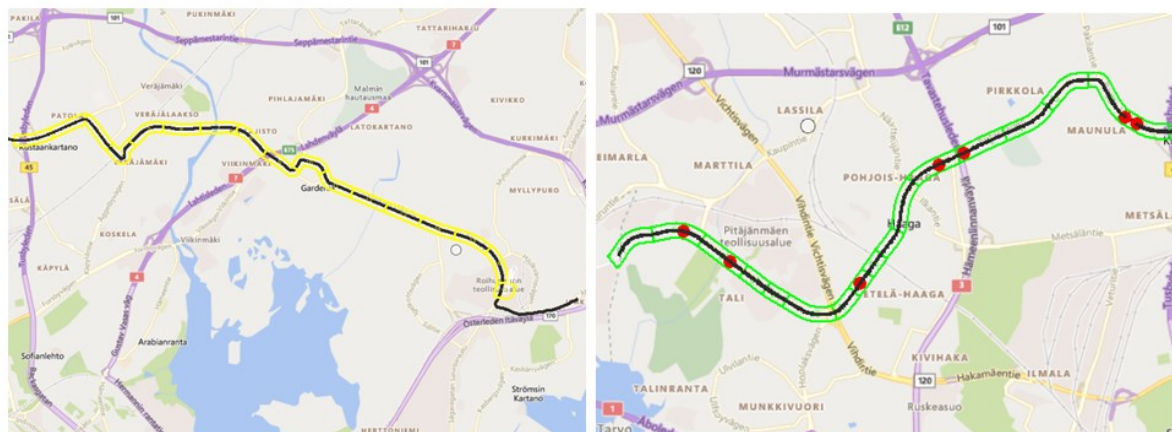
Kolmas ATU-keilaus suoritettiin Raide-Jokerin varikolla Helsingin Roihupellossa 12.5.2022. Varikon alueella on yksiraiteista rataa noin 4 km verran ja alueella on 24 vaihdetta. Varikkoalueella radat kulkevat ulkona ja sisällä, joista osa radoista menee varikko rakennuksen läpi ja osa päättyy sisälle. Alueesta tekee keilaukselle haastavan se, että raiteita on monia ja rakennukset kiinteät asennukset peittävät osan keilausalueesta.

Kuva 16. Raide-Jokerin varikko Vector.io-sovelluksessa. (Vector.io, 2023)



Varikolla rakennuksen sisäpuolella laserkeilaus tehtiin eri keilaimella kuin muilla alueilla. Sisätiloissa käytettiin Trimble MX7 -laserkeilainta ja laite orientoitiin tähystarrojen avulla käsin liikuttelamalla. Keilauspäivänä varikkoalueella oli näkyvissä paljon irtonaista tavaraa, ihmisiä ja nostokalustoa, jotka hankaloittivat osittain esteiden tulkintaa materiaalin jälkikäsitelyssä. Siksi tarkastelussa on mukana mahdollisesti esteeksi luokiteltavia kohteita, jotka eivät todellisuudessa niitä ole. (Raide-Jokerin ATU-tarkastelu loppuraportti, 2023)

Kuva 17. Neljäs ja viides ATU-keilausalue (Raide-Jokerin ATU-tarkastelu loppuraportti, 2023)



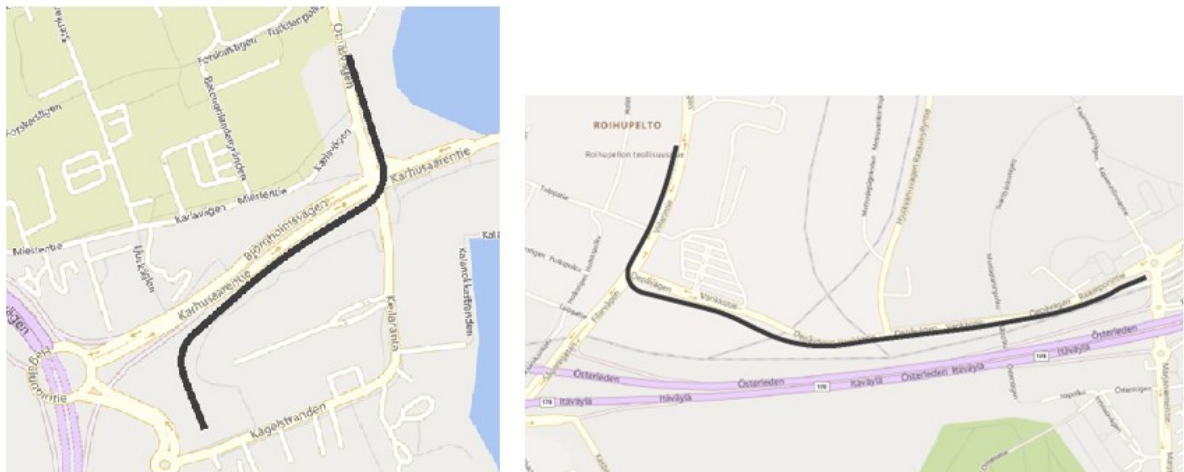
Neljäs ja viides ATU-keilaus suoritettiin 13.9.2022. ja 7.10.2022. Helsingin rataosuuksilla. Alueelle sijoittui myös Patterimäen tunneli ja Huopalahden tunneli, joissa keilaus piti tehdä kumpaakin raidetta pitkin ajaen, että saimme varmasti kuvattua kummatkin raiteet. ATU-keilaukset sujuivat Helsingissä lähes ongelmitta, sillä rata-alueet olivat lähes valmiit ja viimeisiä töitä tehtiin vielä. ATU-keilauksien aikana eteen tuli pari työkonetta ja taksia, joita jouduimme ohjeistamaan siirtymään pois edestä. Koska ATU-keilaus jouduttiin pysäyttämään hetkeksi, piti mönkijän peruuttaa lähimmän tähyksen kohdalle ja jatkaa siitä matkaa. Tähyksistä on enemmän kerrottu kohdassa 4.3 Laserkeilauksen valmistelu. Muuten ATU-keilaukset sujuivat ongelmitta. Alla olevassa kuvassa 18 on kiskopyörämönkijä Viikin Prisman kohdalla. (Raide-Jokerin ATU-tarkastelu loppuraportti, 2023)

Kuva 18. Kiskopyörämönkijä ja Tribler MX9 -mobiililaserkeilain.



Viimeinen ATU-keilaus tehtiin Keilaniemen ja Itäkeskuksen päätepysäkeillä. Raide-Jokerin päätepysäkit päätettiin rakentaa viimeisten osuuksien aikana, useasti muuttuvien lisähankkeiden takia. Tämän takia päätepysäkkien ATU-keilaukset päätettiin tehdä vasta viimeisenä. ATU-keilaukset aloitettiin Keilaniemen pysäkiltä, minne mönkijä tuli poikkeuksellisesti peräkärriyllä. Ajaminen varikolta tuntui turhan raskaalta vaihtoehdolta, joten päädyimme kuljettamaan mönkijän peräkärriyllä Keilaniemen pysäkillä. Keilaniemen Keilauksen jälkeen purimme tavarat ja suuntasimme kohti Itäkeskuksen pysäkkiä. Myös Itäkeskuksen pysäkin kuvaaminen onnistui ongelmitta ja häiriöitä. Lopuksi purimme kaikki tavarat ja suuntasimme yhteiselle lounaalle läheiseen kauppakeskukseen. (Raide-Jokerin ATU-tarkastelu loppuraportti, 2023)

Kuva 19. Kuudes ATU-keilausalue (Raide-Jokerin ATU-tarkastelu loppuraportti, 2023)



Laserkeilauksen jälkeen Geotrim tyhjensi aineistot laserkeilaimen SSD-levyltä tietokoneelle tai verkkoasemalle. Verkkoasema on säilytyksen kannalta parempi, sillä silloin aineisto on myös muiden käyttäjien saatavilla. Jos aineisto siirretään verkkoasemalle, verkon pitää olla nopea, muuten aineiston lukeminen ja kirjoittaminen on hidasta ja vie enemmän aikaa. (Steffansson, 2022)

Laserkeilausmateriaali käsitellään Trimble Business Center -sovelluksella, jossa määritellään aineistolle koordinaatisto, sekä tehdään tarvittavat korjaukset. Kun laserkeilausmateriaali on muunnettu vaadittuun koordinaatistoon, voidaan aineisto toimittaa eteenpäin.

Laserkeilausaineistot toimitetaan pääsääntäisesti .las-muotoisina ja ortokuva-aineistot .tiff, .geotiff- tai .jpg-muotoisina. (Steffansson, 2022; Forsell, 2022)

4 Laserkeilauksen tulokset

4.1 Pistepilvi

Pistepilvi on kolmiulotteinen aineisto kuvatusta kohteesta ja koostuu miljoonista yksittäisistä pisteistä. Pistepilvimateriaalia voidaan käsitellä erilaisilla yhteensopivilla sovelluksilla.

Sovelluksien ominaisuudet vaihtelevat toisistaan, mutta yhteisiä ominaisuuksia on esimerkiksi 3D-kuvan pyörittäminen, kohteen etäisyyksien mittaaminen ja karttapohja. Pistepilvimateriaalia voidaan käyttää esimerkiksi radan rakentamisessa havaittujen ongelmakohtien löytämiseen tai hankalan kohteen kunnossapitoa helpottaviin tarpeisiin. Oheisessa kuvassa 20 on esimerkki Raide-Jokereilla tehdystä ATU-keilauksesta ja sen pistepilvimateriaalin käytöstä Vektor.io -sovelluksella.

Kuva 20. Pistepilven havainnekuva. Kuva esitetty Vektor.io-sovelluksella. (Vector.io, 2023)



Pistepilviaineiston luokittelu tarkoittaa, että pisteet jaetaan eri tasoihin. Tasojen avulla pystytään erottamaan eri pisteet toisistaan laittamalla taso näkyviin tai piilottamalla se. Tasot mahdollistavat sen, että pistepilviaineistosta saadaan poimittua pienempiä osioita käsiteltäväksi esimerkiksi pelkkä maanpinta. Tasojen nimiä ja väriä voi muokata haluamallaan tavalla, mikä helpottaa laajan materiaalin käsittelyä. Pistepilvimateriaalin luokittelu tehdään siihen tarkoitukseen sopivalla ohjelmistolla. Yleensä ohjelmistosta löytyy oma algoritmi, joka sijoittaa pisteet automaattisesti tietyille tasoille. Automaattisen käsittelyn jälkeen aineisto tulee vielä tarkistaa itse, jotta vääriä pisteitä ei ole päätyneet sille kuulumattomalle tasolla. Pistepilven luokittelu muistuttaa CADs-suunnitteluohjelman eri piirustustasoja. (Raidejokerin ATU-tarkastelu, 2023)

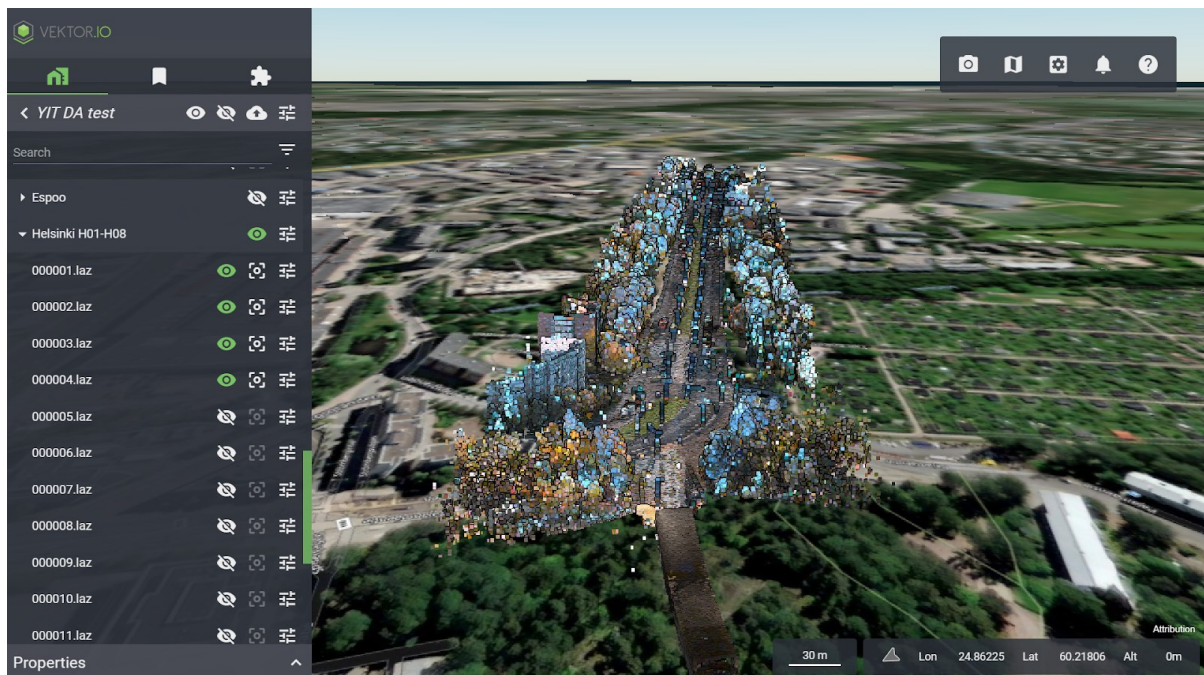
4.2 Pistepilvimateriaalin käyttö Raide-Jokerilla

Raide-Jokerin laserkeilausmateriaalista tehtiin pistepilvi. Pistepilvimateriaalin avulla pystytään katselemaan laserkeilattua aluetta 3D-mallina. Näin ollen kuvastusta keilausalueesta saatiin todellisuuden mukainen kuva. Raide-Jokerilla on käytössä Vector.io verkkosovellus.

Vector.io on suomalainen ohjelmistoyritys, joka tarjoaa 3D-ohjelmisto ratkaisuja asiakkailleen. Vector.io online on verkossa toimiva 3D-BIM ohjelmisto, minkä avulla käyttäjä voi tarkastella BIM- ja GIS-ohjelmistoja. Vektor.io:n käyttäjinä on muun muassa Väylävirasto, Helsingin kaupunki, Ramboll Finland Oy ja monet muut isot toimijat. Meidän Raide-Jokerin käyttämä lisenssi tulee YIT Oyj puolesta. (Vector.io, 2023)

Vector.io:n avulla käyttäjä pystyy katselemaan omia pistepilvi materiaaleja verkko-osoitteessa ilman minkäänlaisia ohjelmien asennuksia. 3D-malleja pyöritellään oman näppäimistön ja hiiren avulla, joten ohjelman käyttäminen onnistuu vaikka liikkuvassa junassa. Vector.io:n avulla käyttäjä pystyy asettamaan oman pistepilvimateriaalinsa valmiin karttapohjan päälle ja katselemaan missä keilausmateriaali on kuvattu. Keilausmateriaali kannattaa ladata sovellukseen pienemmissä kokonaisuuksissa, sillä pistepilvi tasoja pystyy laittaa näkyviin yhden tai useamman samaan aikaan. Käyttäjällä pystyy siirtymään nopeasti eri kokonaisuuksiin kartalla, sivussa olevan valikon kautta. Mitä vähemmän pistepilviä tasoja on näkyvissä kerralla, sitä vähemmän tehoa sovellus vaatii tietokoneelta. Alhaalla kuvassa 21. esimerkki pistepilvi tasoista. Tasot näkyvät vasemmassa laidassa. Vihreä silmä kuvaa, että taso on näkyvissä ja valkoinen piilotettu. (Vector.io, 2023)

Kuva 21. Pistepilvi Vector.io-sovelluksessa. (Vector.io, 2023)



Raide-Jokerilla kuvattua pistepilveä pääsee katsomaan kaikki halukkaat työntekijät pyytämällä tunnukset Vector.io-palveluun Raide-Jokerin mittauspäälliköltä. Tunnuksia on esimerkiksi mittamiehillä, BIM-asiantuntijoilla ja osalla työnjohtajista. Pistepilvi helpottaa maaston tutkimista myös etäältä ja aina ei siis tarvitse mennä työmaalle tarkistamaan jotain kohdetta erikseen. Raide-Jokerilla on käytössä myös Infrakit-palvelu minkä avulla pystyy kätevästi katsomaan radan suunnitelmia kartalta ja kuvattua 2D Drone-kuvaa maastosta. Mutta kaikkea Infrakitillä ei voi tehdä ja siksi Vector.io on kiva lisätyökalu työn tekemiseen. Laserkeilaus ja pistepilvi on suhteellisen uutta teknologiaa ja aina kun olen esitellyt sitä töiden ulkopuolella, saan ihailevia kommentteja. Pistepilvimateriaalit ovat vasta tulossa paremmin tunnetuksi työmaiden tuotannossa.

4.3 ATU-tarkastelu raportti

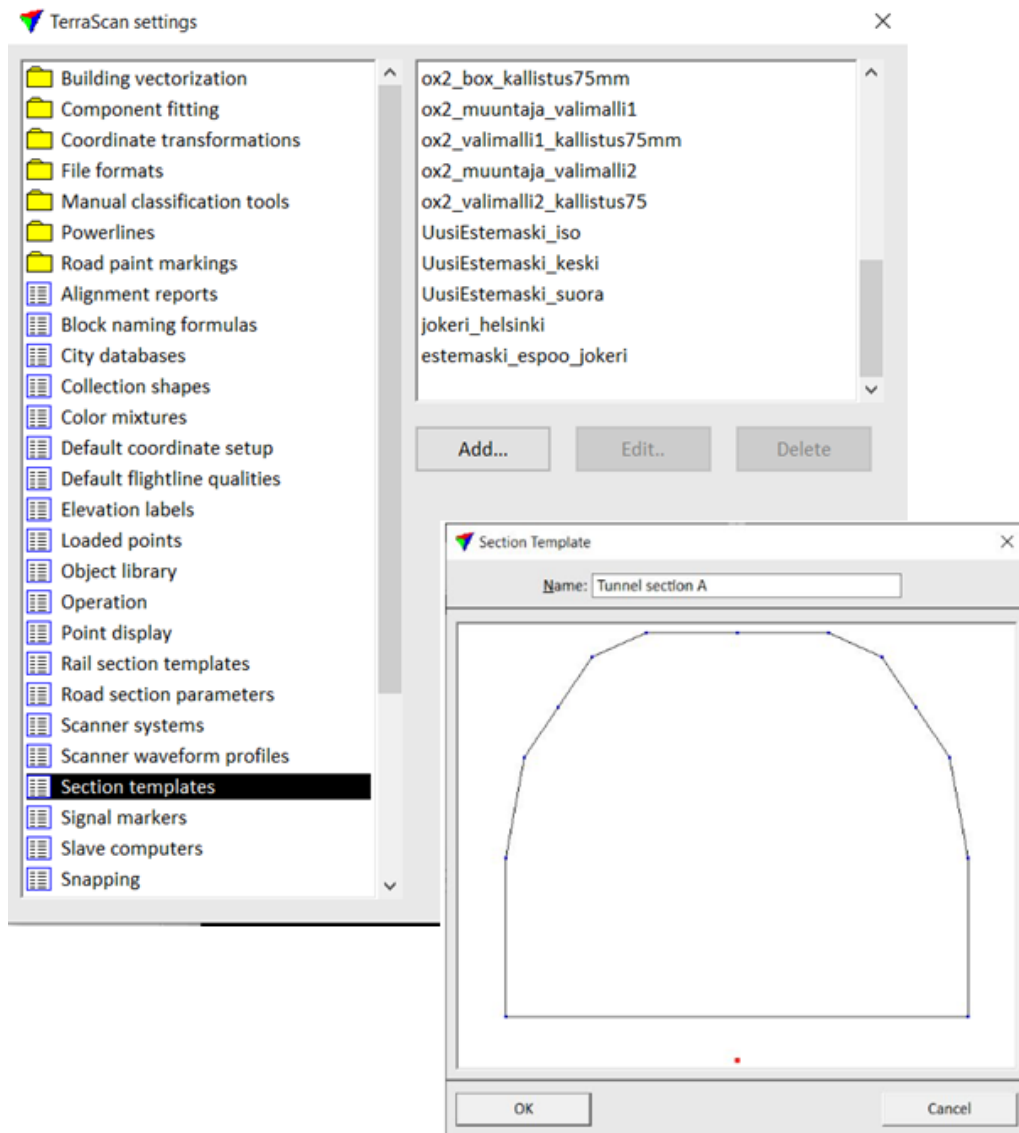
Swecon tehdessä sopimuksen ATU-keilauksesta Raide-Jokerin kanssa, he samalla lupautuivat tekemään raportin kaikista ATU-rikkeistä, mitä radalla havaittiin. Raportin pohjalta Raide-Jokerin tuotanto voisi tehdä tarvittavat muutostyöt rata-alueella.

Kun pistepilvimateriaali oli saatu kuvattua, Geotrim lähetti luokittelemattoman pistepilven, ajorata tiedot, panoraamakuvat ja niiden metadatat Swecolle jatkokäsittelyä varten. Pistepilven käsittelyyn Sweco käytti MicroStation-ohjelmaa, jonka päälle oli vielä avattu TerraScan-lisäosa. MicroStation on Bentley Systemsin omistama suunnitteluohjelma ja sillä pystyy piirtämään vektorigrafiikkaa sekä kaksi- että kolmiulotteisesti. TerraScan on taas Terrasolidin ohjelma käsittelemään kaiken tyyppisiä pistepilvimateriaaleja. Näiden ohjelmien avulla Sweco käsitteli pistepilvi materiaalin ja työsti ATU-virheistä raportin. (Raidejokerin ATU-tarkastelu, 2023)

Sweco aloitti pistepilvimateriaalin käsittelyn jakamalla sen omiin luokkiin. Karkean pistepilven luokittelun saa tehtyä automaattisesti MicroStationia käyttämällä. Karkean luokittelun jälkeen pitää luokiteltu materiaali käydä vielä läpi manuaalisesti hajanaisten väärin pisteiden takia ja siirtää väärin luokitellut pisteet oikeisiin luokkiin. Luokittelun jälkeen pistepilven käsittely on helpompaa. (Raidejokerin ATU-tarkastelu, 2023)

ATU-tarkastelu tehdään pistepilvimateriaalille tekemällä TerraScanilla estemaski. Pistepilvimateriaali skannataan estemaskin läpi ja kohdat missä pisteet ja estemaski kohtaavat ovat ATU-rikkeitä. Estemaskin voi tehdä itse suoraan TerraScan-sovelluksella, joka on esitetty kuvassa 22 tai erikseen lisäämällä DGN-muotoisen tiedoston sovellukseen. ATU-tarkastelussa on hyödynnetty tilaajalta saatuja lähtöaineistoja ATU-maskin ja vaunun äärimittojen määrittämiseksi. Tarkemmat tiedot ATU:n vaatimuksista löytyy Raide-Jokerin suunnitteluperusteista (RJ_000_SOH_Ohje-Suunnitteluperusteet.docx) kohdasta 3.2. Liitteenä 1 olevassa dokumentissa on esitetty suunnitteluperusteet Raide-Jokerin Aukean tilan ulottumalle (ATU). (Raidejokerin ATU-tarkastelu, 2023)

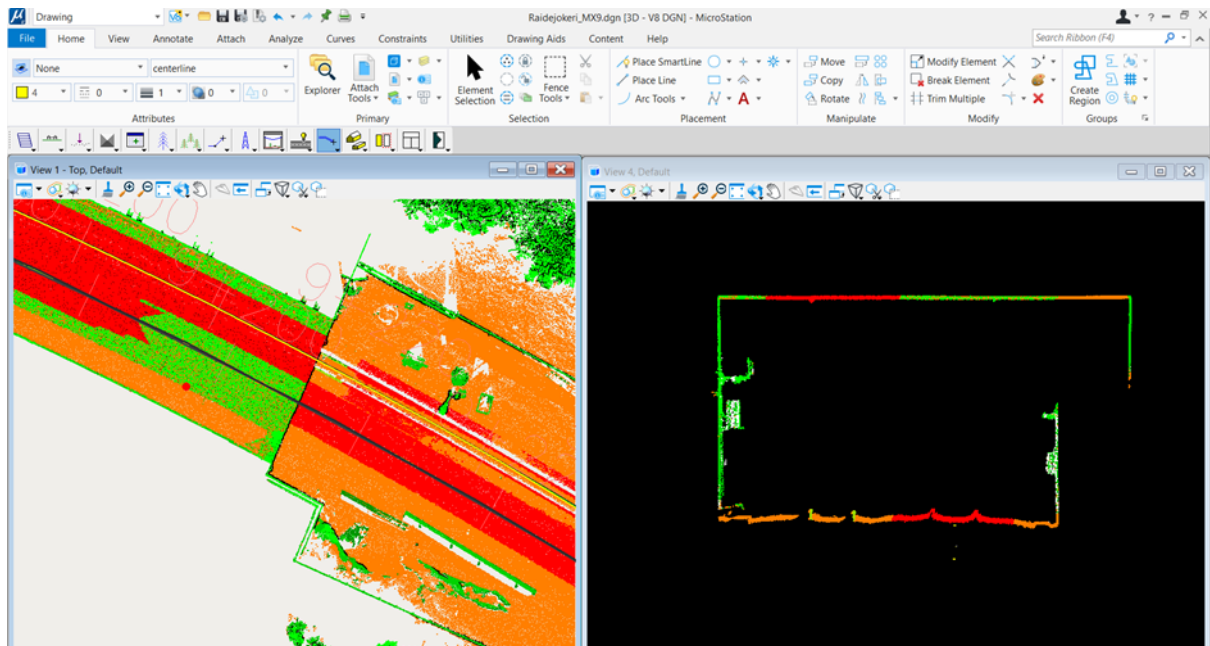
Kuva 22. TerraScan-sovelluksessa tehdyt estemaskit. (Raidejokerin ATU-tarkastelu, 2023)



Raide-Jokerilla käytetty ATU-maski on tehty yhdistämällä suunnitteluohjeissa määritellyt ATU-alueet; ATU-alue suoralla alueella, ATU-alue kaarteessa vasemmalle ja ATU-alue kaarteessa oikealle. Kuva valmiista ATU-maskista esitetty ylempänä kuvassa 22. Raide-Jokerin ATU-maski tehtiin erillisellä sovelluksella DWG-muodossa, mutta muuttamalla se DGN-muotoon, se pystyttiin lisäämään TerraScan-sovellukseen. Kuvassa 22 on esitetty monia erilaisia maskeja, mitä on käytetty Raide-Jokerin ATU-tarkasteluun. (Raidejokerin ATU-tarkastelu, 2023)

Kun ATU-tarkastelu on tehty pistepilvi materiaalille, pystytään ATU-rikkeitä selaamaan MicroStation-ohjelmalla. Travelpath-toiminnon avulla käyttäjä pystyy liikkumaan rikkeestä toiseen ja näin ollen liikkuvuus radalla on helppoa. ATU-rikkeitä pystyy katsomaan ylhäältä päin kuten kuvan 23 “View 1” ikkunassa on esitetty, tai sitten yleisimmin käytössä oleva poikkileikkauskuva “View 4”. Käyttäjällä pystyy lisäämään poikkileikkauskuvaan myös erilaisia Cell:lejä. Cell:it ovat lisättäviä symboleja ja muotoja minkä apunaan käyttäjä pystyy havainnollistamaan tarkemmin esteitä. Esimerkki kuvassa 22 on käytetty poikkileikkauskuvan päällä ATU-maskia ja raitiovaunun ääri viivoja. (Raidejokerin ATU-tarkastelu, 2023)

Kuva 23. Poikkileikkauskuvat esittynä ylhäältä ja sivusta päin. (Raidejokerin ATU-tarkastelu, 2023)



Sweco teki kaikista ATU-rikkeistä raportin, missä oli esitetty ATU-rikkeet kuvausalueittain. Kuvausalueita oli testikeilaus, varikko, Espoo, Helsinki ja pääte pysäkit. Jokaisen keilausalueen alle oli otettu kuvakaappaus ATU-rikkeen poikkileikkauskuvasta ja sen sijainti oli esitetty Raide-Jokerilla käytettyjen paalulukujen mukaan. Paalulukujen sijainnin voi katsoa Excel-taulukosta tai Infrakit-sovelluksesta. Paaluvun perusteella ATU-riike oli helppo paikantaa rata-alueelta.

Raporttia työstettiin osissa, sillä kaikkia alueita ei ATU-keilattu samaan aikaan. Aina kun jokin alue oli saatu tarkasteltua loppuun, toimitettiin osaraportti Raide-Jokerille. Lopuksi, kun kaikki alueet olivat tarkasteltu, Sweco toimitti lopullisen raportin työstään kaikkien nähtäväksi.

4.4 Raportin ja rakentamisen yhteydessä löytyneet korjattavat kohteet

Kun ATU-tarkastelu oli saatu tehtyä Swecon puolesta, he toimittivat Raide-Jokerin mittauspäällikölle raportin ATU-rikkeistä. ATU-rikkeet oli merkattu raporttiin kohta kohdalta. Kohde on helppo paikantaa 25 km pituiselta rata-alueelta, kun ATU-rikkeet on kerrottu tarkasti paalulukuja käyttäen. Raide-Jokerin mittauspäällikkö välitti raportin jokaiselle tuotantolohkolle, joita raportin osa-alueet koskivat. Lohkojen oma henkilöstö tutustui raporttiin ja sen perusteella lähtivät käymään ATU-rikkeitä läpi.

ATU-rikkeet vaihtelivat paljon toisistaan ja niiden tulkitseminen oli melko haastavaa poikkileikkauksuvasta. Osa rikkeistä johtui suoraan siitä, että ATU-keilaus suoritettiin osittain keskeneräisillä rataosuuksilla, missä rakennustyöt olivat vielä kesken. Tällaisia ATU-rikkeitä radan varressa oli muun muassa työmaa-aidat, rakennustavara lavat, kaapelikelat ja työkoneet. Nämä rikkeet poistuvat automaattisesti, kun kohteen rakennustyöt kohteessa loppuvat. Muita selkeitä ATU-rikkeitä oli liikennemerkkit ja keskeneräisten ajolankojen roikkuvat osat, kuten väliaikaiset narut ajolanka osien kiinnittämiseen. Kaikki loput ATU-rikkeet mitä emme voineet poikkileikkauksuvista suoraan tunnistamaan, jouduttiin tuotantolohkoilla menemään paikan päälle tarkistamaan mikä on aiheuttanut rikkeen. (Raide-Jokerin ATU-tarkastelu loppuraportti, 2023)

Raporttien pohjalta siirsimme kahta kiinteää liikennemerkkitolppaa ja kahta väliaikaista siirrettävää liikennemerkkiä. Liikennemerkkien korjaaminen oikeaan asentoon oli helppoa ja nopeaa työtä, kun oli kuvassa 24 esiintyvä poikkileikkauksukuva apuna virheen tulkinnassa. Homma saadaan suoritettua parissa tunnissa ja se maksaa itsensä takaisin. Raitiovaunun osuessa liikennemerkkiin olisi kustannukset nousseet moninkertaiseksi.

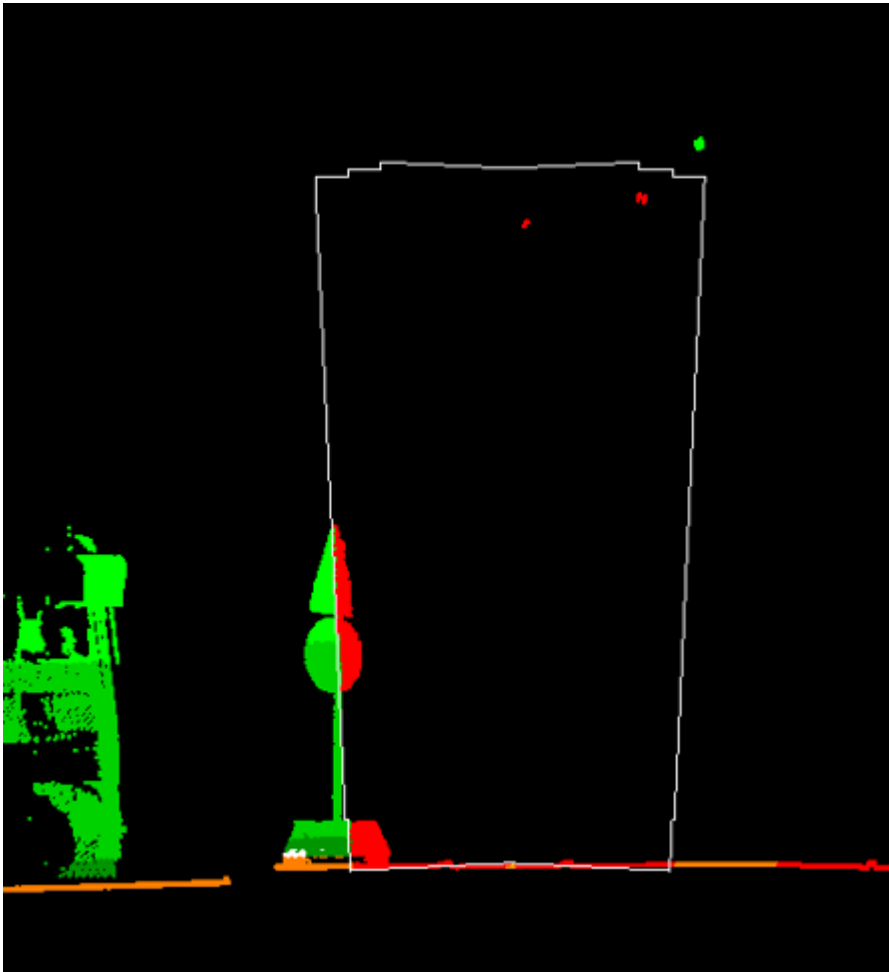
Tämän lisäksi parilla nurmikkoalueella oli havaittavissa ATU-rikkaita, kohteissa oli multaa mylläntynyt kunnossapidon tai ilkeiden seurauksena, joka oli aiheuttanut ATU-rikkaita. Näiden kohteiden korjaaminen onnistui tasoittamalla maa-ainesta uudestaan maantasoon haravalla ja lapiolla. (Raide-Jokerin ATU-tarkastelu loppuraportti, 2023)

Vaikka ATU-raportti oli kattava, sen lisäksi päätimme tehdä erilaisia muutoksia radan varrelta. Lähellä ATU:n rajapintaa olevissa kohteissa siirrettiin lähellä olevia rakenteita varmistaaksemme, että ATU:n turva-alue täyttyy. Yhdessä kohteessa oli samassa tolpassa kaksi vierekkäistä liikennevalo-opastinta, jotka siirrettiin pystysuuntaan päällekkäin ja näin ollen ATU varmasti täyttyy. (Raide-Jokerin ATU-tarkastelu loppuraportti, 2023)

ATU-keilauksesta ja raportista huolimatta kaikkia ongelmia tapauksia ei pystytty löytämään. Espooseen tullessa koeliikenteessä huomasimme, että raitiovaunun lisävarusteena tulleet kynnyksikumit osuvat parilla pysäkillä pysäkin reunakiviin. Ongelmaa esiintyy vain tiukkojen kaarteiden jälkeen olevilla pysäkeillä. Vaunu taipuu kaarteissa ulospäin ja vaunun viimeinen kynnyskumi hankaa pysäkin reunakiveä vasten. Reunakivien asennukset vastaavat suunniteltua, mutta ATU-aluetta suunnitellessa ei ole otettu huomioon lisävarusteena tulevien kynnyksikumien tuomaa lisää leveyttä vaunun äärimitoissa. Korjaustoimenpiteenä joudumme purkamaan ja siirtämään reunakiviä, jotta kosketusta ei tule ja ATU-alue täyttyy. (Raide-Jokerin ATU-tarkastelu loppuraportti, 2023)

Toinen ongelma tapauksista mitä ei selvinnyt ATU-raportista on ajolankojen asennukseen liittyvät rikkeet. Kun rakennetaan 25 km pitkä rata-alue tulee pakolla hienosäädettäviä kohteita radan varrelta. Koeajojen aikana ajolankoja tehneet työntekijät tarkkailevat ajolangan käyttäytymistä raitiovaunun liikkuessa kohteessa. Eräessä kohdassa rata-aluetta raitiovaunun virroitin tarttui kiinni ajolangan kiinnitysorteen ja aiheutti virroitimen ponnahduksen ja virtakatkon. Raitiovaunu selvisi tästä ilman vahinkoa, mutta kohde oli korjattava, jotta vältetään samanlaiselta virtakatkosta jatkossa. Kohde merkittiin ylös ja korjattiin myöhemmin nostamalla kiinnitysortta hieman ylemmäs pylväässä. (Raide-Jokerin ATU-tarkastelu loppuraportti, 2023)

Kuva 24. Poikkileikkauskuva ATU-rikkeestä. (Vector.io, 2023)



5 ATU-keilauksen hyödyt kustannuksissa

Laatu ei tarkoita ainoastaan tilaajan, rakennuttajien ja suunnittelijoiden laadukkaan lopputuotteen tekemistä, vaan myös osa kilpailukyvyn ja yritysten tuottavuutta parantamista, sekä lopullisten rakennuskustannusten pienentämistä. Parhaan laadun takaamiseksi on laadunvarmistus tärkeä osa rakentamisprojektia. Laadun varmistamiseksi Raide-Jokerilla päätettiin tehdä ATU-keilaus ja -tarkastelu. ATU-keilaus tehtiin käyttäen apuna kiskopyörämönkiää ja laserkeilaus olisi mahdollisimman nopea, sekä vastaisi raitiovaunun liikkeitä.

Raide-Jokerille tehdyn ATU-keilauksen ja pistepilvimateriaalin hankintahinta on liikesalaisuus, joten vertailua kustannuksiin ei voida tehdä. Miettiessä mitä kustannussäästöjä ATU-keilauksella saavutettiin, on hyvä pohtia mitä kaikkea olisi voinut käydä, jos ATU-tarkastelua ei olisi tehty Raide-Jokerilla. ATU-tarkastelun avulla tehtiin raportti, minkä pohjalta pystyttiin ennalta ehkäisemään onnettomuuksia rata-alueella ennen teknisen koeliikenteen alkamista.

Rakentaessa isoa infrahanketta, jossa on mukana satoja työntekijöitä ovat pelkästään työntekijöiden palkat miljoonan euron luokkaa kuukaudessa. ATU-tarkastuksen avulla pystyttiin kiristämään teknisen koeliikenteen aloitusta, kun jokaista pysäkkiä, liikennemerkkiä ja pylvästä ei tarvinnut erikseen tarkistaa ATU-ulottuman varmistamiseksi. Koeliikenne-tiimi sai rauhassa valmistautua koeliikenteen aikaisten testien tekemiseen, kun ajettava rata-alue oli tarkastettu etukäteen ATU-tarkastelussa. Mikäli ATU-tarkastelua ei olisi tehty rata-alueelle, olisi koeliikenteen aikana pitänyt jokaisessa mahdollisessa osuma kohdassa ajaa raitiovaunulla todella rauhallisesti ja samalla jännittää osuuko vaunu kohteeseen. Tämä olisi varmasti lisännyt koeajopäiviä ja samalla projektin kustannuksia.

ATU-tarkastelu antoi meille muutakin tärkeää tietoa, kuin vain raportin. ATU-tarkastelun avulla pystyttiin varmistamaan, että Patterimäen tunneli on varmasti tarpeeksi iso Raide-Jokerin raitiovaunuille. Varmistaminen oli erityisen tärkeää, jotta ei kävisi samanlaista virhettä kuin Espanjan Asturiassa ja Cantabriassa, jossa Espanjaan hankitut uudet noin 238 miljoonaa euroa maksaneet junat eivät mahtuneet suunnitellun reitin varrella olevien tunnelien läpi. Kyseinen tapaus on todellinen kriisi Espanjassa ja useat johtohenkilöt ovat eronneet tästä syystä. (The train is too big for the tunnels, 2023)

Noin 11 miljoonaa euroa maksava Patterimäen tunneli on muutenkin Raide-Jokerin haastavimpia rakennelmia. Patterimäen tunneli on 300 metriä pitkä, 11,5 metriä leveä ja korkeutta tunnelilla on kahdeksan metriä. Patterimäen tunnelin sisällä on ajoittain todella ahdasta ja kahden vierekkäisen raitiovaunun väliin jää vain toistakymmentä senttiä. Tästä huolimatta Patterimäen tunneli täyttää ATU:n vaatimukset ja on laillinen rakennelma. Mikäli

ATU-tarkastelussa olisi huomattu tunnelin ja raiteiden olevan liian kapeita, olisi korjauskustannukset ja koeliikenteen siirtyminen voineet nostaa kustannukset kymmenistä tuhansista euroista jopa miljooniin euroihin. ATU-keilaus oli siis halpa ratkaisu koko tunnelin etäisyyksien tarkastamiseen. Ensimmäisen kerran raitiovaunut kulkevat tunnelin läpi vasta koeliikenteen aikana ja silloin on jo liian myöhäistä huomata, että tunneli on esimerkiksi liian kapea kahdelle raitiovaunulle. (Patterimäen raitiotietunneli valmistuu vaihe vaiheelta, 2021)

ATU-tarkastelun avulla pystyttiin estämään mahdollisia kolaritilanteita, sillä mikäli Raide-Jokerin raitiovaunu olisi törmännyt katukivetykseen, puuhun tai pylvääseen ja olisi se vaurioitunut. Korjauskustannuksia pyrittiin selvittämään Škoda Transtech Oy:ltä, joka valmistaa ja korjaa Raide-Jokerin Skoda Artic XL -raitiovaunuja, mutta heidän korjauskustannukset ovat myös liikesalaisuuksia ja niihin ei voida ottaa kantaa. Samaa asiaa pyrittiin selvittää myös raitiovaunu kaluston omistajalta Kaupunkiliikenne Oy:ltä tuloksetta. Valitettavasti tässä opinnäytetyössä ei voitu ottaa kantaa raitiovaunun korjauskustannuksiin.

6 Aineiston hyödyt tulevissa hankkeissa

Tutkimuksen perusteella pystytään toteamaan, että ATU-keilauksen avulla pystyy tuottamaan kattavan pistepilvimateriaalin suhteellisen pienellä vaivalla. Pistepilvi koostuu miljoonista yksittäisistä pisteistä ja materiaalin avulla pystytään saamaan rata-alueesta kolmiulotteinen kuvamateriaali havainnollistamaan pintojen muotoja. Pistepilvi on kätevä tapa tallentaa todennukainen kolmiulotteinen kuvamateriaali rakennetusta alueesta tuleville projekteille. Pistepilvi pysyy muokkaamattomana ja se vastaa sen aikaista laserkeilausaluetta, joten materiaalia voidaan käyttää myös takuuasioiden todiste aineistona.

Mikäli pistepilvimateriaali ladataan verkkopohjaiseen Vector.io-sovellukseen, voidaan sitä katsella missä päin maailmaa vain vaikka omalta kesämökiltä käsin, sillä 3D-malleja pyöritellään oman näppäimistön ja hiiren avulla.

Näin pistepilven käsittely on mutkatonta ja sen jakaminen muille henkilöille onnistuu nopeasti ja ilman materiaalin siirtämistä toiselle henkilölle. Pistepilven käyttömahdollisuudet jälkikäteen ovat todella monipuoliset, kuten etäisyyksien mittaamisen eri pisteiden väliltä tai tarkastamaan, onko laserkeilausalueelle asennettu esimerkiksi tarvittavaa liikennemerkkiä. Pistepilvi toimii kattavana kartoitus tietona seuraavia rakennushankkeita varten, miettiessä mitä tullaan tekemään radan välittömässä läheisyydessä. Kuvassa 25 on Raide-Jokerin pistepilvi Vector.io-sovelluksessa.

Kuva 25. Pistepilvi kuva Espoon Leppävaarasta. (Vector.io, 2023)



ATU-tarkastelu raportti on kattava laadunvarmistus dokumentti. Dokumentti on tehty digitaalisesti, joten sen virhemarginaali on pienempi kuin esimerkiksi yksittäisten henkilöiden tekemät tarkastuspöytäkirjat. Mikäli tarkastettava alue on suuri ja käsin tehtäviä tarkastuspöytäkirjoja on satoja, ellei tuhansia on niiden virhemarginaali suurempi, kuin digitaalisesti tehdyssä työssä.

Seuraavassa esimerkissä on pohdittu miksi digitaalinen tarkastustapa olisi parempi, kuin usean henkilön tekemät havainnot. Esimerkiksi rata-alue minkä pylviäitä ja pysäkkialueen kivityksiä halutaan mitata ja varmistaa täyttykö ATU kyseisellä alueella. Mitattavia kohteita on 500 kappaletta. Työ tehdään käsin lasermittarilla mittaamalla ja tehdään samalla mittauspöytäkirja, sekä digitaalisesti laserkeilaamalla ja ATU-tarkastelulla.

Tämän esimerkin perusteella, kun kohteita on niin monta ja alue on laaja. Tarvitaan käsin tarkastamiseen 10 henkilöä, joten jokaiselle jää 50 tarkastettavaa kohdetta. Kaikille jaetaan samat ohjeet ja vaaditut raja-arvot työn tekemiseen. Laserkeilaus mittauksessa voidaan olettaa, että alue on niin laaja, että laserkeilauksia tarvitaan viisi kappaletta. Laserkeilaukset voidaan liittää toisiinsa yhteisen koordinaatiston mukaan. Oletetaan, että työntekijät ovat alan ammattilaisia, joten tarvitaan kaksi työntekijää tekemään laserkeilaus. Toinen heistä suorittaa laserkeilauksen ja toinen tekee ATU-tarkastelun.

Jos yksi henkilö on tarkastamassa kaikki viisi aluetta digitaalisesti laserkeilaimella ja toinen henkilö tekee materiaalille ATU-tarkastelun, se todennäköisesti johtaa pienempään virhemarginaaliin verrattuna 10 henkilön käsin tekemät tarkastukset. Käsin tehtävä tarkastus on alttiimpi inhimilliselle virheelle, koska eri henkilöt voivat arvioida saman kohteen eri tavoin ohjeesta huolimatta ja se voi johtaa erilaisiin tulkintoihin ja virheisiin. Tämä johtuu siitä, että käsin tehtävissä tarkastuksissa voi olla eroja ihmisten kyvyissä havaita ja tulkita asioita.

Digitaalisessa laserkeilauksessa virheet voivat syntyä teknisten virheiden tai virheellisen kalibroinnin vuoksi. Jos laserkeilaimen ohjelmointi on virheellinen tai jos laserkeilain ei pysty havaitsemaan kaikkia kohteita oikein, se voi johtaa virheisiin ja epätarkkuuksiin. Mutta koska työn tekee alan ammattilainen, voidaan pitää virhemarginaalia todella pienenä.

Yhteenvetona voidaan kuitenkin todeta, että digitaalisesti tarkastetulla alueella on yleensä pienempi virhemarginaali, kuin käsin mitatessa. Digitaalisen tarkastelun tarkkuus riippuu käytetyn teknologian laadusta ja toimivuudesta.

Tällä hetkellä materiaali on Raide-Jokeri allianssin omaisuutta, mutta koska projektin tilaajina on Helsingin- ja Espoon kaupunki, sekä Kaupunkiliikenne Oy on materiaali todellisuudessa heidän omaisuuttansa. Kun Raide-Jokeri allianssin rakentaminen ja käyttöönotto loppuu, kaikki jäljelle jäänyt materiaali siirretään tilaajien esittämiin paikkoihin ja verkkolevyille, mukaan lukien laserkeilausmateriaali. Se mihin laserkeilausmateriaalia tulevaisuudessa käytetään, on vain arvailujen varassa. Itse uskon, että mahdollisia käyttäjiä voisi olla erilaiset suunnittelijat, kaupunkien rakennusvirastot ja kunnossapidon henkilöt.

Tässä opinnäytetyössä pyrittiin selvittämään yhdessä Raide-Jokerin mittauspäällikön kanssa laserkeilausmateriaalin loppusijoituspaikkaa ja tulevaisuuden käyttäjiä tuloksetta. Tiedusteluja on tehty Kaupunkiliikenne Oy:ltä, Helsingin kaupungin Kaupunkiympäristön toimialalta (KYMP) ja Helsingin kaupungin rakentamispalveluliikelaitos Stara:lta. Suoria vastauksia ei ole vielä saatu, mutta joitain halukkaita pistepilvimateriaaliin tutustujia on löytynyt. Tutustumista varten heille tehdään tunnukset Vector.io-sovellukseen. Mikäli suoraa vastausta materiaalin loppusijoituspaikasta ei saada ennen, kun Raide-Jokeri allianssin rakentaminen ja käyttöönotto loppuu, jää laserkeilausmateriaalin loppusijoituspaikka tilaajien päätettäväksi.

7 Yhteenveto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää ATU-keilauksen hyötyjä raitiotie hankkeissa. Raide-Jokerin puolesta heräsi kysymys keväällä 2022 täyttääkö Raide-Jokerille rakennettu rata-alue varmasti ennalta suunnitellun ATU-alueen vaatimukset. Ongelman ratkaisuksi tutkittiin erilaisia tutkimusmenetelmiä kuten laserkeilausta, dronella tehtävää kartoitusta, takymetrimittausta ja havainnointia maastossa. Kaikki mittaustavat olivat omalta osaltaan erilaisia ja jokaisessa oli hyvät ja huonot puolensa. Näistä laserkeilaus ja havainnointi soveltuisi parhaiten ongelman ratkaisemiseen, sillä rata-alue kulkee keskellä vilkasta kaupunkia. Lopulta ongelmaan pyrittiin löytämään ratkaisu tekemällä Raide-Jokerille ATU-keilaus mobiililaserkeilaimella.

Mobiililaserkeilauksesta suoritettiin erillinen kilpailutus eri alojen toimijoille, joista Sweco Infra & Rail Oy valikoitui ATU-keilauksen urakoitsijaksi. Swecon alihankkija Geotrim Oy suoritti itse ATU-keilauksen maastossa ja Sweco työsti pistepilvimateriaalin, sekä ATU-tarkastelun pistepilvimateriaalille. ATU-tarkastelun perusteella Sweco koosti kaikista ATU-rikkeistä yhteisen raportin ja toimitti sen Raide-Jokerin henkilöstölle lisäkäsittelyä varten.

ATU-keilauksesta syntyi pistepilvi, mikä on miljoonista yksittäisistä pisteistä koostuva kolmiulotteinen kuvamateriaali rata-alueesta. Pistepilvi on kätevä tapa tallentaa todenmukainen kolmiulotteinen kuvamateriaali rakennetusta alueesta tuleville projekteille käytettäväksi. Pistepilvi pysyy muokkaamattomana ja sitä voidaan käyttää myös todistusmateriaalina takuuasioissa.

Pistepilvella tehtiin törmäyskuvatarkastelu käyttäen raitiovaunun muotoista estemaskia mahdollisten esteiden ja rakennusvirheiden löytämiseksi. Kaikista ATU-rikkeistä Sweco keräsi yhteisen raportin Raide-Jokerille. Raportin pohjalta pystyttiin korjaamaan siinä esiin tulleet virheet ja aloittamaan teknisen koeliikenteen ajoissa.

ATU-keilaus ja -tarkastelu on loistava tapa varmistaa rata-alueilla vaaditun ATU:n täytyminen ja näin ollen ongelma saatiin ratkaistua. Laserkeilaus ei ole kaikista halvin ratkaisu, mutta sen virhemarginaali on hyvin vähäinen digitaalisesti suoritettavan mittaustavan takia. Suomessa pistepilviaineistoa on käytetty jo pitkään erilaisissa mallinuksissa, kuten tunneli- ja kalliorakentamisessa, mutta raitiotierakentamiseen ja ATU-tarkastelussa ei mahdollisesti koskaan aikaisemmin. Itse uskon, että pistepilvimallinnus tulee yleistymään tulevaisuudessa rakennushankkeissa. Tästä hyvä esimerkki on Suomen valtion omistama Väylävirasto, joka on myös ottanut Vector.io-sovelluksen käyttöönsä pistepilvimateriaalia varten. ("Kuin veisi viestikapulaa eteenpäin" – BIM-työkalu mahdollistaa yhden luukun periaatteen, 2023)

Toinen millä tutkimusongelman olisi saanut ratkaistua olisi ollut tarpeeksi kattava havainnointi maastossa. Tärkeintä on erityinen huolellisuus ja riittävä dokumentointi maastossa tehtävistä mittauksista. Apuna mittaustuloksien saamisessa olisi voinut käyttää lasermittareita ja kiskoilla työnnettävän mittaustaunua. Esimerkiksi tällaista tutkimusmenetelmää on käytetty Tampereen raitiotie -hankkeessa.

Lähteet

Aviamaps. (2022). Noudettu osoitteesta <https://aviamaps.com/>

Forsell N. (2022). Laserkeilaavan dronen hyödyntäminen suunnittelussa [opinnäytetyö, Hämeen ammattikorkeakoulu]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2022051810200>

Geotrim Oy. (n.d). Trimble MX9. <https://geotrim.fi/tuotteet/mobiilikartoitus/trimble-mx9/>

Gigantti Oy Ab. (2023). DJI Mini 3 Pro drone + Smart Control ohjain.
<https://www.gigantti.fi/product/urheilu-ja-vapaa-aika/dronet-ja-tarvikkeet/dronet/dji-mini-3-pro-drone-smart-control-ohjain/456263>

Helsingin kaupunki. (2023). Raitiotien tilavaatimukset.
<https://raitiotieohje.fi/tilavaatimukset-2/>

Ingeo Oy. (2023). Tähyys YBRT-K. <https://www.ingeo.fi/tuotteet.html?id=47/246>

Laine A. (2018). Seurantamittaukset takymetri- ja tarkkavaaituskalustolla [opinnäytetyö, Metropolia ammattikorkeakoulu]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201805076876>

Lappalainen J. (2021). Tampereen raitiotien linjavaihteiden tilatietojen monitorointi CTC järjestelmään [opinnäytetyö, Metropolia ammattikorkeakoulu].
<https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202102102118>

Mäkelä Tomi. (2023). Mittauspäällikkö. YIT Oyj. Helsinki. Keskustelu 02.02.2023.

Prismatech OÜ. (2023). DJI Matrice 300 RTK LiDAR Package.
<https://prismatech.com.au/commercial-drone-products/p/dji-matrice-300-lidar-package>

Raide-Jokeri. (2020) Kiskopyörämönkijän käyttöohjeet. Yrityksen sisäinen materiaali.
NRC Group Finland Oy.

Raide-Jokeri. (2022). Lähipiiritransaktio ATU-keilaus Sweco. Yrityksen sisäinen materiaali.
Raide-Jokeri allianssi.

Raide-Jokeri. (n.d). Mikä on Raide-Jokeri?. <https://raidejokeri.info/mika-raide-jokeri/>

Raide-Jokeri. (23.8.2021). Patterimäen raitiotietunneli valmistuu vaihe vaiheelta.
<https://raidejokeri.info/patterimaen-raiotietunneli-valmistuu-vaihe-vaiheelta/>

Raide-Jokeri. (2021). Perehdytysmateriaali 2021. Yrityksen sisäinen materiaali.
Raide-Jokeri allianssi.

Raide-Jokeri. (2023). Raide-Jokerin ATU-tarkastelu loppuraportti.
Yrityksen sisäinen materiaali. Raide-Jokeri allianssi.

Raide-Jokeri. (2023. Raidejokerin ATU-tarkastelu. Yrityksen sisäinen materiaali.
Sweco Infra & Rail Oy

Railway Supply. (08.02.2023). The train is too big for the tunnels.
<https://www.railway.supply/en/the-train-is-too-big-for-the-tunnels/>

Siivola M. (2013). Mobiilikeilaimet ja niiden käyttö ratateknisissä mittauksissa [opinnäytetyö, Rovaniemen ammattikorkeakoulu]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201305025776>

Steffansson Tom. (2022). Myynti-insinööri. Geotrim Oy. Helsinki. Keskustelu 7.10.2022

Vector.io. (2023). Noudettu osoitteesta <https://viewer.vektor.io/>

Väylävirasto. (23.3.2023). "Kuin veisi viestikapulaa eteenpäin" – BIM-työkalu mahdollistaa yhden luukun periaatteen. <https://vayla.fi/-/kuin-veisi-viestikapulaa-eteenpain-bim-tyokalu-mahdollistaa-yhden-luukun-periaatteen>

Väylävirasto (2022). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 2 Radan geometria.

https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2021-22_rato2_web.pdf

Liite 1. Raide-Jokerin suunnitteluperusteet

Raide-Jokeri

Suunnitteluperusteet

24.9.2019

Päivitysversio 21.4.2020



3.2 AUKEAN TILAN ULOTTUMA (ATU)

Vaatus 1:

Raitiotien aukean tilan ulottuma on määritelty liitteessä [RJ_000_RAT_Piirustus-ATU2900 ja ATU3150 piirustukset.pdf \(Desktop, Web, Mobile\)](#).

Tarkennus:

3150 mm leveää ATU:a käytetään Espoossa välillä Karhusaarentie – Maarinrannantie. Muualla ATU:n leveys on 2900 mm.

3.2.1 Kaarrelevitys

Vaatus 1:

Linjalle tehdään ajouratarkastelu, jossa mitoitussajoneuvona ovat Helsingin kantaverkon Artic, Raide-Jokerille hankittavat Artic XL 5- ja 7-osaisina, erikseen määritellyt normivaunut A ja B sekä työkuone Matisa B36. Normivaunujen mitat on esitetty dokumentissa [RJ_000_KTT; LKT; RAT_Esitys-Normivaunu ulottumatarkasteluihin.pptx \(Desktop, Web, Mobile\)](#).

Tarkennus:

Pysäkkilaiturin reuna määritetään kaarrelevitysalueella ajouratarkastelun perusteella kohdekohtaisesti.

Vaatus 2:

Aukean tilan ulottumaan tehdään kaarrelevitys taulukon 1 mukaisesti varsinaisen kaarresäteen alueella.

Kommentti:

Levitys perustuu kaavaan $e=12,5/R$

Vaatus 3:

Raitiotien ulkopuolella levitys huomioidaan myös siirtymäkaaren matkalla täysimääräisesti pienemmän ympyräkaarten säteen mukaan.

Tarkennus:

Kun klotoidi on ympyräkaarien välissä, valitaan levityksen laskentaan pienemmän ympyräkaaren levityksen arvo.

Vaatus 3:

Raiteiden välissä tarkasteluksi riittää ajouratarkastelu muualla kuin varsinaisen kaarresäteen alueella.

Kommentti:

Kaarrelevitystä ei voida huomioida täysimääräisesti raidevälissä siirtymäkaaren alueella tai kaaren jälkeisellä/kaarta edeltävällä suoralla, koska tällöin raideväli suoralla kasvaa levitystä vastaavaan mittaan.

Vaatus 4:

Raitiotien ulkopuolella levitys huomioidaan kaartein jälkeisellä suoralla sisäkaartein puolella 15 m ja ulkokaartein puolella 10 m matkalla taulukon Taulukko 1 mukaisesti:

Taulukko 1. Kaarrelevitysten suunnitteluarvot eri kaarresäteillä.

Kaarre	Ulottuman leventäminen sekä ulko- että sisäkaarteissa	Raiteiden väli (keskilinjosten välistä mitattuna)	Raitiotien kokonaisleveys vähintään	Ulottuman leventäminen kaarretta edeltävällä tai kaartein jälkeisellä suoralla	
				Sisäkaarre (15 m)	Ulkokaarre (10 m)
R (m)	e (mm)	mm	mm	mm	mm
R ≥ 250	0	3000	5900	0	0
125 ≤ R < 250	100	3200	6300	50	80
85 ≤ R < 125	150	3300	6500	65	110
65 ≤ R < 85	200	3400	6700	65	140
50 ≤ R < 65	250	3500	6900	75	180
45 ≤ R < 50	300	3600	7100	90	210
40 ≤ R < 45	350	3700	7300	105	250
35 ≤ R < 40	400	3800	7500	120	280
30 ≤ R < 35	450	3900	7700	135	320
25 ≤ R < 30	500	4000	7900	150	350

3.2.2 Kallistuksen aiheuttama levennystarve

Vaatus 1:

Kallistetuissa kaarteissa on otettava huomioon myös ATU:n levennystarve sisäkaarteissa kaavan mukaisesti (TRStrab):

$$b_u = \frac{H \cdot D}{1060}$$

Jossa b_u = on raiteen kallistuksesta johtuva sisäkaarteiden levitys millimetreinä, D = on raiteen kallistus millimetreissä, H = levityspisteen korkeus millimetreinä kiskon selän korkeudesta.

Taulukossa Taulukko 2 on laskettu esimerkkejä kaarrelevityksistä.

Tarkennus:

Levennystarve on huomioitava myös siirtymäkaarissa (kallistuksen muutos tehdään siirtymäkaaren matkalla lineaarisesti).

Mitta 1060 mm on vaunun pyörien ajopintojen välinen nimellisetäisyys. Artic vaunulla mitta on laskennallisesti 1053 mm, Artic XL osalta ei ole vielä määritetty.

Taulukko 2. Kallistuksen aiheuttama kaarrelevitys eri korkeuden arvoilla. (laskenta kallistuksilla 5 mm välein, korkeuksilla 300 mm, 460 mm, 3900 mm ja 6200 mm KSK:sta).

	Kallistuksesta johtuva sisäkaarteiden levitys b_u (mm)			
	Tarkastelupisteen korkeus mitattuna kiskon selän korkeudesta H (mm)			
Raiteen kallistus D (mm)	300	460	3900	6200
5	1	2	18	29
10	3	4	37	58
15	4	7	55	88
20	6	9	74	117
25	7	11	92	146
30	8	13	110	175
35	10	15	129	205
40	11	17	147	234
45	13	20	166	263
50	14	22	184	292
55	16	24	202	322
60	17	26	221	351
65	18	28	239	380
70	20	30	258	409
75	21	33	276	439
80	23	35	294	468
85	24	37	313	497
90	25	39	331	526