Tampereen yliopisto

Jarkko Saarela

PELASTUSLAITOKSEN TAPAHTUMAPAIKAN MALLINNUS JA NOSTOLAVAYKSIKÖN SIJOITTELU

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Jussi Aaltonen
Tarkastaja: Kari Koskinen
Toukokuu 2025

TIIVISTELMÄ

Jarkko Saarela: Pelastuslaitoksen tapahtumapaikan mallinnus ja nostolavayksikön sijoittelu
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Toukokuu 2025

Pelastustilanteen johtajien kanssa käytyjen keskustelujen perusteella on havaittu, että raskaalla ja korkean painopisteen omaavalla nostolavayksiköllä on tapana saapua palopaikalle viimeisenä, ja nostolavalle varatun paikan sijainnin välitys muulle henkilöstölle on hektisessä tilanteessa hankalaa. Kun varattu sijoituspaikka tai siihen johtavat ajoreitit ovat estyneet, seurauksena on ylimääräisiä kaluston uudelleenjärjestelyjä, mikä heikentää pelastustoiminnan tehokkuutta.

Tässä työssä laaditaan Bronto Duties -ohjelmiston kehittämislinjat siten, että nostolavan sijoituspaikka voidaan määrittää ja kommunikoida visuaalisesti selkeällä tavalla. Työ jakaantuu kolmeen osioon: ensiksi kartoitetaan julkisesti saatavilla olevat kartta- ja laserkeilausaineistot ja arvioidaan niiden soveltuvuus pohjakarttana, toisessa osassa kehitetään menetelmiä tapahtumapaikalla luodun kolmiulotteisen pistepilviaineiston reaaliaikaiseen georeferointiin ja visualisointiin, ja kolmanneksi esitellään algoritmiset periaatteet optimoidun sijoituspaikkasuosituksen laskemiseksi sekä sijoituspaikan ja palon sijainnin kaltaisten keskeisten kontekstuaalisten tietojen visuaaliseksi esittämiseksi muiden pelastusyksiköiden informointia varten.

Menetelminä käytetään kirjallisuuskatsausta, kokeellista tutkimusta sekä konseptuaalista mallinnusta. Työn tuloksena syntyy selvitys kartta-aineistoista, vaiheittaiset ohjeet aineistofuusiolle, 3D-mallin generoinnille ja sijoituslaskennalle, jotka yhdessä muodostavat Bronto Duties -järjestelmän kriittisen ytimen. Näiden ohjeiden avulla pelastustilanteen johtaja saa käyttöliittymässä välittömästi näkyville optimoidun sijoituspaikan, ajoreitit ja olennaiset kolmiulotteiset mallit

Avainsanat: kartta, lidar, georeferointi, visualisointi, pistepilvi, 3D-mallinnus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Jarkko Saarela: Modeling of Rescue Site and Positioning of the Aerial Platform Unit
Master's Thesis
Tampere University
Mechanical Engineering
May 2025

Discussions with incident commanders have revealed that the heavy aerial platform unit, characterized by a high center of gravity, typically arrives at the fire scene among the last vehicles. Communicating the predesignated deployment location of the platform to other personnel is challenging under the hectic conditions of an emergency. When the assigned placement area or its access routes become obstructed, additional vehicle repositioning is often required, which undermines the overall efficiency of the rescue operation.

This thesis defines development guidelines for the Bronto Duties software so that the optimal positioning of the aerial platform can be determined and communicated in a visually clear manner. The work is divided into three main parts: first, publicly available map and laser scanning datasets are identified and evaluated for their suitability as base maps; second, methods are developed for the real-time georeferencing and visualization of three-dimensional point cloud data collected at the incident site; and third, algorithmic principles are presented for calculating an optimized placement recommendation and for visually conveying key contextual information such as the placement location and the fire's position to other rescue units.

The applied research methods include a literature review, experimental research, and conceptual modeling. The outcome consists of an analysis of available mapping data, as well as step-by-step guidelines for data fusion, 3D model generation, and placement calculation. Together, these elements form the critical core of the Bronto Duties system. With the support of these tools, the incident commander is able to immediately access optimized placement recommendations, access routes, and essential three-dimensional models within the user interface.

Keywords: map, LiDAR, georeferencing, visualization, point cloud, 3D modeling

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

☐ Ei
☒ Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: ChatGPT versiot: GPT-4o, 3o-mini-high, 4o-mini-high, GPT-4.5, Deep research.

Käyttötarkoitus:
1. Kirjoitetun tekstin uudelleenmuotoiluun parantamaan esitystavan selkeyttä ja kielellistä laatua.
2. Lähteiden ja tiedon etsimiseen. Kaikki tekoälyn antamat tulokset on tämän jälkeen varmistettu todellisista lähteistä.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Kaikissa osioissa on käytetty joiltain osin. Tekoäly on tärkein yksittäinen työkalu tieteellistä tukimusta kirjoittaessa vähentäen tiedon etsimiseen kuluvaa aikaa merkittävästi, eikä olisi järkevää olla hyödyntämättä sitä. Rinnastan tekoälyn käyttämisen keskustelupalstojen lukemiseen. Se vaatii lähdekriittisyyttä mutta on oikein käytettynä hyödyllistä. Työstä löytyy ymmärrettävästi myös omaa tekstiäni muokkaamattomana merkittäviä määriä.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on toteutettu Bronto Skylift Oy Ab:lle. Haluan kiittää erityisesti ohjaajaani ja esimiestäni Jouni Törnqvistiä, jolta sain työn aiheen, tukea työn aikana ja käytännössä täysin vapaat kädet työn sisällön suhteen. Työn aihe ei olisi voinut olla parempi, sillä hyödyllisen lähtökohdan luomisen lisäksi pääsin syventymään omiin teknisiin intohimoihini.

Suuret kiitokset Henrille ja Niilolle kannustavasta ja hyvästä työilmapiiristä. Kiitän myös yliopiston ohjaajiani, professori Kari Koskista ja tutkimuspäällikkö Jussi Aaltosta erinomaisesta ohjauksesta ja asiantuntevasta tuesta. Lisäksi lämpimät kiitokset Harrille, Jarille, Tommille, Karrille, Jouni H:lle, Hiroyukille, Juholle ja kaikille muille, jotka ovat vastanneet kysymyksiini ja auttaneet aineiston keruussa.

Pirkkalassa, 30.5.2025

Jarkko Saarela

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO ... 1
   1.1 Tausta ja tavoite ... 1
   1.2 Tutkimuskysymykset, tutkimusmenetelmät ja rajaus ... 2
2. LASERKEILAUKSEN JA PISTEPILVITEKNOLOGIAN TEOREETTISET PERUSTEET ... 4
   2.1 Laserkeilausteknologian toimintaperiaatteet ja sovellukset ... 4
   2.2 Pistepilviaineiston muodostus ja prosessointitekniikat ... 5
   2.3 Todennäköisyyspohjainen menetelmä pistepilven rekisteröintiin ... 8
   2.4 Spatiaalinen hahmotus ja perspektiivin vääristymien vaikutus mittauksiin ... 9
   2.5 Korkeusmallit ... 11
   2.6 Vaihtoehtoiset teknologiat laserkeilaukselle ja niiden arviointi ... 11
      2.6.1 Fotogrammetrian toimintaperiaate ... 13
3. JULKISESTI SAATAVILLA OLEVAT KARTTA-AINEISTOT ... 16
   3.1 Google maps – palvelun aineistot ja tarkkuus ... 16
   3.2 Maanmittauslaitoksen tarjoamat laserkeilausaineistot ... 18
   3.3 Cesium alustan mahdollisuudet 3D-paikkatiedon hyödyntämisessä ... 23
   3.4 Muiden kartta-aineistojen kansainvälinen saatavuus ja tarkkuus ... 24
   3.5 Sotilaallisten karttojen tarkkuus ja käyttömahdollisuudet ... 27
   3.6 Maanalaisen infrastruktuurin paikkatietojen saatavuus ... 28
4. REAALIAIKAISEN 3D-MALLIN LUONTI TAPAHTUMAPAIKALTA ... 30
   4.1 Lidar-skannaus nostolavan työkorista ... 31
   4.2 Lidar tutkien optimaaliset sijoituspaikat ... 35
   4.3 Reflektiivisyysperusteinen pistepilven visualisointi ... 37
   4.4 Prosessoitujen pistepilvien georeferointi Duties-sovellukseen ... 39
      4.4.1 Aineistofuusio ja pistepilvien vaihtoehtoiset georeferointimenetelmät ... 45
5. NOSTOLAVAYKSIKÖN SIJOITUKSEN OPTIMOINTI JA VISUALISOINTI ... 48
   5.1 Duties-järjestelmän periaatteellinen konsepti sijoituspaikan määrittämiseksi ... 48
   5.2 Vapaan tilan analyysi ja esimerkillisen paikanlaskenta kohteensijainnin perusteella ... 53
   5.3 Muiden yksiköiden informointi ... 54
   5.4 Teoreettinen kohteen automaattinen määritys ... 54
   5.5 Suositus käytettävistä ratkaisuista ... 56

6. JOHTOPÄÄTÖKSET 58
LÄHTEET 60

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ALS	Lentolaserkeilaus, Airborne laser scanning
API	Ohjelmointirajapinta
ASPRS	The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing
Bronto	Bronto Skyliftin nostolavayksikkö
CC 4.0	Nimeä Creative Commons 4.0-lisenssi
CHM	Latvuston korkeusmalli, Canopy height model
CSF	Cloth Simulation Filter
DEM	Korkeusmalli, Digital elevation model
DSM	Pintamalli, Digital surface model
DTM	Maastomalli, Digital terrain model
IGS	The International GNSS Service
IMU	Inertia-anturi, An Inertial Measurement Unit
LAS	Pistepilvien tallenusformaatti
LAZ	Pakattu muoto LAS:sta
LIDAR	Lasertutka, Light detection and ranging
MLS	Liikkuva maastolaserkeilaus, Moving laser scanning
MML	Maanmittauslaitos
NDT	Normal Distribution Transform
NDT-OM	Normal Distributions Transform Occupancy Maps
OSM	OpenStreetMap
SLAM	Samanaikanen paikallistus ja kartoitus, Simultaneous Localization and Mapping
TLS	Maastolaserkeilaus, Terrestial laser scanning

α	Skaalauskerroin
λ	Aallonpituus
D	Läpimitta
θ	Kulma
θ_x	Suuntakulma x-akselin ympäri
θ_y	Suuntakulma y-akselin ympäri
θ_z	Suuntakulma z-akselin ympäri
r	Säde
s	Pituus
t_x	Sijainti x-akselilla
t_y	Sijainti y-akselilla
t_z	Sijainti z-akselilla

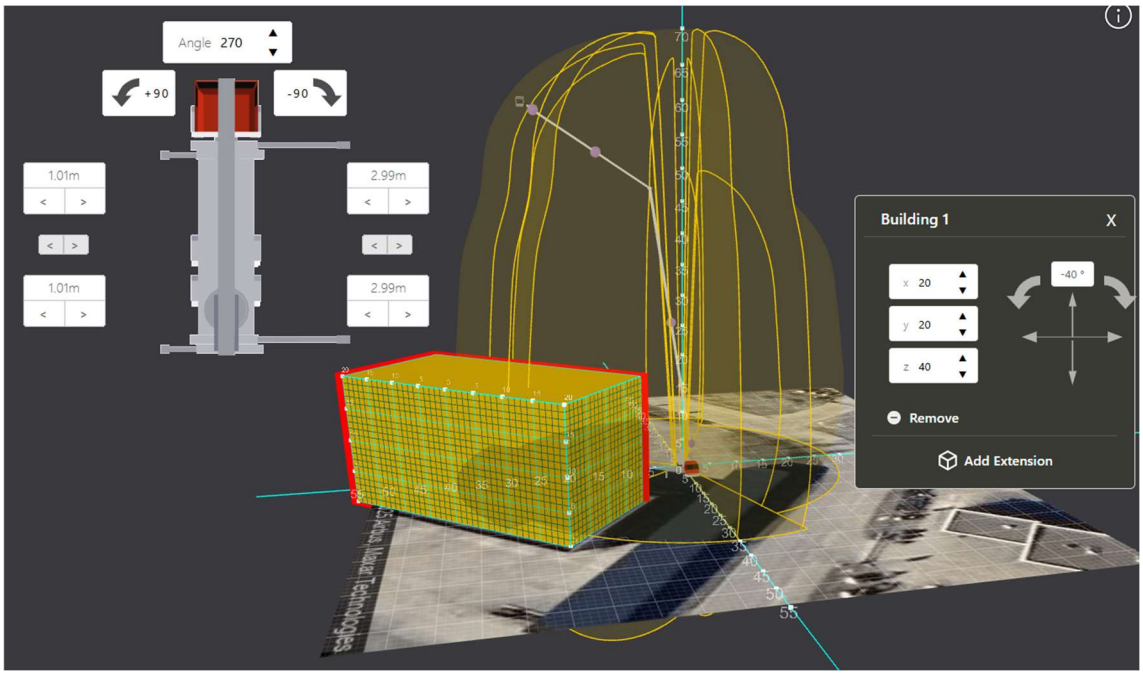
1. JOHDANTO

Tässä luvussa esitellään työn aihe, tavoitteet ja tutkimuskysymykset. Aluksi kuvataan Bronto One -alustan ja siihen liittyvän Bronto Duties -ohjelman kehitystyön taustat ja tarpeet. Lisäksi käsitellään tutkimuksen osaongelmat ja tutkimusmenetelmät.

1.1 Tausta ja tavoite

Bronto One on digitaalinen alusta, joka koostuu verkkosivustosta ja mobiilisovelluksesta. Sen tarkoituksena on tarjota käyttäjille kattava järjestelmä mm. laitteiden hallintaan, työtehtävien suunnitteluun, Bronto Skyliftin nostolavayksikköjen huoltoon ja asiakaspalveluun.

Osana Bronto One – kokonaisuutta toimii kehitysvaiheessa oleva Bronto Duties – ohjelma, jossa asiakas pääsee simuloimaan nostotapahtumia virtuaalisesti, esimerkiksi nostolavan sijoitusta ja ulottuman tarkastelua varten. Ohjelmassa valitaan joko manuaalisesti tai sijainnin perusteella Googlen satelliittikuvasta suorakulmion muotoinen alue, jonka sivun pituus on 100–150 metriä, ja johon Bronto eli Bronto Skyliftin nostolavayksikkö sijoitetaan.



Kuva 1. *Bronton Duties ohjelman käyttöliittymää (muokattu)* ***[1]****.*

Kuvassa 1 on näkyvissä ohjelman tärkeimmät käytännölliset ominaisuudet. Ohjelma piirtää Bronton kartalle sijoituksen jälkeen kolmiulotteisen havainnollistuksen nostolaitteen ulottumasta, eli siitä mihin paikkoihin sillä pääsee ajamaan. Ulottuma on riippuvainen kuvan 1 vasemmalla näkyvistä tukijalkojen asennoista, ja ohjelma automaattisesti päivittää näkymää näiden perusteella. Rakennuksia pystytään tällä hetkellä lisäämään manuaalisesti antamalla niille dimensiot ja siirtämällä ne oikeille paikoilleen. Työssä pyritään kehittämään ohjelmaa mahdollisimman autonomiseksi ja visuaalisesti informaatiorikkaaksi erityisesti palotehtäville.

Tarve työlle on noussut esiin keskusteluissa palopäälliköiden kanssa. Näissä keskusteluissa on ilmennyt, että nostolava saapuu usein palopaikalle viimeisten ajoneuvojen joukossa sen suuren massan ja korkean painopisteen vuoksi. Tämä muodostaa haasteen, sillä nostolava on yksi keskeisimmistä työvälineistä rakennuspalojen sammutus- ja pelastustehtävissä, ja sen sijoituspaikan valintaan tulee kiinnittää erityistä huomiota.

Sijoituspaikan määrityksestä vastaa nykyisin pelastustilanteen johtaja. Käytännössä sijoituskohtaa koskeva informaatio välittyy kuitenkin puutteellisesti, ja palopaikan tilanteen hektisyys lisää riskiä sille, että nostolavan sijoituspaikka tai sinne johtavat ajoreitit tukitaan. Tämä johtaa usein siihen, että ajoneuvoja joudutaan järjestelemään uudelleen, mikä vie kallista sammutus- ja pelastustöihin kuluvaa aikaa.

Tämän työn tarkoituksena on luoda pohja visuaalisesti informoivan ohjelman, eli Bronto Dutiesin, kehittämistyölle. Ohjelman avulla pyritään vähentämään sijoituspaikkaan liittyviä epäselvyyksiä ja siten tehostamaan pelastusajoneuvojen toimintaa kriittisissä tilanteissa.

1.2 Tutkimuskysymykset, tutkimusmenetelmät ja rajaus

Työ on jaettu kolmeen tutkimuskysymykseen, joihin kuhunkin haetaan itsenäisesti ratkaisuja. Nämä osaongelmat muodostavat kokonaisuuden siten, että kukin seuraava osa täydentää ja syventää edellisten ratkaisujen tuottamaa tietoa. Kysymykset ovat seuraavat:

1. Mitä valmiina olevia kartta-aineistoja on olemassa, ja mitä niistä voidaan hyödyntää Duties-sovelluksessa?
2. Miten kolmiulotteista aineistoa voidaan kerätä, ja miten se voidaan reaaliaikaisesti georeferoida?
3. Miten nostolavayksikön sijoituspaikka voidaan määrittää ja informoida visuaalisesti tehtävälle osallistuville yksiköille?

Tutkimusmenetelminä ensimmäisessä kysymyksessä ovat kirjallisuuskatsaus sekä aineiston kehittäminen visuaalisten kokeilujen avulla, joiden avulla arvioidaan eri aineistojen tuottamaa visuaalista lopputulosta.

Toisessa tutkimuskysymyksessä yhdistyvät kirjallisuuskatsaus, kokeellinen tutkimus ja konseptuaalinen tutkimus, jotta sekä teoreettinen ymmärrys että käytännön toteutettavuus tulevat selkeästi esiin.

Kolmannessa tutkimuskysymyksessä puolestaan menetelminä toimivat kirjallisuuskatsaus ja konseptuaalinen tutkimus, joiden avulla kehitetään sijoituspaikan informointimallit.

2. LASERKEILAUKSEN JA PISTEPILVITEKNOLOGIAN TEOREETTISET PERUSTEET

Tässä luvussa käsitellään laserkeilauksen ja pistepilviteknologian teoreettisia perusteita. Aluksi kuvataan laserkeilauksen toimintaperiaatteet ja sovellukset, minkä jälkeen tarkastellaan pistepilviaineiston muodostusta ja prosessointitekniikoita. Lisäksi käsitellään erityisesti erästä pistepilvien rekisteröintiin soveltuvaa todennäköisyyspohjaista 3D-NDT-menetelmää sekä spatiaalisen hahmotuksen ja perspektiivin vääristymien vaikutuksia mittauksiin. Luku päättyy laserkeilaukselle vaihtoehtoisten menetelmien esittelyyn.

2.1 Laserkeilausteknologian toimintaperiaatteet ja sovellukset

Laserkeilaus tarkoittaa nimensä mukaisesti kaukokartoitustekniikkaa laserilla, jolla tallennetaan pinnanmuotoja [2, pp. 10-17]. Laserkeilaus voidaan jakaa kolmeen yleisimpään päätyyppiin, joita ovat lentolaserkeilaus (ALS), liikkuva maastolaserkeilaus (MLS) ja maastolaserkeilaus (TLS). Teknisesti erona näillä on vain alusta, ALS:ssä keilain on kiinnitettynä lentokoneeseen, MLS:ssä ajoneuvoon, ja TLS:ssä keilain on kiinteästi paikallaan, usein kolmijalan päällä [2, p. 30].

Tarkastellaan lentolaserkeilauksen toimintaperiaatetta tarkemmin. Lentolaserkeilaus perustuu laserpulssin lähettämiseen maanpinnalle, sen takaisinheijastumisen rekisteröintiin, ja paikkatietoon yhdistämiseen. Pulssin lähetystä toistetaan niin, että saadaan lopulta pistetietona kolmiulotteinen kuva keilattavasta kohteesta. Teknisesti ALS tarkoittaa melkein samaa kuin lasertutka eli LIDAR, mutta erona näillä on, että lidar voi toimia myös ilman paikannustietoa. Laserkeilaimen sijainti saadaan tarkasti selville satelliittipaikannus, kuten GPS-järjestelmällä. Lisäksi apuna on inertia- eli kiihtyvyysmittauksiin (IMU) perustuvia järjetelmiä. Kun lisäksi tiedetään laser pulssin suunta ja etäisyys pulssin ja heijastuksen välisestä aikaerosta laskemalla, saadaan myös maan pinnan kohteille tarkka sijainti. Tällöin jokaiselle laserkeilan antamalle pisteelle saadaan x, y ja z koordinaatti. [2, pp. 10-17]

Etäisyyden mittaukseen jaetaan kahteen eri tapaan, pulssi- ja taajuusmoduloituihin lasereihin. Pulssilaserin toimii edellä mainitulla tavalla. Pulssikompressio on samaan tapaan perustuva muoto, mikä vaatii pienemmän tehon, antaa paremman erottelukyvyn ja suuremman kantaman, mutta vaatii enemmän aikaa mittaukseen. Taajuusmoduloiduissa lasereissa etäisyys määräytyy lasersignaalin vaihesiirtymästä, mikä on suoraan verrannollinen etäisyyteen. Taajuusmittauksiin ja pulssikompressioon perustuvat

keilat ovat tarkempia, mutta tarvitsevat suuremman aikaikkunan mittauksiin, joten lentosovelluksissa käytetään perinteistä pulssilaseria. [2, p. 14]

2.2 Pistepilviaineiston muodostus ja prosessointitekniikat

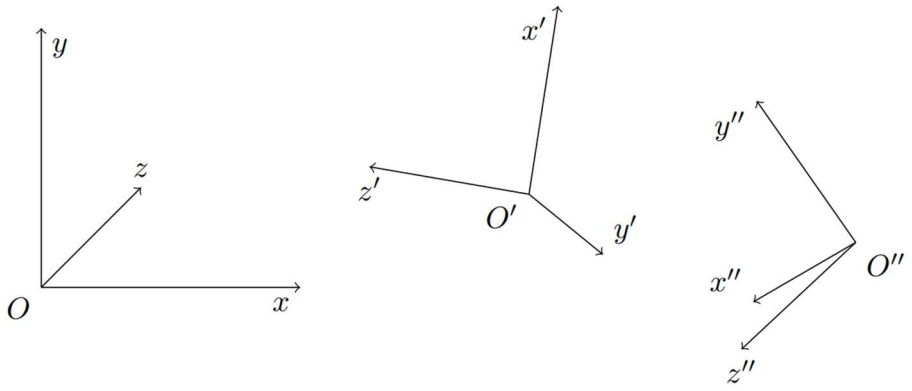
Laserkeilaimen keräämät yksittäiset pisteet luovat yhteen kerättynä kokonaisuutena pistepilven. Ennen vanhaan kartografiassa käytetyt 2D eli yhden tason lidarit mittasivat n. 20–50 tuhatta pistettä sekunnissa, mutta nykyään 3D lidareilla päästään useiden miljoonien pisteiden sekunnissa mittausnopeuksiin [3]. Esimerkiksi kappaleessa 4 perehdytään Ouster OS1 anturiin, jolla mallinnetaan Tampere-taloa ja anturin tallennusnopeus voi olla jopa 5,2 miljoonaa pistettä sekunnissa [4]. 3D-kuvat pitävät sisällään huomattavasti enemmän informaatiota kuin 2D kuvat, ja voivat antaa visuaalisesti nopeammin ja helpommin ymmärrettävän kuvan tilanteesta. Pistepilviä käytetään yleisesti mallintamaan 3D kuvauksia erilaisista kappaleista. Yhdestä pisteestä kuvatessa on kuitenkin mahdotonta saada kattavaa kuvaa kappaleesta, joten lidaria usein liikutellaan kunnollisen perspektiivin saamiseksi. [5, p. 1]

Simultaneous Localization and Mapping eli SLAM on välttämätön tekniikka, robotiikassa ja autonomiassa, jossa laite rakentaa karttaa samanaikaisesti tietäen oman paikkansa samaisessa kartassa. Avainhaaste SLAMissa on pistepilven rekisteröinti, engl. point cloud registration. Siinä muunnetaan jokaisen mittauspisteen pistepilvi omasta lokaalista koordinaatistostaan yleiseen globaaliin koordinaatistoon [5, p. 2]. Globaalina koordinaatistona voi toimia esimerkiksi ensimmäinen mittauspiste, tai yleisemmin käytetty koordinaattijärjestelmä kartalta. Lokaalit koordinaatistot, jotka voivat erota toisistaan sekä translaation, että rotaation suhteen, tulee projisoida globaaliin koordinaatistoon koordinaattimuunnoksina, jotta saadaan yhteneväinen 3D kuva muodostettua. Koordinaatistojen luomia perspektiivejä toistensa suhteen havainnollistetaan kuvassa 2.

Riippuen datan määrästä, pistepilvien yhdistystä tehdään kahdella eri tavalla, yhdistämällä 2 pistepilveä kerrallaan, eng. pairwise registration, tai samanaikaisesti useampi kuin 2 pistepilveä, eng multiview registration. Yleisesti käytettyjä algoritmityyppejä pistepilvien prosessoimiseksi käyttökelpoiseksi ovat Iterative Closest Point (ICP), Feature-based, Learning-based ja Probabilistic algoritmit. [5, pp. 2-3] Taulukossa 1 on selitetty metodien perustoimintaperiaatteet.

Taulukko 1. *Yleisimmät pistepilvien rekisteröintialgoritmityypit* ***[5]****.*

Metodi	Toimintaperiaate
Iterative Closest Point (ICP)	Iteratiivisesti minimoi toisiaan vastaavien pisteiden sijaintia kahdessa pistepilvessä säätämällä koordinaatistonmuunnos parametrejä.
Feature-based	Poimii erottuvia geometrisiä piirteitä pistepilvistä, ja pyrkii sulauttamaan ne arvioimalla koordinaatistonmuunnos parametrit.
Learning-based	Käyttää syväoppimismalleja oppiakseen pistepilvien esityksiä ja ennustaa muunnoksia vertaamalla käsiteltävänä olevaa materiaalia opittuihin aineistoihin.
Probabilistic	Mallintaa pistepilviä todennäköisyysjakaumina ja arvioi koordinaattimuunnoksen minimoimalla tilastollisen etäisyyden.



Kuva 2. *Lokaalit koordinaatistot O' ja O'' globaalissa koordinaatistossa O.*

Pistepilvien yleisin tallennusmuoto on LAS-formaatti, jonka uusin päivitys LAS 1.4 R16 on julkaistu vuonna 2019. Formaattia kehittää ja ylläpitää sekä omistaa The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). LAS 1.4 tukee 10 eri formaattityyppiä, 0-5 ovat vanhempia versioita ja käyttöön suositellut formaatit ovat 6-10. Formaateissa 6-10 pistepilven pisteet luokitellaan taulukon 2 mukaisiin luokkiin. [6] On kuitenkin hyvä huomata, että formaattia käytetään pääsääntöisesti vain ilmakuvausaineistossa.

Taulukko 2. *Pistepilvien pisteiden luokat* ***[6]****.*

Arvo	Tarkoitus
0	Created, never classified
1	Unclassifed
2	Ground
3	Low vegetation
4	Medium vegetation
5	High vegetation
6	Building
7	Low point (noise)
8	Reserved
9	Water
10	Rail
11	Road surface
12	Reserved
13	Wire – guard (shield)
14	Wire – conductor (Phase)
15	Transmission tower
16	Wire-structure connector
17	Bridge deck
18	High noise
19	Overhead structure
20	Ignored ground
21	Snow
22	Temporal exclusion
23-63	Reserved
64-255	User definable

Datan muokkaajan vastuulla luokitella pisteet yllä oleviin luokkiin, ja luokitteluprosessi perustuu filosofiaan siitä, että datasta ei koskaan pitäisi joutua poistamaan pisteitä, vaan ei-toivotut pisteet piilotetaan. Tarkoitukseen on kehitetty monia automatisoituja algoritmeja. [7] Automaattiset luokittelut eivät kuitenkaan ole täydellisiä, ja niiden tarkkuus on yleensä n. 90 %. Lopuille pisteille täytyy tehdä manuaalinen puhdistus ja luokittelu mikä on aikaa vievää ja kallista. [8] Voidaan olettaa tosin, että 100 % oikeellisuus ei myöskään ole sovelluksesta riippuen aina tarpeellista.

2.3 Todennäköisyyspohjainen menetelmä pistepilven rekisteröintiin

Tutustutaan tarkemmin erääseen todennäköisyysjakaumiin perustuvaan NDT-menetelmään, mikä voidaan kategorisoida taulukon 1 todennäköisyysperäisiin algoritmeihin. Kyseistä menetelmää tullaan käyttämään työssä myöhemmin.

Vuonna 2003 Peter Biber esitteli tutkimuksessaan ”The Normal distributions Transform: A new Approach to Laser Scan Matching” menetelmän kaksiulotteisille pistejoukoille, joka erosi yleisesti siihen mennessä käytössä olleista menetelmistä kuten ICP siten, että menetelmässä ei tarvitse muodostaa suoria vastaavuuksia pisteiden välillä. Peterin NDT perustuu siihen, että kaksiulotteinen taso pilkotaan ennaltamäärätyn kokoisiin ruutuihin, jonka jälkeen ruuduille, joissa on vähintään kolme pistettä, lasketaan todennäköisyysjakauma. Todennäköisyysjakauma lasketaan pisteiden painopisteen ja kovarianssin avulla, ja se kertoo todennäköisyyden pisteen sijainnille kussakin ruudun pisteessä [9].

NDT-jakauman laskemisen jälkeen, uusi pistejoukko voidaan rekisteröidä tämän päälle selvittämällä translaation eli sijainnin ja suunnan parametrit seuraavasti:

1. Arvioi sijainnin ja suunnan parametrit. (nolla-arvo tai muu mittaukseen perustuva arvio, esim. IMU)
2. Sijoita uuden pistejoukon pisteet ensimmäisen joukon koordinaatistoon arvioituja parametrejä käyttäen.
3. Määritä, minkä normaalijakauman alueelle kukin piste osuu ensimmäisessä pistejoukossa.
4. Parametrit pisteytetään laskemalla transformoitujen pisteiden sijaintien todennäköisyyksien summa.
5. Suorita uusi arvio parametreille tekemällä yksi Newtonin algoritmin iteraatio.
6. Palaa kohtaan 2 ja toista, kunnes konvergerssikriteeri täyttyy. [9]

Vuonna 2009 Martin Magnusson laajensi Peter Biberin vuonna 2003 esittelemää menetelmää kattamaan kolmiulotteisen avaruuden. Tässä 3D-NDT:ssä alkuperäinen periaate säilyy, mutta ruutujen sijasta käytetään kolmiulotteisia kuutioita eli vokseleita. Magnusson tunnisti alkuperäisen 2D-NDT:n haasteita, kuten vaikeuden käsitellä suuria määriä dataa ja vaikeudet pistejoukkojen rekisteröinnissä tilanteissa, joissa alkutilan arvio on epätarkka. Joihin vastattiin mm. multiresoluutioisella vokseliverkolla ja trilineaarisella interpolaatiolla. Liian suuri vokselikoko johtaa siihen, että pienemmät yksityiskohdat sumentuvat, ja kohdistuksen tarkkuus heikkenee. Liian pienessä vokseliverkossa vokselit

taas vaikuttavat liian paikallisesti, jolloin kohdistuksen onnistuminen edellyttää hyvin läheistä alkusijoitusta. Yksittäisen kiinteän vokselikoon valitsemisen sijaan Magnusson ehdottaa muutamaa eri ratkaisua, mm. octree-diskretisointia, jossa tila jaetaan pienempiin soluihin vain tarvittaessa, ja iteratiivista diskretisointia, jossa verkkoa hienonnetaan aina iteraatioden välillä. Trilineaarinen interpolaatio parantaa jatkuvuutta ja pehmeyttä huomioimalla pisteiden vaikutuksen naapurivokseleihin, estäen näin epäjatkuvuuksia vokselien rajoilla. Kokeissa eri tavoista yleensä parhaimmaksi suoriutui iteratiivinen diskretisointi, sen nopeuden ja tarkkuuden välisen kompromissin takia. [10]

Lisäksi tutkimuksessa esitellään onnistuneesti tapaa ratkaista loop detection-ongelmaa. Loop detection eli silmukan tunnistus tarkoittaa kykyä tunnistaa aiemmin vierailtuja paikkoja, jolla voidaan korjata sijaintiarviota pitkänkin matkan jälkeen. Silmukan tunnistus on yksi hankalimmista ongelmista SLAM:ssa, ja väärä positiivinen eli väärän silmukan havaitseminen voi tuhota kerätyn datan käyttökelvottomaksi. Silmukan havaitsematta jääminen toisaalta ei ole niin suuri ongelma. Loop detection on tärkeää siitä syystä, että tarkkojenkin mittausten jäljiltä kertyy summautuvasti sijainnin vääristymiä mittausdataan. [10]

Vuonna 2013 Jari Saarinen kollegoineen jatkoi NDT-menetelmän kehittämistä esittelemällä Normal Distributions Transform Occupancy Maps (NDT-OM) -menetelmän. Menetelmä on suunniteltu erityisesti reaaliaikaiseen 3D-kartoitukseen suurissa muuttuvissa ympäristöissä. NDT-OM hyödyntää aiemmin esiteltyä NDT-esitystä, mutta laajentaa sitä yhdistämällä siihen tilan varaustiedon. Varaustieto jakaa ympäristön vokseleihin, joille määritetään todennäköisyys siitä, onko kyseinen alue vapaa vai varattu. Menetelmän muistivaatimukset riippuvat vain kartoitetun ympäristön koosta, eivätkä esimerkiksi kuljetun reitin pituudesta tai mittausdatan määrästä, tehden siitä pätevän myös suurienkin aineistojen käsittelyyn. [11]

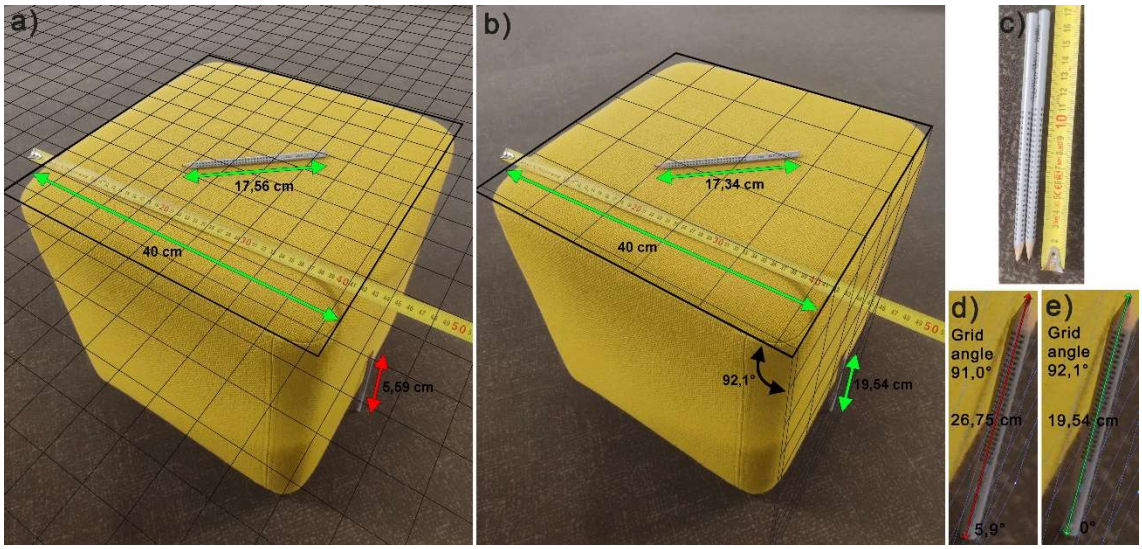
2.4 Spatiaalinen hahmotus ja perspektiivin vääristymien vaikutus mittauksiin

Spatiaalinen eli avaruudellinen hahmotus ja kuvan mittasuhteiden saaminen ei ole valokuvista yksinkertainen tehtävä. Kun kuvattava kohde on kaksiulotteinen, kuva sisältää yhden referenssimitan, ja lisäksi kamera ottaa kuvan samansuuntaisesti kuvattavan pinnan suhteen, voidaan kuvan olettaa olevan tarpeeksi yksinkertaistettu, jolloin kuvan kohteiden mitat saadaan vertaamalla suoraan referenssiasteikkoon tavallisen kaksiulotteisen kartan tavoin. Käytännössä kuvaan tulee kuitenkin aina perspektiivin vääristymiä (engl. perspective distortions), koska kamera kuvaa kohdetta väistämättä jostakin kulmasta eikä kohtisuoraan kohteen pisteisiin nähden. Tämä aiheuttaa sen, että kohteen

eri osat kuvautuvat eri mittakaavoissa ja suhteissa. Tilannetta edelleen monimutkaistaa, kun kuvattavan kohteen pinnat sijaitsevat kolmiulotteisessa avaruudessa lukemattomiin eri suuntiin osoittavilla tasoilla. [12]

Kuvassa 3 kohdassa a) tummennetulla referenssineliöllä oikaistaan perspektiivin vääristymä määrittämällä kuvassa eri pituisina projisoituvat tahkon kaikki neljäsivua samanmittaisiksi. Kun määritetään sivun pituudeksi todellinen 40 cm, ja luodaan referenssineliön perspektiivissä referenssiruudukko, pystytään tältä tasolta mittaamaan minkä tahansa esineen mitta. Tahkolla olevan kynän mitaksi saadaan mitattua näin 17,56 cm, mikä on varsin lähellä todellista kohdassa c) näkyvää todellista n. 17 cm mittaa. Sivutahkolla, punaisella nuolella merkitty kynä sen sijaan jää vääristyneeseen 5,59 cm mittaan, sillä kynä ei sijaitse samalla tasolla.

Kuvan 3 kohdassa b) on pyritty korjaamaan kynän pituuden vääristymää luomalla päälitahkon suhteen 92,1° kulmassa referenssitaso, jolloin tasolla on sama kulma kuin tuoliin nojaavalla kynällä. Näin määriteltynä kynien pituuksina saadaan 17,34 cm päälitahkolla, ja 19,54 cm sivutahkolla, mikä on huomattava parannus aikaisemmasta 5,59 cm mitasta. Kohdissa d) ja e) havainnollistetaan virhettä mikä aiheutuu referenssitasonkulma virheestä. Kohdassa d) referenssitasonkulma on 91,0° jolloin kynä projisoituu 5,9° kulmassa referenssitason vertikaalisia ruudunviivoja vasten, ja kynän mitaksi saadaan 26,75 cm. Kohdassa e) referenssitasonkulma on 92,1°, jolloin kynä projisoituu tasolle samansuuntaisena kuin referenssiruudukon vertikaalit viivat ja kynän pituudeksi saadaan 19,54 cm. Mikäli sivutahkolla oleva kynän suunta ei olisi ennalta tiedossa, kuten tässä tapauksessa, jossa sen tiedetään osoittavan suoraan ylöspäin hieman nojaten tuolia kohti, ei sen pituutta voitaisi luotettavasti määrittää yksittäisestä kuvasta. Tällöin tarkkamittaus edellyttäisi toista kuvakulmaa, jotta orientaatio voitaisiin ratkaista yksiselitteisesti.



Kuva 3. *Spatiaalisen hahmottamisen ongelmia. a) Perspektiivin vääristymä yhdellä tasolla. b) Perspektiivin vääristymän korjaus kahdella tasolla. c) Kynien todellinen mitta. d) ja e) kulman vaikutus mittatulokseen.*

2.5 Korkeusmallit

Työn kannalta hyödyllisiä karttatasoja ovat korkeusmallit, jotka paljastavat pintamuotoja maanpinnasta puiden latvustoihin asti. Maastomalli eli Digital terrain model (DTM) kuvaa pelkän maanpinnan maastoa ilman rakennuksia tai kasvillisuutta. DTM:n pisteistä interpoloitu rasteri eli digital elevation model (DEM) tai suomeksi korkeusmalli muodostetaan säännölliseksi ruudukoksi, jossa jokainen solu sisältää korkeusarvon. Digital surface model (DSM) eli pintamalli puolestaan rekisteröi pinnalta korkeimman kohdan, olipa kyseessä rakennuksen katto tai puun latvus. Latvuston korkeusmalli (canopy height model, CHM) saadaan vähentämällä DSM:stä DTM, eli suorittamalla laskutoimitus CHM = DSM - DTM, jolloin tuloksena on juuri puiden latvuston korkeus maanpintaan nähden. [13] Nämä korkeusmallit ovat yleisesti käytössä olevat formaatit, jotka kaikki saadaan johdettua ALS-aineistosta.

2.6 Vaihtoehtoiset teknologiat laserkeilaukselle ja niiden arviointi

Perinteiset tutkateknologiaan perustuvat anturit käyttävät tunnistukseen radioaaltoja, joiden aallonpituus vaihtelee sadoista kilometreistä millimetriin. Autoteknologiassa käytetyissä sovelluksissa käytetään yleisesti tutkia, joiden radioaallonpituus on joitakin millimetrejä [14]. Rayleighin kriteerin mukaan tutkien kulmaresoluutio riippuu aallonpituudesta ja antennin koosta [15]; pidempi aallonpituus johtaa väistämättä heikompaan kul-

maresoluutioon verrattuna lyhytaallonpituisiin järjestelmiin, kuten kameroihin ja lidareihin. Tästä syystä tutkilla ei voida saavuttaa yhtä korkeaa kulmaresoluutiota kuin lidareilla, jotka hyödyntävät huomattavasti lyhyempää näkyvän valon tai infrapunan aallonpituutta.

Tämän vuoksi edes uusimmat ja edistyneimmät 4D-kuvantamiseen tarkoitetut tutkajärjestelmät eivät kykene tuottamaan lidarin tarkkuutta vastaavaa yksityiskohtaista esitystä ympäristöstä. Tutkatekniikka tarjoaa kuitenkin kustannustehokkaan vaihtoehdon tilanteisiin, joissa tarkkuus voidaan osin uhrata edullisemman ja nopeamman järjestelmän hyväksi. Esimerkiksi ensimmäisenä kohteeseen saapuvan yksikön lidarin voisi korvata ajoneuvokäyttöön tarkoitetuilla tutkajärjestelmillä, joiden keräämää dataa voitaisiin hyödyntää nostolavan sijoittelussa. Tässä lähestymistavassa kuitenkin menetetään merkittävä osa käyttökokemusta, koska yksityiskohtaisen tilannekuvan muodostaminen lidarilla voisi alkaa vasta samanaikaisesti nostimen operoinnin kanssa.

Lidarin ja tutkien lisäksi fotogrammetrialla voidaan tuottaa korkealaatuisia ja visuaalisesti vaikuttavia kolmiulotteisia malleja. Taulukossa 3 esitetään näiden kolmen kuvantamisteknologian ominaisuuksia vertailumuodossa. Taulukon tavoitteena on havainnollistaa menetelmien eroja sekä vahvuuksia ja heikkouksia erityisesti työn kannalta olennaisten ominaisuuksien osalta.

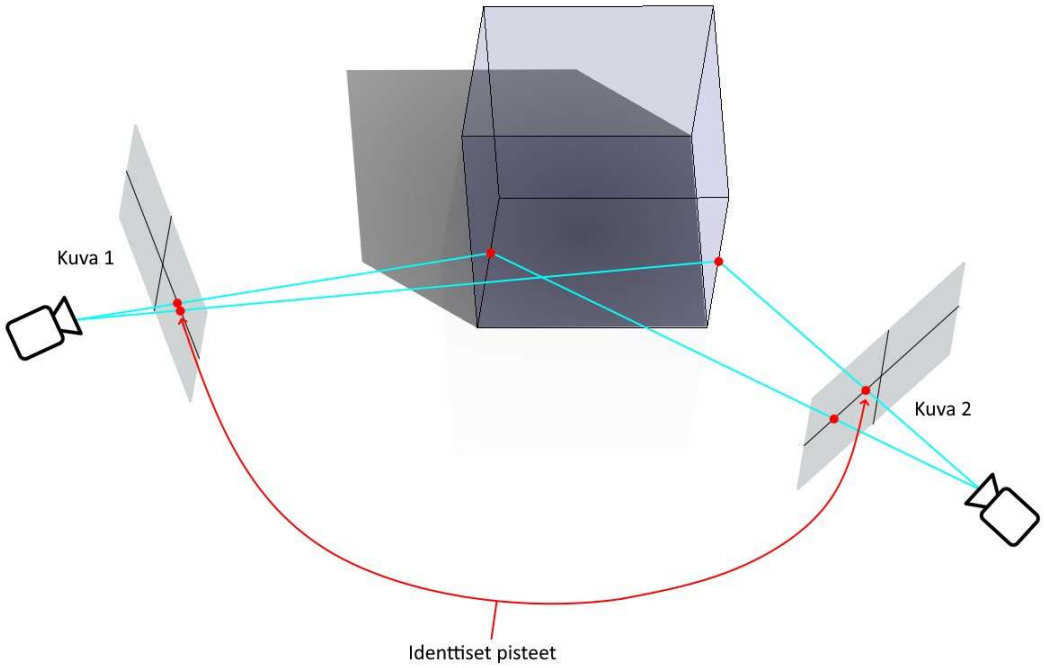
Taulukko 3. *Kuvantamisteknologioiden vertailu.*

	Lidar	Fotogrammetria	Tutkat
Säänkestävyys	Ei ole riippuvainen auringonvalosta. Sumu, sade ja pöly heikentävät kuvantamisen laatua hieman.	Vaatii ulkoisen valaistuksen. Varjot menetelmälle haitallisia [16]. Sumu, sade ja pöly haitallisia.	Erinomainen, toimii kaikissa sääoloissa.
Mallinnustarkkuus	Senttimetritarkkuus.	Jopa senttimetri horisontaalisesti ja 2–4 cm vertikaalisesti [17].	Huono, lähietäisyydellä jopa 10 cm, mutta suurenee nopeasti etäisyyden kasvaessa [18].
Vertikaalinen näkökenttä.	Vaihtelee, yleensä 20–40°. OS1 noin 40° [4].	Riippuvainen kameran optiikasta. Yleensä > 40°.	Vaihtelee, yleisesti noin 5–30°.
Vertikaalinen resoluutio	1–1440 kanavaa [19]. OS1 128 kanavaa [4].	Kameran resoluutio.	Tyypillisesti 3–10°
Nopeus	Reaaliaikainen, myös rekisteröinti mahdollista reaaliaikaistaa.	Fotogrammetristen mallien luonti on laskennallisesti raskasta, eikä nykyteknologialla päästä reaaliaikaisiin malleihin [16].	Pieni datatiheys mahdollistaa nopean käsittelyn.
Resurssivaatimukset	Korkeat.	Erittäin korkeat.	Pienet.
Kustannus	Kallis. Pelkkä anturi voi olla yli 10 000€.	Halpa. Vaatimuksena laadukas kamera.	Kohtalainen, massatuotetut autosensorit halpoja, korkearesoluutioiset 4D imaging radarit kalliimpia.

2.6.1 Fotogrammetrian toimintaperiaate

Fotogrammetria tarjoaa tavan rekonstruoida kolmiulotteisia kappaleita parsimalla yhteen kaksiulotteisia kuvia. Kuvassa 4 on esitetty 2 erillistä pistettä sekä näiden projektiot ku-

vatuissa kuvissa 1 ja 2. Vähintään kaksi kuvaa vaaditaan kolmiulotteisen kuvan luomiseen [20, p. 10]. Kuvaa 4 katsoessa on kuitenkin ilmiselvää, että sillä ei saada mallinnettua kuin tahko, jossa pisteet ovat, koska muuta sivu tahkot näkyvät korkeintaan yhdessä kuvassa.



Kuva 4. *Fotogrammetrian toimintaperiaate.*

Kuvasta saadaan sitä parempi, mitä enemmän kuvia otetaan. Fotogrammetriassa pisteiden sijainti lasketaan kolmiomittauksella risteävien viivojen perusteella. Fotogrammetrian etuna on, että tämä mittaus voidaan toteuttaa samanaikaisesti näennäisesti rajattomalle määrälle pisteitä, saaden spatiaalisesti rekonstruoitua kuvan mittasuhteet eri perspektiivien suhteen. kolmiomittauksen takia pelkästään kuvien ottaminen ei riitä, vaan kamerasta tarvitsee tietää sen suuntaus ja sijainti. Kun kameroiden sijainti ja suuntaus toisiinsa nähden tiedetään, saadaan laskettua mitatun pisteen etäisyys ja annettua sille x, y ja z komponentit. [20, pp. 10-11]

Jotta fotogramminen kuva saadaan rekonstruoitua mitoiltaan oikeaksi kolmiulotteiseksi rakenteeksi, on kameran oltava kalibroitu. Tällä tarkoitetaan sitä, että kameran sisäiset parametrit, kuten polttoväli, pääpiste ja pikselien kuvasuhde ovat tunnettuja. Jos kameroiden kalibrointia ei suoriteta, saadaan ainoastaan projektiivinen rekonstruktio, missä mallin mittasuhteet voivat poiketa huomattavastikin euklidisesta rakenteesta. Pelkässä projektiivisessa mallissa ei ole tietoa todellisista kulmista tai mittasuhteista, ja sen takia kuva voi näyttää epärealistiselta. Kuitenkin mikäli kuvattavasta kohteesta on monta ku-

vaa, ja tiedetään että kuvan ottaneilla kameroilla on sama kalibrointi, voidaan kameroiden kalibrointi päätellä ja saadaan kolmiulotteinen malli tuotettua. On kuitenkin huomioitava, että automaattinen kalibrointi voi olla laskennallisesti haastavaa ja altis virheille. Tämän vuoksi tarkka ennakkokalibrointi parantaa huomattavasti rekonstruoidun mallin mittatarkkuutta ja luotettavuutta. [21, pp. 16-18]

3. JULKISESTI SAATAVILLA OLEVAT KARTTA-AINEISTOT

Tässä luvussa esitellään tutkimuksessa hyödynnetyt julkisesti saatavilla olevat karttaaineistot. Aluksi tarkastellaan Google Maps- ja Google Earth -palveluiden käyttömahdollisuuksia ja niihin liittyviä käyttörajoituksia. Seuraavaksi käsitellään Maanmittauslaitoksen tarjoamia laserkeilausaineistoja, niiden luokituksia ja käyttömahdollisuuksia Bronton Duties -sovelluksessa. Lopuksi tarkastellaan Cesium-alustan ja muiden kansainvälisten karttapalveluiden käyttöä 3D-paikkatiedon hallinnassa ja hyödynnetään aineistoja sovelluksen kehitystyössä.

3.1 Google maps – palvelun aineistot ja tarkkuus

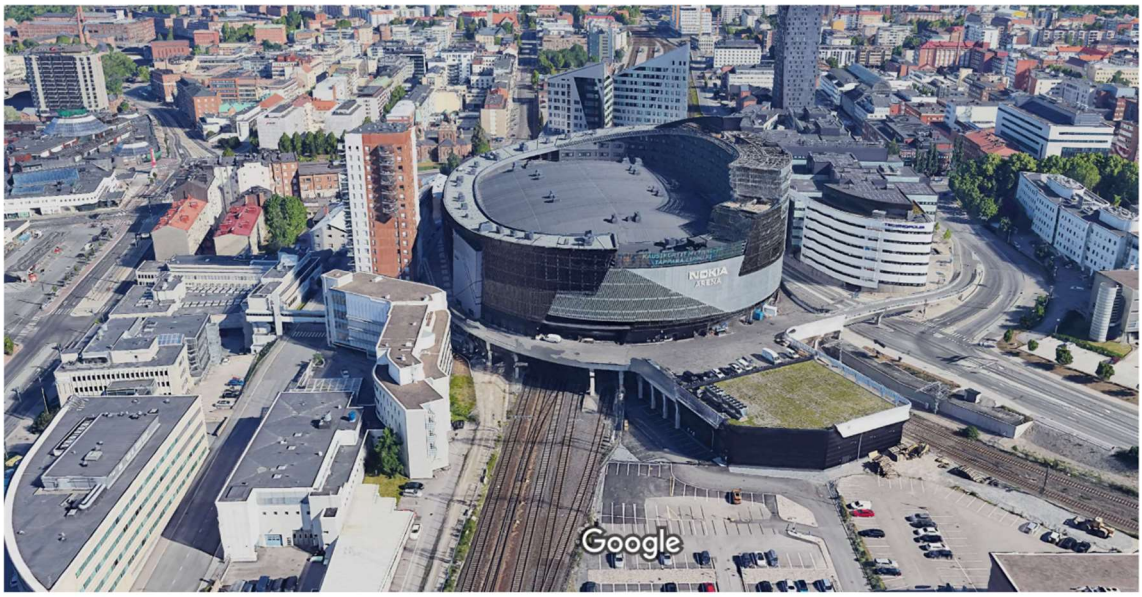
Google Earth palvelussa on 3D-malleja valituista kaupungeista ympäri maailmaa. Mallit on tehty fotogrammetrialla yhdistämällä ja prosessoimalla kuvia senttimetrien tarkkuudella monesta eri perspektiivistä, esimerkiksi ilmakuvista, Street view-autoista ja vaeltajilta [22]. Suoraan palveluista ei saa aineistoa

Kaikkialta, mistä aineistoa on saatavilla, aineisto on korkealaatuista ja esteettisesti näyttävää, mutta aineiston muokkaus ja tallennus suoraan palvelusta on kielletty. Kolmannen osapuolen työkalut eivät saa tallentaa malleja Google Earth palvelusta vastaavien 3D-mallien luomiseen tai vastaavaan tarkoitukseen [23].

Vaikka suoraan palvelusta ei saa irrottaa materiaalia omiin tarkoituksiin, Google tarjoaa erilaisia ohjelmointirajapintoja (API), joilla voidaan upottaa Googlen karttoja omiin tarkoituksiin. Karttatasoista on saatavilla kaikki, jotka normaalissa Google Mapsissakin ovat saatavilla. API:sta riippuen käyttö on ilmaista aina 1 000–100 000 pyyntöön asti kuukaudessa, jonka jälkeen google alkaa periä maksuja käytön mukaan [24].

Duties-sovelluksessa on käytössä Map Tiles API, mikä näkyy kuvassa 1. Pohjakarttana on sateliittikuvattu 2D-ruutu (2D Tiles). Map Tiles API on siitä hyvä, että sillä voi tehdä pyyntöjä tavallisista tiekartoista, satelliittikuvista, katunäkymistä ja fotorealistisista 3D-ruuduista (Photorealistic 3D Tiles) [25]. Tällä hetkellä Bronton Duties -sovelluksessa käytössä on 2D-pohjakartta, mutta 3D-mallien integraatio olisi varteenotettava lisäaskel. Kuvassa 5 on geneerinen kuva Tampereen kannen areenasta Googlen 3D-mallina. Googlen fotogrammetrialla tuotetuissa kuvissa on lentolaserskannaukseen verrattuna

etuna se, että myös seinien piirteet saadaan yllättävän tarkasti näkyviin (esim. parvekkeet), ja mallit ovat automaattisesti todenmukaisempia niiden luonnollisen värityksen takia.



Kuvat ©2025 Google,Airbus,Maxar Technologies,CNES / Airbus,CNES / Airbus,Landsat / Copernicus,IBCAO,Karttatiedot ©2025 20 m

Kuva 5. *Havainnollistava kuva Googlen 3D-mallista.*

Tärkeimpänä huomiona Google antaa erityisen luvan:

- Geodata overlays with Photorealistic 3D Tiles

  Voit esittää omia 3D-objekteja, jos esitettyjä objekteja ei ole poimittu, jäljitelty tai muuten luotu Googlen Photorealistic 3D Tiles perusteella [25].

Lupa mahdollistaa mallien täydennyksen omilla tarkemmilla malleilla, tässä tapauksessa Itse kuvatuilla lidar-pistepilvillä tai niistä valmistetuilla malleilla suoraan googlen kartan päälle, kunhan alkuperäistä Googlen karttaa ei suoraan muokkaa.

Tutkimuksessa, jossa vertailtiin äärimmäisen tarkkaan tunnettujen 1054 IGS (eng. The International GNSS Service) referenssiasemien koordinaatteja ympäri maailmaa Google Earth kartan satelliittikuvissa näkyvään asemien sijaintiin, saatiin satelliittikuvien sijaintitarkkuudeksi keskimäärin 4,38 m. Tutkimuksessa mainitaan myös, että sijaintitarkkuus on paras, luokkaa 1 m länsimaisissa kaupungeissa. [26] Itse GNSS-paikannusjärjestelmillä päästään 1,5-2 m (Galileo), 2-4 m (GPS), 3-5 m (GLONASS) ja 1,5-10 m (BeiDou) absoluuttiseen tarkkuuteen [27]. Vaikka GNSS-järjestelmä tuottaisi täydellisen virheetöntä sijaintitietoa, havaittaisiin Google Earth kartassa silti sijaintipoikkeama, koska koko kartalla on sijaintipoikkeama.

Vaikka GNSS-järjestelmien absoluuttinen tarkkuus on parhaimmillaan n. 1,5 m, suhteellinen tarkkuus on huomattavasti parempi, noin 1 cm luokkaa. Tämä johtuu siitä, että absoluuttinen virhe on kahden vierekkäisen GNSS vastaanottimen välillä aina samaan suuntaa, jolloin absoluuttinen virhe saadaan poistettua. Jos toinen GNSS vastaanottimista sijoitetaan tarkasti tiedettyyn paikkaan, saadaan todellinen sijainti muille GNSS vastaanottimille senttimetrien tarkkuudelle vertaamalla tiedettyyn. Menetelmä toimii noin 35 km säteelle, sillä vastaanottimien on nähtävä samat satelliitit. [28]

Google Earth -karttojen spatiaalinen resoluutio, eli yksityiskohtien erotuskyky vaihtelee kartan mosaiikkimaisuuden takia, eikä Google tarjoa suoraan palvelua resoluution selvittämiseksi. Yleisesti kuitenkin tiedetään, että Google käyttää kuvissaan satelliitteja, joiden erotuskyky vaihtelee aina 30 metristä pikselillä ainakin 15 senttimetriin pikselillä, lisäksi karttaa on täydennetty erityisesti asutuilla alueilla ilmakuvauksilla, joiden resoluutio voi olla jopa tarkempi. Esimerkiksi kuvan 5 alalaidassa mainittu Maxar Technologies tuottaa kuvasisältöä 15 cm spatiaalisella resoluutiolla [29].

3.2 Maanmittauslaitoksen tarjoamat laserkeilausaineistot

Maanmittauslaitos eli MML tarjoaa tämän projektin kannalta hyödyllisiä kartta-aineistoja Suomen valtion rajojen sisältä. Tärkeimpänä voidaan pitää laserkeilausaineistoja ja niiden pohjalta korkeusmalleja, sillä nämä antavat kattavasti tietoa maanpinnan muodoista. Tämä kappale sisältää vain tietoa MML tarjoamista materiaaleista, ja tarkempi selvitys laserkeilauksesta, sekä sen tuottaman pistepilven toiminnasta löytyy kappaleista 2.1 ja 2.2.

MML tuottaa kahta eri ilmakuvattua laserkeilausaineistoa. Aineistot koostuvat pistepilvistä, joilla on x, y ja z koordinaatit standardisoidussa koordinaatistossa. [30]. Keilausaineistot jaetaan LAZ-formaatissa, pakaten datan n. 7–20 % tilaan yleisimmin käytetystä LAS-formaatista [31].

- **Laserkeilausaineisto 5 p**

Tarkempi. 5 pistettä/m^2, mikä vastaa sitä, että pisteiden etäisyys toisistaan on keskimäärin enintään 0,4 m. Korkeus- ja tasotarkkuuden keskivirheet ovat enintään 10 ja 45 senttimetriä. Aineiston käyttö on luvallista, ja maksaa keväällä 2025 0,026 € / km^2 eli tekisi koko Suomen pinta-alalle n. 8800 €. [30] Aineistoa on alettu kerätä vuodesta 2020, ja kattaa melkein koko Suomen pohjoisinta Lappia lukuun ottamatta. Aineistoa tuotetaan kuuden vuoden sykleissä, n. 55 000 km^2 per vuosi. [32] Aineiston käyttöehdot määrittävät mm. seuraavaa: ”Aineistoa voi muokata ja muokattuna hyödyntää kaupallisesti ja eikaupallisesti ja yhdistellä muokattuna muihin tuotteisiin tai käyttää muokattuna osana

sovellusta tai palvelua” ja ”Muokkaamisella tarkoitetaan näissä käyttöehdoissa aineiston vähäistä suurempaa muuttamista, kuten korkeusmallien, pintamallien, rinnevarjosteiden tai muiden vastaavien tekemistä kahden (2) metrin tai sitä karkeammalla resoluutiolla” [33]. Tämä siis tarkoittaa, että Duties-sovelluksessa käytettävä korkeusmalli voisi olla korkeintaan 2 pistettä/m^2 tarkkuudella tehdystä aineistosta.

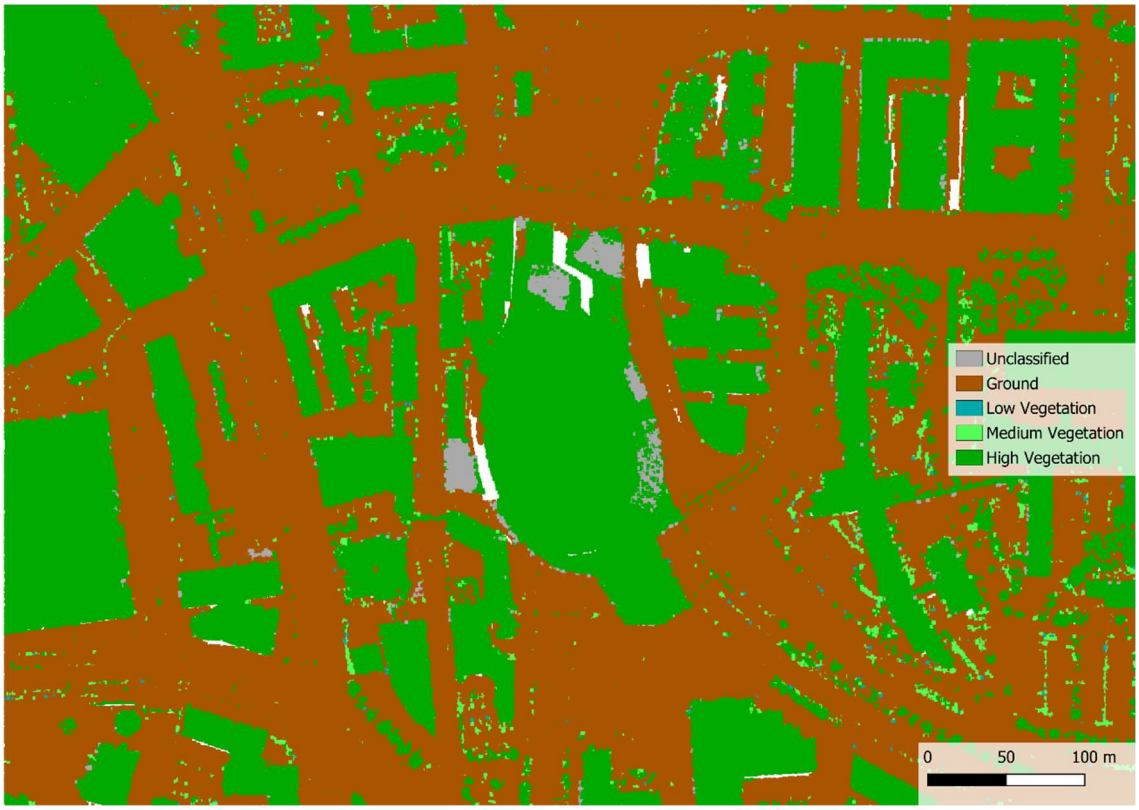
- **Laserkeilausaineisto 0,5 p**

MML pitää yllä kahta eri 0,5 p aineistoa. Aikaisempi on kerätty 2008–2019 välillä, kattaa koko suomen, ja uudempi vuodesta 2020 alkaen on tuotettu harvennettuna 5 p laserkeilausaineistosta, minkä kattavuusalue on täten myös sama kuin 5 p aineistolla [32]. Uusi aineisto on tarkkuudeltansa sama, kuin 5 p aineisto, vanha on tarkkuudeltansa 15 ja 60 senttimetriä korkeus- ja tasotarkkuuksissa. 0,5 p aineistot ovat ilmaisia ja vapaan kaupallisen käytön oikeuttavan CC 4.0 lisenssin alaisena [34] [35].

Kuvassa 6 näkyy MML:n laserkeilausaineistoa, CHM mallin muodossa, jossa pisteet on luokiteltu LAS 1.2-formaatin (kts. luku 2.1) mukaan, millä saadaan suodatettua poikkeuksellisia pisteitä. Tässä pisteet on luokiteltu viiteen kategoriaan korkeuden mukaan:

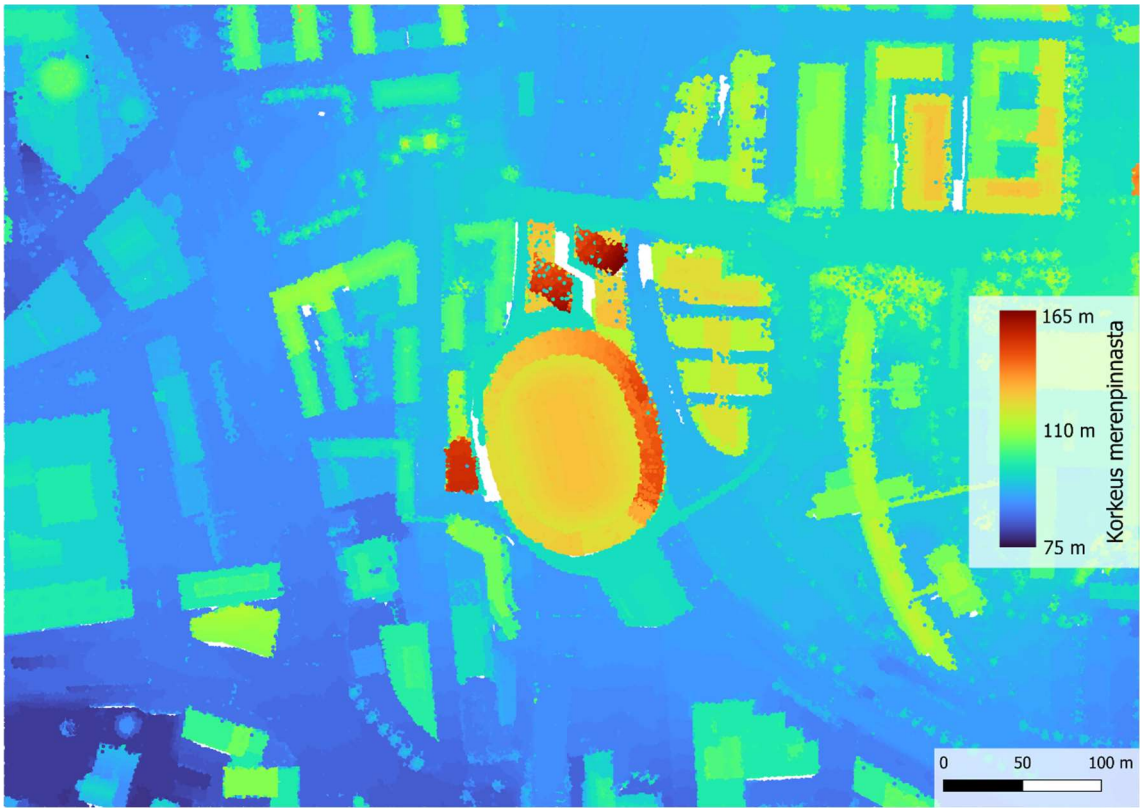
1. Low vegetation 0.0–0.5 m
2. Medium vegetation 0.5–2.0 m
3. High vegetation 2.0–50.0 m.

Lisäksi käytössä on maanpinnan taso ground, ja määrittelemättömät unclassified. [34] Vaikka CHM malli on juuri se, mitä sovellukseen olisi hyvä saada, ei kuvasta 6 käy formaatin takia ilmi rakennuksien korkeutta. Katvealueita on näkyvissä korkeiden rakennusten läheisyydessä, kuvassa valkoisella.



Kuva 6. *0,5 p laserkeilausaineisto Tampereen Kannen areenasta* ***[36]****.*

Kuvassa 7 kuvan 6 data on muokattu pintamalliksi, sillä siitä käy värien perusteella selvemmin ilmi korkeus merenpinnasta. On huomattava, että kuvan pisteiden luokitus on muokatessa hävinnyt, mikä saa aikaan virhe pisteitä. Tämä käy erityisesti ilmi katsoessa areenan eteläpuolella olevia korkeita punaisella näkyviä torneja, joissa on satunnaisia sinisiä pisteitä. Nämä virhe pisteet voidaan uudelleenluokittelulla tai vastaavan prosessointialgoritmin käytöllä poistaa, mutta tähän ei ole esimerkkinä käytettävässä kuvassa ryhdytty. Kuvasta 7 saataisiin helposti CHM-malli vähentämällä siitä korkeusmalli, mistä voitaisiin edelleen rakentaa rakennusten 3D mallit, mikä tehdäänkin myöhemmin. On hyvä huomata, että vaikka pisteresoluutio on huonompi 0,5 pistettä/m^2, erottuvat kuvasta silti monet yksityiskohdat kuten yksittäiset puut.



Kuva 7. *Muokattu 0,5 p laserkeilausaineisto Tampereen Kannen areenasta* ***[36]****.*

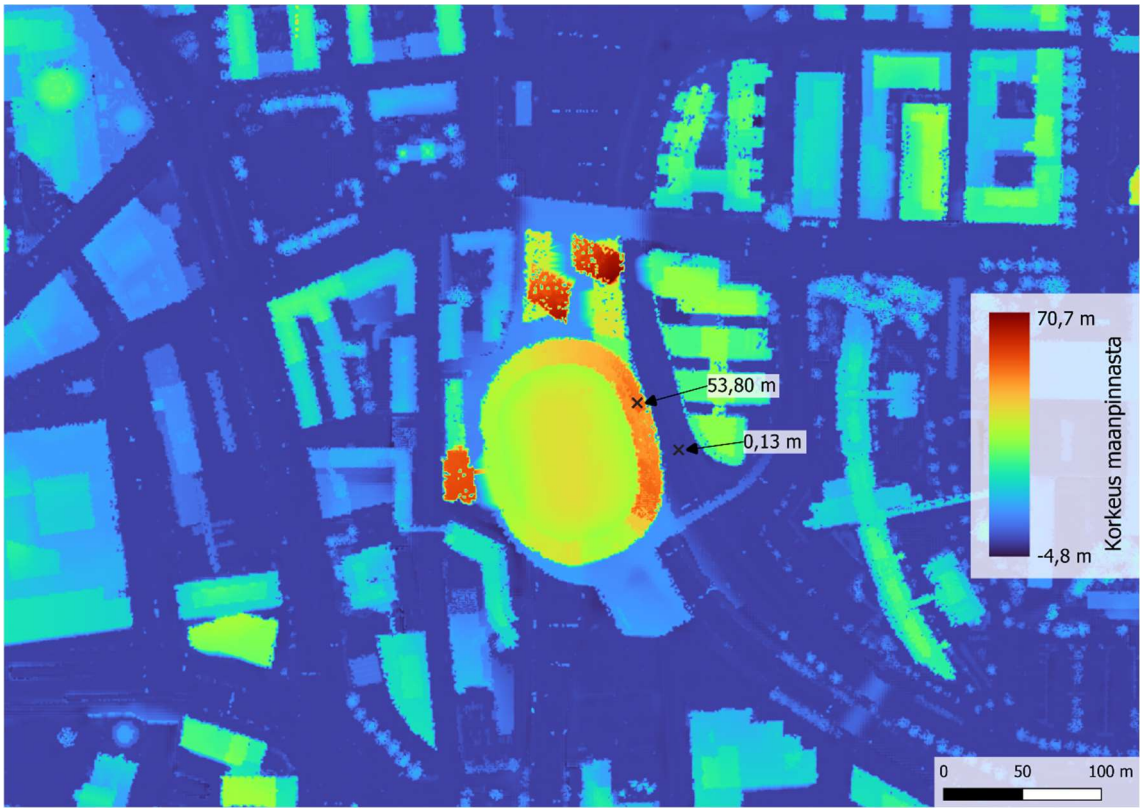
- **Korkeusmalli 2 m**

MML:n korkeusmalli 2 m eli DEM kuvaa maanpinnan korkeutta 2 x 2 m tarkkuudella. Se on luotu laserkeilausaineistojen pohjalta, sekä on vapaasti käytettävissä myös kaupallisesti CC 4.0-lisenssin alaisena. Korkeusmallilla on kaksi laatuluokkaa, joista paremman korkeustarkkuus on keskimäärin 0,3 m ja huonomman 0,3–1 m. Korkeusmallin tiedostomuoto on rasterikuva, kun taas laserkeilausaineistot ovat vektoritiedostoja. [37]

MML tuottaa myös väljempää 10 metrin korkeusmallia, mutta sen hyötyarvo tässä sovelluksessa on todennäköisesti pienempi. Valmiin korkeusmallin käyttö CHM:n muodostamisessa voi olla haastavampaa, sillä sitä ei välttämättä ole saatavilla kaikkialta, joilta kuitenkin on saatavilla laserkeilausainestoa, jolloin se loisi yhden tarkastettavan lisämuuttujan. Toisaalta se vähentäisi prosessointia, ja voisi mahdollisesti olla laadultaan parempi kuin itse pistepilvestä prosessoitu korkeusmalli.

Kuvassa 8 on latvuston korkeusmalli. Kuva 8 on tehty kuvasta 3 rasterisoimalla sen sisältämä vektoriaineisto ja vähentämällä siitä vastaavassa formaatissa oleva MML:n korkeusmalli 2 m. Kuvaan on merkitty referenssipisteeksi satunnaisesta kohdasta kadunpinnan taso 0,13 m (todellinen referenssitaso ei ole tiedossa) ja areenan korkein piste 53,80 m korkeudesta. Näin laskettuna korkeudeksi saadaan 53,67 m.

Todellisuudessa areenan korkeus on 53,5 m [38]. Voidaan todeta saatavilla olevan datan olevan varsin tarkkaa. Katvealueet on kuvassa 8 rasterisoinnin yhteydessä sulautettu lineaarisesti ympäröiviin korkeuksiin. Tälläisissa kohdissa seinät mallintuvat vinoina pystysuoran sijasta. Ongelmasta häviäisi muuttamalla rasterisointialgoritmiä sellaiseksi, joka antaisi katvealueille korkeuden matalimman ympäröivän korkeuden perusteella.



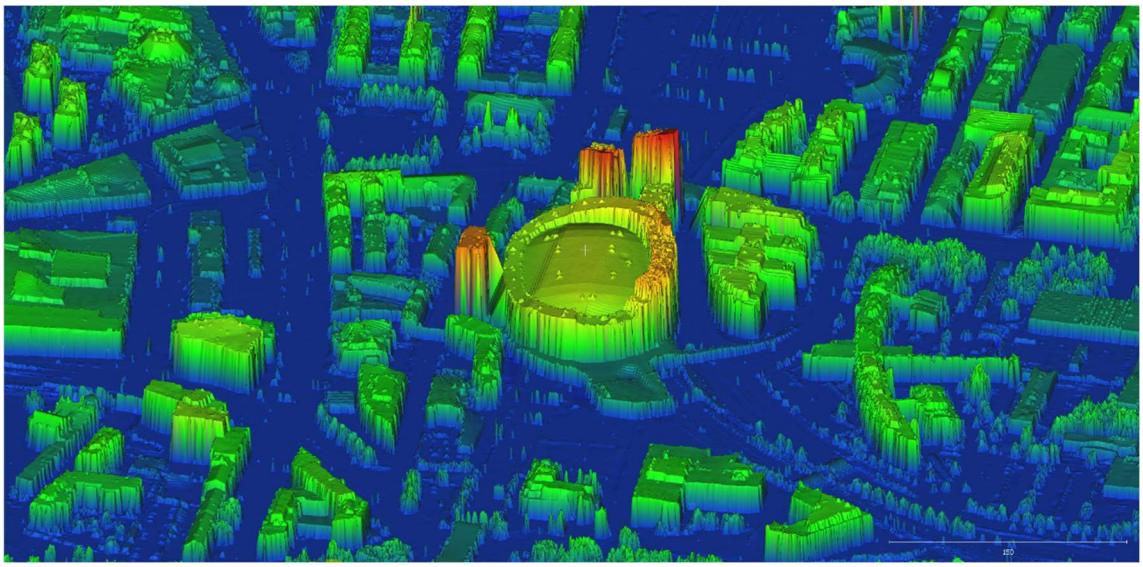
Kuva 8. *CHM rasterikuva Tampereen Kannen areenasta.*

MML tarjoaa lisäksi työn aihetta hipoen Rakennukset 3D-aineistoa, missä rakennukset ovat valmiiksi mallinnettuna, mutta aineisto on varsin hajanainen eikä kovin kattava. Tästä, ja myös muiden maiden kartastojen kanssa yhtenevän järjestelmän luomisen kannalta olisi kuitenkin järkevää keskittyä mahdollisimman pieneen määrään tiedostomuotoja, mieluusti vain laserkeilausaineistoihin, joista saadaan prosessoimalla kaikki tarpeellinen korkeustieto irti.

Merkittävä haitta ilmakuvatussa laserkeilausaineistossa on se, että se ei anna tietoa kappaleiden muista pinnan muodoista kuten seinistä ja katoksien alaisista onkaloista. Tästä syystä dataa pyritään keräämään myös muilla paikan päällä tapahtuvilla tavoilla, joihin perehdytään kappaleessa 4.

Kuva 9 on kuvan 8 perusteella tehty 3D-malli juurikaan kuvaa muokkaamatta. Kuvassa näkyy, suurin osa kuvan katoista on tarpeeksi tarkkoja, jotta niissä näkyvät katon pinnanmuodot. Kuviin 8 ja 9 on kuitenkin jäänyt myös virhepisteitä, esimerkkinä areenan

ympärillä punaisella värityksellä olevat tornit, joissa sinisiä matalampia pisteitä keskellä. Näistä päästäisiin eroon tutustumalla tarkemmin saatavilla oleviin pistepilviaineistojen prosessointialgoritmeihin, tai jopa luomalla oma simppeli matemaattinen malli tähän tarkoitukseen, mutta työn laajuuden puitteissa tähän ei ryhdytä. Kuvan 9 kaltaisen 3D-mallin luovan sovelluksen kehityksessä täytyisi ottaa huomioon luomisen prosessointialgoritmin tehokkuuden optimointi. Mitä tarkempi kuva, sitä raskaampi prosessi. Allekirjoittaneella 2 eri ohjelmaa kaatui lukemattomia kertoja, ja materiaalia täytyi hieman harventaa verkotuksen onnistumiseksi. Prosessoinnin tehokkuuteen ei tässä kiinnitetty minkäänlaista huomiota, ja siihen löytyy varmasti tehokkaampia tapoja.



Kuva 9. *3D-mallinnus kuvan 6 CHM mallin perusteella*

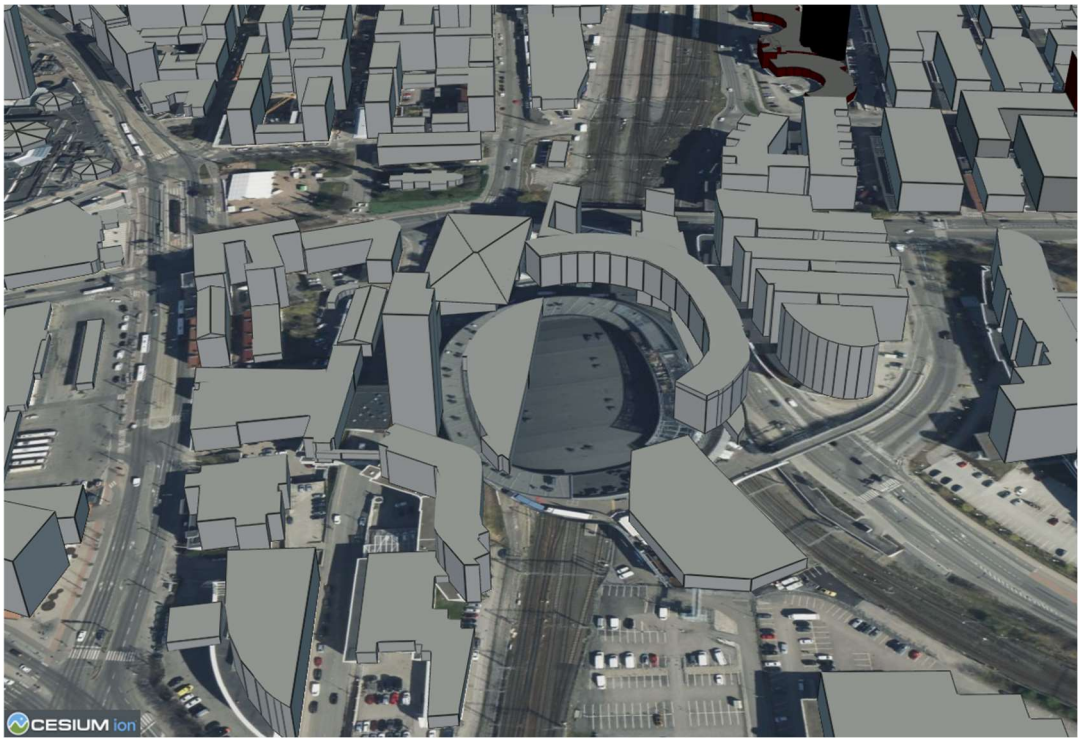
Johdonmukaisena kysymyksenä saadaan, onko prosessointi järkevämpää suorittaa aina pieninä paloina tarpeen mukaan, esimerkiksi 100 m säteellä Bronton sijainnista, vai prosessoida maapallon pinta-alan mukainen paketti valmiiksi niiltä osin mistä dataa on saatavilla ja säilyttää tätä aineistoa keskuspalvelimella.

3.3 Cesium alustan mahdollisuudet 3D-paikkatiedon hyödyntämisessä

Cesium ion on alusta, joka mahdollistaa 3D-paikkatiedon luomisen, visualisoinnin, ylläpidon ja jakamisen mille tahansa laitteelle. Käyttötapoina toimivat mm. JavaScript-kirjasto CesiumJS, sekä pelimoottorit Unreal Engine ja Unity. [39]

Tärkeitä Cesiumin ominaisuuksia:

- tarjoaa mahdollisuuden yhdistää karttoja monista lähteistä, mm. Googlen Map Tiles API, josta 3D Photorealistic Tiles [40]. Tämä kuuluu lisäksi suoraan Cesiumin tarjoamaan kaupalliseen pakettiin alkaen 5000 pyynnöstä hintaan 149 $ kuukaudessa [41].
- Omien materiaalien integraatio. Cesium muuttaa syötetyn datan automaattisesti 3D Tiles -formaattiin. Data voi olla mm. pistepilviä, 3D-malleja, fotogrammetriaa tai maastoa [42].
- Cesium OSM buildings on OpenStreetMapin dataa hyödyntämällä luotu 3D-taso rakennuksista, kattaa koko maapallon sisältäen yli 350 miljoonaa rakennusta [43]. Kuvassa 10 on esimerkki OSM-tasosta Tampereen kannen areenasta, jossa pohjakarttana toimii Bingin satelliittikuva. Mallit ovat yleensä yksinkertaisia, perustuen pohjapiirroksen perusteella korkeuteen pursotetusta laatikosta.



Kuva 10. *Cesium OSM buildings tason havainnollistus.*

3.4 Muiden kartta-aineistojen kansainvälinen saatavuus ja tarkkuus

Kuvassa 10 näkyvää Cesium OSM karttatasoa vastaavia tasoja on saatavilla monessa muussakin palvelussa, sillä se on tuotettu OpenStreetMapin (OSM) metadatan pohjalta, ja on täten tarvittaessa itsekin luotavissa. Vastaavan tason ovat luoneet esimerkiksi, mutta ei pelkästään mm. OSM Buildings, Esri ja GLOSM.

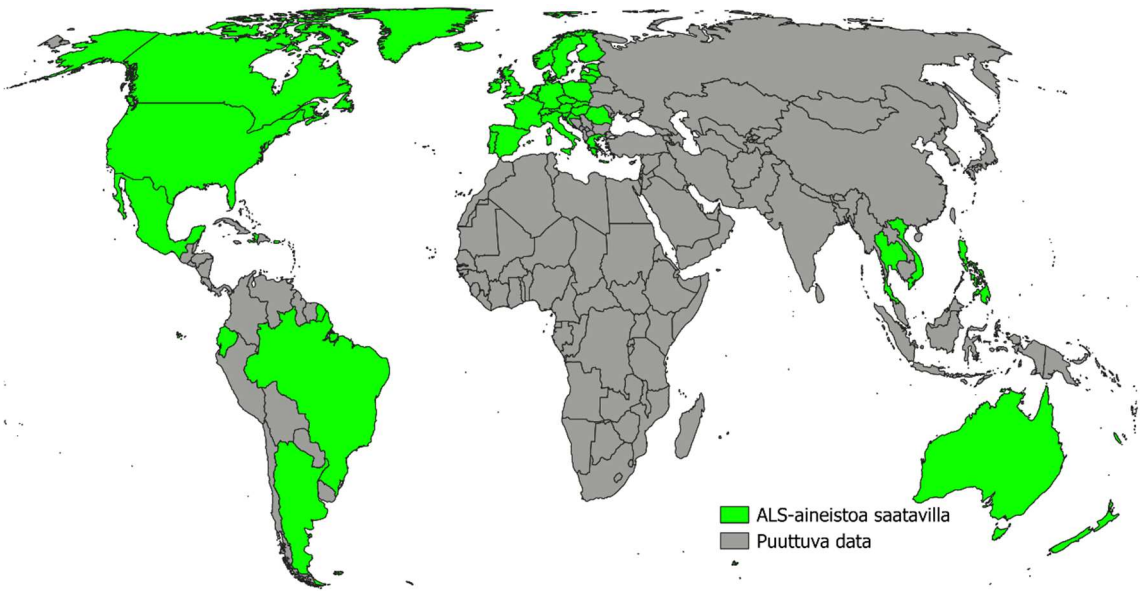
Ideaalisesti jokaisesta maailman kolkasta löytyisi samassa formaatissa olevaa laserkeilausdataa, kuin mitä MML tarjoaa. Tämä ei kuitenkaan todellisuudessa pidä paikkaansa ja dataa on saatavilla vaihtelevalla resoluutiolla ja kattavuudella. Karttaa pitää manuaalisesti päivittää ja prosessoida saatavilla olevien karttojen mukaan, ja yhdistellä niistä tilkkutäkki.

Koko maan tai osavaltion kattavia aineistoja on tehty pääasiassa länsimaissa. Taulukossa 4 on esitelty muutama esimerkki vapaaseen käyttöön jaetuista materiaaleista, joiden tarjoajana toimii kyseisen valtion maanmittauslaitos. Taulukossa 4 näkyy tarkkuus ja kattavuus, jotka ovat keskeisiä tekijöitä karttojen laatimisessa. Taulukon 4 perusteella huomataan, että Suomessa MML:n jakama vapaassa käytössä oleva 0,5 pisteen resoluutio on huono verrattuna muihin valtioihin. Tästä voidaan tehdä johtopäätös, että kuvan 9 tyyppisistä malleista saataisiin yleisesti vieläkin tarkempia.

Taulukko 4. *Esimerkkejä eri maiden tarjoamista ALS-aineistoista.*

Alue	Tarjoaja	Resoluutio	Kattavuus
Yhdysvallat	USGS 3DEP [44]	≥ 2 p/m^2	Lähes koko maa
Englanti	Environment Agency [45]	1 m erotustarkkuus	100 %
Skotlanti	Scottish Goverment [46]	1–4 p/m^2	Osittainen
Ruotsi	Lantmäteriet [47]	1–2 p/m^2	Lähes koko maa
Portugal	DGT [48]	10 p/m^2	100 % (julkaistaan 2025)
Ranska	IGN [49]	10 p/m^2	Lähes koko maa
Puola	GuGik [50]	4–20 p/m^2	Koko maa

Kuvassa 11 on tiedossa olevat maailman valtiot, joista on saatavilla lentolaserkeilaus materiaalia ainakin osittaisella kattavuudella. Kuva on luotu LiDAR and Aerial Archeology yhteisön kattavaan linkkikokoelmaan perustuen jättämällä perinteiset ilmakuva-aineistot huomioimatta [51]. Myös kuvan harmailta alueilta voi olla saatavilla satunnaisesti materiaalia, etenkin tulevaisuudessa lidar-teknologian yleistyessä.



Kuva 11. *Lentolaserkeilausta tuottavat alueet.*

Bronton nostolavoja on 24.3.2025 mennessä Bronto One – järjestelmässä kaikkiaan 4187 kappaletta, joista 2722 on kuvaan 11 merkittyjen valtioiden alueella [52]. Saadaan teoreettinen 65 % kattavuus olettamalla, että kuvaan merkittyjen valtioiden jakama materiaali on koko maan kattava.

Pelastusajoneuvojen navigointi tapahtuu ensisijaisesti ajoneuvoihin integroitujen navigointijärjestelmien avulla. Näiden järjestelmien on oltava luotettavia ja reaaliaikaisesti päivitettäviä, jotta pelastushenkilöstö voi saapua kohteeseen mahdollisimman nopeasti ja turvallisesti.

Bronto Duties -palveluun olisi suositeltavaa integroida navigointiominaisuus, jotta paloajoneuvoissa ei tarvitsisi käyttää erillistä navigointilaitetta. Tämä parantaisi järjestelmän käytettävyyttä ja vähentäisi ajoneuvon ohjaamossa tarvittavien näyttöjen määrää, mikä puolestaan voisi helpottaa kuljettajan työskentelyä ja parantaa turvallisuutta. Integrointi mahdollistaisi sujuvamman operatiivisen toiminnan sekä yhdenmukaisen käyttöliittymän hyödyntämisen ajoneuvon eri toiminnoissa.

Navigointiominaisuudet saisi rakennettua ilmaiseksi perustuen OSM:n tarjoamiin karttapohjiin, tai vaihtoehtoisesti käyttämällä Googlen API-palveluita, jossa etuna on reaaliaikaisuus ja tarkkuus. Tiestön käyttö Dutiesin pohjana on suotavaa riippumatta siitä, päädytäänkö navigointimahdollisuuksien integroimiseen vai ei, sillä kuvan 9 tyyppisistä 3D-malleista pystytään tiestön pohjapiirustuksen perusteella prosessoimaan esteet pois, esimerkiksi tien yli ulottuvat opasteportaalit ja sillat, jotka näkyvät kuvassa suorakulmion muotoisina tasapaksuina möykkyinä.

3.5 Sotilaallisten karttojen tarkkuus ja käyttömahdollisuudet

Fysiikan lait määrittävät satelliiteille tietyn erotuskyvyn, jota pienempää kulmaa ne eivät pysty erottamaan enää toisistaan. Tätä kulmaa θ kutsutaan Rayleighin kriteeriksi, joka määritellään seuraavasti:

$$\theta = 1.22\frac{\lambda}{D}, \tag{1}$$

jossa λ on käytetyn valon aallonpituus ja D linssin tai peilin läpimitta [15]. Edelleen kaaren pituus ympyrästä on:

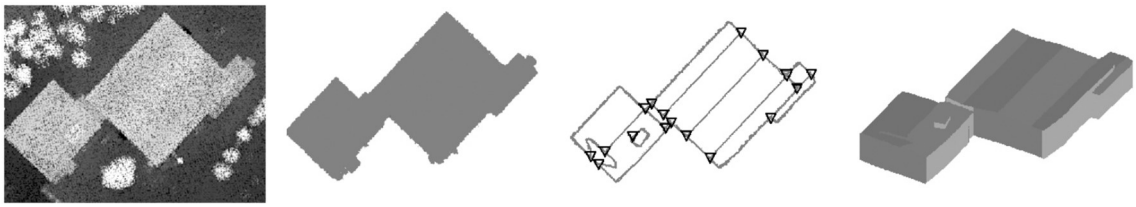
$$s = r * \theta, \tag{2}$$

missä r on säde [15]. Kaavat 1 ja 2 yhdistämällä, sekä käyttämällä pienintä näkyvän valon, violetin 400 nm aallonpituutta ja olettamalla, että maata kiertävällä satelliitilla on halkaisijaltaan 1 metrin kokoinen peili, saadaan 250 km korkeudessa kiertavälle satelliitille teoreettiseksi maksimierotuskyvyksi 12,2 cm.

Tästä syystä voidaan perustellusti olettaa, että sotilaallisten ja siviilitoimijoiden teknologinen ero pysyy saman kertaluokan rajoissa, eikä ainakaan näkyvään valoon perustuvien satelliittien voida olettaa saavuttavan merkittävästi parempia tuloksia maanpinnan kuvantamisessa, sillä kaupallisilla satelliiteillakin päästään jo erittäin lähelle teoreettista maksimia, esimerkiksi Googlen käyttämien Maxar satelliittien erotuskyky on 15 cm [29].

NATOlla on kuitenkin olemassa monia eritarkoituksiin luotuja karttoja ja paikannusjärjestelmiä, joita käytetään sen moninaisilla toimialueilla. STANAG:it (Standardization agreement) ovat NATO:n luomia standardeja, joilla se pyrkii yhtenäistämään jäsenvaltioiden välisiä käytäntöjä yhteensopivuusvaatimusten täyttämiseksi [53]. STANAG-standardien metodeja pohjanaan käyttäen jäsenvaltiot tuottavat myös operatiivisia karttoja, mutta turvaluokituksen alaisina karttoja sekä tietoa niistä on hankalaa löytää julkisista lähteistä.

Tämän tutkimuksen kannalta mielenkiintoinen teknologia on vuonna 2004 ruotsalaisessa maanpuolustuksen tutkimuslaitoksessa kehitetty ja NATOlle esitetty tapa rekonstruoida rakennus laserkeilausaineistoista. Kuvassa 12 rekonstruoidaan vaiheittain rakennuksen 3D-malli hyödyntämällä ALS-aineistoa. Oikealta vasemmalle, ensimmäinen kuva on raaka ALS-data, seuraava rakennuksen pohjapiirustuksen erotus luokittelemalla, kolmas kuva on reuna ja pinta-analyysi ja viimeinen kuva lopputuotteena syntyvä CAD-malli. Pisteet ryhmitellään pohjan sisällä käyttäen erilaisia mittasuureita, esimerkiksi korkeutta ja kulmaa, joiden perusteella pystytään erottamaan katon segmentit, ja tarvittaessa laajentamaan ne koko pohjapiirustuksen alalle. Tämän jälkeen kattosegmentteihin sovitetaan suorat kulmat, tehdään niistä suorakulmioita ja luodaan CAD-malli [54].



Kuva 12. *Rakennuksen rekonstruointi* ***[54]****.*

3.6 Maanalaisen infrastruktuurin paikkatietojen saatavuus

Suomessa on voimassa yhteisrakentamislaki 276/2016, jonka momentissa 5§ määritetään, että Liikenne- ja viestintävirasto huolehtii kansalaisten saatavilla olevan keskitetyn tietopisteen, jonka kautta saadaan ilman viivytystä tiedot mm. ”verkkojen fyysisestä infrastruktuurista” ja ”kaapeleiden, putkien ja niihin verrattavien aktiivisten verkon osien sijainneista.” Verkolla laissa tarkoitetaan viestintä-, energia-, liikenne- ja vesihuoltoverkkoa. Poikkeuksena tietoja ei lain mukaan kuitenkaan tarvitse antaa, mikäli tiedot vaarantavat verkkojen tietoturvallisuutta, yleistä tai kansallista turvallisuutta tai liikesalaisuuksia. [55]

Teoriassa siis Suomesta pitäisi löytyä keskitetty paikka, josta saisi esimerkiksi viemäriverkoston sijainnin helposti maanlaajuisesti. Tosiasiassa valtioneuvoston tiedotteen mukaan tätä varten Traficomin on valmistelema Sijaintitietopalvelun käyttöönotto, joka oli tarkoitus avata tuotantokäyttöön syksyllä 2024, ja sijaintiselvityksen tekijöille 2025 keväällä on turvallisuustilanteen takia ministeri Lulu Ranteen toimeksiannosta pysäytetty 11.10.2024 ennalta määrittelemättömäksi ajaksi [56].

Tiedot maanalaisista rakenteista ovat tästä huolimatta olemassa, mutta niiden hankkiminen monilta toimijoilta, kunnallisilta ja yksityisiltä on työlästä ja jätetään urakoitsijoille, jotka maanmuokkaustyötä tekevät. Bronto Skyliftin tapauksessa tarkoituksessa, jossa karttoja saatettaisiin käyttää esimerkiksi maaperän kantavuusanalyysin tekemiseen henkilönostimen tukijalkojen alla, keskitetty sijaintitietopalvelu olisi suuren mittakaavan karttasovelluksen kannalta melkein välttämätön.

Pääkaupunkiseudulla Helsingin seudun ympäristöpalvelut (HSY) ylläpitää Seuturuutukarttapalvelua, johon on keskitetty eri pääkaupunkiseudun toimijoiden paikkatietoaineistoja, mm. rekisteritietoa, hulevesiaineistoja ja liikenne- ja ympäristö aineistoja. Osa aineistoista on avointa dataa, ja saatavilla tuottajaorganisaatioiden rajapinnoista, mutta SeutuRuutu on luvanvarainen, sillä se sisältää yhteiskunnallisen infrastruktuurin kannalta olennaista tietoa. Seuturuudussa on myös hulevesiensuunnittelua auttava hulevesiprofiili, johon myönnetään erillislupia vain pääkaupunkiseudunkuntien ja HSY:n työnte-

kijöille. Luvanvaraista ainestoa hulevesiprofiilista ovat mm. kartat putkista, kaivoista, kaivoalueista, aukoista ja rumpuputkista. [57] Erityisesti edellä mainitut aineistot voisivat antaa tukea Bronton nostimen tukijalkojen sijoittelussa.

4. REAALIAIKAISEN 3D-MALLIN LUONTI TAPAHTUMAPAIKALTA

Kun Duties-ohjelmaan on tuotettu pohjakartta, oli kyseessä sitten perinteinen kaksiulotteinen kartta tai realistisempi fotogrammetrian tai lentolaserkeilauksen avulla muodostettu aineisto, voidaan siirtyä seuraavaan vaiheeseen, jossa karttaa tarkennetaan reaaliaikaisesti.

Todennäköisin menetelmä kartan täydentämiseen on lidar-skannaukseen perustuva järjestelmä, mutta tässä työssä pohditaan myös lidar- ja kamerakuvien yhdistämiseen perustuvaa teknologiaa. Lisäksi työssä keskitytään erityisesti siihen, miten kerätty data saadaan asemoitua tarkasti ja sulautettua Duties-ohjelman pohjakarttaan.

Ensin perehdytään testiin, jossa kuvattiin käsiskannerilla nostolavan työkorista käsin Tampere-taloa, ja tämän jälkeen vietiin kuvattu materiaali Duties-järjestelmään. Tästä seuraava kehitysaskel on viedä skannerit fyysisesti kiinnitettäviksi autoon, ja rakentaa järjestelmä, joka automaattisesti kuvaisi, prosessoisi, integroisi ja välittäisi kartan käyttäjilleen.

Työssä otetaan käyttöön oletus, että skannerit ovat kiinnitettynä seuraavasti:

1. Ensimmäisenä tapahtumapaikalle saapuvan pelastusyksikön etuosaan, joka prosessoi kartan seuraavina paikalle saapuville yksiköille ja nostolavayksikölle valmiiksi.

2. Nostolavan työkoriin jatkuvan aineiston keruun, prosessoinnin ja tilannekuvan ylläpidon varmistamiseksi.

Näiden oletusten lisäksi tarkastellaan vaihtoehtoa, jossa lidar olisi kiinnitettynä droneen. Kahden skannerin käyttäminen tulee olemaan välttämätöntä mahdollisimman tehokkaan järjestelmän aikaansaamiseksi, sillä ensimmäinen antaa nopean tilannekuvan läheltä maanpintaa, ja toinen jatkuvaa syötettä korkeammalta ilmasta tapahtumapaikan ytimestä.

Tässä kappaleessa keskitytään selvittämään, millaisia järjestelmiä ja ratkaisuja edellä kuvatuissa tehtävissä olisi mahdollista hyödyntää, tehdään tapaustutkimusta teknologiasta autonomisissa autoissa, sekä arvioidaan ratkaisujen ominaisuuksia. Tämän kappaleen asiat muodostavat perustan luvussa 5 käsiteltävälle, Bronton optimaalista sijoittelua koskevalle tarkastelulle.

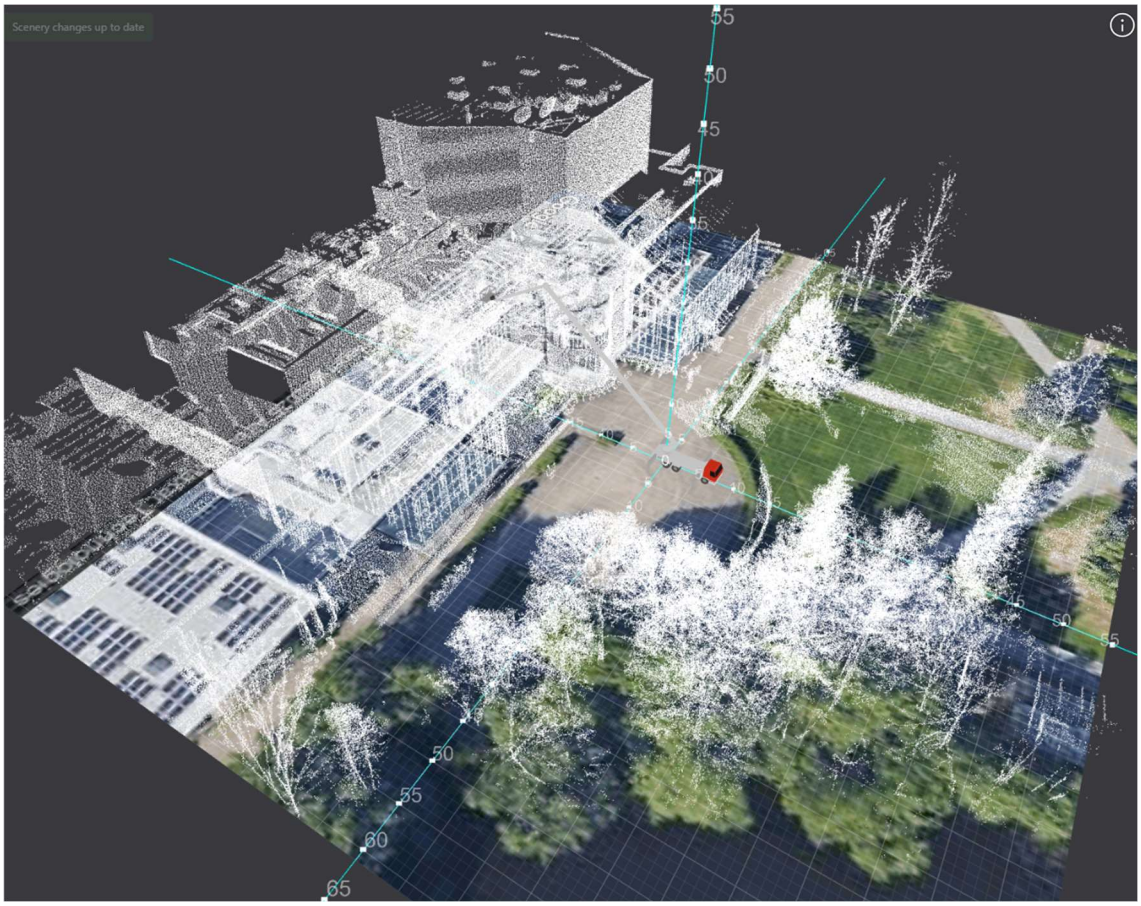
4.1 Lidar-skannaus nostolavan työkorista

Ensimmäisenä askeleena reaaliaikaisen kartan luomisessa on testata, kuinka rakennuksen tallentaminen käytännössä onnistuu ja minkälainen materiaali saadaan tuotettua. Tätä varten suoritettiin näytteenotto Tampere-talolla käyttäen kolmijalkaan kiinnitettyä Ouster OS1 -lidar-anturia, jota pystyttiin liikuttelemaan käsin.

Kolmijalka sijoitettiin Bronton työkoriin, ja laitteistoa liikutettiin pystysuunnassa ylös ja alas tarkoituksena kuvata Tampere-talon pohjoispuolta, mukaan lukien seinät ja katto. Tämä muodosti ensimmäisen tallennuskerran. Toisella tallennuskerralla toistettiin sama mittaus hieman eri sijainnista ja korkeammalta, minkä lisäksi Bronton laskettua alas, tarkoituksena oli jatkaa tallennusta kävelemällä Tampere-talon ympäri. Data kuitenkin korruptoitui kävelystä, joten tämä osio jouduttiin jättämään pois. Tällöin tavoitteena oli tallentaa rakennuksen seinät myös sen takapuolelta. Toisaalta pelkästään yhdestä suunnasta kuvaaminen voi olla todenmukaisempi tapahtuma todellisella palolaitoksen tehtävällä, sillä näissä paikalle ajetaan suoraan, eikä ole välttämättä tarkoituksen mukaista kiertää rakennusta kuvaten sitä. Kuvassa 13 näkyy käynnissä oleva skannaus jälkimmäisestä otoksesta. Tallennukset kestivät arvioilta noin 10 minuuttia.

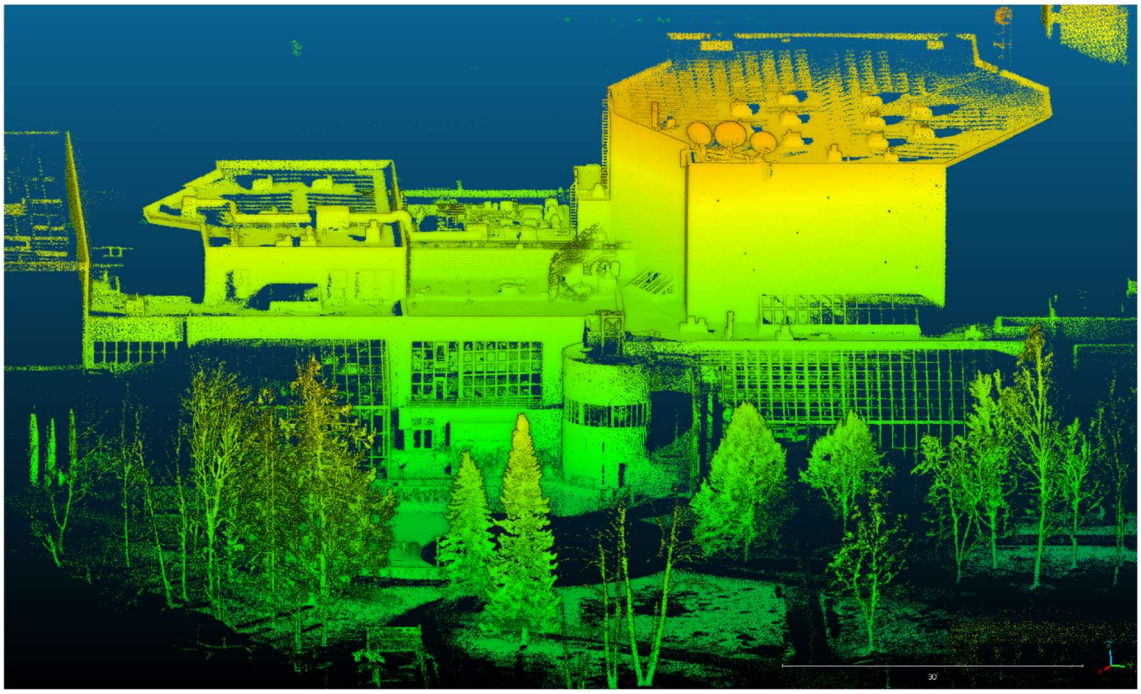
Kuva 13. *Tampere-talon lidar-skannaustapahtuma.*

Kuvassa 14 on esitetty ensimmäisestä skannauksesta peräisin oleva, 1 000 000-pisteen pistepilvi sijoitettuna Duties-ohjelmaan. Huomionarvoista on, että normaalin asemoinnin ja Googlen pohjakartan rajojen ylittävien pisteiden karsimisen ohella pistepilveä on kallistettu siten, että sen XY-taso on suoristettu vastaamaan karttatason suuntaa. Kolmiulotteisen rakennusmallin projisointi kaksiulotteiselle tasolle voi muodostua ongelmaksi etenkin rinteissä ja epätasaisissa maastoissa. Tätä ongelmaa tarkastellaan tarkemmin kappaleessa 4.3



Kuva 14. *Ensimmäinen Tampere-talon taltiointi sijoitettuna Duties-ohjelmaan.*

Kuvassa 15 on lopputuote jälkimmäisestä lidar-mittauksesta. Taltioinnissa pyrittiin menemään korkeammalle, jotta ylemmän katon piirteitä saadaan paremmin näkyviin, ja siinä onnistuttiinkin. Kuvasta tulee hyvin ilmi, miten yksittäinen perspektiivi jättää helposti kuolleita kulmia. Pistepilviaineisto on kerätty kuvan 13 mukaisesta kohdasta, ja kuvassa 15 aineistoa tarkastellaan eri perspektiivistä, jolloin aineistosta erottuu varjomaisesti kohdat, jotka ovat jääneet tutkalle pimentoon. Bronton henkilönostimen pisteet on myös poistettu molemmista pistepilvistä.



Kuva 15. *Jälkimmäinen Tampere-talon taltiointi korkeammalta.*

Kuvauksissa käytetty Ouster OS1 on keskipitkän kantaman, korkean resoluution lidar-järjestelmä, joka soveltuu tarkkaan 3D-ympäristön havainnointiin. Järjestelmä kykenee tunnistamaan kohteita 90 %:n todennäköisyydellä jopa 170 metrin etäisyydeltä, edellyttäen, että kohteen pinnan diffuusi heijastuskyky on vähintään 80 %. Lisäksi OS1 saavuttaa saman havaitsemistodennäköisyyden 90 metrin etäisyydellä myös silloin, kun kohteen heijastuskyky on alhaisempi, vähintään 10 %. [4]

Diffuusi heijastus viittaa pinnan kykyyn heijastaa siihen osuvaa säteilyä tasaisesti moniin suuntiin. Ideaalisesti heijastuminen tapahtuu kaikkiin mahdollisiin suuntiin yhtä voimakkaana, jota kutsutaan Lambertin heijastukseksi. [58, p. 56] Diffuusi heijastus on tyypillistä mattapintaisille materiaaleille, ja se vaikuttaa merkittävästi lidar-järjestelmän kykyyn havaita kohteita erilaisissa valaistus- ja pintamateriaaliolosuhteissa.

Ousterin OS1-anturia myydään kolmella vertikaalisella resoluutiolla: 32, 64 ja 128 kanavaisena. Kukin kanava vastaa yhtä korkeuskulmaa tasaisesti jaoteltuna anturin vertikaaliseen näkökenttään ±21,2 asteeseen. Tämä muodostaa keilamaisen kolmiulotteisen havaintoalueen, jossa kukin kanava kattaa sivusuunnassa täydet 360 astetta. Sivusuunnassa resoluutio on konfiguroitavissa 512,1024 ja 2048 pisteeseen. Anturin laserin aallonpituus on lähi-infrapunavalon alueella 865 nm, ollen näkymätön ihmissilmälle. [4] Vertikaalinen näkökenttä on kriittinen tekijä anturin sijoittelussa, sillä se vaikuttaa suoraan siihen, voidaanko halutut kohteet havaita tehokkaasti ympäristössä.

Ouster tarjoaa myös OS0-mallia, jonka vertikaalinen näkökenttä on laajennettu ±45,4 asteeseen. Tämä mahdollistaa laajemman pystysuuntaisen havainnointikapasiteetin tunnistusetäisyyden kustannuksella. OS1-anturia vastaavat havaintokantamat OS0-mallissa ovat 75 ja 35 metriä, riippuen kohteen heijastavuudesta. Muilta osin OS0 vastaa rakenteellisesti ja toiminnallisesti OS1-mallia. [4] [59]

OS0- ja OS1-antureiden näytteenottotaajuudeksi voi valita 10 tai 20 Hz. Antureiden tuottamien pistepilvien erotuskyky vaihtelee välillä 1–8 mm valitusta tiedonkeruuprofiilista riippuen. Etäisyysmittauksen tarkkuus on ±2,5 cm, mikä on riittävä tarkkuustaso Brontonostimen käyttötarkoituksia ja toimintaympäristöä ajatellen. [4] [59]

4.2 Lidar tutkien optimaaliset sijoituspaikat

Käsiskannerista ei välttämättä toimi pysyvänä lidar-sijoitusratkaisuna, vaan sen avulla kerätään kehitysvaiheen dataa. Järjestelmän jatkokehitystä varten lidarin tai muun tutkajärjestelmän sijoituspaikkaa tulee arvioida useiden muuttujien perusteella. Vertailu eri muuttujien suhteen on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. *Anturien sijoituspaikkojen keskeisten ominaisuuksien vertailu.*

	Bronton työ-kori	**Pelastusyk-sikkö**	**Käsiskanneri**	**Drone**
Näkökenttä sivuttainen	Hyvä	Kohtalainen*	Hyvä	Erinomainen
Näkökenttä vertikaali	Hyvä	Huono	kohtalainen	Erinomainen
Automatisoin-nin mahdolli-suus	Kyllä	Kyllä	Ei	EI**
Datan korrup-toitumisriski (arvio)	Pieni	Pieni	Suuri	Kohtalainen
Käyttöönoton nopeus	Välitön***	Välitön	Kohtalainen	Hidas**
Sään vaikutus ****	Kohtalainen	Kohtalainen	kohtalainen	Suuri

* Keskikatolta ei saada kuvaa maasta, mikä tärkeää kappaleen 5. sijainnin optimoinnin kannalta. Auton keulassa tilanne voi olla parempi.

** Futuristinen, lentoon pelastusyksikönkatolta automaattisesti ratkaisu muuttaisi mahdolliseksi.

*** Skannaus saadaan alkamaan välittömästi Bronton operoinnin alkaessa, mutta operoinnin aloittaminen vie aikaa.

**** Lidarin ja muiden tutkajärjestelmien sääalttiudesta kappaleessa 4.5.

Pelastusyksikön katolle suoraan kiinnitetty tutkajärjestelmä ei ole optimaalinen ratkaisu, ellei sijoituskohtaa koroteta katonrajasta ylöspäin, sillä ajoneuvon katto muodostaa näkökenttäesteen erityisesti tienpinnan ja muiden matalalla sijaitsevien kohteiden havainnoinnille. Sen sijaan tutkajärjestelmän sijoittaminen ajoneuvon keulaosaan mahdollistaisi sivuttaisen 180 asteen kattavuuden. Vertikaalisesti näkyvyys tulisi olemaan huono. Lisäksi järjestelmä voidaan ohjelmoida käynnistymään automaattisesti, kun GNSS-järjestelmä tunnistaa ajoneuvon olevan riittävän lähellä kohdetta.

Käsiskannerin keskeinen haaste on sen manuaalinen käyttö, mikä ei ole tarkoituksenmukaista tilanteissa, joissa pelastushenkilöstön ensisijaisena tehtävänä on keskittyä operatiivisiin pelastustoimiin. Sen etuna on kuitenkin mahdollisuus helposti Kääntää tutkaa pystysuunnassa kuvaamaan rakennusta myös korkeammalta kuin maanpinnan tasolta.

Manuaalisen käytön haaste koskee myös droneja, vaikka se voitaisiin periaatteessa ratkaista asentamalla pelastusyksikön katolle automaattinen laukaisualusta. Tällöin drone voisi nousta automaattisesti ilmaan, suorittaa kohteen kartoituksen ja palata takaisin ilman manuaalista ohjausta. Dronen etuna on sen laajin näkökenttä, joka saavutetaan hyvän liikkuvuuden ja esteettömän sijainnin ansiosta.

Lidarin sijoitus Bronto-nostimen työkoriin on toinen kiinnostava kehityssuunta pelastusyksikköön kiinnitetyn tutkan ohella. Tämä ratkaisu tarjoaisi näkymän sekä tapahtuman ytimeen, että rakennuksen ulkopintoihin korkeasta tarkkailupisteestä. Työkorista sivuttainen tutkan näkökenttä on sijoituspaikasta riippuen n. 180 asteesta lähes 360 asteeseen.

Käytännön toteutuksessa tutkia tarvittaneen vähintään kaksi: yksi sijoitettuna ensimmäisenä saapuvaan ajoneuvoon maanpinnan tasolla tapahtuvaan havainnointiin, ja toinen tarkempaan kohteen dokumentointiin. Laajemman anturimäärän kokeilu ei kuitenkaan ole poissuljettua, mikäli operatiiviset tarpeet sitä edellyttävät.

4.3 Reflektiivisyysperusteinen pistepilven visualisointi

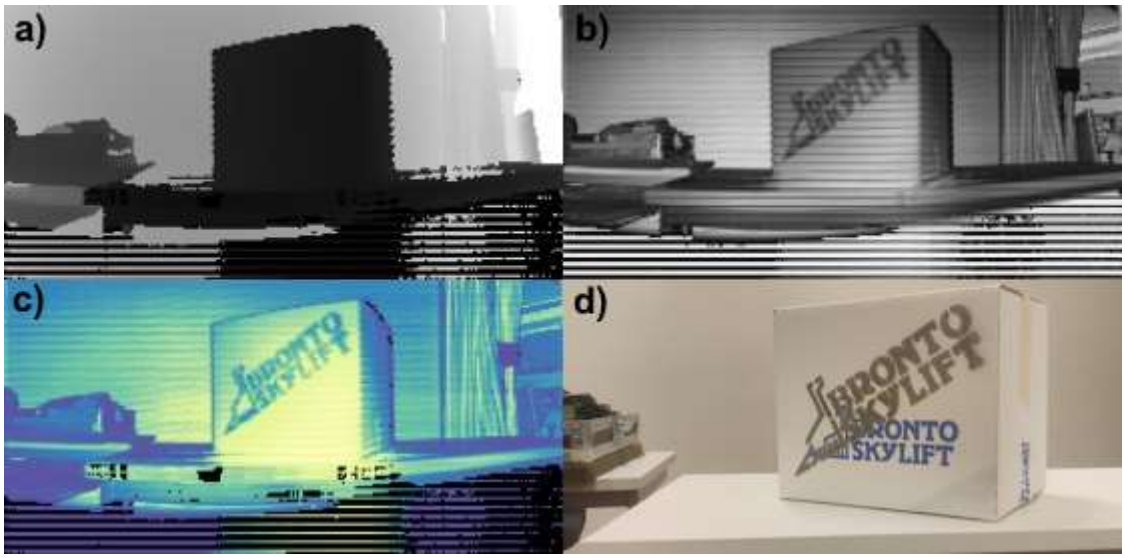
Kappaleessa 2.3 perehdyttiin NDT-OM-menetelmän toimintaan. Esimerkiksi Tamperetalon pistepilviaineiston prosessoinnissa käytetty menetelmä pohjautuu merkittäviltä osin tähän NDT-OM menetelmään. Kyseisen aineiston käsittely toteutettiin prototyyppivaiheessa vielä jälkiprosessointina, ja käsittelyn kesto oli noin 30 minuuttia. Menetelmällä on kuitenkin valmiuksia reaaliaikaiseen prosessointiin, ja siitä on tehty joissain projekteissa reaaliaikaisia toteutuksia. Menetelmän täysimittainen reaaliaikaistaminen vaatii kuitenkin vielä jatkokehitystä. Suunnitellussa Duties-kartassa, jossa ideana olisi tuottaa kartta tapahtumapaikalta reaaliaikaisuus on edellytys.

NDT-menetelmään pohjautuva algoritmi on todennäköisesti ratkaisu, jonka varaan pistepilvien käsittely tulevaisuudessa rakentuu. Tässä yhteydessä on kuitenkin perusteltua tarkastella vaihtoehtoisia ratkaisuja, jotka voisivat täydentää NDT:n käyttöä. Seuraavaksi esitellään joitakin menetelmiä, joiden avulla pistepilven visuaalista laatua voidaan parannella, sillä perinteisillä NDT-menetelmillä käsitellyt pisteet eivät suoraan sisällä tietoa esimerkiksi pulssin intensiteetistä.

Yksi tapa voisi projektoida pisteisiin värit lidarin yhteyteen kytkettyyn kameraan, jolloin pisteet saadaan väritettyä ympäristön mukaan luoden ihmissilmälle miellyttävämmän näköisen tuotteen jo pelkän kontrastin takia. Kontrastia voidaan lisätä myös esimerkiksi laskemalla pistepilven pisteille normaalit tai käyttämällä varjostimia, kuten kuvassa 15

on tehty, saaden kulmat ja muut geometriset piirteet paremmin näkyviin. Pisteiden väritystä itseasiassa sivuttiin Magnussonin väitöskirjassa esittelemällä color-NDT, ja tekemällä katsaus jo olemassa oleviin menetelmiin kuten color-ICP, jonka etuna miellyttävämmän ulkonäön lisäksi on parempi rekisteröinti kohteista, joista puuttuu selviä geometrisiä piirteitä [10].

Kuvassa 16 on 512 pisteen vaakaresoluutiolla mitattua dataa. Kohdassa a) on etäisyys mitattuna signaalin paluuajasta, tumma lähempänä ja kirkas kauempana. kohdassa b) on anturin mittaama absoluuttinen signaalin voimakkuus, kirkkaampi väri tarkoittaa voimakkaampaa kaikua. Kohdassa c) on kohteen kalibroitu reflektiivisyys, kirkkaampi tarkoittaa suurempaa reflektiivisyyttä. Viimeisenä kohdassa d) on tavallinen kameran kuva kuvattavasta laatikosta. Reflektiivisyys on laskettu skaalaamalla absoluuttisen signaalin voimakkuus anturin herkkyydellä mitatulla etäisyydellä, jolloin saadaan arvio kohteen todellisesta reflektiivisyydestä. Kuva 16 havainnollistaa sitä, miten lidarilla voidaan saada näkyviin myös geometriasta riippumattomia piirteitä reflektiivisyyttä hyödyntäen, kuten laatikkoon maalattu harmaa Bronto Skylift logo. Logon näkyminen perustuu siihen, että yleensä tummat värit (eivät aina) absorboivat infrapuna valoa tehokkaammin kuin vaaleat, mutta samalla on hyvä huomata, että laatikon sininen logo ei erotu lidar kuvista ollenkaan.



Kuva 16. *OS1-anturin skalaariarvoja 2D-näkymässä ja tavallisen kameran kuva. a) Etäisyys. b) Signaalin voimakkuus. c) Reflektiivisyys. d) kuva kohteesta.*

Yksinkertaisena kontrastin luojana ja pisteiden värittäjänä voitaisiin Dutiesissa käyttää reflektiivisyyteen perustuvaa väriskaalaa. Se ei vaatisi taltiointijärjestelmältä mitään fyysisiä muutoksia pitäen järjestelmän mahdollisimman yksinkertaisena. Color-NDT menetelmä sen sijaan vaatisi lidarin yhteyteen kalibroidun kameran, mikä on omiaan luomaan ylimääräistä kompleksisuutta.

4.4 Prosessoitujen pistepilvien georeferointi Duties-sovellukseen

Pistepilven siirtäminen Duties-järjestelmään toteutettiin käsiskannerin tapauksessa vielä manuaalisesti. Valmiissa tuotteessa sen on kuitenkin tapahduttava automaattisesti. Pistepilven tai muun vastaavan mallin asemointi oikein pohjakarttaan ei kuitenkaan ole mikään yksinkertainen temppu vaan siinä törmätään uudelleen samaan ongelmaan kuin pistepilvien rekisteröinnissä, nyt erona on vain se, että kolmiulotteinen pistejoukko pitäisi rekisteröidä kaksiulotteiseen karttaan toisen pistepilven sijasta.

Keskeisiä teknisiä ongelmia ja ratkaisuja:

- **Paikannus**

  GNSS antaa suuntaa-antavan sijainnin muutaman metrin tarkkuudella, ja yksinään tämän käyttäminen voisi saada pohjakartalle oudolta näyttäviä sijoituksia.

  5G- ja 6G-verkkojen kehitystyön keskeisenä tavoitteena on mahdollistaa erittäin tarkan paikannustiedon saavuttaminen. Tulevaisuudessa yleistyvät mobiiliverkot voivat tarjota kertaluokkia paremman sijaintitarkkuuden verrattuna perinteisiin GNSS-järjestelmiin. Työn kirjoitushetkellä edistynein ja viimeisin julkaistu 5G-verkon päivitys, Release 18, antaa valmiudet optimiolosuhteissa sisätiloissa senttimetriluokan paikannustarkkuudelle [60] Teoreettisesti tämä tarkoittaa arviolta noin 100-kertaista parannusta verrattuna GNSS-järjestelmien tarjoamaan tarkkuuteen.

  Nykyisellään ja erityisesti tulevaisuudessa, kattavan televerkkoyhteyden ulottumattomissa toimittaessa, on tarpeen kehittää erehtymätön menetelmä oikean sijaintipaikan tunnistamiseksi pohjakartalta. Tämä voidaan toteuttaa suunnittelemalla heuristinen algoritmi, joka samanaikaisesti optimoi alla esitellyn horisontaalisen suuntakulman ja sijainnin määrittämisen.

- **Vertikaalisten suuntakulmien määritys**

  Käsiskannerilla kerätty aineisto oli rekisteröitynyt vinossa suhteessa todelliseen maanpinnan tasoon ja vaati manuaalista pystysuuntaisen rotaation parametrien säätämistä. Voidaan olettaa, että vastaava ilmiö esiintyy myös jatkossa, minkä vuoksi oikean rotaation määrittämiseksi on tarpeen kehittää automaattinen menetelmä. Ottaen huomioon, että pistepilvi on lähtökohtaisesti suunnattu suurin piirtein oikein eikä esimerkiksi sivuttain tai ylösalaisin, tehtävää voidaan pitää yksinkertaisena. Tällöin riittää, että pistepilvestä tunnistetaan kaksi eri suuntiin

osoittavaa rakennuksen pystysuuntaista seinäpintaa eli tasoa, joiden avulla voidaan määrittää tarvittavat rotaatioparametrit. Näiden perusteella pistepilvi voidaan oikaista siten, että sen asento vastaa oikein pystysuoraa suuntaa.

- **Skaalaus, sekä horisontaalisen suuntakulman ja paikan määritys**

  Suuntauksen arvio olisi mahdollista toteuttaa magnetometrillä. OS1-anturissa ei kuitenkaan ole sisäänrakennettua magnetometriä. Tämä tieto tarvitsisi sisällyttää prosessoituun pistepilveen ja siten mitata näytteenottohetkellä. Magnetometrien tarkkuus saattaa vaihdella olosuhteiden mukaan suuresti, mutta esim. Bosch BMM150 lupaa noin ±2,5° tarkkuuden [61].

  Mahdollisesti parempi lähestymistapa olisi kuitenkin hyödyntää pistepilvestä poimittuja rakennuksen ääriviivoja, joita verrataan esimerkiksi OpenStreetMap-aineistosta saataviin pohjapiirustuksiin. Tämän jälkeen luotaisiin algoritmi, joka etsii pistepilvestä erotetuille piirteille parhaan mahdollisen vastaavuuden sijainnin ja orientaation suhteen pohjakartalta. Menetelmään voi kuitenkin liittyä epävarmuutta tapauksissa, joissa orientaatio ei ole yksiselitteinen. Esimerkiksi kahden rakennuksen välissä kerätty mittausaineisto voisi asemoitua yhtä hyvin 0 tai 180 asteen kulmaan.

  Näiden kahden menetelmän yhdistäminen voisi kuitenkin johtaa järjestelmään, jolla pistepilven asemointi onnistuisi suurella varmuudella myös silloin, kun käytettävissä olevien geometristen piirteiden määrä on vähäinen. Menetelmien yhteiskäytöllä voitaisiin hyödyntää kummankin lähestymistavan vahvuuksia ja vähentää epäselvien tapausten määrää merkittävästi. Pohjakartan ja pistepilven välinen skaalauskerroin saatetaan joutua ottamaan ylimääräiseksi ratkaistavaksi muuttujaksi, mikäli niiden mittakaavat eroavat merkittävästi toisistaan.

- **Projektion vääristymät**

  Kuten aiemmin on todettu, kaikkiin mittauksiin liittyy luonnollisesti jonkinasteisia vääristymiä. Tässä yhteydessä voidaan kuitenkin olettaa, että pistepilviaineiston laatu on riittävän korkea tai vääristymät on jo korjattu, jolloin vääristymien erillistä korjaamista ei ole tässä vaiheessa tarpeen käsitellä. Esimerkiksi kuvassa 14 esitetty aineisto vaikuttaa silmämääräisesti arvioituna käyttötarkoitukseen tarpeeksi tarkalta.

- **Pistejoukon ja tason leikkauskorkeuden määritys (korostuu epätasaisessa maastossa oleville rakennuksille.**

Koska pistepilvi seuraa todellista maastonmuotoa, ei rakennuksen sijoittaminen kaksiulotteiselle karttapohjalle ole kaikissa tapauksissa suoraviivaista. Esimerkiksi jyrkänteeseen tai muuhun epätasaiseen maastoon rakennettu rakennus ei välttämättä asemoidu loogisesti litteälle karttatasolle. Myös tasaisessa maastossa sijaitsevien rakennusten kohdalla on määritettävä, mihin korkeusarvoon rakennuksen perustaso sijoitetaan kartan suhteen. Alimman yksittäisen pisteen käyttö ankkurointikorkeutena voi olla altis kohinasta tai yksittäisistä poikkeamista johtuville virheille. Siksi tarkoituksenmukaisempaa olisi etsiä mittausaineistosta suurin tasomainen alue alimmalta korkeustasolta ja käyttää sen sijaintia rakennuksen vertailupintana. Tämä lähestymistapa on luotettavampi ja vastaa todennäköisemmin todellista rakennuksen perustustasoa.

- **Karttapohjan ajantasaisuus.**

  Pohjakartta ei välttämättä ole ajan tasalla, tai siinä voi olla muita epätäydellisyyksiä. Tällöin rekisteröinti voi epäonnistua, jos tarpeeksi vastaavia piirteitä ei löydy ja karttaa ei saada sijoitettua. Tästä ja muistakin mahdollisista virhetilanteista johtuen pistepilven käsittelyn algoritmeihin täytyy sisällyttää poikkeuksia varten toimintaohjeet. Poikkeustapauksissa, jos pistepilven sijoitusparametrien haku epäonnistuu, voidaan sijoituksessa poikkeuksellisesti käyttää suoraan GNSS:n ja magnetometrin antamia tietoja. Jos myös GNSS-signaali puuttuu, pohjakartan kokonaan pois jättäminen voi olla mahdollisuus.

Toisin sanottuna pistepilven sijoittaminen koordinaatistoon edellyttää seitsemän vapausasteen automaattista määrittämistä, jotka ovat skaalauskerroin α, sijainti- (t_x, t_y, t_z) ja rotaatioparametrit (θ_x, θ_y, θ_z). Menettelyn vaiheet voidaan jäsentää seuraavasti, ja suluissa on esitetty vaiheessa ratkaistavat parametrit:

1. Karkea sijainti GNSS-järjestelmän perusteella.

2. Karkea suunta magnetometrin perusteella.

3. Pistepilven muodostus lidar-aineistosta NDT-OM menetelmällä.

4. Vertikaalinen suuntaus. (θ_x, θ_y)

5. Rakennuksen ääriviivojen tunnistaminen pistepilvestä.

6. Skaalaus, tarkka sijainti ja suuntakulma esimerkiksi heuristiikkaan perustuvalla algoritmilla vertaamalla ääriviivoja pohjakarttaan. (α,t_x, t_y, θ_z)

7.Pistepilven leikkauskorkeuden määrittäminen. (t_z)

8. Pistepilven sijoitus Dutiesiin aikaisempien vaiheiden ratkaistuilla parametreilla.

Karkeaa magnetometrin antama suunta-arvio voidaan halutessaan tarkentaa käyttämällä Dual-antenna GNSS-kompassia. Dual-antenna GNSS-kompassi perustuu samaan satelliittisignaaliin kohdistuvien kahden antennin vastaanottamien signaalin vaiheerojen tarkkaan mittaamiseen. Menetelmä käsittelee kahden antennin ja saman satelliitin välisen signaalipolun kahtena rinnakkaisena reittinä ja ratkaisee näiden kaksoisdifferentiaaliyhtälöistä perusviivan suunnan suhteessa pohjoiseen. Kun antennien välinen etäisyys on noin kaksi metriä, esimerkiksi ajoneuvon etu- ja takapäässä, korkean tarkkuuden GNSS-vastaanottimilla voidaan päästä yli 0,15° suuntatarkkuuteen. [62] Tämä mahdollistaa tarkan suuntatiedon ilman liikettä ja ilman magneettikenttään perustuvia antureita.

Karl Ni:n ja kumppaneiden tutkimuksessa "Geo-registering 3D Point Clouds to 2D Maps with Scan Matching and the Hough Transform" esitetty rekisteröintimenetelmä muistuttaa rakenteellisesti useilta osin tässä työssä hahmoteltua lähestymistapaa. Molemmissa pyritään ratkaisemaan 3D-pistepilven ja 2D-pohjakartan välinen kohdistus kaikkien seitsemän vapausasteen osalta [63].

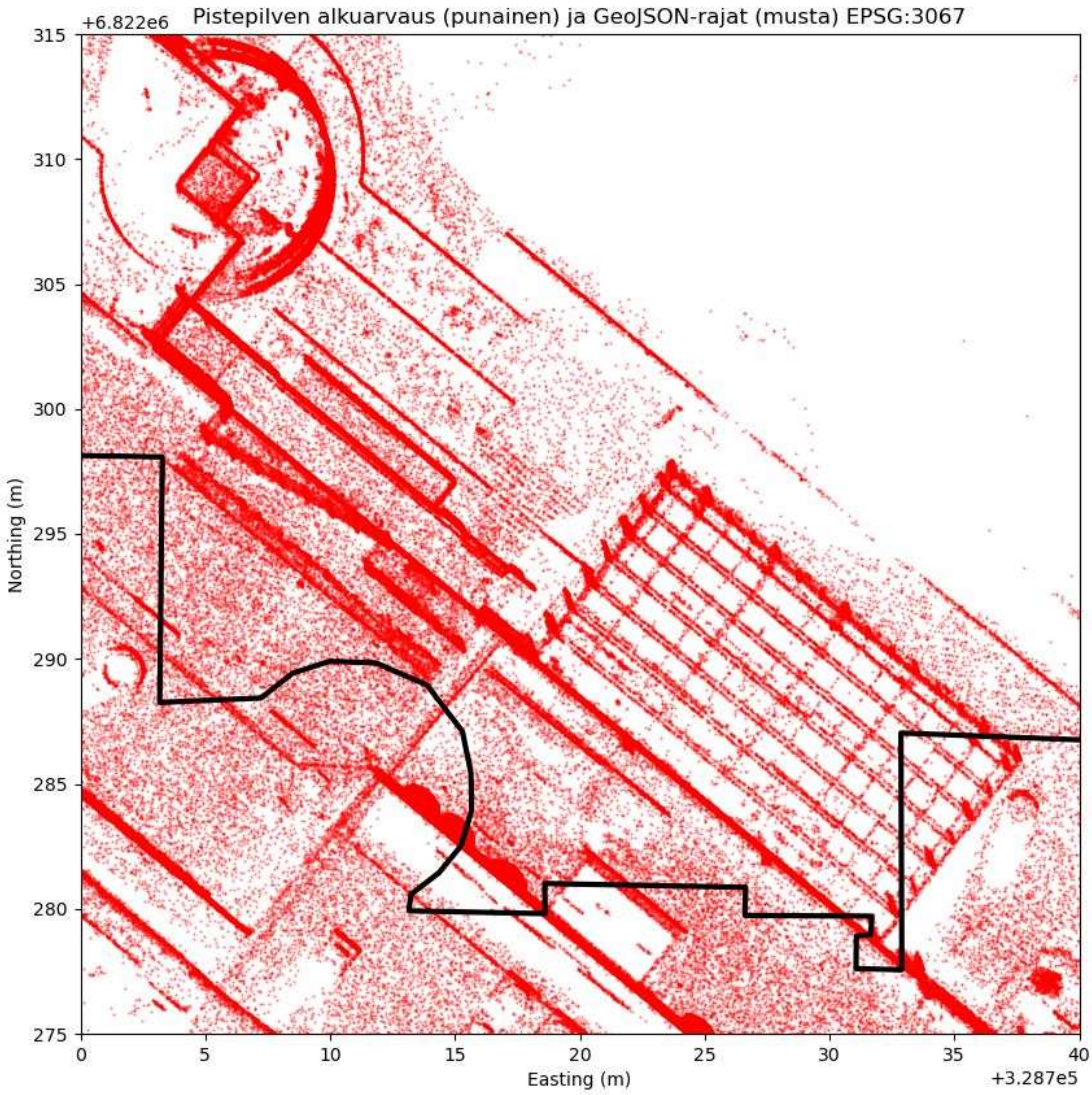
Keskeinen ero liittyy aineiston laajuuteen ja siihen, miten alkuarvaukset käsitellään. Tässä työssä tarkasteltava Bronton skannerilla kerätty aineisto on kooltaan huomattavasti suppeampi kuin tutkimuksessa käytetyt noin korttelin suuruiset pistepilvet. Tämän vuoksi Bronton tapauksessa orientaation tueksi esitetään magnetometrimittauksia. Ni:n menetelmä sen sijaan ei tukeudu ulkoisiin antureihin, vaan suuntaus toteutetaan yksinomaan suuremman mittausaineiston sisältämien rakenteellisten piirteiden perusteella, jolloin alkuarvausta ei tarvita [63].

Lisäksi Ni esittää ratkaisun laskennallisesti raskaaseen tehtävään hakea neljää muuttujaa samanaikaisesti, joka tässä työssä vastaa edellä esitetyn hahmotelman vaihetta 6 eli tarkkaa skaalauksen, suunnan ja sijainnin määrittämistä. Tutkimuksessa tämä laskennallisesti raskas kohdistusongelma pilkotaan erillisiksi osaongelmiksi, joissa rotaatio, skaala ja sijainti ratkaistaan askeleittain erillisten prosessien kautta [63].

Edellä esitettyyn ideatasoiseen hahmotelmaan verrattuna Ni:n tutkimus tarjoaa lisäksi eksaktit matemaattiset välineet kohdistuksen toteuttamiseksi [63]. Tutkimus muodostaa siten vahvan teoreettisen perustan, jonka pohjalta voidaan jatkokehittää ja toteuttaa vastaavantyyppinen ratkaisu Duties-järjestelmään.

Osittain Ni:n tutkimukseen perustuvien menetelmiin perustuvien Python-kirjastojen käytöllä ja aikaisemmin määriteltyjä vaiheita seuraten, tutkimuksessa tehtiin Python-koodi, joka kohdistaa automaattisesti Tampere-talosta kuvatun pistepilviaineiston todellisiin metripohjaisiin EPSG:3067 koordinaatteihin varsin tarkasti ja luotettavasti, käyttäen pohjakarttana OSM-GeoJSON-karttaa Tampere-talon lähiympäristöistä.

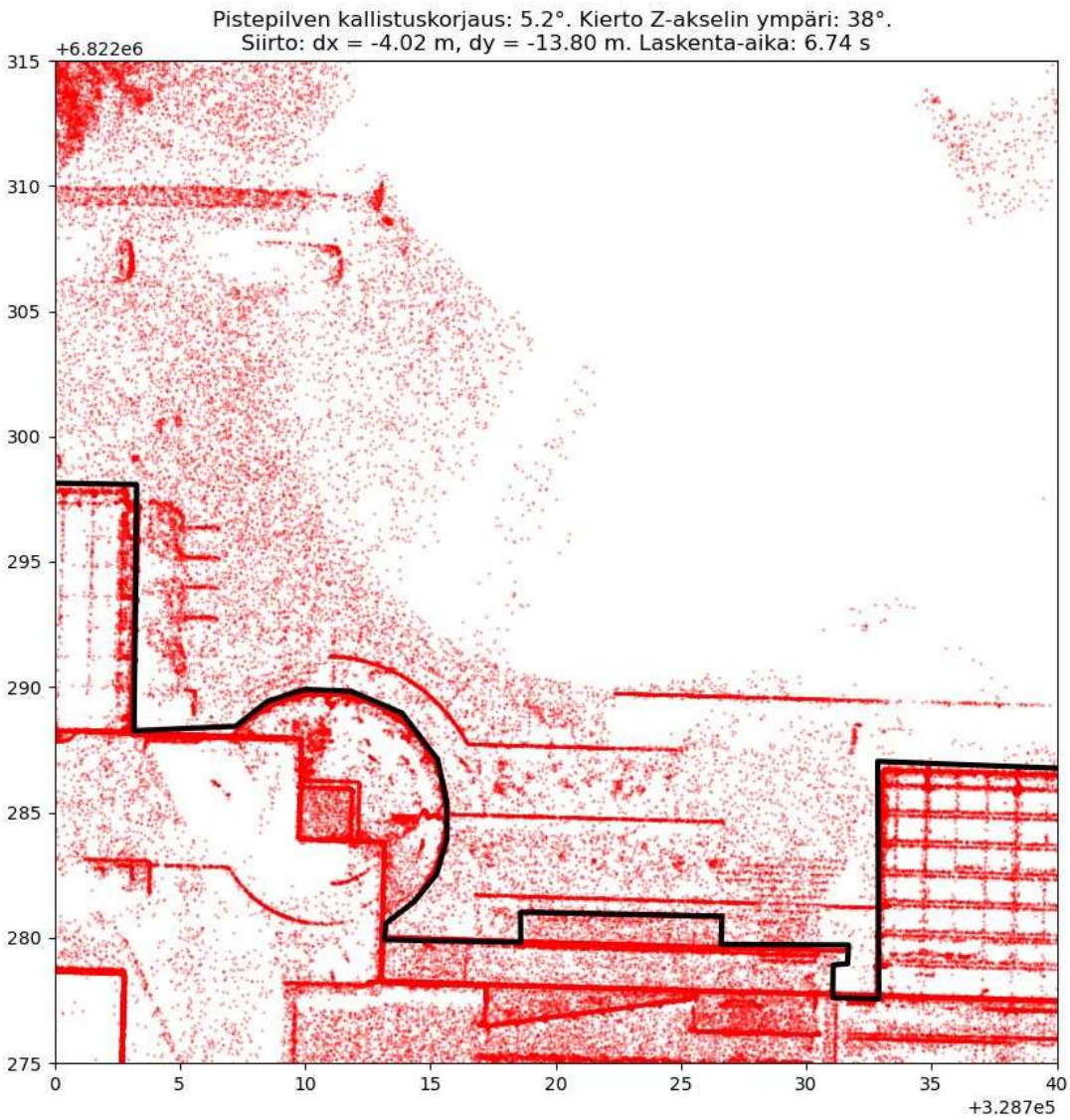
Kuvassa 17 on lähtötilanne kohdistusalgoritmille, josta lähdetään etsimään viittä ratkaistavaa parametriä. Tässä tapauksessa pistepilven leikkauskorkeuden määrittäminen on jätetty pois sen merkityksettömyyden vuoksi kaksiulotteisessa havainnollistuksessa. Lisäksi skaalauskertoimen etsintä on sivuutettu, koska mittausaineisto on valmiiksi dimensioiltaan tarpeeksi tarkka. Vertikaalisen suuntauksen kulmat (θ_x, θ_y) on muunnettu yhdeksi kulmaksi, luomalla uusi XY-tasolla oleva akseli, jonka ympäri pistepilveä käännetään. Pistepilvi on sijoitettu kuvassa 17 satunnaiseen paikkaan ja kulmaan, simuloiden täten epävarmaa GPS signaalia, ja huonoa magnetometriä.



Kuva 17. *Kohdistusalgoritmin lähtötilanne.*

Pistepilvi on siirretty ja käännetty kuvassa 18 todelliseen paikkaansa selvitettyjen parametrien avulla. Testeissä pistepilven sijoituksen onnistumistodennäköisyys todettiin hyvällä alkuarvaussijoituksella lähes varmaksi. Alkuarvaussijoituksen epämääräisyyden

kasvaessa, arviolta noin 20 metrin päässä todellisesta sijainnista asemoinnin epävarmuus alkoi näkyä, ja algoritmi ei enää onnistunut sijoittamaan pilveä luotettavasti. Oikean kulman selvittämiseen pistepilvi vaati suunnan ±90° tarkkuudella todellisesta, jonka ylittyessä pistepilvi asemoitui satunnaisesti. Testien perusteella suuntaan ei tarvita kovin tarkkaa alkuarvausta, mutta jatkokehityksen kannalta asiaa olisi hyvä tutkia yksinkertaisempia piirteitä omaavien rakennusten kannalta. Laskenta-aikaa parametrien selvittämiseen kului 5-7 sekuntia. Ajan voidaan katsoa olevan riittävä reaaliaikaisiin sovelluksiin, sillä paikannus tarvitsee tehdä vain kerran.



Kuva 18. *kohdistusalgoritmin löytämillä parametreillä korjatun pistepilven sijoituskohta.*

4.4.1 Aineistofuusio ja pistepilvien vaihtoehtoiset georeferointimenetelmät

Kappaleessa 4.4 tarkasteltiin perusmallia, jossa pohjakarttana toimii kaksiulotteinen kartta. Tässä kappaleessa keskitytään ideatasolla siihen, kuinka voidaan menetellä tilanteessa, jossa pohjakarttana toimii Googlen kolmiulotteinen kartta, sekä siihen, miten 2D-pohjakarttaan voidaan integroida ilmalaserkeilausaineisto (ALS-kartta) ja edelleen itse skannattu pistepilvi.

Tapauksessa, jossa pohjakarttana hyödynnetään Googlen 3D Photorealistic Tiles -aineistoa, olisi suositeltavaa liittää samaan koordinaatistoon myös 2D-pohjakartta, josta

rakennusten ääriviivat ovat nähtävissä. Tämän jälkeen pistepilvi voidaan integroida 3D-näkymään samalla periaatteella kuin kappaleessa 4.4 esitettiin 2D-kartan kanssa. Tässä tapauksessa 2D-pohjakartan ei tarvitse välttämättä olla näkyvissä käyttäjälle, kunhan se on tallennettuna metatietona prosessointivaiheita varten. Vastaavasti, mikäli pohjakarttana käytetään satelliittikuvaa, prosessointia helpottaisi, mikäli metatietoihin olisi liitetty esimerkiksi vektorimuotoinen aineisto rakennusten ääriviivoista. Toisaalta rakennusten ääriviivat voidaan joissain tapauksissa myös tunnistaa suoraan satelliittikuvista kuvankäsittelymenetelmien avulla. Kuvassa 19 havainnollistetaan oman aineiston istuvuutta ilman erillistä skaalauskerrointa Googlen fotogrammetrisen mallin päälle. Kuvasta voidaan todeta, että aineistojen skaala on valmiiksi tarpeeksi yhtenevä ollakseen ihmissilmälle miellyttävä.

Kuva 19. *Oman aineiston projektio Googlen Photorealistic 3D Tiles-pohjakartan päälle.*

Tapauksessa, jossa pohjakartan päälle rekisteröidään ilmalaserkeilausaineistoa, rekisteröintiprosessi etenee kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa ALS-aineisto täytyy kohdistaa samaan koordinaatistoon varsinaisen pohjakartan kanssa. Tämä poikkeaa kappaleessa 4.4 kuvatusta menetelmästä siten, että vaiheet 1–4 voidaan jättää pois. Lisäksi rakennusten ääriviivojen tunnistaminen ei perustu seinätasoihin, vaan katon

ja maanpinnan merkittävään korkeuseroon, joka aiheuttaa näkyvän kontrastin korkeusmallissa. Toisessa vaiheessa itse taltioitu pistepilvi sulautetaan integroituun ALS-materiaaliin täydentäen sitä.

ALS-aineiston integroimiseen liittyy erityisiä haasteita. Projektio- tai kohdistusvirheet voivat kasautua merkittäviksi, sillä aineisto kattaa yleensä laajoja alueita (esimerkiksi 5×5 km ruutuja), toisin kuin itse skannattu pistepilvi, joka voi kattaa huomattavasti pienemmän alueen (esimerkiksi 0,1×0,1 km). Tämän vuoksi ALS-aineisto saattaa vaatia lisäkorjauksia, kuten muodon korjaamista referenssipisteiden avulla. On myös huomioitava, että ALS-aineiston prosessointi tehdään manuaalisesti ja kertaluontoisesti, mikä erottaa sen jatkuvasti päivittyvästä tai automaattisesti tuotetusta aineistosta.

Geometrisiin piirteisiin perustuva kohdistus ei ole ainut mahdollinen menetelmä, ja esimerkiksi vuonna 2012 Ebadat Parmehr ja kumppanit esittelivät tutkimuksessaan ”Automatic Registration of Aerial Images with 3D LiDAR Data Using a Hybrid Intensity-Based Method” automatisoidun menetelmän rekisteröidä ortoilmakuva laserkeilausaineistoon geometristen piirteiden sijasta intensiteetistä riippuvilla mittareilla. Tutkimuksessa sen todetaan antavan lupaavia tuloksia myös silloin, kun ortokuvassa on geometrisia häiriöitä. [64]

Toisen vaiheen itsetaltioidun pistepilven yhdistäminen ALS-aineistoon voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla. Ensimmäisessä lähestymistavassa pistepilvi rekisteröidään kaksiulotteiseen pohjakarttaan kappaleessa 4.4 kuvatun menetelmän mukaisesti. Tällöin hyvin suoritetulla rekisteröinnillä ALS-aineisto ja omakerätty pistepilvi voivat parhaimmillaan täydentää toisiaan: ALS tarjoaa laajemman ilmaperspektiivin, kun taas oma aineisto voi aluksi sisältää yksityiskohtaista tietoa erityisesti rakennusten seinämistä. Onnistunut yhdistäminen luo eheän kokonaiskuvan, kun taas rekisteröintivirheet voivat aiheuttaa ristiriitaisuuksia aineistojen välille ja heikentää niiden visuaalista yhteensopivuutta.

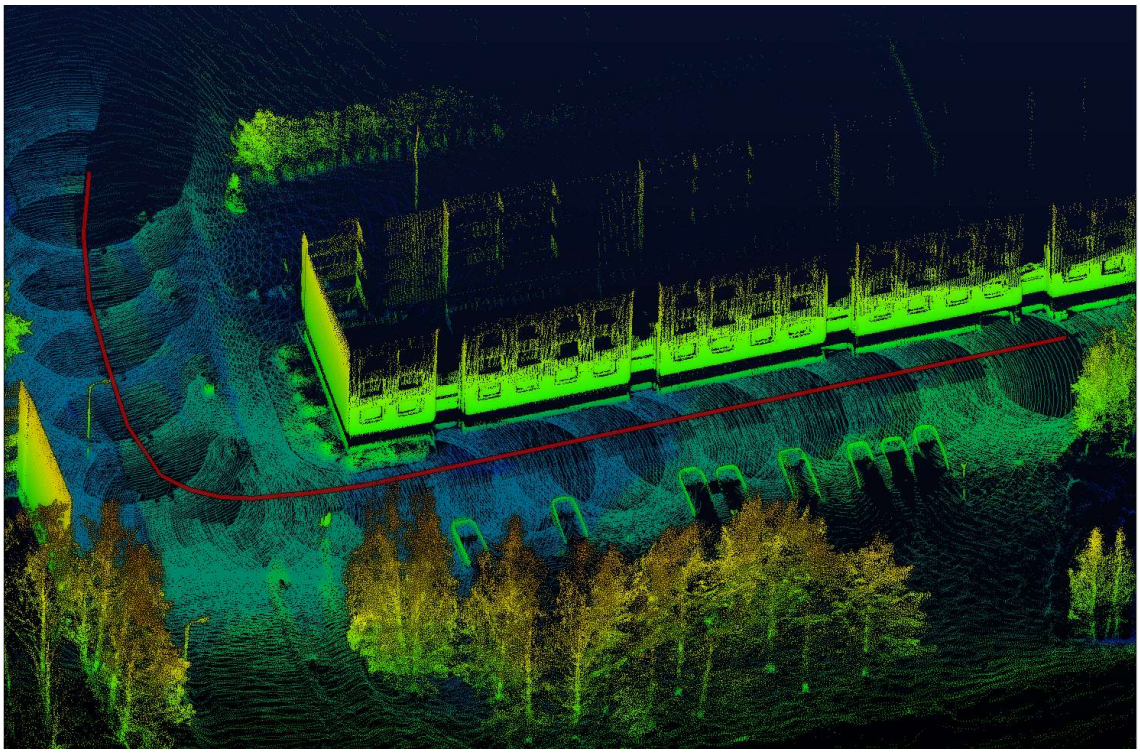
Toisessa lähestymistavassa pisteaineistoa kerätään korkealta esimerkiksi Bronton nostolavalta, ja kun tätä dataa alkaa olla riittävästi saatavilla, voidaan Bronton keräämää aineistoa pyrkiä rekisteröimään suoraan ALS-aineistoon. Koska korkealta kuvatuista näkymistä saadaan useammin toisiaan vastaavia rakenteellisia piirteitä, rekisteröinti on tällöin lähtökohtaisesti luotettavampaa. Tämä mahdollistaisi aineistojen fuusion siten, että ilmaperspektiivi ja yksityiskohtainen seinämä- ja katuinfrastruktuuri yhdistyvät yhtenäiseksi pistepilvimalliksi.

5. NOSTOLAVAYKSIKÖN SIJOITUKSEN OPTIMOINTI JA VISUALISOINTI

Nostolavayksikkö on keskeisin ajoneuvo palotehtävillä, joten sen sijoitteluun täytyy käyttää erityistä huomiota parhaan sammutus tai muun operatiivisen toiminnan takaamiseksi. Sijoituspaikan informointi muille tehtävälle osallistuville yksiköille ei nykyisin kuitenkaan ole aina sujuvaa, ja sijoituspaikka saattaa unohtua, tai reitti paikalle saatetaan vahingossa tukkia muilla kulkuneuvoilla. Tällöin yksiköitä joudutaan uudelleen asemoimaan, vieden aikaa tärkeimmältä eli sammutustyöltä. Tähän ongelmaan perustuen seuraavissa kappaleissa esitellään ratkaisua, jolla myös muita paikalla olevia yksiköitä saadaan informoitua selkeästi sijoituspaikasta ja siihen johtavasta reitistä.

5.1 Duties-järjestelmän periaatteellinen konsepti sijoituspaikan määrittämiseksi

Bronton sijoituspaikan valinta toteutetaan nykyään yleensä pelastustoiminnan johtajan määrittämänä, ja siitä informoidaan lähinnä sanallisesti radionvälityksellä. Seuraava esitys loisi visuaalisen ja helposti ymmärrettävän aineiston kaikille osapuolille.



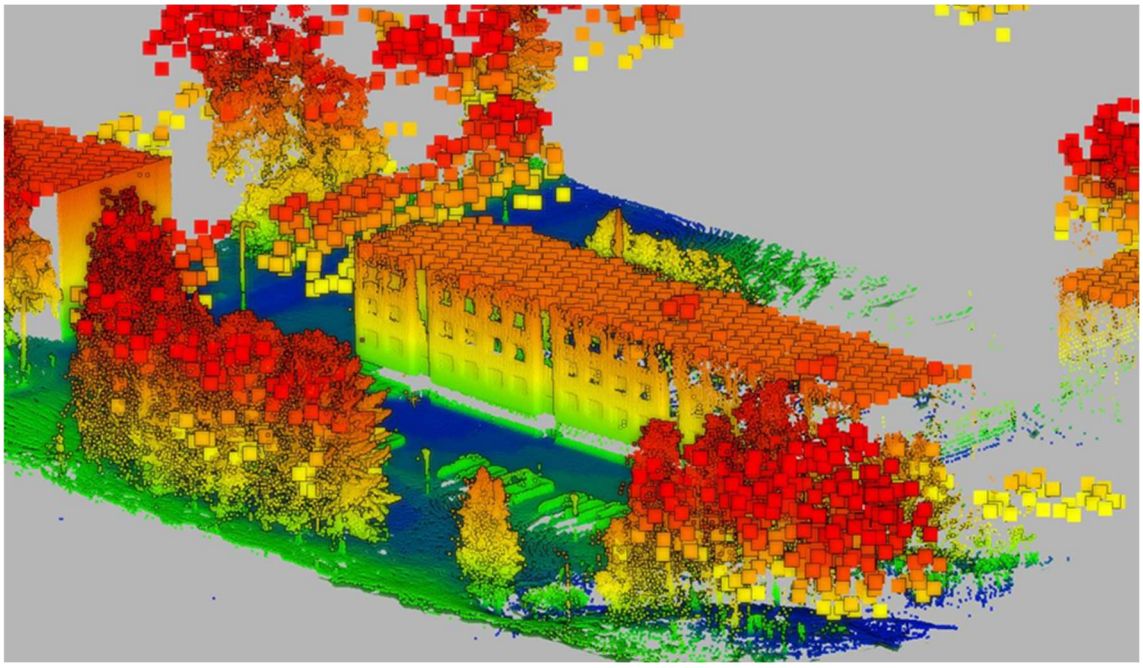
Kuva 20. *Mahdollinen kohteen lähestymisaineisto.*

Kuvassa 20 on esitetty lähestymisaineisto, joka on kerätty simuloimalla ensimmäisen yksikön lähestymistä tapahtumapaikalle. Aineisto on tallennettu auton ikkunasta katon yläpuolelle nostetussa kolmijalassa olevalla OS1-lidarilla, joka mittaa ympäristöä 10 Hz taajuudella. Kokonaisuudessaan mittaus kesti yhteensä 44 sekuntia, jolloin tallennettiin yhteensä 441 erillistä mittauskehystä. Näistä mittauksista kuitenkin vain 23 kehystä on valittu käytettäväksi pistepilven muodostuksessa manuaalisesta ICP rekisteröinnistä johtuen. Koko mittausmateriaalilla pistepilveä saataisiin tihennettyä huomattavasti rakennuksen ylempien kerrosten osalta, jotka tässä näkyvät harvana pistepilvenä.

Aineiston esikäsittelyvaiheessa pistepilvestä on suodatettu pois kuvaus auton kattoon osuneet pisteet. Tämän suodatuksen yhteydessä poistui vahingossa myös pisteet Z-koordinaattien väliltä -1,5 m – 0 m, mikä on aiheuttanut näkyvän aukon esimerkiksi rakennuksen seinäpinnassa. Tämä virhe on kuitenkin havainnollistuksen kannalta merkityksetön.

Kuvassa 20 näkyvä punainen viiva näyttää ensimmäisen yksikön ajoreitin tapahtumapaikkaa lähestyessä. Tätä lähestymisaineistoa visualisoinnin lisäksi hyödynnetään maanpinnan tasolla tehtävässä vapaan tilan analyysissä, jonka perusteella voidaan edelleen määrittää optimaaliset kohdat nostolavan sijoittamiseksi. Lisäksi analyysin perusteella voidaan määrittää kohderakennuksen korkeus.

Kuvassa 21 on havainnollistuksen vuoksi näytetty miltä kuvan 20 maasta kuvattu aineisto näyttää, kun se on yhdistetty MML:n julkiseen ilmakuvattuun ALS-aineistoon. Suuret pisteet ovat harvaa ALS-ainestoa ja pienet omaa mallia.



Kuva 21. *Lähestymisaineiston ja MML:n ALS-aineiston fuusio.*

Seuraavassa on selostettu vaiheittain ideaalisesti toimiva Duties-järjestelmä kohteeseen saapuessa:

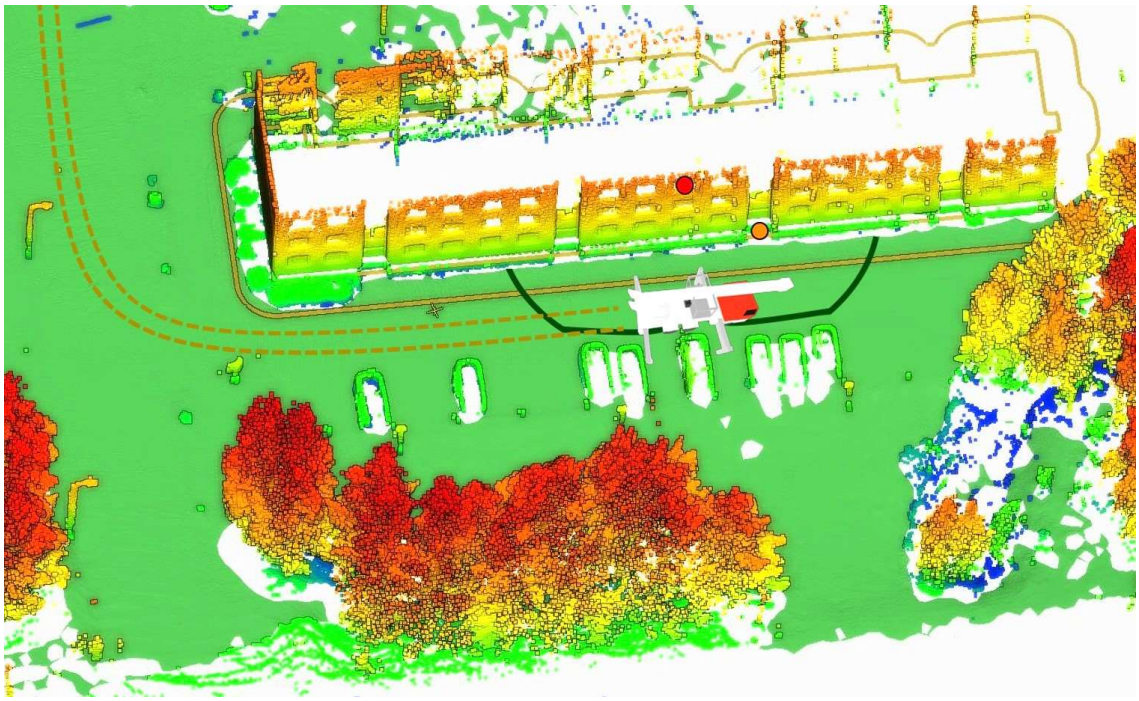
1. **Osoitetieto ja navigointi kohteeseen.** Tapahtumapaikan osoite saadaan suoraan hätäkeskukselta ja se tallentuu järjestelmään, sekä ohjaa normaalin navigaattorin tapaan paikalle.
2. **Lähestymisaineiston rekisteröinti pohjakarttaan.** GNSS-etäisyyden ollessa tarpeeksi pieni tapahtumapaikan osoitteesta lidar kytkeytyy päälle ja kerää dataa aina ajoneuvon pysähtymiseen asti. Tämä aineisto prosessoidaan kevyesti ja ajetaan pohjakarttaan oikealle paikalleen.
3. **Vapaan tilan analyysi.** Esimerkiksi NDT-OM-varaustilaan perustuen. Analyysi laskee lähestymisaineiston perusteella mahdolliset sijoituspaikat. Tarkempi kuvaus kappaleessa 5.2.
4. **Bronton optimoidun sijoituspaikan määritys.** Voidaan tehdä kahdella tapaa:
    a. Pelastustoiminnan johtaja määrittää Dutiesin kartalle Bronton sijainnin ja suunnan. Apuna hän voi halutessaan käyttää ulottumakaaviota.
    b. Pelastustoiminnan johtaja määrittää Dutiesin 3D-pistepilvelle tehtävän kohteen tarkennetun sijainnin havaintojensa pohjalta. Tällöin ohjelma

suorittaa laskennan kappaleessa 5.2 esiteltävän hahmotelman perusteella, ja palauttaa ehdotuksen sijainnille, jonka pelastustoiminnan johtaja hyväksyy. Ehdotetun sijainnin on kuitenkin oltava yliajettavissa johtajan toimesta.

5. **Ajourien reititys.** Määritetyn sijoituspaikan perusteella ohjelma laskee ja merkitsee reitin kartalle, joka muiden yksiköiden tulee jättää vapaaksi sujuvaa sijoitusta varten. Ajourien reitityksestä lisää kappaleessa 5.2
6. **Kohteen visuaalinen esitys.** Kaikille tehtävään osallistuvien yksikköjen Duties-navigaattoriin päivittyy malli, jossa pohjakartan, ja lähestymisaineiston pistepilven päälle on projektoitu realistisen kokoinen Bronto ja korostetut ajourat, jotka tulee jättää vapaaksi. Lisäksi karttaan on merkitty tarkka kohteen (tai kohteiden) sijainti. Lisäinformaationa kartassa voidaan korostaa esimerkiksi osoitteen rapun sijainti, sillä tämä on varsinkin uudemmissa kerrostaloissa saatavilla karttapalveluissa. Kuvassa 22 näytetään suuntaa antava esimerkki mahdollisesta visualisoinnista.

Tarkka kohde voi olla rakennuksessa myös palopaikan lisäksi esimerkiksi asuntoon jumiin jäänyt ihminen, joka tulee pelastaa. Tämän takia, ja myös palon leviämismahdollisuuksien takia on mahdollista, tapahtumasta riippuen kohteita joudutaan merkitsemään useita. Korkein prioriteetti tulisi olla vaarassa olevilla ihmishengillä.

Käytännöllisyyden kannalta olisi tärkeää, että tämä sijoitusjärjestelmä korvaisi kokonaan tai vähintään sulauttaisi ominaisuutensa nykyisin pelastajilla käytössä olevaan järjestelmän, sillä ylimääräinen karttaruutu ei palvele käytännöllisyyttä.



Kuva 22. *Tapahtumapaikan visualisoinnin ja taustalaskennan arkkitehtuuri.*

Kuva 22 esittää tapahtumapaikan visualisointia lähestymisaineiston sekä siihen liittyvän taustalaskennan perusteella. Kuvassa vihreällä värillä esitetty maanpinta kuvaa vapaan tilan aluetta. Punainen piste merkitsee pelastustoiminnan johtajan määrittämää tehtävän kohdetta. Oranssi piste puolestaan osoittaa rakennuksen sisäänkäynnin sijaintia, joka on määritetty karttapalveluiden tarjoaman osoitetiedon perusteella. Bronton sijoituspaikka on määritelty laskennallisesti ja hyväksytetty pelastustoiminnan johtajalla. Nostolava-auton sijoituspaikalle johtavat ajourat on merkitty lähestymissuunnan mukaisesti keltaisilla katkoviivoilla. Yhtenäinen keltainen viiva kuvaa rakennuksen seinämiä, sekä ulompana ohjeena käytettävää suositeltavaa tasauspaikanetäisyyttä kohteesta. Tummanvihreällä viivalla rajattu alue puolestaan esittää laskennallisesti määritettyä aluetta, jonka sisällä nostolavan kääntökehän keskipisteen tulee sijaita, jotta kohteen tavoittaminen ulottumakaavion perusteella olisi luotettavasti mahdollista.

Vihreä alue ei olisi todellisessa Duties-sovelluksessa ollenkaan näkyvissä vaan se toimisi vain taustalaskennan apuna sijoittelussa. Todellisuudessa pohjalle tulisi todellinen pohjakartta. Myöskään keltaisella merkitty turvaetäisyys ei tarvitsisi olla näkyvissä muille kuin pelastustoiminnan johtajalle ja nostolavan operaattorille, ja heillekin suosituksena.

Korkeita kohteita lähestyessä lidarin noin 40 asteen vertikaalisen näkökentän rajallisuus aiheuttaa sen, ettei ylimpien kerrosten kattava taltiointi välttämättä onnistu. Tällöin kohteen tarkan sijainnin suora määrittäminen pistepilviaineiston perusteella ei ole mahdollista. Edellä mainitun kaltaisissa tilanteissa tarkka sijainti voitaisiin merkitä kartalle joko ilman korkeustietoa tai lisäämällä sijaintiin manuaalisesti arvioitu korkeustieto, jolloin

kohde sijoittuisi kartalla ikään kuin ilmaan. Tällaisissa tilanteissa on kuitenkin noudatettava erityistä huolellisuutta ja varmistettava sivu-ulottuman riittävyys käytännön pelastustoiminnan näkökulmasta.

5.2 Vapaan tilan analyysi ja esimerkillisen paikanlaskenta kohteensijainnin perusteella

kuvan 22 vihreällä merkitty vapaan tilan alue on määritetty pistepilviaineiston maaluokittelulla, joka toteutettiin Cloth Simulation Filter (CSF) -algoritmilla. Menetelmän avulla pistepilvi luokiteltiin maanpinnan pisteisiin sekä maanpinnan yläpuolisiin pisteisiin. Luokittelun jälkeen maanpinnan yläpuolisista pisteistä luotiin verkkopinta, jota käytettiin poistamaan kaikki sen alle jäävät maanpinnan pisteet. Tämän toimenpiteen ensisijainen tarkoitus oli poistaa muun muassa autojen alapuolelle jääneitä pisteitä. On huomioitava, että kyseinen menetelmä poistaa epätoivottavasti myös puiden latvuston alle jääviä pisteitä. Ongelma olisi kuitenkin ratkaistavissa hyödyntämällä aiemmin esiteltyä NDT-OM-menetelmää, joka laskee vokseleille varaustiedon kolmiulotteisessa avaruudessa.

Kun edellä kuvattu karsinta oli suoritettu, jäljelle jääneet pisteet verkotettiin uudelleen, jolloin muodostui lopullinen vapaan tilan alue, joka katsotaan alustavasti sopivaksi nostolava-auton tukijalkojen sijoittamiselle. NDT-OM-menetelmän käyttö poistaisi samalla kokonaan tarpeen edellä mainitulle verkotusmenetelmälle. Todellisuudessa lidar-menetelmällä ei kuitenkaan pystytä määrittämään alueen maanperän kantavuutta, joten lopullinen arvio tukijalkojen sijoituspaikan soveltuvuudesta jää aina nostolava-auton operaattorin vastuulle.

Nostolavan optimaalisen sijainnin määrittämisessä päätavoitteena on löytää sellainen paikka, joka minimoi etäisyyden nostolavan kääntökehän keskipisteestä pelastuskohteeseen tai kohteisiin. Näin varmistetaan mahdollisimman suora ja sujuva lähestyminen kohteeseen ilman tarvetta peruuttaa nostolavaa paikalleen ajettaessa. Optimaalisen paikan valintaan vaikuttaa useita rajoitteita, kuten laitteistokohtaiset ulottuman rajat ja kääntökehän keskipisteen minimietäisyys rakennuksen seinästä. Lisäksi valitun sijainnin on oltava vapaa esteistä, eli nostolavan runko ei saa sijoittua aiemmin vapaan tilan analyysissä ilmenneiden esteiden päälle.

Varsinaisten ehdottomien rajoitteiden lisäksi huomioidaan valinnaisina ohjenuorina turvallisuus- ja käytettävyystekijöitä. Näihin sisältyy pyrkimys säilyttää riittävä turvaetäisyys rakennuksen seinästä ja välttää sijoittamista suoraan kohteen rapun eteen, jotta kulku kohteeseen säilyisi avoimena myös muille yksiköille ja toimijoille. Mikäli vapaata tilaa on käytettävissä riittävästi, pyritään myös jättämään nostolavan sivulle vähintään ajokaistan

levyinen tila, joka mahdollistaa muiden pelastusyksiköiden tai ajoneuvojen vapaan ohituksen. Lisäksi nostolavan ulottuman olisi hyvä riittää rakennuksen katolle asti, vaikka kohde ei siellä sijaitsisikaan. Tätä varten korkeustieto saadaan useimmista kerrostaloista eristettyä lähestymisaineistoa hyödyntämällä.

Tukijalkojen sijoituksessa lähtökohtana on käyttää tukijalkoja leveimmässä mahdollisessa asennossa, jolloin vakautta ja turvallisuutta voidaan maksimoida. Mikäli vapaa tila ei kuitenkaan mahdollista leveintä mahdollista asentoa, kavennus suoritetaan ensisijaisesti rakennuksesta kauimpana olevien tukijalkojen puolelta.

Reitityksen peruslaskenta voidaan toteuttaa vakiintuneen reitityspalvelun, kuten Googlen navigaattorin, osoitepohjaisen reittilaskennan varaan. Pelastustoiminnan johtajan määriteltyä nostolavan sijoituspaikan reititysjärjestelmä aktivoituu vasta viimeiselle noin sadalle metrille, jolloin sen laskema tarkennettu siirtymä ohjaa ajoneuvon suoraan kohteeseen. Tällöin reitti mukautuu vapaantilan analyysin antamien rajoitteiden puitteissa siten, että se noudattaa pääsääntöisesti OpenStreetMap-kartastosta haettavien ajoväylien oikean laidan linjaa aina siihen asti, kunnes jäljellä oleva matka edellyttää poikkeamaa ajoväylästä ja siirtymistä suoraan nostolavan sijoituspaikkaan. Näin varmistetaan, että ajolinjat seuraavat käytettävissä olevia väyliä ja että tarvittava epäjatkuvuus ajoväylään tapahtuu vasta aivan kohdealueen tuntumassa.

5.3 Muiden yksiköiden informointi

Kaikkien tehtävään osallistuvien palolaitosten Navigaattoriin ilmestyisi kuvan 22 tapainen esitys, asetettuna pohjakartan päälle. Lisäksi siitä olisi poistettu vain laskennan kannalta olennaiset elementit kuten vihreä vapaatila. Pohjakartta voisi sisältää esimerkiksi Googlen satelliittikuvan ja tapahtumapaikan osoitteen lähiympäristön pisteet MML:n ALS-aineistosta, jolloin lähestymisaineistolle saadaan suoraan myös katto.

5.4 Teoreettinen kohteen automaattinen määritys

Palokohteen rekisteröinti sekä nykyisessä että suunnitellussa Duties-järjestelmässä perustuu pääosin pelastustoiminnan johtajan manuaaliseen toimintaan. Ideaalitilanteessa rekisteröintiprosessi voitaisiin automatisoida kokonaan siten, että järjestelmä itsenäisesti tunnistaisi palokohteen sekä pulassa olevat henkilöt rakennuksen julkisivulta, merkitsisi heidät, ja määrittäisi automaattisesti sopivan sijoituspaikan Brontolle. Käytännössä palontunnistus ja tarkka paikannus vaativat lidar-sensorin lisäksi myös muita täydentäviä antureita, kuten lidarin kanssa kalibroitua lämpökameraa tai konenäöllä toimivaa savuntunnistuskameraa. Lisäksi palon näkyminen ulkopuolisille antureille riippuu merkittävästi

sen sijainnista ja laajuudesta, mikä tarkoittaa, että kaikenkattavassakaan futuristisessa järjestelmässä ei välttämättä aina pystytä luotettavasti tunnistamaan palon sijaintia automaattisesti. Tällöin on edelleen palattava manuaaliseen lokalisaatioon.

Toisaalta ihmishahmojen automaattinen tunnistaminen lidar-aineistosta, esimerkiksi ikkunoista tai parvekkeilta, voi olla mahdollista. Käytännössä kuitenkin luotettavin tapa ihmisten tunnistamiseen perustuu yleensä kaksiulotteisiin kuvamateriaaleihin. Koska automaattisia menetelmiä ei kuitenkaan voida pitää ehdottoman varmoina, lopullinen varmennus ja kohteiden tarkka paikannus tulisi toteuttaa edelleen ihmistyönä. Samalla ulkopuolisin menetelmin ei voida saada tietoa rakennuksen sisätiloista, vaan niiden kartoittaminen jää aina pelastajien vastuulle. Seuraavassa tarkastellaan nykyteknologisia ratkaisuja, joita käytetään ihmisten tunnistamiseen ja paikantamiseen tulipaloissa.

Rafi ym. (2025) esittelevät tutkimuksessaan ”Detection of Human Life in Fire Scenarios Using YOLOv8” reaaliaikaisen konenäköjärjestelmän, jolla voidaan tunnistaa ja paikantaa palotilanteissa sekä ihmiset että tulipesäkkeet. Järjestelmä perustuu YOLOv8-objektintunnistusalgoritmiin, jonka kouluttamisessa käytettiin yhteensä 8 939 kuvaa. Lisäksi ihmisten tunnistuksen yhteydessä käytetään Mediapipe-algoritmia, joka luokittelee ihmisten asennot yksinkertaistettuihin kategorioihin: seisoma-, kyykky- tai makuuasentoon. Asennon tunnistuksen avulla voidaan priorisoida evakuointijärjestystä, sillä esimerkiksi makaava henkilö voi olla merkki tajuttomuudesta. Tutkimuksessa saavutettiin 83,6 %:n osumatarkkuus (precision), eli järjestelmän ihmiseksi tunnistamista kohteista 83,6 % vastasi todellista ihmishavaintoa. Kokonaisosumatarkkuus (accuracy), joka huomioi myös tapaukset, joissa kuvissa ei ollut lainkaan ihmisiä, oli puolestaan 88,8 %. Tutkimuksessa havaittiin kuitenkin myös rajoitteita, kuten heikentynyt suorituskyky erittäin tiheässä savussa tai matalassa valaistuksessa, minkä vuoksi sensorifuusion, esimerkiksi lämpökuvien tai lidar-teknologian lisääminen järjestelmään nähtiin tärkeänä jatkokehityskohteena. [65]

Tsai ym. (2022) puolestaan tutkivat jo aikaisemmin vastaavanlaista ratkaisua tutkimuksessaan ”Using Deep Learning with Thermal Imaging for Human Detection in Heavy Smoke Scenarios”. Tässä tutkimuksessa sovellettiin YOLOv4-algoritmia lämpökameran kuva-aineistoon ihmisten tunnistamiseksi erityisesti paksun savun aiheuttamassa heikentyneessä näkyvyydessä. Tutkimuksessa käytetty konvoluutioneuroverkko koulutettiin monipuolisella lämpökuva-aineistolla, ja se saavutti yli 95 %:n tunnistustarkkuuden ihmishahmojen havaitsemisessa savuisissa olosuhteissa. Lisäksi järjestelmä mahdollisti reaaliaikaisen ja luotettavan paikannustiedon välittämisen pelastushenkilöstölle, mikä merkittävästi paransi pelastajien tilannetietoisuutta ja tehosti evakuointitoimia. Tutkijat

korostivat erityisesti lämpökuvantamisen etuja näkyvän valon kameraan verrattuna tilanteissa, joissa näkyvyys on voimakkaasti rajoittunut. [66]

Käytännön esimerkkinä kaupallisesta ratkaisusta, Qwake Technologies on kehittänyt palokypärään integroitavan lisätyn todellisuuden järjestelmän, nimeltään C-THRU. Tämä järjestelmä hyödyntää lämpökameraa, jonka tuottama kuva heijastetaan reaaliajassa käyttäjän näkökenttään sijoitetulle näytölle. Kuvan lisäksi järjestelmä tarjoaa reunojen tunnistukseen perustuvaa visuaalista tukea, kuten rakennusten ja esineiden ääriviivojen korostamista. [67]

EU-rahoitteisessa SmokeBot-projektissa kehitettiin prototyyppirobotti, johon oli integroitu stereolämpökamera, lidar ja 3D-radarkamera. SmokeBotin tarkoituksena oli tuottaa palomiehille yksityiskohtaista tietoa paloalueesta, kartoittaa ympäristöä ja luoda reaaliaikaisia ympäristömalleja pelastustoimien tueksi. Projektissa kuitenkin havaittiin, että robotti oli vielä vuonna 2018 liian hidas käytännön pelastustehtävissä, sillä datan kerääminen ja analysointi kesti noin 15–30 minuuttia. [68]

Vaikka edellä kuvatut esimerkit ovat keskittyneet lähinnä rakennusten sisäisen tilanteen visualisointiin ja mallinnukseen, samoja menetelmiä olisi mahdollista soveltaa myös ulkopuolelta tehtävään havainnointiin, kuten parvekkeilla tai ikkunoissa olevien ihmisten automaattiseen tunnistukseen. Parhaimmillaan reaaliaikainen tilannekuva voitaisiin jatkossa yhdistää ulkoa tehtävien havaintojen lisäksi rakennusten sisällä pelastajien käyttämistä laitteista saataviin tietoihin, jolloin esimerkiksi palokypäriin integroidut ohjelmistot voisivat tuottaa yhtenäistä visualisoitua tilannekuvaa Duties-järjestelmän kautta myös rakennuksen ulkopuolella oleville yksiköille ja pelastusjohdolle.

5.5 Suositus käytettävistä ratkaisuista

Ohjelman kehittämisen alkuvaiheessa ensimmäiseksi julkaistavaksi versioksi suositellaan järjestelmää, jossa käyttäjällä olisi mahdollisuus valita pohjakartaksi joko Googlen perinteinen karttapohja tai satelliittikuva. Tämän päälle lisättäisiin ajoneuvon katolle sijoitetun lidarin automaattisesti taltioima aineisto. Algoritmi prosessoisi ja sijoittaisi pistepilven automaattisesti karttapohjalle sekä visualisoisi palotehtävän kannalta olennaiset yksityiskohdat kuvan 22 mukaisesti. Lisäksi pistepilven värityksessä olisi suositeltavaa hyödyntää pisteiden reflektiivisyyttä, joka on suoraan saatavissa lidar-aineiston raakadatasta. Reflektiivisyyden käyttö on myös teknisesti yksinkertainen ratkaisu, eikä se kasvata järjestelmän kokonaiskompleksisuutta muutoin kuin ohjelmakoodin osalta. Edellä mainitut toiminnot muodostavat ohjelman kriittisen ytimen, jonka toteutus on teknisesti suoraviivaista eikä edellytä merkittäviä suorituskykyvaatimuksia päätelaitteistolta.

Kun ohjelman keskeiset ja kriittiset ominaisuudet on saatu luotettavasti toimiviksi, voidaan järjestelmää jatkokehittää vapaammin erilaisin lisäominaisuuksin. Esimerkkinä mahdollisesta jatkokehityksestä voidaan mainita toiminnallisuus, jossa kohteiden pistepilvimallit täydennetään automaattisesti julkisten ALS-aineistojen avulla. Tämä mahdollistaisi muun muassa rakennusten kattojen piirteiden entistä kattavamman ja yksityiskohtaisemman visualisoinnin.

Diplomityössä kehitetylle karttajärjestelmälle voidaan tunnistaa potentiaalista hyötykäyttöä myös pelastuslaitosten ulkopuolisissa sovelluksissa. Esimerkiksi erilaiset urakointialan yritykset voisivat hyödyntää järjestelmää siten, että työkohteesta kerättäisiin aineistoa etukäteen, jolloin työtoimenpiteiden suunnittelu voitaisiin toteuttaa jälkikäteen toimistoympäristössä. Tämä mahdollistaisi visuaalisesti informaatiorikkaan aineiston hyödyntämisen työvaiheiden suunnittelussa sekä tarjoaisi mahdollisuuden esitellä ja havainnollistaa suunnitellut työoperaatiot myös suuremmalle yleisölle esimerkiksi koulutustilanteissa.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimus osoittaa, että pelastustilanteissa kriittinen tarve selkeälle ja luotettavalle sijoitusinformaatiolle voidaan täyttää yhdistämällä eri lähteistä peräisin olevat paikkatiedot ja 3D-aineistot reaaliaikaisesti. Työssä tehdään kattava selvitys helposti karttasovellukseen integroitavissa olevista kartta-aineistoista. Kirjallisuuskatsaus ja kokeelliset visuaaliset kokeilut paljastivat vaihtelevien kartta- ja lidar-aineistojen yhteensoveltuvuuden, kun taas konseptuaalisessa mallinnuksessa kehitetyt linjat muodostavat vankan pohjan Duties -järjestelmän jatkokehitykselle.

Työn antamat vastaukset tutkimuskysymyksiin ovat seuraavat:

1. Mitä valmiina olevia kartta-aineistoja on olemassa, ja mitä niistä voidaan hyödyntää Duties-sovelluksessa?

   Erityisesti Googlen 3D-mallien käyttö ja julkisten pistepilviaineistojen käyttö nähdään hyödyllisenä mallin visuaalisen luonteen luomiseen. Käytettävissä on myös yksinkertaisia, rakennusten korkeustietoon ja pohjapiirustukseen perustuvia laatikkomalleja, ja lisäksi maanalaisia putkisto-, viemäröinti- ja johtokarttoja, joiden kerääminen Suomessa todetaan työlääksi.

2. Miten kolmiulotteista aineistoa voidaan kerätä, ja miten se voidaan reaaliaikaisesti georeferoida?

   Työssä keskitytään pääasiassa siihen, että kolmiulotteinen materiaali taltioidaan lidarilla, joka on kiinnitettynä palotehtävälle ensimmäisenä saapuvaan kulkuneuvoon ja nostolavan työkoriin. Työssä ehdotetaan materiaalin väritykselle yksinkertaista reflektiivisyyteen perustuvaa väritystä, jolloin järjestelmä ei vaadi lidarin lisäksi muita ympäristöä havainnoivia laitteita. Georeferointia varten työssä toteutettiin yksinkertainen ohjelma, joka rakennusten pohjapiirustuksiin verraten sijoittaa pistepilven oikealle paikalleen vakuuttavalla tarkkuudella.

3. Miten nostolavayksikön sijoituspaikka voidaan määrittää ja informoida visuaalisesti tehtävälle osallistuville yksiköille?

   Työssä annetaan esimerkki näkymästä, kun tapahtumapaikalle ajetaan. Näkymään on tämän jälkeen täydennetty ulkoista pistepilviaineistoa hyödyntäen. Sijoituspaikan optimoinnin saamiseksi annetaan karkea kaava jatkokehitystä varten. Järjestelmän ehdotetaan korvaavan aikaisemmat navigointijärjestelmät kokonaan käyttäjäystävällisyyden vuoksi.

Esitetty arkkitehtuuri mahdollistaa tapahtumapaikalla kerätyn pistepilviaineiston reaaliaikaisen georeferoinnin luotettavasti todellisiin pohjakartan koordinaatteihin. Lisäksi pelastustoiminnan johtaja saa luonnostellussa käyttöliittymässä välittömästi ehdotuksen optimaalisesta sijoituspaikasta, ja hän sekä kaikki pelastustehtävään osallistuvat tahot saavat ajantasaisen tilannekuvan ajoreiteistä ja muusta välttämättömästä kontekstuaalisesta tiedosta, kuten parvekkeella olevista ihmisistä.

Työn tulokset tarjoavat konkreettiset suositukset ohjelmiston prototyyppikehitykseen, ja ne muodostavat perustan jatkotutkimukselle, jossa voidaan toteuttaa reaaliaikainen automatisoitu palokohteen tunnistus ja tarkentaa sijoituslaskentaa täydentävillä anturijärjestelmillä. Lisäksi ehdotetut menetelmät ovat sovellettavissa laajemminkin työmaan suunnitteluun visualisointiin ja operatiiviseen johtamiseen muilla toimialoilla.

LÄHTEET

[1] Bronto Skylift Oy Ab, ”Bronto Duties,” 2025.

[2] M. Holopainen, J. Hyyppä ja M. Vastaranta, Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa, Helsingin yliopiston metsätieteiden laitos, 2013.

[3] B. Lombard, ”How does Lidar work? (in detail),” Outsight, [Online]. Available: https://insights.outsight.ai/how-does-lidar-work/. [Haettu 10 3 2025].

[4] Ouster, ”OS1 Mid-Range High-Resolution Imaging Lidar,” [Online]. Available: https://data.ouster.io/downloads/datasheets/datasheet-rev7-v3p1-os1.pdf. [Haettu 10 3 2025].

[5] L. Leihui, W. Riwei ja Z. Xuping, ”A Tutorial Review on Point Cloud Registrations: Principle, Classification, Comparison, and Technology Challenges,” *Mathematical Problems in Engineering,* 2021.

[6] ASPRS American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ”LAS Specification 1.4 - R15,” 2019. [Online]. Available: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/07/LAS_1_4_r15.pdf.

[7] L. Graham, ”The LAS 1.4 Spesification,” 2012.

[8] ArcGIS Desktop, ”Editing LAS point classification,” [Online]. Available: https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/las-dataset/editing-las-dataset-points.htm. [Haettu 13 3 2025].

[9] P. Biber, ”The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan,” tekijä: *Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings.*, Tubingen, 2003.

[10] M. Magnusson, ”The Three-Dimensional Normal-Distributions Transform — an Efficient Representation for Registration, Surface Analysis, and Loop Detection,” Örebro University, Örebro, 2009.

[11] J. Saarinen, H. Andearsson, t. Stoyanov, J. Ala-Luhtala ja A. J. Lilienthal, ”Normal Distributions Transform Occupancy Maps: Application to large-scale online 3D mapping,” tekijä: *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, 2013.

[12] Imagemeter, ”Reference Scale,” [Online]. Available: https://imagemeter.com/manual/measuring/reference-scale/. [Haettu 27 3 2025].

[13] Plex-Earth, ”Elevation Modeling - the differences between DTM, DSM & DEM,” 2024. [Online]. Available: https://support.plexearth.com/hc/en-us/articles/4642425453201-Elevation-Modeling-the-differences-between-DTM-DSM-DEM. [Haettu 27 5 2025].

[14] Texas Instruments, ”Why Are Automotive Radar Systems Moving from 24GHz to 77GHz?,” [Online]. Available: https://www.ti.com/document-viewer/lit/html/SSZT916. [Haettu 5 5 2025].

[15] Douglas College Physics Department and OpenStax, Douglas College Physics 1207, Douglas College, 2016.

[16] RTI international, ”Photogrammetry Summary: Lab 58 Technology Research Brief,” 2020. [Online]. Available: https://www.rti.org/brochures/photogrammetry-summary-lab-58-technology-research-brief?utm_source=chatgpt.com. [Haettu 2 5 2025].

[17] Anvil Labs, ”LiDAR vs. Photogrammetry: Accuracy in Harsh Conditions,” 2024. [Online]. Available: https://anvil.so/post/lidar-vs-photogrammetry-accuracy-in-harsh-conditions#:~:text=,Much%20cheaper%2C%20starting%20at%20%245%2C000. [Haettu 2 5 2025].

[18] Sensrad, ”Hugin D1,” [Online]. Available: https://www.sensrad.com/hugin-d1. [Haettu 2 5 2025].

[19] HESAI, ”Two New Products at CES: Hesai Showcases 1440-Channel Automotive Lidar and Next Gen Solid-State Lidar,” 2025. [Online]. Available: https://www.hesaitech.com/two-new-products-at-ces-hesai-showcases-1440-channel-automotive-lidar-and-next-gen-solid-state-lidar/?utm_source=chatgpt.com. [Haettu 5 5 2025].

[20] Geodetic Services Inc, ”Basics of Photogrammetry,” 2017. [Online]. Available: https://www.geodetic.com/basics-of-photogrammetry/. [Haettu 17 3 2025].

[21] R. Hartley ja A. Zisserman, Multiple View Geometry in Computer Vision, Second Edition, Cambridge University Press, 2004.

[22] F. Daniel, ”How we built Immersive View for routes on Maps,” Google, 2023. [Online]. Available: https://blog.google/products/maps/google-maps-immersive-view-routes/. [Haettu 13 3 2025].

[23] Google, ”Geo guidelines, Google Maps, Google Earth, and Street View,” [Online]. Available: https://about.google/brand-resource-center/products-and-services/geo-guidelines/. [Haettu 17 3 2025].

[24] Google, ”Google Maps Platform Pricing,” [Online]. Available: https://mapsplatform.google.com/pricing/. [Haettu 19 3 2025].

[25] Google, ”Map Tiles API,” [Online]. Available: https://developers.google.com/maps/documentation/tile. [Haettu 19 3 2025].

[26] X. Wang ja F. Wang, ”The precision of google earth map analysis with the coordinates of igs stations,” *Dalian University of Technology,* 2020.

[27] SpaceFinland, ”Mikä on GNSS-järjestelmien sijaintitiedon tarkkuus?,” [Online]. Available: https://spacefinland.fi/gnss-jarjestelmien-sijaintitiedon-tarkkuus?utm_source=chatgpt.com. [Haettu 30 3 2025].

[28] ArduSimple, ”Centimeter Precision GPS/GNSS - RTK Explained,” [Online]. Available: https://www.ardusimple.com/rtk-explained/. [Haettu 30 3 2025].

[29] Maxar, ”Optical Imagery,” [Online]. Available: https://www.maxar.com/maxar-intelligence/products/optical-imagery. [Haettu 1 4 2025].

[30] Maanmittauslaoitos, ”Laserkeilausaineisto 5 p,” [Online]. Available: https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/aineistot-ja-rajapinnat/tuotekuvaukset/laserkeilausaineisto-5-p. [Haettu 3 3 2025].

[31] Maanmittauslaitos, ”Maanmittauslaitoksen paikkatietoaineistojen formaatit,” [Online]. Available: https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/aineistot-ja-rajapinnat/maastotiedot-ja-niiden-hankinta-0. [Haettu 3 3 2025].

[32] Maanmittauslaitos, ”Laserkeilaus ja ilmakuvaus,” [Online]. Available: https://www.maanmittauslaitos.fi/laserkeilaus-ja-ilmakuvaus. [Haettu 3 3 2025].

[33] Maanmittauslaitos, ”Maanmittauslaitoksen Laserkeilausaineisto 5 p:n käyttöehdot,” [Online]. Available: https://www.maanmittauslaitos.fi/laserkeilausaineistot/kayttoehdot. [Haettu 3 3 2025].

[34] Maanmittauslaitos, ”Laserkeilausaineisto 0,5 p,” [Online]. Available: https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/aineistot-ja-rajapinnat/tuotekuvaukset/laserkeilausaineisto-05-p. [Haettu 3 3 2025].

[35] Maanmittauslaitos, ”Laserkeilausaineisto 0,5 p (2008-2019),” [Online]. Available: Laserkeilausaineisto 0,5 p (2008-2019). [Haettu 3 3 2025].

[36] Maanmittauslaitos, ”Karttapaikka - Laserkeilausaineisto,” [Online]. Available: https://asiointi.maanmittauslaitos.fi/karttapaikka/tiedostopalvelu/laserkeilausaineisto_05?lang=fi. [Haettu 25 2 2025].

[37] Maanmittauslaitos, ”Korkeusmalli 2 m,” [Online]. Available: https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/aineistot-ja-rajapinnat/tuotekuvaukset/korkeusmalli-2-m. [Haettu 28 2 2025].

[38] YLE, ”Millaista Tamperetta rakennetaan juuri nyt? Kiipesimme kaupungin kattojen ylle – katso huimat maisemat varjoliidon kyydistä,” YLE, [Online]. Available: https://yle.fi/a/3-12124067. [Haettu 10 3 2025].

[39] cesium, ”Cesium ion,” [Online]. Available: https://cesium.com/platform/cesium-ion/. [Haettu 19 3 2025].

[40] Cesium, ”Curated 3D content,” [Online]. Available: https://cesium.com/platform/cesium-ion/content/. [Haettu 19 3 2025].

[41] Cesium, ”Cesium ion SaaS pricing plans,” [Online]. Available: https://cesium.com/platform/cesium-ion/pricing/. [Haettu 19 3 2025].

[42] Cesium, ”3D Tiling with Cesium,” [Online]. Available: https://cesium.com/platform/cesium-ion/3d-tiling-pipeline/. [Haettu 20 3 2025].

[43] Cesium, ”Cesium OSM Buildings,” [Online]. Available: https://cesium.com/platform/cesium-ion/content/cesium-osm-buildings/. [Haettu 20 3 2025].

[44] USGS (United States Geological Survey), ”3D Elevation Program,” [Online]. Available: https://www.usgs.gov/3d-elevation-program. [Haettu 20 3 2025].

[45] Environment Agency, ”National LIDAR Programme,” [Online]. Available: https://www.data.gov.uk/dataset/f0db0249-f17b-4036-9e65-309148c97ce4/national-lidar-programme. [Haettu 20 3 2025].

[46] Scottish Government, ”Scottish Remote Sensing Portal,” [Online]. Available: https://remotesensingdata.gov.scot/. [Haettu 20 3 2025].

[47] Lantmäteriet, ”Laserdata Nedladdning, skog,” [Online]. Available: https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/vara-produkter/produktlista/laserdata-nedladdning-skog/. [Haettu 21 3 2025].

[48] Direção Geral do Território, ”Modelos Digitais de Terreno e de Superfície,” [Online]. Available: https://www.dgterritorio.gov.pt/cartografia/cartografia-topografica/modelos-digitais?fbclid=IwAR1w02GyUoAaKQ9qRtlZqODA9144-kRiSAuc896xN_aGLmT1zNxaULJj9Q. [Haettu 21 3 2025].

[49] Eurogeographics, ”Annual review 2020,” 2020. [Online]. Available: https://eurogeographics.org/app/uploads/2021/06/EG_annual_review_2020_2021_06_14.pdf. [Haettu 21 3 2025].

[50] GuGiK, ”LIDAR measurements (LIDAR),” [Online]. Available: https://www.geoportal.gov.pl/en/data/lidar-measurements-lidar/. [Haettu 21 3 2025].

[51] C. Campbell, ”LiDAR and Aerial Archaeology,” [Online]. Available: https://github.com/LiDAR-and-Aerial-Archaeology. [Haettu 24 3 2025].

[52] Bronto Skylift Oy Ab, ”Bronto One,” [Online]. Available: one.brontoskylift.com. [Haettu 24 3 2025].

[53] NATO, ”Standardization,” 2022. [Online]. Available: https://www.nato.int/cps/su/natohq/topics_69269.htm. [Haettu 26 3 2025].

[54] S. Ahlberg, U. Söderman, Å. Persson ja M. Elmqvist, ”High-Resolution Environment Models to Support Rapid and Efficient Mission Planning and Training,” *Modelling and Simulation to Address NATO’s New and Existing Military Requirements,* pp. 5-(1-11), 2004.

[55] Suomen valtio, ”Laki verkkoinfrastruktuurin yhteisrakentamisesta ja -käytöstä (276/2016),” 2016. [Online]. Available: https://finlex.fi/fi/lainsaadanto/2016/276.

[56] Valtioneuvosto, ”Ministeri Ranne: Sijaintitietopalvelua ei toistaiseksi käynnistetä (Tiedote),” 11 10 2024. [Online]. Available: https://valtioneuvosto.fi/-/1410829/ministeri-ranne-sijaintitietopalvelua-ei-toistaiseksi-kaynnisteta.

[57] Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY, ”SeutuRuutu hulevesisuunnittelun tukena,” [Online]. Available: https://julkaisu.hsy.fi/seuturuutu-hulevesisuunnittelun-tukena/2.html. [Haettu 14 4 2025].

[58] A. Kumar ja R. Choudhury, ”Principles of Colour Appearance and Measurement, Volume 1 - Object Appearance, Colour Perception and Instrumental Measurement,” Elsevier Ltd, 2014, p. 56.

[59] Ouster, ”OS0 Ultra-Wide View High-Resolution Imaging Lidar,” [Online]. Available: https://data.ouster.io/downloads/datasheets/datasheet-rev7-v3p1-os0.pdf. [Haettu 9 4 2025].

[60] H.-S. Cha, G. Lee, A. Ghosh, M. Baker, S. Kelley ja H. Juergen, ”5G NR Positioning Enhancements in 3GPP Release-18,” *IEEE Communications Magazine 9(1):22-27,* p. 6, 3 2025.

[61] DFROBOT, ”SKU:SEN0419,” [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/SKU_SEN0419_Fermion_BMM150_Triple_Axis_Magnetometer_Sensor_Breakout?utm_source=chatgpt.com. [Haettu 25 4 2025].

[62] ComNav Technology, ”What is the principle of dual-antenna heading and what is its accuracy?,” 2024. [Online]. Available: https://www.comnavtech.com/about/blogs/582. [Haettu 27 5 2025].

[63] K. Ni, N. Armstrong-Crews ja S. Sawyer, ”Geo-registering 3D point clouds to 2D maps with scan matching and the Hough Transform,” tekijä: *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vancouver, 2013.

[64] E. G. Parmehr, c. S. Fraser, C. Zhang ja j. Leach, ”Automatic Registration of Aerial Images with 3D LiDAR Data Using a Hybrid Intensity-Based Method,” tekijä: *DICTA*, 2012.

[65] S. Rafi, S. Nagaraj, n. Murali, S. S, M. F. Shariff ja S. K. K. L, ”Detection of Human Life in Fire Scenarios Using YOLOv8,” *International Journal for Multidisciplinary Research,* nro 1, 2025.

[66] P.-F. Tsai, C.-H. Liao ja Y. Shyan-Ming, ”Using Deep Learning with Thermal Imaging for Human Detection in Heavy Smoke Scenarios,” *Sensors,* nro 22, 2022.

[67] Qwake, ”C-THRU Navigator, Hands-Free AR Vision & Navigation,” [Online]. Available: https://www.qwake.tech/navigator. [Haettu 27 5 2025].

[68] New Atlas, ”SmokeBot sees through smoke to guide firefighters,” 2018. [Online]. Available: https://newatlas.com/smokebot-fire-rescue-robot/55103. [Haettu 27 5 2025].