



Patrik Penttinen

# Laserkeilausaineiston luokittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinöörityö

19.4.2025

# Tiivistelmä

Tekijä: Patrik Penttinen  
Otsikko: Laserkeilausaineiston luokittelu  
Sivumäärä: 28 sivua  
Aika: 19.4.2021

Tutkinto: Insinööri (AMK)  
Tutkinto-ohjelma: Maanmittaustekniikka  
Ohjaajat: lehtori Ilkka Partonen

---

Insinööriyössä selvitettiin lasererkeilausaineiston luokittelua erilaisissa ympäristöissä hyödyntämällä Leica RTC360 -laserkeilainta, Leica REGISTER 360 -ohjelmistoa ja Leica Cyclone 3DR -ohjelmistoa. Työn tavoitteena oli tutkia, kuinka hyvin automaattinen luokittelu toimii sisä- ja ulkotiloissa sekä arvioida luokittelun tarkkuutta ja luotettavuutta.

Työ koostui teoriaosuudesta ja käytännön testauksesta. Teoriaosuudessa käsiteltiin laserkeilauksen peruseräiteitä, historiaa ja kehitystä sekä aineiston käsittelyvaiheita. Käytännön osuudessa suoritettiin laserkeilaus sekä sisällä että ulkona, minkä jälkeen aineisto prosessoitiin ja luokiteltiin Leica REGISTER 360 -ohjelmistossa, sekä luokittelua tehtiin vertailun vuoksi myös Cyclone 3DR -ohjelmistolla. Luokittelutulokset analysoitiin vertailemalla eri ympäristöjen vaikutusta pistepilviaineistoon.

Työssä havaittiin, että Leica REGISTER 360 tarjoaa tehokkaita työkaluja laserkeilausaineiston luokitteluun, mutta automaattisten menetelmien luotettavuus riippuu huomattavasti keilausolosuhteista, lisäksi työssä todettiin Cyclone 3DR automaattisen luokittelun toimivan paremmin kuin Leica REGISTER 360.

Opinnäytetyön tuloksia voidaan hyödyntää erityisesti rakennus- ja inframittauksissa, joissa tarkka kohteiden erottelu on tärkeää, ja joka sisältää useaa eri luokiteltavaa kohdetta.

Avainsanat: Laserkeilaus, Laserkeilausaineiston luokittelu, automaattinen luokittelu, Leica REGISTER 360, Cyclone 3DR

---

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

## Abstract

Author: Patrik Penttinen  
Title: Classification of laser scanning data  
Number of Pages: 28 pages  
Date: 19 April 2025  
Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Land Surveying  
Supervisors: Ilkka Partonen, Senior Lecturer

---

The thesis aimed at evaluating the performance, accuracy, and reliability of automatic classification of laser scanning data in both indoor and outdoor environments using the Leica RTC360 laser scanner and Leica REGISTER 360 software.

The project collected information about the principles of laser scanning and data processing. Laser scanning was then conducted indoors and outdoors, and the data were processed with Leica RTC360 laser scanner and classified with Leica REGISTER 360. Additionally, automatic classification was performed with Cyclone 3DR software, which provided more accurate classification results than REGISTER 360. The classification results were analysed by comparing the effect of the different conditions on the data.

The results showed that the REGISTER 360 software provides efficient classification tools, but scanning conditions affect the accuracy. Indoor classification identified walls and structures, but not necessarily smaller objects. Outdoor classification was more precise, distinguishing vegetation, buildings, and ground surfaces. Automatic classification was more accurate with Cyclone 3DR software.

The project showed that automatic classification can improve efficiency in construction and infrastructure measurements. While manual corrections are still needed, automatic classification significantly reduced processing time. The thesis could be used in future research into optimizing classification methods with higher-resolution scans and more advanced computing resources.

Keywords: laser scanning, classification, point cloud, Leica REGISTER 360, automatic classification, Cyclone 3DR.

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Laserkeilauksen perusteet	2

2.1	Laserkeilaus	2
2.2	Historia ja kehitys	4
2.3	Perusperiaate	4
2.4	Edut ja haasteet	5
2.5	Mittausmenetelmät	5
3	Laserkeilausaineisto	7
3.1	Keruu	7
3.2	Käsittely	9
3.3	Pistepilven ominaisuudet	10
4	Laserkeilausaineiston luokittelu	11
5	Käytännön sovellus ja testaus	12
5.1	Aineisto ja ohjelmistot	12
5.2	Leica REGISTER 360 plus	13
5.2.1	Sisätila	13
5.2.2	Ulkotila	18
5.3	Cyclone 3DR	21
5.3.1	Sisätila	21
5.3.2	Ulkotila	24
6	Yhteenveto	26
	Lähteet	29

## Lyhenteet ja käsitteet

- LIDAR: *Light detection and ranging*. Teknologia, jolla mitataan etäisyyksiä laserpulssien avulla.
- ToF: *Time-of-light*. Toiminta periaate tarkalle mittaukselle, joka käyttää laseria lähettämään moduloidun valoallon, joka heijastuu takaisin mittavasta kohteesta.
- Tähys: Yksittäinen piste/objekti, jolle on määritetty sijainti koordinaatistossa.
- 3D-malli: Kolmiulotteinen digitaalinen esitys esineestä, ympäristöstä tai rakenteesta, joka on muodostettu pisteistä, viivoista ja pinnoista kolmiulotteisessa avaruudessa.

# 1 Johdanto

Laserkeilaus on nykyaikainen, tarkka ja tehokas mittausmenetelmä, jolla voidaan tuottaa kolmiulotteisia pistepilviaineistoja. Laserkeilausta hyödynnetään useilla eri aloilla kuten maanmittauksessa, rakentamisessa ja rikostutkinnassa, jossa poliisi käyttää sitä rikospaikkojen analysointiin. Laserkeilausaineisto pitää sisällään valtavan määrän pisteitä, jotka kuvaavat ympäristöä eri kohteiden, kuten maanpinnan, rakennusten ja kasvillisuuden osalta. Aineistosta voidaan tuottaa 3D-malleja, joissa voidaan luokitella näitä kohteita eri kohteisiin. Luokittelu voidaan toteuttaa manuaalisesti tai automaattisilla menetelmillä.

Insinööriyössä tutkitaan laserkeilausaineiston luokittelua käyttämällä Leica RTC360 -laserkeilainta sekä Leica REGISTER 360- ja Cyclone 3DR -ohjelmistoa. Tarkoituksena on testata Leica REGISTER 360:lla ja Cyclone 3DR:llä automaattista aineiston luokittelumenetelmää ja arvioida sen tulosten tarkkuutta niin sisä- että ulkotilassa. Työssä tutkitaan, miten ohjelmiston automaattinen luokittelumenetelmä toimii ja kuinka hyvin se pystyy erottamaan kohteet toisistaan. Lisäksi pohditaan, voisiko luokittelumenetelmää helpottaa jotenkin ja millaisia haasteita siitä löytyy.

Työn tavoitteena on saada parempi käsitys laserkeilausaineiston luokittelusta ja sen haasteista. Erityisesti pyritään selvittämään, kuinka hyvin Leica REGISTER 360:n automaattiset työkalut pystyvät helpottamaan luokittelua ja vertailemaan REGISTER 360:n ja Cyclone 3DR:n eroja automaattisessa luokittelussa.

Työn teoriaosuudessa käsitellään laserkeilauksen perusteita ja sen käyttöalueita, minkä jälkeen käsitellään aineiston käsittelyvaiheita ja analysointia. Tämän jälkeen perehdytään tarkemmin laserkeilausaineiston luokitteluun ja käsittelyyn Leica REGISTER 360- ja Cyclone 3DR -ohjelmistolla. Lopuksi esitellään käytännön mittauksia, joissa vertaillaan automaattisen luokittelun toimivuutta sisä- ja ulkotiloissa, analysoidaan tuloksia ja pohditaan johtopäätöksiä.

Opinnäytetyöraportin kieliasun muotoilussa ja tarkistamisessa on käytetty OpenAI:n ChatGPT:n versiota maaliskuuta 2025. Opinnäytetyön tekijä on vastuussa kaikesta opinnäytetyön sisällöstä ja muotoilusta.

## 2 Laserkeilauksen perusteet

### 2.1 Laserkeilaus

Laserkeilaus on yksinkertainen ja käytännöllinen mittausmenetelmä, jota hyödynnetään monella eri tavalla niin suunnittelussa kuin rakentamisessakin. Laserkeilauksessa käytetään lasersäteitä kohteiden kolmiulotteiseen skannaamiseen, ja tämä tekniikka mahdollistaa todella tarkkojen ja yksityiskohtaisten pistepilvi aineistojen tuottamisen. (1, s. 33.)

Laserkeilaimet lähettävät tuhansia tai jopa miljoonia laserpulsseja ympäristöönsä. Nämä pulssit heijastuvat ympäristöstä takaisin laserkeilaimeen, ja ohjelmisto laskee niiden kulkeman ajan ja vaaka- ja pystykulmien perusteella koordinaattipisteen jokaiselle heijastuspisteelle. Näistä yksittäisistä pisteistä koostuu iso yhtenäinen kokonaisuus, jota kutsutaan pistepilveksi, jonka avulla voidaan tehdä kohteesta esimerkiksi 3D-malli. Pistepilvi voidaan värjätä keilaimen ottamien valokuvien väriarvojen perusteella, jolloin se saa realistisemmän ulkoasun ja vastaa todellista ympäristöä. (2.)

Laserkeilausten tarkkuuteen vaikuttavat useat tekijät, kuten etäisyyden mittaus-tarkkuus ja kulmatarkkuus. Esimerkiksi tässä työssä käytettävässä Leica RTC360 -laserkeilaimessa määritetyn pisteen sijainti on 1,9 mm 10 metrin etäisyydelle skannattuna, mikä tarkoittaa, että jokainen yksittäinen skannattu piste voi sijaita  $\pm 1.9$  mm:n päässä todellisesta sijainnistaan. (3; 4.) Kuvassa 1 on työssä käytetty Leica RTC 360 -laserkeilain.



Kuva 1. Leica RTC360 -laserkeilain kolmijalanpäällä valmiina käyttöön.

Laserkeilauksen soveltamiskohteita ovat muun muassa rakennusten suunnittelu, arkkitehtuuri, tiedonhallinta ja dokumentointi, laadunvalvonta ja tarkkuusmittaukset. Esimerkiksi rakennusprojekteissa laserkeilausta käytetään dokumentoimaan eri rakennusvaiheita ja keräämään tietoa rakennusprosessin eri vaiheista, mikä auttaa projektinhallinnassa.

## 2.2 Historia ja kehitys

Ensimmäiset laserkeilauslaitteet oli kehitetty sotilaalliseen käyttöön, joten niiden tarkkaa valmistus vuotta ei voida todeta, mutta 1980-1990-luvun taitteessa laserkeilausteknologiaa oli jo käytössä. Ruotsalaiset, joita voidaan nähdä laserkeilausteknologian edelläkävijöinä, käyttivät tuolloin laserkeilausteknologiaa sukellusveneiden etsimiseen. (1, s. 33.)

Ensimmäiset kaupalliset laserkeilaimet olivat ilmalaserkeilaimia ja pian näiden jälkeen markkinoille tulivat maastolaserkeilaimet, joita siirretään kolmijalkojen päällä. 2005 vuoden aikoihin tulivat liikkuvat laserkeilaimet, minkä jälkeen laitteiston kehitys on ollut todella nopeaa. Laserkeilainten hinnat ovat tulleet alas päin, ja niiden ominaisuudet ovat parantuneet sekä koko pienentynyt. Uskotaan, että laserkeilausteknologia tulee kehittymään todella paljon, sillä nykyään niitä käytetään jopa autoissa pääsensorina. (1, s. 33-34.)

## 2.3 Perusperiaate

Laserkeilaus tunnetaan myös toisella nimellä LIDAR (Light detection and ranging), on etäisyydenmittaamiseen perustuva mittausteknologiaa, jossa hyödynnetään laserpulssien heijastumista kohteesta takaisin laserkeilaimeen. Tämän menetelmän avulla voidaan luoda tarkkoja kolmiulotteisia malleja ympäristöstä, rakennuksista ja sisätiloista. (6.)

Laserkeilauksen perusperiaate on seuraavanlainen, keilain lähettää lyhyitä laserpulsseja kohti mitattavaa kohdetta, ja kun pulssi osuu kohteeseen osa siitä, heijastuu takaisin keilaimeen. Tässä yhteydessä keilain mittaa ajan, joka kuluu pulssin lähettämisen ja sen takaisin vastaanottamisen välillä, koska valonnopeus on vakio. Tämän perusteella keilain laskee tarkan etäisyyden kohteeseen. Laserkeilain toistaa tämän prosessin tuhansia kertoja eri suuntiin, niin muodostuu yhtenäinen pistepilvi, joka tallentaa sen hetkisen ympäristön tilanteen pistepilveen. Pistepilvessä jokaisella pisteellä on x-, y-, ja z-koordinaatit. (6.)

## 2.4 Edut ja haasteet

Laserkeilauksen keskeisiä etuja ovat sen tehokkuus, tarkkuus ja monipuolisuus. Keilaamalla voidaan saavuttaa millimetrien tarkkuus tehokkaasti pienellä työmäärällä. Tämä tekee laserkeilaimista erinomaisen mittausvälineen, sillä keilaamalla voidaan nopeasti kartoittaa laajoja alueita, kuten tehdashalleja, mikä säästää paljon resursseja. (6.)

Haasteina laserkeilaamiselle ovat sääolosuhteet, laserkeilain ei pysty kunnolla keilaamaan kovassa sateessa, koska säteet osuvat vesipisaroihin, mikä tuottaa haittaa pistepilvelle. Laserkeilainpulssit eivät myöskään heijastu kunnolla lumesta, mikä aiheuttaa sen, että laserkeilaamista ei voida toteuttaa kunnolla talvisin ulkona. (1, s. 35; 6.)

## 2.5 Mittausmenetelmät

Laserkeilausmenetelmiä löytyy useampia. Tässä työssä käytetään maalaserkeilausta, joka on yleinen laserkeilausmenetelmä rakennuslalla ja suunnittelussa. Maalaserkeilauksessa laserkeilain asetetaan kolmijalan päälle, ja sillä skannataan ympäröivää aluetta. Tätä tapaa käytetään muun muassa tehtaiden putkilinjojen suunnitteluun ja moneen muuhun tarkoitukseen. (1, s. 33.)

Ilmalaserkeilaus on yksi keilausmenetelmistä, ja toteutetaan ilmasta käsin esimerkiksi lentokoneella, helikopterilla tai dronella. Tässä menetelmässä laserkeilain asennetaan ilma-alukseen, joka lentää mitattavan alueen yli. Suomessa on käytössä Maanmittauslaitoksen Kansallinen laserkeilausohjelma, jossa Suomi on jaettu alueisiin, jotka keilataan ilmalaserkeilauksella kuuden vuoden sykleissä. Tässä Kansallisessa laserkeilausohjelmassa tuotetun datan pistetiheys on ollut viisi pistettä neliömetrillä. (7.)

Mobiililaserkeilaus suoritetaan maanpinnalla, mutta keilain sijoitetaan liikkuvaan alustaan, kuten esimerkiksi auton katolle. Ajoneuvo kulkee mitattavan alueen läpi keräten dataa ympäriltä. Tätä menetelmää käytetään erityisesti katujen ja kaupunkialueiden kartoituksessa. Mobiililaserkeilauksen etuna on sen tehokkuus kerätä tietoa nopeasti laajalta alueelta. (8.)

Kaikkia näitä laserkeilausmenetelmiä voidaan hyödyntää monipuolisesti eri projekteissa. Laserkeilausmenetelmien valinta riippuu projektin tarpeista, mittausalueen laajuudesta, ja tarvittavasta tarkkuudesta. Ilmalaserkeilaus soveltuu laajojen alueiden nopeaan kartoitukseen. Maalaserkeilaus tarjoaa erittäin tarkkaa tietoa pienemmiltä alueilta mutta vaatii hieman enemmän työtä. Mobiililaserkeilaus puolestaan yhdistää liikkuvuuden ja paremman tarkkuuden ilmalaserkeilaukseen verrattuna.

### 3 Laserkeilausaineisto

#### 3.1 Keruu

Laserkeilausaineiston tuottaminen alkaa keilattavan alueen keilaussuunnitelman tekemisellä, jonka tavoitteena on työn tehokkuuden optimointi sekä ennen kaikkea sen varmistaminen, että kaikki tarvittavat kohteet tulevat asianmukaisesti kuvatuiksi. Tässä kappaleessa käydään aineiston keruuta läpi Leica RTC360 -keilaimen avulla, jota käytetään myös tämän työn käytännön vaiheessa. Suunnitteluvaiheessa mietitään myös laserkeilaimen asetuksia, kuten pistetiheyttä, joka vaikuttaa keilauksen nopeuteen mutta myös tarkkuuteen. Leica RTC360 käyttää Time of flight (ToF) -teknologiaa, joka mahdollistaa kohteiden skannaamisen jopa kahden miljoonan pisteen sekuntinopeudella. Se pystyy tuottamaan värillisiä pistepilviä alle kahdessa minuutissa. Time of flight -teknologia mittaa valon kulkuajan avulla kohteen etäisyyttä. (4; 9.) Taulukossa 1 esitellään Leica RTC360 -laserkeilaimen ominaisuuksia.

Taulukko 1. Leica RTC360 -laserkeilaimen ominaisuuksia.

Skannaus nopeus:	Parhaimmillaan 2 000 000 pistettä sekunnissa
Tietojen hankinta:	alle 2 minuuttia täydelliseen 360 ° astetta
Alue:	Min. 0.5 – 130 metriä
Resoluutio:	Valittavissa (3/6/12 mm @10 m)
Tuplaskannaus:	On

Mittauksen alkuvaiheessa luodaan projekti Cyclone Field 360 -sovelluksella, jota käytetään tabletilla. Tässä vaiheessa tabletin on oltava yhdistettynä laserkeilaimeen, jotta sen asetuksia voidaan määrittää. Asetuksista voidaan määrittää pistetiheys, kuvauksen käyttö sekä tuplaskannauksen aktivointi. Tuplaskannaus poistaa automaattisesti keilauksesta liikkuvia kohteita, kuten käveleviä ihmisiä. Mittausvaiheessa Cyclone Field 360 -sovelluksella voidaan tarkastella keilausaineistoa ja yhdistää eri keilainasemat toisiinsa pikalinkityksellä. (9.) Kuvassa 2 näkyy Field 360 -sovellus keilausvaiheessa.



Kuva 1. Field 360 -sovellus tabletilla, jossa näkyy useampi keilausasema piste-pilvikartalla.

Kun mittaukset on suoritettu, keilausaineisto siirretään käsiteltäväksi tietokoneelle muistitikun avulla. Tässä työssä aineiston käsittelyyn käytetään Cyclone REGISTER 360 plus -ohjelmistoa. Kun aineisto on saatu tuotua REGISTER 360 -ohjelmistoon, voidaan suorittaa pistepilven suodatus uudelleen ja poistaa mahdolliset virheelliset havainnot, joita ei ole poistettu automaattisesti. REGISTER 360 -sovelluksen avulla keilainasemat voidaan optimoida keskenään ja tarkastella niistä muodostuvia virhearvoja. (9; 10; 11.)

### 3.2 Käsittely

Laserkeilausaineisto sisältää usein kohinaa, joka voi johtua esimerkiksi ympäristössä olevista häiriötekijöistä, kuten mittausvirheistä tai liikkuvista kohteista. Kohinan poistaminen ja suodatus ovat olennaisia vaiheita pistepilven käsittelyssä, sillä ne parantavat aineiston laatua ja helpottavat jatkokäsittelyä. Cyclone REGISTER 360 plus -ohjelmassa on automaattinen kohinanpoisto, joka poistaa yleisimmät virheelliset pisteet jo rekisteröitäessä aineistoa. Kohinaa voidaan vähentää käyttämällä laserkeilauksessa tuplaskannausta, joka poistaa automaattisesti liikkuvien kohteiden aiheuttamaa kohinaa. (11; 13, s. 10.)

Vaikka automaattinen suodatusmenetelmä poistaa usein suurimman osan kohinasta, manuaalinen kohinanpoisto on monesti edelleen tarpeen. Cyclone REGISTER 360 Plus tarjoaa tähän useita työkaluja, kuten rajaussuodattimen, jonka avulla voidaan rajata analysoitava alue ja poistaa tarpeettomat pisteet. Huolellisesti suodatettu aineisto parantaa pistepilven laatua, mikä helpottaa sen hyödyntämistä jatkokäsittelyssä, kuten georeferoinnissa, luokittelussa ja mallinnuksessa. Aineisto voidaan tarvittaessa tähysten tai GPS-mittauksen avulla georeferoida koordinaatistoon. Tämän jälkeen voidaan suorittaa pistepilven luokittelua. (11; 13, s. 10.)

### 3.3 Pistepilven ominaisuudet

Pistepilvi on kolmiulotteinen aineisto, joka tuotetaan laserkeilaamalla. Se koostuu miljoonista yksittäisistä pisteistä, joilla jokaisella on tarkka koordinaatti. Pisteet sisältävät sijaintitietojensa lisäksi muita ominaisuuksia, kuten värin ja intensiteettiarvon. (14; 15; 16.) Kuvassa 3. Näkyy väritetty pistepilvi sisätilasta.



Kuva 2. Väritetty pistepilvi Metropolia Ammattikorkeakoulun kellaritilasta.

Pistepilvien keskeisiä ominaisuuksia ovat kolmiulotteisuus, väriarvot ja intensiteettiarvo. Kolmiulotteisuudessa jokaisella pisteellä on tarkka sijainti kolmiulotteisesti, mikä mahdollistaa kohteen tarkan mallinnuksen. Pisteet voivat sisältää väriarvoja, jotka saadaan laserkeilaimen kamerajärjestelmän avulla. Tämä mahdollistaa pistepilven RGB värittämisen, joka helpottaa pistepilven tulkitsemista. Intensiteettiarvo taas kertoo laserpulssin palaavan signaalin voimakkuudesta, joka kertoo kohteen pinnan ominaisuuksista, kuten materiaalista tai pinnan karheudesta. (14; 15; 16.)

## 4 Laserkeilausaineiston luokittelu

Laserkeilausaineistoa voidaan luokitella sekä manuaalisesti että automaattisesti. Molemmat luokittelutavat onnistuvat Leica REGISTER 360 -sovelluksella, jossa on omat valmiit luokittelutaulukot sekä sisä- että ulkotilojen luokitteluun. Tämän työn käytännön osuudessa testataan Register 360- ja Cyclone 3DR -sovelluksien automaattisen luokittelun toimivuutta. (17.)

Aineiston automaattinen luokittelu perustuu pistepilven lasersäteiden ominaisuuksiin sekä sääntöpohjaiseen luokitteluun. Sovellus analysoi kunkin pisteen ominaisuuksia, kuten korkeutta, intensiteettiä ja heijastuvuutta, ja käyttää näitä tietoja määrittääkseen, mihin luokkaan kukin piste kuuluu. Intensiteettiarvo on tärkeä automaattisessa luokittelussa, sillä se kertoo paljon pisteen ominaisuuksista ja näin ollen kohteesta. REGISTER 360 -sovellus tarjoaa valmiit luokitteluryhmät sekä ulko-, että sisätiloille, joiden avulla se luokittelee pistepilven eri luokkiin, kuten seinät, putket, maa ja nurmikko. (17; 18; 19, s.32-39.)

Automaattisen luokittelun etuna on sen nopeus ja tehokkuus, minkä lisäksi se vähentää manuaalisen työn tarvetta ja minimoi inhimillisten virheiden riskiä. Leica REGISTER 360 -sovelluksen automaattinen luokittelu vaatii paljon las- kentatehoa, eikä siksi toimi kunnolla heikkotehoisilla tietokoneilla. Cyclone 3DR:n automaattinen luokittelu ei vaadi koneelta niin suuria tehoja kuin REGISTER 360. Automaattinen luokittelu ei ole täysin virheetöntä, minkä vuoksi tulokset on tarkistettava manuaalisesti ja tarvittaessa mahdollisesti tehtävä korjauksia.

## 5 Käytännön sovellus ja testaus

### 5.1 Aineisto ja ohjelmistot

Opinnäytetyössä käytetty aineisto tuotettiin itse Leica RTC360 -laserkeilaimella, jota ohjattiin tabletilla käyttäen Leica Cyclone FIELD 360 -sovellusta. Keilaukset suoritettiin sekä sisä- että ulkotiloissa, jotta pystyttiin testaamaan automaattisen luokittelun toimivuutta erilaisissa ympäristöissä ja kohteissa.

Sisätilakeilaus toteutettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun Myllypuron kampuksen kellaritiloissa luokassa MPAK020, jossa tehtiin kahdeksan koeaseman keilaus. Sisätilakeilauksessa ei käytetty tuplaskannausta, ja laitteen resoluutio asetettiin pienimpään arvoon 12 mm/10 m, sillä keilattava tila oli melko pieni. Ulkokeilaus puolestaan suoritettiin Myllypurossa liikuntakeskus Liikuntamylyn kullamalla, jossa keilattiin kymmenen koeaseman alue. Ulkokeilauksessa käytettiin keskitasoista resoluutiota 6 mm/10 m tarkkuuden parantamiseksi sekä tuplaskannausta liikkuvien ihmisten vaikutuksen minimoimiseksi. Molemmat paikat valikoituivat niiden monipuolisten rakenteiden ja materiaalien vuoksi. Ulkokeilauksen alueella oli muun muassa portaita, roskasäiliöitä, nurmikkoja, kalliota, asfalttia ja tikapuita, mikä mahdollisti luokittelun tarkkuuden arvioinnin erityyppisillä pinnoilla ja rakenteilla.

Pistepilviaineistot käsiteltiin Dellin valmistamalla tietokoneella Leica REGISTER 360 plus (versio 2024.0.2) ja Cyclone 3DR (versio 2025.0) -ohjelmistoilla. Ohjelmistolla suoritettiin aineiston rekisteröinti, esikäsittely, automaattinen luokittelu, sekä luokittelun tarkkuuden arviointi. Erityistä huomiota kiinnitettiin ohjelmiston kykyyn erottaa eri kohdeluokat, kuten maanpinta, rakenteet ja kasvillisuus. Lisäksi tarkasteltiin, miten sisä- ja ulkotilojen erilaiset materiaalit vaikuttivat luokittelun tarkkuuteen.

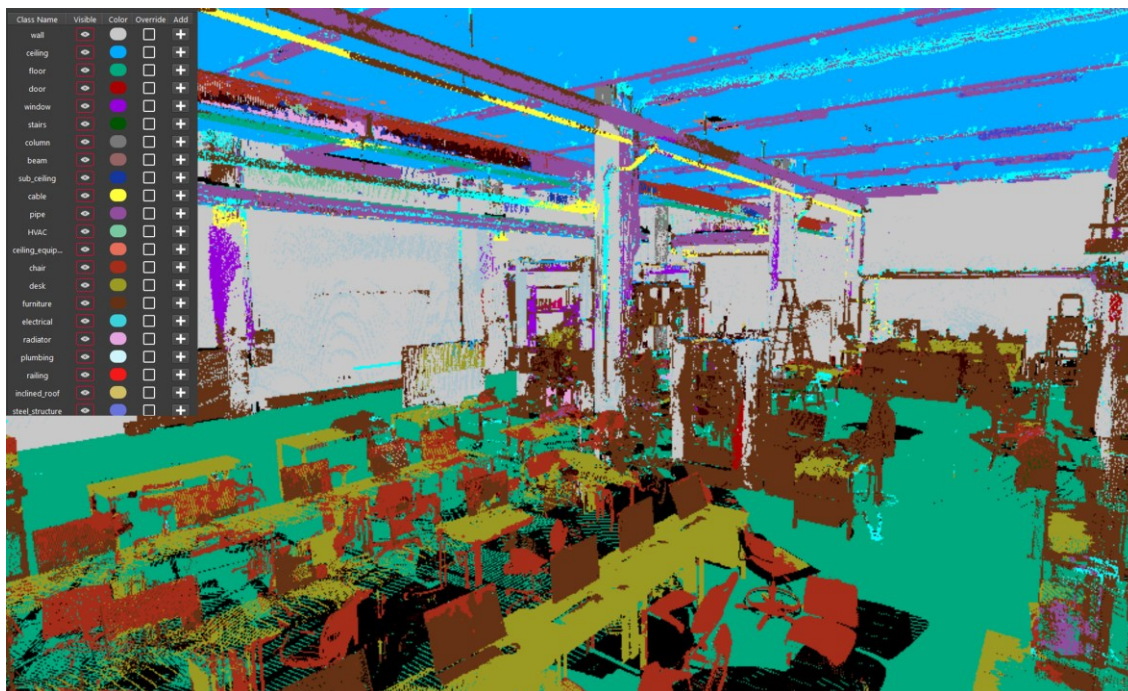
Datan käsittelyyn käytetty tietokone oli varustettu Intel Core i5-8400H -prosessorilla ja 32 gigatavun keskusmuistilla, jonka nopeus oli 2667 MHz. Tallennustilana toimi yhden teratavun NVMe SSD-levy, joka mahdollisti nopean tiedonsiirron suuria pistepilviaineistoja käsiteltäessä. Näytönohjaimina käytössä olivat sekä integroituna Intel UHD Graphics 630 että erillisenä Nvidia Quadro P2000, joka paransi visuaalista analyysia ja graafista suorituskykyä. Tietokone ei kuitenkaan täyttänyt Leican suosituksia näytönohjaimen osalta, sillä ohjelmisto vaati vähintään NVIDIA Ampere-, Volta- tai Turing-arkkitehtuuriin perustuvan näytönohjaimen, kuten minkä tahansa RTX-mallin tai Geforce GTX 1650 tai paremman. Lisäksi näytönohjaimen täytyisi sisältää vähintään 4 GB videomuistia sekä sen laskentatehon täytyisi olla 7.0 tai parempi. Tästä syystä pistepilvien automaattinen luokittelu oli hidasta työssä käytetyllä tietokoneella. (17.)

## 5.2 Leica REGISTER 360 plus

### 5.2.1 Sisätila

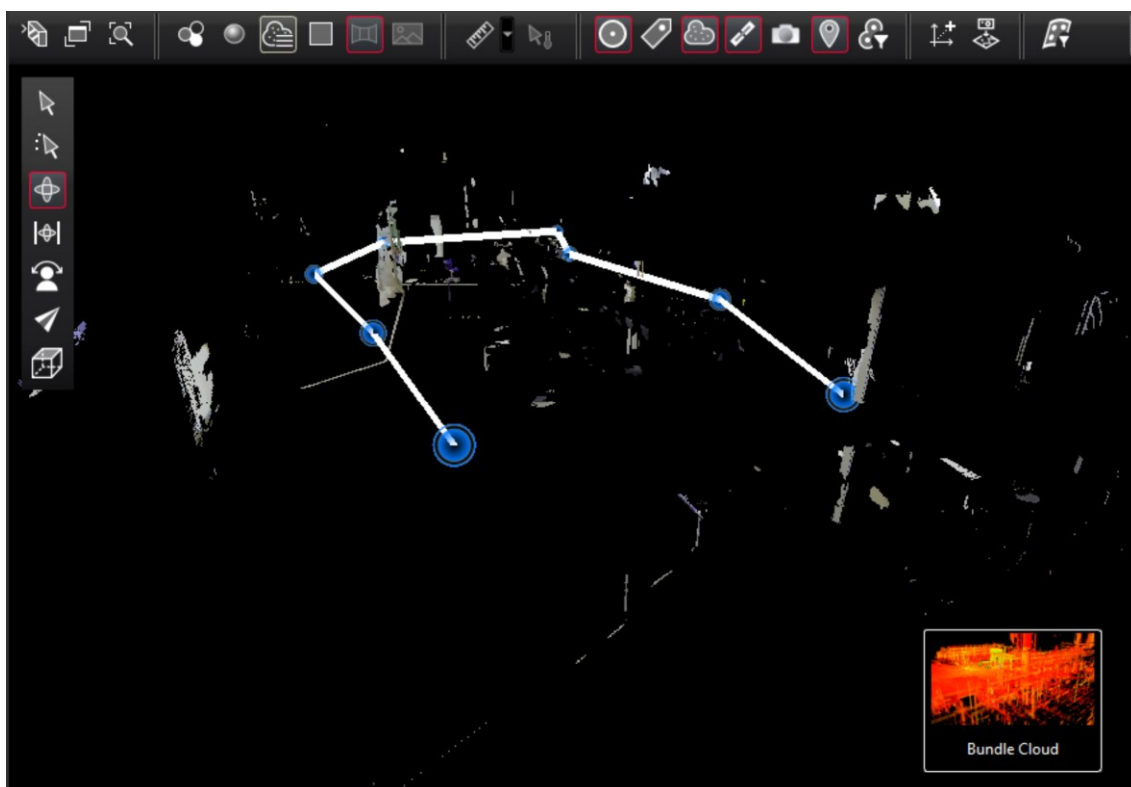
Sisätilan laserkeilauksesta saatu pistepilvi käsiteltiin Leica Register 360 plus -ohjelmistolla, jossa eri rakenteet pyrittiin luokittelemaan erillisiin kohderyhmiin. Sisätilan pistepilvi koostui noin 78 miljoonasta pisteestä. Luokittelun onnistumista arvioitiin vertailemalla luokiteltua aineistoa alkuperäiseen luokittelemattomaan pistepilveen sekä analysoimalla, kuinka hyvin luokittelu on onnistunut yksittäisissä kohteissa, kuten pöydissä, huonekaluissa, seinissä ja putkissa.

Kuvassa 4 on esitetty, kuinka automaattinen luokittelu on erottanut eri rakenteet värikoodauksen avulla. Vertailemalla tätä luokittelemattomaan aineistoon voidaan arvioida luokittelun tarkkuutta ja havaita mahdollisia virheitä luokittelussa. Kuvasta voidaan havaita luokittelun onnistuneen kohtuullisesti, vaikkakin osa kohteista on hieman sulautunut toisiin.



Kuva 3. Pistepilvi luokiteltuna ja värikoodattuna.

Luokitellussa kuvassa materiaalit ja rakenteet on esitetty erivärisinä, mikä helpottaa rakenteiden analysointia ja tukee aineiston jatkokäsittelyä. REGISTER 360 -sovelluksen automaattinen luokittelu käsitteli lähes kaikki pisteet pistepilvestä. Kuvassa 5 on esitetty pisteet, joita automaattinen luokittelu ei tunnistanut. Kuvasta on havaittavissa kohinaa, joita järjestelmä ei osannut sijoittaa mihinkään määriteltyyn luokkaan. Pistepilven luokittelussa pystytään myös muuttamaan kohteen luokkaa, jos automaattinen luokittelu luokittelee kohteen väärin.

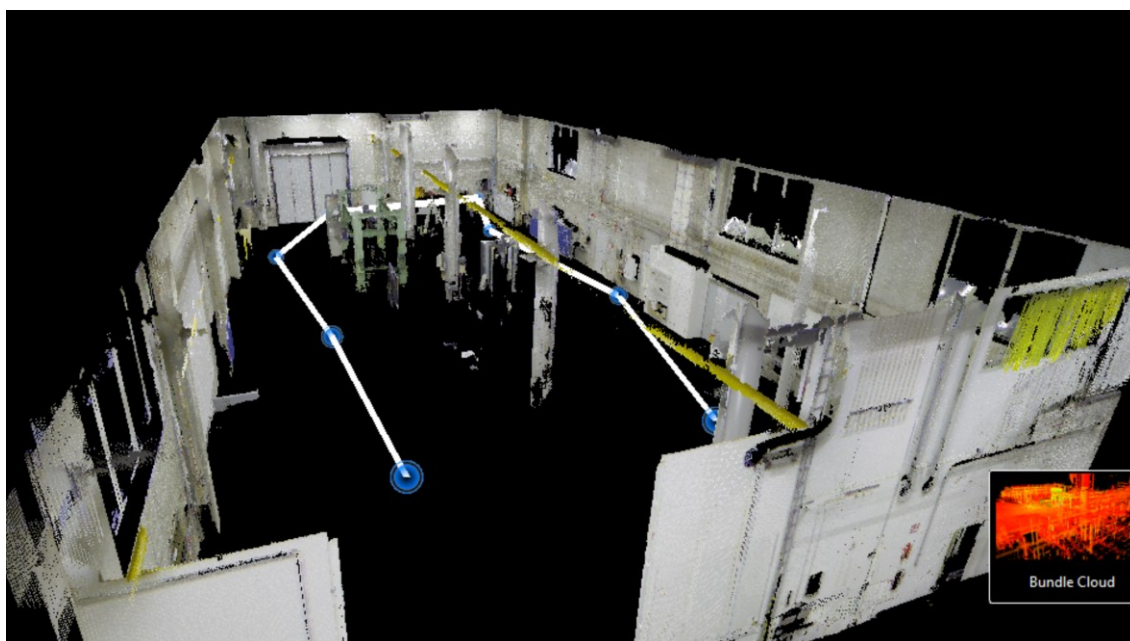


Kuva 4. Luokittelemattomat pisteet pistepilvessä.

Työssä keilatussa sisätilassa sijaitti paljon pöytiä ja huonekaluja, jotka automaattinen luokittelu pyrki erottamaan toisistaan. Kuvassa 4 pöydät on luokiteltu keltaisella, penkit oranssilla ja muut huonekalut ruskealla. Automaattinen luokittelu on kuitenkin luokitellut myös tietokoneiden näytöt huonekaluiksi. Tällaisessa tilassa kohteiden onnistunut erottelu on tärkeää, sillä se helpottaa mallin jatkokäsittelyä. Esimerkiksi pöydät ja huonekalut voidaan piilottaa yhdellä komennolla, jolloin voidaan keskittyä vaikkapa putkien mallintamiseen.

Suurin osa pöydistä on luokiteltu oikein, mutta joissakin kohdissa ne sulautuvat muihin kalusteisiin. Tämä voi johtua pistepilven tiheydestä tai skannauksen kulmasta, jotka vaikuttavat kohteiden ääriviivojen erottuvuuteen. Sama ilmiö havaitaan myös huonekaluissa ja penkeissä: ne ovat pääosin hyvin luokiteltuja, mutta joidenkin yksityiskohtien kohdalla rajat hämärtyvät.

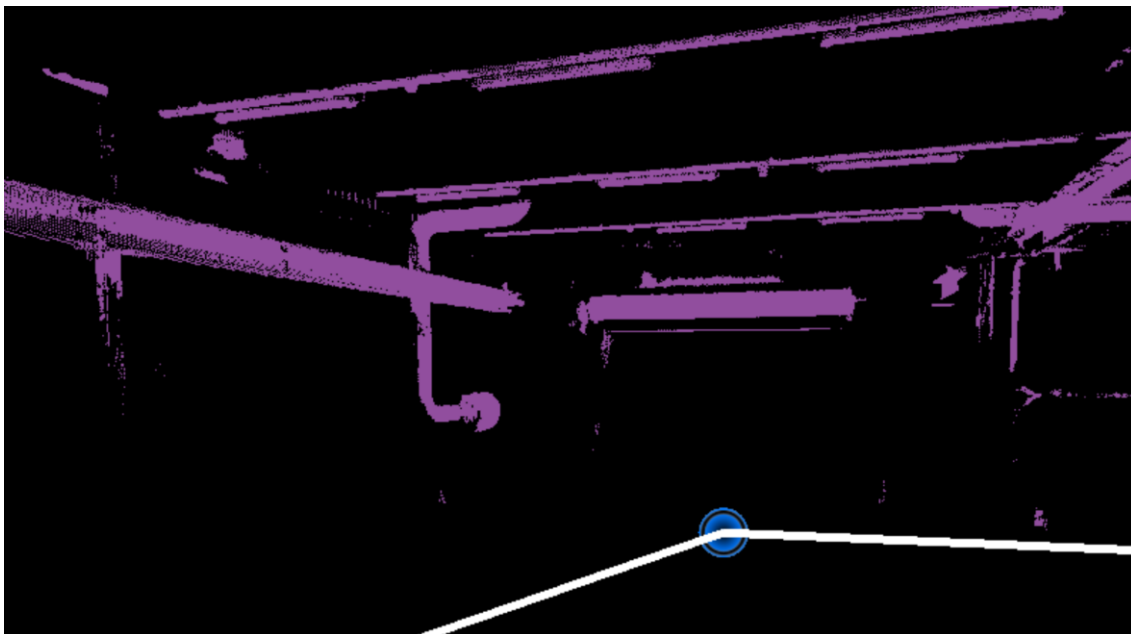
Seinien tarkka tunnistaminen on olennaista, sillä ne muodostavat mallin rungon. Kuvassa 6 näkyy seinien luokittelun lopputulos. Luokittelu vaikuttaa onnistuneelta, ja seinät erottuvat selkeästi muista rakenteista. Tämä parantaa tilan hahmottamista ja tukee esimerkiksi pohjapiirrosten luomista. Kuvasta 6 kuitenkin huomataan, että automaattinen luokittelu on luokitellut tilan keskellä olevat pilarit myös seiniksi, joten näiden osalta luokittelu vaatisi manuaalista korjaamista. Automaattinen luokittelu tunnisti katon ja lattian pistepilvestä ilman havaittuja ongelmia.



Kuva 5. Seinät automaattisesti luokiteltuna.

Ilmanvaihtoputket ja muut tekniset järjestelmät ovat keskeinen osa sisätilojen mallinnusta. Niiden erottaminen muista rakenteista voi kuitenkin olla haastavaa, erityisesti silloin, kun ne sijaitsevat katossa muiden elementtien joukossa. Joissakin keilattavissa kohteissa putkia voi olla erittäin runsaasti, mikä tekee manuaalisesta luokittelusta työlää ja aikaa vievää prosessia. Tällaisissa tapauksissa automaattinen luokittelu voi vähentää manuaalisen työn tarvetta.

Kuvasta 7 voidaan havaita työssä keilatussa sisätilassa putkien luokittelu on onnistuneen. Putket on tunnistettu pistepilvestä, mutta joissakin kohdissa niiden päät sulautuvat muihin rakenteisiin, mikä vaatisi manuaalista korjausta. Siitä huolimatta automaattinen luokittelu helpottaa putkien mallintamista, vaikka joitakin yksityiskohtia joudutaan viimeistelemään käsin.

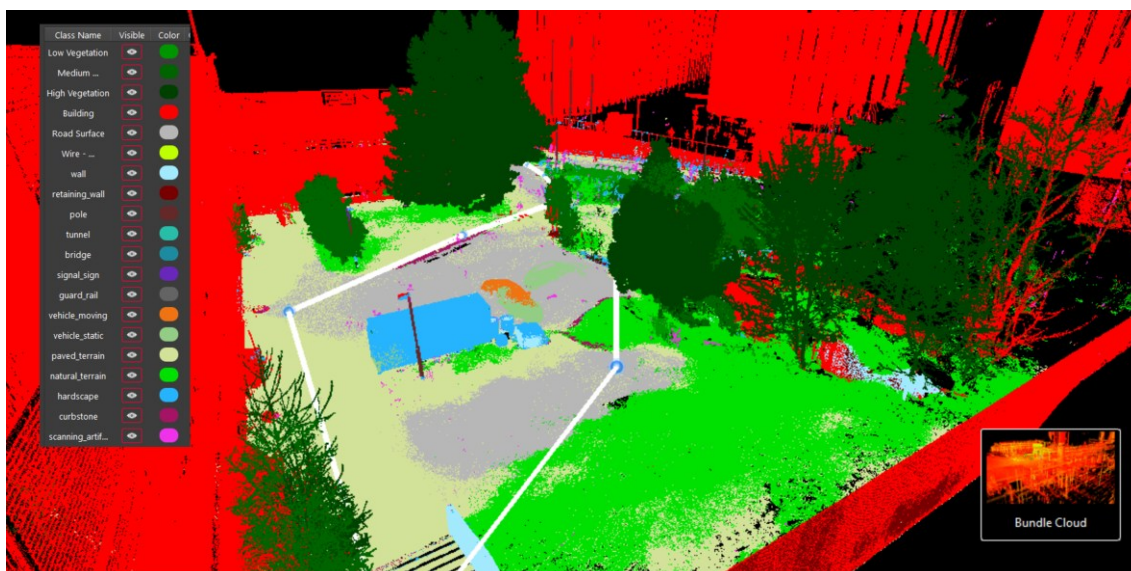


Kuva 6. Putket automaattisesti luokiteltuna pistepilvestä.

Sisätilan automaattinen luokittelu REGISTER 360 -sovelluksella on pääosin onnistunut, ja eri rakenteet on tunnistettu melko tarkasti. Täydellinen lopputulos vaatisi kuitenkin vielä jonkin verran manuaalista hienosäätöä.

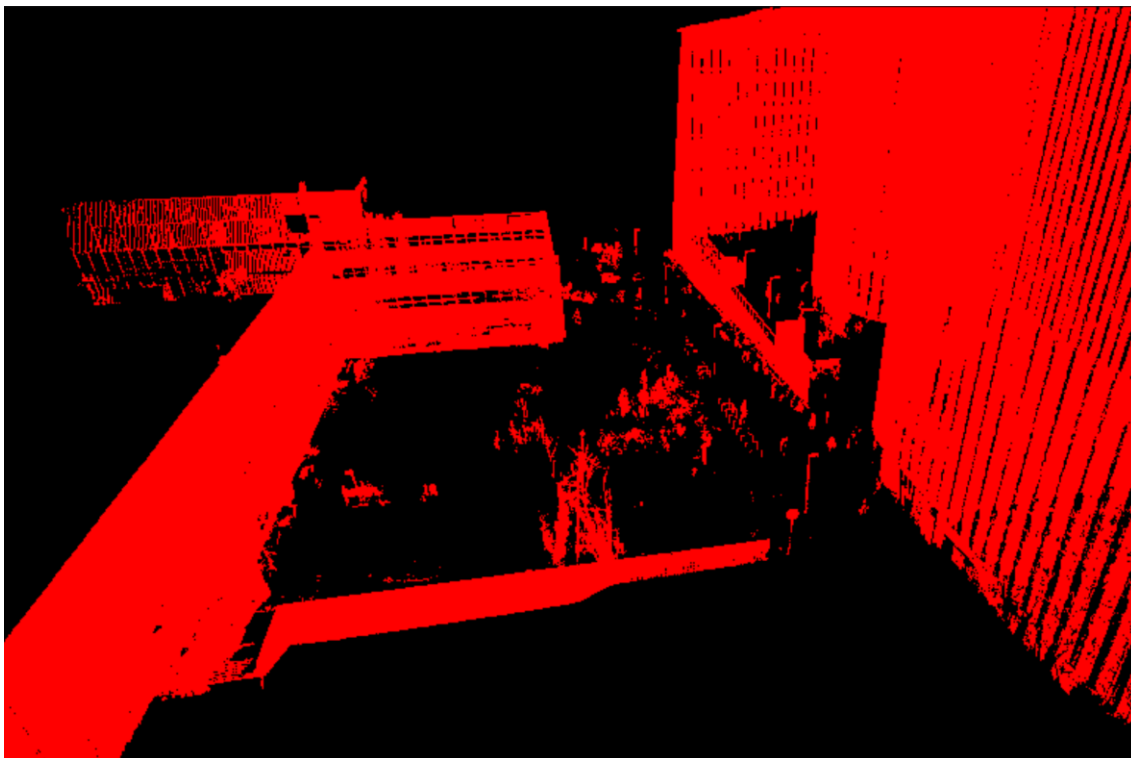
## 5.2.2 Ulkotila

Ulkotilan laserkeilaus tuotti yhteensä noin 226 miljoonaa pistettä, jotka käsiteltiin samalla tavalla kuin sisätilassa. Tässä tapauksessa käytettiin kuitenkin automaattista ulkotilan luokittelua. Laserkeilaimen asetuksina käytettiin keskimäistä resoluutiota (6 mm/10 m), ja käytettiin tuplaskannausta kohinan estämiseksi. Kokonaisuudessaan luokittelu onnistui hyvin, vaikka tietokoneen rajoitukset hidastivat prosessia, kuten sisätilan luokittelussakin. Automaattinen luokittelu kesti noin kahdeksan tuntia. Kuvassa 8 on esitetty koko luokiteltu ulkotila, jossa eri luokat on eroteltu väri koodauksen avulla.



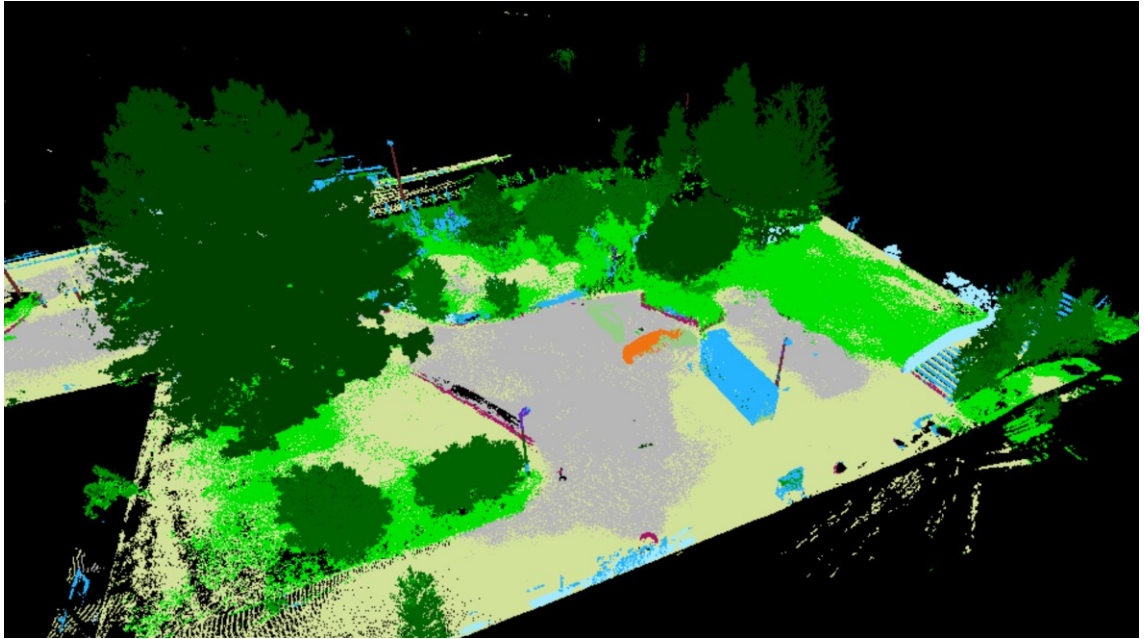
Kuva 7. Keilatun ulkotilan pistepilvi, joka on luokiteltu värikoodauksen avulla.

Ulkotilan luokittelussa rakennukset on tunnistettu onnistuneesti, ja niiden seinät erottuvat selkeästi. Aineistosta näkyvät talojen julkisivut ja rakenteet tarkasti, mutta alueen keskelle on jäänyt jonkin verran kohinaa, joka vaatisi manuaalista puhdistusta automaattisen luokittelun täydentämiseksi. Kuvassa 9 on esitetty vain luokitellut seinät punaisella.



Kuva 8. Rakennusten ulkoseinät pistepilvessä luokiteltuna.

Ulkotilan luokittelussa myös kasvillisuuden ja maaston erottelu on onnistunut. Automaattinen luokittelu on onnistunut tunnistamaan pistepilvestä eri kasvillisuuden tyypit tarkasti, ja esimerkiksi puut erottuvat selkeästi nurmikosta ja heinikosta. Kuvassa 10 näkyy luokiteltu kasvillisuus ja maaston piirteet.



Kuva 9. Kuvassa näkyy luokiteltua kasvillisuutta ja maaston piirteitä.

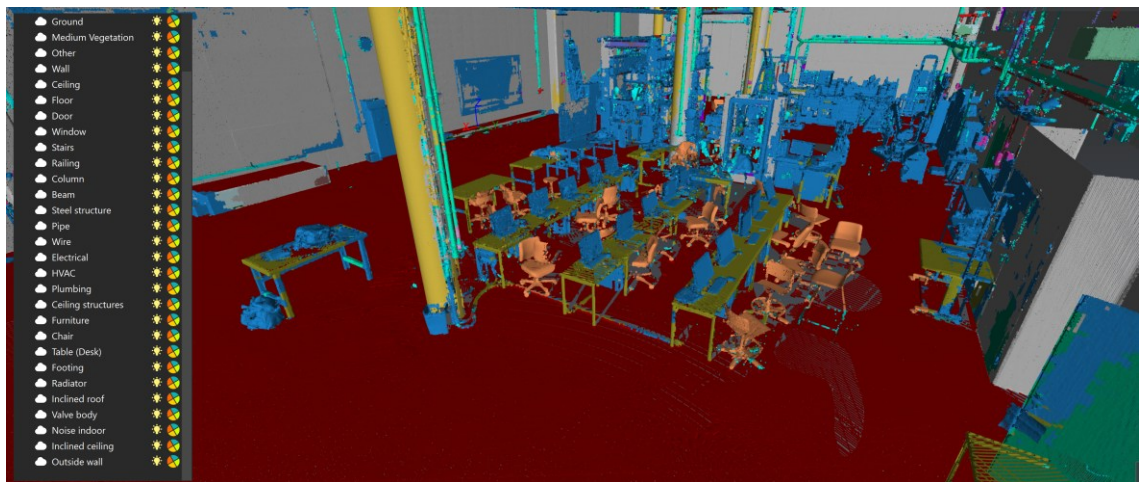
Voidaan todeta, että automaattinen luokittelu toimii ulkotiloissa havaintojen perusteella hyvin. Aineistosta onnistuttiin poimimaan muun muassa rakennukset, katulamput, reunakivet, kasvillisuus, puut sekä parkkeerattu auto. Merkittävänä huomiona kaikki pisteet saatiin luokiteltua, eikä aineistoon jäänyt luokittelemattomia pisteitä. Tämä osoittaa, että automaattinen luokittelu pystyy käsittelemään suuria pistepilvi aineistoja tehokkaasti. Vaikka joitakin pieniä manuaalisia korjauksia tarvitaan, automaattinen luokittelu säästää huomattavasti aikaa ja tehostaa pistepilven käsittelyä.

## 5.3 Cyclone 3DR

### 5.3.1 Sisätila

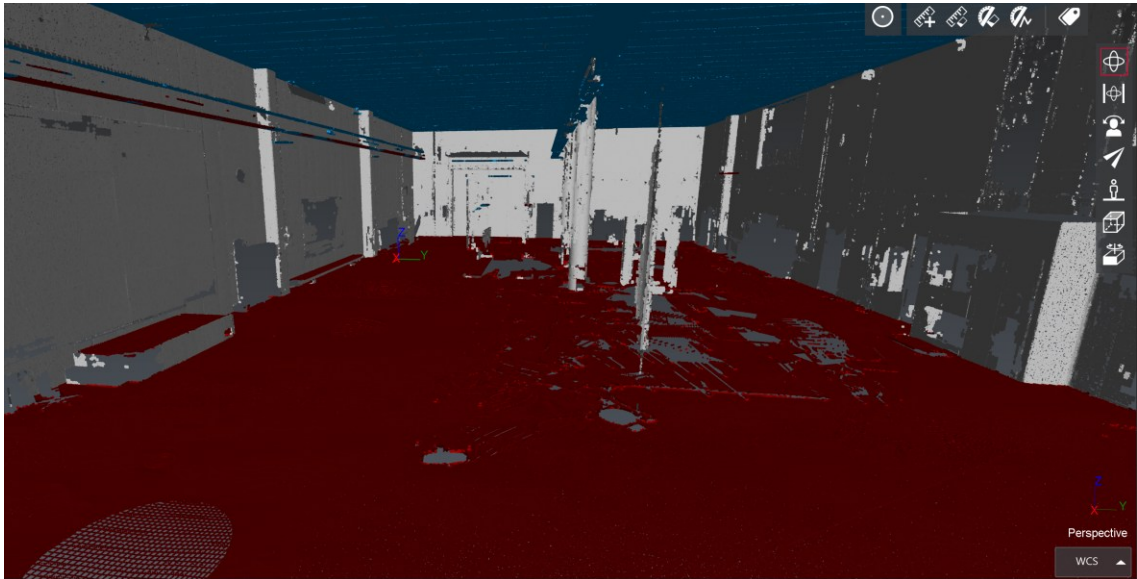
Cyclone 3DR -ohjelmiston automaattisen luokittelun suorituskykyä arvioitiin vertailemalla sen tarjoamia luokittelutuloksia kahden eri algoritmin avulla. Käytetyt algoritmit olivat Indoor- ja Construction-algoritmit, joista molemmat on suunniteltu sisätilojen luokitteluun. Näistä Construction-algoritmi on kuitenkin painottunut erityisesti työmaa- ja rakennusympäristöjen piirteiden tunnistamiseen. Vertailu tehtiin hyödyntämällä samaa laserkeilausaineistoa sisätilasta, jota käytettiin REGISTER 360 -ohjelmistollakin. Cyclone 3DR

Indooralgoritmia käytettäessä pistepilvi luokiteltiin perinteisiin sisätilaelementteihin. Molemmat sisätila luokittelut veivät aikaa noin 10 minuutin verran. Kuvassa 11 pistepilvi on luokiteltu kyseisellä algoritmilla, ja siitä nähdään, että huonekalut, pöydät, seinät ja lattiat ovat selkeästi omissa luokissaan. Cyclone 3DR -ohjelmisto on luokitellut pöydät ja huonekalut tarkasti, jolloin eri kohteet eivät su-laudu yhteen, vaan ovat erottuvat toisistaan hyvin.



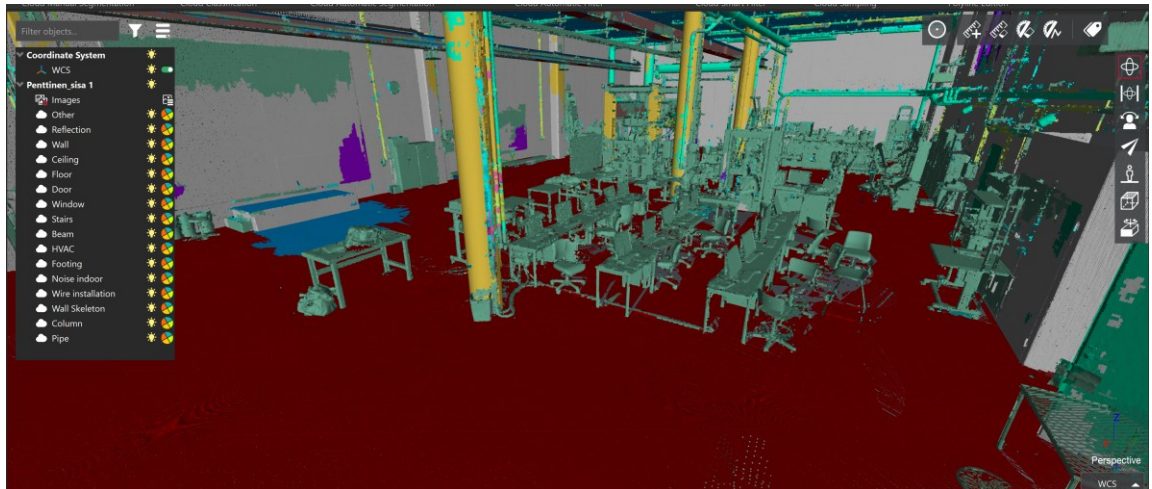
Kuva 10. Pistepilvi luokiteltuna Indooralgoritmilla.

Indoor-luokittelu tuotti selkeitä tuloksia suurten pintojen, kuten seinien, lattian ja katon osalta, kuten kuvasta 12 voidaan havaita. Kyseistä algoritmia käytettäessä tapahtui kuitenkin virhe huoneen keskellä olevan tukipilarin kohdalla, sillä se luokiteltiin virheellisesti seinäksi. Tämä edellyttäisi manuaalista korjausta. Construction-luokittelussa vastaavaa virhettä ei esiintynyt, vaan algoritmi luokitteli suuret pinnat tarkemmin ja onnistui tunnistamaan tukipilarit oikein.



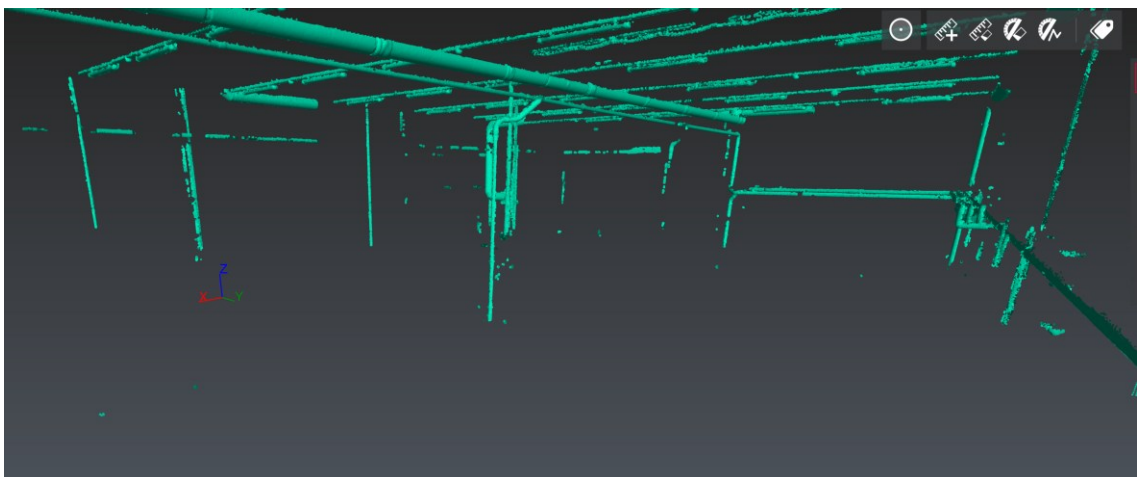
Kuva 11. Indoorluokittelulla luokiteltu seinät, lattia ja katto. Kuvassa on huoneen keskellä virheellistä luokittelua.

Kuvasta 13 voidaan havaita, että Constructionalgoritmi on onnistunut luokittelussa pitkälti samalla tavalla kuin Indooralgoritmi, mutta se ei ole erotellut huonekaluja erikseen. Huonekalut ja pienemmät esineet on luokiteltu yleisesti muihin kohteisiin. Constructionalgoritmi on kuitenkin onnistuneesti erotellut selkeät rakenteelliset elementit, kuten seinät ja lattiat.



Kuva 12. Tila luokiteltuna constructionsitealgoritmilla, jossa muut kohteet ovat vaaleansinisellä.

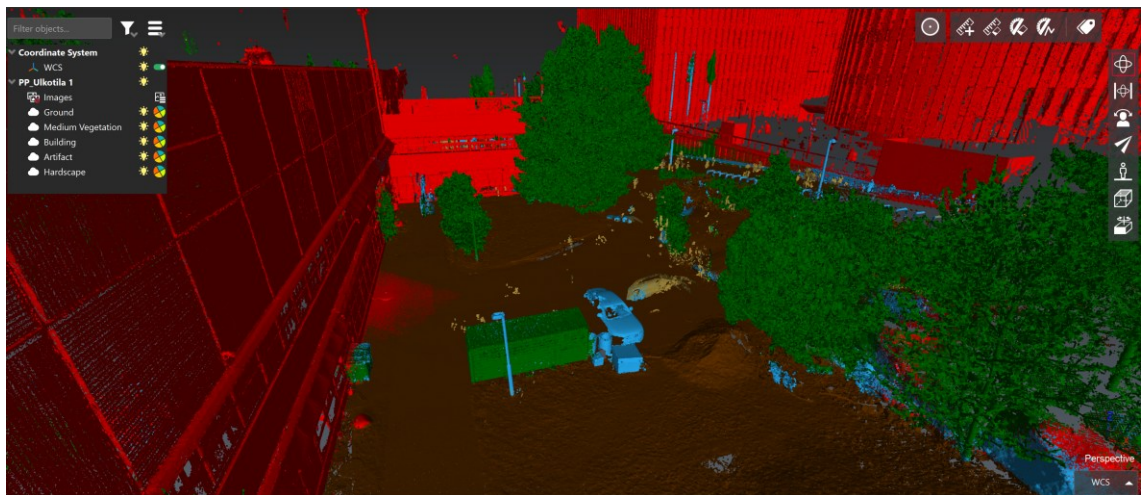
Kuvasta 14 voidaan todeta, että molemmat algoritmit tunnistivat katossa ja seinissä olevat putket. Tämä voi merkittävästi nopeuttaa rakennusalan työskentelyä, koska putkistojen sijainti ja rakenneosat voidaan hahmottaa nopeasti automaattisen luokittelun avulla. Vaikka tulokset vaativat edelleen manuaalista tarkistusta ja mahdollisesti pieniä korjauksia, Cyclone 3DR -ohjelmiston automaattista luokittelua voidaan käyttää sisätiloissa työskentelyn tukena.



Kuva 13. Indoor -luokittelulla tunnistetut putket.

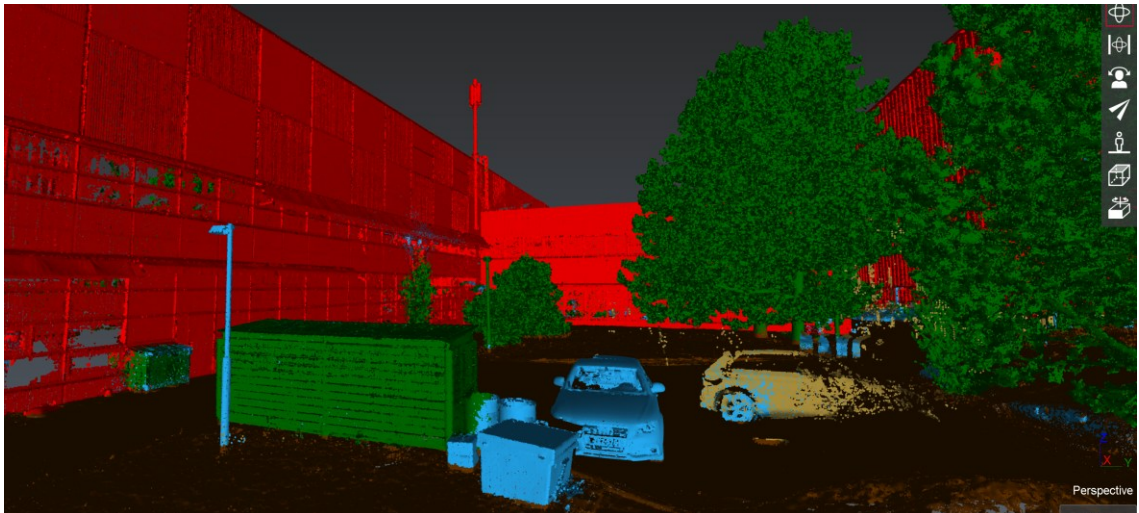
### 5.3.2 Ulkotila

Ulkotilan luokittelussa luokiteltiin samaa Leica RTC360 -laserkeilaimella tuotettua pistepilvi dataa, jota aikaisemmin käsiteltiin REGISTER 360 -ohjelmistolla. Ulkotilojen luokitteluprosessin suorittaminen Cyclone 3DR -ohjelmistolla kesti hieman alle tunnin, mikä osoittaa ohjelmiston tehokkuutta myös ulkokohteiden laajojen pistepilviaineistojen käsittelyssä. Yleisesti tarkasteltuna Cyclone 3DR -sovelluksella tehty ulkotilojen luokittelu tuotti toimivia tuloksia. Kuvassa 15 nähdään ulkotilan pistepilvi luokiteltuna eri ryhmiin.



Kuva 14. Ulkotila luokiteltuna Cyclone 3DR -sovelluksella.

Kuvasta nähdään selkeästi, että Cyclone 3DR tunnisti johdonmukaisesti eri elementit, kuten rakennukset, maanpinnat, kasvillisuuden ja erilaiset infrastruktuuri-elementit. Kuvassa on luokiteltu rakennukset punaisella värillä, jotka erottuvat selkeästi ympäröivästä kasvillisuudesta (vihreä väri) sekä maaston pinnasta (ruskea väri). Luokittelu onnistui jopa yksittäisten ajoneuvojen (sinisellä) sekä erilaisten pienten kohteiden, kuten valopylväiden, tunnistamisessa ja luokittelussa, nämä kohteet on luokiteltu kiinteisiin elementteihin. Luokittelun onnistumisen ansiosta sitä on mahdollista hyödyntää esimerkiksi erilaisten kohteiden tunnistamisessa tai alueiden suunnittelussa. Kuvassa 16 kiinnitetään huomiota luokittelussa tapahtuneeseen virheeseen.



Kuva 15. Cyclone 3DR virheellisesti luokiteltu roskakatos.

Kuvasta 16 voidaan havaita, automaattinen luokittelu ei tässäkään tapauksessa ole täysin virheetön. Kuvassa vihreällä näkyvä roskakatos on virheellisesti luokiteltu kasvillisuudeksi, vaikka sen kuuluisi olla luokiteltuna kiinteisiin elementteihin. Tämä johtuu todennäköisesti roskakatoksen pintarakenteesta, jonka muoto ja rakenne pistepilviaineistossa ovat muistuttaneet kasvillisuudelle tyypillisiä piirteitä. Tällainen yksittäinen virhe on kuitenkin helposti korjattavissa manuaalisesti siirtämällä kohde oikeaan luokkaan. Analyysin perusteella Cyclone 3DR-sovelluksen automaattinen luokittelu toimi myös ulkotilan luokittelussa.

## 6 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tavoitteena oli tutkia laserkeilausaineiston automaattisen luokittelun toimintaa Leica RTC360 -laserkeilaimella ja Leica REGISTER 360 -ohjelmistolla eri ympäristöissä. Tavoitteena oli arvioida, kuinka hyvin automaattinen luokittelu toimii sisä- ja ulkotiloissa, sekä tutkia luokittelun tarkkuutta ja luotettavuutta.

Työ jakautui teoriaosuuteen ja käytännön testaukseen. Teoriaosuudessa perehdyttiin laserkeilauksen perusperiaatteisiin, mittausmenetelmiin sekä aineiston käsittelyvaiheisiin. Käytännön osuudessa aineisto tuotettiin Leica RTC360 -keilaimella ja käsiteltiin Leica Cyclone REGISTER 360 plus -ohjelmistolla sekä Cyclone 3DR -sovelluksella. Kerätty pistepilvi käsiteltiin ja luokiteltiin molempien ohjelmistojen automaattisilla luokitteluilla ja tuloksia analysoitiin vertailemalla luokiteltuja kohteita todellisiin rakenteisiin.

Havaittiin, että automaattinen luokittelu onnistui yleisesti ottaen hyvin, mutta tulosten laatu vaihteli huomattavasti eri ympäristöissä. Sisätilojen luokittelussa ohjelmisto tunnisti hyvin seinät ja perusrakenteet, mutta haasteita ilmeni erityisesti esineiden, kuten tietokoneiden näyttöjen ja huonekalujen erottelussa toisistaan. Ulkotiloissa rakennukset ja kasvillisuus tunnistettiin suhteellisen hyvin, mutta aineistossa esiintyi myös ylimääräistä kohinaa, joka hankaloitti selkeiden rakenteiden tunnistamista.

Vaikka automaattinen luokittelu toimi sekä sisä- että ulkotiloissa yllättävän hyvin, prosessissa ilmeni myös haasteita, jotka vaikuttivat lopputuloksen tarkkuuteen ja tehokkuuteen. Tarkempaan luokittelutulokseen olisi todennäköisesti päästy käyttämällä laserkeilaimen korkeinta resoluutiota. Tätä resoluutiota ei kuitenkaan käytetty, koska käytössä ollut tietokone ei täyttänyt ohjelmiston näytönohjaimelle asettamia vaatimuksia, mikä hidasti merkittävästi aineiston käsittelyä. Tehokkaampi laitteisto olisi varmasti lyhentänyt käsittelyaikaa ja parantanut työskentelyn sujuvuutta.

Toinen havaittu haaste liittyi kohinan ja virheellisten pisteiden tunnistamiseen. Rakennusten luokittelussa aineistoon jäi jonkin verran pisteitä, jotka eivät kuuluneet mihinkään selkeään rakenteeseen. Tämä johtui usein keilaimen heijastusvirheistä, liikkuvista kohteista tai ympäristön vaihteluista. Lisäksi kasvillisuuden ja maaston erottelu onnistui pääosin hyvin, mutta paikoin kasvillisuustyypit sulautuivat toisiinsa. Myös asfalttipintojen ja muiden maanpintojen tunnistamisessa oli joillakin alueilla epäselvyyttä, mikä voi hankaloittaa jatkokäsittelyä esimerkiksi maastomallinnuksessa.

Sisätilojen osalta havaittiin, ettei kaikkia esineitä ja rakenteita tunnistettu aina oikein; esimerkiksi tietokoneiden näytöt luokiteltiin virheellisesti huonekaluiksi. Tämä osoittaa, että nykyinen luokittelualgoritmi ei aina kykene tekemään täydellistä erottelua kohteiden välillä, mikä voi vaikeuttaa aineiston käyttöä tarkoissa 3D-malleissa. Nämä ongelmat ovat kuitenkin korjattavissa manuaalisella tarkistuksella.

Automaattista luokittelua testattiin myös Cyclone 3DR -sovelluksella REGISTER 360 ohella, ja lopputuloksena todettiin Cyclone 3DR:n automaattisen luokittelun olevan kehittyneempi kuin REGISTER 360 -sovelluksen. Cyclone 3DR -sovellus tuotti samasta lähtöaineistosta paljon nopeammin ja parempilaatuista luokittelua kuin REGISTER 360. Cyclone 3DR -sovelluksen sisätila luokittelussa ei havaittu kohteiden sulautuvan niin paljon toisiinsa kuin REGISTER 360 -sovelluksen luokittelussa.

Insinööriyön tavoitteet saavutettiin pääosin, sillä tuloksena saatiin kattava arvio automaattisen luokittelun soveltuvuudesta sekä sen eduista ja haasteista. Työ toi esille automaattisen luokittelun todellisen tehokkuuden ja sen rajoituksia erilaisissa käytännön ympäristöissä. Selvittämättä jäi kuitenkin, kuinka merkittävästi tarkkuutta voitaisiin parantaa tehokkaammalla tietokonelaitteistolla ja korkeamman resoluution skannauksilla.

Automaattinen luokittelu säästää huomattavasti aikaa, mutta täysin virheetöntä lopputulosta ei saavutettu. Rakennusten keskelle jäänyt kohina, väärin luokitellut esineet ja kasvillisuuden osittaiset sekoittumiset vaativat edelleen manuaalista tarkastusta ja korjausta, mikä lisää työmäärää. Tästä huolimatta automaattinen luokittelu osoittautui tehokkaaksi ja käytännölliseksi ratkaisuksi suurten pistepilviaineistojen käsittelyyn.

Jatkossa tutkimusta voisi syventää testaamalla automaattista luokittelua useammilla ympäristöillä ja erilaisilla asetuksilla sekä vertailemalla tuloksia kehittyneempiin ohjelmistoihin ja algoritmeihin. Olisi myös tärkeää selvittää, kuinka automaattista luokittelua voitaisiin optimoida paremmin eri käyttötarkoituksiin.

Työssä tuotettuja tuloksia voidaan hyödyntää rakennus- ja inframittauksissa, joissa tarkka ja tehokas kohteiden erottelu säästää aikaa ja vähentää manuaalista jälkityötä. Insinööriyöprosessi kehitti ymmärrystä automaattisten menetelmien hyödyistä ja rajoituksista sekä tehokkaan laitteiston ja resurssien merkityksestä laajojen aineistojen käsittelyssä.

## Lähteet

- 1 Hotakainen, Markus. 2015. Laser mallintaa maailmaa. Tieteessä tapahtuu 1/2015, s. 33–35.
- 2 Hirvonen, Riku. 2023. Laserkeilauksen monet käyttötarkoitukset. Verkkoaineisto. Karelia ammattikorkeakoulu. <<https://www.karelia.fi/2023/12/laserkeilauksen-monet-kayttotarkoitukset/>>. 5.12.2023. Luettu 3.3.2025.
- 3 Laserkeilaimen tekniset ominaisuudet – Osa 2: Laserkeilauksen tarkkuus. Verkkoaineisto. Geotrim Oy. <<https://geotrim.fi/yritys/blogi/laserkeilaimen-tekniset-ominaisuudet-osa-2-laserkeilauksen-tarkkuus/>>. Luettu 3.3.2025.
- 4 Leica RTC360 3D Laser Scanner. Verkkoaineisto. Leica-Geosystems. <<https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>>. Luettu 11.2.2025.
- 5 3 tapaa hyödyntää 3D-laserkeilausta rakennustyömaalla. 2021. Verkkoaineisto. Buildingpoint Finland. <<https://buildingpointfinland.fi/3-tapaa-hyodyntaa-3d-laserkeilausta-rakennustyomaalla/>>. 18.8.2021. Luettu 11.2.2025.
- 6 Miten laserkeilaus toimii? Verkkoaineisto. MLTFinland. <<https://www.mltfinland.fi/miten-laserkeilaus-toimii/>>. Luettu 11.02.2025.
- 7 Laserkeilaus ja ilmakuvaus. Verkkoaineisto. Maanmittauslaitos. <[https://www.maanmittauslaitos.fi/laserkeilaus-ja-ilmakuvaus?utm\\_source](https://www.maanmittauslaitos.fi/laserkeilaus-ja-ilmakuvaus?utm_source)>. Luettu 27.1.2025.
- 8 Joustavat maastomallituotannon menetelmät. 2023. Verkkoaineisto. Tequ. <<https://www.tequ.fi/fi/joustavat-maastomallituotannon-menetelmat/>>. 18.8.2021. Luettu 11.2.2025.
- 9 Workflow Demonstration: Leica RTC360 3D Laser Scanner, julkistustilaisuus 5.10.2018. 2018. Verkkoaineisto. Imaginit Technologies. <[https://www.youtube.com/watch?v=GQm3U4\\_MinM](https://www.youtube.com/watch?v=GQm3U4_MinM)>. Katsottu 4.3.2025.
- 10 Asiantuntijan näkemys yksinkertaistetusta pistepilven käsittelyohjelmasta. Verkkoaineisto. Leica-Geosystems. <<https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>>. Luettu 11.2.2025.
- 11 Langan Engineering on the All-New Leica Cyclone REGISTER 360 for Surveying Applications, julkistustilaisuus 13.7.2017. 2017. Verkkoaineisto. Leica Geosystems AG. <<https://www.youtube.com/watch?v=em31ZbxfDV0>>. Katsottu 4.3.2025.

- 12 Leica Cyclone REGISTER 360 PLUS - 3D Laser Scanning Point Cloud Registration Software. Verkkoaineisto. Leica-Geosystems. <<https://leica-geosystems.com/en-us/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-register-360>>. Luettu 13.2.2025.
- 13 Ohjekirja laserkeilausaineiston hankintaan. Verkkoaineisto. GeoForum Finland ry. <<https://geoforum.fi/laserkeilauksen-ohjekirja/>>. Luettu 27.1.2025.
- 14 Pistepilviaineistot suunnittelun lähtötietona. 2022. Verkkoaineisto. Buildingpoint Finland. <<https://buildingpointfinland.fi/pistepilviaineistot-suunnittelun-lahtotietona/>>. 23.3.2022. Luettu 20.2.2025.
- 15 Mikä on pistepilvi ja mihin sitä käytetään talonrakentamisessa?. 2021. Verkkoaineisto. Buildingpoint Finland. <<https://buildingpointfinland.fi/mika-on-pistepilvi-ja-mihin-sita-kaytettaan-talonrakentamisessa/>>. 23.11.2021. Luettu 25.2.2025.
- 16 LiDAR-pistepilvet, joita käytetään 3D-kuvaukseen ja visualisointiin. 2023. Verkkoaineisto. Neuvition. <<https://www.neuvition.com/fi/media/blog/lidar-point-clouds-used-for-3d-imaging-and-visualization.html>>. 31.10.2023. Luettu 25.2.2025.
- 17 Classification Manager. Verkkoaineisto. Leica-Geosystems. <<https://rcdocs.leica-geosystems.com/cyclone-register-360/latest/classification-manager>>. Luettu 10.3.2025.
- 18 Lesson 10c2: Exploring and Classifying LiDAR Data in Global Mapper, 1.11.2019. 2019. Verkkoaineisto. National Geospatial Program. <<https://www.usgs.gov/media/videos/lesson-10c2-exploring-and-classifying-lidar-data-global-mapper>>. Katsottu 10.3.2025.
- 19 Tulonen, Benjamin. 2024. Laserkeilauksen laadunvarmistusmenetelmät. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Aaltodoc-tietokanta.