

Dronella tuotetun ilmalaserkeilausaineiston patoturvallisuusvertailu

Kumpula Santeri

Opinnäytetyö
Tekniikka ja liikenne
Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

2021

Tekniikka ja liikenne
Maanmittaustekniikka

Tekijä	Santeri Kumpula	Vuosi	2021
Ohjaaja(t)	Teuvo Heimonen		
Toimeksiantaja	Mitta Oy		
Työn nimi	Dronella tuotetun ilmalaserkeilausaineiston patoturvallisuusvertailu		
Sivu- ja liitesivumäärä	30 + 4		

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli vertailla ilmalaserkeilattua aineistoa takymetrillä ja GNSS-paikannuksella tehtyihin mittauksiin maa- ja betonipadoilta. Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää mahdolliset poikkeavuudet tehtyjen mitausten välillä. Työn toimeksiantajana oli Mitta Oy.

Opinnäytetyössä kerrottiin ilmalaserkeilauksen historiasta, mittauksissa käytettyjen laitteiden ominaisuuksista, patoturvallisuudesta, lennättämiseen liittyvistä laeista, työn suorittamisesta, tuloksista ja pohdinnoista.

Työssä käytetty aineisto tuotettiin YellowScan-keilaimella, joka oli kiinnitettynä geodroneen. Vertailtavana aineistona käytettiin takymetrillä ja GNSS-paikannuksella tehtyjä mittauksia patojen harjoilta. Vertailu suoritettiin tekemällä raportti korkeusvaihteluista ilma-laserkeilauksen maastomallin ja takymetrimittausten sekä GNSS-mittausten välillä. Lisäksi kerättyä mittaustietoa vertailtiin poikki- ja pituusleikkauksin.

Tulokset osoittivat, että laskereilausaineisto oli vertailussa lähempänä GNSS-mittausta kuin takymetrillä tehtyä mittausta. Takymetrillä mitattujen pisteiden keskiarvo oli vertailussa 1,2 senttimetriä ilmalaserkeilauksen alapuolella, kun taas GNSS-mittauksen pisteet olivat 0,2 senttimetriä ilmalaserkeilausta ylempänä. Kuitenkin laserkeilausaineistossa oli vertailtavalla alueella kohtia, joissa ei ollut odotettua määrää pisteitä. Poikkileikkauksien osalta poikkeavuudet vaihtelivat tasaisen ja epätasaisen maanpinnan välillä. Padon harjalla tasaisella maanpinnalla erot takymetrimittauksen ja ilmalaserkeilauksen pisteissä olivat enintään 4 senttimetriä, kun taas epätasaisessa maastossa erot olivat noin 5–30 senttimetriä.

School of Technology, Communication and Transport
Study Programme in Land Surveying Engineering
Degree Programme of Land Surveying

Author	Santeri Kumpula	Year	2021
Supervisor	Teuvo Heimonen		
Commissioned by	Mitta Oy		
Subject of thesis	Drone Lidar Data Comparison Concerning Dam safety		
Number of pages	30 + 4		

The purpose of this bachelor's thesis was to compare drone lidar data against measurements done by tachometer and GNSS in dam sights. The goal was to find out anomalies between measurements. This thesis was commissioned by Mitta Oy.

The data used in this thesis project was produced by YellowScan laser scanner which was attached to GeoDrone UAV. The data was compared to the tachometer- and GNSS-measurements that were measured from the ridges of the dams. The comparison was made by writing an elevation fluctuation report between the ground model of aerial laser scanning, tachometer- and GNSS-measurements. In addition, cross-sections and slittings were made to point lines and ground models.

The results showed that the lidar data was closer to GNSS-measurements than tachometer measurements. The average height of points measured by tachometer was 1,2 cm lower than lidar points, when the GNSS-measured points were 0,2 cm higher than lidar points. Nevertheless, in the laser scanning data there were some areas that did not have the expected point thickness. Differences between flat and rugged ground changed a lot when it comes to cross-sections. Differences between tachometer measured points and lidar points were up to 4 cm in flat ridges of the dikes when in rugged ground differences were approximately 5-30 cm.

This Bachelor's thesis also presents the history of laser scanning, the specifications of measuring equipment, dam safety and laws related to aviation.

Key words

LiDAR, UAS, UAV

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	UAS, LIDAR JA PATOTURVALLISUUS	8
2.1	Yleistä	8
2.2	Lidar-historia	8
2.3	Lait, määräykset ja vastuu	9
2.4	Patoturvallisuus	9
2.5	Mittauskalusto	10
3	MITTAUSTYÖT	12
3.1	Laserkeilauskohde ja tarkoitus	12
3.2	Lennon valmistelut	12
3.3	Suunnittelu	13
3.4	Suunnittelun jälkeen maastossa tehtävät toimenpiteet	14
3.5	Ilmalaserkeilaus	14
3.6	Takymetri- ja GNSS-mittaukset	15
4	AINEISTOJEN KÄSITTELY	18
4.1	Lentoratatietojen hakeminen, korjaaminen ja lentoratojen pätkiminen	18
4.2	Spatix	18
4.2.1	Yleistä	18
4.2.2	Käsittelyn askeleet	19
5	AINEISTOJEN VERTAILU	20
5.1	Spatix-vertailu	20
5.2	3D-Win vertailu	22
5.2.1	Poikki- ja pituusleikkausvertailu	22
5.2.2	Pistetiheysvertailu	24
6	POHDINTA	26
	LÄHTEET	28
	LIITTEET	30

ALKUSANAT

Kiitokset Mitta Oy:lle työn mahdollistamisesta sekä Geotrim Oy:lle lennättämiseen ja aineistonkäsittelyyn liittyvistä koulutuksista. Lisäksi haluan kiittää mittauksissa apuna olleita henkilöitä.

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

GNSS	Global Navigation Satellite System. Maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä, joka lähettää sijainti- ja aikadataa GNSS-vastaanottimille. (European Global Navigation Satellite System Agency.)
GPS	Global Positioning System. Maailmanlaajuinen Yhdysvaltain puolustusministeriön ylläpitämä satelliittipaikannusjärjestelmä. (Laurila 2012, XIX.)
LIDAR	Light Detection and Ranging. Kaukokartoituksen tapa, jota käytetään maanpinnan tutkimiseen. (National Ocean Service 2020.)
IMU	Inertial Measurement Unit. Suomeksi inertiamittausalusta, joka mittaa laitteen asennon ja sijainnin muutoksia kiihtyvyyssantureiden ja gyroskooppien avulla. (Laurila 2012, XX.)
UAS	Unmanned Aircraft System. Miehitettömällä ilma-alusjärjestelmällä (UAS) tarkoitetaan miehitettömää ilma-alusta ja sen kauko-ohjaukseen tarvittavaa laitteistoa. (Komission delegoitu asetus (EU) 2019/945. 1:3.3.)
PPM	Parts per milloin, suomeksi miljoonasosa. Käytetään matkaan verrannollisten virheiden ja korjausten yhteydessä. (Pasi Laurila 2012, XXI.)

1 JOHDANTO

Nykypäivänä kartoituksen mahdollisuudet lisääntyvät nopeasti, sillä uusia kartoitukseen suunniteltuja laitteita kehitetään jatkuvasti. Maanmittausalan ammattilaiset pystyvät keräämään paljon dataa lyhyen ajan sisällä mutta haluavat varmistua siitä, että käytössä olevat laitteet ovat tarkkuudeltaan luotettavia.

Mitta Oy-Ympäristö on vuoden 2020 aikana järjestänyt dronen käyttö- ja aineistonkäsittelykoulutuksen, joiden pitäjänä oli Geotrim Oy. Koulutusten yhteydessä Mitta Oy:n Ympäristö-puolella on otettu käyttöön droneen kiinnitettävä ilmalaserkeilauslaitteisto, jota hyödynnetään esimerkiksi Kemijoki Oy:n vesivoimalaitosten patojen mittauksissa. Patojen mahdollisia muutoksia on aikaisemmin seurattu muun muassa GNSS-satelliittipaikantimilla sekä takymetrillä tehtävillä mittauksilla.

Opinnäytetyössä vertailtiin dronella tehtyä keilausta takymetrillä sekä GNSS-satelliittipaikantimella tehtäviin mittauksiin Ossauskosken padoilta. Vertailtava lentoaineisto keilattiin 50 metristä käyttämällä GeoDrone X4L -dronea ja Yellowscan surveyor -laserkeilainta. Tavoitteena oli saada selville, eroavatko mittaustulokset toisistaan käytettäessä erilaisia mittauskohjeita.

Työ aloitettiin koulutusten jälkeen heinäkuussa 2020, jolloin suoritettiin ilmalaserkeilaus. Aineistonkäsittely ja viimeiset mittaukset padoilta tehtiin helmikuussa 2021. Työn toimeksiantajana oli Mitta Oy.

2 UAS, LIDAR JA PATOTURVALLISUUS

2.1 Yleistä

Miehittämättömille ilma-aluksille on useita nimiä käyttötarkoituksen perusteella, mutta yleisesti kaikista maalla, merellä tai ilmassa kulkevista miehittämättömistä laitteista käytetään nimitystä drone. UAS (Unmanned Aircraft System) on miehittämättömän ilma-aluksen käytön kokonaisjärjestelmä, jossa ei ole ohjaajaa. (Droneinfo 2020.)

Yleisesti laaja-alaiset kartoitukset tehdään kaukokartoituksen keinoin. Kuitenkin on mahdollista, että kaukokartoituksen keinoin ei saada riittävää määrää tietoa kartoitettavasta alueesta. Tällöin karttoja joudutaan tarkastamaan ja täydentämään maastomittauksin satelliitti- ja takymetrimittauksella (Laurila 2012, 262).

Ilmalaserkeilaus on yksi kaukokartoituksen osa-alue, joka toimii laserpulssien avulla. Laserpulssit mittaavat matkaa kohteeseen. (National Oceanic and Atmospheric Administration 2020.) Suomessa koko maan kattavaa laserkeilausaineistoa tuottaa maanmittauslaitos. Pistetiheys neliömetrille on aikaisemmin ollut 0,5 pistettä, mutta tänä vuonna Maanmittauslaitos on alkanut tuottaa 5 pistettä/neliömetri alueelle. (maanmittauslaitos 2020.)

2.2 Lidar-historia

Hughes Aircraft kehitti ensimmäisen optisen laserin vuonna 1960. Pian sen jälkeen laser-instrumentteja pystyttiin käyttämään matkan laskentaan laserpulssin kulkeutumisen käyttämän ajan perusteella. Sitten Lidar-tekniikan käyttö maapinnan tarkkaan korkeusmäärittelyyn alkoi 1970-luvulla. Tuolloin lentokoneisiin kiinnitetyt laitteet keilasivat ainoastaan suoraan alapuolella olevia kohteita, jolloin datan keruu suurilta alueilta ei ollut kustannustehokasta. Lisäksi käytöstä puuttui tuolloin GPS ja IMU. (Chipman, Kiefer & Lillesand 2015, 471.) Käyttökelpoisuus-tutkimuksissa huomattiin hyödynnettävyys GPS:n sekä kiertosensoreiden kehityksen myötä (Awange & Kyalo Kiema 2013, 127).

Ensimmäiset laserprofilointi tutkimukset suoritettiin 1989–1990 professori Ackermannin ohjeistamassa erikoistutkimusprojektissa. Sen jälkeen 1990-luvun alkupuolella esimerkiksi TopScanin ja Toposysin kaupalliset applikaatiot tulivat markkinoille. (Awange & Kyalo Kiema 2013, 127.)

2.3 Lait, määräykset ja vastuu

Työssä käytettävää kalustoa koskevat lait ja määräykset ovat Komission delegoitu asetus (EU) 2019/945, ilmailulaki (864/2014), (OPS M1-1) ja OPS M1-32. Poikkeuksellista aikaisempiin lakeihin ja määräyksiin on, että jako lennokkien eli harrastustoiminnassa käytettävien dronien ja miehittämättömien ilma-aluksien välillä poistuu. Lentotoiminta on uudessa EU-asetuksessa kategorisoitu vaativuuden mukaan, jotta sovellettavilla toimenpiteillä saadaan vähennettyä riskit hyväksyttävälle tasolle. Lisäksi kaikkien toimien on rekisteröidyttävä. (traficom 2019.)

EU-dronelain siirtymäkaudella 1.1.2021–1.1.2023 droneille on asetettu rajoituksia avoimessa kategoriassa, jotka koskevat painoa, lennättämisaluetta sekä kouluttautumista. Mitta Oy:n käytössä oleva GeoDrone lukeutuu siirtymäkaudella luokkaan A3, sillä dronen paino on 0,5–25 kilogrammaa. Työssä käytettävällä kalustolla lennot tulee suorittaa harvaan asutetulla alueella, kaukana asutuksesta ja ihmisistä. Lisäksi tulee huomioida UAS-ilmatilavyöhykkeet sekä tehdä verkko-teoriakoe. (droneinfo 2021.)

Kuitenkin kauko-ohjatun ilma-aluksen käyttäjät, jotka ovat tehneet ilmoituksen laitteen käyttämisestä, saavat jatkaa voimassa olevan kansallisen ilmailumääräyksen (OPS M1-32 luku 3) mukaisesti vielä vuoden 2021 loppuun asti. Lennokkikerhoissa harrastavat voivat jatkaa M1-31 kuvun mukaisesti siirtymäkauden loppuun. (droneinfo 2021.)

2.4 Patoturvallisuus

Padot luokitellaan patoturvallisuuslaissa (379/2011) vahingonvaaran perusteella kolmeen luokkaan. Luokittelua ei tarvitse tehdä, mikäli patoturvallisuusviranomaisen on katsonut, ettei padosta aiheudu vaaraa. Padon omistajan on tehtävä pa-

dolle joko vuosi- tai määräaikaistarkastus, mikä riippuu luokituksesta. Vuositar-
kastukset koskevat luokan 1 ja 2 patoja. Määräaikaistarkastukset tulee suorittaa
vähintään viiden vuoden välein, luokan 1–3 padoilla tarvittaessa useammin. (Pa-
toturvallisuuslaki 3:11 §, 4:18–19 §.) Patojen kuntoa tarkastellaan määräajoin
tehtävillä kartoitusmittauksilla. Aikaisemmin padoilla tehtäviin mittauksiin on käy-
tetty GNSS- ja takymetrimittauksia. Periaatteena on, että aineiston tulee olla ver-
tailtavissa aikaisempiin mittauksiin, jotta mahdolliset muutokset pystytään havait-
semaan. (Sirniö 2021.)

2.5 Mittauskalusto

Ilmalaserkeilauskaluston lennätyksessä Mitta Oy:n Ympäristö-puolella on Geo-
Drone X4L V4 -ilma-alus ja siihen kiinnitettävä YellowScan Surveyor. Laitteet ei-
vät kommunikoi keskenään, vaan ne ovat itsenäisiä laitekokonaisuuksia (Geotrim
2020a, 3). Droneen on laitettu pidike erilaisten sensoreiden helppoa kiinnittämistä
varten. (Kuvio 1). GeoDrone X4L V4 on suomalaisvalmisteinen drone, jonka mak-
simipaino on 6,7 kilogrammaa. Lentoakun kesto on rajoittava tekijä muuhun lait-
teistoon verrattuna, sillä suuria alueita kuvattaessa akku kestää laserskanneri
kiinnitettynä enintään 30 minuuttia. (Mäenpää 2020.)



Kuvio 1. Lidar laitteisto kiinnitettynä Geodroneen. (Geotrim 2020b.)

Vertailtava aineisto tuotettiin takymetriä ja GNSS-paikanninta käyttämällä. Takymetri on mittauskoje, jolla pystyy mittaamaan etäisyyksiä, vaakasuuntia ja pystykulmia (Laurila 2012, XIII). GNSS-paikantimen käytössä hyödynnettiin Trimblen verkko-RTK-mittausta, jossa hyödynnetään yhden tukiaseman sijasta tukiasemien verkostoa (Laurila 2012, 320). Vertailuaineiston tuottamisessa käytössä oli Trimble S6 DR300+ -takymetri, Trimble R12 GNSS -vastaanotin ja Trimble TSC7 -maastotietokone.

3 MITTAUSTYÖT

3.1 Laserkeilauskohde ja tarkoitus

Työn kohteena oli Ossauskosken voimalaitosalueen betoni- ja maapadot. Ilmalaserkeilauksen pituus oli kokonaisuudessaan noin 2 kilometriä. Maapatojen sivustoilla olevan kasvillisuuden avulla saadaan mahdollisesti selville, millaista piste-pilveä ilmalaserkeilain pystyy tuottamaan maapatojen reunoilla tiheän kasvillisuuden alueella. Keilauksesta tuotettavaa aineistoa verrataan takymetrillä ja GNSS-paikannuksella otettuihin mittauksiin.

3.2 Lennon valmistelut

Ennen lentojen suunnittelua on seurattava sääennusteita, jotta lennot voidaan suorittaa laitteistojen käyttöohjeiden mukaan turvallisesti. Lisäksi ennen lentopaikalle siirtymistä tulee katsoa, että akuissa on riittävästi virtaa lentojen suorittamiseksi. Suunnittelukohteen rajoitukset sekä kieltoalueet tulee tarkistaa. Lisäksi lennon ajankohta tulee ilmoittaa muille miehittämättömien ilma-aluksien lentäjille aviamapsissa. (Mäenpää 2020.)

Aviamaps näyttää myös ajankohtaiset rajoitukset ja kieltoalueet kartalla (droneinfo 2020). Vaikka rajoitukset ja suurin osa korkeista esteistä näkyvät kartalla, on lennätettävä alue katsottava läpi sinne saavuttua.

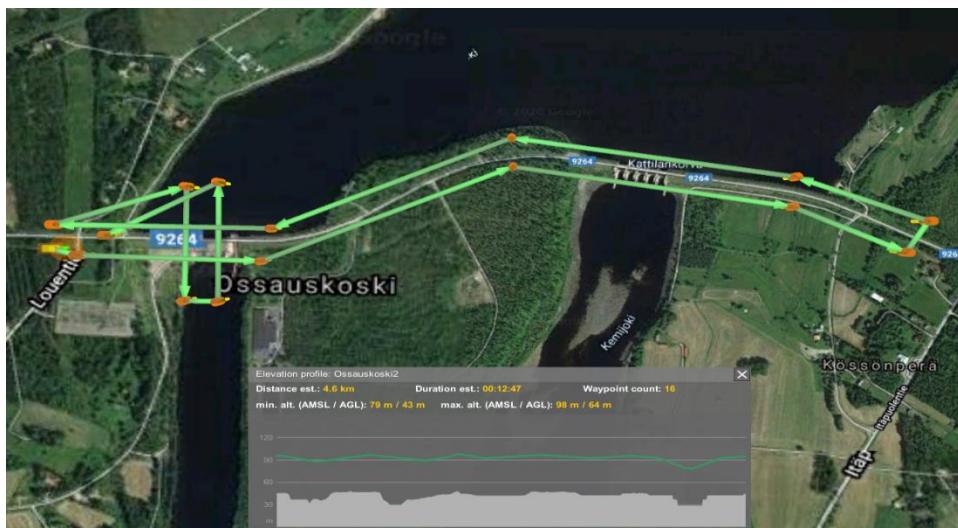
Tyypillisesti lentokenttien välittömässä läheisyydessä sekä puolustusvoimien alueilla lennättäminen on luvanvaraista. Kauempana lentokentästä esimerkiksi Rovaniemen keskustan alueella dronella lennättämisen korkeutta on rajoitettu. Ossauskosken alueella lennon korkeus saa olla enintään 120 metriä avoimen kategorian lennokeilla. (Aviamaps 2020.) Kun alue on tarkistettu rajoitusten osalta, voidaan siirtyä suunnitteluun.

3.3 Suunnittelu

Suunnitelman voi tehdä ennen alueelle siirtymistä tai lentoalueella. Suunnittelussa pohjatietona käytetään Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistoa. Sen avulla lentolinjat pysyvät tarpeeksi matalalla. Lähtö- ja laskeutumisaika tulee valita avoimelta sekä tasaiselta alueelta, jotta GPS-signaalit pysyvät hyvänä ja drone pysyy pystyssä laskeutumisessa. (Mäenpää 2020.)

Suunnitelmassa on otettava huomioon keilauslaitteen tekniset tiedot ja ominaisuudet sekä dronen maksimilentoaika Lidar-kalustolla. Keilausleveveys YellowScan surveyor -keilaimella on noin 120–150 metriä, tyypillinen lentokorkeus 40–80 m ja suositeltu nopeus 4–6 metriä sekunnissa. (Mäenpää 2020.) Tässä työssä lentokorkeus oli 50 metriä, sillä niin alhaalla pystyi turvallisesti lentämään, sekä lentonopeudeksi 6 metriä sekunnissa, koska maasto on avointa patojen kohdalla.

Suunnittelun lähtökohtana oli, että lentolinjat kattavat tarpeellisen alueen. Lisäksi lennoille on hyvä laittaa saatto- ja paluupisteet, jotta drone lähtee samasta paikasta ja palaa samaan paikkaan lennon päätyttyä. Lisäksi kuvattaessa linjamaisia kohteita suunnitelmaan lisättävä kalibrointiin liittyvät poikkileikkaukset. (Mäenpää 2020.) Tällä tavalla pystyy arvioimaan lennon kokonaisaikaa paremmin. Lidar-kalustolla lennettäessä linjamaisia kohteita on tärkeä myös pyrkiä tekemään mahdollisimman pitkiä suorita linjoja, jolloin lentolinjoilta ei jää aukkoja aineistonkäsittelyssä. Lentoja suunnitellulle alueelle tuli yksi (Kuvio 2).



Kuvio 2. Lentojen suunnittelualue.

3.4 Suunnittelun jälkeen maastossa tehtävät toimenpiteet

Maanpinnan korkeuden kontrollissa käytetään yleensä aeropointteja. Maastoon mentäessä on hyvä sijoittaa ne ensimmäisenä tallentamaan sijaintejaan. Aeropointit laitetaan tasaiselle maalle mahdollisimman kattavasti ympäri lennettävää aluetta, jotta korkeuskontrollissa ei tule virhettä. Aeropointit paikantavat itsensä satelliittien avulla, mutta niiden tulee olla maastossa vähintään 45 minuuttia. Laitettaessa kattavasti aeropointit maastoon samalla varmistetaan maaston mahdollisista esteistä, jotka voivat tulla lentolinjoille. Tällaisia esteitä voimalaitosten läheisyydessä voivat olla esimerkiksi korkeat mastot sekä voimalinjajohdot. Sen jälkeen katsotaan, onko suunnitelmaan laitettu lennätyspaikka turvallinen. Lennätyspaikan tulee olla avoin, jotta dronen pystyy nostattamaan ilmaan. (Mäenpää 2020.)

Lisäksi on otettava huomioon mahdollinen dronen kalibrointi, joka on suoritettava lennätyskuorman muuttuessa sekä siirryttäessä noin 100 kilometriä toisaalle viime lennätyspaikasta. Kalibrointia tehdessä on oltava etäällä metallisista esineistä sekä muista esineistä, jotka voivat häiritä laitteen sisäistä kompassia. (Mäenpää 2020.)

3.5 Ilmalaserkeilaus

Ilmalaserkeilaus suoritettiin 20.7.2020. Lentoja edeltävällä viikolla katsottiin sääennusteita, jotta pystyttiin valitsemaan lennoille sopiva ajankohta. Lähempänä lentopäivää sääolosuhteista vielä varmistuttiin. Keilauksiin liittyvä suunnitelma tehtiin lentoja edeltävänä päivänä sekä ladattiin drone ja skannerin akut. Sääolosuhteet paikalle tullessa olivat hieman tuuliset (noin 5 m/s), mutta laitteiden ominaisuuksien perusteella se oli sallituissa rajoissa. Sateen mahdollisuutta ei ollut, joten lennon suorittaminen oli mahdollinen.

Ennen lentoa vietiin kaksi aeropointtia toiseen päähän ja toiseen yksi. Suunnitelman mukainen lähtöpaikka varmistettiin, ja sen todettiin olevan hyvä lennättämispaikka. Ennen lentoa suoritettiin dronelle kalibroinnin, sillä aiempi lento oli suoritettu toisella paikkakunnalla. Kalibroinnin jälkeen laitettiin skanneri sekä tallennus päälle. Kun drone oli nostettu ilmaan, tehtiin pientä liikehdintää dronella, jottai

voitiin varmistua kalibroinnin onnistumisesta. Sen jälkeen tehtiin IMU:n alustaminen ja laitettiin drone suorittamaan lento. Sitten seurattiin työparin kanssa dronea lennon aikana henkilöautolla, jotta odottamattomien tilanteiden sattuessa se olisi pystytty välittömästi laskemaan. Lennon mentyä moitteettomasti IMU:n alustaminen tehtiin uudelleen, drone laskettiin ja tallennus lopetettiin. Lopuksi varmistuttiin datan siirtyminen skannerissa olevaan muistitikkuun, kerättiin aeropointit ja ladattiin niiden tiedot puhelimen mobiilitukiaseman kautta nettisivulle.

3.6 Takymetri- ja GNSS-mittaukset

GNSS- ja takymetrimittaukset suoritettiin 26.2.2021. Vertailualueelta mitattiin pituusleikkaus molemmilla mittausmenetelmillä sekä poikkileikkauksia maapadosta takymetrillä. Ilmalaserkeilatun alueen suunnitelmasta katsottuna vertailualue sijoittuu oikealle puoliskolle tulvaluukun molemmin puolin. Vaaleanvihreät linjat ovat mitattuja linjoja. (Kuvio 3).



Kuvio 3. Vertailussa käytetyt linjat.

Apuna mittauksien suorittamisessa oli Mitta Oy:n toinen työntekijä. Aluksi alueelle tultaessa luotiin liitospisteverkoston, joista otettiin keskiarvoistamalla kolme mitaustulosta. Yhteensä pisteitä tuli kahdeksan. Yhdellä takymetrin asemapisteeillä

käytettiin neljää liitospistettä. Liitospisteiden kohdalta jää ja lumi sulatettiin sekä porattiin asfalttiin reikä, johon pisteen pystyi tehdä. (Kuvio 4).



Kuvio 4. Liitospiste.

Takymetrimittaukset suoritettiin kahdelta asemapisteltä, jotta mittausetäisyydet eivät kasvaksi liian suuriksi. Pituusleikkauksen linjan pituus oli takymetrimittauksen osalta noin 320 metriä. Pisteitä jonolle tuli 44 kappaletta, jolloin etäisyys pisteiden välillä oli noin seitsemän metriä. Mitattujen pisteiden paikat jouduttiin sulattamaan, jotta mitatut pisteet olisivat vertailukelpoiset aikaisempaan kesänä tehtyihin ilmalaserkeilauksiin (Kuvio 5).



Kuvio 5. Kartoitusjonon piste.

Poikkileikkaukset suoritettiin takymetrimittauksena yhdeltä asemapisteeeltä. Poikkileikkaukset olivat noin 25 metriä pitkiä ja noin 10 metriä sivulla toisistaan. Jonoja mitattaessa maa kaivettiin esiin lumen alta ja mittaukset otettiin noin neljän metrin välein (kuvio 6). Liitospisteiden mittaamisen lisäksi otettiin GNSS-mittauksella samasta kohtaa mittaukset kuin takymetrillä.



Kuvio 6. Poikkileikkausjonot.

4 AINEISTOJEN KÄSITTELY

4.1 Lentoratatietojen hakeminen, korjaaminen ja lentoratojen pätkiminen

Lennon jälkeen POSPac UAV -ohjelmistossa suoritetaan lentoradan ja asennon tarkka jälkilaskenta trimnet-datan avulla. Aluksi tuodaan YellowScanista ulos otettu data, jolloin ohjelma alkaa hakea internetistä ratatietoja. Kun ratatiedot on haettu, voidaan katsoa lennon GPS-aika lentoradan ominaisuuksista. Tämän jälkeen ohjelmistoon tuodaan tukiasemadata GPS-ajan ja -sijainnin perusteella Geotrim Oy:n Trimnet-tukiasemadata palvelusta, jolloin lentoradan jälkilaskenta käynnistyy. Tämän jälkeen ohjelmistossa tuotetaan integroitu GNSS/IMU-ratkaisu, jonka tuloksena tarkempi lentorata. (Mäenpää 2020.)

Cloudstationissa valitaan YellowScanista ulos otettu pistepilvi sekä käytetään PosPac UAV -ohjelmistossa laskettua lentoratatietoa. Koko lentorata pilkotaan pienimmiksi osiksi, jolloin käytetään mahdollisimman suorina yksittäisiä linjoja. Kun lentolinjat on pilkottu, aineisto tuodaan ulos lentolinjoittain LAS-tiedostoiksi, joita käytetään Spatix-ohjelmistossa. (Mäenpää 2020.)

4.2 Spatix

4.2.1 Yleistä

Terra-sovellukset vaativat toimiakseen CAD-alustan, joka vuoteen 2019 saakka oli eri Bentley Systemsin versiot. Vanhat alustat toimivat edelleen, mutta vuodesta 2020 lähtien CAD-alustana on ollut mahdollista käyttää Spatix-ohjelmaa. Siinä ei ole järeämmin CAD-ominaisuuksia, mutta se sopii pistepilvikartoitusten tuotantotehtäviin. (Mäenpää & Steffansson 2020.)

UAV-keilauksen käsittely vaatii yleensä lentolinjojen yhteensovittamisen ja lentoratatiedon. Pällekkäisten pisteiden luokittelulla saadaan laadukkaimmat pisteet käyttöön. Suunta- ja kallistus virheet esiintyvät kaikessa keilaamisessa, jossa on inertialaite mukana. Ohjelmisto laskee, miten lentolinjojen korjauksia täytyy muuttaa, jotta pisteet osuvat yhteen. lentoratojen korkeutta korjataan sen jälkeen, jotta

lentolinjojen laserpisteet menevät limittäin. Sen jälkeen korjataan GNSS-mittauksessa esiintyvä korkeusheijaus. Lopullisessa tuotoksessa käytetään lentolinjoista lyhyimmän matkan kulkeneet pisteet eli jokaisen lentolinjan keskikaistale. (Mäenpää & Steffansson 2020.)

4.2.2 Käsittelyn askeleet

Aluksi avattiin Terra-sovellukset, jotta tarvittavat työkalut saatiin aineiston käsittelyyn. Tämän jälkeen avattiin jälkilaskettu lentoratatieto sekä YellowScanin laserpisteet. Sitten katkottiin lentoradoista käännökset sekä tuhottiin lentoradattomat pisteet. Kun lentoradattomat pisteet saatiin pois, aineistosta luokiteltiin maanpinta lentolinjoittain. Luokittelun jälkeen maanpinnan pisteitä käytettiin heading-, pitch-, roll- ja peiliskaalauskorjauksiin.

Tämän jälkeen korkeuden korjaukset laskettiin lentolinjoittain. Näiden korjauksien jälkeen haettiin paikalliset korkeusvaihtelukorjaukset ja tehtiin tarkkuusraportin koko aineistolle. Sitten leikattiin päällekkäiset pisteet ja tehtiin lopullisen maanpinnan luokittelu. Luokittelulle ajettiin korkeuskontrolliraportti aeropointeilla tuotettujen pisteiden avulla. Jos aeropointtien korkeusvaihtelu on suuri, korjataan datan korkeudet lentolinjoittain.

Vaihtoehtoisesti korkeuskontrolliin voidaan käyttää esimerkiksi GNSS-mittauksella tai takymetrillä tehtyjä mittauksia. Korkeuskontrollissa käytettäviä pisteitä verrataan ilmalaserkeilauksesta tehtyyn maastomalliin. Se sisältää luokitellun maanpinnan korkeudet jatkuvaksi pinnaksi mallinnettuna. Maastomallin pisteet yhdistetään kolmioiksi eli kolmioverkkomalliksi, jonka avulla vertailu korkeuskontrollipisteisiin onnistuu. (Laurila 2012, 265.)

Lopuksi luokiteltiin maanpinnan yläpuoliset laserpisteet ja maanpinnan reikätydennykset. Reikätydennykset tehtiin matalan kasvillisuuden pisteistä. Täydennyksiä tuli sellaisiin kohtiin, joissa maanpinnan pisteiden etäisyys toisistaan ei ollut alle metrin. Lopullisena tuotoksena vertailuun otettiin käytettävä digitaalinen korkeusmalli.

5 AINEISTOJEN VERTAILU

5.1 Spatix-vertailu

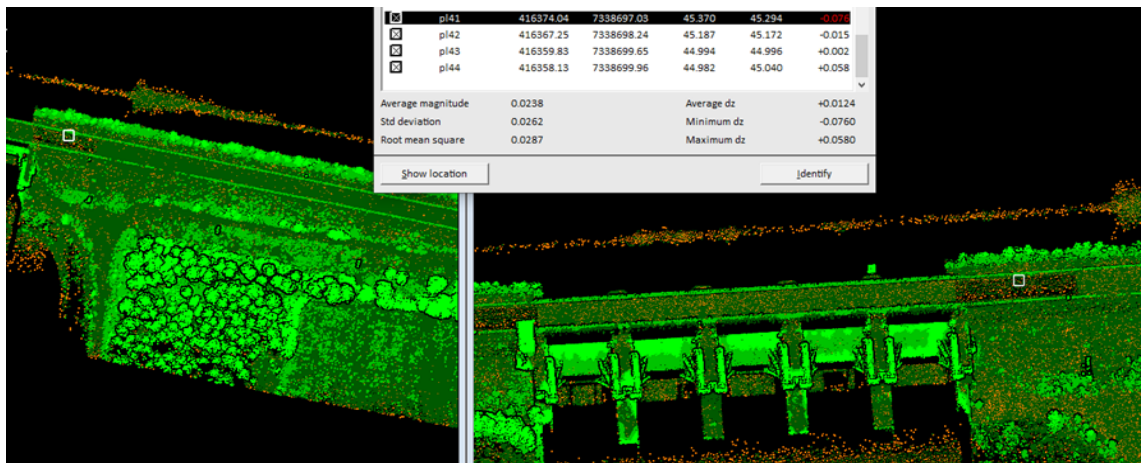
Spatixin terrascanin ominaisuuksiin kuuluu aineiston kontrollointi toisen mittausdatan avulla. Yleensä kontrollointiin käytettiin aeropointteja, jotta saatiin osviittaa lennon korjaustoimenpiteiden ja maanpinnan luokittelun onnistumisesta. Spatix-vertailussa luokitelluista maanpinnan pisteistä luodaan maastomalli, joihin tunnettuja pisteitä verrataan. Tässä työssä, kuitenkin hyödynnettiin mahdollisuutta laittamalla raporttiin GNSS- ja takymetrimittaukset.

Pituusleikkauksien osalta molempien mittaustapojen data näyttää Spatixin-raporttien perusteella hyvältä. Takymetrimittauksen pituusleikkauksen pisteet olivat keskiarvolta 1,2 senttimetriä ilmalaserkeilausta alempana. Takymetrimittauksen enimmäisarvot olivat 7,6 senttimetriä ylempänä ja 5,8 senttimetriä alempana verrattuna keilauksen maastomalliin. (Kuvio 7).

Average dz	+0.012
Minimum dz	-0.076
Maximum dz	+0.058
Average magnitude	0.024
Root mean square	0.029
Std deviation	0.026

Kuvio 7. Osa takymetrin pituusleikkausraportista. (liite 1, 1)

Suurimmat poikkeamakohdat pystyttiin katsomaan Spatix-korkeuskontrolliraportissa näyttämällä pisteen sijainnin sekä siirtelemällä ja pyörittelemällä aineistoa. (Kuvio 8).



Kuvio 8. Suurimman poikkeaman alue Spatixissa.

Suurin yksittäinen poikkeama oli tulvaluukun viereisellä betonilla, jossa pistetiheys ilmalaserkeilauksessa oli odotettua harvempi. Todennäköisesti suuriin poikkeamiin vaikuttaa tässä tapauksessa huono pistetiheys, jolloin ilmalaserkeilauksen maastomallin kolmiointi ei ole niin yksityiskohtainen. Ilmalaserkeilausalueella oli vasta uusittua asfalttia, joista laserkeilain sai pisteitä vain harvakseltaan. Uusitun asfaltin kohdat näkyvät tummempina kohtina Google Mapsissa. (Kuvio 9).



Kuvio 9. Tulvaluukun viereiset asfalttipinnat. (Google Maps.)

GNSS-mittausta verrattaessa keskiarvovaihtelu pisteiden välillä oli 2 millimetriä. Suurimmat vaihtelut olivat samoissa kohdissa kuin takymetrimittauksen pituusleikkauksessa. Enimmillään yksittäiset pisteet olivat maastomalliin verrattuna 7

senttimetriä ylempänä ja 3,6 senttimetriä alempana. (Kuvio 10). Suuret poikkeamat ovat samalla alueella, kuin takymetrimittauksessa.

Average dz	-0.002
Minimum dz	-0.070
Maximum dz	+0.036
Average magnitude	0.014
Root mean square	0.020
Std deviation	0.020

Kuvio 10. Osa GNSS-mittauksen pituusleikkausraportista. (Liite 1, 2.)

Takymetrillä tehtyjen poikkileikkauksien osalta korkeudet vaihtelivat paljon. Raportin perusteella takymetrillä mitatut pisteet menivät kahta pistettä lukuun ottamatta alemmas verrattuna laserkeilauksessa luokitellun maanpinnan pisteisiin. Kuitenkin luiskalle siirryttäessä erot linjojen välillä kasvoivat enintään 30,6 senttimetriä. Keskiarvoisesti takymetrillä mitattu poikkileikkausaineisto on 11,8 senttimetriä keilausaineistoa alempana. (Kuvio 11)

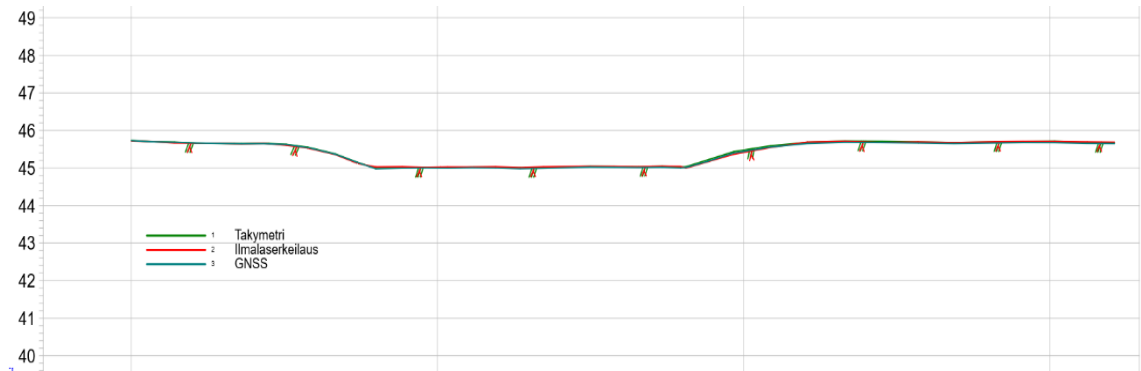
Average dz	+0.118
Minimum dz	-0.006
Maximum dz	+0.306
Average magnitude	0.118
Root mean square	0.148
Std deviation	0.090

Kuvio 11. Osa takymetrimittauksen padon poikkileikkauksien raportista. (Liite 1,3.)

5.2 3D-Win vertailu

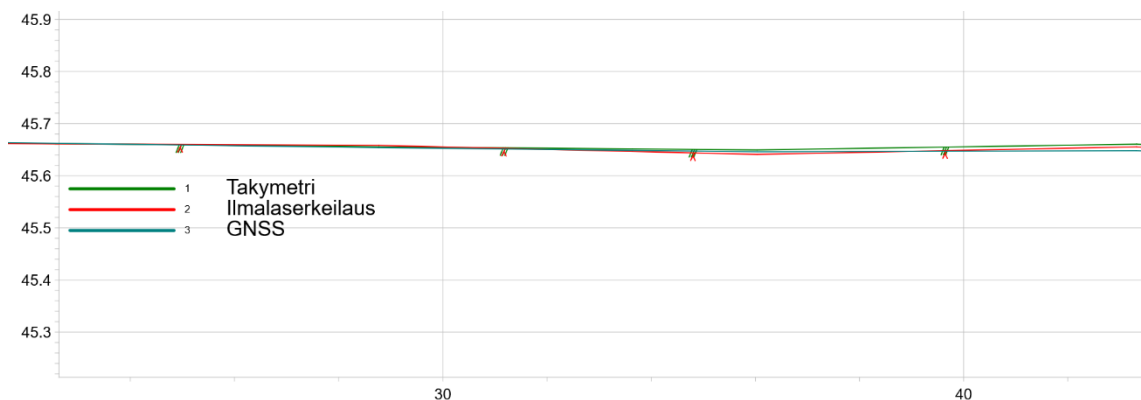
5.2.1 Poikki- ja pituusleikkausvertailu

3D-Win-ohjelmistolla käytettävät linjoihin on käytetty samoja pisteitä kuin Spatix-ohjelmistossa. Pisteistä tehtiin linjat ja kopioitiin ne molemmin puolin, jotta voidaan luoda maastomalli, jotta pystyttiin käyttämään leikkaustyökaluja visualisointiin. Lisäksi GNSS-mittauksen linja kopioitiin ja otettiin ilmalaserkeilauksen maastomalli korke kopeidulle linjalle. Pituusleikkauksen matalin kohta on tulvaluukkujen kohdalla, jonka vierestä tie lähtee nousemaan molemmin puolin. (kuvio 12.)



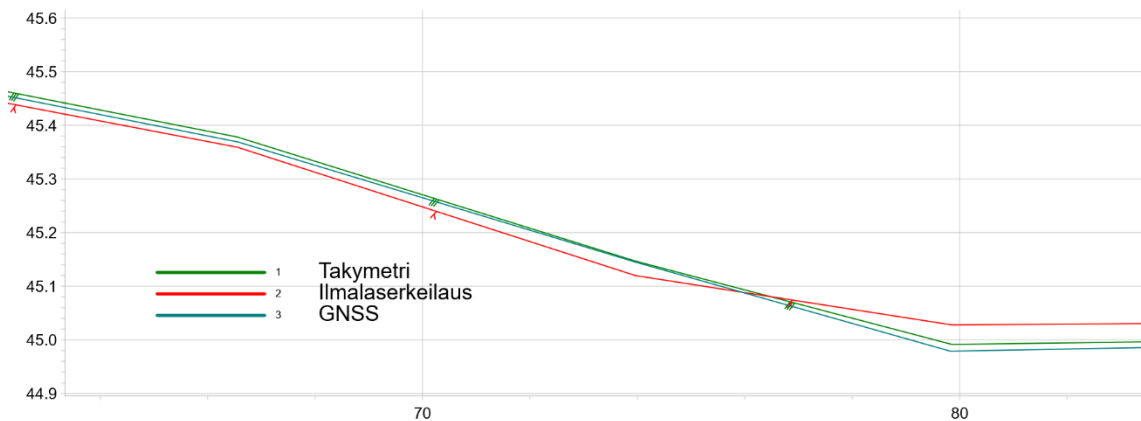
Kuvio 12. Koko pituusleikkaus.

Vertailussa linjoissa oli vähiten poikkeamaa tasaisilla kohdilla. Suurimmat poikkeamat tasaisilla kohdilla olivat takymetrimittauksen ja ilmalaserkeilauksen välillä. GNSS-mittaus ja ilmalaserkeilaus kulkivat tasaisella lähellä toisiaan, ja suurin yksittäinen poikkeama oli 3,1 senttimetriä mitatun pisteen kohdalla, kun taas takymetrimittauksen suurin yksittäinen poikkeama oli 4 senttimetriä. (kuvio 12) Pääsääntöisesti tasaiselta pinnalta mitattaessa linjojen väliset erot ilmalaserkeilaukseen olivat takymetrimittauksessa noin 1,5 senttimetriä ja GNSS-mittauksessa alle 1 senttimetri. (kuvio 13.)



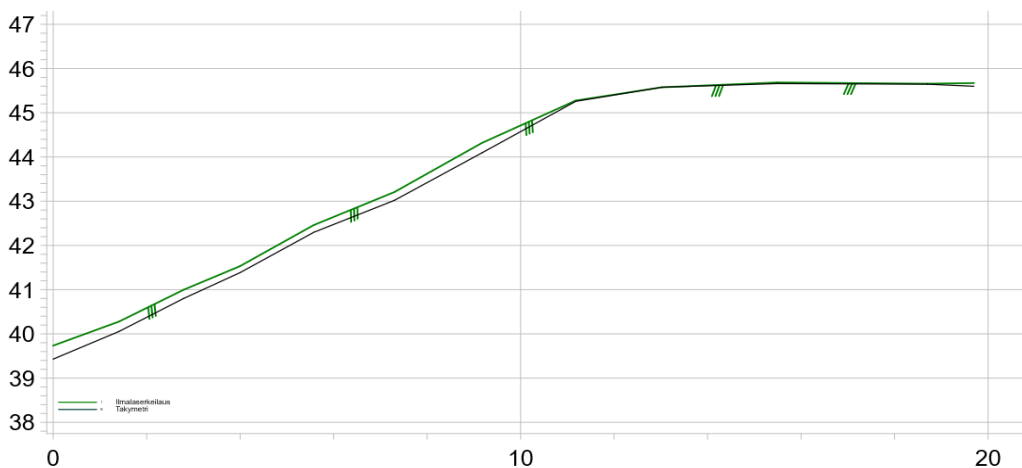
Kuvio 13. Pituusleikkaus tasaisella.

Ongelmallisiksi kohdiksi muodostuivat tulvaluukun viereiset alueet. Ilmalaserkeilauksen korkeus poikkesi muihin mittausmenetelmiin nähden enintään 7,0–7,6 senttimetriä. Suurimmat poikkeamat takymetri- ja GNSS-mittaukseen verrattuna esiintyvät ilmalaserkeilauksessa esiintyneissä huonon pistetiheyden alueilla. 3D-Winin pituusleikkaustoiminnolla suurimman poikkeaman alueella ilmalaserkeilauksen alue kulkee muiden linjojen alla luiskan kohdalla, mutta tasaiselle pinnalle mentäessä linja nousee muiden menetelmien yläpuolelle (kuvio 14).



Kuvio 14. Pituusleikkaus vertailun ongelmakohta.

Poikkileikkauksissa padon harjalla olevat ilmalaserkeilausaineisto oli enintään 4 senttimetriä takymetrillä tehtyjen linjojen yläpuolella. Pääsääntöisesti tasaisella, lumettomalla maalla linja kulki noin 1,5 senttimetriä takymetrimitausta ylempänä. Luiskalla siirryttäessä alaspäin takymetrillä mitattu linja kulki poikkeuksetta ilmalaserkeilauslinjan alapuolella erojen ollessa noin 5–30 senttimetriä.

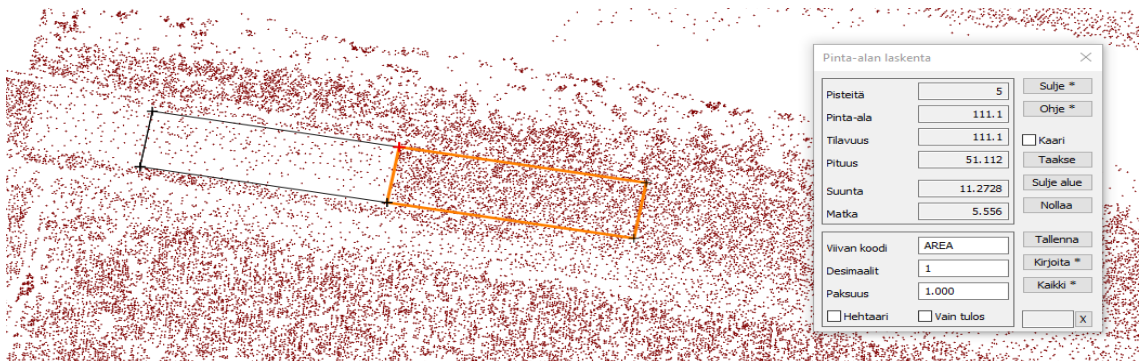


Kuvio 13. Poikkileikkauksen vertailu.

5.2.2 Pistetiheysvertailu

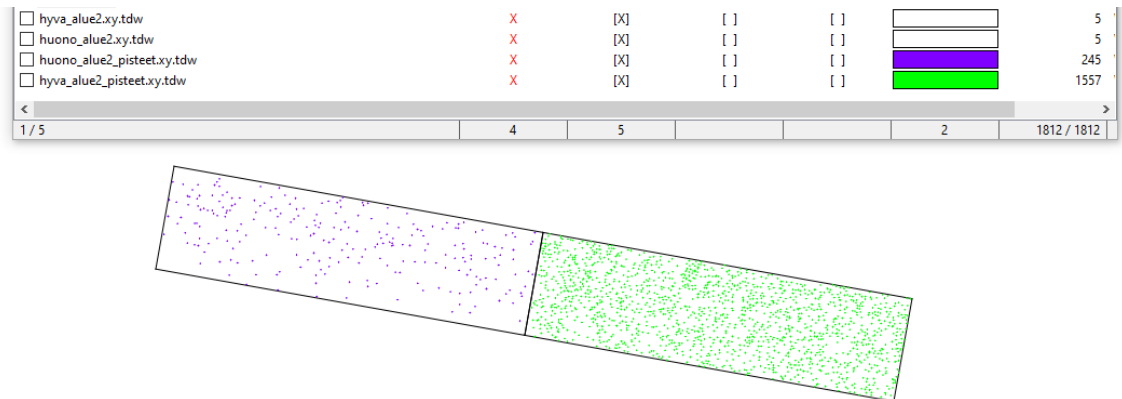
Pistetiheyksien vertailussa keskityttiin ilmalaserkeilauksen alueella olevaan tiehen, josta tehtiin myös pituusleikkausvertailu. Alueella aineiston pistetiheys näytti silmämääräisesti vaihtelevalta, joten päätettiin tehdä vertailu. Aluksi ohjelmistoon tuotiin Spatixissa kirjoitettu LAS-maanpintapistepilvi, minkä jälkeen rajattiin alue

hyvään ja huonoon pistetiheyden alueeseen (Kuvio 14). Rajatut alueet olivat pinta-alaltaan samankokoiset.



Kuvio 14. Rajatut alueet.

Alueen rajaamisen jälkeen valittiin rajattujen alueiden sisältä pisteet erillisiksi tiedostoiksi, joista laskettiin pisteiden määrät neliömetrille. Huonomman pistetiheyden alueella pisteitä oli 245, kun taas tiheimmällä alueella pisteitä oli 1 557 (Kuvio 15). Alueella tehtiin kaksi samantyyppistä laskelmaa molempien luiskien kohdalta. Esimerkissä olevan pistetiheydet alueilla olivat noin 2,2 pistettä neliömetrille ja noin 14,0 pistettä neliömetrille. Toisessa tapauksessa vastaavat lukemat olivat noin 2,6 pistettä neliömetrille ja 13,9 pistettä neliömetrille.



Kuvio 15. Pisteiden määrät rajatulla alueella.

6 POHDINTA

Tässä opinnäytetyössä vertailtiin ilmalaserkeilausta takymetrillä sekä GNSS-paikannuksella tehtyihin mittauksiin. Lisäksi tavoitteena oli selvittää poikkeavuudet tehtyjen mittausten välillä.

Opinnäytetyön ehdotus tuli työnantajalta, jolloin aihekokonaisuus ei ollut työmäärältään mahdollista toteuttaa opinnäytetyön puitteissa. Sitten päätettiin, että työ tehdään yhdestä osa-alueesta, joka vaikutti mielenkiintoiselta. Keilattavista paodoista valittiin jo keilattu alue, sillä keilauskalustoa ei enää pystynyt käyttämään talvisisten olosuhteiden vuoksi. Kesällä 2020 tehdystä keilauksesta ei ollut otettu valokuvia, joista olisi ollut mahdollisesti apua myöhemmässä vaiheessa.

Ilmalaserkeilauksen ajankohta maanpinnan muotojen saamiseksi oli pituusleikkauksen osalta optimaalinen, sillä tasaista maanpintaa mitattaessa kuivana keisäpäivänä maanpinnan muodot tallentuivat hyvin ilmalaserkeilaimeen. Vaikka keilausolosuhteet olivat otolliset, keilain ei pystynyt tallentamaan pisteitä vasta uusitulta asfaltilta niin tiheästi kuin viereisillä kohdilla. On mahdollista, että keilaimella ei pysty kartoittamaan tummia kohteita niin hyvin kuin vaaleita. Kuitenkin ajankohta poikkileikkauksien tekemiseen oli huono, sillä kasvit ja puut olivat keilaushetkellä jo kukkineet. Vaikka poikkileikkauksien alueella kasvillisuus ei ollut korkea, ilmalaserkeilain ei saanut pisteitä tiheään matalan tiheän pusikon läpi. Tässä tapauksessa halutun tiedon saamiseksi optimaalinen ajankohta keilaukselle olisi alkukesä, jolloin maanpinnan muodot olisivat dronen kuvakulmasta parhaiten nähtävissä sekä peitteisessä maastossa laserkeilaimen pisteet osuisivat maanpintaan.

GNSS-paikannuksella ja takymetrillä tehdyillä mittauksilla ajankohdan valinnan pyrittiin tekemään niin, että mittauksissa olisi mahdollista saada maanpinta näkyviin mitatuilla pisteillä samalla tavalla kuin se oli keilaushetkellä. Spatix-sovelluksessa maanpinnan reikätydennykset otettiin luokitellulta matalan kasvillisuuden matalimmista pisteistä, jolloin yli metrin kokoiset aukot ovat täydennetty matalan kasvillisuuden pisteistä. Ilmalaserkeilauksen maastomalli kulki GNSS- ja takymetrimittauksen yläpuolella suurimmillaan noin 7–8 senttimetriä, joten matalan

kasvillisuuden reikätydennyspisteet voivat vaikuttaa korkeuspoikkeamaan. Ongelmalliseksi kohdaksi osoittautui tien viereinen osuus, jossa oli vielä reilusti lunta. Tien pinnasta tehdyt mittaukset oli mahdollista toteuttaa sulattamalla mitattavalla kohdalla oleva jää. Poikkileikkauksia otettaessa tien vierustalla maastossa, maanpinnan muotoja ja korkeutta oli vaikea arvioida, joten tulokset niiden osalta ei anna luotettavaa informaatiota.

Työssä käytettävän lentokaluston lakiin ja rajoituksiin tutustuessa ohjeistukset muuttuivat työn edetessä, joten niiden tarkasteluun jouduttiin kiinnittämään erityistä huomiota. Työhön liittyvät aihealueet lisäsivät ymmärrystä laserkeilauksen historiasta, laitteiden toimintaperiaatteista ja käyttömahdollisuuksista padoilla tehtävissä mittauksissa. Lisäksi ymmärrystä kertyi työhön käytettävästä ajasta ja optimaalisen mittausajankohdan valinnan mahdollisesta vaikutuksesta.

Opinnäytetyössä vertaillaan yksittäisiä linjoja keilattuun maastomalliin. Jatkotutkimuksissa voitaisiin perehtyä mittauksissa käytettyjen menetelmien epävarmuustekijöihin, jolloin mittausmenetelmien tarkkuutta verrattuna toisiinsa voisi tutkia.

Ilmalaserkeilausta käytetään yleisesti laaja-alaisten alueiden kartoituksessa, joten työssä käytetty ilmalaserkeilain toimii hyvin patokohteissa. Työssä keilatun alueen pituus yhteen suuntaan oli yli kaksi kilometriä, joten maastomittauksin alueen kartoitus olisi aikaa vievää. Kuitenkin esimerkiksi vertailussa käytetyillä muilla mittausmenetelmillä voidaan joutua täydentämään ja tarkastamaan ilmalaserkeilauksesta saatua dataa.

LÄHTEET

- Aviamaps 2021. Dronekartta. Viitattu 2.3.2021
<https://aviamaps.com/map?drone#p=13.19/66.15532/25.13829>
- Awange, J. & Kyalo Kiema, J. 2013. Environmental Geoinformatics: Monitoring and Management. Springer.
- Chipman, J., Kiefer, R. & Lillesand, M. 2015. Remote Sensing and Image Interpretation. 7th edition. Wiley.
- Droneinfo 2020a. EU-droneasetuksen soveltaminen siirtyy
https://www.droneinfo.fi/fi/tiedotteet/6944/eu-droneasetuksen_soveltaminen_siirtyy
- Droneinfo 2020b. Usein kysyttyä. Viitattu 6.10.2020
https://www.droneinfo.fi/fi/usein_kysyttya/ilmailu_-_miehittamattomat_ilma-alukset_ja_lennokit
- Droneinfo 2021. EU: dronesäännöt. Viitattu 12.2.2021
<https://www.droneinfo.fi/fi/eun-dronesaaannot?toggle=Erilaisia%20laitteita%20koskevat%20siirtym%C3%A4ajat&toggle=Erilaisia%20operaattoreita%20ja%20kauko-ohjaajia%20koskevat%20siirtym%C3%A4ajat>
- European Global Navigation Satellite System Agency 2021. What is GNSS? Viitattu 26.3.2021 <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss>
- Geotrim 2020a. GeoDrone YellowScan Workflow Viitattu 5.10.2020
- Geotrim 2020b. Yellowscan. Viitattu 8.10.2020 <https://geotrim.fi/tuotteet/uas/yellowscan/>
- Google Maps 2021. Viitattu 26.3.2021
<https://www.google.fi/maps/@66.1576352,25.14532,223m/data=!3m1!1e3>
- Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin käyttäminen ilmailuun 2018. Määräys 7.12.2018. Liikenteen turvallisuusvirasto. Viitattu 8.10.2020 https://arkisto.trafi.fi/filebank/a/1543326521/514c2766eb6f8413b2b0d71032cb4337/32598-OPS_M1-32_2018_fi.pdf
- Komission delegoitu asetus (EU) 12.3.2019/945
- Laurila, P. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. 4., uudistettu painos. Jyväskylä: Kopijyvä Oy
- Maanmittauslaitos 2020. Laserkeilausaineisto 2008–2019. Viitattu 6.10.2020
<https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/laserkeilausaineisto>

Mäenpää, S. 2020. Geotrim Oy. Dronen käyttökoulutus 13-14.5.2020.

Mäenpää, S & Steffansson, T 2020. Terrawebinaari. Viitattu 8.3.2021

National Ocean Service 2020. What is LiDAR? Viitattu 6.10.2020 <https://ocean-service.noaa.gov/facts/lidar.html>

Patoturvallisuuslaki 26.6.2009/494.

Steffansson, T. 2020. Geotrim Oy. Terrasolid koulutus 23-24.6.2020.

Travicom 2019. Koko EU:n kattavat drone-asetukset on julkistettu. Viitattu 8.10.2020 <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/koko-eun-kattavat-drone-asetukset-julkistettu>

Trimble 2016, APX 15-UAV datasheet. Viitattu 21.4.2021
https://www.applanix.com/downloads/products/specs/APX15_DS_NEW_0408_YW.pdf

Trimble 2020, Trimble R12 GNSS system data sheet. Viitattu 8.3.2021
[https://geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2020-10/Datasheet%20-%20Trimble%20R12%20GNSS%20Receiver%20English%20\(UK\)%20-%20Screen.pdf](https://geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2020-10/Datasheet%20-%20Trimble%20R12%20GNSS%20Receiver%20English%20(UK)%20-%20Screen.pdf)

Trimble 2021, Trimble S6 total station data sheet. Viitattu 8.3.2021
http://www.land-scope.com/media/Trimble_S6_Data_Sheet.pdf

VideoDrone finland Oy 2018. GeoDrone X4L V4.1.4 Käyttöopas. Viitattu 19.04.2021

VideoDrone 2020. Geodrone. Viitattu 13.1.2020 https://videodrone.fi/en/geodrone-x4l/?gclid=EAlalQobChMImqD0wKCZ7gIVRgKLCh0LMAQsEAAYASA-BEgKd7fD_BwE

Sirniö, V-P. Mitta Oy. Palvelupäällikön keskustelu 21.4.2021.

Yellowscan 2020. Yellowscan surveyor. Viitattu 13.1.2020
https://cdn2.hubspot.net/hubfs/4903061/Datasheets%20EN%20-%20007012020/YSDatasheet_Surveyor.pdf

LIITTEET

- Liite 1. Spatix-korkeuskontrolliraportit
- Liite 2. Mittauskaluston tekniset tiedot

SPATIX KORKEUSKONTROLLIRAPORTIT

Liite 1 1(3)

Korkeuskontrolliraporttien sarakkeiden merkitys vasemmalta oikealle. Vasemmassa reunassa oleva numero (Number) on takymetrillä tai GNSS-mittauksella otettu mitatun pisteen tunnus. Easting- ja Northing-otsikon alla olevat numerot ovat länsi-itä- ja etelä-pohjoinen-koordinaatteja Number-sarakkeessa oleville pisteille. Known Z eli tunnettu korkeus on takymetrillä tai GNSS-mittauksella otetun pisteen korkeus, kun taas Lazer Z on ilmalaserkeilauksesta tehdyn maastomallin korkeus samassa Easting-Northing-sijainnissa. Dz-sarakkeessa olevat luvut tarkoittavat korkeuseroa pisteiden välillä. Esimerkiksi GNSS-mittauksen pituusleikkausraportissa Dz-luku -0.016 tarkoittaa, että ilmalaserkeilauksen maastomalli on 0.016 metriä alempana GNSS-mittauksella tuotettua pistettä.

Number	Easting	Northing	Known Z	Lazer Z	Dz
p11	416359.832	7338699.635	45.012	44.997	-0.015
p12	416358.136	7338699.943	45.000	45.040	+0.040
p13	416352.259	7338701.197	45.018	45.044	+0.026
p14	416344.719	7338702.685	45.010	45.037	+0.027
p15	416336.849	7338704.292	45.017	45.039	+0.022
p16	416329.183	7338705.853	45.023	45.037	+0.014
p17	416321.835	7338707.279	45.007	45.038	+0.031
p18	416314.257	7338708.863	44.992	45.031	+0.039
p19	416306.737	7338710.272	44.981	45.010	+0.029
p110	416298.890	7338711.856	45.000	45.033	+0.033
p111	416291.300	7338713.359	45.005	45.025	+0.020
p112	416283.483	7338715.019	44.996	45.027	+0.031
p113	416276.220	7338716.385	45.000	45.015	+0.015
p114	416269.025	7338717.718	44.995	45.034	+0.039
p115	416260.456	7338719.465	44.979	45.029	+0.050
p116	416254.704	7338720.584	45.145	45.120	-0.025
p117	416247.471	7338722.157	45.369	45.359	-0.010
p118	416239.400	7338723.841	45.533	45.532	-0.001
p119	416231.804	7338725.287	45.626	45.605	-0.021
p120	416224.663	7338726.676	45.648	45.655	+0.007
p121	416217.538	7338728.147	45.646	45.642	-0.004
p122	416210.394	7338729.496	45.654	45.657	+0.003
p123	416202.981	7338731.042	45.664	45.662	-0.002
p124	416196.000	7338732.469	45.685	45.665	-0.020
p125	416188.652	7338733.735	45.699	45.701	+0.002
p126	416182.148	7338734.927	45.728	45.720	-0.008
p127	416172.571	7338736.579	45.789	45.786	-0.003
p128	416503.577	7338671.547	45.654	45.682	+0.028
p129	416497.270	7338672.815	45.651	45.687	+0.036
p130	416488.372	7338674.623	45.655	45.694	+0.039
p131	416478.035	7338676.635	45.674	45.704	+0.030
p132	416467.899	7338678.719	45.676	45.706	+0.030
p133	416458.922	7338680.544	45.666	45.700	+0.034
p134	416445.903	7338683.102	45.650	45.674	+0.024
p135	416434.280	7338685.323	45.665	45.694	+0.029
p136	416422.739	7338687.633	45.676	45.677	+0.001
p137	416410.806	7338689.980	45.683	45.706	+0.023
p138	416398.770	7338692.308	45.651	45.686	+0.035
p139	416386.997	7338694.709	45.558	45.541	-0.017
p140	416375.217	7338696.942	45.399	45.365	-0.034
p141	416374.042	7338697.030	45.370	45.294	-0.076
p142	416367.250	7338698.240	45.187	45.172	-0.015
p143	416359.831	7338699.651	44.994	44.996	+0.002
p144	416358.133	7338699.964	44.982	45.040	+0.058
Average dz		+0.012			
Minimum dz		-0.076			
Maximum dz		+0.058			
Average magnitude		0.024			
Root mean square		0.029			
Std deviation		0.026			

Takymetrin pituusleikkausraportti.

Liite 1 2(3)

Number	Easting	Northing	Known Z	Laser Z	Dz
plgps1	416623.978	7338644.938	45.865	45.849	-0.016
plgps2	416612.347	7338648.440	45.853	45.838	-0.015
plgps3	416600.376	7338651.651	45.799	45.804	+0.005
plgps4	416588.671	7338654.571	45.760	45.754	-0.006
plgps5	416576.493	7338657.285	45.705	45.695	-0.010
plgps6	416564.140	7338659.842	45.647	45.653	+0.006
plgps7	416551.753	7338662.404	45.639	45.638	-0.001
plgps8	416539.257	7338664.791	45.662	45.677	+0.015
plgps9	416527.216	7338667.176	45.677	45.673	-0.004
plgps10	416515.392	7338669.404	45.681	45.676	-0.005
plgps11	416503.568	7338671.548	45.680	45.683	+0.003
plgps12	416497.264	7338672.808	45.673	45.687	+0.014
plgps13	416488.375	7338674.593	45.670	45.695	+0.025
plgps14	416478.045	7338676.626	45.712	45.704	-0.008
plgps15	416467.901	7338678.698	45.699	45.707	+0.008
plgps16	416458.941	7338680.550	45.692	45.699	+0.007
plgps17	416445.883	7338683.102	45.677	45.676	-0.001
plgps18	416434.268	7338685.311	45.692	45.693	+0.001
plgps19	416422.729	7338687.607	45.708	45.677	-0.031
plgps20	416410.800	7338689.959	45.716	45.708	-0.008
plgps21	416398.785	7338692.273	45.683	45.690	+0.007
plgps22	416387.015	7338694.680	45.591	45.545	-0.046
plgps23	416375.217	7338696.932	45.435	45.365	-0.070
plgps24	416359.834	7338699.641	45.032	44.997	-0.035
plgps25	416350.128	7338699.944	45.021	45.040	+0.019
plgps26	416352.249	7338701.196	45.047	45.044	-0.003
plgps27	416344.604	7338702.711	45.029	45.032	+0.003
plgps28	416336.842	7338704.285	45.040	45.039	-0.001
plgps29	416329.280	7338705.868	45.045	45.043	-0.002
plgps30	416321.823	7338707.272	45.029	45.038	+0.009
plgps31	416314.253	7338708.858	45.013	45.031	+0.018
plgps32	416306.743	7338710.273	45.004	45.010	+0.006
plgps33	416298.898	7338711.851	45.018	45.033	+0.015
plgps34	416291.275	7338713.364	45.021	45.025	+0.004
plgps35	416283.483	7338715.017	45.003	45.027	+0.024
plgps36	416276.227	7338716.389	45.014	45.014	+0.000
plgps37	416269.025	7338717.708	45.003	45.034	+0.031
plgps38	416260.480	7338719.442	44.992	45.028	+0.036
plgps39	416254.701	7338720.581	45.147	45.120	-0.027
plgps40	416247.462	7338722.159	45.378	45.359	-0.019
plgps41	416238.730	7338723.682	45.553	45.529	-0.024
plgps42	416231.793	7338725.274	45.630	45.604	-0.026
plgps43	416224.668	7338726.679	45.661	45.655	-0.006
plgps44	416217.532	7338728.157	45.649	45.641	-0.008
plgps45	416210.394	7338729.477	45.656	45.658	+0.002
plgps46	416202.981	7338731.040	45.663	45.662	-0.001
plgps47	416196.003	7338732.470	45.689	45.665	-0.024
plgps48	416188.670	7338733.740	45.699	45.702	+0.003
plgps49	416182.156	7338734.917	45.735	45.719	-0.016
plgps50	416172.085	7338736.884	45.786	45.814	+0.028
Average dz		-0.002			
Minimum dz		-0.070			
Maximum dz		+0.036			
Average magnitude		0.014			
Root mean square		0.020			
Std deviation		0.020			

GNSS-mittauksen pituusleikkausraportti.

Liite 1 3(3)

Number	Easting	Northing	Known Z	Laser Z	Dz
100	416485.325	7338657.240	39.706	39.723	+0.017
101	416485.649	7338659.085	40.535	40.684	+0.149
102	416486.006	7338660.867	41.508	41.669	+0.161
103	416486.155	7338662.224	42.297	42.436	+0.139
104	416486.479	7338664.003	43.332	43.493	+0.161
105	416486.786	7338665.582	44.332	44.638	+0.306
106	416486.981	7338666.922	45.050	45.209	+0.159
107	416487.122	7338668.109	45.425	45.496	+0.071
108	416487.635	7338670.319	45.618	45.652	+0.034
109	416487.981	7338671.906	45.670	45.688	+0.018
110	416488.384	7338674.574	45.654	45.696	+0.042
111	416492.768	7338655.174	39.429	39.734	+0.305
112	416492.884	7338656.577	40.054	40.278	+0.224
113	416493.120	7338657.943	40.802	40.999	+0.197
114	416493.460	7338659.096	41.384	41.531	+0.147
115	416493.773	7338660.645	42.297	42.461	+0.164
116	416494.125	7338662.330	43.018	43.206	+0.188
117	416494.239	7338664.201	44.093	44.317	+0.224
118	416494.693	7338666.155	45.258	45.275	+0.017
119	416495.187	7338667.934	45.577	45.576	-0.001
120	416495.623	7338670.361	45.660	45.685	+0.025
121	416496.456	7338673.459	45.646	45.657	+0.011
122	416496.798	7338674.399	45.599	45.671	+0.072
123	416500.386	7338653.504	39.584	39.770	+0.186
124	416500.773	7338655.334	40.180	40.439	+0.259
125	416501.097	7338656.838	41.000	41.196	+0.196
126	416501.413	7338658.226	41.790	41.925	+0.135
127	416501.668	7338659.776	42.652	42.763	+0.111
128	416502.041	7338661.132	43.379	43.510	+0.131
129	416502.447	7338662.964	44.375	44.538	+0.163
130	416502.841	7338664.670	45.321	45.349	+0.028
131	416503.203	7338665.998	45.559	45.565	+0.006
132	416503.641	7338668.003	45.637	45.678	+0.041
133	416504.154	7338670.021	45.669	45.663	-0.006
134	416504.517	7338672.460	45.647	45.687	+0.040
Average dz	+0.118				
Minimum dz	-0.006				
Maximum dz	+0.306				
Average magnitude	0.118				
Root mean square	0.148				
Std deviation	0.090				

Takymetrimittauksen poikkileikkauksien raportti.

MITTAUSKALUSTON TEKNISET TIEDOT

Liite 2 1(1)

GeoDrone X4L V4

- Maksimi lentoonlähtömassa: 6.4 kg
- Leveys 58 cm X 58 cm
- Operointilämpötila: –10–40 °C (Videodrone 2020.)
- Lentoaika: Max. 30 min (Geotrim 2020a, 4).
- Maksimituuli: Vallitseva tuuli 8m/s, puuskat 12m/s (VideoDrone finland Oy 2018, 3).

YellowScan Surveyor

- Scanneri: Velodyne VLP-16
- Paino: 1,6 kg
- Aallonpituus: 903 nm
- Tarkkuus 4 cm
- Absoluuttinen tarkkuus 5 cm
- Näkökenttä: 360°
- Laserpulseja sekunnissa: 300000
- GNSS-Inertia ratkaisu: Applanix APX-15 UAV (Yellowscan 2020, 1–2.)

Trimble R12

- Taso: 8 mm + 1 ppm RMS
- Korkeus: 15 mm + 1 ppm RMS (Trimble 2020, 2.)

Trimble S6 DR300+

Perinteinen prismaan mittaus: \pm (3 mm + 2 ppm) (Trimble 2021, 2).