



AKADEMIN FÖR TEKNIK OCH MILJÖ
Avdelningen för datavetenskap och samhällsbyggnad

Mätosäkerhet hos DTM:er från två olika UAS/LiDAR-system

Jämförelse av LiDAR sensorerna DJI Zenmuse L1 och
Zenmuse L2

Jakob Salomonsson

2024

Examensarbete, Grundnivå (högskoleingenjör), 15 hp
Lantmåteriteknik
Lantmätarprogrammet, teknisk inriktning

Handledare: Ulrika Ågren
Examinator: Mohammad Bagherbandi

Sammanfattning

Utvecklingen av luftburna laserskannersystem sker snabbt. De blir mer kompakta och får ett bättre slutresultat med lägre mätosäkerhet och högre punkttäthet. De nyare modellerna som tillverkas är som regel bättre än de äldre som de ersätter. Därför är det intressant att undersöka hur stor förbättringen är när det gäller mätosäkerhet och kvaliteten hos en nyare modell av luftburna laserskanningsystem i jämförelse med en äldre.

Inom ramen för studien har en jämförelse mellan DJI Zenmuse L2 och dess föregångare DJI Zenmuse L1 genomförts. Målet var att göra en ingående analys av enheterna med avseende på hur bra de presterar och hur användbara de är. Sensorernas prestanda undersöktes i fält genom att ett och samma område med varierande terräng och marktyp skannades med både Zenmuse L1 och Zenmuse L2. Insamlingen gjordes med sex flygningar där L1 och L2 var inställd på en, två och tre returer som sedan jämfördes mot varandra. Syftet var att avgöra vilken mätosäkerhet punktmolnen har. Kontrollprofiler och stödpunkter mättes med en totalstation enligt SIS-TS 21144:2016. DTM:er skapades från punktmolnen och utifrån jämförelser mellan DTM:erna och kontrollprofilerna beräknades standardavvikelse och medelavvikelse.

Utifrån analys av Zenmuse L1 och Zenmuse L2 gav det ett resultat som visar på att det inte har en sån stor skillnad mellan varandra i mätosäkerhet. I medelavvikelse var skillnad mellan L1 och L2 0,0113 m för retur 1, 0,0065 m för retur 2 och 0,0237 m för retur 3. I standardavvikelse blev skillnaden 0,0097 m för retur 1, 0,0052 m för retur 2 och 0,0016 m för retur 3. Medelavvikelsen blev bättre för L1 vid retur 2 och 3 men vid standardavvikelsen fick L2 ett bättre resultat än L1.

Nyckelord: Laserskanning, UAV, UAS-LiDAR, drönare, luftburen laserskanning, DTM

Abstract

The development of airborne laser scanner systems is occurring rapidly. They are becoming more compact and achieving better results with lower measurement uncertainty and higher point density. The newer models that are produced are usually better than the older ones they replace. That is why it is interesting to investigate how significant the improvements are in terms of measurement uncertainty and quality when comparing a newer model of airborne laser scanning system in comparison to an older one.

Within the framework of the study, a comparison between DJI Zenmuse L2 and its predecessor DJI Zenmuse L1 has been carried out. The goal was to do an in-depth analysis of the devices in terms of their performance and usefulness. The performance of the sensors was investigated in the field by scanning the same area with varying terrain and soil types with both the Zenmuse L1 and Zenmuse L2. The data collection was done with six flights where L1 and L2 were set to one, two and three returns. These settings were then compared against each other. The purpose was to determine the measurement uncertainty of the point clouds and how well ground classification can be performed. Control profiles and check points were measured with a total station according to SIS-TS 21144:2016. DTMs were created from the point clouds and from comparisons between the DTMs the standard deviation and mean deviation of the control profiles were calculated.

Based on analysis of Zenmuse L1 and Zenmuse L2, the result shows that there is not such a significant difference between them in measurement uncertainty. In terms of mean deviation, difference between L1 and L2 was 0,0113 m for return 1, 0,0065 m for return 2 and 0,0237 m for return 3. In terms of standard deviation, the difference was 0,0097 m for return 1, 0,0052 m for return 2 and 0,0016 m for return 3. The mean deviation was better for L1 on returns 2 and 3 but on the standard deviation L2 achieved a better result than L1.

Keywords: Laser scanning, UAV, UAS-LiDAR, drones, airborne laser scanning, DTM

Förord

Tre lärorika år har gått förbi i rasande fart på lantmätarprogrammet och tar slut med det här examensarbete. Jag vill tacka alla lärare som har fyllt de här tre åren med lärorika föreläsningar som har gett mig den kunskap som jag har idag.

De här examensarbete hade inte kunnat genomföras utan Joachim Stenberg från UAS Intelligence Sweden som bidrog med väldigt mycket kunskap om flygning med UAV och kom med goda råd.

Sen vill jag tacka min handledare Ulrika Ågren som har kommit med givande och betydande synpunkter för utformningen av examensarbetet.

Sist men inte minst vill jag tacka mina klasskamrater och andra studenter som har gjort de här tre åren värda att minnas.

Jakob Salomonsson

Innehållsförteckning

Sammanfattning	Error! Bookmark not defined.
Abstract	i
Förord	iii
Innehållsförteckning	iv
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och mål	3
1.3 Frågeställningar	3
1.4 Avgränsningar	4
2 Teori	5
2.1 Tidigare studier	5
2.2 Reflektioner	7
3 Metod	8
3.1 Material	8
3.2 Flygning	12
3.3 Kontrollprofiler	14
3.4 Efterbearbetning	17
4 Resultat	19
5 Diskussion	32
5.1 För och nackdelar	32
5.2 Medelavvikelse och standardavvikelse för respektive profil	32
5.3 Medelavvikelse och standardavvikelse för området	33
5.4 Felkällor	33
5.5 Aspekter på miljö och hållbarutveckling	34
5.6 Etiska aspekter	34
6 Slutsats	35
Referenser	36
Bilaga A	A1
Bilaga B	B1
Bilaga C	C1

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Ett UAS (Unmanned Aerial System) bestående av en UAV (Unmanned Aerial Vehicle) kombinerad med en LiDAR-skanner (Light Detection and Ranging) är en bra kombination som erbjuder en effektiv geografisk och topografisk datainsamling (Zhang et al., 2016). Den är nu för tiden en viktig resurs inom olika mätningsområden. UAS med LiDAR erbjuder flexibilitet med låg mätosäkerhet för en mindre kostnad än andra luftburna alternativ, som till exempel flygplan eller helikopter. En stor fördel med ett UAS/LiDAR-system är att det har förmågan att komma åt svårtillgängliga eller farliga områden som en markbaserad laserskanner kan ha svårt att komma åt (Wallace et al., 2012). UAS/LiDAR-system kan vara snabbare att använda än markbaserad laserskanning när det kommer till att skanna ett större område, eftersom en UAV med LiDAR kan göra det snabbare än vad ett markbaserat system kan.

1.1.1 UAS-LiDAR

Laserskanning introduceras på 1980-talet inom forskningsvärlden och efter några år tillverkades den första laserskannern (Kolecka, 2011). Laserskanningssystem har genomgått en snabb utveckling sedan dess fram till nu 2024. I år finns det handhållna system, terrestra system där totalstation och laserskanner är kombinerade i en och samma enhet, samt luftburna system som är såpass kompakta och lätta att de kan monteras på en UAV.

Luftburen laserskanning började testas på 1980-talet men saknade då någon slags skanningsmekanik, vilket gjorde att de kallades för profilerande system. Under början av 1990-talet kom laserskannersystem på den civila marknaden. Som mycket annat har också laserskannersystemen gått via den militära utvecklingen (Olsson, 2014).

Utvecklingen av GNSS-tekniken (Global Navigation Satellite Systems) i kombination med IMU-teknik (Inertial Measurement Unit), även kallat tröghetsnavigering, har bidragit till att laserskanningstekniken fått ett stort genombrott inom mättekniken. Att både GNSS och IMU jobbar tillsammans med att registrera systemets rotationer, hastighetsändringar och position har gjort att punkter på marken har kunnat få en lägesosäkerhet på någon decimeter eller bättre (Olsson et al., 2014).

Denna studie går ut på att jämföra en äldre modell av luftburen laserskanner med en nyare. Modellerna som ska jämföras är DJI:s Zenmuse L1 och Zenmuse L2. Den UAV som användes är DJI:s Matrice 300 RTK (DJI, u.å.). Enheterna jämfördes i

olika terränger och marktyper för att se deras prestanda och vilka kvalitetsförbättringar som kan upptäckas hos L2 i jämförelse med L1.

I de tekniska specifikationerna för L1 och L2, i tabell 1 går det att se skillnader och likheter mellan de båda enheterna. L1 kan enligt specifikationerna till exempel täcka en area på 2 kvadratkilometer med en flygning, med en osäkerhet i vertikalled på 5 cm och 10 cm i horisontalled. L2 ska på en flygning täcka 2,5 kvadratkilometer med en osäkerhet på 4 cm i vertikalled och 5 cm i horisontalled. Från L1 till L2 har osäkerheten i vertikalled minskat med 1 cm i och osäkerheten i horisontalled har minskat med 5 cm. Skillnad med LiDAR:n är att L1 kan ge upp till 3 returerna medan L2 ger upp till 5 returerna trots att de har samma våglängd på lasern på 905 nanometer. L1 och L2 har olika varierande noggrannhet på LiDAR, 3 centimeter @ 100 meter för L1 och 2 centimeter på 150 meter för L2 (DJI, u.å.). Den varierande noggrannheten är ett viktigt index som avgör LiDAR-enhetens upplösningsförmåga (Yang, T. et al., 2024). DJI rekommenderar att värma upp IMU:erna hos L1 i 3 till 5 minuter innan en flygning. Vilket innebär att mer batterikraft går åt och man måste vänta tills man kan flyga med L1. L2 kan flyga när uppdraget har laddats upp till vilket är det som gör att L2 kan täcka 0,5 kvadratmeter mer än L1.

Tabell 1. En jämförelse av Zenmuse L1 och Zenmuse L2.

Specifikationer	L1	L2
Max returerna	3	5
Max täckningsgrad	2 km ²	2,5 km ²
Vertikal noggrannhet	5 cm	4 cm
Horisontell noggrannhet	10 cm	5 cm
Punktfrekvens 1 retur	240 000 pts/s	240 000 pts/s
Punktfrekvens multipla returerna	480 000 pts/s	1 200 000 pts/s
IMU	Värmas upp	Värms inte upp
Accelerometers räckvidd	±8 g	±6 g
Mättnoggrannhet	3cm @ 100 m	2 cm @ 150 m
Laserns våglängd	905 nm	905 nm
IMU uppdateringsfrekvens	200 Hz	200 Hz
Scannings mönster	Icke repetitiv och repetitiv mönster	

1.2 Syfte och mål

Syftet med studien är att jämföra Zenmuse L1 med Zenmuse L2 och se hur mycket bättre den nya versionen har blivit. Enheterna jämförs med varandra över en yta där det finns olika marktyper för att kunna se skillnaden mellan dem när det gäller att skapa en DTM och dess mätosäkerhet.

Syftet med att studera olika terräng- och marktyper (skog, öppen yta, vegetation och hårdgjord yta m.m.) är att geodetisk mätning vanligtvis inte sker i en och samma miljö utan skiljer sig åt från uppdrag till uppdrag. Att se för- och nackdelarna för L1 och L2 ger en bättre förståelse om vad respektive enhet kan användas till. För detta behöver varierade terrängtyper undersökas. Det kommer att leda till en bättre förståelse om vad L1 och L2 klarar av samt hur bra de fungerar med de olika terräng- och marktyper.

Målet med studien är att undersöka vilken mätosäkerhet punktmolnen får och hur bra de kan markklassas för L1 respektive L2. Det uppnås genom att skapa DTM:er från punktmolnen och kontrollera kvaliteten på DTM:erna. Kontrollprofiler och stödpunkter mäts med totalstation enligt SIS-TS 21144:2016.

Standardavvikelse/standardosäkerhet och medelavvikelse beräknas utifrån jämförelser mellan DTM:er och kontrollprofiler.

1.3 Frågeställningar

- Hur stor är skillnaden är det i medelavvikelse och standardavvikelse för DTM:er gjorda med Zenmuse L1 respektive Zenmuse L2 för de olika marktyperna skog, hårdgjord yta och låg/hög vegetation?
- Vilka andra begränsningar har de undersökta marktyperna för Zenmuse L1 respektive Zenmuse L2?
- Vilka skillnader finns mellan Zenmuse L1 och Zenmuse L2 när sensorerna använder 1, 2 respektive 3 retur?

1.4 Avgränsningar

Studien har begränsats på grund av tidsperioden och tillgång av utrustningen, Zenmuse L1, Zenmuse L2 och Matrice 300 RTK. Tillgången av utrustningen har gjort att det krävs operatörer som är villiga att ställa upp med utrustningen och förmågan att ha det som krävs för att framföra drönare i svenskt luftrum. Tidsramen på tio veckor har haft en inverkan på vad som är möjligt att utföra och hinna med. Vilket har lett till att flygningen bara kunde ske på en dag när operatör och utrustning var tillgänglig med hopp om att vädret inte skulle kunna sätta stopp för flygningen. Examensarbetet har utförts med sex flygningar, tre med Zenmuse L1 och tre med Zenmuse L2 med inställningarna 1, 2 och 3 retur för respektive flygning. På grund av det ska detta examensarbete ses som en förstudie.

2 Teori

2.1 Tidigare studier

2.1.1 Unmanned Aerial Vehicle

Unmanned Aerial Vehicle även kallad för UAV är en luftburen drönare som kan användas till många varierande arbetsuppgifter inom olika områden, till exempel sjukvård, transport och mätning. Inom mätning och 3D modellering är UAV ett bra och billigt verktyg att använda inom olika luftburna mätningar i jämförelse med traditionella metoder i stora områden. Till exempel kan det behövas minst en person och en UAV med LiDAR-skanner för att skanna in ett område och få en lägre punkttäthet än ett flygplan skulle få, där det behövs en besättning på minst 3 personer. UAV gör det lättare för en användare som vill skanna in ett område fotogrammetriskt eller med ett LiDAR-system. En ensam användare kan göra det utan några större omständigheter. Det leder till en utökad förståelse över området samt att miljön blir mindre påverkad (Nex & Remondino, 2014).

Resop et al. (2019) gjorde en jämförelse av laserskanning med drönare mot traditionell flygbaserad laserskanning. Syftet med studien var att modellera ett flodlandskaps topografi och vegetation. Drönaren och sensorn som användes i studien var en Vapor 35 och en YellowScan surveyor Core LIDAR-skanner. Resultatet visade att punkttätheten och klassificeringen fick ett bättre resultat med flygningen med drönare än med flygbaserad flygning (Resop et al. 2019)

2.1.2 DJI Zenmuse L1 mot andra LiDAR-system

I Aksén (2023) jämfördes Zenmuse L1 med RIEGL miniVUX-1DL. Enheterna har hade olika prisklasser vilket leder till Akséns syfte med att se vilken av dem som presterade bäst där fokuset låg på att studera osäkerheten när digitala terrängmodellerna skapades. Eftersom det var två olika enheter som jämfördes krävdes två olika UAV:er. L1 flögs med DJI Matrice 300 RTK och RIEGL med Microdrones md4-3000. Studien utfördes i Rörberg på en grustäkt. Stödpunkter, kontrollpunkter och kontrollprofiler mättes in som sedan användes för att kontrollera punktmolnet. Trimble S5 användes för att mäta in stöd och även kontrollpunkterna. I efterbearbetningen användes programmet TerraScan för att passa in och kontrollera punktmolnet och för att skapa en DTM användes TerraModeler. Aksén (2023) kom fram till att RIEGL- systemet resulterade i en lägre avvikelse av punktmolnet från kontrollpunkterna (Aksén, 2023).

Kersten et al. (2022) har gjort en studie med Zenmuse L1 där de undersöker vilken mätosäkerhet den har med en Matrice 300 RTK. I undersökningen skannades tre områden i Hamburg, Tyskland. Område 1 bestod av marksten, betong och sand,

område 2 bestod av bara marksten, och område 3 bestod av träd, sand och gräs. Keresten et al. (2022) gjorde två flygningar med L1 på flyghöjden 50 meter och en flygning på 90 meter. De tre olika flygningarna hade sina egna parametrar med olika skanningsmönster, vilket genererade olika resultat och punkttäthet. Det gjordes också en koordinatjämförelse mellan stödpunkterna mot referensytor som hade skapats tidigare efter en terrester laserskanning. Resultatet redovisade höjdavvikelse som jämförde punktmolnet mot 44 stödpunkter. Flygningarna med ett repetitivt mönster resulterade i medelavvikelse 0,000 m, standardavvikelse 0,015 m maxavvikelse 0,039 m och minavvikelse -0,032 m på 50 m flyghöjd. 90 m flyghöjd resulterade i medelavvikelse -0,002 m, standardavvikelse 0,013 m, maxavvikelse 0,041 m och minavvikelse -0,036 m. Tredje flygningen som skedde med ett icke repetitivt mönster hade en flyghöjd på 50 m vilket resulterade i medelavvikelse 0,006 m, standardavvikelse 0,015 m, maxavvikelse 0,035 m och minavvikelse -0,030 m (Keresten et al., 2022).

2.1.3 DJI Zenmuse L2

Det finns inga tidigare vetenskapliga studier där DJI Zenmuse L2 har använts. Detta kan bero på att L2:an introducerades på marknaden i februari 2024 (DJI, u.å.).

2.1.4 Digital terrängmodell

En DTM (Digital Terrain Model) är en digital markmodell som beskriver terrängens eller markens form, vilket betyder att vegetation, byggnader och andra konstruktioner tas bort digitalt (European Environment Agency, u.å.). För att skapa en DTM mäter man in punkter med till exempel en totalstation, GNSS eller laserskanner från marken eller från luften. Punkterna som mäts in används sedan för att interpolera höjdvärden i andra punkter eller för att skapa en DTM i rasterformat. Ofta sammanknyts punkterna i en triangelstruktur (TIN, Triangular Irregular Network) som sedan kan användas för linjär interpolation. Ju tätare punkter som mäts in, desto mer kommer DTM:en att efterlikna verkligheten. Vid skapandet av digitala terrängmodeller ska möjliga felkällor tas hänsyn till och kompenseras för eller korrigeras. Många felkällor kan påverka resultatet under insamlingen. Felkällor som kan uppstå när det gäller insamling med UAV är UAV:ens navigering och positionering. Det här felet kan även uppstå i LiDAR-sensorn. Geometriska felkällor kan orsakas av flyghöjden, avsökningsvinkeln eller studieområdets topografi. Under efterbearbetning kan felkällor som har att göra med stråkutjämning och interpolation uppstå (Stal et al., 2011).

2.2 Reflektioner

Eftersom det inte finns några tidigare studier som har använt Zenmuse L2 är det svårt att dra en slutsats av vad som kan förväntas av studien. Man kan få en liten avbild av vad man kan förvänta sig när man läser de tekniska specifikationerna för Zenmuse L1 och Zenmuse L2.

Med Akséns resultat ser man att Zenmuse L1 kan prestera näst intill lika bra som RIEGL miniVUX-1DL som var en dyrare variant av LiDAR system vid studiens tidpunkt.

3 Metod

Insamlingen med Zenmuse L1 och Zenmuse L2 gjordes med UAV:en Matrice 300 RTK som är tillverkad av DJI. Studieområdet har en varierande terräng med öppen yta, buskage, skog och hårdgjordyta. Studieområdet kallas för Alderholmen som är en udde vid Gävle hamn som ligger i östra delen av Gävle stad. Flygningen täckte ett lämpligt område med flera olika marktyper. Det genomfördes sex flygningar, tre med L1 och tre med L2. Både L1 och L2 flögs med inställningen en, två och tre returer. De insamlade punktmolnen användas för att skapa DTM:er över området. Totalstations etableringen med RUFRIIS gjordes efter Andersson (2011). Kontrollprofiler följde hänvisningarna i SIS-TS 21144:2016 för utförande B.

3.1 Material

3.1.1 Mätutrustning

Mätutrustningen som användes för att samla in kontrollprofiler och mäta in GCP:er användes multistationen Trimble SX12 och GNSS-mottagaren Trimble R12i användes för att göra stationsetablering med Realtidsuppdaterad fri station (RUFRIIS). Både SX12 och R12i använde en Trimble TSC7 handdator. Insamling med LiDAR-enheterna utfördes med Zenmuse L1 (figur 1) och Zenmuse L2 (figur 2) som flögs med Matrice 300 RTK (figur 3).



Figur 1. LiDAR-sensorn Zenmuse L1 (<https://dronarbutiken.se/products/dji-l1-lidar>).



Figur 2. LIDAR-sensorn DJI Zenmuse L2 (<https://enterprise.dji.com/zenmuse-l2>).



Figur 3. UAV:en DJI Matrice 300 RTK.

3.1.2 Programvaror

Programvarorna som har använts är DJI Terra för att konvertera LiDAR-filerna som Zenmuse L1 och Zenmuse L2 skapade till filer som sedan kunde arbetas med i Trimble Business Center (TBC). TBC användes för att rensa bort onödiga punkter och brus samt markklassificera punktmolnen, som sedan användes för att skapa en DTM. Kontrollen av DTM:erna gjordes i SBG Geo Professional där den inbyggda funktion användes i Geo där en terrängmodell subtraheras med en koordinatfil. Funktionen ger en ny koordinatfil i Geo som sedan infördes in i Microsoft Excel för att räkna ut höjdavvikelse, medelavvikelse, standardavvikelse och min-/maxavvikelse enligt SIS-TS 2144:2016.

3.1.4 Insamlingsområdet

Studieområdet för examensarbetet är beläget i Gävle, invid kusten (se figur 4). Området omfattar fyra marktyper: hårdgjordyta, ett mindre skogsområde och två typer av öppen yta (en täkt med grus och ett överväxt med buskage), se figur 4 - 8.



Figur 4. Studieområdet på Alderholmen (bild tagen från lantmäteriet.se).



Figur 5. Marktypen grus i studieområdet på Alderholmen.



Figur 6. Marktyperna buskage och skog i studieområdet på Alderholmen.



Figur 7. Marktyperna skog (till vänster i bilden), hårdgjord yta i mitten och grus till höger i studieområdet på Alderholmen.



Figur 8. Marktyperna skog och hårdgjord yta i studieområdet på Alderholmen.

3.2.5 Litteratur

Litteratur som har använts i arbetet är dokumentation från Andersson, PM Underlag till metodbeskrivning RUFRIIS (2011) för stationsetablering med RUFRIIS-metoden, SIS-TS 2144:2016 för skapande av kontrollprofiler och kontroll av DTM:er, samt vetenskapliga artiklar om punktmolnsjämförelser.

3.2 Flygning

Flygningen med Zenmuse L1 och Zenmuse L2 gjordes med en Matrice 300 RTK som flögs av Joachim Stenberg från UAS Intelligence. Uppdraget och parametrarna gjordes i handkontrollen med programvaran DJI Terra. Parametrarna till uppdragen inbegriper en flyghöjd på 50 meter och en hastighet på 8 meter per sekund. Studieområdet var Alderholmen i Gävle. Alderholmen är en udde som ligger vid hamnen i Gävle (figur 4).

Med diskussion med Ulrika Ågren och Joachim Stenberg skulle sex flygningar genomföras med olika retururer. Vi kom fram till att Zenmuse L1 och Zenmuse L2 skulle flygas tre gånger med respektive en, två och tre retururer. Sammanlagt gjordes 2 uppdrag med samma parametrar, en för L1 och en för L2. Det behövdes göras då L2 behövde en annan handkontroll än L1. L1 flögs tre gånger med olika retururer en,

två och tre. L2 flögs tre gånger med samma retur som L1 en, två och tre för att dessa skulle kunna jämföras mot varandra.

Under flygningen med Zenmuse L1 såg väderförhållandena ut som i figur 9 (till vänster). Denna visar en vindhastighet på 7 meter per sekund med vindbyar på 14 meter per sekund. Enligt UAV Forecast rekommenderades det inte att flyga på grund av de dåliga väderförhållandena. Flygningen genomfördes trots det utan några incidenter. Under flygningen med Zenmuse L2 såg väderförhållandena ut som i figur 9 (till höger). Den visar en vindhastighet på 5 meter per sekund med vindbyar på 12 meter per sekund. Det var bättre väderförhållanden än flygningen med Zenmuse L1. UAV Forecast rekommenderade inte att flyga med de väderförhållanden som var. Flygningen med L2 genomfördes ändå utan några incidenter.



Figur 9. Väderförhållandena för flygningen med Zenmuse L1 (vänster) och flygningen med Zenmuse L2 (höger).

3.3 Kontrollprofiler

Etablering av totalstationen gjordes enligt RUFRIIS (Andersson, 2016), med 15 bakåtoobjekt där 6 stycken var bakåtoobjekt som sattes ut med mätspik för att användas som kontrollpunkter för att kontrollera stationen före och efter mätning. Efter varje batteribyte och paus för att flyga gjordes en kontroll av Trimble SX12:ans libell för att se att den inte hade rubbat ut ur tolerans.

Kontrollprofilerna mättes in med Trimble SX12 med minst 20 meter i längd och minst 20 punkter med max 3 meter mellan punkterna enligt SIS/TS 21144:2016. Kontrollprofilerna räknades ut med en teoretisk area på området som var 41 500 kvadratmeter. Där 5 200 kvadratmeter bestod av hårdgjord yta, 9 500 kvadratmeter öppet område grus, 17 300 kvadratmeter öppet område buskage och 9 500 kvadratmeter skogsområde, se figur 10 för visualisering för uppdelning av området. Detta resulterade i 3 kontrollprofiler för hårdgjord yta, 6 för grus, 10 för buskage och 6 för skog enligt utförande B (utökad levernaskontroll för att utvärdera systematiska fel, modells användbarhet för projektering och byggande) i SIS-TS 21144:2016 med ekvationen (1). Visualisering för RUFRIIS uppställning visas i figur 11 och kontrollprofilernas utsättnings visas i figur 13.

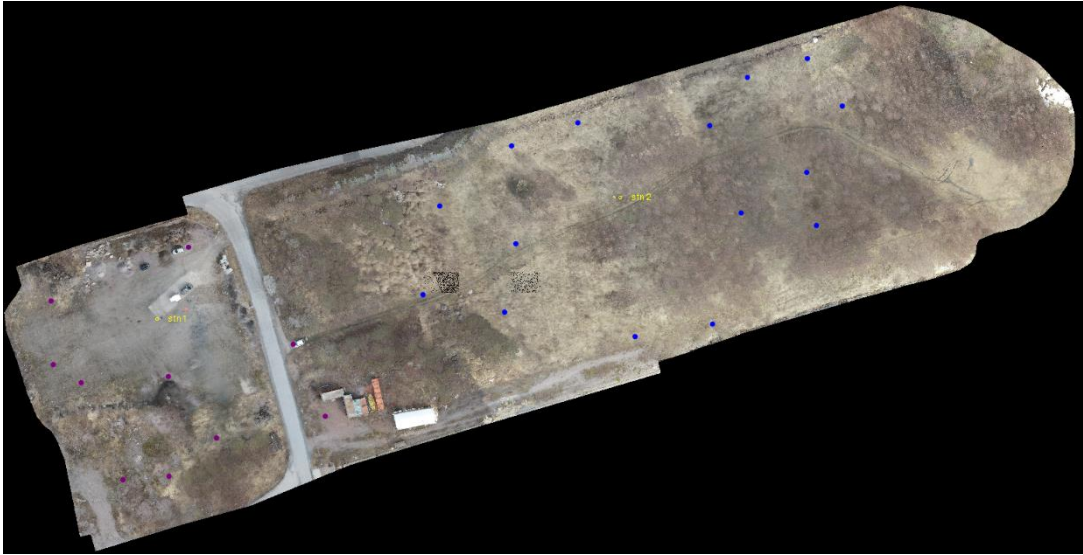
$$5N + 2\sqrt{A} \quad (1)$$

N är antal marktyper

A är hela områdets area (anges i hektar)



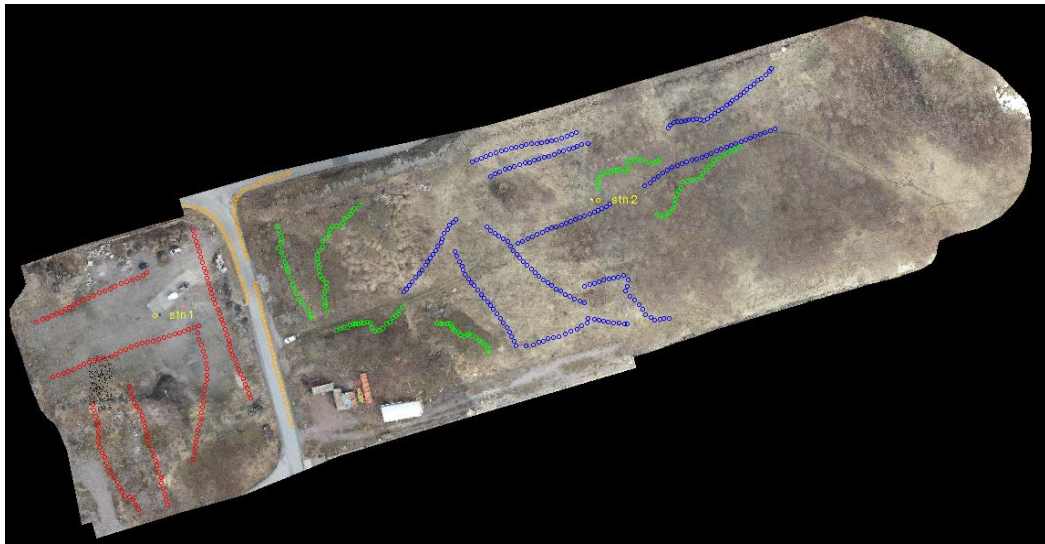
Figur 10. Studieområdet Alderholmen med de teoretiska marktyperna (bild hämtad från lantmäteriet.se).



Figur 11. Stationsetableringar med visualisering av bakåtoobjekten och kontrollpunkternas spridning i området. Stationerna är gula, bakobjekt för etablering för station 1 är i lila och bakobjekt för etablering för station 2 är i blått (punktmolnet är ifrån L1 retur 3).



Figur 12. Stationsetablering med RUFRIIS-metoden med ett bakåtoobjekt.



Figur 13. Kontrollprofilernas fördelning i området. Röd visar kontrollprofiler för grus, orange för hårdgjord yta, grön skog och blå buskage (punktmolnet är ifrån L1 retur 3).

3.4 Efterbearbetning

De exporterade dataseten från Zenmuse L1 och Zenmuse L2 lades in i DJI Terra för att konverteras till las fil. Konverteringen genomfördes på grund av att L1 och L2 inte själva skapar dessa filer. Med filerna skapades också en rapport som sammanställde information om flygtid och osäkerhet (se bilaga B). I rapporterna kan vi se att flygningarna med L2 har fått en varningsmeddelande som säger att flygningens L2 kan ha en osäkerhet beroende på att den har tappat 2 satelliter under flygningen.

För att skapa DTM:erna användes Trimble Business Center (TBC). I TBC markklassificerades punktmolnen och rensades på onödiga punkter som inte behövdes för att skapa en DTM.

Kontroll av DTM:erna gjordes i SBG Geo Professional (Geo). För att använda markmodellen från TBC var modellerna tvungna att vektoriseras vilket gjordes för att Geo skulle kunna skapa en DTM som den kunde använda. Kontrollen genomfördes i Geo genom att använda funktion som finns, där programmet tar terrängmodell minus en koordinatfil (kontrollprofilerna) för att få ut skillnaden mellan DTM och kontrollprofilen. Denna fördes sedan in i ett Excel-dokument för att räkna ut höjdavvikelse, medelavvikelse, standardavvikelse, och min-/maxavvikelse enligt SIS-TS 2144:2016.

Höjdavvikelsen mellan markmodellens höjd och kontrollmätt höjd beräknades vid varje inmätt kontrollpunkt i profilen. För att få markmodellens höjd i en enskild punkt används det inmätta planläget för att interpolera fram en höjd ur modellen. Ekvationen som används anges i ekvation (2).

$$Ah = Th - Kh \quad (2)$$

Ah är höjdavvikelsen

Th är markmodellens höjd i kontrollprofilen

Kh är kontrollpunktens höjd

Medelavvikelsen för varje enskild profil räknades ut i Excel med ekvationen (3).

$$Map_t = \frac{\sum_{i=1}^n Ah_i}{n} \quad (3)$$

Map_t är medelavvikelsen för varje enskild profil

n är antal mätta punkter i profilen

Standardavvikelsen i varje enskild profil räknades ut i Excel med ekvationen (4).

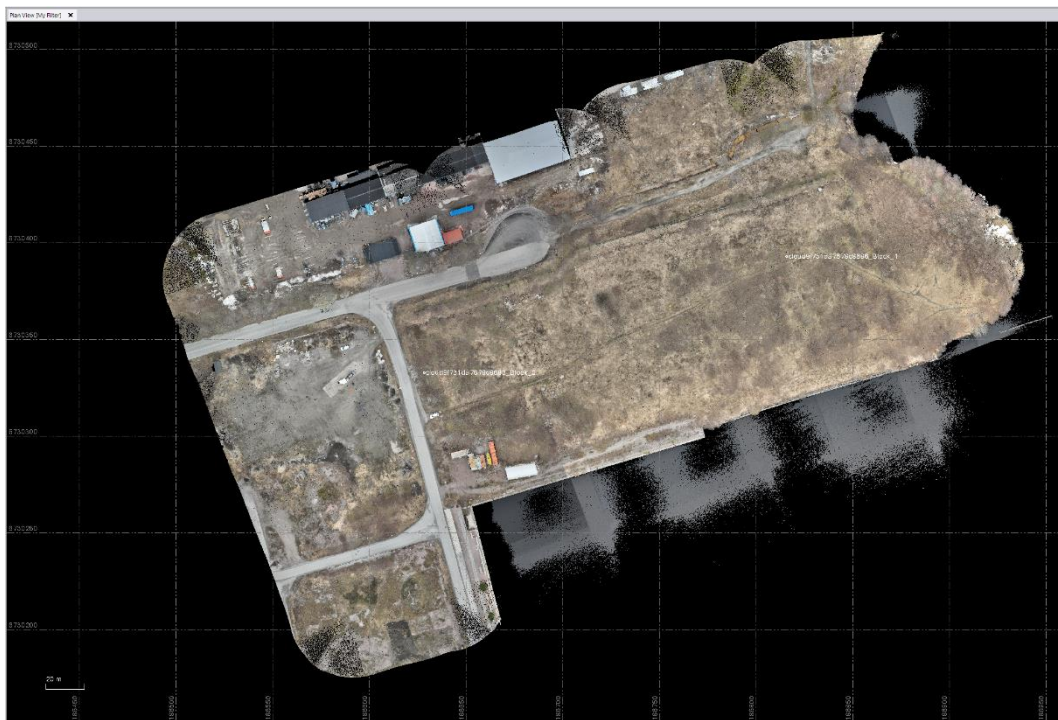
$$S_{pt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ah_i - Map_t)^2}{n - 1}} \quad (4)$$

S_{pt} är standardavvikelsen i varje enskild profil

4 Resultat

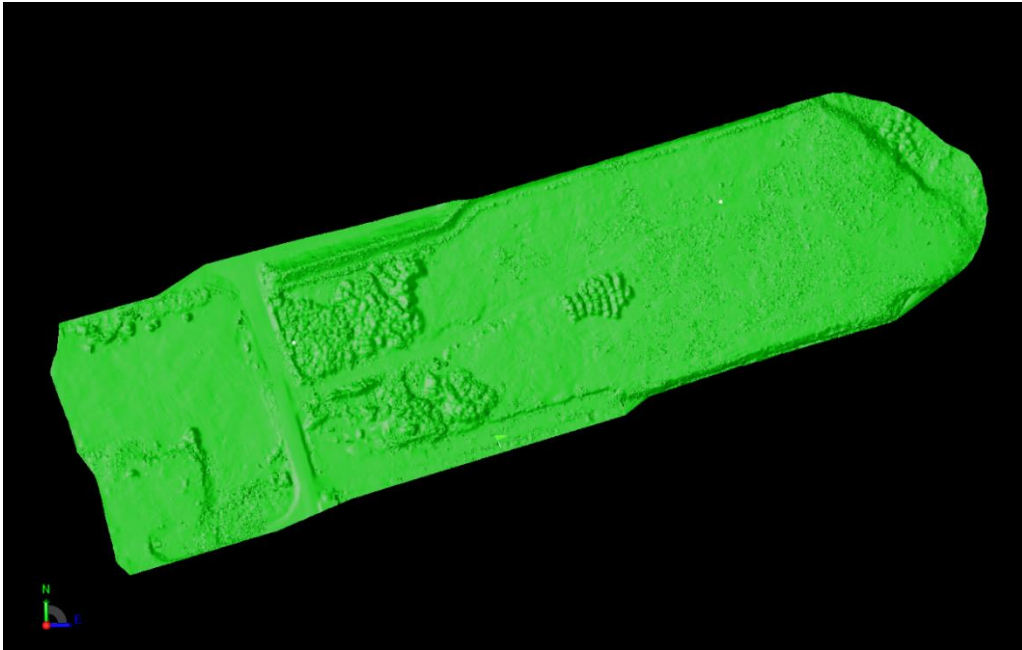
Resultatet av konverteringen i DJI Terra resulterade i modellerna, RGB, reflektants och höjddata. Flygning där inställningarna var satt på fler returerna gavs det ut modeller om hur returerna har registrerats. Med Zenmuse L2 gav DJI Terra ut det som har nämnts samt digital ytmodell och markklassificering. Dessa visas i bilaga C, C1 till C7.

Punktmolnen som konverterades i DJI Terra till las fil format och som sedan importerades till Trimble Business Center (TBC). Figur 14 visar punktmolnet L2 retur 3 i TBC. I bilaga C, C8 till C12 visar punktmolnen för Zenmuse L1 och Zenmuse L2 för en, två och tre returerna.



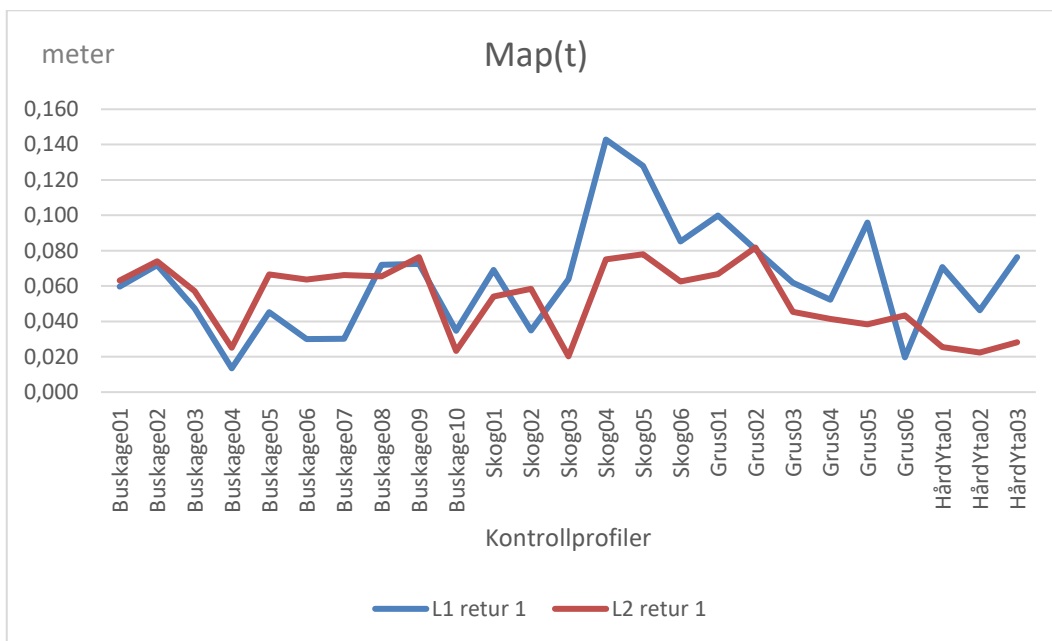
Figur 14. Punktmolnet för L2 retur 3 i TBC.

Figur 15 visar den digitala terrängmodellen som skapades i TBC för L2 retur 3. I bilaga C, C13 till C17 visar de skapade digitala terrängmodellerna för Zenmuse L1 och Zenmuse L2 i TBC.

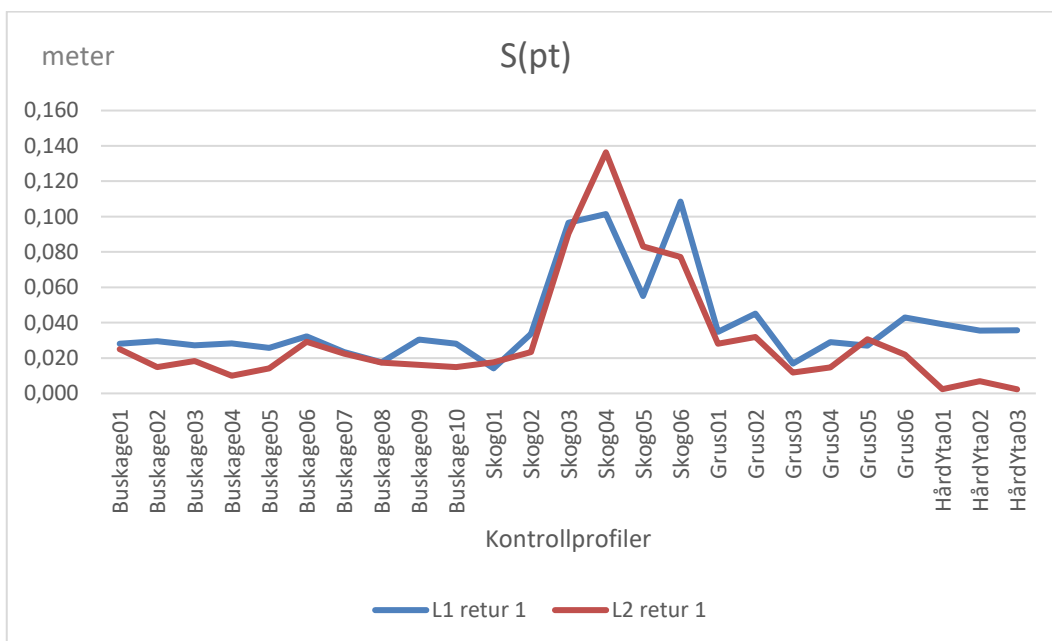


Figur 15. DTM av Zenmuse L2 med 3 returer i TBC.

I bilaga A visas resultatet av kontrollen av markmodellerna från Microsoft Excel. Standardavvikelsen och medelavvikelsen för respektive kontrollprofil för varje flygning visas i figur 15 till 20 med data från bilaga A.



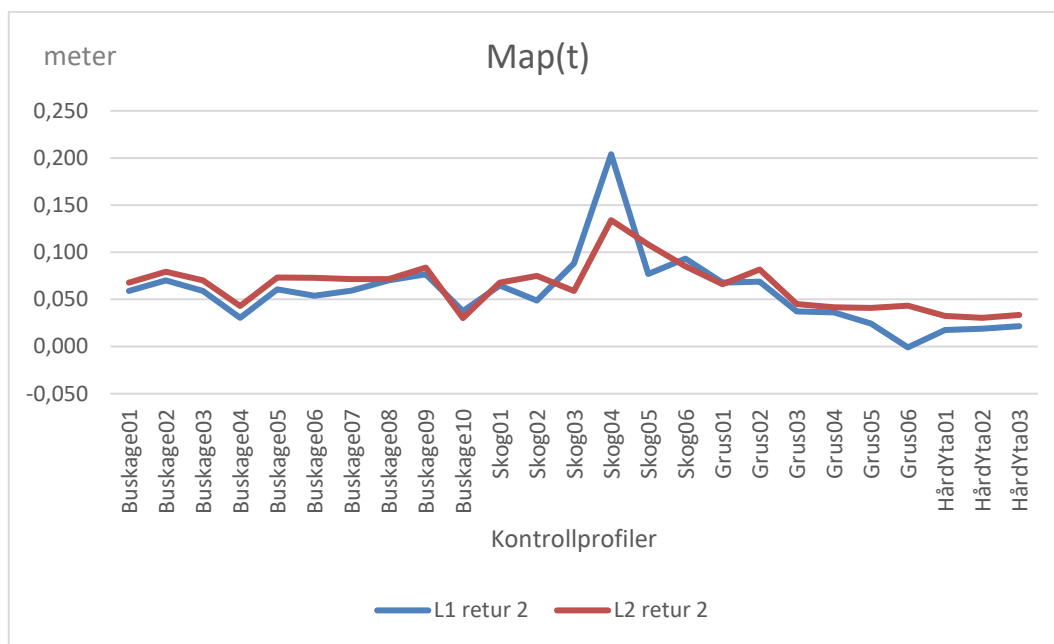
Figur 15. Jämförelse i medelavvikelse mellan L1 retur 1 och L2 retur 1.



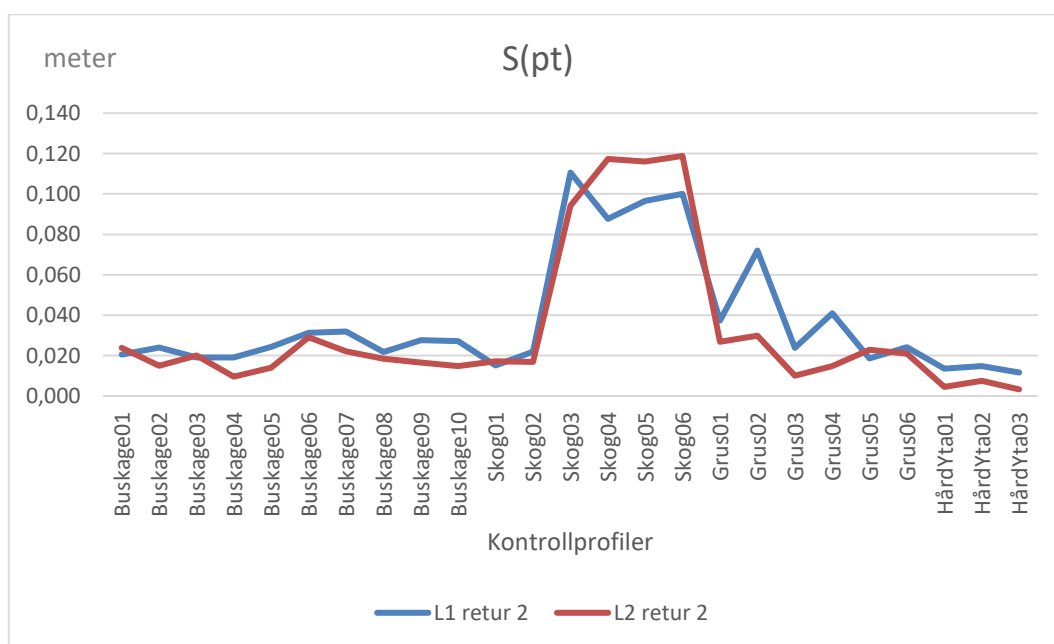
Figur 16. Jämförelse i standardavvikelse mellan L1 retur 1 och L2 retur 1.

I figur 15 och 16 visas resultatet för flygningen där Zenmuse L1 och Zenmuse L2 var inställd på 1 retur. I figur 16 mellan buskage 05 och buskage 08 är det en skillnad på ungefär 0,02 meter mellan L1 och L2 där L2 har ett högre värde än L1, vid kontrollprofil skog 02 går L1 om L2 till ett maxvärde på ungefär 0,140 meter.

Diagrammet är spretigt men L2 håller en jämnare linje än L1. I figur 16 följer L1 och L2 varandra mer men L2 sticker snabbt upp till ungefär 0,140 meter men sen går ner under L1 igen. Kontrollprofilerna i skogen sticker väldigt mycket ut i jämförelse med de andra, där kontrollprofil skog 04 sticker ut mest. Det kan bero på att L1 retur 1 och L2 retur 1 saknar data i punktmolnet vid skogsområdet (bilaga C8 och C11).

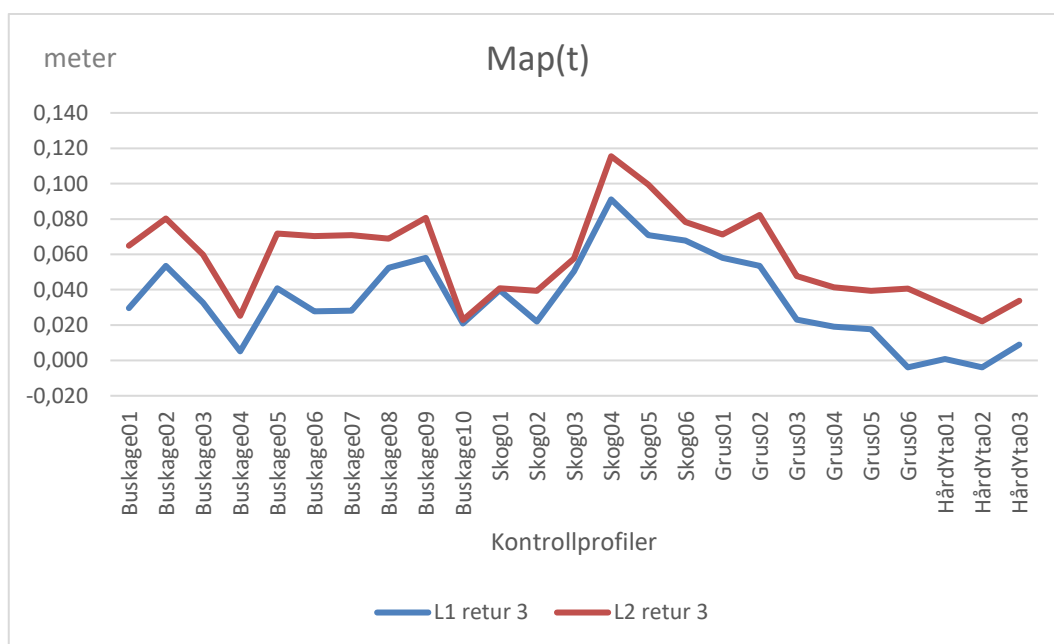


Figur 17. Jämförelse i medelavvikelse mellan L1 retur 2 och L2 retur 2.

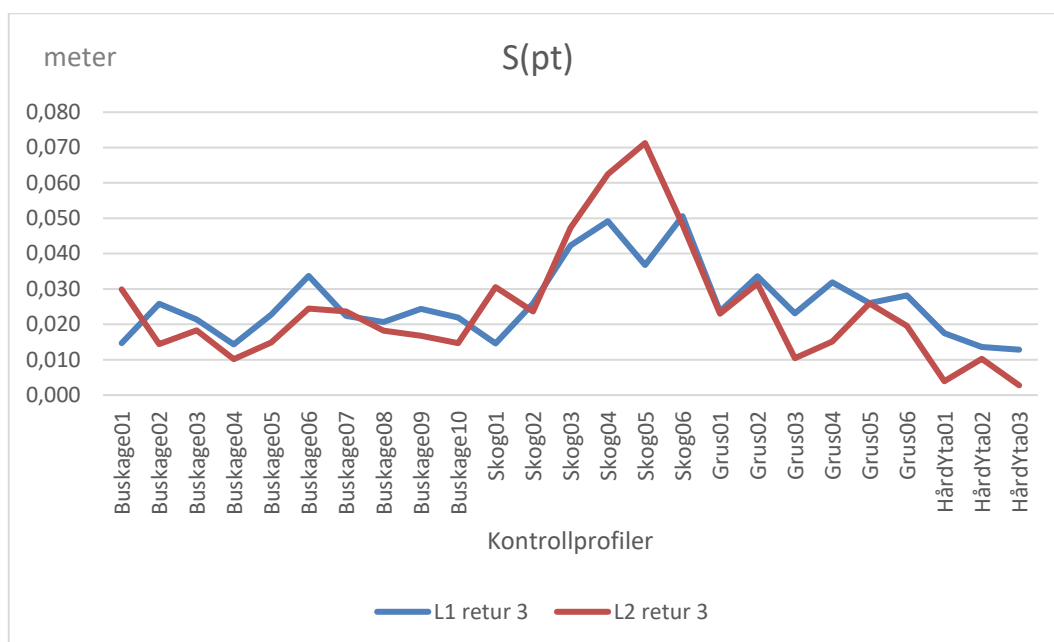


Figur 18. Jämförelse i standardavvikelse mellan L1 retur 1 och L2 retur 2.

Jämförelse med diagrammen för flygningen med 2 returer (figur 17 och 18) visar att Zenmuse L1 har lite högre värden än Zenmuse L2 förutom vid kontrollprofilen skog 04 där L1 når ett värde på ungefär 0,200 meter. Men med standardavvikelsen (figur 18) har L2 ett lägre värde än L1 bortsett från vid kontrollprofilerna skog 03 till 06. Detta kan bero på att det saknas data i punktmolnet vid kontrollprofilerna (bilaga C12).



Figur 19. Jämförelse i medelavvikelse mellan L1 retur 2 och L2 retur 3.



Figur 20. Jämförelse i standardavvikelse mellan L1 retur 3 och L2 retur 3.

Flygningen med retur 3 kan man se i diagrammet för medelavvikelse (figur 19) att Zenmuse L2 har ett högre värde än Zenmuse L1 för samtliga kontrollprofiler, linjerna i diagrammet följer varandra lite i formen med några undantag i vissa kontrollprofiler. I diagrammet för standardavvikelsen (figur 20) går L1 och L2 om varandra en del men L2 stick ut vid kontrollprofilerna skog 03 till 06 där L2 når ett värde på ungefär 0,070 meter när L1 har ett värde på ungefär 0,040 meter.

I tabellerna 2 till 3 kan man se medelavvikelsen och standardavvikelsen för respektive för respektive buskage, skog, grus och hårdgjordyta marktyster. Tabellerna jämförs för varje retur och visualiseras i figur 21 till 26.

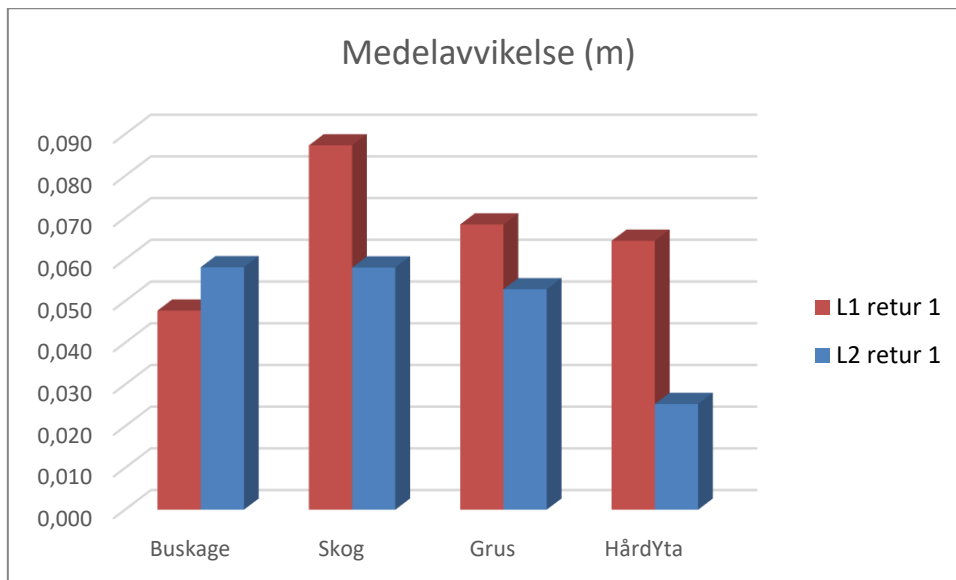
Tabell 2. Zenmuse L1 medelavvikelse och standardavvikelse för varje kontrollprofiler för flygning med 1 retur, 2 returer och 3 returer.

	Medelavvikelse (m)	Standardavvikelse (m)
L1 retur 3		
Buskage	0,035	0,022
Skog	0,057	0,037
Grus	0,028	0,028
HårdYta	0,002	0,015
L1 retur 2		
Buskage	0,058	0,025

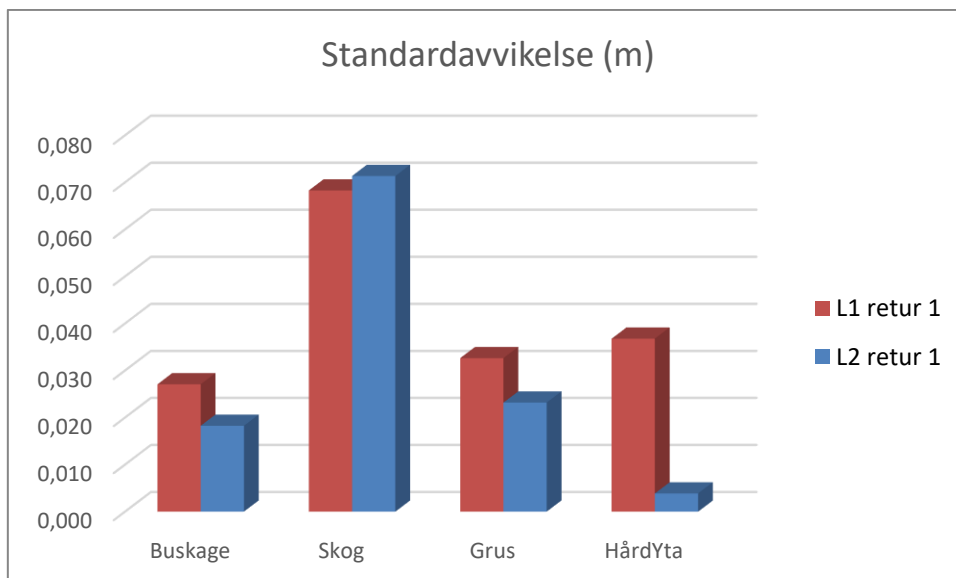
Skog	0,096	0,072
Grus	0,039	0,036
HårdYta	0,019	0,013
L1 retur 1		
Buskage	0,048	0,027
Skog	0,087	0,068
Grus	0,068	0,033
HårdYta	0,064	0,037

Tabell 3. Zenmuse L2 medelavvikelse och standardavvikelse för varje kontrollprofiler för flygning med 1 retur, 2 returer och 3 returer.

	Medelavvikelse (m)	Standardavvikelse (m)
L2 retur 3		
Buskage	0,062	0,019
Skog	0,072	0,047
Grus	0,054	0,021
HårdYta	0,029	0,006
L2 retur 2		
Buskage	0,066	0,018
Skog	0,088	0,080
Grus	0,053	0,021
HårdYta	0,032	0,005
L2 retur 1		
Buskage	0,058	0,018
Skog	0,058	0,071
Grus	0,053	0,023
HårdYta	0,025	0,004

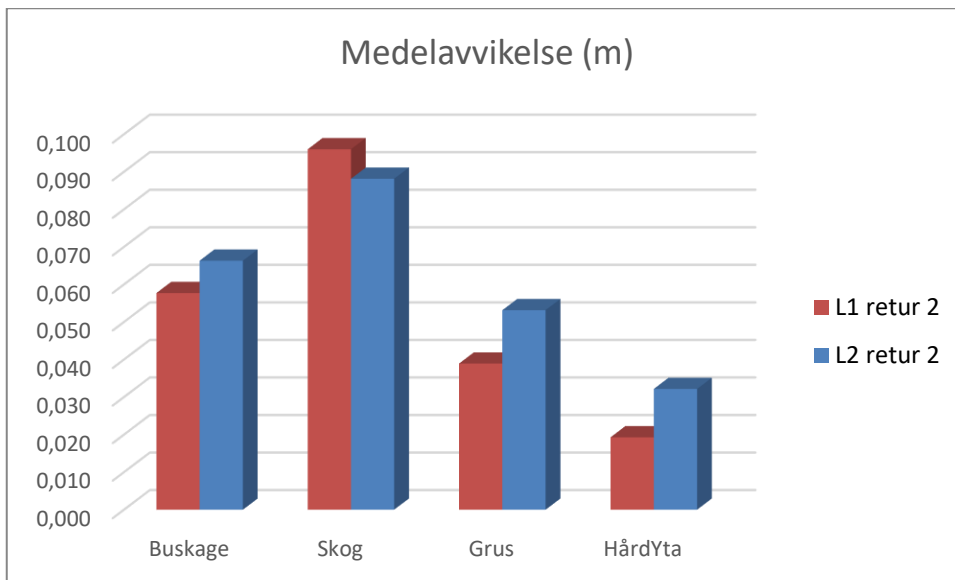


Figur 21. Jämför medelavvikelsen mellan Zenmuse L1 och Zenmuse L2 för retur 1.

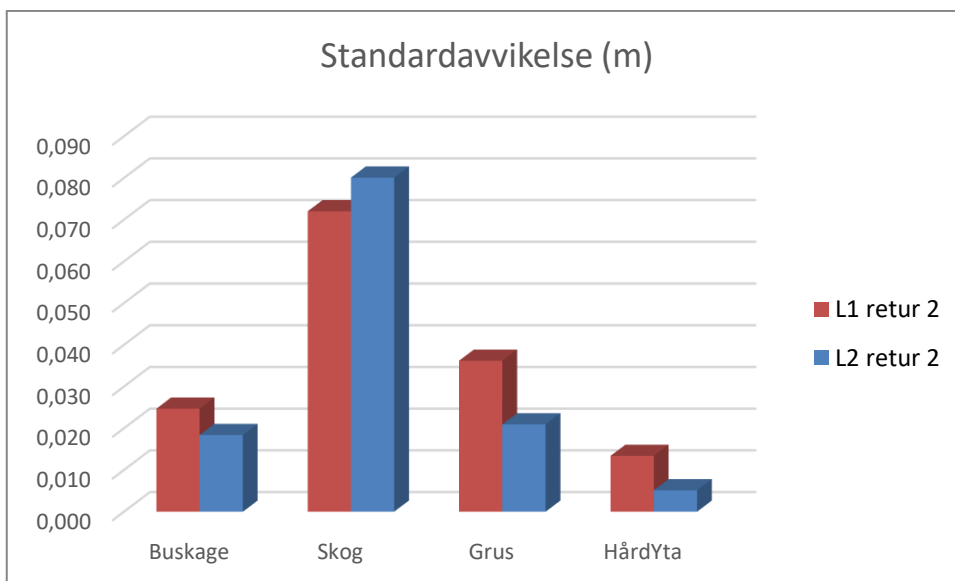


Figur 22. Jämför standardavvikelsen mellan Zenmuse L1 och Zenmuse L2 för retur 1.

I figur 21 kan man se att Zenmuse L2 har ett betydligt lägre värde än Zenmuse L1 i medelavvikelse för kontrollprofilerna skog, grus och hårdgjord yta. Kontrollprofil buskage har L1 ett bättre värde men inte med en stor skillnad som L2 har emot L1 på de andra kontrollprofilerna. Med standardavvikelsen som visas i figur 22 kan man se att L2 har ett lite högre värde på kontrollprofil skog men på med de andra har L2 ett lägre värde speciellt på hårdgjord yta.

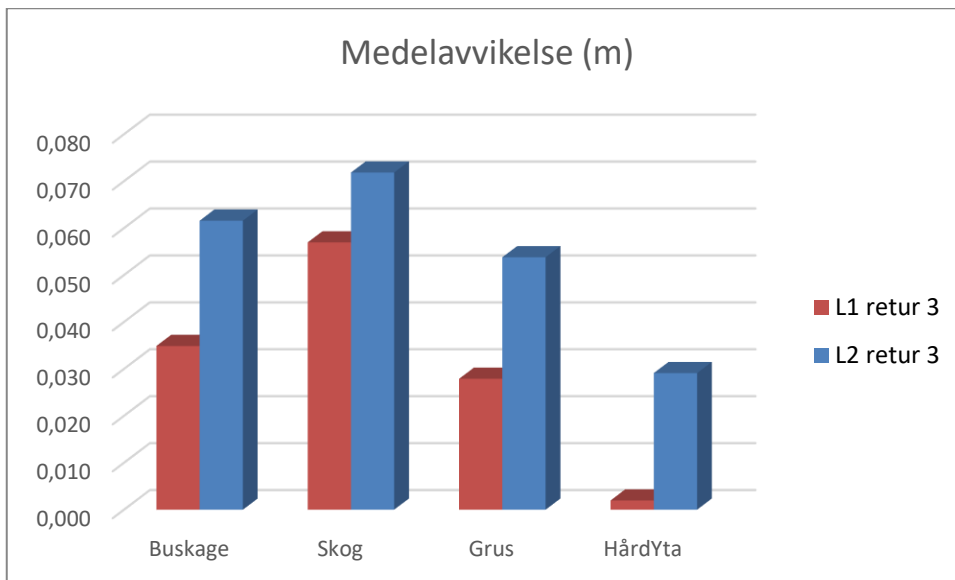


Figur 23. Jämför medelavvikelsen mellan Zenmuse L1 och Zenmuse L2 för retur 2.

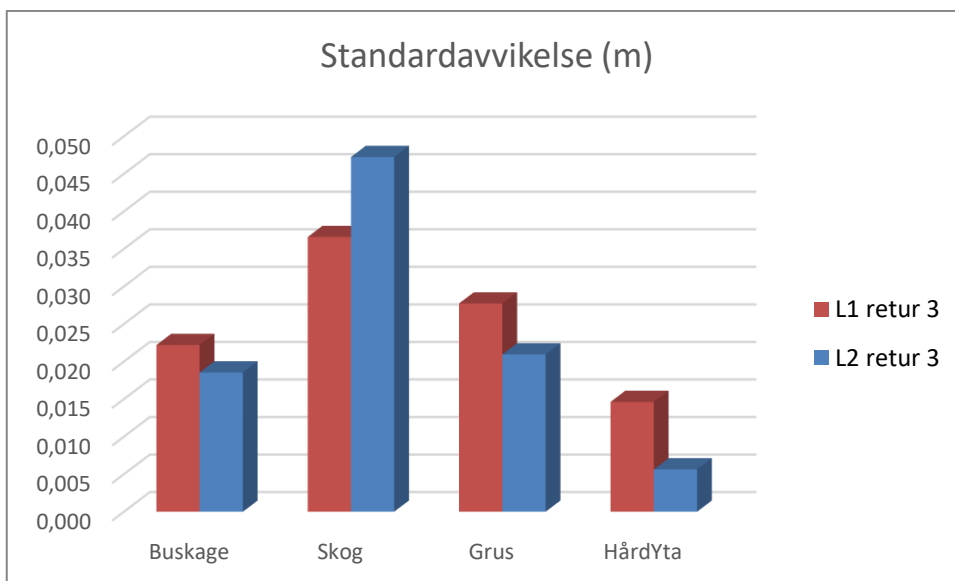


Figur 24. Jämför standardavvikelsen mellan Zenmuse L1 och Zenmuse L2 för retur 2.

Medelavvikelsen för retur 2 som visas i figur 23 kan man se att Zenmuse L1 har ett lägre värde än Zenmuse L2 med kontrollprofilerna buskage, grus och hårdgjordyta. I figur 24 som visar standardavvikelsen är värdena omvända i jämförelse mot figur 23 som visar medelavvikelsen. Där L1 har ett lägre värde har nu L1 ett högre värde i jämförelse mot L2.



Figur 25. Jämför medelavvikelsen mellan Zenmuse L1 och Zenmuse L2 för retur 3.



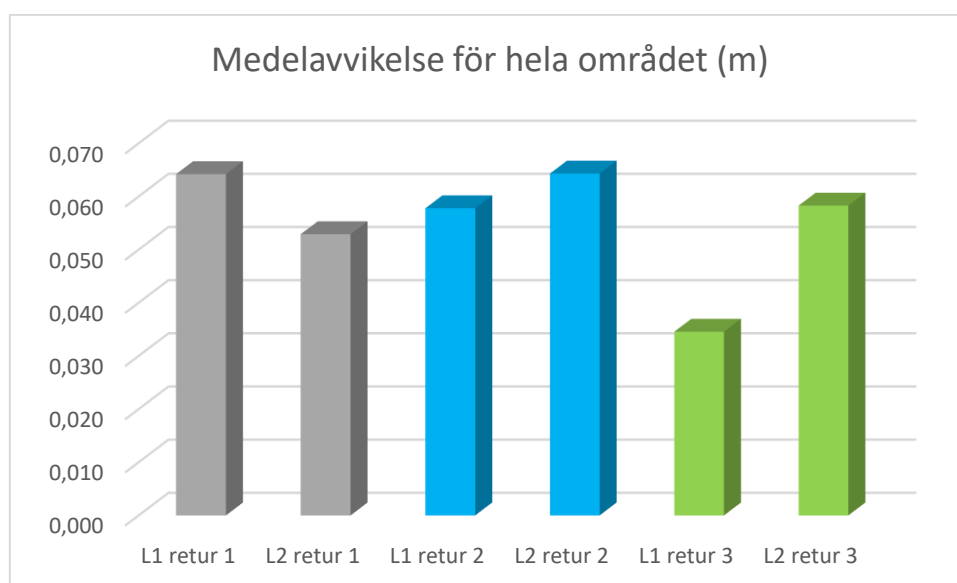
Figur 26. Jämför standardavvikelsen mellan Zenmuse L1 och Zenmuse L2 för retur 3.

Figur 25 visar medelavvikelsen för retur 3, i figuren kan man se att Zenmuse L1 har ett lägre värde än Zenmuse L2 på alla kontrollprofiler speciellt på hårdgjord yta. Figur 26 visar standardavvikelsen för L2 har ett lägre värde än L1 förutom på kontrollprofil skog.

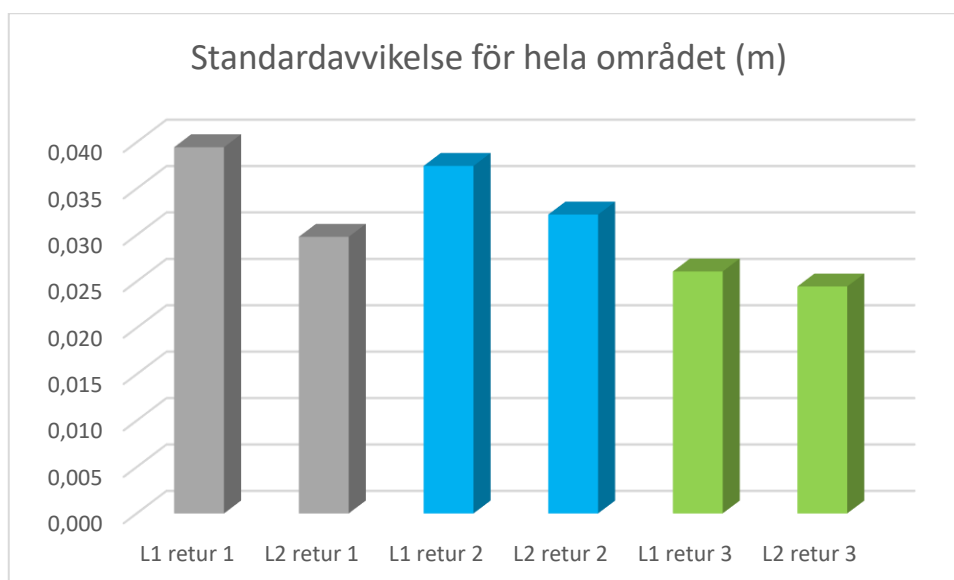
Tabell 4 visar en sammanställning av resultatet av tabellerna i bilaga A. I tabellerna A1 till A6 kan man se dem exakta värdena som sammanställs i tabell 4 och som visualiseras med diagram i figur 27, 28 samt bilaga C18 och C19.

Tabell 4. Sammanställning av resultatet av uträkningen av kontrollprofilerna ifrån tabellerna i bilaga A.

Mätning	Antal profiler	Totalt antal kontrollerade punkter	Min avvikelse i höjd (m)	Max avvikelse i höjd (m)	Medelavvikelse för området (m)	Standardavvikelse för området (m)	Profil längd (m)
L1 retur 1	25	614	-0,216	0,391	0,0642	0,0395	1123,094
L2 retur 1	25	614	-0,349	0,267	0,0529	0,0298	1123,094
L1 retur 2	25	614	-0,126	0,396	0,0578	0,0374	1123,094
L2 retur 2	25	614	-0,201	0,486	0,0643	0,0322	1123,094
L1 retur 3	25	614	-0,084	0,184	0,0346	0,0261	1123,094
L2 retur 3	25	614	-0,098	0,282	0,0583	0,0245	1123,094



Figur 27. Jämförelse i medelavvikelse mellan de olika returerna för Zenmuse L1 och Zenmuse L2.



Figur 28. Jämförelse i standardavvikelse mellan de olika returerna för Zenmuse L1 och Zenmuse L2.

Retur 1 har Zenmuse L1 den minsta värdet på $-0,216$ meter i jämförelse med Zenmuse L2 som har ett värde på $-0,349$ meter i minsta avvikelser i höjd. Max avvikelser i höjd har L1 ett värde på $0,391$ meter där L2 har ett värde på $0,267$ meter. L2 får ett bättre medelvärde i både medelavvikelse på $0,0529$ meter och standardavvikelse på $0,0298$ meter, L1 medelavvikelse är på $0,0642$ meter och $0,0395$ meter på standardavvikelsen. Det ger en skillnad på ungefär $0,010$ meter i både medel- och standardavvikelse, trots att L2 har större värden på min- och maxavvikelse får L2 ett bättre resultat än L1 på retur 1.

Retur 2 har Zenmuse L1 bättre värden än Zenmuse L2 i min- och maxavvikelse, L1 med $-0,126$ meter i minavvikelse och $0,369$ meter i maxavvikelse. L2 har $-0,201$ i minavvikelse och $0,486$ i maxavvikelse. L1:ans medel- och standardavvikelse är $0,0578$ meter och $0,0374$ meter. L2:ans medel- och standardavvikelse är $0,0643$ meter och $0,0322$ meter. L2 har ett större värde än L1 med en skillnad på ungefär $0,008$ meter men med standardavvikelse har L2 ett mindre värde än L1 med en skillnad på $0,005$ meter.

Med retur 3 har både Zenmuse L1 och Zenmuse L2 lägra värden än retur 1 och retur 2. Men L1 har också här ett bättre värde än L2. Min- och maxavvikelsen för L1 är $-0,084$ och $0,184$. L2 har ett min- och maxavvikelse på $-0,098$ meter och $0,282$ meter. Medel- och standardavvikelsen för L1 är på $0,0346$ meter och $0,0261$ meter. L2:ans medel- och standardavvikelsen är på $0,0583$ meter och $0,0245$ meter. Här har L1 ett bättre värde på medelavvikelsen med en skillnad på ungefär $0,024$ meter medan L2 får ett bättre värde på standardavvikelsen med en skillnad på $0,002$ meter.

Både retur 2 och retur 3 i medelavvikelse med Zenmuse L2 får ett värde som är sämre än Zenmuse L1 vilket kan bero på det dåliga vädret som var under flygningen med L2.

5 Diskussion

5.1 För och nackdelar

Zenmuse L1 och Zenmuse L2 har en stor skillnad när det kommer till konverteringen i DJI Terra där filer ifrån enheterna görs om till filer som kan arbetas med. Skillnaden är att L2 ger ut mer användbara data i DJI Terra än L1, med L2 får man information som digitala ytmodell och markklassificering som man inte kan få ut med L1. Det är något som kunde göras bättre och fått ut markklassificeringen som skulle ha används för att skapa en digitalmarkmodell. Detta skulle kunna ha tagit bort osäkerhet och fel som kan uppstå när man flyttar emellan filer mellan olika program.

I tabell 1 ser man att Zenmuse L1 och Zenmuse L2 med punktfrekvens multipla retur, det vill säga retur 2 och 3, har L1 480 000 pts/s och L2 1 200 00 pts/s. Med det bör L2 få en bättre täckning av punkter och ge ett bättre resultat än L1 då den skickar ut fler punkter än L1 men som man kan se i studien är detta inte fallet. Dem är ganska lika i både standardavvikelse och medelavvikelse. Vilket man inte skulle kunna tro när L2 har mer än det dubbla punkter per sekund än L1.

5.2 Medelavvikelse och standardavvikelse för respektive profil

Varje kontrollprofil för varje flygning med Zenmuse L1 och Zenmuse L2 när de hade inställningen retur 1, retur 2 och retur 3 jämförs i figur 21 till 26. I figurerna kan vi se att både L1 och L2 har olika värden. Flygningen med inställningen retur 2 ser man att L2 presterar bättre än L1 i både medelavvikelse och standardavvikelse. Förutom med standardavvikelsen med kontrollprofil skog där L1 har ett lite lägre värde än L2. Med inställningarna retur 1 och retur 3 har L1 ett lägre värde än L2 i medelavvikelse fast sen när det kommer till standardavvikelsen får L2 ett lägre värde. Här kan man också se att kontrollprofil skog inte följer samma mönster som de andra kontrollprofilerna buskage, grus och hårdgjord yta. Det som alla figurer visar för både L1 och L2 är att kontrollprofil skog har ett högre värde än de andra kontrollprofilerna. Vilket kan bero på att trots att insamlingen skedde när det inte vara lövsprickning är skogen ändå så pass tät att ett fåtal punkter når ner till marken

Marktypen hårdgjord yta har det lägsta värdet för respektive retur i både medelavvikelse och standardavvikelse. Vilket är förväntat då det var en jämn och fin yta som reflekterade lasern bra.

Med marktyperna buskage och grus har dem ungefär samma värde och följer varandra. Dem är på samma nivå vid vissa tillfällen men med vissa retur visar ett

bättre resultat än den andra i både medelavvikelse och standardavvikelse för både buskage och grus. Det förväntades att grus skulle prestera bättre än buskage på grund av det är en mer öppen yta med färre saker i vägen för lasern. Vilket kan bero på att dem var rätt lika varandra och skulle nog vara en och samma marktyp.

5.3 Medelavvikelse och standardavvikelse för området

Skillnaden i medelavvikelsen var på 0,0113 m för retur 1, 0,0065 m för retur 2 och 0,0237 m för retur 3. Med retur 1 har Zenmuse L1 ett bättre resultat än Zenmuse L2 men med retur 2 och 3 har L1 det bättre resultatet. Skillnaden i standardavvikelse är på 0,0097 m för retur 1, 0,0052 m för retur 2 och 0,0016 m för retur. Här får L2 ett bättre resultat på samtliga returer än L1.

Både Zenmuse L1 och Zenmuse L2 har begränsningar när det kommer till marktypen skog. Man kan se att i diagrammen (figur 15 till 20) att kontrollprofilen får ett betydligt högre värde än de andra marktyperna.

5.4 Felkällor

I bilaga C8, C11 och C12 kan man se att det finns lite hål i punktmolnet i samma område. Hålen har kommit fram vid skogspartiet på udden, det finns också data som saknas vid vägen i vänstra hörnet på bilaga C8, C11 och C12. Att data saknas i punktmolnet kan bero på väderförhållandet, tappade referens satelliter under flygning eller att data har gått förlorat under skapande av las filerna. Med den förlorande data kan de ha lett till att de digitala terrängmodellerna inte blivit som de egentligen skulle ha blivit vilket kan ha lett till skillnaden i resultatet med standardavvikelse och medelavvikelse.

En felkälla som kan ha uppstått kan vara under skapande av digitala terrängmodellerna. När digitala terrängmodellerna skapade behövdes "region" väljas och för alla retur med L1 kunde bara en väljas men när det kom till L2 valdes 3 till L2 retur 1, 2 till L2 retur 2 och 3. Vilket kan ha bidraget till att L2 har fått sämre värden än L1.

En annan felkälla kan också vara att flera olika program har använts, om man hade använt samma program kanske man hade minskat risken att förlora data. Samt att under flygningen med Zenmuse L2 förlorande den 2 eller mindre referenssatelliter vilket kan ha gjort att osäkerheten har blivit påverkad.

5.5 Aspekter på miljö och hållbarutveckling

De aspekter som finns gällande arbetsmiljöfrågor och hållbar utveckling är att fortsätta se framstegen med UAV-flygning och UAS-system för att gå emot ett mer fossilfritt arbete med mindre människor som är inblandade för att utföra arbetet. Resultatet har inte resulterat i några effekter som har haft en negativ inverkan på miljön och hållbarutveckling (Agenda, mål 11 och 13 (u.å.)).

UAV med LiDAR system bidrar till en hållbarutveckling inom samhällsplanering, UAS system har också andra användningsområden så som miljöforskning eller annan forskning. UAV med LiDAR system ger fördelen med att det är skonsamt för naturen då det inte sker något större utsläpp med dem kommersiella systemen som finns på marknaden idag, i jämförelse om man skulle ha använt andra system som flygplan eller helikoptrar som har en större miljöpåverkan på naturen med deras koldioxidutsläpp. UAV med LiDAR har en mängd större område inom samhällsplanering, de kan användas inom byggnation av hus, infrastruktur, järnväg och vägar att nämna ett fåtal exempel. UAS system har ett ännu större användningsområde då det ger möjligheten att få in sensorer som hjälper att göra olika typer av mätningar i svårframkomliga och farliga miljöer.

5.6 Etiska aspekter

Datainsamlingen har följt av de regler som Transportstyrelsen har satt för flygning av drönare. Operatören som har flugit Matrice 300 RTK är certifierad enligt den specifika kategorin som var ett krav då flygningen utfördes vid en väg och bostäder i närheten (Transportstyrelsen, u.å.).

6 Slutsats

Syftet med studien var att undersöka skillnaden i medelavvikelse och standardavvikelse mellan LiDAR systemen Zenmuse L1 och Zenmuse L2 med hjälp av kontrollprofiler som var utsätt på olika marktyper, buskage, grus, skog och hårdgjord yta.

Resultat av studien är att Zenmuse L2 är bättre än Zenmuse L1 trots att L2 har lite sämre värden än L1 vid vissa tillfällen, det bero på det ojämna väderförhållandet som var och att L2 tappade kontakt med referenssatelliterna. En stor skillnad mellan L1 och L2 är att som nämnt tidigare med att DJI rekommenderar att IMU:en hos L1 måste värmas upp först innan flygningen börjas. Vilket leder till ett mer lättamt arbete där man kan flyga direkt med L2 än att man behöver vänta en obestämd tid som man behöver med L1.

Kontrollprofilerna visar att både Zenmuse L1 och Zenmuse L2 har en liten skillnad mellan varandra i medelavvikelse och standardavvikelse, men att vissa kontrollprofiler sticker ut mer än andra. Detta kan ha sett bättre ut ifall flygningen hade genomförts under bättre väderförhållande eller skapandet av de digitala terrängmodellerna.

En vidare studie kan vara att genomföra fler flygningar med samma retur för att finna ett bättre sannare värde än att göra flera flygningar med olika retur. Desto fler flygningar med bättre väderförhållande kan ge ett bra underlag för en studie med bra kvalité. Om tid finns kan man göra flygningar och en djupare inblick i enheterna för att komma fram till vilka inställningar som ge den bästa kvalitén.

Studien har gett en bättre inblick i att UAV med LiDAR-enheter kommer vara ett verktyg att arbeta med för kommande mätningstekniker som ger chansen framkalla olika markmodeller väldigt snabbt och simpelt. Det är en ny teknik som kan användas inom många olika arbetsområden som kommer att utvecklas ännu mer.

Referenser

Agenda 2030. (u.å.). *Mål 11*. [Agenda 2030 | Mål 11 | Hållbara städer och samhällen - Regeringen.se](#)

Agenda 2030. (u.å.). *Mål 13*. [Agenda 2030 | Mål 13 | Bekämpa klimatförändringarna - Regeringen.se](#)

Andersson, V.J (2011). *PM Underlag till metodbeskrivning RUFRIIS*. WSP Samhällsbyggnad. Uppdragsnr: 10141701.
<https://bransch.trafikverket.se/contentassets/6cade102e6ec4ad98c8d6044bd47cf83/stomnat/rufriis---underlag-till-metodbeskrivning-rufriis.pdf>

Aksén, F. (2023). *Utvärdering av kvaliteten för två UAV/LiDAR-system i olika prisklasser Jämförelse av osäkerheten vid skapandet av digitala terrängmodeller*. Examensarbete, Högskolan i Gävle. <https://hig.diva-portal.org/smash/get/diva2:1772672/FULLTEXT01.pdf>

DJI. (u.å.). *Matrice 300*. <https://enterprise.dji.com/matrice-300>

DJI. (u.å.). *Zenmuse L1 Specs*. <https://enterprise.dji.com/zenmuse-l1/specs>

DJI. (u.å.). *Zenmuse L2 Specs*. <https://enterprise.dji.com/zenmuse-l2/specs>

European Environment Agency. (u.å.). *Digital terrain model*.
<https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/digital-terrain-model>

Kersten, T., Wolf, J. & Lindstaedt, M. (2022). Investigations into the accuracy of the UAV system DJI Matrice 300 RTK with the sensors Zenmuse P1 and L1 in the Hamburg test field. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B1-2022, 339–346.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2022-339-2022>

- Kolecka, N. (2011). *Photo-based 3D scanning vs laser scanning - competitive data acquisition methods for digital terrain modelling of steep mountain slopes*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. (XXXVIII-4/W19, 203–208).
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-4-W19-203-2011>
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Olsson, H. Skånes, H. Tullodahl, M. Wikström, S. Kautsky, H. Rydell, B. Årnfelt, E. Eklöf, J. Steinvall, O. (2014). *Flygburen laser och digitala bilder för kartering och övervakning av akvatisk och terrester miljö* (Rapport 6633) Naturvårdsverket
<https://naturvardsverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1610454/FULLTEXT01.pdf>
- Resop, J., Lehmann, L. Hession, W. (2019). *Drone laser scanning for modeling riverscape topography and vegetation: comparison with traditional aerial lidar*. *Drones*. 3(2), 35. <https://doi.org/10.3390/drones3020035>
- SIS-TS 21144:2016. Byggmätning - Specifikationer vid framställning och kontroll av digitala markmodeller. Stockholm: SIS Förlag AB
- Stal, C. Nuttens, T. Bourgeois, J. Carlier, L. De Maeyer, P. De Wulf, A. (2011) Accuracy assessment of a LiDAR Digital Terrain Model by using RTK GPS and total station. *EARSeL eProceedings*. Volume 10. Issue 8. pp. 1-8
- Transportstyrelsen. (u.å.) Drönare - Transportstyrelsen
- Yang, T. Tam, W.Lai, J. Zhao, Y. Wu, Z. Yunjing, Ji. Wang, C. Li, Z. (2024). Ranging accuracy difference correction among channels of a vehicle-borne road detection LiDAR. *Optics & Laser Technology*, 174, 110477.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110477>

Wallace, L. Lucieer, A. Watson, C. Turner, D. (2012). Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory. *Remote Sensing.*, 4(6), 1519-1543. <https://doi.org/10.3390/rs4061519>

Zhang, J. Hu, J. Lian, J. Fan, Z. Ouyang, X. Ye, W. (2016). Seeing the forest from drones: Testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring. *Biological Conservation*, 198, 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.03.027>

Bilaga A

Uträkning från Geo och för standardavvikelsen fås ut på begäran.

Tabell A1. Sammanställning av kontrollprofilen för L1 retur 1.

Kontr ollpro fil	Antal profile r	Total antal kontrollera de punkter	Min avvikelse i höjd (m)	Max avvikelse i höjd (m)	Medelavvikelse för resp. profiler (m)	Standardavvik else i varje profil (m)	Profillängd (m)
Buska							
ge01	1	20	-0,010	0,105	0,059	0,028	36,060
Buska							
ge02	1	22	-0,014	0,116	0,071	0,029	43,640
Buska							
ge03	1	30	-0,007	0,102	0,047	0,027	48,132
Buska							
ge04	1	28	-0,043	0,055	0,013	0,028	57,204
Buska							
ge05	1	21	-0,004	0,086	0,045	0,025	41,670
Buska							
ge06	1	23	-0,017	0,104	0,029	0,032	45,225
Buska							
ge07	1	25	-0,004	0,070	0,030	0,023	50,122
Buska							
ge08	1	22	0,031	0,098	0,072	0,017	36,778
Buska							
ge09	1	21	0,007	0,121	0,072	0,030	41,569
Buska							
ge10	1	21	-0,032	0,075	0,034	0,028	40,404
Skog0							
1	1	24	0,046	0,108	0,069	0,014	26,887
Skog0							
2	1	28	-0,018	0,133	0,034	0,033	43,472
Skog0							
3	1	21	-0,216	0,278	0,063	0,096	23,816
Skog0							
4	1	23	-0,041	0,391	0,142	0,101	28,546
Skog0							
5	1	22	0,031	0,209	0,128	0,055	39,501
Skog0							
6	1	30	-0,208	0,340	0,085	0,108	44,955
Grus0							
1	1	23	0,036	0,181	0,099	0,034	46,266

Grus0								
2	1	23	0,050	0,271	0,080	0,045	50,246	
Grus0								
3	1	23	0,036	0,090	0,061	0,016	48,924	
Grus0								
4	1	29	-0,020	0,108	0,052	0,029	62,626	
Grus0								
5	1	34	0,053	0,188	0,095	0,026	71,498	
Grus0								
6	1	23	-0,112	0,084	0,019	0,043	50,919	
HårdY								
ta01	1	24	-0,002	0,117	0,070	0,039	46,667	
HårdY								
ta02	1	30	-0,017	0,113	0,046	0,035	59,530	
HårdY								
ta03	1	24	0,024	0,128	0,076	0,035	38,428	
Antal:	Summa:	MIN: -	MAX:			Summa:		
25	614	0,216	0,391	Medel: 0,064	Medel: 0,039	1123,094		

Tabell A2. Sammanställning av kontrollprofilen för L1 retur 2.

Kontrollprofil	Antal profiler	Total antal kontrollerade punkter	Min avvikelse i höjd (m)	Max avvikelse i höjd (m)	Medelavvikelse för resp. profiler (m)	Standardavvikelse i varje profil (m)	Profillängd (m)
Buskag e01	1	20	0,023	0,086	0,059	0,020	36,060
Buskag e02	1	22	-0,003	0,104	0,070	0,024	43,640
Buskag e03	1	30	0,000	0,093	0,059	0,019	48,132
Buskag e04	1	28	-0,007	0,071	0,031	0,019	57,204
Buskag e05	1	21	0,030	0,120	0,061	0,024	41,671
Buskag e06	1	23	-0,011	0,102	0,054	0,031	45,225
Buskag e07	1	25	-0,001	0,119	0,059	0,032	50,122
Buskag e08	1	22	0,031	0,107	0,070	0,022	36,778
Buskag e09	1	21	0,012	0,115	0,077	0,028	41,570

Buskage10	1	21	-0,025	0,072	0,037	0,027	40,404
Skog01	1	24	0,040	0,093	0,065	0,015	26,888
Skog02	1	28	0,007	0,088	0,049	0,022	43,472
Skog03	1	21	-0,097	0,396	0,088	0,111	23,817
Skog04	1	23	0,030	0,361	0,204	0,088	28,547
Skog05	1	22	-0,126	0,288	0,077	0,097	39,501
Skog06	1	30	-0,117	0,314	0,093	0,100	44,955
Grus01	1	23	-0,023	0,156	0,068	0,037	46,266
Grus02	1	23	-0,010	0,342	0,069	0,072	50,246
Grus03	1	23	-0,013	0,075	0,037	0,024	48,925
Grus04	1	29	-0,069	0,111	0,036	0,041	62,626
Grus05	1	34	-0,025	0,065	0,024	0,019	71,499
					-		
Grus06	1	23	-0,046	0,058	0,001	0,024	50,920
HårdYt a01	1	24	-0,017	0,040	0,017	0,014	46,668
HårdYt a02	1	30	-0,006	0,047	0,019	0,015	59,531
HårdYt a03	1	24	-0,002	0,040	0,022	0,012	38,428
Antal:	25		MIN: -	MAX:	Medel:		Summa:
		Summa: 614	0,126	0,396	0,057	Medel: 0,037	1123,094

Tabell A3. Sammanställning av kontrollprofilen för L1 retur 3.

Kontr	Antal	Total antal	Min	Max	Medelavvikelse	Standardavvikelse	Profillängd
ollpr	er	kontrollerade	avvikelse i	avvikelse i	e för resp.	se i varje profil	(m)
ofil		punkter	höjd (m)	höjd (m)	profiler (m)	(m)	
Buskage01	1	20	0,004	0,066	0,030	0,015	36,060
Buskage02	1	22	-0,018	0,099	0,054	0,026	43,640
Buskage03	1	30	-0,021	0,086	0,033	0,021	48,132
Buskage04	1	28	-0,021	0,037	0,005	0,014	57,204

Busk age0 5	1	21	-0,016	0,073	0,041	0,023	41,671
Busk age0 6	1	23	-0,036	0,131	0,028	0,034	45,225
Busk age0 7	1	25	-0,015	0,069	0,028	0,022	50,122
Busk age0 8	1	22	0,003	0,081	0,052	0,021	36,778
Busk age0 9	1	21	-0,016	0,098	0,058	0,024	41,570
Busk age1 0	1	21	-0,023	0,059	0,021	0,022	40,404
Skog 01	1	24	0,011	0,070	0,040	0,015	26,888
Skog 02	1	28	-0,022	0,097	0,022	0,026	43,472
Skog 03	1	21	0,003	0,144	0,050	0,042	23,817
Skog 04	1	23	0,004	0,169	0,091	0,049	28,547
Skog 05	1	22	0,003	0,150	0,071	0,037	39,501
Skog 06	1	30	-0,084	0,184	0,068	0,051	44,955
Grus 01	1	23	0,020	0,111	0,058	0,024	46,266
Grus 02	1	23	0,011	0,166	0,054	0,034	50,246
Grus 03	1	23	-0,041	0,065	0,023	0,023	48,925
Grus 04	1	29	-0,034	0,069	0,019	0,032	62,626
Grus 05	1	34	-0,012	0,145	0,018	0,026	71,499
Grus 06	1	23	-0,066	0,065	-0,004	0,028	50,920

Hård							
Yta0							
1	1	24	-0,022	0,037	0,001	0,017	46,668
Hård							
Yta0							
2	1	30	-0,033	0,028	-0,004	0,014	59,531
Hård							
Yta0							
3	1	24	-0,029	0,033	0,009	0,013	38,428
	Antal		MIN: -	MAX:	Medel:		Summa:
	: 25	Summa: 614	0,084	0,184	0,034	Medel: 0,026	1123,094

Tabell A4. Sammanställning av kontrollprofilen för L2 retur 1.

Kontr	Antal	Total antal	Min	Max	Medelavvikelse	Standardavvik	Profillängd
ofil	er	kontrollerade	avvikelse i	avvikelse i	för resp.	else i varje	(m)
		punkter	höjd (m)	höjd (m)	profiler (m)	profil (m)	
Busk							
age0							
1	1	20	0,029	0,129	0,063	0,025	36,060
Busk							
age0							
2	1	22	0,051	0,101	0,074	0,015	43,640
Busk							
age0							
3	1	30	0,029	0,103	0,057	0,018	48,132
Busk							
age0							
4	1	28	0,008	0,049	0,025	0,010	57,204
Busk							
age0							
5	1	21	0,047	0,096	0,067	0,014	41,671
Busk							
age0							
6	1	23	0,016	0,145	0,064	0,029	45,225
Busk							
age0							
7	1	25	0,021	0,125	0,066	0,023	50,122

Busk age0 8	1	22	0,031	0,095	0,066	0,017	36,778
Busk age0 9	1	21	0,044	0,110	0,076	0,016	41,570
Busk age1 0	1	21	0,001	0,055	0,023	0,015	40,404
Skog 01	1	24	0,001	0,089	0,054	0,018	26,888
Skog 02	1	28	0,017	0,120	0,058	0,023	43,472
Skog 03	1	21	-0,228	0,192	0,020	0,090	23,817
Skog 04	1	23	-0,349	0,264	0,075	0,136	28,547
Skog 05	1	22	-0,141	0,214	0,078	0,083	39,501
Skog 06	1	30	-0,102	0,267	0,063	0,077	44,955
Grus 01	1	23	0,014	0,120	0,067	0,028	46,266
Grus 02	1	23	0,049	0,192	0,082	0,032	50,246
Grus 03	1	23	0,020	0,068	0,045	0,012	48,925
Grus 04	1	29	0,014	0,075	0,041	0,015	62,626
Grus 05	1	34	0,005	0,192	0,038	0,031	71,499
Grus 06	1	23	-0,011	0,086	0,043	0,022	50,920
Hård Yta0 1	1	24	0,021	0,030	0,026	0,002	46,668
Hård Yta0 2	1	30	0,000	0,030	0,022	0,007	59,531
Hård Yta0 3	1	24	0,024	0,033	0,028	0,002	38,428
Antal	: 25	Summa: 614	MIN: -	MAX:	Medel: 0,052	Medel: 0,030	Summa:
			0,349	0,267			1123,094

Tabell A5. Sammanställning av kontrollprofilen för L2 retur 2.

Kontr	Antal	Total antal	Min	Max	Medelavvikelse	Standardavvik	Profillängd
ofil	er	punkter	avvikelse i höjd (m)	avvikelse i höjd (m)	för resp. profiler (m)	else i varje profil (m)	(m)
Busk							
age0							
1	1	20	0,039	0,132	0,068	0,024	36,060
Busk							
age0							
2	1	22	0,054	0,106	0,079	0,015	43,640
Busk							
age0							
3	1	30	0,038	0,118	0,070	0,020	48,132
Busk							
age0							
4	1	28	0,023	0,060	0,043	0,010	57,204
Busk							
age0							
5	1	21	0,052	0,104	0,073	0,014	41,671
Busk							
age0							
6	1	23	0,027	0,155	0,073	0,029	45,225
Busk							
age0							
7	1	25	0,028	0,128	0,072	0,022	50,122
Busk							
age0							
8	1	22	0,036	0,104	0,072	0,018	36,778
Busk							
age0							
9	1	21	0,054	0,122	0,084	0,017	41,570
Busk							
age1							
0	1	21	0,008	0,062	0,030	0,015	40,404
Skog							
01	1	24	0,039	0,106	0,068	0,017	26,888
Skog							
02	1	28	0,040	0,114	0,075	0,017	43,472
Skog							
03	1	21	-0,146	0,266	0,059	0,094	23,817

Skog							
04	1	23	-0,201	0,425	0,134	0,117	28,547
Skog							
05	1	22	-0,117	0,426	0,108	0,116	39,501
Skog							
06	1	30	-0,155	0,486	0,085	0,119	44,955
Grus							
01	1	23	0,021	0,114	0,066	0,027	46,266
Grus							
02	1	23	0,049	0,173	0,082	0,030	50,246
Grus							
03	1	23	0,023	0,064	0,045	0,010	48,925
Grus							
04	1	29	0,014	0,076	0,042	0,015	62,626
Grus							
05	1	34	0,007	0,133	0,041	0,023	71,499
Grus							
06	1	23	-0,010	0,087	0,043	0,021	50,920
Hård							
Yta0							
1	1	24	0,023	0,040	0,032	0,004	46,668
Hård							
Yta0							
2	1	30	0,007	0,039	0,031	0,008	59,531
Hård							
Yta0							
3	1	24	0,028	0,040	0,034	0,003	38,428
Antal			MIN: -		MAX:		Summa:
: 25		Summa: 614	0,201	0,486	Medel: 0,064	Medel: 0,032	1123,094

Tabell A6. Sammanställning av kontrollprofilen för L2 retur 3.

Kontr	Antal	Total antal	Min	Max	Medelavvikelse	Standardavvik	Profil
ofil	er	punkter	avvikelse i	avvikelse i	för resp.	else i varje	längd
			höjd (m)	höjd (m)	profiler (m)	profil (m)	(m)
Busk							
age0							
1	1	20	0,030	0,157	0,065	0,030	36,060
Busk							
age0							
2	1	22	0,058	0,107	0,080	0,014	43,640

Busk age0 3	1	30	0,035	0,106	0,060	0,018	48,132
Busk age0 4	1	28	0,004	0,049	0,025	0,010	57,204
Busk age0 5	1	21	0,051	0,102	0,072	0,015	41,671
Busk age0 6	1	23	0,025	0,139	0,070	0,024	45,225
Busk age0 7	1	25	0,026	0,135	0,071	0,024	50,122
Busk age0 8	1	22	0,029	0,101	0,069	0,018	36,778
Busk age0 9	1	21	0,047	0,116	0,081	0,017	41,570
Busk age1 0	1	21	0,003	0,053	0,023	0,015	40,404
Skog 01	1	24	-0,032	0,086	0,041	0,031	26,888
Skog 02	1	28	0,000	0,084	0,039	0,024	43,472
Skog 03	1	21	-0,038	0,164	0,058	0,047	23,817
Skog 04	1	23	0,009	0,282	0,115	0,063	28,547
Skog 05	1	22	-0,098	0,211	0,100	0,071	39,501
Skog 06	1	30	-0,034	0,159	0,078	0,048	44,955
Grus 01	1	23	0,039	0,118	0,071	0,023	46,266
Grus 02	1	23	0,037	0,157	0,082	0,031	50,246
Grus 03	1	23	0,023	0,067	0,048	0,010	48,925
Grus 04	1	29	0,011	0,078	0,041	0,015	62,626

Grus								
05	1	34	0,001	0,149	0,039	0,026	71,499	
Grus								
06	1	23	-0,009	0,073	0,041	0,020	50,920	
Hård								
Yta0								
1	1	24	0,022	0,037	0,031	0,004	46,668	
Hård								
Yta0								
2	1	30	-0,008	0,038	0,022	0,010	59,531	
Hård								
Yta0								
3	1	24	0,028	0,039	0,034	0,003	38,428	
	Antal		MIN: -	MAX:			Summa:	
	: 25	Summa: 614	0,098	0,282	Medel: 0,058	Medel: 0,024	1123,094	

Appendix B

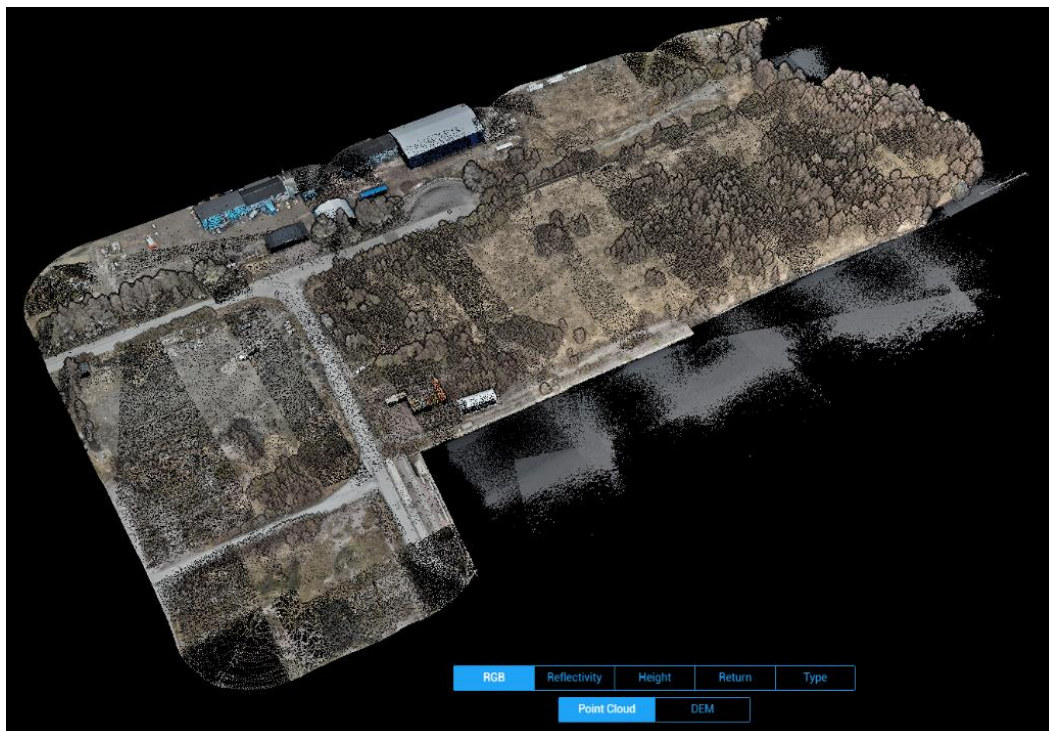
Alla rapporter fås ut på begäran.

Warning Message

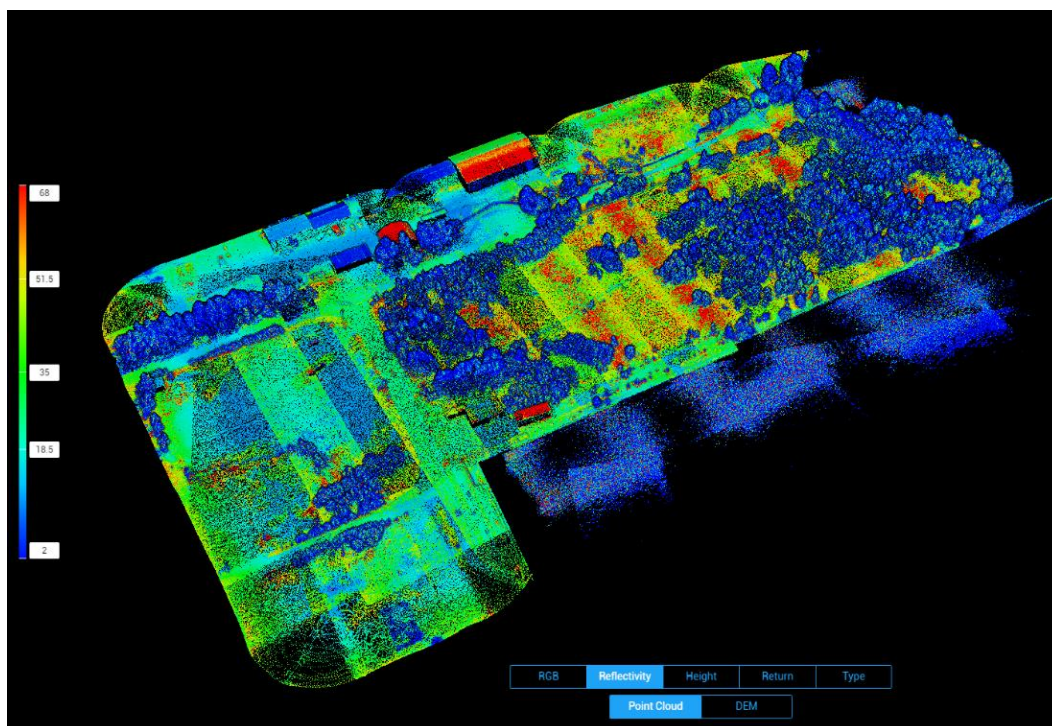
 Warning: Only 2 or less than 2 reference satellite systems available for base station. Solution accuracy may be affected

Bilaga B1. Varningsmeddelandet som finns i rapporterna från Zenmuse L2.

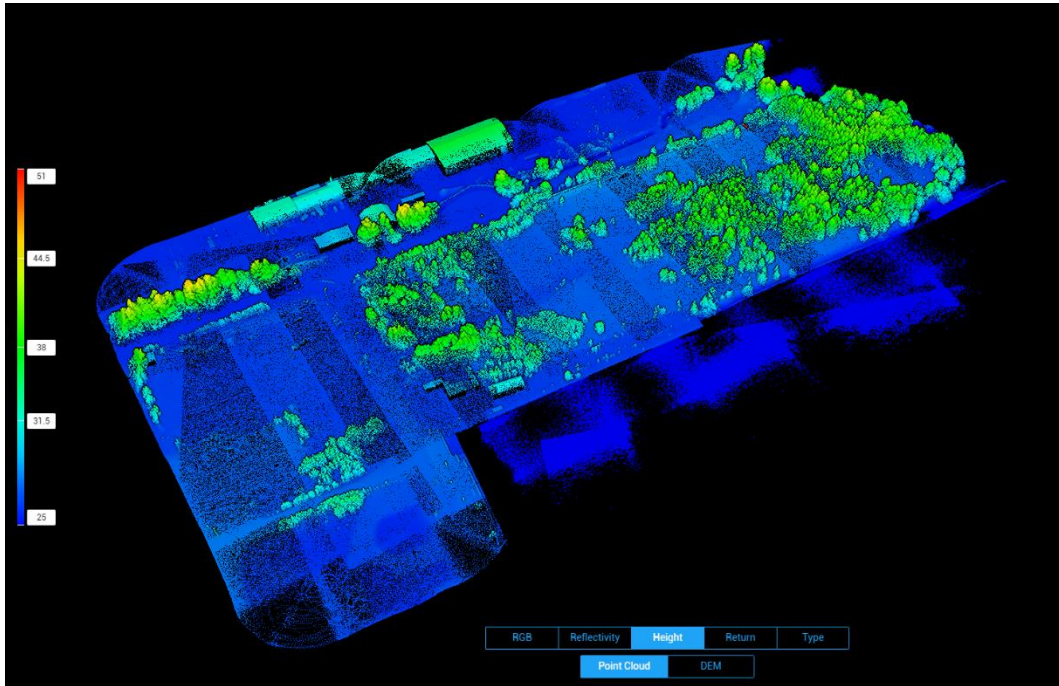
Bilaga C



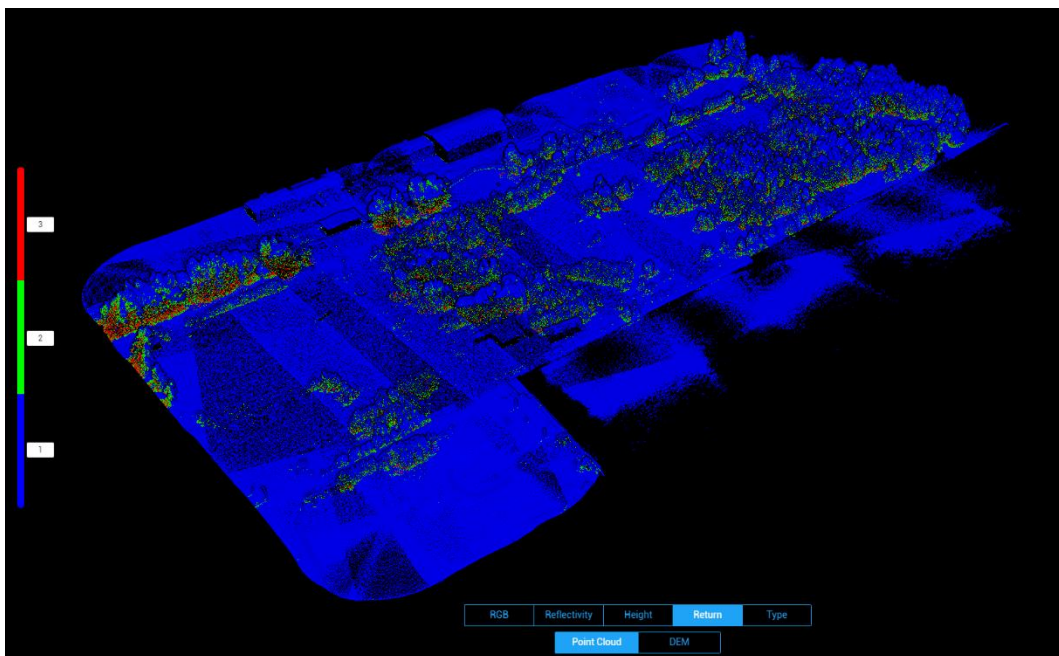
Bilaga C1. Punktmolnet för L2 retur 3 i DJI Terra med RGB



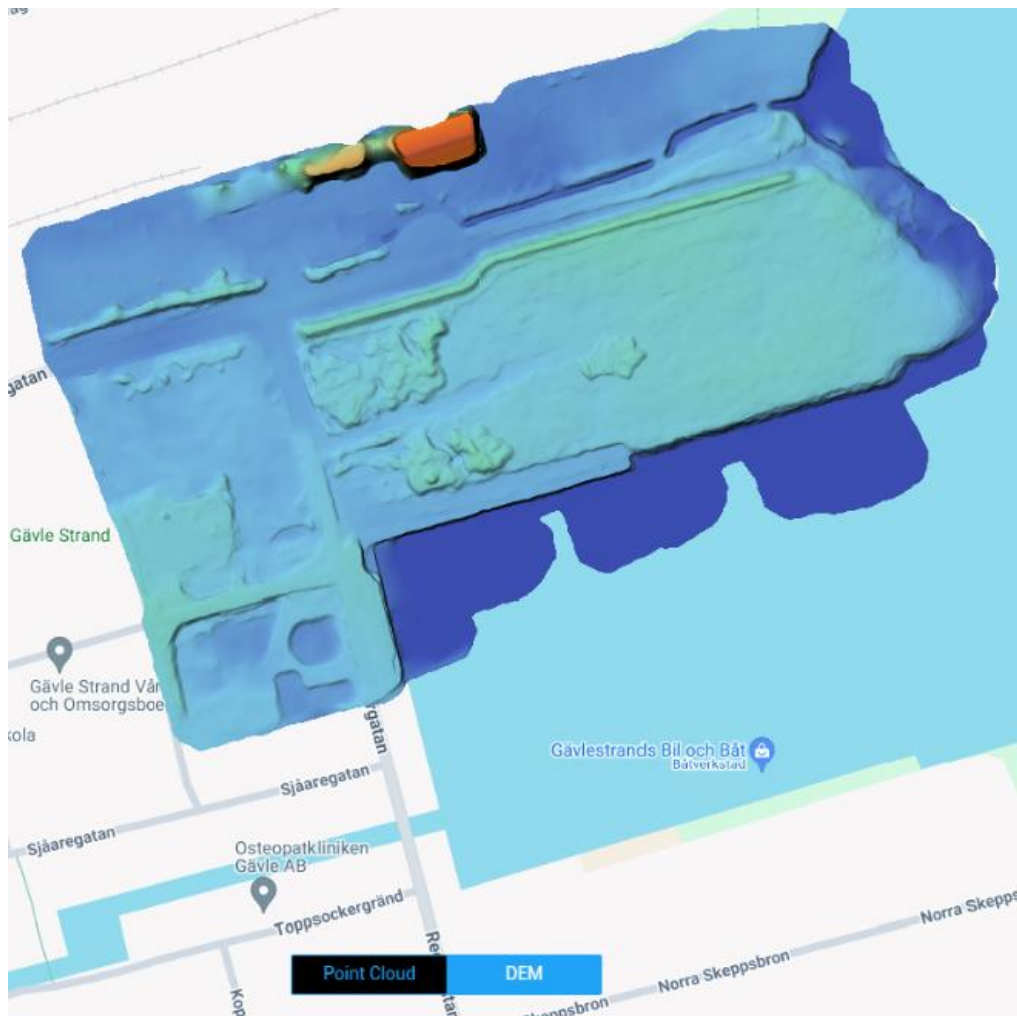
Bilaga C2. Punktmolnet för L2 retur 3 i DJI Terra med reflektants, röd hög reflektants till blå låg reflektants.



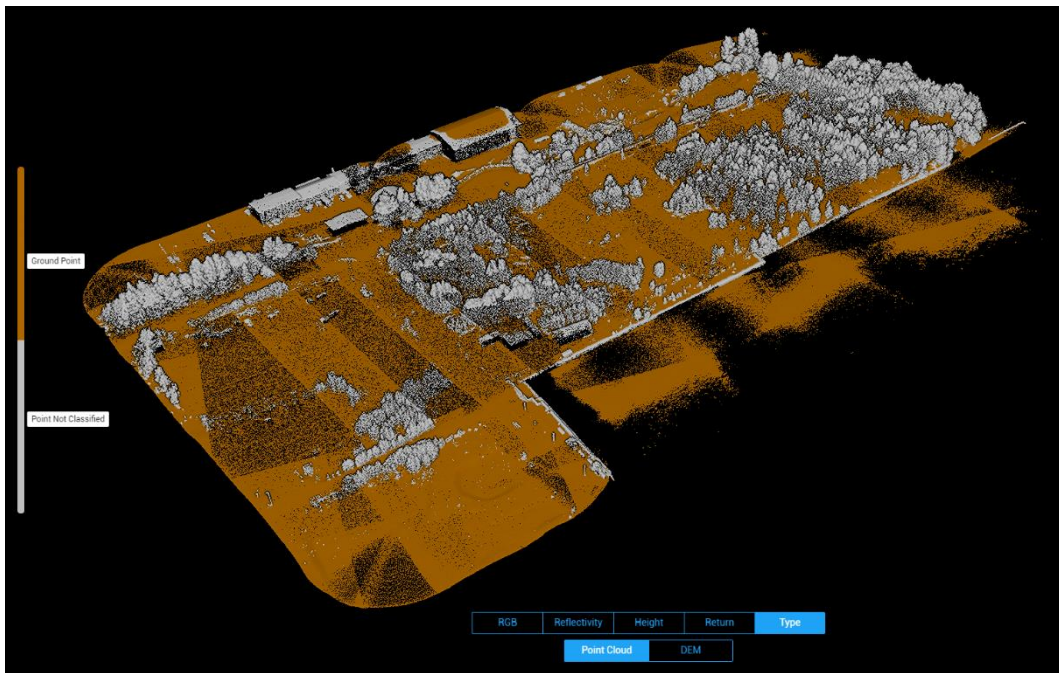
Bilaga C3. Punktmolnet för L2 retur 3 i DJI Terra med höjddata, röd 51 m, gul 44,5 m, grön 38 m, ljus blå 31,5 och blå 25 m.



Bilaga C4. Punktmolnet för L2 retur 3 i DJI Terra med antal returer, röd tredje returen, grön andra returen, blå första returen.



Bilaga C6. Punktmolnet för L2 retur 3 i DJI Terra med digital ytmodell.



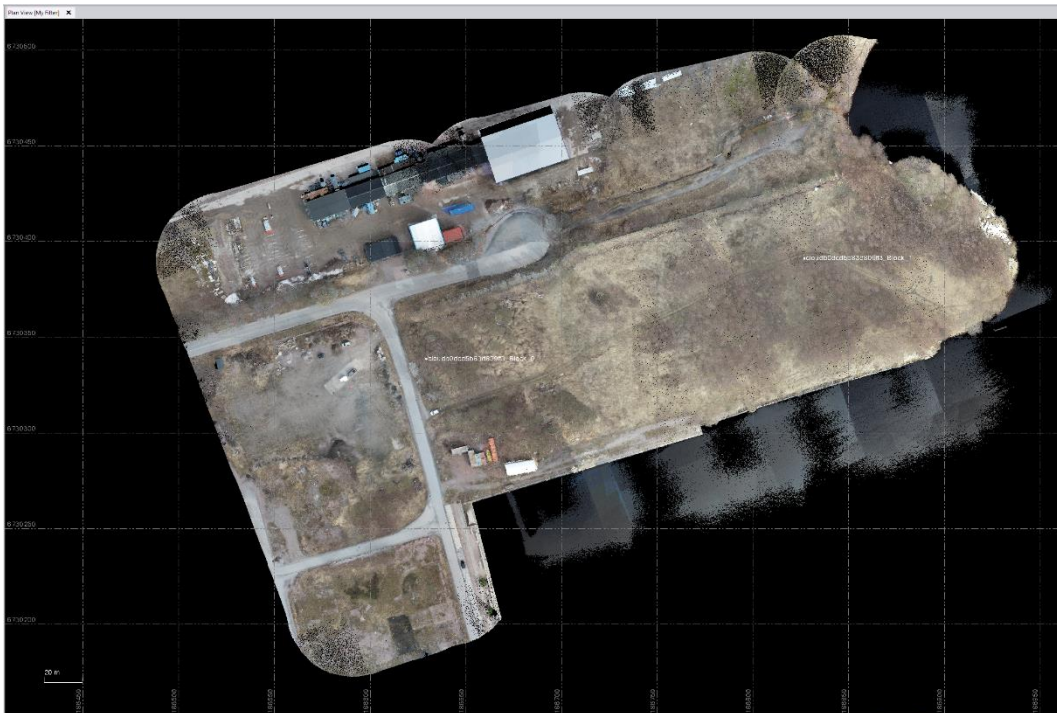
Bilaga C7. Punktmolnet för L2 retur 3 i DJI Terra med markklassificering, brun markklassificering och vit/grått punkter som inte har klassificerat.



Bilaga C8. Punktmolnet för L1 retur 1 i TBC.



Bilaga C9. Punktmolnet för L1 retur 2 i TBC.



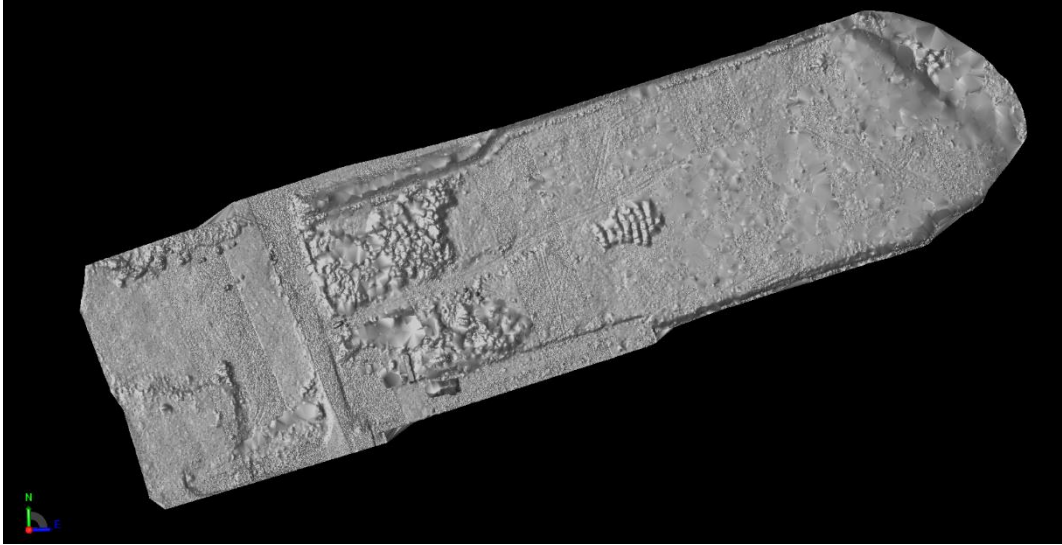
Bilaga C10. Punktmolnet för L1 retur 3 i TBC.



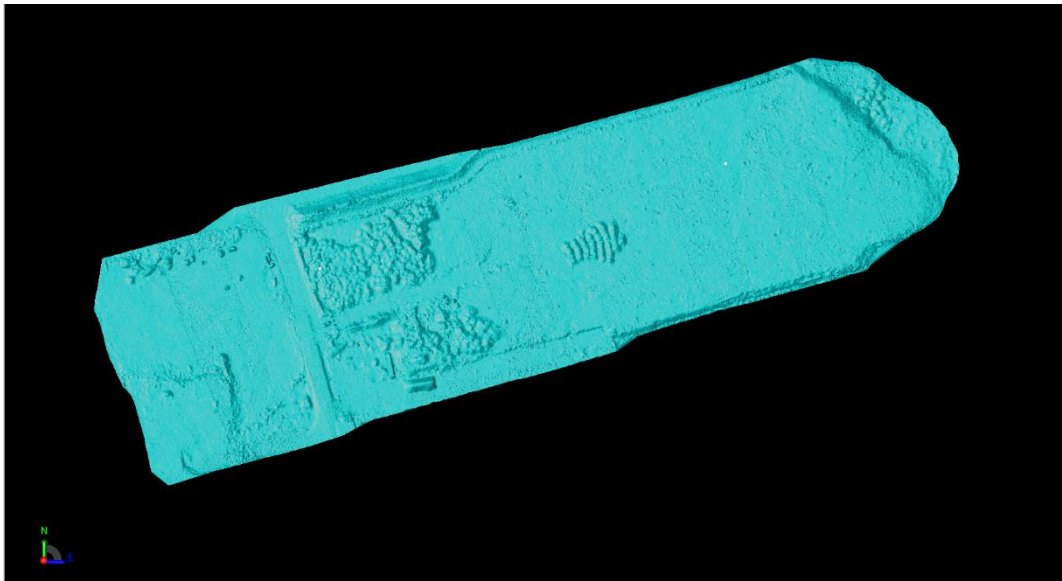
Bilaga C11. Punktmolnet för L2 retur 1 i TBC.



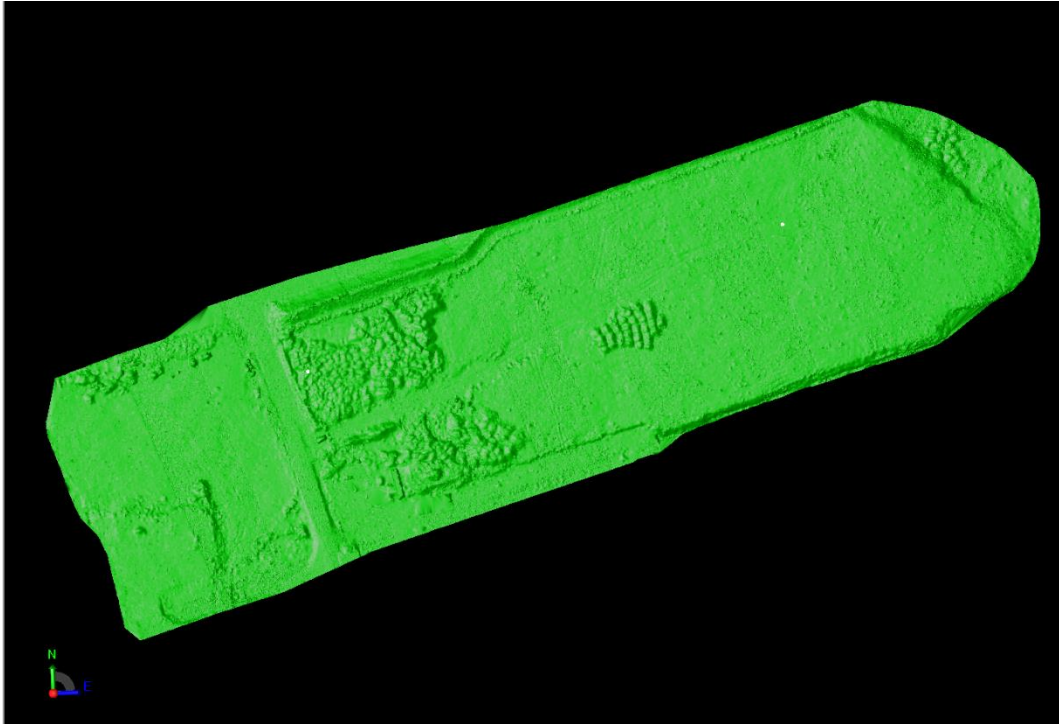
Bilaga C12. Punktmolnet för L2 retur 2 i TBC.



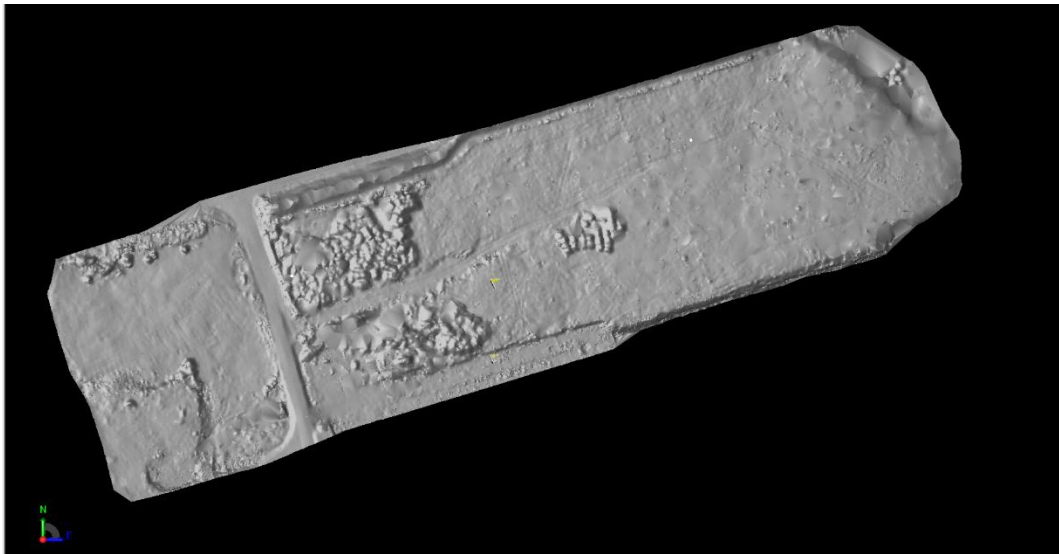
Bilaga C13. DTM av Zenmuse L1 med 1 retur i TBC.



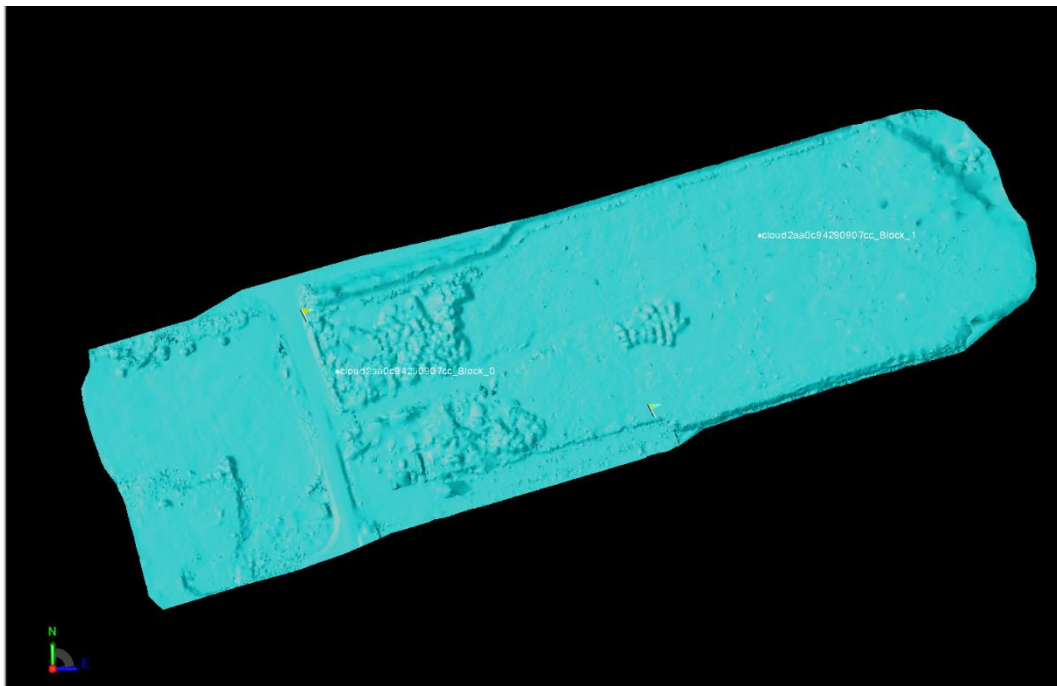
Bilaga C14. DTM av Zenmuse L1 med 2 returer i TBC



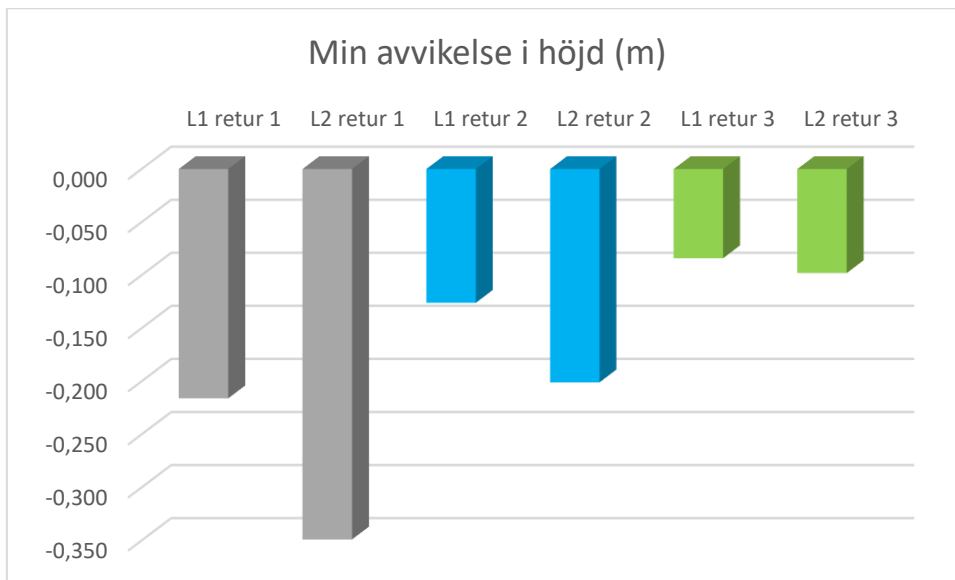
Bilaga C15. DTM av Zenmuse L1 med 3 returer i TBC.



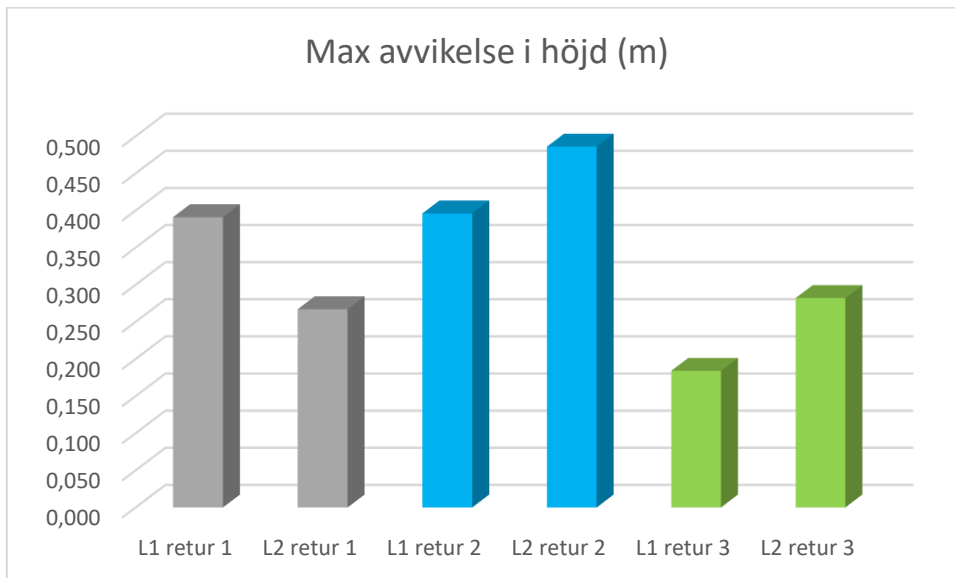
Bilaga C16. DTM av Zenmuse L2 med 1 retur i TBC.



Bilaga C17. DTM av Zennuse L2 med 2 returer i TBC.



Bilaga C18. Jämförelse i min avvikelse i höjd mellan de olika returerna för Zenmuse L1 och Zenmuse L2



Bilaga C19. Jämförelse i maxavvikelse i höjd mellan de olika returerna för Zenmuse L1 och Zenmuse L2.