

Georeferering av ortofoton med UAV

En jämförelsestudie mellan direkt och indirekt georeferering

Joan Abdi och Joel Johansson

2020

Examensarbete, Grundnivå (kandidatexamen), 15 hp
Lantmäteriteknik
Lantmätarprogrammet, teknisk inriktning

Handledare: Faramarz Nilfouroushan
Examinator: Mattias Lindman
Biträdande examinator: Ulrika Ågren

Förord

Högskolan i Gävle har tagit oss genom en resa av studier, vänskap och minnen för livet. 180 högskolepoäng har lärt oss mycket och vi är nu redo att ta del av allt vi har lärt oss samt påbörja ett nytt kapitel i livet som teknisk lantmätare. En examen är inte komplett förrän efter att C-uppsatsen är skriven och publicerad. Uppsatsen fullbordades tack vare den hjälp och support vi har fått under tidens gång.

Vi vill först och främst tacka vår handledare Faramarz Nilfouroushan, för alla Zoom-möten, den expertis och positiva inställning till vårt examensarbete. Tack till Arash Jouybari för UAV-flygningen, utan det insamlade data hade vi inte haft ett examensarbete som det ser ut idag. Ett tack till Marianne Berg som fanns tillgänglig på skolan oavsett de rådande omständigheter som sker ute i världen.

Till sist ett stort tack till alla klasskamrater som fungerade som stöttepelare under denna period och alla perioder innan. Med dessa ord avslutar vi vår utbildning inom Lantmäteriteknik på Högskolan i Gävle och vi vill tacka alla som har tagit del av vårt studieliv.

Tack så mycket.

Joan Abdi

Joel Johansson

Sammanfattning

UAV (Unmanned Aircraft Vehicle) har revolutionerat ortofotoframställningen med sitt bidrag till ökad säkerhet, lägre kostnader samt effektivare arbetsgång vid framställning av ortofoton. Den traditionella flygfotogrammetrin med flygplan och utplacering av flygsignaler har varit den givna metoden i många år. Att flyga med UAV istället för flygplan sparar tid och pengar däremot är utplacering och inmätning av flygsignaler fortfarande tidskrävande och därfor kostsam. Företaget DJI har tagit fram en ny UAV med namnet DJI Phantom 4 RTK vilken stödjer möjligheten att använda satellitbaserad positionering för direkt georeferering.

Den här studien har jämfört två olika georefereringsmetoder för framställning av ortofoton med UAV: direkt georeferering med NRTK (satellitbaserad positionering och nätverks-RTK) samt indirekt georeferering med olika antal markstödpunkter. Studien utfördes vid Högskolan i Gävle på en yta av åtta hektar. En undersökning av avvikelse i plan och höjd resulterade i acceptabla värden enligt de riktlinjer som följdes i HMK – Ortofoto (2017) samt de kontroller som genomfördes enligt SIS-TS 21144:2016.

RMS-värdet i plan för den indirekta georefereringsmetoden ligger på 0,0102 m. För den direkta georefereringsmetoden ligger RMS-värdet i plan vid användning av markstödpunkter mellan 0,0132 och 0,0148 m. Slutligen för den direkta georefereringsmetoden utan markstödpunkter är RMS-värdet i plan på 0,0136 m. RMS i höjd ligger inom intervallet 0,008-0,025 m.

Det som redovisas i studien visar att en accepterad kvalitet av ortofoton går att erhålla baserat på de RMS-värden i plan och höjd med samtliga georefereringsmetoder som testats. Efter genomförda kontroller och utvärdering av de resultat kan det konstateras att de olika georefereringsmetoderna skiljer inte mycket åt varandra kvalitetsmässigt. Dock är den direkta georefereringsmetoden utan markstödpunkter mycket effektivare ur ett tidsperspektiv.

Phantom 4 RTK är ny på marknaden och det behöver utföras mer forskning för att få en större insikt av dess potential. Dock krävs det mer forskning kring direkt georeferering för utvärdering av ortofotons kvalitet.

Nyckelord: Network Real Time Kinematic (NRTK), UAV photogrammetry, accuracy assessment, georeferencing, DJI Phantom 4 RTK

Abstract

UAV (Unmanned Aircraft Vehicle) has revolutionized the creation of orthophotos with its contribution to increased safety, lower costs and more effective ways when making orthophotos. The traditional aerial photogrammetry with airplanes and placement of flight signals has been the standard method for years. To fly with UAV instead of an airplane is cheaper and saves time, however, the placement and measurements of flight signals is still time consuming and therefore expensive. The company DJI has developed a new UAV called Phantom 4 RTK that supports satellite based technology for direct georeferencing.

This study compared two different measuring methods when producing orthophotos with UAV: direct georeferencing with NRTK (Network Real Time Kinematic) and indirect georeferencing when using different number of Ground Control Points (GCP). The study was conducted at the University of Gävle over an area of eight hectares. An investigation of the deviation in plane and height resulted in acceptable units based on the guidelines that were followed in HMK – Ortofoto and the controls that were followed from SIS-TS 21144:2016.

The RMS value in plane for the indirect georeferencing method is 0,0102 m. For the direct georeferencing method the RMS value in plane when using ground control points is between 0,0132 and 0,0148 m. At last the RMS value for the direct georeferencing method without ground control points is 0,0136 m. The RMS value in height is between the intervals 0,008-0,025 m.

The data presented in this study show that an accepted quality in the orthophotos can be acquired based on the RMS values in plane and height for every georeferencing that was tested. After accomplished controls and evaluation the results show that the different georeferencing methods doesn't differantiate too much from each other based on their quality. However, the direct georeferencing method with ground control points is more effective from a time perspective.

Phantom 4 RTK is new on the market and more research is necessary in order to understand the potential of this technology and its possibility to integrate into society. More research is required for the direct georeferencing method in order to evaluate the quality of orthophotos.

Keywords: Network Real Time Kinematic (NRTK), UAV photogrammetry, accuracy assessment, georeferencing, DJI Phantom 4 RTK

Innehållsförteckning

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	3
1.3	Frågeställningar	3
1.4	Avgränsningar	4
2	Litteraturstudie.....	5
3	Metod och material	9
3.1	Studieområde	9
3.2	Utplacering och inmätning av flygsignaler	11
3.3	Inmätning av kontrollprofiler	13
3.4	Flygning med UAV	16
3.4.1	NRTK	18
3.4.2	Traditionell fotogrammetrisk mätning med UAV	19
3.5	Databearbetning	19
3.5.1	Databearbetning av flygdata.....	19
3.5.2	Databearbetning av kontrollprofiler	21
3.6	Kontrollberäkningar och utvärderingar	22
3.6.1	Kontroll av lägesosäkerhet i plan.....	22
3.6.2	Kontroll av lägesosäkerhet i höjd	24
3.6.3	Kontroll av kontrollpunkter	26
3.6.4	Kontroll av NRTK+1 och NRTK data.....	26
4	Resultat	27
4.1	Kontroll av GNSS-instrument	27
4.2	Medeltalsbildade koordinater för samtliga flygsignaler.....	27
4.3	Ortofoton framtagna i Agisoft	28
4.4	RUFRISS-etablering	29
4.5	Avvikeler i plan	29
4.6	Lägesosäkerheter i höjd	32
5	Diskussion	42
6	Slutsats.....	49
6.1	Framtida studier	50
	Referenser	51
	Bilaga A Parameterlista	A1
	Bilaga B Agisoftrapport, no-RTK.....	B1
	Bilaga C Agisoftrapport, NRTK+1	C1
	Bilaga D Agisoftrapport, NRTK+1.....	D1
	Bilaga E Agisoftrapport, NRTK.....	E1
	Bilaga F Inmätta markstödpunkter/kontrollpunkter.....	F1
	Bilaga G Timestamp.....	G1
	Bilaga H Flödesschema för databearbetningsprocess.....	H1

1 Introduktion

Följande kapitel är avsett att ge en bakgrund till de större begreppen i studien och presentera dess syfte och frågeställningar som den avser att besvara. Kapitlet kommer även att behandla dess avgränsningar.

1.1 Bakgrund

UAV står för Unmanned Aerial Vehicle och är en obemannad flygfarkost som går under många namn, bland annat drönare eller UAS (Unmanned Aearial System) (Colomina & Molina, 2014). Begreppet UAV är det som genomgående kommer att användas i denna studie. Potentialen av att använda UAV för kartering upptäcktes redan på slutet av 70-talet och idag genererar denna marknad stora pengar och är mer relevant än någonsin tidigare (Colomina & Molina, 2014). UAV har gått från att användas för militära syften vid spionage och i vapensyfte till att användas som ett instrument vid naturkatastrofer och fotogrammetri (Colomina & Molina, 2014). Idag är UAV inom fotogrammetrin ett självklart val för många aktörer med tanke på dess potential (Colomina & Molina, 2014).

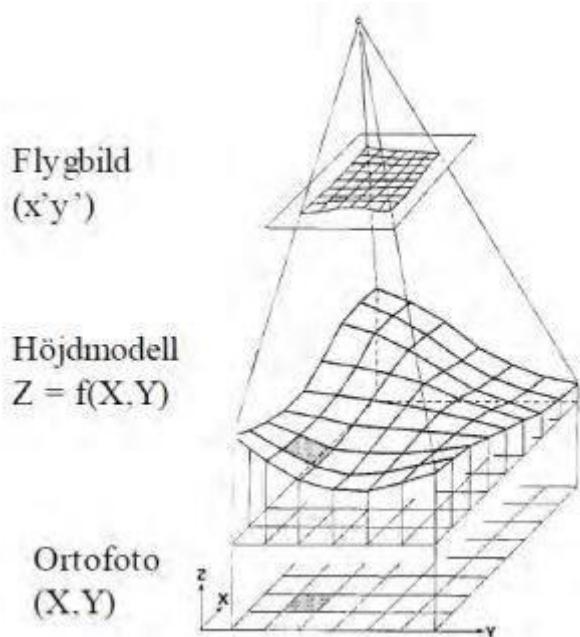
Fotogrammetri är en teknik som med hjälp av olika tolkningar och mätningar i en eller flera bilder bestämmer och visar position, geometrisk form och andra egenskaper hos avbildade föremål. Flygfotogrammetri syftar till bilder tagna från luften där oftast ett flertal bilder tas i flygstråk som överlappar varandra för att skapa ett block av bilder. Detta block används bland annat för kartframställning.

Flygbilderna lägesbestäms till ett yttre koordinatsystem genom direkt eller indirekt georeferering. Vid indirekt georeferering används kända koordinater på marken i form av markstödpunkter för att lägesbestämma bilderna (Lantmäteriet m.fl., 2013). Vid direkt georeferering används UAVns positioneringssystem samt dess IMU (Inertial Measurement Unit) för att bestämma dem externa orienteringsparametrarna för bilderna (CHIO, 2016).

Vid fotogrammetrisk mätning har markstödpunkter en viktig roll för att få en exaktare georeferering och har därför länge varit en given metod för att få en noggrann georeferering av den yta som ska mätas in med UAV (Zhang et al., 2019). Utplacering av markstödpunkter är en kostsam och tidskrävande process och kvaliteten av UAV-inmätningen står i hög grad i relevans till antalet markstödpunkter som används och hur de placeras (Zhang m.fl., 2019). Optimal placering av markstödpunkter enligt HMK – flygfotografering (2017), sektion 3.1.2 innefattar en jämn fördelning av markstödpunkterna vid hörnen, kanterna och vid mitten av mätningsytan.

Utsättning av markstödpunkterna vid ytterkanterna av mätningsytan är till för att minska lägesosäkerheten inom N och E-koordinat och markstödpunkter i mitten av mätningsytan hjälper till att minimera fel i höjd. Inom denna studie kommer begreppet flygsignaler att användas vilket är en gemensam benämning för markstödpunkter (GCP) och kontrollpunkter (CP). Enligt Chio (2016) är inmätningen och etableringen av markstödpunkter ett krav för att kunna placera och orientera flygbilder i ett yttre referenssystem vilket kallas indirekt georeferering. Vid direkt georeferering bestäms koordinaterna för kamerans projekionscentrum med hjälp av det inbyggda positionssystemet i UAVn (Chio, 2016). Enligt HMK – Flygfotografering finns det en gemensam benämning för orientering och placering av flygbilder i ett yttre referenssystem vilket kallas blockutjämning (Lantmäteriet, 2017a).

Ortofoto är en flygbild som räknats om till en vinkelrät projektion av terrängen. Denna projektion sammanställer den ritade kartans geometri med flygbildens innehåll. För att framställa ett ortofoto krävs det en digital flygbild och en digital höjdmodell. Ortofoton kan delas in i två olika typer, traditionellt ortofoto samt sant ortofoto. Vid traditionellt ortofoto används digital terrängmodell tillsammans med flygbilder för att kunna projicera mark och byggnader ortogonal. Sant ortofoto använder digital ytmall ihop med flygbilder för att projicera samtliga objekt samt marken ortogonal. Figur 1 visar på hur en ortofotoframställning går till där en flygbild och höjdmodell utgör grundpelarna bakom framställningen (Lantmäteriet m.fl, 2013).



Figur 1. Generell princip bakom ortofotoframställning. Bild hämtad från (Lantmäteriet m.fl, 2013).

Med dagens teknik har UAV möjligheten att använda olika GNSS (Global Navigation Satellite System)-tekniker såsom NRTK vid fotogrammetriska mätningar. RTK är realtidsmätning där korrektionerna från en referensstation skickas till UAVn samtidigt som den mäter och förbättrar GNSS-datat under tidens gång (Tomaštík, Mokroš, Surový, Grznárová & Merganic^v, 2019). Vid NRTK bestäms läget på UAVn av ett antal fasta referensstationer samt satellitobservationer (Lantmäteriet, 2017a). Vid NRTK-metoden, som tidigare nämnts, uppstår en samverkan mellan olika referensstationer för en kontinuerlig RTK-mätning. Grundtanken är att referensstationerna skickar kontinuerlig GNSS-data till en driftledningscentral som i sin tur samlar in felkällor som uppkommer i bland annat atmosfären. Slutligen skickas korrektioner tillbaka till GNSS-instrumentet, detta för att erhålla en lägesosäkerhet på centimeternivå ("Nätverks-RTK | Lantmäteriet," n.d.). Vid flygningar med UAV sparas kamerans positioner i UAVn. När no-RTK tekniken tillämpas används däremot inte kamerans positioner till skillnad från NRTK-metoden där positionerna används.

I det här examensarbetet kommer HMK – standardnivå 3 att följas enligt HMK – Geodatakvalitet 2017. Detta eftersom HMK standardnivå 3 möjliggör användningen av insamlad bilddata med UAV där kraven på lägesosäkerhet ligger på fem centimeter eller bättre.

1.2 Syfte

Den här studien kommer att granska och bedöma två olika metoder för georeferering vid fotogrammetrisk mätning med UAV, nämligen direkt georeferering med NRTK-tekniken och indirekt georeferering med användning av markstödpunkter. Därefter kommer dessa två metoder att jämföras mot varandra. Syftet med denna studie är att få en djupare förståelse över skillnaderna mellan direkt georeferering och indirekt georeferering med markstödpunkter vid flygning med UAV. Samt behovet av markstödpunkter vid direkt georeferering med satellitbaserad positionering. UAV med NRTK-teknik har blivit allt mer populär på grund av en låg kostnad, högre säkerhet och mer tidseffektivt arbete (Rabah, Basiouny, Ghanem, & Elhadary, 2018)

1.3 Frågeställningar

- Vad blir avvikelsen i ortofoton i plan vid jämförelse mellan direkt och indirekt georeferering vid mätning med UAV där en jämförelse mellan ortofoto och kontrollpunkter genomförs?

- Vad blir avvikelsen i ortofoton i höjd vid jämförelse mellan direkt och indirekt georeferering vid mätning med UAV där en jämförelse mellan ortofoto och terrängmodell genomförs?
- Vad är lägsta antalet markstödpunkter vid direkt georeferering med NRTK där kraven i plan uppfylls enligt HMK-standardnivå 3 och kontrollmetoden i HMK-ortofoto bilaga C?
- Vad är lägsta antalet markstödpunkter vid direkt georeferering med NRTK där kraven i höjd uppfylls enligt SIS-TS 21144:2016?

1.4 Avgränsningar

Denna rapport kommer att jämföra avvikelser mellan direkt och indirekt georefereringar vid skapande av ortofoton med hjälp av UAV-insamlad data.

Studien riktar in sig specifikt på framställning av ortofoto och terrängmodell med DJI Phantom 4 RTK UAV som kommer att användas efter tillverkarens specifikationer. Studieområdet avgränsas till campusområdet på Högskolan i Gävle vilket defineras av höga byggnader, gräs och asfalt. Detta medför att angränsande skogspartier samt träd kommer att exkluderas.

2 Litteraturstudie

Indirekt georeferering har långt varit den givna metoden inom fotogrammetri. På senaste tiden har möjligheter öppnats för att implementera direkt georeferering istället, särskilt inom flygfotogrammetri (Rabah, Basiouny, Ghanem & Elhadary, 2018). Rabah m.fl. (2018) anser att det finns fyra fördelar med direkt georeferering: snabbare fältarbete och data bearbetning, enklare utförande samt lägre kostnad.

Enligt Zhang m.fl. (2019) är den indirekta georefereringen en bra metod för att erhålla tillförlitliga positioneringar. Dock poängterar Zhang m.fl. (2019) att den geometriska noggrannheten är väldigt beroende av antalet markstödpunkter som används i denna metod. Detta medför i sin tur att denna metod är mer kostsam och tidskrävande. I motsvarighet till det Zhang m.fl. (2019) säger, skriver Forlani m.fl. (2018) att användning av markstödpunkter är den mest tidskrävande arbetet ute i fält vid mätning med UAV. Vidare förklarar Forlani m.fl. (2018) att direkt georeferering utan markstödpunkter är genomförbara om särskild hänsyn tas till kamerakalibrering och UAVn innehåller GNSS-mottagare med integrerad RTK. Anledningen till att kamerakalibrering ska utföras är att vid direkt georeferering används UAVns GNSS-mottagare samt den inbyggda IMU vid lägesbestämning med UAV.

Tziavou, Pytharouli & Souter (2018) beskriver att det finns ett antal parametrar som ska läggas i beaktandet vid flygningar med UAV såsom flyghöjd, överlappen mellan bilderna, bildupplösningen samt lins och kamerainställningarna. Tziavou m.fl. (2018) menar att dessa parametrars vikt påverkar inte bara upplösningen av de erhållna bilderna utan även tiden som spenderas ute i fält, tiden för efterbearbetningen samt ansträngningen att producera punktmoln och fotomosaik. Tmušić m.fl. (2020) lägger också stor vikt på planeringen och har lagt upp en generell guide vilken går att följa i deras artikel.

Tziavou m.fl. (2018) förklarar att en överlappning på minst 60 % i flygriktningen och minst 20 % i sidled ska anses som godkänt inom fotogrammetri för att en fotomosaik ska kunna skapas. Colomina & Molina (2014) rekommenderar däremot en överlappning på 80 % i flygriktningen och 60–80 % i stråköverlappet vid användning av UAV. Tmušić m.fl. (2020) rekommenderar också ett överlapp på 80 % i flygriktning och 60 % i sidled vid flygning över skogsområde. Däremot är ett överlapp på 70 % i flygriktningen och 40 % i stråköverlappet att rekommendera på mer öppna ytor där konjunktionspunkter lätt går att identifiera någonting att rekommendera (Tmušić et al., 2020). Tmušić m.fl. (2020) poängterar dock att det inte finns någon allmän metod vid val av överlapp vid flygning utan att varje flygning i sig är unik där de minsta ändringar i parametrarna kan påverka kvaliteten i flygningen.

Tziavou m.fl. (2018) nämner att antalet markstödpunkter markant kan påverka noggrannheten på fotomosaiken och att antalet markstödpunkter beror på det studerade områdets topografi samt metoden för upprättandet av GNSS positionering. Tziavou m.fl. (2018) menar att vid RTK-mätning med UAV krävs det endast en markstödpunkt men för alla andra typer av mätningar som till exempel traditionell flygning med UAV, krävs minst fyra väl utspridda markstödpunkter samt att markstödpunkterna används för kamerakalibrering. Forlani m.fl. (2018) jämförde två olika flygningar med NRTK. Bland annat en flygning där blockutjämning genomfördes mot en markstödpunkt och en flygning utan markstödpunkter (Forlani et al., 2018). Forlani m.fl. (2018) konstaterade att skillnaden i plan inte skilde sig mycket åt ändemot blev det en signifikant differens i höjd. Om en markstödpunkt placerades i centrum av studieområdet kunde de systematiska felkällorna undvikas i höjd vid NRTK-mätning (Forlani et al., 2018). Larsson & Stark (2019) kontrollerade lägesosäkerheten i plan med hjälp av DJI:s nya UAV: Phantom 4 RTK. Larsson & Stark (2019) kom fram till att det var möjligt att framställa ett ortofoto utan markstödpunkter enligt de krav som följdes i HMK - standardnivå 3. Larsson & Stark (2019) erhöll en sammanlagd lägesosäkerhet i plan på 0,029 m vid direkt georeferering utan markstödpunkter. Precis som i Forlani m.fl. (2018) rapport uppkommer stora systematiska fel i höjd vid NRTK-mätning utan markstödpunkter (Larsson & Stark, 2019). Larsson & Stark (2019) ser också behovet av markstödpunkter för att eliminera de systematiska effekterna i höjd. Enligt Martínez-Carricundo m.fl. (2018) erhålls längsta avvikelse vid indirekt georeferering med UAV när markstödpunkterna är placerade på kanten av området detta för att få bättre kvalitet för plan-koordinater. Markstödpunkterna bör även finnas utsprida i mitten av området i syfte att få en lägre osäkerhet i höjd (Martínez-Carricundo et al., 2018). Martínez-Carricundo m.fl. (2018) poängterar även att efter ett visst avstånd mellan markstödpunkterna blir kvaliteten inte mycket bättre med ett högre antal markstödpunkter nära inpå varandra. Placering av flygsignaler är det mest tidskonsumerade arbetet vid fotogrammetri vilket optimering av utplacering av markstödpunkter drastiskt kan spara in tid på. Tomaštík m.fl. (2019) har i sin studie undersökt noggrannheten av NRTK med hjälp av det Slovakiska positionstjänsten (SKPOS), vid flygningar med UAV för att erhålla kamerans positioner med hjälp av GNSS. Två olika uppsättningar av markstödpunkter användes (fyra samt nio stycken) som en jämförelse (Tomaštík et al., 2019). Tomaštík m.fl. (2019) ser dess positiva inverkan av ett väl distribuerat nät av markstödpunkter men att enbart öka antalet markstödpunkter är för tidskrävande för att anses vara effektivt.

Vid positionering av en laserskanner kontrollerade Mårtensson m.fl. (2012) bland annat en NRTK-GNSS-mottagare. Mårtensson m.fl. (2012) erhöll en standardosäkerhet i plan på under 10 mm och en standardosäkerhet i höjd på under

16 mm vid positionering av en laserskanner med NRTK när en mätning av en minut med en GNSS-mottagare utfördes. Liknande metod vid innmätning av flygsignaler användes av Reshetnyuk & Mårtensson, (2016) vid ett senare skede, där de mätte in varje flygsignal med en GNSS-mottagare uppkopplad till NRTK i 60 sekunder. Reshetnyuk & Mårtensson, (2016) rekommenderar att mäta in respektive flygsignal under två tidpunkter med ett tidsintervall av minst 45 minuter för att undvika systematiska fel, vilket inte genomfördes i deras studie på grund av tidsbrist.

Tomaštík m.fl. (2019) undersökte ett område i Slovakien med en area på 270 hektar där resultaten mellan RTK och markstödpunkter skiljde sig en aning. När RTK och markstödpunkter användes samtidigt blev resultatet inte bättre än om bara markstödpunkter användes (Tomaštík et al., 2019). Rabah m.fl. (2018) nämner att tekniker där man använder sig utav markstödpunkter har många nackdelar: tidskrävande, kostsamt samt svår att sätta ut beroende på terräng och miljö. Rabah m.fl. (2018) beskriver även avsaknaden av topografiska kartor i flera områden runt om i världen som ett problem just på grund av att terrängförhållandena försvårar utplacering av markstödpunkter. En lösning på problemet kan vara användning av direkt georeferering istället för indirekt georeferering då man inte behöver markstödpunkter (Rabah et al., 2018). Enligt Zhang m.fl. (2019) finns det dock vissa svårigheter med RTK-positionering eftersom den kräver radiosignal eller internetuppkoppling mellan en bas och UAV. Detta kan enligt Zhang m.fl. (2019) bli utmanande eftersom det kan uppkomma avbrott i radio/internetsignalen eller att GNSS signalen blockeras. Fazeli, Samadzadegan & Dadrasjavan (2016) beskriver i sin studie att RTK-GPS-systemet är det mest noggranna positioneringssystemet då den har en noggrannhet på några få centimeter. Enligt Fazeli m.fl. (2016) är positioneringens noggrannhet påverkad av flera olika källor där jonosfärens fördräjning spelar en avgörande roll, vilket är en felkälla Fazeli starkt reducerade med hjälp av en dubbelfrekvens-mottagare. Chio (2016) beskriver i sin studie hur han undersöker RTK-teknik vid UAV-mätningar och kontrollerar om det går att minska antalet markstödpunkter som ska användas vid blockutjämningen. Efter genomfört arbete kunde Chio (2016) komma fram till slutsatsen att de positioner som mättes in under UAVns flygtid räcker för den direkta georefereringen.

Att ta i betänkande är de felkällor som kan uppstå vid NRTK-mätning. Inom GNSS-mätning är jonasfärssördröjning en viktig felkälla vilket påverkar mottagarens erhållna position (Fazeli, Samadzadegan & Dadrasjavan, 2016). SWEPOS driftledningscentral, vilket är beläget på lantmäteriets huvudkontor i Gävle är lantmäteriets stödsystem för positionering av satelliter och på deras tjänsteportal kontrolleras bland annat jonasfärstörningar (Swepos Tjänsteportal, u.å.). Jonasfärstörningar bör kontrolleras vid mätning med GNSS eftersom solens aktivitet bildar laddade partiklar i atmosfären som i sin tur gör att GNSS-mottagaren kan störas om den stöter på de laddade partiklarna (Swepos Tjänsteportal, u.å.). Resultatet kan bli att mätosäkerheten blir hög och fixlösningen försvåras (Swepos Tjänsteportal, u.å.). Position Dilution Of Precision (PDOP) är också en av de parametrar som bör kontrolleras vid GNSS-mätning för att säkerställa att mätresultatet inte påverkas av dålig satellitkonfiguration (Lantmäteriet, 2017b). Ett lågt PDOP-värde resulterar i lägre osäkerhet och bör ligga under 3 för god satellitgeometri (Lantmäteriet, 2017b). PDOP-värdet är det DOP-värde som påverkas av antalet satelliter och dess position i relation till placeringen av mottagaren (Lantmäteriet, 2017b).

3 Metod och material

Kapitlet metod och material kommer att omfatta beskrivning av studieområdet. Det kommer även att beskriva val av utrustning för samtliga mätningar men även vilka programvaror som har använts för att bearbeta det insamlade data. Slutligen kommer det att beskrivas vilka metoder som har använts inom studien.

3.1 Studieområde

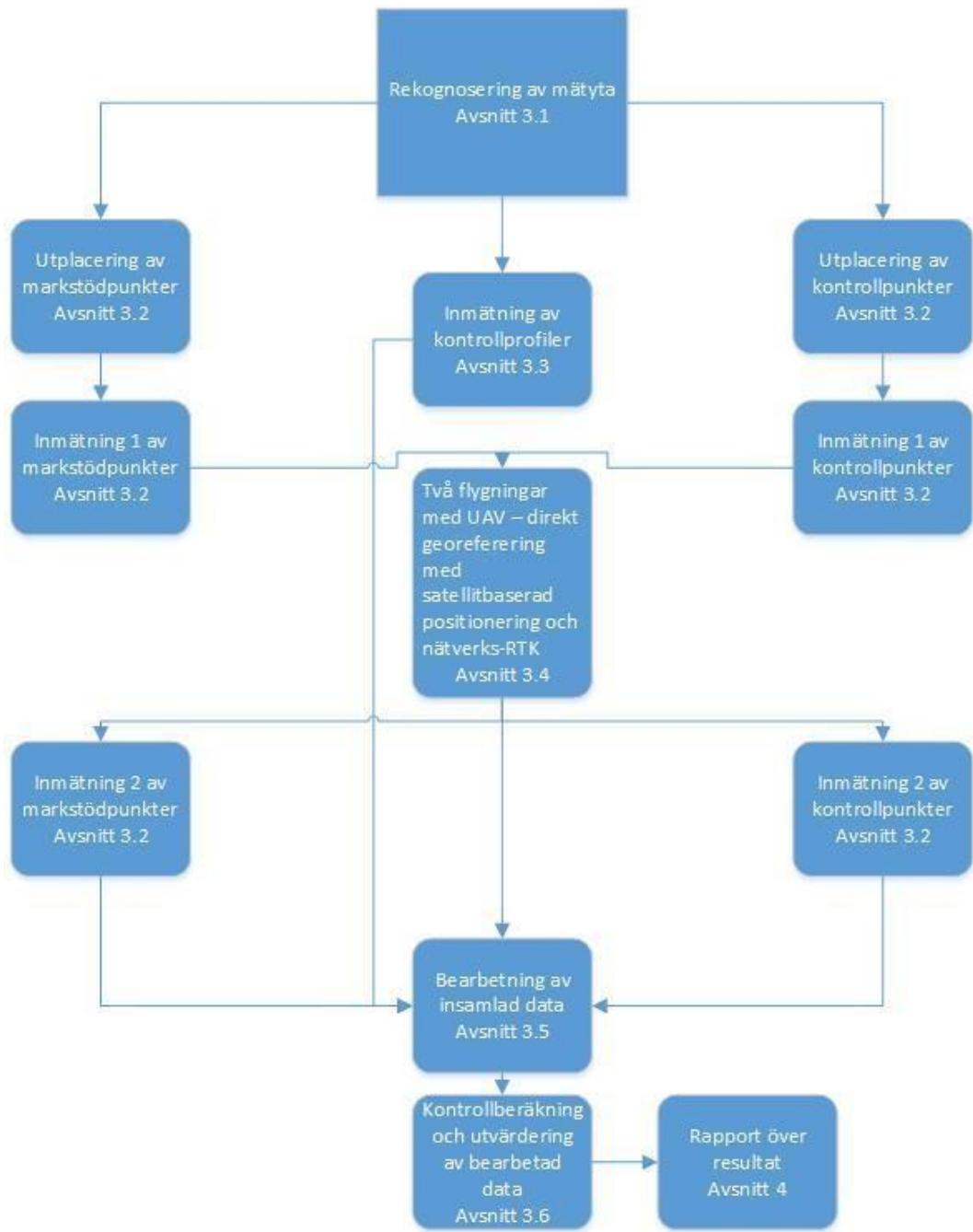
Högskolan i Gävle valdes som mätningsyta då området är av högt intresse inom Lantmätarprogrammet. Detta eftersom många av de laborationer, mätningar samt undersökningar inom detta program har genomförts i direkt anslutning till högskolan. En positiv bieffekt är att det också finns andra utbildningar vid högskolan som kommer att ha nytta av aktuellt flygmätdata över området.

Sammanlagt placerades 19 flygsignaler ut – elva markstödpunkter och åtta kontrollpunkter som mättes in över området samt genomfördes två flygningar genomfördes med UAV under en mätdag (Figur 2). Storleken på den yta som UAVn flög över är åtta hektar. All utrustning tillhandahölls av Högskolan i Gävle vilket möjliggjorde att mätningarna var lätt att utföra ur en planeringssynpunkt.



Figur 2. 19 flygsignaler utplacerade på studieområdet. 11 markstödpunkter markerade i ljusblå färg (GCP) och 8 kontrollpunkter markerade i gul färg (CP). De mörkblåa färgerna symbolisera flaggor utplacerade på respektive flygsignal (Screenshot tagen från Agisoft Metashape Professional, version 1.6.2).

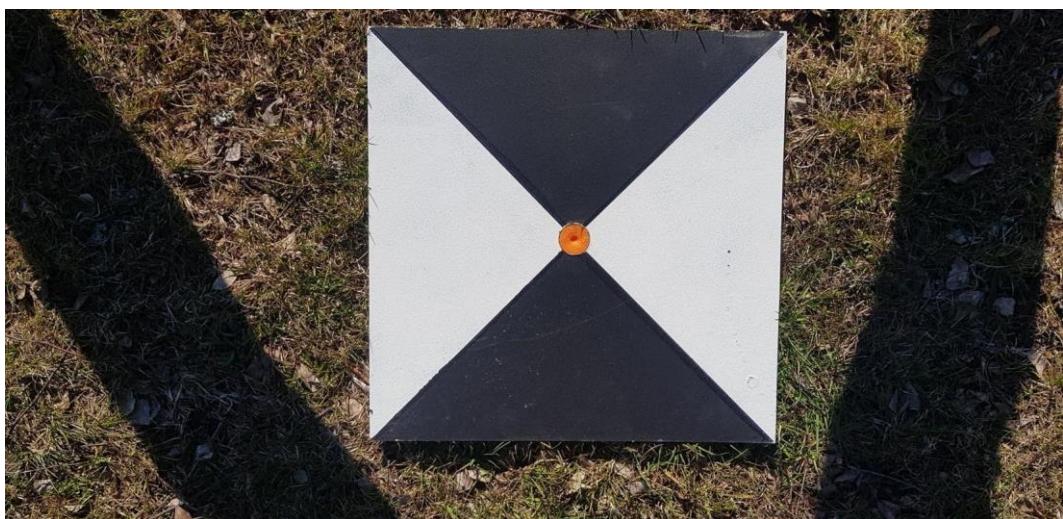
Nedanstående flödesschema ger en övergripande bild över studiens genomförande (Figur 3).



Figur 3. Ett övergripande flödesschema över studiens olika genomförandemoment

3.2 Utplacering och inmätning av flygsignaler

För att kunna georeferera samt utvärdera lägesosäkerheten av de skapade ortofoton krävs det att markstödpunkter samt kontrollpunkter placeras väl utspritt över mätområdet. I denna studie användes elva markstödpunkter (Figur 2) som placerades i ytterkanterna på flygområdet samt några i mitten enligt rekommendationer från HMK – Flygfotografering 2017. Åtta stycken kontrollpunkter mättes in i denna studie som placerades väl utspridda över området oberoende av resterande markstödpunkter eftersom markstödpunkterna användes för georeferering. Antalet flygsignaler som användes i studien baserades utifrån en egen bedömning. Anledningen till varför kontrollpunkter används är för att kunna kontrollera de resultat som erhålls från UAV-mätningen. Flygsignaler för utplacering av markstödpunkter samt kontrollpunkter tillhandahölls av Högskolan i Gävle. Både markstödpunkterna samt kontrollpunkterna signalerades med hjälp av 40 x 40 cm stora skivor som var målade i svart och vit färg för att lättare kunna lokaliseras från UAVns kamera. Skivorna var utformade på ett sådant sätt som möjliggjorde att använda plastspik för att fasthålla dessa horisontellt mot marken (Figur 4).



Figur 4. Bild på flygsignal med måtten 40x40 cm fastspikad med orange spik i mark. Bild tagen av Joan Abdi.

Markstödpunkterna samt kontrollpunkterna mättes in med Leicas GNSS-mottagare GS14. Koordinatsystemet som valdes var SWEREF 99 16 30 i plan samt RH 2000 i höjd. En elevationsgräns på 15 grader valdes i GNSS-mottagaren för att eliminera satelliter med en för låg satellitelevation för att minimera flervägsfel och undvika att satellitsignalerna färdas för långt inom atmosfären där signalen lättare påverkas (Lantmäteriet, 2017b). GPS och GLONASS användes som satellitsystem. En kontroll av GNSS-utrustningen genomfördes genom att mäta in mot en känd punkt två gånger (Figur 5).

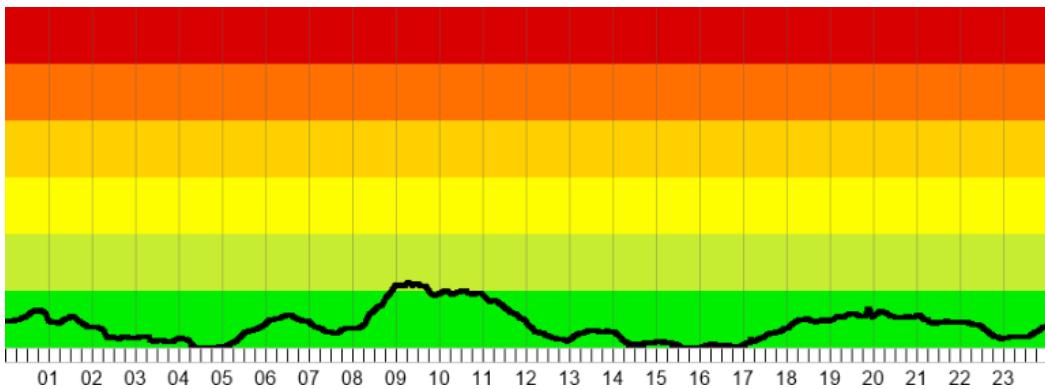


Figur 5. Fyra timmar statisk mätning över en skruv i sten den 9:e maj 2019. Bild tagen av Joel Johansson.

Den kända punktens ursprung är från en statisk mätning på fyra timmar över en skruv som placerades i den aktuella stenen (Figur 5) den 9:e maj 2019. En skillnad i koordinaterna från GNSS-mätningarna och den statiska mätningen beräknades fram.

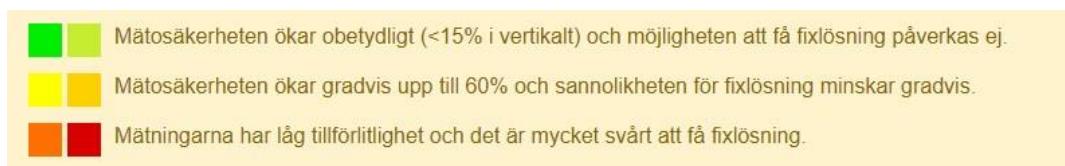
Samtliga flygsignaler placerades inom studieområdet och mättes in i två omgångar där varje mätning utfördes i 60 sekunder enligt rekommendation från Mårtensson, Reshetnyuk & Jivall (2012). GNSS-mottagaren var placerad på en Leica-lodstav med höjden 2 meter och stabiliseras med hjälp av två metall-käppar. Första omgången av inmätningar av flygsignalerna utfördes från kl. 08-09 och andra omgången från kl. 10-11, med en timmes mellanrum enligt rekommendation från Reshetnyuk & Mårtensson (2016) där de rekommenderar att inmätning ska ske med ett mellanrum av minst 45 minuter.

Innan inmätningarna av flygsignalerna hade påbörjats utfördes det en kontroll mot SWEPOS tjänsteportal som redovisar jonasfärstörningar. Detta är en viktig åtgärd som bör genomföras innan mätningar med GNSS för att säkerhetsställa bra signaler (Figur 6).



Figur 6. Monitor över ionosfären för området Svealand från den 2020-04-21 (Swepos Tjänsteportal, u.å.).

Figur 7 representerar de olika färgskalorna från Figur 6.



Figur 7. Förlaring av de färgskalor som uppkommer i Figur 6 (Swepos Tjänsteportal, u.å.).

PDOP-värdet kontrollerades kontinuerligt vid varje inmätning av samtliga flygsignaler. Första epoken genererade PDOP-värden mellan 1,3 – 1,7 och andra epoken 1,3 – 1,9. Ett PDOP med ett värde mindre än 3 anses ge en god sattellitgeometri och rekommenderas vid mätning med GNSS (Lantmäteriet, 2017b). En ytterligare kontroll av flygsignalerna genomfördes genom att mäta med måttband mellan flygsignalerna CP6 och GCP11 där ett mått på 47,805 meter erhölls. En kontrollmätning i programmet Agisoft mellan ovanstående punkter resulterade på ett mått av 47,80 meter och flygsignalerna accepterades.

3.3 Inmätning av kontrollprofiler

Vid avvikelsebestämning i höjd kontrolleras en genererad digital ytmodell mot särskilt inmätta kontrollprofiler. Dessa kontrollprofiler används som en referens vid lägesosäkerhetsbestämningen i höjd. Det finns flera olika utföranden enligt standarden SIS-TS 21144:2016 och i denna studie valdes utförande A eftersom det utgör de krav av modeller som framställts från flygfotogrammetri. Enligt 21144:2016 genomförs utförande B när resultaten från utförande A innehåller avvikande resultat och skillnader. Antalet kontrollprofiler (K_n) bestämdes efter antalet marktyper i kontrolllytan (N) och hektarytan (A) och beräknades med följande formel (1) .

$$K_n = 3N + \sqrt{A} \quad (1)$$

Två marktyper mättes in på studieområdet, gräs samt asfalt, med en utvald area på tre hektar (Figur 8), vilket resulterade i att åtta kontrollprofiler utgjorde minimumkravet för antalet kontrollprofiler. Dock mättes in och användes tio kontrollprofiler för att få en överbestämmelse.



Figur 8. Det utvalda området markerat i en gul ruta är på 3 hektar där kontrollprofilerna mättes in (Screenshot tagen från Agisoft Metashape Professional, version 1.6.2).

Figur 9 illustrerar samtliga kontrollprofiler i det utvalda området.



Figur 9. Illustrering av samtliga kontrollprofiler (1-10) samt placering av totalstation.

Tio kontrollprofiler mättes in med en Leica TS15 som etablerades med hjälp av Leica Smartpole-metoden. Smartpole-metoden följer samma koncept som RUFRIS-metoden med den distinkta skillnaden att ett minimumkrav av 15 punkter ska mäts in vid etablering med RUFRIS-metoden (Trafikverket, 2012). Smartpole-metoden följer samma tillvägagångssätt som RUFRIS-metoden förutom att tio punkter mäts in istället för 15. Totalstationen placerades först på en trefot, horisonterades och därefter mättes instrumenthöjden in med ett specialanpassat måttband för Leica. Totalstationen mätte mot ett bakåtobjekt för kontroll av stationsriktning (Trafikverket, 2012). Tio punkter mättes in där varje punkt blev inmätt i 30 positioner med GNSS-mottagare som placerades på prismat. Sedan utfördes en mätning mot prismat vilket görs för att kontrollera GNSS-mätningen (Trafikverket, 2012). Punkterna placerades 360 grader runt totalstationen, (Trafikverket, 2012) och ca 20 meter ifrån. Totalstationen etablerades i referenssystemet SWEREF 99 16 30 för plan och RH 2000 i höjd. När etableringen av totalstationen var utförd påbörjades inmätning av samtliga kontrollprofiler där 20 punkter per profil mättes in enligt SIS-TS 21144:2016. Sammanlagt blev tio profiler inmätta som omfattade gräsyta och tre profiler på asfalt vilket resulterade i exakt 200 inmätta punkter.

3.4 Flygning med UAV

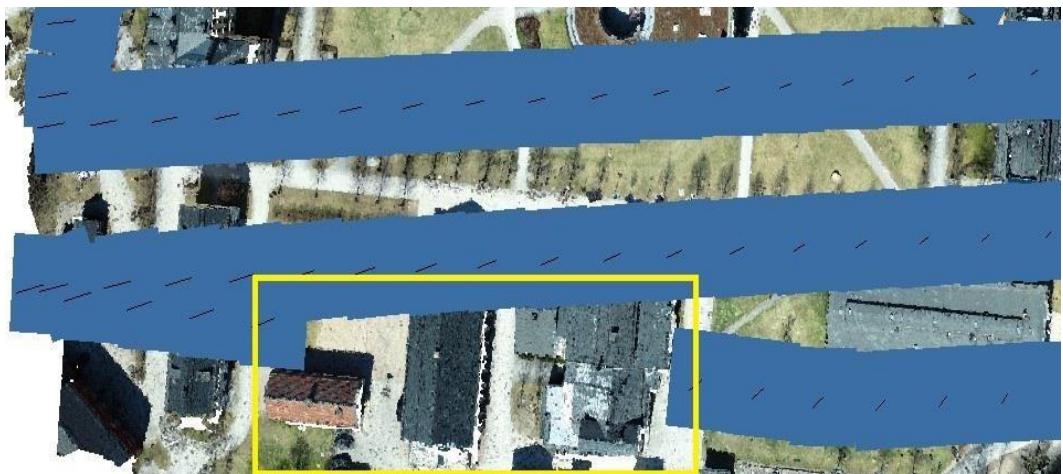
En UAV av märket DJI Phantom 4 RTK (Figur 10) har nyligen införskaffats av Högskolan i Gävle och har använts för att mäta in cirka åtta hektar över Högskolan i Gävle.



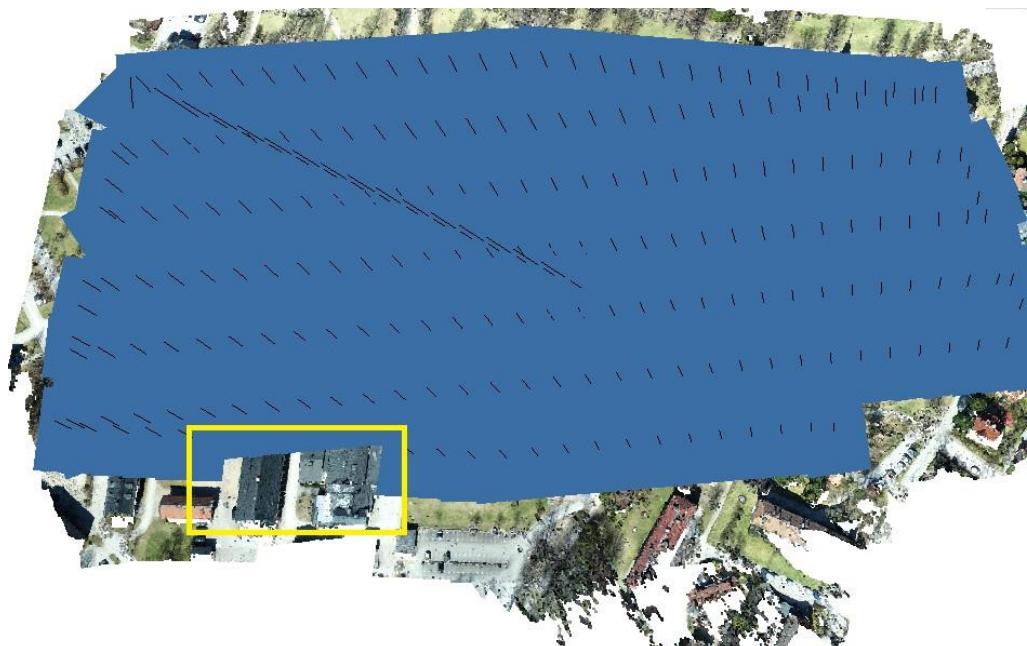
Figur 10. Bild på Phantom 4 RTK UAV och dess handkontroll. Bild hämtad från (“DJI Phantom 4 RTK - Voosestore,” n.d.).

Innan flygningen kontrollerades inställningarna i UAVns handkontroll där en överlapp framåt på 80 % och en stråköverlapp på 70 % valdes. Enligt Colomina & Molina (2014) är överlapp framåt på 80 % och en stråköverlapp på 70 % optimala vid UAV-flygning. Satellitsystemen GPS, GLONASS, GALILEO och BEIDOU användes för att få en redundans av satelliter vid UAV-flygningen för bästa möjliga resultat. UAVns kamera hade en vinkel på minus 90 grader vilket innebär att den siktar rakt ner mot marken och styrs av en gimbal vilket fungerar som en plattform och stabiliseringssmodul för kameran under flygning (DJI, 2018). Inställningen ”Altitude optimization” användes eftersom den optimerar höjden av flygningen genom att UAVn avslutar flygningen genom att flyga in mot mitten av flygområdet där kameran fotograferar i riktning framåt med en vinkel på 30 grader. Detta innebär att bilder tagna i 30 graders vinkel fotograferas snett rakt framåt och fångar en större del av studieområdet. Det i sin tur resulterar i att fler flygsignaler kan identifieras och markeras i programmet Agisoft Metashape. Hastigheten valdes till 6,3 m/sek och bilderna togs inom samma tidsintervall hela tiden vilket resulterar i att fler foton genereras där UAVn svänger. I kombination med en flyghöjd på 80 meter och ett studieområde på åtta hektar samt ovannämnda inställningar genererade varje UAV flygning 230 foton med en upplösning på 2,20 cm/per pixel. Av oförklarliga skäl producerade flygningen med den indirekta georefereringsmetoden enbart 224 bilder där sex bilder saknades i ett flygstråk. I

Figur 11 redovisas området med slingan innehållande de saknade bilderna. De blå fyrförkanterna är bilder tagna från drönaren under flygturen, där de svarta strecken är kamerapositionen för varje bild. I Figur 11 syns det tydligt och klart att det finns en flygsträcka på ca 100 meter där inga bilder har tagits. I Figur 12 redovisas en övergripande bild på studieområdet samt det område som innehåller de saknade bilderna som är markerat i gult.



Figur 11. Område i ett flygstråk där bild 16-21 saknades i no-RTK flygningen. De blå fyrförkanterna representerar tagna bilder från UAVn och de svarta sträckan visar kamerans position vid varje bildtagning. 80 % överlapp framåt 70 % stråköverlapp förekommer (Screenshot tagen från Agisoft Metashape Professional, version 1.6.2).



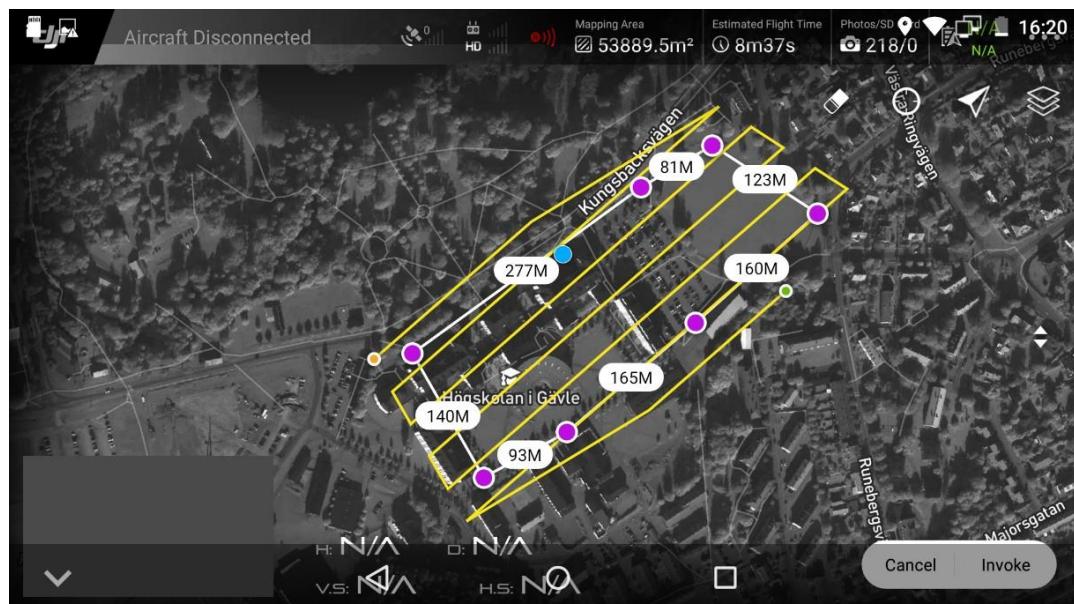
Figur 12. Studieområdet samt det gulmarkerade ytan som avgränsar det området som saknar bilder tagna med no-RTK flygningen.

Eftersom de saknade bilderna var belägna i utkanten av flygområdet accepterades ändå dessa data och flygningen behövde inte göras om. NRTK och no-RTK-flygningen pågick från klockan 11:30 fram till klockan 12:00 den 2020-04-21 i en vindstilla och solig miljö. Två flygningar med DJI Phantom 4 RTK genomfördes där fyra olika metoder analyserades i efterhand:

- NRTK utan markstödpunkter (NRTK)
- NRTK med 11 markstödpunkter (NRTK+11)
- NRTK med en markstödpunkt (NRTK+1)
- Traditionell fotogrammetrisk mätning med UAV med samtliga markstödpunkter och kontrollpunkter (no-RTK)

3.4.1 NRTK

DJI Phantom 4 RTK kopplas upp till tjänsten SWEPOS för att få kontinuerliga korrektioner av positionen från flera basstationer som är uppkopplad till SWEPOS-tjänsten. Med NRTK kan positioneringen av bilderna ske på centimeter-nivå och möjliggör en kontinuerlig lägesbestämning av UAVn under flygturen. Flygrutten finns att se i Figur 13.



Figur 13. Bild över Högskolan i Gävle (campusområdet) och den flygrutt som genomfördes (Screenshot tagen från DJI handkontrollen).

3.4.2 Traditionell fotogrammetrisk mätning med UAV

Vid traditionell fotogrammetrisk mätning, d.v.s. indirekt georeferering via markstöd, flyger farkosten utan direkt positionering av bilder med hjälp av GNSS och NRTK. Detta medför en lägesosäkerhet för bildkoordinaterna på meternivå vilket går att se i Bilaga G. Med anledning av detta blir behovet av markstödpunkter ett måste för vidare georeferering. Den traditionella fotogrammetrin med hjälp av UAV går ut på att använda samtliga markstödpunkter i denna studie för indirekt georeferering. Markstödpunkterna mäts in med vanligt GNSS-instrument för att få dess koordinater. För att positionsbestämma kameran för UAVn för varje framtagen bild är det nödvändigt att använda de insamlade parametrarna: markstödpunkternas koordinater samt UAVns IMU data. IMU-data från UAVn lagras i varje enskild bild vilket användes vid bearbetningen i Agisoft. Slutligen kan bilderna georefereras med hjälp av indirekt georeferering.

3.5 Databearbetning

De inmätta flygsignalerna importerades till SBG Geo för att bearbetas. Ett medelvärde för koordinaterna räknades fram från de två mätningarna och exporterades till en csv-fil (Comma delimited) vilket är det filformat som är kompatibelt med Agisoft programvaran vid import av markstödpunkter och kontrollpunkter. CSV-filen med dess inlagda markstödpunkter och kontrollpunkter kontrollerades i ett tidigare skede ute i fält där GNSS-utrustningen blev inmätt mot en känd punkt och PDOP-värdet observerades under varje mätningstillfälle. Respektive punkt benämndes med dess korrekta beteckning i csv-filen för att urskilja punkterna från varandra och därefter importerades samtliga markstödpunkter och kontrollpunkter in i Agisoft Metashape efter behov.

3.5.1 Databearbetning av flygdata

Vid bearbetning av UAV-bilderna användes programvaran Agisoft Metashape Professional vilket är en ny version av Agisoft Photoscan Professional. Agisoft Metashape Professional version 1.6.2 innehåller nya funktioner som Agisoft Photoscan Professional tidigare saknade som bland annat förbättrad klassificering av tät-punktmoln (Agisoft, 2020). Agisoft Photoscan Professional har länge varit standardprogrammet inom DEM och ortofotoframställning men har ersatts av Agisoft Metashape Professional. Vid bearbetning av flygdata följdes Agisoft manual (2018) vid framställning av DEM och fotomosaik.

Bilderna exporterades från DJI Phantom 4 RTK UAV och importerades in i Agisoft Metashape Professional. Därefter konverterades dessa till koordinatsystem SWEREF 99 16 30 för plankoordinaterna och till RH2000 för höjdkoordinaterna. Bildernas kvalité kontrollerades för att utesluta de bilder med låg skärpa då det kan påverka resultatet negativt enligt Agisoft (2018). Agisoft sätter ett värde mellan 0-1 på varje bild som baseras utifrån den skarpaste delen av fotot (Agisoft, 2018). De bilder med ett värde på under 0.5 rekommenderas att inte användas vid bildprocessen om det förmidas att det finns överlappande bilder som kan täcka bildens position (Agisoft, 2018). Kvalitén på bilderna inom denna studie låg på ett värde mellan 0.8-1 och samtliga bilder användes vid fortsatt bildprocess. Noggrannheten från kameran och de inmätta flygsignalerna som importeras senare i processen valdes baserat från erfarenhet efter bearbetat datat ett antal gånger och analys av dess resultat.

Noggrannheten för flygsignalerna sattes på tre cm och kamerapositioneringens noggrannhet sattes till fem cm vid bearbetning av NRTK-data. Vid no-RTK-flygningen sattes viktningen av kamerans noggrannhet på tio meter som är standardinställningarna i Agisoft.

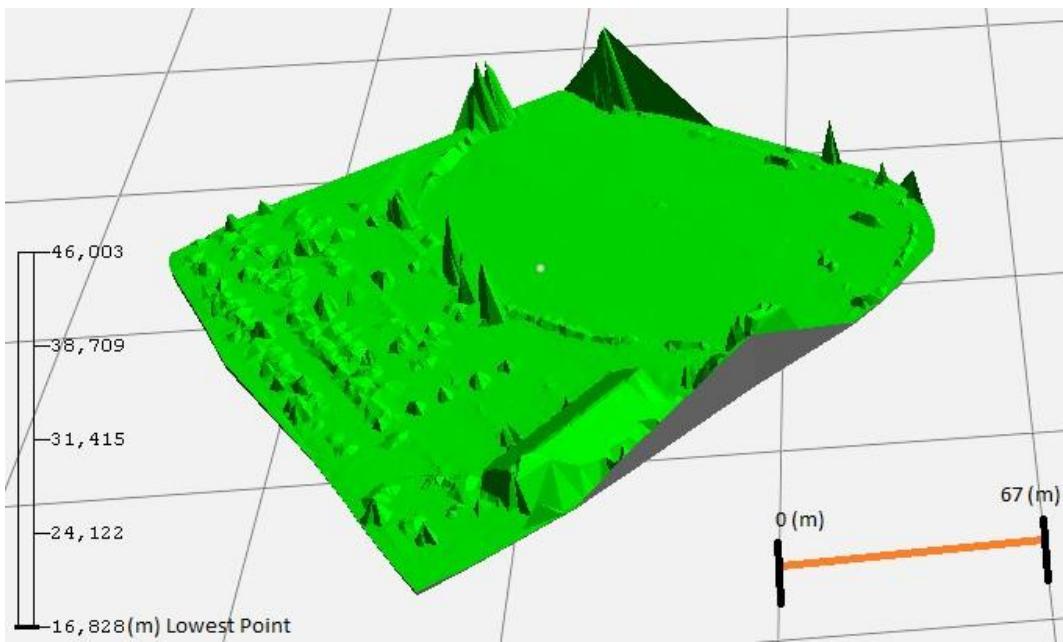
Då kamerapositionerna från de bilder tagna vid no-RTK-flygningen inte användes vid georeferering av no-RTK-datat hade viktningen av kamerans noggrannhet ingen påverkan på slutresultatet. Positionerna av bilderna från NRTK-flygningen har en mycket lägre osäkerhet än om UAV enbart flyger med den inbyggda GNSS-mottagaren (Bilaga G). Med anledning av detta användes kamerapositionerna för direkt georeferering vid bearbetningen av flygbilderna från flygningen med NRTK.

Nästa del i processen är att justera bilderna genom att använda sig av bildernas kameraposition och orientering för att generera ett glest punktmoln (Agisoft, 2018). De inställningar som valdes vid skapandet av det glesa punktmolnet var ”Highest”, ”Generic preselection” och ”Reference preselection”. Vid högsta noggrannheten tar databearbetningsprocessen mycket längre tid och rekommenderas av Agisoft (2018) enbart för forskningssyften då högsta noggrannheten skalar upp varje bild fyra gånger från originalet. Inställningarna ”Generic” och ”Reference” använder sig av varsin metod för att snabbare para ihop bilderna med varandra och minska justeringsprocessen av bilderna (Agisoft, 2018).

Två av de metoder som ska jämföras använder sig av samtliga flygsignaler som placeras inom studieområdet. Markstödpunkterna och kontrollpunkterna importeras som en csv-fil i samma koordinatsystem och höjdsystem som bilderna är refererade till, närmare bestämt SWEREF 99 16 30 i plan och RH 2000 i höjd. Varje importerad koordinat från de inmätta flygsignalerna georefererades inom den bild den är belägen i och placerades manuellt i centrum på flygsignalerna i UAV-bilderna. För att förbättra georefereringen görs en optimering av kamerainriktningen vilket enligt Agisoft (2018) kan väsentligt förbättra noggrannheten inom georefereringen. Alla inställningar inom "Optimize camera alignment" bockades i då det genererade det bästa resultatet. Därefter skapades ett tätt punktmoln med en kvalitet på "high" och med djupfiltrering inställd på "moderate". Högre kvalitet vid generering av det tätta punktmolnet resulterar i att kvalitén på detaljer och geometrin blir mer noggrann (Agisoft, 2018). "Moderate" djupfiltrering valdes då det skapar en balans av de andra två valen, "Mild" och "Aggressive" djupfiltrering. "Mild" djupfiltrering sparar viktiga detaljer i bilderna och "Aggressive" djupfiltrering filtrerar bort mindre detaljer i bilderna vilket rekommenderas vid bearbetning av data (Agisoft, 2018). Efter att tät-punktmolnet är klart är det bäst att skapa den digitala höjdmodellen då generering av den digitala höjdmodellen från det tätta punktmolnet resulterar i den högsta noggrannheten (Agisoft, 2018). Från den digitala höjdmodellen genererades ortofoto av den givna ytan över samtliga fyra metoder samt rapport från Agisoft som finns att se i Bilaga B och C.

3.5.2 Databearbetning av kontrollprofiler

De inmätta kontrollprofilerna från mätningen med totalstationen användes som referens vid kontroll av de terrängmodeller som skapades i SBG Geo från det tätta punktmoln som genererades i Agisoft. En yta över det tätta punktmolnet valdes i åtanke med de inmätta kontrollprofilers placering inom området och med bästa möjliga distribution. Det tätta punktmolnet exporterades till en LAS-fil (ASPRS LAS) för att därefter importeras som ett punktmoln i SBG Geo. Punktmolnet simplifierades till att ha ett punktavstånd på 20 centimeter mellan varandra efter ett antal test i SBG GEO vilket gav acceptabla resultat. För låga värden genererade för mycket data och fick SBG GEO att krascha ett antal gånger. Därefter togs dupliceringar bort för att förbättra prestandaförstågan i SBG Geo och exporterades till en geo-fil. Från punktmolnet skapades en terrängmodell (Figur 14).



Figur 14. Terrängmodell över kontrollprofilytan (screenshot tagen från SBG GEO version 2019.3.15.44)

Från de inmätta kontrollprofilerna och den genererade terrängmodellen tas en höjdskillnad fram vilket är det data som används för att kontrollera lägesosäkerheten inom höjd för varje flygning. Samma steg utfördes för respektive metod som kontrolleras i denna studie.

3.6 Kontrollberäkningar och utvärderingar

Här redovisas samtliga kontrollberäkningar och utvärderingar av erhållit data för lägesosäkerhet i plan och höjd.

3.6.1 Kontroll av ortofotots planläge

Enligt HMK-Ortofoto (2017), Bilaga C.2 kontrolleras lägesosäkerhet i plan med hjälp av kontrollobjekt som är framtagna från det genererade ortofotot.

Kontrollobjekten kan vara punkter eller objekt som har kända koordinater och som är väl utspridda över området samt oberoende av de markstödspunkter som har använts tidigare. I denna studie är kontrollobjekten lika med kontrollpunkterna som har mätts in och spridits ut oberoende av de markstödspunkterna inom flygområdet. Denna kontroll är baserad på en metod i HMK-Geodatakvalitet (2017) Bilaga A.2. Syftet med detta är att utvärda om de krav som en specifierad standardosäkerhet enligt HMK-Geodatakvalitet (2017) Tabell 2.6 är uppfyllda enligt standardnivå 3.

Enligt HMK-Geodatakvalitet (2017) finns tre olika standardnivåer därav standardnivå 3 valdes för denna studie eftersom den används för projektinriktade mätningar och kartläggningar för projektering. För att kunna kontrollera lägesosäkerheten i plan måste RMS i plan räknas ut och därefter kontrolleras mot standardosäkerheten på 95 % konfidensnivå enligt HMK – standardnivå 3.

Formel 2 till 7 följer det som föreskrivs enligt HMK – Ortofoto 2017 bilaga C. För att räkna ut RMS-värdet i plan måste medelavvikelserna i plan beräknas först. Dessa beräknas genom att summera samtliga kontrollpunkters enskilda avvikeler för respektive koordinat och därefter dividera summan med antalet punkter.

Medelavvikelsen i plan för N (Northing), E (Easting) samt den radiella off-sett betecknas med $\Delta \bar{N}$, $\Delta \bar{E}$ och $\Delta \bar{R}$. Dock måste varje enskild avvikelse mellan kontrollpunktarna beräknas först som betecknas med ΔN_i ($N_{inmätt} - N_{ortofoto}$) och ΔE_i ($E_{inmätt} - E_{ortofoto}$). Medelavvikelsen för N-koordinaterna beräknas enligt formel (2).

$$\Delta \bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta N_i \quad (2)$$

Medelavvikelsen för E-koordinaten beräknas enligt formel (3).

$$\Delta \bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta E_i \quad (3)$$

Den radiella avvikelsen beräknas utifrån de erhållna värdena från medelavvikelsen för N-koordinaterna och E-koordinaterna, enligt formel (4).

$$\Delta \bar{R} = \sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2} \quad (4)$$

Därefter beräknas RMS-värdet i plan för att vidare kunna kontrollera och utvärdera den sammanlagda lägesosäkerheten i plan. Detta beräknas genom att använda summan av respektive avvikelse i kvadrat för varje N och E-koordinat samt antalet kontrollpunkter och beräknas enligt formel (5).

$$RMS_{plan} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta N_i^2 + \sum_{i=1}^n \Delta E_i^2}{n}} \quad (5)$$

Den radiella offseten ska kontrolleras enligt formel (6). Detta för att kunna kontrollera om det förekommer systematiska fel där σ_{plan} innehåller det specificerade lägesosäkerheten i plan.

$$\Delta \bar{R} \leq \frac{2\sigma_{plan}}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

Erhållen RMS värde i plan kontrolleras gentemot formel (7). Detta för att kontrollera om den erhållna lägesosäkerheten i plan uppfyller det angivna toleransen.

$$RMS_{plan} \leq \sigma_{plan} \cdot (0,96 + n^{-0,4}) \quad (7)$$

3.6.2 Kontroll av avvikeler mellan terrängmodell och kontrollprofiler

Samtliga uträkningar följer de krav och formler som anges enligt SIS-TS 21144:2016. Ursprungligen är den undersökta ytan i denna studie ca åtta hektar stor. Den består av gräs, asfalt samt högskolans byggnader. Punktmolnet som skapades i programmet Agisoft innehöll ca 35 miljoner punkter och detta föranleder en stor mängd data som ska exporteras och jämföras vidare med inmätta kontrollprofiler. Därför fattades beslutet om att utföra mätningar av kontrollprofiler på en yta som omfattar samtliga ytor inom studien men av en mindre storlek: ca tre hektar. Området som valdes är fotbollsplanen samt parkeringen som ligger intill då dessa två ytor omfattar studiens typkaraktär. Detta beslut medför dock en annan typ av databearbetning där varje framställt punktmoln beskärdes för att passa in på den yta som användes för kontrollprofilsmätning. De punktmoln som skapades i efterhand innehöll ca fyra miljoner punkter. Punktmolnen exporterades från Agisoft i filformatet LAS som sedan importerades i SBG GEO (2016). I programmet SBG GEO (2016) skapades terrängmodeller utifrån de importerade punktmolnen och dessa modeller jämfördes med de inmätta kontrollprofilerna i höjd enligt formel (8). Beräkningen går ut på att subtrahera de inmätta kontrollprofilernas punkter mot de punkter som genereras fram från terrängmodellen där kontrollprofilernas höjd i varje punkt betecknas med (Kh) och markmodellens höjd i meter betecknas med (Th).

$$Ah = Kh - Th \quad (8)$$

För att kontrollera om den framtagna modellen ligger för högt eller för lågt beräknas medelavvikelsen för varje profil (Ah_m) enligt formel (9) där summan av samtliga avvikeler

(Ah_i) med sitt tecken divideras med antalet mätpunkter (n_p) i respektive profil.

$$Ah_m = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} Ah_i}{n_p} \quad (9)$$

Vidare beräknas standardavvikelsen (S_p) i varje enskild profil enligt formel (10) för att beskriva höjdavvikelsernas spridning inom varje profil.

$$S_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_p} (Ah_i - \bar{A}h)^2}{n_p - 1}} \quad (10)$$

För att kontrollera spridningen för avvikelserna mellan modellens höjder och höjderna för kontrollprofilerna beräknas därmed variationsvidden (Var_p) för respektive kontrollprofil enligt formel (11) där den maximala höjdavvikelsen (Max_p) subtraheras från den minimala höjdavvikelsen (Min_p).

$$Var_p = Max_p - Min_p \quad (11)$$

Varje enskild marktyps medelavvikelse (Map_t) beräknas enligt formel (12). Detta genomförs genom att addera samtliga avvikeler i kontrollpunkt (Ah_i) och därefter dividera resultatet med antalet kontrollpunkter (n_t) som finns inom den specifika marktypen.

$$Map_t = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} Ah_i}{n_t} \quad (12)$$

Vidare beskrivs spridningen av medelavvikelserna i höjd inom en särskild marktyp genom att beräkna standardavvikelsen för en särskild marktyp (S_{pt}) enligt formel (13).

$$S_{pt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_t} (Ah_i - Map_t)^2}{n_t - 1}} \quad (13)$$

För att beräkna medelavvikelsen för hela modellen (Ah_{mod}) krävs det att addera samtliga avvikeler (Ah) i kontrollpunkterna och därefter dividera med antalet punkter (n). Se formel (14).

$$Ah_{mod} = \frac{\sum_{i=1}^n Ah}{n} \quad (14)$$

Enligt SIS-TS 21144:2016 ska standardosäkerheterna för avvikelserna mellan kontrollprofiler och terrängmodell beräknas. Detta beräknas enligt formel (15).

$$S_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_m} (Ah_i - Ah_{mod})^2}{n_m - 1}} \quad (15)$$

Slutligen valdes det att beräkna spridningen hos varje enskild kontrollprofil i form av RMS-värde samt för varje enskild kontrolllyta enligt formel (16).

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Ah_i^2}{n}} \quad (16)$$

3.6.3 Kontroll av kontrollpunkter

Kontrollpunktarna kontrollerades mot de ”sanna” koordinaterna som mättes in med hjälp av NRTK-GNSS-teknik vilket beskrevs i sektion 3.2 i Metoden. Agisoft Metashape bearbetar samtliga data och genererar en så kallad ”estimated values” på de kontrollpunktter som har använts. Utifrån dessa koordinater beräknades ett RMS-värde fram i plan och höjd. Slutligen utfördes det en ytterligare kontroll med samma kontrollpunktter där man förbisåg dem så kallade ”estimated values” och istället extraherades dessa koordinater direkt från ortofotot vilket baseras från det tidigare skapade punktmolnet. Eftersom ett ortofoto inte innehåller höjdinformation hämtades den informationen från det underliggande täta punktmolnet. Utifrån det beräknades nya RMS-värden fram där värderna i plan kommer från ortofotot och värderna i höjd kommer från det täta punktmolnet.

3.6.4 Kontroll av NRTK+1 och NRTK data

För att kontrollera att mätningarna för NRTK där en markstödpunkt användes (NRTK+1) och NRTK utan markstödpunkter (NRTK), genomfördes en ytterligare kontroll för dessa två mätmetoder. För att säkerhetsställa att Agisoft Metashape inte sparar loggfiler eller annan data från tidigare mätningar återställdes Agisoft och ny databearbetning för dessa två metoder utfördes.

4 Resultat

Syftet med detta kapitel är att redovisa de erhållna resultaten från denna studie. För att enklare kunna förstå och följa de resultat som har erhållits kommer samtliga resultat följa samma kronologiska ordning som studiens metod. Först kommer kontroll av GNSS-instrument att redovisas därefter resultaten över de medeltalsbildade koordinaterna för flygsignalerna. Sedan redovisas resultaten av UAV-flygningen i form av framtagna ortofoton samt RUFRIS-etableringen. Vidare presenteras resultaten av lägesosäkerheten i plan och lägesosäkerheten i höjd. Slutligen presenteras en kontroll av RMS i plan och höjd samt en extra kontroll av NRTK+1 och NRTK utan markstödpunkter.

4.1 Kontroll av GNSS-instrument

I Tabell 1 och 2 redovisas kontrollen av det GNSS-instrument som användes för inmätning av samtliga flygsignaler. Enligt de beräknade skillnader mellan de erhållna kontrollmätningar som redovisas i Tabell 2 accepterades det GNSS-instrument. Dessa avvikelser kan däremot utgöra en potentiell felkälla i slutresultat vilket diskuteras vidare i diskussionen.

Tabell 1. Kontrollmätning av GNSS-utrustning mot känd punkt.

Beteckning	Metod	E (m)	N (m)	H (m)
Stenmätning 2019	Statisk mätning i 4 timmar	183929,006	6728678,106	18,274
Stenmätning 1 2020	GNSS 60 sekunder	183929,028	6728678,077	18,254
Stenmätning 2 2020	GNSS 60 sekunder	183929,025	6728678,080	18,276

Tabell 2. Beräknade skillnader mellan erhållna kontrollmätningar.

Skillnad mellan	ΔE	ΔN	ΔH
Stenmätning 2019 - Stenmätning 1 2020	-0,022	0,029	0,02
Stenmätning 2019 - Stenmätning 2 2020	-0,019	0,026	-0,002

4.2 Medeltalsbildade koordinater för samtliga flygsignaler

Som tidigare nämnts är flygsignalerna indelade i markstödpunkter och kontrollpunkter. I Tabell 3 redovisas de medeltalsbildade koordinaterna för markstödpunkterna och i Tabell 4 redovisas de medeltalsbildade koordinaterna för kontrollpunkterna. Koordinaterna som redovisas i Tabell 3 och 4 refererar till de flygsignaler som redovisas i Figur 2.

Tabell 3. Medeltalsbildade koordinater för markstödpunkterna (GCP) i plan och höjd. Referenssystem: SWEREF 99 16 30 i plan och RH 2000 i höjd.

Punkt Id	E (m)	N (m)	H (m)
GCP1	183813,399	6728593,844	18,284
GCP2	183809,591	6728678,885	18,119
GCP3	183892,284	6728734,412	18,092
GCP4	183945,576	6728681,293	17,868
GCP5	183991,088	6728717,808	17,418
GCP6	183749,869	6728719,630	18,817
GCP7	183817,950	6728767,391	18,814
GCP8	183902,590	6728826,308	19,218
GCP9	184006,895	6728911,638	17,446
GCP10	184113,993	6728813,995	17,459
GCP11	184005,060	6728819,032	17,372

Tabell 4. Medeltalsbildade koordinater för kontrollpunkterna (CP) i plan och höjd. Referenssystem: SWEREF 99 16 30 i plan och RH 2000 i höjd.

Punkt Id	E (m)	N (m)	H (m)
CP1	6728644,153	183789,574	18,348
CP2	6728653,484	183891,057	17,678
CP3	6728701,228	183916,449	17,67
CP4	6728733,781	183760,274	18,843
CP5	6728801,960	183872,786	18,682
CP6	6728859,115	183979,039	17,437
CP7	6728849,940	184050,990	17,667
CP8	6728784,914	184025,778	16,928

4.3 Ortofoton framtagna i Agisoft

I denna studie genomfördes det som tidigare nämnts två flygningar, en med NRTK och en med no-RTK. Flygningen med NRTK resulterade i 230 bilder och flygningen utan RTK i 224 bilder. Inom denna studie genomfördes det fyra olika jämförelser som i sin tur genererade fyra ortofoton baserade på de insamlade flygbilderna.

Eftersom de fyra genererade ortofoton är väldigt snarlika rent visuellt valdes det att redovisa endast ett av dem (Figur 15). Vid varje enskild databearbetning inom programmet Agisoft produceras det en rapport som innehåller samtliga parametrar, kameraorienteringar, val av kvalitet för bearbetningen m.m. Detta redovisas i Bilaga B, C, D och E.



Figur 15. Ortofoto skapat i Agisoft Metashape över Högskolan i Gävle (exporterad från Agisoft Metashape Professional, version 1.6.2).

4.4 RUFRIS-etablering

Som tidigare skrivet i kapitlet Metod sektion 3.3, har RUFRIS använts vid etablering av totalstation och inmätning av kontrollprofiler. I Tabell 5 redovisas de erhållna koordinaterna för den etablerade totalstationen vid inmätningen av kontrollprofilerna.

Tabell 5. Etablerade totalstationens koordinater i plan och höjd samt dess erhållna kvalitetsvärden.

E (m)	N (m)	H (m)
184014,172	6728820,109	17,271
E σ (m)	N σ (m)	H σ (m)
0,004	0,004	0,002

4.5 Avvikeler i plan

De kontroller som har utförts och de resultat som har erhållits för lägesosäkerheter i plan har följt HMK – Geodatakvalitet (2017) samt de formler som anges i HMK - Ortofoto (2017). I denna studie har HMK – standardnivå 3 följts för kontroll av lägesosäkerhet i plan enligt HMK – Geodatakvalitet (2017) där kraven på lägesosäkerheten ligger på fem centimeter nivå eller bättre. För varje framtaget ortofoto har avvikeler i plan beräknats och resultaten redovisas enligt Tabell 6. Enligt angivna formler från HMK – Ortofoto (2017) har toleranser i form av maximal lägesosäkerhet samt systematiska effekter i plan beräknats och resultaten redovisas i Tabell 7.

Tabell 6. Avvikeler i plan i meter.

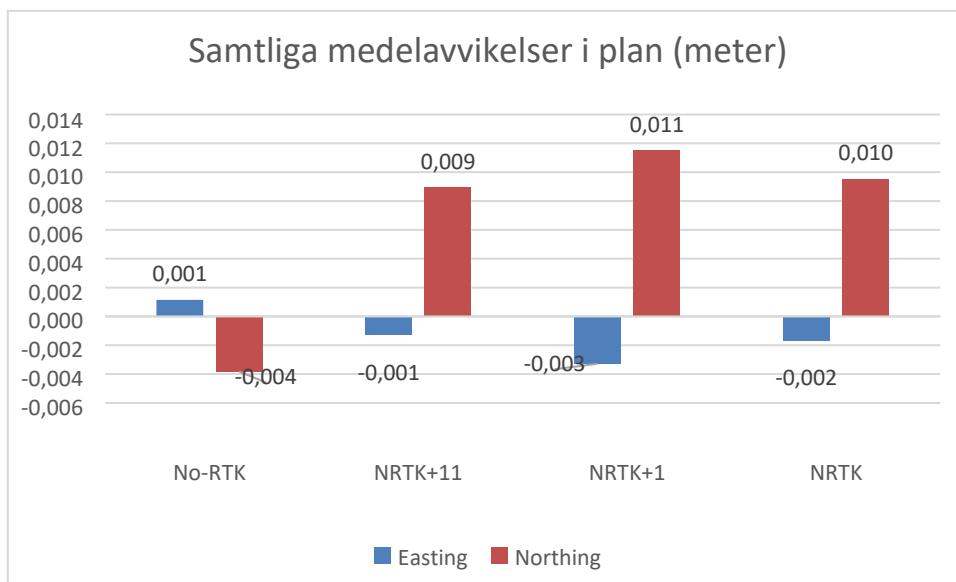
Metod	$\Delta \bar{E}$ Formel 3	$\Delta \bar{N}$ Formel 2	$\Delta \bar{R}$ Formel 4	RMS_{plan} Formel 5
No-RTK	0,001	-0,004	0,0040	0,0102
NRTK+11	-0,001	0,009	0,0093	0,0132
NRTK+1	-0,003	0,011	0,0120	0,0148
NRTK	-0,002	0,010	0,0097	0,0136

Tabell 7. Beräknade toleranser enligt HMK – standardnivå 3.

Specificerad lägesosäkerhet (m) = σ_{plan}	0,050
Maximal lägesosäkerhet (m) = $\sigma_{plan} \cdot (0,96 + n^{-0,4})$	0,070
Systematiska effekter i plan (m) = $\frac{2\sigma_{plan}}{\sqrt{n}}$	0,035

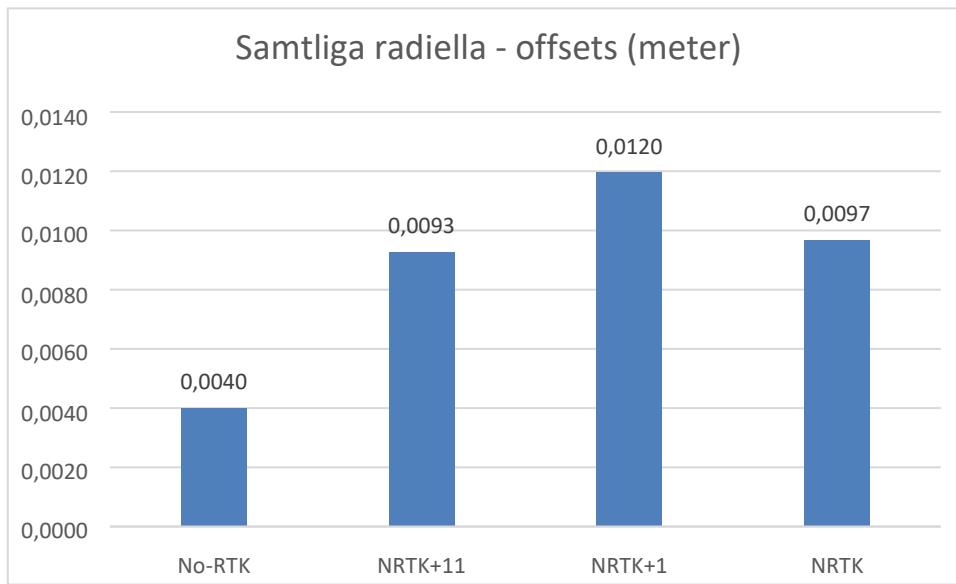
Efter genomförda beräkningar kan de erhållna resultaten tydligt visa att samtliga framtagna ortofoton med respektive metod klarar av kravet på lägesosäkerhet i plan och att inga systematiska effekter har framkommit eftersom de radiella avvikelserna inte överstiger de angivna toleranserna.

I Figur 16 redovisas en jämförelse för samtliga medelavvikeler i plan.



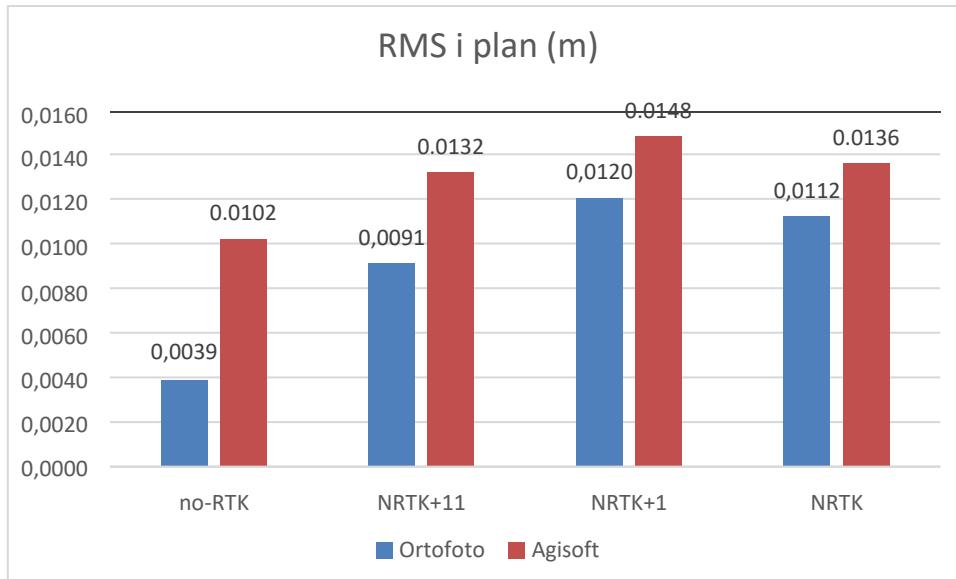
Figur 16. Jämförelse mellan samtliga medelavvikeler i plan i meter.

I Figur 17 redovisas en jämförelse av samtliga radiella medelavvikeler i plan mellan samtliga ortofoton.



Figur 17. Jämförelse av radiella medelavvikeler mellan samtliga ortofoton i meter.

I Figur 18 redovisas en jämförelse av samtliga RMS-värden i plan mellan alla ortofoton samt en jämförelse i RMS-värde mellan de koordinater som bearbetats i Agisoft och de koordinater som tagits direkt från ortofotot.



Figur 18. Jämförelse av RMS-värden i plan mellan samtliga ortofoton i meter samt RMS-värden i plan mellan koordinater tagna från ortofoto och från Agisoft.

4.6 Lägesosäkerheter i höjd

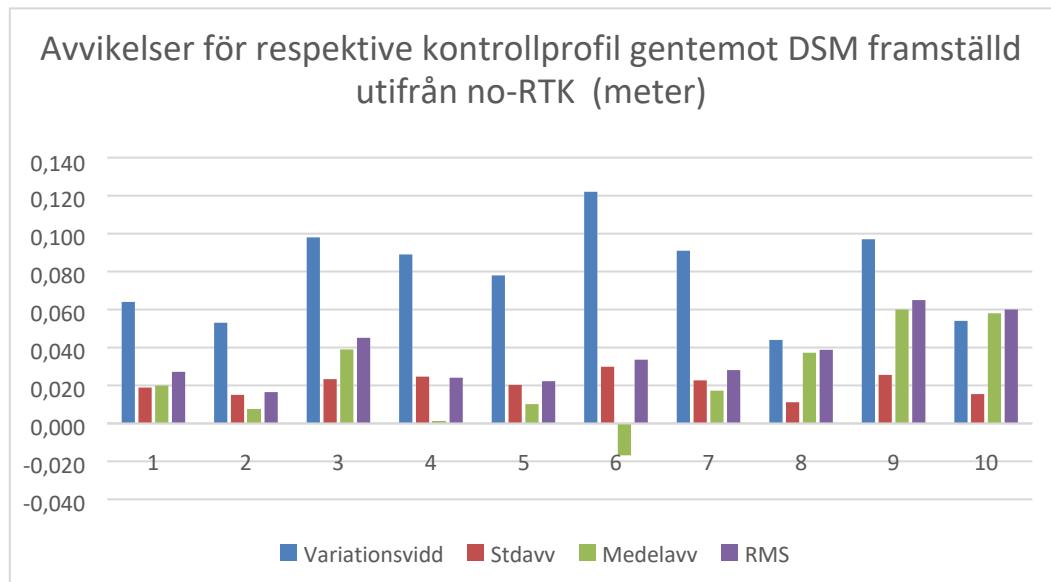
I kommande redogörelse påvisas avvikelser för varje enskild profil samt att viss marktypsprofil redovisas som är framtagna från varje enskild digital terrängmodell. Alla terrängmodeller har skapats utifrån det tätta punktmolnet som har extraherats från programmet Agisoft där varje enskilt tätt punktmoln har genererats fram baserat på de olika flygmetoderna: no-RTK, NRTK+11, NRTK+1 samt NRTK utan markstödpunkter. Nedanstående redovisning kommer att på ett illustrativt sätt redovisa skillnaderna på de olika terrängmodellerna i form av grafer och tabeller.

I Tabell 8 redovisas samtliga avvikelser för respektive kontrollprofil jämfört mot den skapade digitala terrängmodellen utifrån no-RTK mätningen.

Tabell 8. Avvikelser samt variationer mellan kontrollprofiler och no-RTK-mätningens genererade terrängmodell.

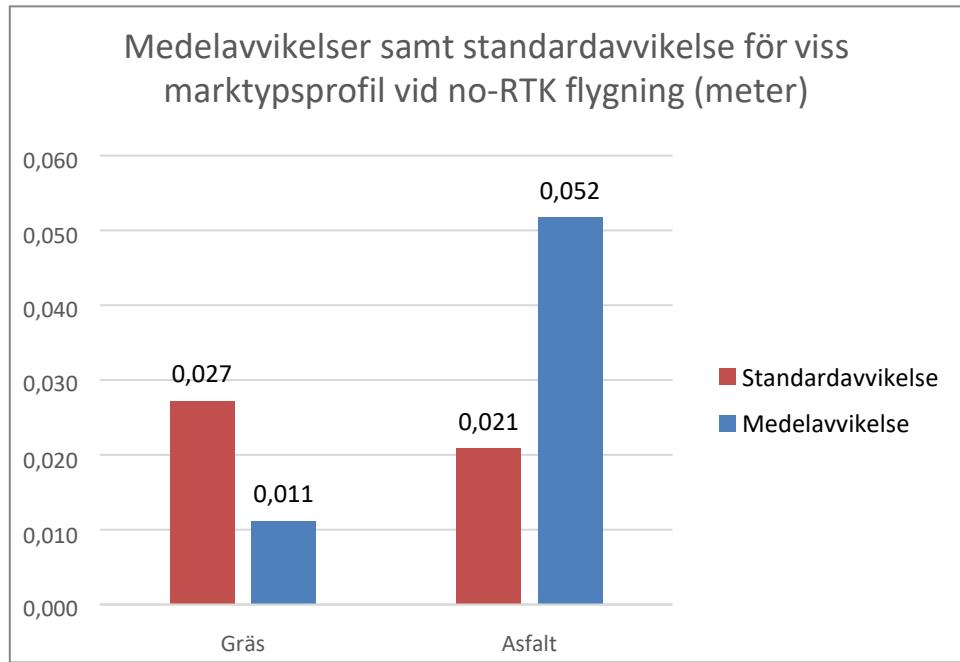
Profil	Marktyp	Antal punkter	Max avv	Min avv	Variationsvidd	Stdavv	Medelavv	RMS
1	Gräs	20	0,064	0	0,064	0,019	0,02	0,027
2	Gräs	20	0,037	-0,016	0,053	0,015	0,008	0,016
3	Gräs	20	0,099	0,001	0,098	0,023	0,039	0,045
4	Gräs	20	0,049	-0,04	0,089	0,025	0,001	0,024
5	Gräs	20	0,046	-0,032	0,078	0,02	0,01	0,022
6	Gräs	20	0,039	-0,083	0,122	0,03	-0,017	0,034
7	Gräs	20	0,076	-0,015	0,091	0,023	0,017	0,028
8	Asfalt	20	0,06	0,016	0,044	0,011	0,037	0,039
9	Asfalt	20	0,103	0,006	0,097	0,026	0,06	0,065
10	Asfalt	20	0,091	0,037	0,054	0,015	0,058	0,06
Total/medel		200	0,0664	-0,0126	0,079	0,020684	0,0233	0,036041

I Figur 19 redovisas avvikelser för respektive kontrollprofil i jämförelse mot den skapade digitala terrängmodellen utifrån no-RTK mätningen.



Figur 19. Jämförelse mellan de avvikelser och variationer som uppstår mellan kontrollprofilerna och no-RTK-terrängmodellen.

I Figur 20 redovisas medelavvikelserna för en viss marktypsprofil i jämförelse mot den skapade digitala terrängmodellen utifrån no-RTK mätningen.



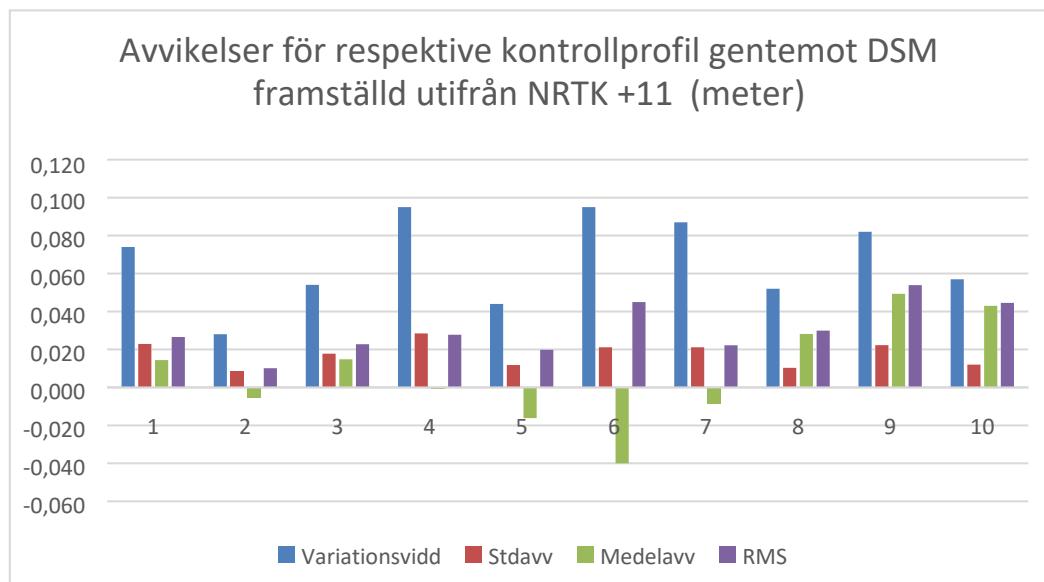
Figur 20. Medelavvikelsar och standardavvikelsar från no-RTK-mätningen för respektive marktyp.

I Tabell 9 redovisas samtliga avvikelser för respektive kontrollprofil i jämförelse mot den skapade digitala terrängmodellen utifrån NRTK+11 mätningen.

Tabell 9. Avvikelser samt variationer mellan kontrollprofiler och NRTK+11 mätningens genererade terrängmodell.

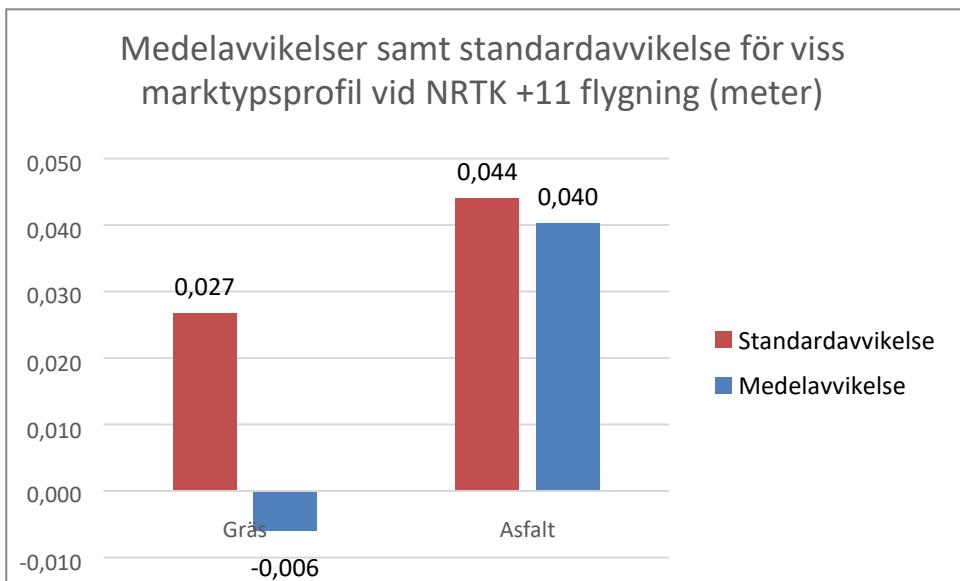
Profil	Marktyp	Antal punkter	Max avv	Min avv	Variationsvidd	Stdavv	Medelavv	RMS
1	Gräs	20	0,061	-0,013	0,074	0,023	0,014	0,027
2	Gräs	20	0,008	-0,02	0,028	0,009	-0,006	0,01
3	Gräs	20	0,036	-0,018	0,054	0,018	0,015	0,023
4	Gräs	20	0,044	-0,051	0,095	0,028	-0,001	0,028
5	Gräs	20	0,003	-0,041	0,044	0,012	-0,016	0,02
6	Gräs	20	0,001	-0,094	0,095	0,021	-0,04	0,045
7	Gräs	20	0,045	-0,042	0,087	0,021	-0,008	0,022
8	Asfalt	20	0,052	0	0,052	0,01	0,028	0,03
9	Asfalt	20	0,09	0,008	0,082	0,022	0,049	0,054
10	Asfalt	20	0,068	0,011	0,057	0,012	0,043	0,045
Total/medel		200	0,0408	-0,026	0,0668	0,017643	0,0078	0,030264

I Figur 21 redovisas avvikelser för respektive kontrollprofil i jämförelse mot den skapade digitala terrängmodellen utifrån NRTK+11 mätningen.



Figur 21. Jämförelse mellan de avvikelser och variationer som uppstår mellan kontrollprofilerna och NRTK+11 terrängmodellen.

I Figur 22 redovisas medelavvikelserna samt standardavvikelserna för en viss marktypsprofil i jämförelse mot den skapade digitala terrängmodellen utifrån NRTK+11 mätningen.



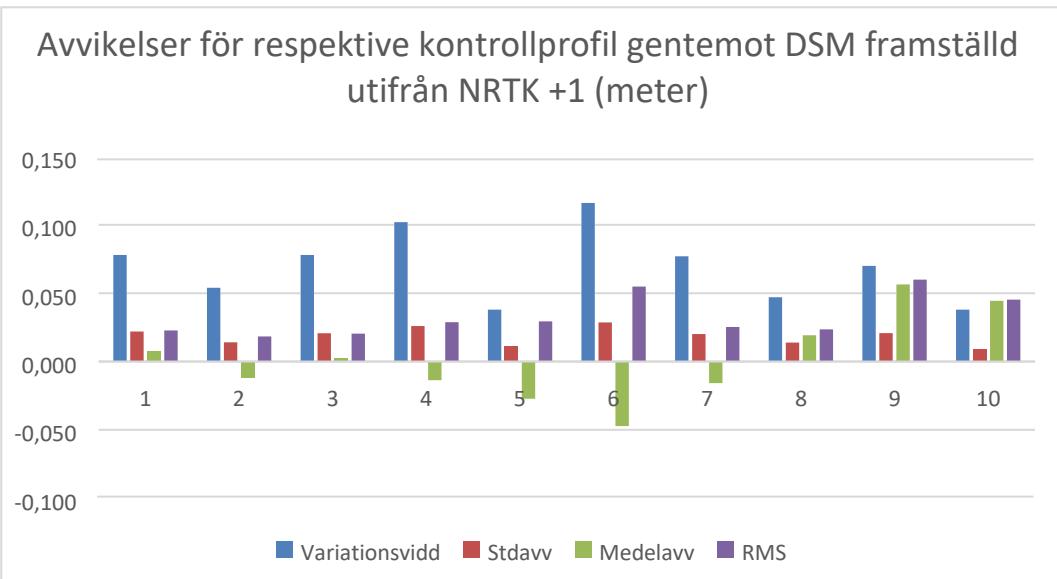
Figur 22. Medelavvikeler och standardavvikeler från NRTK+11 mätningen för respektive marktyp.

I Tabell 10 redovisas samtliga avvikeler för respektive kontrollprofil i jämförelse mot den skapade digitala terrängmodellen utifrån NRTK+1 mätningen.

Tabell 10. Avvikeler samt variationer mellan kontrollprofiler och NRTK+1 mätningens genererade terrängmodell.

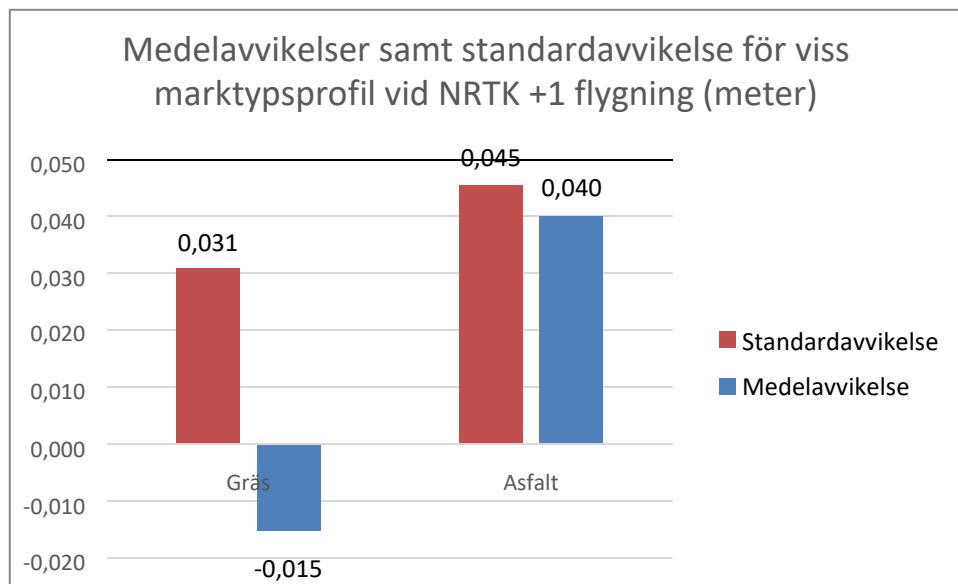
Profil	Marktyp	Antal punkter	Max avv	Min avv	Variationsvidd	Stdavv	Medelavv	RMS
1	Gräs	20	0,055	-0,023	0,078	0,022	0,008	0,023
2	Gräs	20	0,022	-0,032	0,054	0,014	-0,012	0,018
3	Gräs	20	0,037	-0,041	0,078	0,021	0,003	0,02
4	Gräs	20	0,043	-0,059	0,102	0,026	-0,014	0,029
5	Gräs	20	-0,008	-0,046	0,038	0,011	-0,027	0,029
6	Gräs	20	0,004	-0,112	0,116	0,029	-0,047	0,055
7	Gräs	20	0,026	-0,051	0,077	0,02	-0,016	0,025
8	Asfalt	20	0,044	-0,003	0,047	0,014	0,019	0,023
9	Asfalt	20	0,101	0,031	0,07	0,021	0,056	0,06
10	Asfalt	20	0,063	0,025	0,038	0,009	0,044	0,045
Total/medel		200	0,0387	-0,0311	0,0698	0,01866	0,0014	0,032823

I Figur 23 redovisas avvikeler för respektive kontrollprofil i jämförelse mot den skapade digitala terrängmodellen utifrån NRTK+1 mätningen.



Figur 23. Jämförelse mellan de avvikelser och variationer som uppstår mellan kontrollprofilerna och NRTK+1 terrängmodellen.

I Figur 24 redovisas medelavvikelserna samt standardavvikelserna för en viss marktypsprofil i jämförelse mot den skapade digitala terrängmodellen utifrån NRTK+1 mätningen.



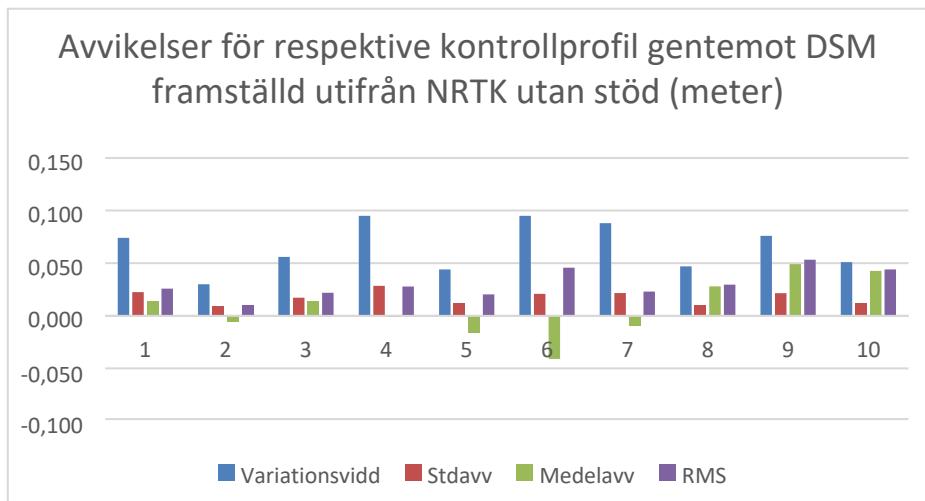
Figur 24. Medelavvikelse och standardavvikelse från NRTK+1 mätningen för respektive marktyp.

I Tabell 11 redovisas samtliga avvikelser för respektive kontrollprofil jämfört mot den skapade digitala terrängmodellen utifrån NRTK mätningen.

Tabell 11. Avvikeler samt variationer mellan kontrollprofiler och NRTK-mätningens genererade terrängmodell.

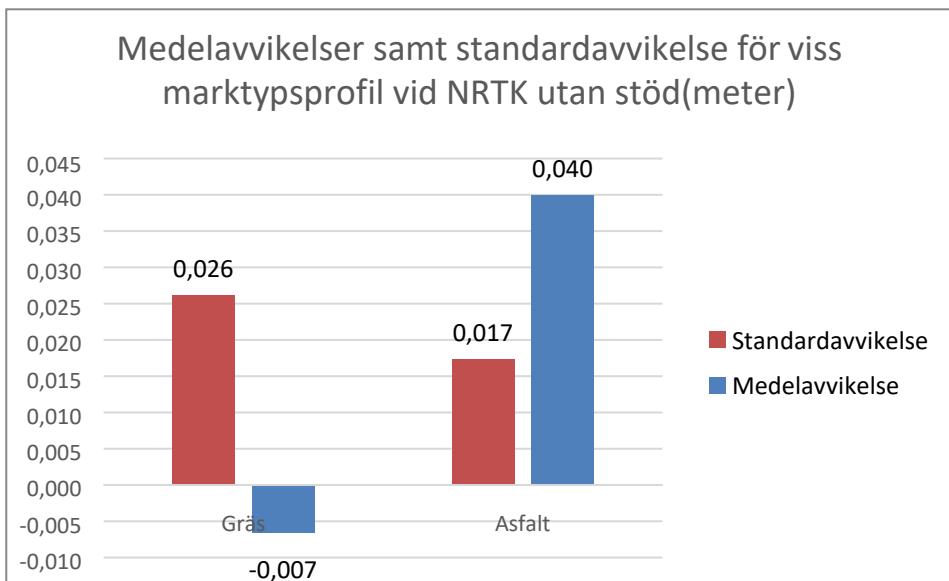
Profil	Marktyp	Antal punkter	Max avv	Min avv	Variationsvidd	Stdavv	Medelavv	RMS
1	Gräs	20	0,061	-0,013	0,074	0,023	0,014	0,026
2	Gräs	20	0,008	-0,022	0,03	0,009	-0,006	0,01
3	Gräs	20	0,035	-0,021	0,056	0,017	0,014	0,022
4	Gräs	20	0,044	-0,051	0,095	0,028	-0,001	0,028
5	Gräs	20	0,005	-0,039	0,044	0,012	-0,017	0,02
6	Gräs	20	0	-0,095	0,095	0,021	-0,041	0,046
7	Gräs	20	0,045	-0,043	0,088	0,022	-0,009	0,023
8	Asfalt	20	0,052	0,005	0,047	0,01	0,028	0,03
9	Asfalt	20	0,084	0,008	0,076	0,021	0,049	0,053
10	Asfalt	20	0,067	0,016	0,051	0,011	0,043	0,044
Total/medel		200	0,0401	-0,0255	0,0656	0,017425	0,0074	0,030178

I Figur 25 redovisas avvikeler för respektive kontrollprofil i jämförelse mot den skapade digitala terrängmodellen utifrån NRTK mätningen.



Figur 25. Jämförelse mellan de avvikeler och variationer som uppstår mellan kontrollprofilerna och NRTK terrängmodellen.

I Figur 26 redovisas medelavvikelserna samt standardavvikelserna för en viss marktypsprofil i jämförelse mot den skapade digitala terrängmodellen utifrån NRTK mätningen.



Figur 26. Medelavvikeler och standardavvikeler från NRTK-mätningen för respektive marktyp.

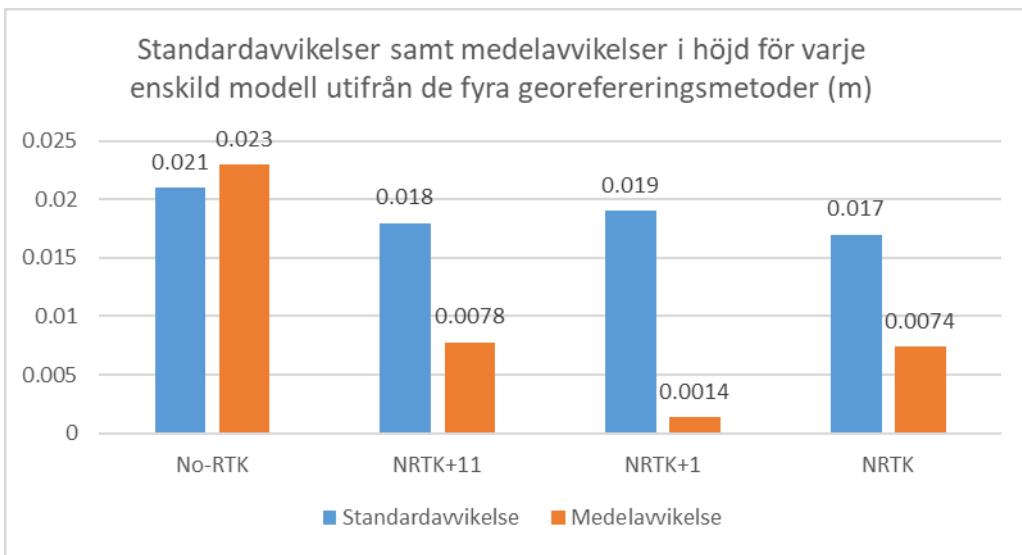
Tabell 12 visar samtliga standardavvikeler och medelavvikeler i höjd för en hel modell för respektive georefereringsmetod.

Tabell 12. Standardavvikelse samt medelavvikelse i höjd för varje enskild modell.

Metod	Standardavvikelse	Medelavvikelse
	Formel 15	Formel 14
No-RTK	0,021	0,023
NRTK+11	0,018	0,0078
NRTK+1	0,019	0,0014
NRTK	0,017	0,0074

I Figur 27 redovisas en jämförelse av standardavvikelsen samt medelavvikelsen i höjd för varje enskild modell som är skapad

utifrån de fyra olika georefereringsmetoder.



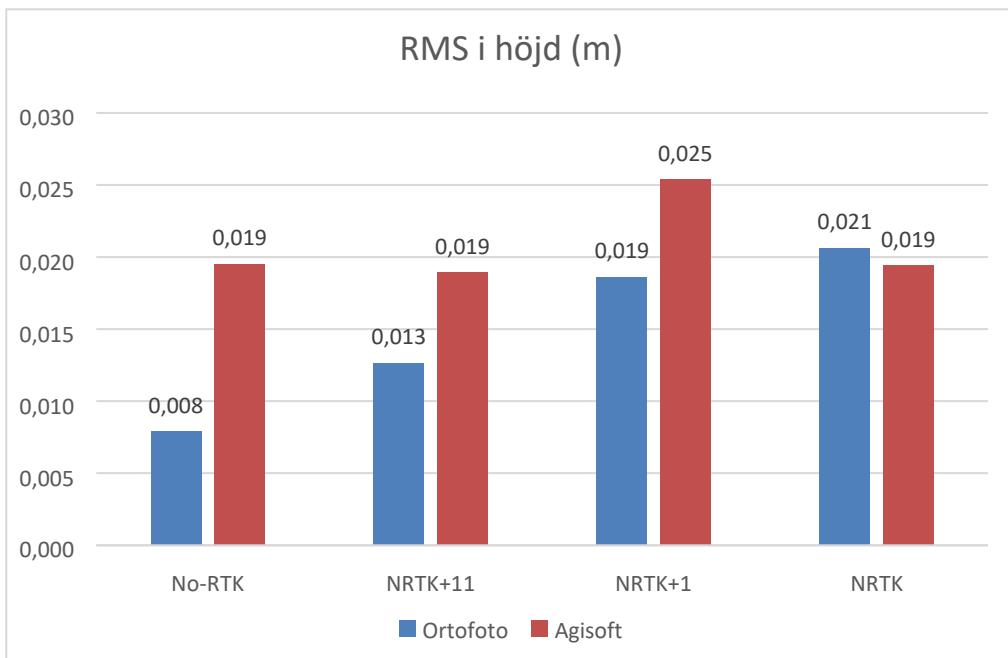
Figur 27. Samtliga standardavvikeler och medelavvikeler i höjd för en hel modell utifrån de olika georefereringsmetoderna.

Tabell 13 redovisar RMS-värdena i höjd för kontrollpunkternas Z-koordinater beträffande de olika georefereringsmetoderna. RMS för ortofoto innehåller att Z-koordinaterna har extraherats manuellt från det underliggande punktmolnet. RMS för Agisoft innehåller att Z-koordinaterna har automatiskt erhållits från Agisoft Metashape.

Tabell 13. RMS-värden för Z-koordinater från ortofotot respektive Agisoft.

Metod	RMS Ortofoto	RMS Agisoft
No-RTK	0,008	0,019
NRTK+11	0,013	0,019
NRTK+1	0,019	0,025
NRTK	0,021	0,019

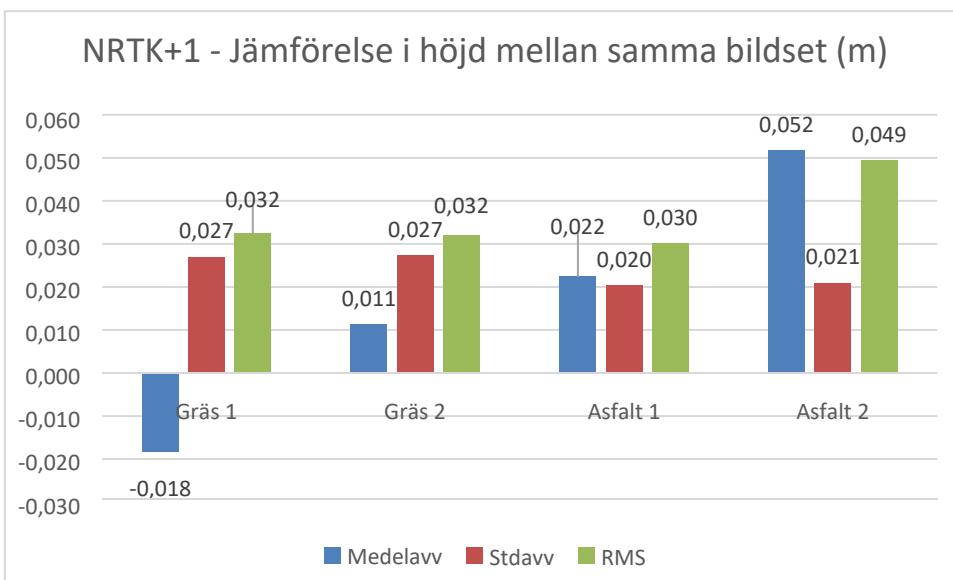
I Figur 28 redovisas en jämförelse av samtliga RMS-värden i höjd mellan samtliga ortofoton samt en jämförelse i RMS-värde mellan de koordinater som bearbetats i Agisoft och de koordinater som tagits direkt från ortofotot.



Figur 28. Jämförelse av RMS-värden i höjd mellan samtliga ortofoton i meter samt RMS-värden i höjd mellan koordinater tagna från ortofoto och från Agisoft.

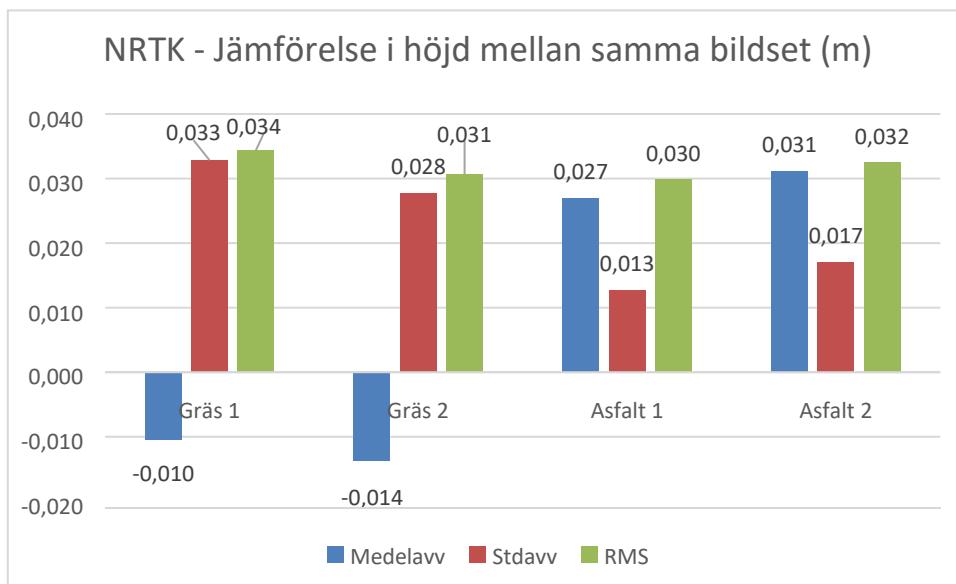
Som tidigare nämnts i sektion 3.6.4 i Metoden kontrollerades NRTK+1 och NRTK utan markstödpunkter mot nytt data som gjordes om från början för att försäkra om att Agisoft inte lagrar data.

I Figur 29 redovisas en jämförelse i medelavvikelse, standardavvikelse samt RMS i höjd mellan samma bildset med NRTK+1. Gräs 1 och Asfalt 1 syftar på det data som används i denna rapport och Gräs 2 och Asfalt 2 är det nya datasetet som skapats.



Figur 29. Jämförelse mellan samtliga avvikelser mellan det gamla och nya NRTK+1 datasetet.

I Figur 30 redovisas en jämförelse i medelavvikelse, standardavvikelse samt RMS i höjd mellan samma bildset där NRTK utan markstödpunkter används.



Figur 30. Jämförelse mellan samtliga avvikelser mellan det gamla och nya NRTK datasetet.

5 Diskussion

Enligt HMK – standardnivå 3 ska lägesosäkerheten i plan ligga mellan intervallet 0,02-0,05 m enligt HMK – Ortofoto (2017). En lägre lägesosäkerhet går att erhålla om flygbilderna är bättre orienterade, flygstråken är tätare mellan varandra och om höjdmodellen är av bättre kvalitet, någonting som går att uppnå med dagens UAV (Ortofoto, 2017).

Den totala avvikelsen i plan representeras av de RMS-värden som har redovisats enligt Tabell 6 i Resultatet, sektion 4.5 mellan kontrollpunkterna och de ortofoton som genererats fram. Intervallen som avvikelsen i plan ligger på är mellan 0,01-0,015 m där den längsta avvikelsen är beräknad utifrån den indirekta georefereringsmetoden med markstödpunkter och den högsta avvikelsen kommer från den direkta georefereringen med hjälp av NRTK och en markstödpunkt. Det som kan avläsas av Tabell 6 och 7 är att det inte skiljer sig mycket åt mellan samtliga ortofoton när det gäller avvikelser och RMS-värden i plan. Samt att de samtidigt klarar av de krav angående systematiska effekter och avvikelser som ställs utifrån en specificerad lägesosäkerhet i plan enligt HMK – standardnivå 3 och kontrollmetodiken i HMK – Ortofoto (2017), bilaga C. Detta innebär dock inte per automatik att det inte förekommer systematiska effekter utan enbart att eventuella systematiska effekter är accepterbara enligt HMK – standardnivå 3. Intressant att påpeka är att i de flygningar där NRTK-teknik har använts har minimala skillnader beträffande avvikelser i plan inträffat. Skillnaden mellan NRTK+11 och NRTK+1 är 1,6 mm, skillnaden mellan NRTK+11 och NRTK är 0,4 mm och skillnaden mellan NRTK+1 och NRTK utan markstödpunkter är 1,2 mm. En liten skillnad på 1,6 mm mellan NRTK+11 och NRTK+1 styrks från Tziavou m.fl. (2018) teori om att enbart en markstödpunkt är nödvändigt för att erhålla en låg lägesosäkerhet.

Att ta i beaktande vid mätning med UAV där många steg utförs för att erhålla ett resultat är att varje steg i processen har en påverkan på slutprodukten och den erhållna kvalitén på mätningen (Tmušić m.fl. 2020). Bilaga A skapades med anledningen av att hålla koll på de parametrar som haft en påverkan på resultatet. Vissa av dessa parametrar har valts efter rekommendationer i facklitteratur men flera andra parametrar inom studien är flexibla till en viss grad, som t.ex. antalet markstödpunkter och kontrollpunkter eller om UAVn ska flyga på 80 meters höjd respektive 100 meter. Under studiens gång har fokus lagts på att planera och utföra mätningarna på bästa möjliga sätt och samtidigt få ut de resultat som besvarar frågeställningarna (som finns att se under Introduktion, sektion 1.3.). Tmušić m.fl. (2020) lägger stor vikt på planering som är grunden till att få en rättvis bild av vad Phantom 4 RTK UAV kan åstadkomma.

Det finns många felkällor att ta hänsyn till som systematiska, slumpmässiga och den mänskliga faktorn. PDOP och jonasfärstörningar har kontrollerats under mätningens gång för att undvika onödiga fel i mätningarna och den mänskliga faktorn har kontrollerats genom att två parter har kontrollerat och diskuterat det data som har genererats. Tziavou m.fl. (2018) poängterar att den tid som läggs ned ute i fält, för databearbetning och producering av punktmoln och ortofoton har en påverkan på det erhållna resultatet.

Manualen från Agisoft användes i en stor utsträckning vid databearbetningen. Vid vissa förfaranden valdes det dock att bortse från vad som Agisosets manual föreskriver och egna tester genomfördes tills ett tillförlitligt resultat erhölls. Eftersom Agisoft Metashape är en sofistikerad programvara med många inställningsmöjligheter behövs det flera veckor för att erhålla rätt kompetens för att producera produkter med högsta kvalitet. Resultaten från Agisoft har varit av hög kvalitet baserad på de utförda beräkningarna och den noggranna arbetsprocess som genomfördes i Agisoft, speciellt från NRTK-mätningen där inga markstödpunkter användes. Vid databearbetningen där markstödpunkter används placeras små flaggor ut individuellt i varje bild där flygsignalerna syns. Osäkerheten vid utplacering av dessa flaggor i centrum på flygsignalerna har en påverkan på georefereringen av bilderna. Då två flygningar utfördes, en med NRTK och en utan NRTK, bearbetades respektive data separat från varandra.

Vid kontroll av avvikelserna i höjd har ett antal olika beräkningar och jämförelser gjorts som också har kontrollerats mot de krav som ställs i HMK – Ortofoto (2017) och SIS-TS21144:2016. Det som är intressant att titta på först är medelavvikeler för varje enskild profil. Det som indikeras från dessa medelavvikeler är om den skapade modellen eventuellt skulle ligga för högt eller lågt i ett visst delområde. I det här examensarbetet har det erhållits ett varierande resultat när det gäller medelavvikelserna i varje enskild profil där värdena ligger i ett intervall mellan 1,2 mm upp till sex cm. Det som kan tolkas utifrån dessa värden är att vissa områden på den skapade modellen ligger lite högre än vad som förväntats. I detta examensarbete har det erhållits varierande resultat på variationsvidden vilket skiljer sig från 2,8 cm upp till 12,2 cm från de olika georefereringsmetoderna. Anledningen till att sådana skillnader har erhållits kan ha sitt ursprung från många olika faktorer. En av de hypoteser som framkommit är hur själva modellen har tagits fram och hur kontrollprofilerna har mätts in. I denna studie, som tidigare har nämnts, har det täta punktmolnet exporterats till programmet SBG GEO. Därefter har punktmolnet glesats genom att punktavståndet har ökats till 20 cm vilket kan ha påverkat den slutliga terrängmodellen som skapats och därefter använts för en jämförelse mot de inmätta kontrollprofilerna.

En annan diskussionspunkt som finns i detta examensarbete är kontrollen av det GNSS-instrument som har använts för inmätning av flygsignaler. Enligt Tabell 2 förekommer det en skillnad på två cm mellan kontrollmätningarna i höjd. Med detta i åtanke borde en ytterligare kontroll genomföras genom en inmätning på 60 sekunder för att minimera eventuella uppkomster av felkällor såsom systematiska effekter. Något att ha i åtanke vid jämförelse av modeller och kontrollprofiler är att avvikelsen mellan modellerna inte nödvändigtvis representerar en avvikelse från det ”sanna värdet”. Med detta sagt, kan studiens referensmodell fortfarande skilja sig från det ”sanna värdet” vilket innebär att det fortfarande finns en viss osäkerhet i de värden som erhålls.

Enligt HMK – Ortofoto (2017) ska standardosäkerheten i höjd för varje modell räknas ut och även uppfylla de angivna kraven enligt HMK-Ortofoto (2017), tabell 2.3.3. Eftersom standardnivå 3 har följts inom denna studie så är kraven på standardosäkerheten i höjd mellan 2–10 cm. I denna studie har de erhållna standardosäkerheter för avvikelser i höjdled för avvikelser mellan terrängmodell och kontrollprofil för varje enskild modell en variation på mellan 1,7–2,1 cm. Det som är intressant att poängtala är att den lägsta standardosäkerheten för avvikelser i höjdled har erhållits för mätningen utan RTK samt att den högsta standardosäkerheten har erhållits för mätningen med NRTK+1. Ekvation 14 ger en standardosäkerhet för avvikelser mellan terrängmodell och profiler. Eftersom Agisoft inte ger ut standardosäkerheter för höjd i punktmoln/terrängmodell kan ingen utvärdering utföras i aktuell studie på grund av brist av data. Däremot är medelavvikelsen för no-RTK den högsta och NRTK+1 erhåller den lägsta medelavvikelsen. No-RTK mätningen visar en medelavvikelse på 2,3 cm och NRTK+1 på 0,14 cm. De standardavvikelser som uppkommer i plan har en likhet med standardosäkerheter för avvikelser i höjdled beträffande skillnaderna mellan varje georefereringsmetod.

Det är intressant när det kommer till den direkta georefereringen utan markstödpunkter att likartade resultat erhålls från de andra georefereringarna vilket motsäger några av de artiklar som har refererats till i studien. I tidigare studier av Forlani m.fl. (2018) och Tziavou m.fl. (2018) har de påpekat behovet av att ha minst en markstödpunkt för att undvika systematiska fel inom höjd vid NRTK-mätning med UAV. Studien skriven av Forlani m.fl. (2018) är riktigt intressant att jämföra mot eftersom det finns många likheter mellan denna och deras studie. Forlani m.fl (2018) använde liknande tillvägagångssätt och flög även över ett campusområde som påminner om Högskolan i Gävle (ett 18 hektar stort område i Italien). Resultatet från denna studie och Forlanis studie påminner också om varandra både vid jämförelse i RMS i plan men också att RMS-värdena visade sig vara lite bättre vid mätningen där enbart markstödpunkter användes.

Figur 4B i studien skriven av Forlani m.fl. (2018) illustrerar RMS-värdet i höjd där mätningarna utan markstödpunkter med NRTK tydligt sticker ut mot resterande metoder, vilket avviker i resultat från denna studie. Det är också intressant att titta på det som skiljer studierna från varandra som t.ex. att kvaliteten vid generering av det täta punktmolnet var på Medium istället för High, flyghöjden var på 90 meter istället för 80 meter och QGIS användes vid generering av DSM istället för SBG GEO. Största skillnaden dock är vilken utrustning som har använts vid de två studierna. Forlani m.fl. (2018) använde sig av GNSS med NRTK-funktion vid inmätning av kontrollpunkter istället för mätning av totalstation med prismastång vilket inte rekommenderades av SIS-TS 21144:2016 där hårdgjorda ytor ska mäts in. Forlani m.fl. (2018) flög också med en så kallad "Fixed wing" UAV med benämningen Wing SenseFly eBee-RTK.

Vid en snabb jämförelse mellan Phantom 4 RTK och Wing SenseFly eBee-RTK nämner DJI att de har en absolut noggrannhet, horisontellt och vertikalt på cirka fem cm utan markstödpunkter ("DJI - The World Leader in Camera Drones/Quadcopters for Aerial Photography," n.d.). Samtidigt säger Senseflys tillverkare att de har en absolut noggrannhet mellan 1-5 meter i vertikal och horisontell riktning, vilket är en markant skillnad mellan utrustningarna ("EBee Plus Survey Drone - Aerial Efficiency, Photogrammetric Accuracy," n.d.). Användning av Phantom 4 RTK i denna studie kan vara förklaringen till varför de värden i höjd vid flygning med NRTK utan markstödpunkter blir av den kvalitet som visas i resultatet. Larsson & Stark (2019) utförde en liknande studie som undersökte avvikelsen i plan med hjälp av en Phantom 4 RTK, lika UAV som denna studie har utvärderat. Det kan spekuleras om att olika utrustningar ger olika slutresultat, dock är utrustningen i den här studien väldigt lik det som används av Larsson & Stark (2019). Därmed kan det inte vara helt säkert på att utrustningen är anledningen till att RMS i höjd vid direkt georeferering utan markstödpunkter skiljer sig mycket ifrån Larsson & Stark (2019). Metoden som Larsson & Stark (2019) använde sig utav är snarlik denna studies metod eftersom båda följer de föreskrivna anvisningarna enligt HMK-Ortofoto (2017) samt SIS-TS 21144:2016 vid kontroll av ortofotons och digitala terrängmodellers kvalitet. Tidigare argumenterades det om att skillnaden mellan Wing SenseFly eBee-RTK och Phantom 4 RTK UAV kan ha haft en påverkan på det resultat Forlani m.fl. (2018) erhöll i höjd. Då Larsson & Stark (2019) flög med samma UAV (Phantom 4 RTK) samt att de också mätte in sina kontrollprofiler med totalstation och prisma som etablerats med RUFRIS-metoden, stärks inte idén om att utrustningen som användes i denna studie ligger bakom de stora skillnaderna mellan resultaten.

Vid etablering av totalstation med RUFRIS-metoden ska ett antal etableringspunkter mätas in som är utanför mätningsområdet (Trafikverket, 2012). Detta är något som har misstolkats i detta examensarbete där etableringspunkterna mättes in 20 meter från totalstationen samt enbart inom mätområdet. Denna misstolkning kan ha gett upphov till att totalstationens orientering innehåller en viss osäkerhet (Trafikverket, 2012).

Det finns en tydlig skillnad mellan denna studie och den som har skrivits av Larsson & Stark (2019) som flyghöjd, områdesstorlek samt inställningar i Agisoft. Vid vidare kontroll av distributionen av flygsignaler av Larsson & Stark (2019) går det att argumentera att det finns uppenbarliga skiljaktigheter eftersom det finns ytor som inte är täckta av någon flygsignal. Detta kan visserligen förklaras av att de har haft ett stort skogsparti i mitten av sitt flygområde och att utplacering av flygsignaler i det området endast skulle ha försvårat arbetet. Sådana svårigheter har inte förekommit i aktuell studie då god fördelning av samtliga flygsignaler har erhållits.

I denna studie erhålls ett RMS-värde i höjd på 0,036 m för flygningen med no-RTK samt ett RMS-värde på 0,033 m för flygningen med NRTK+1. Studien skriven av Larsson & Stark (2019) erhåller 0,044 m i RMS-värde för no-RTK flygningen samt 0,108 m i RMS-värde för NRTK+1 flygningen. I dessa två studier kan en skillnad på 0,075m räknas fram från flygningarna med NRTK+1 som i sin tur påvisar en stor differens. Resultaten från studien skriven av Forlani m.fl. (2018) vid NRTK+1 mätningen i höjd överensstämmer mycket bättre med denna undersökning eftersom Forlanis erhållna resultat har en intervall mellan 0,029-0,047 m. Forlani m.fl. (2018) poängterar också att enbart en markstödpunkt är nödvändig för att eliminera de systematiska effekterna samtidigt som Larsson & Stark (2019) behöver två markstödpunkter för att erhålla liknande resultat. Varför resultaten skiljer sig mellan Forlani m.fl. (2018), Larsson & Stark (2019) och denna studie är oklart och fler undersökningar behöver göras för att komma fram till ett tillförlitligt resultat.

Vid val av kontrolllyta för inmätning av kontrollprofiler valdes enbart en del av hela studieområdets yta vilket går att se i Metod, sektion 3.3. Figur 8, vilket ska omfatta studieområdets karaktär. Enligt SIS-TS 21144:2016 är det acceptabelt att välja ut ett provområde om denna provyta kan representera de markytor som finns i området vilket i denna studie är asfalt och gräs. Tio kontrollprofiler mättes in där tre profiler mättes på asfalt och sju profiler på gräs. Enligt utförande A i SIS-TS 21144:2016 krävs det enbart åtta kontrollprofiler men då fler kontrollprofiler mättes in i denna studie användes alla tio kontrollprofiler till senare beräkningar. Eftersom den förvalda ytan består mestadels av gräs mättes det in dubbelt så många kontrollprofiler på gräsytan jämfört med på asfaltsytan.

Det går att argumentera att det inte går att få fram kompletta höjdvärden för flygområdet då det valts en begränsad yta som ska representera hela studieområdets ytkaraktär. Största delen av studieområdet är täckt av gräsytor vilket också majoriteten av kontrollprofilerna utgörs av, ändå är inte asfalt den andra största ytan som representeras utan istället höga byggnader då hela Högskolan i Gävle är med i bilden. Om mer tid hade getts för detta examensarbete hade fler kontrollprofiler mätts in över hela ytan och hela studieområdet hade använts för generering av terrängmodeller för att få med all yta som representeras i studieområdet. Det kan ha en signifikant betydelse för resultatet att det endast valdes ca 40 % som kontrolllyta istället den totala ytan, speciellt då provytan skiljer sig åt rätt mycket mot resterande yta.

Vid tidigare bearbetning av NRTK-data i Agisoft antogs det att samma dataset kunde användas som en grund för att därefter modifieras för de andra två NRTK-metoderna. Först gjordes NRTK+1 datasetet där alla flygsignaler placerades ut på respektive bild. NRTK+1 utfördes efter den process som hade lagt upp i Agisoft och data producerades utifrån det. För att inte behöva göra om alla steg i Agisoft vid generering av data för NRTK+1 och NRTK utan markstödpunkter raderades de markstödpunkter som inte behövdes samtidigt som resterande punkter från tidigare dataset var kvar. Efter det utfördes en "Camera optimization" och vid detta steg i processen tar Agisoft bort det tidigare tätta punktmoln samt ortofoto som har genererats. Vad "Camera optimization" gör är att den georefererar och optimerar bilderna baserat på det data som produceras vilket i det här fallet är samtliga bilder och punkter (Agisoft, 2018). Vid senare skede när data hade producerats från NRTK+1 och NRTK skilde sig ingen av de tre dataseten signifikant från varandra.

Baserat på analys av vetenskapliga artiklar fanns det förväntningar om att den direkta georefereringen med GNSS-NRTK utan markstödpunkter skulle ge en systematisk effekt i höjd. Att detta inte uppkom i denna studie kan ses som ett intressant resultat. En djupgående analys i skillnader mellan artikeln skriven av Forlani m.fl. (2018), examensarbetet från Larsson & Stark (2019) och denna studie utfördes då samtliga berör liknade frågeställningar. Varför avvikelsen i den här undersökningen skilde sig mot Forlani m.fl (2018) och Larsson & Stark (2019) baserat på hur respektive metod skilde sig från varandra kräver mer undersökningar. En av anledningarna till att resultaten skilde sig från varandra kan vara att Agisoft lagrar det data som tidigare fanns inlagt i programmet oavsett om markstödpunkterna togs bort eller inte. Därför togs beslutet att göra om datasetet för NRTK+1 samt NRTK helt från början på en annan dator och med en annan inloggning. Resultatet finns att se i Figur 29 och 30. De två dataseten från NRTK utan markstödpunkter skiljer sig endast på millimeter nivå och dataseten mellan NRTK+1 skiljer sig antingen inte alls eller på någon centimeter. Med tanke på det resultat som erhölls accepterades det data som används i det här examensarbetet.

I sektion 3.6.3 under Metod och material kontrollerades kontrollpunkterna mot varandra i plan och höjd. Kontrollpunkterna fyller en viktig roll i denna studie där deras kvalitet är grunden till de utvärderingar som har gjorts. Att ta samtliga nya koordinater direkt från ortofotot och kontrollera mot de beräknade koordinaterna från Agisoft är av intresse för att kontrollera ortofotots kvalitet samt kontrollera den information Agisoft ger. Vid analys av Figur 18 skiljer sig resultatet bara med upp till sex mm från varandra och vid analys av Figur 28 förekommer inte heller några större skillnader där största differansen ligger på elva millimeter. Den mänskliga faktorn spelar roll, detta eftersom att extraheringen av koordinater från ortofotot görs manuellt och kräver en viss noggrannhet där varje extrahering kan skilja sig sinsemellan.

6 Slutsats

Enligt de undersökningar som har utförts i tidigare studier har slutsatsen dragits att för att kunna erhålla bra värden i plan och höjd vid flygningar med no-RTK krävs ett gediget arbete ute i fält där ett flertal flygsignaler behövs sättas ut. Vid mätning med UAV är utsättning och inmätning av flygsignaler det mest tidskrävande arbetet vilket innebär att flygningar med direkt georeferering med hög noggrannhet genom exempelvis GNSS-NRTK är den mest optimala metoden ur ett tidsperspektiv. Detta eftersom denna studie visar att direkt georeferering med GNSS-NRTK ger näst intill identiska resultat när det gäller systematiska avvikeler i plan och höjd i jämförelse med indirekt georeferering med en/flera markstödpunkter. Med fördelen att inga eller många färre markstödpunkter placeras ut och mäts in vilket sparar timmar ute i fält. Denna slutsats angående kvaliteten på de befintliga data styrks av de mätningar som har genomförts inom denna studie.

Med anledning av detta kan NRTK-mätningen rekommenderas ur ett tidsperspektiv trots att den erhåller lite högre avvikeler i plan samt likvärdiga RMS-värden i höjd i jämförelse till no-RTK metoden. Resultatet visar på att inga markstödpunkter behövs vid NRTK-mätning med UAV vilket är intressant eftersom det skiljer sig från andra studier som istället rekommenderar minst en markstödpunkt vid NRTK-mätning.

Någonting som kan vara missvisande är när det forskas kring flygningar med endast NRTK utan några markstödpunkter. Att inte ha några markstödpunkter betyder inte per automatik att man inte har några kontrollpunkter/kontrollobjekt. För att kunna utvärdera det slutliga resultatet av en mätning utan några markstödpunkter krävs det kontrollpunkter/kontrollobjekt som ska vara inmätta på ett välutfört sätt. Med detta sagt innebär det att mätningar med UAV där NRTK utan några markstödpunkter används behövs fortfarande ett antal kontrollpunkter vid kontroll för framtida studier/mätningar.

Slutligen är de krav som följer en specifierad standardosäkerhet enligt HMK-standardnivå 3 uppfyllda beträffande tillåtna avvikeler i plan och höjd.

6.1 Framtida studier

Faktorer som jonasfärstörningar och PDOP kontrollerades men det är oklart vilket påverkan de har på resultatet och hur stor påverkan de kunde ha på resultatet om mätningen utfördes på en ”dålig” dag. Det är också intressant att titta på hur samma data påverkas från olika arbetsprocesser inom t.ex. Agisoft eller framställning av terrängmodeller i SBG GEO. I GEO märktes det klart och tydligt vilken stor påverkan tätpunktheten kan ha på kontrollprofilerna och att det också är viktigt att dessa delar i processen blir korrekta och riktiga. För framtida studier hade det varit intressant att titta på hur stor påverkan bearbetningsprocessen har på slutresultatet och hur tillsyns samma parametrar kan ge ett annat resultat. Bilaga A fungerar som en referens för de som är intresserad av att upprepa denna studie och jämföra mot de resultat studien gav.

Något som är speciellt intressant att följa upp i denna studie är det resultat som gavs vid direkt georeferering med NRTK utan markstödpunkter. Tidigare studie av Forlani m.fl. (2018) har understrukit nödvändigheten för en markstödpunkt vid georeferering för att erhålla godkända värden inom höjd. Datat från detta examensarbete visar på motsatsen, att bra värden i höjd går att få utan markstödpunkt vid direkt georeferering med NRTK. Möjligtvis kan utrustningen ha spelat en roll där Forlani m.fl. (2018) använde sig av en ”Fixed Wing” Wing SenseFly eBee-RTK UAV istället för en Phantom 4 RTK. En jämförelse mellan dessa två UAV-farkoster hade varit intressant att fördjupa sig i för att se om de håller de krav de lovar och om den kan bidra med en förklaring till varför värden från den här studien skiljer sig i höjd från det Folani m.fl. (2018) erhöll. Att resultatet skiljer sig från föregående års examensarbete skriven av Larsson & Stark (2019) när de också flög med Phantom 4 RTK är oklart och kan enbart spekuleras vid detta skede.

Referenser

- Agisoft. (2018). Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition. Copyright © 2018 Agisoft LLC, (Version 1.4), 127.
<https://doi.org/10.1016/j.bjps.2011.05.024>
- Agisoft. (2020). *Agisoft Metashape & Agisoft PhotoScan comparison*. Hämtad från https://www.agisoft.com/pdf/metashape_comparison.pdf
- Chio, S.-H. (2016). Vbs Rtk Gps-Assisted Self-Calibration Bundle Adjustment for Aerial Triangulation of Fixed-Wing Uas Images for Updating Topographic Maps. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 22(4), 665–684.
<https://doi.org/10.1590/s1982-21702016000400038>
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- DJI. (2018). *PHANTOM 4 RTK* [User Manual version 1.4]. Hämtad 2020-04-20 från http://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_rtk/20181015/Phantom_4_RTK_User_Manual_v1.4_EN_2.pdf
- DJI - The World Leader in Camera Drones/Quadcopters for Aerial Photography. (u.å.). Hämtad 21 maj 2020, från <https://www.dji.com/se/phantom-4-rtk/info>
- DJI Phantom 4 RTK - Voosestore. (u.å.). Hämtad 11 juni 2020, från <https://www.voosestore.com/se/dronare/dji/dji-phantom/dji-phantom-4-rtk>
- eBee Plus Survey Drone - Aerial Efficiency, Photogrammetric Accuracy. (u.å.). Hämtad 21 maj 2020, från <https://www.sensefly.com/drone/ebee-plus-survey-drone/>
- Fazeli, H., Samadzadegan, F., & Dadrasjavan, F. (2016). Evaluating the potential of RTK-UAV for automatic point cloud generation in 3D rapid mapping. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 41(July), 221–226.
<https://doi.org/10.5194/isprarchives-XLI-B6-221-2016>
- Forlani, G., Dall'Asta, E., Diotri, F., di Cella, U. M., Roncella, R., & Santise, M. (2018). Quality assessment of DSMs produced from UAV flights georeferenced with on-board RTK positioning. *Remote Sensing*, 10(2), 1–23.
<https://doi.org/10.3390/rs10020311>
- Lantmäteriet. (2017a). *HMK-GNSS-baserad detaljmätning 2017*. Hämtad från https://www.lantmateriet.se/contentassets/96e6a20268f94f36959bd12e0700a581/hmk-gegnss-det_2017.pdf
- Lantmäteriet. (2017b). HMK flygfotografering 2017. Hämtad från <https://www.lantmateriet.se/contentassets/96e6a20268f94f36959bd12e070>

0a581/hmk_flygfoto_2017.pdf

- Lantmäteriet m.fl. (2013). *Geodetisk och fotogrammetrisk mätnings- och beräkningsteknik.* 168–170. Hämtad från <https://www.lantmateriet.se/globalassets/om-lantmateriet/var-samverkan-med-andra/handbok-mat--och-kartfragor/utbildning/kompendium20131028.pdf>
- Lantmäteriet. (u.å.). *Nätverks-RTK.* Hämtad 11 juni 2020, från <https://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/gps-geodesi-och-swepos/GPS-och-satellitpositionering/Metoder-for-GNSS-matning/Natverks-RTK/>
- Larsson, J., Stark, M. (2019). Utvärdering av lägesosäkerheter i ortofoton framtagna med hjälp av DJI Phantom 4 RTK. Hämtad från <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1325035&dswid=-6284>
- Mårtensson, S. G., Reshetnyuk, Y., & Jivall, L. (2012). Measurement uncertainty in network RTK GNSS-based positioning of a terrestrial laser scanner. *Journal of Applied Geodesy*, 6(1), 25–32. <https://doi.org/10.1515/jag-2011-0013>
- Martínez-Carricando, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F. J., García-Ferrer, A., & Pérez-Porras, F. J. (2018). Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 72(May), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.015>
- Rabah, M., Basiouny, M., Ghanem, E., & Elhadary, A. (2018). Using RTK and VRS in direct geo-referencing of the UAV imagery. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 7(2), 220–226. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2018.05.003>
- Reshetnyuk, Y., & Mårtensson, S. G. (2016). Generation of Highly Accurate Digital Elevation Models with Unmanned Aerial Vehicles. *Photogrammetric Record*, 31(154), 143–165. <https://doi.org/10.1111/phor.12143>
- Swepos Tjänsteportal. (u.å.). Hämtad 29 mars 2020, från <http://swepos.lantmateriet.se/services/iono.aspx>
- Tmušić, G., Manfreda, S., Aasen, H., James, M. R., Gonçalves, G., Ben-Dor, E., ... McCabe, M. F. (2020). Current Practices in UAS-based Environmental Monitoring. *Remote Sensing*, 12(6), 1001. <https://doi.org/10.3390/rs12061001>
- Tomaštík, J., Mokroš, M., Surový, P., Grznárová, A., & Merganič, J. (2019). UAV RTK/PPK method-An optimal solution for mapping inaccessible forested areas? *Remote Sensing*, 11(6), 721. <https://doi.org/10.3390/RS11060721>
- Trafikverket. (2012). *Metodbeskrivning RUFRIS.* Hämtad från <https://trafikverket.ineko.se/se/metodbeskrivning-rufiris>
- Tziavou, O., Pytharouli, S., & Souter, J. (2018). Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based mapping in engineering geological surveys: Considerations for optimum

results. *Engineering Geology*, 232(March 2017), 12–21.

<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.11.004>

Zhang, H., Aldana-Jague, E., Clapuyt, F., Wilken, F., Vanacker, V., & Van Oost, K. (2019). Evaluating the Potential of PPK Direct Georeferencing for UAV-SfM Photogrammetry and Precise Topographic Mapping. *Earth Surface Dynamics Discussions*, 1–34. <https://doi.org/10.5194/esurf-2019-2>

Bilaga A

Parametrar som haft en påverkan på det slutgiltiga resultatet. Strukturen är baserad på Tabell 2 från: Tmušić et al (2020).

A1. Flygparametrar samt inställningar i Agisoft

UAV	DJI Phantom 4 RTK	
Programvaror	Agisoft Metashape, Excel, SBG Geo	
Koordinatsystem	SWEREF 99 16 30	
Höjdsystem	RH 2000	
Flygparametrar		
Antalet flygningar	2	
Flygfart	6.3 m/s	
Flyghöjd	80 meter	
Överlapp	80 % framöverlapp 70 % sidöverlapp	
Väder	Soligt (ca 20 grader), Vindstilla	
Flygtid	10 minuter	
Geometrisk upplösning	2.20 cm/pix	
Antalet flygstråk	7 avlånga flygstråk	
Kameravinkel	-90 grader (rakt ner) + 30 grader (snett framåt)	
Antalet flygbilder (GNSS)	224	
Antalet flygbilder (NRTK)	230	
Flygyta		
Område	Högskolan i Gävle	
Storlek	53890 m ²	
Flygsignaler		
Antalet markstödpunkter	11	
Antalet kontrollpunkter	8	
Placering av flygsignaler	Utspridd, vid kanterna och mitt i området	
Flygsignal	40x40 cm svartvit skiva i kartong	
Mätutrustning	GNSS	
Mätmetod	60 positioner, två gånger	
Kontrollprofil		
Antalet inmätta kontrollprofiler	10	
Antalet punkter per profil	20	
Inmättningsmetod	Efter utförande A i SIS:TS 21144:2016	
Mätutrustning	Totalstation samt prismastång	
Stationsetableringsmetod	Leica Smartpole	
Agisoft parametrar	NRTK	No-RTK
Antal bearbetade bilder	224 X 3	224 X 1
Viktning av flygsignaler	3 cm	3 cm
Viktning av kameran	5 cm	10 m (obetydlig)
Inställningar av glest punktmoln	"Highest", "Generic preselection", "Reference preselection"	
Inställning av tät-punktmoln	"High", "Moderate"	
Ortofoton genererade	4	

Bilaga B

Följande Bilaga visar den bearbetade rapporten för den indirekta georefereringsmetoden (no-RTK) från Agisoft Metashape.

No-RTK

Högskolan i Gävle
21 May 2020



B1. Framsida från No-RTK rapporten framställd i Agisoft.

Survey Data

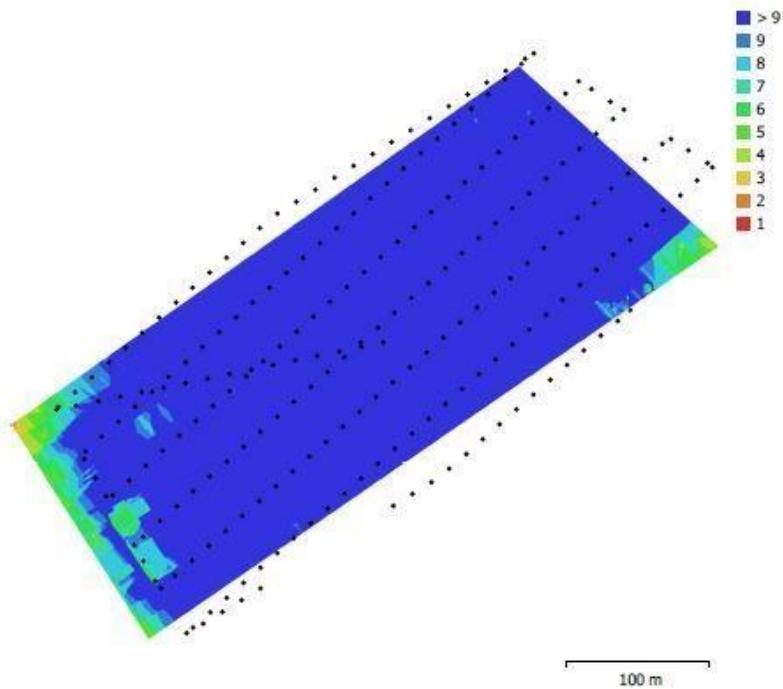


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	224	Camera stations:	224
Flying altitude:	83.4 m	Tie points:	223,117
Ground resolution:	2.05 cm/pix	Projections:	821,859
Coverage area:	0.084 km ²	Reprojection error:	0.473 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310R (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 µm	No
FC6310R (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 µm	No

B2. Sida 1 från No-RTK rapporten framställd i Agisoft.

Camera Calibration

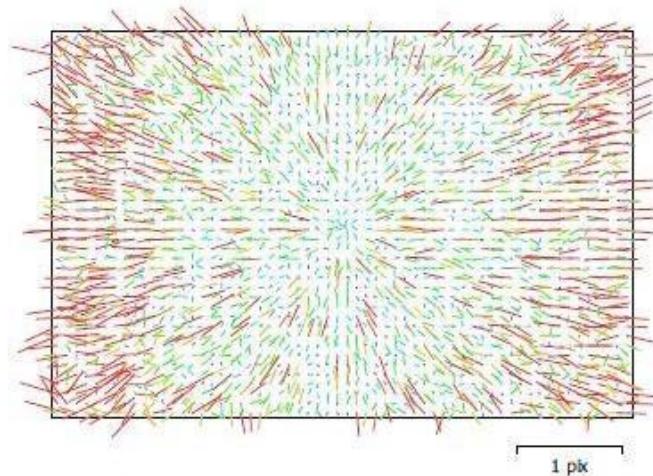


Fig. 2. Image residuals for FC6310R (8.8mm).

FC6310R (8.8mm)

205 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 µm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	3690.18	0.25	1.00	0.04	-0.05	-0.31	0.02	-0.98	0.96	-0.94	0.91	0.05	-0.04
Cx	-33.7348	0.097		1.00	-0.00	-0.21	-0.26	-0.04	0.04	-0.04	0.04	0.98	-0.00
Cy	-25.1311	0.085			1.00	0.19	-0.25	0.04	-0.04	0.04	-0.04	0.00	0.98
B1	0.0775423	0.014				1.00	0.01	0.32	-0.32	0.31	-0.29	-0.23	0.19
B2	0.584928	0.0095					1.00	-0.01	0.01	-0.01	0.01	-0.27	-0.25
K1	-0.0348331	0.00056						1.00	-1.00	0.98	-0.96	-0.05	0.03
K2	0.0530988	0.0017							1.00	-0.99	0.98	0.05	-0.03
K3	-0.0533841	0.0021								1.00	-0.99	-0.05	0.03
K4	0.0238101	0.00099									1.00	0.05	-0.03
P1	-0.00268882	1.4e-05										1.00	0.00
P2	-0.00242994	1.2e-05											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

B3. Sida 3 från No-RTK rapporten framställd i Agisoft.

Ground Control Points



Fig. 4. GCP locations and error estimates.
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
11	0.753619	1.21484	1.45712	1.42961	2.04132

Table 4. Control points RMSE.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
8	0.513252	0.879363	1.94957	1.01819	2.19944

Table 5. Check points RMSE.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

B4. Sida 4 från No-RTK rapporten framställd i Agisoft

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
GCP1	1.0275	-0.376206	-3.22863	3.40901	0.645 (21)
GCP3	0.498894	-2.05651	1.37257	2.52232	0.707 (19)
GCP6	0.0069178	1.30197	0.131786	1.30864	0.373 (19)
GCP7	0.657006	0.732799	1.13388	1.50144	0.473 (27)
GCP8	1.08837	0.276043	1.22751	1.66359	0.388 (15)
GCP9	-0.590078	2.33933	0.349101	2.43773	0.340 (15)
GCP11	-0.568412	-0.142437	0.153328	0.605715	0.369 (20)
GCP13	-1.55695	-0.266109	0.399042	1.62915	0.765 (16)
GCP15	-0.0641242	0.756007	-2.2195	2.3456	0.675 (15)
GCP16	-0.475834	-1.53813	-0.837384	1.81479	0.481 (14)
GCP18	-0.0232939	-1.02676	1.5183	1.83303	0.460 (19)
Total	0.753619	1.21484	1.45712	2.04132	0.534

Table 6. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
CP2	-0.449687	1.20588	-1.48507	1.96515	0.411 (17)
CP4	0.643273	0.475218	1.30953	1.53444	0.497 (17)
CP5	0.548016	0.021305	2.35035	2.41349	0.501 (27)
CP10	0.130925	1.43553	-0.245254	1.4622	0.452 (14)
CP12	-0.842575	1.03238	2.90491	3.19598	0.405 (13)
CP14	-0.641134	-1.02019	1.91171	2.25975	0.420 (23)
CP17	-0.203344	-0.452257	2.43955	2.48944	0.476 (24)
CP19	-0.107707	0.365932	1.69038	1.73289	0.392 (29)
Total	0.513252	0.879363	1.94957	2.19944	0.447

Table 7. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

B5. Sida 5 från No-RTK rapporten framställd i Agisoft

Digital Elevation Model

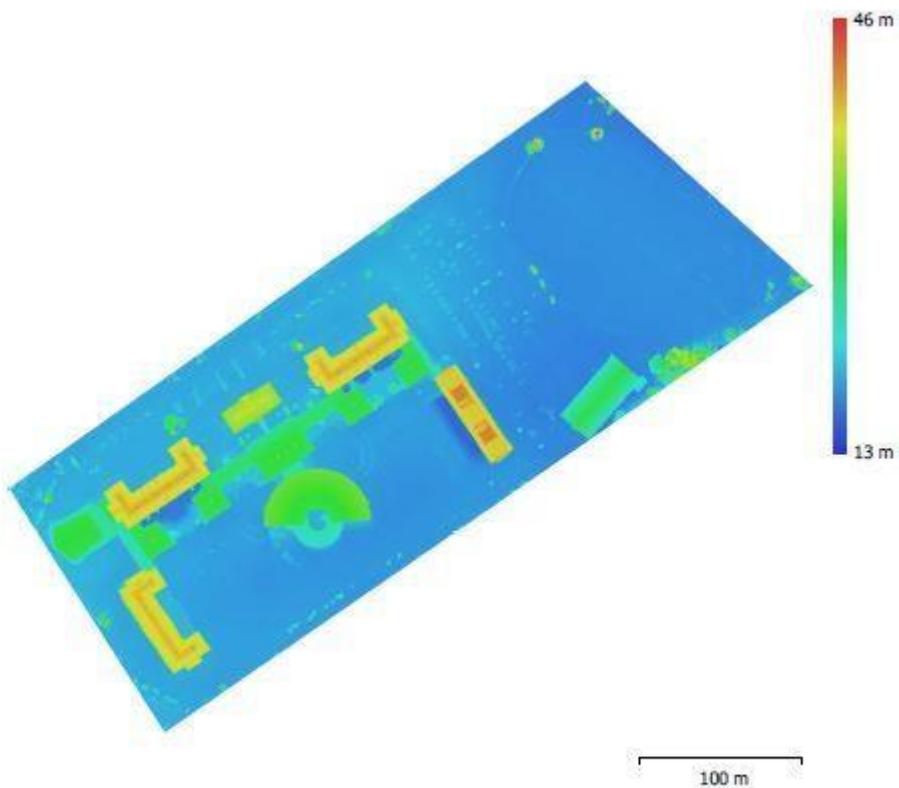


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 8.21 cm/pix
Point density: 148 points/m²

B6. Sida 6 från No-RTK rapporten framställd i Agisoft

Bilaga C

Följande Bilaga visar den genererade rapporten från Agisoft Metashape för den direkta georefereringsmetoden (NRTK+11).

NRTK + 11 Markstödpunkter

Högskolan i Gävle
11 May 2020



C1. Framsida från NRTK+11 rapporten framställd i Agisoft.

Survey Data

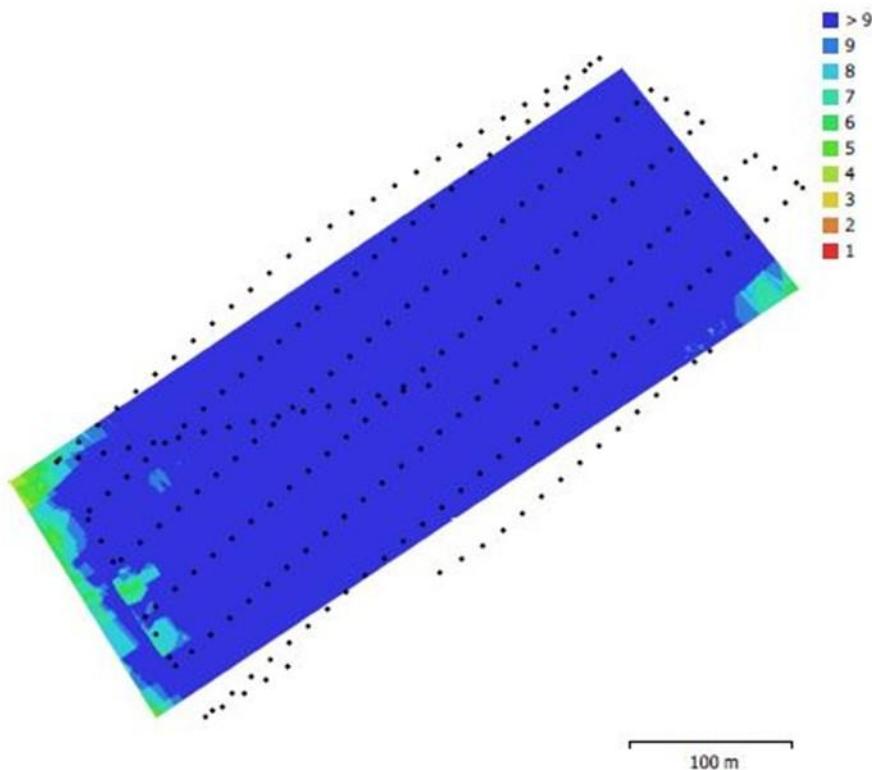


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	224	Camera stations:	224
Flying altitude:	88.3 m	Tie points:	211,407
Ground resolution:	2.18 cm/pix	Projections:	803,580
Coverage area:	0.0813 km ²	Reprojection error:	0.466 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310R (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 µm	No
FC6310R (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 µm	No

Table 1. Cameras.

C2. Sida 1 från NRTK+11 rapporten framställd i Agisoft.

Camera Calibration

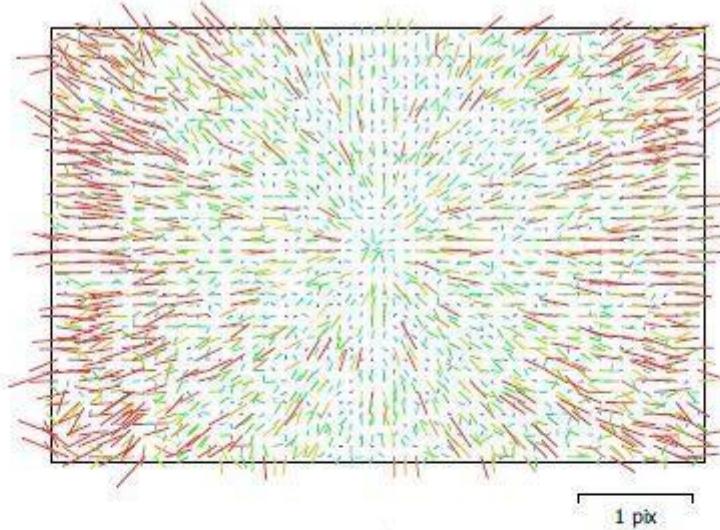


Fig. 2. Image residuals for FC6310R (8.8mm).

FC6310R (8.8mm)

205 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	3689.03	0.25	1.00	0.01	-0.05	-0.28	0.01	-0.99	0.97	-0.95	0.92	0.02	-0.04
Cx	-33.6618	0.091		1.00	-0.02	-0.19	-0.25	-0.01	0.01	-0.01	0.01	0.99	-0.01
Cy	-24.2865	0.082			1.00	0.20	-0.23	0.04	-0.04	0.04	-0.04	-0.01	0.99
B1	0.131908	0.014				1.00	0.01	0.30	-0.30	0.29	-0.27	-0.21	0.20
B2	0.616857	0.0091					1.00	-0.01	0.01	-0.01	0.01	-0.25	-0.23
K1	-0.0312563	0.00055						1.00	-1.00	0.98	-0.96	-0.03	0.03
K2	0.0426507	0.0016							1.00	-0.99	0.98	0.03	-0.03
K3	-0.0406678	0.0021								1.00	-0.99	-0.02	0.03
K4	0.0182532	0.00099									1.00	0.02	-0.03
P1	-0.00265624	1.3e-05										1.00	-0.01
P2	-0.00234262	1.2e-05											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

C3. Sida 2 FRÅN från NRTK+11 rapporten framställd i Agisoft.

Camera Locations

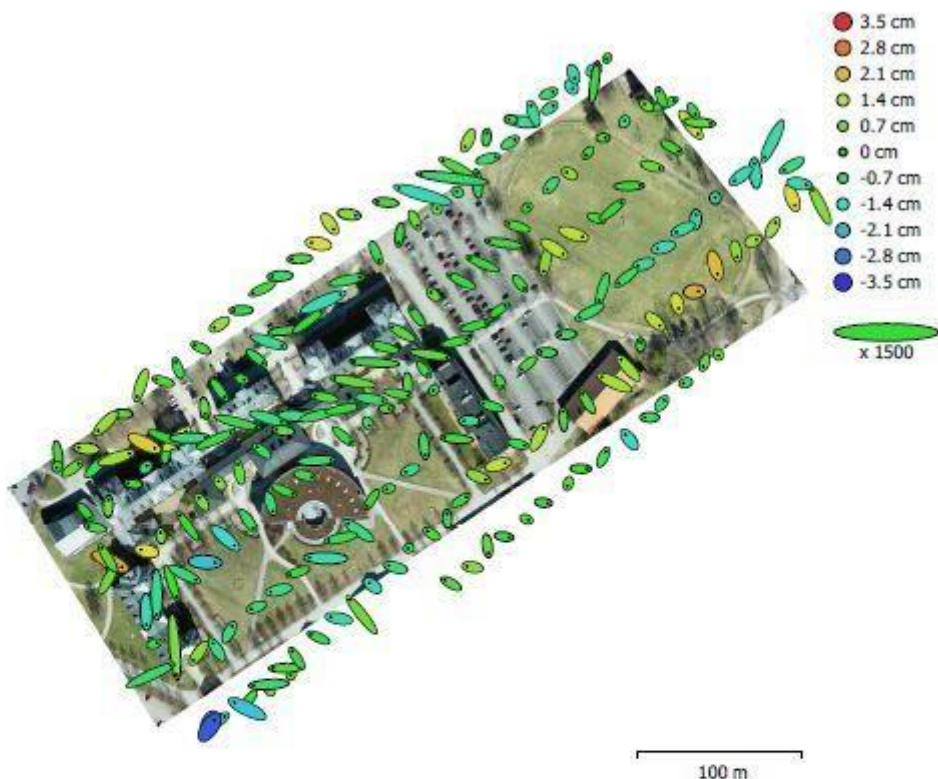


Fig. 4. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
0.649366	0.466538	0.834024	0.799583	1.15539

Table 4. Average camera location error.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

C4. Sida 3 från NRTK+11 rapporten framställd i Agisoft.

Ground Control Points

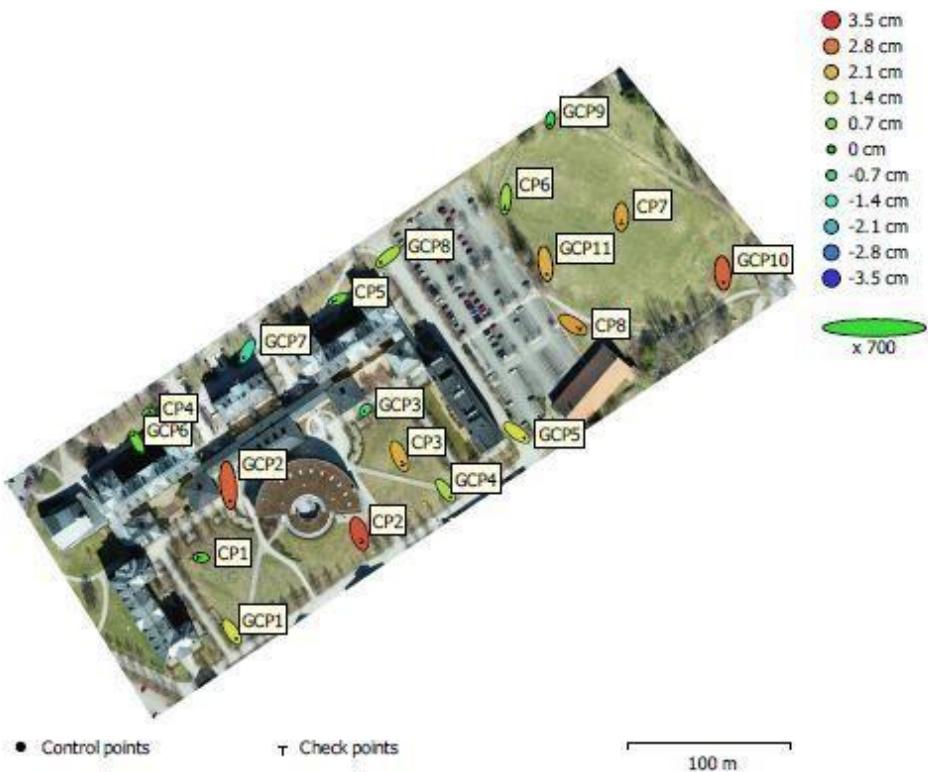


Fig. 5. GCP locations and error estimates.
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
11	0.723376	1.41584	1.7501	1.58993	2.36447

Table 5. Control points RMSE.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
8	0.677575	1.1289	1.89205	1.31663	2.30507

Table 6. Check points RMSE.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

C5. Sida 4 från NRTK+11 rapporten framställd i Agisoft.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
GCP1	0.792406	-1.23835	1.60196	2.17433	0.403 (21)
GCP2	0.30897	-2.8235	3.03423	4.15622	0.367 (19)
GCP3	-0.210712	-0.229581	-0.592186	0.669172	0.389 (18)
GCP4	0.884131	-1.14084	1.17445	1.86079	0.460 (18)
GCP5	1.30955	-0.966907	1.65533	2.32162	0.338 (15)
GCP6	-0.640574	1.16246	0.570174	1.44456	0.368 (17)
GCP7	-0.60784	-1.16316	-1.22579	1.79582	0.481 (19)
GCP8	-1.27416	-1.02133	1.17157	2.00977	0.736 (16)
GCP9	-0.0895418	-0.725867	-0.20181	0.758701	0.441 (17)
GCP10	0.126616	-1.61597	3.02898	3.43542	0.657 (11)
GCP11	0.253574	-1.83581	2.24339	2.90986	0.419 (14)
Total	0.723376	1.41584	1.7501	2.36447	0.466

Table 7. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
CP1	-0.596208	0.0356357	0.487833	0.771178	0.395 (19)
CP2	0.488864	-1.51692	3.22434	3.59673	0.463 (16)
CP3	0.660227	-1.53727	2.21265	2.77397	0.306 (17)
CP4	0.270313	0.112112	0.494984	0.575019	0.562 (13)
CP5	-0.915121	-0.401531	0.475766	1.10681	0.528 (15)
CP6	-0.151018	-1.75463	1.05224	2.05152	0.448 (20)
CP7	-0.0187589	-1.27439	2.36225	2.68415	0.562 (18)
CP8	1.30722	-0.80822	2.43921	2.88302	0.431 (23)
Total	0.677575	1.1289	1.89205	2.30507	0.463

Table 8. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

C6. Sida 5 från NRTK+11 rapporten framställd i Agisoft.

Digital Elevation Model

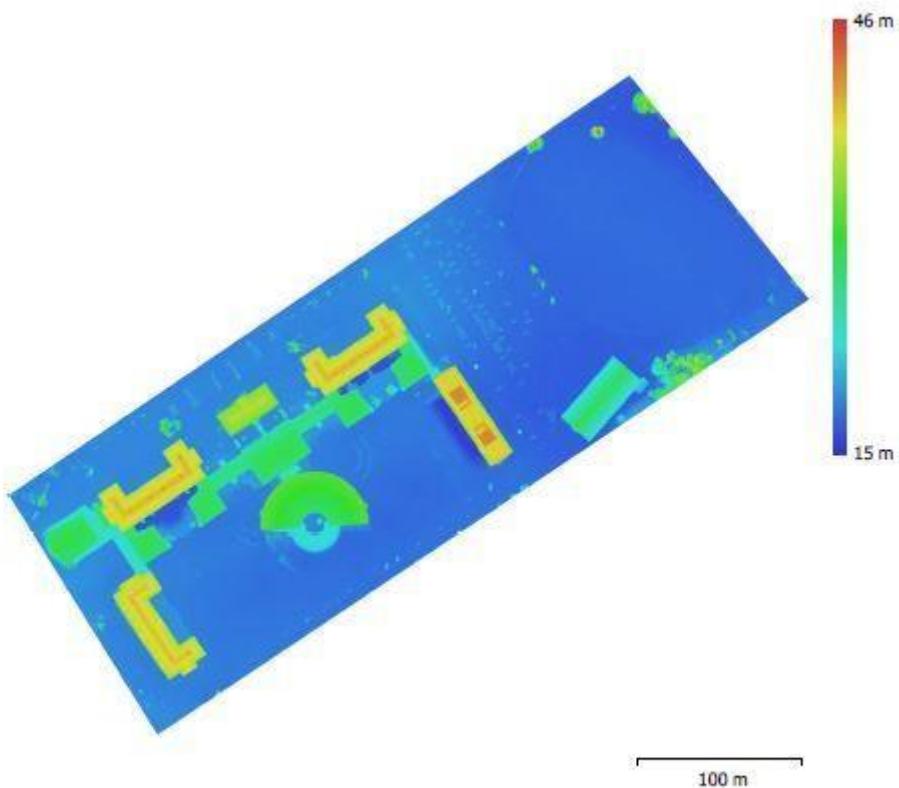


Fig. 6. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 4.36 cm/pix
Point density: 527 points/m²

C7. Sida 6 från NRTK+11 rapporten framställd i Agisoft.

Processing Parameters

General	
Cameras	224
Aligned cameras	224
Markers	19
Shapes	
Polygons	1
Coordinate system	SWEREF99 16 30 + RH2000 height (EPSG::5849)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	211,407 of 228,028
RMS reprojection error	0.204815 (0.466307 pix)
Max reprojection error	0.960272 (21.0691 pix)
Mean key point size	2.16725 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	4.04141
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Fit additional corrections	Yes
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	17 seconds
Depth Maps	
Count	224
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Moderate
Processing time	1 hours 16 minutes
Software version	1.6.2.10247
Dense Point Cloud	
Points	123,937,423
Point colors	3 bands, uint8
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Moderate
Processing time	1 hours 16 minutes
Dense cloud generation parameters	
Processing time	42 minutes 28 seconds
Software version	1.6.2.10247
DEM	
Size	18,718 x 17,221
Coordinate system	SWEREF99 16 30 + RH2000 height (EPSG::5849)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	6 minutes 20 seconds
Software version	1.6.2.10247
Orthomosaic	
Size	26,751 x 24,611
Coordinate system	SWEREF99 16 30 + RH2000 height (EPSG::5849)
Colors	3 bands, uint8

C8. Sida 7 från NRTK+11 rapporten framställd i Agisoft.

Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Processing time	31 minutes 9 seconds
Software version	1.6.2.10247
System	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.6.2 build 10247
OS	Windows 64 bit
RAM	31.84 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-8700K CPU @ 3.70GHz
GPU(s)	Quadro P2000

C9. Sida 8 från NRTK+11 rapporten framställd i Agisoft.

Bilaga D

Följande Bilaga visar den genererade rapporten från Agisoft Metashape för den direkta georefereringsmetoden (NRTK+1).

NRTK + 1 Markstödpunkt

Högskolan i Gävle
11 May 2020



D1. Framsida från NRTK+1 rapporten framställd i Agisoft.

Survey Data

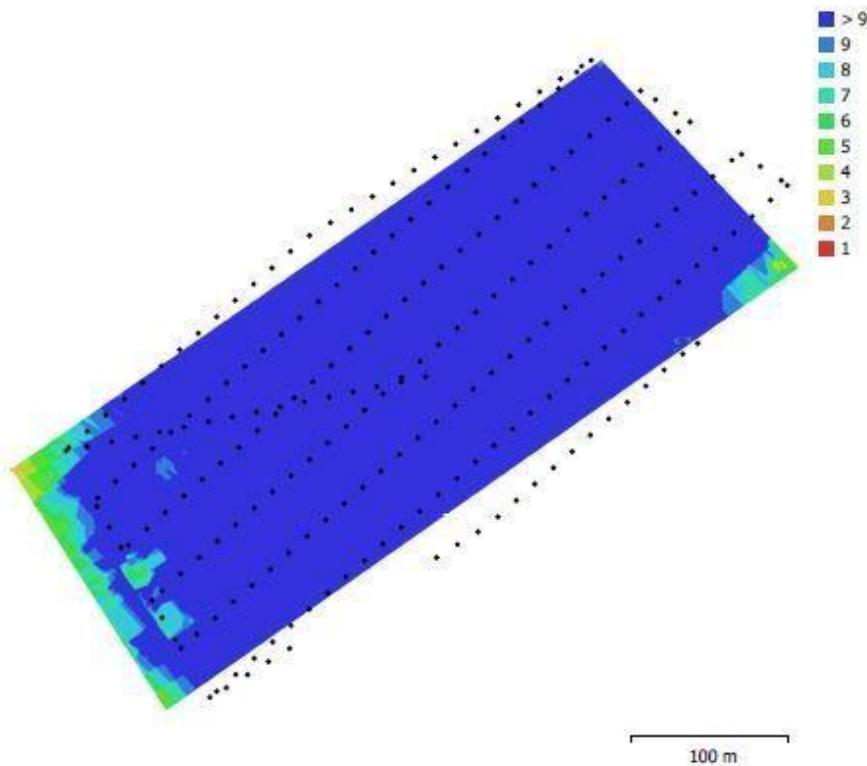


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	224	Camera stations:	224
Flying altitude:	88.5 m	Tie points:	219,696
Ground resolution:	2.18 cm/pix	Projections:	790,819
Coverage area:	0.087 km ²	Reprojection error:	0.471 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310R (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 µm	No

Table 1. Cameras.

D2. Sida 1 från NRTK+1 rapporten framställd i Agisoft.

Camera Calibration

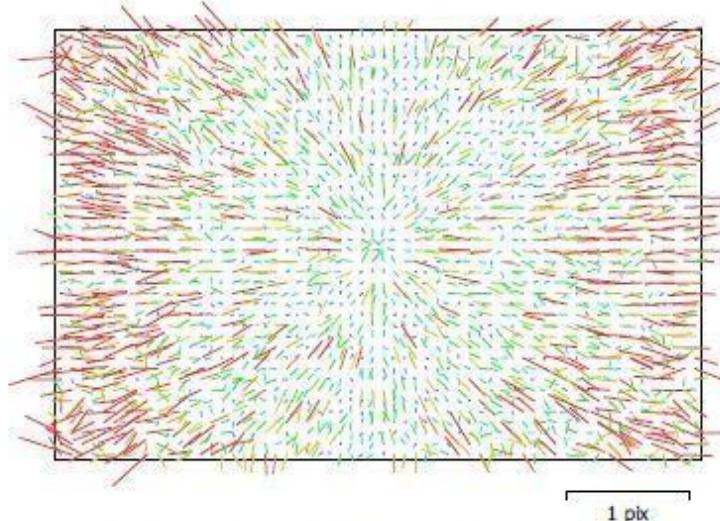


Fig. 2. Image residuals for FC6310R (8.8mm).

FC6310R (8.8mm)

224 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	3689.16	0.25	1.00	0.05	-0.04	-0.27	0.00	-0.98	0.97	-0.95	0.92	0.06	-0.03
Cx	-33.8141	0.089		1.00	-0.02	-0.26	-0.24	-0.06	0.05	-0.05	0.05	0.99	-0.02
Cy	-24.1961	0.079			1.00	0.18	-0.26	0.03	-0.03	0.03	-0.03	-0.02	0.99
B1	0.129148	0.014				1.00	0.02	0.29	-0.29	0.28	-0.26	-0.27	0.18
B2	0.654974	0.0094					1.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.24	-0.26
K1	-0.0319597	0.00055						1.00	-1.00	0.98	-0.96	-0.06	0.02
K2	0.0450514	0.0016							1.00	-0.99	0.98	0.06	-0.02
K3	-0.0440202	0.0021								1.00	-0.99	-0.06	0.02
K4	0.0199225	0.00098									1.00	0.06	-0.02
P1	-0.00266498	1.3e-05										1.00	-0.02
P2	-0.0023271	1.2e-05											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

D3. Sida 2 från NRTK+1 rapporten framställd i Agisoft..

Camera Locations



Fig. 3. Camera locations and error estimates.
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
0.628058	0.466227	0.853577	0.782192	1.15776

Table 3. Average camera location error.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

D4. Sida 3 från NRTK+1 rapporten framställd i Agisoft.

Ground Control Points

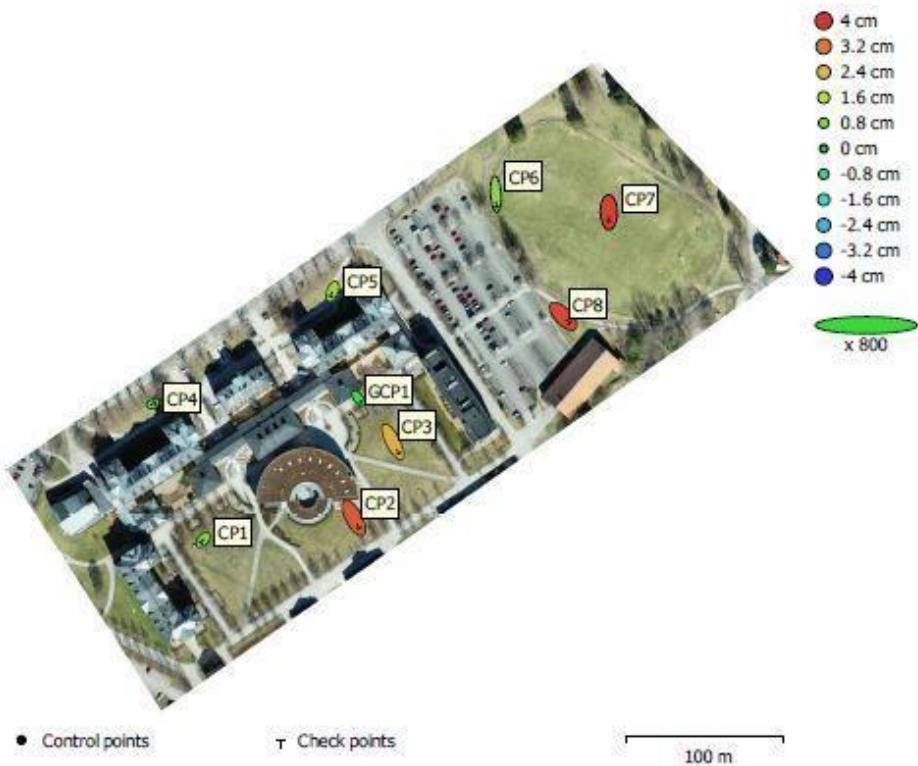


Fig. 4. GCP locations and error estimates.
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
1	0.425316	0.572786	0.333744	0.713426	0.787631

Table 4. Control points RMSE.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
8	0.614809	1.35047	2.53779	1.48383	2.93975

Table 5. Check points RMSE.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

D5. Sida 4 från NRTK+1 rapporten framställd i Agisoft.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
GCP1	0.425316	-0.572786	-0.333744	0.787631	0.451 (19)
Total	0.425316	0.572786	0.333744	0.787631	0.451

Table 6. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
CP3	0.944915	-1.86281	2.51817	3.27171	0.310 (20)
CP8	1.02966	-1.07991	3.74276	4.02922	0.471 (23)
CP7	0.0241244	-1.46495	3.87415	4.14194	0.500 (18)
CP6	0.130811	-2.07116	0.931922	2.27493	0.442 (19)
CP5	-0.288902	-0.78346	1.25204	1.50495	0.321 (18)
CP4	0.30645	0.140674	0.406412	0.528082	0.302 (13)
CP2	0.858008	-1.64051	3.5583	4.0111	0.539 (15)
CP1	-0.373651	-0.439459	0.949639	1.1111	0.330 (19)
Total	0.614809	1.35047	2.53779	2.93975	0.413

Table 7. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

D6. Sida 5 från NRTK+1 rapporten framställd i Agisoft.

Digital Elevation Model

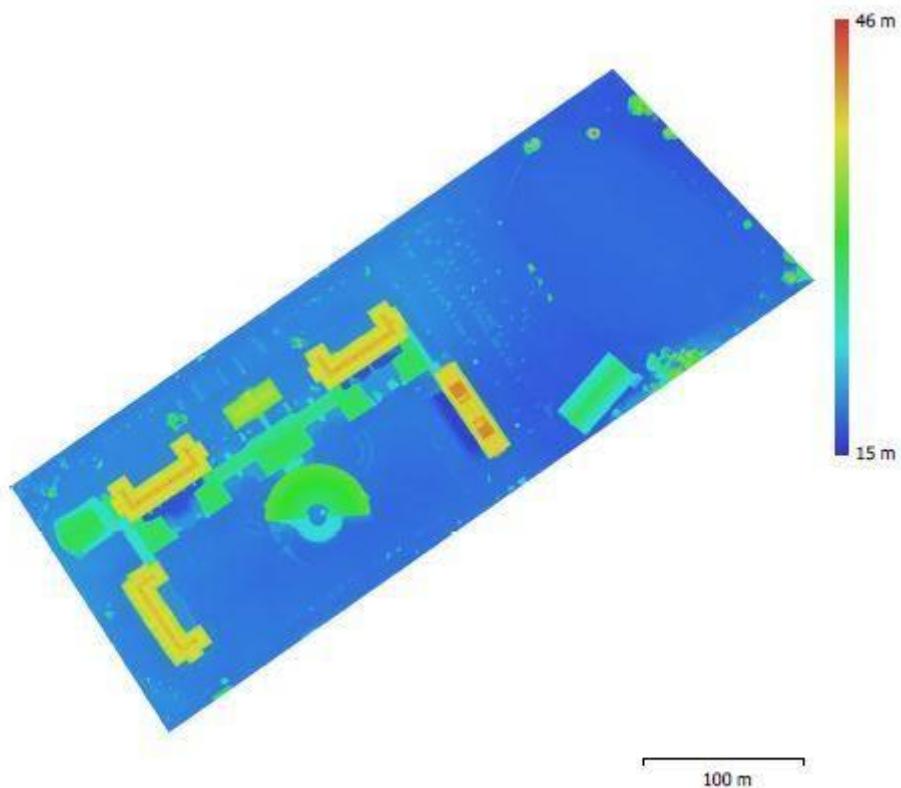


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 4.35 cm/pix
Point density: 528 points/m²

D7. Sida 6 från NRTK+1 rapporten framställd i Agisoft.

Processing Parameters

General	
Cameras	224
Aligned cameras	224
Markers	9
Shapes	
Polygons	1
Coordinate system	SWEREF99 16 30 + RH2000 height (EPSG::5849)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	219,696 of 236,201
RMS reprojection error	0.204667 (0.471463 pix)
Max reprojection error	0.89038 (28.5538 pix)
Mean key point size	2.19454 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	3.81598
Alignment parameters	
Accuracy	Highest
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	4 minutes 40 seconds
Matching memory usage	5.88 GB
Alignment time	1 minutes 1 seconds
Alignment memory usage	187.70 MB
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Fit additional corrections	Yes
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	17 seconds
Software version	1.6.2.10247
Depth Maps	
Count	224
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Moderate
Processing time	1 hours 5 minutes
Software version	1.6.2.10247
Dense Point Cloud	
Points	124,338,092
Point colors	3 bands, uint8
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Moderate
Processing time	1 hours 5 minutes
Dense cloud generation parameters	
Processing time	43 minutes 24 seconds

D8. Sida 7 från NRTK+1 rapporten framställd i Agisoft.

Software version	1.6.2.10247
DEM	
Size	18,155 x 16,728
Coordinate system	
	SWEREF99 16 30 + RH2000 height (EPSG::5849)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	6 minutes 39 seconds
Software version	1.6.2.10247
Orthomosaic	
Size	26,803 x 24,379
Coordinate system	SWEREF99 16 30 + RH2000 height (EPSG::5849)
Colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Processing time	36 minutes 31 seconds
Software version	1.6.2.10247
System	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.6.2 build 10247
OS	Windows 64 bit
RAM	31.84 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-8700K CPU @ 3.70GHz
GPU(s)	Quadro P2000

D9. Sida 8 från NRTK+1 rapporten framställd i Agisoft.

Bilaga E

Följande Bilaga visar den genererade rapporten från Agisoft Metashape för den direkta georefereringsmetoden (NRTK utan markstödpunkter).

NRTK utan Markstödpunkter

Högskolan i Gävle
11 May 2020



E1. Framsida från NRTK rapporten framställd i Agisoft.

Survey Data

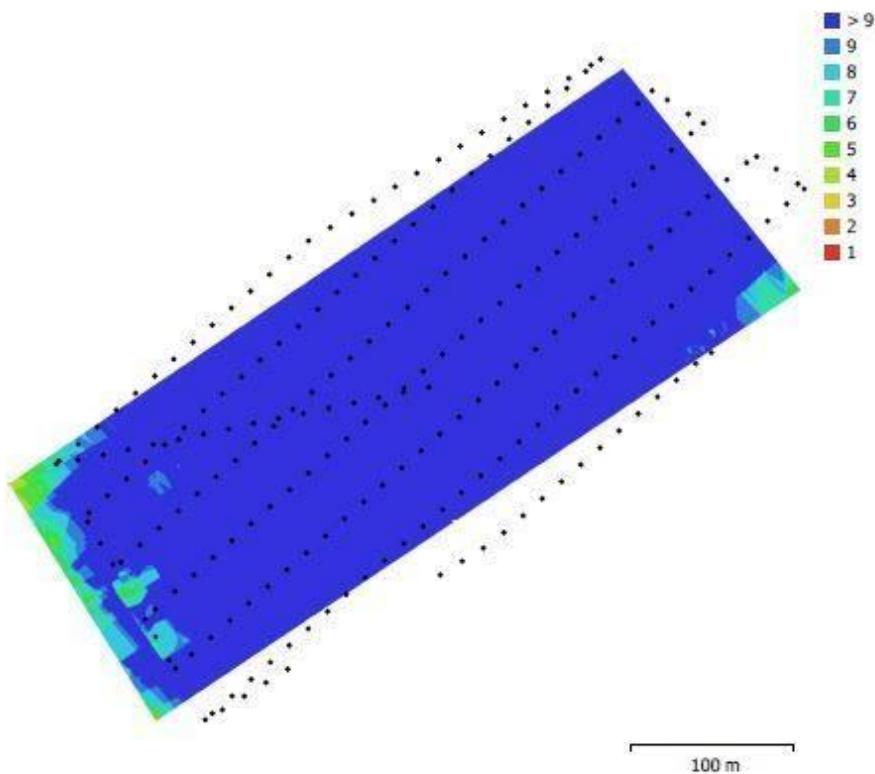


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	224	Camera stations:	224
Flying altitude:	88.3 m	Tie points:	211,407
Ground resolution:	2.18 cm/pix	Projections:	803,580
Coverage area:	0.0813 km ²	Reprojection error:	0.466 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310R (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 µm	No
FC6310R (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 µm	No

Table 1. Cameras.

E2. Sida 1 från NRTK rapporten framställd i Agisoft..

Camera Calibration

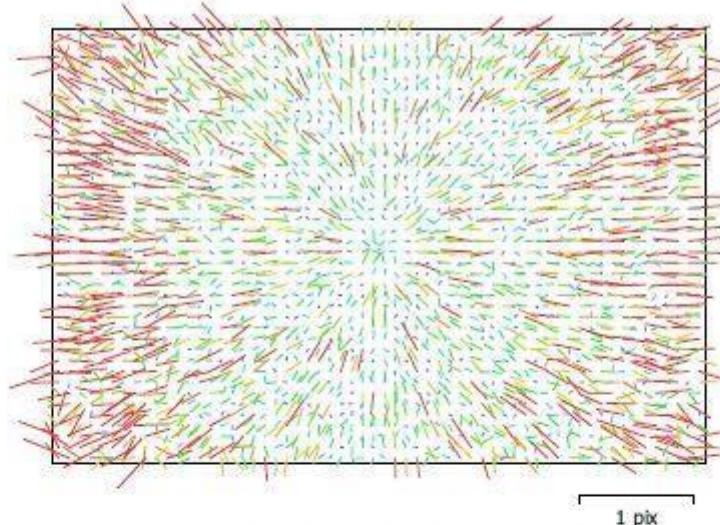


Fig. 2. Image residuals for FC6310R (8.8mm).

FC6310R (8.8mm)

205 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	3689.03	0.25	1.00	0.01	-0.05	-0.28	0.01	-0.99	0.97	-0.95	0.92	0.02	-0.04
Cx	-33.6618	0.091		1.00	-0.02	-0.19	-0.25	-0.01	0.01	-0.01	0.01	0.99	-0.01
Cy	-24.2865	0.082			1.00	0.20	-0.23	0.04	-0.04	0.04	-0.04	-0.01	0.99
B1	0.131908	0.014				1.00	0.01	0.30	-0.30	0.29	-0.27	-0.21	0.20
B2	0.616857	0.0091					1.00	-0.01	0.01	-0.01	0.01	-0.25	-0.23
K1	-0.0312563	0.00055						1.00	-1.00	0.98	-0.96	-0.03	0.03
K2	0.0426507	0.0016							1.00	-0.99	0.98	0.03	-0.03
K3	-0.0406678	0.0021								1.00	-0.99	-0.02	0.03
K4	0.0182532	0.00099									1.00	0.02	-0.03
P1	-0.00265624	1.3e-05										1.00	-0.01
P2	-0.00234262	1.2e-05											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

E3. Sida 2 från NRTK rapporten framställd i Agisoft..

Camera Locations

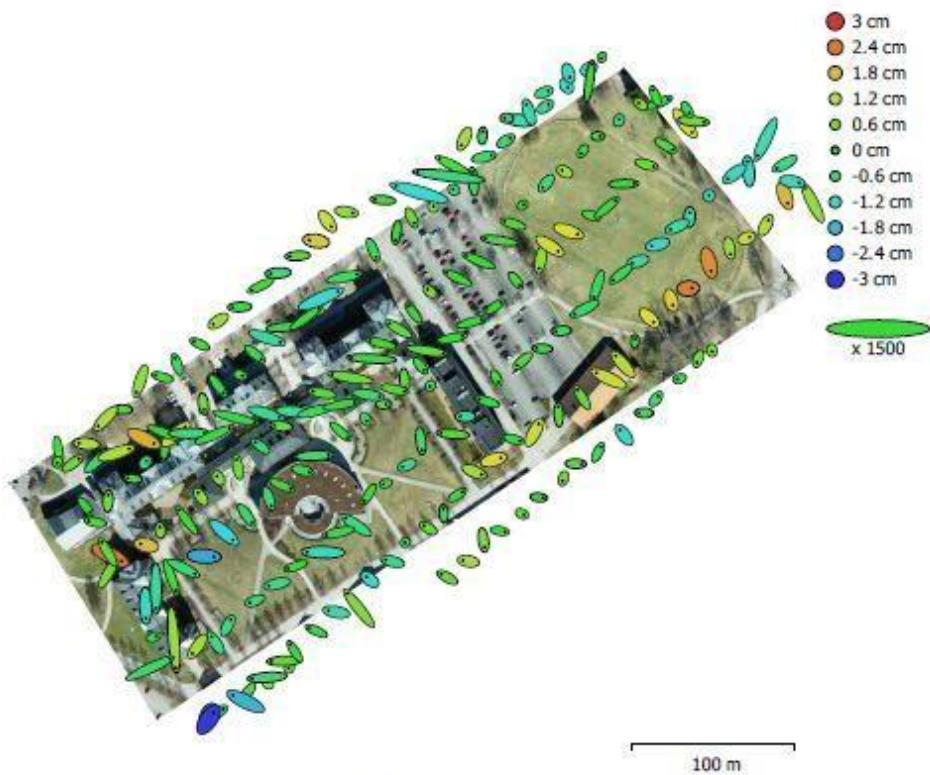


Fig. 4. Camera locations and error estimates.
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
0.649397	0.466513	0.830063	0.799594	1.15254

Table 4. Average camera location error.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

E4. Sida 3 från NRTK rapporten framställd i Agisoft..

Ground Control Points



Fig. 5. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
8	0.6856	1.17689	1.9396	1.36203	2.37005

Table 5. Check points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
CP1	-0.555673	-0.0227931	0.542768	0.777103	0.395 (19)
CP2	0.528007	-1.57533	3.32002	3.71254	0.463 (16)
CP3	0.698674	-1.5963	2.28692	2.87512	0.306 (17)
CP4	0.310534	0.0524032	0.473925	0.569019	0.562 (13)
CP5	-0.877055	-0.461758	0.459612	1.09256	0.528 (15)
CP6	-0.114437	-1.81599	1.04578	2.09871	0.448 (20)
CP7	0.0166079	-1.33499	2.39563	2.74255	0.562 (18)
CP8	1.34374	-0.868441	2.50613	2.9733	0.431 (23)
Total	0.6856	1.17689	1.9396	2.37005	0.463

Table 6. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

E5. Sida 4 från NRTK rapporten framställd i Agisoft..

Digital Elevation Model

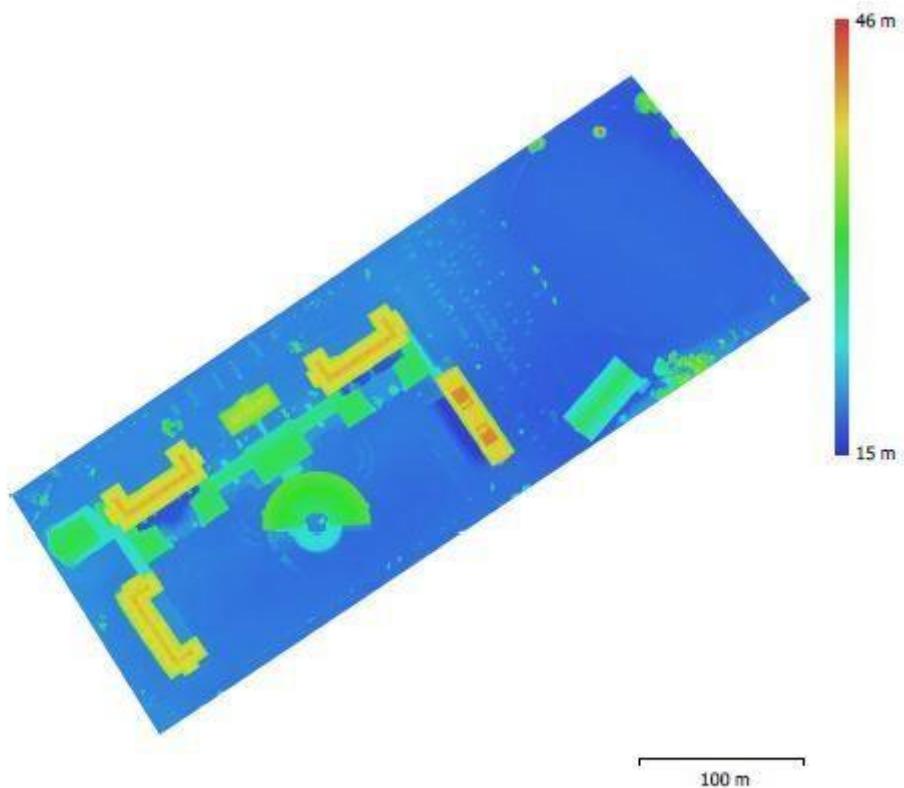


Fig. 6. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 4.36 cm/pix
Point density: 527 points/m²

E6. Sida 5 från NRTK rapporten framställd i Agisoft..

Processing Parameters

General	
Cameras	224
Aligned cameras	224
Markers	8
Shapes	
Polygons	1
Coordinate system	SWEREF99 16 30 + RH2000 height (EPSG::5849)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	211,407 of 228,028
RMS reprojection error	0.204815 (0.466307 pix)
Max reprojection error	0.960272 (21.0691 pix)
Mean key point size	2.16725 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	4.04141
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Fit additional corrections	Yes
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	17 seconds
Depth Maps	
Count	224
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Moderate
Processing time	1 hours 16 minutes
Software version	1.6.2.10247
Dense Point Cloud	
Points	123,937,423
Point colors	3 bands, uint8
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Moderate
Processing time	1 hours 16 minutes
Dense cloud generation parameters	
Processing time	42 minutes 28 seconds
Software version	1.6.2.10247
DEM	
Size	18,718 x 17,221
Coordinate system	SWEREF99 16 30 + RH2000 height (EPSG::5849)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	6 minutes 20 seconds
Software version	1.6.2.10247
Orthomosaic	
Size	26,751 x 24,611
Coordinate system	SWEREF99 16 30 + RH2000 height (EPSG::5849)
Colors	3 bands, uint8

E7. Sida 6 från NRTK rapporten framställd i Agisoft..

Reconstruction parameters

Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Processing time	31 minutes 9 seconds
Software version	1.6.2.10247

System

Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.6.2 build 10247
OS	Windows 64 bit
RAM	31.84 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-8700K CPU @ 3.70GHz
GPU(s)	Quadro P2000

E8. Sida 7 från NRTK rapporten framställd i Agisoft.

Bilaga F

Markstödpunkter och kontrollpunkter inmätta vid två tillfällen.

F1. Inmätning 1 av flygsignaler från klockan 08.00 till 09.00.

Punktnmr	N	E	H
CP1	6 728 644,15	183 789,57	18,344
CP2	6 728 653,48	183 891,05	17,673
CP3	6 728 701,23	183 916,45	17,671
CP4	6 728 733,77	183 760,28	18,845
CP5	6 728 801,97	183 872,78	18,676
CP6	6 728 859,12	183 979,03	17,438
CP7	6 728 849,94	184 050,99	17,667
CP8	6 728 784,91	184 025,77	16,925
GCP1	6 728 593,84	183 813,40	18,275
GCP2	6 728 678,89	183 809,59	18,126
GCP3	6 728 734,41	183 892,29	18,105
GCP4	6 728 681,29	183 945,58	17,87
GCP5	6 728 717,82	183 991,09	17,423
GCP6	6 728 719,63	183 749,86	18,81
GCP7	6 728 767,39	183 817,94	18,822
GCP8	6 728 826,31	183 902,59	19,226
GCP9	6 728 911,65	184 006,89	17,447
GCP10	6 728 813,99	184 113,99	17,45
GCP11	6 728 819,04	184 005,06	17,37

F2. Inmätning av flygsignaler från klockan 10.00 till 11.00.

Punktnmr	N	E	H
CP1	6 728 644,15	183 789,58	18,351
CP2	6 728 653,49	183 891,06	17,684
CP3	6 728 701,23	183 916,45	17,668
CP4	6 728 733,79	183 760,27	18,841
CP5	6 728 801,96	183 872,79	18,688
CP6	6 728 859,11	183 979,05	17,436
CP7	6 728 849,94	184 050,99	17,667
CP8	6 728 784,91	184 025,78	16,932
GCP1	6 728 593,85	183 813,40	18,292
GCP2	6 728 678,88	183 809,60	18,112
GCP3	6 728 734,42	183 892,28	18,078
GCP4	6 728 681,30	183 945,57	17,867
GCP5	6 728 717,80	183 991,09	17,414
GCP6	6 728 719,63	183 749,88	18,824
GCP7	6 728 767,39	183 817,96	18,806
GCP8	6 728 826,30	183 902,59	19,211
GCP9	6 728 911,63	184 006,90	17,445
GCP10	6 728 814,00	184 113,99	17,468
GCP11	6 728 819,02	184 005,06	17,374

Bilaga G

Exempelbit av "Timestamp.MRK" som genererades från respektive flygning som bland annat visar bildernas standardosäkerhet för avvikelse i plan och höjd samt om flygningen skede med eller utan RTK ("50,Q" syftar på att NRTK var kopplad till UAVn med fixlösning och "16,Q" syftar på att UAVn får en signal av sin position från en mottagare vilket är den inbyggda GNSS.mottagaren i UAVn)(Hämtad från <https://shop.quadrocopter.com/assets/images/P4RwhitePaperV2.pdf.>)

Bildnr	NRTK				No-RTK			
	ΔN	ΔE	ΔH	RTK status	ΔN	ΔE	ΔH	RTK status
1	0.009184	0.013405	0.021780	50,Q	0.911113	1.683217	3.087752	16,Q
2	0.008951	0.013124	0.021525	50,Q	0.902882	1.643301	3.010540	16,Q
3	0.009129	0.013274	0.021739	50,Q	0.898964	1.648640	3.008177	16,Q
4	0.008872	0.012973	0.021330	50,Q	0.893347	1.636263	2.984547	16,Q
5	0.009027	0.013110	0.021526	50,Q	0.892097	1.631071	2.973062	16,Q
6	0.008848	0.012991	0.021244	50,Q	0.892353	1.672369	3.021959	16,Q
7	0.008574	0.012690	0.020958	50,Q	0.877600	1.623679	2.989015	16,Q
8	0.008828	0.012912	0.021220	50,Q	0.890462	1.665043	2.983592	16,Q
9	0.008553	0.012744	0.020932	50,Q	0.890380	1.583936	2.850387	16,Q
10	0.008832	0.013048	0.021364	50,Q	0.891119	1.591221	2.861978	16,Q
11	0.008593	0.012951	0.021191	50,Q	0.875461	1.539828	2.829065	16,Q
12	0.008826	0.013133	0.021472	50,Q	0.879767	1.569133	2.866402	16,Q
13	0.008532	0.012810	0.021140	50,Q	0.874947	1.545439	2.804949	16,Q
14	0.008370	0.012682	0.020929	50,Q	0.887885	1.553981	2.781981	16,Q
15	0.008996	0.013256	0.021542	50,Q	0.887523	1.520740	2.728442	16,Q
16	0.008827	0.014128	0.023068	50,Q	0.871530	1.512066	2.734860	16,Q
17	0.008575	0.013869	0.022860	50,Q	0.876875	1.512076	2.734555	16,Q
18	0.008851	0.014089	0.023141	50,Q	0.885217	1.554957	2.746137	16,Q
19	0.009397	0.014596	0.023707	50,Q	0.885596	1.505059	2.695638	16,Q

G1. Information framtagen från Timestamp - filen.

Bilaga H

Flödesschema som beskriver databearbetningsprocessen fram till skapandet av ortofoto.

