

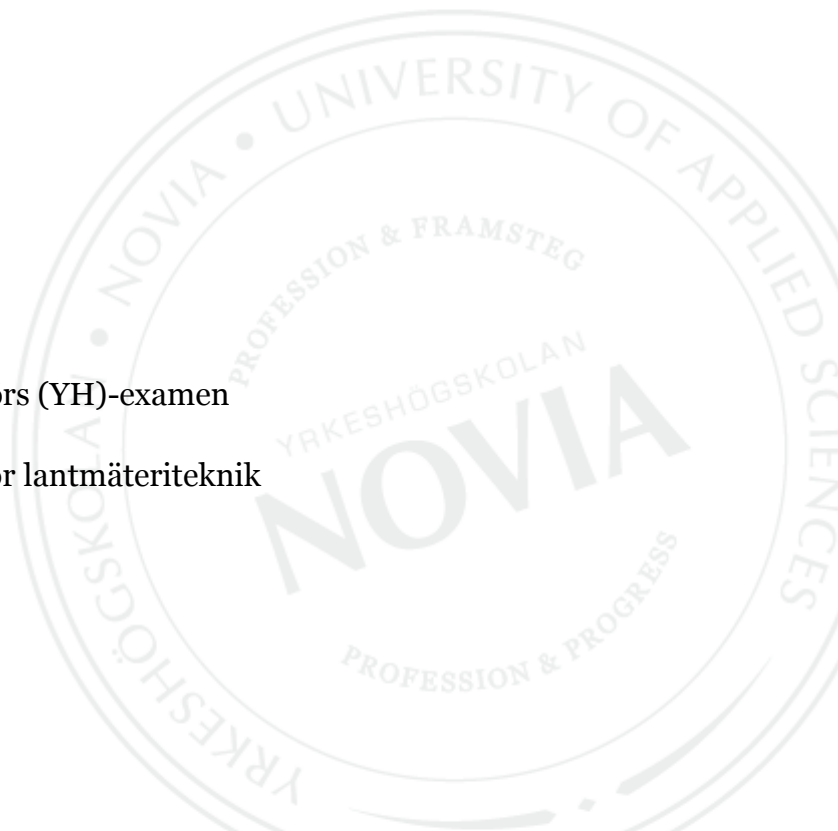
Noggrannhetsanalys för UAV- flygfotografering

Robert Kvist

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen

Utbildningsprogrammet för lantmäteriteknik

Vasa 2015



EXAMENSARBETE

Författare: Robert Kvist

Utbildningsprogram och ort: Lantmäteriteknik, Vasa

Handledare: Sem Timmerbacka

Titel: *Noggrannhetsanalys för UAV-flygfotografering*

Datum 29.4.2015

Sidantal 63

Bilagor 1

Abstrakt

I detta examensarbete undersöktes det hur bra noggrannhet man får på en ytmodell gjort med hjälp av UAV. Beställare var PIEnearing OY. I undersökningen togs det också reda på hur antalet signaler påverkar noggrannheten på modellen. Man har även jämfört noggrannheten med flyglaserskanningsdata.

Till examensarbetet utfördes en UAV-flygfotografering över Stenhaga i Vasa. Med hjälp av programmen RapidStation, RapidTerrain och PhotoScan skapades ytmodeller. Med programmen fick man fram noggrannheten för signalerna och modellerna. Det gjordes även en undersökning hur tiden påverkar noggrannheten för GNSS.

Som resultat fick man en jämförelse mellan noggrannheten för flygburen laserskanning och UAV-flygfotografering, hur antalet signaler påverkade ytmodellen samt hur tiden påverkar noggrannheten för en GNSS-mottagare.

Språk: svenska

Nyckelord: UAV, LIDAR, GNSS

OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Robert Kvist

Koulutusohjelma ja paikkakunta: Maanmittaustekniikka, Vaasa

Ohjaajat: Sem Timmerbacka

Nimike; *Tarkkuusanalyysi UAV-ilmalentokuvaukselle*

Päivämäärä 29.4.2015

Sivumäärä 63

Liitteet 1

Tiivistelmä

Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin kuinka hyvä tarkkuus saadaan pintamallille, joka on tehty UAV:n avulla. Asiakas oli PIEngineering OY. Tutkimuksessa otettiin myös selvää miten signaalien määrä vaikuttaa mallin tarkkuuteen. Verrattiin myös tarkkuutta lentolaserkeilausdatan kanssa.

Opinnäytetyöhön tehtiin UAV-lentoilmakuvauksen Kivihaan yli Vaasassa. Luotiin malleja RapidStation-, RapidTerrain -ja PhotoScan -ohjelmien avulla. Ohjelmilla saatiin esiin signaalien ja mallien tarkkuuden. Tutkittiin myös miten aika vaikuttaa GNSS:n tarkkuuteen.

Tulokseksi saatiin vertailun lentolaserkeilauksen ja UAV- ilmakuvausten tarkkuuden välillä, miten signaalien lukumäärä vaikutti pintamalliin sekä kuinka aika vaikuttaa GNSS-vastanottimen tarkkuuteen.

Kieli: ruotsi

Avainsanat: UAV, LIDAR, GNSS

BACHELOR'S THESIS

Author: Robert Kvist

Degree Programme: Land Surveying, Vaasa

Supervisors: Sem Timmerbacka

Title: *Accuracy Analysis for UAV Aerial Photography*

Date 29.4.2015

Number of pages 63

Appendices 1

Summary

In this thesis it was investigated how good an accuracy one can get on a surface model made with the help of UAV aerial photography. The client was PIEnengineering OY. The survey also clarifies how the number of signals affects the accuracy of the model. It also compares the accuracy with the accuracy of flight laser scanning data.

A UAV aerial photography of Stenhaga in Vaasa was done as a part of this thesis work. With the help of the programs RapidStation, RapidTerrain and PhotoScan surface models were created. With the help of the programs you got the accuracy of the signals and models. The work also included a study of how time affects the accuracy of GNSS.

The result was a comparison of the accuracy of airborne scanning and UAV aerial photography and a clarification of how the number of signals affected the surface model and how time affects the accuracy of a GNSS receiver.

Language: Swedish

Key words: UAV, LIDAR, GNSS

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
2	Syfte	1
3	Fotogrammetri	2
3.1	Kameran.....	3
3.2	Digitalkamera.....	4
4	Kameraparametrar	6
4.1	Inre och yttre orientering	6
4.2	Flygbilden.....	7
4.3	Radiell höjddeplacering	8
4.4	Fotografisk bildkvalitet.....	9
5	UAV-flygfotografering	11
5.1	UAV-modeller	12
5.2	UAV intresset växer	14
6	Resultat av en flygfotografering	15
6.1	Ortofoto	15
6.2	Digital surface model	16
7	Felkällor	17
7.1	Mätningar	17
7.2	Tidpunkten	18
7.3	Skuggor.....	18
8	GNSS	19

8.1	Positionsbestämning.....	19
8.2	Absolut positionsbestämning.....	19
8.3	Differential positionsbestämning	20
8.4	Relativ positionsbestämning	20
8.5	RTK.....	21
8.5.1	Nätverks-RTK.....	21
8.5.2	VRS	23
8.6	Felkällor vid GNSS-mätning	24
9	Flygburen laserskanning.....	26
9.1	Skannerfunktion	27
9.2	Markmodellering och markpunkter	29
10	UAV-flygfotograferingen.....	32
11	Signalnoggrannhet	35
11.1	Beräkning.....	36
11.2	Sammanfattning av signaleringen.....	42
12	Noggrannhetsanalys för ytmodeller gjorda med flygfotografier och LIDAR-data	44
12.1	Noggrannhetsanalys för UAV-flygfotograferingen	44
12.1.1	Sammanfattning av noggrannhetsanalysen för UAV- flygfotograferingen.....	48
12.2	Noggrannhetsanalys för flyglaserskanningen	49
12.2.1	Sammanfattning av noggrannhetsanalysen för flyglaserskanningen..	50
12.3	Jämförelse	50

13	GNSS-undersökning.....	52
13.1	Beräkning.....	52
13.2	Sammanfattning av GNSS-undersökningen.....	54
14	Slutdiskussion.....	56
14.1	Allmänt.....	56
14.2	Vidare forskning.....	57
14.3	Personliga reflektioner.....	58
15	Källförteckning.....	59
15.1	Figurkällor.....	62

1 Inledning

Idag kan man göra ytmodeller med hjälp av flygburen laserskanning och UAV-flygfotografering. I flygburen laserskanning skapas punkter i punktmoln och i UAV-flygfotografering ska man utföra fotogrammetriska mätningar för att få ett punktmoln. Båda har sina för- och nackdelar, men hur bra noggrannhet har de?

För att få mätt noggrannheten ska mätningar utföras i terrängen. Dessa mätningar kan utföras med en GNSS-mottagare. Också GNSS-mottagaren har noggrannhetsfaktorer t.ex. hur lång ska en observation vara för att få bra noggrannhet?

Dessa är frågeställningar som kommer att besvaras i detta examensarbete. Uppdragsgivare är PIEnering Oy och därifrån kommer Mikael Holm att hjälpa mig. Data kommer att fås genom en UAV-flygfotografering av Ilkka Valli från UAS Kuvaukset. Laserdata fås av Vasa stad och GNSS-mottagaren lånas från skolan.

2 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att undersöka och jämföra noggrannheten mellan UAV-flygfotografering och flygburen laserskanning. Jag kommer även undersöka hur mängden stödpunkter, så kallade signaler, påverkar noggrannheten för ytmodellen. Dessutom kommer jag att undersöka vad som händer om man har signaler bara placerade inom ett visst område och hur det påverkar noggrannheten på andra ställen inom det flygfotograferade området.

Inom det flygfotograferade och flyglaserskannade området ska jag mäta noggrannheten i höjd och med hjälp av profiler som mäts med takymeter. Jag ska även undersöka hur noggrannheten ändras beroende på tiden man står vid en punkt med en GNSS-mottagare.

3 Fotogrammetri

Begreppet fotogrammetri betyder ”mätning i fotografisk bild” eller ”bildmätning”. Med fotogrammetri går det bestämma form, läge och storlek på objekt i fotografier. Man kan utföra fotogrammetrisk mätning i ett enskilt foto, i ett par foton eller ett block av fotografier. (Lantmäteriet m.fl., 2013, s. 181)

Den grundläggande principen för fotogrammetri är triangulering. Triangulering uppstår genom att ta foton från minst två platser och då bildas strålar från varje kameraposition till punkter i terrängen. Av strålarna kan man beräkna 3-dimensionella koordinater för varje punkt. Det är också genom triangulering som våra ögon mäter avstånd. (Geodetic.com, u.å)

Fotografering omvandlar den verkliga 3-dimensionella världen till platta 2-dimensionella bilder. Kameran är verktyget som används för denna omvandling. Tyvärr förloras information i själva omvandlingen och det är främst höjden som försvinner. Med fotogrammetri konverteras de platta 2-dimensionella bilderna tillbaka till den riktiga 3-dimensionella världen. Men eftersom information går förlorad i den fotografiska processen kan vi inte rekonstruera den 3-dimensionella världen med endast ett fotografi.

Det behövs minst två fotografier för att rekonstruera en 3-dimensionell modell. Om allt i processandet skulle gå perfekt kan två fotografier vara mer än tillräckligt. Men tyvärr behövs det alltid fler fotografier för att få ett bra resultat.

Fotogrammetri använder den grundläggande principen för triangulering, det vill säga korsande linjer som används för att beräkna en punkt i alla tre dimensioner. Men till skillnad från takymetrar, kan man med hjälp av fotogrammetri mäta flera punkter samtidigt. För att triangulera fler punkter måste man känna till kamerans orientering, det vill säga position och vinklar. Med hjälp av orientering fås också XYZ-koordinaterna för varje punkt.

Den vanligaste tillämpningen av fotogrammetri är att framställa en digital kartdatabas och detta görs med hjälp av flygfotogrammetri. Dessa digitala kartdatabaser kan användas till underlag för infrastrukturplanering eller kommunal detaljplanering och även till allmänna kartor eller orienteringskartor. (Lantmäteriet m.fl., 2013, s. 182)

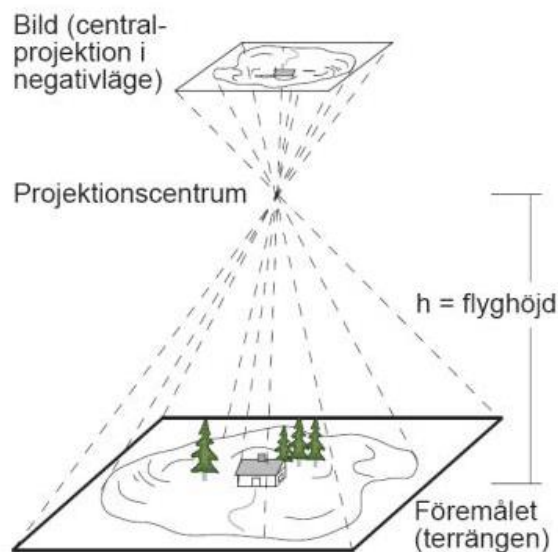
3.1 Kameran

En bild uppstår då ljusstrålar från ett objekt projiceras genom kamerans objektiv till ett bildplan. En digital sensor registrerar sedan ljusstrålarna och den digitala bildsensorn skapar en digital bild i form av en bildmatris. (Lantmäteriet m.fl.,2013, s. 183–184)

Funktionen för kameran är att projicera en skarp bild av det objekt man vill avbilda på ett bildplan. Linserna i kamerans objektiv projicerar ljusstrålarna från objektet till skarpa bildpunkter på bildplanet. Med en bländare kan objektivöppningens storlek anpassas enligt ljusförhållanden. Exponeringen sköts med hjälp av en slutare, som gör att objektivet öppnas för en vald tidsperiod. (Lantmäteriet m.fl., 2013, s. 183)

När flygfotografering utförs får alltid fotografiet en skalfaktor. Skalfaktorn för ett fotografi fås genom att dividera avståndet till objektet med kamerans djup, det vill säga kamerakonstanten. Skalan betecknas sedan med 1:S (Skalfaktorn), till exempel: 1:2 000 (Nämnden för skoglig fjärranalys, 1993, s. 17)

En annan faktor som bör beaktas är centralprojektion (Figur 1). Bildens och det avbildade objektets former utgörs av en centralprojektion. Centralprojektionen är skapad av bilden som kameran har tagit. Ljusstrålarna som kommer från varje punkt i landskapet far igenom kamerans objektiv, det vill säga projektionscentrumet, till detektorn. Avståndet mellan projektionscentrum och bildcentrum kallas kamerakonstanten. Kamerakonstanten måste vara känd vid beräkning. (Nordkvist & Olsson, 2012, s. 35; Nämnden för skoglig fjärranalys, 1993, s.17–18)



Figur 1. En bild på centralprojektion. Projektionscentrumet är objektivet på kameran.

3.2 Digitalkamera

Den digitala kameran har till skillnad från en filmbaserad kamera en platta som är täckt av ljussensorer. Sensorerna kallas även för pixlar. Pixlar kommer från engelskans picture element och är måttet på kvaliteten, det vill säga upplösningen. Ju fler sensorer desto finare detaljer syns på bilden. Sensorerna i kameran är så många att de mäts i megapixel. (pagina.se, u.å)

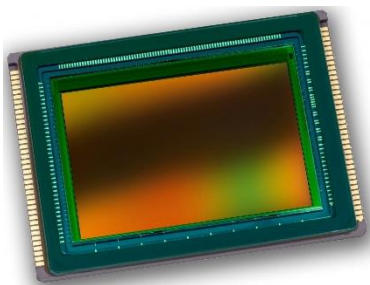
Även om pixlar är måttet på kvalitet betyder inte alltid många pixlar bra kvalitet. Kvaliteten på slutresultatet beror på komponenterna i hela systemet. T.ex. kvaliteten på CCD/CMOS-sensorn. (Mikael Holm, personlig kommunikation, 23.3.2015)

Varje pixel får antingen ett värde för rött, grönt eller blått ljus. Varje gång en bild tas registrerar kameran mängden färg som varje pixel får. Kamerans mikroprocessor sparar sedan all information till en digital fil, som sedan sparas på ett minne i kameran. (pagina.se, u.å)

I digitala kameror kan det antingen finnas en CCD (Charge Coupled Device) eller en CMOS (Complementary Metal Oxide) bildsensor. Båda typerna omvandlar ljus till elektroniska laddningar, för att sedan bearbeta dessa till elektroniska signaler.

I CCD-sensorn registrerar sensorn ljusstyrkan för varje pixel och sedan skickas en analog signal från sensorn till ett utomstående signalbehandlingssystem. (teledynedalsa.com, u.å)

I CMOS-sensorn (Figur 2) har varje pixel en egen omvandlare som ger högre hastighet för överföring av signalen till bildprocessorn. Resultatet blir att man slipper onödig belastning på kameran. Detta gör också att det blir en bättre kvalitet och upplösning. (Canon.se, u.å)



Figur 2. En CMOS-sensor.

4 Kameraparametrar

När en flygbild tas förbinds varje punkt på marken med motsvarande punkt i bildplanet. Detta sker via en ljusstråle genom som går objektivets projektionscentrum. Alla ljusstrålar tillsammans kommer sedan att kallas en strålkärve. Strålkärven kan delas in i två delar: en inre orientering, i kameran, och en yttre orientering, utanför kameran. Den yttre orienteringen kan konstrueras med hjälp av den inre orienteringen. Då måste kamerans inre geometri vara känd, det vill säga att man har en kalibrerad kamera. Senare i beräkningen med beräkningsprogram går det att utföra en självkalibrering för att förbättra kalibreringen. (Lantmäteriet m.fl., 2013, s. 193)

4.1 Inre och yttre orientering

I *Geodetisk och fotogrammetrisk mättings-och beräkningsteknik* (2014) av Lantmäteriet m.fl. står det om inre och yttre orientering: ”Mätkamerans (och därmed mätbildens) inre och yttre orientering är de grundläggande data, som beskriver kamerans inre geometri och dess läge och riktning när bilden togs.

Den inre orienteringen beskriver bildplanets läge i förhållande till projektionscentrum, medan den yttre orienteringen beskriver kamerans läge i ett yttre koordinatsystem och kameraaxelns riktning i detta system. Tillsammans beskriver de relationen mellan bilden och objektet.”

Den inre orienteringen innebär alltså att man rekonstruerar de yttre strålkärvarna inne i kameran. Detta görs matematiskt med hjälp av kamerakonstanten, bildhuvudpunktens läge (samma som bildcentrum) och den radiella felteckningen. Den radiella felteckningen innebär måttet på kamerans avvikning från den perfekta centralprojektionen.

Den yttre orienteringen beskriver kamerans riktning och läge i fotograferingsögonblicket. Läget utgörs av koordinater (X,Y och Z) och riktningen med tre vinklar (ω , ϕ och κ). Den yttre orienteringen kan bestämmas med relativ god noggrannhet redan vid flygningen om farkosten förses med en GNSS-mottagare, som bestämmer läget, och tre accelerometrar, som bestämmer vinklarna. Men detta räcker inte till fotogrammetrisk stereoskopisk mätning. (Lantmäteriet m.fl., 2013, s. 194,196-197)

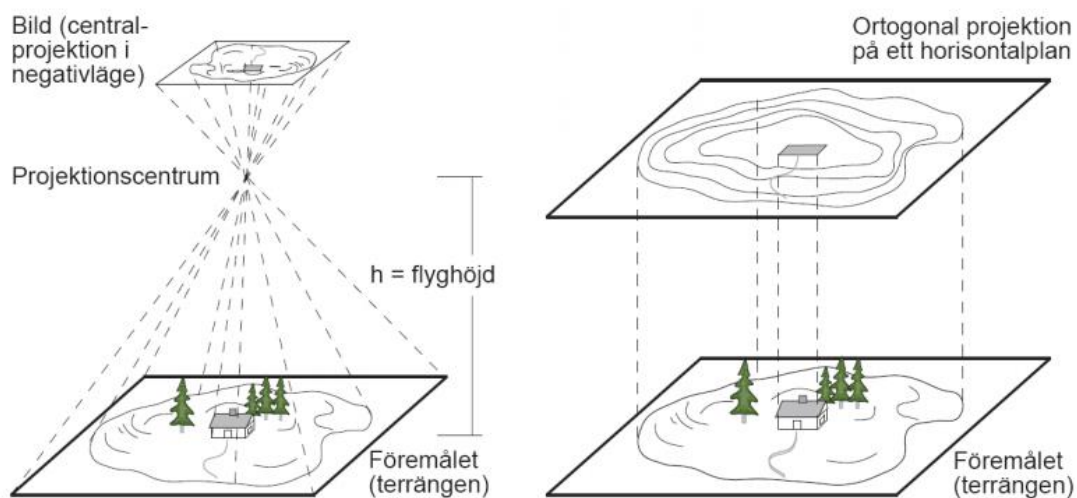
4.2 Flygbilden

En karta är en ortogonal projektion (Figur 3) av terrängen medan flygbilden är en centralprojektion av terrängen, det vill säga ljusstrålar från terrängen går genom objektivet i kameran. I centralprojektionerna där det finns höjdskillnader förvanskas arealer, vinklar och längder.

På grund av olikheter i terrängen får en flygbild skalvariationer på olika objekt på olika höjder. Det som kommer närmare kameran får alltså större skala. Detta innebär att en flygbild inte har någon enhetlig skala. Bildskalan är därför ett medelskala i bilden och detta förorsakar lägesförskjutningar i bilden av terrängobjekt.

Det som också kan orsaka skalvariationer är om kameraaxelns lutning, även kallat bildlutning, inte är lodrät. Om man har skalvariationer som orsakas av bildlutning kan det rättas till genom rektifiering. (Nämnden för skoglig fjärranalys, 1993, s. 51-52, 60; Lantmäteriet m.fl., 2013, s. 188)

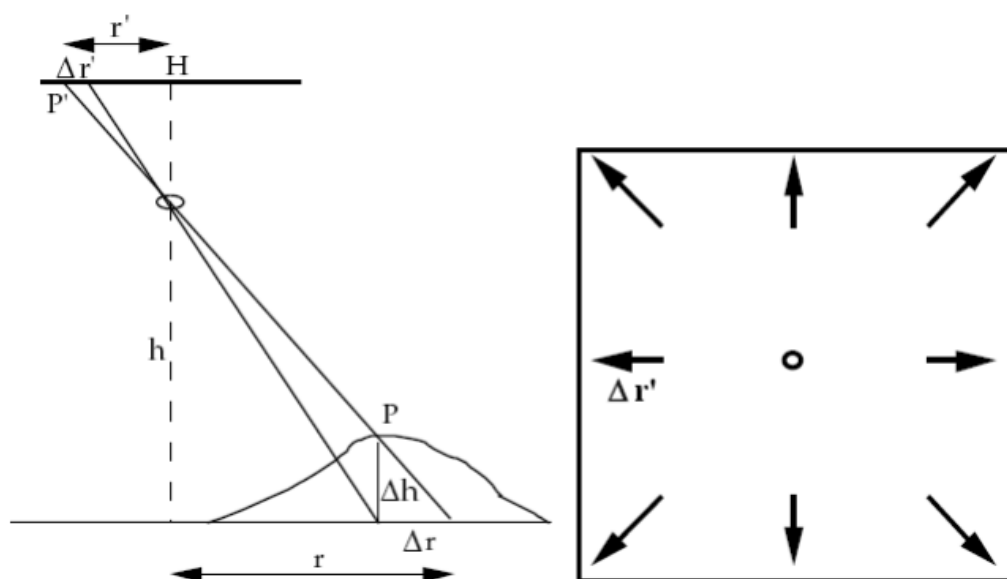
Rektifiering innebär att man tar en kartbild och anpassar den mot en karta, detta gör att den får samma skala. Rektifiering går ut på att man passar ihop punkter som är på samma plats i båda fotografierna. Detta kan jämföras med att man tänjer en gummiduk så att den passar in där den ska. (Gisella.se, u.å.) Men inom fotogrammetri görs rektifieringen genom ortorektifiering, där man använder sig av en höjdmodell för rektifieringen. (Mikael Holm, personlig kommunikation, 2.4.2015)



Figur 3 Här syns skillnaden mellan centralprojektion och ortogonalprojektion. Till kartor vill man ha ortogonalprojektion.

4.3 Radiell höjddeplacering

Radiell höjddeplacering (Figur 4) betyder att olikheter i terrängen skapar skalvariationer i flygbilden. Det gör även att avbildade objekt i flygbilden kommer att förskjutas från den plats de skulle ha haft om terrängen varit plan. Flyghöjden och bildpunktens avstånd till bildcentrum påverkar deplaceringens storlek. Högt liggande terrängpunkter så som träd, bergshöjder förskjuts mot bildens kanter. Lägre punkter som gruvhål och raviner förskjuts mot mitten av bilden. Höjddeplacering är en förutsättning för stereoskopisk höjdmätning och gör stereobetraktning möjlig. (Lantmäteriet m.fl., 2013, s. 189)



Figur 4. Höjddeplacering. På den högra bilden visas att deplaceringen blir större ju längre ut på bilden ett objekt är. Den vänstra bilden visar att punkten P flyttas avståndet Δr på grund av centralprojektion.

4.4 Fotografisk bildkvalitet

Det finns olika huvudfaktorer som påverkar den slutliga flygbildens kvalitet. Dessa faktorer är:

- filtrering och dis
- bildrörelse och exponering
- kamera
- landskap och belysning.

Att kunna beskriva bildkvalitet är viktigt, eftersom det ger en uppfattning om bildernas användbarhet. Det finns två slag av landskapsbelysning: direkt och diffus. Direkt innebär solbelysning och diffus innebär himmelsljus och dis. Vid extremt diffust ljus sker flygfotograferingen under ett molntäcke som ger helt skuggfria bilder. Direkt ljus ger i sin tur högre detaljkontraster som underlättar upplösningen av landskapsdetaljer. Skuggor kan

ge värdefull information, men skuggor försämrar även tolkning av skogsmark och tät bebyggelse i och med att skuggans längd beror på solhöjden.

För att få ett så bra resultat som möjligt när man flygfotograferar tar man oftast flera flygbilder som överlappar varandra. Då flygbilderna överlappas kommer bilderna att ha delvis samma objekt men med i olika ljus i bilderna. Detta beror på att objekten antingen kommer i med- eller sido- motljusposition eftersom objekten kommer att gestaltas i olika vinklar. I medljuspositionen syns inte skuggan på grund av att centralprojektionens avskärmningseffekt och objektet är ljust. Medan i motljuspositionen syns skuggan och objektet är inte solbelyst. (Nämnden för skoglig fjärranalys, 1993, s. 43-44, 154, 157)

5 UAV-flygfotografering

UAV är en förkortning av *unmanned aerial vehicle*, som kan översättas med obemannat flygande fordon på svenska. UAV kan styras manuellt med en fjärrkontroll eller automatiskt med autopilot och med hjälp av förprogrammerade flygrutter. Till först utvecklades drönarna till militära ändamål, men nu har det gått mer över till karteringar av olika slag. (The UAV.com, etn.se, 2013)

För att fotogrammetrisk mätning och kartframställning ska lyckas måste varje landskapsdetalj finnas med på åtminstone två bilder. Då går det att rekonstruera landskapet med hjälp av stereoskopiska modeller.

För att få noggrann georeferering av området som fotograferas krävs inmätta signaler (Figur 5). Signalernas utseende, antal och storlek är avgörande för kvaliteten på slutprodukten. (Mårtensson, Reshetyuk, 2014, s. 8)



Figur 5. Signalerna kan se olika ut i storlek och utseende. Här är ett exempel från en flygning i Sverige.

Flygningen utförs oftast i raka flygstråk och bilderna tas med intervall så att dessa sedan överlappar varandra. Teoretiskt kan man använda 50 % överlappning, men man använder vanligen 70 % överlappning eller mer längs flygstråken. Mellan flygstråken ska det vara 30 %, helst mer.

Eftersom UAV-bilder ofta tas med en kompaktkamera som inte har lika bra inre orientering och radiometrisk kvalitet som digitala fotogrammetriska flygmätkameror, ska överlappningen vara större, speciellt mellan stråken.

Detta för att t.ex. kunna skapa ett punktmoln. (Nämnden för skoglig fjärranalys, 1993, s.22, 37; Mårtensson, Reshetyuk, 2014, s.7) Ett punktmoln är en massa punkter på objekten man fotograferat, där alla punkter är inmätta i tredimensioner. Ett punktmoln kan vara fäst till ett koordinatsystem eller vara helt fritt. (Mättjänst.se, u.å.)

Man strävar till att få traditionella lodbilder med vanligtvis högst 5 gons lutning. Men med UAV blir det ofta större lutningsvinklar. Därför är det bättre med mer överlappning. Genom parvisa bilder kan hela stråket utvärderas stereoskopiskt. När det bestäms vilken överlappningsgrad man ska använda finns det vissa faktorer som beaktas:

- UAV-farkostens hastighet
- flyghöjd
- terrängens topografi
- objektivets öppningsvinkel.

(Nämnden för skoglig fjärranalys, 1993; s. 22, 37; Mikael Holm, personlig kommunikation, 23.3.2015)

5.1 UAV-modeller

UAV bygger på en obemannad farkost som har en digitalkamera fäst på själva farkosten. Det kan vara ett modellflygplan eller en modellhelikopter, t.ex. en multikopter. Till kategorin multikopter hör quadrokopter, med fyra rotoror, och octokopter, med åtta rotoror. UAV-flygplanen startas antingen från en ramp eller genom att planet kastas i luften (Figur 6). Planen behöver en öppen plats för startbana och landningsbana eftersom den behöver utrymme för att lyfta och för landningen.



Figur 6. En Gatewing UAV på en startramp.

En quadrokopter är uppbyggd som ett X med sammanlagt fyra rotorerna, en på varje ände (Figur 7). Quadrokoptern fungerar som så att två rotorerna snurrar motsols och de två andra medsols. Med hjälp av olika hastigheter på de olika rotorerna bestäms det åt vilket håll multikoptern ska flyga. Quadrokoptern kan i princip flyga åt vilket håll som helst och de behöver inte så stor yta för att lyfta och landa. (the rchelicopterfun.com, u.å., Mårtensson, Reshetyuk, s. 7, 2014)



Figur 7. Quadrokopter med kamera.

Det finns också multikoptrar som har åtta rotorerna, octokoptrar. Octokoptrarna är effektivare, enklare och stabilare att flyga än multikoptern med fyra rotorerna. På samma sätt som den med

fyra rotorer så svänger den med åtta rotorer genom att öka hastigheten på de olika rotorerna. (Wowhobbies.com, u.å)

5.2 UAV intresset växer

UAV:s popularitet har ökat ordentligt i takt med att de utvecklas. Trafiksäkerhetsverket Trafi planerar nya regler på obemannade luftfarkoster. Orsaken till de nya reglerna är att obemannade farkoster har blivit mer populära. Den 14.11.2014 skrev YLE att Trafi planerade släppa de nya reglerna i slutet av 2014, men ännu har de inte kommit (13.1.2015).

Meningen med de nya reglerna är att säkerheten ska bli bättre. Med hjälp av de nya reglerna skyddar man även den tredje parten, det vill säga människorna på marken samt deras egendom. Man försöker trots detta att hålla bort byråkratin så mycket som möjligt. Troligtvis kommer man inte att behöva ha ett tillstånd för att flyga, men om farkosten är tyngre än 25 kilogram krävs tillstånd. (Hallamaa, 2014)

I USA har man haft problem med UAVn vid flygplatser. Från juni 2014 till november 2014 har de haft 25 fall där en obemannad farkost har bara varit några meter ifrån ett flygplan som varit i luften. Fast UAV är i diameter 0,5 – 1,5 meter skulle det kunna skapa en katastrof. I USA håller man, som i Finland på att göra nya regler för obemannade farkoster. (Kokkonen, 2014)

I Sverige har man även upplevt små katastrofer på grund av UAV farkoster. På Bromma flygplats blev man tvungen att stänga kontrollzonen en stund efter att de hade fått ett larm om en obemannad farkost. Den obemannade farkosten skulle dokumentera bygget av en trafikled. Totalt 300 – 400 passagerare drabbade av förseningar. (Svd.se)

6 Resultat av en flygfotografering

Resultatet av en flygfotografering fås genom att processa all data efter att man har fått in alla flygfotografier. Med data menas flygfotografier och koordinater för signalerna. Det finns olika saker man kan göra med data men jag nämner två metoder. Dessa två metoder är ortofoto och digital surface model (DSM)

6.1 Ortofoto

Ett ortofoto är en flygbild som har ”omändrats” från en centralprojektion till en ortogonalprojektion (Figur 8). Markytans radiella höjddeplaceringar har eliminerats. När man framställer ett ortofoto utgår man från en digital höjdmodell och en digital flygbild. Ortofotot genereras sedan med hjälp av en digital arbetsstation.

Ortofotot får samma konstruktion som flygbilden, det vill säga en matris av bildelement med färger. Skillnaden mellan flygbilden och ortofotot är att objekten ligger kartmässigt på sina rätta ställen. När ortofotot skapas utgår man från en tom bildmatris, det vill säga ett framtida ortofoto utan bilddetaljer. Sedan tilldelas bildelementen färger enligt objekt detaljens markkoordinater. Detta blir då en ny flygbild med homogen skala och med ortogonalprojektion, alltså ett ortofoto.

Höjdkoordinaten fås av en digital terrängmodell av landskapet. Terrängmodellen måste ha blivit mätt in tidigare med flygburen laserskanning eller fotogrammetriska eller med geodetiska metoder. Ortofoton gjorda på flygfotografier tagna på lägre höjd kräver mer detaljerade terrängmodeller, annars blir den geometriska kvaliteten dålig.

Ortofotots geometriska kvalitet beror på noggrannheten i ursprungsfotots yttre orientering och den digitala terrängmodellens täthet och noggrannhet. (Lantmäteriet m.fl., 2013, s. 201-203; Nämnden för skoglig fjärranalys, 1993, s. 127)

Ett ortofoto gjort med en mycket noggrann och tät DSM kallas för True Ortho Photo. I dessa true ortho photon kan man inte alls se väggar på husen. DSM är förkortning på Digital Surface Model. (Mikael Holm, personlig kommunikation, 23.3.2015)



Figur 8. Bilden till vänster ett flygfoto och bilden till höger är ett ortofoto. Det är ett berg uppe i högre hörnet. Höjddplaceringen i bilden har blivit korrigerat i ortofotot.

6.2 Digital surface model

En digital surface model (DSM) är en ytmodell som till skillnad från en terrängmodell inkluderar alla objekt som syns t.ex. hus och vegetation.(terratec.se, u.å.). DSM är ett tredimensionellt punktmoln med X,Y och Z-koordinater. Punktmolnet fås genom fotogrammetriska metoder från flygbilderna. DSM kan fås i olika noggrannhetsklasser där bland annat tätheten är en faktor. (Åkerholm, 2012, s. 11, Mikael Holm, personlig kommunikation, 23.3.2015)

En DSM kan också fås i rasterform och då har varje punkt ett konstant avstånd mellan varje XY-punkt till skillnad från punktmolnet. Varje XY-punkt har ett exakt Z-värde. (Mikael Holm, personlig kommunikation, 23.3.2015)

7 Felkällor

Vid mätningar och efterberäkningar uppstår det ofta ett antal felkällor och faktorer som påverkar slutresultatet. I detta kapitel beskrivs några av dem. Dessa är mätfel, tidpunkt och skuggor.

7.1 Mätningar

Alla mätresultat måste alltid beskrivas med en specifikation av mätningarnas kvalitet. Med kvaliteten avses fullständighet, noggrannhet och riktighet. Fullständighet innebär att allt ska finnas med. Till noggrannhet hör tillförlitlighet (inga grova fel), modellriktighet (inga systematiska avvikelser) och mätosäkerhet (beskrivning av t.ex. standardosäkerheten). Med riktighet menas att allt är rätt tolkat och kodat.

Grova fel hittar man genom att de avviker mycket från de resterande mätningarna. De systematiska avvikelserna åtgärdas matematiskt, till exempel en konstant avvikelse.

Alla mätningar ska utföras med tillräcklig många överbestämningar. Med hjälp av överbestämningar kan man:

- Få bort grova fel.
- Lägga märke till systematiska avvikelser och rätta dem matematiskt.
- Få ett mått på mätosäkerheten genom att utjämna de tillfälliga avvikelserna.

De flesta mätningar i den fotogrammetriska mätprocessen hänger ihop. Om det kommer en tillfällig avvikelse kan det uppstå systematiska avvikelser. Till exempel om man har en dålig inre orientering kan det orsaka systematiska deformationer i stereomodellen. (Lantmäteriet m.fl., 2013, s. 225-226)

7.2 Tidpunkten

Årstiden och tidpunkten är viktiga faktorer i flygfotograferingen för att få den information man vill ha. Skuggorna blir längre när solen är lågt och detta har betydande effekt på tolkningen av flygbilden. På vintern täcker snön marken och det förändrar terrängen betydligt. Flygfotograferingen kan delas in i sex tidsperioder:

- före lövsprickningen
- efter lövsprickningen
- sommaren
- före lövfällningen
- efter lövfällningen
- vintern (Nämnden för skoglig fjärranalys, 1993, s.169).

Vilken tidsperiod man ska flygfotografera i beror på användningsändamålet. Före lövsprickningen och efter lövfällningen syns marken. På vintern finns det inte mycket att fotografera än mängden snö. Det går även att kartlägga t.ex. älgar på vintern. De andra tidsperioderna kan man t.ex. se behov av gödning och bekämpning av ogräs. Detta med hjälp av en infrakamera. (Mikael Holm, personlig kommunikation, 15.4.2015)

7.3 Skuggor

Skuggorna som uppkommer i fotografierna försvårar beräkningen för dataprogrammen. Dataprogrammen tror att skuggkanten kan vara en kant till t.ex. en annan marktyp som asfalt. Ett annat problem är om skuggan flyttar på sig under flygningen. När kameran tar ett nytt foto på samma ställe kan man inte binda ihop fotografierna lika lätt. (Mikael Holm, personlig kommunikation, 23.3.2015)

8 GNSS

I detta examensarbete har jag använt en GNSS-mottagare till min undersökning. GNSS är en förkortning av global navigation satellite system. GNSS är en kombination av satelliter som sänder signaler från rymden. De GNSS som har täckning över hela jorden är GPS, Glonass, Galileo och Compass. Med en GNSS-mottagare kan man med hjälp av signaler från satelliterna bestämma position av tids- och positionsuppgifter. (European GNSS Agency, u.å; Lantmäteriet, u.å)

8.1 Positionsbestämning

Satelliterna i rymden skickar ut radiosignaler med olika frekvenser. I signalerna finns binära koder som används för positionsbestämning. Positionsbestämning bestäms med hjälp av satelliter och indelas i absolut, differentiell och relativ positionsbestämning. (Lantmäteriverket, u.å)

8.2 Absolut positionsbestämning

I absolut positionsbestämning använder man en separat mottagare, så som en handnavigator. Mottagaren mottar signalerna från satelliten och ur signalerna används huvudsakligen C/A-koder (Coarse acquisition). Koden som genererats i navigatorn jämförs med den mottagna koden och då kan signalens gångtid samt avståndet till satelliten räknas ut. Med minst fyra satelliter fås positionen för mottagaren. (Lantmäteriverket, u.å)

8.3 Differential positionsbestämning

Differential positionsbestämning, det vill säga DGPS, minskar positionsbestämningsfelen med hjälp av en differentialkorrigering. Korrigeringen medlas till mottagaren via en radio eller en mobiltelefon. (Lantmäteriverket, u.å)

8.4 Relativ positionsbestämning

I relativ positionsbestämning utnyttjas satellitsignalernas bärvåg. Till positionsbestämningen behövs två mottagare varav en är på en plats med kända koordinater. Mätningen sker genom beräkning av koordinatskillnader.

När mottagaren har fångat upp satellitsignalen mäter mottagaren bärvågens fas. Efter detta beräknar mottagaren hela våglängder. Vartefter satelliten förflyttar sig på sin bana så syns avståndsändringen i antalet våglängder mottagaren mottagit.

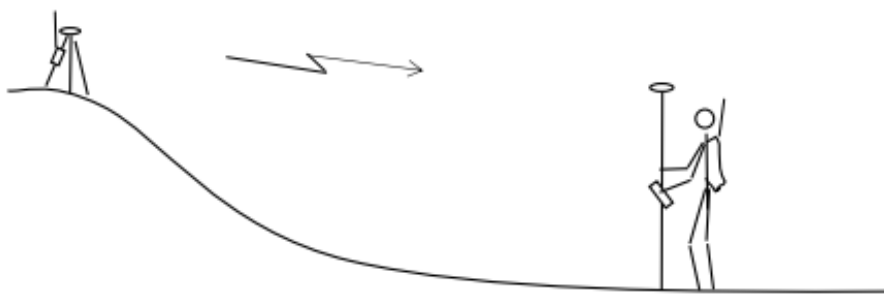
De viktigaste tillämpningarna för den relativa positionsbestämningen är RTK-mätning och statisk GNSS-mätning.

- Vid RTK-mätningen (Real Time Kinematic) beräknas koordinaterna i realtid. Man får alltså koordinaterna genast vid mätningen. Vid RTK-mätningen behöver man en dataförbindelse mellan mottagaren vid den mätta punkten och kartläggningmottagaren.
- Den statistiska GNSS-mätningen beräknas i efterhand. Den statistiska mätningen lämpar sig till exempel för olika slags deformationsmätningar och mätningar av noggranna fixpunktsnät. (Lantmäteriverket, u.å)

8.5 RTK

RTK-mätningen är som jag tidigare nämnde en GNSS-mätning i realtid. Med RTK kan man förflyttas under oavbruten uppdatering av sin position till skillnad från statisk GNSS-mätning. Men för att detta ska vara möjligt måste det finnas en kommunikationslänk mellan rovern och referensen. Kommunikationen kan ske med en radio eller telefon.

Enkelstations-RTK eller RTK-mätning med egen referens lanserades i slutet av 1990-talet. För en enkelstations-RTK behövs en kommunikationslänk och två mottagare. Den ena mottagaren placeras på en känd punkt. Den andra mottagaren bärs av den som utför mätningen (Figur 9). (Mårtensson, 2012, s. 95)



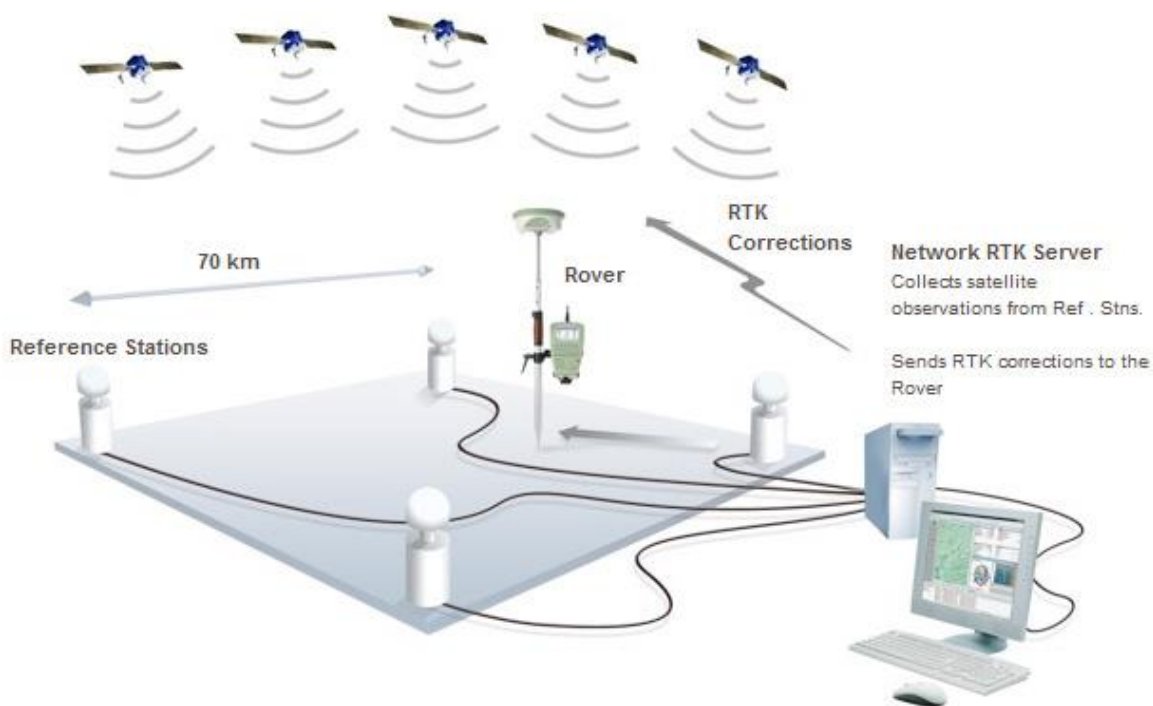
Figur 9. En mottagare står på en känd plats medan den andra mottagaren finns hos den som mäter. Lantmätaren kan bära på antennen i en ryggsäck för att förenkla mätandet.

Vanligtvis har man försökt hålla avståndet mellan de två mottagarna så kort som möjligt. Helst under 10-15 km. Men efter senare tids utveckling så går det ha avstånd upp till 40 km. (Mårtensson, 2012, s. 95)

8.5.1 Nätverks-RTK

Nätverks-RTK går ut på att ett antal referensstationer samarbetar för att ge användaren möjlighet att utnyttja en sömlös RTK-mätning inom täckningsområdet (Figur 10). Lantmäteriet (u.å) skriver om nätverks RTK: ”Konceptet innebär att referensstationerna fortlöpande skickar GNSS-observationer till en driftledningscentral, som samlar

ögonblicklig information om de felkällor som uppkommer på grund av signalstörningarna i atmosfären, samt klock- och banfel.”



Figur 10. Principen för Nätverks-RTK.

Idag är VRS eller virtuell referensstation den hittills dominerade typen av nätverks-RTK. VRS innebär att driftledningscentralen ”simulerar” en referensstation nära mottagaren. (Lantmäteriet, u.å.)

Fördelar med nätverks-RTK:

- Behöver inte inrätta en basstation.
- Noggrannheten för det beräknade läget för mottagaren är mer homogen.
- Noggrannheten bevaras över mer utbrett område mellan mottagaren och referensstationerna.
- Högre tillgänglighet och tillförlitlighet av RTK-korrekationer. Det vill säga att om en station går ner kan en annan station ta över.

Nackdelar med nätverks-RTK:

- Kostnaden för att ta emot korrektioner för nätverks-RTK och prenumerera på ett RTK-nätverk. (SmartNet UK & Ireland, u.å)

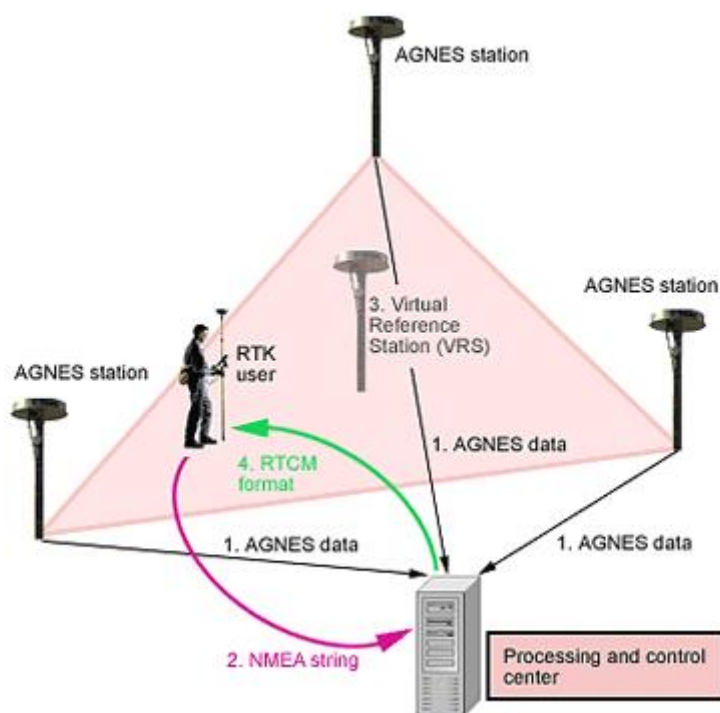
8.5.2 VRS

En virtuell referensstation är en imaginär, obemannad referensstation som bara ligger några meter från RTK användaren (Figur 11). Denna position skapas från data från omgivande referensstationer på samma sätt som om den hade observerats med en GNSS-mottagare. (Swisstopo, u.å.)

Att mäta i VRS-nätet går till så här:

- GNSS-mottagaren sänder uppgifter om sitt läge till VRS-datacentralen via en GSM/GPRS-uppkoppling.
- En virtuell basstation skapas av datacentralen där mottagaren finns.
- Observationsdata placeras i den virtuella basstationen av datacentralen från den närmaste "riktiga" basstationen samt interpolerar och bestämmer de felkällor som berör observationerna för den virtuella basstationen.
- RTK-korrigeringar börjar därefter sändas från datacentralen till mottagaren som om korrigeringarna skulle komma från en basstation nära mätningplatsen. (Lantmäteriverket, u.å)

Lantmäteriverket (u.å.) beskriver VRS: "Med en dylik nätverksmetod blir noggrannheten bättre än med en konventionell RTK-metod, eftersom man nästan helt och hållet blir av med felet som beror på avståndet. Användningen av metoden betyder dessutom kostnads- och tidsbesparingar eftersom det är möjligt att avstå från en egen basstation samt dess uppsättning."



Figur 11. En bild från ett schweiziskt VRS-system. 1. Agnes basstationerna sänder data med en sekunds intervall till kontrollcentret. 2. RTK användaren skickar sin ungefärliga position. 3. Kontrollcentret avgör vilken triangel mottagaren är och beräknar en virtuell referensstation. 4. Kontrollcentret skickar data från VRS till mottagaren.

8.6 Felkällor vid GNSS-mätning

Det finns flera olika felkällor som påverkar GNSS-mätningar och i värsta fall får man ingen position. Några av felkällorna är: klockfel, banfel, jonosfären, troposfären och flervägsfel.

- Med klockfel menas att signalen inte sänds respektive tas emot precis den tiden som anges. Satellitklockfelen är väldigt små eftersom det används atomklockor med mycket hög precision. Klockfelen går att minska med relativ mätning.
- Banfel uppkommer när GNSS-satelliten inte är på den position som förutspåts i utsänt bandatan. Felet går att reducera med hjälp av relativ mätning, eller att i efterhand beräkna positionen när man har bandata av god kvalitet till förfogande.
- Jonosfären finns i övre delen av atmosfären och den innehåller laddade partiklar på grund av solstrålningen. När GNSS-signalen far genom jonosfären berörs den på ett sätt som är direkt proportionellt mot frekvensen. Detta är vanligtvis den största

felkällan inom GNSS-mätning. Detta går att reduceras med hjälp av att mäta på flera frekvenser eller med relativ mätning.

- Den nedersta delen av atmosfären är troposfären. I troposfären förekommer vädret. Här påverkas GNSS-signalen främst av vattenånga. Felet som uppstår i troposfären är något mindre än felet i jonosfären. Felet är svårare att reducera för det är inte frekvensberoende.
- Flervägsfelet kan förklaras genom att GNSS-signalerna inte alltid går den kortaste sträckan mellan satellit och mottagare. Flervägsfelet är i högsta grad beroende av lokala förhållanden. I en miljö med höga träd och hus är det mer allmänt med flervägsfel. Genom att mäta en längre tid kan man reducera denna felkälla.

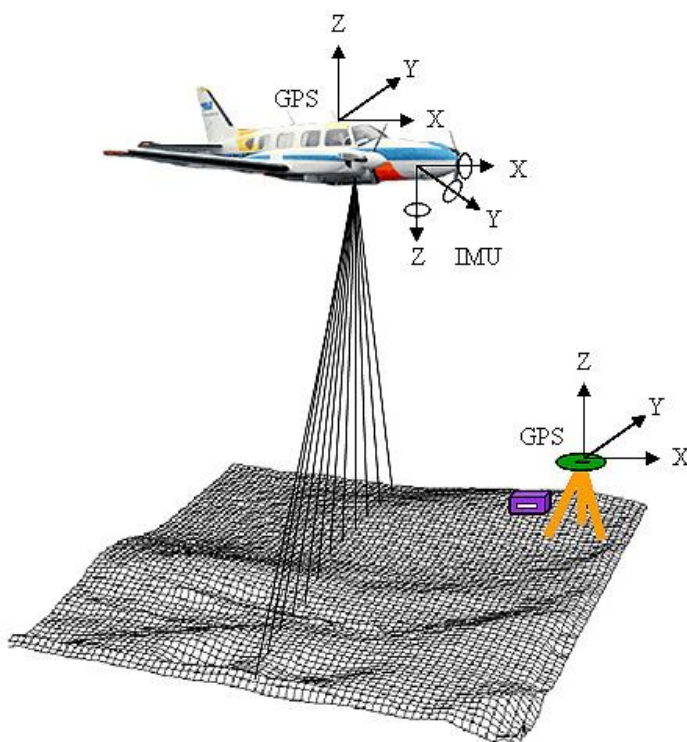
Med absolut positionsbestämning går det att minska påverkan av fel med t.ex. jonosfär- och troposfärmodeller. Vid differentiell positionsbestämning kan man nästan undgå fel tack vare bestämda korrigeringar. Med relativ positionsbestämning utjämnar felkällorna delvis varandra enligt beräkningsmetod. Med hjälp av en tvåfrekvensmottagare kan fel från jonosfären elimineras. (Lantmäteriet, u.å., Lantmäteriverket, u.å.)

9 Flygburen laserskanning

Flygburen laserskanning började man utveckla på 1970- och 1980-talen bland annat vid NASA i USA. Då GPS-tekniken kom löste man problemet med positioneringen av laserskanningsinstrumentet. Efter det har tekniken kunnat utvecklas vidare. (Länsstyrelsen, 2009, s. 7)

Vid flygburen laserskanning används ett flygplan eller en helikopter med syfte att samla geografisk data till exempel höjdmodeller och vegetationsanalyser (Figur 12) (Länsstyrelsen, 2009, s.7) Flygplanet använder man för stora områden med noggrannhetskrav på 5-50 cm medan en helikopter används för t.ex. vägar och kraftledningar med noggrannhetskrav på 2-10 cm. (Björklund, 2013)

Det lasermätssystem som används för flygburen laserskanning är LIDAR (Light Detection and Ranging). LiDAR används också för laserskanning på marknivå. Man använder också begreppet ALS (Airborne Laser Scanning) för flygburen laserskanning.



Figur 12 Flygburen laserskanning. I flygplanet har man en GPS och en IMU.

9.1 Skannerfunktion

Själva skanningen fungerar genom att skannern mäter avståndet till olika objekt som finns på marken. Det gör den genom att skicka ut en puls i form av en ljusstråle, som registrerar tiden tills pulsen kommer tillbaka till skannern. För att veta var pulsen tog i marken måste man veta varifrån och i vilken riktning ljusstrålen kom. Detta görs med hjälp av satellitpositionering (Global Navigation Satellite System, GNSS) och ett tröghetsnavigeringssystem (Inertial Navigation System, INS). Om man vill täcka ett större område behövs fler sensorer eller en rörlig spegel som sprider ut pulserna. (Lantmäteriet, 2009)

Med INS bestäms instrumentets orienteringsriktningar dvs. lutning och vridning med en stor noggrannhet. Medan man med en GNSS kan bestämma instrumentets och farkostens position med hög noggrannhet. (Länsstyrelsen, 2009, s. 7)

INS mäter kontinuerligt acceleration och vinkelförändringar. INS används för att bestämma riktning och position i förhållande till en startpunkt med känd position. I INS finns ett tröghetsinstrument IMU (Inertial Measurement Unit). INS består av tre ortogonala gyroskop, som mäter vinkelhastighet och tre accelerometrar, som mäter linjär acceleration. INS processerar sedan rådata från IMU:n till orienteringsdata som kombineras med orienteringsdata och GNSS-data genom en initiering. (Olsson, 2009, s. 30)

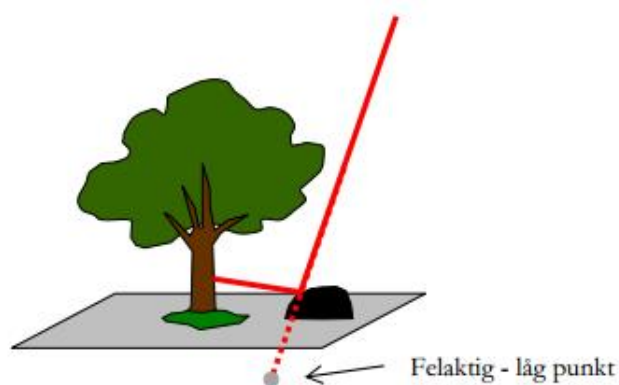
Till avståndsmätningen använder man en laseravståndsmätare som sänder ut laserpulserna och en mottagare som även mäter intensiteten och tiden det tar för pulserna som kommer tillbaka. Denna typ av avståndsmätning kallas ”time-of-flight measurement”. (Länsstyrelsen, 2009, s. 7–8)

En laserpuls träffar ofta på flera ställen innan den når marken och ibland når den inte alls marken. Det kan bero på t.ex. träd och buskar. Dessa punkter kallas multipla reflektioner. Många flyglaserskanningssystem klarar av dessa multipla reflektioner. Ibland kan det ändå komma felaktiga punkter om laserstrålen reflekteras fler än en gång. Eftersom laserstrålen har varit i luften en längre tid än om den skulle ha reflekterats direkt till skannern, beräknar skannern att laserstrålen skulle ha reflekterats direkt. Detta leder till att punkten är längre bort än vad den är. (Björklund, 2009, s. 3–4).

Hur många pulser som reflekteras tillbaka beror på hur tät vegetationen är. Om det är väldigt tät vegetation kommer bara en liten del av pulserna nå marken och om någon puls reflekteras

tillbaka är den oftast för svag för att detekteras och bli en mätpunkt. En ensam punkt som är fel och ligger långt ifrån de andra punkterna är lätt att hitta och filtrera bort. Det är alltså en felaktig punkt, en så kallad lågpunkt (Figur13). Men om punkten ligger strax under de närvarande punkterna eller om det finns flera punkter som är felaktiga är det svårt att avgöra om punkten är rätt eller fel, t.ex. en djup smal grop.

På senare år har full waveform lasersystem blivit tillgängliga. Full waveform lasersystemen kan detektera multipla returer med alla returer, stora och små, och mäta avstånd. (Länsstyrelsen 2009, s. 10–11)

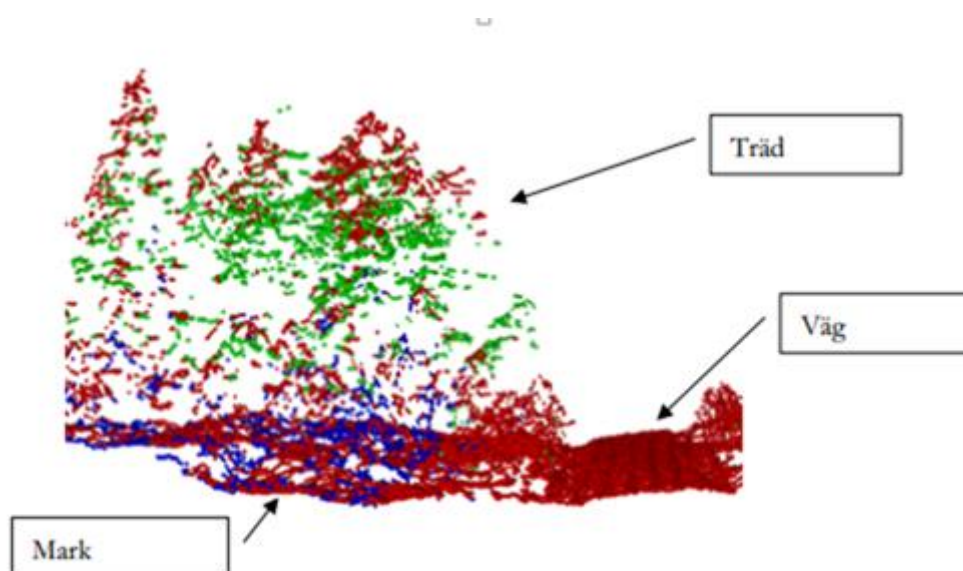


Figur 13 Överst är en bild på hur en felaktig låg punkt uppkommer. Den nedersta bilden visar hur punktmolnet ser ut med felaktiga punkter.

Många av de lasersystem som används idag klarar av att hantera och detektera ett antal multipla reflektioner. Men det är oftast begränsat till första och sista returen. Det finns vissa lasersystem som också klarar av några mellanliggande returer. (Länsstyrelsen, 2009, s. 10)

Det som påverkar den slutliga upplösningen är skannerns rörelse, flygplanets fart, flyghöjd och laserpulsrepetitionsfrekvens, det vill säga hur snabbt pulsernas sänds ut från skannern. Ju lägre och saktare man flyger desto bättre blir upplösningen. Exempelvis om man flyger på 2 km flyghöjd blir upplösningen 50 cm, dvs. fyra punkter per kvadratmeter. Man kan öka punkttätheten om man skannar samma område flera gånger. (Björklund, 2009, s. 3–4)

Resultatet från en mätning blir en stor mängd punkter, där varje punkt har ett intensitetsvärde (mätt på mängden reflekterad laserenergi) och x-, y-, z- koordinater (Figur 14). (Länsstyrelsen, 2009, s. 8,10)



Figur 14. Ett punktmoln som visar hur ett system hanterar olika retur. De röda punkterna är enkelreturer. De gröna punkterna kommer från första returerna och blåa från sista returerna.

9.2 Markmodellering och markpunkter

Att skapa en modell av markytan med laserskanning hör till en viktig del av laserskanningstillämpningarna, t.ex. analys av markmodeller för områden som har fått ökade intressen. Vanligtvis använder man förkortningen DTM (Digital Terrain Model) eller DEM (Digital Elevation Model) när man talar om markmodeller eller terrängmodeller. Problemet med att göra en terrängmodell är att avgöra vilka punkter som är markpunkter i ett punktmoln.

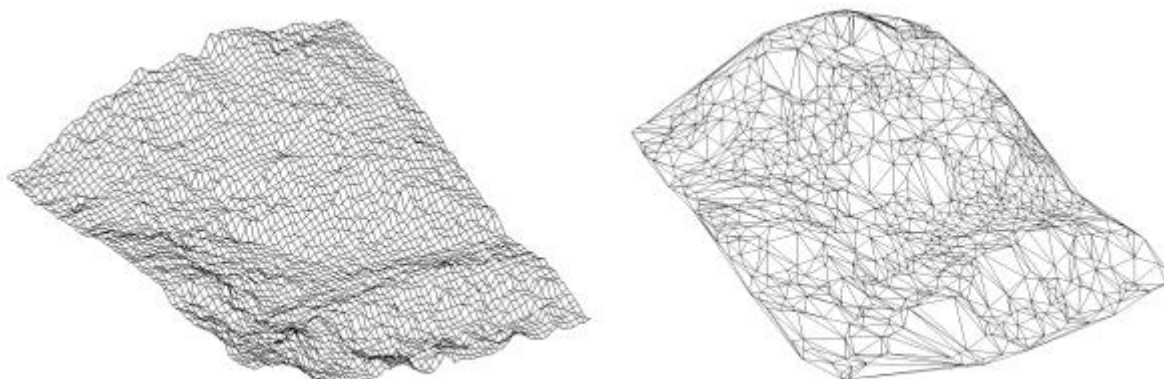
Det går att bestämma vilka punkter som är markpunkter genom att utföra en punktklassificering. Man delar in punkterna i klasser som byggnader, mark, vegetation, mm.

Sedan gör man en filtrering där man separerar markpunkterna från de övriga punkterna. Det tas i beaktande på att alla klassificeringsmetoder och filtreringsmetoder är gjorda på antaganden om egenskaper hos laserskanning och geometriska formationer i terrängen.

Det är inte alltid entydigt vad som faktiskt är markytan utan ofta är det en tolkningsfråga. Därför kan man inte förvänta sig att filtreringen producerar markpunkter som överensstämmer exakt med det man själv förväntat sig. Det kommer alltid finnas variationer. (Länsstyrelsen, 2009, s. 12–13)

Då markpunkterna har bestämts kan en DTM tas fram. De två vanligaste terrängmodellerna är TIN (Triangular Irregular Network) och raster (Figur 15). I en TIN beräknas trianglar av de markpunkter som har mäts in. Triangelytorna bildar sedan en modell av markytan. En bra sak med en TIN är att den vanligtvis är utrymmessnål, det vill säga att det räcker med få punkter (stora trianglar) för platt mark och vid en mer krävande marktopografi krävs flera punkter (mindre trianglar). Det gör att punkttätheten och trianglarnas storlek varierar i en TIN.

Detta är en nackdel vid automatiska analyser eftersom algoritmerna brukar bli mer långsamma och komplexa. I en rastermodell lagras man höjdinformationen i ett regelbundet mönster med höjdpunkter som ger enklare och snabbare algoritmer. Nackdelen blir ett större utrymmesbehov. Storleken på rastermodellen beror på upplösningen, alltså storleken på rastercellerna.



Figur 15. Två terrängmodeller. En rastermodell till vänster och en TIN-modell till höger. TIN-modellen består av trianglar som har beräknats mellan punkterna. Trianglarna bildar en modell av markytan. Rastermodellen bildas av regelbundet mönster med höjdinfo.

Vid framställning av terrängmodeller från punktmoln kan man urskilja två huvudprinciper hos de metoder som används. I den första skapas terrängmodellen i tre steg: laserdata klassificeras genom att man plockar ut markpunkterna och man skapar den önskade terrängmodellen. I den andra avgörs det om en mätpunkt är en markpunkt samtidigt som markmodellen byggs upp. Man utför ingen särskild klassificering av markpunkterna. (Länsstyrelsen, 2009, s. 12–13)

10 UAV-flygfotograferingen

Den 23 oktober 2014 utförde Ilkka Valli från UAS Kuvaukset (numera har verksamheten flyttats till Ympäristösuunnittelu Oy) en flygfotografering med sin multikopter Camflight 8 över Stenhaga i Vasa (Figur 16). Vi som var med på flygningen var Lantmäteri årskurs 1 och 4, Mikael Holm från PIEngineering och vår lärare Sem Timmerbacka.



Figur 16 Ilkka Vallis multikopter Camflight 8. Det var denna ocktocopter som tog alla bilder för detta examensarbete.

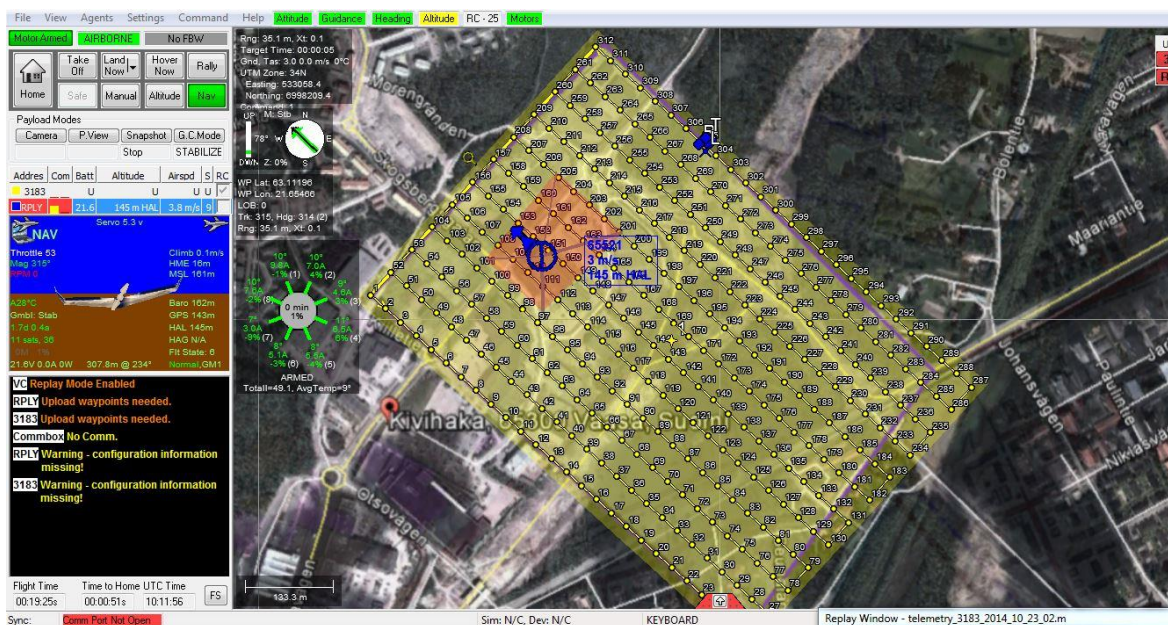
På morgonen samlades vi i skolan för att gå igenom förberedelserna inför flygfotograferingen. Vi delade även upp oss i grupper. En grupp skulle lägga ut signaler med en spik i mitten och en annan grupp skulle mäta koordinater ovanpå spikhuvudena med hjälp av en GNSS-mottagare. Varje mätning skulle mätas i en minut med en mätning i sekunden, det vill säga 60 mätningar. För att mätningen skulle bli noggrannare hade vi två stödkäppar till GNSS-staven. En person höll ändan på staven mot spikhuvudet (Figur 17). GNSS var av modellen Topcon Hiper SR. GNSS-mätningen utfördes i Lecias Smartnet, som är en nätverks-RTK.



Figur 17. Här mättes en signal av några av studerandena som hjälpte till under flygningen. En person höll GNSS-staven på spiken och den andra höll staven stadigt med hjälp av två stödkäppar.

Planet var utrustat med digitalkameran Nikon Coolpix A med fokallängd 18,5 mm och 16.1 megapixels CMOS-bildsensor, sensorstorlek 23,6 x 15,6 mm och pixelstorlek 4,7859 μm . Flygningen genomfördes i Stenhaga i Vasa. Två flyghöjder 70 m och 145 m, bländare varierade f-talet mellan 2,8 till 5, slutartiden för 70 m flygningen var 1/400 s och för 145 m flygningen 1/320 s och ljuskänsligheten (ISO) var 160. Arean för 145 m flygningen blev 64 ha och för 70 m blev 13 ha.

Överlappningen var 70 % på 70 m och vid 145 m en överlappning på 75 %. Hastigheten var ungefär 6 m/s till att den stannade vid fotograferingspunkten för båda flygningarna. Slutartiden för 70 m flygningen var 1/400 s och för 145 m flygningen 1/320 s.



Figur 18. En bild av flygplanen för 145 m flygningen. Vid de gula punkterna tas en bild. Siffrorna visar ordningen på fotograferingen.

På förmiddagen utfördes den första flygningen. Vi hade kontakt med Vasa flygfält som meddelade, när vi fick flyga och inte fick flyga. Den första flygningen utfördes i två sessioner. Orsaken till att den utfördes i två sessioner var för att batterierna höll bara halva flygningen. Den andra flygningen gick inte lika bra som första flygningen. Multikoptern kom tillbaka av olika anledningar. Främsta felet var att batterierna inte tålde kyla. Vi bestämde därför att avbryta flygningen. Resultatet blev att ett mindre område blev flygfotograferat än väntat och utfördes i tre sessioner.

Vädret var soligt och temperaturen var ca $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ och vinden var $8\text{--}9\text{ m/s}$. Vinden högre upp vi multikoptern var ungefär $10\text{--}12\text{ m/s}$ och byig. Årstiden var inte den optimala, för i många flygfoto fick terrängobjekten långa skuggor. Detta på grund av att solen var lågt nere.

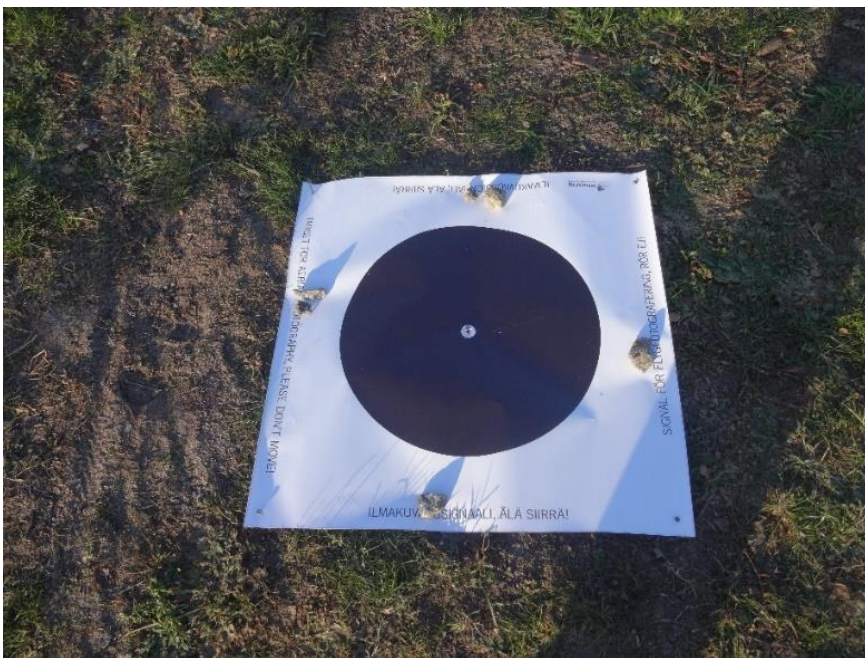
Efter flygningen mätte vi på nytt koordinaterna på signalerna och plockade sedan bort signalerna medan spikarna lämnades kvar. Ännu en ny GNSS-mätning utfördes där signalerna hade varit. Den mätningen utfördes 10.11.2014. Alla punkter utom en mättes på nytt, för att den var otillgänglig.

Punkterna mättes på nytt eftersom vi tyckte att spridningen på koordinaterna var för stora. Spridningen uppstod för att vi höll GNSS-staven lite ostadigt trots stödkäpparna.

Spridningen var omkring 1 cm i plan och 1–2 cm i höjd. Tack vare att vi mätte flera gånger upptäckte vi att vi en gång mätte på fel spikhuvud och den mätningen fick göras om.

11 Signalnoggrannhet

Med PIEnearings program RapidStation och Agisofts PhotoScan har jag skapat en modell av Stenhaga i Vasa. Det som jag undersökte i detta examensarbete är hur många signaler som är nödvändiga för Stenhaga området. Signaleringsplanen finns i bilaga 1. Jag undersökte även hur noggrannheten påverkas t.ex. i norr om man bara mäter in signalerna i söder. Signalerna (Figur 19) blev inmätta med en GNSS-mottagare. Mottagaren var en Topcon Hiper SR. Mottagaren använde Lecia Smartnet, som är en typ av nätverks-RTK.



Figur 19. En av signalerna som vi lade ut och mätte koordinaterna för.

Först skapade jag en första ortomosaik av flygfotografierna från UAV-flygningen i Stenhaga. Efter att ortomosaiken var färdig mätte jag in bildkoordinaterna för signalerna i båda programmen.

11.1 Beräkning

I denna del beskrivs hur antalet signaler påverkar noggrannheten på modellen. Det kommer också fram hur många signaler som är nödvändiga och hur noggrannheten påverkas om det bara finns signaler i en sida av modellen. Enligt Mikael Holm är höjden viktigaste när man tänker mäta i punktmoln, men annars är X och Y viktigare. Jag använde PIEnnerings program RapidStation och programmet Agisoft PhotoScan av Agisoft. Antalet signaler som jag tog med i undersökningen var 19 st. Ursprungligen var det tänkt att ha 20 signaler, men en signal hade för flyttat sig med vinden och den valde jag då bort. I RapidStation beräknade jag modellen i två delar, för att UAV:n landade i 145 m flygningen. I PhotoScan beräkande jag modellen i en del. Detta för att få se om olikheter uppstår.

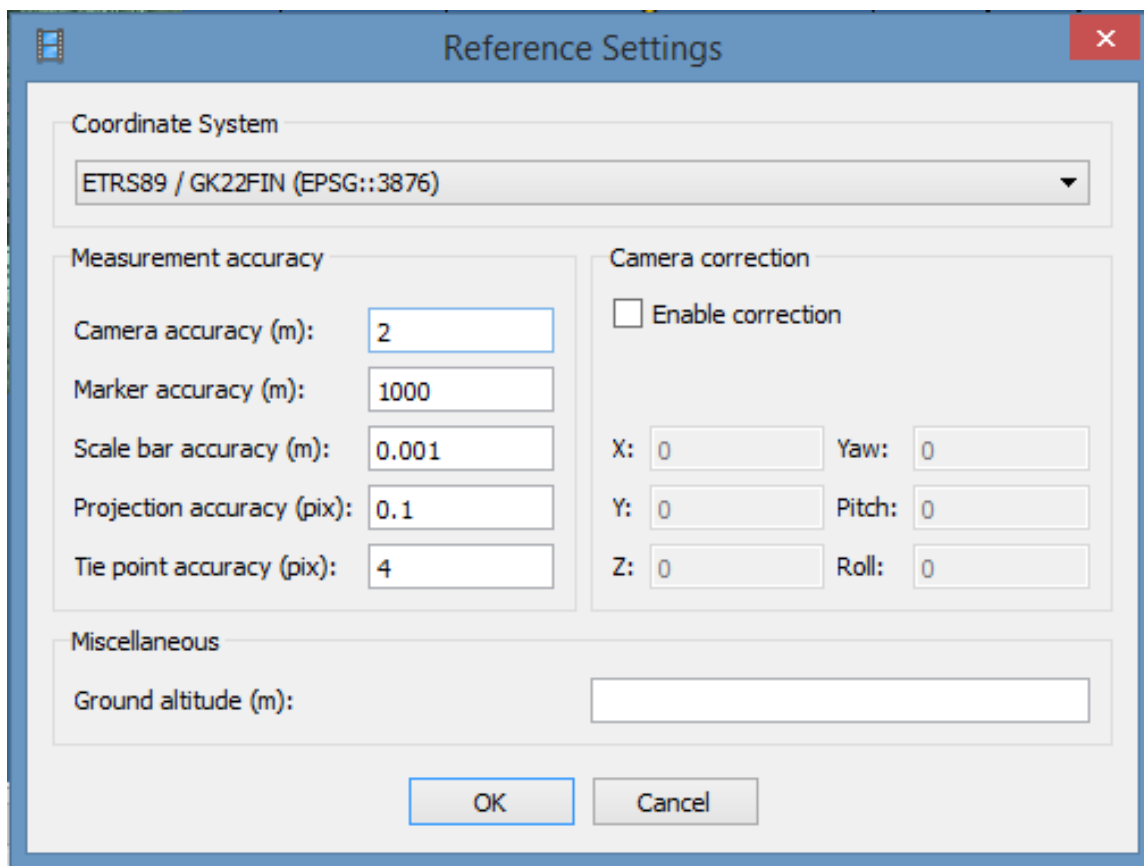
Först gav jag alla signalerna benämningen ”checkpoints” i RapidStation (Figur 20). Med checkpoints menas att de har en noggrannhet på 1000 m, alltså inte fäst vid signalens koordinater. Då alla signaler är checkpoints ser man hur bra noggrannhet modellen har utan bestämda signaler.

The screenshot shows the 'Data Browser' window in RapidStation. The left pane shows a tree view with 'Control point' expanded, listing points C 1 through C 17. The right pane shows the details for 'Control point C 1'.

Control point			
ID	C 1		
easting [m]	22482349.465		
northing [m]	7000813.848		
height [m]	8.276		
Precision class	Checkpoint		
Adjustment statistics			
	easting [m]	northing [m]	height [m]
Residual	0.0231	-0.036	-0.274
A' prior precision	1000	1000	1000
Local redundancy []	1.00	1.00	1.00
Estimated errors	0.0231	-0.036	-0.274
Internal reliability []	4.00	4.00	4.00
Minimum detectable error	3996.81	3996.81	3996.81

Figur 20. En skärmdump från RapidStation. Uppe syns signalnummer och dess koordinater. Det är "Residual" raden som jag har jämfört för signalerna. I detta fall var signalnummer 1 en "checkpoint".

I PhotoScan gjorde jag samma sak (Figur 21). Alla signalerna fick noggrannheten 1000 m. Båda programmen borde ge ungefär samma resultat.



Figur 21. En skärmdump från PhotoScan Jag lade noggrannheten till 1000 m i "Marker accuracy" för alla signaler i PhotoScan.

Resultatet för när alla signaler är checkpoints (Tabell 1) blev att i RapidStation fick man en bra noggrannhet med alla signaler som "checkpoints". Medelavvikelsen i plan blev ungefär 4 cm och 6 cm i höjd. Standardosäkerheten blev ungefär 3 cm i plan och höjd. I PhotoScan blev inte noggrannheten lika bra som i RapidStation. Medelavvikelsen i plan blev ca 25 cm och 9 cm i höjd. Standardosäkerheten blev 23,4 cm i northing, 19,4 cm i easting och 6,9 cm i höjd. Men eftersom jag först skapade ortomosaiken med alla signaler som controlpoints och därefter klassade alla signaler som checkpoints, blev detta resultat bättre än om jag skulle ha börjat med att sätta alla som checkpunkter. Då skulle noggrannheten kunnat stiga till flera meter.

Tabell 1. Alla signaler som checkpoints. N för northing, E för easting och h för höjd. Enheten är meter.

	RapidStation			PhotoScan		
	N	E	h	N	E	h
Medelfel	0,042	0,046	0,056	0,266	0,251	0,091
Standardosäkerhet	0,031	0,032	0,036	0,234	0,194	0,069
Maxfel	0,106	0,122	0,148	0,801	0,584	0,254
Minfel	0,002	0,003	0,001	0,001	0,004	0,014

Till näst lade jag den mittersta signalen nr.9 (se bilaga 1) som ”controlpoint” (Tabell 2). Med controlpoint menas att signalen får en noggrannhet på 0,05 m, det vill säga ungefär den noggrannhet som GNSS-mottagaren fick på grund av lutningen på GNSS-staven. De resterande signalerna blev kvar som checkpoints. Med PhotoScan gick det inte att få resultat med endast en controlpoint. Denna del har därför bara värden från RapidStation

Med en signal som controlpoint blev noggrannheten dålig. Medelavvikelsen i northing blev 14,7 cm, i easting 14,2 cm och i höjd 45,1 cm. Standardosäkerheten blev 8,7 cm i northing 8,3 cm i easting och 26,2 cm i höjd. Maxfelet kom upp till 95 cm i höjd. Orsaken till denna dåliga noggrannhet är att en signal är för lite för modellen ska få bra noggrannhet.

Tabell 2. Signal nr.9 som controlpoint. Denna tabell är endast resultat från RapidStation och resultatet är värden för checkpoints. Enheten är meter.

	N	E	h
Medelfel	0,147	0,142	0,451
Standardosäkerhet	0,087	0,083	0,262
Maxfel	0,320	0,280	0,950
Minfel	0,012	0,016	0,081

När jag lade två av signalerna som controlpoints, signalerna 8 och 13, förbättrades noggrannheten (Tabell 3). På samma sätt i denna undersökning kunde jag inte få något resultat med PhotoScan. Medelavvikelsen sjönk till 8,8 cm i northing, 7,3 cm i easting och 7,1 cm i höjd. Standardosäkerheten blev 6,6 cm i northing, 6,7 cm i easting och 4,4 cm i höjd. Maxfelet i höjd sjönk till 17,6 cm från 95 cm. Men även två signaler är för lite för modellen.

Tabell 3. Signalerna 8 och 13 är controlpoints. Denna tabell är endast resultat från RapidStation och resultatet är värden för checkpoints. Enheten är meter.

	N	E	h
Medelfel	0,088	0,073	0,071
Standardosäkerhet	0,066	0,069	0,044
Maxfel	0,196	0,218	0,176
Minfel	0,001	0,002	0,012

När ytterligare två signaler blev controlpoints, det vill säga med fyra controlpoints, fick jag även ett resultat från PhotoScan (Tabell 4). Jag valde signalerna 1, 4, 17 och 18. De var hörnsignalerna. När antalet controlpoint fördubblades steg så klart noggrannheten också. Noggrannheten i RapidStation blev bättre. Medelavvikelsen blev 2,6 cm i northing, 3,3 cm i easting och 4,5 cm i höjd. Standardosäkerheten blev också bättre i northing och i easting, 2,1 cm respektive 2,8 cm och i höjd blev standardosäkerheten 3,4 cm.

I PhotoScan blev noggrannheten sämre än i RapidStation, eftersom i RapidStation är modellen delad i två flygningar. Medelavvikelsen i höjd blev 14,4 i höjd och standardosäkerheten 7,6 cm. I plan blev noggrannheten sämre i PhotoScan. I northing blev medelavvikelsen 4,8 cm och i easting 6 cm. Standardosäkerheten blev 3,7 i northing och 3,5 i easting.

Tabell 4. Signalerna 1, 4, 17 och 18 är controlpoints. Resultaten är värden för checkpoints. Enheten är meter.

	RapidStation			PhotoScan		
	N	E	h	N	E	h
Medelfel	0,026	0,033	0,045	0,048	0,060	0,144
Standardosäkerhet	0,021	0,028	0,034	0,037	0,035	0,076
Maxfel	0,077	0,089	0,097	0,144	0,113	0,243
Minfel	0,001	0,000	0,000	0,002	0,002	0,006

När ytterligare en controlpoint lades till i mitten av modellen, signal nr. 9, blev antalet fem signaler (Tabell 5). För RapidStation och PhotoScan blev medelavvikelsen och standardosäkerheten i princip lika i northing och i easting som för fyra signaler. Men precis som för fyra signaler är medelavvikelsen och standardosäkerheten bättre i RapidStation än i PhotoScan.

Höjden blev bättre för både RapidStation och PhotoScan. Medelavvikelsen i höjd för RapidStation blev 3,3 cm och 3,8 cm för PhotoScan. Standardosäkerheten i höjd blev 2 cm i RapidStation och 2,4 cm i PhotoScan.

Tabell 5. Signalerna 1, 4, 9, 17 och 18 är controlpoints. Resultaten är värden för checkpoints. Enheten är meter.

	RapidStation			PhotoScan		
	N	E	h	N	E	h
Medelfel	0,026	0,036	0,033	0,048	0,054	0,038
Standardosäkerhet	0,020	0,026	0,020	0,039	0,035	0,024
Maxfel	0,075	0,087	0,063	0,152	0,104	0,092
Minfel	0,000	0,008	0,004	0,005	0,004	0,017

När signalantalet ökade till sex signaler (Tabell 6), använde jag signalerna 1, 4, 8, 13, 17 och 18. Vid sex signaler börjar förbättringen att avta i PhotoScan. I PhotoScan är medelavvikelsen och standardosäkerheten i höjd ungefär samma som för fem signaler. Men medelavvikelsen i plan har förbättrats med 1 cm. Standardosäkerheten är samma som för fem signaler.

I RapidStation blev noggrannheten lite sämre, men inte märkbart. Man kan säga att det är lika bra noggrannhet för fem och sex signaler i RapidStation.

Tabell 6. Signalerna 1, 4, 8, 13, 17 och 18 controlpoints. Resultaten är värden för checkpoints. Enheten är meter.

	RapidStation			PhotoScan		
	N	E	h	N	E	h
Medelfel	0,030	0,032	0,038	0,040	0,041	0,038
Standardosäkerhet	0,024	0,026	0,020	0,040	0,034	0,022
Maxfel	0,083	0,086	0,072	0,152	0,113	0,083
Minfel	0,003	0,000	0,008	0,004	0,003	0,015

När ännu en signal lades till och det blev sju signaler (Tabell 7) stannade förbättringen nästan upp. I RapidStation blev noggrannheten lite bättre än för sex signaler, men i princip samma som för fem signaler.

I PhotoScan stannade förbättringen helt, eftersom modellen i PhotoScan är skapad i en del och redan vid fem signaler var noggrannheten i princip samma i höjd, fem signaler är tillräckligt för PhotoScan för en flygning.

Tabell 7. Signalerna 1, 4, 8, 9, 13, 17 och 18 är controlpoints. Resultaten är värden för checkpoints. Enheten är meter.

	RapidStation			PhotoScan		
	N	E	h	N	E	h
Medelfel	0,024	0,034	0,030	0,042	0,042	0,038
Standardosäkerhet	0,018	0,025	0,018	0,042	0,036	0,022
Maxfel	0,062	0,085	0,051	0,154	0,116	0,078
Minfel	0,002	0,009	0,006	0,003	0,006	0,010

Till sist undersökte jag med nio signaler (Tabell 8), alltså tre uppe, tre i mitten och tre nere i modellen. Då blev noggrannheten också samma i RapidStation som i fem, sex och sju signaler.

I PhotoScan blev det inte heller nu någon förbättring. Detta för att fem signaler räcker när modellen är skapad i en del. Denna test med nio signaler visar att noggrannheten inte ökar mycket fast man lägger till två signaler. Orsaken till att jag inte ökar antalet mer i detta examenarbete, till t.ex. 15 signaler, är för att det blir för lite checkpoints kvar att utföra beräkningar på så att resultatet blir trovärdigt.

Tabell 8. Signalerna 1, 2, 4, 8, 9, 13, 17, 18 och 20 är controlpoints. Resultaten är värden för checkpoints. Enheten är meter.

	RapidStation			PhotoScan		
	N	E	h	N	E	h
Medelfel	0,022	0,037	0,033	0,037	0,033	0,037
Standardosäkerhet	0,019	0,026	0,018	0,035	0,022	0,022
Maxfel	0,062	0,084	0,052	0,122	0,075	0,069
Minfel	0,002	0,010	0,006	0,003	0,008	0,004

Som en jämförelse tog jag alla 19 signaler som var klassade som controlpoints (Tabell 9). Då förbättrades noggrannheten en aning i båda programmen. I RapidStation blev medelavvikelsen 1,9 cm i northing, 2,7 cm i easting och 1,7 cm i höjd. Standardosäkerheten blev 1,2 cm i northing, 1,9 cm i easting och 1,2 cm i höjd. I PhotoScan blev noggrannheten lite sämre. Medelavvikelsen blev 3,1 i alla led. Standardosäkerheten blev 2,6 cm i northing, 2,1 cm i easting och 2,2 i höjd. Detta blev resultatet om lägger noggrannheten på GNSS-mätningarna till 5 cm.

Tabell 9. Alla signaler som control points. Resultaten är värden för controlpoints, eftersom det inte finns några checkpoints. Enheten är meter.

	RapidStation			PhotoScan		
	N	E	h	N	E	h
Medelfel	0,019	0,027	0,017	0,031	0,031	0,031
Standardosäkerhet	0,012	0,019	0,012	0,026	0,021	0,022
Maxfel	0,041	0,062	0,042	0,083	0,067	0,096
Minfel	0,000	0,000	0,000	0,004	0,004	0,003

Till sist undersökte jag hur noggrannheten påverkas om alla signaler på en sida av modellen är controlpoints. Jag valde signalerna 1, 2, 3, 5, 6, och 8 (Tabell 10). I RapidStation blev medelavvikelsen i northing 5,5 cm, i easting 7,1 cm och i höjd 7 cm. Medelavvikelsen i PhotoScan blev 38,5 cm i northing, 53,8 cm i easting och 17,7 cm i höjd. Alltså blev noggrannheten i plan och höjd bättre i RapidStation än i PhotoScan om man har signalerna på en sida. Att ha signaler på bara en sida är ingen bra idé. Speciellt dåligt för PhotoScan eftersom modellen är skapad som en flygning.

Tabell 10. Noggrannheten när signalerna 1, 2, 3, 5, 6, och 8 är controlpoints. Resultatet är för de resterande signalerna. Enheten är meter.

	RapidStation			PhotoScan		
	N	E	h	N	E	h
Medelfel	0,055	0,071	0,070	0,385	0,538	0,177
Standardosäkerhet	0,029	0,045	0,048	0,233	0,451	0,159
Maxfel	0,106	0,146	0,158	0,855	1,410	0,516
Minfel	0,015	0,007	0,006	0,100	0,058	0,001

11.2 Sammanfattning av signaleringen

Sammanfattningsvis kan man konstatera att noggrannheten blir bättre ju fler signaler man har. Denna undersökning visade hur mycket bättre det blir med fler signaler. Man bör komma ihåg att noggrannheten gäller denna modell och dessa värden stämmer inte

nödvändigtvis ihop med antal signaler på en annan modell. Förbättringen borde bli ungefär samma.

Orsaken till att förbättringen blir så mycket bättre mellan en och fyra signaler är att med flera signaler modellerar beräkningsprogrammet bättre bort fel i GNSS:n ombord på UAV:n. Även självkalibreringen av kameran, som utförs av beräkningsprogrammet, blir bättre med fler signaler.

Då RapidStation delade upp modellen i två flygningar blev noggrannheten i plan och höjd bättre än i PhotoScan, som beaktade allt som en flygning. När modellen delades upp i två flygningar blev noggrannheten bättre än då modellen skapades som en flygning. I RapidStation och PhotoScan blev inte noggrannheten avsevärt bättre efter fem signaler. Jag drar den slutsatsen att fem signaler var optimalt för denna ytmodell.

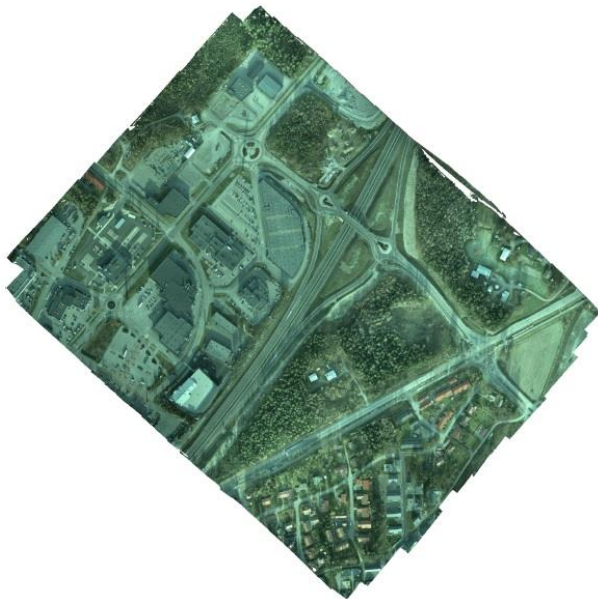
Ett annat alternativ till att minska antalet signaler är att ha en RTK-GPS i UAV:n. Det görs ett examensarbete för PIEngineering OY på samma gång som detta examensarbete som behandlar om det går att vara utan signaler eller åtminstone minska antalet signaler om man har en RTK-GPS ombord på UAV:n

12 Noggrannhetsanalys för ytmodeller gjorda med flygfotografier och LIDAR-data

För detta examensarbete ska jag undersöka hur bra noggrannhet ytmodeller gjorda med flygfotografier har och även jämföra det med LIDAR-data. Flygfotografierna fick jag från UAV-flygfotograferingen i Stenhaga i Vasa och LIDAR-data fick jag av Vasa Stad.

12.1 Noggrannhetsanalys för UAV-flygfotograferingen

När UAV-flygfotograferingen utfördes gjorde vi två olika flygningar på två höjder en på 70 m och en på 145 m. Av flygfotografierna skapade jag två ytmodeller för att testa noggrannheten i höjd för ytmodellerna användes två program. PIEnearings RapidTerrain och Agisofts PhotoScan användes för att skapa punktmoln av ytmodellerna (Figur 22). Ytmodellerna hade samtliga signaler klassade som controlpoints, så modellen hade den bästa noggrannheten den kunde ha. Till själva beräkningen använde jag programmet 3D-Win av 3D-system. Materialet som jag använde fick jag från UAV-flygfotograferingen.



Figur 22. En ortomosaik över modellen som skapades av flygfotografierna av den högre flygningen. Modellen är gjort i Agisoft PhotoScan.

Till noggrannhetsanalysen mättes två profiler med takymeter och prisma. Takymetern var av modellen Leica TS15 (Figur 23). Utgångspunkterna för orienteringen av takymeter var två av signalerna som vi hade mätt tre gånger med en GNSS-mottagare. Men eventuella systematiska fel i GNSS-mätningen har inte beaktats.

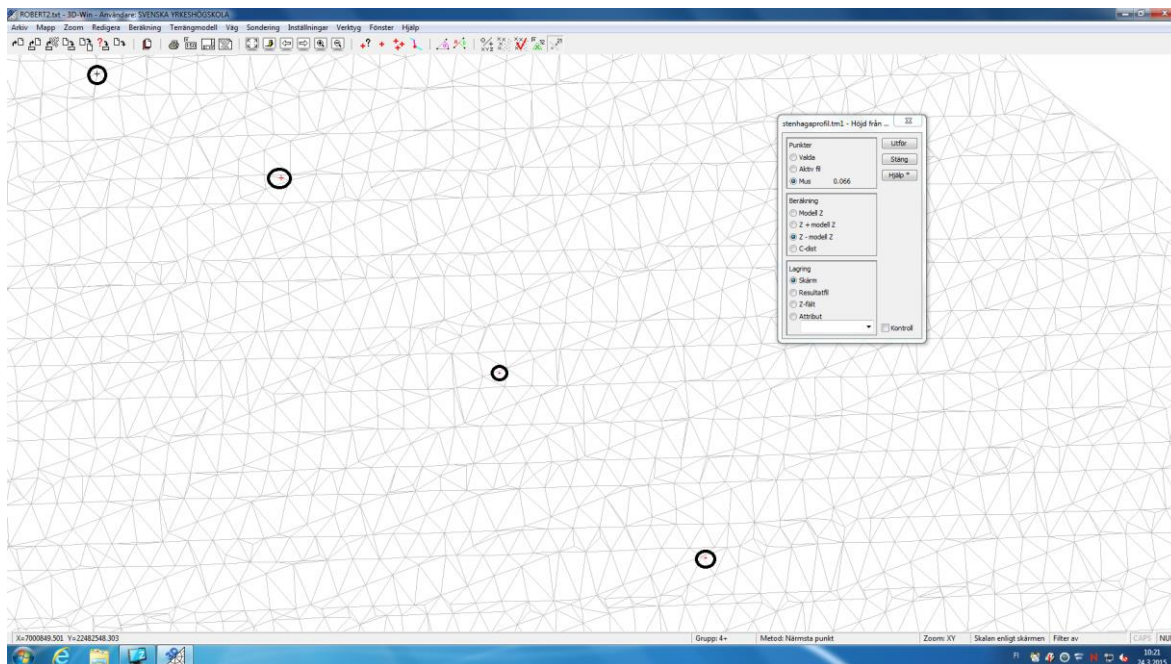
Den ena profilen blev mätt på en lätttrafikled och den andra blev mätt på en kantsten vid en trottoar. Dessa två profilers höjddata ska jämföras med modellen från det flygfotograferade materialet.



Figur 23. Med en Leica TS15 takymeter utfördes profilmätningarna.

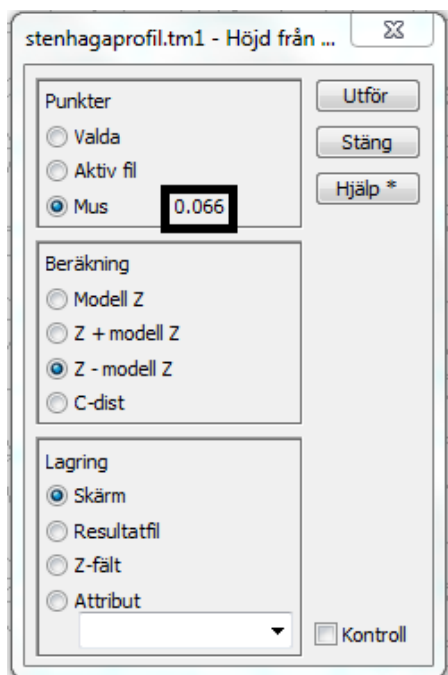
I PhotoScan skapade jag punktmolnet själv, medan punktmolnet från RapidTerrain skapades av PIEnearing på grund av tidsbrist. I PhotoScan behövde jag exportera ytmodellen till ett punktmolnformat så att jag fick ett punktmoln. Med hjälp av punktmolnet beräknas noggrannheten i 3D-Win. För att få in materialet i 3D-Win behövde jag ta ut en liten del av punktmolnet. Jag klippte ut områdena ur punktmolnet där profilerna mättes med programmet Autodesk Recap. I Recap sparades filen i PTS-format (Ett punktmolnformat). Punktmolnet öppnades därefter i 3D-Win där beräkningarna utfördes. I 3D-Win triangulerades punktmolnet först för att skapa en terrängmodell och sedan tog jag in profilerna (Figur 24).

Punktmolnet från RapidTerrain som jag fick av PIEnearing var punktmolnet färdigt utklippt där profilerna fanns. Jag tog in punktmolnen i 3D-Win och triangulerade punktmolnet till en terrängmodell och tog sedan in profilerna.



Figur 24. Punktmolnet triangulerat i 3D-Win. Punkterna markerade med cirklar är punkterna från profilmätningen. Denna triangulering är av det laserskannade materialet.

Efter detta använde jag ett beräkningsprogram i 3D-Win. I beräkningsprogrammet markerades alternativet *Z – modell Z* (Figur 25). Det betyder att man tar profilpunktens höjd minus punktmolnets höjd. Svaret som beräkningsprogrammet gav för varje profilpunkt lades in i en Exceltabell.



Figur 25. Beräkningsprogrammet i 3D-Win. I den svarta rutan visas skillnaden mellan profilens höjd och modellens höjd. Avvikelsen är i meter.

Sedan beräknade jag medelavvikelsen, standardosäkerheten och maxfelet för profil 1 (Tabell 10) och profil 2 (Tabell 11). I den första profilen mättes 17 st. punkter. Medelavvikelsen för den första profilen för PhotoScan, som mättes på en lättrafikled blev samma för båda flygningarna, 3,1 cm. Standardosäkerheten blev bättre för den lägre flygningen. 0,9 cm för 70 m flygningen och 1,4 cm för 145 m flygningen. Maxfelet var också mindre vid 70 m flygningen än vid 145 m flygningen, 4,7 cm respektive 6 cm.

För RapidTerrain var också medelavvikelsen samma för båda flygningarna, 2 cm. Standardosäkerheten var större för 70 m flygningen, 1,8 cm, och för 145 m flygningen 1,3 cm. Maxfelet var ungefär 5 cm för båda flyghöjderna.

För profil 1 hade RapidTerrain lägre medelavvikelse än PhotoScan medan standardosäkerheten var bättre för Photoscan.

Tabell 11. Höjdnoggrannheten för profil 1 för både 70 m och 145 m flygningen. Enheten är meter.

Profil 1	Differens 70 m	Differens 70 m	Differens 145 m	Differens 145 m
	PhotoScan	RapidTerrain	PhotoScan	RapidTerrain
Medelfel	0,031	0,020	0,031	0,020
Standardosäkerhet	0,009	0,018	0,014	0,013
Maxfel	0,047	0,06	0,06	0,049

För profil 2 med 15 punkter, som mättes på en ovanpå en kantsten, fick PhotoScan bättre medelavvikelse i 145 m flygningen än i 70 m flygningen. Medelavvikelsen för 70 m flygningen blev 3,6 cm och 1,7 för 145 m flygningen. Standardosäkerheten blev också bättre för den högre flyghöjden än den lägre. Standardosäkerheten blev 2 cm i 70 m flygningen och 1,5 cm i 145 m flygningen. Maxfelet blev 7,3 cm i den lägre flyghöjden och 5 cm i den högre flyghöjden.

I RapidTerrain blev medelavvikelsen lite under 1 cm för den högre flyghöjden och nästan 2 cm i den lägre. Standardosäkerheten blev 2 cm i 70 m flygningen och 0,6 cm i 145 m flygningen. Maxfelet blev 3,7 cm i den lägre flyghöjden och 1,7 cm i den högre flyghöjden.

Tabell 12. Höjdnoggrannheten för profil 2 för både 70 m och 145 m flygningen. Enheten är meter.

Profil 2	Differens 70 m		Differens 145 m	
	PhotoScan	RapidTerrain	PhotoScan	RapidTerrain
Medelfel	0,036	0,017	0,017	0,007
Standardosäkerhet	0,020	0,012	0,015	0,006
Maxfel	0,073	0,037	0,05	0,017

12.1.1 Sammanfattning av noggrannhetsanalysen för UAV-flygfotograferingen

Sammanfattningsvis kan jag konstatera att noggrannheten för ytmodellerna gjorda med flygfotografier inte som förväntat. Medelavvikelsen i höjd blev 3,1 cm respektive 2 cm för PhotoScan och RapidTerrain i profil 1 för båda flyghöjderna. Profil 1 mättes på en lätttrafikled. Medelavvikelsen för profil 2 blev 3,6 cm för 70 m flygningen och 1,7 för 145 m flygningen i PhotoScan. Medelavvikelsen för RapidTerrain blev 1,7 cm för 70 m flygningen och 0,7 cm för 145 m flygningen. Standardosäkerheten blev sämre i PhotoScan i profil 2 än för profil 1. RapidTerrain fick bättre standardosäkerhet och mindre maxfel i profil 2 än för profil 1, trots höjdskillnaden vid kantstenen.

Noggrannheten på 70 m ytmodeller borde ha blivit bättre än för 145 m ytmodellerna. Varför noggrannheten blev sämre för 70 m flygningen än 145 m flygningen kan bero på att 70 m flygningen blev uppdelad i tre flygningar och bara har fyra signaler. De tre modellhalvorna är ostabila när de är små och med få signaler.

Felkällor kan vara att profilerna är mätta i kanten på lätttrafikleden och kantstenen. Om noggrannheten i XY- led avviker, hamnar profilpunkterna på t.ex. en grästuva eller nedanför kantstenen. Då kan höjden variera med 5 cm om man har otur. Detta kan bero på GNSS noggrannheten på utgångspunkterna till profilmätningen och lutningen på prismastaven.

12.2 Noggrannhetsanalys för flyglaserskanningen

Till mitt examensarbete har jag av Vasa stad fått laserskannat material över samma område som det UAV-flygfotograferade materialet. Med det materialet ska jag mäta noggrannheten och jämföra det med noggrannheten från det flygfotograferade materialet. Till detta har jag använt samma program som i noggrannhetsanalysen för flygfotografierna, 3D-Win.

Flyglaserskanningen utfördes 2013 och 2014. Flygningen utfördes med TopEye system S/N 543 i två sessioner, alltså en 2013 och en 2014. Totalt antal punkter blev 1 158 527 500 st. och tätheten blev 28 punkter/m².

Materialet jag fick kom i LAS-format. För att få in materialet i 3D-Win behövde jag ta ut en liten del av punktmolnet. Jag klippte ut de områdena ur punktmolnet som fanns där profilerna mättes med Recap. I Recap sparades filen i PTS-format. Punktmolnet öppnades därefter i 3D-Win där beräkningarna utfördes. I 3D-Win triangulerades punktmolnet först och sedan tog jag in samma profiler som användes för noggrannhetsanalysen för flygfotografierna. Resultaten lade jag i en Exceltabell och beräknade medelavvikelsen, standardosäkerheten och maxfelet. (Tabell 12)

I den första profilen mättes 17 st. punkter. Medeltalet på skillnaden mellan profilen och punktmolnet blev 0,6 cm. Maxfelet blev 2,1 cm och standardosäkerheten blev 0,5 cm. I den andra profilen mättes 15 st. punkter. Medeltalet blev 2,2 cm, maxfelet blev 6,6 cm och standardosäkerheten blev 2,1 cm.

Tabell 13. Höjdnoggrannheten för de båda profilerna för LIDAR-data. Enheten är meter

	Profil 1	Profil 2
Medelfel	0,006	0,022
Standardosäkerhet	0,005	0,021
Maxfel	0,021	0,066

12.2.1 Sammanfattning av noggrannhetsanalysen för flyglaserskanningen

Profilen för lättrafikleden fick en bättre noggrannhet än profilen för kantstenen. Detta var förväntat eftersom lättrafikleden är plan mark, medan kantstenen har höjdskillnad till vägbanan och därmed borde det uppstå höjdfel vid trianguleringen. Eftersom punktmolnets punkter inte finns på kantsten utan de flesta finns runt kantstenen, skärs vid trianguleringen en del av kantstenen bort. Även har kan noggrannheten på profilpunkterna påverka resultatet.

I den första profilen är det bara en profilpunkt som sticker ut med ett fel på 21 mm, alla andra är under 13 mm. I den andra profilen är det fem profilpunkter som höjer medeltalet. Dessa profilpunkter har fel inom 27–66 mm. Vad avvikelserna beror på är svårt att säga.

Till sist kan jag konstatera att denna laserskanning har en bra noggrannhet. Fel uppstår när det kommer höjdvariationer, men detta går att åtgärda till viss del med tätare punktmoln.

12.3 Jämförelse

När jag jämför noggrannheten mellan flyglaserskanningen och UAV-flygfotograferingen (Tabell 13) ser jag att flyglaserskanningen har bättre noggrannhet än flygfotograferingen. Flyglaserskanningen har en medelavvikelse på 0,6 cm i profil. Den bästa medelavvikelsen som jag fick med UAV-flygfotograferingen var 2 cm. Även standardosäkerheten och max felet blev bättre för flyglaserskanningen. Laserskanningen var således noggrannare än UAV-flygfotograferingen i profil 1. Man ska komma ihåg att punkttätheten i punktmolnet från laserskanningen är i punktmolnen från flygfotograferingen. För det kan påverka resultatet i jämförelsen.

Tabell 14. Noggrannheten för både flyglaserskanningen och UAV-flygfotograferingen för profil 1. Enheten är meter.

Profil 1		Differens 70 m	Differens 70 m	Differens 145 m	Differens 145 m
	LIDAR	PhotoScan	RapidTerrain	PhotoScan	RapidTerrain
Medelfel	0,006	0,031	0,020	0,031	0,020
Standardosäkerhet	0,005	0,009	0,018	0,014	0,013
Maxfel	0,021	0,047	0,06	0,06	0,049

Noggrannheten för den andra profilen (Tabell 14) blev ungefär samma som för flyglaserskanningen och UAV-flygfotograferingen. Alla ytmodeller fick en medelavvikelse på ca 2 cm. Men standardosäkerheten blev sämst för flyglaserskanningen med 2,1 cm. Standardosäkerhet blev mellan 1,5 cm och 0,2 cm för UAV-flygfotograferingen. Även maxfelet blev större för flyglaserskanningen, 6,6 cm. Största maxfelet för UAV-flygfotograferingen blev 3,1 cm. För profil 2 fick UAV-flygfotograferingen bättre noggrannhet.

Tabell 15. Noggrannheten för både flyglaserskanningen och UAV-flygfotograferingen för profil 2. Enheten är meter.

Profil 2	Differens 70 m		Differens 145 m		
	LIDAR	PhotoScan	RapidTerrain	PhotoScan	RapidTerrain
Medelfel	0,022	0,036	0,017	0,017	0,007
Standardosäkerhet	0,021	0,020	0,012	0,015	0,006
Maxfel	0,066	0,073	0,037	0,050	0,017

Slutligen kan jag konstatera att man borde kunna få samma noggrannhet med UAV-flygfotografering som med flygburen laserskanning.

13 GNSS-undersökning

När vi skulle mäta in signalerna i UAV-flygfotograferingen kom frågan hur länge man ska mäta på en punkt för att det ska vara tillförlitligt. Vi lade GNSS mottagaren att stå på samma ställe under en tid och ställde in GNSS att mäta en observation i sekunden. GNSS-mottagaren var en Topcon Hiper SR. Mottagaren använde Leicas Smartnet som är ett nätverks-RTK

GNSS-mottagaren placerades på skolans tak för mätning. Mätningen gjordes den 11 november 2015. Mottagaren mätte tills minnet blev slut i fältminnet. Totalt antal observationer blev 6840 st., alltså tog mätningen 6840s, 114 min. Koordinatsystemet är ETRS-GK-22 och höjdsystemet N2000.

Som hjälpmedel använde jag Excel. Alla observationerna lades in i en Exceltabell. I undersökningen valde jag att räkna medeltalet, standardosäkerheten, minvärde och maxvärde.

13.1 Beräkning

I undersökningen kom det fram att om man ser till medeltalet för alla observationer på en punkt (Tabell 16), blev medeltalet 7000062,049 för X-koordinaten, 22479559,479 för Y-koordinaten och 20,568 i höjd. Den största avvikelser till medeltalet i X-led blev 18 mm, i Y-led 24 mm och 41 mm i höjd. Standardosäkerheten i X-led blev 4,5 mm i Y-led 3,5 mm och i höjd 10,9 mm.

Tabell 16. Medeltalet, standardosäkerheten, maxvärdet och minvärdet för medeltalet för alla observationer. Enheten är meter

	X	Y	Höjd
Medeltal	7000062,049	22479559,479	20,568
Standardosäkerhet	0,0045	0,0035	0,0109
Maxvärde	7000062,062	22479559,489	20,609
Minvärde	7000062,031	22479559,455	20,530
Max-Min	0,031	0,034	0,079

Om man skulle mäta medeltalet av tre observationer (Tabell 17), alltså med tre sekunders intervall, blev medeltalet så klart samma som föregående: 7000062,049 för X-koordinaten, 22479559,479 för Y-koordinaten och 20,568 m i höjd. Den största avvikelserna för X-koordinaten blev 14 mm, för Y-koordinaten 22 mm och 39 mm för höjden. Standardosäkerheten sjönk till 4,3 mm i X-led, 3,4 mm i Y-led och 10,5 mm i höjd.

Tabell 17 Medeltalet, standardosäkerheten, maxvärdet och minvärdet för medeltalet av tre observationer. Enheten är meter

	X	Y	Höjd
Medeltal	7000062,049	22479559,479	20,568
Standardosäkerhet	0,0043	0,0034	0,0105
Maxvärde	7000062,061	22479559,488	20,607
Minvärde	7000062,035	22479559,457	20,533
Max-Min	0,026	0,031	0,074

Om man ser till medeltalet av 30 observationer (Tabell 18), blev medeltalet samma som de två föregående. Den största avvikelserna blev 10 mm i X-led, 18 mm i Y-led och 30 mm i höjd. Standardosäkerheten blev 3,9 mm för X-koordinaten, 3,0 mm för Y-koordinaten och 9,6 mm i höjd.

Tabell 18. Medeltalet, standardosäkerheten, maxvärdet och minvärdet för medeltalet av 30 observationer. Enheten är meter

	X	Y	Höjd
Medeltal	7000062,049	22479559,479	20,568
Standardosäkerhet	0,0039	0,0030	0,0096
Maxvärde	7000062,058	22479559,485	20,598
Minvärde	7000062,039	22479559,461	20,542
Max-Min	0,019	0,024	0,057

Jag undersökte medeltalet av 60 observationer (Tabell 19). Som i de andra observationerna så blev medeltalet det samma. Den största avvikelserna från medeltalet blev 9 mm i X-led, 16 mm i Y-led och 25 mm i höjd. Standardosäkerheten blev 3,8 mm för X-koordinaten, 2,9 mm för Y-koordinaten och 9,3 mm i höjd.

Tabell 19. Medeltalet, standardosäkerheten, maxvärdet och minvärdet för medeltalet av 60 observationer. Enheten är meter

	X	Y	Höjd
Medeltal	7000062,049	22479559,479	20,568
Standardosäkerhet	0,0038	0,0029	0,0093
Maxvärde	7000062,058	22479559,484	20,593
Minvärde	7000062,041	22479559,463	20,544
Max-Min	0,017	0,022	0,049

Till sist undersökte jag tar medeltalet av 180 observationer (Tabell 20). Medeltalet blev den samma som tidigare. Den största avvikelser till medeltalet blev 7 mm i X-led, 7 mm i Y-led och 18 mm i höjd. Standardosäkerheten blev 3,4 mm för X-koordinaten, 2,4 mm för Y-koordinaten och 8,4 mm i höjd.

Tabell 20. Medeltalet, standardosäkerheten, maxvärdet och minvärdet för medeltalet av 180 observationer. Enheten är meter

	X	Y	Höjd
Medeltal	7000062,049	22479559,479	20,568
Standardosäkerhet	0,0034	0,0024	0,0084
Maxvärde	7000062,056	22479559,483	20,586
Minvärde	7000062,042	22479559,472	20,551
Max-Min	0,014	0,011	0,035

13.2 Sammanfattning av GNSS-undersökningen

Man kan konstatera att om man har GNSS-mottagaren att stå tre sekunder istället för en sekund förminskas den största avvikelser till medeltalet 4 mm i plan och 2 mm höjd, enligt denna undersökning. Standardosäkerheten förbättras däremot med 0,2 mm i plan och 0,4 mm i höjd.

Om man ökar observationstiden till 30 sekunder minskar den största avvikelser med 8 mm i plan och 11 mm i höjd. Standardosäkerheten minskar med 0,6 mm i plan och 1,3 mm i höjd.

I UAV-flygningen hade vi en minuts observationstid. Då förbättras den största avvikelsen med 9 mm i plan och 16 mm i höjd. Standardosäkerheten förbättras med 0,7 mm i plan och 1,6 mm i höjd.

Slutligen om man ökar observationstiden till tre minuter minskar den största avvikelsen till medeltalet 17 mm i plan och 23 mm i höjd. Standardosäkerheten förbättras med 1,1 mm i plan och 2,5 mm i höjd.

Man kan även konstatera att ju längre tid man har för en observation desto mer minskar avvikelsen för observationen. Samtidigt minskar även standardosäkerheten. Avvikelsen och standardosäkerhetens förbättring minskar exponentiellt. Ju längre tid som går desto mindre blir själva förbättringen, men maxfelet och standardosäkerheten blir förstås mindre.

Att anmärka i undersökningen är att den största avvikelsen i Y-led vid tre minuters observationer förbättrades kraftigt mot de andra observationstiderna. För alla observationstider förutom tre minuter var differensen mindre i X-led än Y-led.

14 Slutdiskussion

14.1 Allmänt

Sammanfattningsvis kan jag konstatera att jag har uppnått ett ganska bra resultat med alla undersökningar i detta examensarbete. Jag har använt fotogrammetri och laserskanning för att skapa ytmodeller och sedan analyserat noggrannheten på dessa. Jag har undersökt hur antalet signaler påverkar noggrannheten för ytmodellerna som jag skapade från UAV-flygfotograferingen som utfördes som grund för detta examensarbete. Jag har även undersökt hur tiden påverkar noggrannheten för en GNSS-mottagare.

För noggrannhetsanalysen av ytmodellerna använde jag profiler som mättes med takymeter och resultaten jag fick är trovärdiga, eftersom utgångspunkterna för profilerna blev mätta flera gånger och prismahöjden kontrollerades. Programmet som jag använde för beräkningen av noggrannheten av punktmolnen för ytmodellerna var 3D-Win. Resultatet lades in i en Exceltabell för beräkning av medelavvikelse, standardosäkerhet och max- och minfel.

Oväntat var att noggrannheten för UAV-flygfotograferingen fick bättre noggrannhet än flyglaserskanningen i en av profilerna. Medelavvikelsen blev samma, men standardosäkerheten och maxfelet blev större för flyglaserskanningen. Den profilen var ovanpå en kantsten, alltså var marken ojämn vid profilen. Men flyglaserskanningen hade mycket bättre noggrannhet för den andra profilen vid plan mark. Detta visar att man kan använda UAV-flygfotografering och få en bra noggrannhet på ytmodellen man skapar.

Oväntat var också att 145 m modellerna hade bättre noggrannhet än 70 m modellerna. Men det påverkades av att 70 m modellen var instabil på grund av att 70 m flygningen delades upp i tre sessioner. Även att 70 m hade bara fyra signaler påverkade noggrannheten.

När jag undersökte hur antalet signaler påverkar noggrannheten för ytmodellerna använde jag två program. PIEnearings RapidStation och Agisofts PhotoScan. I RapidStation skapades ytmodellen som två flygningar och i PhotoScan skapades ytmodellen som en flygning. Signalerna delades in i två kategorier: Checkpoints och controlpoints. Checkpoints betyder att signalerna fick noggrannheten 1000 m och controlpoints betyder 0,05 m. Båda programmen hade lite olika resultat, men med båda programmen blev noggrannheten bättre. Ju fler signaler som lades som controlpoints desto bättre blev noggrannheten på modellen.

Jag undersökte även vad som händer om signalerna i söder klassades som controlpoints. I den undersökningen kom det fram att det inte blev bra noggrannhet med bara signaler på en sida av modellen.

I GNSS-undersökningen kom jag fram till att det är bättre ju längre observationstid man har desto bättre noggrannhet och avvikelse får man på sin mätning. Vi utförde undersökningen genom att ha GNSS- mottagaren att stå på skolans tak med observationstiden på en sekund. Detta gjordes ända tills minnet i GNSS-mottagaren tog slut och den totala tiden blev då nästan två timmar. Observationerna lade jag in i en Exceltabell för beräkning. Det som jag beräknade var medeltalet, standardosäkerheten, max- och minvärdet och maxvärdet minus minvärdet.

14.2 Vidare forskning

Ämnen för vidare forskning skulle vara att undersöka noggrannheten för olika placeringar för signalerna i modellen. Man skulle kunna undersöka vilken placering av signalerna som kunde vara bäst för olika former av modeller. Med former menar jag om modellen är kvadratisk eller lång och smal modell.

För själva noggrannhetsanalysen skulle man kunna mäta flera och längre profiler på olika typer av mark. Man skulle kunna se hur bra noggrannhet man får på åkermark eller skogsmark. Jämförelsen med profilerna skulle kunna undersökas i XY-led också.

För GNSS-mätningen skulle en längre totaltid ge en bättre bild på hur noggrannheten förändras med tidpunkten på dygnet. Flera mätningar på olika dagar och olika tidpunkter skulle kunna visa olika avvikningar på noggrannheten. En visualisering på hur koordinaterna förändras skulle visa hur observationerna ”rör” på sig.

14.3 Personliga reflektioner

Med mitt examensarbete har jag lärt mig mycket om att beakta noggrannhetsfaktorer inom olika mätningar. Jag har även lärt mig att se kritiskt på mina resultat och mycket om fotogrammetri och dess användning. Jag har också lärt mig att skapa ytmodeller och ortomosaiker med dataprogram.

Mitt syfte med mitt examenarbete har jag uppnått med mina undersökningar. Jag har gjort noggrannhetsanalyser på ytmodeller skapade med laserskanning och fotogrammetri och undersökt hur antalet signaler påverkar ytmodellerna. Jag har även undersökt hur tiden påverkar GNSS-mätningar på noggrannheten.

Jag vill tacka Mikael Holm från PIEngineering och min lärare Sem Timmerbacka för all hjälp med program och teori. Jag vill också tacka de studeranden från lantmåterilinjen, som hjälpte till vid UAV-flygfotograferingen och vid mätningarna som gjordes. Jag vill även tacka min språkgranskare för hjälpen med texten i examensarbetet. Till sist vill jag tacka min fästmo som hjälpt till när orken att skriva tagit slut.

15 Källförteckning

Björklund A. (2013). *Jämförelse mellan flygburen laserskanning och GNS- mätta punkter*, lärdomsprov. Yrkeshögskolan Novia, lantmåteriteknik, Vasa

CMOS-sensor (u.å)

http://www.canon.se/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/technologies_features/cmos_sensor.aspx (3.3.2015)

Drönare stoppade Brommaflyg (2014)

http://www.svd.se/nyheter/inrikes/dronare-stoppade-brommaflyg_4163089.svd (14.1.2015)

Felkällor vid GNSS-mätning (u.å)

<http://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/GPS-och-geodetisk-matning/GPS-och-satellitpositionering/Metoder-for-GNSS-matning/Felkallor-vid-GNSS-matning/> (16.2.2015)

Glödhet i Sveriges flyg-Mekka (u.å)

http://www.etn.se/index.php?option=com_content&view=article&id=57570 (21.10)

GPS och andra GNSS (u.å)

<http://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/GPS-och-geodetisk-matning/GPS-och-satellitpositionering/GPS-och-andra-GNSS/> (29.1.2015)

Grundläggande fakta- digitalkameror (u.å)

<http://pagina.se/bok/63609266/63609266.pdf> (12.1.2015)

Hallamaa, T., 2014. *Trafi suunnittelee ilmailumääräyksiä miehittämättömille ilma-aluksille*

http://yle.fi/uutiset/trafi_suunnittelee_ilmailumaarayksia_miehittamattomille_ilma-aluksille/7622032 (13.1.2015)

Lantmateriet (2009). *Flygburen laserskanning*

http://www.lantmateriet.se/Global/Kartor%20och%20geografisk%20information/H%C3%B6jddata/Nyhetsbrev/2012/Flygburen%20laserskanning_info_blad-14%5B1%5D.pdf (hämtat 16.9.2014)

Lantmateriet m.fl (2013). *Geodetisk och fotogrammetrisk mättnings- och beräkningsteknik*

<http://www.lantmateriet.se/globalassets/om-lantmateriet/var-samverkan-med-andra/handbok-mat--och-kartfragor/utbildning/kompendium20131028.pdf> (19.1.2015)

Mårtensson S-G. (2012), *Kompendium i Geodetisk mätningsteknik*, kursmaterial, Högskolan i Gävle

Mårtensson S-G., Reshetyuk Y. (2014), *Noggrann och kostnadseffektiv uppdatering av DTM med UAS för BIM*. Rapport, Trafikverket, Borlänge

Network RTK (u.å)

http://uk.smartnet-eu.com/network-rtk_221.htm (3.2.2015)

Nordkvist, K & Olsson, H. (2012). *Laserskanning och digital fotogrammetri i skogsbruket*. Arbetsrapport. Sveriges lantbruksuniversitet. Institutionen för skoglig resurshushållning

Nordkvist K., Sandström E., Reese H. & Olsson H. (2013) *Laserskanning och digital fotogrammetri i skogsbruket*, lärdomsprov, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig resurshushållning, Umeå

Nämnden för skoglig fjärranalys (1993) *Flygbildsteknik och fjärranalys*. Stockholm: Italgraf.

Nätverks-RTK (u.å)

<http://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/GPS-och-geodetisk-matning/GPS-och-satellitpositionering/Metoder-for-GNSS-matning/Natverks-RTK/> (3.2.2015)

Octocopters (u.å)

<http://www.wowhobbies.com/octocopter.aspx> (6.3.2015)

Olsson P-O. (2009). *Digitala höjddata och höjdsystem. Insamling av höjddata med fokus på flygburen laserskanning.*, lärdomsprov, Lunds Universitet, Lund

Om Laserskanning (u.å)

<http://www.mattjanst.se/sv/laserskanning/> (14.4.2015)

Rektifiera (u.å)

<http://gisela.humangeo.su.se/Rektifiera.ashx> (12.1.2015)

Satellitmätning eller GPS-mätning (u.å)

<http://www.maanmittauslaitos.fi/sv/kartor-40> (29.1.2015)

Terrängmodeller (u.å.)

http://www.terratec.se/terrangmodeller/cms/73/24/hent_artikkel/91 (11.3.2015)

Understanding The RC Quadrocopter / Multi Rotor (u.å.)

<http://www.rchelicopterfun.com/quadrocopter.html> (21.10)

Unmanned Aerial Vehicle (u.å.)

<http://www.theuav.com/> (11.9)

VRS (u.å.)

<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/en/home/products/services/swipos/gis-geo/vrs.html> (16.2.2015)

What is a virtual reference station and how does it work? (u.å.)

<http://www.insidegnss.com/node/2687> (3.2.2015)

What is GNSS? (u.å.)

<http://egnos-portal.gsa.europa.eu/discover-egnos/about-egnos/what-gnss> (29.1.2015)

What is photogrammetry (u.å.)

<http://www.geodetic.com/v-stars/what-is-photogrammetry.aspx> (9.1.2015)

Which is better? It's complicated... (u.å.)

<https://www.teledynedalsa.com/imaging/knowledge-center/appnotes/ccd-vs-cmos/>
(3.3.2015)

15.1 Figurkällor

Figur 1

http://www.nateko.lu.se/Courses/EXTA50/F%C3%B6rel%C3%A4sningar/F17_Introduktion%20till%20fotogrammetrin%202014.pdf (26.1.2015)

Figur 2

http://www.cmosis.com/assets/images/distributors/CMOSIS_presents_-_Leica_MAX_24MP_CMOS_Sensor.jpg (3.3.2015)

Figur 3

http://www.nateko.lu.se/Courses/EXTA50/F%C3%B6rel%C3%A4sningar/F17_Introduktion%20till%20fotogrammetrin%202014.pdf (26.1.2015)

Figur 4

<http://www.lantmateriet.se/globalassets/om-lantmateriet/var-samverkan-med-andra/handbok-mat--och-kartfragor/utbildning/kompendium20131028.pdf> (26.1.2015)

Figur 5

Mårtensson S-G., Reshetyuk Y. (2014), *Noggrann och kostnadseffektiv uppdatering av DTM med UAS för BIM*. Rapport, Trafikverket, Borlänge

Figur 6

<http://www.unmanned.co.uk/wp-content/uploads/2011/07/Gatewing-UAV.jpg> (5.3.2015)

Figur 7

<http://www.jamcopters.cz/images/products/normal/quadrocopter-l4-45.jpg> (5.3.2015)

Figur 8

<http://www.lantmateriet.se/globalassets/om-lantmateriet/var-samverkan-med-andra/handbok-mat--och-kartfragor/utbildning/kompendium20131028.pdf> (18.1.2015)

Figur 9

Mårtensson S-G. (2012), *Kompendium i Geodetisk mätningsteknik*, kursmaterial, Högskolan i Gävle

Figur 10

http://uk.smartnet-eu.com/network-rtk_221.htm (3.2.2015)

Figur 11

<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/en/home/products/services/swipos/gis-geo/vrs.html> (16.2.2015)

Figur 12

[http://www.packnyheter.se/images/laserscanning02-net\(1\).jpg](http://www.packnyheter.se/images/laserscanning02-net(1).jpg) (18.1.2015)

Figur 13

<http://www.lansstyrelsen.se/dalarna/SiteCollectionDocuments/Sv/Publikationer/Rapporter-2009/09-09.pdf> (17.9.2014)

Figur 14

<http://www.lansstyrelsen.se/dalarna/SiteCollectionDocuments/Sv/Publikationer/Rapporter-2009/09-09.pdf> (17.9.2014)

Figur 15

<http://www.lansstyrelsen.se/dalarna/SiteCollectionDocuments/Sv/Publikationer/Rapporter-2009/09-09.pdf> (17.9.2014)

Bilagor

Bilaga 1:

