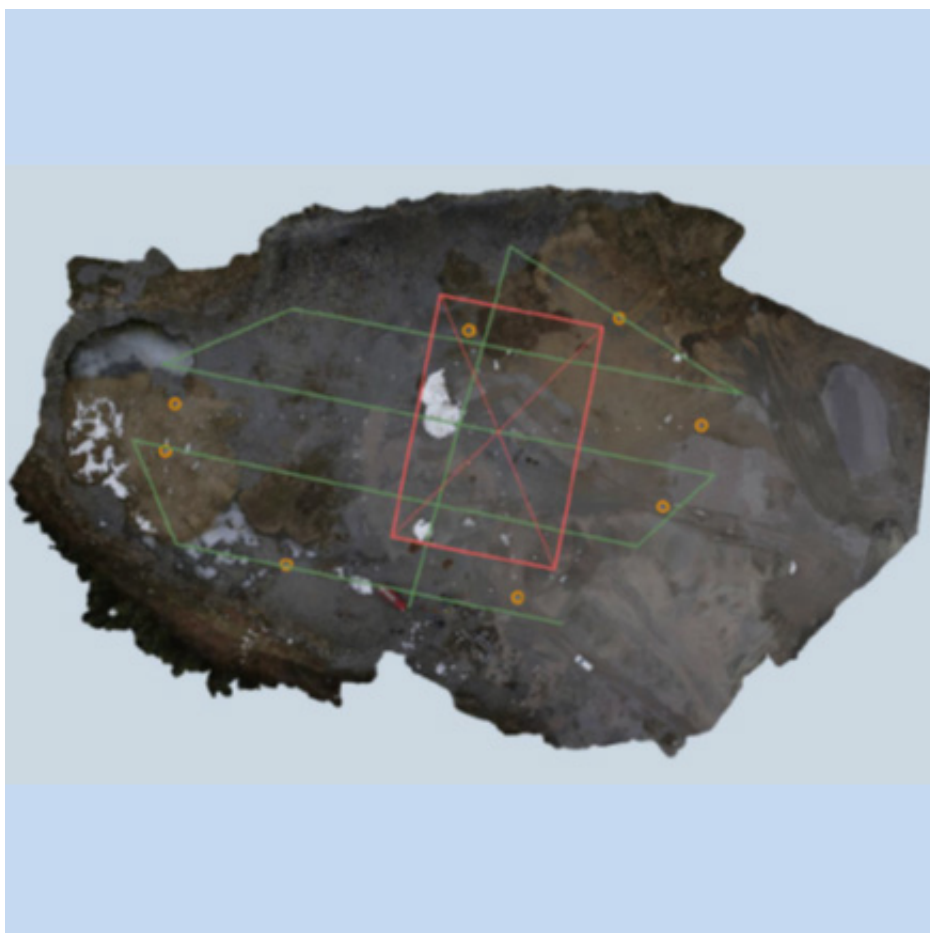


MÄTNING OCH MODELLERING MED OBEMANNNADE LUFTFARTYGC (UAS) OCH FOTOGRAMMETRI

RAPPORT 2015:154



Mätning och modellering med obemannade luftfartyg (UAS) och fotogrammetri

Utvärdering av noggrannhet för tillämpning på
fyllningsdammar

MARTIN SVENSSON, SPOTSCALE AB

ISBN 978-91-7673-154-3 | © 2015 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

I projektet har fotogrammetrisk modellering och mätning testats med avseende på om det skulle kunna vara användbart för övervakning eller tillståndskontroll av fyllningsdammar. I den fas som rapporteras här har fokus varit på om en noggrannhet som är tillräcklig för tillämpning på dammar kan nås.

Uppdraget har utförts av Spotscale AB som arbetar med 3D-modellering och visualisering av byggd miljö baserad på kvalificerad bildanalys. En teknik som de också utvecklar mot fotogrammetri som innebär att man skapar modeller som går att mäta i och där man kan se geometriska förändringar i jämförande modeller. Modellerna skapas baserat på fotografering med kameror bärda av obemannade luftfartyg (UAS), georeferering samt algoritmer för bildanalys.

Utvärderingen visar att man kan nå en modellosäkerhet under 2 cm. Förutom att en högupplöst 3D-modell skapas av dammen är potentialen med tekniken att den skulle kunna användas för att identifiera "långsamma" lokala förändringar såsom sättningar i dammkroppen eller erosion på slänter. Det görs i så fall med upprepade jämförande mätningar där förändringar blir synliga som avvikelser i ytans höjdkoordinater mellan de modeller som skapas.

Vilken potentiell nytta denna möjlighet kan innebära med avseende på övervakning eller tillståndskontroll av dammar i förhållande till den kostnad (återupprepade flygningar) och de praktiska utmaningar som kan finnas (t.ex, väder och vegetation) med att tillämpa tekniken för dammar behöver analyseras djupare.

Projektet har ingått i Energiforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsarbete med medverkan från vattenkraftföretag och Svenska kraftnät.

Stockholm augusti 2015



Cristian Andersson

Sammanfattning

Fotogrammetrisk mätning med obemannade luftfartyg (UAS) blir allt mer vanligt inom ett stort antal olika områden, bland annat som hjälpmedel vid planering av nybyggnationer då terrängen eller området där det ska byggas kan modelleras med hjälp av fotogrammetri. I Sverige finns ett stort antal kraftverksdammar som av säkerhetsskäl tillståndskontrolleras med jämna mellanrum. Att i dessa sammanhang nyttja modeller genererade med fotogrammetri kan vara intressant givet att det ger en digital ytmodell av dammen som är tillräckligt noggrann.

För Energiforsks räkning har Spotscale utvärderat den förväntade noggrannheten hos sina modeller genom att generera en modell av ett mindre område i ett grustag söder om Linköping. Utvärderingen har genomförts genom att samla in data i form av fotografier på flera olika flyghöjder och använda dessa för att generera en digital modell av ytan. Modellens noggrannhet har sedan utvärderats mot ett antal, med totalstation inmätta, kontrollpunkter.

Resultaten visar att det inte är något problem att nå önskat noggrannhetsmål om en osäkerhet under 2 cm på det undersökta området, oavsett om medelavvikelse eller kvadratmedelvärde används som felmått. För att dra någon slutsats om hur osäkerheten blir på en kraftverksdamm krävs att en utvärdering liknande denna genomförs på ett sådant objekt. Spotscale föreslår därför att pilotprojekt på en typisk damm genomförs.

Summary

Photogrammetric measuring with UAS is becoming more and more common within a wide variety of areas, for example as an aid when planning new construction, where the terrain in the intended area of construction can be modeled using photogrammetry.

Sweden has a large number of hydroelectric installations in the form of large dams, which require regular monitoring. To perform this monitoring with photogrammetry-generated models is interesting, given that the accuracy of the model is good enough. Spotscale has, on Energiforsks behalf, evaluated the expected accuracy within their models by generating a model of a smaller area in a quarry south of Linköping. The evaluation has been performed by collecting data on the form of photos taken using a UAS flown on a number of different heights. The photos are then used to generate a digital model of the ground surface. After generation, the accuracy of the model has been evaluated against a number of control points.

Results show that there is no problem reaching the desired accuracy of 2cm in the investigated area. This holds for all the three evaluated methods of measuring accuracy (Standard deviation, Root Mean Square error and average error). To be able to evaluate the accuracy of the model on a dam, further investigation is necessary. Because of this, Spotscale suggests a pilot project where a model of a dam is created and evaluated.

Innehåll

1	Introduktion	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Syfte	7
1.3	Notation	8
1.4	Om fotogrammetrisk mätning med UAS	8
2	Metod	9
2.1	Mätningar i Lökebo bergtäkt	9
2.1.1	Utrustning	9
2.1.2	Inmätning av bakåtpunkter för georeferering	11
2.1.3	Inmätning av stöd- och kontrollpunkter	12
2.1.4	Flygning	13
2.2	Framställning av terrängmodell	14
2.2.1	Detektion av markörer	14
2.2.2	Kalibrering och bestämning av kamerapositioner	14
2.2.3	Framställning av tätt punktmoln	15
2.2.4	Framställning av DEM	15
2.3	Kontroll av terrängmodell	15
3	Resultat och Diskussion	17
3.1	Möjliga felkällor	17
3.2	Osäkerhet i stationsetableringen	17
3.3	Residualer i stöd- och kontrollpunkter efter kamerapositionering	17
3.3.1	Residualer (ε) på inmätta stödpunkter efter positionering av kamerorna.	17
3.3.2	Residualer (ε) på inmätta kontrollpunkter efter positionering av kamerorna.	18
3.4	Terrängmodell	18
4	Slutsatser	20
5	Pilotprojekt	21
6	Referenser	22

1 Introduktion

1.1 BAKGRUND

Säkerhet för dammar är viktigt för hela samhället och ansvaret för att upprätthålla denna ligger på dammarnas ägare. Geometriska förändringar och sättningar i dammbyggen sker över tid, varför dammarna måste kontrolleras regelbundet. Detta gäller speciellt de 50-tal dammar som är klassade som högkonsekvensdamm. Spotscale har tidigare, via Norconsult, fotografiskt skannat Flåsjödammen med kameraförsedd UAS (obemannad flygfarkost) och skapat en 3D-modell. Detta med syfte att inom en tid genomföra ytterligare en flygning och jämföra modellerna för att mäta eventuella förändringar.

Det finns i dagsläget ett antal olika sätt att mäta geometriska förändringar i kraftverksdamm. För mätning av förflyttning hos ett antal diskreta punkter kan totalstation (lokal mätning) och RTK-GNSS (global positionering) användas och generera mätvärden i dessa punkter med väldigt hög noggrannhet. För mer generell mätning av ytor används ofta lasermätning i kombination med GNSS för att ge en modell i form av ett tätt punktmoln med hög noggrannhet i varje punkt. Lasern kan vara såväl markbaserad som monterad på en helikopter. Att använda satellit för ytmätning är också en metod som blir mer och mer vanlig.

Noggrannheten, eller mer korrekt, osäkerheten när man mäter en yta (oavsett om det görs med laser, satellit eller kamera) påverkas av flera parametrar. Bland dessa finns ytans beskaffenhet, avstånd till mätutrustning, tätheten hos punktmolnet och vilka områden som ligger i "skugga", dvs. områden som saknar mätvärden. Dessa är några exempel på parametrar som kan påverka den slutgiltiga osäkerheten hos terrängmodellen.

Att mäta med hjälp av kameraförsedd UAS kan vara ett kostnadseffektivt sätt att genomföra dessa kontroller under förutsättning att tillräcklig mätnoggrannhet kan garanteras. Detta projekt syftar till att definiera hur några av dessa parametrar påverkar noggrannheten i mätningarna när man använder en högpresterande kamera monterad på en hexakopter.

1.2 SYFTE

Syftet med projektet är att:

1. Beskriva noggrannhet/osäkerhet i ett punktmoln genererat av en kamera buren av en UAS, mer exakt:
 - 1.1. Hur noggrannhet räknas ut i ett punktmoln eller modell.
 - 1.2. Hur noggrannhet räknas ut mellan två mätningar (flera modeller).
2. Bestämma optimalt avstånd (flyghöjd) som måste användas för att uppnå maximal noggrannhet givet kameran sensor och flygmönster.
3. Undersöka hur samplingstätheten påverkar osäkerheten hos modellen.
4. Undersöka hur kontrollpunkternas placering påverkar osäkerheten hos modellen.

5. Utreda hur flygmönstret (i termer av överlapp) påverkar osäkerheten hos modellen.

1.3 NOTATION

DEM – *Digital Elevation Model*: Digital höjdmodell i form av ett antal punkter med höjdvärden. Punkterna kan vara både regelbundet och slumpmässigt utspridda, men det finns bara ett z-värde per xy-koordinat.

GNSS – *Global Navigation Satellite System*: Satellitbaserat positioneringssystem som t.ex. GPS och GLONASS.

Nätverks-RTK – *Real Time Kinematics*: Positioneringssystem baserat på positionsbestämning relativt fast basstationer. Används för att få mer exakta GNSS-positioner.

1.4 OM FOTOGRAMMETRISK MÄTNING MED UAS

Fotogrammetrisk mätning med UAS bygger på att en digitalkamera monteras på en UAS i form av ett modellflygplan (fixed-wing) eller en helikopter (multirotor). Denna flyger sedan i ett mönster över det intressanta området och fotograferar med jämna intervall marken. Flygmönstret och frekvensen med vilken man fotograferar bör vara sådana att rikligt med överlapp mellan bilderna erhålls. Kameran som används är vanligen en vanlig digital konsumentkamera med hög upplösning. För georeferering av det inmätta området används noggrant inmätta referenspunkter markerade med någon form av markör som möjliggör noggrann detektion i bilderna.

Efter fotograferingen framställs DEM med hjälp av algoritmer baserade på datorseende (se stycke 2.2).

2 Metod

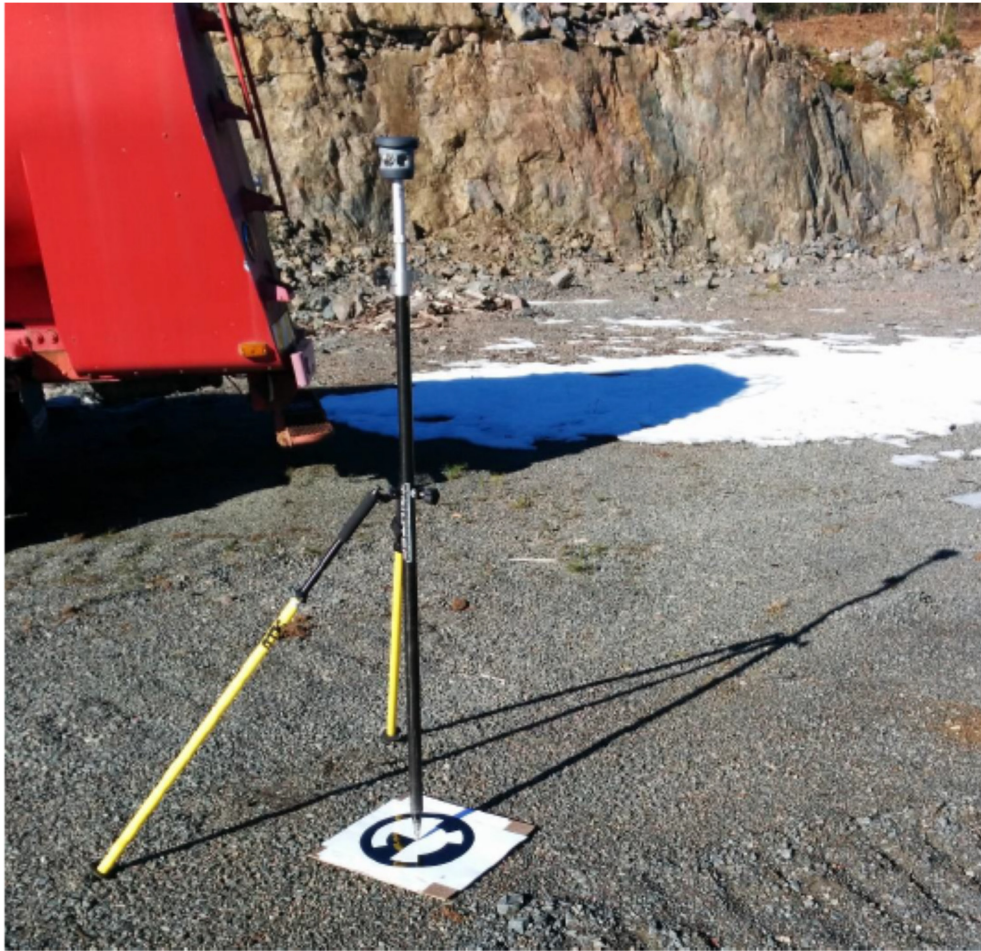
2.1 MÄTNINGAR I LÖKEBO BERGTÄKT

Eftersom de flesta av kraftverksdammarna i Sverige är grus och sten beslutades att samla in testdata vid två separata tillfällen i Lökebo bergtäkt några mil söder om Linköping. Det valda området är cirka 140x70 meter, består av grus och jord samt är mestadels plant. Mellan tillfällena genomfördes databearbetning av resultatet för att användas vid utformningen av inmätningen för flygning 2.

Vädret vid det första måttillfället var soligt med vindhastighet runt 1 m/s, medan det vid det andra tillfället var mulet och det blåste runt 5 m/s med byvindar på upp till 10 m/s.

2.1.1 Utrustning

- Nätverks-RTK för GNSS-mätning, Trimble R10 (Trimble, 2015)
- Totalstation Trimble S6 (Trimble, 2015) med medföljande prisma.
- Bipod för att placera prisma och RTK i lod under mätning.
- UAS + Kamera med fullformatsensor
- Markörer (50st) (se fig. 1)



Figur 1. *Prisma med bipod uppsatt för inmätning av kontrollpunkt (svart-vit markör)*



Figur 2. *Finjustering av prisma med avseende på nedsättningspunkt och lodlinje.*

2.1.2 Inmätning av bakåtpunkter för georeferering

Det första steget i mätningen var inmätning av bakåtpunkter. Detta syftar till att etablera ett antal fasta mätpunkter att använda vid georeferering vid båda mättillfällena. Mer specifikt har de använts för att bestämma totalstationens position. Eftersom det intressanta i denna utvärdering är den interna noggrannheten i modellen är dess globala position mindre viktig. Desto mer viktigt är att modellerna från de båda mättillfällena refereras korrekt mot varandra för att möjliggöra korrekta jämförelser mellan dem. Bakåtpunkterna var alla placerade utanför mätområdet och markerades med rundstavar som slogs ned i marken.

Tillfälle 1

Vid det första mättillfället mättes bakåtpunkterna in med RTK-GNSS först. Efter den initiala inmätningen med RTK-GNSS sattes totalstationen upp och stationsetablering genomfördes med hjälp av de GNSS-koordinater som erhållits genom GNSS-mätningen.

Tillfälle 2

Vid det andra mättillfället genomfördes ingen ny GNSS-mätning. Istället användes de tidigare inmätta bakåtpunkterna för att placera totalstationen i samma koordinatsystem som vid tillfälle 1.



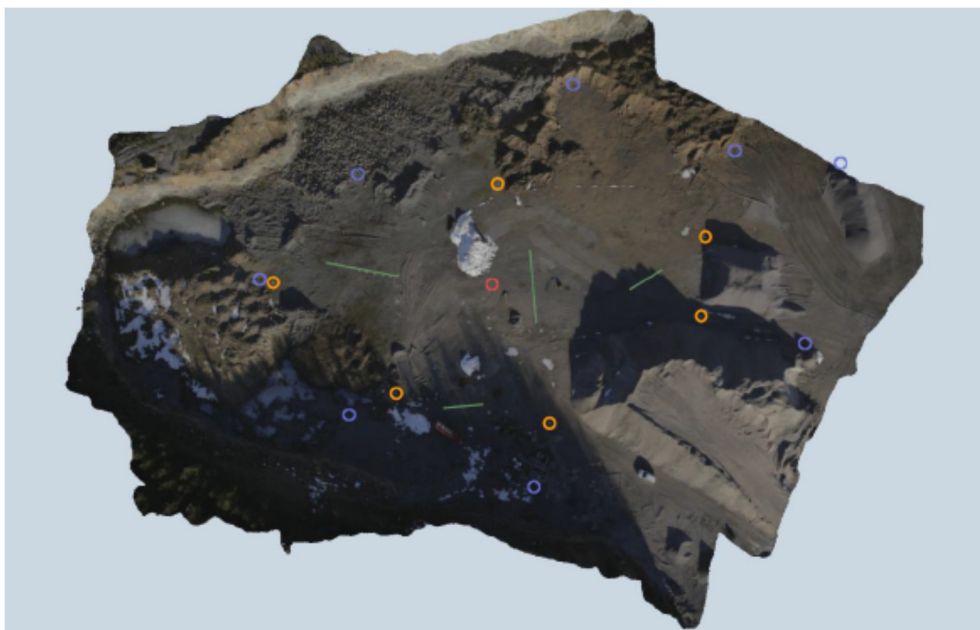
Figur 3. Inmätning med nätverks-RTK av bakåtpunkt markerad med rundstav nedslagen i marken.

2.1.3 Inmätning av stöd- och kontrollpunkter

För markering av stöd- och kontrollpunkter användes cirkulära markörer med tydlig mittpunkt (se figur 1). Vilka markörer som utgör stödpunkter och vilka som utgör kontrollpunkter går att variera, och vid mättillfället är det inget annat än deras placering som avgör skillnaden. Ett antal tänkta kontrollpunkter har vid båda tillfällena placerats i utkanten av området. Totalstationen placerades mitt i området för att alla kontroll-, stöd- och bakåtpunkter skulle vara synliga från den (se figur 4), och för att få så bra precision i mätningarna som möjligt (Trimtec AB, 2013).

Tillfälle 1

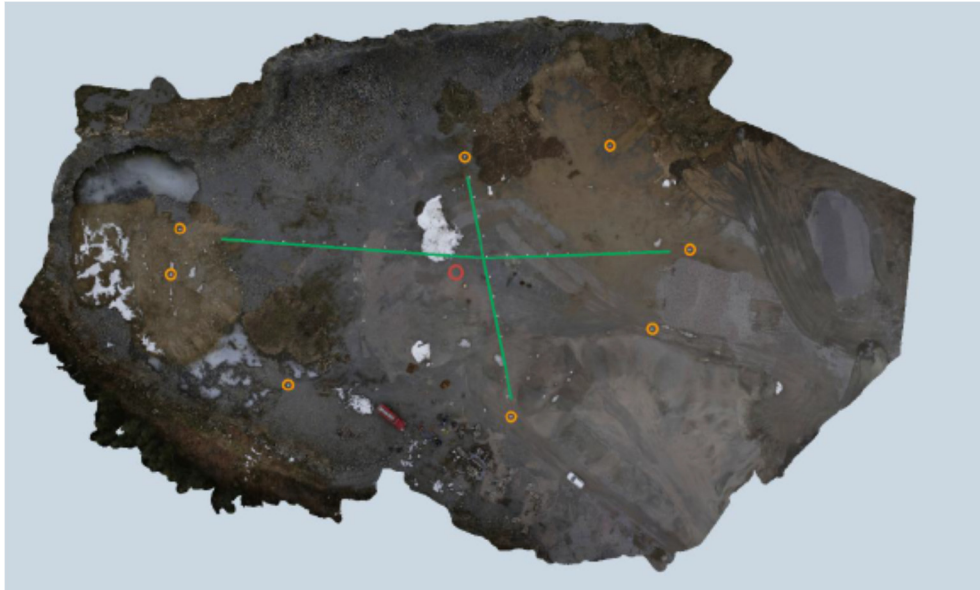
Vid mättillfälle ett var tanken att utvärdera eventuella systematiska fel i modellen och att försöka få fram en noggrannhetsklassning utgående från (SIS-TS 21144:2013)



Figur 4. Texturerad modell genererad från flygtillfälle 1. Den röda cirkeln markerar totalstationens position och de blå de olika bakåtpunkterna som använts. Stödpunkterna har markerats ut som orangea cirklar och kontrollpunkterna ligger längs de gröna linjerna där varje linje motsvarar 10 kontrollpunkter.

Tillfälle 2

Vid tillfälle två placerades ett antal tänkta stödpunkter, i likhet med föregående mättillfälle, i utkanten av området. Merparten av markörerna placerades sedan enligt figur 5 för att se om det fanns några områden i modellen där osäkerheten var högre, samt för att ta reda på hur avståndet från stödpunkterna påverkar noggrannheten i kontrollpunkterna. Exakt samma bakåtpunkter som föregående tillfälle användes för att bestämma totalstationens position, som var ungefär densamma som vid föregående mättillfälle.



Figur 5. Genererad och texturerad terrängmodell med markerade stödpunkter (orange cirklar) och kontrollpunkter (placerade längs gröna linjer med 5m mellanrum). Totalstationens position är även den markerad (röd cirkel)

2.1.4 Flygning

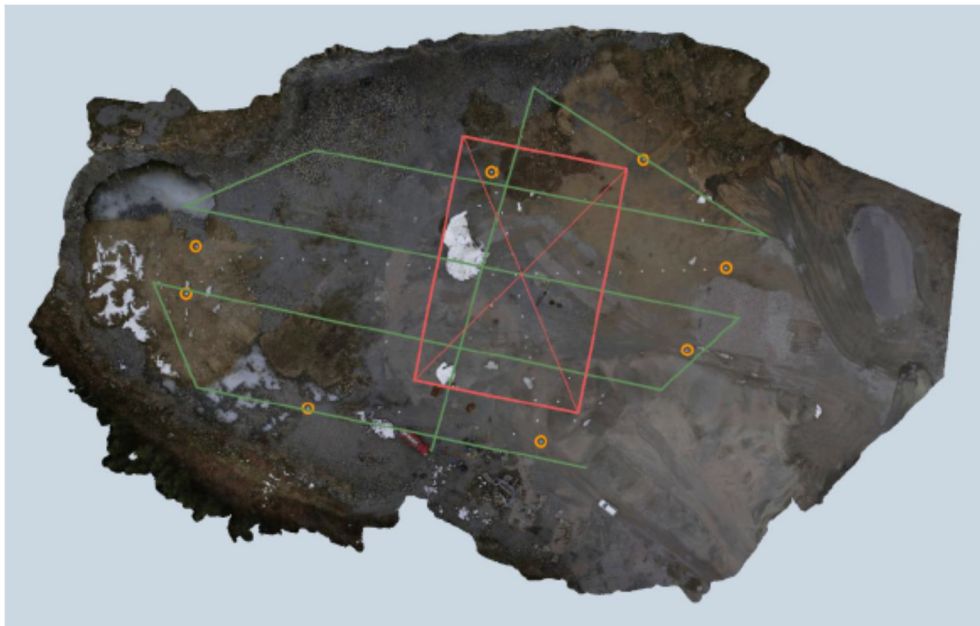
Flygning genomfördes på höjderna 25, 35 och 45 meter vid de båda tillfällena. Vid tillfälle två flögs även på 55 meters höjd. Flygmönstret var utformat för att täcka in hela området (se figur). Vad beträffar överlapp mellan flygningar så är detta direkt beroende av flyghöjden, där en högre flyghöjd ger bättre överlapp på bekostnad av upplösning. Upplösningen på marken, d.v.s. hur mycket av marken som syns i varje kamera, är direkt beroende av flyghöjden och den kamera som används. I det här fallet blev resultatet att varje bild i höjdlängd täcker in en sträcka som är densamma som flyghöjden. Detta innebär att, på 45 meters höjd täcker bilderna in ett område om 67,5x45 meter.

Tillfälle 1

Vid inmätningstillfälle 1 flögs på höjderna 25, 35 och 45 meter.

Tillfälle 2

Vid inmätningstillfälle 2 flögs på höjderna 25, 35, 45 och 55 meter. Denna extra flyghöjd genomfördes p.g.a. att det var flyghöjden 45 meter som gav mest lovande resultat vid den tidigare insamlingen och att det därför var relevant att undersöka om det fanns möjlighet att få bättre resultat på en högre flyghöjd.



Figur 6. Figur med flygmönster från flygtillfälle två med flygmönster markerat i grönt och synfältet hos en kamera på 45 meters höjd markerad i rött.

2.2 FRAMSTÄLLNING AV TERRÄNGMODELL

Framställningen av terrängmodellen genomfördes i fyra steg: Detektion av markörer, kamerakalibrering, bestämning av kamerapositioner och tät bildmatchning.

2.2.1 Detektion av markörer

Detektion och avkodning av markörerna skedde automatiskt. I de bilder som markörerna var synliga men inte kunde detekteras automatiskt markerades de för hand i bilderna. De markörer som utgör stödpunkter fick även sina 3D-koordinater angivna.

2.2.2 Kalibrering och bestämning av kamerapositioner

Kalibrering av kameran kan utföras innan flygning men kan även ske i samband med att kamerapositionerna räknas fram. I det här fallet har kameran förkalibrerats, och kalibreringen har sedan förfinats i samband med att positionerna räknades ut. Med kamerapositioner menas här den position och riktning kameran var positionerad i när respektive bild togs. Dessa räknas fram genom att detektera ett antal intressepunkter (features) i bilderna och sedan med matchningsalgoritmer bestämma dessa intressepunkters position i 3D, tillsammans med positionerna av kamerorna i det ögonblick bilderna togs (eng: Structure from Motion, SfM). Det är även inför detta steg som stödpunkterna detekteras i bilderna och deras position ges som inparameter i positionsbestämningen. Slutligen fås ett glest punktmoln där varje 3D-punkt korresponderar mot ett antal intressepunkter i bilderna.

I detta steg fås även residualer (avvikelser) på både stöd och kontrollpunkter. Detta görs genom att skatta markörens 3D-position med hjälp av dess position i bilderna. De här residualerna kan sedan användas för att ge en bild av förväntad osäkerhet hos den slutgiltiga modellen.

2.2.3 Framställning av tätt punktmoln

Efter att kamerornas position bestämts sker konstruktion av ett tätt punktmoln. Detta görs genom att ett antal bilder väljs ut och så kallad tät matchning används för att få fram en djupkarta från varje bild. De genererade djupkartorna används sedan för att ta fram ett tätt punktmoln, vilket då utgör terrängmodellen. Detta täta punktmoln kan sedan rasteriseras eller trianguleras för att få en DEM eller mer generell modell med önskad upplösning.

2.2.4 Framställning av DEM

Från det täta punktmolnet är det sedan möjligt att generera DEM med önskat format och upplösning. I den här studien har DEM med upplösningar på 5, 10 och 15 cm utvärderats för att undersöka hur upplösningen hos modellen påverkar resultatet. Det är genom att mäta kvaliteten hos DEM som de olika punktmolnens kvalitet har studerats.

2.3 KONTROLL AV TERRÄNGMODELL

Vid kontroll av terrängmodeller undersöks hur väl höjden på modellen i kontrollpunkternas plankoordinater stämmer överens med den inmätta höjden i kontrollpunkterna. Från dessa skillnader har sedan lämpliga osäkerhetsmått beräknats. Vid val av osäkerhetsmått har både standarden för byggmätning (SIS-TS 21144:2013) och resultat från (Mårtensson & Reshetyuk, 2014) tagits i beaktning. Notation har även den valts i enlighet med (Mårtensson & Reshetyuk, 2014).

Avvikelsen av en undersökt punkt, Ah , fås genom att ta höjdvärdet i terrängmodellen, Th , och från detta subtrahera höjdvärdet i kontrollpunkten, Kh .

$$Ah = Th - Kh \quad (1)$$

Medelavvikelsen, Ah_m , hos n stycken inmätta punkter ges då av (2) och visar storleken av eventuella systematiska fel hos de undersökta punkterna.

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

RMS, eller medelfelet (σ) visar spridningen hos de undersökta punkterna i förhållande till kontrollpunkterna.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ah_i^2} \quad (3)$$

Standardavvikelsen (standardosäkerheten)(S) för n undersökta punkter visar hur stor spridningen är bland dessa punkter.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Ah_i - Ah_m)^2} \quad (4)$$

Enligt (SIS-TS 21144:2013) är det medelavvikelsen, Ah_m hos de uppmätta kontrollpunkterna som är avgörande för vilken noggrannhetsklassning modellen tillhör, men (Mårtensson & Reshetyuk, 2014) förespråkar istället det kvadratiska medelvärde (RMS) som ett mer tillförlitligt felmått.

3 Resultat och Diskussion

3.1 MÖJLIGA FELKÄLLOR

Överlag är residualer och avvikelser i både kontroll och stödpunkter högre för modeller genererade under mättillfälle ett. Detta beror med största sannolikhet på att under tillfälle ett var marken frusen på morgonen för att sedan tina upp under dagen. Detta kan ha påverkat mätnoggrannheten i de kontrollpunkter som uppmättes under mättillfälle ett, vilket gör att de kanske inte ger en helt sann bild av modellens osäkerhet. För mättillfälle två fanns inga liknande felkällor.

Vad gäller vädrets påverkan på resultatet så var även det bättre under mättillfälle två. Detta eftersom mulet väder ger en jämnare belysning, vilket minskar risken för under- eller överexponerade områden i bilderna och ökar prestanda hos bildmatchningsalgoritmerna.

3.2 OSÄKERHET I STATIONSETABLERINGEN

Osäkerheten i totalstationsetableringen redovisas nedan. Osäkerheten i stationsetableringen ger en indikation på hur stort fel i en jämförelse mellan modeller från de olika mättillfällena som går att härleda till positioneringen av modellerna relativt varandra. Tabellen nedan visar den estimerade osäkerheten hos stationsetableringen som kunde avläsas från medföljande programvara (referens totalstation). Dessa osäkerheter går antagligen att reducera ytterligare om fler bakåtpunkter används. I ett scenario där en damm ska mätas är det mycket viktigt att osäkerheten i stationsetableringen är låg.

Tabell 1. Uppmätt osäkerhet i totalstationens position i de olika väderstrecken samt höjd. Dessa värden avspeglar hur pass väl modellen har gått att passa in i det globala koordinatsystemet. Alla mått är givna i meter.

Mättillfälle	Antal bakåtpunkter.	RMS_N	RMS_E	RMS_H	RMS_{tot}
Tillfälle 1	8	0,003	0,003	0,003	0,003
Tillfälle 2	8	0,003	0,003	0,002	0,003

3.3 RESIDUALER I STÖD- OCH KONTROLLPUNKTER EFTER KAMERAPOSITIONERING

I tabellerna nedan visas uppmätt medel-RMS och maxfel i respektive ledd. Noterbart är att residualerna är högre vid mättillfälle ett än vid mättillfälle två för kontrollpunkterna..

3.3.1 Residualer (ϵ) på inmätta stödpunkter efter positionering av kamerorna.

För de inmätta stödpunkterna syns tydligt att flyghöjden inte påverkar dessa nämnvärt. Något som däremot är intressant är att för tillfälle två är residualerna i höjddled större än i planet.

Tabell 2. Resulterande hösta uppmätta värden på residualer (ϵ), samt medelfel för dessa (RMS) i stödpunkter uppmätta efter kamerapositionering. Samtliga värden är angivna i meter.

Flygning	Antal Stödp.	RMS_N	RMS_E	RMS_H	$ \epsilon_N _{max}$	$ \epsilon_E _{max}$	$ \epsilon_H _{max}$
Tillfälle 1 25m	6	0,003	0,001	0,002	0,007	0,003	0,003
Tillfälle 1 35m	6	0,007	0,004	0,005	0,016	0,006	0,008
Tillfälle 1 45m	6	0,003	0,003	0,003	0,005	0,006	0,007
Tillfälle 2 25m	8	0,002	0,002	0,004	0,003	0,003	0,008
Tillfälle 2 35m	8	0,003	0,006	0,007	0,005	0,010	0,015
Tillfälle 2 45m	8	0,003	0,003	0,006	0,005	0,004	0,010
Tillfälle 2 55m	8	0,008	0,003	0,012	0,015	0,007	0,022

3.3.2 Residualer (ϵ) på inmätta kontrollpunkter efter positionering av kamerorna.

För kontrollpunkterna finns större skillnader mellan flyghöjder och en flyghöjd på 45m har gett lägst residualer i modellen vid båda mättillfällena. Värt att notera är att medel-RMS hos residualerna i höjddled för 45-meters flygningen tillfälle 2 är så låga som 8mm.

Tabell 3. Resulterande högsta uppmätta värden på residualer (ϵ), samt medelfel för dessa (RMS), i kontrollpunkterna efter kamerapositionering. Samtliga värden är angivna i meter.

Flygning	Antal Kontrollp.	RMS_N	RMS_E	RMS_H	$ \epsilon_N $	$ \epsilon_E $	$ \epsilon_H $
Tillfälle 1 25m	44	0,011	0,013	0,010	0,024	0,033	0,020
Tillfälle 1 35m	44	0,013	0,007	0,014	0,028	0,017	0,031
Tillfälle 1 45m	44	0,006	0,008	0,009	0,012	0,019	0,017
Tillfälle 2 25m	42	0,009	0,008	0,016	0,021	0,019	0,033
Tillfälle 2 35m	42	0,006	0,005	0,010	0,016	0,011	0,017
Tillfälle 2 45m	42	0,005	0,005	0,008	0,013	0,014	0,015
Tillfälle 2 55m	42	0,007	0,007	0,014	0,020	0,018	0,027

3.4 TERRÄNGMODELL

Terrängmodeller i form av DEM på Geo-Tiff formatet genererades för flygningarna på 45 meters höjd. Modellerna togs fram i tre olika upplösningar med 5, 10 respektive 15 centimeters upplösning. Anledningen till att 45 meter valdes var att detta var den höjd på vilken förhållandet mellan flyghöjd och överlapp och upplösning var som bäst, och

därmed den höjd som eventuella mätningar av kraftverksdammar kommer att utföras på.

I tabellen nedan visas resultaten av utvärderingen av modellerna i termer av de olika osäkerhetsmått definierade i sektion 2.3 av detta dokument. Det visar sig att det, precis som efter kamerapositioneringen (Tabell 3), är ungefär samma osäkerhet, både i termer av RMS, standardavvikelse (S) och medelfel (Ah) i de båda modellerna. Man kan därmed konstatera att osäkerheten i kontrollpunkterna efter kamerapositioneringen verkar ha gett en bra bild av det förväntade slutresultatet och att storleken på felen i tabellen nedan stämmer väl överens med resultatet i Tabell 3. Att osäkerheten i den höjdmodellen är något högre än efter kamerapositioneringen beror sannolikt på interpoleringen som ägt rum när det täta punktmolnet beräknats. Noterbart är att upplösningen i terrängmodellen inte ser ut att påverka noggrannheten nämnvärt. Detta beror till största sannolikhet på att terrängen var mestadels plan.

Värt att notera är också att medelavvikelsen, som förespråkas som felmått i (SIS-TS 21144:2013) ger att osäkerheten i modellerna är i princip noll, vilket inte alls återspeglar det faktiska fel man skulle kunna förvänta sig i varje punkt av modellen. Det är därför möjligt att dra slutsatsen att RMS-värden säger betydligt mer om osäkerheten hos modellen än medelfelet. Resultaten visar även tydligt att det i det undersökta scenariot inte är några problem att med fotogrammetrisk mätning med UAS ta fram en terrängmodell med en osäkerhet lägre än 15mm, oavsett om RMS; standardavvikelse (S) eller medelfel (Ah) används som felmått.

Tabell 4. Resultater av avvikelser i kontrollpunkter samt RMS och standardavvikelse för dessa. Terrängmodellerna har genererats som höjdraster i tre olika upplösningar.

Flygning	Upplösn.	Antal kontrollp.	RMS_H	S_H	Ah_m	Ah_{min}	Ah_{max}
Tillfälle 1	5cm	44	0,010	0,010	0,001	-0,024	0,012
Tillfälle 1	10cm	44	0,011	0,010	0,001	-0,027	0,012
Tillfälle 1	15cm	44	0,011	0,011	0,001	-0,029	0,011
Tillfälle 2	5cm	42	0,012	0,011	0,000	-0,034	0,008
Tillfälle 2	10cm	42	0,012	0,011	0,000	-0,034	0,009
Tillfälle 2	15cm	42	0,012	0,011	0,000	-0,033	0,009

4 Slutsatser

Resultaten av utvärderingen av terrängmodellerna visar att det på det utvärderade områdena inte varit några problem att nå en modellosäkerhet under 2 cm. De goda marginalerna och det faktum att avståndet till kontrollpunkterna inte tycks påverka noggrannheten hos mätningen, tyder på att även större objekt som t ex en kraftverksdamm kan nå denna noggrannhet. Resultaten visar också att det är möjligt att anpassa flyghöjd och upplösning hos modellen för att få den noggrannhet som krävs.

Vikten av överlapp i flygmönstret bekräftas även det. Främst eftersom bäst resultat erhöles vid 45 meters flyghöjd, trots att upplösningen på marken då blir lägre. Eftersom flygningarna har gjorts längs samma bana vid båda mättillfällena är det därför med största sannolikhet skillnaden i överlapp som gjort att resultatet blivit som bäst vid 45 meters höjd. På 55 meters höjd fås givetvis ännu mer överlapp, mellan bilder, men vinsten av detta verkar inte vara tillräckligt stor för att kompensera för den reducerade upplösningen. Det är dock högst troligt att ett tätare flygmönster skulle ge ett bättre resultat även på de lägre höjderna.

För att sammanfatta så är fördelarna med fotogrammetrisk mätning att:

- De genererade modellerna blir noggranna (osäkerhet < 2cm) och högupplösta (upp till en punkt per 2 cm²) i det täta punktmolnet. Används medelavvikelse som felmått blir felet < 2mm.
- Det är färre problem med skuggning än vid inmätning med marklaser och billigare än med helikopterburen laserscanner.
- Möjligheter till detaljinspektion med högupplösta bilder över hela objektet.
- Möjlighet att anpassa flyghöjd och därmed datamängd och processtid till önskad noggrannhet i genererad modell.

5 Pilotprojekt

I den här studien har noggrannheten för terrängmodeller framtagna med fotogrammetri och med hjälp av en UAS i ett område om ca 140x70 meter utvärderats. Studien har gett en bra insikt i hur väl Spotscales teknik presterar vid fotogrammetrisk inmätning av ett område med krav på hög noggrannhet, samt hur osäkerheten i den resulterande modellen ska utvärderas och tolkas. När det nu visats att önskad noggrannhet med marginal går att uppnå är det önskvärt att utvärdera metoden på ett skarpt projekt. Detta för att få en bekräftelse på att lika goda resultat kan fås även i ett scenario där en faktisk kraftverksdamm undersöks. Anledningen till detta är att det behöver undersökas vad det är för andra utmaningar som finns när det rör sig om ett skarpt projekt i form av en damm, med bland annat icke-kontrollerad miljö och större höjdskillnader än i utvärderingen.

6 Referenser

- Mårtensson, S.-G., & Reshetyuk, Y. (2014). *Noggrann och kostnadseffektiv uppdatering av DTM med UAS för BIM*. Borlänge: Trafikverket.
- SIS-TS 21143:2013. (u.d.). SIS-TS 21143:2013 Byggmätning - Geodesisk mätning, beräkning och redovisning av byggnadsverk och infrastruktur. Stockholm: SIS Förlag AB.
- SIS-TS 21144:2013. (u.d.). SIS-TS 21144:2013. Byggmätning - Specifikationer vid framställning och kontroll av digitala markmodeller. Stockholm: SIS Förlag AB.
- Trimble. (den 2 April 2015). Trimble R10 GNSS. Hämtat från trimble.com:
http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-653969/022543-544E-SWE_TrimbleR10_DS_1014_LR.pdf
- Trimble. (den 2 April 2015). Trimble S6 Totalstation. Hämtat från trimble.com:
http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-213187/022543-098L-SWE_TrimbleS6_DS_0613_LR.pdf
- Trimtec AB. (2013). Trimtec Grundutbildningsmaterial. Trimtec Grundutbildningsmaterial. Sockholm, Sweden: Trimtec AB.

MÄTNING OCH MODELLERING MED OBEMANNADE LUFTFARTYGC (UAS) OCH FOTOGRAMMETRI

I projektet har fotogrammetrisk modellering och mätning testats med avseende på om det skulle kunna vara användbart för övervakning eller tillståndskontroll av fyllningsdammar. I den fas som rapporteras här har fokus varit på om en noggrannhet som är tillräcklig för tillämpning på dammar kan nås. Utvärderingen visar att man kan nå en modellosäkerhet under 2 cm.

Förutom att en högupplöst 3D-modell skapas av dammen är potentialen med tekniken att den skulle kunna användas för att identifiera "långsamma" lokala förändringar såsom sättningar i dammkroppen eller erosion på slänter. Det görs i så fall med upprepade jämförande mätningar där förändringar blir synliga som avvikelser i ytans höjdkoordinater mellan de modeller som skapas.

Vilken potentiell nytta denna möjlighet kan innebära med avseende på övervakning eller tillståndskontroll av dammar i förhållande till kostnad och praktiska utmaningar med att tillämpa tekniken för dammar behöver analyseras djupare.

Projektet har ingått i Energiforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsarbete med medverkan från vattenkraftföretag och Svenska kraftnät.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk