

HMK

- handbok i mät- och kartfrågor

Lägesosäkerhet vid fotogrammetrisk detaljmätning i 3D

Clas-Göran Persson

Teknisk rapport 2013:3



Förord/Sammanfattning

Denna rapport innehåller en analys av examensarbetet "En noggrannhetsundersökning av fotogrammetrisk detaljmätning i stereo" (Andreas Jansson, Karlstads universitet, 2013). Syftet är att bedöma dess användbarhet i arbetet med HMK (Handbok i mät- och kartfrågor).

Det etablerade talesättet "noggrannheten är ungefär 1 pixel i plan och 1,5 pixel i höjd" visas försvara sin plats som generell tumregel. Genom användning av laserdata – i stor mängd – som höjdstöd kan dock höjdbestämningen förbättras avsevärt i förhållande till denna regel.

Rapporten utgör den tredje i den nya skriftserien "Tekniska rapporter" inom ramen för HMK. Där kommer analyser, bakgrundsfakta, referensmaterial etc. att publiceras, vilket förhoppningsvis ökar förståelsen och gör det möjligt att gå mer "rakt på sak" i de regelrätta handbokstexterna.

[Samlade förord](#)

Abstract

This report deals with uncertainty in photogrammetric, stereoscopic measurements. An analysis of the diploma thesis "En noggrannhetsundersökning av fotogrammetrisk detaljmätning i stereo" by Andreas Jansson, 2013, is carried out and its possible use in the work with HMK (Handbook in Surveying and Mapping) is evaluated.

An accuracy of 1 pixel horizontally and 1.5 pixel vertically is shown to be a useful rule-of-thumb.

Key words: GNSS, digital photogrammetry, uncertainty in measurement.

Författarens kontaktuppgifter

Clas-Göran Persson
Kungliga Tekniska Högskolan (KTH)
Drottning Kristinas väg 30
SE - 100 44 Stockholm
och
Lantmäteriet
SE - 801 82 Gävle
clas-goran.persson@lm.se
+46-70-557 6037

Innehållsförteckning

1	Syfte	4
2	Terminologi	4
3	Examensarbetet	4
4	Problemställningar	5
5	Analys	6
5.1	Från variationsvidd till standardavvikelse	6
5.2	GNSS-mätningar	7
5.3	Fotogrammetriska mätningar	9
5.4	Jämförelse GNSS vs. fotogrammetri	10
5.4.1	Korrigerig av RMS-värden.....	10
5.4.2	Total standardosäkerhet i plan	11
5.4.3	Total standardosäkerhet i höjd	12
5.4.4	Standardosäkerhet vid blocktriangulering	14
5.4.5	Sammanställning.....	16
6	Slutsatser	16
7	Förslag till HMK-text	17
8	Referenser	18

1 Syfte

Denna rapport innehåller en analys av examensarbetet "En noggrannhetsundersökning av fotogrammetrisk detaljmätning i stereo" (Jansson, 2013). Syftet är att bedöma dess användbarhet inom ramen för HMK (Handbok i mät- och kartfrågor).

Huvudsyftet – både med examensarbetet och denna analys – är att bedöma om följande tumregel håller för modern, digital fotogrammetri: "Noggrannheten vid fotogrammetrisk detaljmätning är ungefär 1 pixel i plan och 1,5 pixel i höjd".

2 Terminologi

GUM – *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* – är en internationellt framtagen standard för att uttrycka mätosäkerhet. Bakom konceptet GUM står ett konsortium av sju organisationer, bl.a. ISO (ISO/IEC, 2008). Det har fått stor spridning inom många branscher – dock inte inom svensk mätningsteknik, än så länge.

GUM ger tydliga kvalitetsdeklarationer som kan förstås av alla. Detta sätt att redovisa mätosäkerhet är såväl terminologiskt stringent som pragmatiskt och praktiskt inriktat. GUM tillämpas genomgående i HMK-arbetet och därför också i denna rapport. Konceptet beskrivs utförligare i Persson (2010).

En viktig skillnad är alltså *mätosäkerhet* i stället för *noggrannhet* som överordnad term, men även *standardosäkerhet* i stället för *medelfel*. För spridning kring ett medelvärde används den vedertagna benämningen *standardavvikelse*, som då är synonymt med *standardosäkerhet*. Inom mätningstekniken finns även termen *punktmedelfel*, som översätts till *standardosäkerhet i plan*. Om mätningen avser en positionsbestämning, dvs. bestämning av ett läge, används *lägesosäkerhet* som överordnad term.

Även om det inte har med GUM att göra så har även terminologin kring hur vi benämner koordinaterna i våra referenssystem "HMK-anpassats". Där används *Northing (N)*, *Easting (E)* och *Höjd (H)* i stället för examensarbetets X, Y och Z.

I analysen översätts således terminologin till den ovan beskrivna.

3 Examensarbetet

Examensarbetet avser – som titeln anger – att studera noggrannheten (mätosäkerheten/lägesosäkerheten) vid fotogrammetrisk detaljmätning. Arbetet utfördes av Andreas Jansson på Karlstads universitet och redovisades i juni 2013. Det baserades på mätningar i Jönköping, Norrköping och Skellefteå. Extern handledare var Jan Wingstedt, Jönköpings kommun.

De typer av mätningar som ingår i studien är fotogrammetriska mätningar i Espa-systemet samt – som kontroll – GNSS-mätningar med Nätverks-RTK mot SWEPOS. Underlagsmaterialet utgjordes av digitala flygbilder i olika upplösningar – dels Lantmäteriets standardbilder med upplösningen 250-500 millimeter, dels kommunala bilder i området 60-120 millimeters upplösning.

Ett 60-tal kontrollpunkter mättes med GNSS/RTK och ungefär dubbelt så många fotogrammetriskt – eftersom samma punkt mättes i flera bilder/upplösningar. Den fotogrammetriska mätningen i plan utfördes manuellt medan höjdmätningen skedde med automatisk bildmatchning. Data från blocktrianguleringarna redovisas men ingår inte explicit i studien.

4 Problemställningar

Först ska framhållas att examensarbetet är mycket värdefullt. Mätningarna är omsorgsfullt utförda och beräkningsgången är tydligt redovisad. Analysen i denna rapport ska ses som en kvalitetssäkring snarare än en granskning. Den avser att verifiera och styrka examensarbetets slutsatser, som i sig är korrekta. Det finns dock några "terminologiska skavanker" och avsteg från den traditionella statistiska formelapparaten.

De första otydligheterna finns redan i tumregeln "Noggrannheten vid fotogrammetrisk detaljmätning är ungefär 1 pixel i plan och 1,5 pixel i höjd".

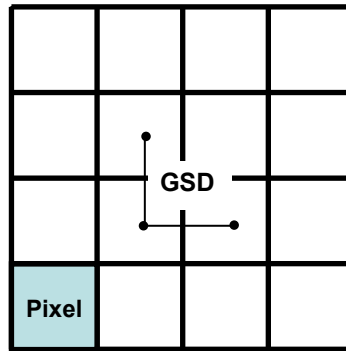
Hur *noggrannhet* mäts framgår inte tydligt. En mer stringent skrivning får man genom att ersätta *noggrannhet* med **standardosäkerhet** (för det är nog det, dvs. *medelfel*, som regeln egentligen avser).

Dessutom ska den 1-dimensionella lägesosäkerheten/noggrannheten) – såväl i höjd som, radiellt, i plan – relateras till en 2-dimensionell *pixel*, dvs. ett kvadratisk bildelement i två dimensioner. 1D ska alltså jämföras med 2D.

Exempelvis betyder "Pixelstorleken 60 millimeter" egentligen att pixeln (*bildelementet*) är 60x60 millimeter, eftersom den är kvadratisk. Bättre är att gå över till *GSD* (*Ground Sampling Distance*) – som är avståndet mellan två pixlar på marken, mätt "lodrätt" eller "vågrätt", se Figur 1. Detta är ett sant 1D-mått.

Med små förändringar, och anpassning till modernt GUM-språkbruk, får vi omformuleringen:

- Standardosäkerheten i plan ligger i nivå med flygbildens geometriska upplösning, mätt som *GSD*.
- Standardosäkerheten i höjd ligger i nivå med flygbildens geometriska upplösning (*GSD*) multiplicerad med 1,5.



Figur 1. Definitionen av "pixel" och "GSD".

Detta kan låta litet övernitiskt, men det torde vara på sin plats att skärpa upp hur tumregeln formuleras samtidigt som vi analyserar dess giltighet.

Så långt, allt väl. Men problemet är att i examensarbetet används några egna definitioner på lägesosäkerhet/noggrannhet, inte standardosäkerhet (medelfel). Där tillämpas i stället *variationsvidd* – eller *variationsbredd* – dvs. skillnaden mellan största och minsta värdet. Det finns även andra otydligheter som bör verifieras.

5 Analys

Det har i analysen inte ingått att utföra beräkningar från "scratch" – dvs. att gå tillbaka till rådata (som i och för sig har gjorts tillgängliga). I stället har noggrannhets-/lägesosäkerhetsmått i möjligaste mån räknats om schablonmässigt utifrån kända eller framtagna samband mellan olika statistiska storheter. Rimligheten i omräkningarna har sedan stickprovsmässigt verifierats mot rådata.

5.1 Från variationsvidd till standardavvikelse

I detta avsnitt behandlar vi uteslutande spridning kring ett medelvärde, varför vi kan använda den mer bekanta termen *standardavvikelse* i stället för standardosäkerhet. Vid normalfördelning finns ett samband mellan standardavvikelse och variationsvidd, se Tabell 1.

Tabell 1. Sambandet mellan standardavvikelse (s) och variationsvidd (v) för normalfördelade data. 100000 simuleringar.

Antal observationer	Variationsvidd
2	$v = 0,56 \cdot s$
3	$v = 0,85 \cdot s$
4	$v = 1,03 \cdot s$
5	$v = 1,16 \cdot s$
6	$v = 1,27 \cdot s$

Denna tabell har åstadkommit genom Monte Carlo-simulering och gör det möjligt att räkna om examensarbetets variationsvidder till standardavvikelse (medelfel). Det är formlerna för tre observationer (GNSS-mätning) och fem observationer (fotogrammetriska mätningar) som behöver tillämpas.

Vi får:

- För tre observationer motsvarar variationsvidden v en standardavvikelse på $s = v / 0,85$.
- För fem observationer motsvarar variationsvidden v en standardavvikelse på $s = v / 1,16$.

Det innebär - lyckligtvis! - att examensarbetets osäkerhetsmått ligger ganska nära de vedertagna måtten. Formlerna kan appliceras var för sig på examensarbetets storheter X (*Northing*), Y (*Easting*) och Z (*Höjd*), för att överföra variationsvidder till standardavvikelsena s_N (standardavvikelsen i *Northing*), s_E (standardavvikelsen i *Easting*) och s_H (standardavvikelsen i *Höjd*).

Vad gäller standardosäkerheten i plan (punktmedelfel) så har storheten R (radiellt) i examensarbetet beräknats på ett sätt som har ett annat samband till standardosäkerheten än det som redovisas i Tabell 1. Men i stället för att härleda/simulera även detta samband utnyttjar vi i stället följande formel för s_p (standardavvikelsen i *Plan*)

$$s_p = \sqrt{s_N^2 + s_E^2} \quad (1)$$

där s_N och s_E beräknas ur variationsvidden på det sätt som beskrivs i föregående avsnitt.

5.2 GNSS-mätningar

Tabell 2 är en omräkning av GNSS-mätningarnas (RTK-mätningarnas) spridningsmått, från variationsvidd till standardosäkerhet, se avsnitt 4.2 i examensarbetet.

Tabell 2. Standardosäkerhet i RTK-mätningarna. Enhet: millimeter.

	Plan	Höjd
Jönköping	44	34
Norrköping	20	26
Skellefteå	19	20
Totalt	30	28

Tabellen visar att standardosäkerheten i RTK-mätningarna ligger på nivån 30 millimeter både i plan och höjd. I plan är det lite i överkant mot vad man brukar få, men det viktigaste här är att bedöma om kontrollpunkterna kan betraktas som felfria eller inte.

Standardosäkerheten avser en **enskild mätning**, men det som används i den fortsatta analysen är **medeltalet** av de tre GNSS-mätningarna. Om mätningarna är *okorrelerade* ges medeltalets standardosäkerhet av uttrycket

$$s_{medeltal} = s_{enskild} / \sqrt{n} = s_{enskild} / \sqrt{3} \quad (2)$$

där n är antalet upprepade mätningar.

Det är svårt att säkert veta hur okorrelerade GNSS-mätningarna är i realiteten, även om det förfarande med återbesök som har tillämpats talar för det. Man borde dock ändå kunna uttrycka det som att

$$s_{enskild} / \sqrt{3} \leq s_{medeltal} \leq s_{enskild} \Leftrightarrow 0,6 \cdot s_{enskild} \leq s_{medeltal} \leq s_{enskild} \quad (3)$$

dvs. medeltalets standardosäkerhet ligger någonstans i detta intervall.

Vi kan konstatera att standardosäkerheten i kontrollpunkterna i värsta fall ligger på nivån 0,5 pixel för de mest högupplösta fallen (60 millimeter) och är försumbar för stora pixelstorlekar, runt 500 millimeter, se Tabell 3. Det betyder att det bara är vid 60, 80 och kanske 120 millimeters pixelstorlek som hänsyn behöver tas till att kontrollpunkterna inte är felfria.

Vi väljer i den fortsatta analysen att betrakta GNSS-mätningarna som okorrelerade, dvs. kontrollpunkternas standardosäkerhet skattas - i enlighet med Formel 2 - till

$$s_{GNSS} = s / \sqrt{3} \quad (4)$$

eftersom det är medeltalet vi går vidare med. Med $s = 30$ millimeter både i plan och höjd får vi alltså $s_{GNSS} = 17$ millimeter (vänstra värdet i intervallet i Tabell 3).

Tabell 3. Kontrollpunkternas standardosäkerhet (17 - 30 millimeter) mätt i andelar av en pixel enligt Formel 3.

Pixelstorlek (millimeter)	Kontrollpunkternas standardosäkerhet
60	0,28 - 0,50 pixel
120	0,14 - 0,25 pixel
250	0,07 - 0,12 pixel
500	0,03 - 0,06 pixel

5.3 Fotogrammetriska mätningar

Tabell 4. Omräkning från variationsvidd till standardosäkerhet i den enskilda bildmätningen. Enhet: pixel.

	<i>N</i>	<i>E</i>	$\sqrt{N^2 + E^2}$	(R)	H
Examensarbetet (variationsvidd)	0,28	0,38	0,47	(0,53)	0,79
Korrigerade värden (standardosäkerhet)	0,24	0,33	0,41	-	0,68

Precisionen (den **interna** lägesosäkerheten i en **enskild** bildmätning), mätt som standardavvikelse i upprepade bildmätningar, ligger på nivån 0,4 pixel i plan och 0,7 pixel i höjd, se Tabell 4. Även här sker den fortsatta analysen m.h.a. medeltalen av de fotogrammetriska mätningarna så - i analogi med GNSS-mätningarna - borde **medeltalets** standardosäkerhet komma in på något sätt.

Här finns dock en stor skillnad. De fotogrammetriska mätningarna sker hela tiden i samma modell, baserad på samma blocktriangulering. De är därför kraftigt korrelerade! Det spelar mindre roll hur många upprepade mätningar som görs, resultatet blir inte så mycket bättre ändå.

En sak kan vi dock konstatera:

I denna studie är lägesosäkerheten i bildmätningen lägre i plan (manuell mätning) än i höjd (automatisk matchning). Standardosäkerheterna skattas till 0,4 respektive 0,7 pixel.

Det helt dominerande bidraget kommer från blocktrianguleringen. Följande formel för den totala standardosäkerheten vid fotogrammetrisk mätning verkar realistisk

$$s_{fmtri} = \sqrt{s_{bild}^2 / n + s_{block\Delta}^2} \quad (5)$$

där s_{bild} är standardosäkerheten i bildmätningen, översatt från enheten pixel till metriska mått, och $s_{block\Delta}$ är blocktrianguleringens dito. Det spelar därför ingen större roll om vi går in med medeltalen eller den enskilda mätningen. Vi väljer dock att korrigera från medeltal till enskild mätning i den fortsatta analysen.

Låt oss även räkna om examensarbetets Tabell 2, se Tabell 5. Det leder oss till att:

Det finns i studien ingen skillnad i lägesosäkerheten mellan de tre städerna och ingen skillnad i den relativa lägesosäkerheten vid olika bildupplösningar.

Tabell 5. Lägesosäkerheten vid fotogrammetrisk mätning i Espa; för respektive stad och upplösning. (Omräkning av examensarbetets Tabell 2.) Enhet: pixel.

	s_N	s_E	s_P	s_H
Jönköping	0,25	0,36	0,44	0,74
Norrköping	0,24	0,28	0,37	0,66
Skellefteå	0,24	0,34	0,42	0,58
60-120 mm	0,27	0,33	0,43	0,64
250 mm	0,26	0,32	0,41	0,69
460-500 mm	0,18	0,35	0,39	0,75
Alla	0,24	0,33	0,41	0,68

5.4 Jämförelse GNSS vs. fotogrammetri

5.4.1 Korrigering av RMS-värden

De korrigerade RMS-värdena i Tabell 6 beräknas som

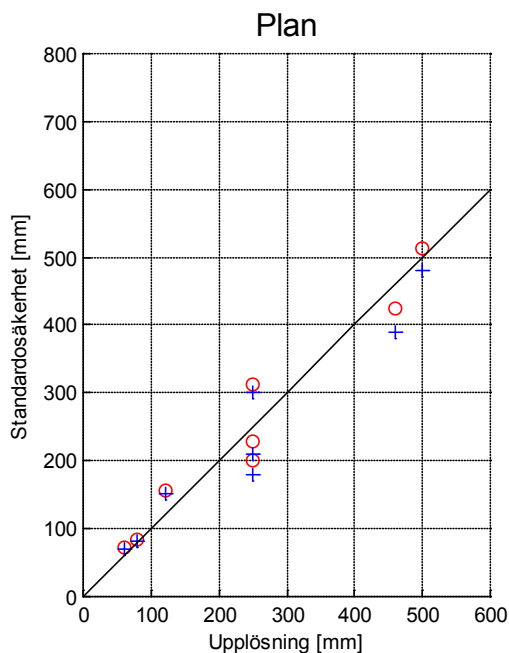
$$RMS_{korr} = \sqrt{RMS^2 - s_{bild}^2 / n + s_{bild}^2 - s_{GNSS}^2} \Leftrightarrow RMS_{korr} = \sqrt{RMS^2 + (1 - 1/n)s_{bild}^2 - s_{GNSS}^2} \Leftrightarrow$$

$$RMS_{korr} = \sqrt{RMS^2 + 0.8s_{bild}^2 - s_{GNSS}^2} \quad (6)$$

Tabell 6. Ursprungliga och korrigerade RMS-värden för avvikelser i kontrollpunkterna. Enhet: millimeter.

Upplösning	Examensarbetet		Korrigerade värden		Ort
	Plan	Höjd	Plan	Höjd	
80	80	50	83,4	67,2	Jönköping
80	80	30	83,4	54,0	
250	180	200	201,0	250,0	
500	480	710	513,0	771,4	
120	150	290	155,4	298,6	Norrköping
250	300	200	313,0	250,0	
460	390	230	424,0	360,4	Skellefteå
60	70	110	71,4	114,5	
250	210	210	228,2	258,1	

5.4.2 Total standardosäkerhet i plan



Figur 2. Total standardosäkerhet i plan. Beräknad ur korrigerade (o) respektive ursprungliga (+) RMS-värden. Enhet: millimeter.

I Figur 2 redovisas de korrigerade och ursprungliga RMS-värdena i plan. Den diagonala linjen är tumregelns "1 pixel i plan".

Skattningen i plan blir något bättre med de korrigerade RMS-värdena jämfört med examensarbetets ursprungliga värden, se Tabell 7 som uppvisar en lägre standardosäkerhet i det första fallet. Dessutom ligger lutningskoefficienten då närmare tumregelns 1 pixel (0,975 jämfört med 0,906), vilket åtminstone indikerar att korrektionen ter sig rimlig.

Ett cirka 95 %-igt konfidensintervall ges av uttrycket

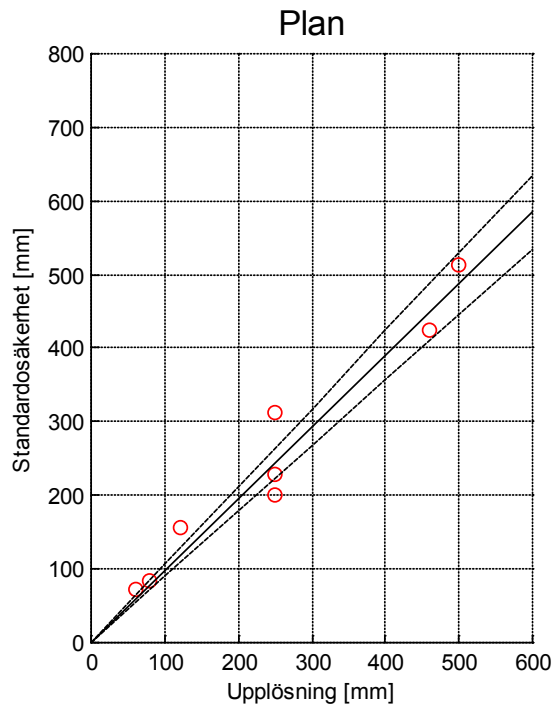
$$s_{plan} = k \pm 2s_k = 0,975 \pm 0,084 \quad (7)$$

dvs. (se Figur 3):

I denna studie ligger den totala standardosäkerheten i plan i intervallet 0,9-1,1 pixel (GSD).

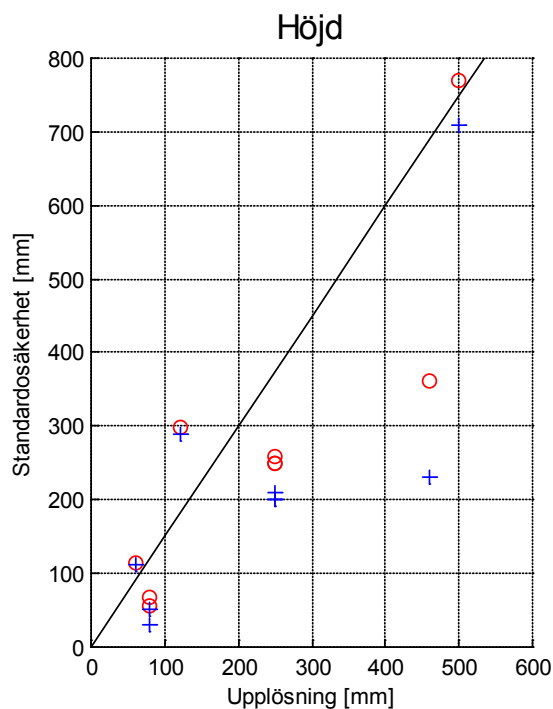
Tabell 7. Skattade lutningskoefficienter i plan och deras standardosäkerhet. Enhet: pixel.

	Lutningskoefficient i plan	Koefficientens skattade standardosäkerhet
Korrigerade värden	$k = 0,975$	$s_k = 0,042$
Ursprungliga mätvärden	$k = 0,906$	$s_k = 0,045$



Figur 3. Standardosäkerheten i plan som funktion av upplösningen (GSD), inklusive ett cirka 95 %-igt konfidensintervall. Enhet: millimeter.

5.4.3 Total standardosäkerhet i höjd



Figur 4. Total standardosäkerhet i höjd. Beräknad ur korrigerade (o) respektive ursprungliga (+) RMS-värden. Enhet: millimeter.

I Figur 4 redovisas de korrigerade och ursprungliga RMS-värdena i höjd. Den diagonala linjen är tumregelns "1,5 pixel i höjd".

Skattningen i höjd blir även den bättre med de korrigerade RMS-värdena, se Tabell 8 som uppvisar en avsevärt lägre standardosäkerhet i det första fallet. Också i höjd ligger lutningskoefficienten då närmare tumregelns 1,5 pixel (1,197 jämfört med 1,012), vilket alltså indikerar att korrektionen ter sig rimlig också i detta fall.

Tabell 8. Skattade lutningskoefficienter i höjd och deras standardosäkerhet. Enhet: pixel.

	Lutningskoefficient i höjd	Koefficientens skattade standardosäkerhet
Korrigerade värden	1,197	0,131
Ursprungliga mätvärden	1,012	0,152

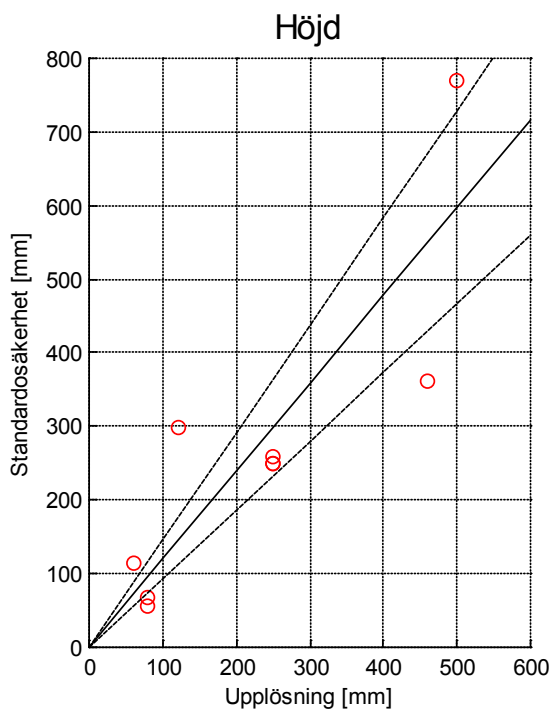
Ett cirka 95 %-igt konfidensintervall ges av uttrycket

$$s_{plan} = k \pm 2s_k = 1,197 \pm 0,262 \quad (8)$$

dvs. (se Figur 5):

I denna studie ligger den totala standardosäkerheten i höjd i intervallet 0,9-1,5 pixel (GSD).

En ganska osäker skattning således.



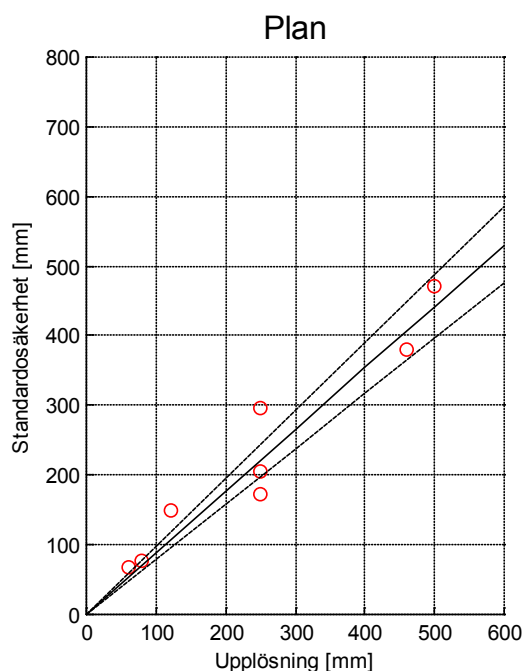
Figur 5. Standardosäkerheten i höjd som funktion av upplösningen (GSD), inklusive ett cirka 95 %-igt konfidensintervall. Enhet: millimeter.

5.4.4 Standardosäkerhet vid blocktriangulering

En biprodukt av att vi har de korrigerade RMS-värdena är att vi – baklänges – kan räkna ut blocktrianguleringens standardosäkerhet, se Tabell 9. Observera RMS- och blocktrianguleringsvärdena i höjd för upplösningen 80 millimeter (skuggade rutor). De låga värdena beror på att man där har använt en stor mängd laserdata som höjdstöd. Se även det inringade området i Figur 7.

Tabell 9. Beräkning av standardosäkerheten i blocktrianguleringen ur korrigerade RMS-värden och bildmätningens precision. Enhet: millimeter.

Upplösning	Korrigerade RMS-värden		Bildmätning (standardosäkerhet)		Blocktriangulering (standardosäkerhet)	
	Plan	Höjd	Plan	Höjd	Plan	Höjd
80	83,4	67,2	32,8	54,4	76,7	39,5
80	83,4	54,0	32,8	54,4	76,7	0,0
250	201,0	250,0	102,5	170,0	172,9	183,3
500	513,0	771,4	205,0	340,0	470,3	692,4
120	155,4	298,6	49,2	81,6	147,4	287,2
250	313,0	250,0	102,5	170,0	295,7	183,3
460	424,0	360,4	188,6	312,8	379,7	179,0
60	71,4	114,5	24,6	40,8	67,0	107,0
250	228,2	258,1	102,5	170,0	203,9	194,2



Figur 6. Standardosäkerheten i plan vid blocktriangulering, inklusive ett cirka 95 %-igt konfidensintervall. Enhet: millimeter.

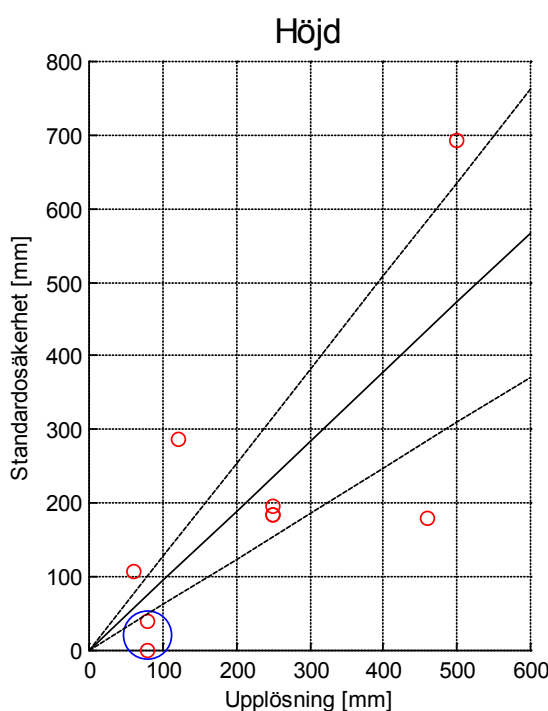
Standardosäkerheten i plan vid blocktriangulering kan beräknas genom minsta-kvadratanpassning av lutningskoefficienten m.h.a. värdena i den näst sista kolumnen i Tabell 9.

Ett cirka 95 %-igt konfidensintervall ges av uttrycket

$$s_{block\Delta plan} = k \pm 2s_k = 0,883 \pm 0,092 \quad (9)$$

dvs. (se Figur 6):

I denna studie ligger standardosäkerheten i plan vid blocktriangulering i intervallet 0,8-1,0 pixel (GSD).



Figur 7. Standardosäkerheten i höjd vid blocktriangulering, inklusive ett cirka 95 %-igt konfidensintervall. Enhet: millimeter.

Standardosäkerheten i höjd vid blocktriangulering kan beräknas på motsvarande sätt m.h.a. värdena i den sista kolumnen i Tabell 9.

Ett cirka 95 %-igt konfidensintervall ges av uttrycket

$$s_{block\Delta höjd} = k \pm 2s_k = 0,945 \pm 0,326 \quad (10)$$

dvs. (se Figur 7):

I denna studie ligger standardosäkerheten i höjd vid blocktriangulering i intervallet 0,6-1,3 pixel (GSD).

Detta är dock som synes en **mycket** osäker skattning.

5.4.5 Sammanställning

Tabell 10 är en sammanställning av standardosäkerheterna i den fotogrammetriska mätningen – uppdelade i plan/höjd, bildmätning/blocktriangulering och redovisade i enheten pixel. Värdena har hämtats från Tabell 4 samt Formel 7-9 och avrundats. De ska i första hand betraktas som storleksordningar eftersom de härrör från just denna studie och eftersom några av skattningarna är ganska osäkra.

OBS det kvadratiske förhållandet mellan de olika koefficienterna:

$$k_{fmtri} = \sqrt{k_{bild}^2 + k_{block\Delta}^2} \quad (11)$$

Tabell 10. Sammanställning av standardosäkerheterna i den fotogrammetriska mätningen i denna studie – uttryckta i enheten pixel (GSD).

	Bildmätning k_{bild}	Blocktriangulering $k_{block\Delta}$	Totalt $k_{fmtri} = \sqrt{k_{bild}^2 + k_{block\Delta}^2}$
Plan	0,4	0,9	1,0
Höjd	0,7	0,95	1,2

6 Slutsatser

Standardosäkerheten i plan ligger alltså på nivån 1 pixel, vilket stämmer bra med tumregeln. Som examensarbetaren Andreas påpekar så skulle nog denna nivå kunna sänkas ytterligare något om en rutinerad fotogrammetriker hade utfört mätningarna.

Standardosäkerheten i höjd bedöms variera mer och hamnar i denna analys i intervallet 1-1,5 pixel. Värdet kan sannolikt minska – kanske ned emot 0,5 pixel – med fler stödpunkter, större övertäckning etc. Examensarbetet visar att användningen av laserdata – i stor mängd – som höjdstöd ger en klar förbättring, se Tabell 9 och Figur 7.

Bedömningen blir:

Den gamla tumregeln rörande lägesosäkerheten i digitala flygbilder ger rimliga storleksordningar och försvarar fortfarande sin plats – som tumregel eller t.o.m. som en övre gräns för lägesosäkerheten.

Beställarens krav på lägesosäkerhet bör avse standardosäkerhet i plan och höjd för tydligt identifierbara objekt mätta i stereomodell efter blocktriangulering. Krav på lägesosäkerhet ställs utifrån kraven för användningen av den beställda produkten.

Kraven bör alltså inte överskrida tumregelns 1 pixel i plan och 1,5 pixel i höjd, men kan naturligtvis vara strängare än så.

Kraven verifieras genom kontrollmätning, exempelvis med någon av de metoder som beskrivs i [HMK-Introduktion, bilaga A](#). Kontrollmetoden bör ha en standardosäkerhet som är högst 1/3 av det angivna kravet.

Om den skattade standardosäkerheten s från kontrollmätningen uppfyller olikheten

$$s \leq \sigma \cdot (0,96 + n^{-0,4}) \quad (12)$$

där n är antalet kontrollpunkter och σ är beställarens krav, så anses kraven uppfylla. Annars är lägesosäkerheten signifikant större än specifikationen (95 % konfidensnivå).

Exempel: Beställaren har angett kraven på lägesosäkerhet till $\sigma = 100$ millimeter i plan och $\sigma = 150$ millimeter i höjd. Upplösningen (GSD) är specificerad till 120 millimeter.

Med 20 kontrollpunkter uppfylls kraven om

$$s \leq 100 \cdot (0,96 + 20^{-0,4}) = 126 \text{ millimeter (plan)}$$

$$s \leq 150 \cdot (0,96 + 20^{-0,4}) = 189 \text{ millimeter (höjd)}$$

Med 100 kontrollpunkter uppfylls kraven om

$$s \leq 100 \cdot (0,96 + 100^{-0,4}) = 112 \text{ millimeter (plan)}$$

$$s \leq 150 \cdot (0,96 + 100^{-0,4}) = 168 \text{ millimeter (höjd)}$$

Ett förslag till skrivning i HMK redovisas i nästa kapitel.

7 Förslag till HMK-text

Rekommendation

Beställaren ställer krav på lägesosäkerhet.

Krav på lägesosäkerhet avser standardosäkerhet i plan och höjd för tydligt identifierbara objekt mätta i stereomodell efter blocktriangulering. Krav på lägesosäkerhet ställs utifrån kraven för användningen av den beställda produkten.

Följande tumregel gäller för standardnivå 1 och 2:

- Krav på standardosäkerheten i plan bör inte överstiga flygbildens geometriska upplösning (GSD).
- Krav på standardosäkerheten i höjd bör inte överstiga flygbildens geometriska upplösning (GSD) med mer än en faktor 1,5.

Läs mer om lägesosäkerhet vid stereokartering i <referens till denna rapport och till examensarbetet>.

Det är möjligt att uppnå en lägre standardosäkerhet än tumregeln ovan. Det kan dock ställa krav på större övertäckning i och mellan flygstråk, eventuella tvärstråk samt fler stödpunkter.

Flygburen laserskanning ger tillgång till många markstödpunkter i höjd på öppna, plana och hårdgjorda ytor. Med hjälp av dessa kan standardosäkerheten i höjd sänkas till 1 pixel eller bättre för standardnivå 1 och 2.

8 Referenser

ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of Measurement -- Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995). www.iso.org/sites/JCGM/GUM-introduction.htm

Jansson, A., 2013. En noggrannhetsundersökning av fotogrammetrisk detaljmätning i stereo. Examensarbete, Karlstads universitet.

Persson, C.-G., 2010. GUM, en guide för att uttrycka mätosäkerhet. www.lantmateriet/HMK under avsnitt *HMK Referensbibliotek-/GUM, att uttrycka mätosäkerhet*.