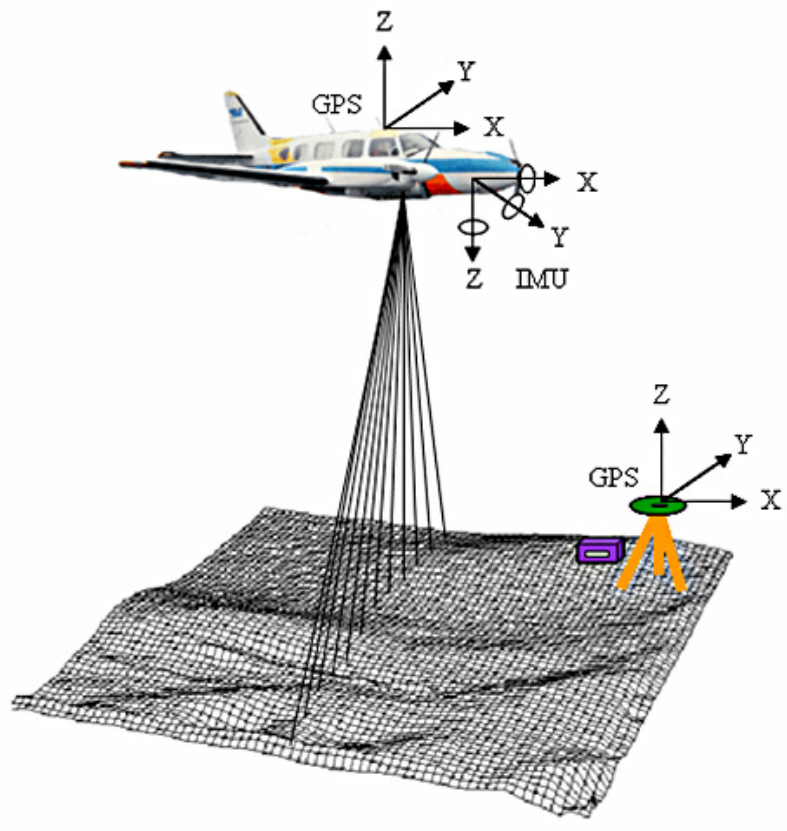


**Teknisk rapport 2014:1**

# **Kontroll av läges- osäkerheten i laserdata**

Clas-Göran Persson, Helén Rost & Thomas Lithén





## Sammanfattning

Denna PM innehåller en analys av lägesosäkerheten i laserdata. Den avser primärt osäkerheten i höjd, som ter sig särskilt viktig i samband med digitala höjdmodeller etc. Behandlingen av lägesosäkerheten i plan är mer pragmatisk.

Innehållet har stämts av mot den norska produktspecifikationen *Produktspesifikasjon, Nasjonal modell for høydedata fra laserskanning (FKB-Laser)* men avviker något från denna. Argumenten för att delvis gå en egen väg redovisas. Analysen kompletteras med en simuleringsstudie och en empirisk studie av den hittillsvarande produktionen av den nya nationella höjdmodellen.

PM:en ingår i skriftserien *Tekniska Rapporter* inom arbetet med HMK (*Handbok i mät- och kartfrågor*). Där publiceras successivt analyser, bakgrundsfakta, referensmaterial etc., vilket förhoppningsvis ökar förståelsen och gör det möjligt att gå mer "rakt på sak" i de regelrätta handbokstexterna.

**Key words:** laser data, uncertainty in measurement. [Samlade förord](#)

## Författarnas 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](mailto:clas-goran.persson@lm.se)  
+46-70-557 6037

### **Helen Rost**

Blom Sweden AB  
Hammarbacken 6B  
SE - 191 49 Sollentuna  
[helen.rost@blomasa.com](mailto:helen.rost@blomasa.com)  
+46-8-578 24 720

### **Thomas Lithén**

Lantmäteriet  
SE - 801 82 Gävle  
[thomas.lithen@lm.se](mailto:thomas.lithen@lm.se)  
+46-26-63 34 44

# Innehållsförteckning

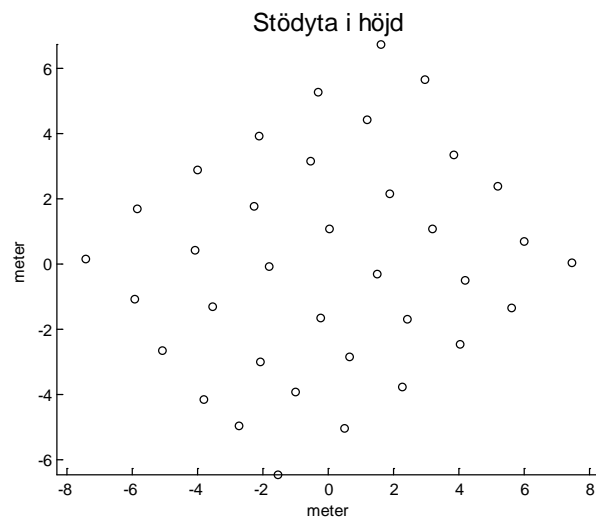
<b>1</b>	<b>Introduktion</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Norska produktspecifikationen för höjddata från laserskanning</b> .....	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Analys</b> .....	<b>9</b>
	Kontrollens placering i produktionsprocessen.....	9
	Signifikans .....	9
	Lägesosäkerhet i höjd: Standardavvikelse, skift, RMS .....	11
	Off-set i plan.....	12
	Toleranser .....	14
	GNSS/RTK som inmätningmetod för stöd- och kontrollpunkter .....	15
<b>4</b>	<b>Förslag</b> .....	<b>16</b>
	Text till HMK-Laserdata 2014, avsnitt 2.3.3: Lägesosäkerhet.....	16
	Kompletterande text till HMK-Laserdata 2014, avsnitt 3.2: Signalering och inmätning av markstöd .....	17
	Justerad och delvis ny text i HMK-Laserdata 2014, bilaga A.3.2: Produkt och metadata.....	17
<b>5</b>	<b>Referenser</b> .....	<b>22</b>
	<b>Bilaga: Lägesosäkerheten i NNH</b> .....	<b>23</b>
	Projektvisa RMS i plan och höjd .....	23
	Relationen mellan RMS i plan och höjd .....	24
	Skift i höjd per projekt.....	24
	Totalt RMS vs. individuella RMS-värden – en simuleringsstudie.....	24
	Sammanfattning – toleranser/gränsvärden.....	25

# 1 Introduktion

Denna PM innehåller en analys av lägesosäkerheten i laserdata. Den avser primärt osäkerheten i höjd, som ter sig särskilt viktig i samband med digitala höjdmodeller etc. Behandlingen av lägesosäkerheten i plan är mer pragmatisk.

Inom **fotogrammetrin** används terrestert inmätta *stödpunkter* för den absoluta orienteringen av flygbilder/stereomodeller och *kontrollpunkter* för att säkerställa att denna anpassning till aktuellt referenssystem gäller för hela projektområdet, även mellan stödpunkterna.

Vid **laserskanning** baseras stödet/kontrollen i stället på "punktsvärmar" av terrestert inmätta punkter. I **höjd** placeras dessa i form av tämligen regelbundna punktgitte på plana, hårdgjorda ytor (se Figur 1 samt Exempel 1). De benämns *stödytor* eller *kontrolltytor*.



**Figur 1.** Exempel på en stödyta i höjd för den nationella höjdmodellen.

För stöd/kontroll i **plan** används i stället *stödoobjekt* eller *kontrollobjekt* som har en tydlig tre-dimensionell "relief", t.ex. diken och hustak.

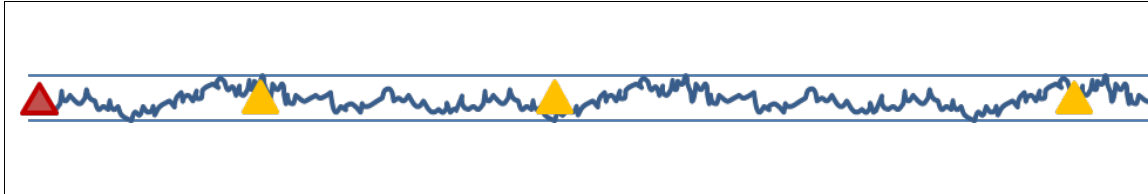
I båda fallen görs en jämförelse mellan dessa ytor/objekt och motsvarande delar i laserdata – en matchning för vilken det finns flera olika metoder. Avvikelserna utgör sedan underlag för den fortsatta hanteringen.

I de fall vi samtidigt behöver referera till stödytor och stödoobjekt – eller kontrolltytor och kontrollobjekt – återgår vi för enkelhets skull till de etablerade termerna *stödpunkter* respektive *kontrollpunkter*; ytor och objekt byggs ju trots allt upp av just punkter.

Det finns två dominerande, geometriska felkällor i laserdata: *brus* och *georeferering*. Georefereringen sker med GNSS/INS och förbättras med stråkutjämnning och inpassning mot stöd.

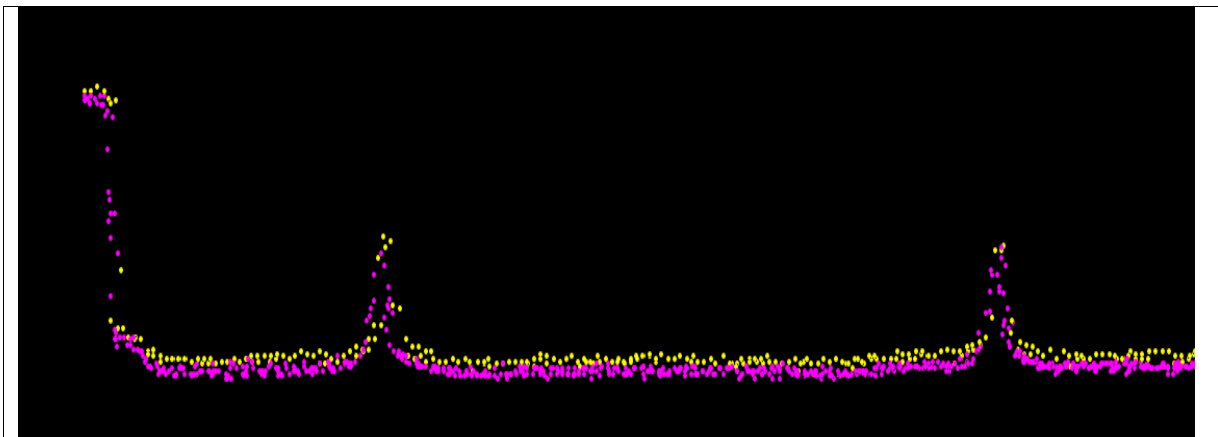
Det finns i princip två sätt utvärdera lägesosäkerheten i laserdata:

1. Jämförelse mot kända kontrollpunkter, se Figur 2.
2. Analys av stråköverlapp (oftast efter stråkutjämnning), se Figur 3.



**Figur 2.** Laserdata i tvärsnitt utgörs av den blå "taggiga" linjen. Gränsvärdena representeras av de raka strecken. Röda trianglar är stödpunkter för inpassning, gula trianglar kontrollpunkter för utvärdering.

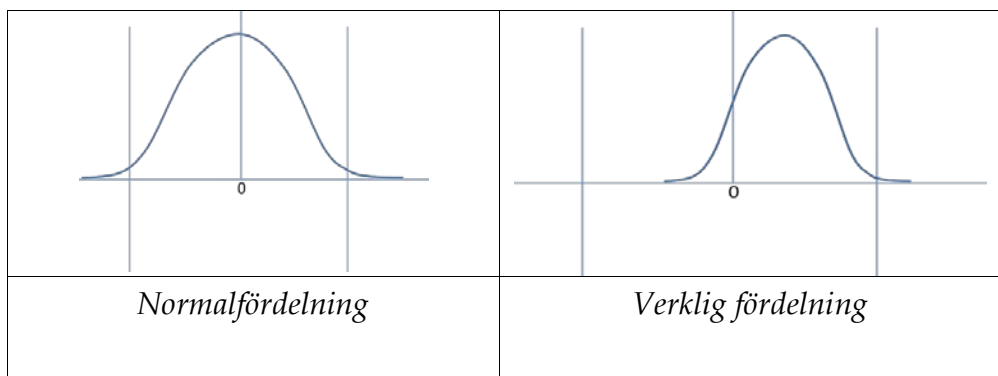
Taggigheten i figur 2 avspeglar bruset i data. Att linjen böljar upp och ner har flera orsaker, men beror främst på driften i GNSS/INS.



**Figur 3.** Tvärsnitt över laserstråk i olika färger med överlapp. "Gliporna" mellan de olikfärgade stråken härrör från fel i georefereringen. Inom varje stråk syns bruset i laserdata som en spridning av punktsvärmen. I detta exempel ligger bruset inom ett stråk på ca 0.03 m och avståndet mellan stråken på ca 0.05 m.

I Figur 3 visas verkliga data. Bruset syns som en spridning av laserpunktsvärmen inom varje stråk och positioneringsfelen syns som en off-set i höjd mellan stråken.

En del av de systematiska felen i GNSS-/tröghetsmätningarna modelleras och korrigeras för vid en stråkutjämnning, men det kommer alltid att finnas en del av dessa fel kvar i slutprodukten. Det betyder att väntevärdet inte alltid ligger på "noll" i kontrollpunkterna, se Figur 4.



**Figur 4.** Normalfördelning vs. verklig fördelning för laserdata.

Det innebär i sin tur att en strikt hantering enligt normalfördelningen inte låter sig göras, utan det blir nödvändigt med mer förnufts- och erfarenhetsmässiga toleransnivåer.

I Sverige sker vanligen ingen specificering av "brus-nivån" i produkten från beställarens sida. Om en kund ber om laserdata specificeras snarast att avvikelserna i kontrollpunkterna ska ligga under en viss nivå.

I den norska specifikationen för höjddata från laserskanning (se nästa kapitel) finns dock en sådan reglering. Utgångspunkten för oss är denna specifikation samt den hypotes som tagits fram i arbetet med remissversionen av HMK-Laserdata 2014, se utdrag i Tabell 1.

Parametrar	Standard-nivå 1	Standard-nivå 2	Standard-nivå 3
Standardosäkerhet i höjd på plana och väldefinierade ytor (mm)	100	50	20
Standardosäkerhet i plan på väldefinierade objekt (mm)	300	150	50

**Tabell 1.** Standardosäkerhet per standardnivå för luftburen laserskanning. (Remissversionen av HMK-Laserdata 2014.)

Tabell 1 ska alltså ses som en startpunkt för vår analys, som vi håller fast vid om inget nytt kommer fram.

## 2 Norske produktspesifikasjonen for høyddata från laserskanning

Ett utdrag ur *Produktspesifikasjon, Nasjonal modell for høydedata fra laserskanning (FKB-Laser)* redovisas nedan. Vad gäller mätosäkerhet regleras

- lägesosäkerhet i höjd, som standardavvikelse och systematisk avvikelse (skift)
- lägesosäkerhet i plan, som systematisk avvikelse (off-set).

### 7.2 Krav til nøyaktighet

Kvalitetsэлемент	Delelement	Kvalitetsmål	Høydegrunnlag		
			FKB-Laser10	FKB-Laser20	FKB-Laser50
			Toleranse	Toleranse	Toleranse
Stedfestingsnøyaktighet	Absolutt høydenøyaktighet	Standardavvik	0.04 m (0)	0.07 m (0)	0.17 m (0)
Stedfestingsnøyaktighet	Absolutt høydenøyaktighet	Systematisk avvik	0.10 m (1)	0.20 m (1)	0.50 m (1)
Stedfestingsnøyaktighet	Absolutt grunnrissnøyaktighet	Systematisk avvik	0.30 m (2)	0.60 m (2)	1.50 m (2)
Egenskapsnøyaktighet	Nøyaktighet til kvalitative egenskaper - feilklassifisering	Prosentandel feil klassifiserte punkt (jf. LAS-klassene)	2 % (3)	2 % (3)	2 % (3)
		Andel bakkepunkt på åpne veldefinerte flater	80 % (4)	80 % (4)	80 % (4)
Logisk konsistens	Egenskaps-konsistens	Prosentandel feil	0 % (5)	0 % (5)	0 % (5)
Logisk konsistens	Formatkonsistens	Prosentandel feil	0 %	0 %	0 %

#### Merknader:

(0) Tallet referer til harde veldefinerte flater, for eksempel veg eller parkeringsplass. I områder med vegetasjon på terrengoverflaten kan stedfestingsnøyaktigheten være noe dårligere.

(1) Laserdataene skal ha en jevn og homogen stedfestingsnøyaktighet i høyde. Kvalitetsmålet for høydenøyaktighet er systematisk avvik. Ved kontroll av høydenøyaktigheten skal man benytte kontrollflater som ligger jevnt utover prosjektområdet. Kontrollflatene kan for eksempel være på 20\*20 meter og skal ligge på harde, veldefinerte horisontale flater (maks helling 10 %), for eksempel veg eller parkeringsplass.

(2) Laserdataene skal ha en jevn og homogen stedfestingsnøyaktighet i grunnriss. Kvalitetsmålet for grunnrissnøyaktighet er systematisk avvik. Kravet er basert på erfaringer fra Sverige der har man erfart at grunnrissnøyaktigheten er 3 ganger dårligere enn høydenøyaktigheten. Dette lar seg lettest måle i knekklinjer som for eksempel mønelinjer og takkanter.

(3) Innen enhver 1 km x1 km rute, skal ikke mer enn 2 prosent av punktene være feilklassifisert.

- Kravet til korrekt klassifisering gjelder for alle klasser

- Eksempel: Innenfor enhver 1km x 1km rute kan maksimalt 2 % av støy-punktene (klasse 7) være feilklassifisert, hvor prosenten beregnes ut i fra korrekt antall støypunkt.



### 3 Analys

#### Kontrollens placering i produktionsprocessen

- HMK-toleranserna avser kontroll av levererad "slutprodukt", **efter** stråkutjämnning och inpassning i givet referenssystem med hjälp av stödpunkter i plan och höjd.

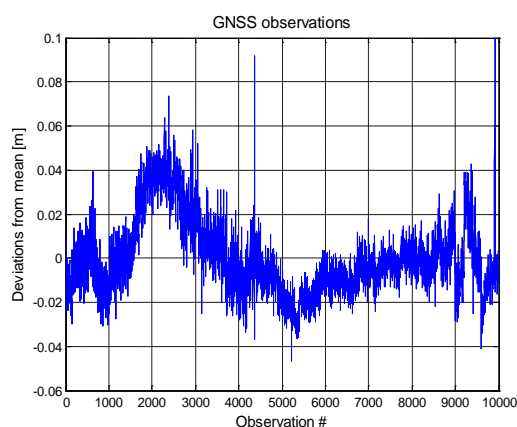
Hanteringen av stödpunkterna varierar mellan olika utförare. Det gör det svårt att hitta något annat sätt att styra på än genom kontroll av slutprodukten. Dessutom finns det som redan beskrivits andra sätt att "staga upp" modellen, t.ex. jämförelser mellan överlappande stråk och jämförelser mellan enskilda stråk och medelvärdet över projektområdet. När uppstagningen väl är gjord spelar de ursprungliga differenserna mindre roll.

- Utföraren förväntas dock ha ett eget kvalitetssystem som kontrollerar de initiala avvikelserna i stödpunkterna, och dessas fortsatta hantering. Men detta betraktas som en del av produktionsprocessen.

#### Signifikans

En kontroll- eller stödpunkt kan vara inmätt med olika metoder. Varje mätmetod har olika felkällor, som bidrar till avvikelserna mellan dessa punkter och laserdata.

- I HMK förordas att kontrollmetodens standardosäkerhet ska vara max 1/3 av den standardosäkerhet som specificerats för laserdata.



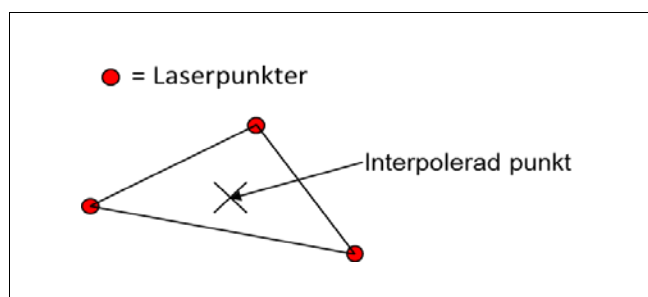
*Figur 5. Variationer i positioner från nätverks-RTK över tiden.*

En vanlig inmättningsmetod är nätverks-RTK. Den metodens standardosäkerhet brukar anges som 15 mm i plan och ca. 25 mm i höjd. Men den angivelsen ska ses över tiden – för korta tidsintervall kan variationerna te sig systematiska, se Figur 5.

Eftersom inmätningen av stöd-/kontrollpunkter genomförs förhållandevis snabbt kan man alltså få en närmast systematisk avvikelse. En annan kvalitetsaspekt är punktconfigurationen. Vissa konfigurationer påverkas mycket av bruset i laserdata, andra påverkas mycket av informationsinnehållet (eller möjligheten att hitta stöd-/kontrollen).

Exempel 1: Stöd- och kontrolltytor i höjd utformas (som redan nämnts) med hjälp av ett antal punkter som representerar en plan, öppen yta – t.ex. 6x6 punkter i ett rutnät, se Figur 1.

Punkterna ska ligga så långt ifrån varandra att nya laserpunkter utnyttjas i jämförelsen med varje rutnätspunkt. Ofta tillämpas *triangulering* som interpolationsmetod och då kommer de tre närmaste laserpunkterna att användas för att interpolera fram en höjd i laserdata för just den rutnätspunkten. Se Figur 6.



**Figur 6.** Interpolation av ett höjdvärde görs med hjälp av "triangulering" utifrån laserpunkterna.

RMS(dH)-värdet kommer att påverkas av bruset i laserdata när denna trianguleringsmetod används.

Om man istället beräknar ett *planets ekvation* från en stor mängd laserpunkter, och använder detta plan för jämförelse, så kommer t.ex. ett RMS-värde inte att påverkas i lika hög grad av bruset i laserdata. Bruset filtreras nämligen till stor del bort i minsta-kvadratanpassningen av planet.

Den senare metoden kräver dock en mycket mer avancerad hantering av data – och dessutom ett stort antal beslut som, i viss mån, bör grundas på vetenskapen om stöd-/kontrollytans egenskaper. Oftast har man ju inte en helt plan yta utan en böljande yta som varierar i skiftande grad.

Sammantaget ter det sig lämpligast att använda RMS som kriterium för avvikelser. Den storheten innehåller både bruset och ett ev. systematiskt skift – utan att gradera vilket som dominerar. Totaleffekten är mest intressant eftersom orsaken till avvikelserna kan variera; den kan bero på laserdata, terrestra data, matchningsmetoden eller – mest realistiskt – kombinationer av dessa felkällor.

## Lägesosäkerhet i höjd: Standardavvikelse, skift, RMS

Sammantaget och mer stringent matematiskt får vi:

- *Standardavvikelsen*  $s$  (i höjd, inom kontrollytan) avspeglar bruset i markklassade punkter – med ett visst tillskott av GNSS/INS-fel, eftersom ytorna ibland kommer från fler än ett stråk.
- *Medelavvikelsen*  $\bar{x}$  (kontrollytans genomsnittliga skift) avspeglar framför allt driften i GNSS/INS.
- *RMS-värdet* avspeglar totaleffekten av brus och drift inom kontrollytan.

Följande samband gäller:

$$RMS^2 \cdot n = s^2(n-1) + \bar{x}^2 \cdot n \Leftrightarrow RMS^2 = s^2 \frac{(n-1)}{n} + \bar{x}^2$$

dvs. approximativt, för någorlunda stora  $n$  (antalet punkter i ytan)

$$RMS^2 = s^2 + \bar{x}^2$$

RMS-värdet innefattar alltså både medelskift och brus. Man kan ha noll i brus och ett tydligt skift, och få samma RMS som när man har ett högt brus och litet medelskift.

- Denna härledning stärker vårt tidigare val av RMS som kvalitetsmått vid kontroll av laserdata **i höjddled**.

Exempel 2: Anta att standardosäkerheten är satt till 100 mm i höjd

- A 100 mm brus och 50 mm i skift ger RMS-värdet ca 110 mm och medelavvikelsen 50 mm.
- B 70 mm brus och 70 mm i skift ger RMS-värdet ca 100 mm och medelavvikelsen 70 mm.
- C 90 mm brus och 30 mm i skift ger RMS-värdet ca 95 mm och medelavvikelsen 30 mm.
- D 40 mm brus och 80 mm i skift ger RMS-värdet ca 90 mm och medelavvikelsen 80 mm.

Om RMS-gränsen är satt till t.ex. 100 mm skulle B, C och D vara OK. Om man också satte en gräns på medelavvikelsen (skiftet) på, säg, 50 mm skulle endast C vara OK.

Stödytorna (passpunkterna) är delvis korrelerade med stråkutjämnningen, och kan därför ge en för låg skattning av lägesosäkerheten. Men de måste placeras ganska regelbundet inom projektarean, vilket innebär att de inte alltid blir helt idealiska till sin utformning.

Å andra sidan kan de oberoende kontrollytorna väljas mer fritt, med en mer ändamålsenlig placering och utformning. Så i båda fallen blir kanske resultatet vad gäller lägesosäkerheten väl optimistiskt, särskilt som det normalt avser plana, hårdgjorda ytor. Men de bör kunna regleras med samma tolerans.

Den norska specifikationen i kapitel 2 reglerar både standardavvikelse och skift. Totaleffekten, uttryckt i RMS, redovisas i Tabell 2. Deras sätt att ställa krav på skiftet blir alltså även det ungefär samma sak som att ställa krav på RMS.

**Tabell 2.** Totaleffekten – uttryckt i RMS – av att reglera standardavvikelse och skift var för sig. Jfr. tabellen i kapitel 2 . Enhet: mm.

	Laser 10	Laser 20	Laser 50
Standardavvikelse	40	70	170
Skift	100	200	500
RMS	108	212	528

### Off-set i plan

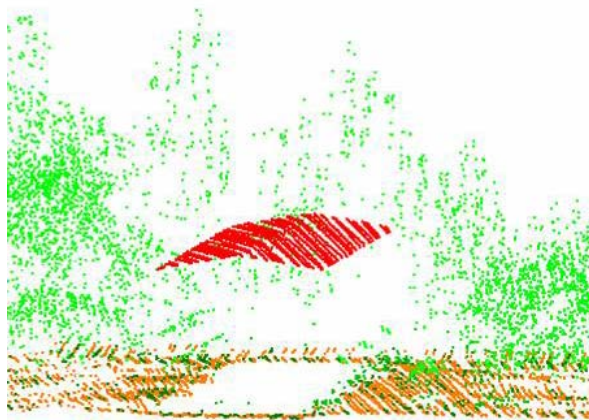
Det är alltid svårare att hitta stöd- och kontrollpunkter för laserdata i plan än i höjd, speciellt för höga flyghöjder. Om det inte finns några "skarpa" objekt så är det även svårt att utvärdera mätosäkerheten i plan. Det är som att matcha två diffusa digitala bilder och ändå få sub-pixel-precision i matchningen.

I plan blir det mer fråga om att hitta **en** referenspunkt, medan det i höjd blir en slags medelvärdesbildning utifrån **flera** punkter.

Exempel 3: Ett stöd- eller kontrollobjekt i plan representeras av en taknock, se Figur 7.

I detta fall kan taknocken modelleras i laserdata genom att hitta två plan i punktsvärmen på ett sadeltak och sedan beräkna planens skärningslinje. Då används en mängd laserpunkter för bestämning av planens ekvation.

Beroende på antalet punkter, bruset i punkterna och takytans lutning så har bestämningen av taknockens läge i laserdata en viss osäkerhet.



**Figur 7.** Laserpunkter klassade som hus för identifiering av kontrollobjekt i plan.

Om många laserpunkter använts för bestämning av tak-planen så kommer RMS-värdena (beräknade ur dE, dN, dH) inte att påverkas nämnvärt av bruset i laserdata.

Exempel 4: Ett stöd- eller kontrollobjekt i plan representeras av en terrängprofil.

Här påverkas resultatet av jämförelsen mellan laserdata och stöd- eller kontrollobjektet mycket av profilens form. En profil i flack terräng ger mycket större osäkerhet än en i varierande terräng.

Terrängvariationerna måste också matcha punkttätheten så att de inte är för små för att fångas upp i laserdata. En uppmätt off-set (dH, dN, dH) påverkas här av informationsinnehållet i profilen. Om terrängprofilen är tillräckligt lång påverkas resultatet inte av bruset i laserdata.

- Ett mer realistiskt mått på avvikelsen i plan är därför *off-set*, dvs. den radiella avvikelsen för respektive objekt.
- Tidiga empiriska resultat har pekat mot att standardosäkerheten för off-set i plan bör sättas ca 3 gånger standardosäkerheten (RMS) i höjd. Detsamma gäller därför för motsvarande toleranser.

I bilagan till denna rapport analyseras lägesosäkerheten i drygt 300 projekt från produktionen av den nationella höjdmodellen (f.d. NNH). Denna analys indikerar att – för den upplösning som där tillämpas, ungefär Standardnivå 1 – så ligger kvoten mellan standardosäkerheterna i plan och höjd snarare på ungefär 5.

Trafikverket har och andra sidan en tradition att – inom deras primära tillämpningsområde, Standardnivå 3 – använda en plan-tolerans som är 2 gånger höjdtoleransen.

Summa summarum så är en rimlig slutsats att:

- standardosäkerheten i plan är större än standardosäkerheten i höjd
- förhållandet/kvoten ligger i intervallet 2-5, beroende på standardnivå.

Ytterligare studier krävs för att bekräfta att kvoten ökar med minskad upplösning, och att den alltså inte är konstant. Detta antagande ter sig ändå rätt rimligt också om man betänker att brusnivån avseende höjdkomponenten inte ökar nämnvärt med flyghöjden liksom felen i GNSS-lösningen. Däremot ökar effekten av ett fel i tröghetsmätningen linjärt med flyghöjden, och är antagligen det största bidraget till planfel i laserpunktmolnet. Det blir också svårare och svårare att urskilja objekt i punktmolnet ju färre laserpunkter det finns, dvs. från högre flyghöjd.

Alltför hårda toleranser – i detta fall alltför liten faktor – ökar risken att felaktigt förkasta ett projekt som egentligen har en kvalitet som uppfyller specificerade krav ("fel av första slaget" vid hypotesprövning).

## Toleranser

Sammantaget bedömer vi

- att den nationella höjdmodellen håller en högre kvalitet i höjd än vad som rimligen krävs inom standardnivå 1
- att vi därför ligger kvar med standardosäkerheten 100 mm och faktorn 3 mellan plan och höjd i standardnivå 1 (se Tabell 1)
- att vi tillämpar faktorn 3 även i standardnivå 2, men anpassar oss något till Trafikverkets normer och sätter denna faktor till 2,5 för standardnivå 3.

De matematiska förhållandena mellan standardosäkerheterna och toleranserna, i plan och höjd, i Tabell 5 bedöms dock vara generellt tillämpbara. Det ger de förhållanden som redovisas i Tabell 3.

**Tabell 3.** Förslag till gränsvärden/toleranser för genomsnittliga och enskilda RMS i förhållande till projektets specificerade standardosäkerhet. Specificerad standardosäkerhet står på första raden, jfr. Tabell 1. Tumregeln för genomsnittligt RMS ges av rad 2 och en tumregel för toleransen för enskilda RMS av rad 3.

	Höjd (mm)			Plan (mm)		
	Standardnivå 1	Standardnivå 2	Standardnivå 3	Standardnivå 1	Standardnivå 2	Standardnivå 3
Slutproduktens standardosäkerhet	100	50	20	300	150	50
Gränsvärde, genomsnittliga RMS i kontroll-/stödpunkter för hela projektet (tumregel)	160	80	30	480	240	80
Tolerans, enskilda RMS i kontroll-/stödpunkter (tumregel)	200	100	40	600	300	100

Relationerna mellan de olika storheterna i tabellen framgår tydligare av förslaget i kapitel 4, där de anges explicit i Tabell A.3.2 (enligt beteckningen i HMK-Laserdata 2014).

## GNSS/RTK som inmätningssmetod för stöd- och kontrollpunkter

Nätverks-RTK mot SWEPOS är den mest rationella metoden för att mäta in stöd- och kontrollpunkter vid laserskanning. Men med den låga mätosäkerhet som laserskanning ger i dag så börjar vi nu närma oss gränsen för vad denna GNSS-teknik klarar av, åtminstone i höjd. Så det är höjdkomponenten som är viktigast att analysera. Målsättningen är att kontrollmetodens standardosäkerhet är  $\leq 1/3$  av laserskanningens standardosäkerhet.

I standardnivå 1 är laserskanningens antagna standardosäkerhet på 100 mm i höjd är ungefär 3 gånger nätverks-RTK-teknikens värde på 20-30 mm (se HMK-ReGe, Bilaga B.1). Dvs. precis på gränsen.

Hur blir det då vid laserskanning i standardnivåerna 2 och 3, när vi kommer ned på ungefär samma mätosäkerhetsnivå som nätverks-RTK mot SWEPOS ger i sin vanligaste tappning?

Här finns flera alternativ som sänker mätosäkerheten:

- Mäta in flera punkter i varje stöd-/kontrolllyta på samma sätt som i det nationella höjdmodellsprojektet. Det kan fungera i standardnivå 2, men Nätverks-RTK mot SWEPOS är inte lämplig för standardnivå 3.

Där får man i stället överväga att

- gå över till *projektanpassad nätverks-RTK* (se [HMK-ReGe 2013](#) avsnitt 1.2.2 samt Bilaga B.1); det ger ungefär en halvering av standardosäkerheten i höjd
- tillämpa *RUFRIIS* (se [HMK-ReGe 2013](#) avsnitt 2.3 samt Bilaga B.1); det sänker standardosäkerheten ytterligare, ned mot några millimeter, om systemet dessutom är projektanpassat.

En alternativ åtgärd är naturligtvis att byta till en annan inmätningssmetod, t.ex. *precisionsavvägning* – som är ytterst noggrann men inte särskilt kostnadseffektiv. Dessutom måste då planläget bestämmas på något annat sätt i alla fall.

En empirisk studie av de olika alternativen vore önskvärd för att kunna ge tydligare råd beträffande kontrollmätning i dessa sammanhang. Här behövs sannolikt precisionsavvägning som "facit".



## 4 Förslag

I detta kapitel redovisas de delar från denna studie som föreslås ingå i HMK-Laserdata 2014. **OBS:** Hänvisningar, avsnitts- och figur-/tabellnummer avser beteckningar i HMK-Laserdata 2014. Föreliggande tekniska rapport har där benämningen "referens [3]".

### Text till HMK-Laserdata 2014, avsnitt 2.3.3: Lägesosäkerhet

#### Rekommendation

- a) Beställaren ställer krav på lägesosäkerhet

Krav på lägesosäkerhet avser standardosäkerhet i höjd och plan för öppna plana hårdgjorda ytor respektive tydligt identifierbara objekt mätta i punktmolnet efter stråkutjämning och inpassning på stöd.

Observera att standardosäkerheten i höjd kan bli avsevärt högre på andra typer av ytor, exempelvis lutande ytor och ytor med vegetation. Läs mer i referens [1] och [2] för att få en uppskattning av vilken standardosäkerhet i höjd som kan förväntas utanför öppna plana hårdgjorda ytor.

Krav på lägesosäkerhet ställs utifrån kraven för användningen av den beställda produkten. Följande tumregler gäller för standardnivå 1, 2 respektive 3:

- Krav på standardosäkerheten i höjd bör inte överstiga 100, 50 respektive 20 mm på öppna plana hårdgjorda ytor.
- Krav på standardosäkerheten i plan bör inte överstiga standardosäkerheten i höjd med mer än en faktor 2-3 beroende på standardnivå.

Det är möjligt att uppnå en lägre standardosäkerhet i höjd än tumreglerna ovan. Vid hårda krav på standardosäkerheten i höjd för standardnivå 1 och 2 kan faktorn för standardosäkerhet i plan behöva höjas upp till 5, läs mer i referens [3] <detta dokument>. Hårdare krav på standardosäkerheten i höjd påverkar kravställningen på stödpunkter, efterbearbetning med mera liksom kostnaden för uppdraget.

Laser- och bilddatainsamling kan göras vid samma insamlingstillfälle för att erhålla låg lägesosäkerhet i både plan och höjd samtidigt. Än så länge är detta vanligast för standardnivå 3.

Det förekommer också, exempelvis vid inventering, höga krav på tolkbarhet medan lägesosäkerheten är mindre viktig. I sådana fall kan kraven på lägesosäkerhet minskas jämfört med tumreglerna.



## Kompletterande text till HMK-Laserdata 2014, avsnitt 3.2: Signalering och inmätning av markstöd

Med den låga mätosäkerhet som laserskanning ger i dag börjar vi närma oss gränsen för vad Nätverks-RTK mot SWEPOS klarar av i höjd för standardnivå 1 och 2, om målsättningen är att kontrollmetodens standardosäkerhet är  $\leq 1/3$  av laserskanningens.

Standardosäkerheten i bestämningen av ytan minskar med antalet kontrollpunkter – även om det finns en korrelation mellan mätningarna, eftersom punkterna ligger så tätt och eftersom inmätningen sker under en kort tidsperiod.

Antingen mäts ett flertal punkter i varje stöd-/kontrollyta, läs mer i referens [3] <detta dokument>, eller så väljs annan metod enligt HMK-ReGe 2013, bilaga B.1. Nätverks-RTK mot SWEPOS är inte lämplig för standardnivå 3 eller vid särskilda krav på lägesosäkerhet i standardnivå 2.

## Justerad och delvis ny text i HMK-Laserdata 2014, bilaga A.3.2: Produkt och metadata

### c.1) Kontroll med hjälp av kontrollytor/objekt på öppna ytor

Objekten kan vara signalerade eller naturliga. För att undvika inverkan av klassning och punkttäthet placeras de på väldefinierade ytor i öppen terräng. Kontrollen kommer därför att ge en realistisk bild av lägesosäkerheten på öppna väldefinierade ytor men en optimistisk bild av lägesosäkerheten på områden med vegetation, stora lutningar mm.

Kontrollen sker genom jämförelse mellan laserpunktmolnet, efter beräkning enligt avsnitt 3.3.3 <i HMK-Laserdata 2014>, och ytor/objekt med kända positioner. För denna kontroll används:

- *Stödytor/stödobjekt* som har lägesbestämts för att passa in laserdata mot överordnat referenssystem. Utförs av leverantören och resultatet redovisas i produktionsdokumentationen, se Bilaga A.1.3 <i HMK-Laserdata 2014>.
- *Oberoende kontrollytor/kontrollobjekt*, som mäts in separat och fördelas jämnt över projektområdet. Beställaren avgör vem som utför kontrollen – i egen regi eller som ett tilläggsuppdrag till leverantören.

I praktiken kan även andra konfigurationer komma ifråga. Exempelvis kan brunnslock och streckmålningar i vägbanan mätas in i såväl höjd som plan (alla fyra hörnen på ett målat streck). Orsaken kan vara att sådana inmätningar behövs i andra sammanhang, för andra ändamål eller för att åstadkomma kombinerade produkter, där laserdata bara är en av flera datakällor. Det bör dock gå att tillämpa beskrivet förfarande även i dessa sammanhang.

- RMS används som kvalitetsmått vid kontroll av laserdata i **höjded**. *Off-set*, radiellt, används som kvalitetsmått vid kontroll av laserdata i **plan**.

Tumregler för toleranser för *enskilda ytor/objekt* redovisas i Tabell A.3.2 <i HMK-Laserdata 2014>. Där finns även tumregler för *genomsnittliga RMS i plan och höjd*. Värdena utgår från att jämförelseytorna/-objekten är utformade på det sätt som beskrivs i avsnitt 3.1.2 <i HMK-Laserdata 2014>.

Totalt för hela projektet beräknas även *medelskiftet i höjd*, *Northing* och *Easting* samt *totalt, radiellt off-set i plan*. För dessa storheter ger HMK – för tillfället – inga toleranser, men de ska redovisas för att ge möjlighet till en kvalitativ granskning av helheten. Dessutom är det naturligtvis möjligt för varje beställare att ställa egna krav på dessa storheter.

Läs mer om tumreglerna, toleranser med mera i referens [3] <detta dokument>.

- RMS-värden beräknas enligt:

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

där  $\Delta$  avser avvikelserna mellan lasermätningen och inmätningen av jämförelseobjektet och  $n$  är antalet punkter.

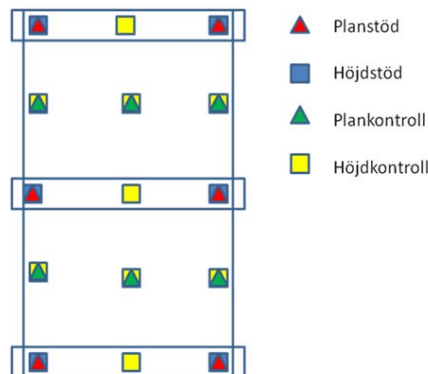
- Medelskift, i höjd ( $\Delta \bar{H}$ ) och plan ( $\Delta \bar{N}$ ,  $\Delta \bar{E}$ ), beräknas som:

$$\Delta \bar{H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i \quad \Delta \bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta N_i \quad \Delta \bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta E_i$$

- Radiellt off-set i plan beräknas som:

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

$$\Delta R_i = \sqrt{\Delta N_i^2 + \Delta E_i^2} \quad (\text{enskilt objekt})$$



**Figur.** Principiell placering av stöd, kontroller och tvärstråk i ett skanningsområde på 25x50 km i NNH.

**Tabell A.3.2 <i HMK-Laserdata 2014>.** Formler avseende gränsvärden-/toleranser för genomsnittliga och enskilda RMS i förhållande till projektets specificerade standardosäkerhet.

	Höjd (mm)			Plan (mm)		
	Standard-nivå 1	Standard-nivå 2	Standard-nivå 3	Standard-nivå 1	Standard-nivå 2	Standard-nivå 3
<b>Slutproduktens standardosäkerhet</b>	Sh1 (100)	Sh2 (50)	Sh3 (20)	Sp1=3*Sh1 (300)	Sp2=3*Sh2 (150)	Sp3=2,5*Sh3 (50)
<b>Gränsvärde, genomsnittliga RMS i kontroll-/stödpunkter för hela projektet (tumregel)</b>	1,6*Sh1 (160)	1,6*Sh2 (80)	1,6*Sh3 (30)	1,6*Sp1 (480)	1,6*Sp2 (240)	1,6*Sp3 (80)
<b>Tolerans, enskilda RMS i kontroll-/stödpunkter (tumregel)</b>	2*Sh1 (200)	2*Sh2 (100)	2*Sh3 (40)	2*Sp1 (600)	2*Sp2 (300)	2*Sp3 (100)

Inom parentes i tabellen framgår faktiska värden på standardosäkerhet från Tabell 2.3 <i HMK-Laserdata 2014> samt beräknade värden för gränsvärden/toleranser.

#### Exempel:

Följande exempel kommer från NNH-projektet, läs mer i referens [3] <denna rapport>. Jämförelsen avser dels separata/oberoende kontrollpunkter, dels kontroll mot stödpunkterna – **efter** stråkutjämning och inpassning mot stöd. Exemplet avser att illustrera hur de olika lägesosäkerhetsparametrarna tas fram.

*Jämförelse mellan laserdata och kontrolllytor i höjd.*

Yta	Medelavvikelse (skift) [m]	StdAvv. (brus) [m]	RMS [m]
09P01_501H	+0.046	0.017	0.049
09P01_502H	+0.022	0.040	0.045
09P01_503H	+0.034	0.024	0.041
09P01_504H	-0.076	0.029	0.081
09P01_505H	+0.031	0.023	0.038
09P01_506H	-0.013	0.043	0.045
09P01_507H	+0.031	0.029	0.042
09P01_508H	-0.055	0.030	0.062
09P01_509H	+0.031	0.033	0.045
<b>Totalt</b>	<b>+0.006 (medel) 0.042 (RMS)</b>	<b>0.031</b>	<b>0.051 (genomsnitt)</b>

*Jämförelse mellan laserdata och stödytor i höjd.*

Yta	Medelavvikelse (skift) [m]	StdAvv. (brus) [m]	RMS [m]
09P01_001H	+0.008	0.042	0.042
09P01_002H	-0.003	0.043	0.043
09P01_003H	+0.021	0.033	0.039
09P01_004H	-0.037	0.051	0.062
09P01_005H	-0.022	0.025	0.033
09P01_006H	+0.022	0.022	0.030
Totalt	-0.002 (medel) 0.022 (RMS)	0.037	0.043 (genomsnitt)

*Jämförelse mellan laserdata och kontrollobjekt i plan.*

Objekt	dNorthing (skift) [m]	dEasting (skift) [m]	dPlan (radiellt off-set) [m]
09p01_501P	-0.102	-0.042	0.110
09p01_504P	+0.030	-0.050	0.058
09p01_505P	+0.156	-0.060	0.167
09p01_506P	+0.120	-0.050	0.130
09p02_507P	+0.175	+0.026	0.177
09p02_508P	+0.126	-0.069	0.144
09p02_509P	-0.004	+0.021	0.021
Totalt	+0.072 (medelskift) 0.117 (RMS)	-0.032 (medelskift) 0.048 (RMS)	0.127 (RMS, radiellt medel-offset)

*Jämförelse mellan laserdata och stödobjekt i plan.*

Objekt	dNorthing (skift) [m]	dEasting (skift) [m]	dPlan (radiellt off-set) [m]
09p01_001p	-0.054	-0.084	0.100
09p01_002p	-0.128	+0.129	0.182
09p01_003p	-0.050	-0.002	0.050
09p01_005p	+0.214	-0.057	0.221
09p01_006p	-0.321	+0.054	0.326
Totalt	-0.068 (medelskift) 0.185 (RMS)	+0.008 (medelskift) 0.077 (RMS)	0.200 (RMS, radiellt medel-offset)

## Slutsats

Punkttätheten var specificerad till  $\geq 0.5$  punkter per kvm, vilket motsvarar ett punktavstånd på ca 1,5 meter i genomsnitt. Om vi därför hänför projektet till Standardnivå 1 så skulle toleranserna för **enskilda** värden, enligt tabell A.3.2 ovan, bli:

- RMS i höjd: max 200 mm på varje yta.
- Off-set i plan: max 600 mm för varje objekt.

En jämförelse med de gulmarkerade värdena i tabellerna visar att aktuella ytor/objekt klarar kraven i samtliga fall.

Låt oss även titta på **medelskift** och **genomsnittliga** RMS-värden

*Sammanställning av samtliga ytor/objekt (enhet: meter).*

<b>Höjd</b> , totalt för alla ytor (15 st.)	+0.003 (medelskift H) 0.035 (RMS)	0.034 (StdAvv H)	0.048 (genomsnittligt RMS-höjd)
<b>Plan</b> , totalt för alla objekt (12 st.)	+0.014 (medelskift N) 0.149 (RMS)	-0.015 (medelskift E) 0.062 (RMS)	0.021 (radiellt off-set) 0.161 (genomsnittligt RMS-plan)

Ur detta kan vi utläsa att projektet totalt sett ligger väl centrerat, utan nämnvärda skift i vare sig höjd (0.003) eller plan (0.021 radiellt), samt att genomsnittliga RMS ligger väl under tumregelns värden både i höjd (0.048 vs. 0.160) och plan (0.161 vs. 0.480).

Även om det inte finns regelrätta toleranser för dessa storheter så ger de som synes tilläggsinformation, som kan vara av betydelse för helhetsbedömningen.

## 5 Referenser

- [1] Dan Klang & Helén Burman (2006): *En ny svensk höjdmodell – laserskanning, testprojekt Falun*. Lantmäteriet, Sverige. LMV-rapport 2006:3.
- [2] Andreas Rönnerberg (2011): *Höjdmodellens noggrannhet*. Lantmäteriet, Sverige. Intern PM - Ny Nationell Höjdmodell, 2011-04-06.
- [3] Patric Jansson & Clas-Göran Persson (2013): *The effect of correlation on uncertainty estimates – with GPS examples*. Journal of Geodetic Science, KTH. Volume 3, June 2013.
- [4] Statens kartverk, Norge (2013) *Produktspesifikasjon Nasjonal modell for høydedata fra laserskanning (FKB-Laser), Versjon 2.0, 2013-02-01*.

## Bilaga: Lägesosäkerheten i NNH

Följande analys bygger på 324 skanningsområden från produktionen av den nationella höjdmodellen (f.d. NNH). Olika aspekter på lägesosäkerheten studeras.

Vi analyserar avvikelserna i stöd- och kontrollpunkter **efter** stråktjämföring och annan anpassning till det överordnade referenssystemet.

Det huvudsakliga verktyget är RMS (root mean square), dvs:

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

där  $\Delta$  avser skillnaden mellan lasermätningen och inmätningen av jämförelseobjektet och  $n$  är antalet punkter.

### Projektvisa RMS i plan och höjd

Med "projekt" avser vi här mätning inom ett skanningsområde, som är 25x50 km.

Genomsnittliga värden för de projektvisa RMS i plan är 0.258 m för stödobjekt och 0.274 m för kontrollobjekt (265 mm i medeltal). De empiriska, två-sidiga, 95 %-iga konfidensintervallen är [0.114-0.390] m för stöd- och [0.093-0.446] m för kontrollobjekt. Ensidiga 95 %-intervall är  $\leq 0.371$  m för stöd- och  $\leq 0.412$  m för kontrollobjekt - eller som avrundat genomsnitt  $\leq 0.400$  m.

Genomsnittliga värden för de projektvisa RMS i höjd är 0.049 m för stödytor och 0.052 m för kontrolltytor (50 mm i medeltal). Det empiriska, två-sidiga, 95 %-iga konfidensintervallet är ungefär [0.029-0.083] m för både stöd- och kontrolltytor. Ett ensidigt 95 %-intervall är  $\leq 0.077$  m, eller avrundat  $\leq 0.080$  m.

Utifrån dessa RMS-skattningar får vi att standardosäkerheten i plan alltså är ca. 5 gånger standardosäkerheten i höjd. En tidig tumregel, som hittills har applicerats, är att denna faktor i stället är ca. 3. För NNH verkar alltså kvoten mellan standardosäkerheten i plan och höjd vara större än vad tumregeln anger.

Ett annat sätt att skatta denna faktor redovisas i nästa avsnitt, och förhållandet mellan genomsnittliga och individuella RMS-värden (inom en stöd- eller kontrolltyta) redovisas i en därpå följande simuleringstudie.

## Relationen mellan RMS i plan och höjd

I denna delanalys skattar vi direkt medelvärdet av faktorn mellan standardosäkerhet i plan och höjd, genom att beräkna medeltalet av kvoten mellan RMS i plan och höjd för de 324 projekten.

Vi får då följande medeltal: 5.33 för stödpunkter (standardavvikelse 2.0) och 5.23 för kontrollpunkter (standardavvikelse 2.2), dvs. 5.28 i genomsnitt. Det stämmer bra med föregående avsnitt.

Ett 95 %-igt konfidensintervall för denna kvot är (empiriskt) [2.25-9.83] för stödpunkter och [1.79-9.72] för kontrollpunkter. Dvs. kvoten - för NNH - mellan standardosäkerheten i plan och höjd ligger i intervallet 2-10. Även det ger fog för att öka tumregelns faktor 3.

## Skift i höjd per projekt

Genomsnittsavvikelsen i höjd inom ett projekt - **efter** stråkutjämnning etc. - ges av följande RMS-värden: 0.004 m för stöd- och 0.020 m för kontrolllytor.

Ungefärliga toleranser - enligt 2-sigma principen - för kvarstående höjdavvikelser (medelskiftet) skulle alltså bli  $\pm 8$  mm för stödytor och  $\pm 40$  mm för kontrolllytor, om man antar ett normalfördelnings-tänkande. Motsvarande empiriska intervall är  $\pm 5$  mm resp.  $\pm 40$  mm, så låt oss anta de avrundade toleranserna  $\pm 10$  mm resp.  $\pm 40$  mm

## Totalt RMS vs. individuella RMS-värden – en simuleringsstudie

Den tidigare, empiriska analysen kompletteras här med en simuleringsstudie a la Monte Carlo. Avsikten är att ge en tumregel för hur genomsnittligt, totalt RMS-värde förhåller sig till de individuella RMS-värdena inom det projekt som det har beräknats ur. Det kan t.ex. ge tumregler för hur stora de genomsnittliga RMS-värdena bör vara i förhållande till de individuella - eller tvärtom.

Utgångspunkten är hanteringen av stöd och kontroll i höjd. En anpassning har gjorts - så gott det går - till NNH, t.ex. vad gäller antal punkter inom en stöd-/kontrolllyta och antalet stöd-/kontrolllytor totalt för projektet.

Kvoten mellan det största individuella RMS-värdet och det genomsnittliga RMS-värdet beräknas i varje simulering, dvs.

$$\max(RMS_i) / RMS_{medel}$$

Det gav medeltalet 0.85, dvs. det största enskilda värdet är genomsnitt  $1/0.85 \approx 1.18$  gånger medeltalet, dvs. ca 18 % större. Nu är ju inte medeltalet särskilt bra som mått - bättre då att tänka i termer av konfidensintervall även här.



Ett ensidigt 95 %-igt konfidensintervall för kvoten blir (empiriskt)  $\leq 0.8$ , dvs. sannolikheten är bara 5 % att ett individuellt RMS-värde är mer än  $1/0.8 = 1.25$  (dvs. 25 %) större än det genomsnittliga RMS-värdet.

Utifrån detta kan vi skatta toleranser för enskilda RMS-värden (inom en stöd-/kontrolllyta) från de genomsnittliga toleranserna

Då får vi följande ensidiga, 95 %-iga intervall (toleranser):

- Plan:  $\leq 0.464$  m (0.371 gånger 1.25) för stöd- och  $\leq 0.515$  m (0.412 gånger 1.25) för kontrollobjekt. Säg  $\leq 0.500$  m i genomsnitt.
- Höjd:  $\leq 0.100$  m (ungefär 0.077 gånger 1.25) för bägge kategorierna.

### Sammanfattning – toleranser/gränsvärden

Hur bör då en kontrollapparat baserad på vår analys formuleras? Sammanfattningsvis verkar följande värden rimliga:

- Toleransen för *enskilda RMS i höjd*, inom en kontrolllyta, kan sättas till 100 mm.
- Toleransen för *enskilda off-set i plan*, inom ett kontrollobjekt, kan sättas till 500 mm (5 gånger höjdtoleransen).
- Gränsvärdet för det *genomsnittliga RMS i höjd*, inom ett projekt, kan sättas till 80 mm (ca. 0.8 gånger toleransen för enskilda RMS).
- Gränsvärdet för *genomsnittlig off-set i plan*, inom ett projekt, kan sättas till 400 mm (5 gånger föregående tolerans).
- Gränsvärdet för *genomsnittliga höjdavvikelser (medelskiftet)*, inom ett projekt, kan sättas till  $\pm 10$  mm för stödpunkter och  $\pm 40$  mm för kontrollpunkter.

Observera att vi här inte lägger ett förslag att ändra toleranserna för det nationella höjdmodellsprojektet. Syftet är bara att presentera toleranser som harmonierar med "riktiga" data, dvs. snarast en efterhandskaraktäristik av lasermätningarna. Och en begränsning är naturligtvis att underlaget ligger på en övergripande projektnivå, vilket inte gör det möjligt att direkt studera egenskaper som ligger på detaljnivå, t.ex. enskilda kontrolllytor etc. (Ett mindre exempel på detaljnivå ingår dock i förslaget i kapitel 4.)

Då är då frågan hur väl dessa toleranser/gränsvärden stämmer med verkligheten. I Tabell 4 redovisas resultatet av mätningen för den nationella höjdmodellen – som naturligtvis är korrelerad med toleranserna, eftersom den har utgjort underlag för att ta fram dessa.

Som synes ligger förkastningsnivån på knappt 5 %, som var den avsedda nivån. Konstruktionen verkar alltså fungera – särskilt för de oberoende kontrollytorna/-objekten.

*Tabell 4. Jämförelse mellan framtagna gränsvärden/toleranser och produktionen av den nationella höjdmodellen. Andelen i % som överskrider gränsen.*

	Höjd		Plan	
	Stödytor	Kontroll- ytor	Stödobjekt	Kontroll- objekt
<b>Genomsnittliga RMS/off-set</b>	3%	4%	2%	6%
<b>Genomsnittliga höjdavvikelser (medelskift)</b>	1 %	5 %	-	-

Till vilken standardosäkerhet ska man då hänföra toleranserna, dvs. vilken standardosäkerhet för slutprodukten motsvaras av toleransvärdena? Vi räknar ju "baklänges" här.

Det finns flera motkandidater till att använda själva toleranserna som mått på slutproduktens lägesosäkerhet:

- toleransen för *enskilda RMS i höjd*, inom en kontrollyta, är 100 mm; motsvarar väntevärdet 65 mm för tillhörande standardosäkerhet
- toleransen för *enskilda off-set i plan*, inom ett kontrollobjekt, är 500 mm; motsvarar väntevärdet 330 mm för tillhörande standardosäkerhet

eller

- gränsvärdet för det *genomsnittliga RMS i höjd*, inom ett projekt, är 80 mm; motsvarar väntevärdet 50 mm för tillhörande standardosäkerhet
- gränsvärdet för *genomsnittligt off-set i plan*, inom ett projekt, är 400 mm; motsvarar väntevärdet 265 mm för tillhörande standardosäkerhet.

Dvs. ska standardosäkerheten i höjd sättas till 50, 65, 80 eller 100 mm, och den i plan till 265, 330, 400 eller 500 mm?

Den intuitiva tolkningen är att **genomsnittligt RMS i kontrollpunkterna** är den standardosäkerhet som man kan förvänta sig av slutprodukten – för andra hårdgjorda ytor, som inte är kontrollpunkter.

Avrundat sätter vi därför slutproduktens standardosäkerhet till 50 mm i höjd och 250 mm i plan i denna studie. Motsvarande gräns-

värden för genomsnittliga RMS/off-set är 80 mm i höjd och 400 mm i plan, men de betraktar vi mest som *tumregler* för dessa översiktliga indikatorer.

Däremot är toleranserna för enskilda RMS/off-set – 100 resp. 500 mm – mer konstruktiva som kontrollmetoder eftersom de anger var problemen finns; den informationen får man inte ur de genomsnittliga värdena.

Vi får sammanfattningsvis de värden som anges i Tabell 5.

**Tabell 5.** Gränsvärden/toleranser i förhållande till specificerad standardosäkerhet.

	Höjd (mm)	Plan (mm)
<b>Specificerad standardosäkerhet för slutprodukten</b>	50	250
<b>Gränsvärde för genomsnittliga RMS i kontroll-/stödpunkter för hela projektet (tumregel)</b>	$1.6 \times 50 = 80$	$1.6 \times 250 = 400$
<b>Tolerans för enskilda RMS i kontroll-/stödpunkter</b>	$2 \times 50 = 100$	$2 \times 250 = 500$

Varför kan man då inte använda "specificerad standardosäkerhet för slutprodukten" som tolerans? Dvs. 50 mm i höjd och 250 mm i plan.

I Tabell 6 redovisas den andel av skanningsområdena som skulle ha underkänts om standardosäkerheterna hade använts som toleranser. Jämför med Tabell 4 – många områden skulle underkännas i onödan!

**Tabell 6.** Mängden underkända skanningsområden om standardosäkerheterna används som toleranser för kontrollpunkterna. Andelen i % som överskrider gränsen.

	Kontrolltyor i höjd	Kontrollobjekt i plan
<b>Genomsnittliga RMS/off-set</b>	46%	50%
<b>Genomsnittliga höjdavvikelser</b>	30%	-