

**Rapportserie: Geodesi och Geografiska informationssystem**

---

**En ny svensk höjdmodell**

**- Laserskanning, Testprojekt Falun -**

**Dan Klang, Lantmäteriet  
Helén Burman, Digpro AB**

**Gävle 2006**

**L A N T M Ä T E R I E T**



LANTMÄTERIET



Copyright © Lantmäteriverket, 801 82 Gävle  
2006-05-02

Författare Dan Klang, Lantmäteriet och Helén Burman, Digpro AB  
Typografi och layout Rainer Hertel

Totalt antal sidor 66

LMV-rapport 2006:3 - ISSN 0280-5731

**En ny svensk höjdmodell**  
**- Laserskanning, Testprojekt Falun -**

**Dan Klang, Lantmäteriet**  
**Helén Burman, Digpro AB**

**Gävle 2006**



## Sammanfattning

Denna rapport är en sammanställning av de studier som genomförts av Lantmäteriet de senaste åren kring revidering av den rikstäckande höjdmodellen. Rapporten innehåller en sammanfattande beskrivning av tekniken flygburen laserskanning samt en studie, "Testprojekt Falun", som genomförts i Lantmäteriets regi. Vid formulering av testprojektet har Lantmäteriets interna behov samt de önskemål som framkommit i remissen "En ny svensk höjdmodell" - Dnr: 505-2003/2417, vägts samman. Testområdet, 25 km x 25 km, flögs från 2000 meters höjd dels för utvärdera noggrannheten vid denna flyghöjd dels i syfte att etablera referensdata för framtida utvärdering av alternativa tekniker för insamling av höjddata.

Användarnas önskemål, baserade på remissvaren, har sammanfattats till noggrannheten 0.5 m för ett 2.5-metersgrid inkluderande kvalitetsbeskrivning och en tidplan motsvarande 5 år. Remissvaren har bl.a. presenterats vid Kartdagarna 2004.

"Testprojekt Falun" har fokuserat på metoder för att säkerställa geometrin i laserdata. Utvärderingen av den geometriska noggrannheten har sedan använts för att beräkna noggrannheten i den slutgiltiga höjdmodellen. Höjdmodellens noggrannhet är bättre än de 0.5 m som formulerats. Samtidigt har det konstaterats att noggrannheten försämras i områden med tät vegetation där punkttätheten är låg i markklassade data.

Det punktmoln som genereras vid laserskanningen måste, efter den geometriska korrigeringen, genomgå ett antal bearbetningsmoment innan höjdmodellen är brukbar. Bearbetningen inleds med att data filtreras för att få fram markpunkter. Filtreringsresultatet utvärderas, och även om det är möjligt att ytterligare optimera de parametrar som använts i processen, kommer det att återstå ett behov av manuell editering för att förbättra noggrannheten. Speciellt finns det behov av förbättrade metoder för hantering av broar. Ett annat problem är vattenytor, eftersom de generellt sett är dåligt representerade i laserdata.

Ett förslag på hur noggrannheten i höjdmodeller, till skillnad från noggrannhet i enstaka mätta punkter, kan bestämmas har formulerats inom projektet. Metoden beskriver en summerad felbudget som inkluderar höjd- och planfel tillsammans med punkttäthetens inverkan på höjdmodellens noggrannhet. Denna felbudget är tänkt att appliceras på resultatet från de mätmetoder som är aktuella för insamling av höjddata. Metoden skapar möjlighet att hantera noggrannhetsklassificering av en höjdmodell även om insamlingsmetoderna eller efterbearbetningens omfattning skiljer sig.

Laserskanning är en lämplig metod för insamling av höjddata. Det huvudsakliga skälet till detta är den höga punkttätheten och den relativt goda "insyn" som uppnås i områden som täckts av vegetation. Efter inpassning mot ett begränsat antal stöd är höjdnoggrannheten i enstaka mätningar som regel mycket hög. Om plannoggrannheten kan kontrolleras med lämpliga metoder finns goda förutsättningar för korrigering och även att uppnå de noggrannhetskrav som ställts på den rikstäckande höjdmodellen.

Produktionstid och kostnad för en nationell höjdmodell är tydligt kopplad till valet av datafångstmetod, laserskanning alternativt digitala flygbilder. Antalet effektiva flygdagar per år, olika flyghöjder och stråkbredder är parametrar som tillsammans med flygtid per dag bör beaktas. En sådan analys är dock inte inkluderad i rapporten. Ytterligare en aspekt som bör diskuteras vid val av metod är behovet av manuella bearbetningsinsatser. Dessa manuella insatser är väsentligt större vid mätning i bilder än vid editering av laserdata.

Förhoppningen är att denna sammanställning skall ge en helhetsbild av det arbete som genomförts de senaste åren och att syftet med en revidering av den rikstäckande höjdmodellen tydliggörs.

Dessutom vill Lantmäteriet tacka de personer och organisationer som besvarat remissen samt Digpro AB, Stockholms stadsbyggnadskontor, Vägverket och Falu kommun som bidragit med bilder och referensdata.

# Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	5
1. Inledning .....	9
1.1 Bakgrund .....	9
1.2 Laserskanning kontra fotogrammetri .....	9
1.3 Syfte och mål .....	9
1.4 Rapportens indelning och struktur .....	10
1.5 Definitioner .....	10
1.6 Övrig dokumentation .....	11
2. Testprojekt Falun .....	13
2.1. Inledning .....	13
2.2. Produktionsmoment.....	14
2.2.1. Datafångst.....	14
2.2.2. Geometrisk korrigerig.....	14
2.2.3. Bearbetning.....	14
2.2.4. Modellerig.....	14
2.2.5. Kvalitetsbeskrivning av höjdmodeller.....	17
2.3. Övrigt.....	18
3. Flygburen laserskanning - metodbeskrivning.....	19
3.1. Viktiga parametrar vid flygburen laserskanning .....	20
3.2. Geometrisk korrigerig.....	21
3.2.1. Stråkutjämning.....	23
3.2.2. Stråkutjämning – global korrigerig .....	23
3.2.3. Stråkutjämning – stråkvis korrigerig.....	24
3.2.4. Planinpassning .....	25
3.2.5. Höjdinpassning .....	26
3.3. Bearbetning - filtrering .....	27
3.3.1. Låga punkter .....	30
3.4. Bearbetning – klassificering och modellerig av objekt ovan mark .....	30
3.4.1. Broar .....	31
3.4.2. Vegetation .....	32
3.4.3. Byggnader .....	33
3.4.4. Sjöar och vattendrag .....	34

3.5.	Höjdmodell - DEM.....	35
3.6.	Kvalitetsbeskrivning av höjdmodellen - felbudget.....	36
4.	Data.....	38
4.1.	Laserdata .....	38
4.1.1.	Datafångst.....	38
4.1.2.	GPS-data.....	39
4.1.3.	Databearbetning – Blom Norkart Mapping .....	39
4.1.4.	Dataleverans – LAS-format, Trajectory .....	39
4.2.	Referensdata .....	41
4.3.	Referenssystem .....	43
4.3.1.	Horisontellt - plan .....	43
4.3.2.	Vertikalt - höjd.....	43
4.3.3.	Transformation .....	43
5.	Resultat och diskussioner.....	44
5.1.	Stråkutjämning.....	44
5.1.1.	Globala korrektioner .....	44
5.1.2.	Stråkvisa korrektioner.....	44
5.1.3.	Stråkens avvikelser mot kontrollytorna i höjd.....	45
5.2.	Plankorrektion.....	46
5.2.1.	Jämförelse med GGD.....	46
5.2.2.	Jämförelse med ortofoto .....	46
5.2.3.	Jämförelse med Falu kommuns vektordata.....	47
5.2.4.	Planutvärdering .....	48
5.3.	Höjdkorrektion .....	49
5.4.	Bearbetning.....	49
5.4.1.	Effekten av olika filtreringsparametrar i TerraScan .....	49
5.4.2.	Resultat från markklassningen .....	50
5.5.	Höjdmodellens noggrannhet .....	54
6.	Slutsatser .....	57
6.1.	Produktion - noggrannhet .....	57
7.	Framtida projekt .....	59
7.1.	Förslag till kompletterande studier .....	59
7.2.	Förslag till tänkbara studier .....	60
8.	Referenser .....	61



# 1. Inledning

## 1.1 Bakgrund

Den behovsanalys som genomfördes i början av år 2004, i form av en remiss från Lantmäteriet, har bidragit till en ökad förståelse för samhällets behov av noggrannare höjddata. Därifrån har riktlinjer formuleras för revideringen av den nationella höjddatabasen.

Revideringen av Lantmäteriets höjdmodell är planerad att påbörjas under 2007. Tiden fram till dess skall användas för utvärdering av bl.a. nya insamlingstekniker, noggrannhetsbehov, produktionstid och kostnad för revideringen.

Flygburen laserskanning för framställning av höjdmodeller har tidigare utvärderats av Lantmäteriet i två mindre studier. Som komplement till dessa studier formulerades och påbörjades ett projekt år 2004, "Testprojekt Falun", där ett område motsvarande ett topografiskt kartblad, 25 km \* 25 km, laserskannades från 2000 meters flyghöjd. Existerande metoder för geometriska korrigeringar och filtrering/klassificering av mark har anpassats till de behov som framkommit genom Lantmäteriets behovsinventering.

## 1.2 Laserskanning kontra fotogrammetri

Erfarenhetsmässigt erhålles de största förtjänsterna, noggrannhet och kostnad, vid laserskanning av skogbeväxade och urbana områden. I tabell 1.1 redovisas fördelningen mellan olika markslag i Sverige 2004, källa SCB. Kolumnen *Flygfoto* ger en indikation på de markslag där digitala flygbilder eventuellt kan vara ett kostnadseffektivt alternativ till laserskanning. Vid val av datafångstmetod bör således även markslagets egenskaper beaktas, där digitala flygbilder sannolikt kan vara ett fullvärdigt alternativ i exempelvis icke skogbeväxade fjällområden.

Tabell 1.1: Fördelning mellan olika markslag i Sverige 2004, källa SCB.

<b>Markslag</b>	<b>Areal (ha)</b>	<b>%</b>	<b>Laser</b>	<b>Flygfoto</b>
Jordbruksmark	3466562	7,70		7,70
Skogsmark	23506500	52,20	52,20	
Bebyggd mark	1287695	2,86	2,86	
Golfbanor, skidpister	30400	0,07		0,07
Täkt	47300	0,11		0,11
Öppen myr, ej torv	3867550	8,59		8,59
Gräsbevuxen, hed	3229950	7,17		7,17
Berg i dagen + övrigt	5597500	12,43		12,43
<b>Land, summa</b>	<b>41033457</b>	<b>91,13</b>		
Vatten, insjö	3995990	8,87		8,87
<b>Totalt</b>	<b>45029490</b>	<b>100,00</b>	<b>55,06</b>	<b>44,94</b>

## 1.3 Syfte och mål

Syftet med "Testprojekt Falun" är att utvärdera flygburen laserskanning som insamlingsteknik för revidering av den nationella höjddatabasen. Dessutom skapas en

höjdmodell, med beskriven kvalitet, som kan användas som referensdata vid utvärdering av alternativa lasersensorer och datafångstmetoder.

Målet är att öka kompetensen inom flygburen laserskanning på Lantmäteriet samt att utforma riktlinjer för produktion av en ny höjdmodell baserad på tekniken flygburen laserskanning.

## 1.4 Rapportens indelning och struktur

Inledningen, kapitel 1, beskriver kortfattat förutsättningarna för arbetet.

Den studie som gjorts för att ytterligare utvärdera flygburen laserskanning som insamlingsmetod redovisas i kapitel 2, Testprojekt Falun.

Tekniken flygburen laserskanning utvecklas kontinuerligt, framförallt gäller det högre laserpulsfrekvens och flyghöjd. Dessa och andra viktiga egenskaper beskrivs i kapitel 3 som även innehåller beskrivningar av de metoder som använts för att korrigera och extrahera de laserpulser som representerar markytan.

De data, laserdata såväl som referensdata, som använts i studien beskrivs i kapitel 4. Detta kapitel innehåller även information om de referenssystem och transformationer som använts i studien.

Resultaten från de i kapitel 3 beskrivna bearbetningsprocesserna redovisas i kapitel 5 där även höjdmodellen noggrannhet beskrivs.

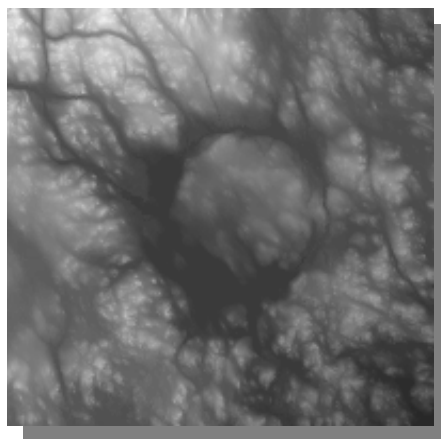
I kapitel 6 Slutsatser och kapitel 7 Framtida projekt sammanfattas erfarenheterna från projektet samtidigt som ämnesområden som kräver kompletterande studier tydliggörs.

I kapitel 8 redovisas för den genomförda studien relevant referenslitteratur.

## 1.5 Definitioner

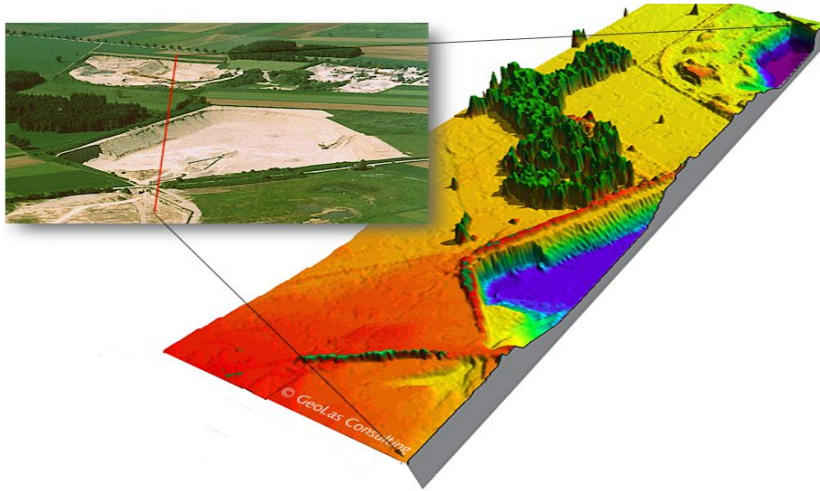
För att inga missförstånd skall uppstå används begreppen kring höjddata i enlighet med nedanstående beskrivningar. Det finns skilda åsikter om dessa definitioner men målet är att använda samma terminologi i denna rapport som den som användes i remissen.

*Digital höjdmodell (DEM):* är en digital beskrivning av markytan, figur 1.1. De höjddata som Lantmäteriet för närvarande förvaltar kan hänföras till beskrivningen för en digital höjdmodell, lagrad som ett regelbundet rutnät.



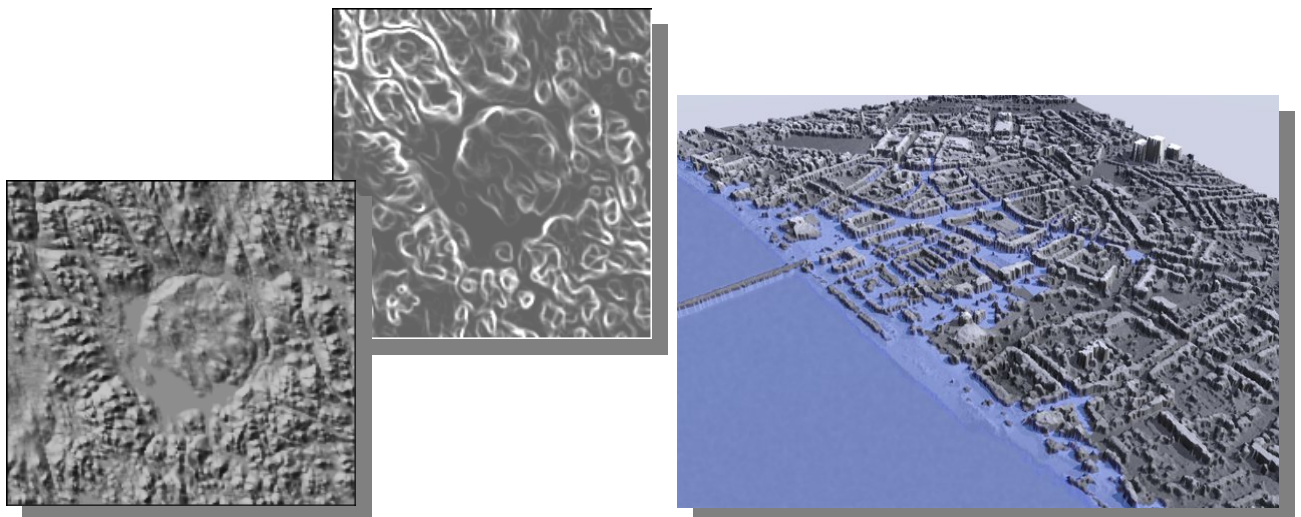
Figur 1.1: Höjdmodell från Lantmäteriets 50 meters grid. Höjdmodellen som visar Siljansringen är bl.a. framställd genom fotogrammetrisk mätning i stereomodell.

*Digital ytmodell (DSM)*: är oftast resultatet av flygburen mätning, flygfotografering eller laserskanning. Ytan representerar i detta fall resultatet av bildmatchning eller "obearbetade" laserdata, figur 1.2. Byggnader, vegetation och andra objekt som står ovanpå markytan finns således inkluderade i dessa data.



Figur 1.2: Digital ytmodell. Denna "top-of-the-world" modell är resultatet av flygburen laserskanning eller automatisk bildmatchning.

*Digital terrängmodell (DTM)*: är en digital beskrivning av terrängen baserad på höjddata. Sluttningskartor, avrinningsmodeller och terrängskuggning kan alla hänföras till begreppet terrängmodell.



Figur 1.3: Exempel på terrängmodeller. Från vänster till höger visas terrängskuggning, sluttningsskarta och avrinningsmodell.

## 1.6 Övrig dokumentation

Delar ur rapporten har tidigare presenterats för ULI i Norrköping 2003, Kartdagarna 2004, artikel i ULI-bulletinen 1/2004, Kartdagarna 2005 och SKMF 2005 i Göteborg.

Den geometriska analysen av data presenterades vid en internationell konferens "3D Optical Measurements" i Wien, oktober 2005. I samband med denna konferens publicerades även en artikel (Klang & Burman 2005).

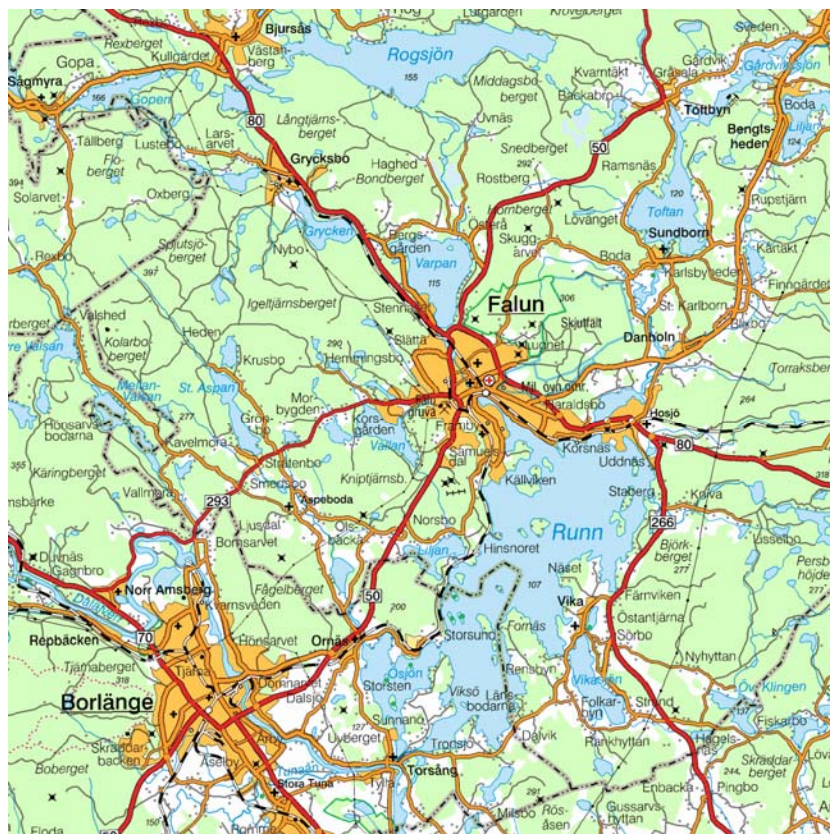
Referenslistan innehåller fler artiklar än de som refererats i rapporten. De kan dock vara av intresse för den vetgirige. Underrubrikerna, geometri, bearbetning, höjdmodeller, myndigheter, fotogrammetri och standarder är tänkta att förenkla sökningen efter relevanta artiklar. Litteraturen har dock inte sammanfattats eftersom denna uppgift inte inkluderats inom ramen för detta projekt.

## 2. Testprojekt Falun

### 2.1. Inledning

Baserat på de önskemål som framförts i remissvaren samt resultat från av Lantmäteriet tidigare genomförda studier kring flygburen laserskanning (Talts, 2003) har "Testprojekt Falun" formulerats. Projektets utformning skapar förutsättningar för utvärdering av såväl teknik som tidsåtgång och kostnad. Bedömning av de senare, tid och kostnad, kan ske relativt den noggrannhet, flyghöjd, datafångstmetod, lagring och distribution som Lantmäteriet anser lämplig för den rikstäckande höjdmodellen. Dessa parametrar kommer belysas i framtida projekt.

Skälen till att Falun valts som testområde är flera, bl.a. har GGD nyligen reviderats, terräng och markslag har stor variation, samarbete med Falu kommun ger tillgång till noggrant referensdata samt att närheten till Gävle ger goda möjligheter för fältstudier. Figur 2.1 redovisar områdets geografiska utbredning, motsvarande ett topografiskt kartblads storlek.



Figur 2.1. Testprojekt Falun, geografisk utbredning, 25 km \* 25 km.

Resultatet av den tekniska utvärderingen kan även användas som underlag för bedömning av produktionstid och kostnad för en ny rikstäckande höjdmodell. I rapportens avslutande kapitel presenteras och diskuteras även projektförslag som komplement till denna studie.

## **2.2. Produktionsmoment**

Faluprojektet har delats in i följande produktionsmoment

1. Datafångst
2. Geometrisk korrigerigering
3. Bearbetning
4. Modellerigering
5. Kvalitetsbeskrivning av höjddmodellen

Nedan följer en kortfattad beskrivning av vad som inkluderas i dessa moment, i kapitel 3 beskrivs de mer detaljerat. I kapitel 5 redovisas resultatet av varje moment.

### **2.2.1. Datafångst**

Datafångst med flygburen laserskanning bygger på kontinuerlig mätning och samtidig registrering av sensorns position och attityd, vinklar, i luften. Till skillnad från fotogrammetrisk blocktriangulering finns ingen möjlighet till rekonstruktion av flygplanets orientering under flygningen eftersom lasern sänder ut diskreta punkter som inte med "naturlighet" kan länkas samman. Av den och flera ytterligare skäl är det viktigt att ett stabilt koncept för datafångsten etableras. Avståndet till GPS-referensstationer, övertäckningsgrad mellan stråk och behovet av tvärstråk för att skapa stabila "block" beskrivs under denna rubrik.

### **2.2.2. Geometrisk korrigerigering**

Traditionell fotogrammetrisk stereokartering för framställning av höjddmodeller förutsätter markstöd och gemensamma geometrier för det bildpar som formar en stereomodell. Bestämning av sensorns geometrier krävs även vid laserskanning. Vid flygfotografering utjämnas ett stort antal bilder till ett block med gemensam geometri. Motsvarande procedur genomförs för laserdata, fast då med laserstråk i stället för bilder som de enheter som skall bearbetas.

### **2.2.3. Bearbetning**

Vid laserskanning är det inte bara markytan, höjddmodellen, som registreras. Vegetation, byggnader, broar och andra objekt som inte representerar markytan skall filtreras, sorteras, bort. Kännedom om det geografiska läget på dessa "icke önskvärda" objekt förenklar filtreringen. Vektordata kan eventuellt fungera som indikation på de områden som skall specialhanteras och som även kan kräva manuell editering.

Ytterligare en frågeställning är om det är möjligt att harmonisera Lantmäteriets geografiska information inom ramarna för revideringen av höjddmodellen. Möjligheten att återanvända och samtidigt höjdsätta vägar och strandlinjer kommer sannolikt att utvärderas i framtida projekt.

### **2.2.4. Modellerigering**

Som beskrivits i remissen är det tänkt att höjddata som bearbetats och modellerats skall lagras i Lantmäteriets höjddatabas med de koordinater där registreringen skett. Från dessa

oregelbundna höjddata är det sedan möjligt att framställa, med skilda grader av komplexa interpolationsmetoder, regelbundna rutnät med applikationsanpassad markupplösning.

I remissen redovisades en tabell med höjdmodellens antagna degenerering vid glesare markupplösning på höjdgittret. Tabell 2.1 är en kopia av nämnda tabell.

Tabell 2.1. Uppskattade noggrannheter i bearbetade data från laserskanning, registrerade från ca 2000 meters höjd.

Rutnät (m)	Bas-DEM	2.5	5.0	10.0	50.0
$\sigma_h$ (m) ~	0.4	0.5	0.6	0.8	2.0

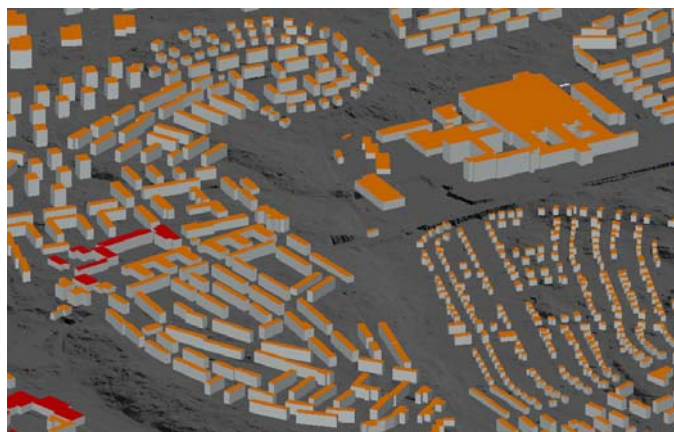
Ovanstående höjdnoggrannheter är uppskattningar och bedömningen gäller öppna plana ytor. Internationella studier indikerar försämringar i svärmätta områden som skog och vid stora lutningar mellan 3 och 5 gånger medelfelet i optimala mätningar. Vid 10 meters markupplösning skulle detta resultera i 2.4-4.0 meters medelfel i tät vegetation med stor lutning. Likt beskrivningen i tabell 2.1 har höjdmodeller med olika markupplösning framställts i projektet, interpolerade från Bas-DEM. De olika höjdmodellernas noggrannhet har utvärderats och beskrivits i (Klang & Burman, 2005).

Modellering inkluderar även editering av höjddata. Eftersom detta moment är den mest komplexa och tidskrävande delen i framställning av höjdmodellen finns mycket att vinna, såväl ekonomiskt som noggrannhetsmässigt, om en effektiv editeringsmiljö etableras. Detta kräver en del kompletterande studier.

Nedan beskrivs kortfattat hanteringen av höjdmodellen, den i projektet centrala uppgiften, och de "restprodukter" för vilka det finns möjlighet att utveckla rutiner för anpassning till Lantmäteriets övriga geografiska information.

**Höjdmodell:** Resultatet från filtrering och klassificering är fortfarande oregelbundna data. Dessa data innehåller nu även "hål" där bl.a. byggnader, vegetation och broar exkluderats från de data som klassificerats som markyta. Hålen skall fyllas, vilket sker med för ändamålet lämplig interpolationsmetod. Metoder för detta finns redan etablerade och sannolikt behövs ingen speciell anpassning till Lantmäteriets behov. Utvecklingen av laserskanning har utökats från tidigare relativt låga flyghöjder med helikopter till att nu även inkludera högre höjder med flygplan. De modelleringsrutiner som utvecklats är således med stor sannolikhet optimerade till, för Lantmäteriets ändamål, relativt hög punkttäthet vilket innebär att det kan krävas anpassning för att rätt kvalitet skall uppnås. De modelleringsrutiner som slutligen kommer att användas kommer även ge möjlighet att tydligare beskriva markens strukturer, i form av brytlinjer, än vad som idag är fallet i den befintliga höjddatabasen.

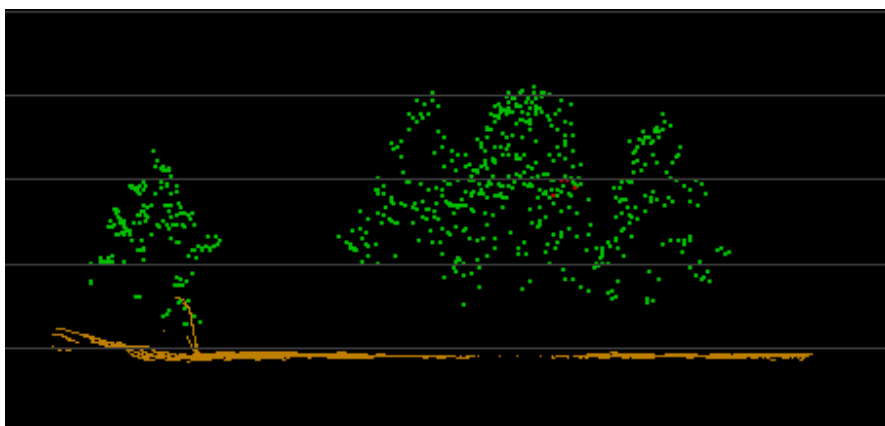
**Byggnader:** Den specifikation för byggnader som idag föreligger i GGD hanterar endast enskilda hus utanför bebyggelseområden. På längre sikt kommer, med stor sannolikhet, kraven på redovisning av enskilda hus ökas, se figur 2.2, till de områden som idag redovisas som ytor samtidigt som kraven på noggrannhet i plan kommer att skärpas. Byggnadshöjder är för stunden inte homogent hanterade i GGD. Sannolikt kommer det framledes även ställas önskemål på en mer uniform redovisning av byggnadshöjder för att skapa bättre förutsättningar vid modelleringar och förbättrad kvalitet i exempelvis den rikstäckande basen av ortofoton.



Figur 2.2. Integration med befintliga byggnadsdata och rutiner som filtrerar, klassificerar och modellerar byggnader skapar nya förutsättningar men kräver samtidigt anpassning av Lantmäteriets produktion.

Förutsättningar för en effektiv uppdatering, nykartering, av byggnader kan skapas genom det närmare samarbete som Lantmäteriet är på väg att etablera med Sveriges kommuner via Sveriges Kommuner och Landsting (SKL). De byggnadspolygoner, med hög noggrannhet i plan, som finns digitalt tillgängliga i kommunernas baser, kan liksom de tankar som finns för NVDB, sambearbetas med Lantmäteriets data för att på så sätt uppnå dels homogenitet dels en kostnadseffektiv hantering. Det är möjligt att använda lasermätningar för att lokalisera byggnader och även att, om punkttätheten är tillräckligt hög, bestämma en generell höjd eller än bättre modellera takets form.

**Vegetation:** Skogsnäringen har inte bara ett stort intresse i en höjdmodell med homogen kvalitet utan är även intresserade av trädens höjd. Klassningsrutiner finns och är redan väl etablerade, figur 2.3. Är det dessutom möjligt att ur "restprodukten" vegetation modellera träd, eller bestånd, skapas förutsättningar för intressanta applikationer om trädhöjder sambearbetas med IR-bilder.



Figur 2.3. Det krävs väl fungerande rutiner, som medger hög automation vid filtrering och klassificering av vegetation, för att uppnå en kostnadseffektiv produktion av höjdmodellen - markytan.



**Broar - vägar:** Höjdmodellen representerar markytan. Broar bör, liksom vegetation, exkluderas från höjdmodellen och hanteras på ett liknande sätt som byggnader, d.v.s. inkluderas i GGD. Om broars höjder inte finns redovisade i vare sig höjddatabasen eller GGD kommer de vägar som går ovanpå dessa broar att se ut som "solkurvor på järnvägsräls om sommaren" vid rektifiering till ortofoton. Sker redovisningen i höjddatabasen med endast ett höjdvärde/plankoordinat kommer broar att betraktas som murar vilket inte är acceptabelt vid beräkning av vattenflödesmodeller och spridningsmodeller för telekom. Den enda rimliga hanteringen av broar är således att de inkluderas i GGD och att höjddatabasen och GGD samutnyttjas vid produktion av bl.a. ortofoton. Intensitetsdata från laserdata skapar tack vare sin förmåga att "se genom" vegetation goda förutsättningar för kartläggning av skogsbilvägar.

**Strandlinje:** Finns det möjlighet att på ett entydigt sätt beskriva en rikstäckande strandlinje finns det många intressenter. Förutom Lantmäteriet är Försvarsmakten, Sjöfartsverket, Naturvårdsverket och SMHI exempel på organisationer som torde se förtjänster i en sådan samordning.

### 2.2.5. Kvalitetsbeskrivning av höjdmodeller

Med dagens snabba teknikutveckling är det inte rimligt att kvalitetsbeskriva enskilda datafångstmetoder för insamling av höjddata. Alternativet, att istället etablera rutiner för kvalitetskontroll av slutprodukten, skapar förutsättning för ett objektiva koncept som inte är relaterat till respektive insamlingsmetod utan till höjdmodellen. Lyckas man, retroaktivt, kvalitetsbeskriva data insamlat med äldre teknik med denna typ av objektiva metoder skapas även förutsättning för sambearbetning med nytt data.

I (Klang, 2005) beskrivs en metod för bestämning, genom simulering, av en höjdmodells noggrannhet. Höjdmodellens noggrannhet är formulerad som summan av de fel som genereras från bristande plan- och höjdnoggrannhet samt dess punkttäthet. Beskrivningen skapar förutsättningar att såväl globalt som lokalt, oberoende av datafångstmetod, beskriva noggrannheten i en DEM. Plan- och höjdnoggrannhet går att bestämma relativt terrestert, geodetiskt, mätta punkter. Används flygbilder för DEM-framställning genomförs oftast mätningarna i ett regelbundet rutnät, där avståndet mellan rutnätspunkterna är ett indirekt mått på punkttätheten. Vanligtvis förbättras automatiskt bestämda punkter med manuella mätningar utförda av professionella stereoooperatörer. En sådan process är kostsam. Flygburen laserskanning genererar oregelbundet fördelade mätdata som även de kräver bearbetning, automatisk såväl som manuell. Kravet på manuella bearbetningsinsatser är dock påtagligt lägre vid laserskanning än vid automatisk matchning av flygbilder.

Inhomogena databaser är aldrig att föredra varför målsättningen bör vara en produkt, höjdmodell, vars grundutförande är homogen. Den indelning i kvalitetsområden som diskuterades i remissen motiverades främst av ytterligare förbättringar av den reviderade höjdmodellen där sådana behov finns, översvämningsproblem o.d. Förtätning av data på detta sätt är, på samma sätt som vid sambearbetning av äldre data, möjligt att inkludera i en gemensam kvalitetsbeskrivning av höjdmodellen. Förslag på hur detta skall hanteras redovisas under metod och resultat i rapporten.

## 2.3. Övrigt

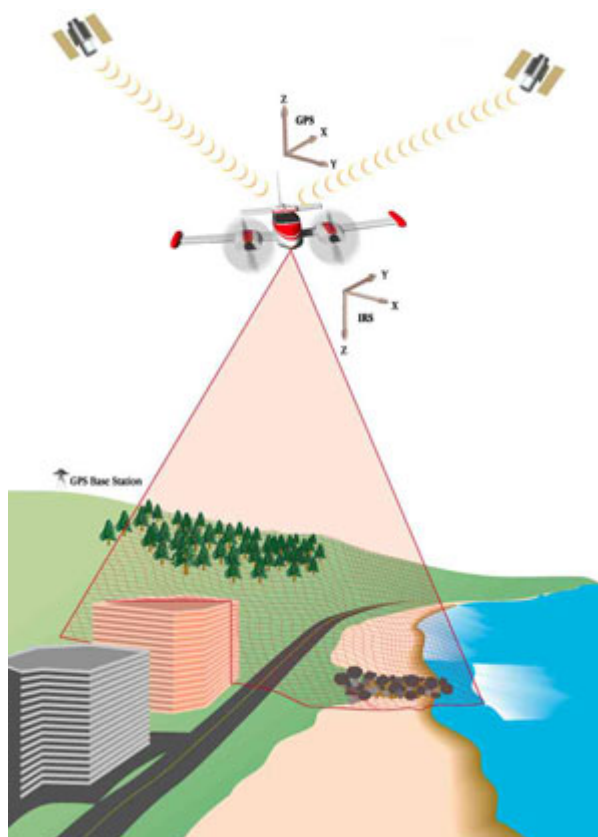
Höjddata från projektet kommer även fungera som ett första bidrag till etablering av ett referensområde för fotogrammetriska datafångstmetoder. Ett sådant referensområde kan sedan användas vid utvärdering av nya sensorer för bl.a. alternativ framställning av höjddata. En förutsättning för detta är att den höjdmodell som etableras har en noggrannhet som tillgodoser de krav som ställs på referensdata.

Eftersom flygburen laserskanning är en förhållandevis obeprövad teknik inom Lantmäteriet har vi valt att samarbeta med organisationer som besitter kunskap och erfarenhet kring framställning av höjdmodeller från laserdata. Bland annat har ett projekt formulerats där Digpro AB, med specialistkunskap kring geometrisk korrigering och bearbetning för framställning av höjdmodeller ur laserdata, medverkar till Lantmäteriets kompetensutveckling.

Övriga viktiga frågor som läsaren saknar och således inte diskuterats i detta kapitel återfinns med stor sannolikhet i kapitlet Framtida projekt.

### 3. Flygburen laserskanning - metodbeskrivning

Vid flygburen laserskanning mäts avstånd från flygplanet eller helikoptern till olika objekt på marken. Detta sker genom att skicka ut en smal stråle ljus under ett kort tidsintervall och sedan registrera tiden för pulsens retur till sensorn. Då man känner ljusets hastighet är det möjligt att räkna ut avståndet till objekt på marken. För att veta var på marken ljuset reflekterades måste man veta varifrån och i vilken riktning pulsen sändes ut. Detta görs genom att mäta sensorns orientering i luften med hjälp av satellitpositionering (GPS) och tröghetsnavigering, figur 3.1. För att sprida mätningarna och täcka ett större område kan man antingen använda sig av flera sensorer som mäter i olika riktningar eller av en rörlig spegel eller ett prisma som sprider mätningarna från en sensor.



Figur 3.1. Principskiss över Optechs laserskanningsystem ALTM.

Mätning med laserskanning ger hög precision, d.v.s. lokalt hög noggrannhet. Eftersom flygplanet är i ständig rörelse krävs kontinuerliga mätningar av dess position för att möjliggöra orientering mot markytan, motsvarande absolutorientering inom fotogrammetrin. Flygplanets position registreras med jämna intervall m.h.a. GPS-utrustning. Dessa diskreta mätningar ger dock inte tillräckligt underlag för bestämning av flygplanets position och rotation kring koordinatsystemets 3 axlar (X, Y, Z) utan det måste skapas förutsättningar för en kontinuerlig beskrivning av planets position och rotation. Som komplement till den GPS-mätta positionen används därför ett tröghetssystem. Tröghetsnavigering används också ibland vid flygfotografering för att bestämma orienteringen för respektive bildregistrering. Tröghetssystemets behov av initiering är en begränsande faktor för flygstråkens längd. Initieringen kan göras i luften genom att provocera fram accelerationer vid svängar och därvid jämföra GPS- och TN-mätningar. Hur

ofta en sådan initiering bör göras beror på vilket tröghetssystem som används och hur tröghetsdata integreras med GPS-data.

Noggrannheten i den med GPS-mätningar bestämda positionen styrs av avståndet/avstånden till närliggande referensstationer i det rikstäckande SWEPOS-nätet. Placeras en temporär referensstation centralt i det område som skall laserskannas skapas förutsättningar för en noggrannare bestämning av flygplanets position.

### 3.1. Viktiga parametrar vid flygburen laserskanning

Resultatet från flygburen laserskanning påverkas av ett antal parametrar som tillsammans används för att skapa "rätt" förutsättningar för den bearbetning av data som behövs vid anpassning till bland annat Lantmäteriets specifika applikationer.

**Flyghöjd:** Vid högre flyghöjder täcks ett större område på snabbare tid och till lägre flygkostnader. En konsekvens blir dock att såväl lägesnoggrannhet som punkttäthet påverkas menligt. Dessutom minskar mängden energi som returneras till sensorn kvadratisk mot ökad flyghöjd vilket kan påverka både antalet returerna och kvaliteten i registreringarna. Dessa parametrar påverkar påtagligt effektiviteten i bearbetningen och kvaliteten i det slutliga resultatet. Av den anledningen är det viktigt att valet av flyghöjd för ändamålet nogsamt utreds.

**Punkttäthet:** Tillsammans med lägesnoggrannheten är detta den mest betydande parametern vid flygburen laserskanning. Svepbredden  $\pm 15^\circ$  skapar förutsättningar för god "insyn" mot marken även i skogbeklädda områden. Svepfrekvensen, antalet svep per sekund, koordineras till svepbredd och laserfrekvens för att distributionen av mätningar skall bli så jämnt fördelad som möjligt.

En av marknadens systemleverantörer, Optech, rekommenderar nedanstående flyghöjder, tabell 3.1, vid varierande frekvens på laserskannern. Den med ökad flyghöjd reducerade frekvensen beror på risken för "interferens", d.v.s. en puls har inte hunnit tillbaka till sensorn innan nästa sänds ut.

Tabell 3.1: Tabellen redovisar Optechs rekommenderade flyghöjder vid varierande laserfrekvens. Den sista kolumnen visar avståndet mellan punkterna för respektive flyghöjd. \*Leica-instrumentets frekvens och punkttäthet är bedömd för 4000 meters flyghöjd vilket möjliggör en jämförelse med de lägre flyghöjder som föreslås i Faluprojektet.

	FREKVENS	FLYGHÖJD	SVEPBREDD	M/PKT
Optech	100000	1100	589	0,44
Optech	70000	1700	911	0,98
Optech	50000	2500	1340	2,01
Optech	33000	3500	1876	4,26
Projekt Falun	33000	2000	1072	2,44
Leica ALS40*	29000	4000	2144	5,54

**Fotpunkt:** Detta är storleken på laserpulsens utbredning, diameter, när den träffar marken. Ju större fotpunkten blir desto svårare blir det att tolka vad mätningen verkligen redovisar. Speciellt känsligt är detta i områden med stora höjdförändringar - t.ex. vegetation och

byggnader. Fotpunktens storlek påverkas av lasersensorns spridning av utgående puls och flyghöjden.

**Laserfrekvens:** Antalet, från sensorn, utsända pulser per tidsenhet är ofta angivet i kHz. Vid ökad frekvens ökar också punkttätheten, vilket som tidigare beskrivits är positivt ur bearbetningssynpunkt. I de fall punkttätheten är den styrande faktorn är det således möjligt att vid högre flyghöjd bibehålla tätheten om frekvensen ökas. Det finns tyvärr begränsningar även i detta fall. Dels tekniska begränsningar för hur hög frekvens utrusningen tillåter, dels måste en utsänd puls komma tillbaka till sensorn innan nästa puls kan sändas ut. Den senare begränsningen får till följd att ju högre man flyger, ju längre blir avståndet till marken, vilket i sin tur ger konsekvensen att frekvensen måste minskas – resulterande i minskad punkttäthet. Eftersom ett stort antal av de utsända pulserna inte träffar homogena ytor registrerar sensorn ett antal ekon från varje puls – antalet varierar mellan de olika systemlösningarna. Genom att jämföra exempelvis första och sista ekot från en puls som träffar ett träd är det möjligt att klassificera pulsen som trolig träff i vegetation i den fortsatta bearbetningen.

**Öppningsvinkel och svepbredd:** Möjlighet finns att variera svepbredden för de olika systemen. Vinklar på ca.  $\pm 40^\circ$  finns att tillgå i vissa system som således medger ett bredare svep och därmed större täckning. Även i detta fall finns det dock negativa effekter i form av svårigheter att erhålla tillräckligt med träffar på markytan i skogb eklädda områden samt att det även blir glesare mellan träffarna på marken om frekvensen på lasern och svepfrekvensen är oförändrad. Vanligtvis används, som tidigare nämnts, en öppningsvinkel mellan  $\pm 15 - 20^\circ$  beroende på terrängens egenskaper.

**Reflektioner:** I sensorn bestäms även intensiteten i varje återkommande laserpuls. Denna information är till sin natur det närmaste man kan komma ett "sant" ortofoto eftersom registreringen sker i tre dimensioner. Dock är det inte en optisk registrering som kan användas på motsvarande sätt som vid traditionell bildtolkning eftersom registreringen endast sker i ett våglängdsområde, med förhållandevis mycket brus, och med begränsad markupplösning. Den innehåller dock så pass mycket information att det lämpar sig att tolka vissa objekt, bl.a. skogsbilvägar.

### 3.2. Geometrisk korrigerig

Laserdata georefereras med GPS och tröghetsnavigering. Valet av tröghetssystem är av stor betydelse för slutresultatet. Även de andra komponenternas prestanda, laser och GPS-utrustning, är viktig för att generera data av god kvalitet. Ett viktigt moment är att integrera mätningarna från de olika komponenterna. En god integrering ger möjlighet att kontrollera mätningarna mot varandra och skapa förutsättningar för att detektera fel. Integrering gäller alla delar, bl.a. ingår

- tidssynkronisering
- bestämning av delarnas inbördes lägesförhållande (GPS-antenn, tröghetsutrustning, laser, speglar och mottagare)
- integrering av GPS och tröghetsmätningar
- optimering vid användande av flera referensstationer

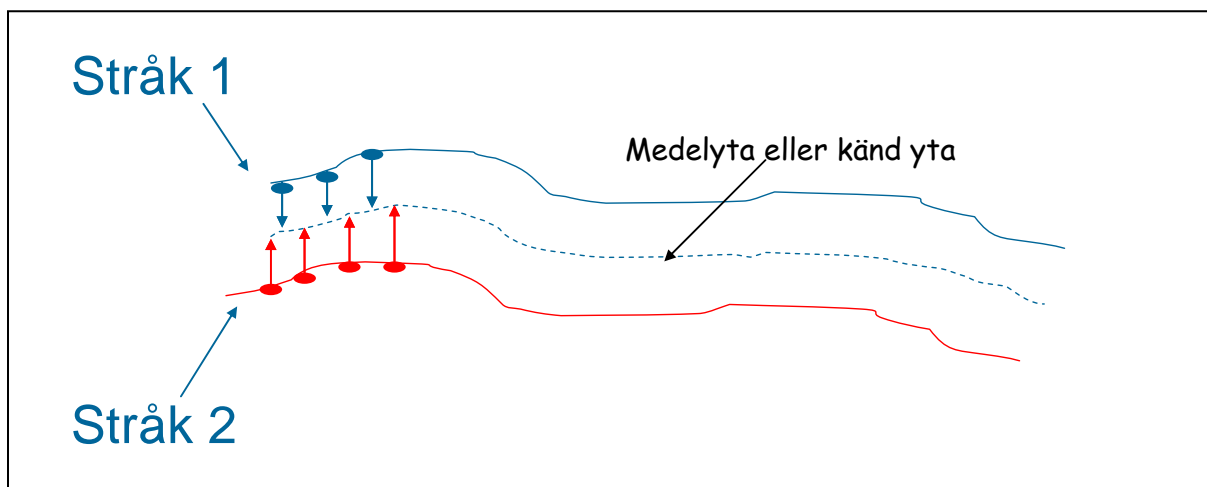
För denna uppgift, integreringen, är man som regel beroende av hur effektivt flygoperatörens programvara lyckas integrera resultatet från laserskanningssystemets

komponenter. En oregelbunden, systemkorrigerad, punktsvärm är oftast det resultat som tillhandahålls av flygoperatörerna.

För att uppnå högsta precision görs GPS-positioneringen med fasmätning där man bestämmer fasförskjutningen samt hela antalet våglängder, d.v.s. periodobekanta, i signalen mellan satelliten och mottagare. Större systematiska fel i GPS-mätningarna, bl.a. orsakat av jonosfäriska och troposfäriska störningar, kan korrigeras för genom att använda två-frekvensmottagare och fasta referensstationer. I Faluprojekt gjordes också speciell ansträngning att behålla kontakten med satelliterna genom hela flygningen. Detta för att skapa goda förutsättningar för lösning av periodobekanta, vilket också är till fördel vid integrering av GPS- och tröghetsmätningar.

Flygplanets och laserskannerns rotationsvinklar mäts med tröghetssystemet. Ett tröghetssystem mäter accelerationer och vinkelhastigheter, vilket kan omvandlas till rotationsvinklar, hastighet och position. Mätningarna i ett tröghetssystem är behäftade med fel som driver och växer med tiden. Genom att integrera GPS och tröghetsmätningar kan man korrigeras för driften, vilket ger en mer robust lösning. Resultatet blir orienteringsdata med endast små systematiska fel.

Geometrisk korrigering inkluderar metoder för att förbättra orienteringen och samtidigt kontrollera kvaliteten i orienteringsdata. Den optimala kvalitetskontrollen är att utvärdera laserdata mot inmätta objekt på marken. Det är dock inte ekonomiskt försvarbart att kontrollera varje laserstråk på detta sätt. Istället kan man mäta avvikelser mellan överlappande stråk för att bestämma och kompensera för kvarvarande fel, se figur 3.2.



Figur 3.2. Observationerna utgörs av mätningar av höjdskillnader mellan stråk.

Metoden kan liknas vid fotogrammetrisk blocktriangulering men enheterna utgörs inte av bilder utan av laserstråk. Slutligen kan ett begränsat antal stödpunkter användas för att passa in blocket till markytan i plan och höjd.

I projektet användes Terrasolids program TerraMatch för stråkutjämnningen (Burman, 2001). Höjd- och plandifferenser mellan stråk mäts och modelleras med korrekationer av orienteringsparametrarna. Observationsekvationen för denna matchning beskrivs i ekvation (1).

$$\begin{aligned}
\lambda_{Zl} = & Z'_X \cdot dX_d + Z'_Y \cdot dY_d - dZ_d + \\
& + \left( Z'_X \frac{\partial R_X}{\partial r} + Z'_Y \frac{\partial R_Y}{\partial r} - \frac{\partial R_Z}{\partial r} \right) \cdot \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} \cdot dr + \\
& + \left( Z'_X \frac{\partial R_X}{\partial p} + Z'_Y \frac{\partial R_Y}{\partial p} - \frac{\partial R_Z}{\partial p} \right) \cdot \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} \cdot dp + \\
& + \left( Z'_X \frac{\partial R_X}{\partial h} + Z'_Y \frac{\partial R_Y}{\partial h} - \frac{\partial R_Z}{\partial h} \right) \cdot \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} \cdot dh
\end{aligned} \tag{1}$$

där

$\lambda_{Zl}$	= observerad höjdskillnad
$Z'$	= höjdgradient
$R$	= rotationsmatris
$l$	= avstånd mätt av lasern uppdelad i tre vektorkomponenter
$dr, dp, dh$	= offset i roll, tipp och gir (eng. roll, pitch, heading)
$dX, dY, dZ$	= offset i plan- och höjdkoordinater

Mätningen av höjddifferenser och gradienter görs i höjdmodeller som tagits fram för varje separat stråk. Vid denna process görs först en markklassning av punkter, därefter beräknas en triangelmödel för stråket. För att undvika stora skillnader i markklassningen exkluderas stora höjddifferenser. Dessutom rensas enskilda låga punkter bort.

### 3.2.1. Stråkutjämning

Det finns möjlighet att bestämma och korrigera för olika systematiska fel genom att jämföra laserstråkens inbördes läge. Felen beror bland annat på systematiska fel i GPS-mätningarna, brister vid systemkalibreringen, brister vid initieringen av tröghetssystemet eller på transformationsfel. Utjämningen sker, i två steg, på motsvarande sätt som vid fotogrammetrisk blocktriangulering men enheterna utgörs i detta fall, som tidigare nämnts, av laserstråk.

Steg 1: Global utjämning för hela blocket för att hitta fel som skall korrigeras för alla data.

Steg 2: Stråkvis utjämning där avvikelser mellan stråk modelleras och korrigeras för. I detta moment kan man bedöma lokala avvikelser som annars kan vara svåra att upptäcka.

Resultatet efter de två korrigeringarna, global och stråkvis, är ett block av lasermätningar med homogen kvalitet. Korrigeringarna beskrivs detaljerat i nedanstående två rubriker.

### 3.2.2. Stråkutjämning – global korrigering

De orienteringsvinklar som erhålls från tröghetssystemet relaterar till tröghetssystemets interna koordinatsystem. Tröghetssystemet är fast monterat mot lasersystemet vilket

innebär att vridningen mellan systemen måste bestämmas för att man skall kunna georeferera lasersystemet. Detta görs efter montering av systemet, ofta genom en kalibreringsflygning, vilket brukar kallas "boresight"-kalibrering. Denna procedur upprepas med jämna mellanrum och den är också möjlig att utföra i det aktuella projektet, s.k. "on-the-job"-kalibrering, för att kompensera för eventuella kvarvarande fel eller temporära förändringar.

I Faluprojektet gjordes en "boresight"-kalibrering med hjälp av TerraMatch där avvikelser i vinklarna, konstanta för hela blocket, modellerades med stöd av stråkutjämning, se ekvation (2).

$$\begin{aligned} \lambda_{zI} = & \left( Z'_x \frac{\partial R_x}{\partial r} + Z'_y \frac{\partial R_y}{\partial r} - \frac{\partial R_z}{\partial r} \right) \cdot \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} \cdot dr + \\ & + \left( Z'_x \frac{\partial R_x}{\partial p} + Z'_y \frac{\partial R_y}{\partial p} - \frac{\partial R_z}{\partial p} \right) \cdot \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} \cdot dp + \\ & + \left( Z'_x \frac{\partial R_x}{\partial h} + Z'_y \frac{\partial R_y}{\partial h} - \frac{\partial R_z}{\partial h} \right) \cdot \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} \cdot dh \end{aligned} \quad (2)$$

där

$\lambda_{zI}$	= observerad höjdskillnad
$Z'$	= höjdgradient
$R$	= rotationsmatris
$l$	= avstånd mätt av lasern uppdelad i tre vektorkomponenter
$dr, dp, dh$	= offset i roll, tipp och gir

### 3.2.3. Stråkutjämning – stråkvis korrigerig

Efter "boresight"-kalibreringen finns det fortfarande systematiska fel mellan stråken, dessa kan modelleras i en stråkvis utjämning. Att modellera alla fel är inte realistiskt, eftersom de kan variera i ett ej förutsägbart mönster på marken. De mätbara avvikelserna mellan stråken, vilka beror på orienteringsfel, är dessutom beroende av variationer i terrängen. Av dessa skäl är det endast realistiskt att modellera övergripande systematiska fel.

I projektet har konstanta positionsfel ( $dX, dY, dZ$ ) modellerats samt en konstant roll-vinkel ( $dr$ ) för varje stråk. Tipp-vinkeln är inte modellerad eftersom den är starkt korrelerad med positionen. Gir-vinkeln modelleras heller inte eftersom den ger små effekter på lasermätningens markposition och då endast i ytterkanterna av stråken. Även gir-vinkeln är korrelerad med positionen. Roll-vinkeln ger en vridning av stråket och kan därför separeras från ett positionsfel och inkluderas därför i modellen, se ekvation (3).



$$\lambda_{Zl} = Z'_x \cdot dX_d + Z'_y \cdot dY_d - dZ_d + \left( Z'_x \frac{\partial R_x}{\partial r} + Z'_y \frac{\partial R_y}{\partial r} - \frac{\partial R_z}{\partial r} \right) \cdot \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} \cdot dr \quad (3)$$

där

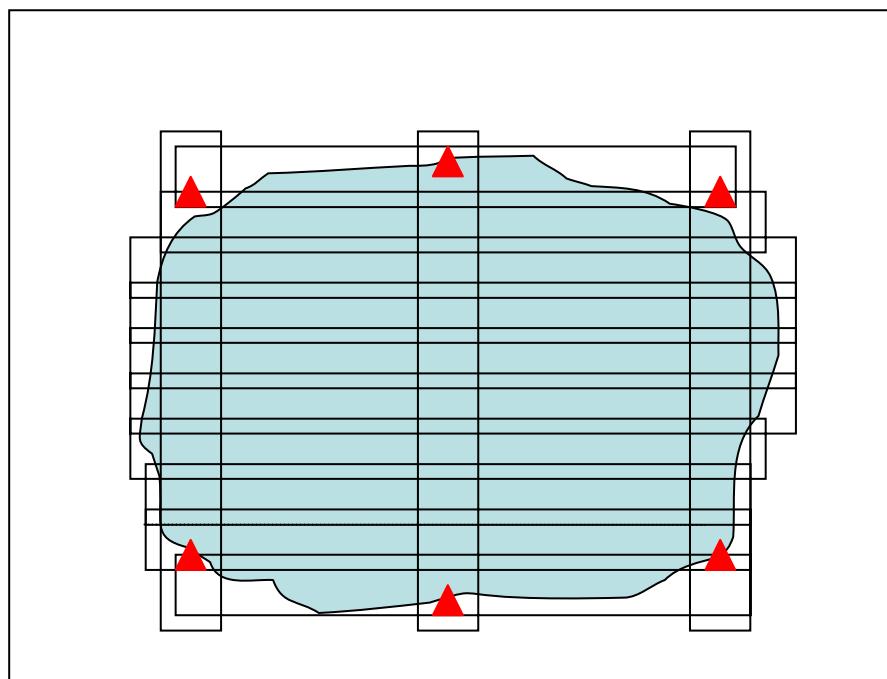
$\lambda_{Zl}$	= observerad höjdskillnad
$Z'$	= höjdgradient
$R$	= rotationsmatris
$l$	= avstånd mätt av lasern uppdelad i tre vektorkomponenter
$dr$	= offset i roll
$dX, dY, dZ$	= offset i plan- och höjtkoordinater

### 3.2.4. Planinpassning

Jämförelse mot referensdata fungerar som underlag för geometrisk korrigerings och som verifikation av plannoggrannheten. Finns inte referensdata av hög kvalitet att tillgå måste lämpliga objekt mätas in, med tillräckligt hög noggrannhet, för att den plannoggrannhet som efterfrågas skall gå att verifiera.

Planstöden kan utgöras av kartmaterial, t.ex. primärkarta, om sådant finns tillgängligt. Tänkbara referensdata är också ortofoto eller inmätningar av objekt som tydligt kan urskiljas i laserdata. Eftersom laserdata utgörs av en förhållandevis gles punktsvärm är det sannolikt att man tvingas extrahera semantisk information, hustak, väggkant, för att möjliggöra jämförelse med referensdata. Det är också möjligt att utnyttja intensitetsinformationen i laserdata i de fall vägkanter och målade vägdetaljer kan urskiljas. Det är även viktigt att tillräckligt stora formationer mäts in så att de med säkerhet registreras i laserdata. Planstöd kan även representeras av slänter, sänkor och kullar. Genom att mäta profiler, eller ett fiktivt rutnät, av höjdformationerna i olika riktningar kan avvikelser i planläge bestämmas relativt laserdata.

Distributionen och avståndet mellan stöden bedöms relativt driften i GPS/INS-lösningen. Planstöd bör, som visas i figur 3.3, placeras i ändarna på stråken eller i de fall korsande stråk används i ändarna av de korsande stråken.



Figur 3.3: Distribution av planstöd vid laserskanning.

När den interna geometrin i blocket förbättrats efter "boresight"-kalibrering och stråkutjämnning, utvärderas planläget mot referensdata och eventuella korrigeringar görs för att passa in laserblocket i plan.

Tillgängliga referensdata beskrivs i kapitel 4 och deras lämplighet att användas till planstöd utvärderades i samband med planinpassningen. Resultatet återfinns i kapitel 5.

### 3.2.5. Höjdinpassning

Inpassning mot höjdstöd bör ske efter, eller i samband med planinpassningen annars riskerar man att höjden passas in på fel planposition. Höjdstöd bör placeras i kanterna av blocket, vid långsmala områden i ändarna av blocket. Vid större projekt bör kompletterande höjdstöd placeras ut med jämna mellanrum i blocket. Höjdstöd mäts på motsvarande sätt som vid flygfotografering d.v.s. på plana öppna ytor.

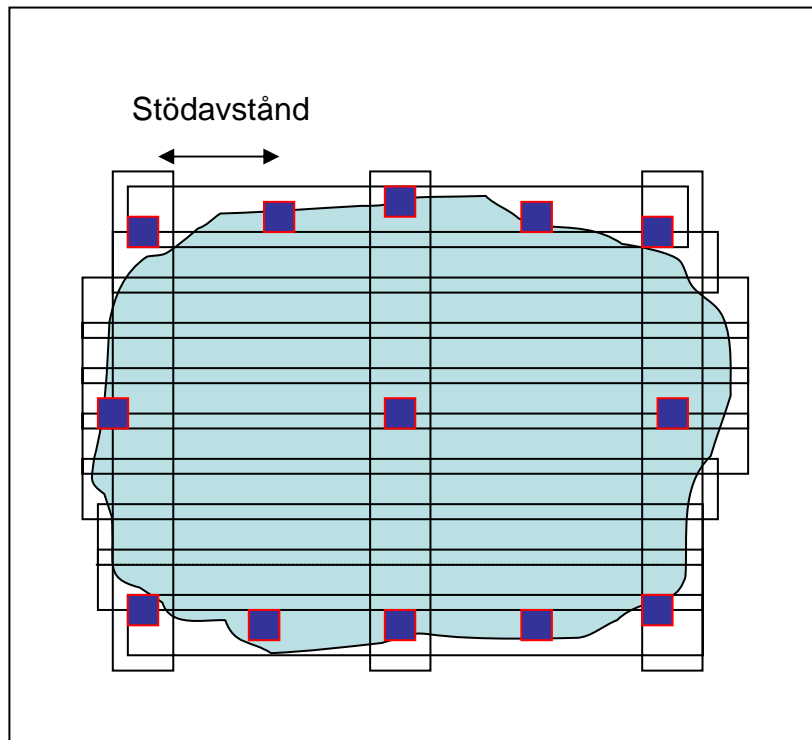
Inmätningen av höjdstöden kan ske som diskreta punkter i profiler eller som punkter jämnt distribuerade över en plan yta. Ju fler punkter som används, desto högre tillförlitlighet i inpassningen.

Målet att reducera förekomsten av systematiska fel i höjd kräver att höjdstöden placeras på en väldefinierad yta där mätningarna inte påverkas av annat än laserskanningen. En kontinuerlig yta såsom asfalt, grus eller betong är lämpligt underlag. I tabell 3.2 redovisas dessa tillsammans med mindre lämpliga markslag. Väljer man ojämn skogsterräng, vattenfylld dikesbotten eller tät markvegetation kan korrektionerna som beror på lokala avvikelser komma att påverka hela området geometri menligt.

Tabell 3.2. Lämpliga och olämpliga markslag för höjdstöd.

LÄMPLIGT MARKSLAG	OLÄMPLIGT MARKSLAG
Asfalt	Skogsterräng
Betong	Dikesbotten
Grus	Tät markvegetation
	Flygsignal - skild från terräng

På samma sätt som för distribution och avstånd mellan planstöd gäller att bestämning av ett optimalt avstånd mellan höjdstöd är starkt relaterat till driften i GPS/INS-lösningen. Höjdstöden bör placeras i ändarna på stråken eller, i de fall korsande stråk används, även i ändarna av de korsande stråken. Distributionen av markstöd för inpassning i höjdläge beskrivs, generellt, i figur 3.4.



Figur 3.4. Distribution av höjdstöd vid laserskanning.

När planläget för laserblocket bestämts görs en utvärdering av höjdläget. Till detta finns olika referensdata, kapitel 4, men det är bara de inmätta höjdstödytorna, 6x6 punkter, som har en så hög noggrannhet att de kan användas för inpassning av laserblocket. Det finns en spridning i höjdstödytorna och då dessa ytor distribuerats över hela området finns det möjlighet att inventera differenser i olika delar av blocket.

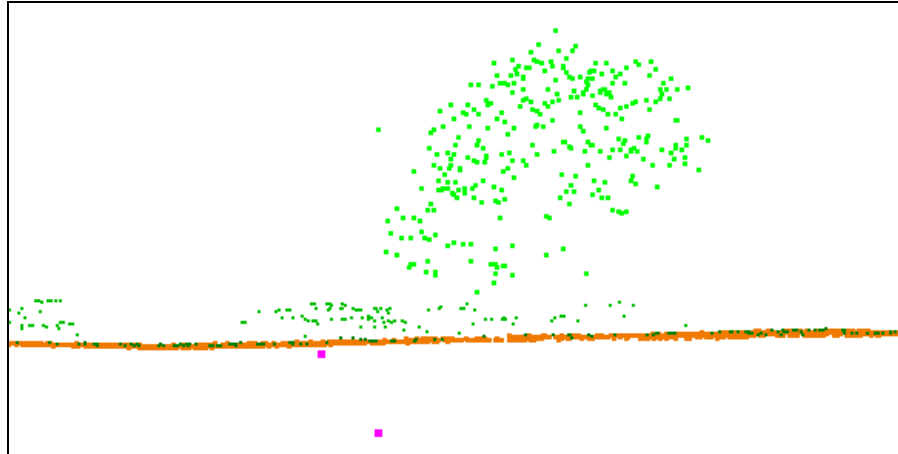
### 3.3. Bearbetning - filtrering

När laserdata är kontrollerat och korrigerat för systematiska positioneringsfel följer momentet filtrering. Den vanligaste förädlingen av data är att ta fram en höjdmodell som representerar markytan. Alla objekt som inte anses tillhöra markytan (hus, vegetation m.m.) filtreras bort. Därefter kan man klassificera dessa laserpunkter till exempelvis hus eller bro.

Markfiltrering görs på olika sätt i olika programvaror. Gemensamt för de flesta är att markytan bestäms genom statistisk analys av data. Man utnyttjar det faktum att marken är en kontinuerlig yta som ligger under vegetation, hus och andra objekt. Det dataprogram som filtrerar fram markytan, se figur 3.5, skall inkludera rutiner som medger att:

- låga punkter under mark tas bort i filtreringsprocessen
- lokalt snabba diskontinuiteter (t.ex. avsatser i stadsmiljö) specialhanteras
- olika terrängtyper, plan/kuperad, bearbetas separat

Dessutom måste resultatet manuellt kontrolleras för att begränsa förekomsten av grova fel i slutprodukten.



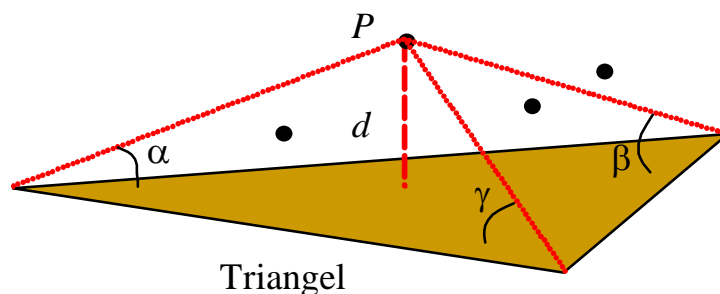
Figur 3.5. Resultatet från markfiltrering, där markklassade punkter är ljusbruna. Rosa punkter ligger under den markyta som detekterats och klassas därför som "lågpunkt".

Filtrering av laserdata innebär att man, med statistiska metoder, klassar markpunkter i laserdata. Det kan uttryckas som att man filtrerar bort allt som inte tillhör mark. Det finns ett antal filtreringsalgoritmer som utvecklats vid olika universitet, högskolor eller andra organisationer. Flera av dessa finns beskrivna i (Sithole, 2005) där också praktiska test med de olika metoderna har utvärderats. Bland dessa finns den metod, utvecklad av (Axelsson, 2000), som är implementerad i TerraScan.

Markklassningen i TerraScan är baserad på iterativ förtätning av ett TIN (triangulerade oregelbundna punkter). Ett start-TIN skapas genom att välja de lägsta punkterna inom varje ruta i ett rutnät. Därefter förtätas triangelnätet iterativt genom att gå igenom alla trianglar och inkludera den punkt som ligger lägst inom triangelns yta och dessutom uppfyller de kriterier som finns uppställda. Kriterierna bestäms av användaren genom att denne ansätter ett antal parametrar:

1. Täthet i det ursprungliga triangelnätet
2. Maximalt tillåten terrängvinkel
3. Iterationsvinkel ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ), d.v.s. tillåten förändring av lutningen vid förtätning
4. Iterationsavstånd ( $d$ ), d.v.s. tillåtet avstånd för ny punkt till tidigare triangel vid förtätning
5. Reduceringsavstånd, d.v.s. det avstånd från en redan inkluderad punkt till en eventuell ny punkt där iterationsvinkeln skall reduceras
6. Triangelstorlek, vid vilken längd på triangelsidan förtätningen kan avbrytas

Dessa parametrar finns också beskrivna grafiskt i figur 3.6



Figur 3.6. Visualisering av de parametrar som används vid markklassning i TerraScan.

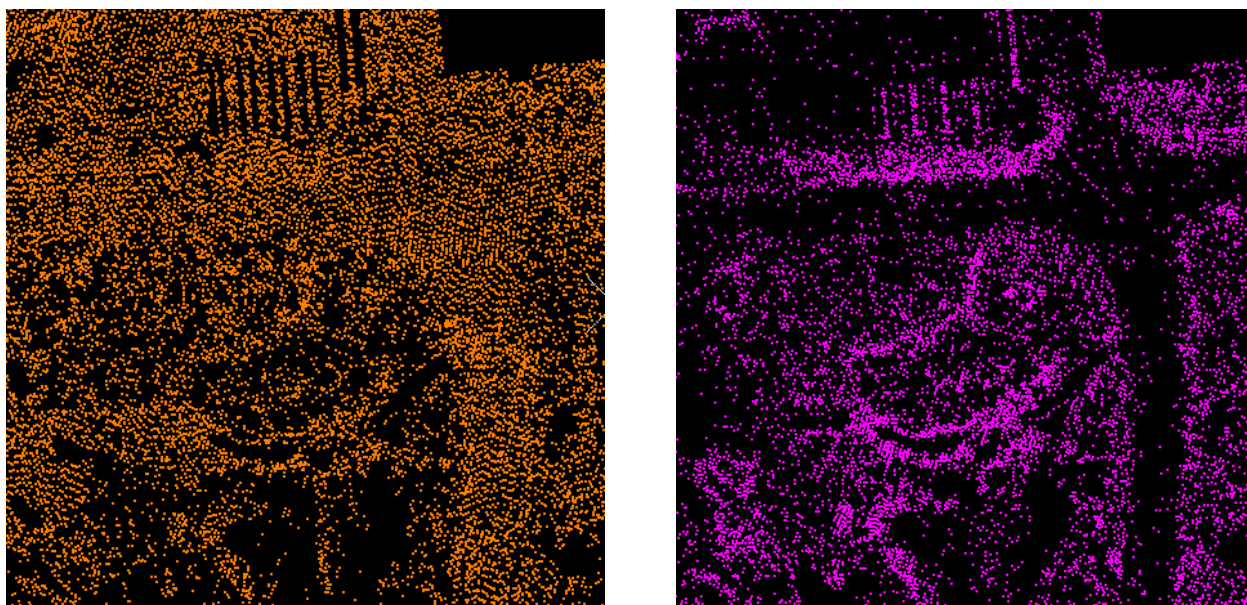
Filtreringen görs i två omgångar. Den första filtreringen görs för varje stråk separat. Detta för att möjliggöra stråkutjämnningen. I stråkutjämnningen jämförs nämligen de triangulerade höjdmmodellerna för varje stråk med varandra. I detta steg är det inte kritiskt att alla markpunkter är korrekta, t.ex. om man har fått med delar av en bro eller någon annan konstruktion i markhöjd som inte bör klassas som mark. Det viktiga i en sådan klassning är i stället att stråken klassas på liknande sätt och att man får med viktiga terrängvariationer som kan vara värdefulla vid matchningen.

När den interna geometrin i laserblocket har säkerställts görs en slutlig markklassning baserad på alla data. Här kommer allt som kan inkluderas i en kontinuerlig yta, enligt de parametrar som satts upp, att definieras som mark. Det innebär att t.ex. broar kan komma att inkluderas i markklassningen. Även stora byggnader, p.g.a. för snålt tilltaget start-TIN, och souterrängbyggnader, där taket sammanfaller med marken på något sätt, kan komma att klassas som mark. För att få en höjdmmodell över marken krävs således att broar och liknande objekt lokaliseras och separeras från övriga data, t.ex. genom klassning.

Klassningen av mark gjordes på allt data efter det att den geometriska korrektionen genomförts för alla stråk. De parametrar som valdes var:

- Startgrid 300 m
- Terrängvinkel 80 grader
- Iterationsvinkel 7 grader
- Iterationsavstånd 2 m
- Reducerad iterationsvinkel från 5 m
- Triangelstorlek - ingen, d.v.s. förtätningen pågår till dess att alla punkter tillhör mark eller icke mark.

Efter en markfiltrering finns det oftast överrepresentation av punkter i områden som är mindre kuperade. Detta kan vara en nackdel, t.ex. för att datamängden blir stor. I många fall uppnås noggrannhetskraven även om höjdmodellen representeras av färre punkter. Kravet som ställs på programmet som glesar ut data är att punkterna endast reduceras i plana områden, figur 3.7. Ett sätt att kontrollera förändringen mellan ursprunglig och utglesad höjdmmodell är att beräkna och analysera differensen mellan höjdmmodellerna.



Figur 3.7. Utglesning av punkter som representerar mark. Speciellt på plana ytor, t.ex. vägbanan, reduceras antalet punkter.

### 3.3.1. Låga punkter

Av olika anledningar kan det finnas punkter under markytan som bör filtreras bort. Dessa felaktigheter kan uppkomma av olika skäl. Ett sätt kan vara att laserstrålen reflekterats mot fler än ett objekt, t.ex. husvägg och markyta, och därför har returen fördröjts, vilket får till följd att punkten registrerats under markytan. Ett annat fall kan vara förekomsten av källartrappor eller andra nedgångar, runt byggnader, vilka bör rensas från markdata. Låga punkter rensas bort med enkla statistiska filter beskrivna nedan i ekvation (4).

$$\begin{aligned} |Z_i - \bar{Z}| \leq \text{gränsvärde} &\Rightarrow Z_i \in \text{mark} \\ |Z_i - \bar{Z}| > \text{gränsvärde} &\Rightarrow Z_i \notin \text{mark} \end{aligned} \quad (4)$$

Där:

$Z_i$  = Z-värdet för punkt i

$Z$  = medelvärdet för alla punkter inom radien r (t ex 5 m) från punkten i

Gränsvärdet = acceptabel skillnad i höjd

## 3.4. Bearbetning – klassificering och modellering av objekt ovan mark

Den bearbetning som beskrivs i detta kapitel inkluderar klassificering och modellering av objekt som inte tillhör marken. Vid klassificeringen delas laserpulserna in i förutbestämda klasser. Byggnader, låg och hög vegetation, vägar och broar och övrig information separeras från höjdmodellen - markytan - i detta moment. Även för denna bearbetning finns det bra metoder etablerade. Genom att anpassa dessa metoder till Lantmäteriets objektsdefinitioner, och parallellt med detta även skapa rutiner där GGD inkluderas i processen, kan klassificeringen förenklas. Även detta skulle, likt vid filtreringen, begränsa behovet av manuell editering.

Då laserdata klassats är resultatet en punktsvärm där punkterna har tilldelats ett attribut som talar om vilken typ av punkt det är, t.ex. mark, vegetation, hus, bro etc. Utifrån dessa

data och attribut är uppgiften som regel att göra modeller av markytan, trådmodeller av hus, kantlinjer på broar, m.m. för att kunna nyttja data. Då data är modellerat kan man interpolera fram markhöjden i en godtycklig punkt, man kan beräkna areor, beräkna avstånd och göra analyser på data. I och med modelleringen görs ofta en generalisering som bidrar till att reducera datamängden.

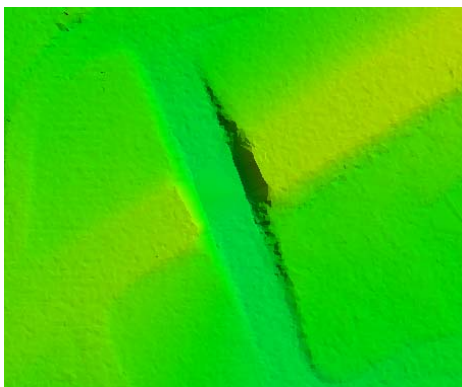
Eftersom klassificering och modellering ofta är sammanlänkade i en och samma process beskrivs båda dessa steg i detta kapitel. Ofta bygger klassificeringen på att man gör en modell och försöker avgöra om punkterna tillhör denna. Detta görs t.ex. vid husklassificering genom att ekvationer beräknas för olika plan för att bestämma takstrukturer, där punkterna sedan klassas som tak. Tas planens ekvationer tillvara kan man i samma process modellera taket.

### 3.4.1. Broar

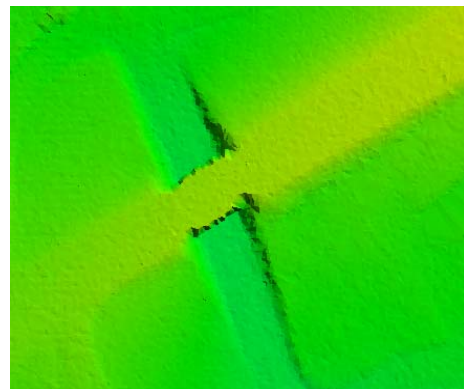
För många applikationer, t.ex. avrinningsanalys, är det nödvändigt att broar är separerade från marken. Därför måste eventuella laserpunkter som är klassade som mark, men ligger på bron, klassas om, se exempel i figur 3.8.

Man kan tänka sig olika scenarier:

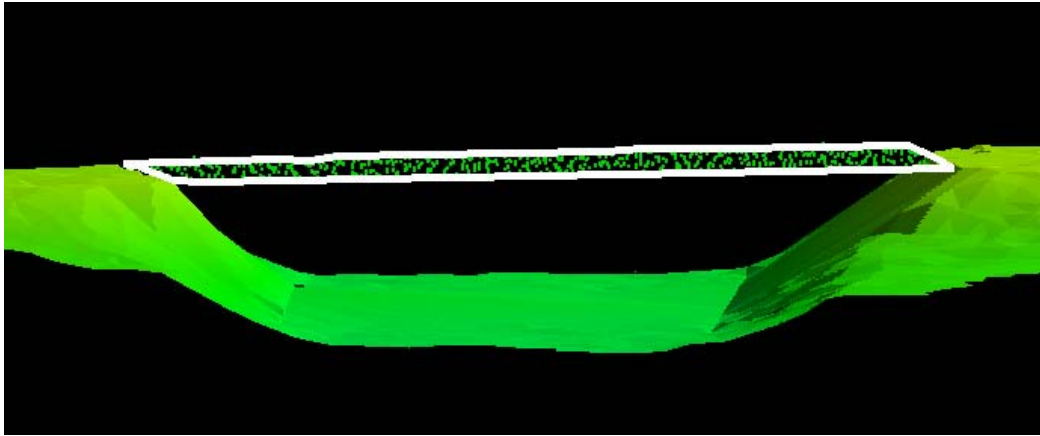
1. Ingen information finns tillgänglig för att lokalisera broar. I detta fall måste en operatör leta upp broarna i det underlagsmaterial som finns och editera punkterna för hand.
2. Det finns information om var broarna finns, t.ex. genom en vägdatabas, eller som ett lager i en karta. I detta fall kan informationen användas för att styra en operatör till rätt läge och därefter sker editeringen för hand.
3. Det finns bro-masker, d.v.s. slutna polygoner som beskriver brons läge och utbredning. I detta fall kan man använda masken för editering och automatisera processen. Dessutom kan man använda polygonen för att bygga en bro-modell, vilken kan användas vid ortorektifieringen för att få broar att avbildas ortogonalt i ortofotot.



DEM efter ursprunglig markklassning



DEM efter borttagning av punkter på bron



Punkterna på bron används för att höjdsätta bromodellen.

Figur 3.8. Exempel på hur broar kan hanteras efter klassning av laserdata.

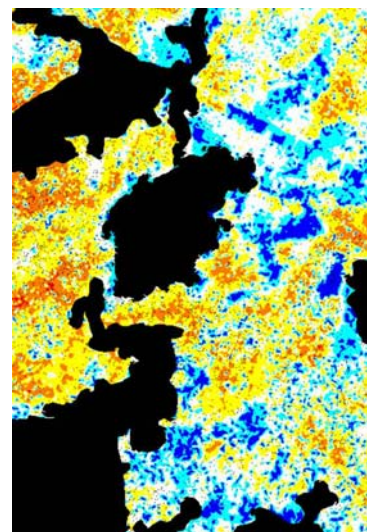
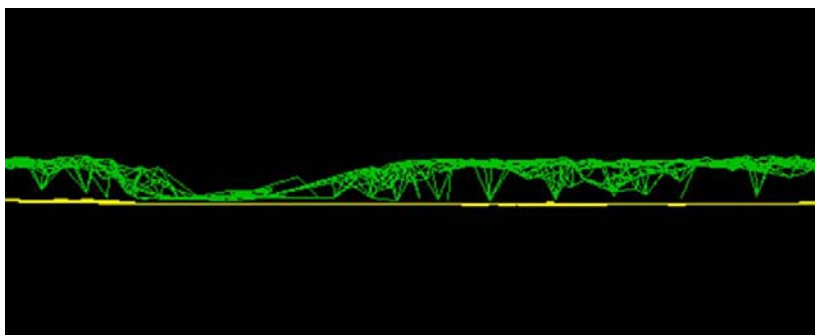
### 3.4.2. Vegetation

Det finns möjlighet att klassa vegetation i laserdata. Det pågår mycket forskning inom området (Holmgren, 2004 och Næsset et. al, 2004) som visar att det även finns möjlighet att artbestämma enskilda träd. För att kunna göra en sådan detaljerad tolkning krävs att man har en mycket tät punktsvärm.

I TerraScan finns möjlighet att klassa och modellera vegetation. Även om denna inte är lika välutvecklad som de senaste forskningsresultaten så kan den vara användbar för många applikationer.

Som ett första steg klassas de punkter som ligger ovan mark som vegetation. Dessa kan läggas i olika höjdsikt, t.ex. låg, medel och hög vegetation. Utifrån dessa klassade punkter kan man därefter modellera vegetationen på olika sätt.

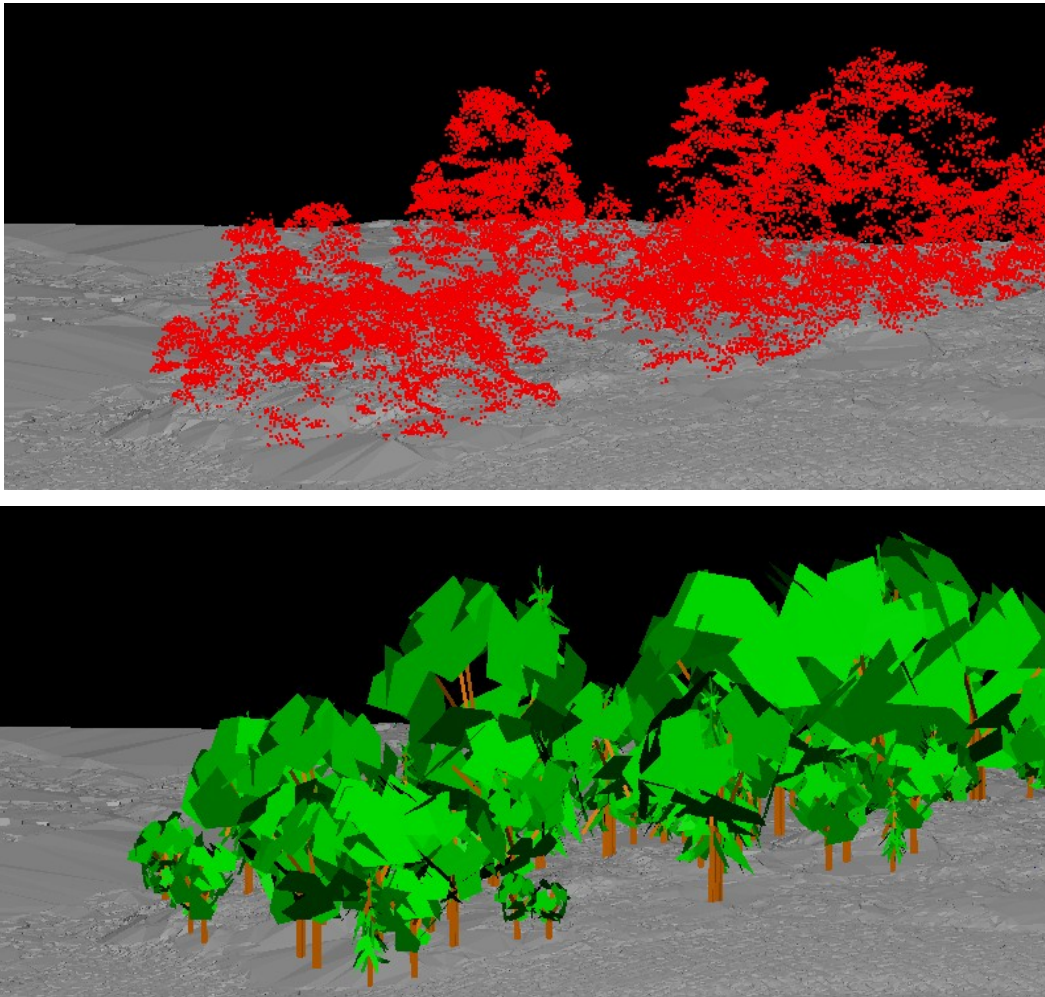
En alternativ metod att modellera skogen är som ett övre vegetationslager, se figur 3.9. Då har man möjlighet att beräkna trädhöjder och därifrån volymen, vilket kan vara av intresse för skogsindustrin.



Figur 3.9. Exempel på en markmodell (gul) och en skogshöjdmodell (grön) där höjderna skattats från laserdata (vänster). Skillnaden mellan höjdmodellerna redovisas i bilden till höger där olika färger representerar olika höjddifferenser.



Modelleras enstaka träd får man eventuellt inte ett exakt antal och läge av alla träd men det skapas goda förutsättningar för visualiseringar, exemplifierat i figur 3.10.



Figur 3.10. Vegetationspunkter har skattats som punkter > 2 m över mark (ovan) samt visualisering av punktsvärmarna som trädceller. Trädcellernas läge och storlek beräknas med hjälp av punktsvärmarna.

### 3.4.3. Byggnader

Liksom för vegetation finns det ett flertal forskare runt om i världen som tagit fram metoder för klassning och modellering av hus, (Persson, EuroSDR-Enschede, 2005), men det finns inte lika mycket att tillgå i form av kommersiell programvara. Noggrannhetsmässigt är det mest optimala att använda en kombination av laserdata och bilder vid tolkning, mätning och modellering av byggnader. Då kombineras det bästa från disciplinerna, grovt sett höjdnoggrannheten i laserdata och plannoggrannheten i bilddata.

Precis som i fallet med broar finns det olika scenarios man kan tänka sig:

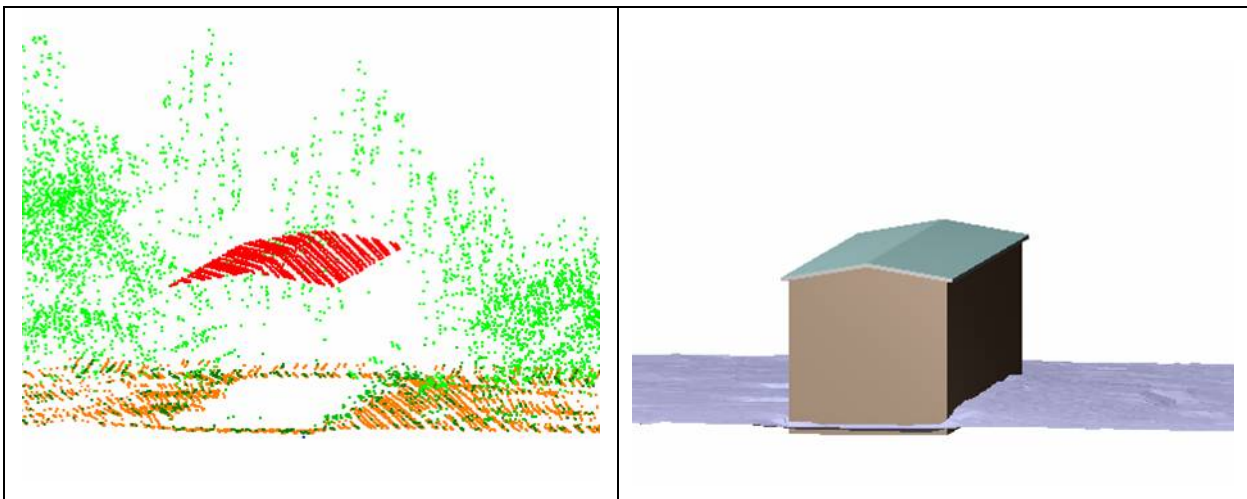
1. Ingen information finns tillgänglig om var byggnaderna är placerade. Byggnader kan då detekteras genom att leta efter ytor utan markdata. I dessa "hål" kan man sedan leta efter hustak, där punkterna statistisk sett ligger orienterade utefter plana ytor, till skillnad från punkter i vegetation. De klassade punkterna kan sedan användas för att modellera tak.
2. Bättre är om man har tillgång till byggnadspolygoner. Dessa kan förbättra robustheten i byggnadsklassningen eftersom man kan använda polygonerna till att maska ut data. Därefter modelleras taken med hjälp av laserpunkterna innanför polygonen.

3. Den bästa situationen råder om man har tillgång till både laser och bilddata för klassning, men framför allt modellering av byggnader. Både planläget och tolkbarheten förbättras vid tillgång till bilder, däremot ger laserdata en bättre höjdnoggrannhet. (EuroSDR-Enschede, 2005)

I projektet klassades byggnader och modellerades i samband med noggrannhetsutvärderingen i plan. Modellering av hustak i laserdata gjordes med programvaran TerraScan. Modellering går till på följande sätt:

1. Alla laserdata analyseras och alla punkter som ligger över den höjd som användaren anser kunna tillhöra hustak (t ex  $>2$  m) läggs till en presumtiv takklass.
2. Användaren pekar någonstans med musen på taket av ett hus
3. Programvaran analyserar var huset kan ha sin begränsningslinje beroende av var det finns ett hål i markpunkterna
4. Programvaran letar efter plana ytor inom husets begränsning bland presumtiva takpunkter
5. Användaren kan, om så önskas, lägga på olika villkor vid modelleringen av taket. De villkor som användes för Faludata var:
  - Takplanen skall mötas i en taknock
  - Vid modellering av sadeltak skall takytorna på båda sidor om taknocken vara symmetriska

Exempel på klassificerade laserdata och byggnadsmodell visas i figur 3.11.

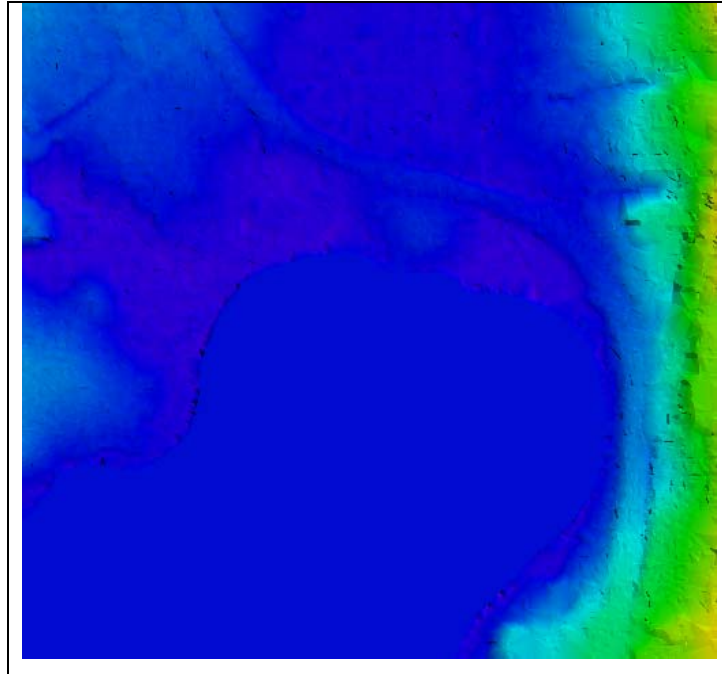


Figur 3.11. Exempel på laserpunkter klassade som hus samt modellering av huset.

#### 3.4.4. Sjöar och vattendrag

Vid laserskanning med våglängder i det närlinfraröda området, vilket är det optimala för de flesta flygburna situationer, får man oftast begränsad reflektion från vattenytor. Dels för att vattenytan fungerar som en spegel för laserpulsen vilket får till följd att pulsen reflekteras bort från sensorn och dels för att det som reflekteras oftast har så låg intensitet att det kanske inte räcker för en relevant registrering. För att komplettera höjdmodellen i dessa områden kan man använda de kartmasker som finns för vattenytorna. Strandlinjen bör

läggas in som en brytlinje för att få en god representation i området. Problem kan dock uppkomma om höjdvärdet för strandlinjen är felaktigt, t.ex. för att plan och höjdläget har samlats in vid olika vattenstånd. Om man kombinerar en strandlinje med felaktig höjd med laserdata kan man få effekter som "diken", se figur 3.12, eller "åsar" som följer strandkanten.

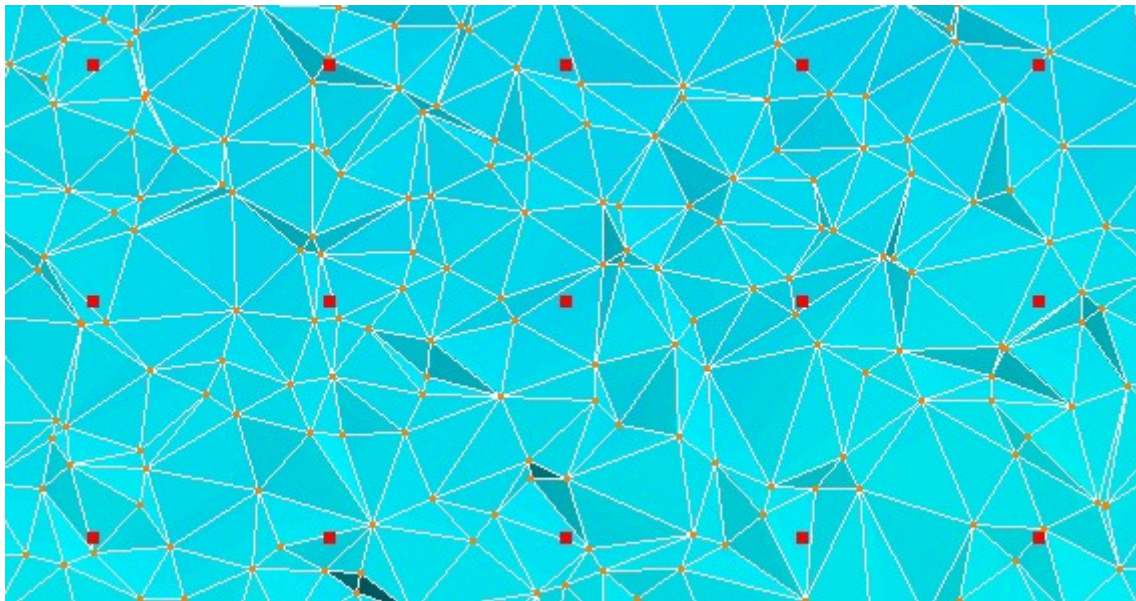


Figur 3.12. Exempel där höjdvärdet för strandlinjen ligger, felaktigt, högre än omkringliggande mark.

Det är inte rimligt att ändra planläget för vattenytorna i Lantmäteriets baser, däremot är det tänkbart att förändra höjdläget för att undvika motsägelser i strandregionen. Det är möjligt att utveckla metoder för höjdsättning av strandlinjen från laserdata.

### 3.5. Höjdmodell - DEM

Höjdmodellen framställdes genom Delauney-triangulering av de markklassade oregelbundna punkterna. I den triangulerade modellen kan nya punkter interpoleras fram till önskad gridstorlek. I figur 3.13 visas ett exempel på hur en punktsvärm, via en triangulerad yta, interpoleras till ett regelbundet rutnät. Höjden i en gridpunkt bestäms relativt triangelns hörn för den aktuella planpositionen. Det faktum att höjden bara kan interpoleras på ett sätt, entydigt bestämd, i en triangel är en stor fördel med triangelmodeller.



Figur 3.13 Höjderna i det regelbundna rutnätet, röda punkter, bestäms av de trianglar som bildats från den ursprungliga punktsvärmen.

Skall det sedan från grid-punkterna framställas ytterligare en höjdmodell är interpolationsmetoden inte given. Man kan tänka sig att använda gridpunkterna som underlag för en ny triangulering eller så kan man använda andra alternativa interpolationsmetoder, bilinjär interpolation eller kubisk faltning. Valet är oftast applikationsanpassat, man måste dock vara medveten om att ytterligare interpolationsfel tillförs i detta moment.

### 3.6. Kvalitetsbeskrivning av höjdmodellen - felbudget

En tydligt uttalad ambition med projektet har varit att formulera ett koncept för en objektiv beskrivning av en höjdmodells noggrannhet. Metoden skall vara teknikoberoende av datafångstmetod, d.v.s. kvalitetsbeskrivningen skall relateras till höjdmodellen och inte till datafångstmetod. I (Klang, 2005) och (Klang & Burman, 2005) beskrivs en metod för bestämning, genom simulering, av en höjdmodells noggrannhet. Höjdmodellens noggrannhet är formulerad som summan av de fel som genereras från bristande plan- och höjdnoggrannhet samt dess punkttäthet och effekten av den interpolationsmetod som används vid den slutliga produktionen av höjdmodellen.

Fyra felkällor används för att beskriva en höjdmodells felbudget, ekvation 5, i denna studie

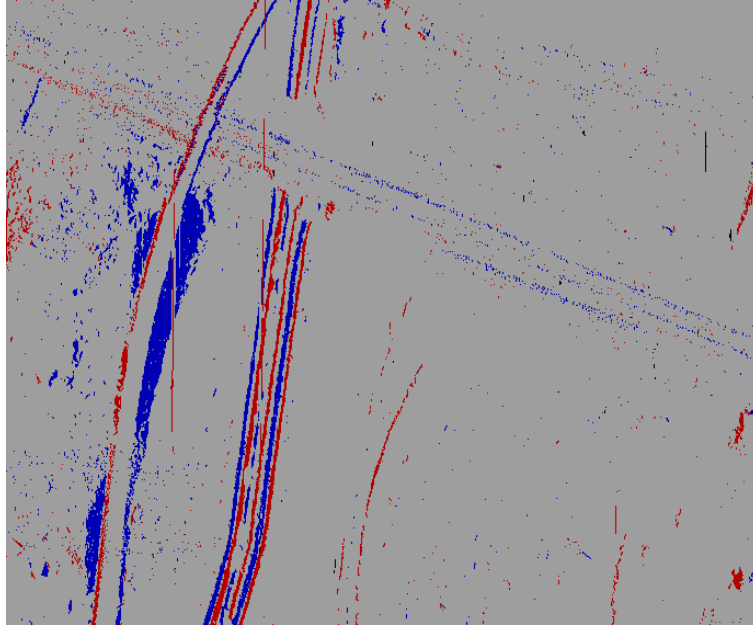
$$\sigma_{DEM}^2 = \sigma_{höjd}^2 + \sigma_{plan}^2 + \sigma_{punkttäthet}^2 + \sigma_{interpolation}^2 \quad (5)$$

där:

varianskomponenten *höjd* påverkas av valet av datafångsttekniken, flyghöjd, stödpointers noggrannhet och "trianguleringsmetoder". Öppna plana ytor, se figur 4.3, geodetiskt mätta används som referens för bestämning av höjdnoggrannheten. Influenser från fel i planläge antas vara försumbara i dessa referensytor.

Varianskomponenten som beskriver fel i *plan* bestäms med störst noggrannhet vid distinkta gradienter, lutningar, i terrängen. Oftast utgörs dessa av "man-made-objects", t.ex. byggnader, murar eller diken. Ett systematiskt fel i planläge har simulerats genom att förskjuta en kopia av höjdmodellen 0.5 m, där skillnaden mellan modellerna visas i figur

3.13. Förskjutningen som skett i öst-västlig riktning syns tydligt på de strukturer som framträder i bilden. Områden i referensdata som ligger ovanför modellen med simulerat fel redovisas med röd färg. Referensdata ligger således väster om mätdata. De strukturer som tydligt framträder är i detta fall vägbankar, "man-made-objects".



Figur 3.13: Effekten av systematiska planlägesfel på höjdmodellen. Förskjutning av mätdata, österut med 0.5m, relativt referensdata ger störst bieffekter där stora gradienter kan lokaliseras i höjdmodellen.

En fullständig beskrivning av en kontinuerlig yta, höjdmodell, kräver ett oändligt antal mätningar. Generellt, gäller att *punkttätheten* är starkt relaterad till valet av datafångstmetod. Låg punkttäthet, orsakad av exempelvis skymda områden såsom skog, försämrar förutsättningarna till en noggrann modellering av markytan. Effekten av denna komponent varierar mellan olika terrängtyper.

Höjdmodellen föreslås i rapporten vara ett regelbundet rutnät, grid. *Interpolation*, vilken degenererar noggrannheten, krävs för att producera ett regelbundet grid. Fortsättningsvis inkluderas denna varianskomponent i den tidigare beskrivna punkttätheten.

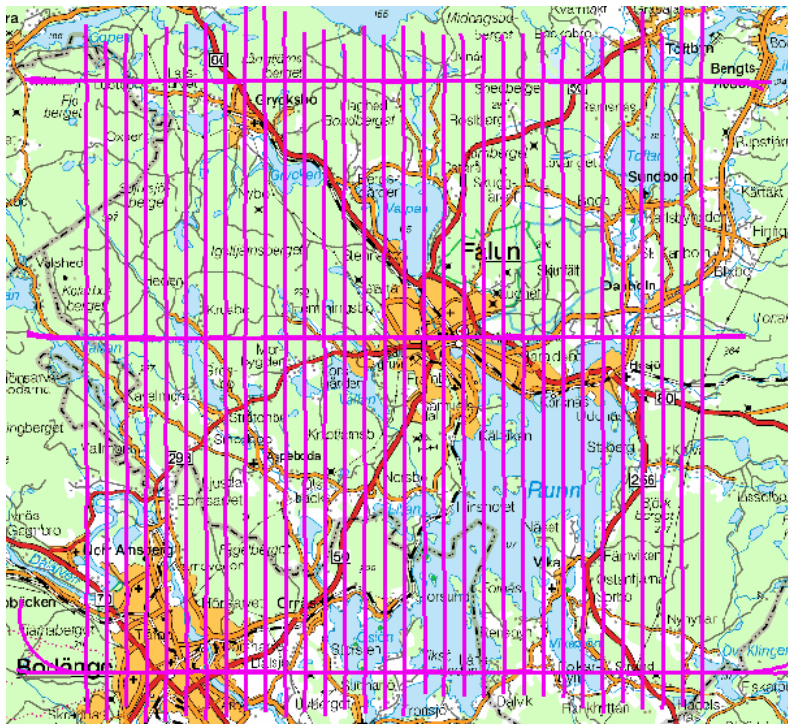
## 4. Data

I slutet av oktober 2004 laserskannades testområdet, 625 km<sup>2</sup>, från 2000 meters flyghöjd. Förutom laserdata anskaffades även olika referensdata över området för att underlätta utvärderingen. Exempel på sådana data är ortofoto, GGD, primärkarta och GPS-mätningar. I detta kapitel redovisas en sammanställning av dels det laserdata som samlats in dels de referensdata som ligger till grund för den geometriska korrigeringen och den avslutande noggrannhetsanalysen.

### 4.1. Laserdata

#### 4.1.1. Datafångst

Den 27:e oktober 2004 laserskannades Faluområdet av Blom Norkart Mapping AS. För att täcka området flögs 32 parallella stråk på 2000 meters flyghöjd i nord-sydlig riktning, med 25 % sidoöverlapp. Tre korsande stråk flögs på 2000 meters flyghöjd och tre på 1000 meters flyghöjd. I figur 4.1 sammanfaller redovisningen av de tre tvärstråken från de olika flyghöjderna eftersom de flugits utefter samma "stråk".



Figur 4.1: Stråkens placering, 32 stråk i NS riktning och 2\*3 tvärstråk i ÖV riktning.

Lasersystemet Optech ALTM 2033 användes vid skanningen. Skannerns parametrar redovisas i tabell 4.1.

Tabell 4.1: Skanningparametrar för Faluprojektet.

PARAMETRAR	VÄRDEN
Flyghöjd	2000 och 1000
PRF	33333 Hz
Skanningfrekvens	25 Hz
Skanningvinkel	± 15 grader
Stråkbredd	1072 m
Sidoövertäckning	25 %
Divergens i laserstrålen	0.3 mrad, träffyta 60 cm på 2000 m
Flyghastighet	75 m/s
Våglängd	1064 nm (NIR)
Punktavstånd (medelvärde)	
x-riktning	1.59 m
y-riktning	1.50 m
m <sup>2</sup> per punkt	2.38

#### 4.1.2. GPS-data

Samplingsfrekvensen för GPS var 1 Hz och integrationen av GPS- och tröghetsmätningar gjordes i programmet POSpac från Applanix. Beräkningen av laserdata utfördes i Optechs programvara REALM.

#### 4.1.3. Databearbetning – Blom Norkart Mapping

Laserdata processades av Blom Norkart Mapping (BNM) och georefererades direkt med hjälp av GPS och tröghetsmätningar. BNM genomförde således ingen anpassning till markstöd. Anpassningen till markstöd utfördes, som avtalat, av Lantmäteriet och Digpro. En intern kalibrering av skannerns skalfel i spegelvinkeln genomfördes dock av BNM innan data levererades till Lantmäteriet.

#### 4.1.4. Dataleverans – LAS-format, Trajectory

Laserdata levererades i LAS-format. LAS är ett standardiserat format, definierat av American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - ASPRS. En sammanfattande beskrivning av formatet återfinns i tabell 4.2.

Tabell 4.2: Generell beskrivning av LAS-format.

INNEHÅLL I LAS-FORMAT	BESKRIVNING
Officiellt "header"-block	Innehåller grundläggande information som datakälla, projektidentitet, version, datum, skalområde, koordinatbegränsning.
"Record" av variabel längd	Variabel "record"-typ som ger leverantörer av laserdata möjlighet att inkludera egen information i filen.
Punktdata	Information om varje laserpunkt. Inkluderar koordinater (x, y, H), intensitet, returnummer, skanningvinkel, klassning och GPS-tid.

För varje laserpunkt, ovan punktdata, innehöll Faludata information om koordinater (x, y, H), intensitet, GPS-tid, stråknnummer och mottagare (1 eller 2). Den skanner som användes har två olika mottagare, vilka ger två olika registreringar för varje reflekterad laserpuls. Ibland är dessa registreringar identiska, mer vanligt är dock att de är några centimetrar separerade. Huruvida dessa skillnader kan betraktas som normalfördelat brus eller om svårigheten att penetrera tät markvegetation bidrar till spridningen är ännu inte klarlagt. Det finns inte heller möjlighet utreda detta problem i projektet utan alla punkter betraktas som kommandes från en enhet vid klassningen. Med tanke på klassningsalgoritmens utformning kommer låga punkter väljas framför högre att representera markytan.

Till den ovan beskrivna informationen levererades även processade banparametrar. Banparametrarna levererades i TerraScans binärformat tillsammans med ursprungliga GPS- och tröghetsmätningar. Banparametrarna innehåller kontinuerlig information om GPS-tid, koordinater (x, y, H), attityd-vinklar (roll, tipp, gir), kvalitet (samma för all stråk) och stråknnummer.

För att säkerställa bästa möjliga förutsättningar för en god positionering, placerades en GPS-referensstation centralt i området. Det finns ett antal stationära GPS-stationer, se figur 4.2, i närheten som möjliggör en lämpligt avstånd till referensstationen. Det finns även möjlighet att analysera vilket resultat en virtuell referensstation skulle ge.

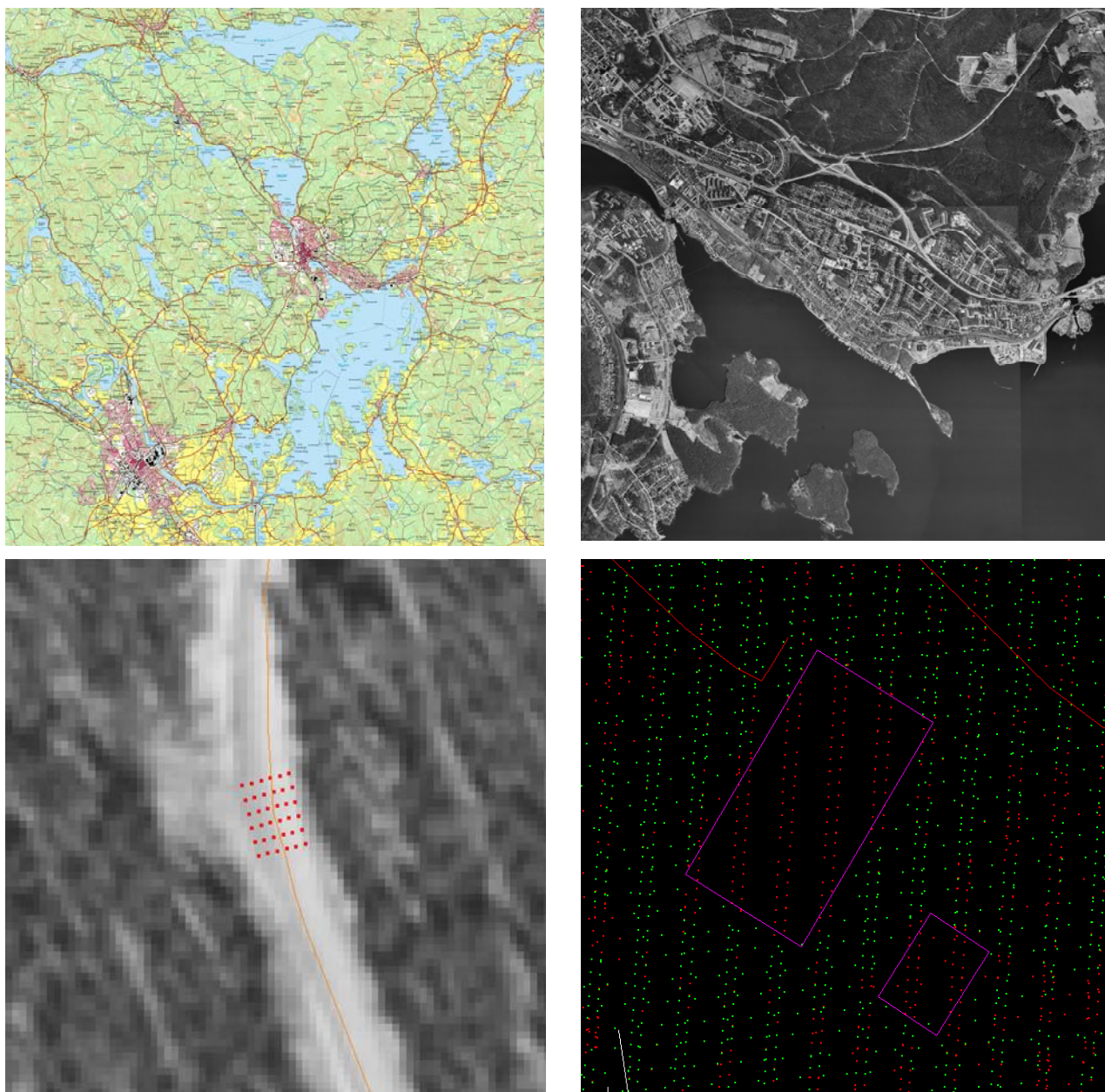




Figur 4.2. Referensstationens placering, centralt i området, samt en sammanställning av närbelägna SWEPOS-stationer.

## 4.2. Referensdata

Plan- och höjdnoggrannhet i höjddata är avgörande parametrar för noggrannheten i den slutliga höjddata modellen. För utvärdering av noggrannheten i Faludata har ett antal datakällor tillgängliggjorts. Bland dessa data finns rikstäckande Grundläggande Geografiska Data (GGD), ortofoton samt den existerande höjddatabasen. För att utvärdera höjdnoggrannheten med hög precision mättes nio öppna plana ytor, vardera bestående av 6x6 punkter. De är av förklarliga skäl inte lämpliga för utvärdering av plannoggrannheten. Falu kommuns primärkarta är ytterligare en källa som nyttjats inom projektet. Dessa kommundata, som är insamlade med såväl geodetiska som fotogrammetriska metoder, har främst använts för utvärderingen av plannoggrannheten. I figur 4.3 visas tillgängligt referensdata och dess bedömda noggrannheter är sammanställda i tabell 4.3.



Figur 4.3. Referensdata, GGD - här redovisad som terrängkartan, ortofoto, höjdstödyta 6\*6 punkter samt vektordata från Falu kommun.

Tabell 4.3. Referensdata och bedömd noggrannhet.

DATAKÄLLA	NOGGRANNHET PLAN ( $1\sigma$ )	NOGGRANNHET HÖJD ( $1\sigma$ )	NOTERING
GGD	2.0 m	2.0 m	Vektordata
Ortofoto	1.0 m	-	1 m upplösning
Falu kommun	0.05 m	0.05 m	Vektordata
Höjdmodell	-	2.0 m	50 m upplösning
Kontrolltytor i höjd	0.03 m	0.03 m	Areor, 6*6 punkter

## 4.3. Referenssystem

### 4.3.1. Horisontellt - plan

Det svenska kartsystemet RT90 är baserat på Bessels ellipsoid och Gauss-Krügers kartprojektion. För en del applikationer används redan det nya referenssystemet, SWEREF99. SWEREF99 är en svensk realisering av det europeiska referenssystemet ETRS89 och medger en framtida effektiv hantering vid mät- och kartläggning. En till svenska förhållanden anpassad UTM-projektion, SWEREF99TM, är det nya officiella svenska kartsystemet som tas i bruk 2007. Data i Faluprojektet levererades i det nya svenska systemet, SWEREF99TM. Även referensdata har transformerats till det nya systemet för att möjliggöra korrektioner och analyser. Transformationsparametrar mellan Faluns system och SWEREF99TM redovisas nedan i kapitel 4.3.3.

### 4.3.2. Vertikalt - höjd

Sveriges nuvarande nationella höjdsystem benämns RH 70. Nollpunkten, Normal Amsterdam Peil (NAP), för detta system är placerad i Holland. RH 70 har epok 1970 och normalhöjder används. Epoken är viktig för svenska förhållanden eftersom Sverige påverkas av post-glaciära förhållanden i form av landhöjning. Ett nytt nationellt höjdsystem realiserades i april 2005. Det nya systemet, RH2000, är en svensk realisation av det europeiska systemet European Vertical Reference System (EVRS). Den huvudsakliga skillnaden jämfört med RH70 är att epoken bytts till 2000.0 Alla de övriga nordiska länderna har eller kommer att implementera liknande system vilket är en anpassning till övriga europeiska system. Eftersom det nya vertikala systemet inte introducerats då laserskanningen över Falun genomfördes har det gamla systemet RH70 använts i projektet.

### 4.3.3. Transformation

Falu kommuns data är producerat i kartsystem, RT R10 2.5 gon V 0:-15. Tanken, att använda dessa data som referens vid noggrannhetsutvärderingen, förutsätter att de har samma geometri, d.v.s. referenssystem, som laserdata. Transformationsparametrar mellan Falu kommuns kartsystem och det nya svenska SWEREF99TM beräknades av Lantmäteriets Geodesienhet. Den metod som förordas, direktprojektion, har dessutom fördelen att höjdvärdet inte påverkas vid transformationen. Parametervärden för de båda systemen redovisas i tabell 4.4.

Tabell 4.4. Kartprojektionsparametrar som användes vid direktprojektion mellan Falu kommuns kartsystem och SWEREF99TM.

PARAMETER	FALU KOMMUN	SWEREF99TM
Longitud för origo	15:48:22.8816	15:00:00.0000
Latitud för origo	0:00:00.0000	0:00:00.0000
Skalreduktionsfaktor	1.00000541	0.99960000
E - tillägg	1500067.948900	500000.000000
N - tillägg	-666.266200	0.000000

## 5. Resultat och diskussioner

### 5.1. Stråkutjämning

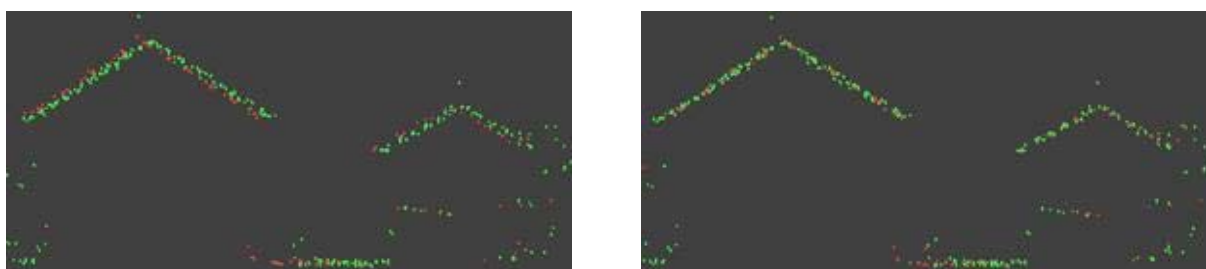
#### 5.1.1. Globala korrektioner

“Boresight”-kalibrering gjordes för två olika block, dels det med tvärstråk på 1000 m flyghöjd, dels det med tvärstråk på 2000 m. De estimerade korrektionerna redovisas i tabell 5.1.

Tabell 5.1. Resultat från “Boresight”-kalibreringen

FLYGHÖJD	2000 M		1000 M	
	Korrektioner	Medelfel	Korrektioner	Medelfel
Roll [grad]	+0.0030	0.0022	+0.0015	0.0014
Tipp [grad]	-0.0112	0.0056	-0.0100	0.0016
Gir [grad]	+0.0056	0.0060	+0.0056	0.0016
Effekt i plan [m]	0.54	-	0.41	-
Effekt i höjd [m]	0.03	-	0.01	-

Särskilt stora korrektioner gjordes i tipp-vinkeln (ca 0.01 grader) vilket ger en effekt av ca 0.4 meter i korrigering av planläget. Om överlappande stråk dessutom är flugna i motsatt riktning kommer effekten av tipp-felet i motsättning mellan stråken att uppgå till det dubbla, se figur 5.1.



Figur 5.1. Bilderna visar effekten av “boresight”-kalibreringen. Olika stråk har olika färg, vänster bild visar före och höger bild efter kalibreringen.

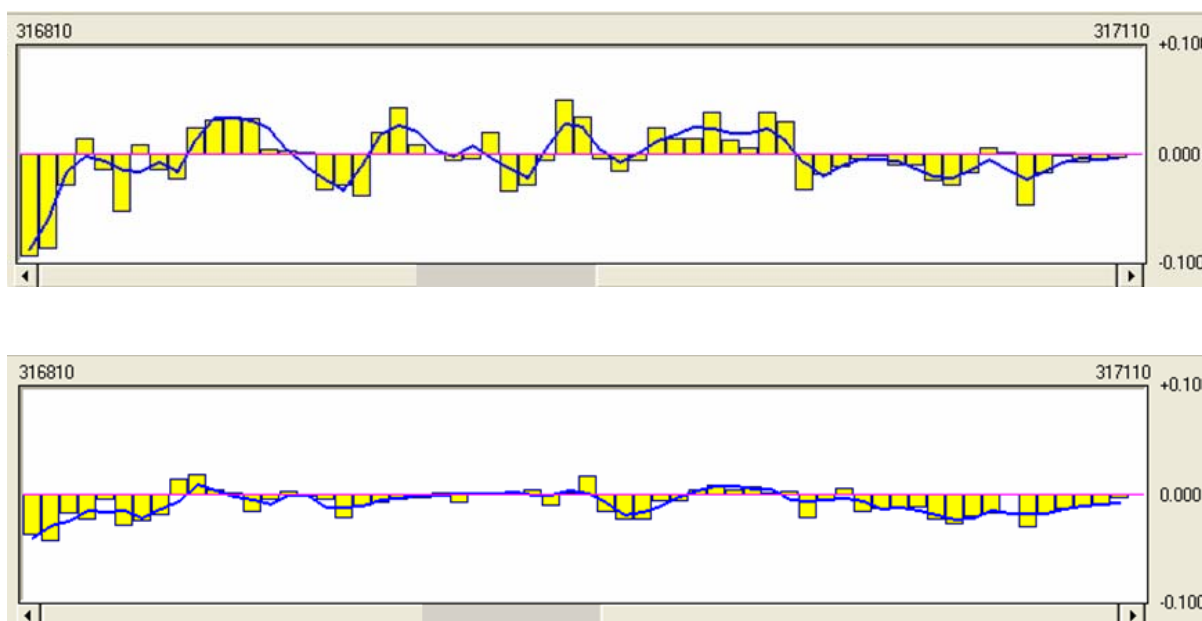
#### 5.1.2. Stråkvisa korrektioner

Stråkvis utjämning utfördes för att modellera och korrigera för kvarvarande systematiska fel i stråken. De fel som modellerades var X, Y, Z och roll. Resultatet från utjämning visas i tabell 5.2.

Tabell 5.2. Resultat från den stråkvisa utjämningen.

	MEDELVÄRDE		SPRIDNING ( $1\sigma$ )		MAXVÄRDEN	
	2000	1000	2000	1000	2000	1000
Flyghöjd [m]	2000	1000	2000	1000	2000	1000
Roll[grad]	0.0002	-0.0003	0.0068	0.0062	0.0122	0.0131
X [m]	-0.04	-0.01	0.07	0.11	0.11	0.25
Y [m]	0.01	-0.08	0.12	0.08	0.29	0.14
Z [m]	0.00	0.00	0.02	0.02	0.03	0.03
Effekt i plan [m]	0.04	0.09	0.38	0.36	0.62	0.78
Effekt i höjd [m]	0.00	0.00	0.08	0.07	0.16	0.18

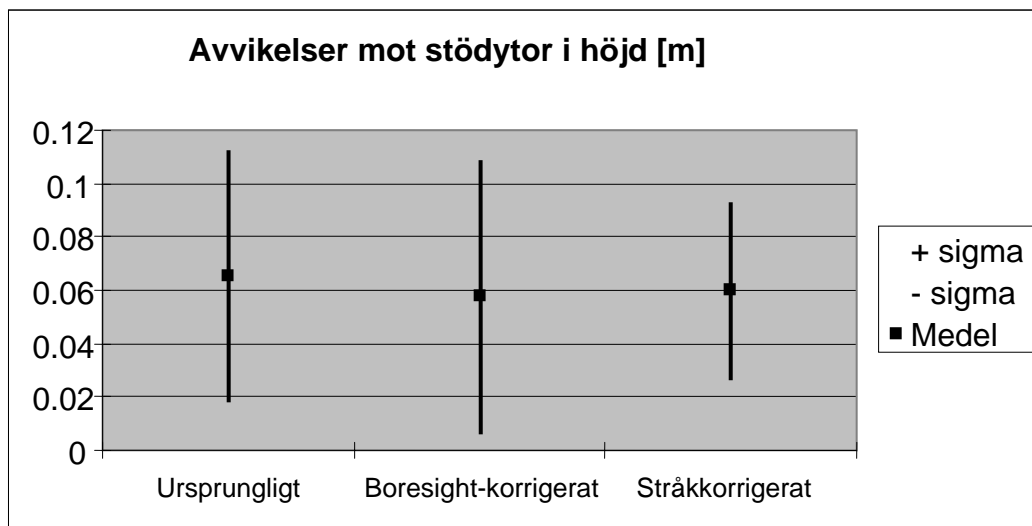
“Boresight”-kalibrering och stråkvis utjämning av laserdata modellerar en del av de kvarvarande systematiska felen. Vissa systematiska fel kvarstår trots denna utjämning, figur 5.2.



Figur 5.2. Motsägelser mellan det mittersta 1000 m tvärstråkets kant och alla andra stråk före, övre, och efter, nedre, stråkvis utjämning.

### 5.1.3. Stråkens avvikelser mot kontrollytorna i höjd

Varje stråk som täckte kontrollytorna analyserades separat för att se effekten av den stråkvisa utjämningen. För varje stråk beräknades medelavvikelserna mot kontrollytorna, även spridningen i stråkens medelavvikelser beräknades, se figur 5.3.



Figur 5.3. Höjdavvikelser mellan laserstråk och höjdstödytor

Korrekktionerna för systematiska fel i stråken bidrog till att medelavvikelserna minskade, men också att spridningen mellan stråken minskade.

## 5.2. Plankorrektion

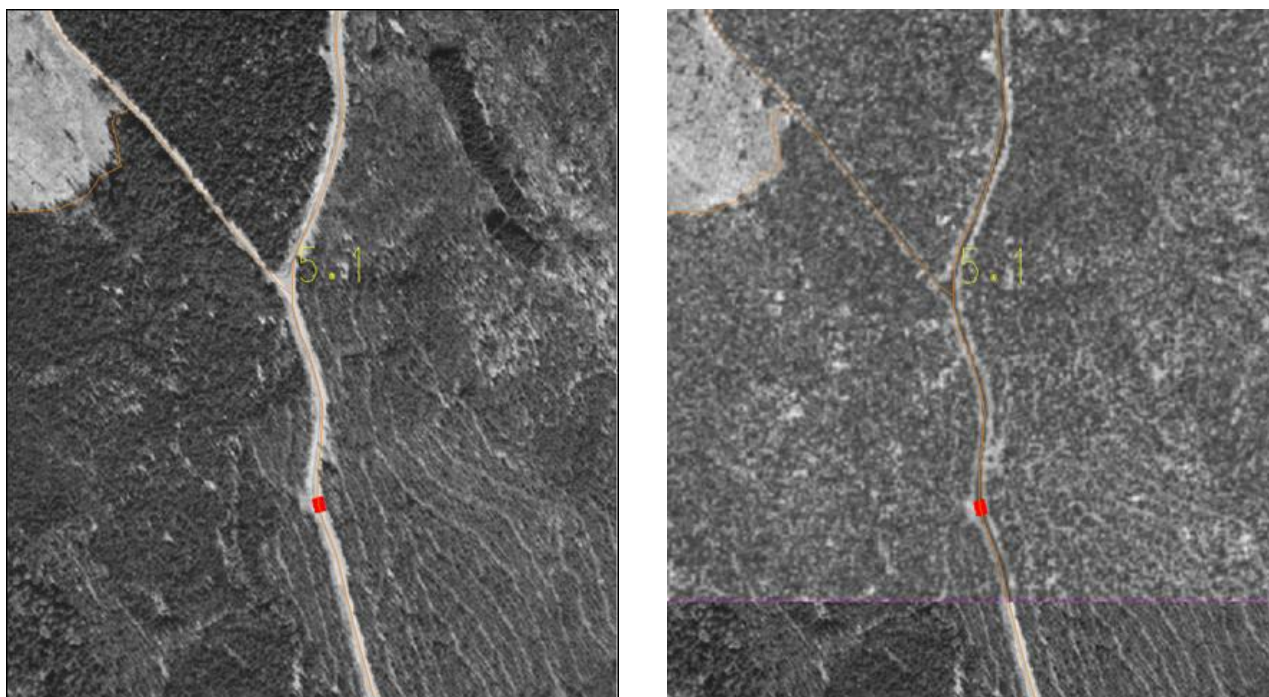
### 5.2.1. Jämförelse med GGD

Eftersom GGD finns tillgängligt rikstäckande är det intressant att se om denna information kan användas för att utvärdera plannoggrannheten i laserdata. Det gjordes försök att tolka laserdata och mäta objekt som finns representerade i GGD. Objekten valdes ut i närheten av de tio stödytor som mätts in för utvärdering av höjdnoggrannheten. Dessa objekt bestod till största del av korsande vägar men i de centrala delarna av blocket också av byggnader. Mätningar har gjorts manuellt i MicroStation med laserdata som bakgrund, antingen visualiserat som höjd- eller intensitetsinformation, figur 5.4, beroende på vad som ansågs bäst för ändamålet.

GGD består ofta av påtagligt generaliserade data, t.ex. vägmitt eller kvarter istället för vägkanter och enskilda hus, vilket gör det svårt att tolka motsvarande objekt i laserdata. Resultatet av jämförelsen mellan laserdata och GGD redovisas i tabell 5.3.

### 5.2.2. Jämförelse med ortofoto

En annan typ av referensdata som finns rikstäckande är ortofoto. Även här gjordes mätningarna i närheten av de tio stödytorna. Det var svårt att hitta motsvarande information i laserdata och ortofotot. De vägkanter som syns i laserintensitetsbilden, högra bilden i figur 5.4, motsvarar övergången från vegetation till grus eller asfalt. I ortofotot, vänstra bilden i figur 5.4, är det ofta kanten på asfalten som är framträdande. Dessutom försvåras analysen av vägarna i ortofotot då de ofta störs av trädskuggor eller skymms av träd. Hustaken i ortofotot är dessutom deplacerade eftersom byggnader inte finns med i den modell som använts för ortorektifieringen.



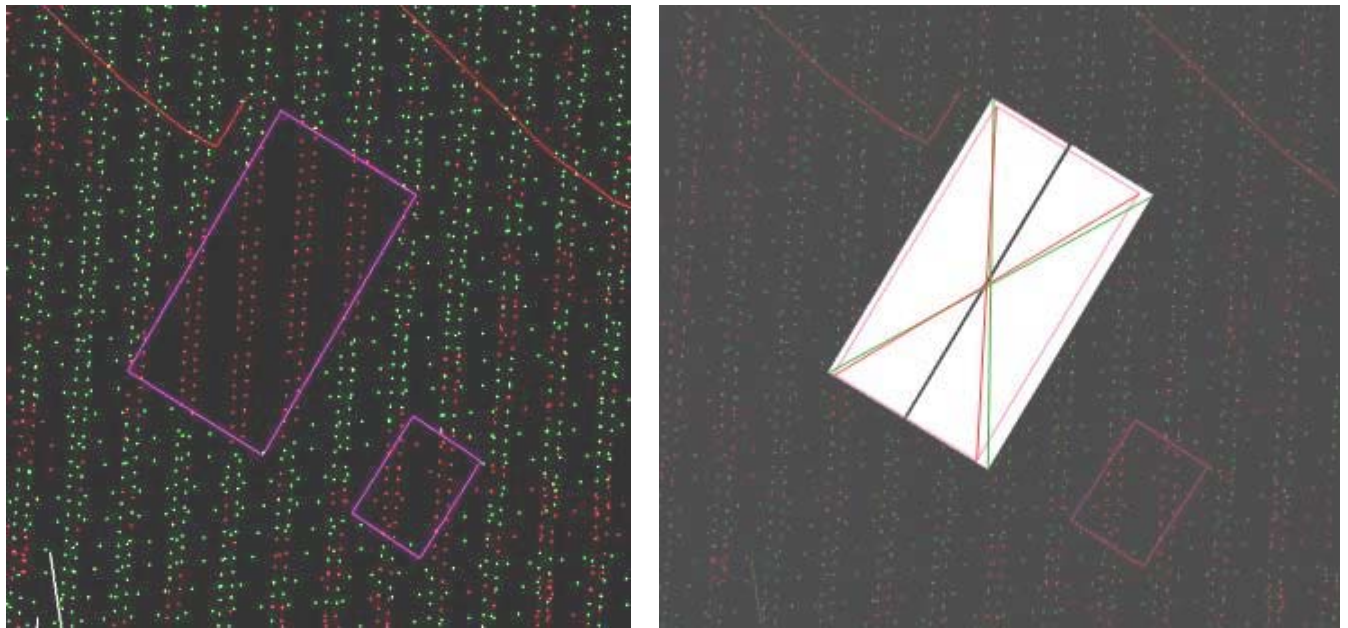
Figur 5.4. GSD-orto till vänster med GGD i svagt orange. Den högra bilden redovisar motsvarande område men i det här fallet som visualiserat intensitetsdata från laserregistreringen. Den nedre delen av bilden är samma ortofot som i den vänstra bilden.

Resultatet av jämförelsen mellan laserdata och ortofotot redovisas i tabell 5.3.

### 5.2.3. Jämförelse med Falu kommuns vektordata

Laserblocket passas in mot kända plankoordinater. Den ursprungliga målsättningen var att utvärdera planläget i olika delar av blocket. Detta var dock inte möjligt då underlaget, d.v.s. planstöd av hög kvalitet, inte fanns tillgängligt över hela området. Istället gjordes en utvärdering mot de centrala delarna av blocket där vektordata av hög kvalitet tillhandahållits av Falu kommun. De avvikelser som beräknas för dessa punkter appliceras sedan på hela blocket. Eftersom laserdata inte innehåller någon semantisk information måste sådan extraheras för att man ska kunna göra en jämförelse mot vektordata. Det objekt som befanns vara lättast att tolka med hög noggrannhet var tak på byggnader, eftersom höjdskillnaden mellan taket och marken framträder tydligt. Dessutom är takkanten så pass lång att det är möjligt att med hög precision skatta denna raka linje.

Den metod som användes till klassning och modellering av hus beskrivs i kapitel 3. När taket modellerats beräknas dess mittpunkt. Avvikelser mellan mittpunkten från laserdata har sedan jämförts med mittpunkten för de geodetiskt inmätta byggnaderna i Falu kommuns vektordata, figur 5.5. Man undviker på så sätt problem där hus antingen kan vara inmätta vid huslivet eller som takets yttre begränsningslinje.



Figur 5.5 Byggnadens mittpunkt, bestämd från laserdata (grönt kryss) och från geodetiska mätningar (rött kryss).

## 5.2.4. Planutvärdering

All utvärdering av planläget i laserdata redovisas i tabell 5.3.

Tabell 5.3. Utvärdering av planläget i laserdata relativt tillgängligt referensdata.

REFERENS	ORTOFOTO		GGD		FALUN	
Flyghöjd (m)	2000	1000	2000	1000	2000	1000
Medel, östlig riktning [m]	0.209	0.257	-0.020	-0.293	0.106	0.035
Standardavvikelse, östlig riktning [m]	0.998	0.903	1.044	1.283	0.161	0.097
RMS, östlig riktning [m]	0.987	0.894	1.023	1.288	0.187	0.101
Medel, nordlig riktning [m]	-0.468	-0.753	-0.265	-0.375	-0.018	-0.082
Standardavvikelse, nordlig riktning [m]	0.848	0.651	1.288	1.402	0.156	0.114
RMS, nordlig riktning [m]	0.943	0.974	1.292	1.421	0.152	0.138
RMS, totalt [m]	1.365	1.322	1.649	1.918	0.241	0.171
Antal mätningar	15	10	27	23	14	20

För att en korrektion skall appliceras bör det uppmätta skiftet uppnå en viss signifikansnivå. I detta fall bedömer vi att en lämplig signifikansnivå utgörs av ett 95%-igt konfidensintervall. Detta innebär att det uppmätta värdet skall överstiga  $1.96 \cdot \text{medelfelet}$  i mätningen för att korrektionen skall appliceras. Denna signifikansnivå nås inte vid något av fallen. Detta innebär att ingen korrektion görs i plan för laserdata.



### 5.3. Höjdkorrektion

För att utvärdera höjdnoggrannheten i laserdata jämfördes markklassade laserdata med de inmätta stödytorna. En av stödytorna visade sig ligga strax utanför området, varför nio ytor återstod för jämförelsen. Resultatet för varje stödyta, samt totalt för alla stödytor, visas i tabell 5.4.

Tabell 5.4. Motsägelser mellan markklassade laserdata och stödytor.

Stödyta	TVÄRSTRÅK 1000 M			TVÄRSTRÅK 2000 M		
	Medel [m]	Standardavvikelse [m]	RMS [m]	Medel [m]	Standardavvikelse [m]	RMS [m]
1	0.021	0.062	0.065	0.005	0.060	0.060
2	0.060	0.060	0.084	0.043	0.062	0.075
3	0.058	0.041	0.071	0.047	0.041	0.062
4	0.072	0.044	0.084	0.062	0.054	0.081
5	0.032	0.062	0.069	-0.001	0.054	0.054
6	0.029	0.050	0.057	-0.017	0.039	0.042
7	0.032	0.038	0.049	0.016	0.037	0.040
8	0.107	0.043	0.111	0.074	0.070	0.101
9	0.014	0.045	0.047	0.025	0.059	0.063
Alla ytor	0.047	0.056	0.073	0.028	0.060	0.067

För att en höjdkorrigerings skall anses signifikant bör avvikelsen utgöra minst  $1.96 \cdot \text{medelfelet}$  i skattningen. Detta inträffar bara för stödyta 8 för tvärstråk på 1000 m ( $0.107/0.043=2.48$ ). Det finns ingen enkel förklaring till varför avvikelsen i denna yta är signifikant. Ser man till alla ytor är heller inte signifikansnivån tillräckligt hög för att en korrektion skall genomföras. Avvikelsen på stödyta 8 ansågs heller inte vara tillräckligt stor för att motivera en specialbehandling. Slutsatsen blev att det inte var motiverat att korrigera för systematiska fel.

### 5.4. Bearbetning

#### 5.4.1. Effekten av olika filtreringsparametrar i TerraScan

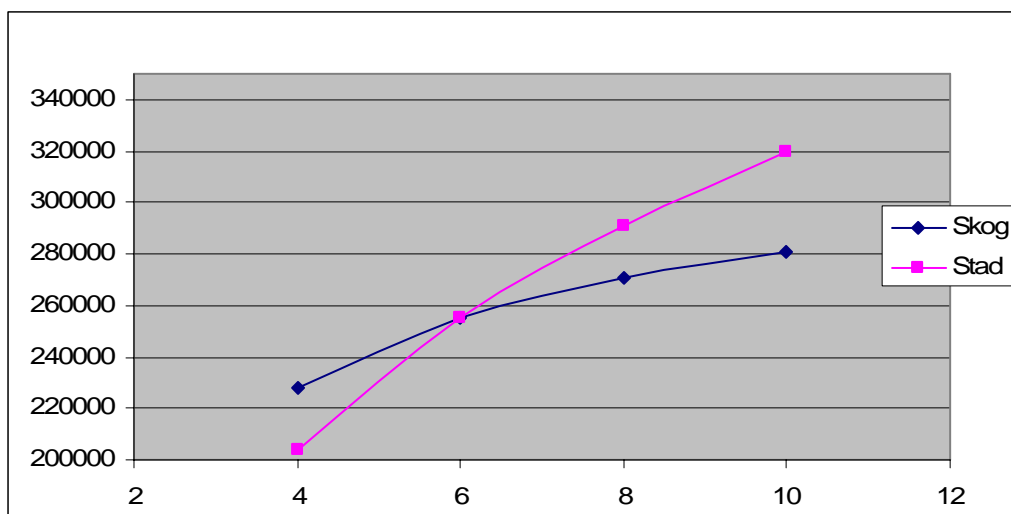
För att se vilken effekt de olika parametrarna har på markklassningen genomfördes ett antal markfiltreringar, dels i skogsterräng, dels i stadsmiljö. Parametrarna varierades, en i taget, för att se effekten på den slutliga markmodellen. Dels registrerades antalet markklassade punkter, dels studerades höjdmodellens utseende.

**Täthet i ursprungligt triangelnät:** Effekten vid ett tätt startnät, här ned till 25 m, är att den lägsta punkten kan befinna sig på ett hustak el.dyl. med följden att en del hus kan komma med i markmodellen. Därav det ökade behovet av mätpunkter för att uppnå relevanta startvärden i stadsmiljöer. Det fanns ingen synbar nackdel med att starta med ett glest

triangelnät, i detta fall 500 m. Man kan tänka sig att en viss negativ effekt kan uppkomma om det finns delområden som är små eller smala. Det finns då risk att dessa inte alls kommer med.

**Terrängvinkel:** Ändring av den maximalt tillåtna terrängvinkeln ger ingen större effekt på markklassningen i detta fall. Man kan se en liten ökning (ca 0.5 %) av antalet punkter vid ökad vinkel från 60 till 90 grader. I höjdmodellen kunde man se att en ökad vinkel både innebar att oönskade områden, som buskage o.dyl., och att önskade små upphöjningar som tidigare missats nu inkluderades.

**Iterationsvinkel:** Iterationsvinkelns storlek är betydande för antalet markklassade punkter, se figur 5.6. Den begränsar höjdmodellens möjlighet att fluktuera i höjddled. En liten iterationsvinkel gör att klassningsalgoritmen exkluderar områden som "sticker upp" från den planare marken och en stor iterationsvinkel gör att uppstickande objekt inkluderas. Det senare kan innebära att t.ex. huskroppar inkluderas i höjdmodellen. Iterationsvinkelns betydelse påverkas också av punkttätheten. Vid låg punkttäthet är det mer troligt att uppstickande objekt, såsom hus, inkluderas i höjdmodellen. Detta beror på att inte bara höjddifferenserna utan även avståndet mellan punkterna påverkar vinkelförändringen mellan efterföljande trianglar.



Figur 5.6. Antalet markklassade punkter beroende av iterationsvinkeln.

**Iterationsavstånd:** Ökat iterationsavstånd gav ingen större förändring i antalet markklassade punkter. I stadsmiljöer ökade antalet punkter vid ökat iterationsavstånd. Detta berodde bl.a. på att en del innergårdar, vilka ofta har en annan nivå än marken utanför kvarteret, inkluderades i höjdmodellen.

#### 5.4.2. Resultat från markklassningen

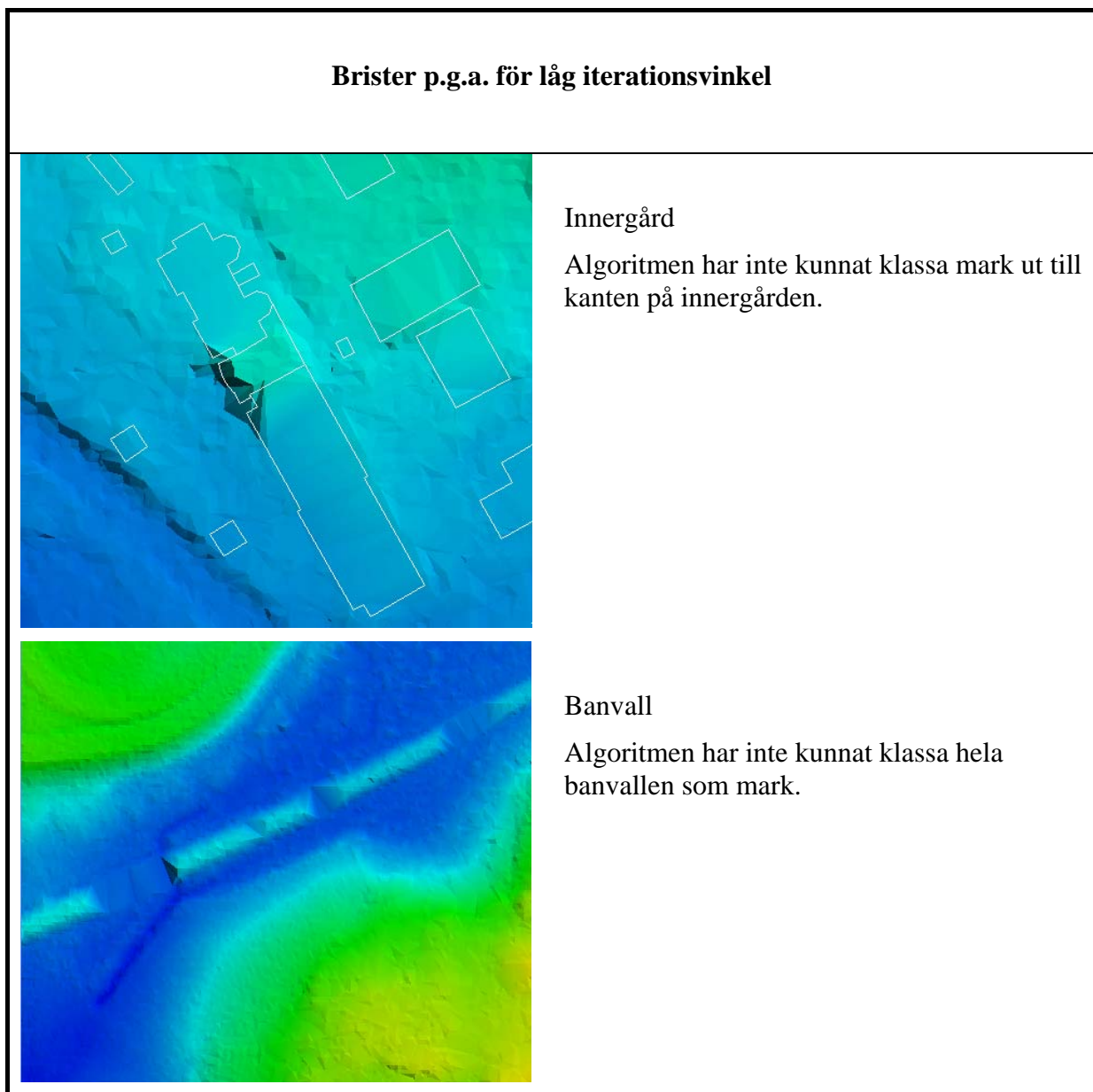
Efter filtreringen triangulerades punkterna för att framställa en höjdmodell. Höjdmodellen studerades visuellt för att upptäcka eventuella brister. Som tidigare konstaterats har iterationsvinkeln störst betydelse av alla parametrar för resultatet av markklassningen.

Problemen vid markklassning kan delas in i två kategorier:

- för högt ställd iterationsvinkel
- för lågt ställd iterationsvinkel

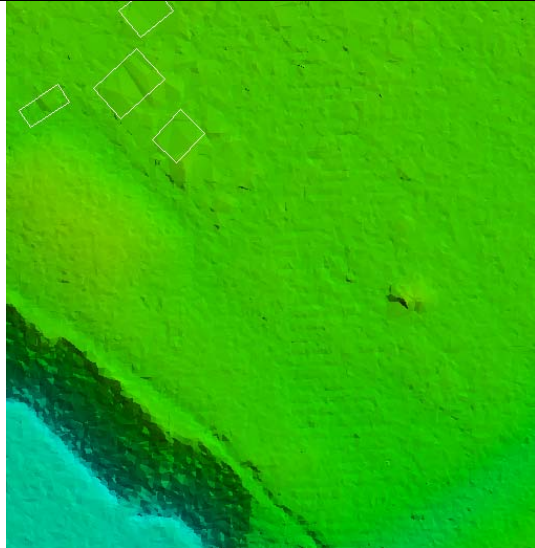
visas i figur 5.7 – 5.9.

Terrängens beskaffenhet i kombination med iterationsvinkeln har betydelse för resultatet. Det finns alltså ingen parameteruppsättning som är lämplig för alla terrängtyper. I vissa fall kan varierande egenskaper inom en terrängtyp eventuellt skapa behov av olika iterationsvinklar för att en optimal markklassning skall uppnås.



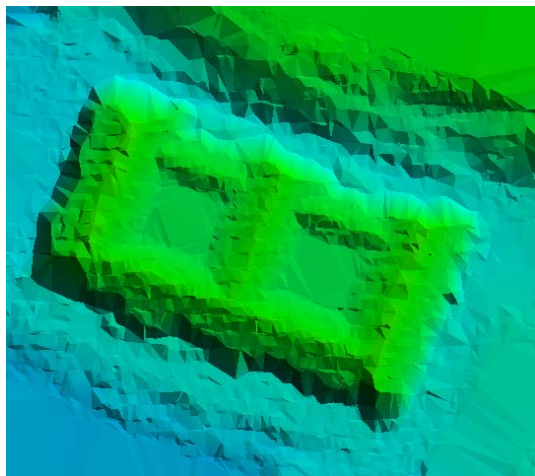
Figur 5.7. Brister i markklassningen beroende på för lågt ställd iterationsvinkel.

## Brister p.g.a. för hög iterationsvinkel



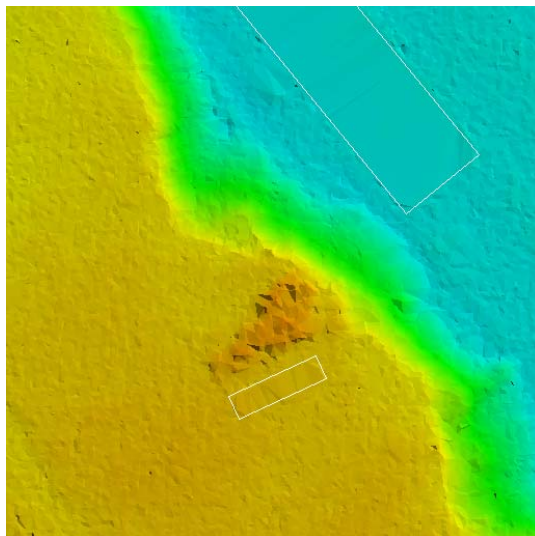
### Buskage

Ett impediment har tätt buskage där lasern inte trängt ned till mark. Algoritmen har klassat punkter nederst i buskaget som mark.



### Hus

Ett souterränghus har klassats som mark då taket ligger väldigt nära marken i den norra delen.

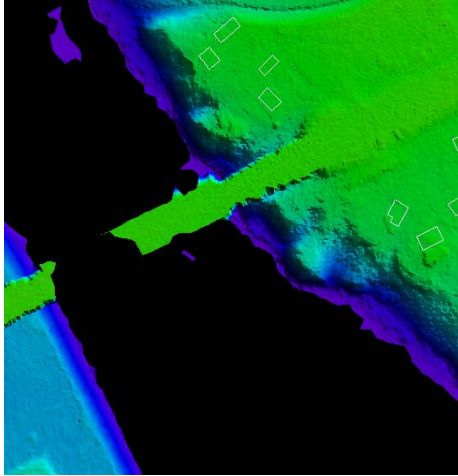


### Buskage

Ett tätt buskage framför huset gör att lasern inte trängt ned till mark. Punkter nederst i buskaget tolkar algoritmen som mark.

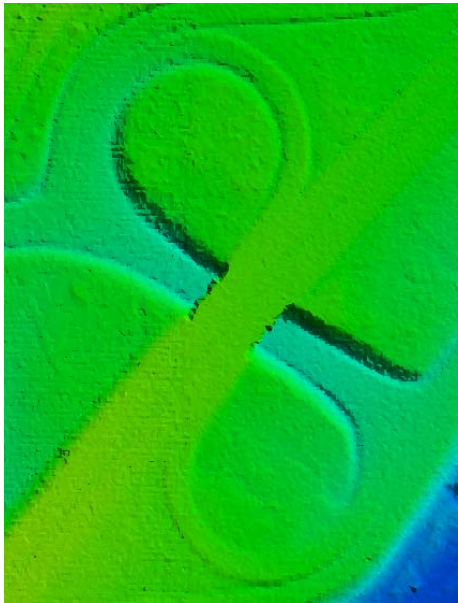
Figur 5.8. Brister i markklassningen beroende på för hög iterationsvinkel.

## Broproblem



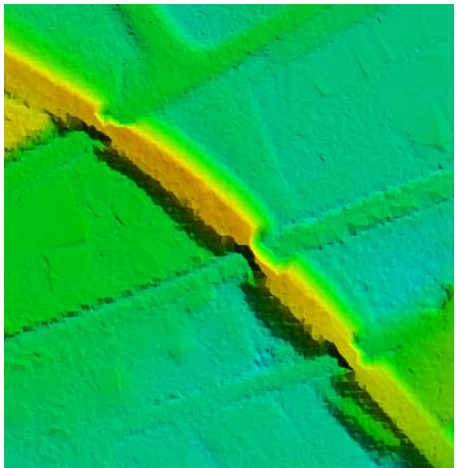
Bro

Algoritmen har klassat mark en bit ut på bron.



Planskild korsning

Den övre vägen har klassats som mark då inga punkter finns på den nedre vägen.



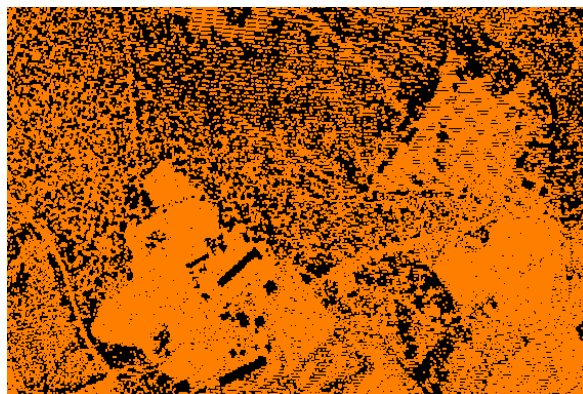
Planskild korsning

Den övre vägen är delvis klassad som mark. Eftersom vissa punkter finns på den nedre vägen klassades dessa delar som mark.

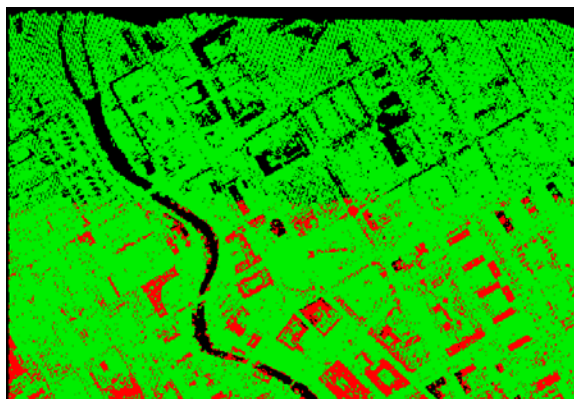
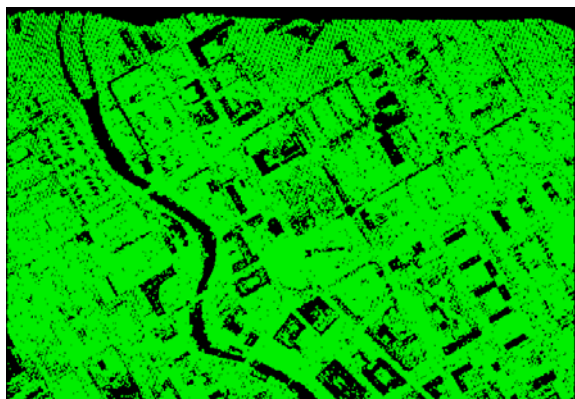
Figur 5.9. Problem med broar vid markklassificeringen.

## 5.5. Höjdmodellens noggrannhet

Plan- och höjdnoggrannhet i höjddata är två av tre komponenter som ingår i den metod som formulerats i kapitel 3 för simulering av en höjdmodells noggrannhet. Den tredje komponenten, som ännu inte beskrivits ingående, är den gemensamma effekten av punkttäthet och interpolation till ett regelbundet rutnät. Ett regelbundet rutnät är ett ofta återkommande önskemål som bl.a. förenklar "konsumentens" användning av höjdmodeller. Punkttätheten representerar antalet laserskott som träffar markytan per  $m^2$ , vilket för Faludata varierar mellan 1.4 punkter/ $m^2$  och 0.05 punkter/ $m^2$ . De stora variationerna beror bl.a. på träffar i vegetation ovan mark och material med nedsatt förmåga att reflektera den utsända lasersignalen. I figur 5.10 och 5.11 åskådliggörs dessa fenomen. Punkttätheten i figur 5.10 minskar påtagligt i skogbeväxade områden relativt den punkttäthet som erhålls för öppen mark. Den vänstra bilden i figur 5.11 innehåller laserdata som registrerats från 2000 meters flyghöjd. Den högra bilden är kompletterad med data från 1000 meter. Skillnaden i detta fall beror på att signalens intensitet är lägre, när den kommer tillbaka till lasersensorn, vid 2000 m flyghöjd och därför är svårare att registrera.



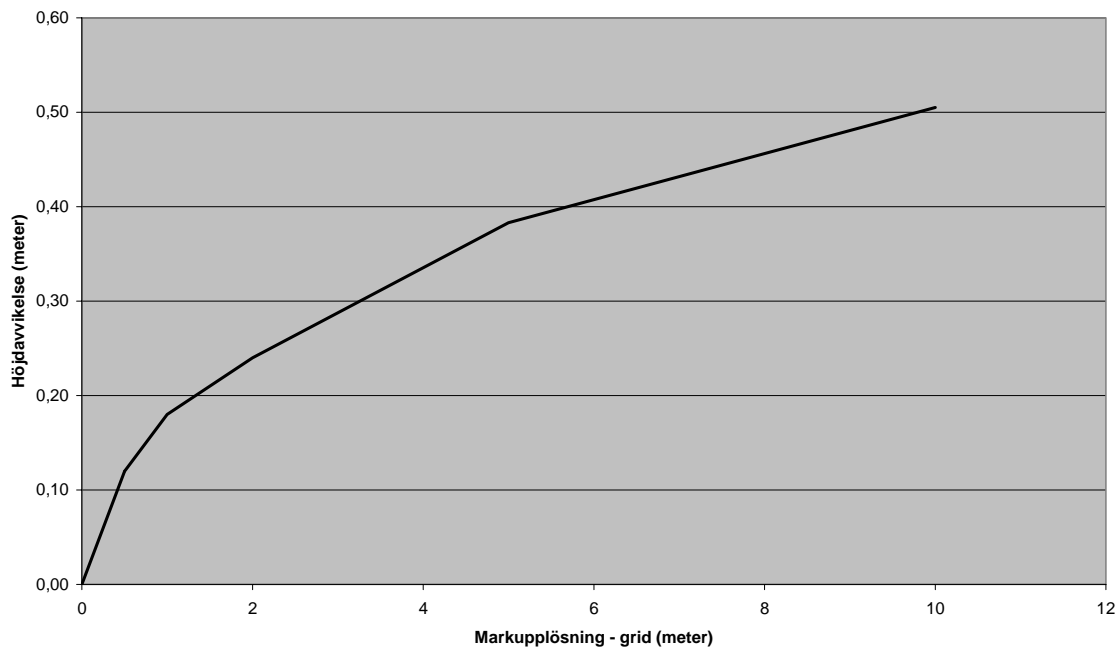
Figur 5.10. Punkttätheten minskar påtagligt i skogbeväxade områden vilket medför sämre förutsättningar för höjdmodellering.



Figur 5.11. Låg intensitet på lasersignalen inverkar menligt på antalet registrerade punkter. Den vänstra bilden innehåller data från 2000 meters flyghöjd. Den högra bilden har kompletterats med data från 1000 meters flyghöjd.

Punkttäthetens influens på en höjdmodells noggrannhet redovisas i figur 5.12. Diagrammet är baserat på studier av laserdata med påtagligt högre punkttäthet än de i Falun. Terrängens variationer i höjdlängd har stor inverkan på hur mycket höjdmodellen degenereras vid ökat avstånd mellan punkterna. De data som använts för figur 5.12 kan anses motsvara de i Falu-terrängen. Om terrängen är flackare minskar kurvans lutning och

om terrängen är mer kuperad ökar kurvans lutning. Punkttätheten, markupplösningen, har stegvis reducerats. Grafen beskriver de avvikelser, relativt de ursprungliga mätningarna, som uppstår vid interpolation i de reducerade dataseten. Den tidigare nämnda punkttätheten i Faludatat, 1.4 punkter/m<sup>2</sup> till 0.05 punkter/m<sup>2</sup>, motsvarar en markupplösning som varierar mellan 0.8 m och 4.5 m.



Figur 5.12 Punkttäthetens influens på höjdmodellens noggrannhet vid terräng med relativt stora variationer. I figuren relateras simulerad höjdnoggrannhet till olika markupplösning - grid.

Bidraget till felbudgeten, formel (5), från den i remissen föreslagna markupplösningen, 2.5 m (0.16 punkter/m<sup>2</sup>), avläses i diagrammet till 0.26 m. Faluområdets lägsta punkttäthet, 0.05 punkter/m<sup>2</sup>, avläses på motsvarande sätt till 0.36 m. I (Klang & Burman, 2005) har ett planlägesfel simulerats genom att bestämma avvikelserna mellan datas ursprungliga position och en höjdmodell som skapats från dessa data och sedan flyttats 0.5 m i fyra olika riktningar. Planfelets inverkan på höjdmodellens noggrannhet finns beskrivet i (6).

Varianskomponenten för höjd baseras på avvikelser mot stödytor i öppna plana områden. Det finns ingen utvärdering, i detta projekt, av höjdprecisionen i olika typer av terräng. Man kan dock anta att den försämras bl.a. vid ökat inslag av markvegetation. Värdet som använts, 0.07 meter, bör anses som det bästa som kunnat uppnås i Faluprojektet.

$$\sigma_{DEM}^2 = \sigma_{höjd}^2 + \sigma_{plan}^2 + \sigma_{täthet+interpolation}^2$$

$$\sigma_{plan}^2 = (\sigma_{(x,y)} / 2)^2 = (0.171 / 2)^2 \text{ meter}$$

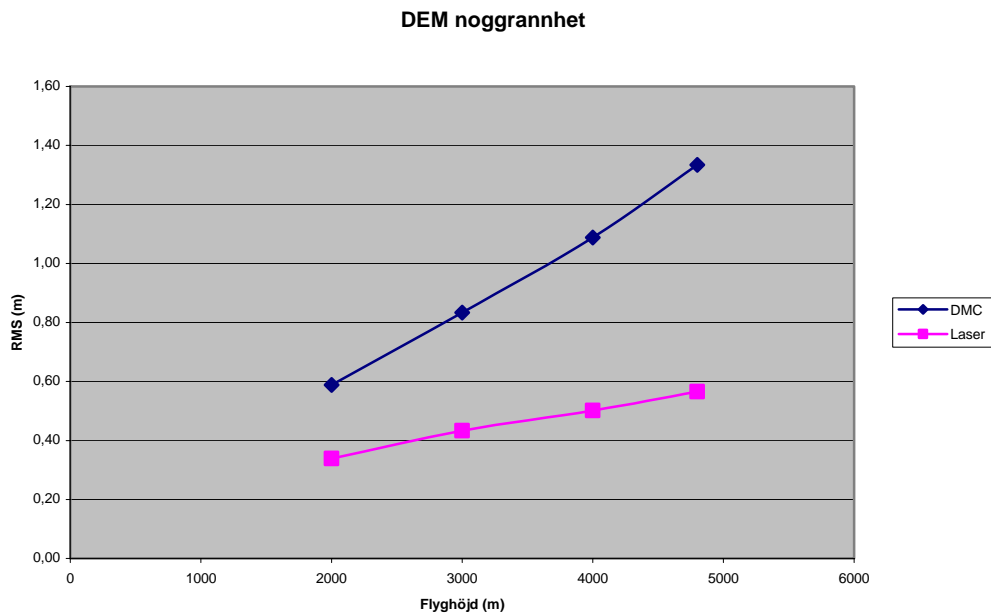
$$\text{där, } \sigma_{(x,y)}^2, \text{ planlägesfelet återfinns i tabell 6.3} \tag{6}$$

$$\text{Exempel A : 2.5 m grid} \quad \Rightarrow \sigma_{DEM} = \sqrt{0.07^2 + 0.086^2 + 0.26^2} = 0.28 \text{ m}$$

$$\text{Exempel B : 0.05 ptker / m}^2 \quad \Rightarrow \sigma_{DEM} = \sqrt{0.07^2 + 0.086^2 + 0.36^2} = 0.38 \text{ m}$$

Tydligt är att komponenten *punkttäthet och interpolation* har störst inverkan på höjdmodellens noggrannhet i Faludata. Den simulerade noggrannheten varierar mellan 0.28 m och 0.38 m i området, främst beroende på tätheten i data. Tillskottet från plan- och höjdkomponenterna är förhållandevis små, till stor del beroende på en bra ursprunglig geometri och de korrekationer som genomförts.

I figur 5.13 redovisas den noggrannhet, simulerad som tidigare beskrivits, som sannolikt kan uppnås för två skilda sensorer vid varierad flyghöjd. För beräkning av noggrannheten för DMC, Lantmäteriets digitala kamera, har HMK-Fo:s generella beskrivningar för plan- och höjdnoggrannhet använts. Noggrannheten i plan och höjd för laserskanning påverkas inte på samma sätt som för fotogrammetrisk mätning. Planfelet är direkt relaterat till vinkelfelet, tröghetsystemets noggrannhet, och flyghöjd för registreringen. Höjdfelet beror främst på laserns mätnoggrannhet. Hur väl dessa "systemfel" kan modelleras och kompenseras för beror på de program som används för efterbearbetning, PPS och "triangulering".



Figur 5.13 Simulerad noggrannhet för höjdmodeller framställda med fotogrammetriska metoder och flygburen laserskanning. För den fotogrammetriska mätningen har 2\*medelfelet för signalerade objekt i HMK-Fo använts.

I figuren förutsätts att lasersystemet klarar av att skicka ut tillräckligt starka pulser för att få tillbaka returerna från signifikanta objekt. Minskad punkttäthet och svagare returerna ger försämrade noggrannhet i höjdmodellen än vad figuren redovisar. Antas risken vara påtaglig att signifikanta objekt inte kommer att registreras rekommenderas en lägre flyghöjd.



## 6. Slutsatser

### 6.1. Produktion - noggrannhet

Baserat på den metod som presenterats för kvalitetskontroll av höjdmodeller har det konstaterats att en höjdmodell producerad från Faluprojektets data uppfyller de önskemål, ca 0.5 meter, som presenterats i remissen "En ny svensk höjdmodell".

Behovet av geometrisk korrigerings har tydliggjorts genom redovisning av ursprungliga systematiska avvikelser samt resultatet efter det att korrekationer utförts och plan- respektive höjdmått kontroller genomförts.

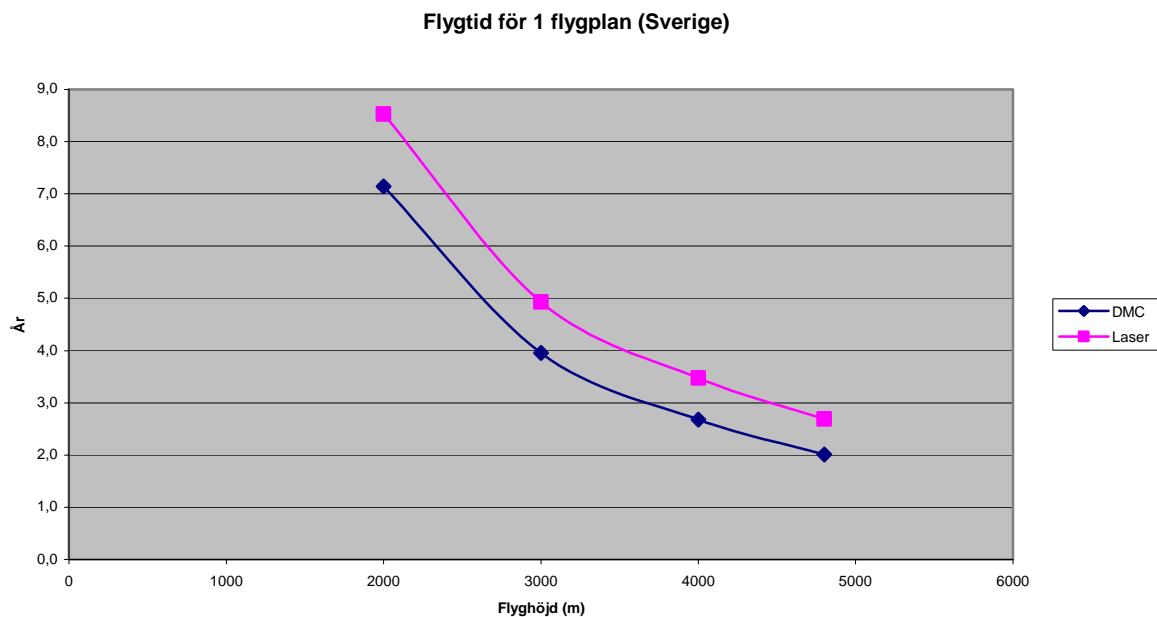
Genom att simulera noggrannheten i höjdmodeller framställda med fotogrammetriska metoder och flygburen laserskanning har det tydligt visats att laserskanningens förtjänster inte bara gäller skogbeväxtade och urbana områden. Höjdnoggrannheten vid laserskanning försämras inte i motsvarande utsträckning som vid mätning i bilder vid ökad flyghöjd.

Förutsatt att den i figur 5.13 simulerade noggrannheten för höjdmodeller framställda från laserskannat data är en "korrekt" beskrivning av höjdnoggrannhetens försämring vid högre flyghöjder gäller följande slutsatser.

1. Produktionen av Lantmäteriets rikstäckande höjdmodell bör baseras på laserdata.
2. Det svenska landskapet är inte indelat i "karteringsenheter" likt de procentuella markslagsandelarna i tabell 1.1. Av den anledningen är ett homogent alternativ, samma datafångstmetod och flyghöjd över hela Sverige, att föredra före indelning i kvalitetsområden. Dessutom förenklas planering, flygning, bearbetning och kvalitetsbeskrivningen av produkten.
3. Antas detta förslag MÅSTE man genomföra en kompletterande studie där noggrannheten i lasersensorer för högre flyghöjder utvärderas på motsvarande sätt som nu genomförts på Faludata. Som referens vid en sådan studie är Faludata ett väl fungerande alternativ.

Utvärderingen, av laserskanning över Falun, som beskrivits i detta dokument indikerar goda förutsättningar att uppnå den noggrannhet man i remissvaren önskar, ca 0.5 meter. I föregående kapitel beskrevs även noggrannheten för fotogrammetriskt insamlat höjddata. Den återstående frågan är hur höjdmodellens noggrannhet skall bedömas i relation till tids- och kostnadsaspekter inom statsuppdragets formuleringar.

Figur 6.1 beskriver generellt den flygtid som erfordras för att med ett, 1, flygplan samla in data med fullständig Sverigetäckning. Alternativen, fotogrammetrisk och laser, skiljer sig främst beroende på att laserskanningens flygstråk inte antagits vara lika breda som för DMC. Skälet till detta är att man vill skapa förutsättning för markregistreringar även i skogbeväxtade områden och därför inte utnyttjat skannerns maximala svepbredd.



Figur 6.1. Om ambitionen är att samla in data inom en 5-årsperiod skulle detta således vara möjligt för flygning med såväl laser som DMC. Flygbildsalternativet - DMC - är dock känsligare för yttre förutsättningar, moln och skuggor.

Tidplanen för datafångst måste givetvis kompletteras med bearbetningstider som relateras till sensor och flyghöjd. Högre flyghöjder medför som regel högre bearbetningskostnader, till stor del beroende på att tolkning och statistiska analyser försvåras på grund av att data inte har motsvarande "innehåll" som vid lägre flyghöjder. En tumregel är dock att tidsåtgången för bearbetning är 10-20 ggr tiden för datafångst. Man måste således ta hänsyn till hela produktionsprocessen och inte suboptimera kostnader för t.ex. flygningen vilket sannolikt medför en väsentligt ökad kostnad för bearbetning och med det även slutprodukten.

Kostnaden för en rikstäckande kartering kräver ytterligare tidsstudier och kostnadsbedömningar för de olika bearbetningsmomenten, vilket föreslås som en till den beskrivna noggrannhetsinventeringen kompletterande studie.

Tekniken utvecklas och konkurrensbilden förändras ständigt, det är därför svårt att bedöma kostnaden för ett rikstäckande projekt. Det som kan anses vara någorlunda beständigt är produkten, höjdmodellen. Fastställs kvalitetskraven skapas långsiktiga möjligheter att nyttja teknikens utveckling på ett för Lantmäteriet kostnadseffektivt sätt utan att menligt påverka höjdmodellens noggrannhet.

## 7. Framtida projekt

Ett delområde av höjdmodellen över Falun skall göras tillgänglig för distribution och extern analys. Dessutom finns intentioner att genomföra ytterligare studier kring optimering av referensstationer baserat på data från Falustudien. Vidare har det framkommit behov av kompletterande studier vilka beskrivs nedan.

### 7.1. Förslag till kompletterande studier

- Delområden av Faluhöjdmodellen bör kvalitetssäkras för att kunna nyttjas som referensdata vid utvärdering av flygburen laserskanning från högre höjder.
- Faluområdet har flygfotograferats med DMC under sommaren år 2005. Bilder från 4800 m, 3000 m och 2500 m har registrerats. Dessa bilder kan användas för utvärdering av den geometriska noggrannheten i DMC. Som referensdata är det möjligt att använda den höjdmodell som framställts från laserdata. En sådan studie kan även ge indikationer på att DMC, trots det som framkommit i Falustudien, kan vara ett alternativ till flygburen laserskanning.
- Alternativet, att flyga från högre höjd med laserskanner, förutsätter följande:
  - Alla lasersensorer har unika egenskaper och "egenheter". Det måste etableras metoder för att detektera och korrigera för systematiska avvikelser på motsvarande sätt som gjorts i Falustudien. Utförs inte de korrekationer som beskrivits i detta dokument kan man inte förutsätta att den i figur 5.13. simulerade noggrannhet är korrekt.
  - Bearbetningsmetoder, filtrering och klassificering, måste anpassas till data med lägre punkttäthet.
  - Det bör säkerställas att utrustningen som används för högre flyghöjder kan generera data med tillräckligt stark signal och lågt brus.
- Den modell som använts för beskrivning av höjdmodellens noggrannhet är även användbar för kvalitetsbeskrivning av alla typer av höjdmätningar. Det ges således möjlighet att särskilja noggrannheten i skog, glesa mätningar, från öppen mark där punkttätheten är högre. Kvalitetsbeskrivningen bör knytas till varje mätning, laserträff på markytan.
- Vilken typ av markstöd, plan och höjd, för alternativa flyghöjder samt vilket överlapp som krävs mellan olika geografiska produktionsområden behöver utredas för att datafångst, geometrisk korrigering och bearbetning skall optimeras.
- Lagring och distribution är frågor som måste optimeras med avseende på bl.a. det modelleringsarbete som sker inom Lantmäteriet, ELIPS. Ett nytt lagringsformat måste formuleras och innehålla möjligheter att lagra såväl regelbundet som oregelbundet höjddata med tillhörande kvalitetsbeskrivningar.
- Motsvarande studier bör även ske för resterande del av GGD för att som vision skapa en framtida bas innehållande  $x$ ,  $y$  och  $H$  i rikets nya referenssystem.
- Inledningsvis, även om produktionen av höjddata kommer att ske utanför Lantmäteriet, bör vi säkerställa Lantmäteriets egen kompetens såväl teoretiskt som praktiskt vad gäller bearbetning, höjdmodellering och kvalitetsbeskrivning av laserdata.

- Tids- och kostnadsbedömningar bör baseras på ett beslut om vilken ambitionsnivå Lantmäteriet anser rimlig för höjdmodellen. Samhällets behov är tveklöst större än Lantmäteriets interna behov.

## **7.2. Förslag till tänkbara studier**

- Dataintegration, samproduktion av GGD och höjdmodellen, bör ske som en pilotstudie för strandlinjen. En medelhöjd kan beräknas utefter sjöars strandlinje, i GGD, och därefter, om metoden fungerar, användas som medelvattenyta i GGD. På så vis kan man undvika alltför stora geometriska konflikter mellan strandlinjen i GGD och höjdmodellen.

## 8. Referenser

### Geometri

Abdullatif, A., Bethel, J., Mikhail, E. M., 2004. Analysis and Accuracy Assessment of Airborne Laserscanning System. Proceedings of ISPRS Congress in Istanbul, Commision 2, 2004.

<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm2/papers/113.pdf>

Behan, A., Maas, H-G and Vosselman, G., 2000. Steps Towards Quality Improvement of Airborne Laser Scanner Data. Proceedings of the 26th Annual Conference of the Remote Sensing Society, Leicester, September 12-14, on CD-ROM, 9 pages.

Burman, H., 2001: Laser strip adjustment for data calibration and verification. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol 34, Part 3A, "Photogrammetric Computer Vision", pp. 67-72, Graz, 2002.

Burman, H., 2000. Calibration and Orientation of Airborne Image and Laser Scanner Data Using GPS and INS. Doktorsavhandling. KTH, Stockholm.

Filin, S., and Vosselman, G., 2004. Adjustment of Airborne Laser Altimetry Strips. Proceedings of ISPRS Congress in Istanbul, Commision 3, Working Group 3, 2004.

<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm3/papers/282.pdf>

Kager, H., 2004. Discrepancies Between Overlapping Laser Scanning Strips- Simultaneous Fitting of Aerial Laser Scanner Strips. Poster: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing XXth Congress, Istanbul; 07-12-2004 - 07-23-2004; in Proceedings, O. Altan (ed.); Vol XXXV, Part B/1 (2004), ISSN 1682-1750; 555 - 560.

Maas, H-G., 2002. Methods for Measuring Height and Planimetry Discrepancies in Airborne Laserscanner Data. PE&RS, Vol. 68, No. 9, September 2002, pp. 933-940.

[http://www.tu-dresden.de/fghgipf/forschung/material/publ2002/Maas\\_PERS2002.pdf](http://www.tu-dresden.de/fghgipf/forschung/material/publ2002/Maas_PERS2002.pdf)

Maas, H-G., 2003. Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data: User requirements and system performance. Proceedings 49. Photogrammetric Week (Ed. Fritsch), Wichmann Verlag, pp. 117-125.

<http://www.tu-dresden.de/fghgipf/forschung/material/publ2003/PhoWo03-Maas.pdf>

Morin, K. and Naser E-S., 2002. Post-mission Adjustment Methods of Airborne Laser Scanning Data. FIG XXII International Congress, Washington, D.C. USA, April 19-26 2002.

[http://www.fig.net/pub/fig\\_2002/Ts5-9/TS5\\_9\\_morin\\_elsheimy.pdf](http://www.fig.net/pub/fig_2002/Ts5-9/TS5_9_morin_elsheimy.pdf)

Rönnholm, P. 2004. The evaluation of the internal quality of laser scanning strips using the interactive orientation method and point clouds. XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 12.-23.7.2004, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXV, pp. 255-261.

Schenk, T., 2001. Modeling and recovering systematic errors in airborne laser scanners. Proceedings of OEEPE workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models.

Schenk, T., Suyoung S., Beatha C., 2001. Accuracy Study of Airborne Laser Scanning Data with Photogrammetry. IAPRS, Vol XXXIV-3W4 Annapolis, MD, 22-24 Oct. 2001.

<http://www.isprs.org/commission3/annapolis/pdf/Schenk.pdf>

Vosselman, G., 2002. On the Estimation of Planimetric Offsets in Laser Altimetry Data. PCV02, Photogrammetric Computer Vision, ISPRS Commission III, Symposium 2002 September 9 - 13, 2002, Graz, Austria.

<http://www.isprs.org/commission3/proceedings/papers/paper007.pdf>

### **Bearbetning - filtrering, klassning...**

Axelsson, P., 1999. Processing of Laser Scanner Data – Algorithms and Applications. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54: 138-147, 1999.

Holmgren, J. 2004. Prediction of tree height, basal area and stem volume in forest stands using airborne laser scanning. Scandinavian Journal of Forest Research 19(6):543-553.

Kraus K., Pfeifer N., 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. ISPRS Journal, Volume 53, 1998, pp. 193 – 203.

Krzystek P. Filtering of Laser Scanning Data in Forest Areas Using Finite Element. Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop “3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data”, Dresden, Germany, 8-10 October 2003.

Morgan, M. and Habib A., 2001. 3D TIN for Automatic Building Extraction from Airborne Laser Scanning Data. Proceedings of the ASPRS, Gateway to the New Millennium, St. Louis, Missouri (23-27 April, 2001).

<http://www.geomatics.ucalgary.ca/~habib/papers/3D%20TIN%20for%20Automatic%20Building%20Extraction%20from%20Airborne%20Laser.pdf>

Næsset, E., T. Gobakken, J. Holmgren, H. Hyyppä, J. Hyyppä, M. Maltamo, M. Nilsson, H. Olsson, Å. Persson, and U. Söderman. 2004. Laser scanning of forest resources: The Nordic experience. Scandinavian Journal of Forest Research 19(6):482-499.

Sithole, G. and G. Vosselman, 2003. Report: ISPRS. Comparison of Filters, Departement of Geodesy, Delft. (29+46 p).

Sithole, G. and Vosselman G., 2003. Comparison of Filtering Algorithms. Workshop on 3D Reconstruction from Airborne Laserscanner and InSAR Data, ISPRS, Dresden, Germany, 8-10 October 2003.

[http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop\\_laserscanning/papers/Sithole\\_ALS\\_DD2003.pdf](http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop_laserscanning/papers/Sithole_ALS_DD2003.pdf)

Sithole, G., 2005. Segmentation and Classification of Airborne Laser Scanner Data. Dissertation. Publications on Geodesy 59, NCG, Delft, The Netherlands, 2005. ISBN 90 6132 292 8.

<http://www.ncg.knaw.nl/publicat/GI59Sithole.htm>

Vosselman, G., and Maas H-G., 2002. Adjustment and Filtering of Raw Laser Altimetry Data. OEEPE meeting, KTH, Stockholm, 2002.

[http://www.tu-dresden.de/fghgipf/forschung/material/publ2001/OEEPE\\_Stockholm.pdf](http://www.tu-dresden.de/fghgipf/forschung/material/publ2001/OEEPE_Stockholm.pdf)

## Höjdmodeller - DEM -, DSM samt kvalitet i dessa

Ahokas, E., Yu, X., Kaartinen, H., Hyyppä, J., Kaasalainen, S., Matikainen, L., Honkavaara, E., Hyyppä, H., Rönnholm, P. and A. Soininen, 2005. Quality of laser scanning. EARSeL Workshop "3-D Remote Sensing", 10. - 11.6.2005, Porto, Portugal.

Al-Bayari, O. A., Al-Hanbali, N. N., Barbarella, M. and Nashwan, A, 2002. Quality Assessment of DTM and Orthophoto Generated by Airborne Laser Scanning System Using Automated Digital Photogrammetry. PCV02, Photogrammetric Computer Vision, ISPRS Commission III, Symposium 2002 September 9 - 13, 2002, Graz, Austria.

<http://www.isprs.org/commission3/proceedings/papers/paper097.pdf>

Axelsson, P. 2000. DEM generation from laserscanner data using adaptive TIN models. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol XXXIII, Part B4, Amsterdam 2000, pp. 110 - 117.

Briese C., 2004. Three-dimensional modelling of breaklines from airborne laser scanner data, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 12-23 July 2004.

Crombaghs, M., Elberink S. O., Brügelmann, R., de Min, E., 2002. Assessing Height Precision of Laser Altimetry DEMs. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol 34, Part 3A, "Photogrammetric Computer Vision", Graz. p. A-85 ff.

Elmqvist, M., 2002. Ground surface estimation from airborne laser scanner data using active shape models, ISPRS Commission III Symposium 2002, Photogrammetric and Computer Vision, 9-13 September 2002, Graz, Austria, pp. 114-118.

Hu, Yong and Vincent Tao, 2005. Hierarchical Recovery of Digital Terrain Models from Single and Multiple Return Lidar Data. PE&RS, Vol. 71, No. 4, April 2005, pp. 425-433.

EuroSDR-Enschede, 2005. Kaartinen H., J. Hyyppä, E. Gülch, G. Vosselman, H. Hyyppä, L. Matikainen, A.D. Hofmann, U. Mäder, Å. Persson, U. Söderman, M. Elmqvist, A. Ruiz, M. Dragoja, D. Flamanc, G. Maillet, T. Kersten, J. Carl, R. Hau, E. Wild, L. Frederiksen, J. Holmgaard, K. Vester, 2005. Accuracy of 3D city models: EuroSDR comparison. In proceedings from Proceedings of the ISPRS Workshop Laser scanning 2005, Enschede, the Netherlands, September 12-14, 2005.

Klang, D., 2005. KRIS-GIS® projekt i Eskilstuna. Kvalitet i höjdmodeller. Lantmäteriet, Gävle.

Klang, D., 2003. Remiss - "En ny svensk höjdmodell" -. Dnr: 505-2003/2417, Lantmäteriet, Gävle.

Kraus Karl, 2006?. Quality Measures for Digital Terrain Models. Photogrammetric Record. (Submitted).

Sohn, G., Dowman, I., 2002. Terrain surface reconstruction by the use of of tetrahedron model with the MDL criterion. International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Information Sciences, 34 (3A) 336-344.

## Visualisering

Persson Å., U. Söderman, J. Töpel, S. Ahlberg, 2005 Visualization and analysis of full-waveform airborne laser scanner data. In proceedings from Proceedings of the ISPRS Workshop Laser scanning 2005, Enschede, the Netherlands, September 12-14, 2005

## Myndigheter

Cory, M.J., and McGill, A., 1999. DTM derivation at Ordnance Survey Ireland: OEEPE Workshop on Automation in Digital Photogrammetric Production, 22-24 June, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Marne la Vallée (France).

[http://phot.epfl.ch/workshop/wks99/5\\_2.html](http://phot.epfl.ch/workshop/wks99/5_2.html)

Kart og geodata, Andersen, Øystein. (1940-2002) version 19.12.2003. Hønefoss, Norge Rapport Statens Kartverk, 111 p, Laserskanning, Kapitel 7. Tillgänglig: 2005-12-09

[http://www.statkart.no/IPS/filestore/Standardisering/Kart\\_og\\_geodata\\_19122003.pdf](http://www.statkart.no/IPS/filestore/Standardisering/Kart_og_geodata_19122003.pdf)

Klang D. och Burman, H., 2005 Airborne Laser Scanning, an efficient revision procedure for the Swedish Digital Elevation Model. Presenterat och publicerat på konferensen "3D Optical Measurements" i Wien, oktober 2005.

Luethy, J., Stengele, R., 2005. 3D Mapping of Switzerland - Challenges and Experiences. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, the Netherlands, September 12-14, 2005.

<http://www.commission3.isprs.org/laserscanning2005/papers/042.pdf>

Oude Elberink, S., Brand, G., Brügelmann, R. 2003. Quality improvement of laser altimetry DEM's. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 34, part 3/W13, proceedings of the ISPRS workshop III/3 "3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data", Dresden 2003, pp. 51-58.; 2003.

Talts, J., 2003. Test av laserscanning för en ny nationell höjddatabas. SKMF, Norrköping.

Warriner, T., Mandlbürger, G., 2005. "Generating a New High Resolution DTM Product from various Data Sources". Talk: Photogrammetric Week, Stuttgart, Deutschland; 09-05-2005 - 09-09-2005, in: "Proceedings of the 50th Photogrammetric Week", G. Mandlbürger (ed.), 2005, 3-87907-421-6; 197 - 206.

Vägverket, Burman, 2004. Rekommendationer vid flygburen laserskanning. Version 1.0, 2004-07-01. Publ. 2004:117. ISSN 1401-9612.

## Fotogrammetri

Baltsavias, E., 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54 (1999) pp. 83-94.

HMK-Fo, 1994. Handbok till mätningsskugörelsen, Fotogrammetri. Lantmäteriet. Gävle.

Yastikli, N., 2004. The Effect of System Calibration on Direct Sensor Orientation. Proceedings of ISPRS Congress in Istanbul, Commission 1, 2004.

<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm1/papers/38.pdf>

Yastikli, N. and Karsten Jacobsen, 2005. Influence of System Calibration on Direct Sensor Orientation. PE&RS Vol. 71, No. 5, May 2005, pp. 629-633.

<http://www.ipi.uni-hannover.de/html/publikationen/2005/paper/yasjac2005.pdf>



## **Standards**

ISO (International Organization for Standardization), 2000, ISO 9000:2000: Quality management systems - Fundamentals and vocabulary. Committee: ISO-TC176, Geneva.

ISO (International Organization for Standardization), 2003a, ISO 19113: Geographic Information - Quality Principles Procedures. Committee: ISO-TC211, Geneva.

ISO (International Organization for Standardization), 2003b, ISO 19113: Geographic Information - Metadata. Committee: ISO-TC211, Geneva.

ISO (International Organization for Standardization), 2004, ISO 19114: Geographic Information - Quality Evaluation Procedures. Committee: ISO-TC211, Geneva.

LAS-format: ASPRS LIDAR Data Exchange Format Standard Version 1.1 March 7, 2005. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), <http://www.lasformat.org>

## Rapporter i geodesi och geografiska informationssystem från Lantmäteriverket

- 2003:4 Engfeldt Andreas, Norin Dan, Nielsen Jan, Holm Warming Louise, Grinde Gro, Johansson Daniel, Lilje Christina, Nilsson Andreas, Wiklund Peter, Kempe Tina, Frisk Anders: The 2002 NKG GNSMART/GPSNet test campaign.
- 2003:8 Vejdeland Sofia & Dahlberg Liselotte: Tolkarhet av GGD-objekt i bilder registrerade av olika sensorer.
- 2003:10 Engfeldt Andreas & Jivall Lotti: Så fungerar GNSS.
- 2003:11 Alm Malin & Munsin Anna-Stina: Traditionell RTK kontra nätverks-RTK – en noggrannhetsjämförelse.
- 2003:12 Jonsson Albert & Nordling Anders: Jämförelse av enkelstations-RTK och nätverks-RTK i Lantmäteriets testnät.
- 2004:1 Peterzon Martin: Distribution of GPS-data via Internet.
- 2004:4 Andersson Maria: Deformationer av fasta geometrier – en metodstudie.
- 2004:7 Valdimarsson Runar Gisli: Interpolationsmetoder för restfelshantering i höjddled vid höjdmätning med GPS.
- 2004:11 Kempe Christina: Väst-RTK – nätverks-RTK i produktionstest i västra Sverige.
- 2004:12 Johansson Daniel: SKAN-RTK – 2 – nätverks-RTK i produktionstest i södra Sverige.
- 2004:13 Wiklund Peter: "Position Stockholm-Mälaren – 2" – nätverks-RTK i produktionstest.
- 2004:16 Andersson Therese & Torngren Julia: Traditionell RTK och nätverks-RTK – en jämförelsestudie.
- 2005:3 Ahrenberg Magnus & Olofsson Andreas: En noggrannhetsjämförelse mellan nätverks-RTK och nätverks-DGPS.
- 2005:4 Jämnäs Lars & Ahlm Linda: Fältstudie av Internet-distribuerad nätverks-RTK.
- 2005:5 Engfeldt Andreas (ed.): Network RTK in northern and central Europe.
- 2005:7 Jivall Lotti, Lidberg Martin, Nørbech Torbjørn, Weber Mette: Processing of the NKG 2003 GPS campaign.
- 2005:8 Eriksson Merja & Hedlund Gunilla: Satellitpositionering med GPS och GPS/GLONASS.
- 2006:2 Norin Dan, Engfeldt Andreas, Johansson Daniel, Lilje Christina: Kortmanual för mätning med SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst.
- 2006:3 Klang Dan, Lantmäteriet, Burman Helén, Digpro AB: En ny svensk höjdmödel. Laserskanning, Testprojekt Falun.