

**KRIS-GIS[®] projekt i Eskilstuna
Kvalitet i höjdmodeller**

Dan Klang

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

Typografi och layout Rainer Hertel

Totalt antal sidor 31

LMV-rapport 2006:4 - ISSN 0280-5731

KRIS-GIS[®] projekt i Eskilstuna.

Kvalitet i höjdmodeller.

Dan Klang

Gävle 2006

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Definitioner	8
3	Problembeskrivning	12
4	Data - höjdmodeller och referensdata	13
5	Metod	16
6	Resultat och diskussioner	17
6.1	Behov av förbättrad höjdmodell	17
6.2	Mätnoggrannhet	18
6.3	Punkttäthetens inverkan på höjdnoggrannheten	19
6.4	Plannoggrannhetens inverkan på höjdnoggrannheten	21
6.5	Simulering av höjdmodellernas totala medelfel	23
6.6	Tillförlitlighet och fullständighet	24
6.7	Lagringsstruktur, interpolation och leveransformat	26
7	Slutsatser	27
8	Kontakt	28
9	Referenser	28

1 Inledning

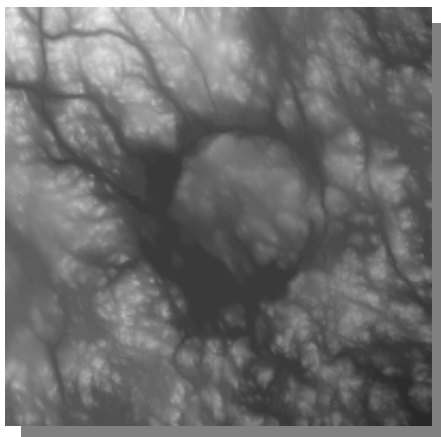
Den rikstäckande digitala höjdmodellen, DEM, har framställts av Lantmäteriet för att effektivisera produktionen av ortofoton. Noggrannhetskraven på Lantmäteriets ortofoton ligger således till grund för den noggrannhet och de metoder som använts vid framställningen av höjdmodellen. Den senaste inventeringen av dess noggrannhet, ca. 2 meters medelfel i flacka områden, genomfördes 2001. Inventeringen ger en tydlig indikation på att 50-meters rutnätet inte är optimalt för bl.a. modellering av vattenflöden i flacka områden vilket ställer högre krav på höjdmodellens noggrannhet.

Ett syfte med detta KRIS-GIS® projekt i Eskilstuna är att påvisa behovet av högkvalitativa höjddata för att, med hög tillförlitlighet, simulera och modellera vattenflöden. Utvecklingen av alternativ teknik för datafångst, exempelvis laserskanning, resulterar i en fortlöpande anpassning och förbättring av program för analys av geografisk information. Inom detta projekt har det skapats förutsättningar för jämförelse mellan olika datafångstmetoder. Data från två alternativa insamlingsmetoder, flygbilder från 800 meter och laserdata, har i denna studie jämförts med den rikstäckande höjdmodellen. Förstasidans bild indikerar stora skillnader mellan den rikstäckande höjdmodellen och höjdmodellen baserad på flygbilder. I de blå- och röd-färgade områdena skiljer sig modellerna mer än 1 meter.

2 Definitioner

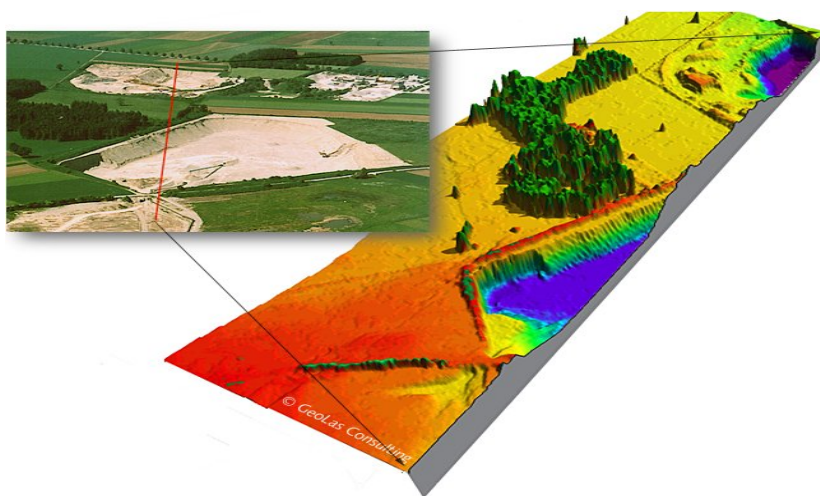
Det förekommer ett antal olika begrepp som beskriver höjddata och dess kvalitet. Tyvärr används begreppen inte entydigt i dagligt bruk. För att inte skapa ytterligare förvirring följer en kortfattad beskrivning av den terminologi som används i detta dokument. Samma definitioner för höjdmodeller användes i remissen "En ny svensk höjdmodell" (Klang, 2003).

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



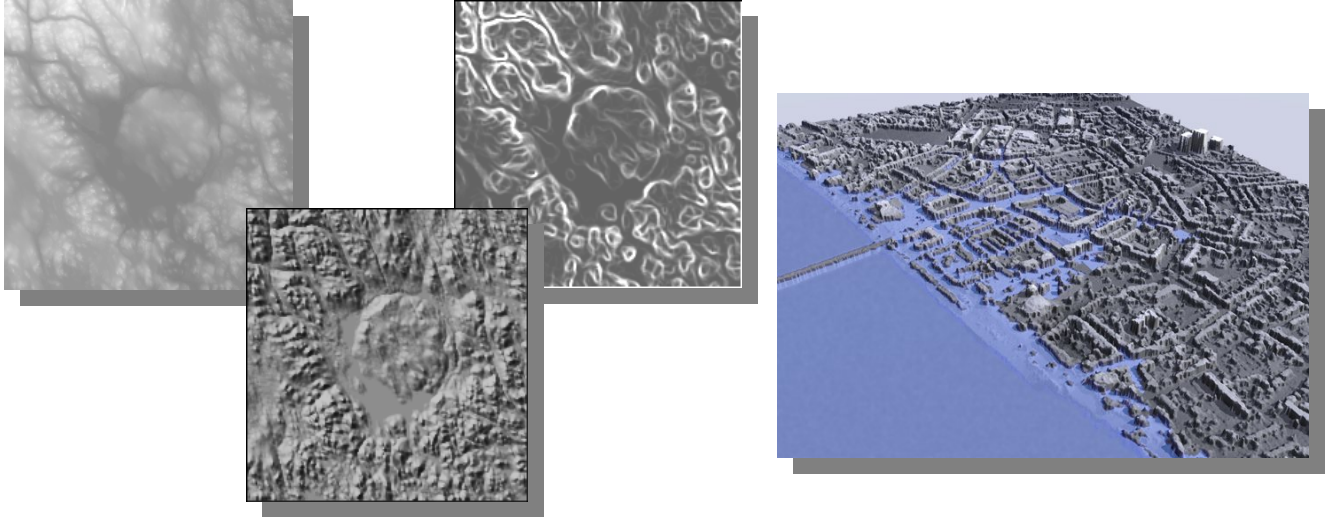
Figur 1: Höjdmodell från Lantmäteriets 50 meters grid. Höjdmodellen som visar Siljansringen är bl.a. framställd genom fotogrammetrisk mätning i stereomodell.

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



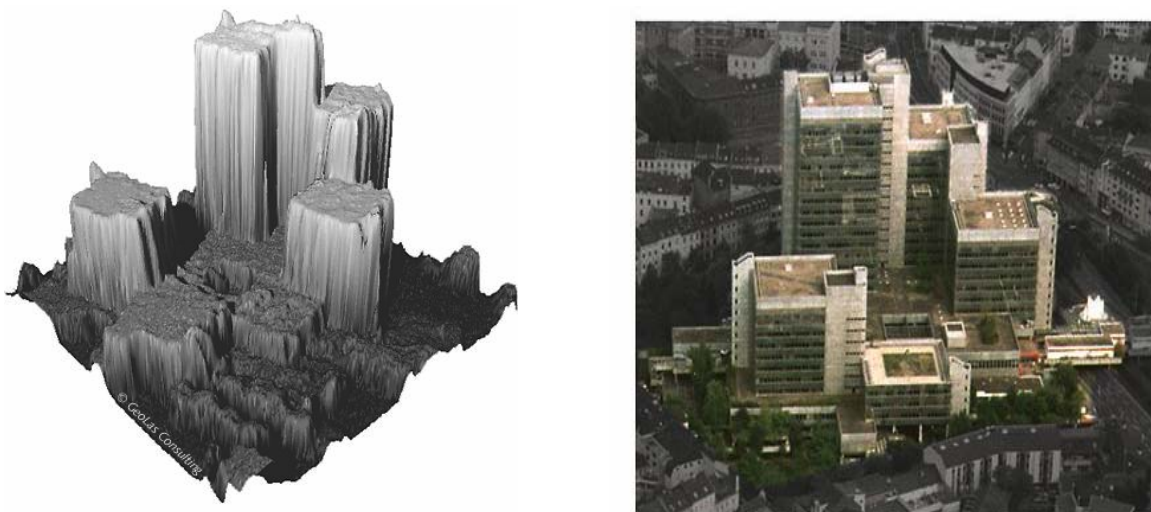
Figur 2: Ytmodell. Denna "top-of-the-world" modell är resultatet av flygburen laserskanning eller automatisk bildmatchning

Digital terrängmodell (DTM) är en digital beskrivning av terrängen, framställd med hjälp av höjddata. Sluttningskartor, avrinningsmodeller och terrängskuggning kan alla, liksom den höjddata som använts för dessa modeller, hänföras till begreppet terrängmodell.



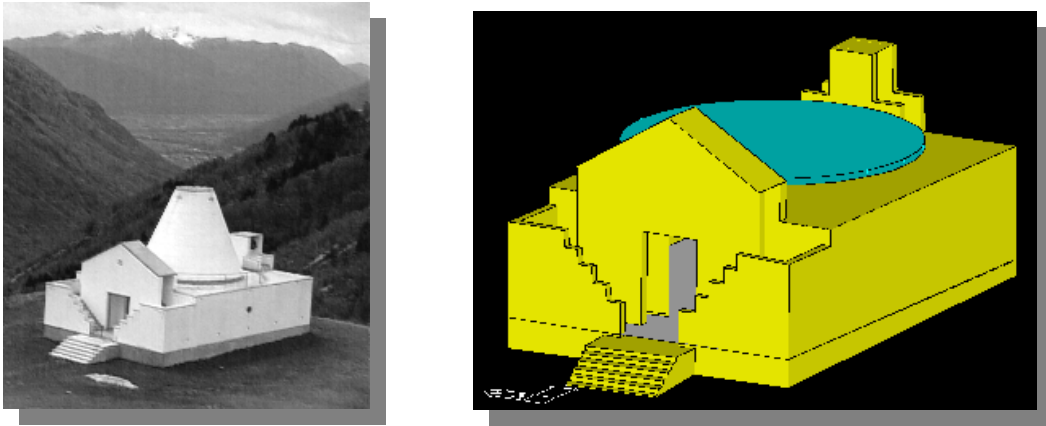
Figur 3: Exempel på terrängmodeller. Från vänster till höger visas en höjddata, terrängskuggning, sluttningskarta och avrinningsmodell.

2.5D För att särskilja höjddata som endast kan lagra ett höjdvärde för respektive plankoordinat, $H_0(x_0, y_0)$, från en fullständig 3D beskrivning, se nedan, har detta begrepp etablerats. 2.5D är inte tillräckligt för lagring av broar och andra liknande objekt där det av olika skäl är önskvärt att även kunna "se" under föremålet. Lagras endast ett höjdvärde för en bro blir resultatet istället en mur.



Figur 4: 2.5D modell. Obearbetat laserdata med endast ett höjdvärde per plankoordinat.

3D Modellen medger insamling och lagring av fler än ett höjdvärde för respektive plankoordinat, $H_0(x_0,y_0)$ $H_1(x_0,y_0)$ $H_n(x_0,y_0)$. En sådan datastruktur kan hantera möjlighet för vatten att rinna under broar, vilket är ett krav vid bland annat bedömning av riskområden för översvämningar.



Figur 5: 3D modell. Flera höjdvärden per plankoordinat skapar förutsättning för lagring i 3 dimensioner.

Nedan beskrivs de statistiska mått som används, i rapporten, för att beskriva avvikelser mellan de olika dataseten. Medelvärde är ett *lägesmått*. Standardavvikelse, varians och RMS är spridningen kring ett väntevärde, *spridningsmått*. Medelvärdet är väntevärdet för standardavvikelse och varians. Väntevärdet är 0 vid bestämning av RMS.

Medelvärde (medelavvikelse)
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_j \quad (1)$$

Standardavvikelse
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (2)$$

Varians
$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 \quad (3)$$

Root Mean Square (RMS)
$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_{j0} - x_{j1})^2}{n}} \quad (4)$$

där

n : antalet mätningar

x_j : mätning nummer j

$(x_{j0} - x_{j1})$: differens mellan mätningarna i två höjdmodeller på samma punkt (x_j, y_j)

I de fall beräknade värden för RMS och standardavvikelse skiljer sig väsentligt, är standardavvikelse alltid mindre än RMS, beror detta på systematiska avvikelser i mätningarna. En indikation på storleken av de systematiska avvikelserna finner man i dessa fall i medelvärdet.

Begreppet medelfel används ofta synonymt med såväl standardavvikelse som RMS. Avviker medelvärdet endast lite från 0, d.v.s. standardavvikelse = RMS är detta en rimlig genrealisering. I annat fall är RMS en bättre formulering vid jämförelse av två dataset där endast en differens beräknas per planposition samt att systematiska fel även inkluderas vid bestämning av avvikelsernas storlek.

Medelfelens fortplantningslag

Om felen är slumpmässiga och oberoende av varandra gäller följande

$$\sigma_{tot}^2 = a_1^2 \cdot \sigma_1^2 + a_2^2 \cdot \sigma_2^2 + \dots + a_n^2 \cdot \sigma_n^2 \quad (5)$$

I kapitel 6.2 visas hur medelfelens fortplantningslag tillämpas på fotogrammetriska mätningar (HMK-Fotogrammetri, 1993).

Referensdata: Som tumregel, vid användning av referensdata för utvärdering av ett dataset, gäller att medelfelet i referensdata skall vara 1/3, eller lägre, än medelfelet hos de data som skall utvärderas.

Kvalitet delas ofta in i följande tre termer.

Noggrannhet: beskrivs vanligtvis som medelfel i plan (x, y) och höjd (H). Noggrannheten påverkas bl.a. av datafångstmetod, flyghöjd, markstöd, avstånd mellan mätningarna (punkter/m²), interpolations- och bearbetningsmetod.

Tillförlitlighet: Detta begrepp är ofta använt vid tolkning. Har ett "markslag" fått rätt tillhörighet eller har det felaktigt klassificerats som hygge i stället för öppen mark? Frågeställningen kan te sig irrelevant i detta sammanhang, så är dock inte fallet. Markfiltrering av laserdata baseras på algoritmer som skall exkludera objekt med stora lutningar, oftast byggnader, från markytan. I de fall dessa stora lutningar är naturliga objekt eller brofästen skall de med stor sannolikhet inkluderas i markytan varför begreppet tillförlitlighet är användbart även vid bedömning av höjdmodeller. Fordon, i rörelse eller stillastående, skall givetvis exkluderas de data som representerar markytan. Om så inte är fallet skall även detta beskrivas som minskad tillförlitlighet.

Fullständighet: Vid traditionell kartläggning används detta begrepp för att beskriva hur många objekt av en viss kategori som karterats i förhållande till det verkliga antalet. För höjdmodeller kan detta exemplifieras med diken som påtagligt påverkar flödet i ett område.

3 Problembeskrivning

De krav som ställts vid upphandlingen och som de utvalda organisationerna haft som uppgift att tillgodose vid produktionen av höjdmodellerna sammanfattas i

- Koordinatsystem: RT90/RH70
- Noggrannhet: plan < 0.5 m, höjd < 0.15 m
- FoU-syfte att:
 - studera vattenflöden
 - noggrannhet, mätning vs DEM
 - ytterligare användning

Dessutom har för de grupper som fått i uppgift att analysera och bedöma användbarheten av de framställda höjdmodellerna ställts inför följande frågeställningar

- Är produkten, tjänsten, rätt utformad?
- Är innehållet användbart för min verksamhet?
- Är det "rätt" kvalitet för mina beslut?
- Kan informationen förstås och användas på lokal, regional och nationell nivå?
- Kan resultaten vara vägledande för hur en nationell DEM skall tas fram?
-

Baserat på dessa frågeställningar har följande problembeskrivning formulerats och analyserats i denna rapport.

1. Kvalitetskontroll av de två höjdmodellerna. Syftet med utvärdering av höjdmodellernas kvalitet är att öka förståelsen för hur datafångstmetoder, bearbetningsteknik och definitioner påverkar en höjdmodells användbarhet. Genom studier av mätnoggrannhet, punkttäthet (antalet mätningar/m²) och noggrannhet i planläge ges möjlighet att beskriva dessa parametrars inverkan på noggrannheten i höjdmodellerna.

2. Resultatet från punkt 1 bör sedan ligga till grund för hur framtida upphandlingar av höjdmodeller kan formuleras för att skapa entydighet och därmed begränsa missförstånd och heterogena produkter.

4 Data – höjddata och referensdata

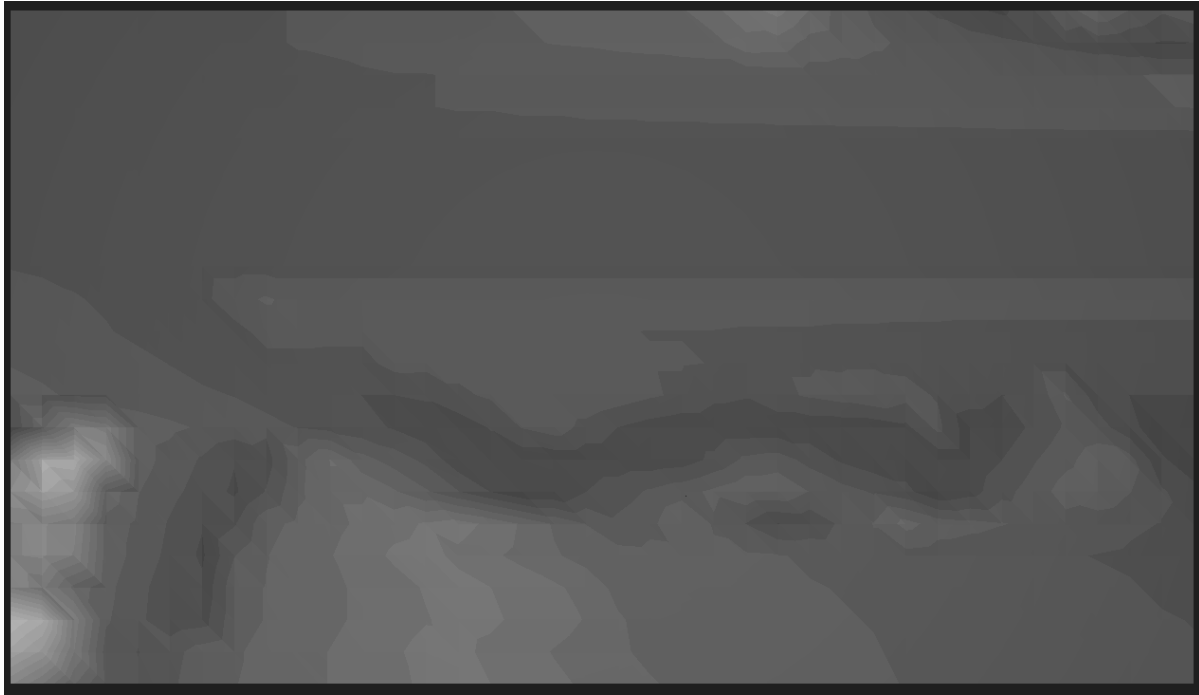
TVå höjddata har producerats, av olika organisationer och dessutom baserad på olika teknik och bearbetningsmetoder. Dessutom har, i ett inledande skede, Lantmäteriets rikstäckande höjddatabas med 50-meters avstånd mellan mätpunkterna använts i analysen. En sammanställning av den senaste utvärderingen av Lantmäteriets höjddata (Talts, 2001) återfinns i bilaga 1.

I tabell 1 redovisas en sammanställning av de data som tillgängliggjorts och även använts i denna studie. Därefter redovisas i figur 6-8 ett utsnitt ur de tre dataseten, figur 6 redovisar en visualisering av den rikstäckande höjddata. Området representerar "minsta gemensamma nämnare", d.v.s det område där data från alla tre dataseten finns tillgängligt. Det är även i detta område analyserna skett.

För modelleringar och analyser av nämnda höjddata har programmen TerraScan och TerraModeler (Terrasolid 1998-2003) använts.

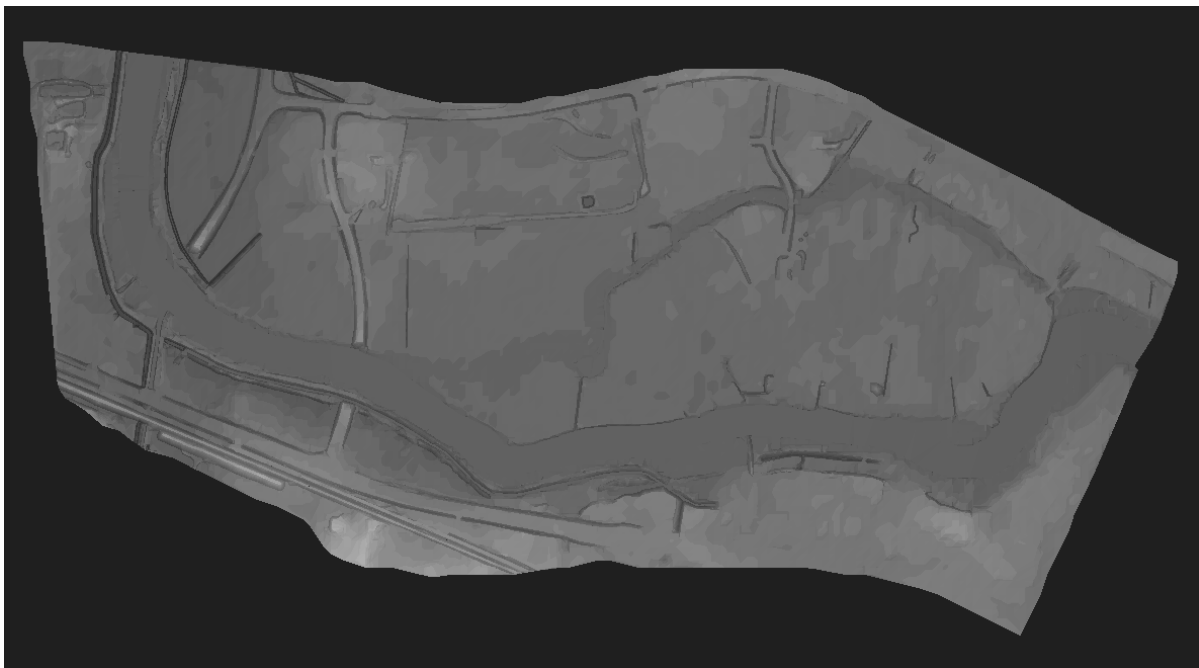
Tabell 1: Sammanställning av de data som används i studien. Höjddata vars medelfel kompletterats med ett "?" kommer att analyseras i denna kvalitetsstudie.

Data	Rutnät (m)	Medelfel (cm)	Antal punkter	Datum	Anm.
<i>Sverige DEM</i>	50	~200	836	-> 2001	Utsnitt Bild
<i>Laser, referens</i>		2	91		RTK, GPS
<i>Laser, skanning</i>		15 ?	4600000	2004-04-13	
<i>Laser, skanning</i>		15 ?	265593		Utsnitt Bild
<i>Bild, referens</i>		5	29		Stöd
<i>Bild, / färg fotogram.</i>		15 ?	9045+7042	2002-04-25	



Figur 6: Höjdmodell från Lantmäteriets 50 meters grid. Höjdmodellen är framställd med ett antal skilda metoder bl.a. fotogrammetrisk mätning i stereomodell, digitalisering av höjdkurvor och profilmätningar lagrade på glasskivor.

Flygbilderna har fotograferats av dåvarande Metrias bildenhet från 800 meters flyghöjd. Höjdmodellen som framställts från bilderna redovisas i figur 7. Som underlag för blocktriangulering, georeferering, av bilderna har 29 stödpunkter - signaler - mätts in.



Figur 7: Höjdmodell från flygbilder, framställd genom fotogrammetrisk mätning i stereomodell.

Laserdata, figur 8, har skannats av TopEye system S/N 4 från 300 meters flyghöjd. De 91 referenspunkter som använts för utvärdering av laserdata har mätts av Eskilstuna kommun.



Figur 8: Höjdmodell framställd från laserdata. Modellen har samma utbredning som data från den höjdmodell som framställts med hjälp av flygbilder.

5 Metod

Som beskrivits i avsnittet Problembeskrivning skall de två höjdmodellernas kvalitet och användbarhet bedömas. De kvalitetsbegrepp och noggrannhetsmått som tidigare beskrivits kommer att användas dels för att beskriva effekten av degenerering av data dels för inventering av höjdmodellernas tillförlitlighet och fullständighet.

Nedanstående sju punkter sammanfattar de metoder som använts för att skapa underlag för den slutliga analysen av dataseten.

1. Visa behovet av en förbättrad höjdmodell, gentemot den svenska höjddatabasen, för flödessimuleringar.

Inledningsvis har den rikstäckande höjdmodellen jämförts med de två höjdmodeller som skall utvärderas. Syftet med detta moment är att tydliggöra behovet av noggrannare höjddata för flödesmodellering i flacka områden likt det i Eskilstuna.

Följande moment berör endast de två "nya" höjdmodellerna.

2. Mätnoggrannhet för insamlingsmetoderna.

3. Hur påverkas höjdmodellens noggrannhet av reducerad punkttäthet.

Inledningsvis skapas en modell, Triangulated Irregular Network (TIN) som binder ihop de mätta punkterna till en heltäckande yta - markytan. Från denna TIN beräknas sedan ett antal höjdmodeller med olika markupplösning, gridstorlek 0.5 meter - 10.0 meter. Genom att jämföra dessa höjdmodeller med ursprungligt höjddata skapas möjlighet att bestämma hur mycket noggrannheten försämras vid lägre punkttäthet. Medelfel beräknas och redovisas för olika markupplösningar.

4. Hur påverkas höjdmodellens noggrannhet av ett systematiskt fel i planläge.

Simuleringen sker genom ett tillskott till de plankoordinater som beskriver de ursprungliga mätningarnas lägen. Avvikelseornas storlek redovisas grafiskt och som tabellerade medelfel.

5. Höjdmodellernas noggrannhet bedöms genom att studera resultaten från de degenererade höjdmodellerna, producerade i punkt 3 och 4 i kombination med den mätnoggrannhet som beskrivs i kapitel 6.2.

6. Tillförlitlighet och fullständighet bedöms genom jämförelse mellan höjdmodellerna och, vid behov, med befintligt kartmaterial.

7. Lagringsstruktur och interpolationsmetod påverkar i väsentlig grad såväl tillgänglighet, användbarhet som noggrannhet. Lagring och alternativa interpolationsmetoder diskuteras i kapitel 6.7.

6 Resultat och diskussioner

Fortsättningsvis kommer följande begrepp att användas för att förenkla formuleringarna och samtidigt skapa en entydighet för läsaren.

SverigeDEM: Den rikstäckande höjdmodellen med 50 meters markupplösning, grid.

BildReferens: De stödpunkter som använts vid blocktriangulering av flygbilderna.

LaserReferens: Oberoende mätningar, geodetiska metoder, för verifiering av LaserDEM.

BildMät: De gridpunkter och brytlinjer som mätts med fotogrammetriska metoder.

LaserMät: De lasermätningar som klassificerats som mark.

BildDEM: Höjdmodeller med markupplösning, 0.5m – 50m, producerade från BildMät.

LaserDEM: Höjdmodeller med markupplösning, 0.5m – 50m, producerade från LaserMät.

6.1 Behov av förbättrad höjdmodell

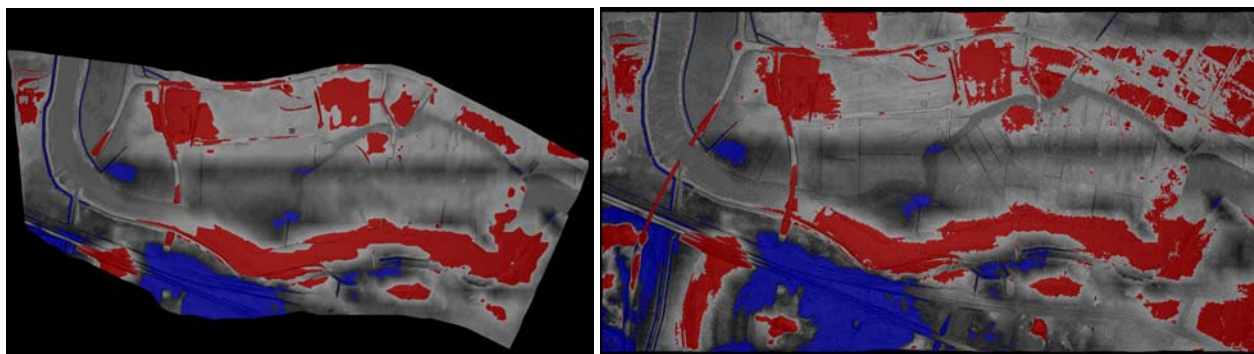
I figur 9 och 10 redovisas visualiseringar av differenserna mellan SverigeDEM och BildDEM respektive SverigeDEM och LaserDEM. Färglagda områden, blått och rött, representerar avvikelser större än 1 meter.

Rött: $\text{Höjd} > \text{SverigeDEM} + 1\text{m}$

Blått: $\text{Höjd} < \text{SverigeDEM} - 1\text{m}$

där Höjd beskriver höjden i BildDEM och LaserDEM för respektive jämförelse.

Gråa nyanser representerar differenser mellan -1 och +1 där de mörkt grå ligger nära -1.



Figur 9 och 10: Differensbilder. Till vänster visas skillnad mellan SverigeDEM och BildDEM, till höger skillnaden mellan SverigeDEM och LaserDEM. Färglagda områden, blått och rött, representerar avvikelser mellan höjdmodellerna större än 1 meter. I röda områden är BildDEM och LaserDEM högre än i SverigeDEM.

Observera att det mörka horisontella stråket i mitten av bilderna inte är ett skrivarfel utan sannolikt en bieffekt av en "skarv" mellan två modeller, kartblad, i SverigeDEM.

Likheten mellan differensbilderna, finns i större skala i bilaga 3, i figur 9 och figur 10 är påtaglig. I tabell 2 redovisas dessa likheter även statistiskt i form av medelavvikelse, standardavvikelse och RMS.

Tabell 2: Sammanställning av avvikelser mellan LaserMät respektive BildMät och SverigeDEM.

Referens	DEM	Medelavvikelse	StdAv	RMS
<i>BildMät</i>	<i>SverigeDEM</i>	-0.223	1.022	1.046
<i>BildReferens</i>	<i>SverigeDEM</i>	-0.152	1.045	1.052
<i>LaserMät</i>	<i>SverigeDEM</i>	-0.167	1.218	1.230
<i>LaserReferens</i>	<i>SverigeDEM</i>	-1.130	1.557	1.917

Medelavvikelsen för alla data, referens såväl som höjddata, visar att SverigeDEM ligger under övriga modeller. Referensdata för utvärdering av laserdata ligger väsentligt högre än övriga "referensdata". Punkterna i dessa referensdata är genomgående placerade på hårdgjorda ytor, företrädesvis vägbanor. Vägbanorna finns inte representerade i den glesa SverigeDEM vilket naturligt leder till att punkterna på de upphöjda vägbanorna ligger påtagligt över den glesa modellens höjd för motsvarande position.

Övriga referenser redovisar endast en liten systematisk avvikelse, sannolikt beror det även i dessa fall på att bl.a. vägnätet finns representerat i BildMät och LaserMät och inte i SverigeDEM.

6.2 Mätnoggrannhet

Mätnoggrannheten är indirekt formulerad genom metodval och flyghöjd vid datafångsten. För fotogrammetrisk mätning används oftast HMKS beskrivning som generellt noggrannhetsmått. Beräkningen gäller signalerade objekt. "För relativt väldefinierade punkter, såsom takhörn, kan medelfelet förväntas bli 1.5-2.5 gånger högre än det som beräknats för signalerade objekt. För mindre väldefinierade objekt kan medelfelet bli upp till 5 gånger högre. I detta projekt där markytan mäts, har medelfelet för signalerade punkter multiplicerats med faktorn 2.5.

$$s_h^2 = a_h^2 + \left(a_i \cdot \frac{H}{(1-\ddot{o}) \cdot s} \right)^2 \quad (6)$$

där

s_h = förväntat medelfel i höjd

a_h = felbidrag i höjd från centrerings och inmätning av signalerade geostödpunkter. För höjdcentrering gäller ca 0.01m

a_i = felbidrag från flygfotografering, bildframställning, orientering av och mätning i stereomodellen. För analytiskt instrument gäller 0.012 mm.

H = flyghöjd = 800 meter.

\ddot{o} = övertäckning mellan bilder i flygstråk, uttryckt som andel av bildsidan = 60%.

s = bildsidan i mm = 230 mm.

$$s_h^2 = 0.01^2 + (0.012 \cdot \frac{800}{(1-0.60) \cdot 0.23})^2 \Rightarrow s_h = 0.105 \text{ m} \quad (7)$$

Laserdata har utvärderats med oberoende mätningar, med hög noggrannhet. Resultatet 7.7 cm över ett stort område påvisar inte något påtagligt inslag av systematiska fel. I medelfelet finns dock en komponent som kan relateras till den interpolation som utförts. Reduceras det faktiska mätfelet för hårdgjorda ytor till 5 cm kan motsvarande antagande som de för bildmätningarna användas. Markslagsvariationerna antas således påverka laserdata i samma omfattning som för bilddata, d.v.s. med en faktor 2.5.

Tabell 3: Tabellen visar skattad höjdnoggrannhet för de två datafångstmetoderna.

Data	Flyghöjd (m)	$\sigma_{mät} = \text{RMS (m)}$	Metod
BildMät	800	$2.5 \cdot 0.10 = 0.25$	HMK
LaserMät	300	$2.5 \cdot 0.05 = 0.125$	Referens

6.3 Punkttäthetens inverkan på höjdnoggrannheten

I viss mån kan punkttätheten påverkas vid lägre flyghöjder med laserskanning. Man måste dock bestämma detta innan flygning för att uppnå optimalt resultat vid efterbearbetning och höjdmodellering. Vid mätning i stereomodell är det möjligt att vid mättillfället förtäta mätningarna i de områden som så kräver för att, alla för höjdmodellen, relevanta objekt och terrängvariationer skall kunna redovisas.

I diagram 1 redovisas de negativa effekter som uppstår vid försämrade markupplösning. Diagrammet visar differensen mellan originalpunkterna från laserskanningen och bildmätning jämfört med höjdmodeller framställda från dessa data. I bilaga 2 redovisas, i tabellform, de differenser som presenteras i diagrammet. I båda fallen har, än så länge, förutsatts att originalmätningarna är felfria.

Viktigt att notera vid analys av diagrammet är

1. Skälet att laserdata försämrats signifikant mer än bilddata är att en stor del av de fina strukturer som samlats in lätt går förlorad vid den utglesning som skett för olika markupplösningar. Att differensen mellan bildmätningarna och de höjdmodeller som framställts därur inte påvisar motsvarande degenerering beror således på att man inte i samma omfattning mätt de fina strukturer som redovisas i laserdata. Detta fenomen har redan tydliggjorts i figurerna 7 och 8.
2. Vid en viss grad av försämring tenderar båda differenskurvorna att plana ut och dessutom bli parallella vilket tydligt visar att utglesningen får allt större inverkan på noggrannheten. Rimligt är också att anta att dessa linjer kommer att sammanfalla om man lyckas bestämma medelfelet i de ursprungliga mätningarna. Ytterligare resonemang kring detta följer under rubrik 6.5 "Simulering av höjdmodellernas totala medelfel".

Punkttäthetens inverkan på höjdnoggrannheten

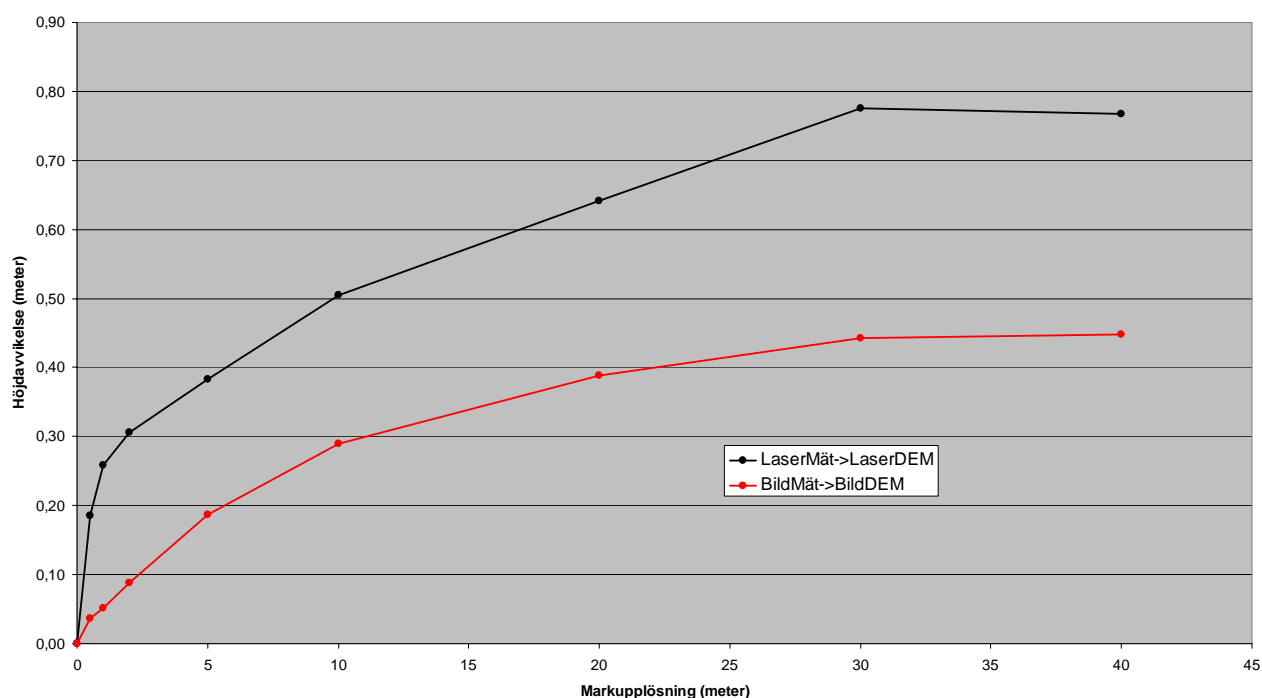


Diagram 1: I diagrammet redovisas hur noggrannheten i LaserDEM och BildDEM försämras vid lägre markupplösning.

Diagram 1 visar tydligt att interpolation till ett regelbundet rutnät påtagligt försämrar noggrannheten gentemot de ursprungliga mätningarna. Betrakta den i diagrammet redovisade linjen som visar avvikelsen mellan LaserMät och LaserDEM. Redan vid 2 meters markupplösning är avvikelsen ca 30 cm. Avvikelsen beror dels på interpolationsmetodernas bieffekter men framförallt på att data inte har tillräcklig punkttäthet. Problemet undviks effektivast genom "tillräckligt" hög punkttäthet. I detta fall blir avståndet till de punkter som används vid interpolation av ett nytt plan- och höjdvärde så små att det inte menligt påverkar resultatet. Dessutom skapas förutsättningar för att registrera alla de fina strukturer som krävs för den önskade höjdnoggrannheten.

Viktigt att notera är att detta är en simulering. Skall man säkerställa hur mycket höjdmodellen försämras måste noggranna mätningar ske i detta område. Förslagsvis kan detta ske med terrester laserskanning. Terrestert mätta data skulle sedan kunna användas för noggranna studier av olika interpolationsmetoders bieffekter men framförallt för studier av hur stor punkttäthet som krävs i olika terrängtyper. Det krävs således mätningar i olika terrängtyper, med olika frekventa höjdvariationer, eftersom egenskaperna skiljer sig påtagligt bl.a. mellan urbana områden och flacka åkerlandskap.

Resultatet från en sådan studie kan sedan användas dels för tydligare upphandlingsformuleringar dels för att öka kunskapen om var "svagheter" i höjdmodellerna är belägna. I urbana områden är det tydligt att de största avvikelserna är belägna vid skarpa skärningar, stora gradienter. Detta förklarar även att regelbundna rutnät ofta förtäts med brytlinjer för bl.a. diken och vägbankar vid fotogrammetrisk mätning.

I tabell 4 visas en sammanställning av olika markupplösning, gridstorlek, inom det aktuella området. Punkttätheten i de två dataset som utvärderas i denna studie redovisas också för att möjliggöra en jämförelse.

Tabell 4: Tabellen visar punkttätheten för laser och bilddata samt vid olika gridstorlek.

Data	Antal punkter	Areal (m ²)	Punkter/m ²
<i>LaserMät</i>	265593	1466342	0.1811
<i>BildMät</i>	16087	1038539	0.0155
Grid 0.5 m	5865144	1466342	4.0
Grid 1.0 m	1465949	1466342	1.0
Grid 2.0 m	366093	1466342	0,25
Grid 5.0 m	58453	1466342	0.04
Grid 10.0 m	14525	1466342	0.01
Grid 20.0 m	3650	1466342	0.003

Enligt tabell 4 motsvarar ett genomsnitt i LaserMät en punkttäthet i ett regelbundet grid med ca 2.35 m markupplösning. För Bilddata är motsvarande punkttäthet ca 8.0 meter.

Viktigt att notera är att punkttätheten i LaserMät och BildMät är medelvärden över hela området. I båda fallen har förtätning skett i de områden som så kräver. Detta får till följd att underlaget för en noggrann interpolation förbättras och att även noggrannheten i höjdmodellen ökar. I den fortsatta analysen har, för att kompensera de beräknade punktmedelvärdena, en punkttäthet för LaserMät på 0.4 punkter/m² och för BildMät 0.04 punkter/m² använts. Dessa punkttätheter motsvarar gridstorlek 1.6 m respektive 5.0 m (i vissa delar av LaserMät är punkttätheten ca 1 punkter/m² => medelfel = 0.25 m). Avläses motsvarande medelfel i den graf som beskriver noggrannaste data i diagram 1, LaserMät->LaserDEM, för dessa gridstorlekar erhålles 0.28 m respektive 0.38 m för LaserDEM och BildDEM.

6.4 Plannoggrannhetens inverkan på höjdnoggrannheten

I detta kapitel utvärderas effekterna på höjdnoggrannheten relaterade till bristande plannoggrannhet vid projektets efterfrågade tolerans 0.50 m. Förutsatt att detta fel är av systematisk karaktär har höjdmodellen förskjutits i 4 riktningar för att simulera och utvärdera inverkan på höjdnoggrannheten. I tabell 5 redovisas resultatet av denna test. Resultatet påverkas med stor sannolikhet även i detta fall av punkttäthet och interpolation vid bestämning av de förskjutna laserpunkternas höjdvärde i originaldata.

Tabell 5: Tabellen visar hur höjdnoggrannheten påverkas av ett planlägesfel.

Data + skift	Referens	dH (cm)
LaserMät +0.5m Norr	LaserMät	31.8
LaserMät -0.5m Norr	LaserMät	31.3
LaserMät +0.5m Öst	LaserMät	31.0
LaserMät -0.5m Öst	LaserMät	31.0

Storleken av interpolationens påverkan bedöms från mätningarna i kapitel 6.2, se bilaga 2, till 0.186 m. Ett planlägesfel, 0.5 meter, ger med dessa antaganden ett tillskott till höjdmodellens totala medelfel enligt (6).

Beräkning av det medelfel i höjd som ett planlägesfel medför sker med hjälp av (5).

$$\sigma_{dH}^2 = (\sigma_{int}^2 + \sigma_{iät}^2) + \sigma_{f(dx,dy)}^2 \quad (6)$$

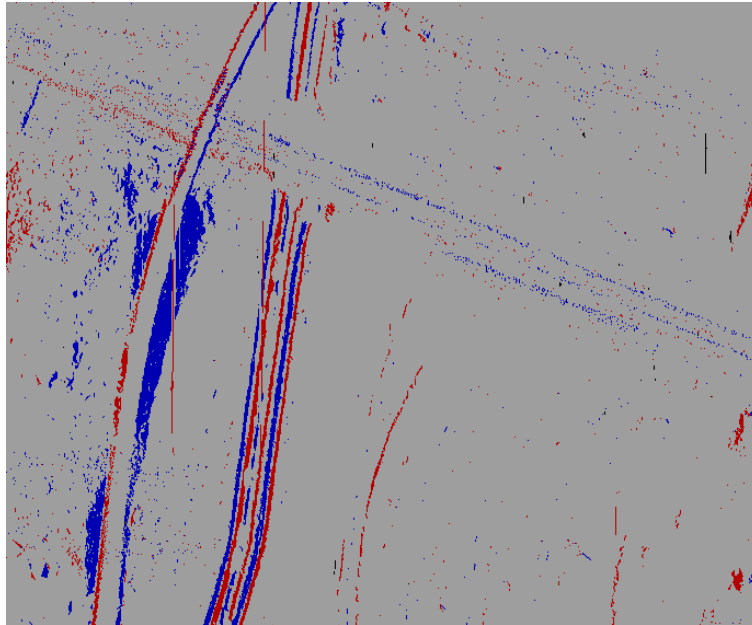
$$\sigma_{f(dx,dy)}^2 = \sigma_{dH}^2 - (\sigma_{int}^2 + \sigma_{iät}^2) = 0.31^2 - 0.186^2 \Rightarrow \sigma_{f(dx,dy)} = 0.25 \text{ m}$$

σ_{dH}^2 : variansen i höjd bestämd genom förskjutning i fyra riktningar enligt tabell 5.

$(\sigma_{int}^2 + \sigma_{iät}^2)$: Den i kapitel 6.2 bestämda inverkan, variansen, av punkttäthet och interpolation.

$\sigma_{f(dx,dy)}^2$: höjdfelet, variansen = medelfelet², av förskjutningen reducerad med avseende på $(\sigma_{int}^2 + \sigma_{iät}^2)$.

Lokalisering av de effekter som ett systematiskt fel av denna karaktär har på höjdmodellen visas i figur 11. Förskjutningen har skett i öst-västlig riktning vilket tydligt syns på de strukturer som framträder i figuren. Som tidigare redovisas områden i referensdata som ligger ovanför mätdata med röd färg. Referensdata ligger således väster om mätdata. De strukturer som tydligt framträder är vad som ofta benämns "man-made-objects" vilka i detta fall representeras av vägbankar.



Figur 11: Effekten av systematiska planlägesfel på höjdmodellen. Förskjutning av mätdata (referensdata), österut med 0.5m, relativt dess ursprungliga läge ger störst bieffekter där stora gradienter kan lokaliseras i höjdmodellen.

Eftersom detta systematiska fel påverkat hela höjdmodellens planläge har det effekt endast vid jämförelse med andra datakällor. Så är dock ofta fallet vid analys i GIS-program vilket är skälet till att det redovisats under en separat rubrik.

6.5 Simulering av höjdmodellernas totala medelfel

Genom summering av de negativa effekter som beskrivits i kapitel 6.3 och 6.4 är det möjligt att bedöma vilken typ av fel som har störst negativ effekt på höjdmodellernas noggrannhet.

I (7) summeras varianserna enligt (5) för att få en uppfattning om höjdmodellernas "absoluta" noggrannhet. Det finns ytterligare komponenter som menligt påverkar noggrannheten i höjddata och som inte diskuterats tidigare i denna studie. Bland dessa kan nämnas effekten av markslag såsom skog och åkermark. Hur mycket högre är exempelvis en vattenmättad åker jämfört med dess höjd under torrperiod? Eller hur mycket påverkas höjdmätningar av olika vegetationstyper och när på säsongen är det bäst förutsättningar för mätning och framställning av en höjdmodell?

Det finns således ett flertal komponenter som inte ingår i nedanstående summering

$$\sigma_{tot}^2 = \sigma_{mät}^2 + \sigma_{tät}^2 + \sigma_{int}^2 + \sigma_{f(dx,dy)}^2 + \dots \quad (7)$$

I tabell 6 redovisas summan av medelfel för 3 typfall för LaserDEM och för två tänkta scenarios för BildDEM. Min, Medel och Max är beräknade för klargöra effekten av de olika felens inverkan på den totala noggrannheten.

Eftersom inget av de medelfel som beräknats i kapitel 6.2 och 6.3 verifierats och mätningarnas noggrannhet endast bedömts på plana hårdgjorda ytor får resultaten i tabellen endast ses som en indikation på den totala noggrannheten. Den komponent som

har störst inverkan på resultatet är utan tvekan tätheten på mätningarna. Om dessa är täta nog behövs i stort sett ingen interpolation varför även denna bieffekt minimeras med många mätningar.

Tabell 6: Tabellen visar hur höjdnoggrannheten påverkas av punkttätheten.

Höjdmodell	$\sqrt{\sigma_{mät}^2}$	$\sqrt{\sigma_{tät}^2 + \sigma_{int}^2}$	$\sqrt{\sigma_{f(dx,dy)}^2}$	σ_{tot}	Anm.
LaserDEM	0,125	0,25	0,00	0,28	Min
LaserDEM	0,125	0,28	0,10	0,32	Medel
LaserDEM	0,125	0,32	0,25	0,42	Max
BildDEM	0,25	0,38	0,10	0,50	Medel
BildDEM	0,25	0,48	0,25	0,60	Max

Jämförs dessa fel med det efterfrågade medelfelet, < 0.15 meter i höjdmodellen, inses snart att ingen av höjdmodellerna uppfyller kraven. Vidare diskussion kring detta återfinns i kapitel 7 Slutsatser.

6.6 Tillförlitlighet och fullständighet

I detta kapitel diskuteras begreppen tillförlitlighet och fullständighet och hur det är möjligt att påverka den inverkan de har på höjdmodellens kvalitet.

Tillförlitligheten, andelen korrekt tolkning (klassning). I figur 9 och 10 skiljer sig klassningen (tolkningen) av vissa objekt. För att belysa influensen av denna parameter är det nödvändigt att tydliggöra vad som skall inkluderas i höjdmodellen.

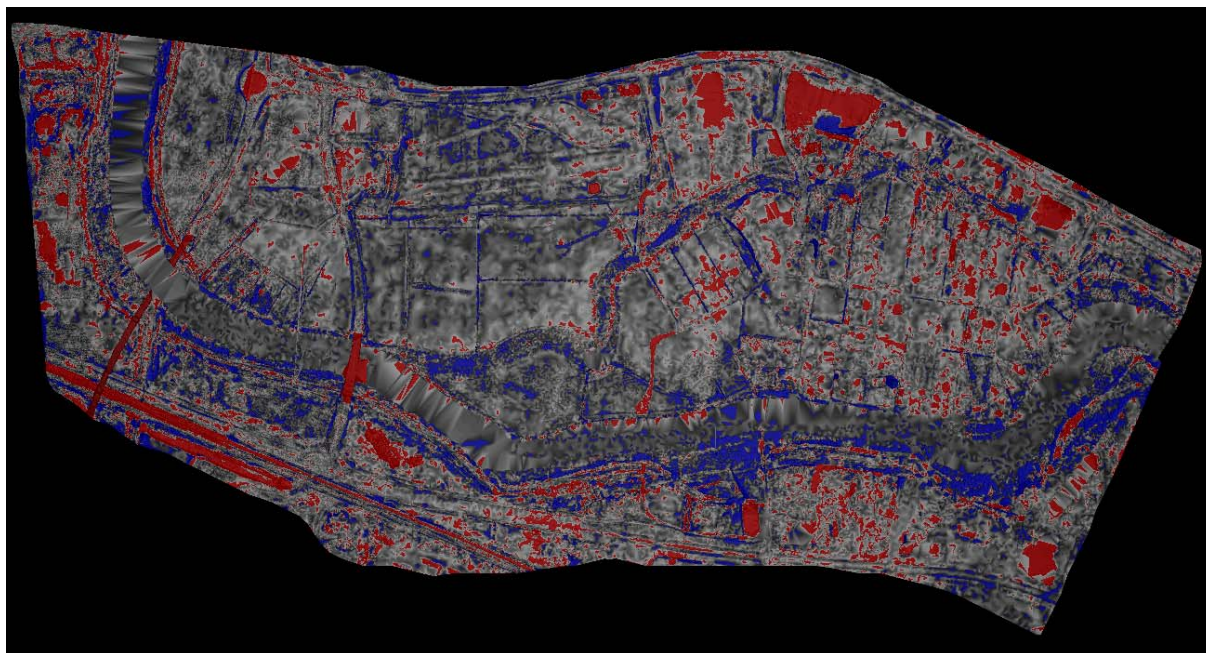
Höjdmodellens definition - markytan - innebär att den ytmodell, DSM, som registrerats genom laserskanning måste bearbetas för att reducera den till en DEM. Momentet innebär att följande objekt kräver separat hantering. Vid fotogrammetrisk mätning styrs insamlingen av en erfaren "tolkare". Är definitionen av höjdmodellens innehåll entydig är också feltolkningarna minimala med denna insamlingsmetod.

Figur 12, en differensbild mellan LaserDEM och BildDEM visar skillnader som till viss del beror på begreppen tillförlitlighet och fullständighet, till viss del på noggrannhet i mätningarna. Färglagda områden, blått och rött, representerar som tidigare avvikelser, i detta fall större än 0.15 meter.

Rött: LaserDEM > BildDEM + 0.15m

Blått: LaserDEM < BildDEM - 0.15m

Figurens gråa nyanser representerar differenser mellan -0.15 och + 0.15 där de mörkt grå ligger nära -0.15.



Figur 12: Differensbild, skillnader mellan LaserDEM och BildDEM. Färglagda områden, blått och rött, representerar avvikelser mellan höjdmodellerna större än 15 cm.

Broar, viadukter, vägar, järnvägar: En av broarna är borttagen, av undertecknad, ur laserdata i figur 10. Det krävs således en tydlig beskrivning vid upphandlingen för att skapa homogenera höjdmodeller. Detta bör medföra enklare hantering vid flödesmodellering även om en fullständig 3D-modell inte etablerats.

Bilar: Fordon på vägar och parkeringsplatser måste tas bort ur laserdata. Om bilder registrerats samtidigt som laserdata förenklas detta moment. Vid fotogrammetrisk mätning sker detta urval med naturlighet.

Vegetation skall inte inkluderas i höjdmodellen. Laserdata filtreras och vid fotogrammetrisk mätning mäts markytan där så är möjligt. En intressant iakttagelse är att, till skillnad från gängse föreställning, lasermätningarna i skog ligger lägre än motsvarande bildmätningar.

Områden under ombyggnad: Det stora sammanhängande röda området i den övre delen av differensbilden är ett område under exploatering. Att detta, precis som rondellen i det övre vänstra hörnet skiljer sig mellan höjdmodellerna beror sannolikt på att det är 2 år mellan registreringarna.

Strandlinje: En för flödesmodelleringar viktig detalj. Det måste tydligt specificeras i upphandlingen hur strandlinjen skall redovisas. Framförallt är det viktigt med täta mätningar utefter linjen. Detta gäller både laser och bilddata.

Byggnader: I laserdata måste dessa data filtreras bort. Automatiska metoder kompletteras med visuell besiktning. En fråga som bör diskuteras är huruvida byggnader skall eller inte skall komplettera höjdmodellen vid flödesmodelleringar. Även detta bör klargöras i upphandlingen.

Fullständigheten är påtagligt högre i höjdmodellen producerad från laserdata. Smala strukturer som diken, vägbankar och små terrängvariationer finns tydligt representerade i laserdata med dess höga punkttäthet. Det är även möjligt att vissa skillnader mellan höjdmodellerna beror på skilda registreringstidpunkter. Värt att notera är att hustak ibland

saknar eller endast har glesa registreringar. Detta beror oftast på att takets material, bl.a. tjärpapp, inte till fulles reflekterar den utsända laserpulsen.

6.7 Lagringsstruktur, interpolation och leveransformat

Interpolationens inverkan på höjdmodellens noggrannhet har diskuterats tidigare i detta dokument. Det effektivaste sättet att begränsa dessa bieffekter är att öka punkttätheten.

Antalet punkter i laserdata reduceras, med avseende på vissa parametrar, för att begränsa datamängden. Det är viktigt att denna reduktion inte försämrar möjligheterna för noggranna interpolationer.

Framställningen av TIN-modeller är inte entydig. Programvaror från skilda leverantörer fungerar lite olika med bl.a. olika parameteruppsättningar. Detta till trots är TIN en effektiv metod för modellering av oregelbundna laserdata. För en TIN-interpolation krävs 3 kända punkter som underlag för beräkning av nypunkten.

Bilinjär interpolation är effektiv vid interpolation i regelbundna rutnät. För bilinjär interpolation krävs 4 kända punkter som underlag för beräkning av nypunkten.

De data som levererats och utvärderats i detta projekt har levererats som punkter och linjer. Rimligt för framtida upphandlingar är att detta kompletteras med en entydig beskrivning av ett regelbundet rutnät med så hög punkttäthet att noggrannheten bibehålls. Denna höjdmodell skapar sannolikt möjlighet för enklare och en mer entydig hantering av höjdmodellerna. Eventuellt kan dessa data kompletteras med brytlinjer.

7 Slutsatser

Utvärdering av de två höjdmodellernas, LaserDEM och BildDEM, kvalitet visar på tydliga skillnader i ett flertal avseenden. Följande kan vara värt att notera.

Noggrannhet har bedömts för de två dataseten. För detta har, i den mån dessa funnits tillgängliga, oberoende referensdata nyttjats. Effekter av olika punkttäthet och plannoggrannhet har adderats till det mätfel som kan förutsättas för respektive dataset. Störst inverkan på den slutliga noggrannheten i höjdmodellerna har punkttäthet, vilken även har effekt på interpolationens noggrannhet. Punkttätheten för LaserMät är i medeltal ca 0.18 punkter/m² men är i vissa fall ca 1 pkt/m². Motsvarande "medeltäthet" för BildMät är 0.015 punkter/m². Adderas datafångsmetodernas mätfel till effekterna "bristande" täthet och interpolation är skillnaden i metoderna uppenbar. Eftersom noggrannheten är påtagligt relaterad till flyghöjden är det med befintliga data inte möjligt att bedöma om det är metod eller flyghöjd eller både och som har störst inverkan på resultatet.

Tillförlitligheten kan i detta fall endast bedömas godtyckligt eftersom offertförfrågan inte innehåller tydliga direktiv om vad höjdmodellerna skall eller inte skall beskriva. Generellt kan dock nämnas att processer som styrs av en "operatör" oftast ger ett bättre resultat än automatiska processer. Den styrda fotogrammetriska bildmätningen ger sannolikt en högre tillförlitlighet än den automatiska process för markfiltrering som laserdata genomgår. Viktigt att framhålla i detta sammanhang är behovet av en tydligare uppdragsbeskrivning för att slutresultatet skall bli så optimalt som möjligt.

Fullständigheten är även den relaterad till uppdragsbeskrivningen. Till skillnad från vad som gäller för tillförlitligheten är det i detta fall viktigt med så många mätningar som möjligt för att försäkra sig om att alla objekt "karterats". De täta mätningar som åstadkoms genom laserskanning är således att föredra i detta fall.

Uppdragsbeskrivningen bör kompletteras med.

1. Behovet av hög punkttäthet.
2. Beskrivning av vilka objekt som skall ingå i höjdmodellen. Strandlinje, broar, vägar, järnvägar, byggnader, diken d.v.s. "man-made-objects" skapar alla förutsättningar för noggrannare modellering och bör av den anledningen specialhanteras. Eventuellt kan detta ske med brytlinjer.
3. Lokalisering och förbättring av "problemområden" i höjddata förenklas om leveransen kompletteras med bilder. Oavsett om det är de flygbilder man mätt i eller enklare bilder som registrerats i samband med laserskanningen har de ett mervärde i det fortsatta arbetet. Eventuellt kan intensitetsdata från laserskanningen användas i de fall de finns tillgängliga.
4. Lagringsstruktur, interpolationsmetod och leveransformat. Gemensamt för dessa begrepp är att om de används i syfte att skapa en entydigare produkt är sannolikheten också stor att man lyckas med detta. Produkten måste dock definieras innan begreppens verkan effektueras.

Avslutningsvis föreslås en kompletterande studie. En oberoende mätmetod, terrester laserskanning, bör användas för att verifiera och dokumentera de negativa effekter som uppstår vid interpolation med "glesa" mätningar.

8 Kontakt

Dan Klang, Tekn.Dr.

Lantmäteriet, Bildenheten

801 02 Gävle

e-post: dan.klang@lm.se

Tel: 026-633526

9 Referenser

HMK-Fotogrammetri, 1993. Handbok till mätningkungörelsen. Statens Lantmäteriverk, Gävle.

Klang, 2003. En ny svensk höjdmodell. Lantmäteriet, Dnr. 505-2003/2417, 8 december 2003, Gävle.

Talts, 2001. Jämförelse av höjder från höjddatabas och blocktriangulering. Lantmäteriverket.

Terrasolid Ltd., 1998-2003. User's Guide TerraScan, TerraModeler.

Bilagor

Bilaga 1.

Sammanställning av resultat från (Talts, 2001) "Jämförelse av höjder från höjddatabas och blocktriangulering".

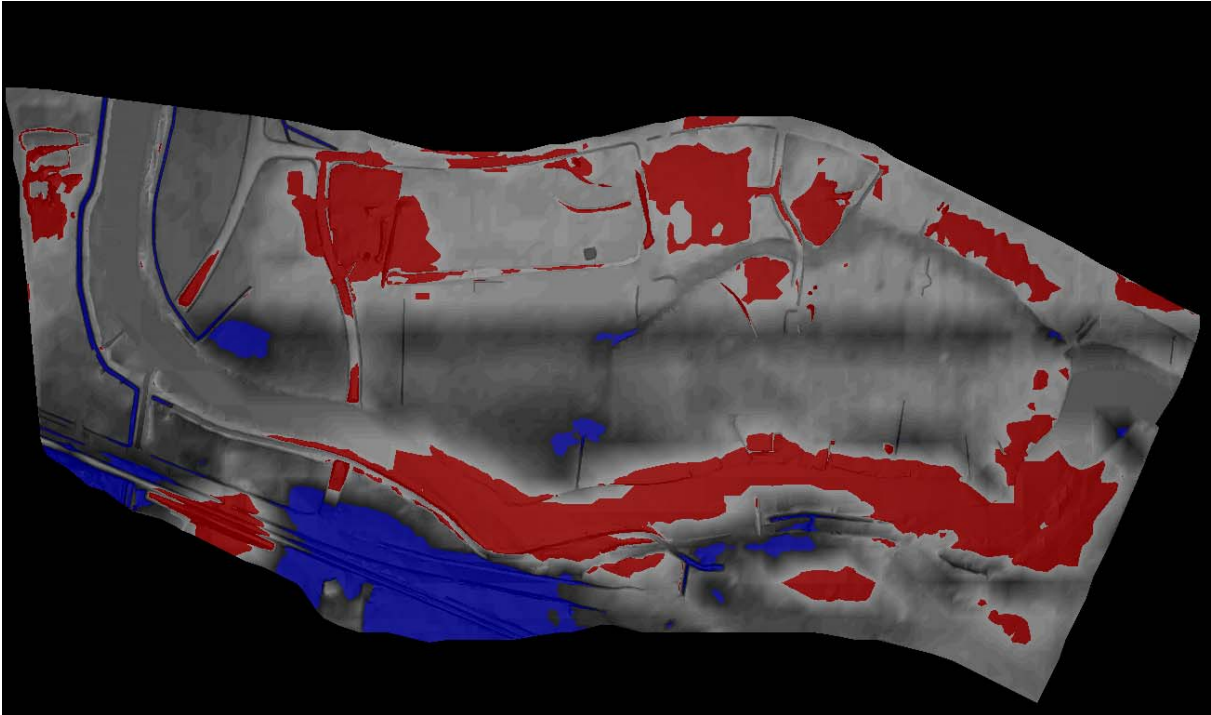
4600 meter	Antal	Medelvärde (m)	KVM (m)
Höjdstöd	9558	0,15	1,73
Konnektioner	37465	0,09	1,91
Alla punkter	47023	0,10	1,87
9200 meter			
Höjdstöd	2000	0,40	2,10
Konnektioner	7238	0,60	2,45
Alla punkter	9238	0,55	2,38
Totalt	56261	0,17	1,96

Bilaga 2.

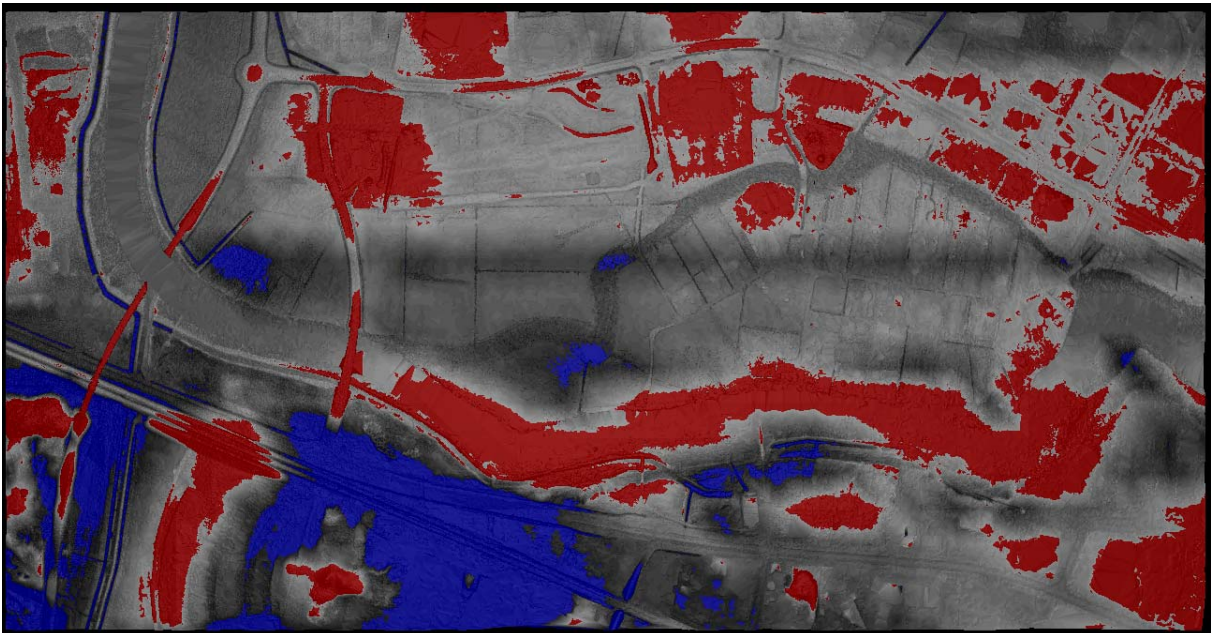
Mätningar av avvikelser mellan originaldata, Laser respektive Bild, och de från dessa data framställda höjdmodellerna. LaserDEM och BildDEM är framställda och analyserade med Terrasolid Lts, TerraScan och TerraModeler.

Rutnät (m)	Laser->LaserDEM	Bild->BildDEM
0	0,0000	0,0000
0,5	0,1860	0,0370
1	0,2580	0,0520
2	0,3060	0,0880
5	0,3830	0,1870
10	0,5050	0,2900
20	0,6420	0,3880
30	0,7760	0,4420
40	0,7680	0,4480

Bilaga 3



Figur 9: Differensbild- skillnad mellan Lantmäteriets 50-meters höjdmodell och höjdmodellen framställd genom stereomätning i bilder. Färglagda områden, blått och rött, representerar avvikelser mellan höjdmodellerna större än 1 meter.



Figur 10: Differensbild- skillnad mellan Lantmäteriets 50-meters höjdmodell och höjdmodellen framställd från laserdata. Färglagda områden, blått och rött, representerar avvikelser mellan höjdmodellerna större än 1 meter.

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 Jämtnäs 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 höjddmodell. Laserskanning, testprojekt Falun.
- 2006:4 Klang Dan: KRIS-GIS® projekt i Eskilstuna. Kvalitet i höjdd modeller.