

GUSTAV TOLT, OSKAR BRATTBERG, PETER FOLLO,
ANDERS GUSTAVSSON, GUSTAV HAAPALAHTI, MIKAEL LUNDBERG



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Gustav Tolt, Oskar Brattberg, Peter Follo,
Anders Gustavsson, Gustav Haapalahti,
Mikael Lundberg

Omvärldsmodellering 2007-2008 – slutrapport

Titel	Omvärldsmodellering 2007-2008 – slutrapport
Title	Environment modelling 2007-2008 – final report
Rapportnr/Report no	FOI-R--2641--SE
Rapporttyp Report Type	Användarrapport User report
Sidor/Pages	44 p
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2008
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde Programme area	2. Operationsanalys, modellering och simulering 2. Operational Research, Modelling and Simulation
Delområde Subcategory	21 Modellering och simulering 21 Modelling and Simulation
Projektnr/Project no	E3078
Godkänd av/Approved by	Johan Söderström
FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut	FOI, Swedish Defence Research Agency
Avdelningen för Informationssystem	Information Systems
Box 1165	P.O.Box 1165
581 11 Linköping	SE-581 11 Linköping

Sammanfattning

Denna rapport sammanfattar verksamheten inom FoT-projektet Basblock: omvärldsmodellering 2007-2008. Projektet behandlar metod- och teknikutveckling avseende framställning av högupplösta omvärldsmodeller från olika typer av sensordata. Verksamheten fokuseras på metoder som möjliggör snabb och i hög grad automatisk bearbetning av data för framställning av sådana modeller.

Bland resultaten märks främst:

- Förbättring av laserbaserad objektsklassificering genom kombination av flera olika klassificeringstekniker
- Utveckling av en metod för förfining av lidarbaserade klassificeringsresultat utifrån analys av andra spektrala data (flygfoton)
- Kvantitativ analys av byggnadsdetektions- och markestimeringsalgoritmer utvecklade inom omvärldsmodelleringsprojekten
- Förbättring av markmodelleringsprocessen genom kombination av två olika algoritmer: en snabb metod särskilt lämpad för ”snälla” miljöer och en långsammare metod som används för svårare områden där den snabba metoden riskerar att producera felaktiga resultat
- Förbättring av byggnadsmodelleringsprocessen genom att algoritmer för texturering och färgsättning av byggnadstak utifrån flygfoton har utvecklats
- Kunskapsöverföring och stöd till verksamheter inom FOI och FM

Nyckelord: Syntetiska naturliga omgivningar, 3D-modeller, lidar, flygfoto, radar

Summary

This report summarizes the work within the project Natural environment modeling 2007-2008. The project deals with development of methods and techniques for producing high-resolution environment models from different kinds of sensor data. Particular focus is on methods and techniques that enable rapid and highly automatic data processing for creation of such models.

The main results are:

- Improvement of laser-based object classification through combination of several classification techniques
- Development of a method for refinement of lidar-based classification result through spectral analysis (using aerial photos)
- Quantitative analysis of building detection and ground estimation algorithms developed within the environment modeling projects
- Improvement of the ground modelling process through combination of two different algorithms: One fast method particularly suited for “nice” regions and one slower that is used for tougher areas where the fast method might have failed
- Improvement of the building modelling process in that algorithms for texturing and colorizing building roofs from aerial photos have been developed
- Knowledge transfer and support to activities within FOI and the Swedish Armed Forces

Keywords: Synthetic natural environments, 3-D models, lidar, aerial imagery, radar

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Bakgrund – M&S och omvärldsmodeller	7
1.2	Omvärldsmodellering och dataförsörjning	8
1.3	Projektets mål och nytta för FM	8
2	FoU-verksamhet 2007-2008	10
2.1	Objektsklassificering	10
2.1.1	Mosaikfunktion	10
2.1.2	Beslutsnivåfusion av klassificeringsresultat.....	11
2.1.3	Lidar-assisterad spektral klassificering	12
2.1.4	Radarteknik för omvärldsmodellering	14
2.2	Modellering.....	16
2.2.1	Färgsättning och texturering av byggnader	16
2.2.2	Hybridmodell för vegetationsområden	18
2.2.3	Ökad automatisering av markmodelleringsprocessen.....	19
2.3	Klassificeringskvalitetsanalys.....	20
2.3.1	Markmodellering	20
2.3.2	Byggnader.....	22
3	Omvärldsmodelleringsprocessen	28
3.1	Uppdelning av rådata i mindre områden.....	28
3.2	Borttagning av felaktiga lasermät punkter	29
3.3	Markmodell.....	29
3.4	Ytmodell	29
3.5	Ortorektifiering.....	29
3.6	Mosaik.....	29
3.7	Klassificering	30
3.8	Trädsegmentering	30
3.9	Artbestämning	31
3.10	Byggnadsrekonstruktion	31
3.11	Integration av objekt till 3D-modell.....	31
4	Slutsatser	32
4.1	Sensordata gränssättande för modellens kvalitet.....	32
4.2	Urbana miljöer är mer än byggnader och träd	33
4.3	Olika tillämpningar medför olika krav på detaljrikedom och noggrannhet.....	33

4.4	Effektiv hantering av geodata och modeller	34
4.5	Taktiska/stridstekniska aspekter	35
5	Omvärldsrelationer	36
5.1	Nationellt	36
5.2	Internationellt.....	36
6	Kunskapsöverföring och stöd	38
6.1	Kunskapsöverföring och stöd inom FoT.....	38
6.2	Kunskapsöverföring och stöd till FM/FMV.....	38
6.3	Kunskapsöverföring och stöd, övrigt.....	38
7	Kvalitetssäkring	39
7.1	Uppsatser (konferensbidrag, tidskriftartiklar, etc)	39
7.2	Presentationer	39
7.3	Internationell utvärdering.....	39
8	Referenser	40
	Bilaga: Utvärderingsresultat för Norrköping	41

1 Inledning

Denna slutrapport i form av en FOI-R-rapport syftar till att redovisa verksamheten för FoT-projektet Basblock: omvärldsmodellering 2007-2008, samt diskutera några viktiga slutsatser som dragits avseende omvärldsmodellering. Projektet tillhör FoT-område Operationsanalys, modellering och simulering.

Basblock: omvärldsmodellering 2007-2008 startade i januari 2007 och avslutas i december 2008. För information om tidigare projekt inom området hänvisas läsaren till t ex (Söderman m fl, 2006). Den övergripande introduktionen till projektet, dvs bakgrund, syfte, mål, etc, är i stort sett densamma som i rapporter för tidigare omvärldsmodelleringsprojekt. Läsare som är bekant med detta kan därför fortsätta direkt till kapitel 2.

1.1 Bakgrund – M&S och omvärldsmodeller

Modellering och Simulering (M&S) är ett område som allmänt anses kommer att få en allt större betydelse för utvecklingen av framtidens försvarsmakt, t ex i FM transformation mot ett flexibelt insatsförsvar. Inom försvarsrelaterad modellering och simulering spelar modeller av den naturliga omgivningen, sk omvärldsmodeller, taktiska omvärldar eller syntetiska naturliga omgivningar (SNO), en central roll. De bildar den gemensamma ”spelplan” där de simulerade operationerna och interaktionerna äger rum. Beroende på syftet med simuleringen representerar omvärldsmodellen olika aspekter hos omgivningen för mark-, sjö-, och luftoperationer (ibland också rymd) tvärs hela spektrumet av tillämpningar (väpnad strid, fredsbevarande operationer, krishantering, osv). En omvärldsmodell kan representera en sann geografisk plats i världen (geospecifik), alternativt en typisk plats eller klass av platser i världen (geotypisk). Innehållet kan bestå av taktiskt relevanta naturliga egenskaper inom land-, sjö- och luftdomänerna, konstruerade objekt som byggnader, broar, vägar, osv samt karakteristika hos plattformar, t ex geometri och ytmaterial. Vidare kan också modeller för olika processer som vind, vattenflöden, nederbörd, erosion, etc, finnas samt växelverkan med simulerade enheter. Omfattningen och innehållet varierar mellan olika tillämpningar och med de funktioner som ska realiseras, t ex 3D-visualisering, simulering av sensorer och sensornätverk, bekämpning, spårbildning, gasutbredning, dygns- och årstidsvariationer, väder och datorstyrda stridskrafter (Computer Generated Forces).

Förutsättningarna och möjligheterna att framställa, hantera och utnyttja omvärldsmodeller förändras dock ständigt av den snabba teknikutvecklingen i samhället, inte minst inom IT-området. Det uppstår och utvecklas därför kontinuerligt nya förväntningar och behov hos användarna. Önskemålen på allt mer komplexa omvärldsmodeller i termer av storlek, detaljrikedom, noggrannhet, realism, möjlighet till sensorfunktioner, hantering av vapenverkan, osv, kan därför förväntas öka i takt med teknikutvecklingen och den ökade användningen av M&S. Det är därför av stor vikt att metoder och tekniker för att framställa, hantera och utnyttja omvärldsmodeller ständigt utvecklas för att kunna möta dessa nya krav och önskemål.

Frågeställningarna ovan har i olika grad adresserats inom M&S-verksamheten vid FOI Avdelningen för Informationssystem (förr Sensorsystem och dessförinnan Sensorteknik) under de senaste åren. Verksamheten fokuseras på omvärldsmodeller som beskriver ”tillstånd” i den naturliga omvärlden, dvs

modeller för egenskaper inom land-, sjö- och luftdomänerna. I det följande används begreppet ”omvärldsmodell” med denna avgränsning.

1.2 Omvärldsmodellering och dataförsörjning

Framställning av omvärldsmodeller för den naturliga omvärlden sker normalt genom bearbetning och integration av data som digitala kartor, höjddatabaser, flyg- och satellitbilder, objektmodeller (byggnader, fordon, broar, etc) och olika typer av materialdatabaser. Materialdatabaserna kan innehålla data som beskriver fysikaliska egenskaper som är relevanta för elektromagnetisk och akustisk vågutbredning (reflektion, dämpning, spridning, osv), egenskaper för mekanisk hållfasthet, värmeledning, osv. Dessa data är nödvändiga för att simulera t ex sensor- och sensornätfunktioner, vapenverkan, rök- och gasmoln eller spårbildning efter fordon, i den omvärld som beskrivs av omvärldsmodellen.

Teknikutvecklingen inom främst IT-området börjar nu nå en nivå där det är möjligt att med rimliga resurser hantera och utnyttja mycket komplexa omvärldsmodeller. De dataunderlag som hittills normalt använts för framställning av omvärldsmodeller inom FM-uppdrag kommer inte längre att vara tillräckliga för alla de nya typer av modeller som efterfrågas. En oförändrad utveckling av försörjningen av dataunderlag kommer sannolikt att medföra svårigheter att realisera efterfrågade modeller. Nya och alternativa sätt till dataförsörjning behöver därför undersökas och provas för att säkra den framtida försörjningen av dataunderlag till omvärldsmodeller inom FMs verksamheter inom M&S-området.

En viktig möjlighet är att inom FMs egen organisation kunna bearbeta och utnyttja data från egna existerande spaningsresurser. Metoder, tekniker och verktyg för att (snabbt) producera nya dataunderlag från olika typer av spaningsdata samt stödja integration med existerande dataunderlag är därför särskilt intressanta att utveckla, studera och prova. En sådan funktion skulle kunna medverka till att säkra försörjningen av data, eventuellt minska kostnaderna för framställning av omvärldsmodeller och dessutom skapa helt nya operativa möjligheter. Genom att använda spaningsdata kan aktuella och situationsanpassade taktiska omvärldsmodeller snabbt framställas, modeller som sedan kan användas operativt i uppdragsplanering, uppdragsträning, lägesbildsgenerering, verkansvärdering, M&S för beslutsstöd, osv.

1.3 Projektets mål och nytta för FM

Projektets övergripande mål är kompetensuppbyggnad rörande omvärldsmodellering med fokus på metod- och teknikutveckling avseende snabb och i hög grad automatisk framställning av högupplösta omvärldsmodeller för modellering och simulering.

Den långsiktiga nyttan för FM är kunskap om datakällor, metoder och verktyg för försörjning av dataunderlag till omvärldsmodellering samt metoder och tekniker för framställning av omvärldsmodeller. Detta hjälper FM att på ett effektivt sätt möta det växande behovet av allt större och mer komplexa omvärldsmodeller. Det skapar handlingsberedskap och möjlighet till vägval inom området omvärldsmodellering i utvecklingen av FMs M&S-verksamhet.

Ett för FM viktigt mervärde som omvärldsmodelleringsverksamheten genom åren påvisat är förmågan att med en luftburen spaningsplattform extrahera detaljerad

information om ett visst geografiskt område, något som t ex kan tjäna som stöd för BG i samband med planering och genomförande av internationella insatser.

Erfarenheter och resultat (metoder, verktyg) från verksamheten bildar också underlag för analys av förutsättningar för framtida FoT-verksamhet, till exempel studier och utveckling av nätverksintegrerade system för snabb och automatisk framställning av situationsanpassade omvärldsmodeller från spaningsdata och annan tillgänglig geografisk information.

2 FoU-verksamhet 2007-2008

I detta kapitel ges en sammanfattning av det FoU-arbete som skett inom projektet under 2007 och 2008. Huvudfokus har varit att effektivt utnyttja olika algoritmer och sensorer för att förbättra kvaliteten på den slutliga omvärldsmodellen.

Verksamheten kan delas in i tre huvudområden: *klassificering*, *modellering* och *klassificeringskvalitetsanalys*. Vart och ett av dessa områden diskuteras närmare i det följande.

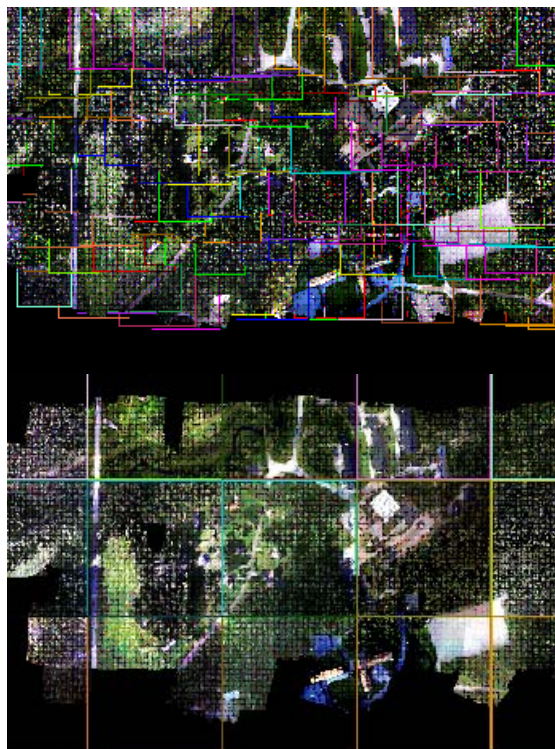
2.1 Objektsklassificering

Inom projektet har arbete bedrivits med att klassificera strukturer och objekt i terrängen genom att utnyttja flera (existerande) algoritmer och data från andra luftburna sensorer än laserskanner (lidar), bl a RGB-kameror. Syftet är att förbättra förmågan till snabb framställning av omvärldsmodeller utifrån sensordata.

2.1.1 Mosaikfunktion

För att t ex kunna samutnyttja flygbilder och laserdata krävs möjlighet att sammanfoga bilddata för ett visst geografiskt område till en sk mosaik. Det i utvecklingsmiljön IDL/ENVI existerande mosaikverktyget har en rad brister; bl a har man ingen kontroll över hur den spektrala informationen bearbetas. Inom ramen för projektet har därför ett alternativt mosaikverktyg utvecklats som integrerats i IDL/ENVI.

En viktig egenskap hos det nya mosaikverktyget är förmågan att utgående från en mängd överlappande bilder producera en ny uppsättning bilder som omsamlats till önskad upplösning (Figur 1). Typiskt har de ursprungliga bilderna betydande överlapp med varandra samt mycket hög spatiell upplösning varför en omsamlingsfunktion i vissa fall är önskvärd för att reducera mängden data att bearbeta.



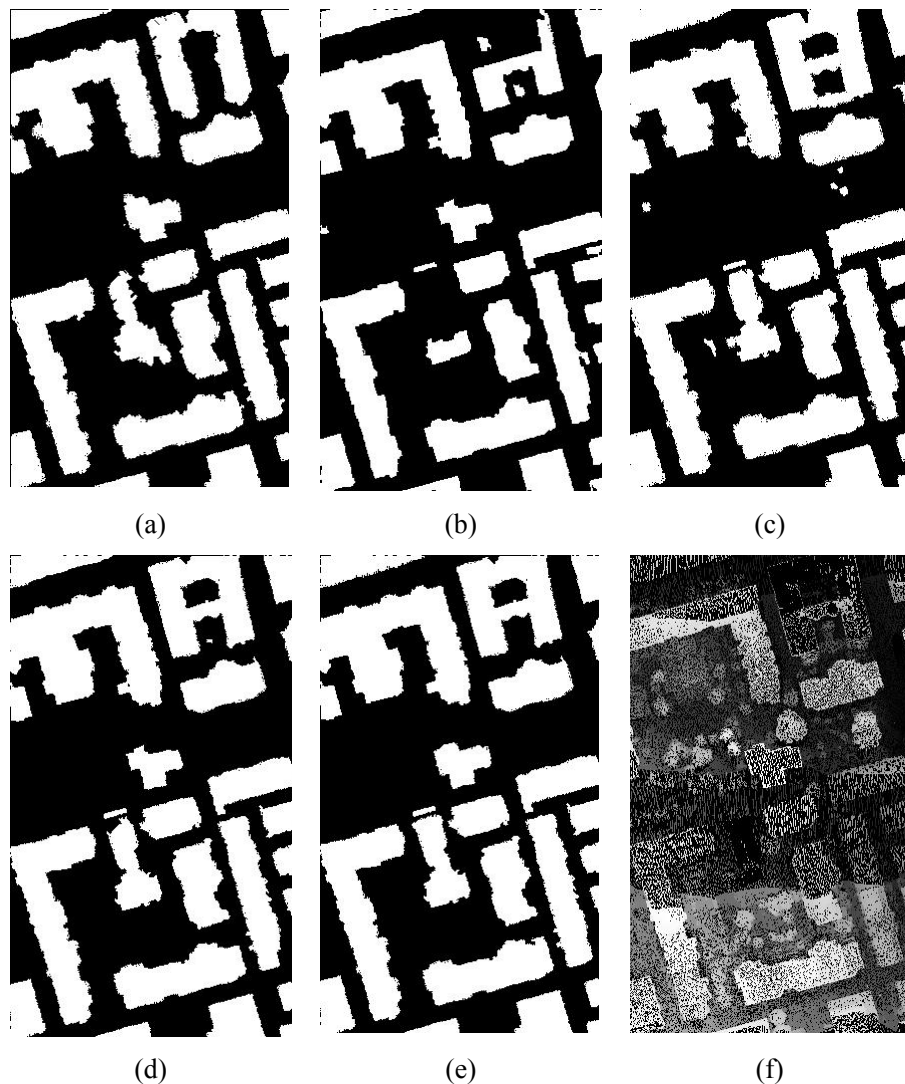
Figur 1. Överst: Bilden visar yttäckningen för respektive bild i en uppsättning med överlappande flygbilder av olika yttäckning över ett visst område. Nederst: Den ursprungliga uppsättningen flygbilder har slagits samman till en mindre mängd (kvadratiska) bilder som var och en svarar mot ett lika stort område med laserdata, vilket underlättar automatiskt samutnyttjande av laser- och bilddata.

2.1.2 Beslutsnivåfusion av klassificeringsresultat

Inom ramen för tidigare omvärldsmodelleringsprojekt har ett antal metoder för segmentering och klassificering av lidardata utvecklats (se Brandin och Hamrén, 2003, Tolt m fl, 2006, Ruhe och Nordin, 2007). Främst har byggnader varit av intresse. Metoderna bygger alla på olika ideer om vilka egenskaper som ska utnyttjas för att beskriva olika typer av objekt. Det kan t ex handla om höjdvärderingar, regelbundna former eller att identifiera områden utan markpunkter. Intressant att notera är att dessa metoder ofta är ungefär lika bra på att detektera byggnader, men att felen som introduceras varierar, vilket är väntat eftersom de bygger på olika idéer om segmentering och beskrivning av objekt. Det är också svårt att på förhand veta vilken klassificeringsmetod som presterar bäst för ett givet dataset. Denna observation har lett till idén att kombinera respektive klassificeringsresultat för att förbättra slutresultatets kvalitet och robusthet. En första ansats har gjorts genom *majoritetsröstning* (eng. majority voting), dvs alla områden som majoriteten av utsagorna anser vara byggnad klassificeras som byggnad. Utöver själva klassificeringsresultatet erhålls då även ett mått på säkerheten i klassificeringen i form av det antal klassificeringsmetoder som röstat på förekomsten av ett objekt av en viss typ.

En av fördelarna med fusion på beslutsnivå är möjligheten att utnyttja redan existerande klassificeringsalgoritmer i form av "svarta lådor". Det innebär således ett kostnadseffektivt och enkelt sätt att förbättra sina resultat genom att dra nytta av den ökande mängden publikt tillgängliga klassificeringsalgoritmer.

Förhoppningarna om förbättrade klassificeringsresultat stöds av den kvantitativa utvärdering av detektionsprestanda som presenteras i kapitel 2.3.2. I Figur 2 visas ett exempel på fusion av resultat från de tre lidarbaserade metoderna.



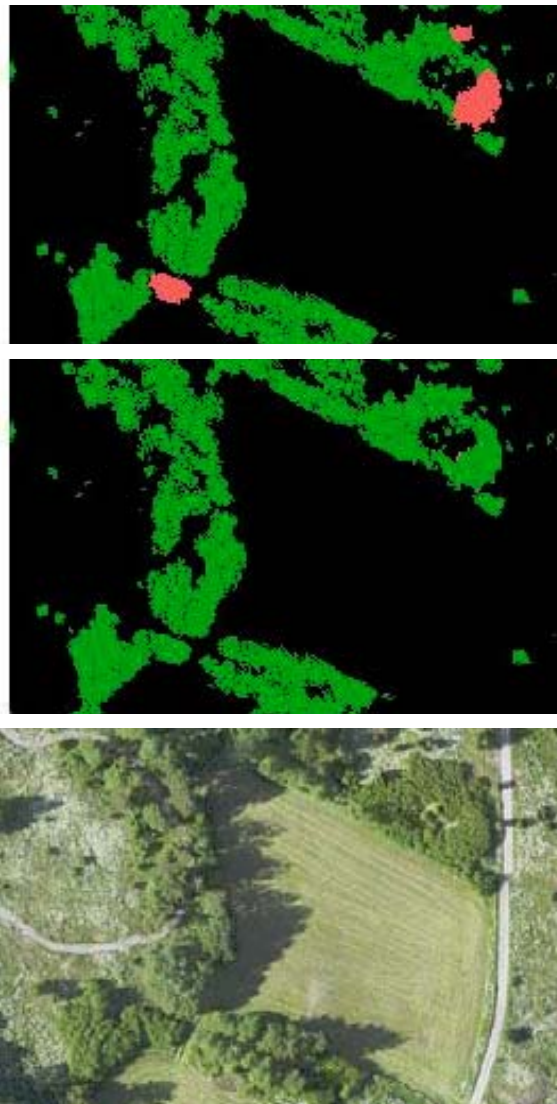
Figur 2. (a)-(c) Byggnadsdetektionsresultat erhållna med tre olika klassificeringstekniker. (d) Resultat efter beslutsnivåfusion (genom sk "majority voting") av de tre klassificeringsresultaten. (e) En manuellt korrigerad klassificeringsbild. (f) Höjddata för det aktuella område (ju ljusare, desto högre höjd över marken).

2.1.3 Lidar-assisterad spektral klassificering

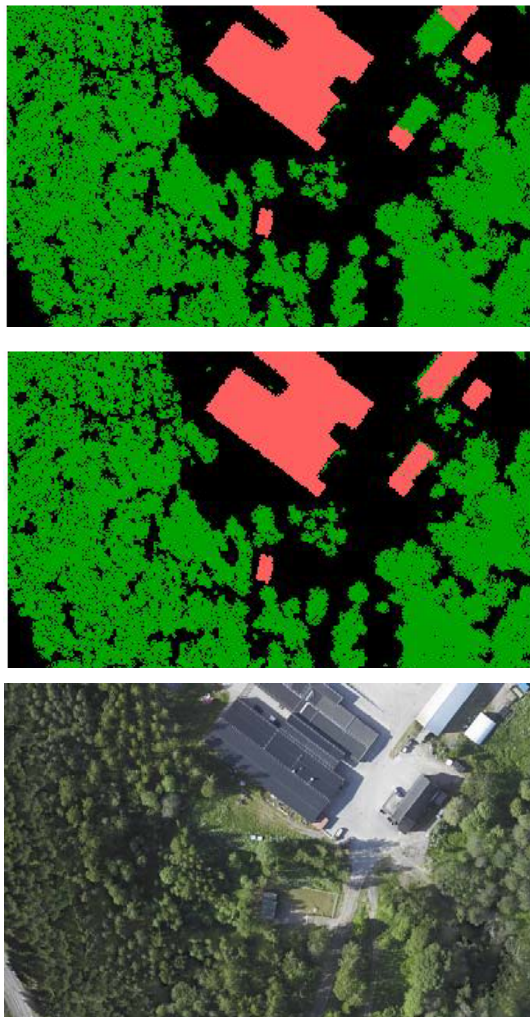
Eftersom de existerande laserbaserade metoderna för klassificering av olika typer av objekt, t ex byggnader och träd, bygger på geometriska objektsegenskaper stöter de på problem när egenskaper för objekt från de olika klasserna är väldigt lika. Till exempel kan tät vegetation uppvisa geometrier som liknar byggnader, medan byggnader pga t ex mätbrus eller ovanliga takformationer på liknande sätt kan vara i princip omöjliga att detektera utifrån tillgängliga laserdata. Den laserbaserade klassificeringen ger dock ändå oftast rätt resultat och kan därför användas som träning av en spektral metod; laserklassificeringen används för att "lära" den spektrala klassificeringen hur vegetation och byggnader ser ut i detta område. Genom att därefter identifiera objekt som avviker från "huvudklassen" kan felaktigheter rättas till.

I Figur 3 visas ett exempel där en rent laserbaserad klassificering resulterat i några felklassificerade områden. De vegetationsområden som felaktigt klassificerats som byggnad är spektralt sett väldigt lika vegetation och kan därför korrigeras till rätt klass. Figur 4 visar den omvända situationen, där en del av en byggnad först felklassificerats som vegetation och sedan korrigerats till rätt klass genom spektral klassificering.

Notera att samutnyttjande av spatiella och spektrala data på detta sätt inte använder laserdata i sig utan endast resultatet av den föregående (laserbaserade) klassificeringen. Fördelarna med detta är dels att tillgång till rådata inte krävs samt att man kan utnyttja redan existerande, väl beprövade spektrala klassificeringsmetoder för att snabbt kunna uppdatera sin klassificering. En inbyggd begränsning är emellertid att inte data kan fusioneras på lägsta (läs, pixel-) nivå; fusion på datanivå möjliggör som regel bättre klassificering. En naturlig fortsättning är en således vidareutveckling av klassificeringstekniker som kombinerar data på olika datanivåer för att på så sätt förbättra klassificeringen ytterligare.



Figur 3. Överst: Ursprungligt klassificeringsresultat erhållet genom automatisk analys av laserdata (grönt=vegetation, rött=byggnad). Notera de vegetationsområden som felaktigt klassificerats som byggnader. Mitten: Förbättrad klassificering mha spektral analys. Nederst: Flygbild över det aktuella området använd som spektral datakälla.



Figur 4. Överst: Ursprungligt klassificeringsresultat erhållet genom automatisk analys av laserdata (grönt=vegetation, rött=byggnad). Notera de byggnadsdelar som felaktigt klassificerats som vegetation. Mitten: Förbättrad klassificering mha spektral analys. Nederst: Flygbild över det aktuella området använd som spektral datakälla.

2.1.4 Radarteknik för omvärldsmodellering

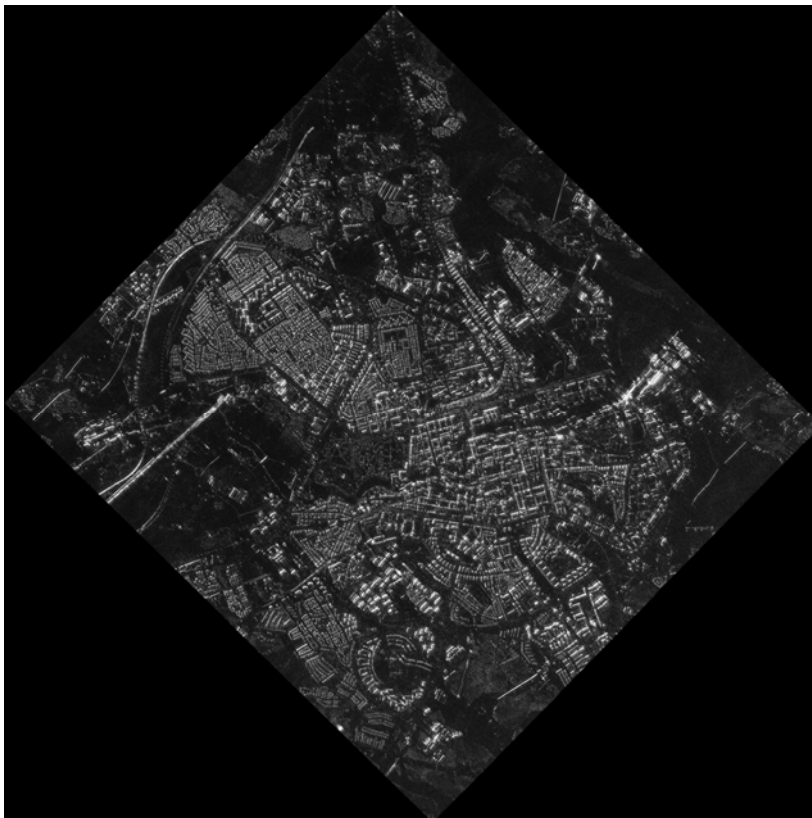
Inom projektet har inledande arbete med att studera radarsystems potential för omvärldsmodelleringsändamål genomförts.

Ett radarsystem monterat i en flygande plattform kan återge markytan med god spatiell upplösning genom avbildningsprincipen syntetisk aperturradar (SAR-Synthetic Aperure Radar). För varje markpunkt inom aktuellt område finns mottagen radarsignal registrerad under den tid den är belyst av huvudloben när plattformen passerar förbi. Styrkan i den enskilda punkten kan sedan rekonstrueras genom att återföra alla relevanta delkomponenter som lagrats digitalt och addera dessa till amplitud och fas. Med god kännedom om avbildningsgeometrin kan värdena hämtas på ett korrekt sätt ur den totalt insamlade datamatrisen och när detta utförts för varje markpunkt inom aktuellt område har en färdig SAR-bild skapats. Denna bildgenereringsprincip medger att upplösningen kan göras oberoende av spaningsavståndet om relevanta radarparametrar, som utsänd effekt och erforderlig registreringstid, justeras i motsvarande mån vid krav på längre räckvidder.

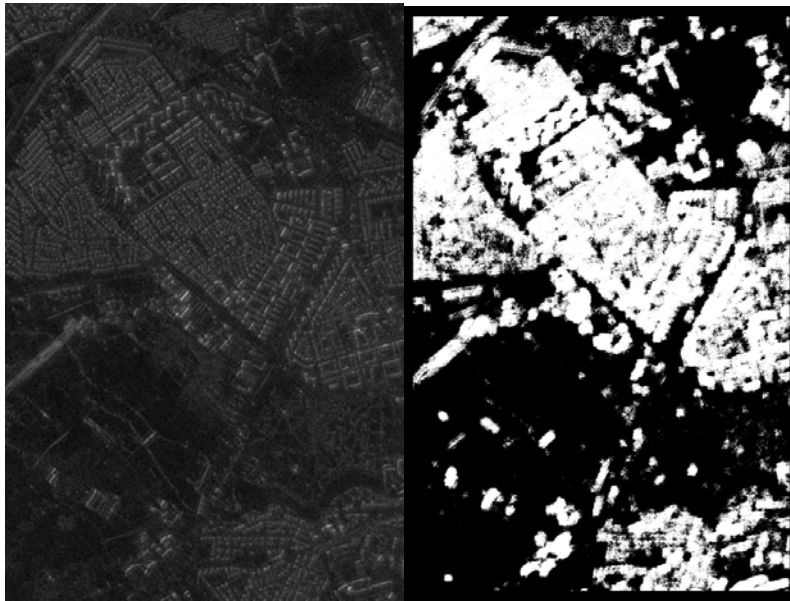
SAR-system har realiserats inom ett brett intervall av olika frekvensband, från metervågor (VHF-band) ner till millimetervågor (W-band). Detta ger olika karaktär för vad man kan identifiera i en SAR-bild då våglängden direkt påverkar de bakomliggande spridningsmekanismerna. Storleken för de strukturer på markytan som förmår bidra till återspridningen bestäms av använd våglängd. SAR-bilder genererade med metervågor återger därför en mindre detaljrikedom inom belyst område då de mindre objekten blir svaga eller försvinner helt. Således är val av våglängd en viktig komponent att beakta vid kartering med radar och möjligheten att klassificera eller ge stöd till klassificering för andra sensortyper som lidar.

En annan parameter som ökar antalet möjliga särdrag är om SAR-systemet är byggt för att kunna mäta upp spridningen med full polarimetrisk information, dvs växelvis puls för puls sända horisontell respektive vertikal polarisation och på mottagarsidan alltid registrera båda komponenterna parallellt. Den polarimetriska signaturen kan ge information om såväl bakgrundens som olika objekts ytstruktur och form.

En viktig faktor att beakta vid algoritmer för klassificering i SAR-bilder är att den sidtittande avbildningsgeometrin ofta ger upphov till informationsbärande skuggor bakom ett belyst objekt. Analys av deras utsträckning tillsammans med belysta sidor ger möjlighet att t ex uppskatta byggnaders dimensioner. Figur 5 återger en SAR-bild av ett i huvudsak urbant dominerat markavsnitt där inledande försök gjorts kring informationsextraktion i stadsbebyggelse (Figur 6).



Figur 5. Exempel på en SAR-bild över Norrköping registrerad med sensorsystemet CARABAS (VHF-bandet) från en flyghöjd strax under 5 km. Området har belysts från en passage på en sydvästlig kurs belägen nordväst om området. Den framräknade SAR-bilden har därefter geokodats och återges kartriktigt i referenssystemet Rikets Nät med storleken 9 km x 9 km. Upplösningen i originalbilden är omkring 3 m x 3 m och variationen i infallsvinkel mot markplanet tvärs flygriktningen är 62° (i nordväst) till 73° (i sydost).



Figur 6. Vänster: Utsnitt av SAR-bilden ovan. Höger: Automatiskt detekterad bebyggelse utifrån SAR-data.

2.2 Modellering

Projektets verksamhet har även omfattat förbättringar avseende modelleringsprocessen, både beträffande framställning av olika typer av modeller för olika tillämpningar och effektivisering av databearbetningskedjan.

2.2.1 Färgsättning och texturering av byggnader

I många tillämpningar är det visuella intrycket av stor betydelse. Ett exempel på en sådan tillämpning är flygsimulatorer. Under hösten 2008 utvecklades därför i samarbete med FM-projektet "Simuleringsbaserade metoder för sensorsimulering" metoder för att extrahera och texturera byggnader utgående från kommunala grunddata avseende byggnaders byggytor och ortorektifierade flygfoton. Då visuella data för väggarna saknades användes en uppsättning av generiska väggtexturer. Detta är för vissa applikationer en nödvändighet. Istället för att använda byggnadernas individuella textur, vilket leder till ohanterliga mängder texturdata för många system, återanvänds samma textur på flera byggnader. Av samma anledning finns möjligheten att istället för att använda flygfotot som taktextur skatta en färg och använda denna istället. Detta möjliggör realistisk om än bara delvis korrekt visualisering av mycket stora områden. I Figur 7 visas en del av Norrköping med generiska väggtexturer och färgsatt tak där färgen är skattad från flygfoto. Figur 8 visar en annan del av Norrköping där de automatiskt mha lidardata konstruerade byggnadsmodellerna färgsatts utifrån flygfoto. Figur 9 visar exempel på ett hus med texturerat resp färgsatt tak.

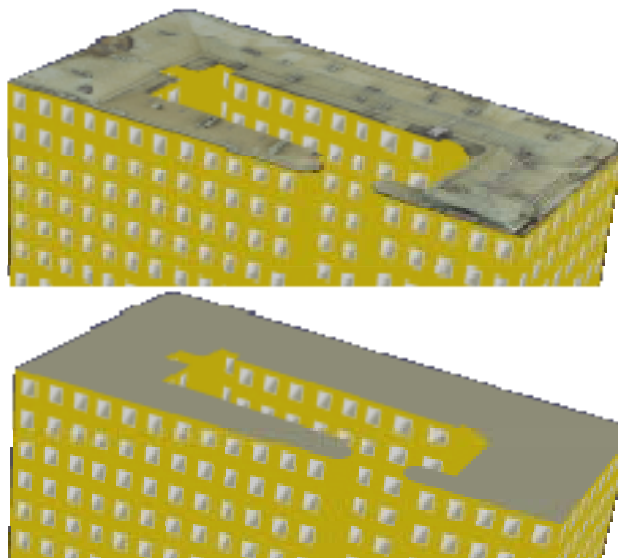


Figur 7. Del av Norrköping. Husen är extraherade ur kommunens grunddata varefter generiska texturer¹ applicerats på väggarna. Takfärgen har skattats från flygfoto.



Figur 8. Del av Norrköping. 3D-modell med byggnader vars tak färgsatts utifrån flygfoto.

¹ Väggtexturer från Got3d.com



Figur 9. Överst: Hus med texturerat tak, textur från ortorektifierat flygfoto. Nederst: Hus med takfärg skattad från flygfoto. Väggtexturen är en generisk textur som lagts på av visualiseringsskäl, dvs den överensstämmer inte med byggnadens verkliga utseende.

2.2.2 Hybridmodell för vegetationsområden

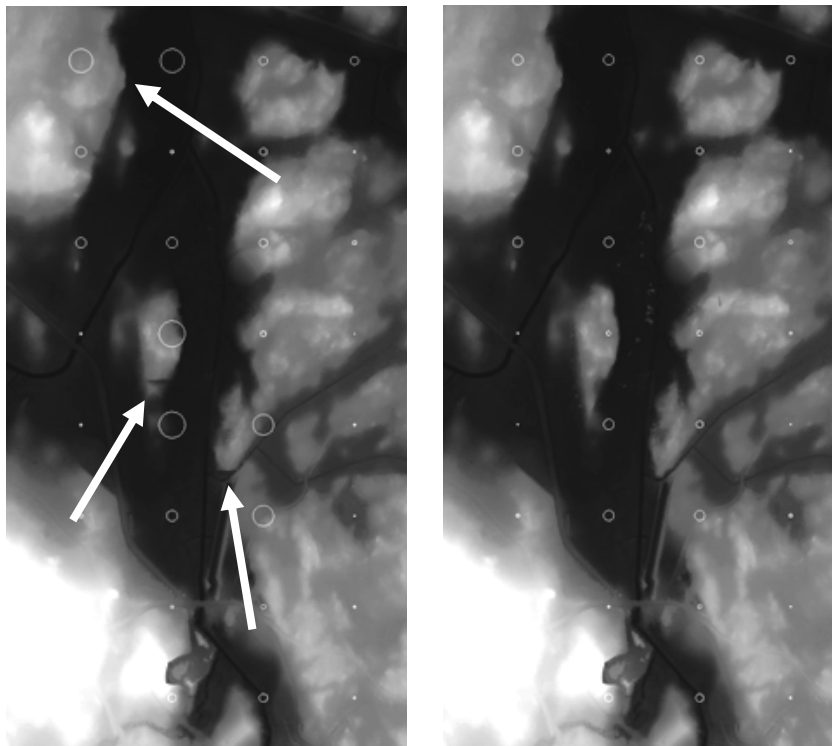
Genom att integrera två olika modelltyper för vegetationsområden kan en för sensorsimuleringsändamål effektivare representation av omvärlden erhållas. Detta sker genom att träd i skogskanter och kring gläntor automatiskt identifieras. I modellen representeras dessa träd sedan av högupplösta, detaljerade modeller, medan det inre av skogen ersätts med en mindre detaljrik höjdmodell som beskriver huvuddragen i skogens höjdstruktur (Figur 10).



Figur 10. Bilden visar ett skogsparti runt vars kanter träd representeras av detaljerade modeller. Träd i den inre delen av skogen har däremot ersatts av en mer lågupplöst modell som beskriver huvuddragen i skogens höjdstruktur.

2.2.3 Ökad automatisering av markmodelleringsprocessen

Inom tidigare omvärldsmodelleringsprojekt har huvudsakligen två tekniker för markestimering utvecklats. Den ena (Elmqvist, 2002) bygger på idén om ”active contours” och innebär en anpassning av en deformierbar yta (”gummiduk”) till mätpunkterna vilket gör den särskilt användbar för lidardata i svår terräng, t ex skog. Emellertid är den tämligen beräkningskrävande och kan ibland producera felaktiga markestimat i områden med stora byggnader. Den andra metoden (Tolt m fl, 2006) utvecklades som ett komplement och är särskilt användbar i enklare miljöer och dessutom beräkningsmässigt betydligt mer attraktiv. Då denna metod bygger på att detektera sammanhängande markområden mha en ”watershed”-segmentering kan den dock ibland stöta på svårigheter i områden med tät skog.



Figur 11. Illustration av markmodelleringsmetoden. Cirklarna markerar mittpunkter på rutor om $200 \times 200 \text{ m}^2$ och deras storlek motsvarar den grad till vilken respektive ruta bedöms inte passa ihop med sina närmaste grannar, här definierat som den största höjdskillnaden längs kanten. Vänster: Markmodell framtagen med den snabba algoritmen. Gråskalan motsvarar höjdvärden (vitt=högt, svart=lågt). Notera fel längs kanten mellan vissa rutor (se pilarna). Höger: Resultat efter att ha ersatt misstänkt felaktiga rutor i den ursprungliga modellen med rutor som bearbetats med den långsamma tekniken.

Inom projektet har en automatiserad markestimeringsmetod som kombinerar båda dessa tekniker utvecklats. Metoden går ut på att först applicera den snabba metoden över hela det aktuella området, sedan verifiera resultatet och därefter tillämpa den långsammare metoden över de delområden där behov finns. Den slutliga markmodellen innehåller därför typiskt en klar majoritet av resultat från den snabba metoden, och en mindre del från den långsammare tekniken. På så sätt kombineras de båda teknikernas respektive fördelar. Som ett första steg har verifieringen fokuserats på att detektera de vanligast förekommande felaktigheterna; skarpa höjdsprång längs kanten mellan två delområden samt osannolika höjdvariationer inuti resp delområde, t ex som följd av att markytan växt upp i byggnadstak. Även tidigare har markmodelleringen genomförts enligt denna verifieringsprincip men då uteslutande med visuell inspektion av

markmodellen, något som är tidskrävande för stora områden. Dessutom kan det vara mycket svårt att subjektivt hitta alla signifikanta felaktigheter i markmodellen. Figur 11 visar ett exempel från Kvarns skjutfält.

2.3 Klassificeringskvalitetsanalys

För att på förhand kunna ha en uppfattning om hur väl en automatiskt framtagen omvärldsmodell överensstämmer med den verklighet den representerar (säg, ett operationsområde) är det viktigt att göra en kvalitetsanalys. Som ett första steg har projektets verksamhet fokuserat på kvantitativ analys av två viktiga moment i omvärldsmodelleringskedjan: markmodellering och byggnadsdetektion.

2.3.1 Markmodellering

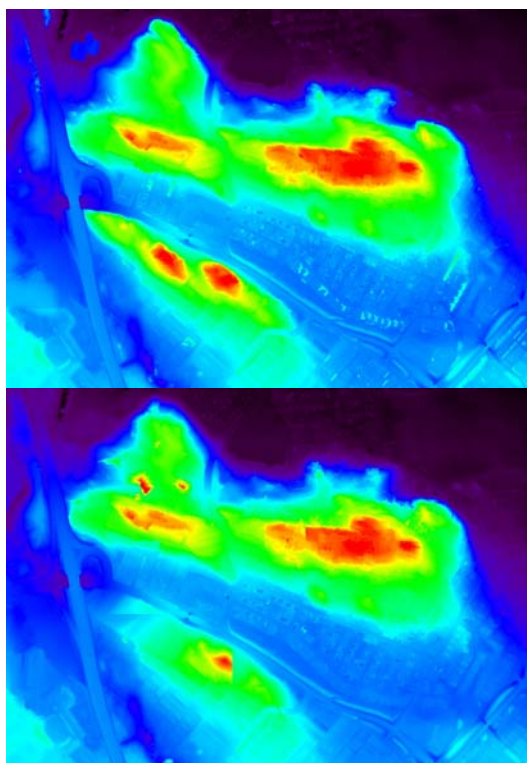
Som diskuterats i kapitel 2.2.3 är det huvudsakligen två metoder som används på FOI för att producera höjddatamodeller automatiskt från lidardata. För att kunna utvärdera dessa båda markestimeringsmetoder kvantitativt fick projektet tillgång till ett antal referenspunkter i Norrköpings kommun. Underlaget inkluderade dock ingen kvalitetsbeskrivning av referenspunkterna vilket gör det svårt att estimerar noggrannheten hos resultaten. Till exempel var punkterna inte explicit klassificerade som mark/icke-markpunkter varför det är svårt att avgöra om en specifik punkt verkligen ska användas för jämförelsen. Trots detta möjliggör naturligtvis referenspunkterna en lite grövre kvantitativ bedömning av markmodelleringsmetoderna. Två områden i Norrköping med varierande terrängtyp valdes ut för ändamålet: ett område med stor höjdvariation (5 m till 40 m) och mycket vegetation samt ett område i centrum med få träd och liten höjdvariation (0 m till 15 m).

I området med stor höjdvariation (Område 1) fanns 34 referenspunkter. Figur 12 visar höjdkartor framtagna med de två olika metoderna för det mer kuperade utvärderingsområdet. Figur 13 visar histogram över höjdskillnaden mellan referenspunkterna och markhöjden estimerad med de två metoderna i samma område. Medelskillnaden (absolutvärdet) mellan referenspunkternas höjd och motsvarande punkter för höjdmodellerna framtagna utifrån LIDAR-data blev i detta område 0,84 meter med active-contours-metoden och 1,53 m med watershed-metoden.

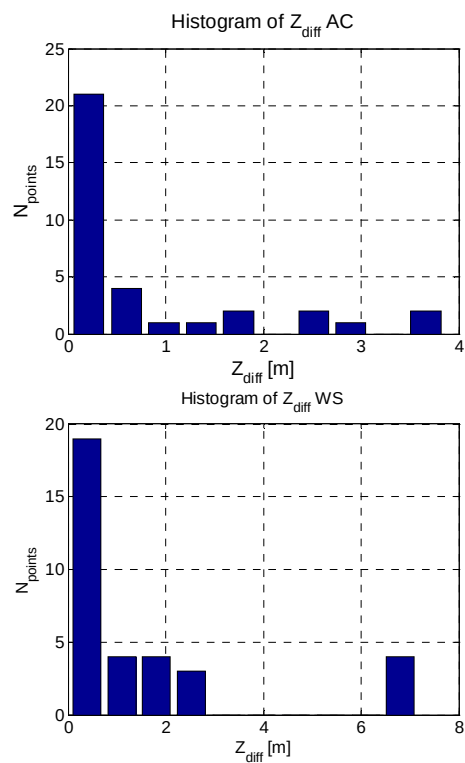
För området i centrala Norrköping (Område 2) fanns 19 referenspunkter. Medelskillnaden där blev 0,34 meter för ”active contours”-metoden (Elmqvist, 2002) och 0,25 m för ”watershed”-metoden (Tolt m fl, 2006). Tabell 1 visar resultatet av utvärderingen. Resultaten visar alltså samma sak som tidigare subjektiva erfarenheter, nämligen att active-contours-metoden fungerar bättre än watershed-metoden i området med stor höjdvariation och många träd medan det omvända gäller för området med liten variation och få träd.

Tabell 1. Höjdskillnad mellan modell och referenspunkter. Höjden varierar mellan 5 och 40 meter i område 1 och mellan 0 till 15 meter i område 2.

	Område 1	Område 2	Totalt
Antal Punkter	34	19	
Medelskillnad AC [m]	0,84	0,34	0,54
Medelskillnad WS [m]	1,53	0,25	0,68



Figur 12. Höjdkartor över utvärderingsområde 1 (med större höjdvariation, 5 m till 40 m). Svart motsvaras av låg höjd och rött av hög höjd. Överst: Markmodell framtagen med active-contours-metoden. Underst: Markmodell framtagen med watershed-metoden.



Figur 13. Histogram som visar spridningen i höjdskillnad mellan de 34 referenspunkterna och markmodellerna framtagna med active-contours-metoden (överst) och watershed-metoden (underst) för område 1.

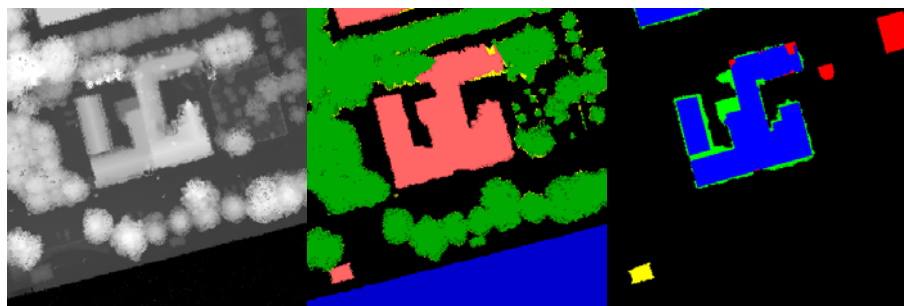
2.3.2 Byggnader

Under verksamhetsåret 2008 fick projektet även tillgång till delar av Norrköpings kommuns databas innehållande geometriska data för befintliga byggnaders utsträckning i markplanet. Detta har möjliggjort en objektiv utvärdering av den automatiska processkedjan att utifrån LIDAR-data detektera byggnader. Fokus för utvärderingen har således varit att kvantifiera resultaten erhållna med de olika byggnadsdetektionsalgoritmerna.

Först kombineras klassificeringsdata med kommunens byggnadsdata vilket ger en resultatbild som visar vilka byggnader som detekteras, hur stor del av varje enhet som detekteras, vilka byggnader som inte detekteras samt vilka objekt som är falska detektioner. Därefter beräknas ett antal olika statistiska och beskrivande egenskaper på varje enskilt objekt i resultatkartan. Slutligen sammanställs resultaten i en fil med egenskaperna för de enskilda objekten, statistik för hela området samt övergripande prestandamått såsom detektionssannolikhet och falsklarmsrisk.

I Figur 14 visas ett exempel på hur en resultatbild kan se ut. Resultatbilden visar bl a att det finns två odetekterade isolerade objekt (röda) och ett felaktigt detekterat objekt (gult). Studerar man lidardata blir orsaken till de felaktigt klassificerade områdena ganska uppenbar; det minsta röda objektet är till stor del skymt av träd, det stora röda objektet ser ut att saknas i lidardata och det falskt detekterade objektet är enligt lidarbilderna ett fyrkantigt objekt som är betydligt högre än omgivande mark och således uppvisar för byggnader typiska kännetecken.

Bilderna från exempelområdet i Figur 14 pekar tydligt på några av de problem som uppstår vid utvärdering av resultat med hjälp av något slags ”facit”. Underlaget kan exempelvis innehålla objekt som inte sensorsystemet lyckas mäta in och detektera. Det kan också innehålla felaktigheter eller sakna objekt som finns i verkligheten. Dessutom svarar detta facit endast mot byggnadernas begränsningslinjer på marken; från ovan ser dock byggnaderna generellt större ut pga att taken skjuter ut ett stycke från väggen (notera den gröna kanten längs byggnaden i Figur 14).



Figur 14. Exempelbilder från ett område i centrala Norrköping inkluderande byggnader, vegetation och vatten. Vänster: Interpolerad lidarbild av uppmätt höjd (Zmax). Mitten: Resultat av byggnadsklassificering (Fusion av flera metoder). Höger: Resultatbild genererad utifrån klassificeringsbilden och ”facit” från kommunen. Blått visar områden där klassificeraren detekterat en känd byggnad. Grönt visar områden som klassificerats som byggnad men som ligger utanför den verkliga byggnadens utsträckning. Rött visar områden som enligt kommunens data är en byggnad men som klassificeraren inte detekterat. Gult visar objekt som detekterats som byggnad men inte finns i facit, dvs. falska detektioner.

2.3.2.1 Resultat för ett mindre testområde

Målet med utvärderingen var att undersöka prestandan för de olika klassificerarna över ett ca 57 km² stort område. För att få en uppfattning om hur god kvalitet de levererade kommundata har och till vilken grad det är möjligt att lita på resultaten från en utvärdering av ett större område, gjordes en noggrannare undersökning på ett mindre testområde i centrala Norrköping (1,8 x 0,4 km²).

I Tabell 2 redovisas en manuell klassificering av objekt som utifrån kommundata är att betrakta som odetekterade kända objekt samt falska detektioner. Av de 40 odetekterade kända byggnaderna i området är 30 st sådana att de rimligtvis inte kan klassificeras korrekt utifrån tillgängliga lidardata, oavsett vilken klassificeringsmetod som används, eftersom mätdataunderlaget helt enkelt är otillräckligt. Återstår gör 10 objekt som algoritmen förkastar som byggnader eftersom de är för små och/eller för låga.

Den automatiska utvärderingen med kommundata redovisar även att 50 st av de objekt som klassificerats som byggnad i själva verket inte är någon byggnad, dvs de är falska detektioner. Vid den manuella genomgången kunde 30 st av dessa identifieras som objekt tillverkade eller utplacerade av människor, t ex fordon, containrar och timmerhögar. Dessa felklassificeringar är en direkt konsekvens av att de egenskaper som klassen ”byggnad” associerats med i de olika klassificeringsmetoderna (regelbundenhet, raka väggar, plana tak, avsaknad av markpunkter inuti byggnaden, etc.) även delas av andra typer av objekt. Ett möjligt sätt att komma till rätta med dylika problem är att ur tillgängliga sensordata även extrahera information om var byggnader inte förväntas finnas. Om man till exempel detekterar en väg och finner ett byggnadslikt objekt på denna, torde sannolikheten för att objektet är en lastbil vara högre än att det är en byggnad.

Återstår gör då de 20 objekt som är ”verkliga” falsklarm. Dessa utgörs till stor del av vegetationsområden vars spatiella egenskaper liknar byggnaders; täta och välansade träd och buskar kan (ofta i kombination med lägre laserdatadensitet för dessa objekt) helt enkelt se ut som en byggnad. Denna slutsats ligger väl i linje med de observationer som legat till grund för utvecklingen av den kombinerade lidar- och flygfotoklassificeringsmetoden i kapitel 2.1.3. Tyvärr fanns inga adekvata ortorektifierade flygfoton att tillgå för Norrköping, varför just denna klassificeringsmetod inte kunde jämföras med de rent lidarbaserade.

Tabell 3 sammanfattar klassificeringsprestandan för fusionsmetoden över detta mindre område med helt automatisk analys samt resultatet då felaktigheterna i Tabell 2 räknas bort.

De största felkällorna (55 % i testområdet) vid en automatisk analys verkar för de odetekterade kända objekten komma från begränsningar i lidarsystemets förmåga att erhålla mätdata från vissa typer av objekt. Detta pga att det för dessa objekt saknas mätpunkter för att de är skymda eller inte reflekterar strålning tillbaka till sensorn. Andelen objekt som skall finnas enligt facit men som i själva verket saknas i lidardatat verkar däremot vara liten. Objekt som klassificeras felaktigt eftersom de ligger i bildkanten utgör inget problem för analysen eftersom kantobjekt kommer att elimineras vid utvärderingen av det stora området. Vidare kan det vara svårt att få ett säkert mått på falsklarmsnivån eftersom stadsmiljön innehåller många av människan tillverkade objekt som saknas i byggnadsfacit (containers, trailers, fordon, etc) men som i sin struktur och geometri påminner om byggnader och därför klassificeras som byggnad av algoritmen.

Tabell 2. Manuell klassificering av objekt som enligt kommundata är kända objekt eller falska detektioner, vilka klassificeras annorlunda av den automatiska byggnadsklassificeraren.

	Antal	Procent
Odetekterade kända objekt	40	
Skydd byggnad	14	35,0%
Få mätpunkter	8	20,0%
Liten/låg byggnad	10	25,0%
Byggnaden finns ej i data	3	7,5%
Ligger i bildkant	5	12,5%
Falska detektioner	50	
Naturliga objekt (träd, buskar, vatten)	20	40,0%
Tillverkade/arrangerade objekt (t ex fordon, container)	30	60,0%

Tabell 3. Resultat från automatisk utvärdering och manuell analys av ett mindre testområde. Det lägre antalet kända objekt i samband med den manuella utvärderingen svarar mot de 30 byggnader som skall finnas enligt "facit" men som bedömts vara omöjliga eller mycket svåra att hitta i en automatisk dataanalys eftersom de associeras med inga eller väldigt få mätpunkter.

	Automatisk utvärdering	Manuell utvärdering
Antal kända objekt	195	165
Detekterade kända objekt	155	155
Falska detektioner	50	20
Antal odetekterade kända objekt	40	10
Pd	0,79	0,94
FAR [km ²]	62	25

2.3.2.2 Resultat för hela området

Efter den inledande analysen av det mindre testområdet genomfördes den automatiska prestandautvärderingen på det stora datasetet med LIDAR-data från ett ca 57 km² stort område över Norrköping med klassificeringsresultat från fyra olika klassificeringsmetoder, "2003", "2006", "2007" samt "Fusion" (se kapitel 2.1.2 för mer detaljer och referenshänvisningar avseende dessa). Dessutom redovisas resultatet efter det sista steget – byggnadsrekonstruktionen.

Resultaten från den manuella genomgången av de automatiskt framtagna prestandamått för det mindre testområdet visar att en jämförelse av klassificeringsresultat med underlaget från kommunen måste tolkas med viss försiktighet.

De övergripande prestandamått från utvärderingen för dessa klassificerare finns sammanfattade i Tabell 4. Denna visar antal kända objekt i underlaget från kommunen, ungefär 14000 st. Det exakta antalet kända objekt varierar mellan de olika klassificeringsmetoderna eftersom antalet objekt som hamnar i kanten av

data och därför ignoreras varierar. Tabellen visar också antal detekterade kända objekt, antal falska detektioner, utvärderingsområdets storlek, andel av pixlarna hos detekterade kända byggnader som hamnar utanför objektet (ett mått som visar hur väl de klassificerade objektets form stämmer överens med facit), sannolikhet för detektion och falsklarmsrisk.

Tabell 4. Övergripande prestandamått.

	2003	2006	2007	Fusion	Byggnadsrek.
Antal kända objekt	14077	14108	14046	14039	14042
Antal detekterade kända objekt	11690	9892	11388	11251	10909
Antal falska detektioner	9596	2527	3690	3109	2231
Area [km ²]	57,080	57,080	57,080	57,080	57,080
Andel detekterade pixlar utanför	0,118	0,114	0,154	0,164	0,180
Pd:	0,830	0,701	0,811	0,801	0,777
FAR [km ⁻²]	168,115	44,271	64,646	54,467	39,086

Metoden ”2003” ger den bästa detektionssannolikheten (83 %) men också den klart högsta falsklarmsrisken (168 falsklarm per km²). Metoden ”2006” detekterar det minsta antalet kända byggnader, 70 %, men har samtidigt den lägsta falsklarmsrisken med 44 falsklarm per km². Den tredje klassificeringsmetoden ”2007” ger en detektionssannolikhet på 81 % och en falsklarmsrisk på 65 falsklarm per km² vilket är det bästa resultatet för de tre grundmetoderna. Den fjärde metoden ”Fusion” använder det fusionerade klassificeringsresultatet från de tre övriga metoderna och ger den bästa sammanlagda prestandan med 80 % sannolikhet för detektion och 54 falsklarm per km². Detta resultat ligger i nivå med resultatet från utvärderingen över det mindre testområdet och bekräftar den subjektiva erfarenheten som motiverade utvecklingen av fusionsmetoden från början, nämligen att reducera antalet falsklarm. Poängteras i detta sammanhang bör att ingen av metoderna explicit tränats på det aktuella datasetet för att prestera så bra som möjligt samt att fusionen gjorts med en enkel majoritetsröstning där alla metoder har lika stor vikt; man kan även tänka sig ett system där respektive klassificerare viktas i förhållande till hur pålitlig den bedöms/förväntas vara. Notera att i byggnadsrekonstruktionssteget har några objekt som tidigare klassificerats som byggnad förkastats. En vanlig anledning till detta är att objektet, trots att det mycket väl kan vara en byggnad, innehåller så få mätpunkter så att det helt enkelt inte går att bestämma dess geometri. En annan anledning är att den noggrannare (och mer tidskrävande) analysen av objektet i byggnadsrekonstruktionen ger vid handen att objektets geometri är oförenlig med en byggnad; det kan t ex vara vegetation som tidigare felklassificerats som byggnad.

I bilagan redovisas för varje klassificeringsmetod ett antal beskrivande egenskaper beräknade på de detekterade objekten. Objekten har delats in i fem olika typer:

1. Odetekterade kända objekt

Finns i underlaget från kommunen men har inte detekterats av algoritmen

2. **Detekterade kända objekt utanför**

Delar av detekterade kända objekt som ligger utanför byggnaden enligt facit

3. **Detekterade objekt innanför**

Delar av detekterade objekt som ligger innanför byggnaden enligt facit

4. **Falska detektioner**

Detekterade objekt som inte finns i underlaget från kommunen

5. **Detekterade objekt långt utanför**

Delar av detekterade kända objekt som ligger mer än 2,5 m från den kända byggnaden

För varje objekt har ett antal egenskaper beräknats:

1. **Area** – Storlek på det detekterade objektet i m^2
2. **zMinHeightMin** – Medelhöjd för zMin för de 25 % lägsta objektpixlarna
3. **zMaxHeightMin** – Medelhöjd för zMax för de 25 % lägsta objektpixlarna
4. **NgroundPixels** – Andel markpixlar i objektet (höjd < 0,25 m över mark)
5. **meanHeightZMin** – Medelhöjd över maken för zMin
6. **meanHeightZMax** – Medelhöjd över marken för zMax
7. **hitDensity** – Antal laserträffar per m^2 för objektet

Egenskaperna som presenteras i bilagan är medelvärden beräknade över alla detekterade objekt inom respektive delklass. För varje egenskap beräknades även ett histogram som visar spridningen hos de enskilda måtten. Exempel på histogram finns i Bilaga 1 (Figur 16-Figur 18).

Två av de mest intressanta delklasserna som påverkar detektionssannolikhet och falsklarmsnivå är de odetekterade kända objekten och falsklarmen. Genom att studera medelvärdena och histogrammen för de beräknade egenskaperna hos dessa två grupper och jämföra mot gruppen av de sanna detekterade objekten kan följande slutsatser dras:

- De detekterade kända objekten (innanför byggnad) innehåller nästan inga markpixlar ($\approx 1\%$). De har en medelhöjd på ungefär 5 m och höjden för de 25 % lägsta pixlarna är strax under 4 m.
- De odetekterade kända objekten har stor andel markpixlar ($\approx 20\%$), en medelhöjd runt 2 m och medelhöjden för de lägsta pixlarna är under 1 m.
- De falskt detekterade objekten innehåller förhållandevis få markpixlar ($\approx 5\%$), har en medelhöjd på ungefär 4 m och medelhöjden för de lägsta pixlarna är runt 3 m.

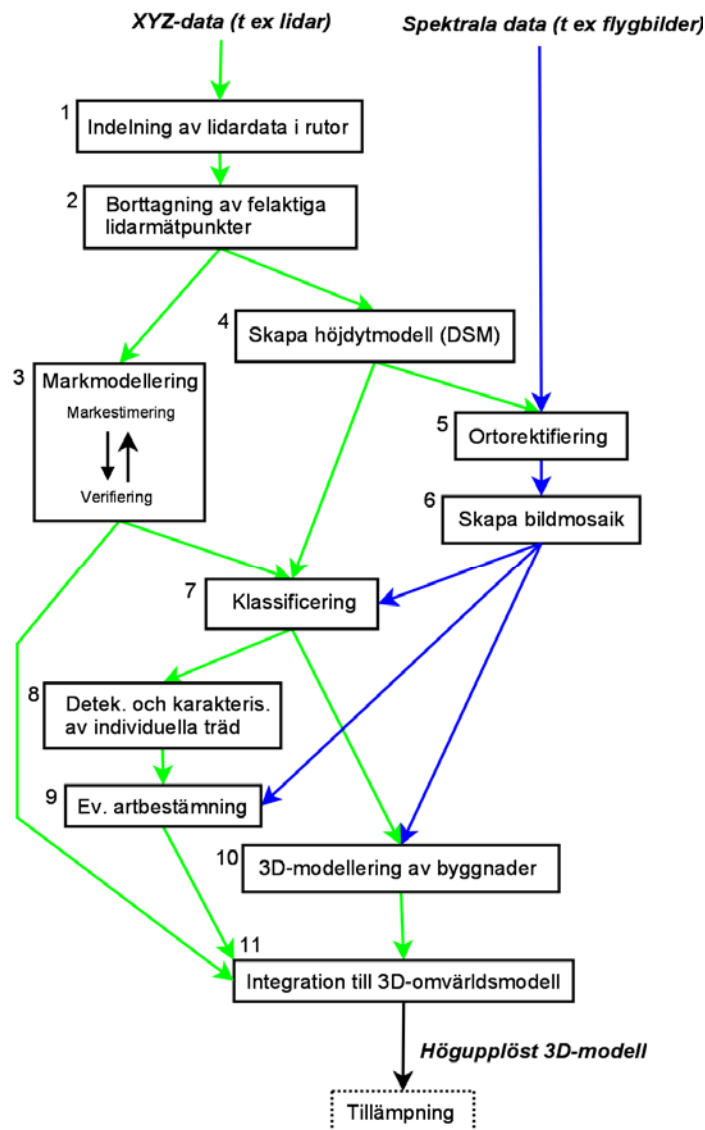
Dessa slutsatser bekräftar det som framkom vid den manuella genomgången av resultaten från det mindre testområdet i centrala Norrköping. De odetekterade kända objekten är i många fall väldigt låga. Om algoritmen skulle detektera dessa skulle den också med stor sannolikhet generera ännu fler falska detektioner från mindre fordon och dylikt. Vidare antyder egenskapsvärdena för de falska detektionerna att dessa objekt till mångt och mycket liknar byggnader.

Notera att de ovan angivna prestandavärdena svarar mot *det totala systemets förmåga att på ett korrekt sätt klassificera de byggnader som existerar i underlaget från kommunen*, men om det däremot gäller att utvärdera klassificerarnas absoluta prestanda att hitta byggnader måste hänsyn tas till att många (uppemot 55 % enligt lilla utvärderingen) av de byggnader som inte detekteras saknas i lidardata pga att de är skymda eller att materialet hos objekten gör att laserstrålning inte reflekteras tillbaka till sensorn. Utvärderingen gör det

ändå möjligt att objektivet jämföra de olika klassificerarnas prestanda relativt varandra. Faktum är att det förväntade antalet falska detektioner relativt facit *bör* vara relativt högt med existerande metoder; stadsmiljön innehåller många byggnadslika objekt (containers, trailers, bilar, lastbilar, torgstånd, etc.) som med nuvarande klassificeringsmetoder inte kan skiljas från byggnader.

3 Omvärldsmodelleringsprocessen

Detta kapitel syftar till att ge en översikt av den databearbetningskedja från sensordata till omvärldsmodell som nyttjats inom projektet. Figur 15 nedan visar en schematisk beskrivning av kedjan med de huvudsakliga databearbetningsstegen. Avsnittsnumreringen i det följande associeras med motsvarande steg i figuren.



Figur 15. Schematisk beskrivning av omvärldsmodelleringskedjan – från sensordata till omvärldsmodell.

3.1 Uppdelning av rådata i mindre områden

För att få en hanterlig mängd lidardata att arbeta på sker först en uppdelning av hela datamängden i mindre ”rutor”, som var och en svarar mot ett tämligen

begränsat geografiskt område, typiskt $200 \times 200 \text{ m}^2$. Dessutom läggs en kant på runt om varje ruta för att minimera effekten av diverse klassificeringsfel som kan uppträda i kanten av rutorna. Märk att valet av kantjocklek har en direkt påverkan på beräkningstiden i vart och ett av de efterföljande stegen, och i praktiken blir det en avvägning mellan en smal kant (för att spara tid) och en bred kant (för att få så god dataanalyskvalitet som möjligt). En vanlig använd kantjocklek är 20 m.

3.2 Borttagning av felaktiga lasermät punkter

Det är viktigt att tidigt i kedjan filtrera bort ”felaktiga” mätpunkter, sk *outliers*, som annars skulle kunna försämra resultatet i ett eller flera av de efterföljande stegen. Felaktiga mätpunkter uppkommer typiskt pga att laserstrålen träffar fåglar (ger mätpunkter som hamnar högt ovan marken) alternativt studsar fler än en gång, t ex i fönster eller på vattenytor, innan den detekteras och därigenom ger upphov till ett för stort avstånd (ger punkter som hamnar under marken).

3.3 Markmodell

Ett av de mest centrala stegen i processen att generera en tredimensionell omvärldsmo del från lidardata är att producera en digital mo del av den underliggande markytan, en sk DTM (eng. Digital Terrain Model). Målet är här att ta fram en representation av terrängen där alla objekt (hus, träd, bilar, lyktstolpar etc.) skalats bort och där återstoden motsvarar en yta som följer den verkliga markytans undulation. Att denna mo del är så korrekt som möjligt är av yttersta vikt eftersom flera av de efterföljande bearbetningsstegen avsevärt underlättas eller är helt beroende av höjdmodellen. Dessutom är höjdmodellen en av beståndsdelarna i den slutliga 3D-omvärldsmo del.

3.4 Ytmodell

Vissa tillämpningar kräver inte en fullständig mo del av omvärlden med alla objekt klassificerade och explicit representerade som ett 3D-objekt. För t ex siktlinjesberäkningar eller visualisering av sensordata kan en sk *ytmodell* eller DSM (eng. Digital Surface Model) vara adekvat. På samma sätt som en DTM (markmo del) återger markhöjden i varje position innehåller en DSM höjdvärdena för det högst belägna objektet i varje position.

3.5 Ortorektifiering

För att flygbilder ska kunna användas tillsammans med lidardata för analys ner på pixelnivå krävs god överensstämmelse mellan lidardata och flygfoton. Målet är att ha en mängd bilder som i varje pixel ser ut som om scenen betraktats rakt uppifrån. För att uppnå detta måste bilddata transformeras genom sk *ortorektifiering*.

3.6 Mosaik

För att bli underlätta samutnyttjande av flygbilder och lidardata är det önskvärt att kunna sammanfoga (ortorektifierade) flygbilder för ett visst geografiskt område till en sk *mosaik*. De ursprungliga flygbilderna har ofta relativt stort överlapp med varandra samt typiskt betydligt högre spatiell upplösning än lidardata varför det

ofta är praktiskt med en omsamlingsfunktion i mosaikverktyget för att reducera mängden data att bearbeta till en rimlig nivå. Dessutom gör överlappet mellan de ursprungliga bilderna att en viss position i den slutliga mosaikbilden ofta kan associeras med pixlar från flera av de ursprungliga bilderna. Dessa pixlar, som alla förväntas avbilda samma geografiska position, borde rimligen ha samma färg, men pga skylningseffekter, variationer i belysning och tittvinkel, felaktigheter i ortorektifieringsprocessen, osv, har de i praktiken ofta olika färg. Det är således svårt att veta vad "rätt" färg är, så pixlarna i den bild som bildmosaikverktyget producerar innehåller typiskt någon form av sammanvägning (t ex medelvärde) av den tillgängliga spektrala informationen i respektive pixel.

3.7 Klassificering

Detta steg syftar till att identifiera och klassificera relevanta objekt i scenen. De vanligaste objekttyperna är byggnader och träd. Vanligen antas att endast de mätpunkter som ligger över en viss nivå ovan mark (t ex 2 m) är de som intressanta för fortsatt analys. Utgående från ett antal regler om vad som kännetecknar objekten och gränserna mellan dem segmenteras först data. Närliggande punkter som bedöms höra ihop, dvs utgör ett segment, klassificeras sedan utgående från ett antal egenskaper, t ex baserade på att byggnader med sina generellt tämligen plana tak och rätta väggar är mer regelbundna än träd, att höjdvariationerna inom vegetation är större än inom en byggnad, att det oftast finns fler markträffar i vegetationsområden än inne i byggnader, osv.

Om man förfogar över ortorektifierade spektrala bilddata över samma område kan det lidarbaserade klassificeringsresultatet förbättras, genom att använda lidarresultatet för att träna den spektrala klassificeraren. Objekt som felklassificerats kan då korrigeras till rätt klass genom att deras spektrala egenskaper analyseras. Fenomenet att tät vegetation ibland (fel-)klassificeras som byggnad kan då t ex rättas till eftersom dessa objekt spektralt sett typiskt är väldigt lika närliggande träd även fast de mha lidar uppmätta geometriska egenskaperna skiljer sig.

Eftersom den lidarbaserade analysen dessutom identifierar var marken är belägen förenklas den spektrala klassificeringen på så sätt att problemet att skilja mellan vegetation och gräsmatta inte uppstår särskilt ofta.

Det är fullt möjligt att klassificera vissa objekt och områden utan kännedom om marknivån (särskilt större byggnader och vegetationsområden), men för att kunna bedöma höjden på objekten måste information om markhöjd finnas. Det är dessutom på markmodellen objekten ställs ut i den slutliga 3D-modellen.

3.8 Trädsegmentering

De områden som klassificerats som vegetation kan sedan delas upp i enskilda träd, som vart och ett associeras med bredd, höjd och position. Trädsegmentering utnyttjar att trädkronor ofta har ett "höjdmaximum" ungefär i mitten. Problemet är att vissa träd har en stor krona och därför ofta flera sådana lokala maxima, varför denna information inte kan användas direkt. Genom att lågpassfiltrera ("smeta ut") höjddata med ett antal olika filterstorlekar, därefter skatta kronans form genom att ansätta en trädkronmodell samt till sist bestämma vilken grad av lågpassfiltrering som ger den bästa passformen till modellen, får man en bättre segmentering.

3.9 Artbestämning

Om man förfogar över högupplösta lidardata och/eller spektrala data (gärna i NäraIR-området) kan man analysera varje enskilt träd mer ingående. Utifrån trädets form och färg kan man t ex skilja mellan tall, gran och lövträd.

3.10 Byggnadsrekonstruktion

De objekt som identifierats som troliga byggnader behandlas ytterligare i byggnadsrekonstruktionssteget, där en digital polygonmodell av varje enskild byggnad skapas. Denna modell utgår från klassificeringsresultatet och höjddata och delar upp respektive byggnad i ett antal taksegment, vart och ett med en viss lutning, form och position i förhållande till övriga taksegment.

På grund av att laserskotten inte träffat överallt på hela taket på byggnaden (utan ibland istället väggen och marken under takutsprånget) kan byggnadskanterna i laserdata te sig ganska oregelbundna, varför de rätas till i rekonstruktionssteget. Om man har tillgång till ortorektifierade flygfoton kan varje takpolygon tilldelas färg eller textur utifrån fotot. De slutliga (polygon-)modellerna sparas i ett välkänt format (COLLADA), vilket gör att de kan hanteras av en mängd olika kommersiella visualiseringsprogram.

3.11 Integration av objekt till 3D-modell

Det sista steget går ut på att sätta samman de i tidigare steg framtagna modellbeståndsdelarna – t ex markmodell, träd, byggnader, flygfoton – till en 3D-modell som sedan kan användas för olika typer av simuleringar. Ett exempel på ett vanligt förekommande dataformat för en sådan typ av modell är OpenFlight.

4 Slutsatser

Generellt kan sägas att de inom omvärldsmodelleringsprojektens utvecklade metoderna utgör en utmärkt stomme för sensordatabaserad omvärldsmodellering. En rad olika terrängstrukturer och objekt kan detekteras automatisk utifrån sensordata (lidardata) och de kan sedan sättas samman till 3D-omvärldsmodeller av olika typ, upplösning och format för användning i olika tillämpningar.

En fördjupad diskussion kring några särskilt intressanta delproblem med tillhörande slutsatser ges i det följande. I samband med detta presenteras även förslag på relevant framtida forskning inom området.

4.1 Sensordata gränssättande för modellens kvalitet

Forskning kring omvärldsmodellering baserad på *flygburen lidar* har bedrivits under ett antal år och nu lett fram till en punkt där insamlade lidardata tämligen framgångsrikt kan bearbetas till en omvärldsmodell. Det indikerar samtidigt att ytterligare insatser i samma riktning förväntas ge endast mindre förbättringar då den största begränsningen bedöms ligga i lidardata i sig. En nackdel med flygburen lidar är nämligen att vissa objekt ofta inte reflekterar tillräckligt mycket av laserstrålningen till mottagaren; tak av vissa material ”syns” ofta inte alls, och även väta kan ge upphov till att antalet registrerade laserträffar reduceras kraftigt. Till en viss gräns kan sådana fenomen utnyttjas för t ex klassificering – erfarenheten säger att områden med låg datadensitet ofta är antingen vatten eller byggnad – men risken för felaktigheter är betydande. Ett område med låg datadensitet kan nämligen också uppstå pga att det är skymt av närliggande högre objekt.

Data från flygburen lidarsensor är dessutom associerade med en osäkerhet/fel avseende positionen för mätpunkterna. Detta sensorbrus gör t ex att plana tak ofta inte ser helt plana ut, varför vissa (mindre) byggnader därför riskerar att undgå upptäckt. Omvänt kan bruset bidra till att andra objekt (som t ex träd) ser plana ut och därför riskerar att felklassificeras som byggnad.

En annan begränsning ligger i lasersystemets begränsade spektrala information. Vanligen används endast en våglängd, typiskt ca 1550 nm, vilket ger en monokromatisk intensitetsbild (jämför RGB som har tre komponenter). Dessutom beror den faktiska mängden mottagen reflekterad laserstrålning på en rad faktorer: t ex avståndet till den reflekterande ytan, hur stor del av strålen som träffar ytan och som därmed överhuvudtaget kan reflekteras tillbaka, ytans lutning i förhållande till strålens infall, ytans spridningsegenskaper, atmosfäriska förhållanden, den utsända pulsens energi, osv. Detta sammantaget gör det vanskligt att använda laserintensitetsinformationen i dataanalyssteget för att skilja mellan olika typer av objekt. Inledande experiment har dock visat att annan spektral information i t ex flygfoton kan användas tillsammans med lidardata för att på så sätt förbättra klassificeringen.

En annan intressant aspekt, som dock inte rymts inom ramen för projektet men som bedöms kunna tillföra ytterligare förbättringspotential, är en klassificering som utöver beskrivning och klassificering av objekt endast utifrån deras egenskaper tar hänsyn till var objekt befinner sig i förhållande till andra i scenen förekommande objekt och strukturer. Exempel på sådana regler skulle kunna vara

av typen ”byggnader och träd står sällan mitt på vägen”, ”om åtta objekt står på rad och sju av dem klassificerats som träd, är sannolikheten för att även det åttonde objektet är ett träd relativt stor”, osv.

En slutsats man kan dra är att man med endast data från flygburna lidarsystem kan detektera och identifiera de flesta i scenen ingående objekten, men att datat i sig ibland är otillräckligt för att dra rätt slutsatser. För att kunna uppnå en betydande förbättring av klassificeringsprestanda bör således fortsatt forskning om sensordatabaserad omvärldsmodellering fokusera på samutnyttjande av flera typer av sensorer samt ta hänsyn till var någonstans i scenen objekt förväntas, eller inte förväntas, förekomma.

4.2 Urbana miljöer är mer än byggnader och träd

Verksamheten i detta projekt, liksom tidigare, har fokuserat på två klasser av objekt: byggnader och träd. Vissa ansatser har gjorts med att detektera andra typer av objekt, t ex ledningar och lyktstolpar, men endast med begränsad framgång. I praktiken har detta resulterat i ett treklassproblem – byggnad, vegetation eller okänd. Det har dessutom visat sig vara enklare att detektera byggnader än vegetation, varför allt som inte bedöms vara byggnad därför till att börja med antas vara vegetation. Denna ”vegetation” analyseras sedan vidare för att identifiera objekt som pga regelbundenhet, begränsad storlek eller något annat kriterium inte bedöms kunna vara vegetation (det kan t ex handla om trappor, antenner, bilar, spårvagnar, lyftkranar, etc.). Många av dessa objekt är ofta inbördes tämligen olika varför det är svårt att definiera klasser för dem. I nuläget förkastas därför dessa objekt. En möjlig lösning skulle kunna vara en form av ”hybridmodell” där alla identifierade träd representeras med en specifik trädmodell (dvs precis som nu) medan vart och ett av objekten i klassen ”övrigt” representeras av en geometrisk modell som konstrueras utifrån deras respektive mätpunkter. Vinsten med detta vore att trots att man inte vet att ett visst objekt är, säg, en lyftkran så kommer ändå lyftkranens geometri med i modellen.

Slutsatsen blir att man med byggnader och träd kan framställa realistiska modeller, men att antalet objektstyper i omvärldsmodellen ändå bör ökas för att uppnå ökad realism och ökad närvarokänsla.

4.3 Olika tillämpningar medför olika krav på detaljrikedom och noggrannhet

Även om målet med omvärldsmodelleringsverksamheten är att utveckla metoder för framställning av *högupplösta* modeller förekommer i praktiken många tillämpningar där hög detaljnivå inte alls är nödvändigt utan rent av kan vara negativt – enklare modeller gör det t ex enklare att uppnå realtidsprestanda. I sådana tillämpningar är det således ofta lämpligare med enklare modeller.

Den på FOI utvecklade metoden för byggnadsrekonstruktion syftar till att så väl som möjligt approximeras och beskriva de i scenen förekommande byggnaderna utifrån de mätdata som associeras med respektive byggnad. Metoden bygger i stort sett bara på antaganden om att tak består av styckvis plana segment och att väggar utgörs av horisontella segment. Ingenting antas om antalet taksegment, antalet väggsegment eller deras inbördes riktning vilket resulterar i en flexibel metod som klarar att anpassa sig till byggnader med komplicerad form, dock med

begränsningen att approximationen sker med styckvis linjära strukturer: tak och väggar. Ofta är detta inte begränsande, men för att bättre beskriva byggnader med en avvikande form (t ex cylindriska torn, byggnader med runda hörn och i sin mer extrema form skapelser som Globen) måste metoden utvidgas till att hantera icke-linjära ytor. Principiellt vore en sådan utveckling ganska rättfram men problemet har ej ännu adresserats inom ramen för omvärldsmodelleringsverksamheten, delvis för att något uttalat behov inte funnits.

Genom att dessutom komplettera metoden med antaganden om mer eller mindre sannolika byggnadsformer skulle ytterligare förbättringar relativt enkelt kunna uppnås. Ett typiskt fenomen med den nuvarande metoden är att de delar av en byggnad som är skyddad (t ex under ett träd) ofta inte kommer med i byggnadsmodellen; metoden använder *endast de tillgängliga mätdata* för att skatta den mest lämpliga modellen. Genom att t ex införa krav på symmetrier eller regelbundenhet – de allra flesta hus har väggar som är antingen vinkelräta eller parallella med varandra – skulle byggnadsmodellernas form bli mer realistisk.

Det är också rimligt att anta att om byggnadsmodellerna görs alltmer geometriskt korrekta kommer önskemål och krav ställas på texturering av dessa. Inom projektet har metoder för framställning av byggnadsmodeller med texturerade eller färgsatta tak utvecklats som resulterat i förmågan att framställa omvärldsmodeller som ger ett realistiskt intryck ovanifrån. Sedan en tid finns kommersiella aktörer som erbjuder ”snedfotografering” av stadsmiljöer. Sådana ”snedbilder” skulle kunna användas för att texturera väggarna på byggnadsmodellerna för att göra dem än mer realistiska.

Ett intressant uppslag för framtida forskning är således att kunna erbjuda modeller skräddarsydda för en viss tillämpning. Det kan t ex handla om att framställa mer geometriskt korrekta byggnader, automatisk texturering av väggar eller approximation av byggnader med enkla geometrier såsom rätblock.

Det är också viktigt att välja en lämplig modell för vegetationsområden. En geometriskt enkel modell med pålagd visuell textur räcker ofta gott för visualiseringsändamål och är dessutom inte särskilt beräkningskrävande, men för t ex sensorsimulering (t ex radar) ställs oftast andra, högre krav. Avvägningen mellan beräkningskomplexitet och simuleringskvalitet avgör då vilken typ av vegetationsmodell som är lämpligast.

4.4 Effektiv hantering av geodata och modeller

Forskningen, såväl inom omvärldsmodelleringsprojektet som internationellt, tillsammans med utvecklingen i den kommersiella sektorn, erbjuder idag ett antal verktyg och metodologier för att utifrån olika typer av data (sensordata, grundkartor, osv) framställa allsköns geografisk information för ett visst område. Detta får till följd att många olika aktörer redan idag kan erbjuda underlag som sedan kan sättas ihop till en 3D-modell. I samband med en operativ insats är det därför sannolikt att flera olika parter erbjuder geografiska underlag av olika kvalitet, upplösning, format, osv.

En mycket central fråga för framtiden är hur all tillgänglig geografisk information hanteras, lagras, konverteras, delas och används för att framställa omvärldsmodeller för en viss tillämpning, samt inte minst vilka konkreta krav på omvärldsmodeller och geografisk information olika tillämpningar ställer. Kunskap

om detta för FM är viktigt, inte bara för att kunna effektivisera och samordna sin verksamhet inom området, utan även för att kunna ställa rätt krav t ex i samband med beställningar till industrin och samverka med andra nationer. Ett naturligt första steg för att belysa detta vore att genomföra en inventering av användningen, försörjningen och behoven av geografisk information och omvärldsmodeller inom FM, FOI och FMV.

4.5 Taktiska/stridstekniska aspekter

Syftet med de databearbetningsmetoder som utvecklats inom omvärldsmodelleringsverksamheten på FOI har varit att utifrån sensordata snabbt och i hög grad automatiskt framställa omvärldsmodeller. Det tänkta scenariot har varit en insats i ett område för vilket det är önskvärt att framställa en 3D-omvärldsmodell även utan tillgång till någon geografisk information i form av t ex kartor. I ljuset av denna ambition har insamlingen av de lidardata som projektet använt skett mha en lågflygande helikopter som opererat rakt ovanför det aktuella området. Det är sannolikt att en sådan plattform och ett sådant mätförfarande inte skulle vara särskilt lämpliga i samband med en insats i ett okänt område. Det vore därför väldigt relevant att studera vad som är möjligt att uppnå med en annan typ av data, t ex lidardata från en snedtittande och högre flygande plattform. För det fall då det aktuella området är säkert, dvs datainsamlingen kan genomföras riskfritt, vore det också intressant att undersöka hur framställning av omvärldsmodeller utifrån sensordata från markbaserade/fordonsburna system kan ske. Denna frågeställning är starkt kopplad till konceptet Taktisk Kartering.

5 Omvärldsrelationer

Nedan redovisas några av de mest relevanta av projektets kontaktytor. Syftet är kunskapsutbyte, seminarier eller annan samverkan inom projektets intresseområde.

5.1 Nationellt

- *Markstridskolan Kvarn*
Kontakter finns med MSS (markstridsskolan) i Kvarn. Sedan flera år pågår ett samarbete kring att ta fram geografiskt underlag (kartor, 3D-modeller, etc) som kan användas för bl a träning, utbildning och studier samt i Markstridsskolans övriga utvecklingsarbete. För FOI finns också många vinster med detta samarbete, t ex data över olika geografiska områden för utveckling och test av databearbetningsmetoder, återkoppling avseende själva modellerna (upplösning, detaljrikedom, naturtrogenhet, etc), FoU kring sensorer och sensorsystem, kommunikation, ledning och beslutstöd.
- *Saab Bofors Dynamics*
Arbete med att jämföra prestanda för olika typer av höjdmätande sensorsystem (lidarsystem och passiva kamerasystem) har inletts. Initialt har ett mindre område av Kvarn-Prästtomta skjutfält analyserats.
- *FORAN Remote Sensing AB*
Goda relationer finns med detta bolag som grundats av f d medlemmar i projektet. Genom kontakter med FORAN RS möjliggörs bl a kunskapsutbyte och diskussioner kring eventuella framtida forskningsrelaterade samarbeten.
- *SLU, Umeå*
Tillsammans med bl a Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) har en gemensam forskningsansökan till Naturvårdsverket skickats in, som behandlar teknik för olika aspekter av lidar- och flygfotobaserad terrängkartering.
- *FLSC, FOI*
Ett antal gemensamma behov och önskemål beträffande omvärldsmodeller har identifierats, bl a avseende leverans av en 3D-modell av urban miljö till FLSC för användning/test i deras simulatormiljö.
- *Citilab*
Dialog förs med Citilab i Norrköping kring möjligheterna att använda en inom projektet framtagna omvärldsmodell för visualiserings-tillämpningar på Norrköpings visualiseringcentrum som kommer öppna under andra halvåret 2009.

5.2 Internationellt

- *NATO-gruppen SET-118 "3D Modeling for Urban Terrain"*
Inom ramen för denna grupps arbete har bl a en gemensam mätdatabas upprättats som ligger till grund för diskussioner och kunskapsutbyte inom

gruppen, avseende olika aspekter på modellering av urban miljö med olika typer av sensordata, bl a flygbilder, radar- och lidardata.

- *NATO-gruppen SET-132 "Imaging LADAR Technology & Algorithms For Tactical Applications"*
FOIs deltagande i denna grupp leder bl a till ökad tillgång till relevanta, från luften insamlade, lidardata. Detta möjliggör i sin tur jämförelse av och diskussion kring olika databearbetningstekniker för omvärldsmodelleringsändamål.

6 Kunskapsöverföring och stöd

Projektet bidrar med kunskap, metoder och särskilt framställda högupplösta omvärldsmodeller till andra FoT-projekt inom FOI. Detta gör det möjligt för dessa projekt att genomföra mer realistiska och omfattande studier och utvecklingsarbeten. Försvarmakten har som kund fått, tack vare möjligheten till realistisk 3D-visualisering av olika scenarion, förbättrade möjligheter att tillgodogöra sig forskningsresultaten från FOI.

Nedan redovisas projektverksamheter inom och utanför FOI som erhållit stöd samt hjälp med utveckling av omvärldsmodeller.

6.1 Kunskapsöverföring och stöd inom FoT

- *SEMARK (FoT Sensorer och signaturanpassning)*
Medlemmar i projektgruppen har medverkat med stöd, förbättringar, och modifieringar avseende geodataunderlag och omvärldsmodeller för sensorsimuleringar inom SEMARK. Stödet har inte minst bestått i underlag för att kunna simulera radarsignaturer från vegetationsområden.
- *Simuleringsbaserat beslutstöd i realtid (FoT Operationsanalys, modellering och simulering)*
Underlag avseende 2D-modeller (markprojektioner) av byggnader i Norrköping har levererats till ovan nämnda projekt.
- *Optisk Signaturanlys (FoT Sensorer och signaturanpassning)*
Underlag avseende höjddata och byggnadsmodeller har levererats till ovan nämnda projekt, i syfte att stödja arbetet med texturering av byggnader. Dessutom förs en kontinuerlig dialog kring bl a framtida projektgemensamma forskningsfrågor, arbetsflöden och dataformat.
- *LedDoV (FoT Ledning med MSI)*
Ovan nämnda projekt har stötts genom leverans av underlag till en 3D-modell som tjänat som virtuell gemensam spelplats vid demonstrationer av forskningsresultat från FOI och FHS. En demonstration inom LedDoV har hållits i Enköping under hösten 2008.
- *Koncept, metoder och verktyg för effektbaserad ledning (FoT Ledning med MSI)*
Personal ur omvärldsmodelleringsprojektet driver inom ramen för ovan nämnda projekt en studie kring Taktisk Kartering.

6.2 Kunskapsöverföring och stöd till FM/FMV

- *MSS Kvarn*
Underlag till en 3D-modell av Kvarns skjutfält levererades under 2007.

6.3 Kunskapsöverföring och stöd, övrigt

- *BioSAR (ESA-projekt)*
Som stöd för en utvärdering av radarbaserad skogsinventering inom ESA-projektet BioSAR 2007 har olika typer av terrängdata tagits fram genom databehandling av lidardata, bl a topografi och vegetationshöjd. Projektet BioSAR 2007 finansierades av ESA (European Space Agency) och rörde det skogliga testområdet Remningstorp i Västergötland.

7 Kvalitetssäkring

7.1 Uppsatser (konferensbidrag, tidskriftartiklar, etc)

- Brattberg O., Tolt G., "Terrain classification using airborne lidar data and aerial imagery", XXIst International Society of Photogrammetry and Remote Sensing Congress, Beijing, China, July 2008.
- Tolt G., Söderman U., Ahlberg S., "3D Urban Models from Laser Radar Data", Urban Remote Sensing Joint Event, Paris, France, April 2007.

7.2 Presentationer

- Tolt G., "Syntetiska omgivningar för säkerhetstillämpningar", SeMer Workshop, Kista, Mars 2007.
- Chevalier T., "Sensor Planning Supported By A High Resolution Environment Model", presented at Defence Imagery 2007, London, UK, 18-20 Sept 2007.
Särskild inbjudan
- Tolt G., "Automatic Mapping and Modelling Using Airborne Sensor Data", ITEC Defence Training , Stockholm, June 2008.

7.3 Internationell utvärdering

Inom FOI har under 2008 en internationell utvärdering av FOIs M&S-verksamhet genomförts. Den i samband med utvärderingen definierade Sensorsystem-simuleringsgruppen, inom vilken omvärldsmodelleringsverksamheten är en avgörande komponent för bl a sensorsimulering, förärades betyget "Very good". Utvärderingsgruppen poängterade särskilt det internationella erkännandet av FOIs verksamhet inom omvärldsmodellering.

8 Referenser

Brandin, M., Hamrén, R., "Classification of Ground Objects Using Laser Radar Data", Examensarbete, Linköpings universitet, LITH-ISY-EX-3372-2003.

Elmqvist M., "Ground surface estimation from airborne laser scanner data using active shape models", Photogrammetric Computer Vision – ISPRS Commission III Symposium, Vol. XXXIV, part A, pp. 114-118, 2002.

Landgård, J., "Segmentering och klassificering av Lidar-data", Examensarbete, Linköpings universitet, LITH-ISY-EX-YY/3729-SE, 2005.

Persson, Å., Holmgren, J., Söderman, U., "Detecting and Measuring Individual Trees Using an Airborne Laser Scanner", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 68, No. 9, pp. 925-932, sept 2002.

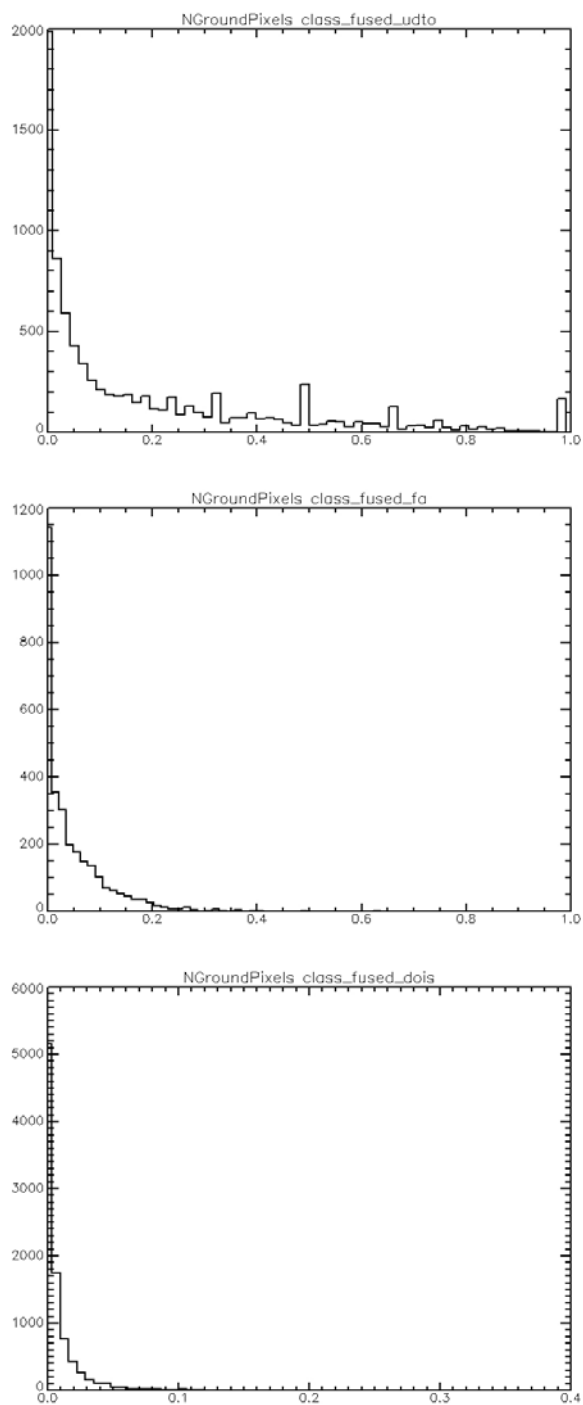
Ruhe, J., Nordin, J., "Classification of Points Acquired by Airborne Laser Systems", Examensarbete, Linköpings universitet, LITH-ISY-EX--07/3874—SE, 2007.

Söderman U., Ahlberg S., Persson Å., Tolt G., "Omvärldsmodellering / Dynamisk Terräng – slutrapport", FOI-R--2170--SE, December 2006.

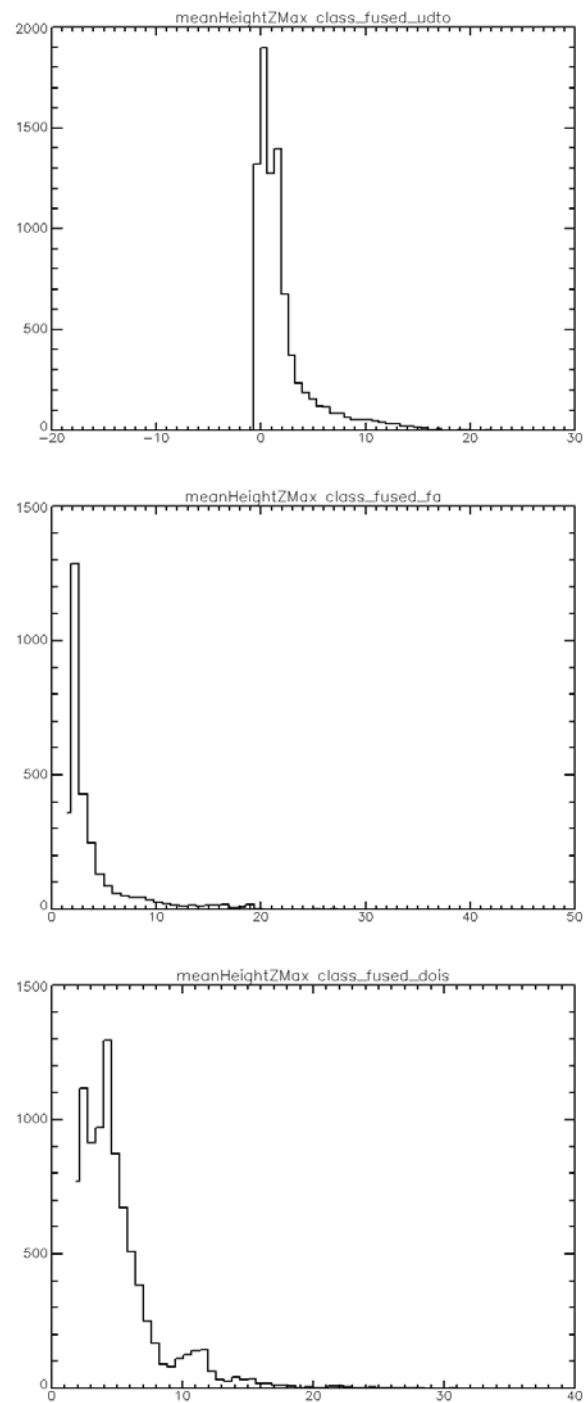
Tolt G., Persson Å., Landgård J., Söderman U., "Segmentation and classification of airborne laser scanner data for ground and building detection", Proc. of SPIE vol. 6214, Laser Radar Technology and Applications XI, Kissimmee, FL, USA, 2006.

Bilaga: Utvärderingsresultat för Norrköping

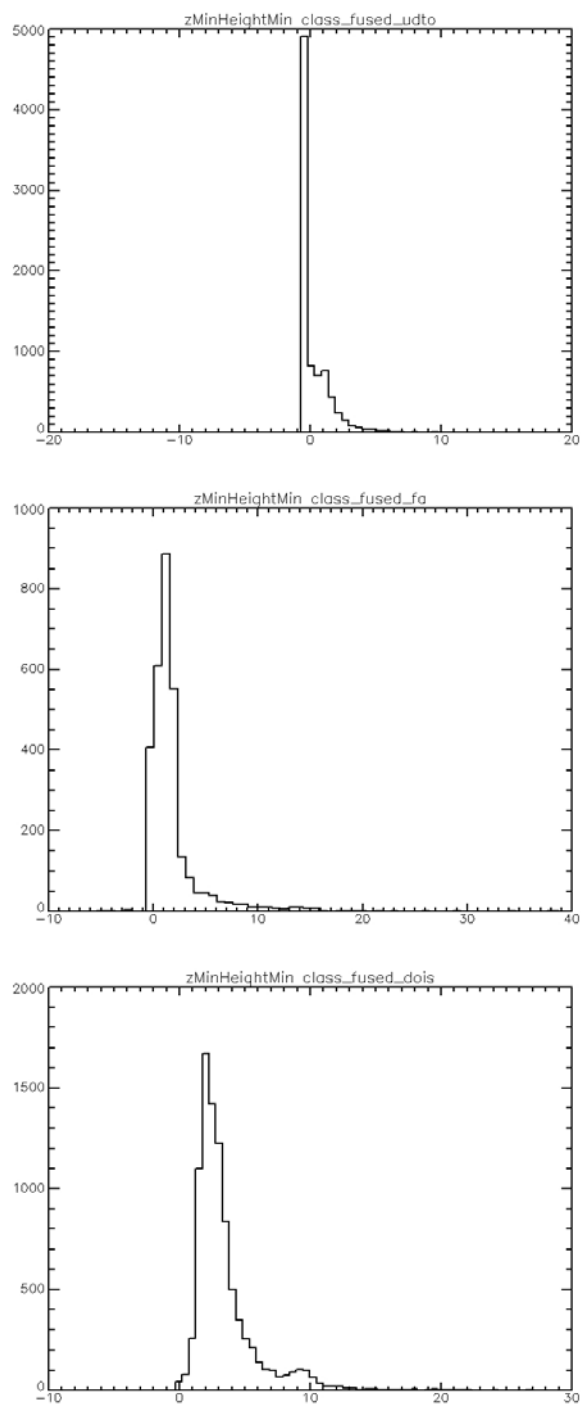
	2003	2006	2007	Fusion	Byggnadsrek.	
Odetekterade kända objekt						
Area: [m ²]	21,859	23,646	42,846	27,226	33,991	1
zMinHeightMin: [m]	0,476	0,555	0,903	0,650	1,106	2
zMaxHeightMin: [m]	0,747	0,737	1,331	0,918	1,684	3
NGroundPixels:	0,201	0,241	0,128	0,198	0,107	4
meanHeightZMin: [m]	2,267	1,609	2,695	1,953	2,907	5
meanHeightZMax: [m]	2,836	1,835	3,258	2,279	3,427	6
hitDensity: [m ⁻²]	15,289	13,782	11,686	12,612	14,014	7
Detekterade objekt utanför						
Area: [m ²]	79,483	81,190	80,731	93,571	112,388	1
zMinHeightMin: [m]	0,765	0,747	0,314	0,360	0,104	2
zMaxHeightMin: [m]	3,112	3,068	1,746	1,913	0,382	3
NGroundPixels:	0,135	0,120	0,177	0,160	0,216	4
meanHeightZMin: [m]	3,064	3,300	2,735	2,782	2,229	5
meanHeightZMax: [m]	4,254	4,651	3,915	3,972	3,094	6
hitDensity: [m ⁻²]	20,678	19,858	21,357	19,186	17,076	7
Detekterade objekt innanför						
Area: [m ²]	340,261	393,906	370,828	385,086	387,264	1
zMinHeightMin: [m]	3,746	4,006	3,719	3,719	3,710	2
zMaxHeightMin: [m]	4,138	4,411	4,111	4,125	4,085	3
NGroundPixels:	0,008	0,007	0,012	0,011	0,011	4
meanHeightZMin: [m]	5,111	5,531	5,262	5,295	5,316	5
meanHeightZMax: [m]	5,246	5,686	5,420	5,448	5,460	6
hitDensity: [m ⁻²]	13,651	13,703	14,369	13,774	13,806	7
Falska detektioner						
Area: [m ²]	86,092	206,091	127,262	148,507	159,337	1
zMinHeightMin: [m]	2,072	2,865	1,527	2,200	1,622	2
zMaxHeightMin: [m]	2,854	4,065	2,438	3,206	2,254	3
NGroundPixels:	0,030	0,041	0,075	0,053	0,066	4
meanHeightZMin: [m]	3,338	4,784	3,136	3,871	3,368	5
meanHeightZMax: [m]	3,585	5,377	3,570	4,281	3,630	6
hitDensity: [m ⁻²]	12,316	15,119	17,937	15,128	15,154	7
Detekterade objekt långt utanför						
Area: [m ²]	65,846	42,121	50,515	47,570	58,294	1
zMinHeightMin: [m]	1,424	1,273	0,732	0,798	0,366	2
zMaxHeightMin: [m]	2,953	3,187	1,792	2,067	0,729	3
NGroundPixels:	0,097	0,110	0,149	0,143	0,226	4
meanHeightZMin: [m]	3,043	3,249	2,465	2,569	1,918	5
meanHeightZMax: [m]	3,649	4,171	3,115	3,283	2,338	6
hitDensity: [m ⁻²]	17,428	19,124	19,721	18,302	16,377	7



Figur 16. Histogram över egenskapen NgroundPixels för de tre delklasserna odetekterade kända objekt (överst), falsklarm (mitten) och detekterade kända objekt (nederst).



Figur 17. Histogram över egenskapen meanHeightZMax för de tre delklasserna odetekterade kända objekt (överst), falsklarm (mitten) och detekterade kända objekt (nederst).



Figur 18. Histogram över egenskapen `zMinHeightMin` för de tre delklasserna odetekterade kända objekt (överst), falsklarm (mitten) och detekterade kända objekt (nederst).