



Fjärranalysforskning på Remningstorp – exempel från SLU

Håkan Olsson, Eva Lindberg, Jörgen Wallerman, Johan Holmgren

Arbetsrapport 479 2017

Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för skoglig resurshushållning
901 83 UMEÅ
www.slu.se/srh
Tfn: 090-786 81 00



ISSN 1401-1204
ISRN SLU-SRG-AR-479-SE

Fjärranalysforskning på Remningstorp – exempel från SLU

Håkan Olsson, Eva Lindberg, Jörgen Wallerman, Johan Holmgren

Nyckelord: Remningstorp, Fjärranalys, laser, radar, satellit, skogliga skattningar

Arbetsrapport: 479

Förord

Fjärranalysområdet befinner sig en snabb teknisk utveckling. För att utvärdera och utveckla nya tekniker inom laser-, radar- och bild-registrering för skogliga ändamål krävs försöksområden med väl inmätta referensdata. Fastigheten Remningstorp har, tack vare långvarigt stöd från Hildur och Sven Winquists stiftelse utvecklats till det främsta försöksområdet för skoglig fjärranalysforskning i Sverige, och dessutom till ett av de främsta områdena i Europa av detta slag.

I denna rapport sammanställs en delmängd av den fjärranalysforskning på Remningstorp som SLU medverkat i. Avsikten är att göra resultat som primärt har publicerats i vetenskapliga tidskrifter mera tillgängliga för intressenter inom i första hand det svenska skogsbruket. Rapporten bygger på bidrag från, och forskning utförd av, ett stort antal forskare. Vid avdelningen för skoglig fjärranalys vid SLU i Umeå har förutom författarna bland andra, Kenneth Olofsson, Ann-Helen Granholm, Mattias Nyström, Mona Forsman, Jonas Bohlin, Nils Lindgren, Mats Nilsson, Svetlana Saarela, Henrik Persson och Johan Fransson bidragit till den forskning som sammanfattas här.

Framtagandet av rapporten har stötts av EU-projektet Advanced SAR.

Umeå i juli 2018, författarna.

Innehållsförteckning

Förord.....	2
Sammanfattning	4
Inledning	5
Skattningar av skogliga data med areabaserade metoder.....	6
Skattningar av skogliga data med enskilda-träd metoder	9
Skattning av beståndsstruktur	11
Skattningar av trädslagsfördelningar	11
Skattning av ståndortsindex	13
Upptäckt av förändringar	14
Segmentering	15
Markbaserad laserskanning och fotogrammetri.....	16
Mera om radardata	16
Dataassimilering	18
Simulering av rymdlaser	18
Framtiden?	19
Erkännanden	19
Referenser	20

Sammanfattning

Fastigheten Remningstorp har tack vare långsiktigt stöd från Hildur och Sven Winquists stiftelse utvecklats till den främsta försöksplatsen i Sverige för skoglig fjärranalysforskning. En viktig resurs är de provtytor på fastigheten som återkommande fältinventerats med medel från stiftelsen och som utgör grunden för att olika typer av fjärranalysdata ska kunna utvärderas. Denna rapport är avsedd att som en vägvisare till forskningsstudier om modern fjärranalys som är gjorda på Remningstorp och som främst har publicerats i olika vetenskapliga tidskrifter.

Med flygburna laserskannerdata och fältinventerade provtytor kan skattningar av trädstorleks-relaterade variabler som höjd, virkesförråd och medeldiameter göras med en noggrannhet som anses tillfredställande för skogsbrukets behov. Försök på Remningstorp visade tidigt att noggrannheter om 12% kunde erhållas vid skattning av virkesförråd som utvärderades på 40 m radie provtytor. Förekomsten av en nationell markmodell från laserskanning har även gjort det möjligt att skatta skogliga data med andra fjärranalystekniker som främst mäter data som är relaterade till krontaketets höjd. Försöken på Remningstorp, samt likartade studier i Finland och Norge visar att dessa ”3D datakällor” rankar enligt följande när det gäller förmågan att skatta t.ex. virkesförråd, från den bästa till den sämsta:

- 3D punktmoln från flygburen laserskanning;
- 3D punktmoln från matchning av stereoregistreringar från mycket högupplösta satelliter;
- 3D punktmoln från matchning av flygbilder;
- 3D data från interferometerisk bearbetning av X-band satellitradar;
- 2D optiska satellitbilder som Sentinel 2 eller Landsat.

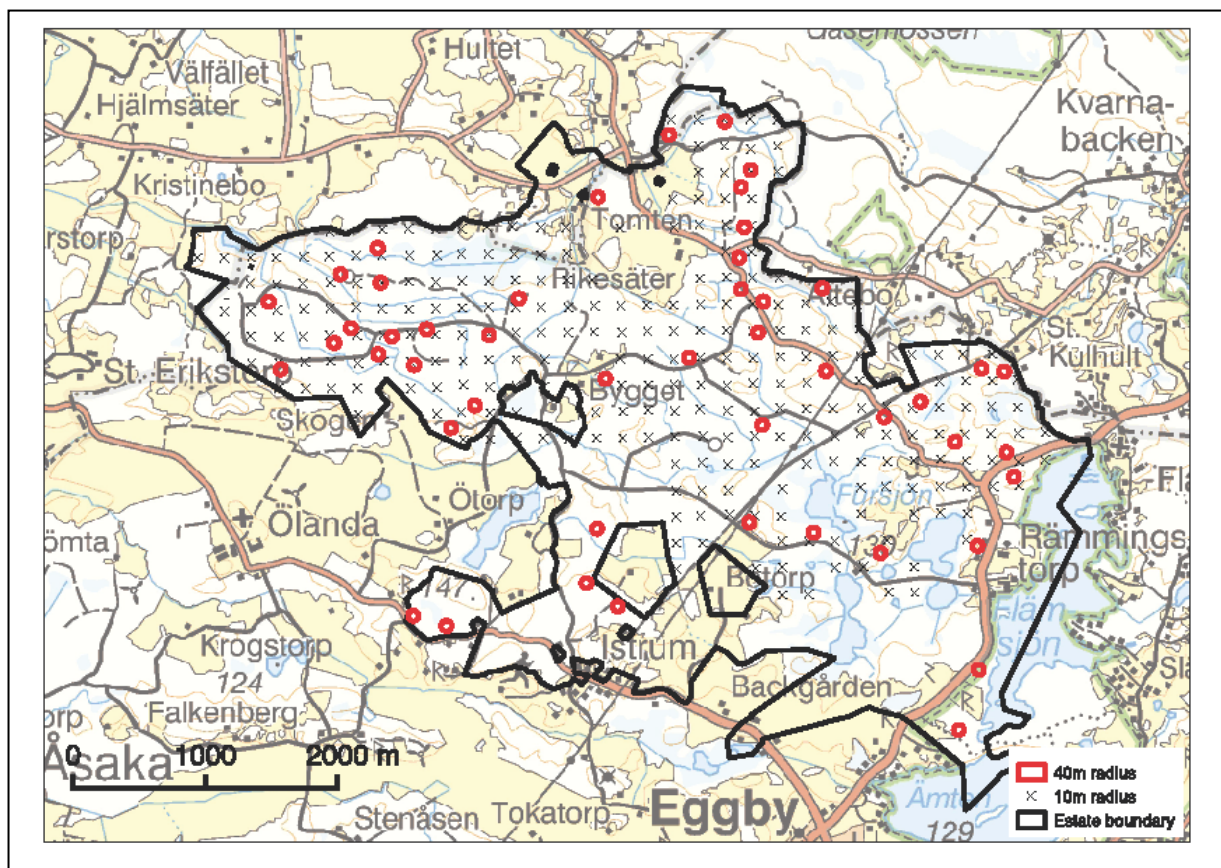
Av dessa datakällor har laserskanning bäst förmåga att även avspegla variationer i skogens täthet och skiktning, medan övriga datakällor kan ge starkt varierande resultat beroende på bl.a. dessa faktorer. Om t.ex. fotogrammetripunktmoln ger tillräckligt bra resultat för användning inom operationell skogsbruksplanering kan därför inte avgöras enbart med resultat från Remningstorp, där fastigheten domineras av väl skötta och mycket produktiva granskogar.

Vid försök på Remningstorp har även mycket bra skattningar erhållits genom att segmentera enskilda trädkronor i högupplösta laserdata, där ca 70% av stammarna, representerade 90% av volymen har kunnat hittas och mätas med automatiska metoder. Dessa försök visar dock även att andelen missade träd är starkt skogstypsberoende, men detta kan delvis kompenseras med så kallad semi-ITC, där man vid tilldelningen av skogliga data räknar med att vissa segment av trädkronor svarar mot mer än en trädstam.

Lovande resultat (ned till 1 cm RMSE) har även uppnåtts med markbaserad, eller personburen laserskanning av trädstammar. Med markbaserad eller mobil skanning kan därmed stammars form mätas för ett sampel av träd, som sedan kopplas automatiskt till motsvarande trädkronor från flygburen skanning.

Inledning

Fastigheten Remningstorp i Västergötland som ägs av Hildur och Sven Wingquists stiftelse (<http://wingquist.skogssallskapet.se/>) och förvaltas av Skogssällskapet har utvecklats till den främsta försöksplatsen för skoglig fjärranalysforskning i Sverige. Tack vare långvarigt stöd från stiftelsen har omfattande inventeringar av fältmätta referensytor kunnat göras på fastigheten. För närvarande är det främst ett systematiskt utlägg med 208 provytor med 10 m radie, samt 50 ytor med 40 m radie (Figur 1) som används i forskningen. Detta är en infrastruktur för fjärranalysforskning som attraherar nya projekt, vilket i sin tur gör att en stor mängd fjärranalysdata av olika slag också blir tillgängliga över tiden. Liknande "super test sites" finns t.ex. även i Våler i Norge och i Evo i Finland. I Sverige finns även ett nordligt testområde vid Krycklans avrinningsområde, utanför Vindeln, där finansieringen dock varit mera knuten till enstaka projekt.



Figur 1. Fastigheten Remningstorp med provytor med koordinatsatta träd som används vid fjärranalysforskning. Kryssen visar systematiskt utlagda 10 m radie provytor och cirkelarna visar 40 m radie provytor som är utlagda centralt i utvalda bestånd.

Data från Remningstorp har främst använts av Institutionen för skoglig resurshushållning vid SLU i Umeå, där avdelningen för skoglig fjärranalys ingår. Dessutom har radarfjärranalys-forskare vid Chalmers och FOI i Linköping i stor utsträckning använt data från fastigheten, oftast i samarbete med SLU. Även flera utländska fjärranalysprojekt har använt data från Remningstorp. Den totala mängden projekt är mycket omfattande, och en del av projekten är av mer grundläggande karaktär. På dessa sidor ges därför i första hand exempel på en del projekt och resultat från SLU som kan vara av intresse för

skogsbrukets bedömning av framtida fjärranalystekniker. Avsikten med denna rapport är även att den ska kunna hjälpa den intresserade att hitta de relevanta originalpublikationerna.

Skattningar av skogliga data med areabaserade metoder

Den så kallade areabaserade metoden för skattning av skogliga data har fått ett stort genomslag i skogsbruket. I första hand har den areabaserade metoden använts för skattning från flygburna laserdata, men metoden kan även användas för andra typer av fjärranalysdata som är väl korrelerade med de skogliga data som ska skattas, t.ex. 3D punktmoln från matchade flygbilder. Metoden bygger på att statistiska mått, ofta kallade metriker, beräknas för fjärranalysdata som så noggrant som möjligt täcker de respektive provytor som inventerats i fält. Därefter modelleras sambandet mellan fjärranalysetriker som förklarande variabler och olika skogliga variabler, t.ex. volym, eller grundyta, som förklarade variabler. Ofta görs modelleringen med regressionsanalys, men även mer automatiska metoder som t.ex. algoritmen Random Forest kan användas. När sambandet mellan fjärranalysdata och fältmätta provytor har etablerats, så används detta samband för att yttäckande prediktera skogliga data från rasterceller med fjärranalysdata.

Noggrannheten vid skattning av skogliga variabler anges ofta som RMSE i %:

$$RMSE (\%) = \frac{100}{\bar{V}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{V}_i - V_i)^2}{N}}$$

Där i detta exempel variabeln V kan stå för volym. Noggrannheten för en skattning blir bättre när en större provyta, eller ett helt bestånd används för utvärderingen. Noggrannheten beror även på skogstyp och lägesnoggrannhet mm för såväl använda provytor som fjärranalysdata. Man bör därför lägga märke till hur stora utvärderingsytor som olika studier använt, samt i första hand jämföra resultaten från olika fjärranalysdata där samma fältdata använts för jämförelsen. Vid nyindelning med traditionella manuella metoder brukar noggrannheten för volym-skattning på beståndsnivå bli kring 20%.

Skattningar med laserdata

Redan i början på 2000-talet visade Johan Holmgren med data från Remningstorp att volym kunde skattas med flygburna laserdata med ett RMSE om 22 % på provytenivå (Holmgren m.fl., 2003) och med ca 12 % RMSE för större ytor om 80×80 m. I det senare fallet, påverkades inte heller resultatet nämnvärt när data tunnades ut ned till 0,1 retur/m² (Holmgren, 2004).

Lindberg och Hollaus (2012) visade med laserdata från Remningstorp med 7 punkter/m² och provytor med 12 m radie att det var bättre att först beräkna ett raster med 0,5 x 0,5 m stora rasterceller och beräkna metriker på detta än att direkt beräkna metriker för alla punkter inom provytorna.

Data från Remningstorp har även använts vid utvärdering av de rikstäckande skogliga grunddata baserade på laserskanning och Riksskogstaxeringens provytor som SLU framställt för Skogsstyrelsen (Nilsson, m.fl., 2016).

Utvecklingen på laserskanningområdet är fortfarande mycket snabb. Hösten 2017 registrerades Remningstorp med Leical SPL100 som är ett flygburet laserskanningssystem som registrerar enskilda fotoner. Flygningen över Remningstorp var det första skogliga försöket i Europa med denna typ av sensor. En tidig utvärdering (Wästlund m.fl., 2018) visar att minst lika bra skattningar kan göras från

hög flyghöjd med denna nya teknik, som från lägre flyghöjd med hittillsvarande lasersystem. Dessutom så erhålls mycket täta laserskannerdata, vilket öppnar upp för en framtida operationell användning av enskilda-träd metoder.

Skattningar med 3D punktmoln från matchade flygbilder

Hur väl skogen kan skattas med 3D-punktmoln från digital fotogrammetri är ett mycket aktuellt ämne. Bohlin m.fl. (2012a) visade i en studie på Remningstorp att felet på provytanivå när fotogrammetripunktmoln och regressionsfunktioner använts för att skatta skogliga data var ca 9 % för trädhöjd och 13 % för volym. Detta goda resultat beror på att 3D punktmoln från matchade flygbilder är väl korrelerade med skogens höjd, de är dock mindre väl korrelerade med skogens täthet än laserdata. 3D punktmolnen från fotogrammetri kan därför inte skatta avvikande bestånd lika väl som laserdata.

Skattningar med 3D punktmoln från högupplösta satellitbilder

Det går även att beräkna 3D data från satellitbilder som registrerats från olika vinklar. Detta har visat sig fungera bäst med mycket högupplösande satellitbilder som har en pixelstorlek på någon meter, eller bättre. Persson och Perko (2016) gjorde skattningar för beståndshöjd med WorldView-2 satelliten, och Persson (2016) presenterade skattningar för bl.a. höjd, grundyta och volym som skattats med stereodata från Pleiad satelliterna. Både WorldView-2 och Pleiaderna producerar bilder med ca 50 cm pixlar från en pankromatisk sensor, som kan kombineras med färgbilder med lägre upplösning från samma instrument. WorldView och Pleiad- satelliterna kan registrera stereobilder genom att de riktas om när de passerar området som ska avbildas. Detta gör dem dock mindre lämpliga för att täcka mycket stora områden, men det är möjligt att även tillverka satelliter som kontinuerligt tittar i flera vinklar längs banspåret och de goda resultaten från stereoregistreringar med WorldView-2 och Pleiaderna indikerar potentialen för denna teknik. Kostnaden för att köpa en aktuell stereotäckning med WorldView-data över ett 15 km × 14 km stort område är ca 50 000 kr. Tabell 1 visar resultat för skattningar med stereodata från Pleiaderna i Remningstorp och Krycklan.

Tabell 1. Noggrannhet (RMSE (%)) för regressionsfunktioner baserade på matchade stereobilder med 0,5 m pixelstorlek från Pleiad-satelliterna, och fältdata från 10 m radie provytor (Persson, 2016) utvärderade på samma provytor med korsvalidering

	Förklarande variabler		Testområde	
	Mått från 3D-höjddata	Spektrala data	Remningstorp, Västergötland	Krycklan, Västerbotten
			RMSE (%)	
Grundytevägd medelhöjd	X		8,7	13,9
Grundytevägd medelhöjd	X	X	7,7	13,2
Grundyta	X		27,9	24,4
Grundyta	X	X	24,8	22,2
Trädbiomassa	X		31,0	28,6
Trädbiomassa	X	X	26,9	25,9

Den vanligaste typen av digitala fjärranalysdata är satellitbilder från satelliter med sensorer som registrerar 10-30 m pixlar, t.ex. Sentinel 2, Landsat och SPOT 1-5. Sentinel 2 och Landsat-bilder är dessutom gratis, och återkommer ofta tack vare stor scenbredd och i fallet Sentinel 2 också för att det är två satelliter. En jämförelse med dessa ”vanliga” satellitbilder är därför motiverat, se tabell 2 nedan. Dock så är dessa bilder ”2D” registreringar på motsvarande sätt som t.ex. ortofoton från flygbilder och bildernas information om volym och trädbiomassa beror mest på att stora träd ger mycket skuggor, och därmed mörkare bilder.

I tabell 2 finns även en jämförelse med skattningar med TanDEM-X InSAR. Detta är 3D data som fåtts från sambearbetning med interferometri från två radarsatelliter som registrerar samma område från två näraliggande parallella banspår, se vidare avsnittet ”Mera om radar”.

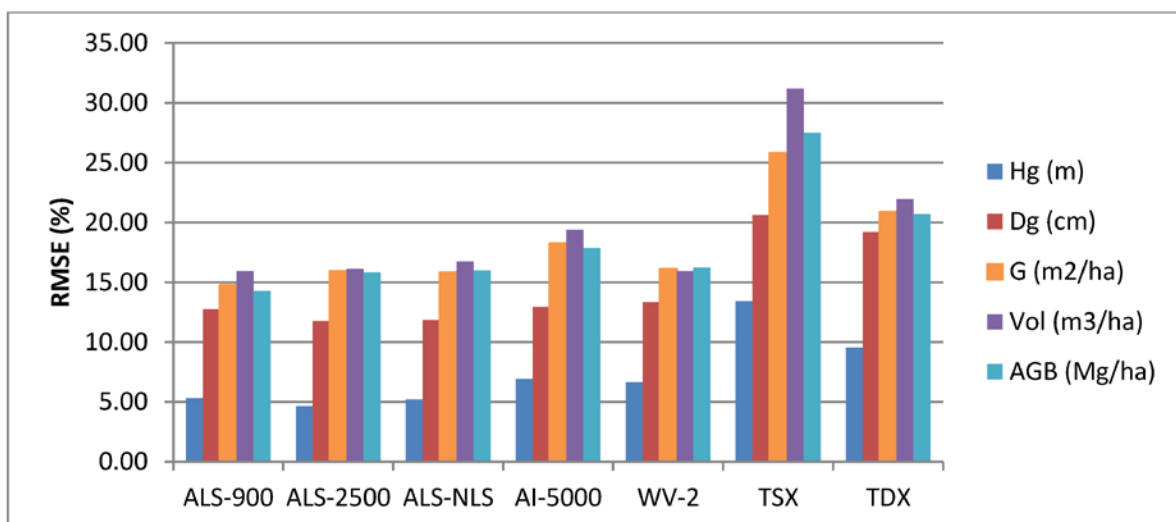
Tabell 2. Noggrannhet (RMSE %) för regressionsfunktioner för 10 m radie provytor för olika typer av fjärranalysdata (från Ehlers m.fl., 2018)

	Optiska satellitdata från SPOT 5 HRG (tre olika tidpunkter) RMSE (%)	TanDEM-X InSAR (tre olika tidpunkter) RMSE (%)	Flygburna laserdata från lantmäteriet, avlövad säsong RMSE (%)
Medeldiameter	25 – 29	24	17
Grundytevägd medelhöjd	17 – 21	14	6
Volym	44 – 47	40 – 45	19

Inom ramen för EU-projektet Advanced SAR, som även finansierat denna rapport, så har FGI i Finland gjort en jämförande studie (Yu m.fl., 2015, Figur 2) som visar att:

- Det är liten skillnad mellan skattningar från laserregistreringar från olika flyghöjder;
- Skattningar från 3D punkmoln från fotogrammetri blir något sämre än skattningar med laserdata;
- Skattningar från 3D satellitdata från World View blev bättre än skattningar från matchade flygbilder och nästan lika bra som laserdata;
- Skattningar med InSAR blev sämre än med 3D punktmoln från fotogrammetri;
- Sist i denna jämförelse kom radargrammetri, som är stereomatchning av radarbilder från två tittvinklar.

Att radargrammetri inte är lika bra som InSAR framgår även av Henrik Perssons avhandling (Persson 2014). Dock så var radargrammetri bättre för skattning av träd-biomassa än stereo data från SPOT HRS sensorn, som avbildade 10*10 m pixlar i två vinklar (framåt och bakåt), längs banspåret. Dessa resultat sammanfattas också i ett Fakta Skog (Persson m.fl, 2015). Även Rahlf m.fl., (2014) har jämförelse av skogliga skattningar i Norge med flera olika 3D datakällor fått liknande resultat som Yu m.fl., (2015).



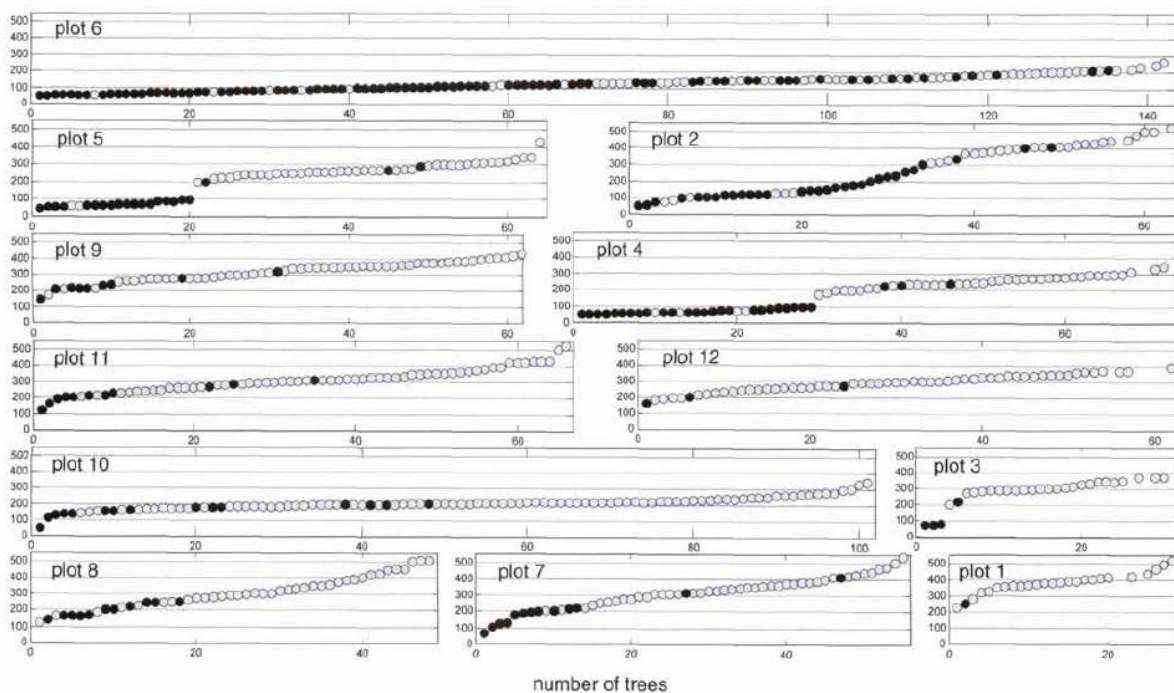
Figur 2. Skattningsnoggrannhet för provytor om 32×32 m, från testområdet Evo i Finland. De tre grupperna till vänster visar noggrannhet för laserdata med: 6 pulser/m² från 900 m höjd; 0,7 pulser/m² från 2500 m; och 0,8 pulser/m² från 1830-2200 m. Därefter följer resultat från 3D-punktmoln från digital fotogrammetri från flygfotografering (AI-5000) respektive från stereoregistrering med WorldView-2 satelliten (WV-2). Slutligen följer stereo-bearbetning av TanDEM-X radardata (TSX) och interferometrisk bearbetning av TanDEM-X radardata (TDX), från Yu m.fl. (2015).

Skattningar av skogliga data med enskilda-träd metoder

Johan Holmgren visade i sin avhandling år 2003 tillsammans med forskare från FOI att det gick bra att upptäcka och mäta enskilda träd i tätskannade laserdata. Totalt kunde ca 70 % av träden, som tillsammans representerade ca 90 % av volymen upptäckas och mätas automatiskt. Ett problem med enskilda-träd-metoder är dock att andelen upptäckta träd är beroende av beståndsstrukturen (Figur 3).

Den varierande andelen upptäckta träd kan vara en orsak till att enskilda-träd-metoder inte slagit igenom ännu. Det finns dock sätt att kompensera för denna effekt, bland annat genom så kallad semi-ITC, vilket innebär att de trädsegment som upptäcks i fjärranalysdata kan antas innehålla 0, 1 eller flera träd och att antalet träd för segment med olika egenskaper kalibreras mot fältmätningar.

I en senare studie (Holmgren och Lindberg, 2013) användes en ny metod för att automatiskt hitta segment med trädkronor. I den studien hittades 75% av träden, representerande 95% av stamvolymen. Sedan gjordes skattningen av skogliga data med semi-ITC, vilket innebar att ett detekterat segment antogs innehålla 0, 1 eller flera träd, enligt vad som erhålls då segmenten tränas mot fältmätningar. I denna studie erhöles relativa RMSE för provytor om 20 m radie enligt följande: volym 9%; grunddyta 7%; grundtyevägd medelhöjd 4%, stamdiameter 6%; och stamantal 15%.



Figur 3. Träd på provytor på Remningstorp som upptäckts (öppna cirklar) respektive inte upptäckts (fyllda cirklar) med analys på enskilda-träd-nivå av tät-skannade flygburna laserdata, Y-axlarna visar stamdiameter i mm och X-axlarna visar antal träd (Persson m.fl., 2002).

En ytterligare orsak till att enskilda-träd-metoder inte har slagit igenom ännu är att en tätare laserskanning än Lantmäteriets nationella laserskanning behövs. Om de enskilda träden inte bara ska upptäckas, utan också mätas, så behövs minst ca 5 laserreturer/m², vilket är ca tio gånger tätare än den laserskanning Lantmäteriet gjorde för den nationella höjdmodellen. Det skulle gå att skanna med denna täthet, även från hög höjd. I dagsläget har dock inte fjärranalysdata från enskilda träd efterfrågats av skogsbruket, men det finns mycket som talar för en utveckling i denna riktning. Ett skäl är att kopplingen till fältdata kan göras säkrare. Om fältdata insamlas med stammarnas positioner, t.ex. via marklaserskanning och fjärranalysdata också finns på enskilda-träd-nivå, så kan mönstret med trädstammar matchas automatiskt mot motsvarande trädkronor som upptäckts i fjärranalysdata från ovan. Även detta har visats med data från Remningstorp, (Lindberg m.fl., 2010, 2012a). Fjärranalysdata på enskilda-träd-nivå kan även matchas mot provytor med positionerade träd. En av fördelarna med

detta är att matchningen av trädmönstret minskar behovet av att använda en mycket noggrann GPS-utrustning för positionering av provytan. En intressant möjlighet är att använda skördardata som referens för fjärranalys-skattningar (Holmgren m.fl., 2012) och om även trädpositionerna kan fås från skördardata i framtiden, så blir detta ett starkt skäl för att även fjärranalysdatat ska analyseras på enskilda-träd-nivå.

Skattning av beståndsstruktur

Med flygburna laserdata finns det förutsättning att även skatta den vertikala fördelningen av barr, löv och grenar i ett bestånd. Lindberg m.fl. (2012b) visade att detta fungerade bättre med så kallade full vågforms laserdata där hela den returnerade laserpulsen samplats med små regelbundna intervall än då de punkter som vanligen returnerats av lasersystemet användes. Ännu bättre fungerade skattningen av vertikal struktur i trädsiktet om man även kompenserade för laserstrålens dämpning i trädkronorna.

Skattningar av trädslagsfördelningar

Med laserdata som analyseras på rastercell-nivå med den så kallade areabaserade metoden har en tillförlitlig metod tagits fram för att skatta höjd, volym, grundyta och medeldiameter. Idag saknas dock en lika tillförlitlig metod för att även skatta trädslagsfördelning, särskilt fördelningen mellan tall och gran, vilket skogsbruket skulle behöva. Närmast tillhands ligger att använda färginformation från satellitbilder för att tillsammans med laserdata även skatta trädslagsandelar. Wallerman och Holmgren (2007) konstaterade att användning av färginformation från en SPOT-5 HRG-satellitbilde tillsammans med laserdata inte kunde ge en tillräckligt bra uppdelning på trädslag för att metoden skulle kunna rekommenderas för skoglig planering. Pågående, ännu ej dokumenterad forskning, indikerar dock mycket goda resultat när det gäller att separera tall och gran med satellitbilder från Sentinel 2 i kombination med laserdata. Satellitbildernas användbarhet för att separera trädslag varierar dock med datum för registreringen.

Försök med att klassa trädslag genom analys av laserdata på enskilda-träd-nivå, har givit lovande resultat. Holmgren och Persson (2004) kunde automatiskt skilja tall från gran i 95 % av fallen genom att analysera kronform i högupplösta laserdata. I en senare studie (Holmgren m.fl., 2008) klassades tall, gran och löv framgångsrikt på enskilda-träd-nivå dels med bilder från Z/I DMC flygfotokamera från sommar respektive höst, dels med laserdata, samt med kombinationen av flygbilder och laserdata (Tabell 3).

Tabell 3. Andel rätt klassade träd med avseende på tall, gran, löv på enskilda-träd-nivå, klassade med digitala flygbilder från ZI/DMC-kameran från 28 juni 2005, respektive 14 oktober 2003, samt laserdata med 50 punkter/m² (Holmgren m.fl., 2008)

Sensordata			Andel rätt klassade träd med avseende på tall/gran/löv (%)
Laserdata	Flygbilder, sommar	Flygbilder, höst	
X			88
	X		84
		X	91
X	X		93
X		X	96

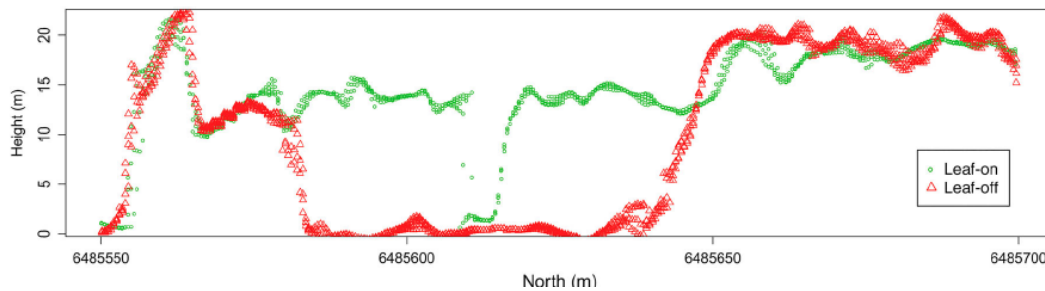
Lindberg m.fl. (2014) segmenterade enskilda träd genom tredimensionell klustring i full vågformslaserdata. Förutom kronform användes sedan även laserreturernas amplitud och pulsbredd för att karaktärisera trädslag på enskilda-träd nivå. Resultatet blev att sex trädslagklasser kunde skiljas med en klassningsnoggrannhet om 71%.

I en studie av Olofsson m.fl., (2006) användes mallanpassning för att automatiskt hitta träden i ett ortofoto från oktober 2003. Av de hittade träden, så kunde 88,7 % klassas rätt med avseende på tall, gran och löv. Det kan dock vara tveksamt att helt förlita sig på analys av flygbildens färger, eftersom dessa kan ha utjämnats inom bilden av bildleverantören.

Bohlin m.fl. (2012b) matchade data från en flygfotografering den 28 juni 2005 för att ta fram ett 3D-punktmoln som även innehöll färginformation från flygbilderna. Metriker från 3D-punktmolnet tilldelades rasterrutor om 18 × 18 m, samt till provytor med 10 m radie. Därefter imputerades skogliga data från provytorna till rasterrutorna och utvärderades på beståndsnivå. Felet (RMSE) för skattningen av total volym på beståndsnivå blev 13 %, medan felet för de trädslagsvisa volymkattningarna blev betydligt högre: 91 % för tall, 26 % för gran och 73 % för löv.

Att använda färg från flygbilder för automatiska klassningar inbegriper många felkällor. Den färg som registreras i en pixel avbildar i princip av en blandning av reflekterat ljus från solbelysta och skuggade trädkronor, samt solbelyst och skuggad undervegetation och proportionerna av dessa komponenter beror förutom naturens komposition, även av läget i bilden. Till detta kommer att producenterna av flygbilder ofta jämnar ut färgerna i bilderna på ett odokumenterat sätt och att detta ibland även görs manuellt för enstaka bilder. När det gäller användning av färgdata som tilldelats 3D punktmoln från matchade flygbilder så tillkommer att metoden för att överföra färg från en eller flera av de matchade bilderna inte alltid är väldokumenterad. Bohlin m.fl. (2017) undersökte dock hur olika metoder för att extrahera färger från matchade bilder till 3D punktmoln inverkar på den slutgiltiga trädslagklassningen och fann att det inte fanns någon avgörande skillnad mellan klassningsresultat baserade på data från olika metoder att överföra färg från de använda bilderna till punktmolnet.

Då det gäller att skilja löv från barr så finns det även en möjlighet att kombinera bilder från lövad och avlövad säsong (Figur 4). Detta gäller såväl satellitbilder som flygbilder eftersom Lantmäteriets flygbilder i stora delar av Sverige fotograferas vartannat år under lövad säsong och vartannat år under avlövad säsong. Bohlin m.fl. (2016) använde 3D-punkmoln från flygbilder från både lövad och avlövad säsong för att skatta andelen löv. Resultatet efter validering på 40 m radie provytor var att lövandelen skattades med ett RMSE om 18 %.



Figur 4. 3D-punkmoln från matchade flygbilder under lövad säsong (grön profil) och avlövad säsong (röd profil). I mitten av profilen syns den markanta skillnaden för ett lövbestånd (Bohlin m.fl., 2016).

Att skilja tall från gran är en viktig uppgift, som dock inte är löst på ett tillfredställande sätt med dagens operationella metoder. Det är därför intressant att konstatera att helt nya resultat från pågående forskning på Remningstorp indikerar att data från laser som använder flera olika färger kan vara användbart för detta. (Axelsson m.fl., 2018). Reflektans från laserljus kan göras mera ”renodlat” eftersom det:

- består av ljus från en väldefinierad våglängd,
- inte innehåller några skuggor,
- kan väljas så att bara laserljus som reflekterats från trädkronornas övre del används.

Axelsson m.fl. (2018) visade att nio olika trädslag kan skiljas med stor noggrannhet med hjälp av intensitetsdata från multispektral flygburen laser. Särskilt intressant är det att tall och gran endast förväxlades i ett fall av 44 i detta försök. I Axelssons försök användes manuellt utpekade enskilda träd, men resultaten indikerar ändå att det i framtiden kan bli möjligt att automatiskt skilja tall, gran och löv på enskilda-träd nivå, eller rastercells-nivå. I Axelssons studie användes en Optech Titan laserskanner som använder tre laservåglängder och som flugits på 400 m höjd för att få användbara data i den gröna våglängden, en sådan låg flyghöjd är dock inte realistiskt för operativa tillämpningar över stora områden.

Ytterligare möjligheter att förbättra skattningen av trädslag är att använda tidsserier av satellitbilder, eller att använda grenmönster som analyseras automatiskt i mycket högupplösta flygbilder eller drönar-bilder. Även inom dessa områden pågår nystartade projekt där data från Remningstorp används.

Skattning av ståndortsindex

Efter trädslag, så är ståndortsindex (SI) den skogliga variabel som efterfrågas mest, utan att kunna skattas tillförlitligt med dagens operationella metoder. En ökad tillgång på tidsserier av 3D-data håller dock på att snabbt förbättra denna situation. Från och med år 2016 har Lantmäteriet börjat framställa

3D-punktmoln från alla nya flygfotografier. (Dock så har det visat sig att den skogliga information har brister i de 3D punktmoln som kommer från bilder som fotograferats med 50 cm pixlar, dvs i Norrlands inland). Förutom tidsserier av 3D punktmoln, så kommer även den nya omdrevslaserskanningen att kunna bidra med tidsserier av 3D data. Med denna typ av tidsseriedata blir det möjligt att på pixelnivå illustrera skogens höjdtillväxt (Wallerman m.fl., 2015). Persson och Fransson (2016) visade att även tidsserier från 3D-satellitdata från InSAR kan användas för att skatta SI om sådana data finns tillgängliga, dessutom visade de att ännu bättre SI-skattningar (6 % RMSE) erhöles med laserdata från endast två tidpunkter.

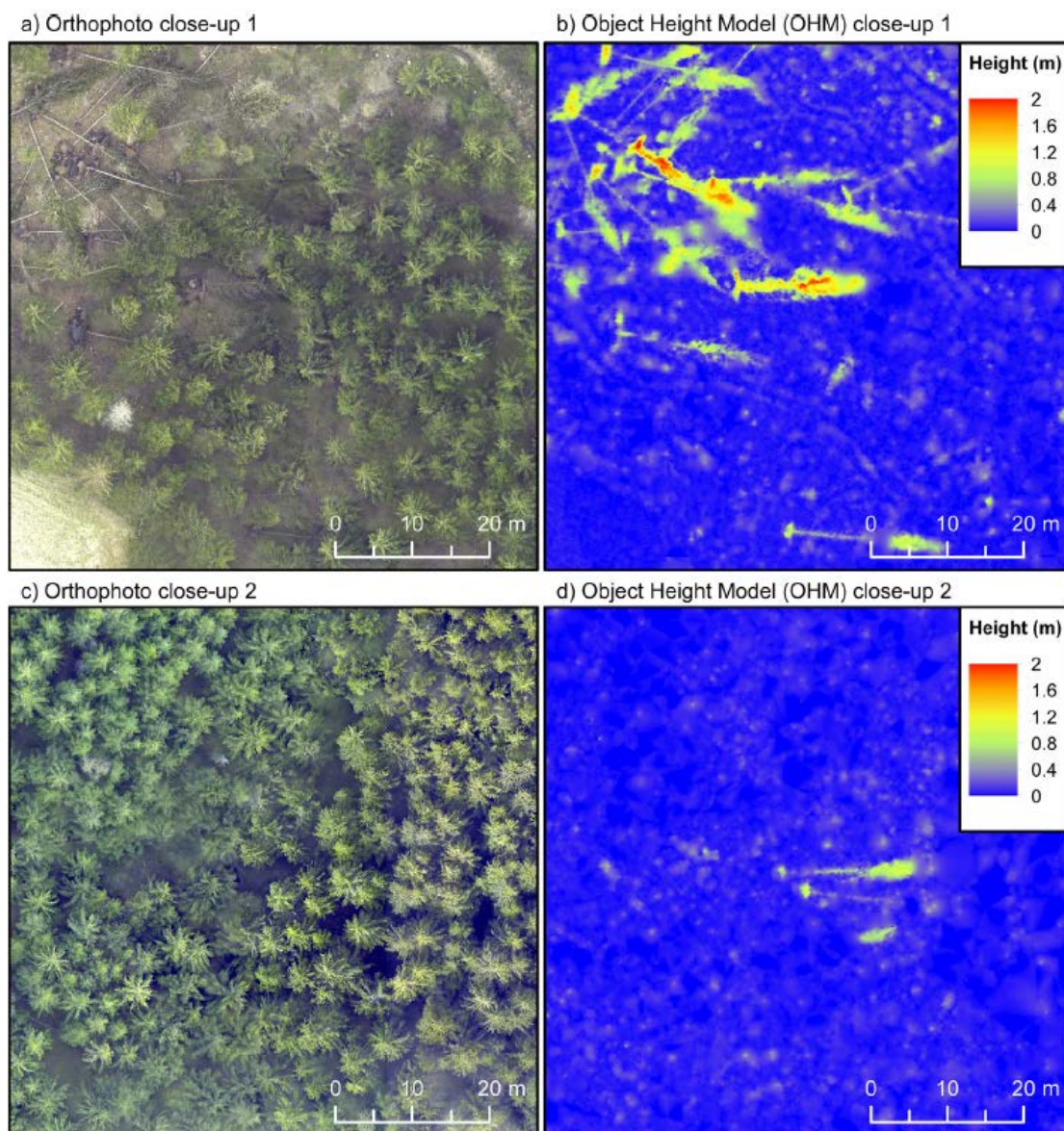
Tillgången på en bra markmodell baserad på laserskanning ökar också möjligheterna att modellera ståndortsindex som en funktion av läget i terrängen. Detta angreppssätt är komplementärt till den uppskattning av höjdtutvecklingen som beskrivs ovan. Dock så ska det observeras att ett SI som bygger på mätningar av kronhöjd speglar beståndets historiska faktiska tillväxt, medan ett SI som bygger på läge i terrängen, jordart, temperatursumma etc, kan indikera beståndets potentiella tillväxt.

Upptäckt av förändringar

När satellitbilder från två tidpunkter jämförs syns nya hyggen väl, medan mer begränsade förändringar kan vara svåra att upptäcka. Magnusson m.fl. (2008), visade dock att upp till 95% av gallringarna på Remningstorp kunde upptäckas automatiskt när SPOT 4-satellitbilder med två års mellanrum jämfördes.

Soja m.fl. (2015) visade att såväl gallringar som lövskogars årstidsvariation kan upptäckas med täta tidsserier (fler registreringar per år) av InSAR-radardata från TanDEM-X. Persson m.fl. (2015b) visade dock att det kan vara svårt att upptäcka gallringar i den snabbväxande skogen på Remningstorp när det gått fyra år mellan bildregistreringarna, och att detta gällde både för InSAR och för laserdata från två tidpunkter.

Fjärranalysmetoder för upptäckt av stormfällningar är en ständigt återkommande frågeställning som det inte finns något givet svar på. Ofta inträffar stormfällningarna under perioden november – januari då det kan vara svårt att få tillräckligt med dagsljus för att få bra flygfoton eller satellitbilder och då skuggorna är långa. Dessutom så kan det vara svårt att upptäcka enstaka liggande träd under ett krontak. Med laserskanning finns en möjlighet att lösa båda dessa begränsningar. Nyström m.fl. (2014) använde skillnaden mellan två olika detaljerade markmodeller för att skapa en skillnadsbild där stormfällda träd framträdde (Figur 5). Därefter användes mallanpassning för att automatiskt upptäcka stormfällda träd, vilket dock fungerade bäst för stora träd, samt bättre för tallar än för övriga trädslag. Även Lindberg m.fl. 2013 provade en variant av mallanpassning på samma material med laserdata och stormfällda träd.



Figur 5. Till vänster: flygbilder över ett område med enskilda träd. Till höger skillnaden mellan två olika elastiska markmodeller, applicerade på täta (100 retur/m²) laserdata registrerade efter stormen, Från Nyström m.fl (2014).

Segmentering

En tidigare inventering på Remningstorp, där 849 provytor inventerades i ett rutnät med 40 m mellan provytorna har bl.a. använts för utvärdering av segmenteringsmetoder. Bl.a. så utvecklade Olofsson och Holmgren (2014) en segmenteringsmetod som bygger på att så kallade Voronoi-polygoner bildas kring detekterade träd. Dessa slås sedan samma till större segment. Vid segmentering från laserdata och vid lika segmentstorlek så förklarade metoden variationen i det fältmätta provytematerialet nästan lika bra som en manuell beståndsindelning gjord i fotogrammetrisk arbetsstation.

Eftersom trädkronorna avbildas från olika vinklar i olika delar av en flygbild, och andelen skuggad och solbelyst trädkrona dessutom varierar med läget i bilden, samt att bildproducenten ibland gör

odokumenterade bildbearbetningar för att kompensera för detta, så kan det vara osäkert i vilken utsträckning automatiska analyser bör göras på ortofoton. För att få ett underlag för segmentering som inte var beroende av läget i bilden så provade istället Granholm m.fl. (2015) att använda en ytmodell från matchade flygbilder som underlag för segmentering. Segmenteringen gjordes med den kommersiella programvaran eCognition. Resultatet utvärderades mot 993 flygbildstolkade ytor på Remningstorp. Segmenteringen baserat på Lantmäteriets standardbilder visade sig fungera bra och ändrades inte mycket när bilder på lägre höjd (1200 m), eller med större överlapp (80 %) användes.

Markbaserad laserskanning och fotogrammetri

Under senare år har fjärranalysforskningen också flyttat ned på marken, så att trädstammarna avbildas från sidan. Provytorna med 40 m radie har marklaserskannats vid ett par tillfällen med 16 uppställningar per yta. Hittillsvarande studier visar att enskilda trädstammar kan hittas automatiskt i marklaserdata och att stamprofilen kan mätas med en noggrannhet om ca 1 cm (Olofsson m.fl, 2014; Olofsson och Holmgren, 2016), se vidare Fakta skog bladets om detta (Olofsson m.fl, 2017). Goda resultat (grundtevägs medeldiamter mindre än 2% fel och grundyta mindre än 6% fel) har även erhållits med en personburen mobil laserskannerutrustning, utvecklad av SLU i samverkan med FOI och Skogforsk (Holmgren m.fl, 2018). De stora provytorna (40 m radie) har också i samverkan med Skogforsk, använts för utvärdering av kommersiella sensorsystem med markbaserad mätning av stammar.

Vidare har metoder utvecklats för att använda mönstret av stammar som mäts i fält med motsvarande mönster av träd som upptäckts i högupplösta flygregistrerade laserdata (Olofsson, m.fl., 2008). Därmed har även stammar som registrerats med markbaserad laserskanning kunnat kopplas ihop med motsvarande trädkronor i flygburna laserdata (Lindberg m.fl. 2010 och 2012a).

Förutom markbaserad och mobil laserskanning, så har även markbaserad fotogrammetri för mätning av trädstammar utvärderats på Remningstorp (Forsman m.fl., 2016).

Markbaserade metoder för att mäta stammars position och form förväntas att få stor operationell användning i skogsbruket, t.ex. då sensorerna placeras på skördare. Med data från Remningstorp pågår även forskning där möjligheterna att automatiskt klassa trädslag med stöd av data om trädens detekterade grenar, undersöks.

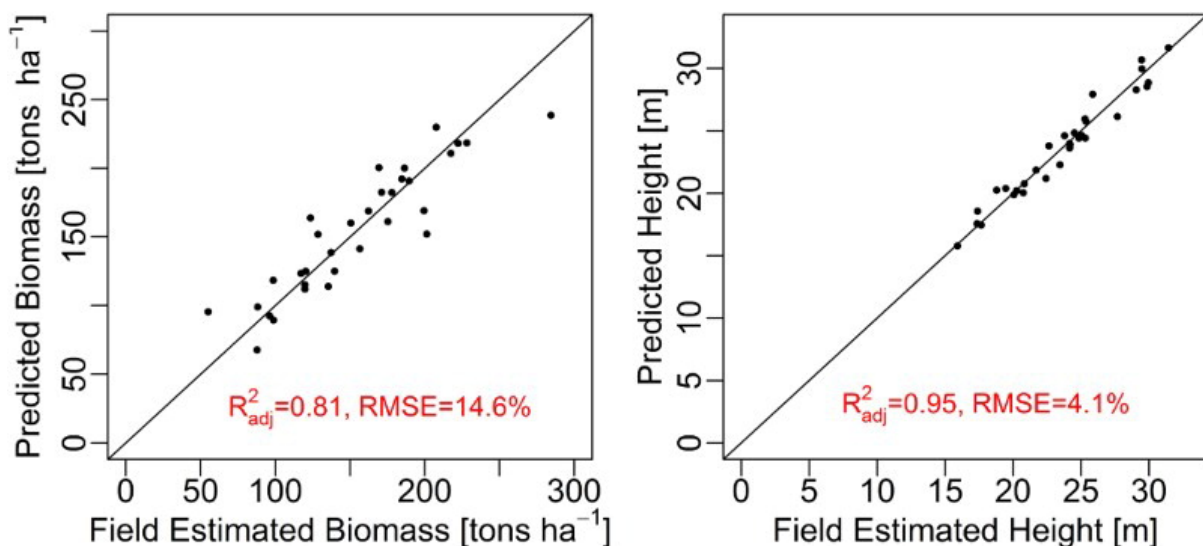
Mera om radardata

Forskningen kring användningen av radardata för skattning av skog har varit omfattande på Remningstorp, och har ofta bedrivits i samverkan mellan forskare vid Chalmers, FOI och SLU. För vanliga "2D" radarbilder, så korrelerar backscatter-data (gråvärdet i en vanlig radarbild) bättre med trädbiomassa, ju längre radarvåglängd som används. Det svenska experimentella radarsystemet CARABAS-II från FOA (nuvarande FOI) använder 3-15 m långa radarvågor vilket är unikt långa vågor för ett bildalstrande radarsystem. Försök på Remningstorp har visat att CARABAS data som registrerats från flera vinklar kan skatta även höga virkesförråd över 500 m³sk/ha med stor noggrannhet (7% RMSE, Fransson m.fl., 2013).

Remningstorp har ofta använts som testområde för flygburna kampanjer där teknik för framtida satellitprojekt har utvärderats. Bland annat så gjordes testflygningar med långvågig radar (P och L-band) år 2007 och 2010 inom de så kallade BioSAR kampanjerna. Resultaten från dessa kampanjer har bidragit till att den Europeiska rymdflygstyrelsen (ESA) kommer att skicka upp Biomass satelliten som

blir den första radarsatelliten som använder det långvågiga P-bandet. I ett nyligt konferensbidrag (Huuva m.fl, 2017) utvärderas hur skillnaderna mellan långvågiga radarbilder från olika år kan användas för att upptäcka förändringar av trädbiomassa.

TanDEM-X InSAR-data kommer från två satelliter som samtidigt registrerar radardata från två parallella banor. Dessa data kan sambearbetas så att en ytmodell av skogens krontak erhålls. När Lantmäteriets markmodell subtraheras från ytmodellen får man ett mått som korrelerar med skogens höjd och täthet. Dessutom kan ytterligare ett mått, som visar hur lika de två radarbilderna är, användas i de skogliga skattningsfunktionerna. Radardata har fördelen att de kan registreras oberoende av molnigheten, vilket väsentligt ökar möjligheten till regelbundna registreringar. Över Remningstorp har vi tillgång till flera hundra InSAR-bilder. Forskningen kring analys av radardata är just nu intensiv och siffrorna i Tabell 2 är därför högst preliminära. En studie av Persson och Fransson (2017) visar att på beståndnivå kan höjd skattas med ca 4% RMSE och biomassa med ca 15% RMSE (Figur 6). Den inbördes ordningen, att InSAR skattar trädstorleks-relaterade skoglig data bättre än optiska satellitbilder, men inte lika bra som laserdata bekräftas dock av flera studier både i Sverige och övriga Norden.



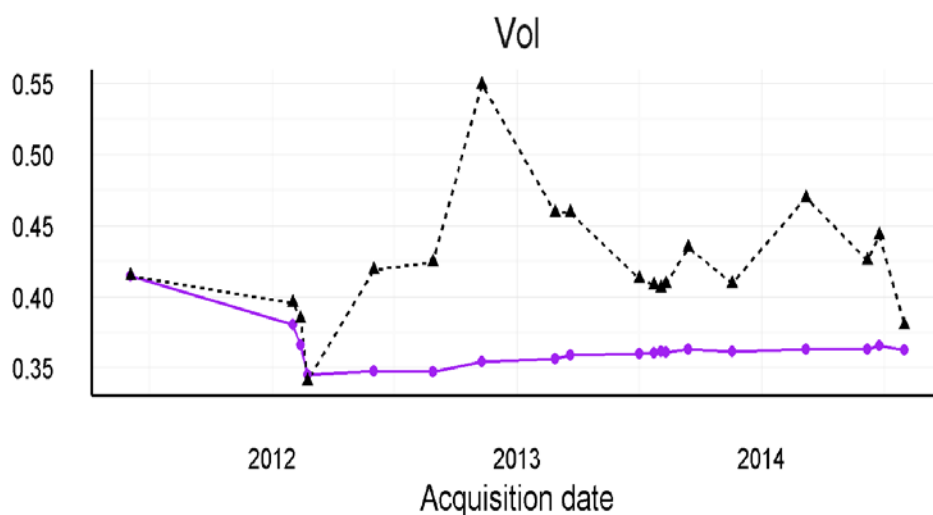
Figur 6. Utvärdering av InSAR-data på 40 m radie provtytor i Remningstorp (Persson och Fransson, 2017).

TanDEM-X använder mycket kortvågiga (ca 3 cm) radardata och är delvis kommersiellt opererat. Inom det Europeiska samarbetet kring satellitdata (Copernicus), har man satsat på fri distribution av C-bandsdata som har något längre våglängder (ca 5 cm) än X-band, men som inte innehåller så mycket skoglig information när bilderna studeras en och en. För skogliga ändamål så vore det därför intressant om en Europeisk C-bands satellit kunde kompletteras med en extra satellit som går parallellt, så att 3D data erhålls. Ett projekt förutsättningarna för detta pågår på Europeisk nivå, där forskare från NBIO i Norge, samt från Chalmers och SLU som har framträdande roller. Inom ramen för detta projekt så kommer tester med flygburna system att göras på Remningstorp (Solberg m.fl., 2017).

Dataassimilering

Vi kommer att få allt mer data över skogen: gratis satellitbilder flera gånger per år, 3D-punktmoln från digital fotogrammetri med några få års mellanrum, och flygburen laserskanning med kanske 8 års mellanrum. Målet med forskningen kring dataassimilering är att utveckla metoder som gör att alla nya data, allteftersom de blir tillgängliga, används för att uppdatera en framskriven modell av skogen, i proportion till informationsvärdet av nya data. Bland fördelarna med detta arbetssätt märks att skogskartan alltid är framskriven och att det inte behöver finnas samma historia av data överallt, samt att alla typer av data om skogen kan användas för att förbättra modellen.

Hittills finns endast ett fåtal studier där detta provats med verkliga data, varav två från Remningstorp (Nyström m.fl., 2015 och Lindgren m.fl., 2017). Dataassimilering med så kallat Extended Kalman-filter fungerar för att kombinera data från samma sensor så att resultatet blir något bättre än om bara den senaste fjärranalyskattningen används. Vinsten i hittillsvarande försök har dock varit marginell. Figur 7 visar skattningsresultat för 16 InSAR-bilder över Remningstorp. Bland fördelarna märks dock att fjärranalysdata med dålig kvalitet inte verkar förstöra skattningarna, samt att processen kan automatiseras. Resultaten förväntas också bli bättre när data från olika typer av sensorer kombineras.



Figur 7. Exempel på dataassimilering av volym (Lindgren m.fl., 2017). Svarta symboler representerar volymkattningar uttryckt i relativt RMSE för 19 olika InSAR-bilder över Remningstorp. Lila symboler är erhållet resultat efter dataassimilering.

Simulering av rymdlaser

I det EU finansierade forskningsprojekt Advanced SAR, har SLU och Chalmers tillsammans med forskare från FGI i Finland och tekniska universitet i Wien undersökt den skogliga användbarheten av flera fjärranalystekniker som ger 3D-data, däribland de tre ovan nämnda: interferometrisk bearbetning av radardata (InSAR), stereobearbetning av radardata och stereobearbetning av mycket högupplösande optiska satellitdata från Pleiaderna och WorldView-2.

Ytterligare en teknik har simulerats med data från Remningstorp: lasermätning med satellit. I framtiden kommer satellitsystem kunna mäta provytor från rymden med laserstrålar som har ca 20 m diameter. Detta öppnar möjligheten för 2-fas-sampling, där en delmängd av dessa ytor även mäts i fält. Dock

företsätter detta att koordinaterna för laserträffarna från satellit är tillräckligt väl lägesbestämda. Betydelsen av detta har simulerats med laserdata från Remningstorp (Milenkovic m.fl., 2017).

Framtiden?

Flygburen laserskanner erbjuder en säker metod för att tillsammans med fältytor automatiskt skatta de vanliga skogliga variabler som beror på trädens höjd och täthet, givet detta så finns det ett flertal saker som det kan finnas behov av att studeras närmare, t.ex:

- *Trädslag*, vad ger t.ex. olika typer av laserljus, tidserier av spektrala data, eller analys av grenmönster i högupplösta bilder?
- *Ståndortsindex*, hur långt kommer vi med tidsserier av höjduvecklingen som mäts med laserdata eller digitala flygbilder och hur kan en rasterkarta som visar tillväxt vara till nytta vid skogsbruksplanering?
- *Skador*, kan vi upptäcka skador i skogen genom att automatiskt följa hur t.ex. skogens färg ändras över vegetationssäsongen och hur kan nya typer av sensorer användas för att upptäcka skador?
- *Åtgärdsbehov*, hur skattar vi bäst behov av röjning och gallring?
- *Inventeringssystem*, hur kan fjärranalysdata och fältdata kombineras bäst, för att även optimera fältarbetet? Hur kan vi bäst få objektiva data för t.ex. fastighetsvärdering?
- *Manuell fältmätning*, hur stora och hur många provtyper behövs, kan de "hållas vid liv" med förändringsanalys?
- *System för automatiserad fältmätning*: Hur kan vi bäst använda markbaserad eller mobil, gärna personburen, laserskanning eller fotogrammetri?
- *Skördardata*, hur blir den möjligheten för referensdatainsamling operationell?
- *Utvärdering av nya sensorer*, vi får fotonräknande lasersystem, och lasrar och kameror som tittar i många riktningar och med flera färger, drönare med laserskannrar som kan mäta stamprofiler, nya typer av radarsystem etc.
- *Jämförelse av den skogliga nyttan för olika tekniker*, vi vet att t.ex. 3D-punktmoln från flygbilder ger några procent lägre RMSE än motsvarande skattning från laserdata, men vad betyder det för de skogliga besluten?

Erkännanden

Denna rapport har tagits fram inom ramen för EU-projektet Advanced SAR. Den forskning som presenteras här har finansierats av ett stort antal organisationer. Viktigast för forskningen på Remningstorp har Hildur och Sven Wingquists stiftelse för skogsvetenskaplig forskning varit. Vidare har enskilda projekt bidragit i stor utsträckning bl.a. finansierade av Rymdstyrelsen, Formas, EU-kommissionen, ESA, MISTRA, Skogssällskapet, Norrskog, Stiftelsen Nils och Dorthi Troedssons forskningsfond, Stiftelsen Åforsk och SLU. Forskningen har utförts av ett stort antal medarbetare främst vid avdelningen för skoglig fjärranalys vid SLU.

Referenser

Samtliga referenser utom de som markerats med * baseras på data från Remningstorp.

Axelsson, A., Lindberg, E., Olsson, H. 2018. Exploring multispectral ALS data for tree species classification. *Remote Sensing*, 10:183.

Bohlin, J., Wallerman, J., Fransson, J.E.S. 2012a. Forest variable estimation using photogrammetric matching of digital aerial images in combination with a high-resolution DEM. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27:692-699.

Bohlin, J., Wallerman, J., Olsson, H., Fransson, J.E.S. 2012b. Species-specific forest variable estimation using non-parametric modeling of multi-spectral photogrammetric point cloud data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B8, pp. 387-391.

Bohlin, J., Wallerman, J., Fransson, J.E.S. 2016. Deciduous forest mapping using change detection of multi-temporal canopy height models from aerial images acquired at leaf-on and leaf-off conditions. *Scandinavian Journal of Forest Research* 31:517-525.

Bohlin, J., Wallerman, J., Fransson, J.E.S. 2017. Assessment of tree species proportions from 3D image products. Manuskript publicerat i Bohlins doktorsavhandling: Data collection for forest management planning using stereo photogrammetry. Doctoral Thesis No 2017:109.

Ehlers, S., Saarela, S., Lindgren, N., Lindberg, E., Nyström, M., Persson, H.J., Olsson, H., Ståhl, G. 2018. Assessing error correlations in remote sensing-based estimates of forest attributes for improved composite estimation. *Remote Sensing* 10(5), 667.

Forsman, M., Börilin, N., Holmgren, J. 2016. Estimation of tree stem attributes using terrestrial photogrammetry with a camera rig. *Forests* 7(3), 61; doi:10.3390/f7020061

Fransson, J.E.S., Wallerman, J., Gustavsson, A., Ulander, L.M.H. 2013. Estimation of stem volume in hemi-boreal forests using airborne low-frequency synthetic aperture radar and lidar data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 161-164.

Granholm, A.-H., Olsson, H., Nilsson, M., Allard, A., Holmgren, J. 2015. The potential of digital surface models based on aerial images for automated vegetation mapping. *International Journal of Remote Sensing* 36:1855-1870.

Holmgren, J., Nilsson, M., Olsson, H. 2003. Estimation of tree height and stem volume on plots – using airborne laser scanning. *Forest Science* 49:419-428.

Holmgren, J. 2004. Prediction of tree height, basal area and stem volume in forest stands. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19:543-553.

Holmgren, J., Persson, Å. 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment* 90:415-423.

Holmgren, J., Persson, Å. Söderman, U. 2008. Species identification of individual trees by combining height resolution LiDAR data with multi-spectral images. *International Journal of Remote Sensing* 29:1537-1552.

- Holmgren, J., Barth, A., Larsson, H., Olsson, H. 2012. Prediction of stem attributes by combining airborne laser scanning and measurements from harvesters. *Silva Fennica* 46:227-239.
- Holmgren, J., Lindberg, E. 2013. Tree crown segmentation based on a geometric tree crown model for prediction of forest variables. *Canadian Journal of Remote Sensing* 39, S86-S98.
- Holmgren, J., Tulldahl, M., Nordlöf, J., Willén, E., and Olsson, H. 2018. Estimation of stem diameters on field plots using simultaneous localization and mapping with data from a back-pack mounted laser scanner. Manuskript.
- Huuva, I., Fransson, J. E. S., Persson, H. J., Wallerman, J., Ulander, L., H., Blomberg, E., Soja, M. J. 2017. Measurements of forest biomass change using L-and P-band SAR backscatter. I Proceedings från IGARSS 23-27 juli 2017 Fort Worth, Texas.
- Lindberg, E., Holmgren, J., Olofsson, K. & Olsson, H. 2010. Estimation of stem attributes using a combination of terrestrial and airborne laser scanning. In: *Proceedings of SilviLaser 2010, the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems*, Freiburg, Germany, 14–17 September, 2010.
- Lindberg, E., Holmgren, J., Olofsson, K., Olsson, H. 2012a. Estimation of stem attributes using a combination of terrestrial and airborne laser scanning. *European Journal of Forest Research* 131:1917-1931.
- Lindberg, E., Olofsson, K., Holmgren, J., Olsson, H. 2012b. Estimation of 3D vegetation structure from waveform and discrete return airborne laser scanning data. *Remote Sensing of Environment* 118, 151–161.
- Lindberg, E., Hollaus, M. 2012. Comparison of Methods for Estimation of Stem Volume, Stem Number and Basal Area from Airborne Laser Scanning Data in a Hemi-Boreal Forest. *Remote Sensing* 4(4), 1004-1023.
- Lindberg, E., Hollaus, M., Mücke, W., Pfeifer, N. 2013. Detection of Lying Tree Stems from Airborne Laser Scanning Data Using a Line Template Matching Algorithm. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-5/W2*, Antalya, Turkey, 11-13 November, 2013. pp. 169-174: ISPRS - International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Lindberg, E., Eysn, L., Hollaus, M., Holmgren, J. & Pfeifer, N. 2014. Delineation of Tree Crowns and Tree Species Classification From Full-Waveform Airborne Laser Scanning Data Using 3-D Ellipsoidal Clustering. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 7(7), 3174-3181.
- Lindgren, N., Persson, H.J., Nyström, M., Nyström, K., Grafström, A., Muszta, A., Willén, E., Fransson, J.E.S., Ståhl, G., Olsson, H. 2017. Improved estimation of forest variables using data assimilation of interferometric synthetic aperture radar data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 43:374-383.
- Magnusson, M., Fransson, J.E.S., Olsson, H. 2008. Change detection of thinned Norway spruce stands using optical SPOT-4 satellite data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34:431-437.

- Milenkovic M., Schnell, S., Holmgren, J., Ressler, C., Lindberg, E., Hollaus, M., Pfeifer, N., Olsson, H. 2017. Recommendations on footprint diameter and geolocation accuracy for future space-borne waveform LiDAR missions: a forestry perspective. *Remote Sensing of Environment* 200:74-88.
- Nilsson, M., Nordkvist, K., Jonzén, J., Lindgren, N., Axensten, P., Wallerman, J., Egberth, M., Larsson, S., Nilsson, L., Eriksson, J., and Olsson, H. 2016. A nationwide forest attribute map of Sweden predicted using airborne laser scanning data and field data from the National Forest Inventory. *Remote Sensing of Environment* 194:447-454. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.022>
- Nyström, M., Holmgren, J., Fransson, J.E.S., Olsson, H. 2014. Detection of windthrown trees using airborne laser scanning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 30:21-29.
- Nyström, M., Lindgren, N., Wallerman, J., Grafström, A., Muszta, A., Nyström, K., Bohlin, J., Willén, E., Fransson, J.E.S., Ehlers, S., Olsson, H., Ståhl, G. 2015. Data assimilation in forest inventory: first empirical results. *Forests* 6:4540-4557.
- Olofsson, K., Wallerman, J., Holmgren, J., Olsson, H. 2006. Tree species discrimination using Z/IDMC imagery and template matching of single trees. *Scandinavian Journal of Forest Research* 21:106-110.
- Olofsson, K., Lindberg, E., and Holmgren, J. 2008 A method for linking field-surveyed and aerial-detected single trees using cross correlation of position images and the optimization of weighted tree list graphs. In proceedings of SilviLaser 2008, p 95.
- Olofsson, K., Holmgren, J. 2014. Forest stand delineation from lidar point-clouds using local maxima of the crown height model and region merging of the corresponding Voronoi cells. *Remote Sensing Letters* 5:268-276.
- Olofsson K, Holmgren J, Olsson H. 2014. Tree stem and height measurements using terrestrial laser scanning and the Ransac algorithm. *Remote Sensing* 6:4323–4344.
- Olofsson K, Holmgren J., 2016. Single Tree Stem Profile Detection Using Terrestrial Laser Scanner Data, Flatness Saliency Features and Curvature Properties. *Forests* 7:207.
- Olofsson, K., Holmgren, J., Lindberg, E., Nyström, M., Olsson, H. 2017. Markbaserad laserskanning. Fakta skog nr 2, 2017.
- Persson, Å., Holmgren, J., Söderman, U. 2002. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanning. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68:925-932.
- Persson, H. 2014. Estimation of forest parameters using 3D satellite data. Fakulteten för Skogsvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet. Doktorsavhandling 2014:84.
- Persson H., Soja, M., Olsson, H., Fransson, J. 2015. Satellitbaserade 3D-data till hjälp för skogliga skattningar, Fakta skog Rön från Sveriges lantbruksuniversitet Nr 1 2015.
- Persson, H.J., Soja, M.J., Ulander, L.M.H., Fransson, J.E.S. 2015. Detection of thinning and clear-cuts using TanDEM-X data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 2907-2910.

Persson, H.J. 2016. Estimation of boreal forest attributes from very high resolution Pléiades data. *Remote Sensing* 8, doi:10.3390/rs8090736J.

Persson, H. J., Perko, R. 2016. Assessment of boreal forest from WorldView-2 satellite stereo images. *Remote Sensing Letters* 7:1150-1159.

Persson, H.J., Fransson, J.E.S. 2016. Estimating site index from short-term TanDEM-X canopy height models. *IEEE Journal of Selected Topics in Earth Observations and Remote Sensing* 9:3598-3606.2

Persson, H.J., and Fransson, J.E.S. 2017. Comparison between TanDEM-X and ALS-based estimation of aboveground biomass and tree height in boreal forests. *Scandinavian Journal of Forest Research* 32:306-319.

*Rahlf, J., Breidenbach, J., Solberg, S., Naeset, E., Astrup, R. 2014. Comparison of four types of 3D data for timber volume estimation. *Remote Sensing of Environment* 155:325-333.

Solberg, S., Ulander, L.M.H., Fransson, J.E.S. 2017. Testing C-band convoy mission for forest monitoring. I Proceedings från IGARSS 23-27 juli 2017 Fort Worth, Texas.

Soja, M.J., Persson, H.J., Ulander, L.M.H. 2015. Detection of forest change and robust estimation of forest height from two-level model inversion of multi-temporal, single-pass InSAR data. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp. 3886-3889.

Wallerman, J., Holmgren, J. 2007. Estimating field-plot data of forest stands using airborne laser scanning and SPOT HRG data. *Remote Sensing of Environment* 110:501-508.

Wallerman, J., Nyström, K., Bohlin, J., Persson, H.J., Soja, M.J., Fransson, J.E.S. 2015. Estimating forest age and site productivity using time series of 3D remote sensing data. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp. 3321-3324.

Wästlund, A., Holmgren, J., Lindberg, E., och Olsson, H. 2018. Forest variable estimation using a high altitude single photon lidar system. Inskickat manuskript.

*Yu, X., Hyypä, J., Karjalainen, M., Nurminen, K., Karila, K., Vastaranta, M., Kankare, V., Karantinen, H., Holopainen, M., Honkavara, E., Kukko, A., Jaakkola, A., Liang, X., Wang, Y., Hyypä, H., Kato, M. 2015. Comparison of laser and stereo optical, SAR and InSAR point clouds from air and space-borne sources in the retrieval of forest inventory attributes. *Remote Sensing* 7:15933-15954.