



Skogsinventering med hjälp av stereomatchning av flygbilder tagna från en drönare på enskilda träd nivå

*Forest inventory on individual tree level using stereo
matching of aerial images taken from a drone*

Simon Benjaminson

**Arbetsrapport 480 2017
Examensarbete 30hp A2E
Jägmästarprogrammet**

**Handledare:
Jörgen Wallerman**

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-480-SE

Skogsinventering med hjälp av stereomatchning av flygbilder tagna från en drönare på enskilda träd nivå

Forest inventory on individual tree level using stereo matching of aerial images taken from a drone

Simon Benjaminson

Nyckelord: stereomatchning, flygbilder, skogsinventering, drönare, enskilda träd

Examensarbete i Skogshushållning vid Institutionen för skoglig resurshushållning, 30 hp
EX0768 A2E

Jägmästarprogrammet

Handledare: Jörgen Wallerman, SLU, Institutionen för skoglig resurshushållning, fjärranalys
Bitr. handledare: J. Bohlin & M. Nyström, SLU, Institutionen för skoglig resurshushållning,

fjärranalys

Examinator: Håkan Olsson, SLU, Institutionen för skoglig resurshushållning, fjärranalys

Extern handledare: Johan Malmqvist, Södra skogsägarna

Sammanfattning

Upprättandet av skogsbruksplaner har utförts på liknades sätt under flera decennier, dagens utveckling inom drönartekniken kan nu möjligen förändra detta. Målet med denna studie var att undersöka möjligheten att skatta skogliga variabler på avdelningsnivå genom stickprov av träd kombinerat med heltäckande skattningar på enskilda träd nivå från stereomatchade flygbilder tagna med drönare. Studien utfördes med hjälp av flygbilder och inventeringsdata från studieområdet Remningstrop.

Resultatet visar att det är möjligt att skatta medelhöjden för ett bestånd med ett medelfel på 13,0 %. Resultatet för medeldiameter och total volym är däremot högre med 17,0 % respektive 28,1 %. Skattningsnoggrannheten skulle sannolikt blivit bättre om fjärranalysdatat för respektive träd kunnat sammanlänkats bättre med motsvarande inventeringsdata, samt om fjärranalysdatat och inventeringsdatat hade varit från samma år. De höga kraven på inventeringsdatat gör att den undersökta metoden kan vara svår att applicera i det operativa skogsbruket.

Abstract

The establishment of forest management plans has been carried out in a similar manner for decades, today's development with drones technology can now change this. The aim of this study was to investigate the possibility of estimating forest variables on compartment level by sampling of trees combined with full individual tree crown estimates from stereo matched aerial images taken by a drone. The study was conducted using aerial images and inventory data from individual trees level from the Remningstrop study area.

The result shows that it's possible to estimate the mean height of a forest department with a RMSE of 13.0 %. The result for mean diameter and total volume, on the other hand, is higher 17.0 % and 28.1 % respectively. Among the weaknesses of the study has been that inventory data have low accuracy and precision for coordiantes and the time difference between the inventory and areial images. The high requirements for inventory data make the method difficult to apply in the operational forestry.

Förord

Detta examensarbete omfattar 30 högskolepoäng på avancerad nivå inom skogshushållning och avslutar min skogliga masterexamen.

Jag vill passa på att tacka min handledare Jörgen Wallerman, Jonas Bohlin och Mattias Nyström, alla vid fjärranalysavdelningen på Institutionen för skoglig resurshushållning vid SLU Umeå, för att ha bollat mina ideer och handlett mig under arbetets gång. Jag vill även tacka Eva Lindberg och Kenneth Olofsson för deras hjälp med databearbetning. Johan Malmqvist vid Södra skogsägarna ska ha ett stort tack för tilliten för att ta mig an detta projektet.

Stort tack till alla som varit med i Ljungbergslabbet - ni vet vilka ni är.

Simon Benjaminson



Innehåll

1	Bakgrund	1
1.1	Introduktion	1
1.2	Syftet med studien	4
1.3	Kort om Södra Skogsägarna	5
1.4	Mål	5
2	Material och metod	6
2.1	Studieområde	6
2.2	Inventeringsdata	7
2.3	Flygbilder	9
2.4	Bildbearbetning	10
2.5	Databearbetning	11
2.6	Sammanlänkning av fjärranalysdata och inventeringsdata . .	12
2.7	Regressionsmodellering	13
3	Resultat	14
3.1	Sammanlänkningar	14
3.2	Regressionsmodeller	15
4	Diskussion	18
4.1	Slutsatser	20
	Litteratur	21

1 Bakgrund

1.1 Introduktion

En skogsbruksplan är ett bra hjälpmedel för skogsägare att försäkra sig om att de förvaltar sina skogsfastigheter på ett hållbart och effektivt sätt. Skogsbruksplanen innehåller information om skogstillståndet och åtgärdsförslag, samt ger skogsägaren en översiktlig bild över fastigheten. En skogsbruksplan upprättas vanligtvis av en planläggare som är utbildad i inventering, skogsbruk och naturvård. Planläggaren delar in fastigheten i avdelningar beroende på homogenitet i höjd, trädslag och bonitet (Magnusson m. fl., 2007). Inom avdelningar inventeras subjektivt utvalda provytor med mätningar av grundyta (GY), medelhöjd (H) och medeldiameter (D) per trädslag, där efter beräknas virkesförrådet (VOL). Även trädslagsblandning och bonitet bedöms för varje avdelning och slutligen presenteras ett åtgärdsförslag för avdelningen baserat på inhämtad information. Upprättandet av en skogsbruksplan är ett arbetsintensivt och tidskrävande arbete som har utförts på liknande sätt under många år, och produktiviteten hos planläggare har inte ökat nämnvärt.

Den avancerade teknikutvecklingen som skett inom fjärranalys öppnar stora möjligheter till att kunna förbättra och effektivisera dagens planläggning. Fjärranalysmetoder kan uppskatta de vanligaste skogliga variablerna som höjd, diameter, grundyta och volym. Därutöver hoppas skogsbruket att i framtiden även kunna skatta trädslag, bonitet, död ved och stamantal. Vissa sensorer som radar och satellitbilder kan även ge temporal upplösning på några dagars mellanrum, vilket möjliggör kontinuerlig uppdatering och kan användas för att uppdatera skogsbruksplaner årligen. Fjärranalysdata kan även användas för att segmentera och klassificera avdelningar. Bland de mest lovade fjärranalysmetoderna för skoglig inventering är flygburen laserskanning och digital stereomatchning av flygbilder (White m. fl., 2016).

Både laserskanning och stereomatchning av flygbilder skapar 3D-punktmoln över de täckta områdena. Punktmolnet är precis som det låter ett moln med punkter där varje punkt är koordinatsatt i tre dimensioner. Punktmolnet kan användas för att skatta skogliga variabler, detta genom att använda inventeringsdata som beroende variabel, där sambandet mellan de två används för att ta fram regressionsmodeller. En av de vanligaste metoderna är att använda metriker, det vill säga kronhöjdsfördelning av punkterna från punktmolnet (Nordkvist och Olsson, 2012). Detta kan med olika statistiska mått beskriva skogens struktur och uppbyggnad (Blombäck, 2015). De mått som brukar korrelera högst är höjdpercentiler, vegetationskvot, standardavvikelse och medelhöjd (Nordkvist och Olsson, 2012).

De uppbyggda regressionsmodellerna tillämpas sedan på ytor utan inventeringsdata och skapar heltäckande skattningar över bestånd. Enskilda träd metoden (individual tree crown, ITC) (Hyyppä m. fl., 2001) och den area-baserade metoden (area-based approach, ABA) (Næsset, 2002) är två olika metoder som är de vanligaste att skatta de skogliga variablerna. ABA är ett välbeprövat och vanligt förekommande tillvägagångssätt vid operativt skogsbruk. Metoden baseras på sambandet mellan fjärranalysdata och inventeringsdata över ytor, vanligtvis 100 m² till 500 m² som lagts ut i ett representativa områden (Næsset, 2002). Resultatet ger en väntevärdesriktig skattning för skogliga variabler (Nordkvist och Olsson, 2012). ITC är en metod som bygger på att först identifiera enskilda träd inom ett specifikt område för att sedan skatta de skogliga variablerna. Den används främst inom forskningen där det är önskvärt att veta mer om uppbyggnaden av skogsstrukturen (Culvenor, 2003) vilket skulle kunna användas för att anpassa skötsel- och avverkningsåtgärder. En metod för ITC är att använda ett lokalt maximum (local maximum, LM)(Hirschmugl m. fl., 2007) eller en watershed (Rahlf m. fl., 2015) för att identifiera enskilda trädets högsta punkt och sedan avgränsa dess kronstorlek det vill säga segmentet. Ur segmenten extraheras sedan metriker som tillsammans med LM utgör de oberoende variablerna i en regressionsmodell. De beroende variablerna kommer från fält-inventeringar. Inventeringsdata måste hålla en hög noggrannhet och precision för att kunna sammanlänkas med fjärranalysdata.

ITC medför dock specifika problem med att urskilja enskilda träd i punktmolnet eftersom närstående eller undertryckta träd ofta är svåra att upptäcka och identifiera, detta påverkar dock inte den uppskattade virkesvolymen nämnvärt då det är främst de mindre träden som inte upptäckts (Holmgren och Lindberg, 2013). Viktiga faktorer som påverkar upptäckten av enskilda

träd är punktmolnets täthet, trädens höjd, trädslag, topografi och strukturen på skogen (Hirschmugl m. fl., 2007; Holmgren och Lindberg, 2013).

En praktisk nackdel med ITC, jämfört med ABA, är att ITC är mycket mer beräkningsintensivt och kräver specialistkompetens och särskild programvara vilket innebär att det är främst forskare samt specialistföretag som tillämpar ITC metoden (Nordkvist och Olsson, 2012). Dessutom krävs täta punktmoln för att skilja ut enskilda träd. Dagens snabba utveckling inom metoder att producera punktmolnsdata och databearbetning gör dock att ITC kan ta fart och tillämpas för praktiskt skogsbruk inom en snar framtid.

Ett exempel på användningsområden för laserskanning är den nya nationella höjdmodellen, en mycket noggrann höjdmodell (digital elevation model, DEM) över Sverige som producerades av Lantmäteriet med hjälp av flygburen laserskanning, på uppdrag av regeringen. Syftet med en nya höjdmodellen var att leverera data till riskanalys och planering vid eventuella klimat- och vattennivå- förändringar. Arbetet påbörjades 2009 och pågår än idag i delar av fjällen. Lantmäteriet klassificerade alla laserpunkter beroende på vad de träffade. Alla punkter som klassades som mark används för skattningar av den nya nationella höjdmodellen. Detta material har även används av Skogsstyrelsen och SLU, vilka främst använde de punkter som var klassade som skog för att med den areabaserade metoden skapa skogliga grunddata (Skogsstyrelsen, 2016), en tjänst med möjlighet att se olika skogliga variabler över önskade områden. Skogliga grunddata använder inventeringsdata från Riksskogstaxeringen som beroende variabel för att skapa regressionsmodeller för uppskattning av skogsparametrarna och det har gett ett resultat på ca 20 % noggrannhet för volymen på beståndsnivå (Skogsstyrelsen, 2016).

Nationella laserskanningar, i likhet med de som ligger till grund för den nya höjdmodellen är kostnadseffektiva metoder för stora områden men för mindre områden kan stereomatchning av flygbilder vara ett bra alternativ (Gobakken m. fl., 2015). Stereomatchning använder flygbilder för att bestämma storlek, form och läge av föremål som fotograferas. Det är möjligt eftersom bilderna har ett stort ($> 60\%$) överlappar och kamerans inre och yttre orientering är kända (Nordkvist och Olsson, 2012). Dessa kriterier gör det möjligt att återfinna samma punkt i två eller fler bilder och skapa ett punktmoln likt det från laser.

Structure from motion (Struktur genom rörelse, SfM) är en typ av stereomatchning av flygbilder som återger ett punktmoln med hjälp av överlappade bilder (Westoby m. fl., 2012). Skillnaden är att SfM inte är beroende av att känna till kamerans inre eller yttre orientering eftersom metoden uppskattar

kameras position och objektens placering genom att spåra särdragen i varje bild. Först beräknas kamerans position och vinkel därefter sker en finjustering med hjälp av stråkutjämning som justerar in positioner med hjälp av en algoritm, därefter skapas punktmolnet (Harrie m. fl., 2015). För att relatera punktmolnet till det absoluta koordinatsystemet används stödpunkter med kända koordinater som placerats ut över flygstråken (Westoby m. fl., 2012). Dessa stödpunkter sprids jämnt över flygstråken för att uppnå det bästa resultat (Harrie m. fl., 2015).

En drönare utrustad med en självutlösande digitalkamera och förprogrammerad flygkurs kan täcka små markområden med högupplösta bilder och med hjälp av SfM skapa ett punktmoln. En stor fördel med denna metod är att en pilot snabbt kan täcka små specifika områden med hög spatial upplösning till en låg kostnad (Puliti m. fl., 2015; Westoby m. fl., 2012). Detta beror framförallt på framgångar inom kamera utvecklingen, multi-bild matchande algoritmer och förbättrade grafikprocessorer vilket har lett till möjlighet att lagra mer data och snabbare databearbetning (Leberl m. fl., 2010). Nackdelarna med punktmolnsdata från stereomatchning av flygbilder är dock att det krävs tillgång till en befintlig DEM för att normalisera höjderna i punktmolnet från höjd över havet till höjd över marken (White m. fl., 2016). Detta är ett av argumenten för att använda laserdata istället som kan penetrera krontaket, och alltså även ger punkter under trädkronorna (White m. fl., 2016).

Tidigare studier som använder sig av stereomatchade flygbilder från drönare för att skapa punktmoln och skatta de skogliga variablerna, har visat goda resultat och kan jämföras med skattningar från flygburen laserskanning. Grundtytevägd medelhöjd är den variabel som skattas bäst och ger det lägsta RMSE på 3,5 % och 8,8 % med drönare respektive flyg (Bohlin m. fl., 2012; Puliti m. fl., 2015). Andra studier visar att det är möjligt att uppskatta höjden inom ett 0,5 m spann (Sperlich m. fl., 2014). Noggrannheten i skattning av volym, diameter och grundyta är lägre då egenskaperna inte bara beror på krontakets höjd. Tidigare resultat visar RMSE på 13,1 % och 14,9 % för volymen vilket är jämförbart med en planläggares medelfel (Bohlin m. fl., 2012; Puliti m. fl., 2015).

1.2 Syftet med studien

Denna studie som stöds av Södra Skogsägarna syftar till att använda flygbilder tagna med en drönare för att skapa ett tätt punktmoln och utvärdera

om ITC metoden kan användas för att ta fram de skogliga variablerna till en skogsbruksplan.

1.3 Kort om Södra Skogsägarna

Södra Skogsägarna är en skogsägarförening som ägs av mer än 50 000 skogsägare, vars ändamål är att främja medlemmarnas ekonomiska intressen genom att trygga virkesavsättningen (Skogsägarna, 2014b, 2016). Föreningen är indelad i tre affärsområden Skog, Wood och Cell. De två sistnämnda är Södras industrier som består av sågverk och massabruk. Södra Skog ansvarar för råvaruanskaffning och den skogliga servicen till medlemmarna, här ingår produktion av skogsbruksplaner. Den genomsnittliga fastigheten för Södras medlemmar är ca 50 ha med en snittavdelning på ca 2 ha. Årligen upprättas ca 2 500 skogsbruksplaner, vilket motsvarar ca 154 000 ha (Skogsägarna, 2016).

Södra använder idag initialt fjärranalysdata vid skogsbruksplanläggning för att få en översikt och för att förtolka fastigheterna innan mätningar i fält påbörjas (Skogsägarna, 2014a). Det är av stort intresse för Södra att dra ytterligare nytta av fjärranalysdata i planläggningen.

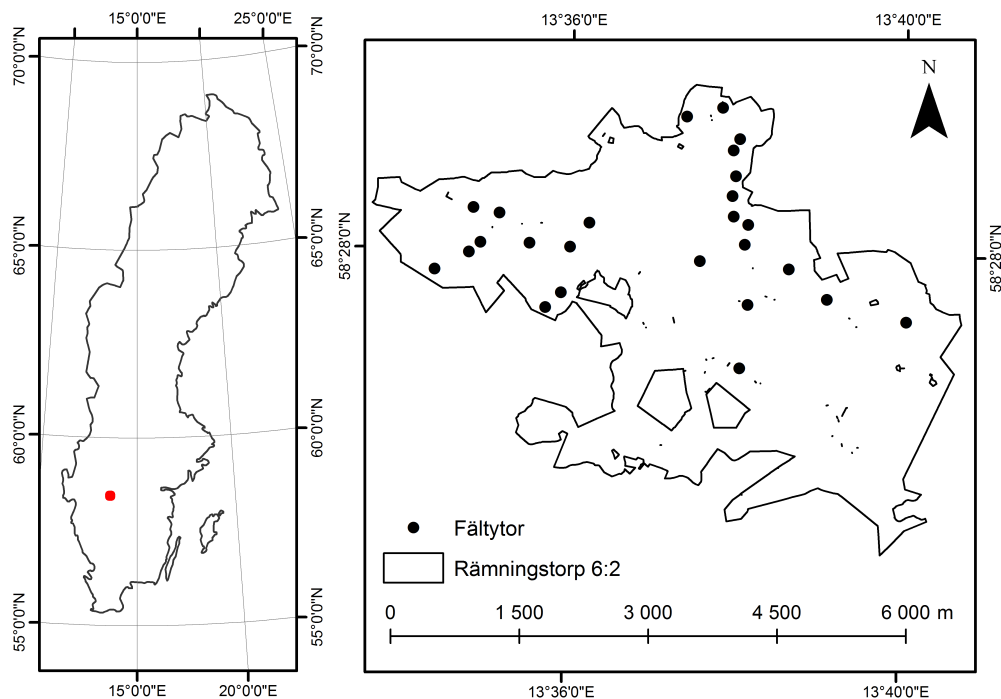
1.4 Mål

Målet med denna studie är att utvärdera en metod för att skatta skogliga variabler (H , D , VOL) på avdelningsnivå, detta genom stickprov av träd kombinerat med heltäckande ITC-skattningar från stereomatchade flygbilder tagna med drönare. Detta med data från ett försöksområde i södra Sverige.

2 Material och metod

2.1 Studieområde

I denna studie användes studieområdet Remningstorp som är beläget 10 km nordost om Skara (58°30' N, 13°40' E.) se figur 1. Stiftelsen som äger området bedriver ett aktivt trakthyggesbruk där det dominerande trädslaget är gran (*Picea abies*) med inslag av tall (*Pinus sylvestris*) och björk (*Betula spp.*). Marken är bördig och terrängen lätt kuperad med en höjd över havet på 120-145 m. Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) har använt området som försöksområde för fjärranalys i södra Sverige under de senaste två decennierna och inventerar fastigheten kontinuerligt. (Wallerman m. fl., 2016).



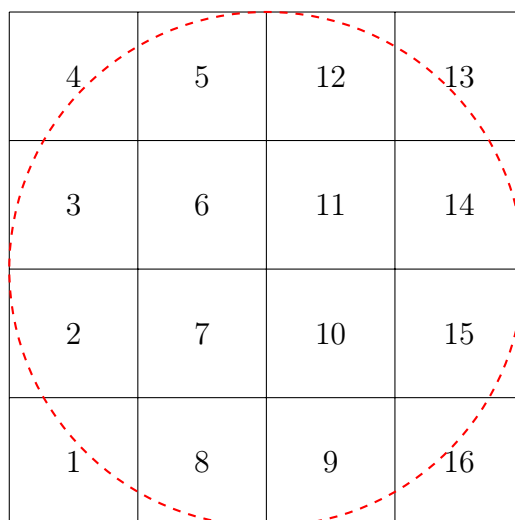
Figur 1. Studieområde. Vänster: Positionen för Remningstorp i Sverige. Höger: Fastighetsgräns och positioner för provytorna (© Lantmäteriet i2014/764).

Figure 1. Study area. Left: Location of the real estate Remningstorp in Sweden. Right: Real estate boundary and positions for field plots (© Lantmäteriet i2014/764).

2.2 Inventeringsdata

Inom studieområdet finns 36 cirkelprovytor med en radie på 40 m. De inventerades under sensommaren och hösten 2014 enligt figur 2. Cirkelcentrum och de 16 separata kvadraterna fastställdes med hjälp av en Trimble GeoX-TR GPS. Därefter klavades alla träd inom cirkelprovytan inklusive stående döda träd med PosTex[©] systemet. Diameter, trädslag och koordinater registrerades och stickprov av trädhöjder togs på i snitt var åttonde stam. De 16 separata kvadraterna behövdes användas för att PosTex systemet inte har tillräcklig räckvidd från cirkelcentrum för att fastställa koordinater. En lokal funktion användes för att uppskatta höjden för varje klavträd som inte höjdmättes (Wallerman m. fl., 2016). Data exporterades därefter till Heureka där tillståndet för provytorna skrevs fram till år 2016.

En genomgång av provytorna gjordes där alla ytor med andra dominerande trädslag än tall eller gran, en lägre grundytta än 10 m² eller som avverkats



Figur 2. Cirkelprovytan med en 40 m radie uppbyggt av 16 kvadratiska ytor. Streckade linjen visar avgränsningen för cirkelprovytan.

Figure 2. Circular field plot with 40 m radius, build from 16 square plots. Dashed line shows the boundary of the circular field plot.

under åren 2014 - 2016 avlägsnades ur studien. Detta gjordes för att få homogena bestånd samt relevanta data som inte påverkas av skogsbruks åtgärder mellan inventering och fjärranalysinsamling. Inom ytorna avlägsnades även alla stammar under 8 cm i bröst höjd. Totalt användes 20 provytor i studien, se tabell 1 för antal träd och dominerande trädslag per yta.

Tabell 1. Antal inventerade träd och dominerande trädslag per yta.

Table 1. Number of trees and the dominated tree species per plot.

Yta	Antal träd	Dominerade trädslag
10	216	Gran
13	344	Gran
87	275	Gran
113	432	Gran
116	377	Gran
151	484	Gran
165	211	Gran
167	312	Tall
180	294	Tall
203	521	Gran
211	386	Gran
212	378	Gran
226	543	Gran
316	355	Gran
325	424	Gran
351	409	Gran
363	401	Gran
447	253	Gran
1005	163	Tall
1010	192	Gran
Totalt:	6 970	

2.3 Flygbilder

I denna studie användes flygbilder från drönarflygningar över Remningstorp från mitten av augusti 2016 innan avlövnningen påbörjats. Väderförhållandena varierade under flygningarna, men med största delen klart och soligt väder. Flygningarna pågick mellan kl. 8-18. Drönaren som användes var en Quad Solo 3DR utrustad med en 24,3 megapixel SONY APS-C kamera. Flygstråken planerades i förväg för att erhålla en stereotäckning på 80 % inom stråken, med inställningarna: flyghöjd 120 m över marken, hastighet 10 m/s och ett slutarintervall på varannan sekund. Upplösningen beräknas till en pixelstorlek på 0,023 m.

Flygblocken sträckte sig över rektangulära områden (15-20 ha) och inom varje block fanns 1-3 provytor. Inom en del av flygblocken fanns stödpunkter som

användes för att förbättra kamerans inre och yttre orientering med hjälp av blocktriangulering. Stödpunkterna var utmarkerade i fält och koordinatsatta med en noggrann GPS. (Lantmäteriet, 2016; Puliti m. fl., 2015).

2.4 Bildbearbetning

Agisoft Photoscan Professional användes för att generera täta 3D-punktmoln, något som visat sig ge goda resultat vid tidigare studier (Puliti m. fl., 2015). Processen var uppdelad i tre huvudsteg.

I det första steget importerades de geotaggade flygbilderna till Photoscan, där en första inspektion utfördes. Bilder som var suddiga eller överexponerade samt från start och landning raderades. Därefter beräknades kameravinkel och position med hjälp av SfM, detta för att upptäcka särdrag och matcha bilderna mot varandra (Agisoft, 2012). Resultatet blev då ett glest 3D-punktmoln med visualisering av kamerans orientering och positioner. Bilder med uppenbara extremvärden och avvikande kamerapositioner rensades bort. Detta medförde att punktmolnet blev mer noggrant vid nästa justering.

I det andra steget importerades koordinaterna till stödpunkterna och Photoscan placerade automatiskt ut flaggor relativt nära stödpunkterna i bilderna. På grund av bristande noggrannhet i kamerans inre orientering justerades flaggans placering så att de matchade stödpunkterna. Vid varje omkörning justerades flaggornas position närmare stödpunkterna och denna process upprepades tills de beräknade felen på stödpunkterna var mindre än 0,2 m. Matchningen gjordes på alla flaggor som var tydligt synliga i flygbilderna.

I det tredje steget byggdes det täta punktmolnet över flygblocken och sparades ner som en LAS fil, se figur 3. Bearbetningen var en tidsödande process som krävde en dator med stor minnes- och grafikkapacitet (Harrie m. fl., 2015). Till sist skapa ett ortofoto över blocket. Stegen ovan repeterades för alla 16 flygblock.



Figur 3. Ett punktmoln skapat med Agisoft Photoscan.

Figure 3. Point cloud build in Agisoft Photoscan.

2.5 Databearbetning

Ur det täta punktmolnet extraherades alla punkter inom en 45 m radie från provytornas centrum med hjälp av LAsTools (Isenburg, 2017). Storleken på radien valdes för att ha en marginal för träd som eventuellt lutar ut från provytans ytterkant. Punktmolnet normaliserades därefter med en DEM från den nya nationella höjdmodellen för att få en höjd över marken istället för höjd över havet (Bohlin m. fl., 2012). En manuell justering av punktmolnets vertikala läge gjordes där marknivån i punktmolnet uppenbart skilde sig ifrån lantmäteriets markmodell.

För att hitta de enskilda trädens toppar användes LM metoden. Metoden användes för sin förmåga att identifiera enskilda träd i barrdominerade bestånd (McGaughey, 2014). Först skapades en högupplöst digital kronhöjdsmodell (Canopy Height Model, CHM) med en upplösning på 0,25x0,25 m från det normaliserade punktmolnet. CHM:en jämnades därefter ut med

en medelhöjd från de närmaste cellerna i FUSION (McGaughey, 2014). För att minska risken för dubbeltoppar och falska toppar användes en begränsning av fönsterstorleken. Fönsterstorleken är ett utrymme där enbart ett LM får finnas och bestäms utifrån en algoritm som tillåter en viss storlek på fönstret beroende på trädhöjden (Kini och Popescu, 2004). Algoritmen multiplicerades med en faktor på 0,25 för att bättre passa studiens skogstyp, då algoritmen kommer från amerikanska skogar (Kini och Popescu, 2004). En tröskelnivå på 10 m användes för att filtrera bort träd under denna höjd. Detta bedömdes till en lämplig höjd då medelhöjden för alla bestånd ligger på ca 28 m. Resultatet av metoden blir till en lista med koordinater och höjd för alla detekterade LM.

För att tillhandahålla regressionsmodellerna med ytterligare information för varje träd användes en watershed-modell för att bestämma trädkronornas areal. Modellen använder en ytmodell (digital surface model, DSM) skapad av FUSION som jämnas ut tre gånger med ett 3x3 Gaussian filter (Holmgren och Lindberg, 2013). DSM normaliserades sedan med hjälp av den nya höjdmodellen. Därefter placeras ett frö i varje rastercell, som symboliserar en startpunkt. Fröna rör sig sedan mot den granncell som har det högsta värdet. Denna process pågår fram tills dess att omkringliggande värden ej längre är större, eftersom ett LM är nått. Alla frön som kommer till samma LM definierar ett segment som representerar en trädkrona i detta fall. Eftersom watershed-modellen utgår från ett LM så användes samma filtrering som tidigare för att ta bort näraliggande LM. Resultatet är segment för trädkronornas utbredning inom avdelningen.

Segmenten används därefter för att extrahera metriker ur varje segment med hjälp av LAStools (Isenburg, 2017). Följande metriker beräknades: höjdpercentiler (p_{80} , p_{85} , p_{90} , p_{95}), och vegetationskvot (dns). Dessa metriker har tidigare visat goda resultat för att skatta skogliga variabler med regressionsmodellerna. (Holmgren och Lindberg, 2013; Næsset, 2002).

2.6 Sammanlänkning av fjärranalysdata och inventeringsdata

Eftersom det finns geometriska fel både i positioneringen av klavträden vid inventeringen och i orienteringen av punktmolnsdata stämmer oftast inte dessa två datakällor exakt överens geografiskt. Ytterligare fel skapas av lutande träd och av att det finns träd som inte detekterats i punktmolnsdata. För att identifiera vilka inventerade träd som hör ihop med vilka

LM användes algoritmen Groundplot (Olofsson, 2006). Kopplingen utgår från LM koordinater som kopplas med inventeringsdatas stampositioner och stamdiameter. Inventeringsdata tilldelas en provisorisk höjd utifrån stamdiameterens mått för att söka efter en bra sammanlänkning inom en bestämd sökradie. För att bättre passa in tillåts hela 40 m cirkelytorna att vridas för att hitta en bättre sammanlänkning. Dessutom används en funktion för att större träd ska prioritera länkning av stora träd eftersom dessa mer sannolika sammanlänkningar. Därefter kopplas trädsegmenten med de matchade träden för att skapa ett dataset med all information från både inventeringsdata och fjärranalysdata (LM och metriker).

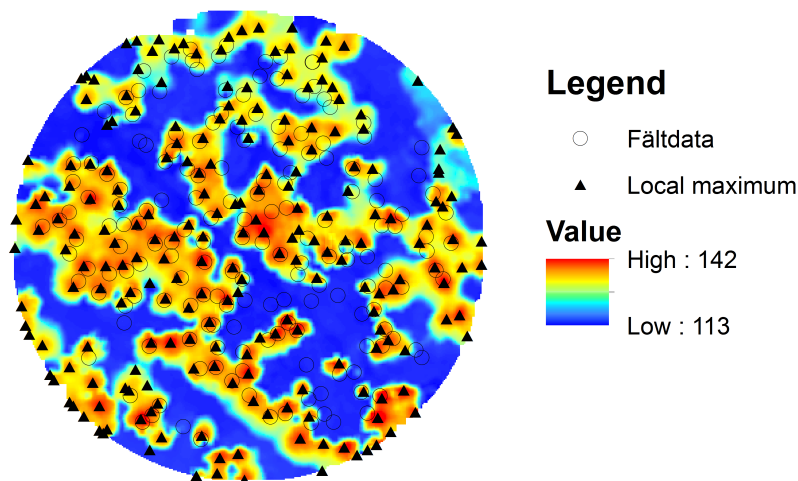
2.7 Regressionsmodellering

Baserat på data för det sammanlänkade inventeringsdatat och fjärranalysdatat anpassades regressionsmodeller för H , D och VOL . Uppenbart felaktiga sammanlänkningar sorterades bort där uppmätta höjder och höjden för LM skiljde sig, mer än 5 meter. För att hitta de fjärranalysvariabler som korrelerar bäst med höjden i en linjär modell gjordes en uttömmande sökning efter en oberoende variabel med R paketet Leaps i RStudio (Fortran code by Alan Miller, 2017; R Core Team, 2016). För diametern och volymen skapades regressionsmodeller baserat på höjd- och densitetsmått, då dessa tidigare visat goda korrelationer till variablerna. Regressionsmodellerna applicerades på alla funna fjärranalys träd och summerade variablernas skattning per yta för alla 20 ytor där totalvolym, medelhöjd och medeldiameter skattades.

3 Resultat

3.1 Sammanlänkningar

Resultatet av sammanlänkningen av fjärranalysdata och inventeringsdata med hjälp av Groundplot blev totalt 4 496 kopplingar, det vill säga att 64 % av träden sammanlänkades. I figur 4 visas en provyta med en ytmodell som bakgrund där LM och fälldata (inventeringsdata) finns utmarkerat med symboler.



Figur 4. DSM för en provyta sett från ovan med LM och inventeringsdata, färgad utifrån DSM:ens höjd (höjd över havet). Figuren visar data inom en 45 m radie från provytans centrum.

Figure 4. DSM for one plot seen from above with the LM and inventory data, colored based on DSM height (above sea level). Figure shows data within 45 m radius from the plot center.

3.2 Regressionsmodeller

Regressionsmodellen byggdes med 3 923 stycken träd från sammanlänkning efter att extremvärdena avlägsnades. Resultatet av regressionsmodellerna baserat på enskilda träd-skattningarna visas i tabell 2. I figur 5 visas värden för H , D och VOL för inventeringsdata plottat mot de skattade värdena utifrån regressionsmodellerna. För höjden syns ett starkt samband mellan LM och inventeringshöjden, däremot visar diameter och volym svagare samband mellan beroende och oberoende variabler.

Resultatet av regressionsmodellerna applicerade på alla funna fjärranlaysträd per provyta med jämförelsetal från inventeringsdatat visas i tabell 3. Relativt RMSE och BIAS för alla ytor visas i tabell 4.

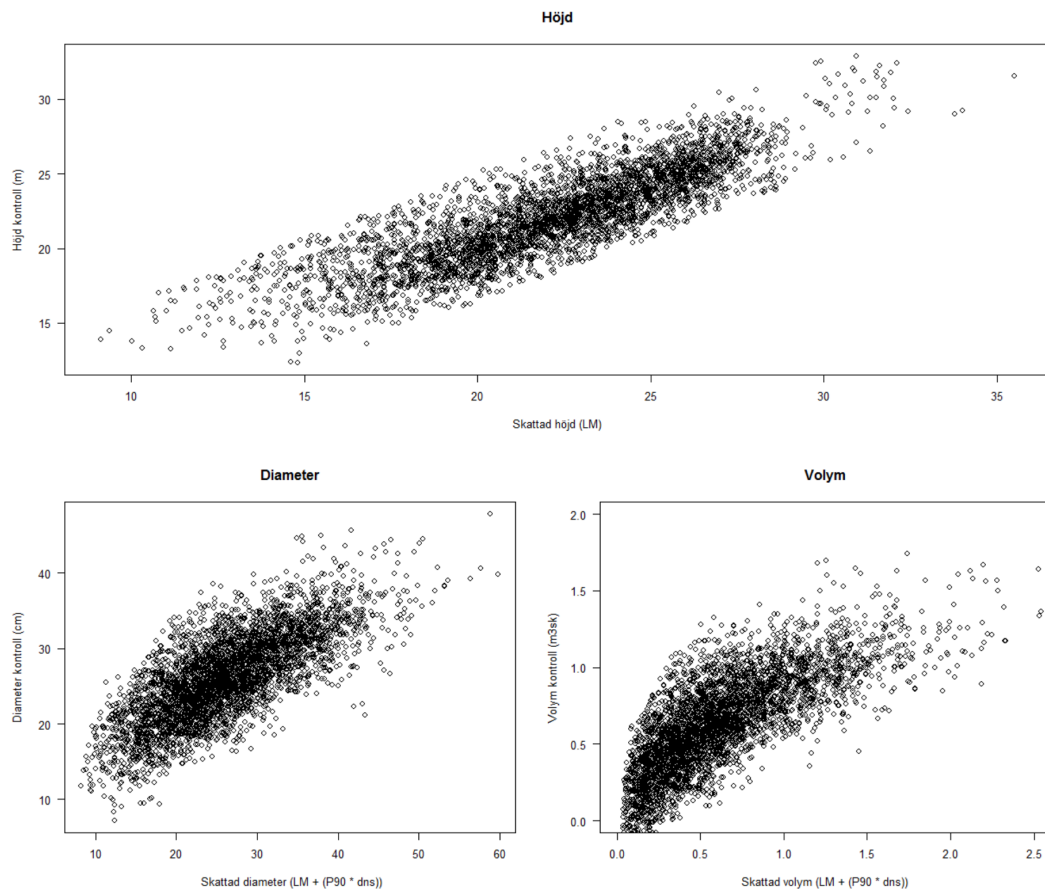
Tabell 2. Resultatet för regressionsmodellerna baserat på oberoende variabel för de sammankopplade enskilda träden, regressionsmodellernas förklaringsgrad (R^2 -adj) och relativ RMSE (RMSE i procent av medelvärdet).

Table 2. Results of regression modeling based on the independent variables of the connected individual trees, coefficient of determination and relative RMSE (RMSE in percent of the meanvalue).

Beroende variabel	Oberoende variabel	R^2 -adj	Relativt RMSE ¹
Höjd	LM^{***}	0,72	8,6 %
Diameter	$LM^{***} + p90*dns^{***}$	0,55	19,8 %
Volym	$LM^{***} + p90*dns^{***}$	0,57	43,9 %

Signifikanskoder: $p \leq 0,001$ ***

¹RMSE: Medelfel



Figur 5. Spridningsdiagram med värden för höjd, diameter och volym från inventering plottade mot skattade värden.

Figure 5. Scatterplot with values from height, diameter and volym from the survey plotted against estimated values.

Tabell 3. Resultatet för regressionsmodellerna per provyta, inventerad och skattade värden för skogliga variablerna: volym, medelhöjd och medeldiameter.

Table 3. The result from the regression models per field plots; surveyed and estimated values of the forest variables: volume, mean height and mean diameter.

Yta	Inventering			Skattad		
	<i>VOL</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>VOL</i>	<i>H</i>	<i>D</i>
10	131.32	23.69	31.68	98.32	22.03	26.34
13	209.71	24.46	28.99	223.72	23.93	29.17
87	75.60	19.02	22.32	62.90	18.64	20.03
113	67.18	17.16	19.80	41.60	17.74	18.18
116	223.12	24.38	29.31	232.76	25.13	31.24
151	89.20	19.78	20.64	129.08	21.33	25.15
165	106.53	22.33	27.60	107.31	20.86	24.87
167	149.37	22.81	27.72	152.05	21.85	25.61
180	131.44	21.74	30.15	131.94	24.54	31.06
203	92.87	17.93	19.05	102.67	18.99	20.37
211	124.94	22.16	24.50	149.25	22.59	26.92
212	104.48	19.60	22.95	122.31	20.68	23.35
226	53.95	17.54	16.99	62.66	18.42	19.76
316	220.43	24.07	29.90	210.67	23.60	28.65
325	173.88	24.09	25.72	254.47	24.85	30.73
351	130.19	20.35	22.56	165.11	21.77	25.27
363	113.11	19.76	22.49	131.66	20.61	23.32
447	162.76	24.20	32.10	168.87	24.79	30.88
1005	128.82	27.15	34.25	109.59	21.92	26.80
1010	120.08	24.92	32.20	129.98	23.42	29.88

Tabell 4. Medelfel och systematiskt fel för de provytevisa skattningar av skogliga variabler baserat på regressionsmodellerna.

Table 4. Results for the regression estimates and mean values per field plots based on regressionmodell.

Skogsvariabel	Relativt RMSE ¹	Relativt BIAS ²
Medelhöjd	13,0 %	2,4 %
Medeldiameter	17,0 %	2,1 %
Volym	28,1 %	10,9 %

¹RMSE: Medelfel

²BIAS: Systematiskt fel

4 Diskussion

Syftet med denna studie var att undersöka möjligheten att skatta avdelningsvisa skogliga variabler från stereomatchade flygbilder tagna med drönare. Resultatet visar att det är möjligt att skatta skogliga variabler med ett medelfel på 13,0 %, 17,0 % och 28,1 % för medelhöjd, medeldiameter och volym. Jämförs resultatet med andra studier baserade på ABA metoden istället för ITC är resultaten underlägsna (Bohlin m. fl., 2012; Næsset, 2002; Puliti m. fl., 2015). Detta är ytterligare ett exempel på att ITC metoden inte är lika operativt tillämpbar som ABA (White m. fl., 2016). Det kan bero på att en optisk sensor användes, resultat från andra ITC studier där laser varit den använda sensorn visar på att 90 % av volymen återfinns (Persson m. fl., 2002). Ett alternativ till ITC hade varit att använda semi-ITC, som kan lösa en del av ITCs problem (Breidenbach m. fl., 2010). Semi-ITC kan koppla flera fältmätta träd till ett segment från fjärranalysdata, vilket innebär att flera träd kan ingå i ett segment, det betyder att inga träd försvinner ur analysen.

Regressionsmodellerna för diameter och volym från tabell 2, var redan från början präglade av höga medelfel därav är det naturligt att ett högt medelfel även återkommer när modellerna tillämpas på de enskilda träden för ytorna. Det finns ett antal olika anledningar till varför värdena är så höga. Främst beror det på att inventeringsdatat fick modifieras och framskrivas. Trädhöjder uppskattades med hjälp av en lokal funktion för alla träd som inte höjdmättes i fält. Det är välkänt att funktioner enbart skattar en viss höjd utifrån vissa parametrar och att det därför garanterat finns fel i höjduppskattningen. Dessutom gjordes framskrivningen av tillståndet med Heureka, alltså ytterligare en funktion som innehåller en del felberäkningar. Båda åtgärderna har varit nödvändiga för att färdigställa studien men problematiska då värden ej stämmer exakt överens med verkligheten.

Resultatet för höjden är den viktigaste faktorn, eftersom den också ger mycket information om volymen och diametern. Detta gäller speciellt vid

stereomatchade flygbilder då de ej detekterar strukturen under trädkronorna. Detta syns på de oberoende variablerna i tabell 2 där både LM och $p90$ används till regressionsmodellernas uppbyggnad. Modellerna för diameter och volym bygger på ett samband mellan höjden ($p90$) och densiteten (dns). Det är intressant att dns korrelerar så bra eftersom densitetsmättet är ett mått främst anpassat för laser där punkter kan återfås från hela vegetationsskiktet. Densitetsmättet har dock tidigare används vid optiska sensorer och regressionsmodeller (Blombäck, 2015; Puliti m. fl., 2015).

Fjärranalysmaterialet som bestod av drönarebilderna har varit ett tillräckligt bra material för att skapa täta punktmoln. En svaghet i bilderna har varit ljusexponeringen, där en del bilder blev delvis överexponerade av solljuset. Detta bidrog även till skuggor, vilket gjorde det svårt att identifiera stödpositionerna i flygbilderna. Det visade sig även att Photoscan bara använder stödpositionerna efter att hela punktmolnet är färdigbyggt. Det bidrog till att en manuell justering av altituden fick göras i efterhand. I framtiden kommer blocktriangulering förmodligen klara sig helt utan stödpunkter om en bättre noggrannhet vid positionering kan användas (Harrie m. fl., 2015). Det kan redan idag genomföras genom att använda en mer noggrann GPS som Real Time Kinematic-GPS.

Vid framtagning av regressionsmodellerna användes det sammanlänkade materialet. Modellens förklaringsgrad från tabell 2 är låg för diameter och volym, någon som är självklart om man jämför med spridningsdiagrammet i figur 5. Det syns tydligt att varken diameter eller volym har lika tydligt samband som för höjden. Detta beror eventuellt på variationen för de olika ytorna där skötselåtgärder, bonitet och tidigare skador kan skilja sig från de olika ytorna. Det kan också bero på olika trädslag, därför hade det varit önskvärt att bygga olika regressionsmodeller för olika trädslag. För att det ska vara möjligt måste dock trädslag kunna identifieras ur punktmolnet, en tidig hypotes var att segmentstorleken skulle kunna antyda något om trädslaget, detta har dock inte testats i denna studien.

Trädpositionerna från inventeringsdata har avvikit mer än väntat och mer än tidigare studier indikerat (Lämås, 2010). Detta kan vara beroende på de 16 delytor, som bygger upp de 40 m cirkulära provytorna, ej har varit tillräckligt noggranna vid utplacering av centrum positionen eller inriktningen av Postexstativet. Detta har varit en bidragande orsak till varför kopplingen mellan inventeringsdata och fjärranalysdata inte är likvärdig med tidigare studier (Olofsson m. fl., 2008). En möjlig lösning skulle kunna vara att istället för

att köra Groundplot på 40 m ytorna skulle den köras på de 16 enskilda kvadratiska ytorna istället.

En kompromiss som fick göras i Groundplot var att justera restriktionerna för sammankopplingen, det bedömdes att inventeringsdatat ej hade den noggrannheten som krävdes för att uppnå de högre restriktionerna. Detta i sin tur har lett till att en del sammankopplingar har blivit fel. De största felen korrigerades därefter genom rensning av extremvärdena. En annan möjlig lösning för att få bättre koordinater skulle vara att använd en markburen laserscanning där både noggrannheten och precisionen är hög. Det i kombination med högre restriktioner på Groundplot hade förmodligen resulterat i fler sammanlänkning och lägre RMSE.

LM var den mest förklarande variabeln för alla tre skogliga variablerna i regressionsmodellerna. Tröskelgränsen på 10 m var en bra nivå för att eliminera bort falska LM, om studien ska göras om bör en justerad tröskelgräns göras beroende på beståndens medelnivå istället, för att ej filtrera bort fler trädtoppar än nödvändigt. Det hade även varit önskvärt att återanvända samma LM punkter från FUSION vid Watershed modellen, då FUSION LM var anpassade för just detta data.

Ett antagande som fick göras vara att modellen vid operativ tillämpning hade tagits fram sedan tidigare. Det skulle således lokalt förbättra modellen. En svaghet i denna studie är dock att modellen byggs och testas på samma material. Det beror på att det inte fanns tillräckligt med inventeringsdata för att testa modellen på enskilt data.

4.1 Slutsatser

Att använda stereomatchade flygbilder från en drönare över mindre markområden för att bygga täta punktmoln fungerar väl. Om däremot information från punktmolnen ska användas för att skattas skogliga variabler på enskilda träd nivå krävs ett bra underlag från inventeringsdata. Denna studie har präglas av modifiering och låg noggrannhet samt precision på inventeringsdata vilket har återspeglats i resultatet. Resultaten visar högt medelfel för höjd, diameter och volym i jämförelse mot andra studier inom fjärranalys, den låga noggrannheten innebär att metoden inte kan rekommenderas för operativt skogsbruk i dagsläget. En möjlighet att förbättra inventeringsdata skulle vara att använt en markburen laserscanning istället.

Litteratur

- Agisoft (2012). URL: http://downloads.agisoft.ru/pdf/photoscan-pro_0_9_0_en.pdf.
- Blombäck, J. (2015). ”Uppdatering av Södras skogsbruksplaner med hjälp av stereomatchning av flygbilder i kombination med den nya nationella höjdmodellen och Riksskogstaxeringens provytor”. I:
- Bohlin, J., J. Wallerman och J. E. S. Fransson (2012). ”Forest variable estimation using photogrammetric matching of digital aerial images in combination with a high-resolution DEM”. I: *Scandinavian Journal of Forest Research* 27.7, 692–699.
- Breidenbach, J. m. fl. (2010). ”Prediction of species specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach based on fused airborne laser scanning and multispectral data”. I: *Remote Sensing of Environment* 114.4, s. 911–924.
- Culvenor, D. S. (2003). ”Extracting individual tree information”. I: *Remote Sensing of Forest Environments*. Springer, s. 255–277.
- Fortran code by Alan Miller, T. L. based on (2017). *leaps: Regression Subset Selection*. R package version 3.0.
- Gobakken, T., O. M. Bollandsås och E. Næsset (2015). ”Comparing biophysical forest characteristics estimated from photogrammetric matching of aerial images and airborne laser scanning data”. I: *Scandinavian Journal of Forest Research* 30.1, s. 73–86.
- Harrie, L. m. fl. (2015). *Geodetisk och fotogrammetrisk mättnings-och beräkningsteknik*.
- Hirschmugl, M. m. fl. (2007). ”Single tree detection in very high resolution remote sensing data”. I: *Remote Sensing of Environment* 110.4. Conference on Operational Tools in Forestry Using Remote Sensing Techniques (ForestSAT 2005), Borås, Sweden, May 31-JUN 03, 2005, 533–544.
- Holmgren, J. och E. Lindberg (2013). ”Tree crown segmentation based on a geometric tree crown model for prediction of forest variables”. I: *Canadian Journal of Remote Sensing* 39.1, S86–S98.

- Hyypä, J. m. fl. (2001). "A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners". I: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39.5, s. 969–975.
- Isenburg, M. (2017). *Award Winning Software for Rapid LiDAR Processing*. URL: <http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/>.
- Kini, A. U. och S. C. Popescu (2004). "TreeVaW: a versatile tool for analyzing forest canopy LIDAR data: A preview with an eye towards future". I: *Kansas City, MO: SPRS Images to Decision: Remote Sensing Foundation for GIS Applications*.
- Lantmäteriet (2016). *Digitala flygbilder*. URL: <https://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/Flyg--och-satellitbilder/Flygbilder/Digitala-flygbilder/>.
- Leberl, F. m. fl. (2010). "Point Clouds: Lidar versus 3D Vision". I: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 76.10, 1123–1134.
- Lämås, T. (2010). *The Haglöf PosTex ultrasound instrument for the positioning of objects on forest sample plots*. Tekn. rapport.
- Magnusson, M., J. E. S. Fransson och H. Olsson (2007). "Aerial photo-interpretation using Z/I DMC images for estimation of forest variables". I: *Scandinavian Journal of Forest Research* 22.3, s. 254–266. eprint: <http://dx.doi.org/10.1080/02827580701262964>.
- McGaughey, R. J. (2014). *FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization*. Report. USDA, United States Department of Agriculture.
- Nordkvist, K. och H. Olsson (2012). "Laser scanning and digital photogrammetry for forestry". I:
- Næsset, E. (2002). "Determination of mean tree height of forest stands by digital photogrammetry". I: *Scandinavian Journal of Forest Research* 17.5, s. 446–459.
- Olofsson, K. (2006). *Groundplot: A field plot matching software*. Report. SLU, Division of Remote Sensing.
- Olofsson, K., E. Lindberg, J. Holmgren m. fl. (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". I: *Proceedings of SilviLaser 2008*, 8th.
- Persson, A., J. Holmgren och U. Söderman (2002). "Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner". I: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68.9, s. 925–932.
- Puliti, S. m. fl. (2015). "Inventory of Small Forest Areas Using an Unmanned Aerial System". I: *Remote Sensing* 7.8, 9632–9654.
- R Core Team (2016). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.

- Rahlf, J. m. fl. (2015). "Forest Parameter Prediction Using an Image-Based Point Cloud: A Comparison of Semi-ITC with ABA". I: *FORESTS* 6.11, s. 4059–4071.
- Skogsstyrelsen (2016). *Noggrannhetsutvärderingar Skogliga grunddata*. URL: http://www.skogsstyrelsen.se/Global/aga-och-bruka/Skogsbruk/Laserdata/Noggrannhet_skogliga_grunddata.pdf.
- Skogsägarna, S. (2014a). *Fältinstruktioner, Södra Skogsägarna*. Report. Södra.
- (2014b). *Stadgar för Södra Skogsägarna ekonomiska förening 2014-05-14*. Report. Södra.
- (2016). *Södra Skogsägarna, 2015 Årsredovisning och Hållbarhetsredovisning, 2015*. Online.
- Sperlich, M. m. fl. (2014). "Potential of unmanned aerial vehicle based photogrammetric point clouds for automatic single tree detection". I: *Available online: http://www.dgpf.de/neu/Proc2014/proceedings/papers/Beitrag270.pdf (accessed on 15 January 2015)*.
- Wallerman, J. m. fl. (2016). *Surveys at Remningstorp in years 2003 - 2014*. Report. SLU, Dept. of Forest Resource Management.
- Westoby, M. m. fl. (2012). "'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications". I: *Geomorphology* 179, s. 300–314.
- White, J. C. m. fl. (2016). "Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories: A Review". I: *Canadian Journal of Remote Sensing*, s. 1–23. eprint: <http://dx.doi.org/10.1080/07038992.2016.1207484>.