



Kontrolltaxering med stöd av drönare hos Norra Skogsägarna

Control assessment using drones at Norra Skogsägarna

Oscar Jakobsson

**Arbetsrapport 476 2017
Examensarbete 30hp A2E
Jägmästarprogrammet**

**Handledare:
Jonas Bohlin**

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-476-SE

Kontrolltaxering med stöd av drönare hos Norra Skogsägarna

Control assessment using drones at Norra Skogsägarna

Oscar Jakobsson

Nyckelord: fotogrammetri, UAV, inventering, inventeringsdesign

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

Jägmästarprogrammet

Handledare: Jonas Bohlin, SLU, Institutionen för skoglig resurshushållning, fjärranalys

Examinator: Tomas Lämås, SLU, Institutionen för skoglig resurshushållning, planering

Bitr. handledare: Jörgen Wallerman, SLU, Institutionen för skoglig resurshushållning, fjärranalys

Bitr. handledare: Mattias Nyström, SLU, Institutionen för skoglig resurshushållning, fjärranalys

Förord

Först och främst vill jag tacka mina handledare Jonas Bohlin, Mattias Nyström och Jörgen Wallerman som bidragit med sin kunskap och givande diskussioner och under arbetets gång. Ett stort tack till Norra Skogsägarna och Sara Karlsson som gav mig möjlighet att koppla arbetet till näringslivet och praktiska tillämpningar.

Jag vill även tacka Ljungbergsfonden som finansierar Ljungbergslaboratoriet som har tillhandahållit en kreativ studiemiljö. Slutligen vill jag också tacka alla studenter som vistats i Ljungbergslaboratoriet för stort kunskapsutbyte och många roliga stunder.

Sammanfattning

Varje år framställer Norra Skogsägarna ett stort antal skogsbruksplaner som måste uppfylla bestämda kvalitetskrav. Målet med studien är att med stöd av en drönare monterad med kamera utveckla kvalitetssäkringen av de skogsbruksplaner Norra Skogsägarna framställer. Målet ska uppnås genom att undersöka och utveckla en inventeringsstrategi för en drönarbaserad metod. Materialet som användes var tredimensionella vegetationsmodeller från fotogrammetiskt bearbetade bilder över små (cirkulära, 10 m radie) och stora (kvadratiska, 80 m × 80 m) fältinventerade provytor. Med hjälp av metriker hämtade ur punktmolnen skapades regressionsmodeller för grundtyvägd medelhöjd, grundtyvägd diameter, volym och grundyta. Tre olika inventeringsdesigner testades, obundet slumpmässigt urval, stratifiering och Local Pivotal Method.

Local Pivotal Method var den design som presterade bäst vid korsvalidering med lågt provyteantal för att skatta grundtyvägd medelhöjd, grundtyvägd diameter, volym och grundyta. Med en regressionsmodell byggd på 20 provytor hade grundtyvägd medelhöjd, grundtyvägd diameter, volym och grundyta ett relativt RMSE på 12,3 %, 10,8 %, 21,0 %, respektive 15,0 %. Resultaten visar att det är möjligt att med stöd av en drönare effektivisera kvalitetssäkringen för att täcka större områden samtidigt som man kan reducera antalet fältmätta provytor.

Abstract

Every year the forest owner association Norra Skogsägarna produces a large amount of forest management plans that must meet certain quality standards. The aim of this study is to develop the quality assurance of the forest management plans with the help of a drone mounted with a camera. The aim will be fulfilled through research and development of an inventory design based on information extracted from drone images. Photogrammetric processing of images across small (circular, 10 meter radius) and large (squared, 80 m × 80 m) plots paired with field surveys accounted for the material in the study. Using metrics extracted from point clouds, regression models for basal area weighted mean height, basal area weighted mean diameter, volume and basal area were created. Three different survey designs were tested, independent random sampling, stratification and the Local Pivotal Method.

The Local Pivotal Method was the inventory design with the best performance at low numbers of field surveyed plots to predict basal area weighted mean height, basal area weighted mean diameter, volume and basal area. A regression model based on 20 field surveyed plots revealed that the relative RMSE for basal area weighted mean height, basal area weighted mean diameter, volume and basal area was 12.3 %, 10.8 %, 21.0 % and 15.0 % respectively. The results show that it is possible to efficiently use a drone for quality assurance to cover larger areas while the number of field measured plots can be reduced.

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Drönare	2
1.3	Fotogrammetri och inventeringsdesign	2
1.4	Mål	4
2	Material och Metod	5
2.1	Studieområde	5
2.2	Fältinventering	6
2.3	Planering och genomförande av datainsamling med drönare	8
2.4	Bearbetning	9
2.5	Simulering av provyteutlägg	10
2.6	Validering	11
3	Resultat	13
4	Diskussion	18
4.1	Slutsats	20
	Litteratur	22

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Sveriges skogsmarksareal ägs till hälften av enskilda privata markägare (Christiansen, 2014). Detta utgör en areal på cirka 11 miljoner hektar fördelat på knappt 330 000 personer och mer än 232 000 brukningsenheter. Vid årsslutet av 2013 var drygt 111 000 personer med en sammanlagd skogsmarksareal över 6 miljoner hektar anslutna till någon av de fyra skogsägarföreningarna inom Lantbrukarnas Riksförbund (Norra Skogsägarna, Skogsägarna Norrskog, Mellanskog och Södra Skogsägarna). Verksamheten i dessa föreningar består i att erbjuda medlemmarna heltäckande skogsbruksservice, utbildning och rådgivning, bevaka de enskilda skogsägarnas näringspolitiska intressen, verka för ett aktivt och miljömedvetet skogsbruk samt att förmedla medlemmarnas virke till den svenska skogsindustrin (Lantbrukarnas Riksförbund, 2017). En del i denna verksamhet realiserar genom att upprätta skogsbruksplaner.

En skogsbruksplan är ett planeringsunderlag som hjälper skogsägare att uppnå målet med sitt brukande och den innehåller detaljerad information om skogstillståndet på fastigheten. Planen sträcker sig över 10 år och vägleder till rätt åtgärder vid rätt tillfällen med hänsyn till skogsskötsel, ekonomi och naturvård. Vid certifiering enligt PEFC-standard av skogsfastigheten är det skogsbruksplanen som utgör basen och den ligger även till grund för värdering vid ägarbyte och försäljning.

Vid beställning av en skogsbruksplan hos Norra Skogsägarna inleds arbetet med en förtolkning av flygbilder och laserdata utförd av externa konsulter. Detta utmynnar i en karta där skogen delats in i avdelningar utifrån tolkningen av dess tillstånd. En planläggare tilldelas den preliminära kartan och besöker avdelningarna i fält för att kontrollera så att avdelningsgränserna stämmer. Planläggaren inventerar också avdelningarna subjektivt och ett långsiktigt mål föreslås för avdelningens skötsel. Planläggaren skattar bland annat de kvantitativa variablerna ålder, medelhöjd, medeldiameter, grundyta och volym samt ger åtgärdsförslag. När fältarbetet är utfört sammanställs skogsbruksplanen och lämnas slutligen ut till skogsägaren.

Norra Skogsägarna planlägger omkring 60 000–70 000 hektar varje år. Arbetet utförs av ungefär 40 planläggare och pågår under fältsäsongen som sträcker sig från maj till oktober. Ett kvalitetskrav ställs på planläggarna där ingen enskild kvantitativ variabel får avvika mer än 25 % och alla variabler sammanvägt får inte avvika mer än 15 % från kontrolltaxerat värde. För att säkerställa enhetlighet och att kvalitetskraven uppnås utför Norra Skogsägarna kontrolltaxering av ett fåtal avdelningar från varje planläggare.

Syftet med kontrolltaxeringen är att ge planläggare tidiga indikationer om eventuella systematiska avvikelser för någon eller några av de inhämtade variablerna. De kvantitativa variablerna kontrolltaxeras endast i bestånd med huggningsklass G1, G2, S1 eller S2. Idag har kontrolltaxeringen som mål att inventera ungefär 2 % av den planlagda arealen. Detta resulterar i att planläggaren får återkoppling på ungefär 10 till 12 planlagda avdelningar under en fältsäsong.

I dagsläget inleds kontrolltaxeringen med en lottning av avdelningar som ska inventeras vilket görs centralt av skogsavdelningen. Kontrolltaxeraren lägger sedan ut provytorna i ett rutnät över avdelningen där förbandet bestäms utifrån avdelningens areal. Provyteradie och antal provytor bestäms utifrån det uppskattade stamantalet inom avdelningen. Vanligtvis inventeras 10 provytor med en radie på 7,98 m inom respektive avdelning.

Samtliga träd med en brösthöjdsdiameter över 8 cm klavas inom provytan, där döda träd och träd som lutar kraftigt inte inkluderas. Två provträd väljs ut objektivt på varje yta, förutsatt att de är friska och representerar beståndet. För varje provträd mäts höjd, diameter och ålder.

Kontrolltaxering är idag ett tidskrävande arbete där återkoppling till planläggare ofta blir knapphändig. Norra Skogsägarna har ambitionen att undersöka nya metoder för att kunna ge en mer utförlig återkoppling till sina planläggare och därmed en utökad kvalitetssäkring av de skogsbruksplaner som framställs.

1.2 Drönare

Genomslaget av drönare på den civila marknaden har medfört nya möjligheter för skoglig inventering. Framförallt är det den höga temporala och spatiala upplösningen, möjligheten att skraddarsy projekt och den enkla inlärningsprocessen som kännetecknar plattformen (Paneque-Galvez et al., 2014). Detta tillsammans med låga kostnader ger goda förutsättningar för drönare som plattform för fjärranalys inom det småskaliga skogsbruket.

Vanligtvis består systemet av en UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), en sensor (till exempel laserskanner eller kamera), en navigeringsdator, en operatör/pilot och ibland även en eller flera observatörer (Whitehead et al., 2014). Transportstyrelsen (2012) använder termen UAS (*Unmanned Aerial System*) för drönare och dess kringutrustning.

1.3 Fotogrammetri och inventeringsdesign

Fotogrammetri är vetenskapen och tekniken av att erhålla spatial information och andra geometriska korrigerade produkter med hjälp av bilder (Lillesand, Kiefer & Chipman, 2008). Mätning kan genomföras manuellt i stereoskopiskt visade bildpar eller med automatisk digital bildmatchning av överlappande bilder. Position i horisontalled (x och y) och vertikalled (z) beräknas för punkter på ytan av objekten i bilderna vilket skapar en tredimensionell modell (Lantmäteriet m.fl., 2013). Med digital fotogrammetrisk bearbetning av traditionella flygbilder är det möjligt att skatta skogliga variabler som trädhöjd, stamvolym och grundyta med högre noggrannhet än subjektiv fältinventering (Bohlin, Wallerman & Fransson, 2012). Applicering av denna teknik med en drönare är något som dykt upp på senare tid (Puliti et al., 2015).

Utvecklingen av teknik och algoritmer för bildbaserad terränguppgbyggnad har markant höjt kvaliteten på information som går att utvinna ur överlappande bilder (Chandler, 1999). På senare tid har automatiserad fotogrammetri och datainsamling från nära håll blivit värdefulla verktyg för tredimensionell topografisk modellering (Remondino & El-Hakim, 2006). Structure from Motion (*SfM*) är en algoritm som kan skapa tredimensionella modeller och punktmoln från överlappande bilder (Westoby et al., 2012). SfM skiljer sig från traditionell fotogrammetri i och med att man inte behöver veta kamerans interna orientering. Algoritmen beräknar simultant kamerans position, interna orientering och geometrin inom objektet med hjälp av matchande element i flertalet överlappande bilder.

Trädhöjd är det vanligaste att skatta med hjälp av tredimensionella vegetationsmodeller (Dandois & Ellis, 2013). För areabaserade metoder (medelvärdesberäkning på provyte- eller beståndsnivå) tas höjden ofta fram genom höjdpentiler. Punkttäthet kan relateras till täthetsvariabler som grundyta och volym (Næsset, 2002). Detta görs genom att filtrera bort punkter som ligger upp till två meter ovan marknivå. De filtrerade punkterna kan då ses som markträffar och kvarvarande punkter som vegetationsträffar. En kvot mellan vegetationsträffar och totalt antal punkter ger en god indikation på täthet i vegetationen.

Puliti et al. (2015) visade att ett UAS tillsammans med SfM-algoritmer för bildprocessering gav väl anpassade regressionsmodeller med ett justerat R^2 konsekvent över 0,71 för trädhöjd och volym på provytenivå. Korsvalidering visade också att regressionsmodellerna var rimliga när det gäller relativt RMSE ($RMSE \leq 15,4\%$). Studien pekar på att detta system har en noggrannhet jämförbar med andra populära fjärranalysmetoder, så som flygburen laserskanning (Gobakken, Bollandsås & Næsset, 2015), med fördelen att snabbt och enkelt kunna genomföras och ge tillgång till data över mindre områden.

Det är idag väl etablerat att fjärranalys i form av digital fotogrammetri och laserskanning från flygburna system skattar skogliga variabler väl (Næsset et al., 2004; White et al., 2013). Ett vanligt tillvägagångssätt för noggrannhetsbedömning är att utvärdera regressionsmodellerna genom korsvalidering (Maltamo, Næsset & Vauhkonen, 2014), där provytorna som används oftast ligger i ett systematiskt utlägg. Lite uppmärksamhet har ägnats åt att testa hur antalet och valet av fältinventerade provytor påverkar precisionen av de regressionsmodeller som används. Eftersom en stor del av de ekonomiska kostnaderna för inventering går åt mätningar i fält är det av intresse att hålla nere provyteantalet (Gobakken, Korhonen & Næsset, 2013).

Gobakken, Korhonen & Næsset (2013) undersökte hur provyteantalet påverkade volymskattningar genom linjär regression med data från flygburen laserskanning. Idén var att reducera antalet fältmätta provytor, och därmed tidsåtgången för fältinventering, utan att försämra regressionsmodellernas precision. För att lyckas krävs ett väl avvägt stickprov som representerar alla fördelningar av de skogliga variabler som finns i området man vill inventera (Gobakken, Korhonen & Næsset, 2013; Grafström, Saarela & Ene, 2014). Ett enkelt sätt att uppnå väl avvägda stickprov är genom stratifiering utifrån variabler som korrelerar väl med det man vill undersöka. Det finns även mer avancerade metoder, bland annat Local Pivotal Method (LPM), som kan utnyttja informationen från fjärranalys för att säkerställa spridning av stickprovet vid fältinventering av provytor (Grafström, Saarela & Ene, 2014).

1.4 Mål

Målet med studien är att med stöd av drönare utveckla Norra Skogsägarnas kontrolltaxering för en utökad kvalitetssäkring av de skogsbruksplaner de framställer. Detta ska uppnås genom att svara på följande frågor:

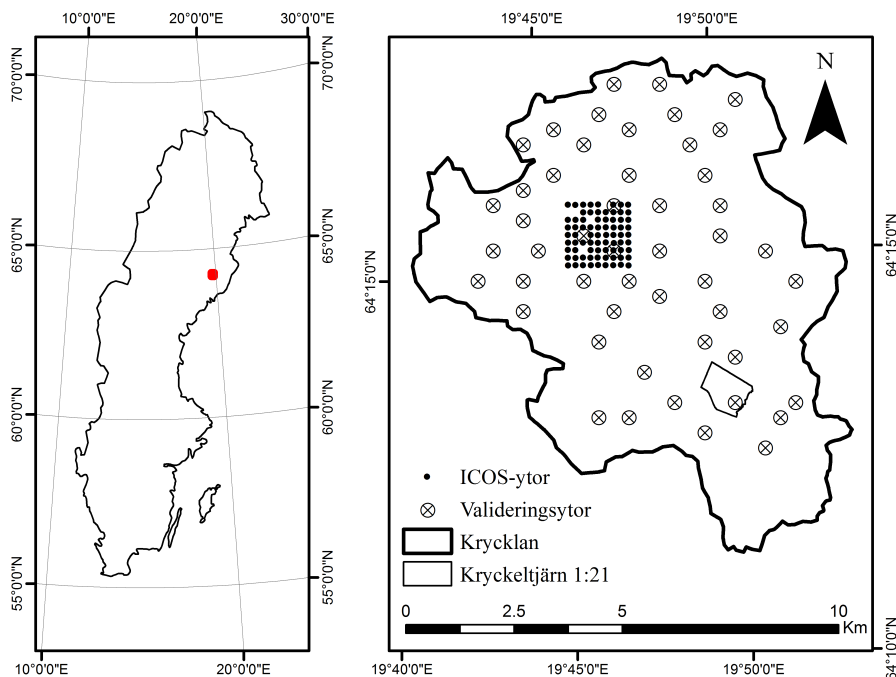
1. Med stöd av simulering, vilken av metoderna obundet slumpmässigt urval (OSU), stratifiering (Strat) och Local Pivotal Method (LPM) resulterar i de bästa regressionsmodellerna när provytorna sprids inom flera avdelningar utifrån hjälpinformationen inhämtad med drönare?
2. Hur påverkar antalet fältinventerade provytor regressionsmodellernas precision?
3. Hur väl skattar regressionsmodellerna grundtyevägd medelhöjd (Hgv), grundtyevägd medeldiameter (Dgv), volym (Vol) och grundyta (Gy) inom bestånd med huggningsklass G1, G2, S1 och S2?

2 Material och Metod

2.1 Studieområde

Studien utfördes inom avrinningsområdet Krycklan som är ca 6 800 hektar stort och är beläget i norra Sverige 50 km nordväst om Umeå (64,14°N, 19,46°E), se figur 2.1. Inom Krycklan bedrivs framförallt forskning kring hydrologi och biokemiska cykler men det har också blivit ett försöksområde för forskning inom fjärranalys och inventering. Höjd över havet varierar mellan 114 och 405 meter och området täcks till ytan av skog (87 %), myr (9 %), odlad mark (2 %), sjöar (1 %) och hållmark (1 %) (Laudon et al., 2013). Skogen domineras av tall (*Pinus sylvestris*) (63 %) och gran (*Picea abies*) (26 %) där fältvegetationen mestadels består av ris som blåbär (*Vaccinium myrtillus*) och lingon (*Vaccinium vitis-idaea*).

Den dominerande markanvändningen inom Krycklan är skogsbruk och cirka 2 500 hektar skog ägs av det statliga skogsbolaget Sveaskog men förvaltas av Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU). Resterande skogsmark ägs av privata markägare. Ungefär 25 % av skogsmarksarealen inom Krycklan har undantagits från skogsbruk sedan 1922 medan det resterande mestadels är produktionsskogar inne på sin andra omloppstid.



Figur 2.1. Krycklans geografiska utsträckning och hur de olika provytorna samt fastigheten Kryckeltjärn 1:21 var allokerade inom studieområdet. ICOS-ytor är de cirkulära träningsytorna med 10 m radie och valideringsytorna är de kvadratiska ytorna där 28 av totalt 38 användes.

Figure 2.1. The geographic extent of Krycklan and how the different sample plots together with the estate Kryckeltjärn 1:21 was allocated within the study area. IOCS-plots are the circular training plots with a 10 m radius and the validation plots are the square plots where 28 out of 38 were used.

2.2 Fältinventering

Under hösten 2014 och våren 2015 inventerades hela Krycklan av personal från SLU. Inventeringsdesignen var ett systematiskt utlägg av cirkelprovytor med 10 m radie, där förbandet mellan ytorna var 350 m. Under hösten 2015 inventerades ytterligare ett antal ytor omkring den ICOS-mast som står i närheten av Svartbergets Försöksstation. Dessa ytor lades i ett jämnt förband mellan de tidigare inventerade ytorna så att det nya förbandet blev 175 meter. På alla ytor som inventerades i Krycklan noterades centrumkoordinater med GPS. Alla träd med en brösthöjdsdiameter över 40 mm klavades med dataklave, även döda träd. Provträd togs ut manuellt på ytan med målet att få cirka 7 till 8 provträd per yta och minst 4 provträd för varje frekvent förekommande art. Även två övrehöjdsträd togs ut per yta. Höjd mättes på alla provträd samt övrehöjdsträd och övrehöjdsträden åldersbestämdes med tillväxtborr. Ståndortsvariabler som ståndortsindex, fukt, jorddjup och textur noterades för varje yta.

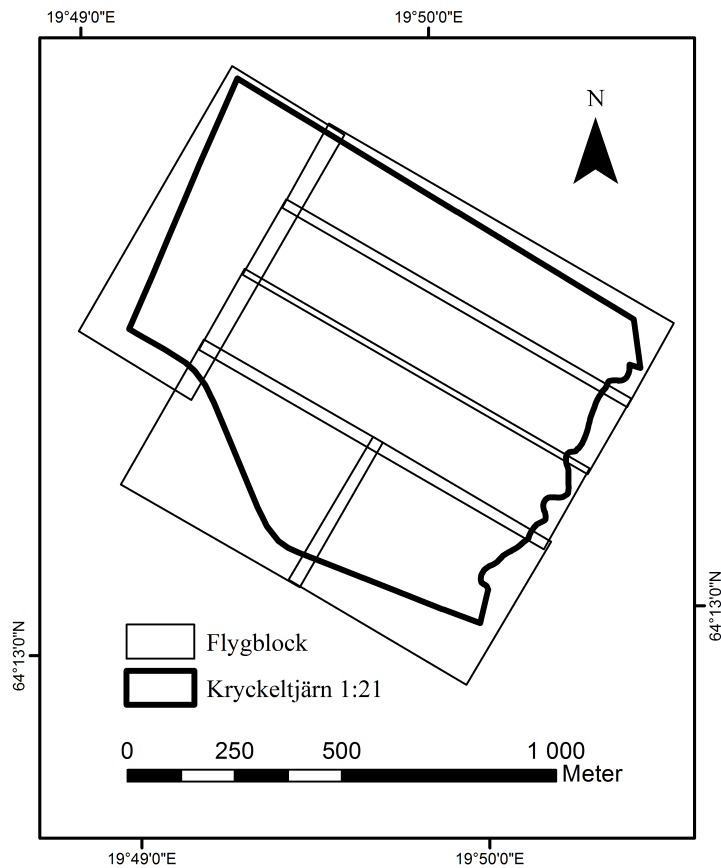
4	5	12	13
3	6	11	14
2	7	10	15
1	8	9	16

Figur 2.2. De kvadratiske ytorne inom Krycklan som delades in i 16 mindre deltor om $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ för att underlätta inventeringen samt säkerställa att inga träd missades. I mitten låg en tidigare inventerad cirkelprovyta med 10 meter i radie.

Figure 2.2. The square plots within Krycklan that was divided into 16 sub-plots of $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ to facilitate the inventory to ensure no tree was missed. In the center there was a previously inventoried circle plot with a radius of 10 meters.

Våren 2016 inventerades 38 kvadratiske provytor om $80\text{ m} \times 80\text{ m}$ inom Krycklan. För att undvika att träd missades eller att samma träd inventerades flera gånger delades ytorne in i mindre deltor om $20\text{ m} \times 20\text{ m}$, se figur 2.2. Två nord-sydliga parallella band lades ut för att markera en kolumn, till exempel delytorna 1–4 i figuren, mellan vilka alla träd med en brösthöjdsdiameter över 40 mm klavades med dataklave. Träden korsklavades i brösthöjd med dataklave och den första diametern mättes med dataklavens linjal riktad mot delytans centrum och den andra diametern vinkelrätt mot den första. På varje delyta gjordes ett subjektivt urval av provträd med någorlunda jämna förband där träd som skadats så höjden påverkats ej valdes. För provträden mättes och noterades höjden.

Inom varje kvadratisk yta fanns även en av de tidigare inventerade cirkelprovytorne med 10 meter i radie. Resultatet av ståndortsboniteringen gjord på cirkelprovytan applicerades till den större kvadratiske ytan ifall det bedömdes stämma. Vid avvikande fall gjordes en ny ståndortsbonitering. Då fältinventeringarna var gjorda en till två tillväxetsäsonger tidigare än insamlingen av fjärranalysdata framskrevs fältdatat med programmet Heureka. Ytor med en medeldiameter under 10 centimeter sorterades bort då studien endast innefattar bestånd med huggningsklass G1 eller högre. Totalt användes 71 cirkulära provytor med 10 meter i radie och 28 kvadratiske provytor.



Figur 2.3. Fastigheten Kryckeltjärn 1:21 och de sex polygonerna som utgjorde flyguppsdragens yttre gränser.

Figure 2.3. The estate Kryckeltjärn 1:21 and the six polygons setting the boundaries for each flight mission.

2.3 Planering och genomförande av datainsamling med drönare

Som plattform för fjärranalys i denna studie användes en 3D Robotics Solo UAV. 3DR Solo är driven av 4 motorer med 4 propellrar och väger 1,5 kg utan last och har en maxlastkapacitet på 450 gram. För grov positionsuppskattning används en UBLOX Neo m7n GPS-mottagare. Neo m7n har en precision på 2,5 m och är optimerad för att bibehålla hög prestanda med låg energiåtgång. Som sensor användes Parrot Sequoia som har en RGB-kamera på 16 megapixlar och fyra enbands-kameror på 1,2 megapixlar vardera med ett pixeldjup på 10-bit. De fyra banden är grön (550 nm), röd (660 nm), red edge (735 nm) och närinfraröd (790 nm). För denna studie var RGB-kameran avstängd och endast de fyra enbands-kamerorna användes. Parrot Sequoia har en storlek av 59 mm × 41 mm × 28 mm och väger 72 gram. Med kameran följer även en ljussensor med en vikt av 36 gram som monterades på ovansidan drönaren. Ingen gimbal (horisontell stabilisator) användes för kameran.

Inför fältbesöket planerades flygningarna genom att rita ut flygblock som georefererade polygoner. Dessa flygblock bestämmer uppdragets yttre gränser. Blocken för de 38 kvadratiske ytorna var cirka $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ i storlek där centrum för varje block placerades över centrum på respektive provyta. Tio flygblock lades kring ICOS-masten i Krycklan för att täcka hela området för provytorna med 10 m radie. För fastigheten Kryckeltjärn 1:21 lades sex rektangulära överlappande block ut för att täcka hela skiftet och säkerställa matchning mellan blocken, se figur 2.3.

Vid fältbesök laddades blocken in i programmet Mission Planner, som kördes på en dator, där varje flyguppdrag planerades separat. Varje flyguppdrag eftersträvade att använda de optimala inställningarna för drönar-SfM gällande överlapp mellan bilder (Dandois, Olano & Ellis, 2015). För de kvadratiske ytorna ställdes överlappet i bilderna in till 60 % tvärs flygriktningen vilket gav fyra flygstråk per yta. Hastigheten för flygningen sattes till 5 m/s och varje uppdrag hade en beräknad flygtid till cirka 4 minuter. För fastigheten och blocken kring ICOS-masten användes ett överlapp på 80 % tvärs flygriktningen och en hastighet på 10 m/s då flygblocken var väsentligt större. Flyghöjden sattes till 120 meter ovan marken utifrån startpunkten för uppdraget. När uppdraget var färdigplanerat och kontrollerat så alla koordinater för färdvägen låg rätt laddades det upp till drönaren. För att säkerställa att drönaren mottagit rätt uppdrag laddades uppdraget ner till en surfplatta via applikationen Tower.

Innan uppdraget startades konfigurerades kameran med en smartphone via det trådlösa nätverk Parrot Sequia tillhandahåller. Slutarintervallet ställdes in till 3 sekunder, vilket styr överlappet i flygriktningen. Med en hastighet på 10 m/s blev överlappet i flygriktningen 80 % medan uppdragen med lägre hastighet hade ett ännu större överlapp. För lagring av bilderna användes det monterade SD-kortet. Kameran kunde endast startas manuellt inför varje flygning och fick även stängas av manuellt efter landning. Det innebar att flera bilder togs vid start och landning utanför flygblocket.

Datainsamlingen med drönare utfördes vid klara väderförhållanden under två dagar i slutet av september samt fem dagar i oktober 2016. Merparten av lövträden hade i slutet av september redan tappat de flesta löven, vilket medförde en risk med för få matchande punkter i träden vid fotogrammetrisk bearbetning (Bohlin, Wallerman & Fransson, 2016). Temperaturen varierade från 0–15 °C och vindstyrkan varierade mellan 1–5 m/s. Begränsningar i batteritid gjorde att fulla arbetsdagar inte kunde läggas på flygning om inte något eluttag för laddning var tillgängligt i närheten.

Efter varje flygning överfördes bilderna till en dator. För de kvadratiske provytorna resulterade flygningarna totalt i cirka 7 600 geotaggade bilder med en total filstorlek på 49,5 GB. Över fastigheten Kryckeltjärn 1:21 togs cirka 5 400 bilder och för blocket kring ICOS-masten cirka 9 300 bilder.

2.4 Bearbetning

För att konstruera punktmoln användes programmet Agisoft Photoscan Professional version 1.2.6. Agisoft Photoscan utför fotogrammetrisk bearbetning av bilder och utnyttjar SfM-algoritmer där konstruktionen av punktmoln sker i flera steg. Efter import av bilder till programmet användes funktionen Camera Alignment som söker efter matchande punkter i överlappande bilder och knyter

samma dem. Funktionen beräknar kamerans position och interna orientering och som biprodukt skapas ett gles punkt moln. Baserat på de beräknade kamerapositionerna och bilderna skapades sedan ett tätt punkt moln som exporterades i filformatet .las i koordinatsystemet SWEREF99 TM.

Eftersom en del bilder togs under start och landning på vägen till och från flygblocket fick dessa raderas innan steget för Camera Alignment då många av dem var oanvändbara. Efter detta steg, när kamerans position var uträknad, raderades även bilder tagna precis när drönaren svänger. I svängen lutar drönaren kraftigt vilket gör att kameran inte är riktad mot nadir och bilden blir svår att matcha med andra bilder. Alla steg i Agisoft Photoscan kördes med de mest högupplösta inställningarna.

När alla bilder var exporterade som punkt moln användes programmet LAS-tools för att klippa ut provytorna. Z-koordinaten för varje punkt i punkt molnen hade ett värde som motsvarade höjd över havet. För att ta fram höjd över marken för varje punkt skapades ett triangulerat oregelbundet nätverk (TIN) från markträffar i lantmäteriets rikstäckande laserskanning (Lantmäteriet, 2016). Detta utgjorde den markmodell som punkternas höjd normaliserades utifrån. Markträffar i punkt molnen från drönarbilderna stämde inte alltid överens med markmodellen och z-koordinaten i punkt molnen behövdes därför manuellt justeras innan normalisering. Skillnaden mellan markmodellen och punkt molnens markträffar mättes i QT-Modeler och z-koordinaten för punkt molnen justerades därefter.

Efter normaliseringen beräknades metriker ur punkt molnen från ICOS-ytorna, de kvadratiske ytorna och fastigheten. De kvadratiske ytorna och avdelningarna på fastigheten delades upp i celler om $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ för att varje cell skulle ha en ungefärlig area som de cirkulära ICOS-ytorna. Metriker för höjdpercentiler (p_{05} , p_{20} , p_{30} , p_{40} , p_{60} , p_{80} , p_{90} , p_{95} , p_{99}), lägsta höjd (min), högsta höjd (max), medelhöjd (avg), standardavvikelse på höjd (std) samt en vegetationskvot (dns) beräknades baserat på alla punkter inom punkt molnen inom varje cell. Vegetationskvoten beräknades genom att dividera alla punkter 2 meter eller högre ovan mark med det totala antalet punkter inom ytan.

2.5 Simulering av provyteutlägg

För att ta reda på vilka metriker som gav högst förklaringsgrad i kombination med varandra användes paketet leaps i R. Leaps utför en uttömmande sökning efter de bästa kombinationerna av variabler i en linjär regressionsfunktion för att skatta en responsvariabel. En begränsning till två förklarande variabler sattes för att ingen överanpassning av modellerna skulle ske. Dessutom kontrollerades variablernas rimlighet för att skatta respektive responsvariabel.

Idag används ett systematiskt utlägg vid kontrolltaxeringen hos Norra Skogsägarna. Systematiska utlägg där ingen förhandsinformation utnyttjas beter sig väldigt likt obundet slumpmässigt urval (Lohr, 2010). Ett systematiskt utlägg ger nödvändigtvis inte ett representativt stickprov. Skulle utlägget sammanfalla med ett mönster i beståndet kan skattningarna bli skeva. Fördelen med systematiska utlägg är att ifall det finns en gradient inom beståndet, till exempel att träden är högre i ena delen av beståndet, säkerställer man att stickprovet blir representativt. I dessa fall blir variansen lägre än med ett obundet slumpmässigt

urval. Däremot går variansen inte att beräkna för systematiska utlägg (Lohr, 2010).

Tre olika inventeringsdesigner testades för att sprida provytor. Den första metoden var obundet slumpmässigt urval (OSU) där alla provytor har samma inklusionssannolikhet. OSU användes som referens då den inte innehåller några restriktioner då det kommer till att sprida provytorna utifrån en hjälpvariabel. Det betyder att sannolikheten för att ett enskilt stickprov inte är representativt för hela populationen är större än för metoder som ser till att sprida ytorna utifrån en hjälpvariabel som korrelerar med det man vill undersöka.

I den andra metoden som testades, stratifiering, delas skogsområdet upp i mindre grupper (strata) utifrån tillgänglig förhandsinformation. Ur varje strata görs ett vanligt OSU och sedan sammanställs skattningarna för hela skogsområdet. Stratifiering är effektivt eftersom man säkerställer att hela skogsområdet finns representerat i stickprovet utifrån den förhandsinformation som används (Lohr, 2010). Detta gör det möjligt att erhålla lägre skattningsfel med ett mindre stickprov jämfört med OSU.

En annan metod som effektivt utnyttjar förhandsinformation är Local Pivotal Method (LPM) (Grafström, Lundström & Schelin, 2012). LPM ser till att sprida stickprovet väl utifrån en hjälpvariabel som är korrelerad med det man vill undersöka, vilket kan vara väldigt fördelaktigt då provytor nära varandra ofta har liknande attribut. LPM är väntevärdesriktig och var den tredje metoden som testades i denna studie.

Höjdpercentilen p_{90} användes som hjälpvariabel för att sprida stickproven. p_{90} korrelerade väldigt väl med de variabler som skulle skattas (Hgv, Dgv, Vol och Gy). För att undersöka hur antalet fältinventerade provytor påverkade regressionsmodellernas precision i de tre olika metoderna gjordes simuleringar i R. För stratifiering användes p_{90} över ytorna kring ICOS-masten för att skapa fyra strata, där kvartilerna avgjorde vilket strata varje yta tillhörde. Simuleringen genomfördes så att tusen stickprov togs för varje stickprovsstorlek, där stickprovsstorlekarna var 3, 4, 5, ..., 69 ytor för OSU och LPM samt 4, 8, 12, ..., 68 för stratifieringen. För varje stickprovsstorlek och metod beräknades medelfel (RMSE), systematiskt fel (BIAS) och standardavvikelse (σ) genom korsvalidering mot provytorna som inte var inkluderade i byggandet av regressionsmodellen. Ett medel-, minimum- och maximumvärde av alla beräkningar extraherades ur de tusen stickprovssimuleringarna.

2.6 Validering

För att validera regressionsmodellen byggd med den typ av provyteutlägg som presterade bäst i simuleringarna användes de kvadratiska ytorna. Cirkelprovytorna med 10 meter i radie kring ICOS-masten användes som träningsdata för regressionsmodellen och de kvadratiska ytorna användes som utvärderingsdata. Återigen togs tusen stickprov för varje stickprovsstorlek och ett medel-, minimum samt maximumvärde av RMSE beräknades för varje stickprovsstorlek.

Slutligen testades modellen för praktisk användning vid kontrolltaxering på fem avdelningar inom Kryckeltjärn 1:21. Baserat på resultatet av valideringen i de kvadratiska ytorna valdes modeller byggda på det antal provytor man kan tänkas hinna inventera objektivt under en 8-timmars arbetsdag. Ett medelfel

och avvikelse för den subjektiva inventeringen utförd av planläggaren beräknades på samma sätt som den görs idag vid Norra Skogsägarnas kontrolltaxering.

3 Resultat

De metriker som valdes för att bygga regressionsmodellerna för de fyra variablerna visas i tabell 3.1, där den förstnämnda variabeln är den mest förklarande i varje modell. För grundtyevägd medelhöjd ansågs att endast en variabel var tillräckligt bra för att få en tillfredsställande modell ($R_{\text{adj}}^2 = 87,9\%$). En av höjdpercentilerna tillsammans med *dns* var bäst för att skatta grundtyevägd medeldiameter, volym och grundyta. Tillägg av fler än två förklarande variabler hade väldigt liten effekt på modellernas förklaringsgrad. För att beräkna R_{adj}^2 och Rel. RMSE användes alla 71 cirkelprovytor.

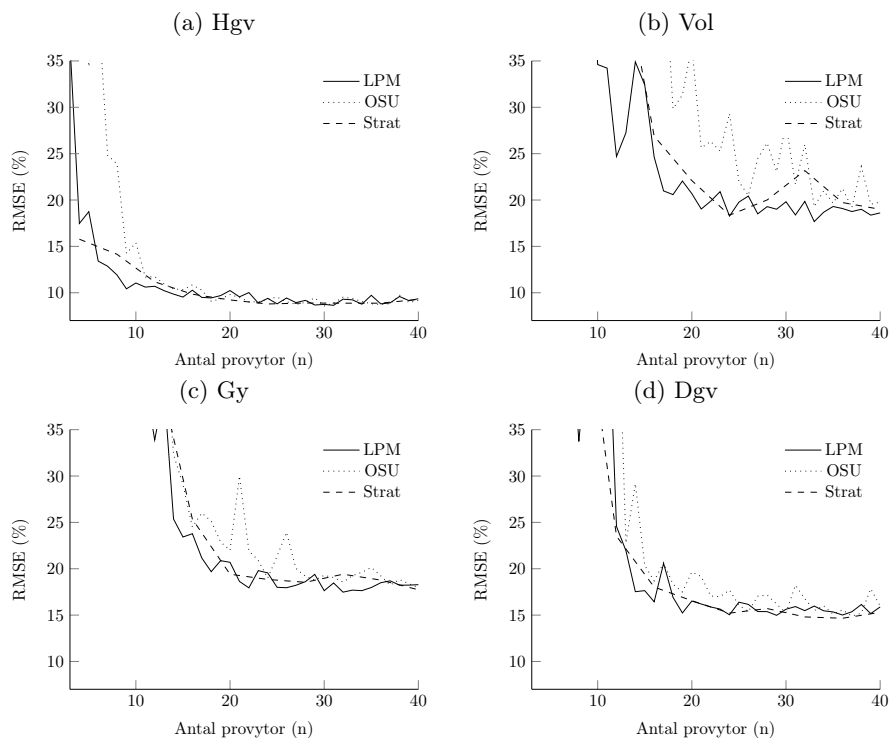
Resultatet av provytesimuleringarna för de tre olika inventeringsdesignerna visas i figur 3.1. Där visas det sämsta utfallet för tusen simuleringar av varje stickprovsstorlek. LPM presterar bäst vid små stickprovsstorlekar medan vid större stickprovsstorlekar går de tre metoderna mot att vara likvärdiga. OSU presterar sämst och varierar mer än de andra metoderna. I medeltal kunde ingen större skillnad ses mellan de tre olika metoderna. Medelvärde för metoden som presterade bäst i simuleringarna, LPM, visas i figur 3.2.

Valideringen av regressionsmodellerna visar att skattning av grundtyevägd medeldiameter presterade bäst med lägst RMSE medan skattning av volym presterade sämst. Vid en regressionsmodell byggd på 20 cirkelprovytor var genomsnittligt RMSE för tusen upprepningar för Hgv, Dgv, Vol och Gy 12,3 %, 10,8 %, 21,0 % och 15,0 %. För alla fyra modellerna förekom en systematisk underskattning av alla variabler, något som inte förekom i korsvalideringen av ICOS-ytorna.

Tabell 3.1. Variabler använda i regressionsmodeller för skattning av grundtyevägd medelhöjd (Hgv), grundtyevägd diameter (Dgv), volym (Vol) och grundyta (Gy) samt förklaringsgraden för varje regressionsmodell (R_{adj}^2) och ett relativt RMSE (Rel. RMSE).

Table 3.1. Variables used for regression modeling of basal area weighted mean height (Hgv), basal area weighted mean diameter (Dgv), volume (Vol) and basal area (Gy) together with the coefficient of determination (R_{adj}^2) and relative RMSE (Rel. RMSE).

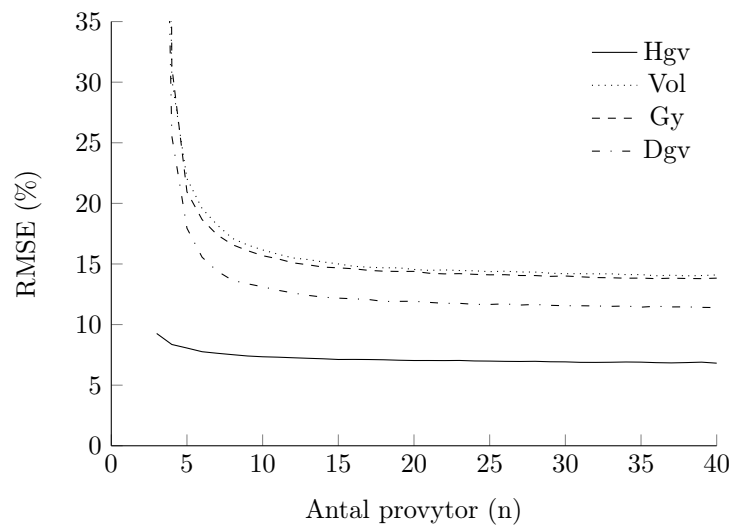
	Modell	R_{adj}^2	Rel. RMSE
Hgv	p_{90}	87,9 %	6,9 %
Dgv	$p_{99} + dns$	71,8 %	10,7 %
Vol	$p_{90} + dns$	90,1 %	13,4 %
Gy	$dns + p_{90}$	86,1 %	13,1 %



Figur 3.1. Sämsta utfallet av relativt RMSE för varje stickprovstorlek för att skatta grundtyevägd medelhöjd (3.1a), volym (3.1b), grundtyta (3.1c) och grundtyevägd medeldiameter (3.1d) för de tre olika inventeringsmetoderna Local Pivotal Method (LPM), obundet slumpmässigt urval (OSU) och stratifiering (Strat).

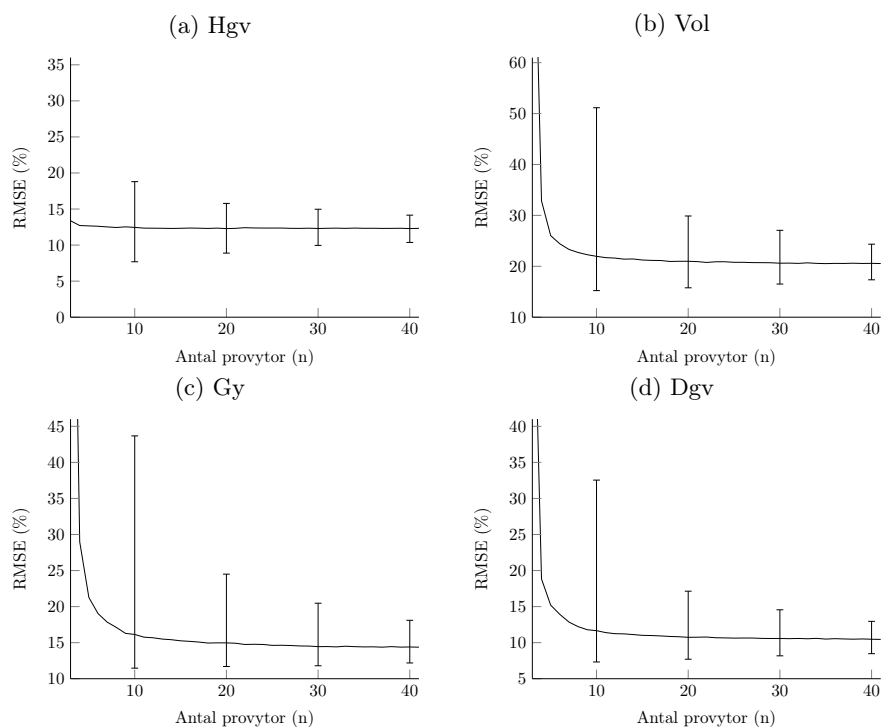
Figure 3.1. Maximum RMSE for each sample size when predicting basal area weighted mean height (3.1a), volume (3.1b), basal area (3.1c) and basal area weighted mean diameter (3.1d) using three different sampling methods which were the Local Pivotal Method (LPM), Simple Random Sampling (OSU) and Stratification (Strat).

Resultatet av fallstudien som en kontrolltaxeringen med stöd av drönare på fastigheten Kryckeltjärn 1:21 visas i tabell 3.2. Regressionsmodellerna som användes var byggda på 20 cirkelprovytor med 10 m radie. Som framgår i tabellen ligger planläggaren inom de kvalitetskrav som Norra Skogsägarna satt. Planläggaren har tendenser till att överskatta Hgv och Dgv samt underskatta Vol och Gy.



Figur 3.2. Genomsnittligt relativt RMSE, med olika antal provytor som stickprov slumpade med LPM-metoden, av tusen simuleringar för grundytvägd medelhöjd (Hgv), volym (Vol), grundyta (Gy) och grundytvägd medeldiameter (Dgv) på ytorna med 10 m radie.

Figure 3.2. Mean relative RMSE for one thousand simulations for each sample size sampled with the LPM method for basal area weighted mean height (Hgv), volume (Vol), basal area (Gy) and basal area weighted mean diameter (Dgv) for the ICOS-plots.



Figur 3.3. Genomsnittlig relativ RMSE med felstaplar som visar max- och minimumvärden, med olika antal provvytor som stickprov, av tusen simuleringar för grundtyevägd medelhöjd (3.3a), volym (3.3b), grundytta (3.3c) och grundtyevägd medeldiameter (3.3d) på valideringsytorna med regressionsmodeller byggda på cyrkelprovvytorna med 10 meter i radie valda med LPM.

Figure 3.3. Mean relative RMSE with error bars showing the maximum and minimum values for one thousand simulations of each sample size for basal area weighed mean height (3.3a), volume (3.3b), basal area (3.3c) and basal area weighted mean diameter (3.3d) over the validation plots using the circular plots with a radius of 10 m sampled with LPM for regression modeling.

Tabell 3.2. Jämförelse mellan skattningar gjorda av planläggare (Plan) och kontrolltaxering med drönare (KoTax) för grundtyvägd medelhöjd (Hgv), grundtyvägd medeldiameter (Dgv), volym (Vol) och grundyta (Gy) i ett antal avdelningar (Avd) på fastigheten Kryckeltjärn 1:21. Regressionsmodellen som användes var byggd på 20 cirkelprovytor med 10 m radie valda med LPM. Avrundningar gjorda för att stämma överens med vad som skrivs in i skogsbruksplanen.

Table 3.2. Comparison between estimations made by the forest planner (Plan) and the control assessment (KoTax) for basal area weighted mean height (Hgv), basal area weighted mean diameter (Dgv), volume (Vol) and basal area (Gy) in some of the stands (Avd) delineated on the forest property Kryckeltjärn 1:21. The regression model used was built on 20 circular plots with a radius of 10 m sampled with the LPM. Rounding to cohere with what is written in the forest management plan.

Avd	Hgv (dm)		Dgv (cm)		Vol (m ³)		Gy (m ²)	
	Plan	KoTax	Plan	KoTax	Plan	KoTax	Plan	KoTax
27	150	140	20	18	100	150	15	21
35	150	120	23	17,5	60	70	9	11
36	160	135	18	18,5	130	135	18	19
47	185	150	24	20,5	200	175	26	23
90	170	155	21	20,5	180	210	24	27
Medelfel	10,1 %		10,9 %		14,3 %		12,4 %	
Avvikelse	+ 23 dm		+ 2 cm		- 14 m ³		- 2 m ²	

4 Diskussion

Resultatet visar att LPM är det mest effektiva sättet att designa inventeringen av provytor när förhandsinformation finns tillgänglig, se figur 3.1. Detta ligger i linje med vad Grafström, Lundström & Schelin (2012) visade i sin studie. LPM presterar bäst vid små stickprovsstorlekar men skillnaden mellan de olika metoderna går mot att vara jämbördiga vid större stickprov. Att skillnaderna minskar med större stickprov är naturligt (Grafström, Lundström & Schelin, 2012) och det finns endast 71 provytor att ta stickprov ifrån och därmed relativt få möjliga utfall. En ytterligare förklaring till att det inte är någon större skillnad mellan metoderna är att ytorna som användes redan ligger i ett systematiskt utlägg. Därmed finns ingen äkta effekt av slumpmässighet, vilket blir tydligt vid större stickprov.

Vad man kan utläsa i figur 3.2 är att mellan 10 och 20 provytor är tillräckligt för att bygga en regressionsmodell med god precision och nyttan av ytterligare ytor är väldigt liten när det gäller relativt RMSE. Större stickprov representerar skogsområdet bättre och man får ett lägre fel i sin skattning. Man bör återigen ha i åtanke att det totala antalet möjliga provytor var endast 71 och vid analys av större skogsområden kan kurvan i figur 3.2 se annorlunda ut, framförallt om variansen är hög inom skogsområdet man undersöker.

Resultatet av valideringen är något sämre än vad Puliti et al. (2015) rapporterade när det kommer till RMSE för volym (14,9 % mot 21,0 %), medan RMSE för grundytavägd medelhöjd (13,3 % mot 12,3 %) och grundyta (15,4 % mot 15,0 %) är ungefär samma. Skattningar på beståndsnivå bör generera mindre fel än skattningar på provytenivå, vilket inte kunde visas. En förklaring till det större felet är den systematiska underskattningen av alla variabler som sker i valideringen. Eftersom den systematiska underskattningen är relativt konstant oavsett stickprovsstorlek kan man dra slutsatsen att metrikerna, givet ett visst fältmätt värde, har ett generellt lägre värde i de kvadratiska provytorna än i de cirkulära provytorna. Det finns ett antal kvadratiska provytor där p_{90} ligger väldigt lågt jämfört med den uppmätta fälthöjden, något som inte förekom bland de cirkulära provytorna. Eftersom tre av fyra regressionsmodeller använder p_{90} som en förklarande variabel kommer dessa ytor kraftigt underskattas i varje simulering vilket blir tydligt då måttet RMSE är känsligt för extremvärden.

Spetsiga grantoppar eller för få träffar i kronorna hos avlödade lövträd kan vara andledning till att p_{90} hamnar lågt på vissa ytor. Väldigt glesa bestånd kan också vara ett problem då det kan uppstå för få matchande punkter i trädkronor i den fotogrammetriska bearbetningen (Bohlin, Wallerman & Fransson, 2016). Ytterligare en faktor som kan ha påverkat metrikerna är det lägre överlappet i sidled över de kvadratiska ytorna. Dandois, Olano & Ellis (2015) visar dock på små skillnader mellan olika stora sidöverlapp ifall man

efterbearbetar med ett tätt punktmoln. Även skogens struktur kan se annorlunda ut beroende på ståndortsindex, vilket i sin tur påverkar hur förhållandet mellan fältmätta värden och metriker ser ut (Gobakken, Bollandsås & Næsset, 2015).

Att skattningen av grundtyevägd medeldiameter presterade bäst i valideringen är ett oväntat resultat. Tidigare studier med digital fotogrammetri visar att felet i diameterskattningar brukar vara mellan 15 % till 20 %; sämre än höjds-kattningar men något bättre än volym- och grundtyes-kattningar (Gobakken, Bollandsås & Næsset, 2015). Regressionsmodellen för Dgv var den enda som inte utnyttjade metriken p_{90} utan använde p_{99} istället. Det kan vara en indikation på att olika metriker är optimala beroende på vilka inställningar som använts för flyguppdragen. Därför blir det viktigt att vara konsekvent i utförandet av datainsamling.

Tabell 3.2 visar, givet att kontrolltaxeringen med drönaren stämmer, att planläggaren för Kryckeltjärn 1:21 ligger inom kvalitetskraven Norra Skogsägarna ställer. Det går även att se en generell överskattning i höjd och diameter samt en generell underskattning i volym och grundtyta. Med syftet att använda kontrolltaxeringen för att få en fingervisning om systematiska avvikelser, vilket Norra Skogsägarna gör, är informationen inhämtad med drönare ett bra verktyg för en utökad uppföljning. Vill man närmare utvärdera och kvalitetssäkra skogsbruksplanen kan man använda sig av standardavvikelser (presenterat i appendix A) för de olika variablerna.

Med hjälp av den information som kan hämtas från drönare finns det möjlighet att designa en inventeringen för att utöka kontrolltaxeringens omfattning till fastighetsnivå samtidigt som man kan spara tid genom färre fältmätningar. En stor fördel med informationen hämtad ur bilder är att den är övergripande och oberoende av vem som utför inventeringen, vilket är passande för kvalitetssäkring. Förutsatt att skogstyp och skogens struktur är liknande är det möjligt att bygga upp en regressionsmodell baserad på fältmätta provytor som inte ligger på fastigheten man vill kontrolltaxera, och ändå skatta grundtyevägd medelhöjd, grundtyevägd medeldiameter, volym och grundtyta med god precision. I framtiden finns alltså en möjlighet att effektivisera det praktiska arbetsflödet, där man över större områden med liknande skogliga egenskaper kan använda samma regressionsmodell. Vid kontrolltaxering av en fastighet inom ett område med en befintlig och passande regressionsmodell behövs därmed inga fältmätningar utan enbart information insamlad med drönare.

För att sänka felet ytterligare i skattningarna vore det fördelaktigt att bygga separata regressionsmodeller för tall- och grandominerade ytor. Eftersom trädslagen skiljer sig i kronform är det troligt att höjdpercentilerna ligger annorlunda beroende på ifall det är en tall- eller grandominerad yta. I så fall krävs förhandsinformation om vilka trädslag som finns på de ytor man vill skatta. För kontrolltaxeringen finns möjlighet att hämta sådan information från skogsbruksplanen man ska kontrolltaxera. Det vore även intressant att inkludera den spektrala informationen från Parrot Sequoia i analyserna och på så sätt göra grova skattningar om trädslagsblandning. I denna studie utnyttjades inte trädslagsvisa regressionsmodeller på grund av små dataset.

För att omsätta kontrolltaxering med stöd av drönare i praktiken krävs ett effektiviserat arbetsflöde. I dagsläget utgör efterbearbetning en relativt tidskrävande process även över mindre områden då korrektion av geometriska fel krävs. Geometriska fel går att minska med stödpunkter med kända koordinater, men medför i sig också mycket extra arbete. En begränsning som förhindrade effektiv

databearbetning var felet i z-koordinaten från GPS:en i drönaren. Eftersom varje yta fick anpassas manuellt till markmodellen har mindre höjdskillnader uppstått mellan ytorna. Ett annat fel som upptäcktes vid den manuella bearbetningen var att punktmolnen kunde ha en felaktig geometri jämfört med markmodellen. Skillnaden i höjddled inom ytan var inte konstant vilket uttryckte sig tydligast i sluttningar där punktmolnet kunde ha en brantare eller flackare lutning än markmodellen. Vid normalisering av punktmolnet ligger då marken ovan noll i ena delen och under noll i andra delen, vilket innebär att vissa trädhöjder överskattas och andra underskattas.

Neo 7-serien av GPS:er som sitter i 3DR Solo var inte den bästa GPS:en på marknaden. Real Time Kinematic-GPS (RTK-GPS) utnyttjar en annan teknik än den mindre noggranna DGPS-tekniken som Neo 7-serien använder. En svaghet hos RTK-GPS är att den är känslig för interferens från signaler som studsar mot objekt, till exempel träd eller husväggar. Eftersom drönaren rör sig ovan krontaket utgör detta inte ett problem för applicering inom skoglig inventering. En noggrannare GPS kan vara lösningen på de problem som uppstått med dåliga z-koordinater och felaktig geometri inom punktmolnen.

En av de kvadratiske valideringsytorna och ett hörn av blocket runt ICOS-masten hade problem med för få matchande punkter i den fotogrammetriska bearbetningen. Anledningen är troligtvis topografiska skillnader i och med att områdena låg på en högre höjd än startpunkten för uppdraget. Det innebär att den faktiska flyghöjden blir lägre än 120 meter över marken. Den lägre flyghöjden medför ett mindre överlapp mellan bilder som tillsammans med den optiska distorsionen i bilderna försvårar matchningen av gemensamma punkter.

Antaganden om linjära samband är en svaghet när det kommer till skattandet av skogliga variabler. Vid hög ålder avtar höjdtillväxten medan volym, grundyta och diameter kan fortsätta öka. Eftersom varje regressionsmodell delvis bygger på höjpercentiler går det att anta att i skogar med hög ålder kan volym, grundyta och diameter underskattas eftersom förhållandet mellan dessa värden och höjd förändras.

Det är alltid en avvägning mellan produktivitet och precision i denna typ av datainsamling. Däremot finns goda möjligheter i att täcka stora arealer dagligen med en drönare, något som Puliti et al. (2015) inte klarade eftersom studien utfördes så sent på året. Här utfördes dock studien under dagar med fler soltimmar och inga stödpunkter användes, vilket tillät fler flyguppdrag per arbetsdag. Det positiva är att den mest tidskrävande processen, den fotogrammetriska bearbetningen, går att automatisera och kan utföras av en dator utanför arbetstid eller förläggas till webbaserade tjänster.

4.1 Slutsats

Resultaten visar att mellan 10 till 20 fältmätta provytor, valda med LPM, är ett lämpligt antal för att göra skattningar inom alla G1, G2, S1 och S2 avdelningar på en fastighet med stöd av informationen hämtad från drönare. Tillgången till stora totalinventerade ytor gav möjligheten att utvärdera regressionsmodellerna mot vad som skulle kunna vara avdelningar i en skogsbruksplan. Datainsamlingen utfördes lite för sent på året eftersom lövträden redan tappat mycket av sina löv, vilket ger glesa kronor som är ett problem vid fotogrammetrisk bearbetning. För att säkerställa kompatibilitet mellan två dataset bör samma

inställningar för flyguppdragen användas oavsett storlek av ytan man ska flyga. Dessutom bör en kontinuerlig utvärdering av de bästa metrikerna ske för att säkerställa regressionsmodellernas precision.

För applicering i praktiken krävs framförallt en bättre GPS i drönaren för att undvika mycket av det manuella efterarbete som krävdes i denna studie om metoden ska kunna ersätta dagens kontrolltaxering. En precision på max tre dm fel i z-koordinaten skulle vara nödvändigt. Rekommendationerna till Norra Skogsägarna är att först flyga hela fastigheten och bearbeta data i linje med den metod som presenterats i denna studie. Därefter objektivet mäta in 20 koordinatsatta provtytor som valts ut med LPM utifrån hjälpinformationen från drönaren. Kontrolltaxering med stöd av drönare ger möjlighet till mindre fältarbete för att samtidigt täcka större arealer, att återkoppla till planläggare på fastighetsnivå och att fullständigt kvalitetssäkra en skogsbruksplan.

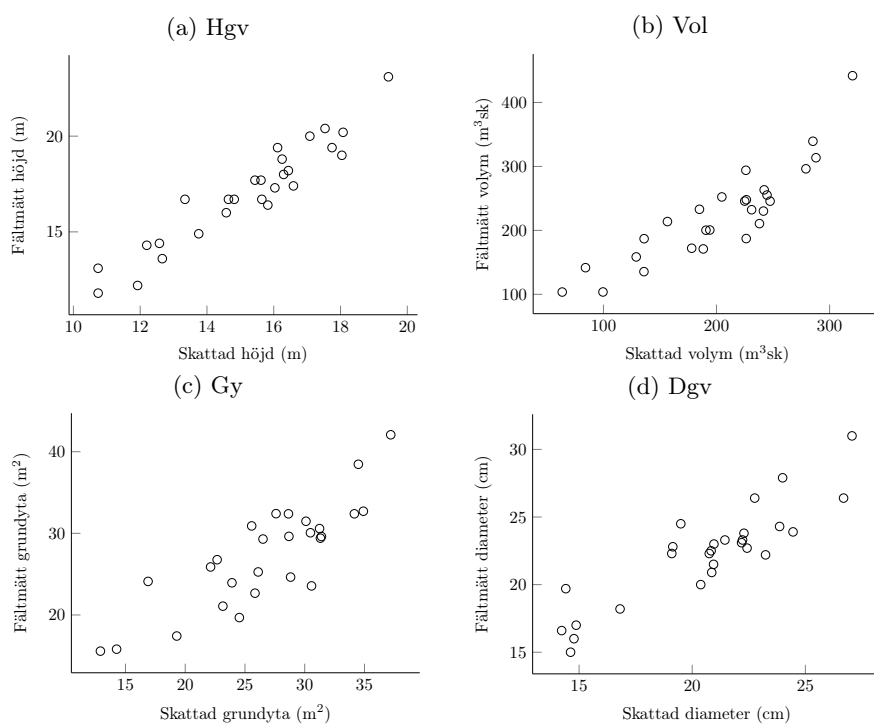
Litteratur

- Bohlin, J., Wallerman, J. & Fransson, J. E. S. (2012). Forest Variable Estimation Using Photogrammetric Matching of Digital Aerial Images in Combination with a High-Resolution DEM. *Scandinavian Journal of Forest Research* vol. 27 (7), ss. 692–699. DOI: 10.1080/02827581.2012.686625.
- 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* vol. 31 (5), ss. 517–525. DOI: 10.1080/02827581.2015.1130850.
- Chandler, J. (1999). Effective Application of Automated Digital Photogrammetry for Geomorphological Research. *Earth Surface Processes and Landforms* vol. 24 (1), ss. 51–63. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199901)24:1<51::AID-ESP948>3.0.CO;2-H.
- Christiansen, L., red. (2014). *Skogsstatistisk Årsbok*. Skogsstyrelsen. ISBN: 978-91-87535-05-5.
- Dandois, J. P. & Ellis, E. C. (2013). High Spatial Resolution Three-Dimensional Mapping of Vegetation Spectral Dynamics Using Computer Vision. *Remote Sensing of Environment* vol. 136, ss. 259–276. DOI: 10.1016/j.rse.2013.04.005.
- Dandois, J. P., Olano, M. & Ellis, E. C. (2015). Optimal Altitude, Overlap, and Weather Conditions for Computer Vision UAV Estimates of Forest Structure. *Remote Sensing* vol. 7 (10), ss. 13895–13920. DOI: 10.3390/rs71013895.
- Gobakken, T., Bollandsås, O. M. & Næsset, E. (2015). Comparing Biophysical Forest Characteristics Estimated from Photogrammetric Matching of Aerial Images and Airborne Laser Scanning Data. *Scandinavian Journal of Forest Research* vol. 30 (1, SI), ss. 73–86. DOI: 10.1080/02827581.2014.961954.
- Gobakken, T., Korhonen, L. & Næsset, E. (2013). Laser-Assisted Selection of Field Plots for an Area-Based Forest Inventory. *Silva Fennica* vol. 47 (5). DOI: 10.14214/sf.943.
- Grafström, A., Lundström, N. L. P. & Schelin, L. (2012). Spatially Balanced Sampling through the Pivotal Method. *Biometrics* vol. 68 (2), ss. 514–520. DOI: 10.1111/j.1541-0420.2011.01699.x.
- Grafström, A., Saarela, S. & Ene, L. T. (2014). Efficient Sampling Strategies for Forest Inventories by Spreading the Sample in Auxiliary Space. *Canadian Journal of Forest Research* vol. 44 (10), ss. 1156–1164. DOI: 10.1139/cjfr-2014-0202.
- Lantbrukarnas Riksförbund (2017). Skogsägarföreningarna. Tillgänglig: <https://www.lrf.se/om-lrf/organisation/branschavdelningar/lrf-skogsagarna/skogsagarforeningarna/> [2017-04-13].

- Lantmäteriet (2016). *Produktbeskrivning: Laserdata*. Lantmäteriet. Tillgänglig: <http://www.lantmateriet.se/globalassets/kartor-och-geografisk-information/hojddata/produktbeskrivningar/laserdat.pdf>.
- Lantmäteriet m.fl. (2013). Geodetiskt och fotogrammetrisk mättnings- och beräkningsteknik. Tillgänglig: <http://www.lantmateriet.se/globalassets/om-lantmateriet/var-samverkan-med-andra/handbok-mat--och-kartfragor/utbildning/kompendium20131028.pdf>.
- Laudon, H., Taberman, I., Ågren, A., Futter, M., Ottosson-Löfvenius, M. & Bishop, K. (2013). The Krycklan Catchment Study—A Flagship Infrastructure for Hydrology, Biogeochemistry, and Climate Research in the Boreal Landscape. *Water Resources Research* vol. 49 (10), ss. 7154–7158. DOI: 10.1002/wrcr.20520. Tillgänglig: <http://dx.doi.org/10.1002/wrcr.20520>.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. & Chipman, J. W. (2008). *Remote Sensing and Image Interpretation*. 6. utg. New York: Wiley.
- Lohr, S. L. (2010). *Sampling: Design and Analysis*. Brooks/Cole.
- Maltamo, M., Næsset, E. & Vauhkonen, J. (2014). *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning: Concepts and Case Studies (Managing Forest Ecosystems)*. Springer.
- Næsset, E. (2002). Predicting Forest Stand Characteristics with Airborne Scanning Laser Using a Practical Two-Stage Procedure and Field Data. *Remote Sensing of Environment* vol. 80 (1), ss. 88–99.
- Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyyppä, H., Hyyppä, J., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, Å. & Söderman, U. (2004). Laser scanning of forest resources: The Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research* vol. 19 (6). Scandlaser Workshop 2003, Umeå, Sweden, Sep 02-04, 2003, ss. 482–499. DOI: 10.1080/02827580410019553.
- Paneque-Galvez, J., McCall, M. K., Napoletano, B. M., Wich, S. A. & Koh, L. P. (2014). Small Drones for Community-Based Forest Monitoring: An Assessment of Their Feasibility and Potential in Tropical Areas. *Forests* vol. 5 (6), ss. 1481–1507. DOI: 10.3390/f5061481.
- Puliti, S., Ørka, H. O., Gobakken, T. & Naeset, E. (2015). Inventory of Small Forest Areas Using an Unmanned Aerial System. *Remote Sensing* vol. 7 (8), ss. 9632–9654. DOI: 10.3390/rs70809632.
- Remondino, F. & El-Hakim, S. (2006). Image-Based 3D Modelling: A Review. *Photogrammetric Record* vol. 21 (115), ss. 269–291. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x.
- Transportstyrelsen (2012). Obemannade Luftfartyg (UAS – Unmanned Aircraft Systems). Tillgänglig: <http://web.archive.org/web/20120504223527/http://www.transportstyrelsen.se/sv/Luftfart/Luftfartyg/Obemannade-luftfartyg-UAS/>.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J. & Reynolds, J. M. (2012). ‘Structure-from-Motion’ Photogrammetry: A Low-Cost, Effective Tool for Geoscience Applications. *Geomorphology* vol. 179, ss. 300–314. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.
- White, J. C., Wulder, M. A., Vastaranta, M., Coops, N. C., Pitt, D. & Woods, M. (2013). The Utility of Image-Based Point Clouds for Forest Inventory: A Comparison with Airborne Laser Scanning. *Forests* vol. 4 (3), ss. 518–536. DOI: 10.3390/f4030518.

Whitehead, K., Hugenholtz, C. H., Myshak, S., Brown, O., LeClair, A., Tamminga, A., Barchyn, T. E., Moorman, B. & Eaton, B. (2014). Remote Sensing of the Environment with Small Unmanned Aircraft Systems (UASs), Part 2: Scientific and Commercial Applications 1. *Journal of Unmanned Vehicle Systems* vol. 2 (3), ss. 86–102.

Appendix



Figur .1. Skattat värde mot uppmätt fältvärde för grundtyevägd medelhöjd (.1a), Volym (.1b), grundyta (.1c) och grundtyevägd medeldiameter (.1d) på de kvadratiske ytorna med en regressionsmodell byggd på 20 cirkulära provytor med 10 meter i radie slumpade med LPM.

Figure .1. Predicted values versus field measured values for basal area weighted mean height (.1a), Volume (.1b), basal area (.1c) and basal area weighted mean diameter (.1d) over the squared plots with a regression model built from 20 circular plots with a radius of 10 meters sampled with LPM.

Tabell .1. Medelfel (RMSE), relativt medelfel (Rel. RMSE), systematiskt fel (BIAS) och standardavvikelse (σ) för varje stickprovsstorlek (n) för grundtyevägd medelhöjd (Hgv) för valideringen.

Table .2. *Root-mean-square deviation (RMSE), relative root-mean-square deviation (Rel. RMSE), systematic error (BIAS) and standard deviation (σ) for each sample size (n) for basal area weighted mean diameter (Hgv) for the validation.*

n	RMSE	Rel. RMSE	BIAS	σ
3	2,19	13,12	-1,89	1,07
4	2,11	12,65	-1,86	1,00
5	2,10	12,58	-1,86	0,97
6	2,08	12,45	-1,85	0,95
7	2,10	12,59	-1,88	0,94
8	2,08	12,47	-1,87	0,93
9	2,07	12,42	-1,86	0,93
10	2,06	12,36	-1,85	0,92
11	2,07	12,42	-1,87	0,91
12	2,08	12,46	-1,87	0,91
13	2,06	12,34	-1,86	0,91
14	2,08	12,46	-1,88	0,91
15	2,08	12,48	-1,88	0,91
16	2,06	12,34	-1,86	0,90
17	2,06	12,33	-1,86	0,90
18	2,06	12,31	-1,86	0,90
19	2,06	12,31	-1,85	0,90
20	2,06	12,36	-1,86	0,90
21	2,06	12,31	-1,86	0,90
22	2,06	12,33	-1,86	0,90
23	2,06	12,31	-1,86	0,89
24	2,06	12,33	-1,86	0,89
25	2,05	12,29	-1,85	0,89
26	2,07	12,42	-1,88	0,89
27	2,06	12,35	-1,87	0,89
28	2,06	12,31	-1,86	0,89
29	2,06	12,36	-1,87	0,89
30	2,07	12,38	-1,87	0,89
31	2,06	12,36	-1,87	0,89
32	2,06	12,34	-1,87	0,89
33	2,06	12,31	-1,86	0,89
34	2,06	12,31	-1,86	0,89
35	2,05	12,30	-1,86	0,89
36	2,06	12,34	-1,87	0,89
37	2,06	12,36	-1,87	0,89
38	2,06	12,33	-1,86	0,89
39	2,06	12,34	-1,87	0,89
40	2,06	12,32	-1,86	0,89

Tabell .3. Medelfel (RMSE), relativt medelfel (Rel. RMSE), systematiskt fel (BIAS) och standardavvikelse (σ) för varje stickprovsstorlek (n) för grundytbevågad medeldiameter (Dgv) för valideringen.

Table .4. Root-mean-square deviation (RMSE), relative root-mean-square deviation (Rel. RMSE), systematic error (BIAS) and standard deviation (σ) for each sample size (n) for basal area weighted mean diameter (Dgv) for the validation.

n	RMSE	Rel. RMSE	BIAS	σ
3	74,79	328,00	-42,93	44,31
4	4,89	21,46	-1,54	3,95
5	3,55	15,56	-1,83	2,78
6	3,18	13,96	-1,78	2,47
7	2,92	12,82	-1,77	2,21
8	2,76	12,11	-1,69	2,11
9	2,74	12,00	-1,73	2,06
10	2,65	11,61	-1,67	2,01
11	2,62	11,49	-1,70	1,96
12	2,58	11,29	-1,69	1,92
13	2,57	11,27	-1,69	1,92
14	2,54	11,16	-1,70	1,88
15	2,53	11,10	-1,70	1,87
16	2,50	10,97	-1,67	1,85
17	2,48	10,90	-1,66	1,85
18	2,48	10,86	-1,66	1,84
19	2,46	10,80	-1,66	1,82
20	2,46	10,79	-1,68	1,81
21	2,44	10,70	-1,64	1,82
22	2,43	10,64	-1,64	1,80
23	2,44	10,71	-1,66	1,80
24	2,43	10,65	-1,65	1,79
25	2,42	10,63	-1,65	1,79
26	2,44	10,70	-1,68	1,78
27	2,42	10,61	-1,66	1,78
28	2,42	10,62	-1,66	1,78
29	2,41	10,58	-1,65	1,77
30	2,41	10,58	-1,66	1,77
31	2,42	10,63	-1,68	1,77
32	2,42	10,60	-1,67	1,77
33	2,40	10,51	-1,65	1,76
34	2,40	10,55	-1,66	1,77
35	2,40	10,53	-1,65	1,76
36	2,40	10,52	-1,66	1,76
37	2,41	10,56	-1,67	1,76
38	2,39	10,48	-1,65	1,75
39	2,39	10,49	-1,66	1,75
40	2,40	10,51	-1,66	1,75

Tabell .5. Medelfel (RMSE), relativt medelfel (Rel. RMSE), systematiskt fel (BIAS) och standardavvikelse (σ) för varje stickprovsstorlek (n) för volym (Vol) för valideringen.

Table .6. *Root-mean-square deviation (RMSE), relative root-mean-square deviation (Rel. RMSE), systematic error (BIAS) and standard deviation (σ) for each sample size (n) for basal area weighted mean diameter (Vol) for the validation.*

n	RMSE	Rel. RMSE	BIAS	σ
3	376,72	188,08	-149,59	296,62
4	70,43	35,16	-29,53	57,52
5	53,98	26,95	-25,60	44,24
6	48,95	24,44	-25,13	40,28
7	45,98	22,95	-23,97	38,25
8	45,67	22,80	-24,75	37,85
9	44,63	22,28	-24,72	36,86
10	43,80	21,87	-24,00	36,47
11	43,45	21,69	-24,06	36,12
12	42,87	21,40	-23,81	35,71
13	42,92	21,43	-24,01	35,72
14	42,24	21,09	-23,42	35,29
15	42,48	21,21	-23,76	35,42
16	42,35	21,14	-23,82	35,28
17	42,10	21,02	-23,83	35,03
18	41,87	20,90	-23,36	35,06
19	41,94	20,94	-23,57	35,03
20	41,71	20,82	-23,37	34,93
21	41,91	20,92	-23,77	34,92
22	41,73	20,83	-23,52	34,89
23	41,70	20,82	-23,60	34,81
24	41,74	20,84	-23,72	34,79
25	41,54	20,74	-23,45	34,74
26	41,58	20,76	-23,57	34,71
27	41,33	20,63	-23,25	34,64
28	41,31	20,63	-23,30	34,60
29	41,56	20,75	-23,68	34,64
30	41,50	20,72	-23,66	34,60
31	41,23	20,58	-23,31	34,52
32	41,28	20,61	-23,41	34,52
33	41,29	20,61	-23,44	34,52
34	41,27	20,60	-23,44	34,50
35	41,07	20,50	-23,24	34,40
36	41,14	20,54	-23,36	34,42
37	41,21	20,58	-23,40	34,48
38	41,23	20,58	-23,49	34,45
39	41,31	20,62	-23,63	34,45
40	41,15	20,54	-23,42	34,40

Tabell .7. Medelfel (RMSE), relativt medelfel (Rel. RMSE), systematiskt fel (BIAS) och standardavvikelse (σ) för varje stickprovsstorlek (n) för grunddyta (Gy) för valideringen.

Table .8. *Root-mean-square deviation (RMSE), relative root-mean-square deviation (Rel. RMSE), systematic error (BIAS) and standard deviation (σ) for each sample size (n) for basal area weighted mean diameter (Gy) for the validation.*

n	RMSE	Rel. RMSE	BIAS	σ
3	47,15	186,57	-17,18	37,37
4	8,01	31,69	-1,41	6,89
5	5,58	22,07	-0,70	4,97
6	4,88	19,32	-0,70	4,45
7	4,45	17,60	-0,55	4,13
8	4,30	17,01	-0,68	4,03
9	4,14	16,36	-0,70	3,92
10	4,09	16,20	-0,64	3,90
11	4,00	15,83	-0,61	3,84
12	3,88	15,37	-0,56	3,76
13	3,90	15,42	-0,64	3,78
14	3,83	15,15	-0,55	3,73
15	3,86	15,28	-0,60	3,76
16	3,81	15,08	-0,62	3,72
17	3,77	14,92	-0,63	3,69
18	3,76	14,88	-0,59	3,69
19	3,77	14,93	-0,63	3,70
20	3,74	14,81	-0,57	3,69
21	3,75	14,85	-0,64	3,69
22	3,74	14,79	-0,60	3,69
23	3,72	14,71	-0,60	3,67
24	3,72	14,73	-0,63	3,68
25	3,70	14,66	-0,60	3,67
26	3,68	14,56	-0,57	3,65
27	3,68	14,55	-0,56	3,65
28	3,67	14,51	-0,58	3,64
29	3,67	14,54	-0,61	3,65
30	3,68	14,56	-0,62	3,65
31	3,65	14,45	-0,57	3,64
32	3,65	14,44	-0,58	3,64
33	3,66	14,47	-0,59	3,64
34	3,64	14,41	-0,59	3,63
35	3,63	14,36	-0,58	3,62
36	3,64	14,39	-0,59	3,63
37	3,65	14,45	-0,59	3,64
38	3,64	14,40	-0,59	3,63
39	3,63	14,38	-0,61	3,63
40	3,62	14,33	-0,59	3,62