

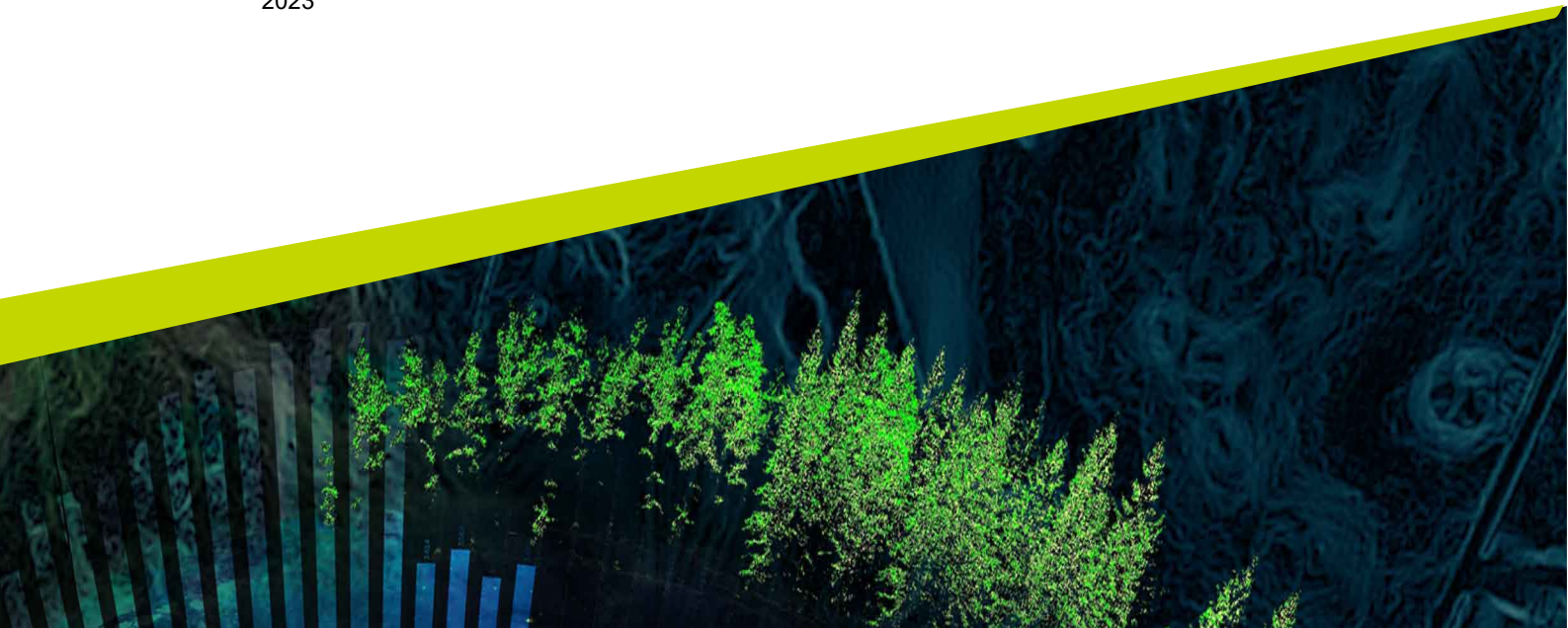


Skattning av HGV och stamvolym med data från stereomatchade drönarbilder genom befintliga modeller från Skogliga grunddata.

Estimating basal area weighted mean height and stem volume by using data from stereo-matched drone imagery through pre-existing models from Skogliga grunddata

Erik Forslöv

Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Institutionen för skoglig resurshushållning
Arbetsrapport / Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig resurshushållning, 541
2023



Skattning av HGV och stamvolym/ha med data från stereomatchade drönbilder med befintliga modeller från skogliga grunddata.

Erik Forslöv

Handledare: Jonas Bohlin, SLU, Institutionen för skoglig resurshushållning
Bitr. handledare: Jörgen Wallerman, SLU, institutionen för skoglig resurshushållning
Examinator: Inka Bohlin, SLU, institutionen för skoglig resurshushållning

Omfattning: 30 hp
Nivå och fördjupning: Avancerad nivå A2E
Kurstitel: Masterarbete i skogsvetenskap
Kurskod: EX0966
Program/utbildning: Jägmästarprogrammet
Kursansvarig inst.: Institutionen för skoglig resurshushållning
Utgivningsort: Umeå
Utgivningsår: 2022
Upphovsrätt: Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.
Serietitel: Arbetsrapport / Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig resurshushållning
Delnummer i serien: 541
ISSN: 1401-1204

Nyckelord: Drönare, Stereofotogrammetri, Skogliga grunddata, Skogsbruksplanläggning

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakultet

Institutionen för skoglig resurshushållning

Skoglig fjärranalys

Sammanfattning

Inom den svenska skogsbruksplanläggningen sker idag datainsamlingen traditionellt med subjektivt fördelade relaskopytor. Den subjektiva mätningen varierar mellan och inom planläggare och har generellt ett relativt medelfel (rRMSE) på 9 % för grundtyevägd medelhöjd (HGV) och 15–20 % för volym/ha. Att använda data från stereomatchade drönarbilder för att skatta dessa två variabler skulle kunna vara ett alternativ för att göra mätningen vid skogsbruksplanläggning mer objektiv och noggrann. I regel krävs det omfattande fältmätningar för att träna och validera modeller för att få bra skattningar ur de stereomatchade bilderna vilket är dyrt och tar lång tid. För att överkomma modellarbetet använder den här studien de befintliga modellerna som Skogliga grunddata (SG) producerat för HGV och stamvolym/ha. Dessa modeller är redan tränade och validerade men framtagna för laserdata och skattningarna bygger på de metriker som beskriver ett laserpunktmolns struktur. Då modellerna är framtagna för en annan typ av data än drönardata kalibreras skattningarna med pixelkalibrering för enskilda drönarmetriker i varje provyta med fältmätningar för att förbättra precisionen.

Tidigare studier har visat att det är hög korrelation mellan främst överhöjdsmetriker som är framtagna för punktmoln från laser- och drönardata och att det går att skatta höjd och stamvolym med relativt små avvikelser genom att bygga modeller med drönarmetriker som korrelerar väl med lasermetriker. Ingen har ännu testat att ta befintliga modeller från SG som endast är tillämpade för laserdata på drönardata. Studiens syfte är att undersöka skattningspotentialen av HGV och stamvolym/ha i barrdominerade bestånd genom att använda drönarmetriker som tagits fram enligt Skogliga grunddatas villkor i deras befintliga prediktionsmodeller med kalibrering från fältmätningar.

Med kalibreringen blir rRMSE 5,7 % för HGV och 14,18 % för stamvolym/ha. Utifrån studiens resultat är de kalibrerade skattningarna från drönarens metriker bättre än den subjektiva mätningen som används vid traditionell skogsbruksplanläggning. Denna metod skulle eventuellt kunna implementeras vid skogsbruksplanläggning där stödmätningar tas med exempelvis Katams teknologi för mobilmätning eller relaskopytor med en känd centrumkoordinat. Då denna studie använde en annan typ av kalibreringsteknik skulle dessa två typer av stödmätningar behöva utvärderas ytterligare innan de fullt ut implementeras vid skogsbruksplanläggning.

Nyckelord: Drönare, Stereofotogrammetri, Skogliga grunddata, Skogsbruksplanläggning

Abstract

Within Swedish forest management planning today, data collection traditionally takes place with subjectively distributed relascope sample plots. The subjective measurements vary between and within planners and generally has relative mean standard error (rRMSE) of 9% for basal area weighted average height (HGV) and 15–20 % for volume / ha. Using data from stereo-matched drone images to estimate these two variables could be an option to make the measurements in forestry management planning more objective and accurately. In general, there is a need for extensive field measurements to train and validate models to get good estimates from the stereo-matched images. This is expensive and takes a lot of time. To overcome the model work, this study uses the existing models that Skogliga grunddata (SG) produced for HGV and volume / ha. These models are already trained and validated but developed for laser data and the estimates are based on the metrics that describe the structure of a laser point cloud. As the models are developed for a different type of data source than drone data, the estimates for individual drone metrics in each sample area are calibrated using pixel calibration with field measurements to improve accuracy.

Previous studies have shown that there is a high correlation mainly between upper height metrics that are developed for point clouds from laser and drone data. The study results also showed that it is possible to estimate height and stem volume with relatively small deviations by building models with drone metrics that correlate well with laser metrics. No one has yet tested the performance of preexisting models that are only applied to laser data with drone data. The aim of the study is to investigate the performance of estimating HGV and volume / ha in field plots dominated by conifers by using drone metrics in Skogliga grunddatas models. The drone metrics were calculated to fit the to the conditions of the Skogliga grunddata in their existing prediction models. The models' estimations were calibrated from field measurements.

With the calibration, the rRMSE becomes 5,7% for HGV and 14,18% for volume / ha. Based on the results of the study, the calibrated estimates from the drone's metrics are better than the subjective measurement used in traditional forestry planning. This method could possibly be implemented in forestry planning where supportive field measurements are taken with Katam's technology for mobile phone measurement or relascope sample plots with a known center coordinate. As this study used a different type of calibration technique, these two types of supportive field measurements would need to be further evaluated before they are fully implemented in forestry planning.

Keywords: Drone, Stereo photogrammetry, Skogliga grunddata, Forest management planning

Innehållsförteckning

Tabellförteckning	6
Figurförteckning.....	7
Förkortningar.....	8
1. Inledning	9
1.1 Skogsbruksplaner och fjärranalys.....	9
1.2 Drönare och fotogrammetri.....	10
1.3 Tidigare studier	11
1.4 Syfte och mål	13
2. Metod.....	14
2.1 Studieområde och fältdata	14
2.2 Drönardata	16
2.3 Skogliga grunddata och modeller	17
2.4 Areametoden.....	18
2.5 Skattning och kalibrering.....	18
3. Resultat	23
3.1 Jämförelse mellan skattat och fältmätt data	23
4. Diskussion	27
4.1 Resultat	27
4.2 Felkällor.....	28
4.3 Tillämpning vid skogsbruksplanläggning	30
4.4 Framtida studier och optimeringsförsök.....	31
5. Slutsatser.....	33
Referenser.....	34
Tack	37

Tabellförteckning

Tabell 1. Parametrar till skattningsfunktionerna	21
Tabell 2. Prestationen av okalibrerade och kalibrerade skattningar av drönarmetriker i SG-modeller för HGV och stamvolym/ha i hänseende av RMSE, rRMSE, Bias och rBias.	25

Figurförteckning

Figur 1. Karta över Remningstorp. Fastigheten ligger inom den mörkgröna polygonen. De röda cirkarna visar var provytorna med 40 m radie är placerade.	15
Figur 3. Drönarpunktmoln med trädköpar på nära håll.	17
Figur 4. Flödesschema för försöket.	19
Figur 5. Visuellt exempel på trädfördelning mellan metriker och fälldata i provytorna.	20
Figur 6. Exempel på att trädfördelning vid pixelkalibrering. Röda stjärnan är provytans centrumkoordinat.	21
Figur 7. Okalibrerad och kalibrerad HGV i jämförelse med fältmätt HGV. Punkterna representerar värden för skattade och fältmätta värden inom 40m ytorna.	24
Figur 8. Okalibrerad och kalibrerad stamvolym/ha i jämförelse med fältmätt stamvolym/ha. Punkterna representerar värden för skattade och fältmätta värden inom 40m ytorna.	25
Figur 9. Okalibrerad och kalibrerad HGV. Röda linjen visar den okalibrerade HGV och gröna den kalibrerade.	26

Förkortningar

SBPL	Skogsbruksplan
SG	Skogliga grunddata
HGV	Grundytvägd medelhöjd

1. Inledning

1.1 Skogsbruksplaner och fjärranalys

I det svenska skogsbruket har skogsbruksplanen (SBPL) funnits till under lång tid i syfte att optimera skogsägarens skogsskötsel. Redan i början av 1930-talet då Skogsstyrelsen började med sitt planläggningsarbete använde skogsbruksplanerna fjärranalys som datakälla i form av flygbilder (Wilhemsson 2007). Inom dagens skogsbruksplanläggning används flygbildsmaterial i huvudsak till skogskartering, beståndsindelning samt skattning av skogliga variabler (Magnusson m.fl 2007).

Vid framtagandet av SBPL används idag ortofoton som genererats med stereofotograferade flygbilder för att kartera och dela in fastigheter i avdelningar. I fält kontrolleras avdelningarnas omfattning och beståndsdata samlas in med stödmätningar. Beståndens grundyta mäts med subjektivt fördelade relaskopytor, grundytevägd diameter (DGV) med talmeter och grundytevägd trädhöjd (HGV) med höjdmätare. Vid skogsbruksplanläggning används idag subjektiv mätning, i stället för objektiv, i syfte att spara tid. Den som planlägger väljer ytor subjektivt för att på bästa sätt fånga den variation som finns inom de inmätta bestånden. Vid subjektiv mätning ligger medelfelet för HGV-skattningar på 9 % och volymsskattningar 15 – 20 % (Ståhl 1992). I tätare bestånd sker ofta en underskattning av volymen och överskattningar i glesa bestånd (Wilhemsson 2007).

Sedan fjärranalysen introducerades för skogsbruket har det utvecklats flera metoder för att skatta skogliga variabler med bättre eller minst lika bra precision som den traditionella fältmätningen kopplat till SBPL. En av de mest etablerade och framgångsrika metoderna inom fjärranalysen är den flygburna laserskanningen. I Sverige utfördes den första skanningen mellan 2009 – 2016 och ett andra omdrev

pågår. Från den data som skanningen genererade finns det skogsvariabelkartor som kallas Skogliga grunddata (SG) (Nilsson m.fl. 2017). SG är ett viktigt underlag i Sverige och används b.l.a. inom SBPL för att få en uppfattning om olika parametrar i skog och mark (Skogsstyrelsen 2022). Från den laserdata som tagits fram finns det befintliga modeller från SG för att skatta bl.a. HGV och stamvolym/ha och andra skogliga variabler.

En laserskanning genererar ett högupplöst 3D-punktmoln som sedan kan användas för att skatta skogliga variabler med hjälp av areametoden ur rasterceller (Næsset m.fl. 2004). I denna metod jämförs sambandet mellan skattade värden för skogsvariabler från punktmolnets metriker med de korresponderande fältinventerade skogsvariablerna inom provytornas area. Metriker är statistiska mått som beskriver punktmolnsstrukturen i hänseende av höjd och täthet.

1.2 Drönare och fotogrammetri

En annan datainsamlingsteknik som också kan generera ett 3D-punktmoln är stereomatchade flygbilder. Punktmolnet utvinns med hjälp av en teknik som heter SFM (Structure From Motion image processing algorithms) där tekniken utnyttjar stereofotogrammetri för att generera punkter i bildernas överlapp där egenskaperna av en struktur kan hittas i båda bilderna (Siebert, S. & Teizer, J. 2014). I stereofotogrammetrin hittas strukturernas egenskaper genom att nyttja kamerans tvådimensionella förskjutning som finns mellan de två överlappande bilderna. Genom att mäta förskjutningen går det att skapa tredimensionella sammansättningar av punkter. En punkt representerar samma egenskap, i två överlappande bilder, men från olika vinklar. Egenskaperna sätts sedan i relation till en känd GNSS-position för att sedan räkna ut xyz-värden för punkterna i punktmolnet (Guerra-Hernández m.fl. 2018). Stereofotogrammetri används för stereofotograferade bilder från flygplan men kan även användas till drönare med liknande premisser.

Strukturen på punktmoln som ALS och stereomatchade flygbilder genererar har många likheter men det finns även några fundamentala skillnader. Ett punktmoln som ALS-data genererat kan ha flera returerna och då genomtränga samt träffa krontak, grenar, stammar, övrig vegetation och mark. Dessa returerna gör att skogstrukturen avbildas relativt väl. Stereomatchade bilder har enbart en retur per punkt men däremot genererar drönarens digitalkamera spektrala värden i RGB för varje punkt. Färgåtergivning av RGB gör det lättare att visuellt urskilja omgivning och trädslag i jämförelse med laserdata. Att punktmoln från stereomatchade bilder endast har en retur leder ofta till att krontaket blir väldefinierat i punktmolnet medan färre punkter beskriver det som är under krontaket. Där skogen är väldigt tät kan information om markytan vara begränsad. (Bohlin m.fl. 2012).

Användningen av drönare inom skogsbruket blir med tiden allt vanligare för olika användningsområden. I dagsläget används drönare främst för att snabbt få en överblick över skogens abiotiska och biotiska tillstånd (Tang, L. & Shao, G. 2015). Ett användningsområde där drönare ännu används i liten utsträckning är inventering av skogsvariabler (Puliti m.fl. 2015). Ett problem med att tillämpa drönaren som inventeringsredskap har varit att det i regel krävs omfattande mätningar i fält för att validera och träna det data som genereras, vilket tar tid och leder till extrakostnader (Goodbody m.fl. 2017) (Kotivuori m.fl. 2020).

Drönare har med tiden blivit ett mer användarvänligt verktyg. Numera behövs inga Ground control points (GCP) för att georeferera punktmolnen och georefereringen kan nu ske automatiskt via algoritmer (Kotivuori m.fl. 2020). Det finns även RTK på en del drönare som kan positionera drönaren med en precision på 4 - 5 cm noggrannhet. Denna noggranna positionering gör det möjligt att skapa punktmoln med relativt små felkällor gällande position.

1.3 Tidigare studier

Kotivuori m.fl. (2020) skattar stamvolym i en mindre skogsinventering med relativt små avvikelser från stereomatchade drönarbilder utan att använda lokala fältdata.

För att genomföra skattningen jämför forskargruppen korrelationen av metrikerna för både laserdata (ALS) samt drönarbilderna. De metriker som har en korrelation på $r^2 > 0,9$ används för att välja befintliga skattningsmodeller framtagna för laserdata för att skatta stamvolym med korresponderande drönarmetriker. Metrikerna som har högst korrelation är i regel överhöjdsmetriker. Skattningar utförs regionalt i närheten av en mindre skogsinventering. Kotivuori m.fl. (2020) använde för det mesta laserdata som skannats samma år som drönarflygningen med undantag för ett område där laserskanningen var 1 - 2 år gammal. För att kompensera för tidsskillnaden användes tillväxtmodeller för att uppdatera virkesförrådet.

En problematik med att ha laserdata som referens är att det kan ta 7 - 10 år innan laserskanningen uppdateras (Hultgren m.fl. 2020). Under tiden till nästkommande skanning sker det dessutom skogstillväxt, gallringar, avverkningar samt eventuella skador som påverkar virkesförrådet. Av dessa påverkande förändringar kan framför allt gallringar vara svåra att upptäcka med punktmoln från stereomatchade flygbilder från flygplan (Ali-Sisto, D. & Packalen, P 2017). En mer högupplöst datakälla som stereomatchade drönarbilder som flyger på lägre höjd och har en mer flexibel temporal upplösningen är eventuellt ett bättre verktyg för att upptäcka dessa förändringar i virkesförrådet.

I Kotivuori m.fl. 2020 studie jämfördes korrelationen mellan drönarmetriker och lasermetriker. Det var främst överhöjdsmetriker som hade en hög korrelation där bl a. P95 hade ett r^2 -värde på 0,99. I och med den höga korrelationen på många av överhöjdsmetrikerna skulle eventuellt drönarmetriker kunna appliceras på samma modeller för att få liknande skattningar men med färsk data. Kotivuori m.fl. 2020 drog slutsatsen att modeller som har tränats regionalt i närheten med areametoden är inte helt avgörande för hur bra modellen skattar höjd och stamvolym. För att lyckas med skattningarna är det viktigt att skogstrukturen är relativt lik i det område som drönaren flyger över som området som modellerna tränats efter (Kotivuori m.fl. 2020). Att skogstrukturen liknar det målområde som modellen används för att skatta skogliga variabler är en mer avgörande faktor för ett bra skattningsresultat än regional närhet. (Toivonen m.fl. 2021). Än har det inte testats hur pass väl

modeller från SG skulle kunna skatta samma variabler med ett punktmoln som genererats från stereomatchade drönbilder i stället för ett laserpunktmoln. En fördel med att använda befintliga modeller är att de inte behöver tränas med fältdata.

En drönare kan snabbt hämta hem data över mindre områden och lämpar sig väl för skogsfastigheter samt skogsbruksplanläggning (Puliti m.fl. 2015). Skogsinventeringar behöver uppdateras löpande och tätare uppdateringar med drönare kan spara kostnader och reducera antalet fälttimmar (Kotivouri m.fl. 2020). Det finns även ett behov av att minska avvikelserna i subjektiv fältmätning vid skogsbruksplanläggning till en billigare kostnad. Den subjektiva fältmätningen varierar inom och mellan planläggare vilket gör det svårt att slå fast hur pass mycket volym som finns på de inmätta fastigheterna. Det finns således även ett behov av en objektiv mätmetod där avvikelserna är mindre och insamlingen av data billigare. En drönare som skattar skogliga variabler från befintliga modeller från Skogliga grunddata med hjälp av stereofotogrammetri kan eventuellt vara lösningen på den här problematiken. Modellerna kan dock behöva någon form av kalibrering då de eventuellt inte är lämpande för den data som kommer från drönpunktmolnen. Ett sätt att kalibrera skattningarna kan vara att använda enstaka stödmätningar i fält.

1.4 Syfte och mål

Syftet med studien är att undersöka skattningspotentialen i att använda punktmoln från drönbilder tillsammans med befintliga prediktionsmodeller från Skogliga grunddata för att skatta HGV och stamvolym i barrdominerade bestånd.

För att utvärdera syftet ställs frågeställningarna:

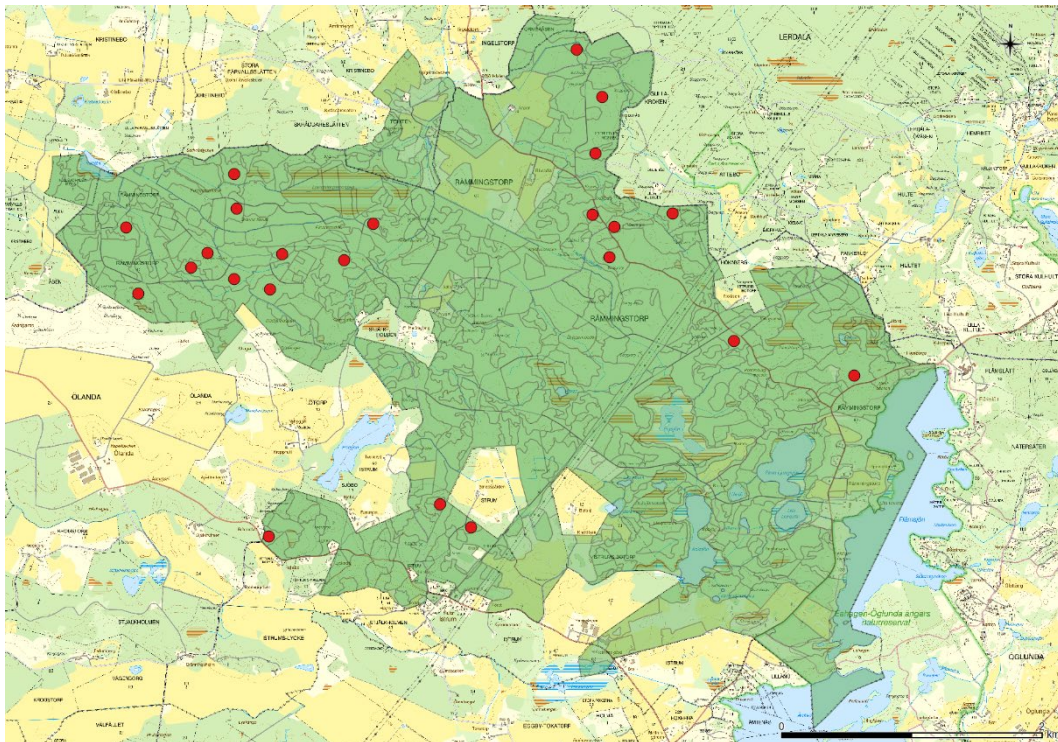
- Hur presterar SG-modellerna i hänseende av precision?
- Kan enstaka stödmätningar i fält användas som kalibreringsverktyg för att förbättra skattningarna?
- Vilka för- respektive nackdelar finns utifrån prediktionsmodellerna vid praktisk tillämpning för skogsbruksplanläggning?

2. Metod

2.1 Studieområde och fältdata

Studieområdet för datainsamlingen i denna studie är skogsfastigheten Remningstorp som är belägen i Västergötland. Storleken på fastigheten uppgår till 1200 ha, innefattar 531 bestånd och sköts av Skogssällskapet som även finansierar den datainsamling som bedrivs. Remningstorp används som försökspark för olika fjärranalysändamål. Fastigheten domineras träslagen av gran (*Picea Abies*) och tall (*Pinus Sylvestris*) i varierande täthet och åldersstruktur.

I den här studien används provytor med en radie på 40 m. Provytorna inventeras vart 3:e år av fjärranalysavdelningen på SLU och den data som användes till den här studien kommer från våren 2021 och har således en tillväxtsång emellan inventeringen och drönarflygningarna. Den drönardata som samlades in flögs tidig vår då lövträden saknade löv på grenarna. Drönarpunktmolnet över dessa träd blir följaktligen inte representativa i lövskog. Totalt är det 49 provytor med 40 m radie på Remningstorp. Flyguppdragen täckte 39 av dessa provytor och av dessa saknade 11 provytor inventeringsdata. En del provytor med inventeringsdata togs bort då de inte ansågs representera typiska barrdominerade bestånd. Det gällde 2 provytor som plockades bort för att de hade hög lövandel, 3 som bestod av mestadels överståndare med mycket underväxt och 2 som var helt eller delvis avverkade efter inventeringstillfället. I den här studien används totalt 23 provytor som placerats centralt i utvalda bestånd.



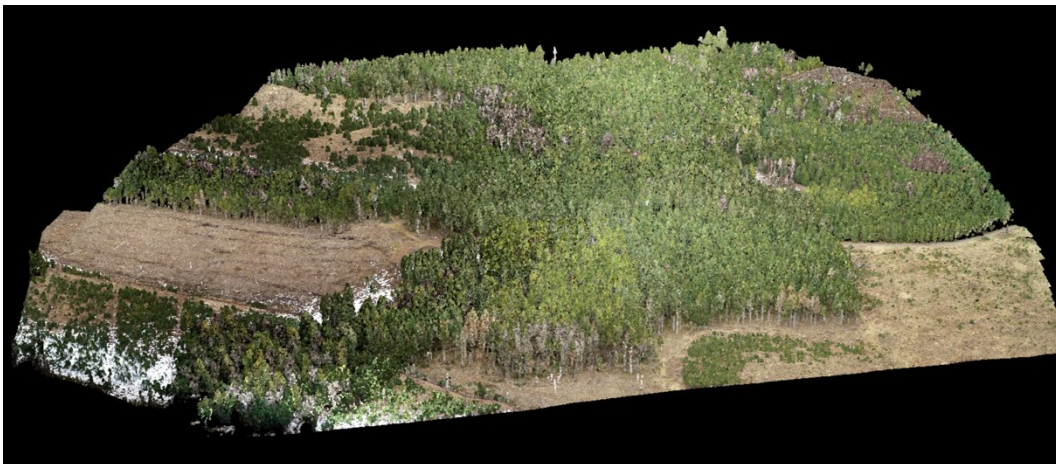
Figur 1. Karta över Remningstorp. Fastigheten ligger inom den mörkgröna polygonen. De röda cirkelarna visar var provytorna med 40 m radie är placerade.

Alla träd som är större än 5 cm i diameter inom provytorna är klavade och har tillhörande koordinater. Volymerna togs fram med Heureka (SLU 2023) som är en programvara för analys och planering av skogsskötsel. Volymen inom provytorna summerades och räknades om till stamvolym/ha. Varje provyta har i snitt 47 provträd. Vid inventeringen är endast provträden som höjden mäts på, resterande träd har en höjd som modellerats fram med Heureka. I jämförelse mellan medelhöjden av alla provträd och HGV för alla träd som beräknats fram med Heureka fanns en betydande skillnad i höjd mellan dessa två HGV-värden för samma provyta. Därför valdes provträdens aritmetiska medelvärde att representera HGV i den här studien då den bygger på mätningar i fält. Höjden av ca 47 provträd / provyta ansågs vara tillräckligt många för ett område som ca 0,5 ha stort.

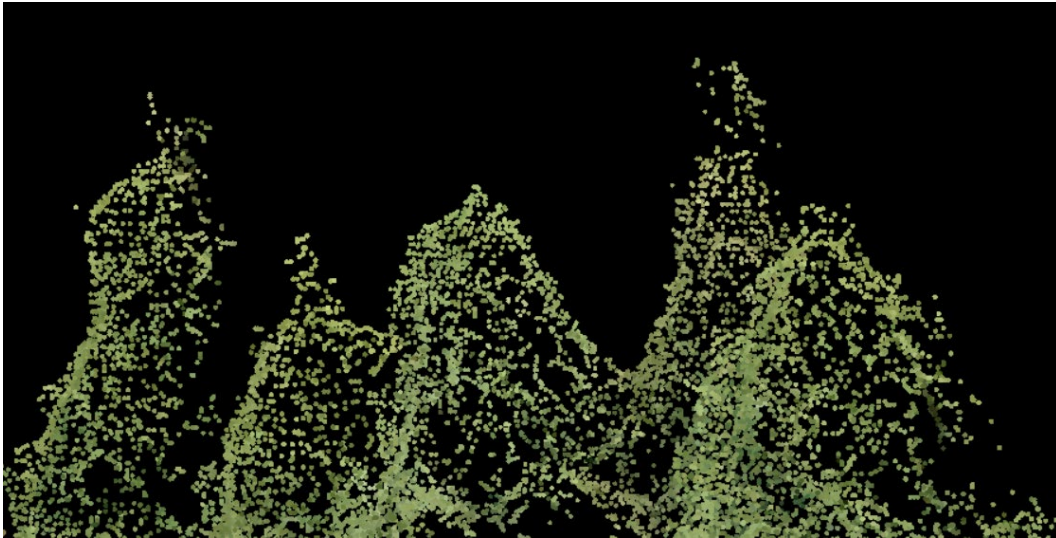
2.2 Drönardata

Drönarflygningen sker med färdigprogrammerade rutter för att täcka områdena för provytorna på skogsfastigheten. Flygningarna görs med en DJI Phantom 4 RTK. Totalt samlades all data in under 4 dagar i följd där en markyta på 311 ha täcktes av flyguppdragen. Metrologiska värdeförhållanden varierade mellan soligt och molnigt bland de olika flygningarna. Drönaren flyger på en höjd av 120 m med bildöverlapp på 85 % längs med och 90 % tvärs mot flygrutten. DJI Phantom 4 RTK har en upplösning på 5472 x 3648 och den genomsnittliga pixelstorleken på marken sett till alla flyguppdrag uppgick till ca 3,16 cm/pix.

3D-punktmoln från drönardata genererades med hjälp av programvaran Agisoft Metashape Professional (64-bit). Punktmolnen samt georeferering skapas genom automatisk stereofotogrammetri och med hjälp av drönarens GNSS-system.



Figur 2. Tredimensionellt punktmoln från stereomatchade drönarbilder.



Figur 3. Drönarpunktmoln med trädtoppar på nära håll.

Lantmäteriets markmodell användes för att normalisera punktmolnets höjd. Normalisering och beräkning av metriker utfördes med hjälp av programvaran FUSION (McGaughey 2012). Metrikerna för drönarpunktmolnet togs fram utefter samma villkor för laserdata som anpassas till Skogliga grunddatas modeller d.v.s med en pixelstorlek på 12,5 m och en höjdgräns på 1,5 m. Höjdgränsen innebär att punkterna under den valda nivån inte inkluderas vid framräknandet av metriker. På så vis undviks att irrelevant information om objekt eller annan vegetation tas med och påverkar skattningarna.

2.3 Skogliga grunddata och modeller

I detta försök används befintliga, färdigtränade modeller från Skogliga grunddata produktionen. SG-Modellerna baseras på kombinationen av laserdata och Riksskogstaxeringens provytor. Genom att använda modellerna från skogliga grunddata är det möjligt att göra rikstäckande skattningar av skogliga variabler. En SG-modell tränas utefter en areal på 2,5 x 2,5 km och är således relativt lokalanpassad (Nilsson m.fl. 2017). Modellerna som använts kommer från den första nationella laserskanningen eftersom det nya omdrevet inte skannat Remningstorp än. De generella värdena för hela den första flygburna laserskanningen flögs med en punktdensitet på 0,5 – 1 punkter/m², flyghöjd på

1700 – 2300 m, skanningsvinkel på max $\pm 20^\circ$, stråköversträckning på min 20 %, träffyta på marken 0,5 m. Laserskanningen över Remningstorp gjordes då träden var avlöfvade.

2.4 Areametoden

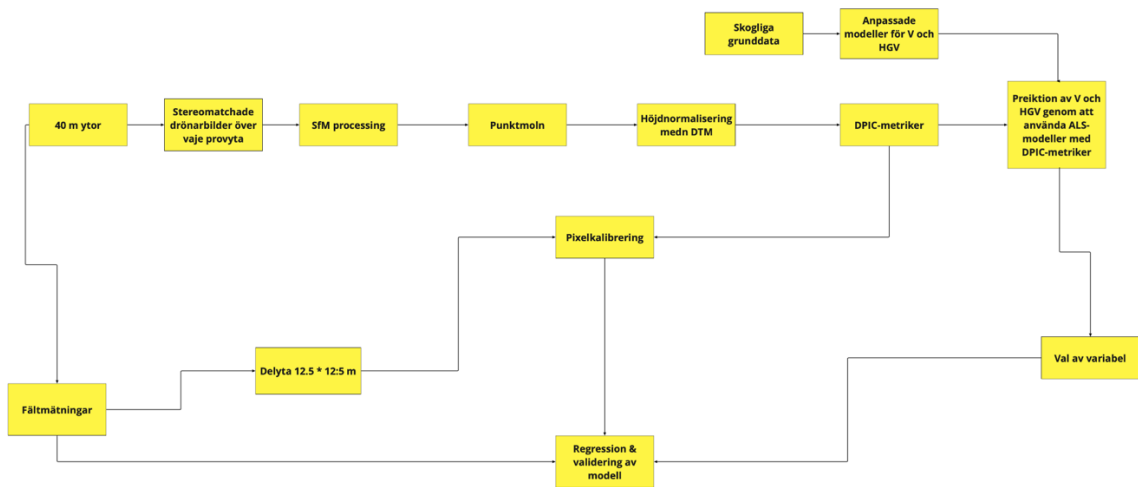
För att utvärdera hur pass bra SG-modellerna skattar variablerna HGV och stamvolym/ha från drönarmetriker används areametoden. I den areabaserade metoden används data från 3D-punktmoln i kombination med fältmätt data. Sambandet mellan de två datakällorna från punktmolnet och fältdata, för en viss variabel, används för att få fram regressionsmodeller (Næsset 2002) (Næsset m.fl 2004). Dessa modeller används sedan för att ta fram heltäckande skattningar för det skannade området (Skogsstyrelsen 2022).

SG-Modellerna som används i den här studien är färdiga och har inget behov av träning. Det är endast skattningarna som modellerna tar fram som behöver valideras. Valideringen sker genom att skatta variablerna utifrån de metriker som täcker de fältinventerade 40m ytorna på Remningstorp. I snitt är det mellan 29 – 32 pixlar med en pixelstorlek på 12,5 m som ryms inom en 40m yta. Skattningarna av HGV och stamvolym/ha över provytorna beräknas genom att ta medelvärdet av alla skattade pixlar inom ytan. Skattningarna kalibrerades sedan med stödmätningar i fält i syfte att förbättra precisionen. Kalibreringsmodeller togs fram med regressionsanalys.

2.5 Skattning och kalibrering

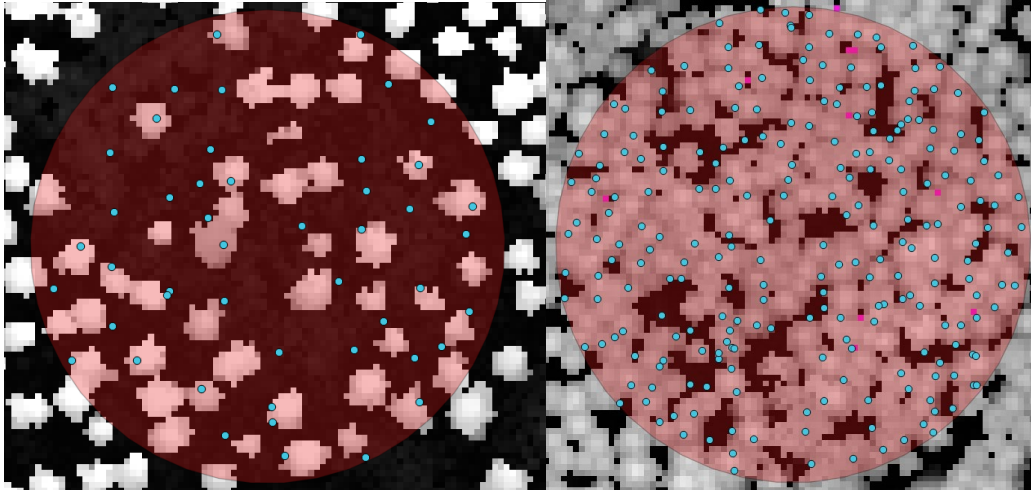
För att öka precisionen ytterligare kalibreras en pixel med tillhörande skattningsvärde mot den fältdata som finns inom pixeln för varje provyta. Tanken med att ta fältdata inom en pixel, som har en area på $156,25 m^2$, är att likna en stödmätning i fält som skulle kunna göras vid skogsbruksplanläggning. En pixel motsvarar 3 - 4 % av de totala antalet pixlar inom en provyta beroende på hur många

metriker som ryms inom provytan. I figur 4 går det att se flödesschemat för försöket.



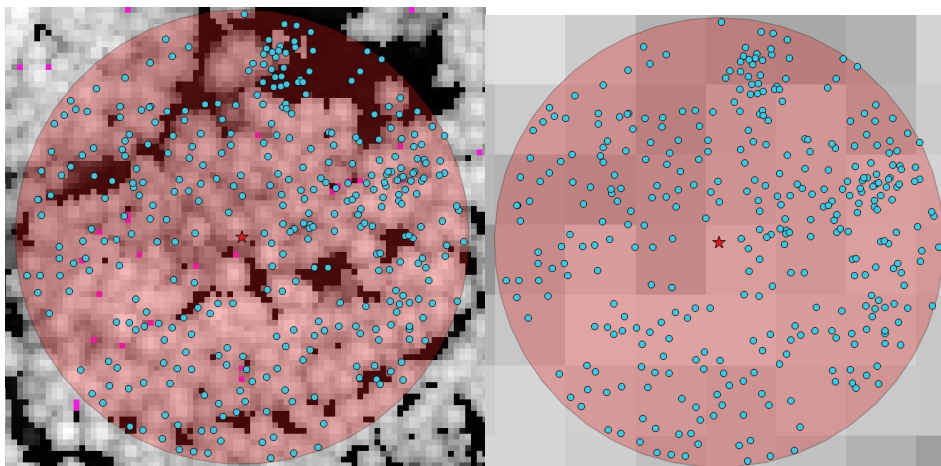
Figur 4. Flödesschema för försöket.

Inom 40 m ytor har alla träd som har minst 5 cm i diameter klavats och för varje klavning finns det koordinater för trädens position. I Figur 5 finns det exempel på hur träden fördelar sig över provytan på bra och mindre bra sätt i jämförelse med drönardata. I arbetet med datasetet upptäcktes det, genom att göra om P95 metrikerna för drönarbilderna till ett 1m raster, att vissa provytor har en felaktig fördelning av träd. Punkterna illustrerar de klavade träden och många av dessa punkter finns inom svarta områden där höjderna ligger nära 0 m i rastret och således inte på ett träd. Ytor som dessa plockades bort då de inte ansågs representera sambandet mellan skattad och fältmätt volym. Till höger i Figur 5 går det att se en bra trädfördelning. Även om det inte helt säkert går att säga att punkterna ligger rätt så är fördelningen relativt jämn över hela ytan. När medelvärdet av alla rasterceller räknas ihop ges en motsvarande bild av medelvärdet av de skogliga variabler som fältmätts.



Figur 5. Visuellt exempel på trädfördelning mellan metriker och fältdata i provytorna.

Vid pixelkalibreringen valdes den pixel där provytans centrumkoordinat fanns inom. Provträdet/provträden inom pixeln fick representera HGV och volymen räknades ihop inom pixeln för att sedan räknas om till stamvolym/ha. Om provträd saknades inom pixeln valdes en närliggande pixel med ett provträd i. Det fanns dock en liknande problematik gällande trädfördelning inom vissa pixlar likt beskrivningen till Figur 5. I Figur 6 går det att se ett liknade exempel där samma provyta visas med olika rasterstorlek. Till vänster används ett 1m raster för att visualisera trädfördelningen mellan fält- och drönardata. Till höger finns ett 12,5 m raster som skattat HGV ur metrikerna från drönardata i Skogliga grunddatas modeller. Till vänster ser det ut som att det borde vara fler träd inom pixeln med centrum koordinaten än vad punkterna visar. Dessa pixlar användes i alla fall då de endast var några enstaka, majoriteten hade en liknande trädfördelning i jämförelse mellan klavade träd och i 1 m raster. Eventuellt kan pixlarna med sämre fördelning av träd påverka kalibreringen negativt.



Figur 6. Exempel på att träd fördelning vid pixelkalibrering. Röda stjärnan är provytans centrumkoordinat.

Skattningarna för HGV och stamvolym/ha utfördes genom att använda formel 1 och det intercept för β_0 samt koefficienterna $\beta_{1,2,3\dots}$ från Skogliga grunddatas modeller med tillhörande metriker $X_{1,2,3\dots}$ från drönbilderna, ε_i är slumpvariabel.

$$\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \varepsilon_i \quad (1)$$

För att skapa en kalibreringsmodell testades inventeringsdata inom pixel Y_{inv_i} för provyta i mot det skattade värdet för samma pixel \hat{y}_{pix_i} där \hat{y} -värdet för pixeln togs fram genom skattning av SG-modellerna med formel 1.

$$Y_{inv_i} = \beta_0 + \beta_1 \hat{y}_{pix_i} + \varepsilon_i \quad (2)$$

Kalibreringsmodellen som formel 2 genererade användes sedan på de ursprungliga skattningarna i syfte att förbättra precisionen med formel 3.

$$\hat{Y}_{kal_i} = \beta_0 + \beta_1 \hat{y} + \varepsilon_i \quad (3)$$

Nedan i tabell 1 visas de intercept B_0 och koefficienter som användes till de befintliga SG-modellerna i formel 4 & 6 samt de kalibrerade modellerna i formel 5 och 7 för HGV och stamvolym/ha.

Tabell 1. Parametrar till skattningsfunktionerna

Modell	B_0	B_1	B_2	B_2
SG.HGV	0,8663468	0,9591098	-	-
Kal.HGV	12,3974565	0,4994233	-	-
SG.rot.S.volym/ha	3,368599749	0,244345594	0,006688418	-0,190329440
Kal.rot.S.volym/ha	-0,9771027	0,9531695	-	-

$$SG.HGV = \beta_0 + \beta_1 \times P95 \quad (4)$$

$$Kal.HGV = \beta_0 + \beta_1 \times SG.HGV \quad (5)$$

$$SG_rot.S.volym/ha = \beta_0 + \beta_1 \times P80 + \beta_2 \times H80veg + \beta_3 \times Elev.std \quad (6)$$

$$Kal_rot.S.volym/ha = \beta_0 + \beta_1 \times SG_rot.S.volym/ha \quad (7)$$

För att kunna utvärdera precisionen från valideringen räknades absolut och relativt medelfel (RMSE och rRMSE) ut via formel 8 och 9. Bias och relativ bias räknades ut via formel 10 och 11.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (8)$$

$$rRMSE(\%) = 100 \times \frac{RMSE}{\bar{y}} \quad (9)$$

$$Bias = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (10)$$

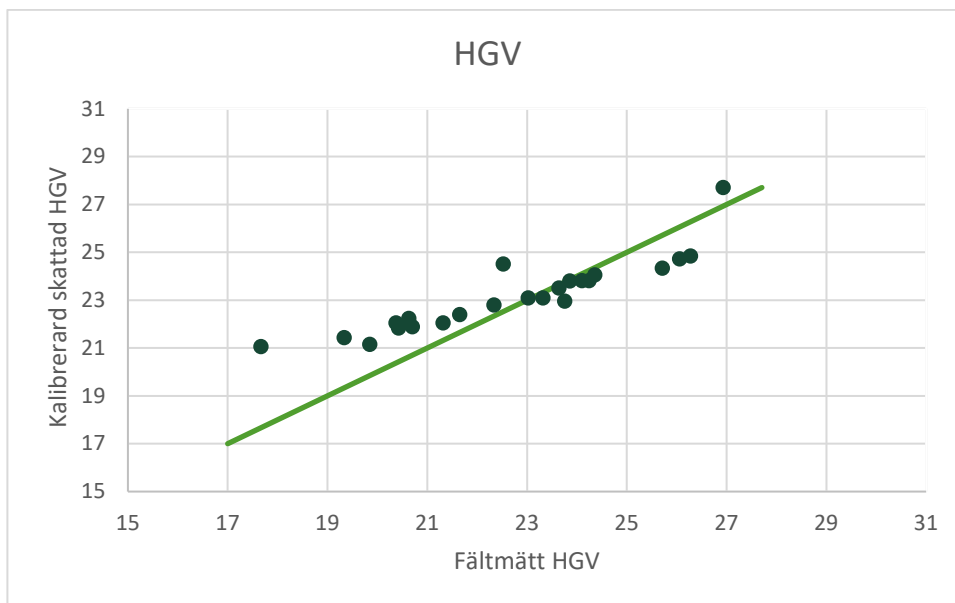
$$rBias(\%) = 100 \times \frac{Bias}{\bar{y}} \quad (11)$$

\hat{y}_i = skattat värde gällande attribut y för provyta i

y_i = fältmätt värde gällande attribut y för provyta i

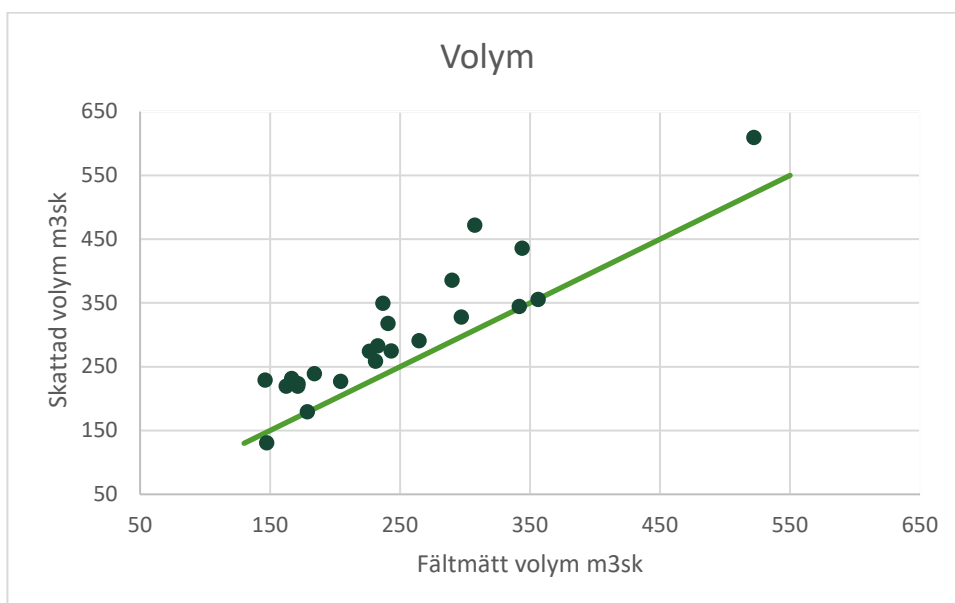
\bar{y} = medelvärde av fältmätt värde gällande attribut y

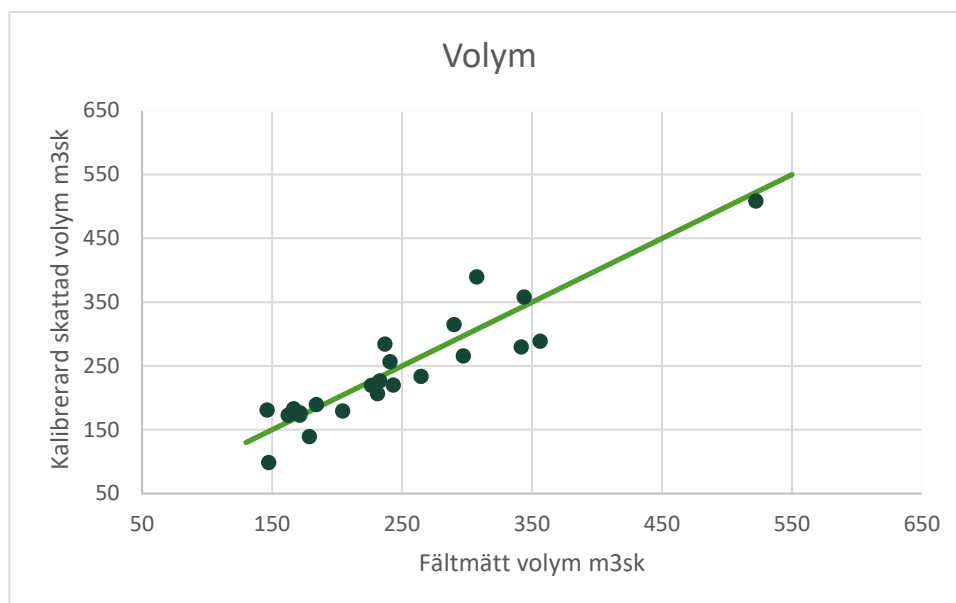
n = antal provytor



Figur 7. Okalibrerad och kalibrerad HGV i jämförelse med fältmätt HGV. Punkterna representerar värden för skattade och fältmätta värden inom 40m ytorna.

I Figur 8 går det att se en jämförelse mellan skattad och fältmätt volym/ha före och efter kalibrering. I regel går det att generellt se en överskattning av volymen innan kalibreringen där 21 av 23 provytor överskattas. Efter kalibreringen är förhållandet mellan över- och underskattningar mer jämt då 11 av 23 provytor underskattas men det generella avståndet minskar mellan det skattade värdena och det förväntade värdet.





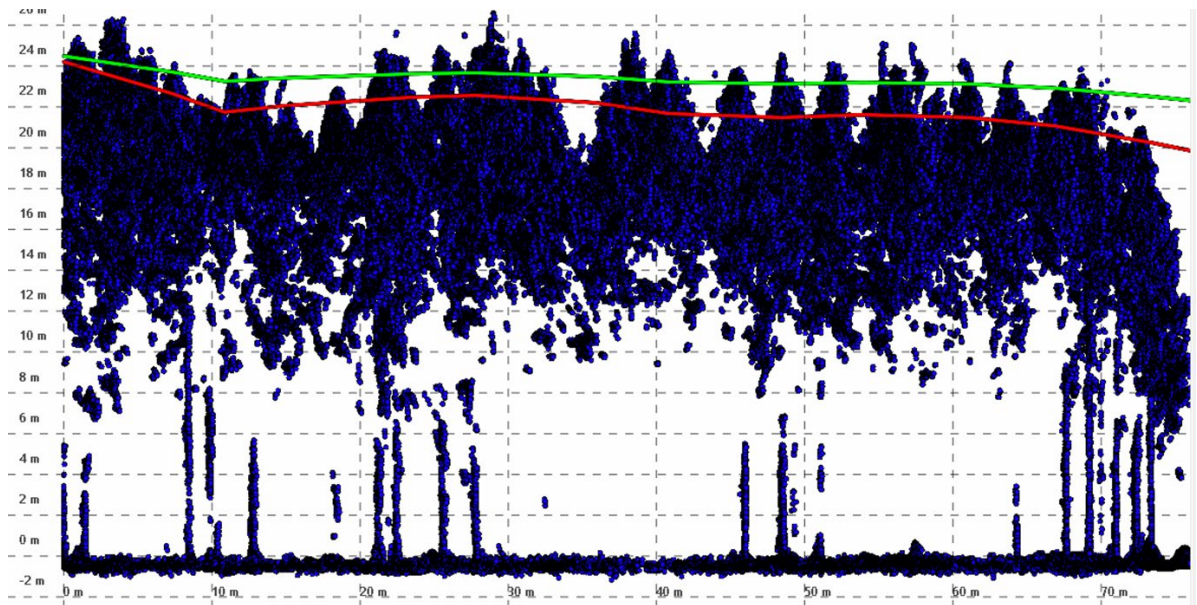
Figur 8. Okalibrerad och kalibrerad stamvolym/ha i jämförelse med fältmätt stamvolym/ha. Punkterna representerar värden för skattade och fältmätta värden inom 40m ytorna.

Absolut och relativt medelfel samt bias och relativ bias presenteras i tabell 2 för skattningarna av stamvolym/ha och HGV före och efter kalibrering. RMSE och bias minskade för båda variablerna efter kalibreringen.

Tabell 2. Prestationen av okalibrerade och kalibrerade skattningar av drönarmetriker i SG-modeller för HGV och stamvolym/ha i hänseende av RMSE, rRMSE, Bias och rBias.

Variabel	RMSE	rRMSE	Bias	rBias
HGV (m)	1,72	7,6 %	-1,11	-4,90 %
Kal_HGV (m)	0,50	5,7 %	0,48	2,12 %
Stamvolym/ha (m^3sk)	66,85	27,1 %	52,90	21,48 %
Kal_stamvolym/ha (m^3sk)	34,92	14,18 %	-5,30	-2,15 %

Figur 9 visar en transekt av ett punktmoln inom en provyta där skattningen av HGV, skär trädtopparna, före och efter kalibrering. Skattningarna illustreras med en röd och grön linje som skär trädtopparna. Bilden är ett lyckat exempel på hur kalibreringen förbättrade skattningen.



Figur 9. Okalibrerar och kalibrerad HGV. Röda linjen visar den okalibrerade HGV och gröna den kalibrerade.

4. Diskussion

4.1 Resultat

Den här studiens syfte är att utvärdera skattningspotentialen för Skogliga grunddatas modeller av HGV och stamvolym/ha när metriker används från ett drönarpunktmoln som genererats av stereomatchade bilder. Metrikerna för drönarpunktmolnet räknades ut med samma villkor som för det laserpunktmoln som användes under Lantmäteriets nationella laserskanning.

Resultatet visar generellt att höjden underskattas och volymen överskattas före kalibreringen. Det relativa medelfelet för skattad HGV ligger på 7,6 % före kalibreringen och på 5,7 % efter. För stamvolym ligger det relativa medelfelet för skattad stamvolym/ha på 27,1 % före kalibreringen och 14,18 % efter. I och med att medelfelet för HGV generellt sett ligger på 9 % vid subjektiv mätning vid skogsbruksplanläggning är skattningarna med drönarmetriker bättre både innan och efter kalibreringen. Utifrån detta resultat höjs den generella datakvalitén genom att applicera drönarmetriker på SG-modeller.

Vid subjektiv mätning i skogsbruksplanläggning av stamvolym/ha ligger medelfelet generellt inom intervallet på 15 – 20 %. Innan kalibrering är det relativa medelfelet högre för skattningar med drönarmetriker i SG-modeller. Volymskattningen förbättras när de kalibreras med objektiva stödmätningar i fält. Efter kalibreringen blir det relativa medelfelet för volymskattningarna från drönarmetriker något bättre än de bästa inom intervallet på 15 – 20 % för subjektiv mätning. Utifrån detta resultat är den generella datakvalitén för skattning av stamvolym/ha med SG-modellerna inte bättre än subjektiva mätningar innan kalibrering men bättre efter kalibreringen.

För båda skogsvariablerna stamvolym/ha och HGV förbättras medelfelet kopplat till skattningar utförda med SG-modeller som applicerats med drönarmetriker jämfört med subjektiv mätning då kalibreringen används. Det är alltså en förbättring i datakvalitet samt en objektiv mätmetod till skillnad från subjektiv mätning inom skogsbruksplanläggning. Det förekommer variation inom och mellan planläggare vid subjektiv mätning vilket kan leda till osäkerheter i att exakt veta hur avvikelserna ser ut för uppmätta skogsvariabler. Vid objektiv mätning mäts allt på samma premisser och det går med större säkerhet att säga hur stora avvikelserna är.

4.2 Felkällor

Under databearbetningen framkom det att koordinaterna för de träd som mäts i fält inte alltid korresponderade visuellt med träden i ett 1m raster från drönarmetriker. På enskilda provytor med lågt antal stammar gick det att se tydligt. Det var däremot svårare att avgöra ifall koordinaterna stämde överens med träden där stammarna står tätt. Så länge träden är någorlunda jämnt fördelade över provytan kanske det spelar mindre roll då avvikelserna eventuellt är mindre. Betydelsen för trädens fördelning spelar nog mindre roll då provyteskattningarna togs fram genom att ta medelvärde av alla pixlar för att jämföra med fältmätt data. Däremot kan det ha spelat en större roll vid pixelkalibreringen. Värdet av en enskild pixel jämfördes med de träd som mäts in inom samma pixel. Om trädfördelningen är helt annorlunda pga. att koordinaterna är felprojekterade kanske kalibreringen i vissa fall, där det förekommer stor variation i fördelningen av träd med hänseende av HGV och stamvolym, påverkar kalibreringen negativt.

En annan felkälla som bör nämnas är att de delytor som användes för att kalibrera pixlarna kommer från det fältinventerade materialet. Detta kan leda till att kalibreringen har överanpassat modellen till det fältdata som inventerats vilket skulle kunna leda till att den fungerar sämre i verkligheten då den testas på andra typer av bestånd. I Kotivuori m.fl (2020) försök visade forskargruppen att överhöjdsmetriken P95 hade ett r^2 -värde på 0,99 när laser och drönarmetriker jämfördes. Även andra metriker hade en hög korrelation på över 0,9 i r^2 -värde. Det

vore intressant att jämföra skillnaden om exakt samma modeller används på nyutkomna laser- och drönarmetriker. Eventuellt kan skattningarna för drönarmetriker kalibreras efter de skattningar som lasermetriker genererar i syfte att förbättra precisionen.

I och med att det finns en del frågetecken kopplat till fältmätningarna vore en regressionsanalys av Skogliga grunddatas raster för HGK och stamvolym/ha ett bra sätt att utvärdera hur pass långt ifrån drönarmetriker ligger efter. Just nu finns det dock ingen relevant data för att utvärdera detta än då senaste laserskanningen över Remningstorp är 10 år gammal. Den nya skanningen kommer ske kommande höst och först då är det möjligt att göra denna typ av utvärdering.

Skattningarna är i regel utförda i barrdominerade bestånd och det finns oftast lite eller inget löv inom ytorna. Några av ytorna har dock lövträd i mer eller mindre omfattning men SG-modellerna har inte presterat sämre skattningsresultat jämfört med övriga ytor. Två lövdominerade ytor togs bort då barrdominerade ytor skulle utvärderas. Dessa skattningar blev mindre bra men SG-modellerna verkar fungera bra om de finns några enstaka lövträd i barrdominerade bestånd. Skattningarna i den här studien gjordes då träden var avlödade. Resultaten kan bli annorlunda när löven slagit ut.

Olika drönarsystem med annan teknik, sensorer, kamerainställningar och annorlunda stereoöverlapp kan ge andra resultat. Det som varit fördelen med att använda DJI Phantom 4 RTK är att GNSS-positionen är relativt exakt vilket gör att kvaliteten på punktmolnet förbättras i jämförelse med sämre positioneringssystem. Väderförhållanden är också en annan faktor som kan påverka mätningen och ge olika resultat. Exempel på dessa faktorer är höga solvinklar som genererar mycket skuggor och blåsiga förhållanden.

4.3 Tillämpning vid skogsbruksplanläggning

En viktig fråga att utreda är om det är möjligt att praktiskt tillämpa skattningen av HGV och stamvolym/ha med hjälp av stereomatchade drönbilder vid skogsbruksplanläggning. Det utredas mer ifall om antalet timmar i fält reduceras jämfört traditionell SBPL. Mätningarna utifrån studiens resultat för höjd och stamvolym/ha presterar bättre efter att ha kalibrerats med stödmätningar i fält än de traditionella mätningar som görs vid planläggningen idag. En förbättrad prestation talar för implementeringen vid skogsbruksplanläggning då den generella datakvaliteten blivit bättre.

En annan fördel med objektiv mätning är att allt mäts efter samma premisser. På så vis minskas den variation som finns inom och mellan planläggare och det går med större säkerhet säga vad avvikelserna av de skattade variablerna är. Med objektiva mätningar finns det inget behov av kontrolltaxerare för att kalibrera planläggarnas mätningar.

Då pixelns area är $156,25 \text{ m}^2$ behövs en objektiv mätmetod i fält med kända koordinater inom varje bestånd där alla träden klavas och höjden mäts på ett eller två representativa PT. I fält är det svårt att exakt veta var själva pixeln hamnar i relation till stödmätningen. För att vara säker på att ha fältdata inom pixeln bör den inmätta behövs cirkulärprovyta med minst 17,6 m radie för att man ska vara helt säker på att en pixel täcks. Det blir även svårt att avgöra vilka träd som hör till den utvalda pixeln om man inte tar koordinater för varje träd vilket är tidskrävande. Det hade dock varit intressant om det hade gått att kalibrera modellerna med en relaskopmätning per yta med känd koordinat för provytans centrum och sedan använda provytecetrum för att välja den pixel som ska kalibreras. Fördelen är att provytan inte behöver vara representativ för beståndet men det är klart en fördel om skogens omgivande struktur inte avviker för mycket runtom relaskopytan, då är det mer sannolikt att skattningarna runt de omgivande pixlarna inte gör det heller.

Ett annat sätt att få skattningar med kända koordinater är att använda Katams mobilapp. Katam är global aktör för insamlandet samt analys av skogsvariabler med relativt hög precision med hjälp av programvara som tillämpas av digitala kameror i mobiltelefoner och drönare. Mobilmätningarna samlas in genom att träden filmas vinkelrätt med videoinspelningarna från mobilkameran. I inspelningen skapas en 3D modell utifrån kamerans förflyttning där avstånden i omgivningen mäts för att sedan processa fram skogsvariabler från trädens spatiala fördelning. Genom det inspelade materialet skattas virkesförråd, grundyta, medeldiameter, diameterfördelning, stamtäthet, trädhöjd. Det inspelade materialet kan, med hjälp av GPS, även registrera samt bestämma position för enskilda träd. Mätprecisionen ökar ju fler träd som registreras under inspelningen men långa inspelningar med mycket data tar längre tid för mobilens processor att analysera. Flera mindre inspelningar kan slås ihop för att öka mätprecisionen och minimera processtiden (Holmström 2022).

4.4 Framtida studier och optimeringsförsök

Skattningar av HGV och stamvolym/ha är endast två skogliga variabler vid datainsamling vid skogsbruksplanläggning. Det finns fler variabler att utvärdera som dessutom har tillhörande SG-modeller som DGV och grundyta. Med dessa variabler hade det också varit intressant att utvärdera hur pass väl det går att skatta medelstamsvolymen i olika bestånd. Just medelstamsvolym är en viktig parameter för skogsindustrin för att projektera hur pass lång tid en avverkning eller gallring tar att utföra för skördare och skotare. Det kan vara ett viktigt bidrag till skogsindustrin då det kan ge färskare data över medelstamsvolymen i bestånd man planerar att använda i sin logistik. Om skattningarna presterar bra kommer det i längden att minska osäkerheterna och på sikt eventuellt kosta mindre pengar då skogsbolagen har bättre uppskattning över hur pass lång tid en avverkning eller gallring tar.

Det hade varit intressant att undersöka ifall det går att kalibrera SG-modellerna med hjälp av provytor i närheten av en drönarflygning som Riksskogstaxeringen

inventerat. Så länge drönaren flyger över det inventerade området kan skattningarna kalibreras utefter inventerade fältdata. Detta tillvägagångssätt skulle kunna vara ett sätt att ta fram kalibrerade modeller med regional anpassning.

Det skulle behövas en mer genomgående utredning i vilka typer av bestånd som SG-modellerna presterar sämre i. På så vis skulle kalibreringen i huvudsak fokuseras till dessa typer av bestånd och bestånd som i regel skattas bra behöver eventuellt inte stödmätningar. Detta skulle kunna optimera kalibreringsresultatet. Den frågeställning som skulle kunna utredas är vilken typ av beståndstruktur skattningarna blir sämre i. Beror felskattningarna på en mindre homogen beståndsstruktur eller är det mer beroende av de trädslag som finns inom beståndet?

Ett annat intressant ämne att undersöka är ifall denna metod skulle kunna tillämpas för att uppdatera virkesförrådet före och efter gallring. Det kan vara viktigt för en markägare att veta hur mycket volym som står kvar efter att gallringen utförts. Två flygningar skulle kunna utföras innan och efter åtgärd samt jämföras med fältdata samt den volym som plockas ut.

5. Slutsatser

Den här studien visar utifrån dess resultat att det är möjligt att skatta både HGV och stamvolym/ha i barrdominerade bestånd bättre än de traditionella mätningarna som är kopplat till skogsbruksplanläggning om det utförs en pixelkalibrering för en pixel per provyta. Det behöver utredas ifall pixelkalibreringens resultat blir annorlunda ifall kalibreringsdata tas utanför de provytor som används som valideringsdata. Studiens metod skulle eventuellt kunna tillämpas praktiskt vid skogsbruksplanläggning om stödmätningar sker med relaskopsytor eller Katams teknologi med kända koordinater. Stödmätningarna behöver inte vara representativa för beståndet som helhet men ska helst ha liten variation runt om själv stödmätningen. Att variationen kring stödmätningen är liten kan vara viktigt då det inte går att veta var pixlarna som senare ska användas i kalibreringen förhåller sig till det stödmätningens område. Om variationen är liten runtom stödmätningen är det mer sannolikt att skattningarna till de pixlar som ligger närmast varandra varierar mindre. Utvärderas detta förslag på metod med liknande resultat som denna studie genererat kan skogsbruksplanläggningen förbättra datakvalitet vid insamling av skogsvariabler och spara kostnader.

Referenser

Ali-Sisto, D. & Packalen, P. (2017). Forest Change Detection by Using Point Clouds From Dense Image Matching Together With a LiDAR-Derived Terrain Model. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 10 (3), 1197–1206. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2615099>

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*, 27(7), ss. 692–699.

Goodbody, T.R.H., Coops, N.C., Tompalski, P., Crawford, P. & Day, K.J.K. (2017). Updating residual stem volume estimates using ALS- and UAV-acquired stereo-photogrammetric point clouds. *International journal of remote sensing*, 38 (8-10), 2938–2953. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1219425>

Guerra-Hernández, J., Cosenza, D.N., Rodriguez, L.C.E., Silva, M., Tomé, M., Díaz-Varela, R.A. & González-Ferreiro, E. (2018). *Comparison of ALS- and UAV(SfM)-derived high-density point clouds for individual tree detection in Eucalyptus plantations*. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 39 (15-16), pp. 5211–5235 Taylor & Francis. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1486519>

Holmström, A. (2022) Katam Technologies. Muntlig källa.

Kotivuori, E., Kukkonen, M., Mehtätalo, L., Maltamo, M., Korhonen, L. & Packalen, P. (2020). Forest inventories for small areas using drone imagery without in-situ field measurements. *Remote sensing of environment*, 237, 111404–. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111404>

Lindgren, N., Wästlund, A., Bohlin, I., Nyström, K., Nilsson, M. & Olsson, H. (2021). Updating of forest stand data by using recent digital photogrammetry in combination with older airborne laser scanning data. *Scandinavian journal of forest research*, 36 (5), 401–407. <https://doi.org/10.1080/02827581.2021.1936153>

- Magnusson, M., Fransson, J.E.S. & Olsson, H. (2007). Aerial photo-interpretation using Z/I DMC images for estimation of forest variables. *Scandinavian journal of forest research*, 22 (3), 254–266. <https://doi.org/10.1080/02827580701262964>
- McGaughey, R.J. (2018). FUSION/LDV: Software for LiDAR data analysis and analysis. FUSION version 3.80. Seattle: University of Washington, United States Department of Agriculture, Forest service.
- Nilsson, M., Nordkvist, K., Jonzén, J., Lindgren, N., Axensten, P., Wallerman, J., Egberth, M., Larsson, S., Nilsson, L., Eriksson, J. & Olsson, H. (2017). A nationwide forest attribute map of Sweden predicted using airborne laser scanning data and field data from the National Forest Inventory. *Remote sensing of environment*, 194, 447–454. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.022>
- Næsset, E. (2002). Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment*, 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*, 19(6), ss. 482-499.
- Puliti, S., Ørka, H.O., Gobakken, T. & Næsset, E. (2015). Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. *Remote sensing (Basel, Switzerland)*, 7 (8), 9632–9654. <https://doi.org/10.3390/rs70809632>
- Siebert, S. & Teizer, J. (2014). *Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system*. *Automation in Construction*, vol. 41, pp. 1–14 Elsevier B.V.
- Skogsstyrelsen (2022). <https://www.skogsstyrelsen.se/skogligagrunddata/> Internet, Hämtad 2022-06-08
- SLU (2023). Heureka systemet <https://www.slu.se/institutioner/skoglig-resurshushallning/programprojekt/sha/heureka2/> Internet, Hämtad 2023-01-04
- Ståhl, G. (1992). En studie av kvalitet i skogliga avdelningsdata som insamlats med subjektiva inventeringsmetoder. Rapport 24. Umeå: Sveriges Lantbruksuniversitet, avdelningen för skogsuppskattning och skogsindelning.
- Tang, L. & Shao, G. (2015). *Drone remote sensing for forestry research and practices*. *Journal of Forestry Research*, vol. 26 (4), pp. 791–797 Harbin: Northeast Forestry University.

Toivonen, J. Korhonen, L. Kukkonen, M. Kotivuori, E. Maltamo, M. & Packalen, P. (2021)

Wilhelmsson, E. (2007). *Forest Management Planning. Arbetsrapport 202 2007*. Sveriges lantbruksuniversitet, ISSN 1401-1204.

Tack

Jag skulle vilja tacka mina två handledare Jonas Bohlin och Jörgen Wallerman. Ni har gett er stöd och väglett mig genom mitt arbete. Tack även till Jonas Jonzén och Peder Axensten på SLUs fjärranalysavdelning samt Anton Holmström på Katam Technologies för utbyte av tankar och åsikter som fört mig framåt i mitt examensarbete. Slutligen skulle jag vilja tacka Elias Bergström som varit en god studiekamrat som hjälpt till med datainsamling, databearbetning samt utbyte av idéer och tankar under arbetes gång.

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Även om du inte publicerar fulltexten kommer den arkiveras digitalt. Om fler än en person har skrivit arbetet gäller krysset för samtliga författare. Läs om SLU:s publiceringsavtal [här](https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/):

- <https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/>.

JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.