



**Kandidatarbeten
i skogsvetenskap**
Fakulteten för skogsvetenskap

2019:17

Kan ytmodeller och punktmoln från
stereomatchade flygbilder användas för att
prediktera trädhöjd vid skogskanter?
- en jämförelse mot flygburen laserskanning

*Can surface models and point clouds from stereo matched
aerial images be used to predict tree heights along forest
edges?
- a comparison to airborne laser scanning*

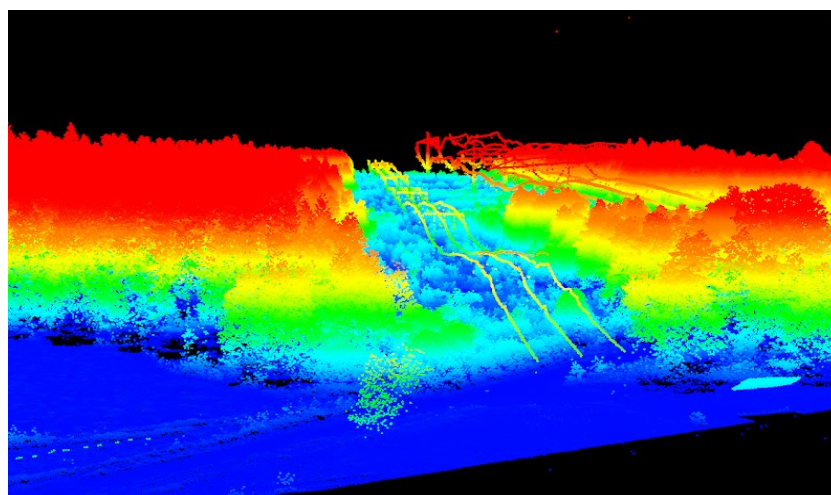


Foto: Martin Persson

Lisa Lindberg & Martin Persson



Kandidatarbeten i Skogsvetenskap

Fakulteten för skogsvetenskap,
Sveriges lantbruksuniversitet

Enhet/Unit	Institutionen för skogens ekologi och skötsel Department of Forest Ecology and Management
Titel, Sv	<i>Kan ytmodeller och punktmoln från stereomatchade flygbilder användas för att prediktera trädhöjd vid skogskanter?</i>
Titel, Eng	<i>Can surface models and point clouds from stereo matched aerial photos be used to predict tree heights along forest edges?</i>
Nyckelord/ Keywords	<i>Fjärranalys, flygbilder, fotogrammetri, kraftledning laserskanning, problemträd/ Aerial images, laser scanning, photogrammetry, power lines, problem trees, remote sensing</i>
Handledare/Supervisor	<i>Jonas Bohlin, institutionen för skoglig resurshushållning/ Department of Forest Resource Management</i>
Examinator/Examiner	Tommy Mörling Institutionen för skogens ekologi och skötsel/ Department of Forest Ecology and Management
Kurstitel/Course	Kandidatarbete i skogsvetenskap Bachelor Degree in Forest Science
Kurskod	EX0911
Program	Jägmästarprogrammet
Omfattning på arbetet/	15 hp
Nivå och fördjupning på arbetet	G2E
Utgivningsort	Umeå
Utgivningsår	2019
Serie	Kandidatarbeten i Skogsvetenskap

FÖRORD

Denna skrift är ett kandidatarbete på Jägmästarprogrammet vid Sveriges lantbruksuniversitet i Umeå. Vi skrev arbetet under våren 2019 och det omfattar 15 högskolepoäng.

Vi vill tacka Jonas Bohlin som varit vår handledare och bistått oss i vårt arbete, samt Mattias Nyström som också varit ett värdefullt bollplank för frågor och funderingar under arbetet. Även tack till SLU och Ljungbergsfonden för tillhandahållande av lokaler och programvara.

SAMMANFATTNING

Syftet med detta arbete var att undersöka om stereomatchade flygbilder kan ersätta dyr helikopterbaserad laserskanning, i arbetet att längs kraftledningsgator identifiera enskilda träd som riskerar att på något sätt skada ledningarna. Möjligheten att använda Lantmäteriets färdiga flygbilder skulle kunna leda till minskade kostnader för inventering. I studien bearbetade vi data från området Remningstorp som under år 2014 både har flygfotograferats och laserskannats med hög punkttäthet. Vi identifierade träd utifrån ytmodeller baserade på flygfoton respektive laserskanning med hjälp av ett segmenteringsverktyg, för att utifrån dessa träd använda två metoder för höjdskartning. Laserskanning antogs vara facit. I metod 1 extraherades höjdvärden för enskilda träd utifrån rasterbilder, i metod 2 användes istället punktmoln. Fler träd identifierades i ytmodellen baserad på laserskanningen, 1145 träd över 15 meter identifierades medan 1024 träd identifierades utifrån fotogrammetriska ytmodellen. Korrelationen mellan laserskanning och flygfoto blev för metod 1: 0,62, medan metod 2 hade en korrelation på 0,97. Determinationskoefficienten blev för metod 1: 38,4 % medan det för metod 2 blev det högre värdet av 94,2 %. I termer av Root Mean Square Error (RMSE) och relativt RMSE gav metod 1 värden på 2,898 meter och 14,21 % medan det för metod 2 blev 0,752 meter och 3,45 %. Metod 2 genererade bättre resultat än metod 1 och vi bedömer att det finns potential att vidareutveckla metoden för att i framtiden kunna använda den för att identifiera enskilda träd. Vi bedömer att stereomatchade flygbilder har potential att vara likvärdiga med laserskanning för identifiering och kartning av enskilda trädets höjd.

Nyckelord: fjärranalys, flygbilder, fotogrammetri, kraftledning, laserskanning, problemträd

SUMMARY

The purpose of this thesis was to investigate whether stereo matched aerial photos can replace expensive helicopter based lasers scanning in detecting individual trees which could possibly damage power lines. The possibility to use Lantmäteriets aerial images could lead to decreased costs for inventory.

In this study we processed data from Remningstorp that has been both air-photographed and laser scanned with a high point density. We identified trees from surface models based upon the aerial images and laser scanning, by using a segmenting tool. Two methods for estimating height on these trees were used. We chose to use the estimates from the laser scanning as the true height values. In method 1, the individual height values were extracted from rasters; point clouds were used for method 2. More trees were identified from the surface model based upon laser scanning, 1145 trees over 15 meters, than in the surface model based upon aerial images, 1024 trees. The correlation was 0,62 respectively 0.97 for method 1 and 2. Coefficient of determination was 38.4 % for method 1, while method 2 had a value of 94.2 %. Root Mean Square Error (RMSE) and relative RMSE was 2.898 meters and 14.21 % for method 1 and 0.752 meters and 3.45 % for method 2.

Method 2 generated better results compared to method 1 and based on this, we think there is potential to further develop this method and in the future use it to identify and estimate individual trees and their height. We therefore assess that stereo matched aerial images have the potential to be equivalent to laser scanning in identifying individual trees and for estimating their height.

Keywords: Power lines, aerial images, laser scanning, remote sensing, photogrammetry

INLEDNING

Kraftledningar finns i olika storlekar och har olika stor betydelse för den svenska elförsörjningen. Stamnätet i Sverige bestod 2017 av cirka 15 000 km kraftledningar sammankopplade över landet (Svenska kraftnät 2017a). Dessa ledningar kräver kontinuerligt underhåll för att garantera elförsörjningen i Sverige. Med hänvisning till 4§ i starkströmsförordningen krävs det att innehavaren fortlöpande driftsbesiktigar luftburna ledningar av en viss storleksordning för att förhindra skada på person eller sak (2009:22). Svenska kraftnät är en innehavare som bland annat arbetar med detta och en del i arbetet är att identifiera "farliga träd", alltså träd som riskerar att på något sätt skada ledningen, exempelvis genom att falla över ledningen. I dagsläget identifieras dessa träd visuellt eller genom laserskanning, utförda med hjälp av helikopter, i anslutning till kraftledningarna (svk 2017b; E.ON u.å). Grändborn¹ beskriver att på företaget Vattenfall, som också är en innehavare av ledningar, har varje ledningsgata en långsiktig underhållsplan som efterföljs och där "farliga träd" identifieras antingen genom laserskanning, som ger data som bearbetas av ett konsultföretag, alternativt genom fotpatrullering. Fotpatrullering används dock inte i någon större omfattning då det är resurskrävande.

Laserskanning är en metod för skogsinventering som har vuxit fram under relativt kort tid (Ågren *et al.* 2013). Tekniken går ut på att en sensor skickar ut en laserpuls som reflekteras. Många pulser sänds ut åt olika håll och det som egentligen görs är att avståndet till reflektionspunkterna mäts. Tekniken kallas LiDAR (Light Detection and Ranging). Eftersom många pulser sänds ut erhålls ett punktmoln med reflektionspunkter, och en av fördelarna med laserskanning är att flera returerna kan erhållas ur en och samma laserpuls, vilket medför att både krontaket och marken kan ses i ett laserskanningsgenererat punktmoln (Ågren *et al.* 2013). Förutom laserskanning finns andra tillvägagångssätt för flygburen datainsamling. Sverige har kontinuerligt fotograferats sedan rikstäckande flygfotografering påbörjades på 1950-talet och därmed finns en stor mängd data arkiverat (Lantmäteriet 2018). Lantmäteriets mål är att nya flygbilder ska tas kontinuerligt, och att 30 % av Sveriges landyta ska fotograferas årligen. Dessa bilder ska sedan kunna nyttjas för olika ändamål inom samhället, exempelvis för bildmätning, så kallad fotogrammetri. Tekniken innebär att det går att fastställa föremåls position, dimension och form (Boberg 2006). Genom att på olika sätt bearbeta och kombinera foton kan 3D-information genereras. Denna information innehåller spatial information, vilket i sin tur, i kombination med en höjdmodell, kan ge punktmoln liknande de som erhålls från laserskanning (Baltsavias 1999). Lagret med de höjdsatta punkterna kan ge en typ av höjdmodell i rasterformat, kallad ytmodell, som redogör för vad som kan ses ovanifrån (Lantmäteriet 2016). Där det inte går att genomföra en matchning mellan flygbilderna kan det bildas hål i ytmodellen där det inte finns någon data. Användningsområdena för de färdiga ytmodellerna kan exempelvis vara inom skogsbruket där de används för att beskriva skogliga strukturer och variabler (Vastaranta *et al.* 2013; Pearse *et al.* 2018; Bohlin *et al.* 2012).

Ett flertal studier finns som jämför möjligheter och begränsningar mellan laserskanning och stereomatchade flygbilder. I en studie gjord av Pearse *et al.* (2018) jämförs flygburen laserskanning mot fotogrammetriskt framställda punktmoln från satelliter. Ett antal vanliga skogliga variabler studerades och resultaten visade att laserskanningen bättre överensstämde med verkligheten. Vastaranta *et al.* (2013) jämförde i sin studie ALS (Airborne Laser

¹ Andreas Grändborn, underhållschef på Vattenfall eldistribution, 2019-03-11

Scanning) och DSI (Digital Stereo Imagery) mot varandra gällande hur bra de kan identifiera och beskriva olika skogsvariabler. Deras slutsats var att DSI i de flesta fall har ett högre RMSE (Root Mean Square Error) än ALS men att DSI kan vara användbart och till och med, i vissa fall, att föredra framför ALS. I en studie av Bohlin *et al.* (2012) studerades skattningar av några vanligt förekommande skogsvariabler utifrån fotogrammetriskt bearbetade flygbilder och jämförde sedan dessa med verkligheten. RMSE för trädhöjden blev 8,8 % för trädhöjd på beståndsnivå och de drog slutsatsen att denna teknik har potential att användas operativt i skogsbruket. Mot bakgrund av dessa studier finns alltså indikationer på att laserskanning generellt har en högre precision i skattningar än stereomatchade flygbilder. Samtidigt bör det noteras att det finns möjligheter för en större framtida användning av stereomatchade flygbilder inom skogsbruket.

Det kan inom skogsbruket även vara av intresse att kunna identifiera enskilda träd. Eriksson (2004) har studerat olika metoder att utifrån flygfoton segmentera och klassificera enskilda träd. Erikssons studie visar att beroende på vilken metod som används vid segmenteringen blev 73-95 % av träden korrekt segmenterade. I en studie av St-Onge *et al.* (2015) gjordes en jämförelse av höjdsättning på enskilda träd med punktmoln från laserskanning respektive fotogrammetri. Slutsatsen var att skillnaden mellan de olika dataseten var väldigt liten, men att det också beror på vilken typ av skog som undersöks. Det finns fler studier som undersökt möjligheterna att identifiera och skatta enskilda träd attribut utifrån flygfoton men dock kommit fram till att exempelvis höjd kan vara svårt att skatta utifrån dessa (Korpela 2004). Vi vill undersöka om data från stereomatchade flygbilder skulle kunna användas för att mäta höjden på enskilda träd och på det sättet ersätta helikopterbaserad laserskanning, som anses vara mer resurs- och tidskrävande än att använda färdiga flygbilder från Lantmäteriet. Vår underliggande frågeställning är därför:

Är höjdprediktioner från stereomatchade flygbilder likvärdiga med de höjder som erhålls från laserskanning?

Enligt den tidigare studien av Pearse *et al.* (2018) fungerar laserskanning bättre vid skattning av höjd. Det är dock viktigt att poängtera att i den studien jämfördes laserskanning och fotogrammetrisk metod mot manuellt uppmätta värden. Vi kommer endast att jämföra de stereobildsgenererade höjderna mot höjder skattade via laserskanning. Vår hypotes är att trädhöjderna från de olika modellerna kommer att avvika från varandra i ganska liten utsträckning. Om det uppenbaras att trädhöjderna från flygbilderna har en återkommande differens jämfört med laserskanningen så planerar vi att skapa en modell utifrån linjär regression som korrigerar detta.

MATERIAL OCH METODER

Studielokal

Data som använts i denna studie har hämtats från ett område mellan Skara och Skövde, Remningstorp, där SLU bedriver forskning. Genom Remningstorp går en större kraftledning. Vi valde ut ett område på 900 meter på båda sidor längs kraftledningen (N58°47'39"09, E13°65'54"34). En zon på ca 20 meter från ledningsgatan och in i skogen användes i analysen. I området fanns vid datainsamlingstillfället öppen terräng med genomkorsande kraftledning samt skog bestående av olika trädslag såsom tall (*Pinus sylvestris L.*), gran (*Picea abies (L) H.Karst*) och björk (*Betula spp L.*). Skogen varierade i åldersklass och höjd. I området förekommer både skog som brukas för timmerproduktion samt ett naturreservat. Bredden på hela ledningsgatan är ca 70 meter.

Flygbilder

Över det studerade området finns stereomatchade flygbilder tagna den 11 och 26 juni år 2014 av Lantmäteriet. Flygbilderna togs på en höjd av 2800 m över marken med kameramodellen UltraCam XP. Bilderna hade ett överlapp på 30 % i sidled och 60 % i längsled. GSD (Ground Sample Distance) var i bilderna 0,25 m. Lantmäteriet korrigerade bilderna radiometriskt samt utförde en blocktriangulering. En modellbaserad synvinkel tillämpades vid korrigeringen, vilket resulterade i Colour infrared images (CIR). Av dessa bilder skapades sedan en ytmodell med programvaran SURE på liknande sätt som de av lantmäteriet producerade ytmodellerna (nFrames u.å).

Laserskanning

En tät laserskanning gjordes på uppdrag av SLU den 14 september år 2014 med helikopter med en Riegel LMS Q680i sensor på 400 meters höjd över vårt studerade område. 40 laserpulser sändes ut per kvadratmeter vilket genererade 100-150 returper per kvadratmeter. Data levererades i normaliserade LAS-filer, vilket innebär att höjddangivelsen är i meter över marken.

Metod 1

Vi valde att bearbeta data med två olika metoder. Metod 1 baserades på ytmodeller som vi har valt att kalla metod 1 medan den andra metoden utgick från punktmoln och som vi har valt att kalla metod 2.

Ytmodell från fotogrammetri

En höjdmmodell från Lantmäteriet med upplösning 2x2 m ändrades för att matcha ytmodellens upplösning på 0,48x0,48 m (ESRI 2018a). Ytmodellen subtraherades med höjdmmodellen för att ge krontakets höjd över marken istället för över havet (ESRI 2016a). För att optimera möjligheterna att hitta lokala maxima i lagret adderades även ett ortofoto till ytmodellen (Bonnet 2017). Då det förekom vissa luckor i data fylldes dessa igen med interpolering (Childs 2004).

Bearbetningen fortsatte sedan i QGIS. Det kombinerade ortofotot med ytmodellen utjämnades med ett gaussiskt filter (Conrad *et al.* 2015), sökmetoden var cirkulär och hade en sökradie på två meter. Innan segmenteringen gjorde vi en invertering av lagret, varvid Z-värdena inverterades. En segmentering gjordes sedan vilket medförde att lokala maxima lokaliserades i området. Sökmetoden var cirkulär och sökradien 2 meter. Ur segmenteringen erhöles dels punkter för varje lokal maxpunkt, gränser mellan segmenten och själva segmenten. Utifrån de lokala maxpunkterna skapades ett lager med en punkt för varje enskild maxpunkt (Jurgiel 2018). Varje erhållen lokal maxpunkt antogs vara ett enskilt träd och dessa punkter användes sedan för att kunna identifiera höjden från det kombinerade lagret med ortofoto och ytmodell. Alla träd med en predikerad höjd som understeg 15 meter togs bort.

Ytmodell från LIDAR

Med funktionen *lasgrid* kunde de aktuella filerna identifieras med hjälp av koordinaterna från de aktuella områdena (LAsTools 2012). Totalt 9 stycken LAS-filer innehöll data från vårt utvalda område. Sedan använde vi verktyget MergeData för att sammanfoga alla LAS-filer till en större fil (McGaughey 2018). Den normaliserade filen omvandlades till en ytmodell i rasterformat (ESRI 2016b). Interpoleringstypen som användes i processen var triangulering, interpoleringsmetoden var linjär och utdatatypen sattes till flytande med en cellstorlek på 0.48 och med 1 som Z-faktor.

Sedan följde vi samma arbetsgång som användes för att skapa punkter utifrån en ytmodell som vi tillämpade för den fotogrammetriska ytmodellen men med en större sökradie på 7 meter när det gaussiska filtret användes.

Kombinering av ytmodeller

De två lagren från de olika modellerna med de lokala maxpunkterna innehållandes höjdinformation kopplades sedan samman där punkterna från den fotogrammetriska ytmodellen kopplas till punkter från ytmodellen baserad på LiDAR (ESRI 2018b). Ett gränsvärde på 1.5 meter sattes för att punkter för långt ifrån varandra inte skulle kopplas ihop.

Ett nytt lager skapades därmed med punkter som innehöll höjddata från båda modellerna.

Metod 2

Extrahering av enskilda träd från LAS-filer och framtagning av höjdpercentiler

Den andra metoden vi använde oss av för att få fram enskilda trädets höjd var att ta fram höjdpercentiler från data från både laserskanningen samt flygbilderna.

I punktmolnen över området från laserskanning respektive flygbilder, klipptes de koordinatsatta lokala maxpunkterna med unika ID-värden ut till enskilda LAS-dataset med 1 meters radie runt varje maxpunkt. De enskilda dataseten bearbetades så att höjdpercentilerna 80, 90 och 95:e percentil togs fram för varje lokal maxpunkt. Då de framtagna percentilvärdena saknade georeferens använde vi de unika ID-värdena för att koppla data till samma ID-värden från en tabell där koordinaterna fanns med. Utifrån koordinaterna kunde sedan ett nytt lager med punkter skapas, innehållandes information om de olika höjdpercentilerna.

När ovanstående process var färdig för båda LAS-dataseten gjordes en rumslig sammankoppling enligt samma metodik och inställningar som i metod 1 (ESRI 2018b).

Regressionsmodell

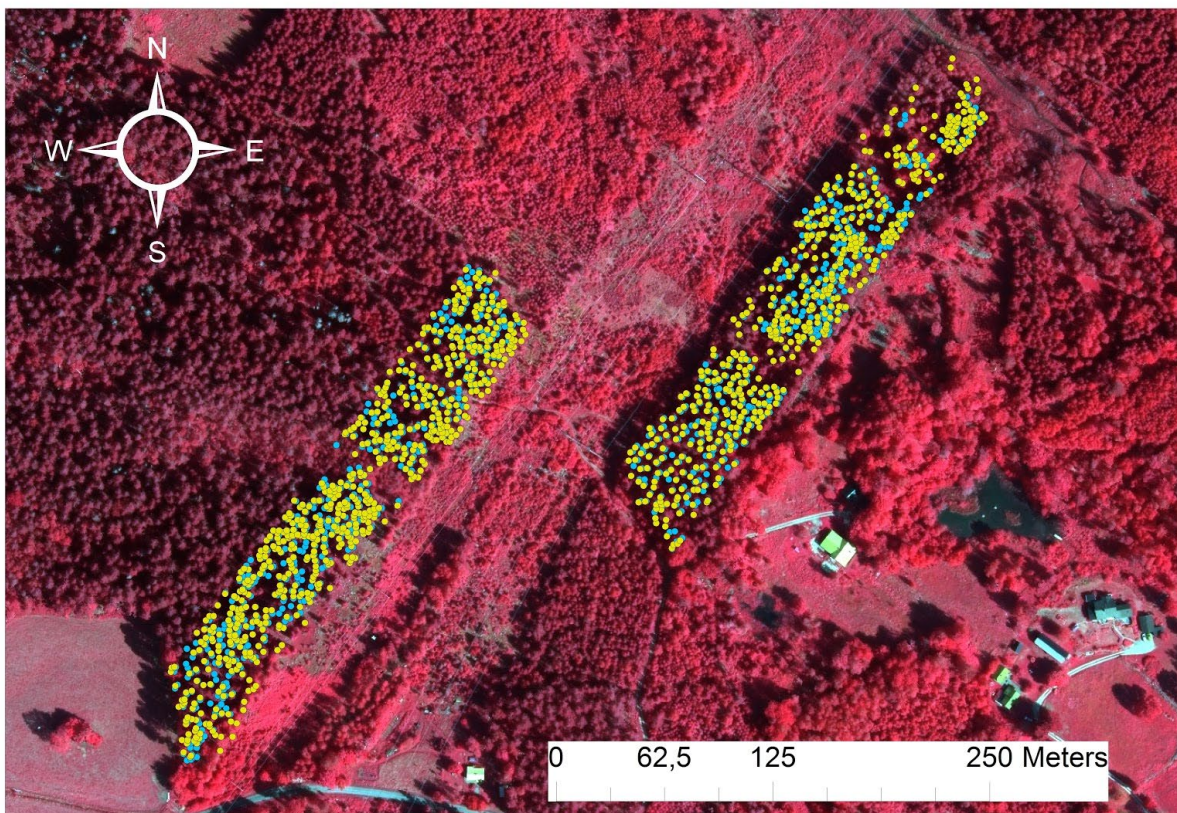
Utifrån de två metodernas framtagna dataset skapade vi sedan två modeller utifrån de två metoderna med enkel linjär regression för att analysera skillnaderna i framtagna höjder från laserskanning och flygbilder. Vi valde att använda oss av höjdvärden från 95:e percentilen i regressionsmodellen, vilket är ett höjdvärde som 95 % av punkterna finns under. Då vi i detta arbete har valt att anta de framtagna enskilda trädhöjderna från laserskanningen som de sanna värdena sattes dessa som variabel Y. De framtagna enskilda trädhöjderna från flygbilderna sattes som variabel X, som förklarande variabel till Y. Modellen från analysen samt residualerna bearbetades och studerades, detta kunde sedan användas för att tolka och beskriva flygbilders möjligheter att identifiera och beskriva enskilda trädets höjd. RMSE beräknades även för att kunna redogöra och utvärdera spridningen på avvikelserna från de två regressionsmodellerna för de två metoderna och detta beräknades med ekvation (1). I ekvationen är n antalet träd, Lh_i är den skattade höjden utifrån laserskanningen som vi väljer att anta är det sanna höjdvärdet, samt är Fh_i det skattade höjdvärdet utifrån de stereomatchade flygbilderna. Även relativt RMSE beräknades med ekvation (2) där \bar{Lh} är medelvärdet av de laserskannade trädhöjderna.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Fh_i - Lh_i)^2} \quad (1)$$

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{Lh}} \times 100 \quad (2)$$

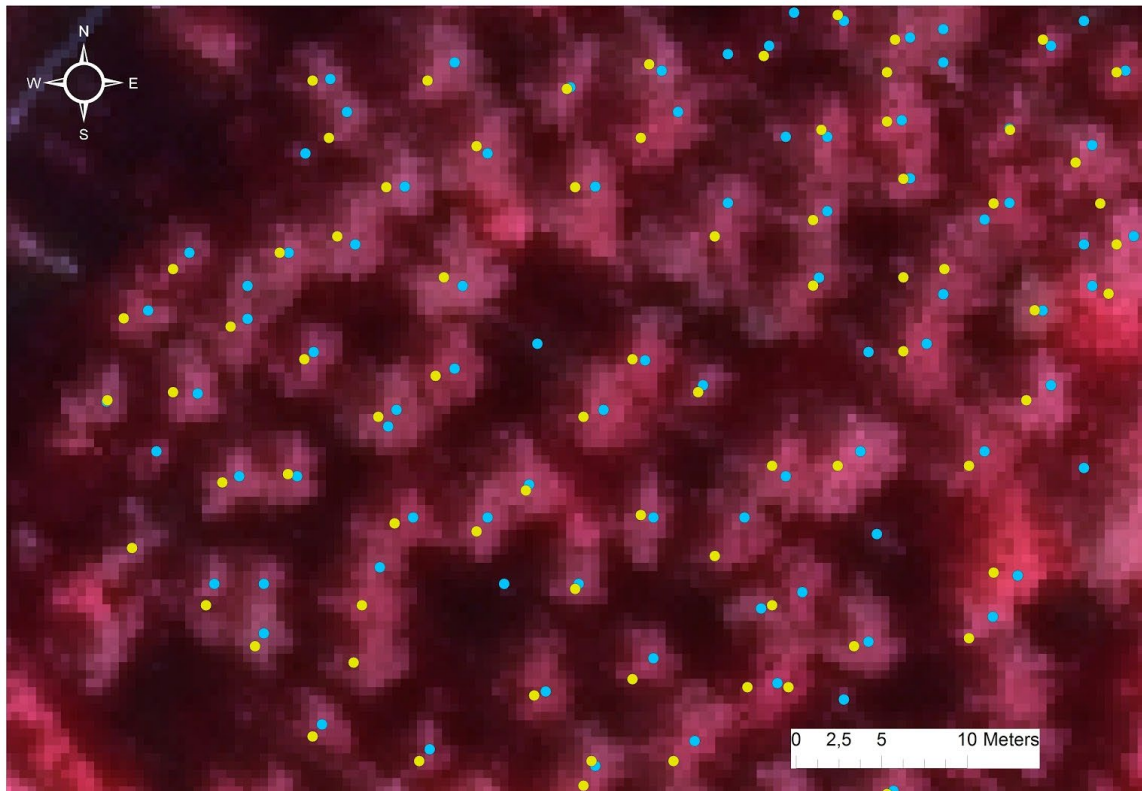
RESULTAT

Punkterna med höjdinformation från de två olika ytmodellerna använde vi för att utvärdera om stereomatchade flygbilder kan användas för att lokalisera och skatta enskilda träds höjd. I det utvalda området urskildes lokala maxpunkter utifrån lagret baserat på ytmodellen från laserskanningen. 1145 punkter med en höjd som var högre än 15 meter identifierades. Dessa punkter antas markera toppen på enskilda träd. I samma område identifierades 1024 punkter med en höjd över 15 meter utifrån ytmodellen baserad på flygbilder. När vi sedan matchade ihop punkterna från de olika modellerna var det 698 punkter från flygbildernas ytmodell som matchades ihop med 1145 punkter från laserskanningens ytmodell (Figur 1). Inom det studerade området var det alltså färre träd som identifierades utifrån den fotogrammetriska ytmodellen än utifrån ytmodellen baserad på laserskanning. Det förekommer en viss förskjutning i var trädtopparna lokaliserats mellan de två modellerna (Figur 2). Laserskanningens ytmodell förefaller ha sina punkter förskjutna åt vänster jämfört med flygbildernas ytmodell.



Figur 1. Blå punkter representerar de punkter (trädtoppar) som identifierades i ytmodellen från flygbilder. De gula punkterna (trädtoppar) visar de punkter som identifierades i ytmodellen från laserskanningen. Bakom punkterna ligger ett ortofoto över området.

Figure 1. Blue dots representing the points (tree tops) that were identified from aerial images. The yellow dots shows the points (tree tops) that were identified from the laser scanning. Behind the dots are a orthophoto over the area. .



Figur 2. Gula och blåa punkter representerar urskilda trädtoppar. Blåa punkter har sitt ursprung från flygbilder, gula har laserskanning som ursprung.

Figure 2. Yellow and blue dots representing distinguished treetops. Blue dots has their origin from aerial images, yellow dots from laser scanning.

Av de olika lagren som användes i metoderna gavs ett högre medelvärde för de urskilda träden i de två lagren med laserskanning som underlag, jämfört med lagren med flygbilder som underlag (Tabell 1). Metod 2 gav även högre medelvärden än metod 1 för både laserskanning och flygbilder. Det högsta funna trädet återfanns i lagret med en ytmodell baserad på laserskanning. Differensen mellan det trädet och de närmsta funna maxhöjderna i de övriga lagren var närmare 6 meter. Skillnaden mellan medelhöjd och maxhöjd var genomgående större mellan laserskanning och flygbilder i metod 1, än mellan laserskanning och flygbilder i metod 2. Minimihöjden var 15 meter enligt de begränsningar som använts.

Tabell 1. Medelhöjd och maxhöjd för de urskilda lokala maxima i de olika lagren med olika ursprung och bearbetningsmetoder

Table 1. Mean height and maximum height for the local maximum in the different layers with different origin and different processing methods

Dataursprung och bearbetningsmetod	Laserskanning- Metod 1	Flygbilder- Metod 1	Laserskanning- Metod 2	Flygbilder- Metod 2
Medelhöjd (m)	20,4	18,9	21,8	21,5
Maxhöjd (m)	36,0	27,0	30,4	30,0

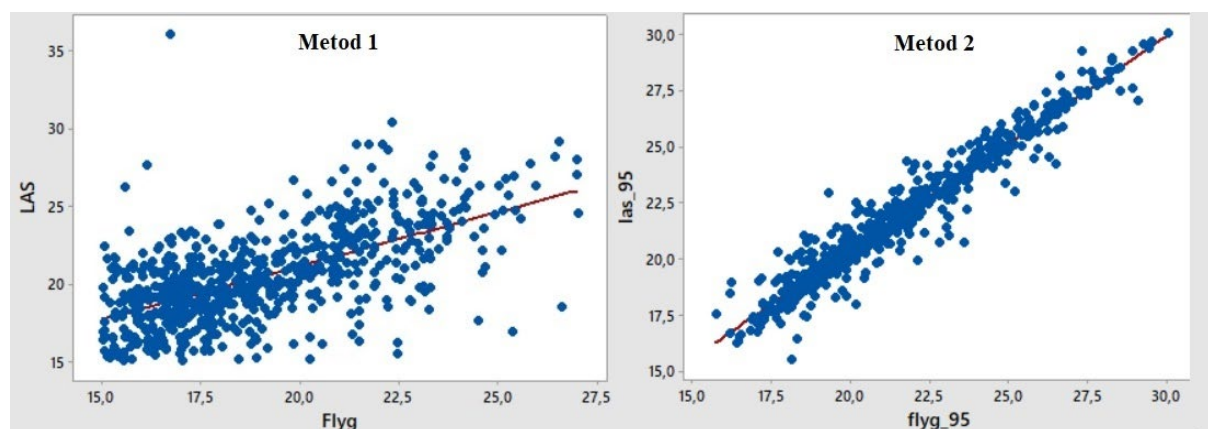
Regressionsmodellerna för de olika metoderna skiljer sig åt (tabell 2). Metod 1 har i modellen ett högre intercept och en lägre lutning än modellen för metod 2. För metod 1 med ytmodeller som utgångspunkt gavs en determinationskoefficient (R^2) som var lägre än för metod 2 (Tabell 2). En större andel av variationen i höjden från laserskanningen kunde därför förklaras för metod 2. Av de två metoderna fungerade modellen från metod 2 bäst i termer av RMSE då ett lägre RMSE samt relativt RMSE observerades för metod 2 (Tabell 2). Gällande Pearson korrelationen noterades modellen från metod 2 ha en högre linjär korrelation mellan variablerna än modellen från metod 1.

Tabell 2. Regressionsmodeller där Y står för trädhöjd för laserskanning och X för trädhöjd från flygbilder, R^2 (Determinationskoefficienten), RMSE (Root Mean Square Error), relativt RMSE samt Pearson korrelation redovisas i tabellen för de två metoderna

Table 2. Regression models where Y is tree height from laser scanning and X is tree height from aerial images, R^2 (Coefficient of determination), RMSE (Root Mean Square Error), relative RMSE and Pearson correlation are shown in the table for the two methods

Metod för databearbetning	Metod 1	Metod 2
Regressionsmodell	$Y = 7,33 + 0,69X$	$Y = 1,15 + 0,96X$
R^2 (%)	38,40	94,10
RMSE (m)	2,90	0,75
RMSE (%)	14,21	3,45
Pearson korrelation	0,62	0,97

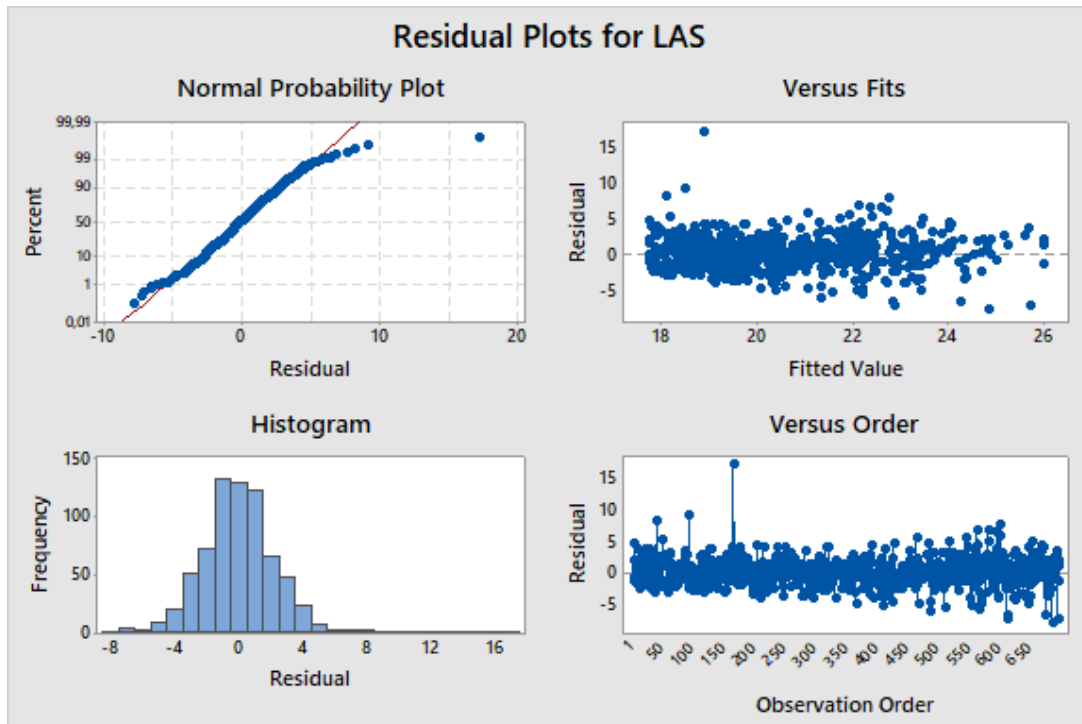
I jämförelse mellan de två framtagna linjära regressionsmodellerna för de två metoderna, observerades ett tydligare linjärt samband mellan individuell trädhöjd från laserskanning och individuell trädhöjd från flygfoton i metod 2 än från metod 1 (Figur 3).



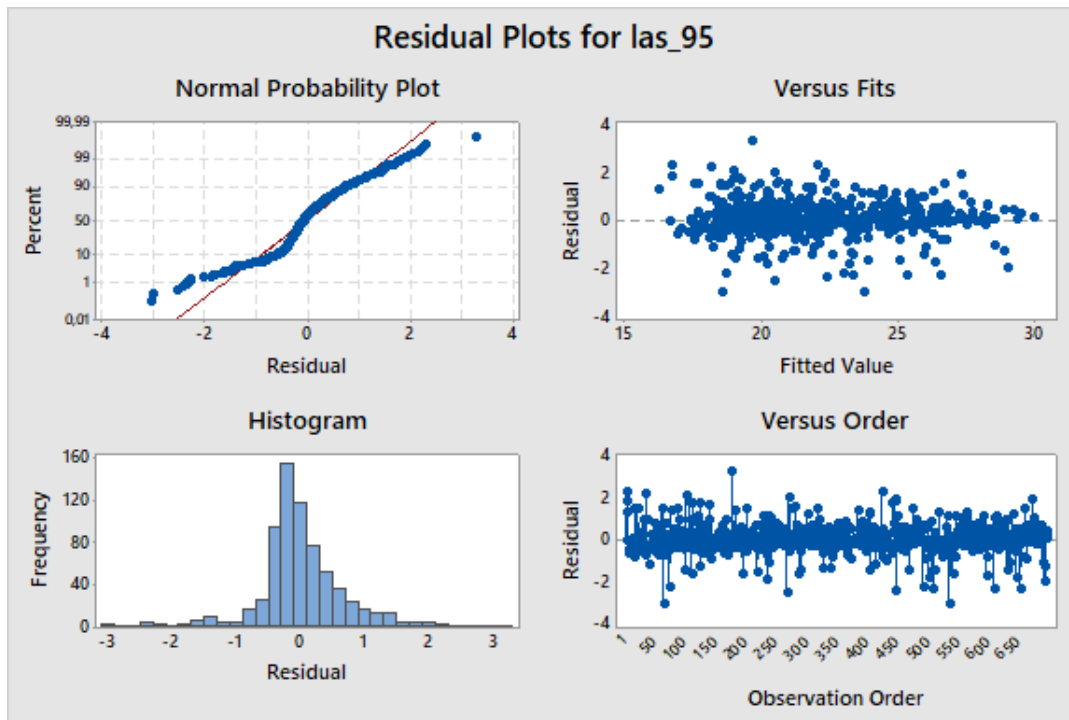
Figur 3. Sambandsdiagram för de båda metoderna där y-axeln (response) utgör höjdvärden från laserskanningen som plottas mot höjdvärden från flygbilder på x-axeln (predictor).

Figure 3. Scatterplot with the laser scanning response value on the x-axis and the aerial photo predictor values on the y-axis.

Residualerna från de två modellerna visar på att grundantagandet om konstant varians inom residualerna är uppfyllt för båda modellerna (Figur 4 och 5). Vi kan även anta att observationerna är oberoende av varandra i de två modellerna. Båda modellernas residualer kan anses vara normalfördelade men med viss avvikelse för båda metoderna. Residualerna har även ett större spridningsintervall i metod 1 än för metod 2, vilket innebär att mer av variationen inte går att förklara utifrån modellen för metod 1 .



Figur 4. Residualplottar för bedömning om regressionsmodellens antagande om data är uppfyllt för metod 1.
Figure 4. Residual plots to evaluate if the regression models assumptions of the data is achieved for method 1.



Figur 5. Residualplottar för bedömning om regressionsmodellens antagande om data är uppfyllt för metod 2.
Figure 5. Residual plots to evaluate if the regression models assumptions of the data is achieved for method 2.

DISKUSSION

Syftet med den här studien var att undersöka huruvida höjdprediktioner från stereomatchade flygbilder är likvärdiga med de höjder som erhålls från laserskanning. Tidigare studier har jämfört laserskanning mot fotogrammetri gällande precision i skattningar av olika skogliga variabler på beståndsnivå, och dragit slutsatsen att laserskanning generellt fungerar bättre (Pearse *et al.* 2018; Vastaranta *et al.* 2013). I en studie av Korpela (2004) testades fotogrammetriska metoder mot en rad skogliga variabler på individuella träd. Korpela drog slutsatsen att höjdmätning på individuella träd var svårt att genomföra med hög precision utifrån flygbilder.

I denna studie har vi undersökt om stereomatchade flygbilder kan ersätta laserskanning för att identifiera "farliga träd" i anslutning till kraftledningar. I vår studie har vi inte jämfört skattade trädhöjder med fältmätt höjd, utan vi har jämfört två skattningar mot varandra med antagandet om att trädhöjderna från laserskanning är de sanna värdena. Eftersom laserskanning med helikopter längs kraftledningar är en vedertagen metod för identifiering av farliga träd (Svenska kraftnät 2017b; E.ON u.å) så har vi i denna studie antagit laserdata som facit. Värt att notera är dock att laserskanning också ger en skattning av höjd och inte de verkliga höjdvärdena på de enskilda träden, vilket hade varit att föredra för att utvärdera de olika metoderna. Det hade även varit önskvärt om den laserskanningsbaserade höjdmätningen utförts enligt samma metodik som i dagsläget används operativt för att identifiera farliga träd.

Våra resultat visar att gällande identifiering av trädtoppar, genom lokalisering av lokala maxpunkter i lagren med ytmodeller, skiljer sig resultaten mellan de två grunddataseten. Fler punkter, som antas vara enskilda träd, lokaliserades i laserskanningslagret jämfört med flygfotolagret, 1145 stycken jämfört med 1024 punkter (Figur 1). Dessa resultat överensstämmer med St-Onge *et al* (2015) som också urskilde fler träd utifrån laserskanning än från flygbilder. Båda lagren presenteras i rasterformat och har samma upplösning, men olika ursprung. Laserskanningslagret har sitt ursprung i ett punktmoln med hög punkttäthet medan flygfotolagret har sitt ursprung från stereomatchade flygbilder. För att fotogrammetrin ska fungera bra krävs det att programvaran som utför stereomatchningen kan hitta matchningar i bilderna, annars kommer det att saknas data på vissa ställen (Lantmäteriet 2016). Då det förekom att data saknades på vissa ställen i vår ytmodell baserad på flygbilder, kan det ha påverkat att färre träd urskildes. Det kan även ge viss förklaring till den större differensen för medelhöjd respektive maxhöjd mellan laserskanningslagret och flygbildslagret i metod 1 än i metod 2 (Tabell 1). Den mindre differensen och den lägre maxhöjden för laserskanningen i metod 2 skulle också kunna förklaras av att de höjdvärden som anges utgör den 95:e percentilen av punkterna i punktmolnet. En möjlig konsekvens av detta är att extrema höjdvärden inte drar upp maxhöjden på samma sätt som i ytmodellen. I övrigt gjorde vi bedömningen att vid visuell analys över området på ortofotot förekommer vissa problem med att urskilja lövträd i den ytmodell som baseras på flygfoton. I den ytmodell som baseras på laserskanning identifierades däremot dessa träd, vilket kan vara en anledning till att laserskanning kan vara att föredra framför stereomatchade flygbilder, eftersom lövträd också kan skada ledningar.

När de urskilda punkterna från laser- respektive flyglagret skulle kopplas ihop, fann programvaran 698 matchningar. Fler matchningar hade troligtvis kunnat uppnås om vi använt en större sökradie än 1,5 meter, men det medför också en risk då punkter som tillhör olika träd kan matchas med varandra. Att fler matchningar inte gjordes kan ytterligare förklaras av

att de framtagna rastren inte överlappade varandra perfekt, med andra ord låg trädskanningarna från de två lagren inte exakt på varandra utan hade en förskjutning om ungefär en meter (Figur 2).

Utifrån de två metoderna som vi valde att bearbeta data med, visar metod 1 på större skillnader i trädhöjder mellan laserskanning och flygbilder jämfört med metod 2 (Tabell 2). Relativt RMSE och korrelationen för metod 1 var 14,21 % respektive 0,62 medan metod 2 visade 3,45 % respektive 0,97. Varför relativt RMSE och korrelationen blev så mycket bättre för metod 2 än för metod 1 är svårt att avgöra, men kan ha sin förklaring i att höjdvärdena hämtades från punktmoln. I metod 1 användes ett punktmoln från laserskanning för att göra ett raster, samt en ytmodell från stereomatchade flygbilder för att få ett motsvarande raster. I metod 2 användes istället ett punktmoln från laserskanning och ett punktmoln från de stereomatchade flygbilderna. Att metod 1 fungerade sämre kan bero på de luckor i data från de stereomatchade flygbilderna. När luckorna fylls igen förloras viss noggrannhet eftersom skattningar ersätter hålen och kan ge större fel på höjdsfattningarna. Även processen att skapa en ytmodell från punktmoln kan ha gjort att data om träden förloras (Gaulton & Malthus 2010).

Eftersom att data går förlorad när ett tätt punktmoln omvandlas till ett raster med förhållandevis stor cellstorlek, är det rimligt att noggrannheten för de två ytmodellerna med stor sannolikhet har minskat. De enskilda cellernas höjdvärde är ett medianvärde från alla punkters höjdvärden från punktmolnet inom varje cell. Detta kan vara orsaken till det sämre RMSE och relativt RMSE i metod 1 jämfört mot metod 2.

Det är viktigt att ha i åtanke att metod 2 grundar sig på metod 1 och inte hade kunnat genomföras utan metod 1, eftersom vi i metod 2 använde oss av de träd som identifierats i metod 1 utifrån ytmodellernas lokala maxpunkter. Vi tog koordinaterna från de identifierade träden och klippte ut dem ur LAS-filen. Visserligen bedömer vi att klippningen av enskilda träd lyckades bra men vi har inte möjligheten att avgöra om alla träd identifierades, eftersom vi saknar fältdata över området.

Tidigare studier visar på att flygbilder kan användas för att skatta skogliga variabler som exempelvis höjd (Vastaranta 2013; Bohlin *et al.* 2012; Wallerman *et al.* 2009). Våra resultat ligger i linje med dessa studier och indikerar även på att flygbilder kan användas för att skatta enskilda trädhöjder med liknande precision som laserskanning, vilket även St-Onge *et al.* (2015) drar som slutsats i sin studie. Vi tror därför att fotogrammetri kan ha en framtid som verktyg för identifiering av riskträd längs kraftledningsgator men att metoderna behöver utvecklas, det är bland annat viktigt att undersöka hur man ska hantera de träd som är svåra att identifiera, exempelvis lövträd. Punktmolnet från fotogrammetrin, metod 2, har en bra korrelation och ett litet relativt RMSE gentemot laserskanningen, varför den möjligtvis skulle kunna ersätta laserskanning. Hur bra en skattning måste vara för att utgöra beslutsunderlag kan inte vi svara för, men vi tror att om metodiken utvecklas ytterligare så kan dagens kostsamma identifieringsprocess med laserskanning ersättas. Tekniken utvecklas kontinuerligt och troligt är att flygbilder kommer kunna användas för att skapa ännu bättre 3D-modeller i framtiden med ännu större precision. Det kan även vara så att det inte är nödvändigt att identifiera varje enskilt riskträd, det är möjligt att det räcker att få en indikation på att det finns träd i ett område som börjar närma sig farlig höjd.

REFERENSER

- Baltsavias, E.P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. ISPRS. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 54 (2–3), ss. 83–94.
- Boberg, A. (2006). *Introduktion till fotogrammetrin*. 8. uppl. Sollentuna: Anders Boberg.
- 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.
- Bonnet, S., Lisein, J., Lejeune, P. (2017). Comparison of UAS photogrammetric products for tree detection and characterization of coniferous stands. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38 (19). ss. 5310-5337
- Childs, C. (2004) Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. Tillgänglig: <https://www.esri.com/news/arcuser/0704/files/interpolating.pdf> [2019-04-01].
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., and Böhner, J. (2015): System for Automated Geoscientific Analyses S(SAGA) v. 2.1.4, *Geosci. Model Dev.*, 8, 1991-2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.
- E.ON (u.å). *Vi underhåller vid våra ledningar för tryggare el till dig*. Tillgänglig: <https://www.eon.se/content/dam/eon-se/swe-documents/swe-faktablad-rojning-regionnat.pdf>. [2019-02-28].
- Erikson, M. *Segmentation and classification of individual tree crowns*. (2004). Tillgänglig: <https://pub.epsilon.slu.se/676/>. [2019-03-25].
- ESRI (2016a) *Minus*. Tillgänglig: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/minus.htm>. [2019-04-01].
- ESRI (2016b) *LAS Dataset To Raster function*. Tillgänglig: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/las-dataset-to-raster-function.htm>. [2019-04-01].
- ESRI (2018a), *Resample—Data Management toolbox* Tillgänglig: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/data-management/resample.htm>. [2019-04-01].
- ESRI (2018b) *Spatial Join*. Tillgänglig: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/analysis/spatial-join.htm> [2019-04-01].
- Gaulton, R. & Malthus, T.J. (2010). LiDAR mapping of canopy gaps in continuous cover forests: A comparison of canopy height model and point cloud based techniques. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 31 (5), ss. 1193–1211.

- Jurgiel, B (2018). *Point sampling tool* (Version 0.5.2) [Programvara] Tillgänglig: <https://plugins.qgis.org/plugins/pointssamplingtool/> [2019-04-09.]
- Korpela, I. (2004) *Individual Tree Measurements by Means of Digital Aerial. SILVA FENNICA*, mon.3, ss.69
- Lantmäteriet (2018). Produktbeskrivning: Digitala flygbilder. Tillgänglig: https://www.lantmateriet.se/globalassets/kartor-och-geografisk-information/flyg--och-satellitbilder/dig_flygb.pdf [2019-02-28].
- Lantmäteriet (2016). Produktbeskrivning: Ytmodell från flygbilder och Ytmodell från flygbilder IRF. Tillgänglig: https://www.lantmateriet.se/globalassets/kartor-och-geografisk-information/hojddata/ytmodell_fran_flygbild2.pdf [2019-02-28].
- LAStools. (2012). *Lasgrid*. Tillgänglig: <https://rapidlasso.com/lastools/lasgrid/>. [2019-04-01].
- McGaughey, R.J. (2018) *FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization*. Tillgänglig: http://forsys.cfr.washington.edu/Software/FUSION/FUSION_manual.pdf [2019-04-01].
- nFrames (u.å): Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. Tillgänglig: ftp.ifp.uni-stuttgart.de/sure_public/SURE_Manual.pdf [2019-04-01]
- Pearse, G.D., Dash, J.P., Persson, H.J. & Watt, M.S. (2018). Comparison of high-density LiDAR and satellite photogrammetry for forest inventory. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 142, ss. 257–267.
- Riksdagsförvaltningen. *Starkströmsförordning (2009:22) Svensk författningssamling 2009:2009:22 t.o.m. SFS 2010:1614 - Riksdagen*. Tillgänglig: https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/starkstromsforordning-200922_sfs-2009-22 [2019-03-21].
- St-Onge, B., Audet, F.-A. & Bégin, J. (2015). Characterizing the Height Structure and Composition of a Boreal Forest Using an Individual Tree Crown Approach Applied to Photogrammetric Point Clouds. *Forests*, vol. 6 (11), ss. 3899–3922.
- Svenska Kraftnät (2017a). *Karta över stamnätet*. Tillgänglig: <https://www.svk.se/drift-av-stamnatet/stamnatskarta/>. [2019-02-28]
- Svenska Kraftnät (2017b). *Underhåll av stamnätet*. Tillgänglig: <https://www.svk.se/drift-av-stamnatet/trygg-elforsorjning/underhall-av-stamnatet/>. [2019-02-28].
- Vastaranta, M., Wulder, M.A., White, J.C., Pekkarinen, A., Tuominen, S., Ginzler, C., Kankare, V., Holopainen, M., Hyypä, J. & Hyypä, H. (2013). Airborne laser scanning and digital stereo imagery measures of forest structure: comparative results and implications to forest mapping and inventory update. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 39 (5), ss. 382–395.

Wallerman, J., Bohlin, J., Fransson, J.E.S & Lundberg, K. (2009). Forest data capture using optical 3D digital surface models from the C3 technologies system. *ASPRS/MAPPS 2009 Fall Conference*. San Antonio 16-19 November 2009, USA.

Ågren, J., Eklundh, L., Olsson, H., Harrie, L., Klang, D. (2013). Insamling av geografiska data. I: Harrie, L. (red), *Geografisk informationsbehandling: teori, metoder och tillämpningar*. 6., [rev.] uppl. Lund: Studentlitteratur. ISBN 978-91-44-08877-8.