

STATISTISK ANALYS AV VARIATIONER I DATA FRÅN FLYGBUREN LASERSKANNING FÖR SKOGLIG INVENTERING

FILIPPA ANDERÉN

Examensarbete
2012:E29



LUNDS UNIVERSITET
Lunds Tekniska Högskola

Matematikcentrum
Matematisk statistik

Förord

Denna studie är ett examensarbete som avslutar min utbildning till civilingenjör i teknisk matematik vid Lunds Tekniska Högskola, LTH. Studien omfattar 30 hp och har skrivits för Sweco Position i Malmö, med förankring på institutionen för matematisk statistik, LTH. Jag vill passa på att rikta ett stort tack till Ulf Månsson, min handledare på Sweco, för samordning av kontakter och material så väl som allmän handledning under arbetets gång. Dessutom vill jag tacka min examinator och handledare, Johan Lindström, för vägledning och mycket värdefulla kommentarer på den matematiska delen av studien. Sist men inte minst vill jag rikta ett stort tack till Martin Sjödin, Blom Sweden, för hans engagemang och delgivande av kunskap inom laserskanning och skogliga beräkningar.

Sammanfattning

På uppdrag av regeringen beslutades 2007 att en ny nationell höjdmodell, NNH, ska upprättas av Lantmäteriet. Höjdmodellen ska baseras på data som samlats in genom flygburen laserskanning. Förutom höjdmodellen finns stor potential för laserdatan i andra sammanhang, däribland skoglig inventering. Den vanligaste metoden för att använda laserskanning som datafångst för inventering av skog är så kallad areal-baserad, där skogliga variabler från laserdatan passas till fältmätt data genom t.ex. regression. Utgångspunkten för denna studie är de skogliga variablerna som går att skatta från laserdata från insamlingen till NNH.

I första delen av studien utreds robustheten i de skogliga variablerna med avseende på olika skannersystem och/eller flygriktning. Jämförelser mellan överlappande flygningar visar att det förekommer vissa systematiska skillnader i data från Leicas respektive Optechs system i vegetationskvot, dvs andelen laserträffar ovan 2 meter över marken, och olika höjdpercentiler av laserträffar högre än 2 meter. Baserat på alla returerna skattas vegetationskvoten ca 0,1 – 0,15 enheter högre om Optechs system används i jämförelse med Leicas. Om bara första returerna tas med i jämförelsen försvinner väsentligen denna åtskillnad. Vad gäller höjdpercentilerna blir skattningarna istället större då Leicas system används, ca 0,5 meter, i jämförelse med Optechs system. De systematiska skillnaderna försvinner **inte** då endast första returerna tas med. Mellan två skanningar utförda med olika flygriktningar men med samma system hittas inga systematiska skillnader i varken vegetationskvot eller höjdpercentiler.

I den andra delen av studien konstrueras en modell för effekten av ökad skannervinkel på vegetationskvoten, då Leicas system används. Överlag verkar en ökad skannervinkel ge en ökad vegetationskvot, dock skiljer sig sambanden avsevärt mellan testområdena. För vissa områden visas signifikanta samband, där en skannervinkel på 20 grader vid tät skog skulle ge en ökad vegetationskvot på upp emot 0,1 – 0,2 enheter. För andra områden finns inget som tyder på en ökad vegetationskvot som följd av en större skannervinkel.

Abstract

In 2007, the swedish government decided to let the authority of land survey produce an updated height surface model with higher resolution. The data collection for the modelling is performed with airborne laser scanning, which in this form can be used in several other applications. One of these additional applications for the laser data is inventory of forest. The method most frequently used for this purpose is so called area-based, where variables from the laser data is fitted to field samples from the forest to predict values for the entire stand.

The first part contains an investigation of the robustness of frequently used laser variables for this application. By comparing four different datasets (two different scanning systems, each system with two separate flying directions) from the same area, the mean difference and variance is studied. The result show that data from Optech gives estimates of the vegetation ratio, i.e. the proportion of laser hits above 2 metres from the ground, ca 0,1 – 0,15 units higher than data from Leica when all returns are included. When only first returns are included, this distinction disappear. Concerning another important laser data variable, different percentiles of the height of the laser hits above 2 metres, the data from Leica gives estimations ca 0,5 metres higher than Optech for all returns. These distinctions does not disappear when only first returns are included. No systematical differences is observed for data from different scanning directions.

In the second part of the study, a model is constructed to describe the effect of a higher vegetation ratio as a result of an increased scanning angle. The result differs extensively between studied test areas. For some areas, the correlation is significant, whereas for other areas, no significant correlation is shown.

Innehåll

1	Inledning	6
1.1	Bakgrund	6
1.1.1	Ny Nationell Höjdmodell (NNH)	6
1.1.2	Flygburen laserskanning	6
1.2	Frågeställningar och mål	7
1.3	Avgränsningar	8
2	Skogliga skattningar från laserdata	8
2.1	Areal-baserade skattningar med regressionsanalys	9
2.1.1	Vegetationskvot	10
2.1.2	Höjdpercentiler	10
2.2	Laserskanning av skog	10
3	Data	12
4	Metod	13
4.1	Markmodell	13
4.2	Testområden	14
4.3	Systematiska skillnader och vinkelberoende .	17
5	Analys och resultat	17
5.1	Vegetationskvot	17
5.2	Percentiler	20
5.3	Täthetsfunktion	22
5.4	Modellering av vinkelberoende	23
6	Slutsatser och diskussion	27
	Referenser	29
A	Ordlista	32
B	FME	33
C	Testområden	35

1 Inledning

1.1 Bakgrund

I regeringens klimat- och sårbarhetsanalys från 2007 utreddes behovet av en förbättrad nationell höjdmmodell. Dagens aktuella modell har ett uppskattat medelfel i höjddled på 2,5 m i ett grid med 50 meters upplösning (Regeringen, 2007). Efter regeringens utredning fick Lantmäteriet i uppdrag att göra en ny heltäckande höjdmmodell över Sveriges yta - Ny Nationell Höjdmmodell (NNH).

Behovet av den nya höjdmmodellen är stort för användare i många olika sammanhang. Kraven varierar beroende på användningsområde, men den ständiga tekniska utvecklingen ställer ökade krav på höjdmmodellens noggrannhet. Exempel på användning är automatisk produktion av ortofoton¹ som uteslutande sker med hjälp av digitala höjdmmodeller (Lantmäteriet, 2012b).

1.1.1 Ny Nationell Höjdmmodell (NNH)

Kraven på NNH är ett medelfel i höjddled bättre än 0,5 meter för ett grid på 2,5 meter. Datainsamlingen inleddes år 2009 och sker genom flygburen laserskanning, se avsnitt 1.1.2. I skrivande stund är insamlingen till hälften färdigställd och beräknas vara klar under 2013. På lantmäteriets hemsida läggs information fortlöpande upp om vilka områden som är skannade och vilka som återstår².

Från början ställdes kravet att hela datainsamlingen skulle utföras under samma förutsättningar för hela landet, dvs samma tidpunkt för skanningen och samma skannersystem. Under projektets gång har kraven mildrats varför södra Sverige³ nu ska skannas under tidig vår och höst, medan övriga Sverige är utan begränsningar för tidpunkten utöver väderförhållanden, som alltid bör vara goda. Två skannersystem utgör grundkapaciteten för datainsamlingen; Leica ALS60/14 och Leica ALS50-II/69. Vid behov har ytterligare fyra andra system använts, varav två av fabrikat Optech.

Datainsamlingen genomförs i första hand som underlag för den nya höjdmmodellen, men det finns fördelar med tekniken som möjliggör ytterligare användningsområden. Eftersom projektet är statligt finansierat har man i möjligaste mån eftersträvat att anpassa insamlingen för övriga användare. Ett exempel är skogsinventering, som behandlas i denna studie.

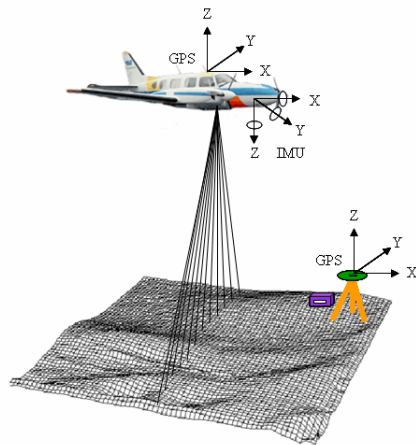
1.1.2 Flygburen laserskanning

Den traditionella metoden för insamling av data till höjdmmodeller är flygfotogrammetri, där två eller flera bilder stereomatchas för att beräkna djup i flygbilder. Laserskanning är i vissa fall ett produktions- och kostnadseffektivt alternativ till stereomatchning (Lantmäteriet, 2009). Skanningen utförs genom att ett laserinstrument fästs under ett flygplan eller en helikopter. Instrumentet

¹Ett ortofoto är en geometriskt korrigerad flygbild.

²Ny Nationell Höjdmmodell - Planer och utfall: http://www.lantmateriet.se/templates/LMV_Page.aspx?id=18108

³Område A, B och C, se figur 3.1.



Figur 1.1: Schematisk bild över hur laserskanning går till. Bilden kommer från (Lantmäteriet, 2012a).

skickar med hög frekvens ut laserpulser, se schematisk bild i figur 1.1. Ljuset i lasern är från det närainfraröda våglängdsområdet och eftersom all energi kommer från lasern kan skanning utföras även på natten. Vädret när skanningen utförs bör dock vara klart eftersom moln kan störa laserns väg genom luften. Genom att mäta tiden det tar för pulsen att returneras till sensorn erhålles information om var lasern har reflekterats relativt flygplanets position. Satellitpositionering (GNSS) och tröghetsnavigering används för att hålla reda på var flygplanet befinner sig. Ju kortare avståndet mellan flygplanet och närmaste GPS på marken är, ju bättre blir positioneringen och därmed laserträffarnas noggrannhet (Lantmäteriet, 2009). Precisionen vid flygburen laserskanning är på punktnivå 5 cm i höjd respektive 25 cm i sidled⁴. Den slutgiltiga noggrannheten på en färdig produkt är starkt beroende av vilken sorts mark som skannats. För jämna och plana ytor erhålles mycket hög noggrannhet eftersom det är lätt att interpolera mellan punkterna. För ytor med t ex låg och tät vegetation eller branta bergsväggar kan noggrannheten bli betydligt sämre (Klang and Burman, 2006).

1.2 Frågeställningar och mål

Eftersom datainsamlingen till NNH är anpassad för den nya höjdmodellen tillhandahålls ingen kvalitetssäkring för tillämpning i andra sammanhang. Utgångspunkten för denna studie är en s.k. areal-baserade metod för skoglig inventering där samband mellan variabler i laserdata och skogliga värden uppmätta i fält skattas genom t.ex. regressionsanalys. I denna studie analyseras endast variationer och robusthet hos **variablerna** för en regressionsanalys, dvs inga skattningar av de skogliga värdena slutförs.

⁴Burman, H. Titel. Blom Sweden AB. Stockholm. Personligt möte. 2012-03-14.

Den övergripande frågeställningen för studien är således hur skattningarna av variablerna från laserdata varierar om samma område skannas flera gånger med samma förutsättningar. I NNH har dessutom olika system använts för dattainsamlingen. Ger olika system upphov till systematiska skillnader, eller kan de anses likvärdiga?

Lasern sprids med en svepande rörelse över markytan och har därmed möjlighet att täcka stora områden. En ökad vinkel bör dock ge en ökad sannolikhet att träffa lövverk och annan vegetation eftersom lasern färdas en längre sträcka i luften. Hur mycket påverkar en högre vinkel variablerna från laserdata? Går det att modellera vinkelberoendet för just laserdata från NNH med given punkttäthet och skannervinkel?

1.3 Avgränsningar

Under analysen av olika skannersystem jämförs endast system från Leica med system från Optech. Varje tillverkare har flera modeller som kan vara olika i utformning och därmed ge upphov till skillnader, men i denna studie har skillnad endast gjorts mellan tillverkarna.

Testområdena som använts i studien är inte kontrollerade mot skogsbruksplaner eller i fält. I avsnittet om modellering av vinkelberoende hade möjligen vissa skillnader mellan testområdena kunnat förklaras med olika skogstyper. Någon sådan information fanns inte att tillgå och har därför inte använts i studien.

Klassning av marken har gjorts separat för varje dataset för att analysen ska bli så lik realistiska skogliga beräkningar som möjligt. Om olika markmodeller används kan detta eventuellt ge utslag i analysen på andra parametrar. Detta har inte analyserats vidare.

I huvudsak har studien riktats in på att jämföra olika dataset för att leta efter systematiska skillnader och trender. Ibland har försök gjorts att förklara vad skillnaderna beror på genom enkla fysikaliska resonemang. Det förekommer dock inga djupare analyser av laserfysik eller skanningstekniker.

2 Skogliga skattningar från laserdata

Det finns väsentligen tre metoder för skogsinventering baserade på laserdata varav två är beprövade i forsknings- och kommersiella sammanhang (Naesset, 2012). Den första metoden är så kallad "single-tree"-baserad och kräver en hög punkttäthet i laserdata. Vid en sådan skanning kan varje träd enskilt analyseras eftersom den höga punkttätheten gör att man kan urskilja form och utseende på varje enskilt träd. Single-tree kräver en punkttäthet i storleksordningen 5-10 punkter per kvadratmeter (Naesset, 2012). Den andra metoden, så kallad semi-single-tree, liknar single-tree men en korrigering görs med fältmätt data efter en indelning av beståndet i mindre, homogena ytor. Indelningen görs för att optimera platserna för provtagning (Breidenbach et al., 2010). Den tredje metoden är så kallad areal-baserad och kräver betydligt lägre punkttäthet. Denna metod

är den mest använda kommersiellt och är väldokumenterad i forskningssammanhang. Vid en areal-baserad inventering erhålles ingen information om enskilda träd utan endast ett medelvärde för hela beståndet. Laserdata från NNH har punkttätheter på ca 0,5 – 1 punkt per kvadratmeter och lämpar sig bäst för areal-baserade metoder. Det finns tre alternativ inom areal-baserade metoder som används för att skatta värden för hela beståndet; regression, k-MSN och bayesiansk (Naasset, 2012). I denna studie fokuseras på regressionsanalys för areal-baserade skattningar, nedan följer en mer ingående beskrivning av denna metod.

2.1 Areal-baserade skattningar med regressionsanalys

Låt säga att det är av intresse att skatta massaslutenheten⁵ i ett skogsbestånd. Om laserdata finns att tillgå kan en areal-baserad skattning genomföras. Inledningsvis mäts ett godtyckligt antal, n , provytor i fält upp som representerar beståndet väl. Massaslutenheten mäts manuellt för varje provyta. Värdet för varje provyta läggs i en vektor, Y , av längd n och kallas *responsvariabel* i linjär regression. Vidare försöker man hitta samband mellan responsvariabeln och information som kan hämtas från laserdatan, de *förklarande variablerna*. För varje provyta räknas k variabler ut från laserdatan som kan beskriva trädens massaslutenhet. Exempelvis kan trädens höjd och täthet ha betydelse, se under rubriker för utförligare beskrivning av vanligt förekommande variabler. Efter lokalisering av de fältmätta provytorna i laserdatan räknas alla k variabler ut för de n olika provytorna och läggs i matrisen X , dvs en matris av storlek $n \times k$. Vi söker därefter B för att hitta ett samband mellan responsvariabeln och de förklarande variablerna. Sambandet ges av

$$Y = XB + \epsilon,$$

där

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix},$$

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,k} \\ 1 & x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,k} \\ 1 & x_{3,1} & x_{3,2} & \cdots & x_{3,k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n,1} & x_{n,2} & \cdots & x_{n,k} \end{pmatrix},$$

⁵Massaslutenhet betyder volym i förhållande till beståndets teoretiskt maximala produktionsförmåga (Jonsson, 1914).

$$B = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{pmatrix}$$

och $\epsilon \in N(0, I\sigma^2)$. B skattas med LS enligt Blom and Holmquist (1998) och ges av⁶

$$\hat{B} = (X^T X)^{-1} X^T Y.$$

För att skatta massaslutenheten för hela beståndet beräknas slutligen X -variablerna ur laserdatan för hela beståndet. Med hjälp av B erhålles således en skattning av hela beståndets massaslutenhet utan att behöva mäta allting för hand.

Två grupper av förklarande variabler, som är vanligt förekommande i sammanhanget, har valts ut för analys, se t ex (Naasset, 2002) och (Holmgren, 2004) för mer ingående beskrivning på regressionsanalys för skogliga skattningar. I denna studie slutförs inte regressionen för de skogliga skattningarna, utan variationer i variablerna som ligger till grund för regressionen analyseras. Nedan beskrivs de variabler som använts.

2.1.1 Vegetationskvot

För att uppskatta skogens täthet används andelen laserträffar i vegetationen relativt marken som ett mått. Vanligen används andelen punkter ovanför någon gräns, t ex 2 meter över markytan. Gränsen införs dels för att försäkra sig om att laserträffar på marken som förblivit oklassade inte räknas som träffar i träden. Dels vill man utesluta stenar och låg vegetation från att räknas som skog, se t ex (Naasset, 1997) och (Nilsson, 1996).

2.1.2 Höjdpercentiler

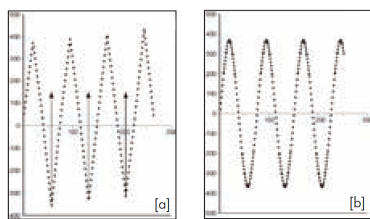
Trädens höjd i ett bestånd är en viktig faktor i de flesta skogliga sammanhang. Genom att analysera olika percentiler av höjderna kan man dels få en uppfattning om hur höga träden är, och dels om hur grenarna är distribuerade över trädets höjd. I denna studie används bara laserträffar högre än 2 meter för percentilberäkningar, men i vissa fall kan tänkas att alla träffar tas med.

2.2 Laserskanning av skog

Utöver de vanliga felkällorna som beror på ojämn markyta, bör man vara extra uppmärksam när skog skannas. Nedan följer en beskrivning av faktorer som kan ha betydelse för skillnader i resultaten.

⁶Om bruset är normalfördelat är ML-skattningen identisk.

Det föreligger vissa skillnader mellan de olika systemen som används för datainsamlingen till NNH. Dessa har inte avgörande betydelse för höjdmodellen (Rönnberg, 2011), men andra användare bör vara mer försiktiga (Lantmäteriet, 2011). En skillnad är skanningsmönstret, dvs distributionen av laserpulserna på marken (Petrie, 2011), se figur 2.1. Leicas system ger en betydligt högre täthet ute i kanterna, där skannervinkeln är som störst. För registrering av returnerande ljus används i Leicas system s.k. automatic gain control (AGC) (Rost, 2012). AGC används för att registrera fler multipla retururer genom att automatiskt justera förstärkningen av det inkommande ljuset (Vain, 2010). Om energin i det inkommande ljuset är över den maximala nivån som kan registreras minskas förstärkningen och vice versa. Energin som registreras är beroende av reflektiviteten hos marken som skannas. En tredje egenskap hos Leicas system är att styrkan i laserpulsen som sänds ut är starkare. I praktiken innebär detta att en högre pulsfrekvens görs möjlig eftersom lasern kräver tid att bygga upp energi mellan pulsarna (Rost, 2012).



Figur 2.1: Till vänster syns en schematisk bild över skanningsmönster från OpTech och till höger från Leica. Bilden är hämtad från Petrie (2011).

Om lasern träffar exempelvis tunnare löv kan multipla retururer uppkomma, dvs en del av pulsen returneras när den träffar objektet och resten fortsätter genom lövet och träffar istället något annat under lövet. Träffyta, dvs utbredningen på pulsen när den träffar marken, är stor; max 1 meter i diameter för NNH. Multipla retururer kan därmed också registreras när lasern delvis träffar något och den andra delen fortsätter. Sensorn på flygplanet registrerar kontinuerligt ljus i samma våglängdsband (nära-infraröda) som laser sänts ut med. När en retur registreras syns en topp i vågformen som räknas om till tiden det tog för ljuset att återvända. Om multipla retururer har uppkommit syns alltså flera toppar i det registrerade ljuset. I specifikationen för NNH anges att minst tre returpulser ska kunna registreras av sensorn i terräng bevuxen med vegetation⁷. Glesare vegetation ger upphov till färre multipla retururer. Eftersom Leicas system har starkare laser ökar sannolikheten för att penetrera löv och därmed registrerar fler multipla retururer. För kartläggning av markytan är detta en fördel då fler markpunkter antagligen kommer att registreras. Användandet av AGC bidrar till att retururer med svagt ljus, ex mörka ytor, ges möjlighet att registreras (Vain et al., 2010), dock gör detta reglage att registrerad intensitet inte direkt kan

⁷Fråga 11: http://www.lantmateriet.se/templates/LMV_FaqList.aspx?id=20240

jämföras mellan olika områden, där alltså förstärkningen är olika. Information om hur stor förstärkningen varit under skanningen sparas, så efter en kalibrering ges möjlighet att jämföra intensiteter mellan laserträffarna (Vain, 2010).

Med öppningsvinkel eller skannervinkel avses vinkeln mellan lodlinjen och laserns väg i luften. Vissa system kan skanna upp till en absolut vinkel på 40° (Lantmäteriet, 2009). I specifikationen för NNH anges en högsta tillåten absolut vinkel på 20° ⁸. Denna inställning är en avvägning mellan noggrannhet och effektivitet. För jämna ytor utan störande objekt bör höga skannervinklar inte ha någon betydelse, men är skog eller andra höga objekt i vägen får man vara mer försiktig. Med en stor skannervinkel kan täta träd eller andra täckande objekt stå i vägen och luckor kan uppstå i punkttäckningen på markytan. En ökad skannervinkel bör också leda till en ökad sannolikhet att träffa lövverket eftersom lasern färdas en längre sträcka i luften. Effekten av detta bör vara en överskattning av vegetationskvoten. Samtidigt vill man eftersträva effektivitet i datainsamlingen och ju större svepbredd som används desto färre flygstråk behövs.

Av praktiska skäl skannas inte alla områden med samma flygriktning, avvikelser sker främst längs kusten. I NNH skannas marken antingen nordsydlig respektive östvästlig riktning, vilket möjligen kan ge effekter i laserdatan. Exempelvis kan man tänka sig att löv riktar in sig i solens riktning, vilket rimligen också bör öka sannolikheten för laserträffar i lövverket.

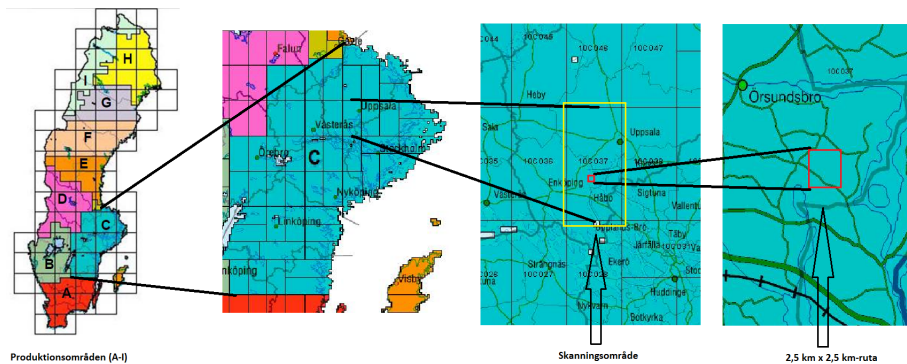
3 Data

I en leverans av NNH-data från Lantmäteriet tillhandahålls två produkter; dels höjddata i rasterformat och dels punktmoln med data från laserskanningen. Höjddata är ett raster som beskriver markens höjd i ett 2 meter grid med en uppskattad noggrannhet på 0,5 meter i höjddled. Punktmolnet ska ha en minsta täthet på $0.5 - 1 \text{ pkt}/\text{m}^2$, men tack vare multipla returerna erhålles ofta en betydligt högre punkttäthet än så. I denna studie har endast punktmolnen använts för analys.

Inför NNH delades Sveriges yta in i 9 *produktionsområden* (A-I), se figur 3.1. Varje produktionsområde är därefter indelade i 30–50 *skanningsområden*. Varje skanningsområde är typiskt en stående rektangel om $50 \text{ km} \times 25 \text{ km}$. Runt Sveriges kust och i ränderna mellan produktionsområdena är skanningsområdena anpassade efter behov och kan då anta andra former. Varje skanningsområde delas sedan in i rutor om $2,5 \text{ km} \times 2,5 \text{ km}$, vilket är formatet för leverans, se figur 3.1. Inom ett skanningsområde ska samma system för skanning användas och målsättningen är att skanningen ska ske under så kort tid som möjligt, i regel under ca en vecka. Dock är skanningen väderberoende, varför perioden kan variera från en månad till i extrema fall mycket längre tid⁹. Om fel upptäcks i ett senare skede kan hela skanningsområden dessutom behöva skannas om.

⁸Fråga 11: http://www.lantmateriet.se/templates/LMV_FaqList.aspx?id=20240

⁹http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/kartor_och_geografisk_info/Hojdinfo/Veckorapport_NNH.pdf



Figur 3.1: NNH's leveransformat

De flesta skanningsområdena är skannade i ca 20 parallella flygstråk i nordsydlig riktning. I fortsättningen kallas ett sådant flygstråk N-S. Varje skanningsområde har utöver parallellstråken i regel även tre flygstråk som är skannade i östvästlig riktning, hädanefter kallade V-Ö. Dessa finns vanligen högst upp, längst ned och någonstans i mitten (placeringen kan variera) i skanningsområdet. I figur 3.2 visas punkttäckningen för ett helt skanningsområde, där tvärstråken blir tydliga. I figur 3.3 syns ett exempel på hur ett punktmoln kan se ut, visualiserat i olika vyer.

Förutom 3D-bilden som ett punktmoln möjliggör ges även information om varje enskild laserträff. Varje punkt har en (x, y) -koordinat som ges i formatet SWEREF 99 TM och en z -koordinat som anges i RH2000. Dessutom lagras följande information i varje punkt (Lantmäteriet, 2012c):

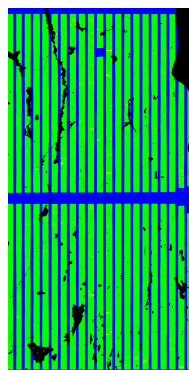
- Klasstillhörighet (mark, vatten eller oklassificerad)
- Id som anger vilket flygstråk punkten tillhör
- Om laserpulsen givit upphov till multipla retureringer anges vilken i ordningen punkten är
- Skannervinkel
- Intensitet från laserreturen

4 Metod

4.1 Markmodell

Koordinatsystemet för NNH i höjddled anges i RH2000, där nollnivån definieras av Normala Amsterdams Peil (NAP)¹⁰. Eftersom marken därför inte har höjden 0 måste höjden för laserreturerna som träffat vegetationen räknas ut **relativt**

¹⁰http://www.lantmateriet.se/templates/LMV_Page.aspx?id=4211



Figur 3.2: Täckningen av flygstråken i ett skanningsområde. Blå fält representerar högre täthet och gröna fält lägre täthet. De blå smala strecken i vertikelled betyder att där finns överlapp mellan flygstråken. Svarta områden representerar utebliven punktäckning vilket kan uppkomma vid sjöar, där returerna sällan registreras.

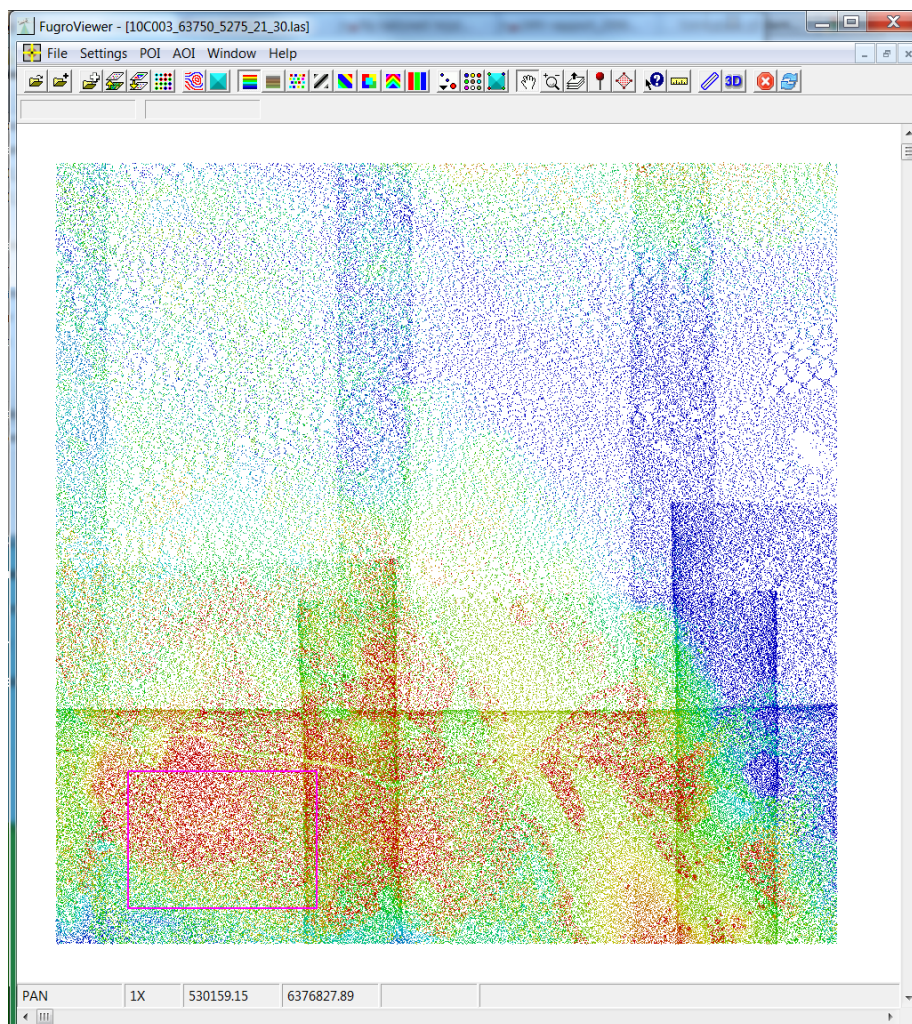
markens höjd i det angivna koordinatsystemet. För att avgöra avståndet mellan marken och varje punkt används en modell av marken som referens. En markmodell är ju huvudanledningen för datainsamlingen i NNH, och ett alternativ hade varit att direkt använda höjdmodellen som referenspunkt. Eftersom studien går ut på att jämföra två olika dataset utformades ett mer trovärdigt alternativ där en separat markmodell skapas för varje dataset. Genom att utgå från de markklassade punkterna från punktmolnet interpolerades en markyta med hjälp av programvaran FME. Höjden för varje punkt har därefter, separat för de olika dataseten, räknats om som höjden relativt markmodellerna. I bilaga B beskrivs arbetet i FME.

Eftersom markmodellen är en interpolation mellan markpunkterna är det inte ovanligt att låga punkter får en negativ höjd om den avviker från de omkringliggande punkterna. I skogliga sammanhang är man inte intresserad av lägre vegetation utan skiljer endast på laserträffar i träden respektive annat. När variablerna från laserdata räknas ut, se avsnitt 2.1, används därför en höjdgräns på 2 meter. Detta exkluderar punkterna med "negativ höjd", vilket följaktligen inte utgör något problem.

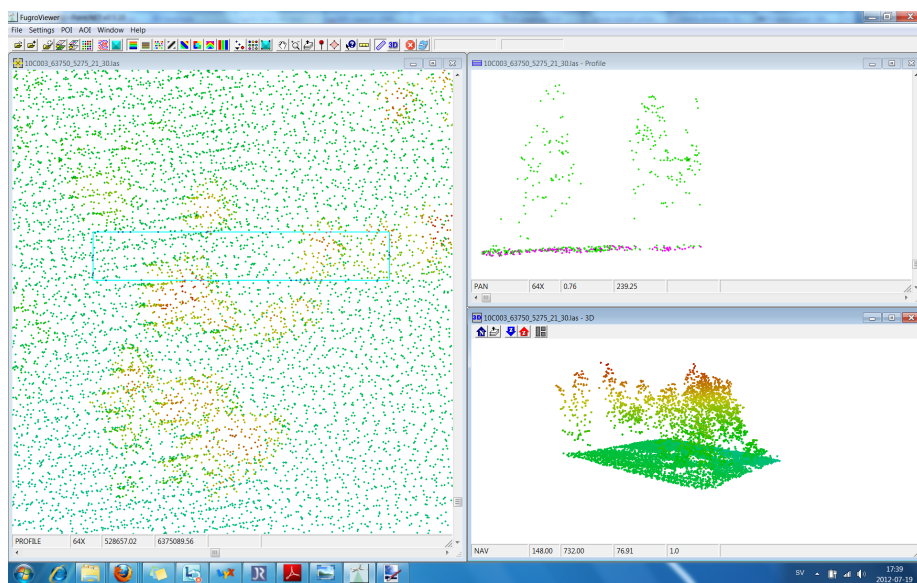
4.2 Testområden

Utgångspunkten för val av testområden är att området ska ha skannats flera gånger, vilket är aktuellt längs med kanterna i ett skanningsområde samt i överlapp mellan flygstråk, se figur 3.2. Sidoöverlappningen mellan alla flygstråk ska överlappa varandra med minst 200 meter¹¹ vilket möjliggör val av testområde. Dels finns överlapp inom ett skanningsområde, där möjlighet ges att jämfö-

¹¹Fråga 11, http://www.lantmateriet.se/templates/LMV_FaqList.aspx?id=20240



Figur 3.3: Laserpunktmoln i NNH's leveransformat, $2,5\text{ km} \times 2,5\text{ km}$, visualiserat i programvaran FugroViewer. Rektangeln i det vänstra hörnet är testområde 5, se avsnitt 4.2 och bilaga C. Färgkodningen är baserad på höjd.



Figur 3.4: Till vänster i figuren syns punktmolnet från figur 3.3 inzoomat över en mindre yta. Nere till höger i figuren syns en 3D-vy, där det går att urskilja träd i punktmolnet. För dessa är färgkodningen baserad på höjd. Över till höger syns en profilvy där formen på två träd blir tydligare. Färgkodningen representerar markpunkter respektive oklassade punkter.

ra skanningar mellan parallelstråk där samma system har använts. Dessutom innehåller varje skanningsområde tre tvärstråk, där jämförelse kan göras mellan skanningar med hela skalan av skannervinklar, men återigen med samma system. Dels finns också överlapp mellan angränsande skanningsområden, som inte innefattas av kravet att samma system måste användas. Strategin för att välja ut testområden har varit att välja områden längs kortsidorna där överlapp finns mellan parallelstråk och tvärstråk för skanningen inom skanningsområdet, men dessutom parallelstråk och tvärstråk från sidoövertäckning från angränsande skanningsområde. Resultatet av ett sådant område är att fyra skanningar erhålles, där de första två är skannade med ett system och de andra två med det andra.

Testområdena, totalt 18 stycken, har valts ut efter att punktmolnen visualiserats i programvaran FugroViewer. Denna programvara gör det möjligt att titta på laserdatan i 3D med olika färgläggningsverktyg och profilvyer. Områdena innehåller vad som ansetts vara relativt tät och homogen skog. I vissa fall innehåller testområdena mindre stigar vilket varit svårt att undvika. Alla testområden är rektangulära och har storlekar mellan ca 100 meter i minsta sida till ca 720 meter i längsta sida. Figur 3.3 visar ett exempel på ett testområde visualiserat i FugroViewer. I bilaga C visas placering och koordinater för samtliga testområden.

Eftersom testområdena är varierande i storlek och ganska få till antalet delas för vissa delar av analysen varje testområde in i kvadrater om ca $20\text{ m} \times 20\text{ m}$. Kvadraterna kallas i fortsättningen *testrutor*.

4.3 Systematiska skillnader och vinkelberoende

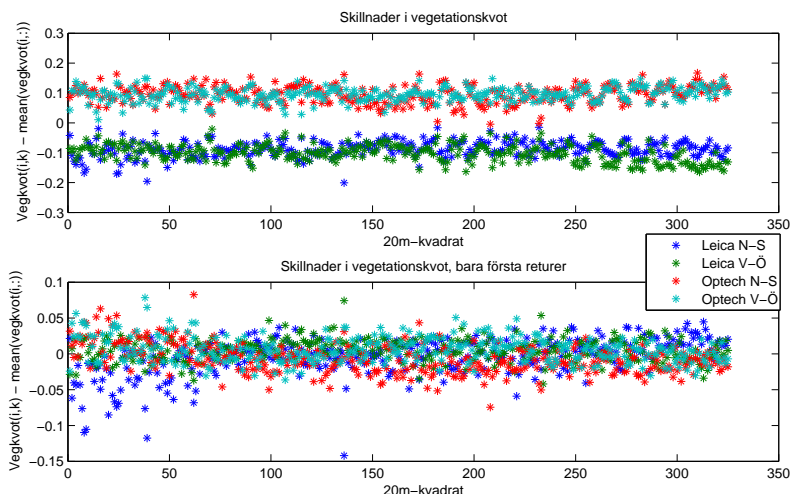
I den inledande delen av analysen klipptes testområdena ut ur laserdatan. För var och en av de fyra dataseten gjordes en markmodell som användes för att räkna ut varje laserträffs avstånd till markytan. För att kunna jämföra de olika testområdena för de olika skanningstillfällena räknades sedan de förklarande variablerna ut dels för testrutorna och dels för testområdena för samtliga dataset. Eftersom varje testområde är skannat fyra gånger kan både skillnad i skannersystem och flygriktning analyseras över samma område. Dessutom ges möjlighet att undersöka om höga skannervinklar kan ge ökad vegetationskvot eller höjdpercentiler eftersom både låga och höga skannervinklar finns med i testområdena.

5 Analys och resultat

5.1 Vegetationskvot

För att få en första uppfattning om hur stor skillnad flygriktning och användande av olika skannersystem ger upphov till räknas vegetationskvot ut för alla testrutor inom ett testområde för var och en av de fyra dataseten. Eftersom testområdena inte är helt homogena, dvs vegetationskvoten varierar mellan test-

områdena inom samma testområde, jämförs dataseten lättare om medelvärdet mellan de fyra skanningarnas vegetationskvot dras bort från varje serie. I figur 5.1 syns avvikelserna från medelvärdet för testområde 2, se bilaga C. I den övre bilden syns tydligt en systematisk skillnad då olika system använts. Däremot är skillnaderna avsevärt mindre då samma system använts. Utöver medel skillnaden ges dessutom en uppfattning om hur stor variansen kan vara, dvs hur stora avvikelser som rimligen kan förväntas för enheter om $20m \times 20m$. I den undre bilden är bara första returerna analyserade, och den tydliga systematiska skillnaden är borta. Till vänster i bilden skönjas Leica N-S avvika lite med en lägre vegetationskvot. Någonstans i mitten syns Optech N-S eventuellt ligga lite under de övriga.



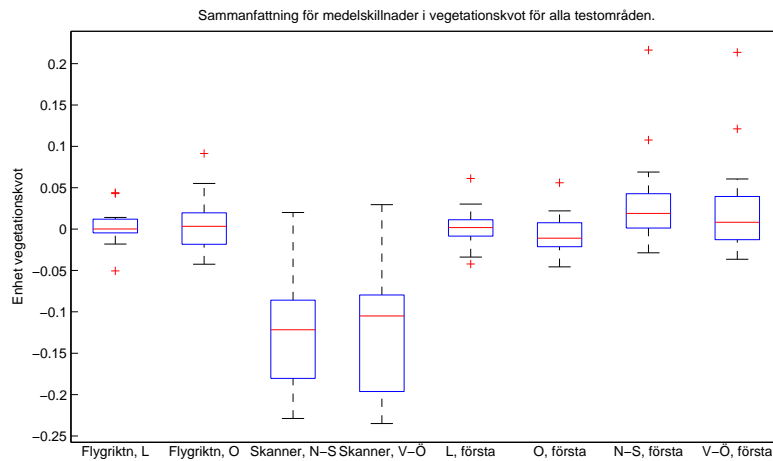
Figur 5.1: Avvikelse från medelvärde i vegetationskvot för fyra olika dataset. Varje stjärna och färg motsvarar en testruta och skanning. Övre: Alla returerna. Undre: Endast första returerna.

Anledningen till den anmärkningsvärda iakttagelsen om en så pass tydlig systematisk skillnad mellan de olika systemen när alla returerna analyseras tros ha förklaringen i skillnaden i intensitet hos lasern. Leicas system har en starkare laser vilket bör öka sannolikheten för multipla returerna och därmed öka sannolikheten att träffa marken istället för lövverket. En ökad andel markträffar innebär att vegetationskvoten minskar i förhållande till då Optechs system används, vilket skulle förklara resultaten. När istället endast första returerna analyseras spelar styrkan i lasern ingen roll, eftersom de extra multipla returerna inte tas med.

De små avvikelserna i den undre bilden, figur 5.1, är svåra att binda till någon fysikalisk förklaring. Det är välkänt att små avvikelser kan uppkomma vid olika väderförhållanden, t ex vind och luftfuktighet. I denna studie är testområdena utvalda så att skanningstillfällena ska ligga nära varandra i tid, i figur 5.1

kommer skanningarna från hösten och skillnaden mellan dem är 2 – 6 veckor. Det är därmed inte heller omöjligt att små förändringar i skogen kan ha skett mellan de olika tidpunkterna, även om ingen av testområdena i denna studie är skannade under vegetationsssäsong.

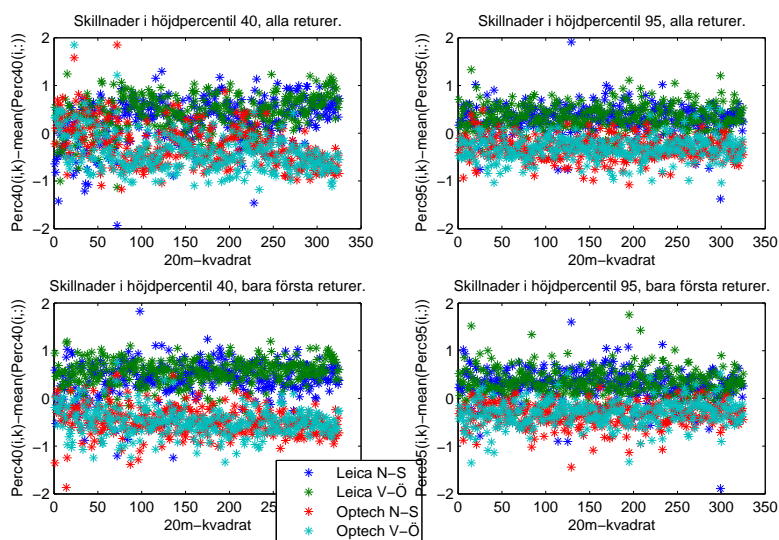
Det ovan analyserade testområdet representerar samtliga testdata väl, även om vissa skillnader i storlek förekommer. I figur 5.2 finns ett sammanfattande diagram över medelskillnader mellan dels olika skannersystem, och dels olika flygriktningar för samma system. Vad som observerades för ett enskilt testområde i analysen ovan verkar vara representativt för alla testområden. Den tredje och fjärde lådan visar att Optechs system systematiskt skattar vegetationskvoten högre än Leicas. Medelskillnaden är i storleksordningen 0,1 – 0,15 enheter, vilket kan anses relativt stort eftersom vegetationskvoten är en andel och antar värden mellan 0 och 1. Dessutom visar sig iakttagelsen om att endast första returerna tar bort denna systematiska skillnad också vara representativ för alla områden. Sjunde och åttonde lådan visar visserligen på något större varians än skillnaden mellan olika flygriktningar, men de stora systematiska avvikelserna är borta.



Figur 5.2: Sammanfattande statistik för samtliga testområden. Första lådan representerar skillnaden mellan att flyga N-S och V-Ö för Leicas skannersystem, andra lådan motsvarande för Optech. Ett positivt värde betyder en högre vegetationskvot för flygning N-S och motsvarande negativt värde en högre vegetationskvot för flygning V-Ö. Med tredje och fjärde lådan visas medelskillnader mellan olika skannrar, vardera med olika flygriktningar. Ett positivt värde betyder en högre vegetationskvot för Leicas skannersystem och motsvarande ett negativt värde en högre vegetationskvot för Optechs. De fyra sista lådorna representerar samma som de första fyra, fast endast första returerna.

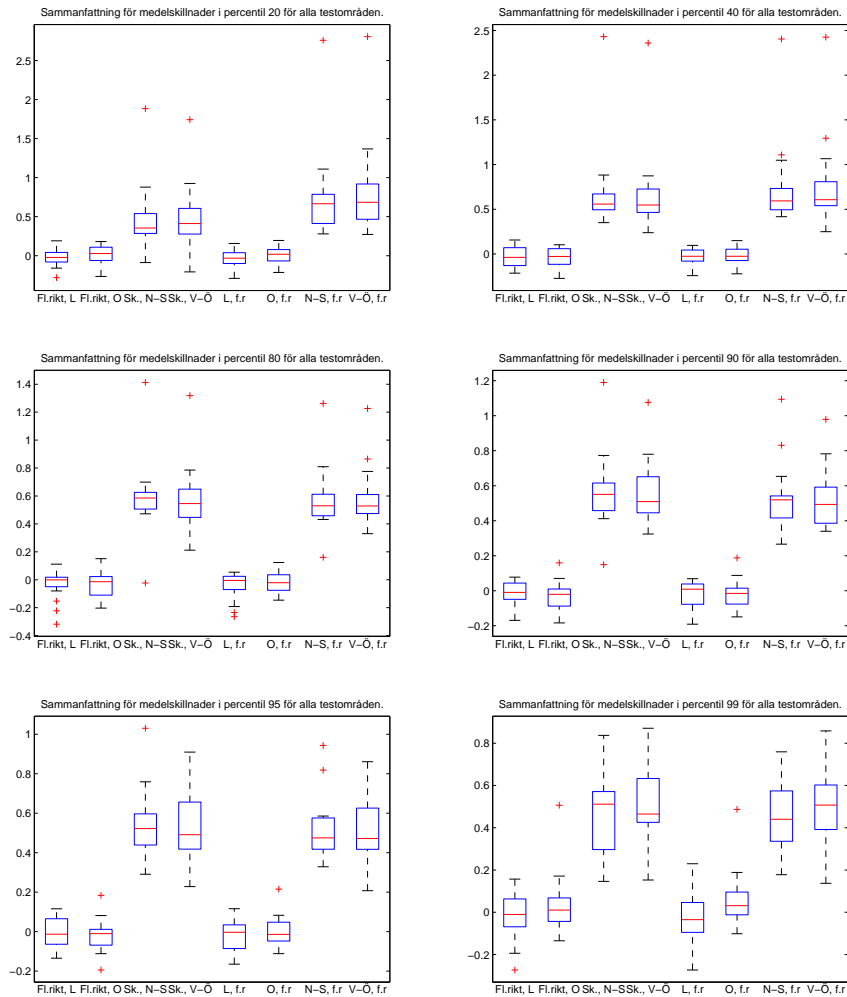
5.2 Percentiler

För att få en känsla för storleksordningen på skillnaderna i höjdpercentiler mellan dataseten har samma analys gjorts med testområdet som för vegetationskvot ovan. I figur 5.3 syns en bild över de fyra dataseten med avvikelser från medelvärde i varje testruta för percentil 40 och 95 med alla respektive endast första returerna. Serierna ser ut att vara skiktade i två lager vilket innebär systematiska skillnader mellan de olika skannersystemen för både percentil 40 och 95. Till skillnad från vegetationskvoterna försvinner inte skillnaderna när endast första returerna tas med och det är svårt att avgöra om skillnaderna ökar eller minskar. Resonemanget om Leicas starkare laser som lättare går igenom löven håller därmed inte i detta fall för att förklara skillnaderna.

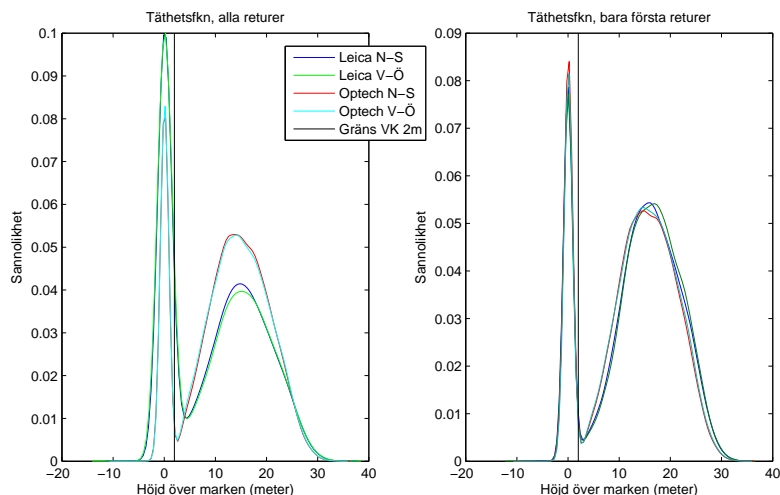


Figur 5.3: Avvikelser från medelvärde i percentil 40 och 95 för fyra olika dataset. Varje stjärna och färg motsvarar en testruta och skanning. Överst: Alla returerna. Underst: Endast första returerna.

För att få en helhetsbild över hur dessa systematiska skillnader ser ut överlag har sammanfattande statistik gjorts även för percentilvariablerna. I figur 5.4 syns låddiagram över percentilerna 20, 40, 60, 80, 90, 95 samt 99. Bilderna visar att Leicas system systematiskt skattar högre värden för percentilerna än Optech och att effekten inte försvinner om man endast analyserar första returerna. Storleksordningen på skillnaderna är ca 0,5 meter för samtliga percentiler.



Figur 5.4: Sammanfattande statistik för samtliga testområden. De två första lådorna i varje bild representerar flygriktning för Leica respektive Optech. Positivt värde betyder högre percentil för N-S och negativt värde betyder högre percentil för V-Ö. Tredje och fjärde lådan i varje bild representerar skillnader mellan skannersystem. Positivt värde betyder högre percentil för Leica och motsvarande negativt värde betyder högre percentil för Optech. De fyra sista lådorna i varje bild representerar samma sak, fast endast första returer. Motsvarande figur för percentil 60 följer samma mönster.



Figur 5.5: Skattade täthetsfunktioner av testområde 2 för fyra olika skanningar. Bilden till vänster innehåller alla retur och bilden till höger endast första retur.

5.3 Täthetsfunktion

För att få en överblick över hur resultaten i vegetationskvot och percentiler uppstår användes MatLab's funktion `ksdensity` för att skatta täthetsfunktionerna för laserträffarnas höjd över markytan. I figur 5.5 syns täthetsfunktionerna för de fyra skanningarna av testområde 2, se bilaga C. Till vänster i båda bilderna finns en spets vilken motsvarar sannolikheten att träffa mark och låg vegetation. Till höger syns en större bäge, där toppens läge i x-led markerar var de flesta laserträffarna i trädens lövverk hamnat, dvs på ca 15 meter. Den röda linjen i figuren markerar gränsen 2 meter över markytan, och massan till höger om linjen motsvarar vegetationskvoten. I den vänstra bilden är alla retur inkluderade medan den högra endast innehåller första retur. I den vänstra bilden syns det tydligt att de två skanningarna med Optech får betydligt högre sannolikhet att träffa vegetationen i träden eftersom bägen till höger är högre för dessa skanningar. Följaktligen är spetsen till vänster lägre vilket innebär lägre sannolikhet att få markträffar. Detta är förklaringen till varför Optechs skannrar får högre värden på vegetationskvoten än Leicas skannrar. I den högra bilden syns också att när endast första retur tas med i analysen försvinner denna effekt och alla fyra täthetsfunktioner blir mer lika. I tabell 1 syns värden på vegetationskvoten för de fyra skanningarna med alla respektive endast första retur. I detta testområde är skillnaden ca 0,2 enheter när olika skannrar används och alla retur tas med.

Skanning	Vegetationskvot, alla retur	Vegetationskvot, endast första retur
Leica N-S	0,643	0,818
Leica V-Ö	0,629	0,827
Optech N-S	0,825	0,814
Optech V-Ö	0,825	0,825

Tabell 1: Tabell över vegetationskvoter efter skanning av testområde 2. Datan är från fyra skanningar med alla respektive endast första retur.

5.4 Modellering av vinkelberoende

Tidigt i studien misstänktes att höga skannervinklar på något sätt skulle ge utslag i data. I figur 5.8 visas beroendet mellan differens i vegetationskvot och skannervinkel. Trots en hög varians syns tydligt en positiv trend mellan absolut skannervinkel och en ökad vegetationskvot.

Ett försök har gjorts att modellera vinkelberoendet för samtliga testområden med linjär regression. Med utgångspunkt i beteckningarna från avsnitt 2.1, motsvaras responsvariabeln av differens i vegetationskvot och de förklarande variablerna av skannervinkeln. Eftersom skogens täthet kan tänkas ge ökade vinkel effekter har medelvärdet mellan skanningarna för varje ruta dessutom tagits med i modellen

$$\Delta y_i = \beta_0 + \beta_1 \theta_{1,i} \overline{VK}_i + \beta_2 \theta_{2,i} \overline{VK}_i,$$

där Δy_i är differensen i vegetationskvot för testruta i , β_k är regressionsparametrarna, $\theta_{k,i}$ är medelvärdet av alla laserträffars skannervinkel i testruta i med system k samt \overline{VK}_i är medelvärdet för de båda skannrarnas vegetationskvot för testruta i . Eftersom medelskillnader mellan samma instrument, men framförallt mellan olika instrument verkar föreligga tas β_0 med i modellen för att låta olika skannrar vid skannervinkel 0 kunna vara annat än noll. Endast data från Leicas skannersystem har analyserats. MatLab's funktion `regress` har använts för att skatta parametrarna β_k . I figur 5.7 syns skattningar med intervall för parametrarna β_1 och β_2 . De flesta skattningarna är positiva och intervallen täcker för de flesta testområden inte noll. Det finns därmed fog för att påstå att en ökad skannervinkel ger upphov till en ökad vegetationskvot. Dock stämmer skattningarna från olika testområden dåligt överens med varandra, vilket gör det svårt att hitta något allmänt samband. Vissa testområden visar tydligt signifikanta vinkelberoenden medan andra inte visar tecken på något beroende alls. Värt att notera är att testområdena endast är utvalda efter en visuell analys av punktmolnen, och ingen information om träslag, ålder osv finns därmed att jämföra med. Intuitivt kan man tänka sig att exempelvis indelningen lövträd respektive barrträd skulle kunna ge skillnad, men några kluster i skattningarna som skulle bekräfta detta är svåra att identifiera.

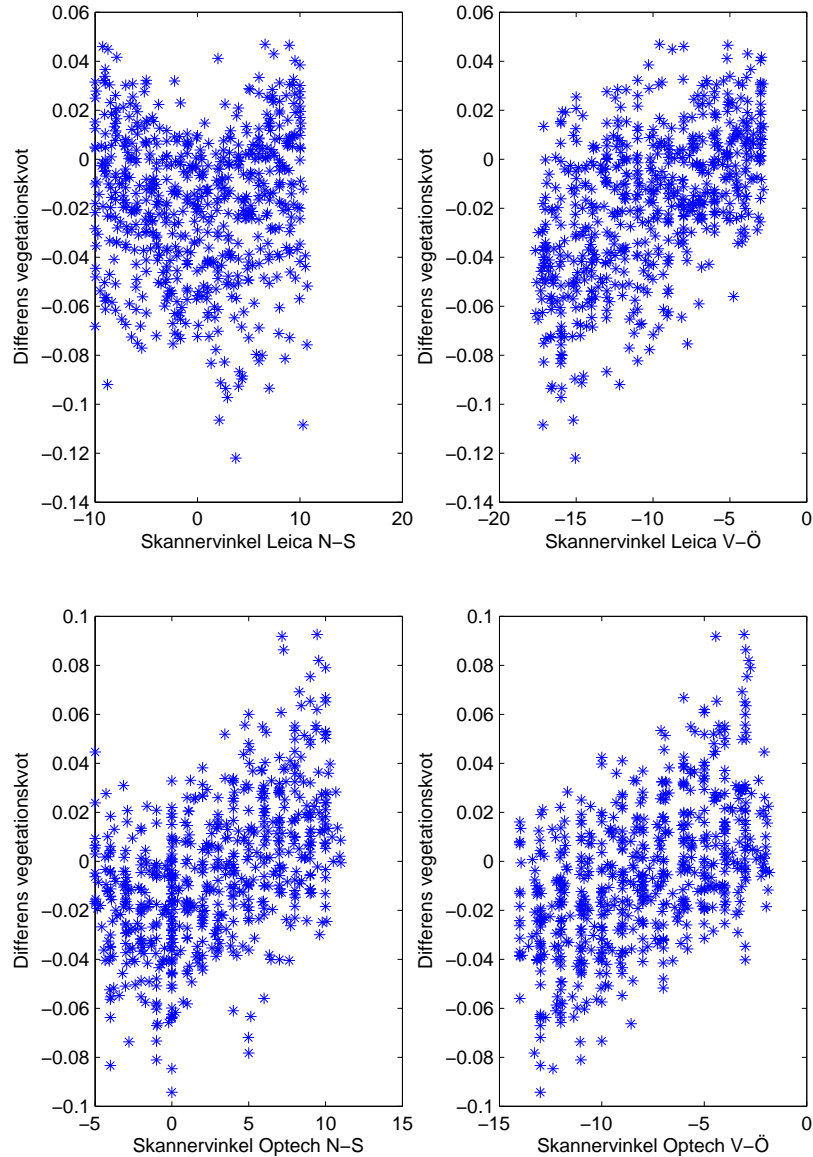
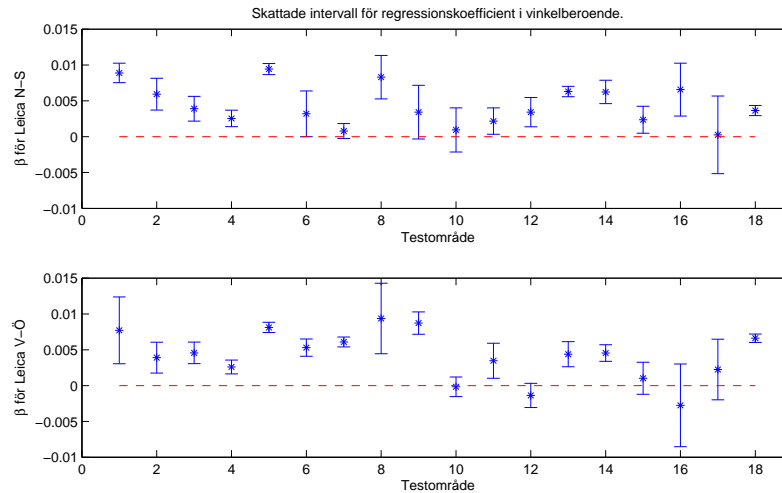


Figure 5.6: I bilderna visas beroende mellan skannervinkel och differens i vegetationskvot. Den övre bilden till vänster innehåller vinklar från Leica N-S varför en ökad absolut vinkel ger högre differens i vegetationskvot. Motsvarande gäller den övre bilden till höger som innehåller vinklar från Leica V-Ö, där en ökad absolut vinkel ger lägre differens i vegetationskvot. I de undre bilderna visas motsvarande testområde fast för skanningar från Optech.



Figur 5.7: Skattningar med 95-procentigt konfidensintervall för parametrarna i regressionsanalysen. Den övre bilden representerar skannervinkel från Leica N-S och den undre Leica V-Ö.

Även andra modeller med fler parametrar och andra förklarande variabler har testats. En modell utan medelvärde för vegetationskvot gav signifikanta β_j , men bättre resultat fås om de tas med. Dessutom testades

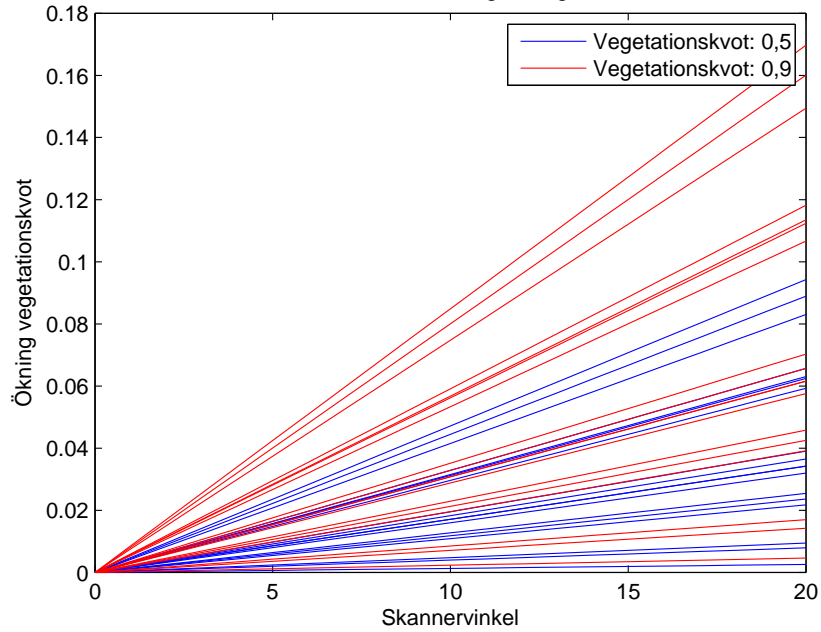
$$\Delta y_i = \beta_0 + \theta_{1,i} (\beta_1 \overline{VK}_i + \beta_2) + \theta_{2,i} (\beta_3 \overline{VK}_i + \beta_4)$$

för att låta skannervinkeln ha en egen parameter utan inverkan från medelvärde i vegetationskvot. Denna modell gav inga signifikanta β (utom intercepten, dvs β_0) och förkastades därmed.

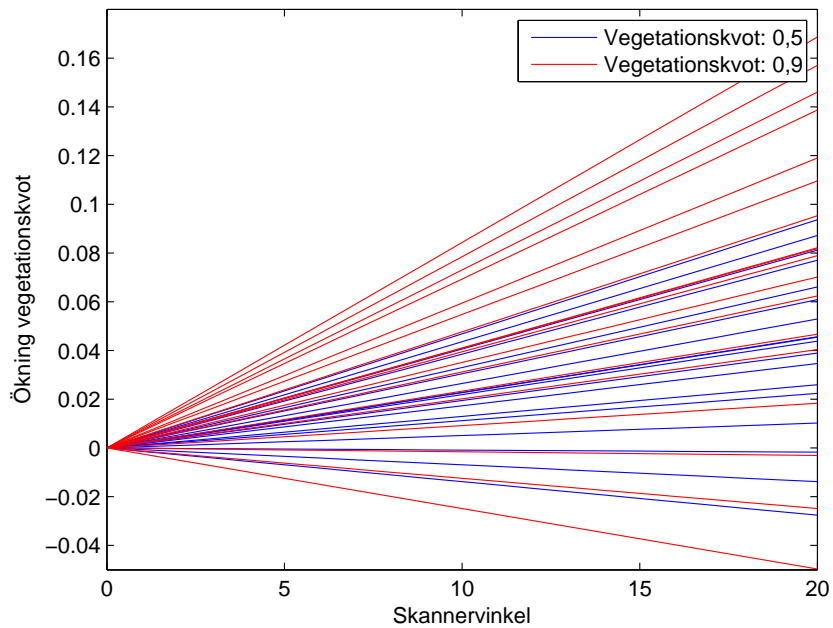
För att få en uppfattning om vilka konsekvenser vinkelberoendet skulle få, uttryckt i vegetationskvot, har ett diagram skapats för att illustrera sambandet. I figur 5.8 kan avläsas hur stor ökning av vegetationskvoten en given skannervinkel skulle ge för de olika skattningarna. Eftersom skattningen av β skilde sig så mycket mellan de 18 testområdena finns alla med i figuren. Dessutom finns medelvärdet för vegetationskvoten med i modellen varför två olika alternativ på vegetationskvoter också finns med. Spridningen är som sagt mycket stor mellan testområdena varför också konsekvensen av dem varierar mycket. Om man endast tittar på de röda linjerna, dvs för vegetationskvot på 0,9, ger den lägsta skattningen på β väldigt liten inverkan. Däremot, för det mest extrema fallet ger en skannervinkel på 20 grader en ökad vegetationskvot med 0,17 enheter. Notera att detta scenario inte är ett extremt fall i ett intervall, utan bästa skattningen av β för ett av testområdena¹².

¹²Testområde 5, som också är exemplet i början av detta avsnitt.

Skattat samband mellan skannervinkel och ökning av vegetationskvot för alla testområden.



Skattat samband mellan skannervinkel och ökning av vegetationskvot för alla testområden.



Figur 5.8: Samband mellan skannervinkel och ökad vegetationskvot. Röda linjer motsvarar ökningen för de 18 testområdenas skattningar för vegetationskvoten 0,9. De blåa linjerna motsvarar ökningen vid vegetationskvoten 0,5. Den övre bilden representerar skattningarna från skanning N-S och den undre bilden V-Ö. Båda skanningarna är utförda med Leicas system.

6 Slutsatser och diskussion

Eftersom data till denna studie kommer från NNH, vars datainsamling är anpassat efter annat ändamål än vad som analyseras i denna studie, måste man vara medveten om begränsningarna. En lägre punkttäthet ger naturligtvis större varians på skattningarna och i slutändan lägre noggrannhet på de skogliga skattningarna. Att variansen är stor medför att man inte kan vara lika säker på medelskillnader som uppträder i jämförelserna. I fallet med vegetationskvot försvann skillnaderna mellan instrumenten då endast första returerna analyseras. Denna iakttagelse bör öka tillförlitligheten i påståendet att Optechs skannersystem skattar vegetationskvot högre än Leicas eftersom fenomenet möjligen har en fysikalisk förklaring i skillnad i intensitet hos lasern. Däremot bör man vara mer försiktig med att dra slutsatser angående iakttagelsen med skillnaderna i höjpercentilerna, där den fysikaliska förklaringen för författaren fortfarande är okänd. Innan någon fysikalisk förklaring tillkännages utesluts inte möjligheten att något blivit fel i modelleringen eller analysen som kan vara orsaken till skillnaden.

En möjlighet till stor felkälla finns i modelleringen av marken. Inom ramen för denna studie fanns inte utrymme att jämföra de olika markmodellerna för olika dataset eller säkerställa noggrannhet och utreda felkällor. Rönnberg (2011) har skrivit ett PM där två markmodeller baserade på olika skanningar med olika skannrar jämförs. I allmänhet uppvisar de båda skanningarna likvärdiga resulterande markmodeller även om vissa lokala avvikelser inte är ovanliga. I regel förklaras de största avvikelserna med ojämna markytor eller låg tät vegetation som felaktigt klassats som mark. Skogsområden är ett vanligt exempel för då markmodellen kan få sämre noggrannhet, varför denna studie kan ha påverkats negativt av osäkerheten i markmodellen. Dessutom har programvaran FME direkt använts för att skapa markmodeller utifrån de markklassade punkterna. En ytterligare felkälla i detta är att en omklassning av laserpunkterna har gjorts utan kvalitetssäkring från Lantmäteriet som annars tillhandahålls. Detta för att tvärstråken som använts för överlapp till en början inte var klassificerade. Å ena sidan kan man förmoda att inga systematiska skillnader bör uppstå av den typen av felkällor, utan bara högre varians. Å andra sidan gäller detta skillnader mellan olika skannrar, där möjligen olika egenskaper kan vara orsaken till systematiska fel i just markmodellen. Utredning av markmodellering av detta slag samt fysikaliska förklaringar till resultaten lämnas till vidare studier.

En stor generalisering som gjorts i studien gäller sammanslagningen av olika modeller av skannersystem inom samma fabrikat. Begränsningen till skogsområden med överlapp av både tvärstråk och angränsande skanningsområde med lämpligt system är anledningen till att denna generalisering gjorts. Jämförelse mellan olika modeller av samma fabrikat lämnas till vidare studier.

Höjden vid positionen i x-led för det lokala minimum mellan spetsen och bågen har en låg sannolikhet och motsvarar antagligen glappet mellan vegetationen på marken och vegetationen i träden. För många testområden ser detta lokala minimum ut att vara förskjutet något till höger om gränsen för 2 meter. Optimalt hade varit om denna gräns dragits precis genom det lokala minimumet.

Man ska dock vara väl medveten om att täthetsfunktionen är skattad och utjämnad med hjälp av funktionen `ksdensity`. Ett histogram visar mer sanningsenligt hur fördelningen ser ut, men där är istället svårt att utläsa vad som skiljer dem åt på grund av oregelbundenheten.

Referenser

- Blom, G., Holmquist, B., 1998. Statistikteori med tillämpningar, Bok B, 3rd Edition. Studentlitteratur AB.
- Breidenbach, J., Næsset, E., Lien, V., Gobakken, T., Solberg, S., 2010. Prediction of species specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach based on fused airborne laser scanning and multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 114 (4), 911-924.
- Holmgren, J., 2004. Prediction of tree height, basal area and stem volume in forest stands using airborne laser scanning. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19:6, 543-553.
- Jonsson, T., 1914. Om bonitering av skogsmark. *Skogsvårdsföreningens tidskrift tolfte årgången*, 369-392.
- Klang, D., Burman, H., 2006. En ny svensk höjdmodell. laserskanning, testprojekt falun. Tech. rep., Lantmäteriet, Digpro AB, LMV-rapport 2006:3, Lantmäteriet. ISSN 0280-5731.
- Lantmäteriet, juli 2009. Infoblad 14: Flygburen laserskanning. Ny nationell höjdmodell - Nyhetsbrev, rapporter och informationsblad.
URL http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/geodesi_gps_och_detaljmatning/Nytt_referenssytem/Infoblad/info_blad-14.pdf
- Lantmäteriet, 2011. Erfarenheter och praktiska råd vid användning av nnh (bilaga till produktbeskrivning: Laserdata).
URL http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/kartor_och_geografisk_info/Hojdinfo/2011/PM_Metadatabilaga.pdf
- Lantmäteriet, 2012a.
URL http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/geodesi_gps_och_detaljmatning/Nytt_referenssytem/Infoblad/info_blad-14.pdf
- Lantmäteriet, 2012b. Infoblad 13: Ny nationell höjdmodell. Ny nationell höjdmodell - Nyhetsbrev, rapporter och informationsblad. www.lantmateriet.se.

- URL http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/geodesi_gps_och_detaljmatning/Nytt_referenssytem/Infoblad/info_blad-13.pdf
- Lantmateriet, april 2012c. Produktbeskrivning:
Laserdata.
URL http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/kartor_och_geografisk_info/Hojdinfo/Prod-beskrivn/laserdat.pdf
- Naesset, E., 1997. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 52, 49-56.
- Naesset, 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, 88-99.
- Naesset, E., 2012. Anvendelse av laserscanning i skogbruksplanleggingen - hvor står vi og hvor går vi: noen tanker om situasjonen i norden. Seminarium.
URL http://www.uli.se/images/stories/seminarier/presentationer/2012/skogsgis2012_naesset1.pdf
- Nilsson, M., 1996. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. Remote Sensing of Environment 56:1, 1-7.
- Petrie, G., 2011. Airborne topographic laser scanners. Geoinformatics 1, 34-44.
- Regeringen, 2007. Sverige inför klimatförändringarna - hot och möjligheter.
URL s.543-544.<http://www.regeringen.se/content/1/c6/08/93/34/0af98686.pdf>
- Rönnerberg, A., 07 2011. Pm - jämförelse av överlappande höjdm modeller.
URL
http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/kartor_och_geografisk_info/Hojdinfo/Veckorapport_NNH.pdf
- Rost, H., mars-juli 2012. Personligt möte och mailkonversation.
- Vain, A., 2010. Calibration of airborne laser scanning intensity data. ISSN: 1648-116X 86 (39), Department of Geomatics, Estonian University of Life Sciences.

Vain, A., Yu, X., Kaasalainen, S., Hyyppä, J., 2010.
Correcting airborne laser scanning intensity data for
automatic gain control effect. IEEE Geoscience and
remote sensing letters 7:3, 511-514.

A Ordlista

NNH Ny Nationell Höjdmodell

Raster Bild uppbyggd av en matris, där varje pixel motsvaras av ett element i matrisen

Produktionsområde (A-I) Indelningen av Sverige för datainsamlingen för NNH

Skanningsområde Indelningen av varje produktionsområde i NNH

Testområde Rektangel för analys. Skannat fyra gånger, 2 gånger med system från Leica samt 2 gånger med system från Optech.

Testruta Testområdena delas in i kvadrater om $20\text{ m} \times 20\text{ m}$, varje sådan ruta kallas testruta.

Leica N-S Skannat med system från Leica med flygriktning norr till söder eller omvänt söder till norr.

Leica V-Ö Skannat med system från Leica med flygriktning väster till öster eller omvänt öster till väster.

Optech N-S Skannat med system från Optech med flygriktning norr till söder eller omvänt söder till norr.

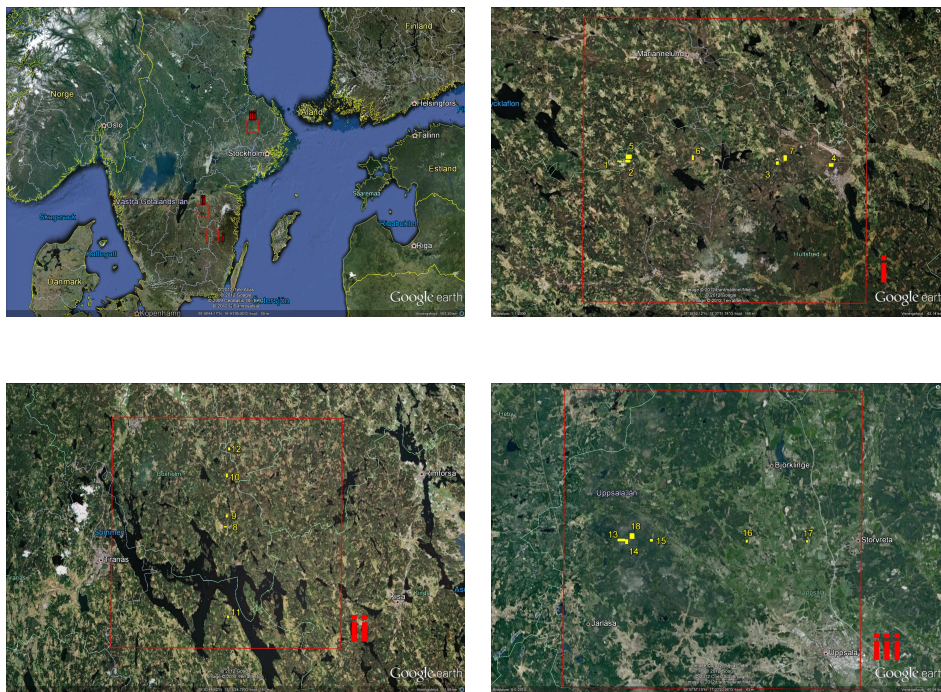
Optech V-Ö Skannat med system från Optech med flygriktning väster till öster eller omvänt öster till väster.

B FME

Programvaran FME har använts för att ordna data inför analysen, som mestadels gjorts i MatLab. I figuren nedan visas ett workspace som till att börja med läser in en shape-fil och en las-fil för att slutligen skriva till en dbf-fil som senare läses in i MatLab. Shape-filen skapades tidigare genom att manuellt rita ut kvadrater i programvaran FugroViewer. FME klipper ut punktmolnet i las-filen som specificerats av shape-filen för att sedan separera punkterna efter klasstillhörighet som tillhandahållits av Lantmäteriet. De punkter som klassificerats som markpunkter skapar FME en markmodell i form av ett raster. Varje punkts höjd beräknas sedan med markmodellen som referenspunkt. Därefter skrivs information om varje punkt vidare till en dbf-fil med tillhörande användbara attribut.

C Testområden

I figur C.1 visas testområdena i kartor från Google Earth. Tabell 2 visar de yttre koordinaterna för varje testområde i SWEREF 99 TM.



Figur C.1: Testområden

ID	V-Ö undre	N-S undre	V-Ö övre	N-S övre	Ordinarie system	System från angränsande område
1	526812,3082	6374760,941	527316,4277	6374911,162	Leica ALS50-II/69	Optech ALTM Gemini/61
2	527706,5691	6374716,957	528209,3353	6374992,362	Leica ALS50-II/69	Optech ALTM Gemini/61
3	543606,5408	6374574,18	543904,9525	6374928,755	Leica ALS50-II/69	Optech ALTM Gemini/61
4	549197,2301	6374427,979	549662,5571	6374778,964	Leica ALS50-II/69	Optech ALTM Gemini/61
5	527732,2825	6375113,189	528335,8726	6375551,671	Optech ALTM Gemini/61	Leica ALS50-II/69
6	534732,5206	6375005,598	534891,5382	6375523,928	Optech ALTM Gemini/61	Leica ALS50-II/69
7	544422,6055	6375002,891	544734,5506	6375586,858	Optech ALTM Gemini/61	Leica ALS50-II/69
8	514573,1647	6437049,481	514903,7182	6437192,597	Optech ALTM Gemini/80/61	Leica ALS60/14
9	514811,691	6438345,346	514995,7454	6438727,665	Optech ALTM Gemini/80/61	Leica ALS60/14
10	514777,1809	6443574,737	514993,0387	6444045,7	Optech ALTM Gemini/80/61	Leica ALS60/14
11	515007,6279	6425207,922	515270,8528	6425563,174	Leica ALS60/14	Optech ALTM Gemini/80/61
12	515006,2746	6447099,893	515285,7395	6447468,679	Leica ALS60/14	Optech ALTM Gemini/80/61
13	626731,1077	6649749,437	627469,3553	6649994,392	Leica ALS60/14	Optech ALTM Gemini/80/61
14	627502,8912	6649497,039	627768,1461	6649943,642	Leica ALS60/14	Optech ALTM Gemini/80/61
15	630003,5679	6649750,791	630257,3193	6649989,994	Leica ALS60/14	Optech ALTM Gemini/80/61
16	639652,3351	6649714,589	639827,5928	6649981,197	Leica ALS60/14	Optech ALTM Gemini/80/61
17	645694,4485	6649771,091	645878,8412	6649995,069	Leica ALS60/14	Optech ALTM Gemini/80/61
18	627940,6971	6650009,658	628387,9763	6650551,671	Optech ALTM Gemini/61	Leica ALS60/14

Tabell 2: Koordinater för testområdena i koordinatsystemet SWEREF 99 TM.

Master's Theses in Mathematical Sciences 2012:E29

ISSN 1404-6342

LUTFMS-3198-2012

Matematisk statistik

Matematikcentrum

Lunds universitet

Box 118, 221 00 Lund

<http://www.maths.lth.se/>