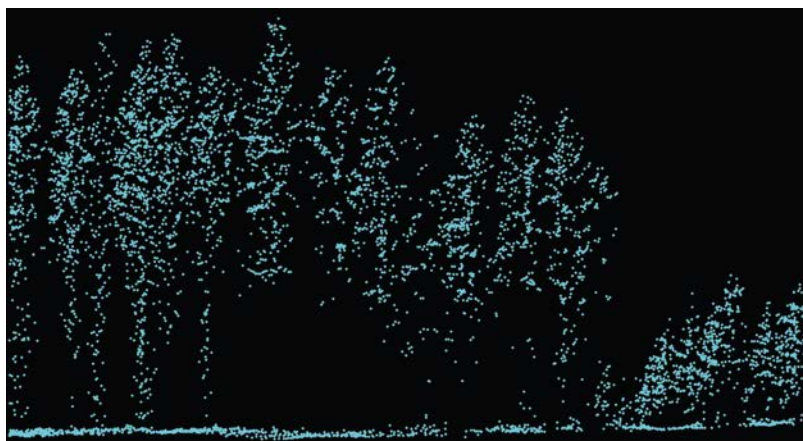




Laserskanning och digital fotogrammetri i skogsbruket

Karin Nordkvist och Håkan Olsson



Arbetsrapport 388 2013



Laserskanning och digital fotogrammetri i skogsbruket

Karin Nordkvist och Håkan Olsson

Arbetsrapport 388 2013

Förord

Flygburen laserskanning och automatiserad användning av digital fotogrammetri håller för närvarande på att revolutionera metoderna för skogsinventering. Detta kompendium är en första ansats att utarbeta ett läromedel på svenska inom området. Kompendiet är framtaget för distanskursen *Laserskanning och digital fotogrammetri i skogsbruket* vid Institutionen för skoglig resurshushållning, SLU, hösten 2012. Vi hoppas att det även kan få en vidare spridning i det svenska skogsbruket, samt att det kan vidareutvecklas inför kommande kurstillfällen allteftersom nya erfarenheter inom detta snabbt expanderande område vinnns. Författarna är därför också tacksamma för synpunkter på kompendiets innehåll och förslag till kompletteringar. Dessa kan skickas till huvudförfattaren Karin Nordkvist (e-post karin.nordkvist@slu.se).

Kompendiet har finansierats av Erik Johan Ljungbergs Utbildningsfond och SLU.

Vid SLU har Jonas Bohlin, Magnus Ekström, Johan Holmgren, Eva Lindberg och Jörgen Wallerman bidragit till kompendiet.

Värdefulla bidrag till innehållet har även lämnats av

Helen Rost och Martin Sjödin, Blom Sweden AB
Fredrik Walter, Dianthus AB
Ulf Söderman, FORAN Remote Sensing AB
Thomas Brethvad, COWI
Andreas Rönnerberg, Lantmäteriet
Anders Boberg, Tyréns

Där inget annat anges är figurerna gjorda av Karin Nordkvist. Dessa figurer samt kompendiets text är licensierade under [Creative Commons Erkännande-DelaLika 2.5](#).

Umeå i september 2012

Karin Nordkvist och Håkan Olsson

Omslagsbild: Jonas Bohlin, SLU. Bilden bygger på data från Lantmäteriet, och visar en punktmolnsprofil från laserskanning (överst) och digital fotogrammetri.

Innehållsförteckning

1	Laserskanning för skogliga tillämpningar	6
1.1	Dagsläget för laserskanning i skogsbruket.....	6
1.2	Laserskanningens utveckling	7
2	Laserskanningens grunder.....	8
2.1	Avståndsmätning	8
2.2	Profilerande laser.....	8
2.3	Skanning.....	9
2.4	Positionsbestämning av mätpunkter.....	10
2.5	Mätnoggrannhet	10
2.6	Olika typer av skannrar	11
2.7	Laserpulsens interaktion med mark och vegetation	12
3	Förbearbetning av laserdata.....	14
3.1	Stråktjämnning och inpassning mot kontrollpunkter	14
3.2	Klassificering av markpunkter	15
3.3	Framtagning av markmodell	17
4	Databearbetning för skogliga tillämpningar	18
4.1	Beräkning av kronhöjdsfördelningar.....	18
5	Visuell tolkning och segmentering av laserdata.....	20
5.1	Markmodellens användningsområden.....	20
5.2	Laserdata i rasterform.....	21
5.3	Automatisk segmentering.....	22
6	Areabaserade skattningar	23
6.1	Insamling och bearbetning av fältdata	23
6.2	Regression	24
6.3	k-MSN.....	27
6.4	Random Forests.....	28
7	Skattning av variabler för enskilda träd	30
7.1	Detektering av träd	30
7.2	Mått kopplade till enskilda träd.....	32
7.3	Sammankoppling av fält- och fjärranalysdata.....	32
7.4	Skattning av trädvariabler	33
8	Automatiserad digital fotogrammetri.....	34
8.1	Färginformation från flygbilder	34
8.2	Centralprojektion och ortofoto	35
8.3	Linjeskanning och cylinderprojektion.....	36
8.4	Stereofotogrammetri.....	36
8.5	Punktmoln från stereobilder	38
8.6	Tillämpningar i skogsbruket.....	39
9	Lagring av 3D-punktdata.....	41
9.1	LAS-filens uppbyggnad	41
10	Referenser.....	43
	Appendix: Förkortningar.....	45

1 Laserskanning för skogliga tillämpningar

1.1 Dagsläget för laserskanning i skogsbruket

Laserskanning har etablerats som en ny och effektiv metod för skoglig datafångst. Flygburen laserskanning mäter med decimeternoggrannhet läget för punkter på marken och i trädkronorna. Med hjälp av särskilda datorprogram kan sedan markens höjd beräknas. Därefter kan även statistiska mått för de återstående laserpunkternas fördelning i trädkronorna beräknas. Med till exempel regressionsanalys kan sedan skogliga data från provytor överföras till rasterrutor som täcker all skogsmark inom den aktuella skanningen. Denna så kallade areabaserade metod introducerades 2002 som en kommersiell metod för skogsbruksplanering i Norge och används idag vid nästan all skogsbruksplanering där. Framst är det mått på trädens storlek inom respektive rasterruta (stamvolym, höjd, grundyta etc.) som skattas på detta sätt. Beståndsindelning och uppskattning av trädslagsfördelning görs i Norge i regel med manuell tolkning av digitala flygbilder i stereo.

Även de statliga finska skogscentralerna har gått över från en traditionell, fältintensiv skogskartering till automatiserad skattning med laserskanning. Arealen som skattas med laserbaserade metoder uppgår nu till 1 - 2 miljoner hektar per år. Till skillnad från i Norge försöker man i Finland att även skatta trädslag automatiskt, bland annat genom att kombinera laserdata med digitala flygbilder. Metoderna för att automatiskt skatta trädslag i operationell skala är dock ännu förhållandevis osäkra.

I Sverige har de flesta större skogsföretag och några skogsägarföreningar gjort försök med laserskattningar, ofta på testområden om ca 10 000 ha. Resultaten är i regel goda då det gäller variabler relaterade till trädens storlek. Enligt en sammanställning gjord av OL Skogsinventering AB är skattningsnoggrannheten på beståndsnivå med den areabaserade metoden 3-6 % för grundtevägd medelhöjd, 6-14 % för virkesförråd och 7-13 % för grundtevägd stamdiameter. Dessa noggrannheter är mycket bättre än vad som uppnås vid traditionella inventeringar i samband med skogsbruksplanläggning. Noggrannheten för skattning av stamtal är ca 12-24 %. [1]

Etableringen av laserskanning i skogsbruket har inte varit lika snabb i Sverige som i Norge och Finland. Den pågående nationella laserskanningen, NNH, som utförs på beställning av Lantmäteriet, kan dock ändra på detta. Av de större skogsföretagen har Bergvik varit föregångare. Där pågår för närvarande en pixelvis skattning av hela skogsinnehavet, baserat på data från den nationella laserskanningen. Något som de funnit särskilt värdefullt är möjligheten till noggrann kartläggning av områden som sannolikt är i behov av gallring. Även Fastighetsverket har beställt skattningar för stora områden. Flera andra organisationer, däribland Sveaskog, använder dessutom laserdata för bland annat avgränsning av bestånd, utan att göra skattningar med stöd av provytor.

En bidragande orsak till den snabbare spridningen av laserskanning i Norge och Finland kan vara att skogsbruksplanläggning för privata fastigheter samordnas på kommunnivå, samtidigt som staten delfinansierar planerna. Någon sådan samordning sker inte i Sverige, vilket försvårar det gemensamma utnyttjandet av laserdata och provytor. Ett intressant framtida alternativ i Sverige, särskilt för planläggning av små privata fastigheter, är tredimensionella mätningar av krontaket som fås genom matchning av digitala flygbilder. Flygbilder kommer sannolikt även framöver att registreras av Lantmäteriet med större regelbundenhet än laserdata. Tekniken att använda punktmoln från digitala flygbilder går igenom i slutet av detta kompendium.

1.2 Laserskanningens utveckling

Laserljus är enfärgade, riktade ljusvågor som är i fas. Den första användbara lasern konstruerades 1960. Idag används laser inom en rad områden: i cd- och dvd-läsare, skrivare, laserspektroskopi, studier av gaser i atmosfären, avstånds- och hastighetsmätning, topografisk kartering, kartering av havsdjup i grunda områden och mycket mer. Vid flygburen laserskanning används laserns förmåga att mäta avstånd med hjälp av tiden från att en laserpuls sänds ut, tills laserljus som reflekterats från marken eller vegetationen kommer tillbaka till sensorn. Tekniken att mäta avstånd med laser kallas ofta LiDAR från engelskans *Light Detection and Ranging*.

De första försöken att mäta trädhöjder med LiDAR gjordes i dåvarande Sovjetunionen i slutet av 1970-talet. Mätning av trädhöjdsprofiler med flygburen laser testades även i Kanada och USA i början av 1980-talet [2]-[4]. De första kända studierna av flygburna skannande lasersystem för skogsinventering genomfördes i samverkan mellan dåvarande FOA (Försvarets Forskningsanstalt, numera Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI) och Sveriges Lantbruksuniversitet, SLU, 1991 [5], [6]. Dessa tidiga försök visade att trädhöjd och virkesförråd kunde mätas med laserskanning. Ett problem med det experimentella system som användes i detta tidiga test var den låga noggrannheten i positioneringen. I mitten av 1990-talet utvecklades kommersiella laserskanningssystem för flygregistrering över land. I dessa system hade GPS integrerats med tröghetsnavigering (*Inertial Navigation System, INS*) vilket gjorde det möjligt att bestämma lasermätningarnas position med 0,5 meters noggrannhet eller bättre.

Ett av de första kommersiella systemen var svenska TopEye, utvecklat av SAAB 1993. Detta helikopterburna system producerade mätdata av hög kvalitet. TopEye-systemet är designat för detaljerad mätning av mindre områden och har använts mycket för mätningar av olika typer av infrastruktur samt för försök med skattningar av skog. De tidiga försöken med helikopterburna laserskanning ledde dock inte till användning inom operationell skogsinventering eftersom kostnaderna för datainsamling upplevdes som alltför höga. I Norge gjorde Erik Næsset 1995 försök med att mäta skog med skannande laser monterad på flygplan. Försöken lyckades väl, vilket ledde till utvecklingen av den så kallade areabaserade metoden för inventering på beståndsnivå med stöd av fältmätta referensytor. I slutet av 1990-talet visade finsk och svensk forskning på möjligheten att även upptäcka och mäta enskilda träd i laserdata med hög punkttäthet. En redogörelse för den tidiga utvecklingen i de nordiska länderna finns i referens [7].

Idag är laserskanning en vedertagen metod för skoglig inventering. Exempel på länder eller regioner där omfattande laserskanning för skogliga ändamål gjorts är Norge, Finland, Österrike, Spanien, norra Italien, USA, Canada, Chile och Tasmanien utanför Australien. Enstaka projekt finns i ytterligare en lång rad länder, till exempel Nepal, Tanzania och Brasilien för att nämna några. År 2011 fick professor Erik Næsset Wallenbergpriset (även kallat det skogliga Nobelpriset) för att han lanserat den areabaserade metoden som en operationell metod för skogsinventering. År 2011 kan också räknas som genombrottsåret för storskalig operationell användning av metoden i Sverige, eftersom Bergviks projekt för att skatta hela sitt skogsinnehav med laserskanning startade då. I Sverige tog det således 20 år från de första försöken 1991, till den fullskaliga användningen.

2 Laserskanningens grunder

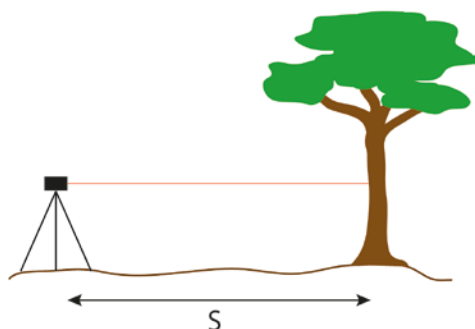
Detta kapitel beskriver de viktigaste principerna bakom laserskanning och de huvudkomponenter som används i dagens system. Främst handlar kapitlet om flygburen laserskanning. En avståndsmätande laser placeras då i ett flygplan eller en helikopter. Lasern sänder ut pulser för att mäta avståndet till punkter på marken eller i vegetationen, och en skanningsmekanism används för att sprida pulserna i ett brett stråk under planet. För positionsbestämning av mätpunkterna krävs att man med hög precision kan registrera avståndet till punkten samt laserns position och i vilken riktning pulserna sänds ut.

2.1 Avståndsmätning

Den metod som används för mätning av stora avstånd (storleksordningen 100 meter och längre) innebär att lasern sänder ut en kort (ca 4-10 ns, eller 1,2-3 m), men intensiv ljuspuls [8]. Pulsen färdas genom luften, träffar något objekt och reflekteras av objektet tillbaka till instrumentet, som registrerar hur lång tid som gått sedan pulsen sändes ut (figur 1). Detektorn omvandlar ljuset till en elektrisk spänning där signalstyrkan är en funktion av tiden. Eftersom ljusets hastighet är känd kan avståndet mellan instrumentet och det reflekterande objektet beräknas som

$$S = v \cdot \frac{t}{2}, \quad (1)$$

där S är avståndet till objektet, v är ljushastigheten och t är den uppmätta tiden. Divisionen med 2 kommer sig av att ljuset färdas samma sträcka två gånger: först från instrumentet till objektet och sedan tillbaka. Metoden med tidtagning av returpulsen är vanlig i både markbaserade och flygburna instrument.

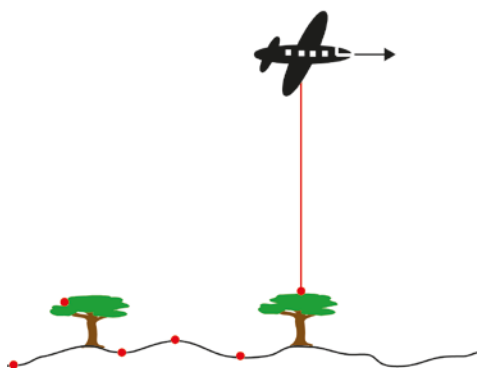


Figur 1. Avståndsmätning med laser.

Det finns även en typ av markbaserade instrument som istället mäter fasförskjutningen hos den returnerade signalen från en amplitudmodulerad laserpuls. Denna metod har mycket hög noggrannhet men lämpar sig endast för kortare avstånd.

2.2 Profilerande laser

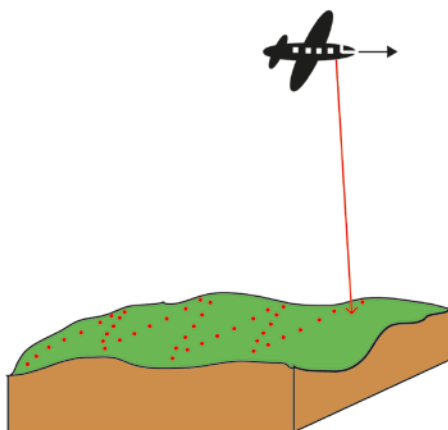
Genom att placera en avståndsmätande laser på ett flygplan kan man skapa höjdprofiler av marken och vegetationen. Under det att flygplanet rör sig framåt sänds laserpulser ut med hög frekvens och träffar marken längs en linje i planets flygriktning (figur 2). De tidiga försöken med lasermätning av skog på 1980-talet gjordes med denna teknik och potentiellt kan det vara ett billigt sätt att få skoglig statistik för stora områden.



Figur 2. Profilerande laser.

2.3 Skanning

De metoder för laserinventering av skog som nu används i det praktiska skogsbruket bygger, till skillnad från profilmätning, på skanning av hela det område som ska inventeras. Den höjdmätande lasern kompletteras därför med en skanningsmekanism som sprider mätningarna i ett stråk under flygplanet (figur 3). Skanningsmekanismen består ofta av en roterande eller oscillerande (vickande) spegel. Genom att flyga flera stråk intill varandra täcker man in större områden.



Figur 3. Flygburen laserskanning.

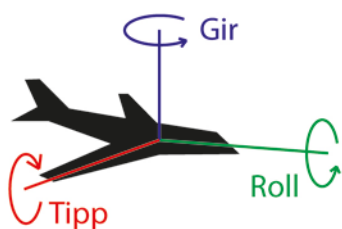
Stråkbredden bestäms av flyghöjden och öppningsvinkeln, det vill säga den maximala vinkeln mellan laserstrålen och lodlinjen. Stråkbredden och flyghastigheten avgör sedan hur stor yta som kan täckas per tidsenhet. Ju snabbare ett område kan täckas in, desto lägre blir kostnaden, och man vill därför använda en hög flyghöjd, flyghastighet och öppningsvinkel. För en given kombination av dessa parametrar bestäms punkttätheten på marken av pulsfrekvensen (antalet utsända laserpulser per sekund).

Eftersom man både vill ha en tillräckligt hög punkttäthet och hög yttäckning per tidsenhet har utvecklingen gått mot skannrar med hög pulsfrekvens. En teknisk utmaning ligger i att kombinera ökad frekvens med den större effekt som behövs vid skanning från hög höjd, eftersom lasern behöver mer tid mellan varje puls när effekten är hög. Utvecklingen har emellertid varit mycket snabb, och pulsfrekvensen hos nuvarande kommersiella system är ofta flera hundratusen utsända pulser per sekund, jämfört med ca 2 000 pulser per sekund hos de tidigaste kommersiella systemen i mitten på 1990-talet. En hög frekvens i förhållande till flyghöjd gör att en puls inte hinner tillbaka innan nästa har sänts ut, och man har därför även utvecklat system som kan hålla reda på flera pulser samtidigt i luften.

Vid höga öppningsvinklar ökar andelen laserskott som träffar vegetationen istället för marken. Det innebär dels sämre täckning av marken, dels att en del av de lasermått som används vid skogliga skattningar blir mindre representativa. Ofta begränsas därför öppningsvinkeln till ca +/- 20° vid skanning primärt för framställning av markmodeller och till ca +/- 15° vid skanning primärt för skogliga skattningar.

2.4 Positionsbestämning av mätpunkter

För att beräkna mätpunkternas position i horisontell och vertikal led måste man känna laserskannerns position och orientering vid tidpunkten för varje utsänd puls. Positionen definieras av tre koordinater i rummet (x , y och z) och orienteringen av de tre vinklar som kallas tipp, roll och gir (figur 4). Dessutom måste man känna till den utsända laserpulsens riktning i förhållande till instrumentet.



Figur 4. Tipp, roll och gir (på engelska pitch, roll, yaw).

När de första försöken med flygburen laserskanning gjordes, saknades teknik för att mäta dessa parametrar med tillräcklig noggrannhet, men i mitten av 1990-talet började man integrera GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) och tröghetsnavigering ([INS](#), *Inertial Navigation System*). GNSS är ett samlingsnamn för alla satellitbaserade navigationssystem. I praktiken används främst det amerikanska GPS.

GNSS ger bra mätningar av position och hastighet, men kan inte användas för att mäta tipp, roll och gir med tillräcklig noggrannhet. Med GNSS registreras positionen dessutom med relativt låg frekvens, vilket gör att flera laserpulser hinner sändas ut mellan varje mätning. För att mäta planets orientering samt fylla i luckorna mellan GNSS-mätningarna används INS. Ett INS består ofta av tre gyroskop och tre accelerometrar. Gyroskoperna mäter vinkelhastighet runt de tre axlarna, och genom att integrera med avseende på tid får man ut förändringen i orientering jämfört med ursprunglig orientering. Accelerometrarna mäter krafter och därmed acceleration. Dubbel integrering med avseende på tid ger positionsförändring jämfört med utgångspunkten. GNSS används för att korrigera för drift i tröghetsystemet.

2.5 Mätnoggrannhet

För hårdgjorda ytor beror noggrannheten och upplösningen i avståndsmätningarna i första hand på tidtagningens noggrannhet och laserpulsens längd. Eftersom avståndet till ett objekt är

$$S = v \cdot \frac{t}{2}, \quad (2)$$

så kan noggrannheten i avståndsmätningen approximeras till

$$\Delta S = v \cdot \frac{\Delta t}{2}, \quad (3)$$

där Δt är noggrannheten i tidtagningen. Ljusets hastighet är ca 300 000 km/s, vilket innebär att en mätnoggrannhet på 1 dm kräver en tidtagningsnoggrannhet på 0,67 nanosekunder ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$). Ljusets hastighet är väl bestämd men påverkas något av lufttemperaturen, varför en mätnoggrannhet bättre än någon cm är svår att uppnå med flygburen laserskanning, oavsett hur väl tiden kan mätas.

Laserstrålen har låg divergens, det vill säga är väl sammanhållen – jämför den smala strålen från en laserpekare med ljuskäglan från en ficklampa. På stora avstånd är divergensen ändå tillräcklig för att pulsen ska träffa en liten yta på marken snarare än en punkt. En divergens på 0,5 mrad ($0,029^\circ$) och en flyghöjd på 1 000 meter ger en träffyta med ungefär 50 cm diameter. Större divergens och flyghöjd leder till att laserpulsen får en större träffyta, vilket påverkar mätnoggrannheten negativt. Även stor terränghöjd och öppningsvinkel kan sänka mätningens noggrannhet.

En del av laserpulsen kan reflekteras av ett objekt som inte blockerar hela pulsens strålgång, medan resten av pulsen fortsätter och reflekteras mot objekt som kommer senare i strålgången, till exempel marken. Många sensorer kan därför registrera mer än ett eko från den utsända laserstrålen. För de flesta sensorer gäller att det måste vara minst någon meter mellan ekon som registreras från samma laserpuls.

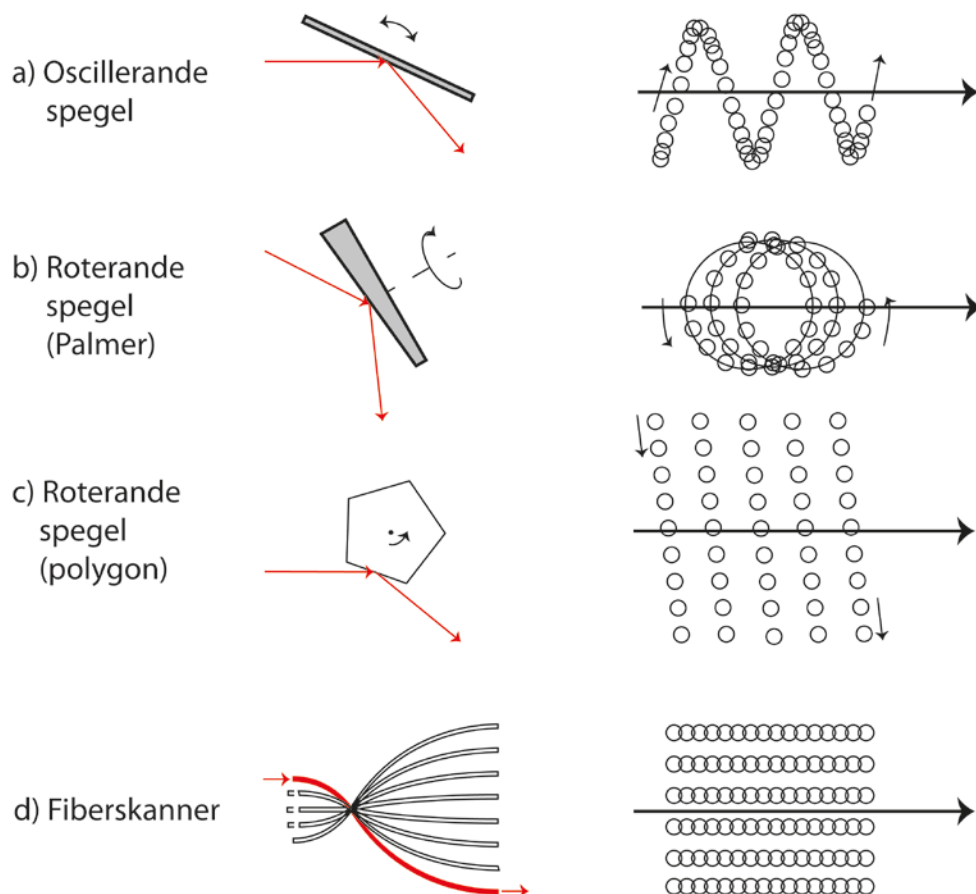
2.6 Olika typer av skannrar

Själva skanningsmekanismen består oftast av en oscillerande eller roterande spegel. En tredje typ är fiberskannern.

En oscillerande spegel svänger mellan två positioner och laserstrålarna träffar marken i ett sicksackmönster (figur 5 a). Vid vändningen saktar spegeln ner och punkttätheten vinkelrätt mot flygriktningen är därför högre i stråkets ytterkanter.

En typ av skanner med roterande spegel är Palmerskannern (figur 5 b). Spegelns yta är inte vinkelrät mot rotationsaxeln, och den utsända pulsens riktning förändras med spegelns läge. Pulserna träffar marken i ett cirkelmönster som förflyttar sig framåt i flygriktningen. Punkttätheten är högst i stråkets kanter. Polygonskannern (figur 5 c) bygger också på en roterande spegel. Spegeln behöver inte göra några accelerationer och inbromsningar, vilket ger en jämnare punkttäthet. På grund av flygplanets rörelse framåt blir mönstret något vinklat mot flygriktningen.

Fiberskannern (figur 5 d) är uppbyggd av ett knippe med optiska fibrer. En emitterad laserpuls går in i en fiber i knippets ena ände, där fibrerna är samlade i en cirkel. I knippets andra ände, där pulsen går ut, ligger fibrerna på en linje. På så sätt överförs en cirkulär skanningsrörelse till ett linjärt mönster. En roterande spegel fördelar pulserna mellan fibrerna. Spegelarna som används är mindre än i andra skannrar och kan därmed rotera snabbare. Punkttätheten blir betydligt högre i flygriktningen än över stråkbredden. Ett sätt att kompensera för det är att låta fiberknippets emitterande ände svänga fram och tillbaka så att pulserna från varje fiber bildar ett sicksackmönster. [9]



Figur 5. Olika typer av skanningsmekanismer, och resulterande skanningsmönster.

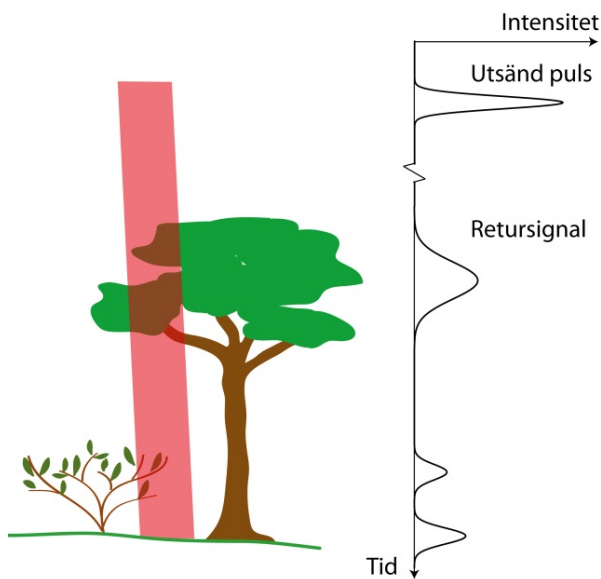
2.7 Laserpulsens interaktion med mark och vegetation

På sin väg mot marken kan den utsända laserpuls reflekteras av marken eller av objekt över marken: trädkronor, stammar, övrig vegetation, stenar, byggnader med mera. En hård och kompakt yta resulterar i en enda distinkt returpuls, men då laserstrålen träffar till exempel en trädkrona eller kanten av ett hustak kan en del av pulsen reflekteras medan resten fortsätter. Vatten har låg reflektans och ger därför i stort sett inga returer.

Ofta registreras, förutom koordinaterna, även intensiteten för varje detekterad laserretur. Många lasersystem använder nära infrarött ljus, och en yta som har hög reflektans i detta våglängdsområde, till exempel levande vegetation, ger returer med hög intensitet. Intensiteten hos returpulserna är dock svårtolkad. Den fysikaliska innebörden av intensitetsmättet är ofta odokumenterad, och en del skannerinstrument ändrar dessutom automatiskt den mottagande sensorns känslighet beroende på om ytan som registreras är ljus eller mörk.

Figur 6 illustrerar hur reflektionen från olika lager i vegetationen och slutligen från marken kan ge flera returer från en utsänd laserpuls. Antalet registrerade returer varierar mellan olika skannrar. I skog kommer ofta förstareturen från trädkronorna och sistareturen från marken. (Det finns också skannrar som med hög frekvens samplar hela laserreturen, så kallad full vågformslaser).

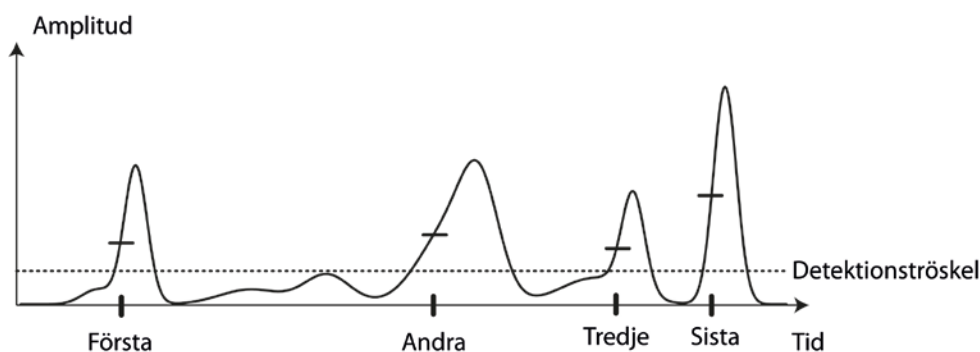
Höjdfördelningen hos laserreturerna ligger under den verkliga trädhöjdsfördelningen. Detta beror dels på att laserstrålen tränger igenom en del av trädkronan innan tillräckligt mycket energi reflekteras för att trigga en mätning i detektorn, dels på att pulserna inte bara träffar trädtopparna utan även trädkronornas sidor. Tät markvegetation kan också göra att returerna från mark och vegetation smälter samman så att markreturen delvis maskeras. Det kan leda till att returen registreras för tidigt och markhöjden överskattas.



Figur 6. Laserpulsens väg till marken. Denna situation genererar flera retur – först från trädet, sedan från busken och till sist från marken. Kurvan intill bilden representerar returpulsens intensitet som funktion av tid, med toppar orsakade av de olika objekten.

Den utsända laserpulsens längd är i storleksordningen meter, men osäkerheten i mätningarna mot en hård yta bör inte överstiga någon decimeter. Av stor vikt för mätningarna är därför den algoritm (beräkningsregel) som bestämmer vid vilken signalstyrka detektorn ska registrera en retur. En vanlig metod är att registrera en retur när en topp i retursignalen nått en viss andel, till exempel 50 %, av sitt maximala värde (figur 7). På så vis påverkas inte tidtagningen av returpulsens maximala styrka utan bara av dess bredd. Toppar som inte når upp över ett visst tröskelvärde, detektionströskeln, registreras inte alls.

Lasersystemen är kalibrerade för att ge rätt mätvärden när de träffar hårdgjorda ytor, till exempel asfalt. Vegetationen är däremot halvt genomtränglig för lasern, och det faktum att olika system kan använda olika principer för att bestämma när en returpuls ska detekteras bidrar till att mätvärden över vegetation från olika lasersystem inte är direkt jämförbara. Den dokumentation som finns tillgänglig för användaren om vilken metod som används är också ofta bristfällig.

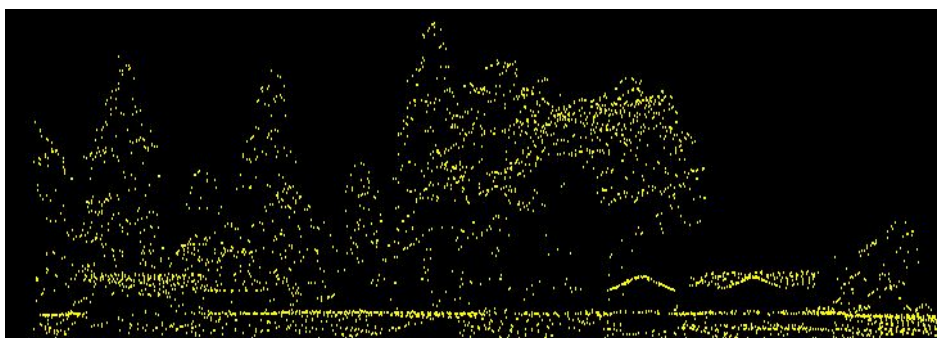


Figur 7. En vanlig metod för registrering av retursignal är att en topp i signalen triggar en registrering när den når en viss andel av sitt maximala värde, till exempel 50 % (vågräta streck). Endast toppar som når över detektionströskeln (prickad linje) registreras.

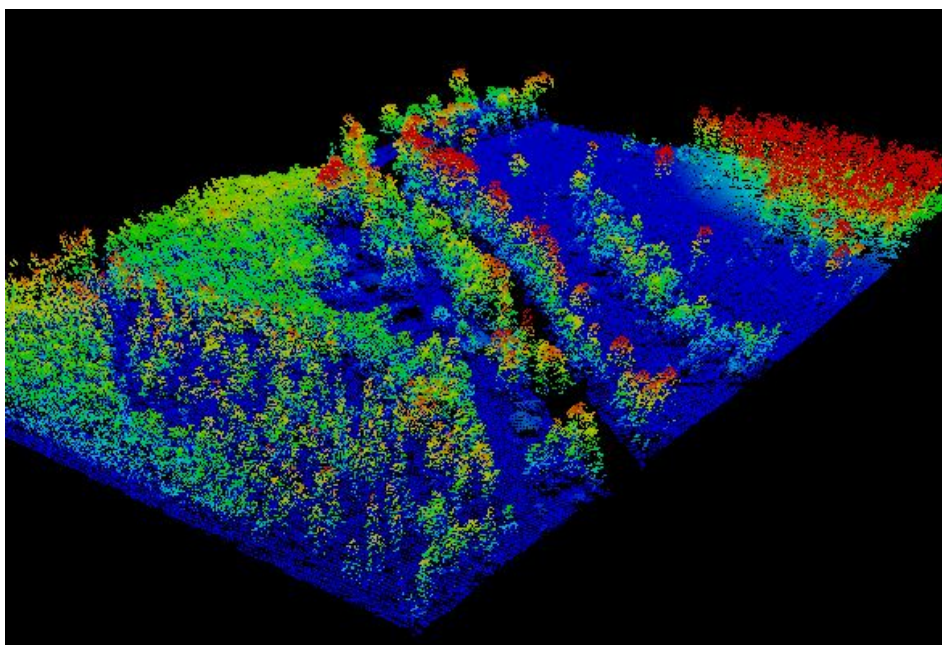
3 Förbearbetning av laserdata

De laserreturer som registreras vid skanningen bildar tillsammans ett så kallat punktmoln, en svärm av punkter koordinatsatta i tre dimensioner (figur 8 och 9). Innan data används för vidare analys krävs en viss förbearbetning. Denna görs i regel av dataleverantören och är inte specifik för skogliga tillämpningar. Förbearbetningen består av

- stråkutjämning och inpassning mot kontrollpunkter
- utrensning av felaktiga mätningar
- klassificering av laserreturer i klasserna mark, vatten och övrigt (inklusive vegetation)
- framtagning av markmodell.



Figur 8. Profil av laserpunktmoln där träd och byggnader framträder tydligt. Bilden bygger på data från Lantmäteriet.

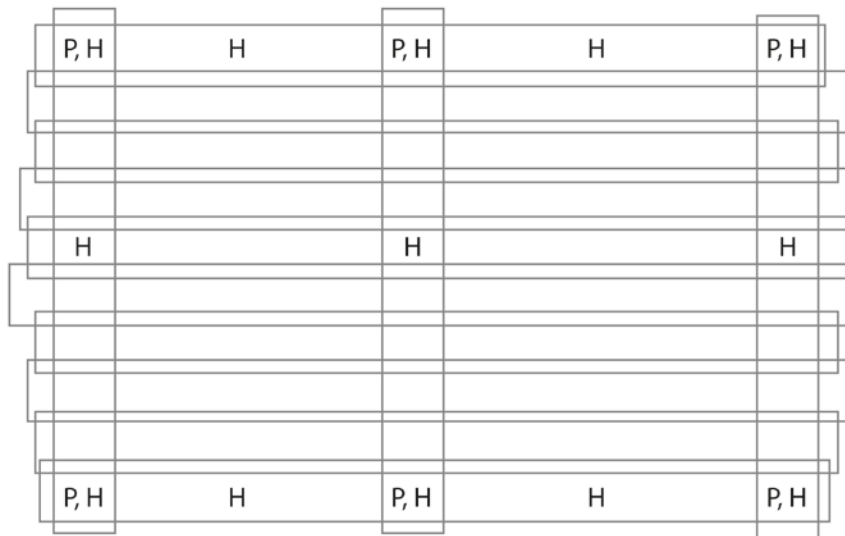


Figur 9. Punktmoln i tre dimensioner, sett snett uppifrån. Punkterna är färgade från blått till rött efter stigande höjd. Genom området löper en å. Bilden bygger på data från Lantmäteriet.

3.1 Stråkutjämning och inpassning mot kontrollpunkter

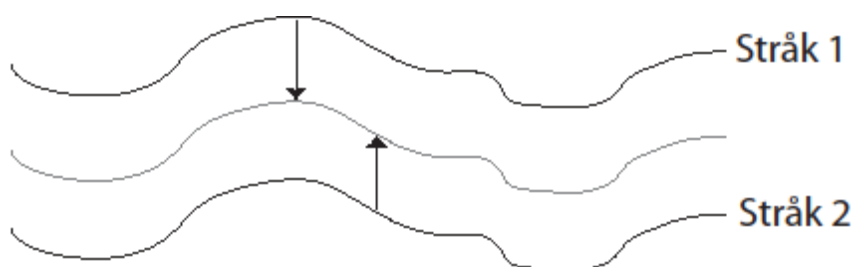
En viktig felkälla vid positioneringen av mätpunkter är navigeringssystemet med GPS och INS. När ett område skannas görs det i regel i stråk fram och tillbaka, med en viss

övertäckning i sidled mellan stråken. Man brukar också lägga tvärgående stråk i början, slutet och eventuellt mitten av stråken (figur 10). Osäkerheten i navigeringen varierar med tiden. Vid flygplaneringen anpassas stråklängden efter driften i systemet så att felet ska vara ungefär detsamma längs hela stråket. Mellan de olika stråken är skillnaden i navigeringsfel större vilket gör att stråken i allmänhet inte sammanfaller med varandra i vertikal och horisontell led.



Figur 10. Utlägg av stråk, tvärstråk, planstöd (P) och höjdstöd (H) i ett skanningsområde.

Data från olika stråk passas in i ett gemensamt skarvlöst block vid en bearbetning som kallas stråkutjämnning (figur 11). Därefter passas blocket med data in mot kontrollpunkter på marken. Planstöd används för att passa in data i sidled, och består av objekt som enkelt kan identifieras i punktmolnet. Exempel på lämpliga planstöd är hustak och diken. En annan möjlighet är att använda vitmålade vägmarkeringar som syns i intensitetsdata. Därefter passas stråken in i höjddled. Till höjdstöd vill man ha öppna, jämna ytor med liten lutning. Hårda ytor som asfalt och grus är lämpliga eftersom de ger hög noggrannhet i höjdmätningarna. [10]

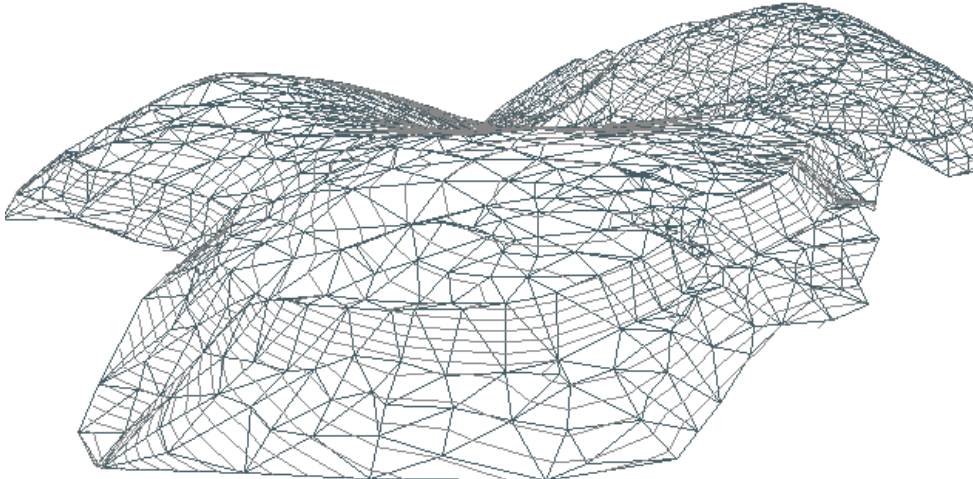


Figur 11. Höjddata i profil från två olika flygstråk. Vid stråkutjämnningen passas stråken in mot varandra, antingen mot en medelyta eller mot en känd yta.

3.2 Klassificering av markpunkter

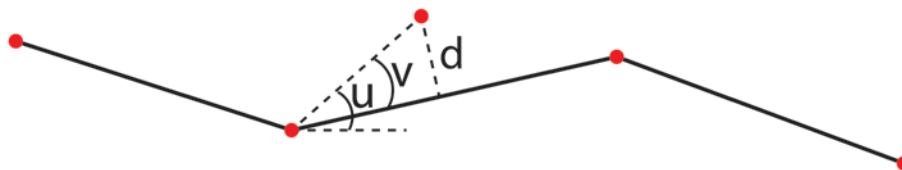
De felaktiga punkter som tas bort är sådana som ligger högt upp i luften till följd av reflektion från till exempel moln, dimma och fåglar, och sådana som tydligt ligger under marknivån. Låga punkter kan uppkomma när en puls reflekteras i flera steg så att retursignalen fördröjs, varvid punkten ser ut att ligga längre bort än den i själva verket gör. Klassificering av markpunkter kan göras på olika sätt, varav två beskrivs nedan.

En metod utvecklad på KTH av Peter Axelsson används i TerraSolids program TerraScan, som har fått mycket stor spridning [11]. Till att börja med läggs ett rektangulärt rutnät ut över punktmolnet, med en cellstorlek som bestäms av användaren. I varje cell väljs den lägsta punkten ut och klassas som en markpunkt. De utvalda punkterna binds samman i ett nät av trianglar som ger en ungefärlig representation av markytan. Denna datastruktur kallas för [TIN](#) (*Triangulated Irregular Network*) (figur 12). Nu börjar en ny process där man steg för steg lägger till nya punkter i nätverket så att det förtätas och följer markytan närmare. Punkter i



Figur 12. Markmodell i form av TIN (mörkgrå linjer). De ljusare linjerna är höjdkurvor. (Efter bild av [Robert Kropf](#) på [de.wikipedia](#). Licencierad av upphovsmannen under [GFDL](#)).

molnet undersöks en och en, och förkastas eller accepteras som nya markpunkter enligt vissa kriterier. Ett kriterium baseras på avståndet mellan punkten och den befintliga ytan, ett annat på hur mycket markytans lutning förändras om den nya punkten läggs till och ett tredje kriterium gäller den största tillåtna marklutningen (figur 13). Vilka värden som är lämpliga för dessa parametrar beror bland annat på topografin.

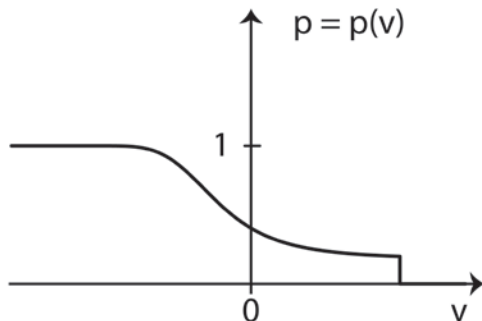


Figur 13. I Axelssons metod för markklassning accepteras en ny punkt som markpunkt om avståndet d till den befintliga ytan, vinkeln v mot ytan samt marklutningen u understiger valda gränsvärden [11].

En annan metod skapad av Karl Kraus och Norbert Pfeifer, vid Wiens tekniska universitet, går ut på att först skapa en yta med hjälp av alla punkter, där varje punkt ges lika stor vikt [12]. Ytan hamnar någonstans mellan marken och krontaket, och markpunkter återfinns med större sannolikhet under ytan än över. Varje punkt ges nu en vikt som beror av dess avstånd och riktning från ytan (figur 14). Ju lägre en punkt ligger i förhållande till ytan, desto högre vikt får den, ner till en gräns under vilken alla punkter får den maximala vikten 1.

Man sätter också ett avstånd över ytan där alla punkter får vikten 0 och alltså inte påverkar ytan. De nya vikterna används för att skapa en ny yta, genom att punkter med högre vikt ”drar” ytan till sig. Vikterna uppdateras igen, och ytterligare en ny yta skapas. Detta fortsätter ett antal gånger – ungefär 3-5 iterationer kan vara lagom. Efter den sista iterationen används

den senast beräknade ytan för att bestämma vilka punkter som ska klassas som markträffar. Denna metod används bland annat i FUSION (http://forsys.cfr.washington.edu/JFSP06/lidar_&_ifsar_tools.htm), en programvara för bearbetning av laserdata för skogliga tillämpningar.



Figur 14. Vikt p som funktion av avstånd v från ytan, i Kraus och Pfeifers metod [12]. Över ytan ($v > 0$) avtar vikten för att över ett visst värde bli 0. Punkter under ytan ($v < 0$) får högre vikt ju lägre de ligger, dock aldrig högre än 1.

3.3 Framtagning av markmodell

Efter klassningen av markpunkterna görs en digital markmodell (*Digital Elevation Model*, DEM), i form av ett TIN eller ett raster. Om markklassningen gjorts med Axelssons metod, som beskrevs i föregående avsnitt, finns redan ett färdigt TIN. Har man istället använt en metod som enbart klassar punkterna i mark och övrigt, till exempel Kraus och Pfeifers metod ovan, har man ett antal markklassade punkter som kan kopplas samman till ett TIN. Till fördelarna med ett TIN hör att alla ingående markpunkter behåller sina koordinater i planet, så att noggrannheten i punktdata bibehålls. Det är dock en komplex datastruktur som tar längre tid att skapa och bearbeta än ett raster.

Ett raster kan genereras utifrån ett TIN genom att en rastercell tilldelas den höjd som TIN-datastrukturen ger i cellens mitt. Man kan även skapa ett raster direkt från en samling markklassade punkter, antingen genom att använda markpunkterna inom rasterrutan eller genom en interpolering där även punkter strax utanför rasterrutan ingår. I ett raster behålls inte punkternas exakta position och man utnyttjar därmed inte mätningarnas fulla noggrannhet. Raster är ändå den vanligaste formen av markmodell för användning i skogliga tillämpningar, eftersom de är mycket praktiska att arbeta med.

Laserdatats punkttäthet på marken är mycket viktig för både detaljeringsgraden och noggrannheten hos den slutliga markmodellen. Punkttätheten påverkas bland annat av pulsfrekvensen, flyghöjden och vegetationen. Tät vegetation gör att färre pulser träffar marken. Markmodellens noggrannhet påverkas även av noggrannheten i avståndsmätningarna, se avsnitt 2.5.

4 Databearbetning för skogliga tillämpningar

Vid tätheter om ca 1 returnerad laserpuls/m², till exempel i Lantmäteriets NNH-data, får man inte detaljerad information om de enskilda träden, men sett över en lite större yta beskriver punkternas höjdfördelning skogens höjd och täthet även då glesare data används. I detta kapitel beskrivs hur man tar fram olika mått på kronhöjdsfördelningen. Denna del av databearbetningen kan i många fall göras av dataleverantören, men kräver en viss kunskap om skogliga tillämpningar. Måtten från laserdata kan användas för visuell tolkning och tillsammans med fältdata även för skattningar av skogliga data för rasterrutor, som i sin tur kan aggregeras till bestånd.

Tätare skanning ger, åtminstone för de dominerande träden, flera returerna från varje träd. För att kunna identifiera enskilda träd och även mäta deras kronform används ofta laserdata med en täthet om ca 10 pulser/m², men även lägre tätheter har visat sig fungera [13]-[15]. Mått som används vid skattning av enskilda träd beskrivs i avsnitt 7.2.

4.1 Beräkning av kronhöjdsfördelningar

När en markmodell tagits fram (avsnitt 3.3) kan höjden över marken för varje punkt beräknas som

$$h = z_p - z_m, \quad (4)$$

där z_p och z_m är punktens respektive markmodellens höjd. Därefter kan statistiska mått på punkternas höjdfördelning beräknas. Tabell 1 visar några vanligt förekommande mått på kronhöjdsfördelning för rasterrutor och provytor. Observera att tabellen endast innehåller ett urval av mått och att flera olika beteckningar och definitioner förekommer i litteraturen, se till exempel [16], [17] och [18]. Måtten används både för manuell tolkning och för automatiserade metoder, till exempel skattning på beståndsnivå. För samtliga mått i tabellen gäller att man använder höjden h över markmodellen. Vid beräkning av höjdmått använder man i regel enbart vegetationsträffar över en tröskel på ca 2 m över marken, för att undvika att returerna från mark och låg vegetation påverkar måtten. Det kan också finnas anledning att beräkna måtten separat för till exempel första- och sista-returerna.

Med höjdpercentil menas den höjd inom ett område, till exempel en rastercell, under vilken en viss andel av punkterna i trädsiktet återfinns; 10 % av punkterna finns under den tionde percentilen, h_{10} , 20 % ligger under h_{20} och så vidare upp till h_{100} som motsvarar den högsta punkten. Det starkaste sambandet med skogens höjd finns i regel kring h_{90} . h_{100} undviks ofta då den är känslig för enstaka höga träd och felaktiga laserpunkter, och därmed även är mer beroende av punkttätheten än de lägre percentilerna.

Andelen av alla returnerade laserpulser som reflekteras från träden är ofta starkt korrelerad med kronslutenheten. Denna andel kallas för vegetationskvot, här betecknad V , och brukar beräknas som antal returerna från vegetationen dividerat med totala antalet returerna.

Så kallade krondensiteter beräknas genom att dela in höjdskillnaden mellan den lägsta och högsta vegetationsträffen i ett antal lika höga fraktioner, ofta 10 stycken. Sedan beräknas andelen returerna över respektive fraktion. Även vegetationsreturernas maxhöjd, medelhöjd, standardavvikelse och variationskoefficient är mått som ibland används.

Tabell 1. Vanligt förekommande mått på kronhöjdsfördelning

Mått	Beteckning	Definition ^a
Höjdpercentil	h_x	den höjd över marken under vilken x % av vegetationsträffarna finns
Vegetationskvot	V	n_{veg}/n_{tot}
Krondensitet	d_y	n_y/n_{tot}
Medelhöjd	h_{mean}	$\frac{\sum_{i=1}^{n_{veg}} h_i}{n_{veg}}$
Standardavvikelse	h_{sd}	$\sqrt{\frac{1}{n_{veg} - 1} \sum_{i=1}^{n_{veg}} (h_i - h_{mean})^2}$
Variationskoefficient	h_{cv}	$\frac{h_{sd}}{h_{mean}}$

^a n_{veg} är antalet returur från vegetation, n_{tot} det totala antalet returur och n_y antalet returur över höjdfraction y om avståndet mellan den lägsta och högsta vegetationsträffen delas upp i ett antal lika stora fraktioner. h_i är höjden över markmodellen för punkt i .

5 Visuell tolkning och segmentering av laserdata

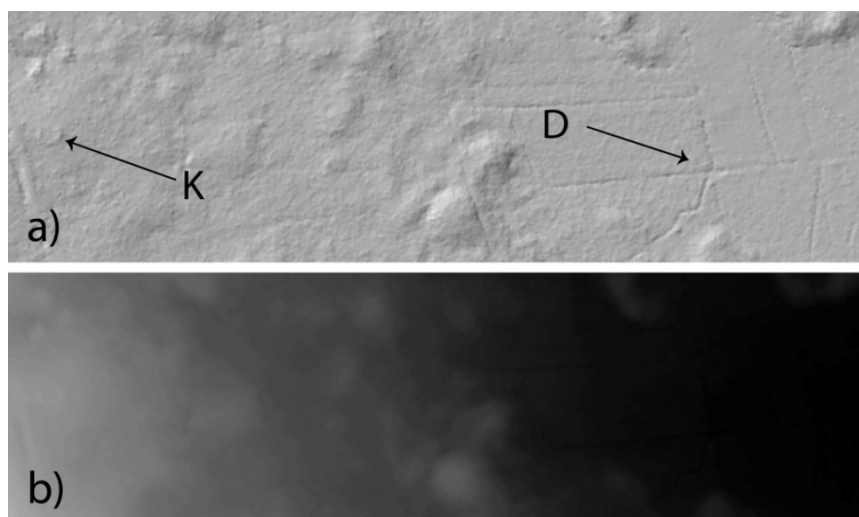
Analys av laserdata kan göras automatiskt eller manuellt (visuellt), och med eller utan stöd av fältmätta skogliga data. Detta kapitel behandlar tillämpningar som inte kräver användning av provytor med fältdata. De flesta av exemplen nedan handlar om visuell tolkning. Om skogliga mätvärden inte behövs kan laserdata också användas direkt för automatiserad identifiering av exempelvis de områden där skogen är högst eller tätast, utan stöd av fältreferensytor. En annan tillämpning som tas upp är automatisk segmentering (beståndsavgränsning).

5.1 Markmodellens användningsområden

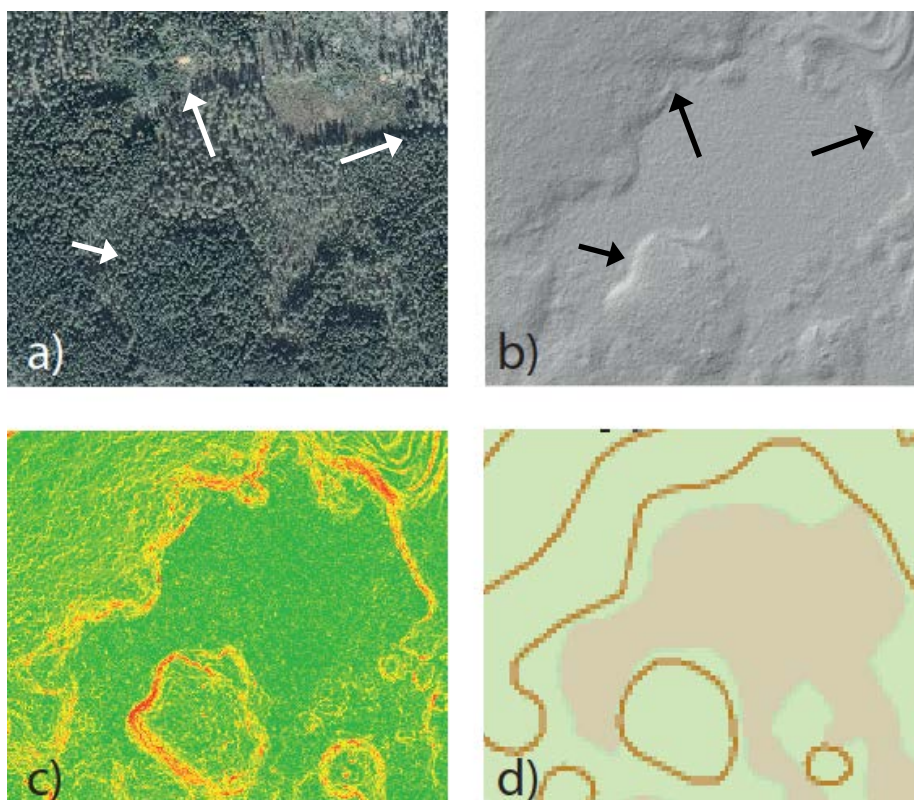
Av en markmodell i rasterform kan man göra en så kallad terrängskuggning. Den digitala markmodellen räknas om så att den återger skuggningen om den belyses av en artificiell ljuskälla. De skuggor som skapas gör det möjligt att upptäcka strukturer som inte syns lika tydligt i en vanlig rasterbild där grånivåerna används för att visa höjd. Om ljuskällan placeras i något av de övre hörnen förstår vi instinktivt modellen rätt – höjder ser ut som höjder och sänkor som sänkor. Genom att belysa modellen från olika vinklar framträder fler strukturer, vilket kan vara till hjälp när man letar efter vissa objekt.

En terrängskuggad markmodell kan användas för att hitta till exempel kolbottnar och diken. Kolbottnar är rester från kolframställning i mila eller kolningsgrop. Rester efter kolmilor kan vara runda (resmila) eller fyrkantiga (liggmila) och består ofta av en vall, ett dike eller ett antal gropar runt mittpartiet. Dessa kulturlämningar får inte markberedas eller planteras [19]. Figur 15 visar en trolig kolbotten i en terrängskuggad markmodell. Även diken och vattendrag framträder i en terrängskuggad bild. Vid till exempel skogsgödsling är det viktigt att känna till var det finns diken så att de kan undvikas.

I ett ortofoto kan det vara svårt att avgöra var gränsen går mellan myr och fast mark. Figur 16 a) och b) visar ortofoto och terrängskuggning för samma område. Pilarna pekar på myrkanter som kan vara svåra att se i fotot men är tydliga i terrängskuggningen. Markmodellen kan också användas för att beräkna branthet, sluttningsriktning, samt sannolikt fuktig mark, vilket kan vara till nytta vid planering av avverkningar.



Figur 15. a) Terrängskuggad markmodell och b) markmodell där grånivån anger höjd. Terrängskuggningen gör att ojämnheter i terrängen framträder tydligt, och avslöjar här en trolig kolbotten (K) samt ett antal diken (D). Markmodellen har här beräknats med 1 meters upplösning. Bilden bygger på data från Lantmäteriet.

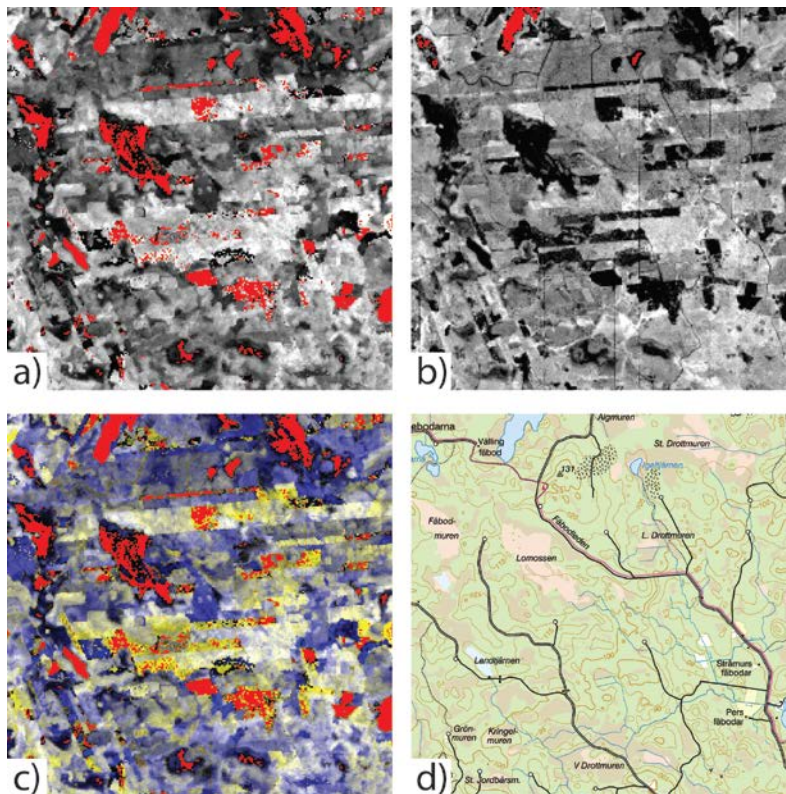


Figur 16. a) Ortofoto, b) terrängskuggning, c) branthet och d) terrängkarta för samma område. Den plana ytan i b) och det ljusbruna i d) är en myr. Pilarna markerar myrens kanter. Skalan i c) går från grönt till rött mot brantare lutning. Terrängskuggning och branthetsbild bygger på laserdata från Lantmäteriet. Ortofoto och karta: © Lantmäteriet, i2012/901.

5.2 Laserdata i rasterform

De höjd- och täthetsmått för laserreturer från trädskiktet som beskrivs i avsnitt 4.1 kan beräknas för rasterceller och visas i någon GIS-programvara. En hög höjdpercentil, till exempel h_{95} , och vegetationskvot, V , är två mycket användbara mått när man snabbt vill få en översikt av skogens relativa höjd respektive täthet.

Ett första steg kan vara att titta på rastren ett och ett (Figur 17 a och b). Man kan också kombinera de två rastren till en färgbild (Figur 17 c). Här används h_{95} i röd och grön kanal vilket ger gult, och vegetationskvot i blå kanal. Hög skog med låg kronslutenhet framträder då som gul, låg men tät skog blir blå och områden där både h_{95} och V är höga blir ljusgrå till vita. Figur 17 d visar terrängkartan för jämförelse. I detta fall beräknades måtten enbart för rasterceller med minst 10 returer. Celler med färre returer, framför allt vattenytor och myrar, har färgats röda. Vid beräkning av h_{95} användes bara punkter över 2 meter, medan alla punkter användes vid beräkning av vegetationskvoten. Fler celler saknar därför data i h_{95} -rastret. Det går även att automatiskt skapa polygonskikt utifrån de områden där h_{95} och V ligger inom valda intervall. Viktigt att komma ihåg är att h_{95} och V inte är detsamma som trädhöjd och kronslutenhet, utan bara mått som korrelerar med dessa.



Figur 17. a) h_{95} , b) V, c) kombination av h_{95} (gult) och V (blått) samt d) terrängkartan. Rött indikerar områden där lasermått inte har beräknats, på grund av för få returerna. Rastren bygger på laserdatabas från Lantmäteriet. Karta: © Lantmäteriet, i2012/901.

5.3 Automatisk segmentering

Segmentering av en bild innebär att den delas upp i mindre delområden eller segment, där varje område är förhållandevis homogent med avseende på till exempel färg eller textur. På motsvarande sätt kan även raster med lasermått, till exempel höjdpcentiler, utgöra en grund för automatisk segmentering. Inom skogsbruket kan automatisk segmentering användas för beståndsavgränsning. Oftast behövs då även en viss manuell efterredigering. Segmentering används även för detektering av enskilda träd, vilket beskrivs i avsnitt 7.1.

Det finns flera strategier för segmentering. En är så kallad *region growing*, där idén är att två angränsande områden slås ihop om de är tillräckligt lika. Hopslagningen fortsätter tills något kriterium har uppfyllts, till exempel att *i)* segmenten uppnått en viss medelstorlek eller *ii)* ett visst antal iterationer har gjorts utan att någon hopslagning skett. Man kan också sätta en minsta och största tillåten segmentstorlek.

Ofta kan segmenteringsprogrammet använda data från flera olika dataskikt. Ett raster med höjdmått från laser är användbart för att skilja mellan olika höga bestånd och på motsvarande sätt kan vegetationskvoten användas för att skilja på olika täta bestånd. Flygbilder och satellitbilder innehåller information om färg som är användbar för att skilja mellan olika trädslag och marktyper. I en flygbild avbildas dock träden från olika vinklar i olika delar av bilden, varför segmentering direkt i ett ortofoto kräver program som tar hänsyn till detta för att resultatet ska bli homogent. Segmenteringar är svåra att utvärdera objektivt och ofta är det därför upp till slutanvändaren att avgöra om resultatet är tillräckligt bra.

6 Areabaserade skattningar

Med så kallade areabaserade metoder skattas skogliga variabler för grupper av träd inom ytenheter om ca 100-500 m². Det laserskannade området delas in i ett rutnät (raster) av kvadratiska celler, eller pixlar. Ett antal provytor, oftast cirkulära, med ungefär samma area som rastercellerna, inventeras i fält för mätning och beräkning av skogliga data. Vanliga variabler som beräknas är grundytbevåg medelhöjd, stamvolym, grundyta, stamantal och medeldiameter. För både rasterceller och provytor beräknas lasermått enligt beskrivning i kapitel 4. Laser- och fältdata från provytorna kopplas sedan ihop så att man utifrån laserdata kan skatta skogliga variabler för rastercellerna inom hela det skannade området. Resultatet kan sedan aggregeras till beståndsnivå genom att man beräknar medelvärdet av alla rasterceller som ingår i ett bestånd.

De idag vanligaste skattningsmetoderna är regression och k-MSN. En tredje användbar metod kallas Random Forests. Detta kapitel ger en översiktlig beskrivning av de tre metoderna och hur de brukar användas i praktiken.

Den ursprungliga ”areabaserade metoden” bygger på att sambandet mellan laserdata och skogliga data skattas med regressionsanalys. Skattningarna brukar baseras på enbart laserdata och man delar i regel inte upp de skattade variablerna per trädslag. Istället kan bestånd med olika dominerande trädslag skattas i olika strata. Regression ger väntevärdesriktiga skattningar, det vill säga att värdet på de skattade variablerna i genomsnitt blir rätt. Eftersom regressionsmetoden är modellbaserad och tillåter interpolering (och inom rimliga gränser även extrapolering) fungerar den med relativt lite fältdata. Provytorna måste dock vara någorlunda representativa – man bör till exempel inte ha med en övervikt av provytor som är ovanligt täta för sin höjd. En begränsning med regression är att varje variabel skattas separat, vilket gör att icke representativa kombinationer av skattade variabler kan uppstå.

k-MSN-metoden har blivit vanlig då man vill kombinera laser- och flygbildsdata för att göra trädslagsspecifika skattningar. Metoden bygger på imputering, vilket innebär att man till respektive rastercell ”lyfter in” skogliga data från provytor som har liknande egenskaper enligt laserdata. k-MSN kräver därför betydligt mer fältdata än regression, jämnt spritt över hela variationsvidden. En fördel med k-MSN är att den skattar många variabler simultant vilket ger mer naturliga relationer mellan skattade variabelvärden.

De areabaserade metoderna bygger på att statistiska mått (till exempel höjdpercentiler och vegetationskvot) för de laserpulser som träffar en provyta korreleras med skogliga data för provytan. Således behövs ”många laserpulser per provyta” för att till exempel höjdpercentiler ska kunna beräknas. Hur tät laserskanningen behöver vara beror på flera saker, bland annat provytestorleken. I praktiken har areabaserad skattning visat sig fungera bra även med relativt glesa data, ned mot 0,5 pulser/m², vilket gör att till exempel Lantmäteriets NNH-data kan användas. En nackdel med NNH-data är dock att den maximala öppningsvinkeln är upp till 20°. Vid skanning för skogliga ändamål rekommenderas ofta att öppningsvinkeln begränsas till 15° eftersom bland annat vegetationskvoten påverkas något vid högre öppningsvinklar.

Beträffande årstid så har skattningsresultaten i barrdominerade nordiska skogar blivit lika bra före lövsprickning och efter lövfällning, som under sommaren. Data från perioden med pågående lövsprickning eller lövfällning bör dock undvikas, eftersom mängden löv då kan variera inom projektområdet och mellan olika arter. Man bör även undvika att skanna när marken är snötäckt eftersom markhöjderna då blir felaktiga.

6.1 Insamling och bearbetning av fältdata

Provytor för fältdatainsamling läggs ut så att den skogliga variationen i det område som ska skattas finns representerad i fältmaterialet. En rent systematisk sampling, till exempel i form

av ett regelbundet rutnät med provytor över hela området, ger ofta för få ytor i bestånd av ovanlig karaktär. Ett sätt att få tillräckligt många provytor från alla typer av skog, utan att kostnaderna blir för höga, kan istället vara att först stratifiera området enligt till exempel trädslag och ålder. Sedan läggs ett visst antal ytor ut i varje stratum enligt någon objektiv metod. Fält- och fjärranalysdata (laser och flygbilder) bör samlas in nära varandra i tiden, gärna samma år. Det finns dock flera fördelar med att vänta med insamlingen av fältdata tills efter skanningen är gjord. Först då vet man vilka områden som verkligen blev täckta med användbara data. Laserdata kan även vara ett stöd vid valet av fältreferenser.

Om provytornas fältmätta läge inte överensstämmer med laserdata kan skattningarnas kvalitet försämrats. Koordinatsättning av provytorna bör därför göras med DGPS (differentiell GPS). Vid DGPS används två GPS-mottagare: en som tas med ut i fält och en som placeras på en väl inmätt punkt i närheten. Den senare används för att mäta skillnaden mellan den position som ges av satelliterna och den kända positionen för punkten. Information om avvikelser skickas till den GPS som används i fält så att den uppmätta positionen för provytan kan korrigeras. Det är också vanligt att istället för referensmottagaren använda data från Lantmäteriets SWEPOS-nät, som är ett rikstäckande nät av referensstationer för GNSS.

I flertalet rapporterade försök med laserskanning av skog har man koordinatsatt provytorna med 1 meters noggrannhet eller bättre, se till exempel [16] och [18]. Positioneringsnoggrannheten är viktigare ju mer heterogen skogen är och ju mindre provytorna är.

Separat fältdata kan samlas in för utvärdering av skattningsnoggrannheten på beståndsnivå, men eftersom detta medför extra kostnader brukar man främst använda sig av korsvalidering på provytenivå, vilket beskrivs nedan.

6.2 Regression

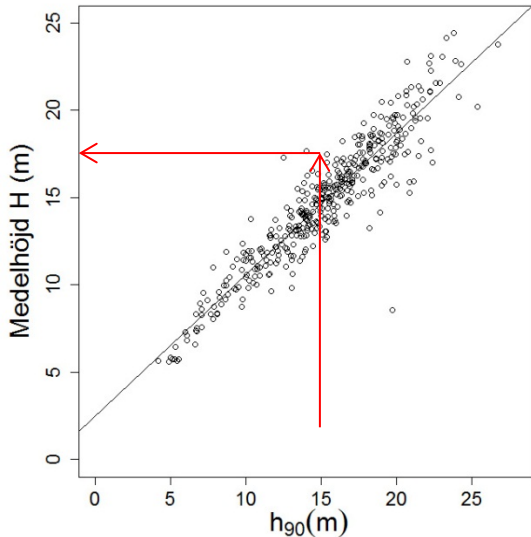
Regression är en statistisk metod för att finna ett samband mellan två eller flera slumpvariabler (stokastiska variabler). Metoden är modellbaserad, det vill säga den utgår ifrån att det finns en speciell matematisk modell som relaterar de två variablerna till varandra. Även om metoden bygger på en hel del teori är grundidén enkel. Att arbeta med regressionsanalys är något av ett hantverk, men det går att komma långt med ganska enkla modeller. Detta avsnitt inleds med ett exempel och en något förenklad beskrivning av regression, och beskriver sedan hur metoden används i praktiken.

6.2.1 Exempel på enkel linjär regression

Figur 18 visar ett spridningsdiagram med fältmätt grundyttevägd medelhöjd, H , på y-axeln och 90:e höjdpercentilen, h_{90} , på x-axeln. Varje punkt representerar en provyta där man både har fältmätningar och laserdata. I avsnitt 4.1 nämndes att det brukar finnas ett starkt samband mellan skogens höjd och h_{90} , vilket blir tydligt i spridningsdiagrammet där punkterna ligger väl samlade längs en linje. Genom att undersöka sambandet mellan medelhöjd och h_{90} kan man sedan skatta H i områden där fältdata saknas. Observera att h_{90} inte är detsamma som skogens medelhöjd, utan bara korrelerad med denna! Korrelation är ett mått på styrkan i ett linjärt samband mellan två variabler, och korrelationskoefficienten kan anta värden mellan -1 och 1. Om y ökar med x och punkterna ligger exakt på en linje är korrelationen 1 vilket innebär ett perfekt, positivt linjärt samband. Om y istället minskar med x , och punkterna ligger exakt på en linje, är sambandet perfekt negativt och korrelationen -1. Ju närmare 0 korrelationen är, desto svagare samband. I det dataset som använts i figur 18 är korrelationen mellan H och h_{90} 0,93 vilket innebär ett mycket starkt, positivt samband.

I diagrammet finns en provyta som tydligt avviker från de andra, ungefär vid $h_{90} = 20$ m och $H = 8$ m. Sådana uppenbara så kallade uteliggare bör i regel tas bort innan man gör

regressionsanalysen, eftersom de annars kommer att försämra modellen. Man bör dock verifiera att det finns sakskäl att ta bort uteliggaren. Orsaker till uteliggare kan vara exempelvis geometriska fel, avverkningar som skett mellan laserskanning och fältdatansamling, eller ren förväxling av provytor.



Figur 18. Spridningsdiagram med grundtyevägd medelhöjd, H , för provytor plottad mot 90:e höjpercentilen, h_{90} , i laserdata. Pilarna visar hur regressionsfunktionen (heldragen svart linje) kan användas för höjdsattning.

Till att börja med måste man hitta den modell som bäst passar observerade data. I fallet med H och h_{90} ser den ut att vara en rät linje. Rätas linjens ekvation skrivs som

$$y = k \cdot x + m, \quad (5)$$

där k är linjens lutning och m är värdet på y i den punkt där linjen skär y -axeln. Punkterna i diagrammet ligger inte exakt på en linje; det finns en viss slumpmässig avvikelse eller spridning kring linjen. Vi skriver därför sambandet mellan H och h_{90} som

$$H_i = \alpha + \beta \cdot h_{90,i} + e_i, \quad (6)$$

där index i betecknar en viss provyta och e_i är avvikelsen från linjen för just den provytan. Med hjälp av regressionsanalys kan vi bestämma de värden på α och β som minimerar kvadratsumman av avstånden e , de så kallade residualerna, mellan mätpunkterna och linjen, under bivillkoret att medelvärdet av alla avvikelser är lika med noll. Ekvation 6 beskriver H som en funktion av h_{90} , och de två variablerna kallas för beroende respektive oberoende. H kan också kallas för responsvariabel och h_{90} för förklarande variabel.

Regressionsanalysen ger dessutom uppskattningar av hur starkt beroende de två variablerna är av varandra. Ett vanligt mått är förklaringsgraden. Denna storhet betecknas ofta R^2 och anger hur stor del av variansen i y -variabeln som regressionsmodellen beskriver. Förklaringsgraden är ett av de verktyg som brukar användas för att välja ut vilka variabler som ska vara med i modellen. Ett annat viktigt mått på modellens riktighet är spridningen kring regressionslinjen. När en tillförlitlig funktion har skattats kan den sedan användas för att skatta medelhöjden i områden där man har laserdata men saknar fältmätningar. Man kan dock inte bestämma H_i exakt – felet e_i förblir okänt.

Exemplet ovan tar upp enkel linjär regression. I många fall behövs flera oberoende variabler för att beskriva den beroende, och man talar då om multipel linjär regression. Man kan också behöva transformera de oberoende variablerna: kvadrera, multiplicera två oberoende med varandra och så vidare. Vissa samband är icke-linjära och kan lineariseras med hjälp av logaritmisk transformation innan regressionen görs. Detta tas inte upp här, och den som vill gå in djupare på teorin hänvisas till statistisk litteratur.

6.2.2 Regressionsmetoden i praktiken

Eftersom skattningsresultaten vanligtvis aggregeras till beståndsmedelvärden är det viktigt med en bra beståndsindelning. I Norge görs i regel beståndsindelningen och trädslagsbedömningen med manuell flygbildstolkning i digitala fotgrammetriska arbetsstationer, varefter övriga skogliga data skattas med stöd av laserdata. Beståndsindelningen kan också göras med stöd av segmentering av laserdata (avsnitt 5.3). Manuell efterreditering kan behövas och flygbilder är naturligtvis också användbara i detta arbete. Beståndsgränserna lagras i vektorformat i ett GIS.

Bestånden och provytorna delas ibland in i grupper efter till exempel trädslag, ståndortsindex eller ålder, så kallad stratifiering. Dessa egenskaper påverkar trädkronornas form, vilken i sin tur påverkar sambanden mellan lasermått och skogliga variabler. Skattningen kan därför få högre noggrannhet om den görs för mer homogena grupper, men det finns också exempel på försök där stratifiering inte har förbättrat resultatet.

När fältdatainsamling, eventuell stratifiering, och bearbetning av laserdata är klara tar regressionsanalysen vid. Det finns en mängd statistikprogramvaror som kan användas för att utföra beräkningarna, men för att resultatet ska bli bra krävs både statistik- och sakkunskaper. En regressionsfunktion tas fram för varje skoglig variabel som ska skattas, eventuellt uppdelat per stratum. Ett första steg är att bestämma vilken typ av modell som ska konstrueras. Residualerna ska vid regression vara jämnt fördelade. Om de ökar eller minskar med den oberoende variabeln så kan data behöva lineariseras, till exempel genom logaritmering.

Sedan väljs de oberoende variablerna ut. Man kan antingen börja med en och successivt lägga till nya, eller börja med många och stryka dem som inte är av betydelse. Den förstnämnda metoden är mer lätthanterlig, då man bör sträva efter en funktion med relativt få oberoende variabler. Man måste också fundera på vilka lasermått som rimligtvis kan ha ett samband med de variabler som ska skattas. Till exempel är det troligt att virkesvolym hänger samman med både höjd- och täthetsmått. Automatiska metoder, exempelvis *stepwise regression* eller *best subset regression*, kan ge vägledning i valet av variabler. Man bör dock inte lita blint på resultatet eftersom metoderna är rent matematiska och inte nödvändigtvis säger något om verkliga orsakssamband.

De ingående lasermåtten bör inte vara för starkt korrelerade med varandra, till exempel två närliggande höjdpercentiler. För varje variabel som lagts till eller tagits bort görs en ny, temporär, regressionsfunktion. Genom att analysera sambandet mellan residualerna från den temporära regressionsfunktionen och varje kandidat till ny variabel avgörs vilken variabel som ska läggas till närmast. Tabell 2 visar exempel på regressionsfunktioner som har använts för att skatta olika skogliga variabler.

De färdiga regressionsfunktionerna (en för varje skattad variabel och stratum) appliceras på rastret med laserdata för skattning av de skogliga variablerna. De resulterande rastren i kombination med beståndsgränserna används för att beräkna beståndsmedelvärden. Resultat från några svenska försök med regressionsmetoden visas i tabell 3 [1].

Som nämndes i avsnitt 6.1 brukar man ofta använda så kallad korsvalidering för att utvärdera resultatet. Det innebär att man utelämnar en (eller ibland några) provytor åt gången, skattar funktionsparametrarna och använder dessa för att skatta ett värde för den eller de

provytor som utlämnats. Detta görs för alla provytor och skattningsresultatet jämförs sedan med fältmätningarna på ytorna.

Tabell 2. Exempel på regressionsfunktioner för skattning på beståndsnivå, från studier av Næsset [16] och Holmgren [17]. Från Næssets studie redovisas funktioner framtagna för mogen skog på goda boniteter

Studie	Variabel	Funktion ^a
Næsset	Medelhöjd, H	$\ln(H) = 0,35 + 0,529 * \ln(h_{90f}) + 0,355 * \ln(h_{maxf})$
Holmgren	Medelhöjd, H	$H = 1,46 + 0,95 * h_{95}$
Næsset	Stamvolym, V	$\ln(V) = 3,151 + 3,027 * \ln(h_{80l}) - 1,66 * \ln(h_{maxf}) + 1,223 * \ln(d_{50f})$
Holmgren	Stamvolym, V	$\ln(V) = -2,50 + 0,87 * \ln(D_v) + 1,49 * \ln(h_{90}) - 2,44 * relstd + 0,44 * D_p$
Næsset	Medeldiameter, D _g	$\ln(d_g) = 0,406 + 0,892 * \ln(h_{90f}) - 0,374 * \ln(d_{1f})$
Næsset	Stamantal, N	$\ln(N) = 10,33 - 0,487 * \ln(h_{0l}) - 0,667 * \ln(h_{cvf}) + 1,187 * \ln(d_{50f})$

^aSubskript _f och _l indikerar att måttet är beräknat för enbart första- respektive sistareturer. h_{max} är maxhöjden hos vegetationsträffarna, d_{50f} är antal förstareturer från trädkronor över h_{50} dividerat med totalt antal returer. D_v är antal förstareturer över 3 m dividerat med totalt antal returer. $relstd$ är standardavvikelsen i höjd dividerad med h_{95} . $d_p = (n_1+n_3)/(n_1+n_2)$ där n_1 är antal endareturer, n_2 är antal förstareturer och n_3 är antal förstareturer där andrareturen är över 3 m.

Tabell 3. Resultat från några svenska försök med regressionsmetoden, utvärderade på beståndsnivå och kompenserade för samplingsfel [1]

Skattad variabel	Medelfel (%)
Volym/ha	6-14
Grundtytevägd medeldiameter	7-13
Stamantal/ha	12-24
Grundtytevägd medelhöjd	3-6

6.3 k-MSN

Vid regressionsanalys antar man att det finns ett matematiskt samband som beskriver förhållandet mellan beroende och oberoende variabler. I så kallade icke-parametriska metoder görs inte det antagandet och man tar inte fram någon modell. Ett exempel på en sådan grupp metoder är imputering. En rastercell tilldelas den trädhöjd, volym etc. som uppmätts på den provyta som mest liknar rastercellen. Likhet mäts här i de oberoende variablerna, det vill säga lasermått, färg från flygbilder och så vidare.

k-MSN (*k Most Similar Neighbors*) bygger på imputering. I k-MSN, och andra liknande metoder, väljer man ut ett antal provytor som liknar rastercellen och beräknar ett viktat medelvärde av dessa. k står för det antal provytor man använder, och värdet kan variera mellan 1 och ca 20 beroende på syftet [18], [20]. Ett högt k ger bättre genomsnittliga skattningsresultat, men kan ge mindre realistiska relationer mellan de skattade variablerna på en given yta. För att välja ut grannarna används kanonisk korrelationsanalys. Denna del är i sig en parametrisk metod, som bygger på att den linjära kombination av beroende variabler (här skogliga data) som är mest korrelerad med en kombination av oberoende data (till exempel lasermått) räknas ut. Detta ger vikter för de olika lasermåtternas betydelse vid imputeringen. Den som vill veta mer hänvisas till vetenskaplig litteratur på området [21].

Alla beroende variabler skattas samtidigt vilket gör att de naturliga förhållandena mellan skattade variabler bevaras bättre än vid regression. Vid skattning med k-MSN används ofta mått från både laserskanning och flygbilder. Flygbilderna kompletterar laserdata genom att färgen innehåller mer information om trädslag än vad kronhöjdsfördelningen gör.

Flygbilderna har ofta en pixelstorlek på några decimeter, vilket innebär att varje provyta och rastercell innehåller många flygbildspixlar. Det finns olika sätt att använda informationen i flygbilderna. En metod är att för en provyta eller rastercell beräkna medelvärdet av de ingående flygbildspixlarna. Det görs för varje spektralband (färg) separat. Man kan dessutom använda kvoter mellan olika färger, till exempel kvoten mellan nära infrarött och rött ljus, och olika texturmått. Ett problem vid automatisk bearbetning av flygbilder är dock att trädens solsida dominerar i den ena delen av bilden och skuggsidan i den andra, och att större delar av trädkronorna projiceras i bildens ytterkanter än i dess centrum. Automatisk användning av flygbilder kan därför fordra avancerad bildbearbetning för att bli bra. Ett första steg är att använda metoder som skiljer på den spektrala informationen som kommer från den solbelysta respektive den skuggade delen av trädkronan. Valda mått från flygbilden används tillsammans med lasermått som oberoende variabler i skattningen.

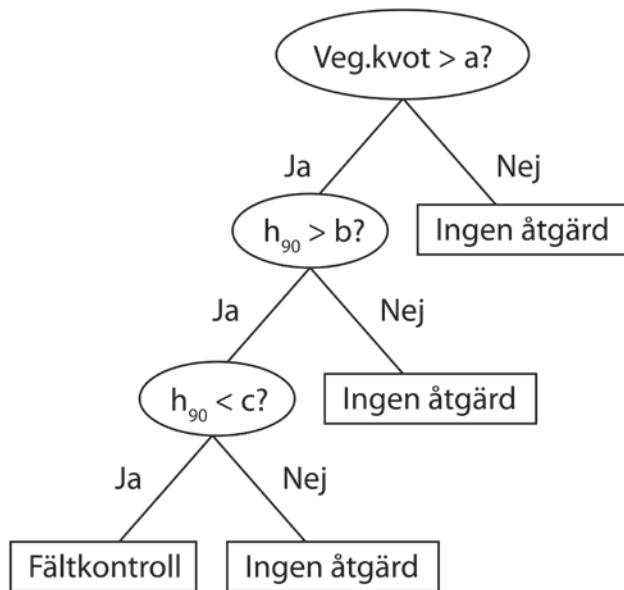
Ett annat alternativ är att för varje laserpunkt beräkna var den skulle ha avbildats i flygbilden, och färga laserpunkten efter den pixeln. Punkter som ligger i trädslagsrena ytor tillhör med stor sannolikhet ett bestämt trädslag. Sådana punkter används för att klassificera även de punkter som återfinns i blandade ytor. Eftersom det inte är meningsfullt att klassa markträffar efter trädslag kan man välja att enbart klassa förstareturer över en viss höjdröskel.

Det är viktigt med ett stort antal provytor jämnt spridda över hela variationsvidden, eftersom det för varje rastercell måste finnas flera nära grannar bland provytorna. Ju större variationen är i skogen, desto fler provytor behövs. Extrapolering fungerar dåligt eftersom rasterceller som ligger utanför provytornas variationsvidd bara får grannar på "en sida".

6.4 *Random Forests*

[Random Forests](#) är en icke-parametrisk metod som kan användas för både skattning och klassning. Den utvecklades av Leo Breiman vid University of California, Berkeley och Adele Cutler vid Utah State University [22]. Notera att *forests* inte har med skog att göra, utan syftar på att metoden använder sig av ett stort antal klassnings- och regressionsträd (*Classification And Regression Tree, CART*). Varje träd ger ett skattnings- eller klassningsresultat, och slutresultatet beräknas som ett medelvärde (i skattningsfallet) eller genom "röstning" (vid klassning). Till fördelarna med Random Forests hör att man kan använda ett stort antal oberoende variabler, även sådana som är korrelerade med varandra. Random Forests har i praktiken visat sig ge nästan lika bra resultat som regression, utan att man manuellt behöver bygga någon modell av sambandet mellan oberoende och beroende data. Metoden har därför visst intresse för framtida automatiserade tillämpningar.

Figur 19 visar ett exempel på ett enkelt klassningsträd. Exemplet är inte helt realistiskt (det finns bättre sätt att identifiera gallringsskogar), utan är främst konstruerat för att beskriva hur klassningsträd fungerar. Säg att vi är intresserade av att hitta gallringsskog. Vi tror att den är tät och ligger inom ett visst höjdintervall, och vi vill avgränsa sådana områden i ett GIS för att planera en kontroll i fält. Vi skapar klassningsträdet i figur 19 och använder det tillsammans med vegetationskvot, V , och den 90:e höjdpercentilen, h_{90} , i form av raster. Varje fråga, eller nod, i trädet gäller en variabel och kan besvaras med "ja" eller "nej". Trädet mynnar ut i ett antal slutnoder som var och en motsvarar en klass. I ovanstående exempel finns två klasser: "ingen åtgärd" och "fältkontroll". En klass kan återfinnas i flera slutnoder.



Figur 19. Exempel på ett enkelt klassningsträd som kan användas för att identifiera områden med tät skog ($V > a$) inom ett visst höjdintervall ($b < h_{90} < c$).

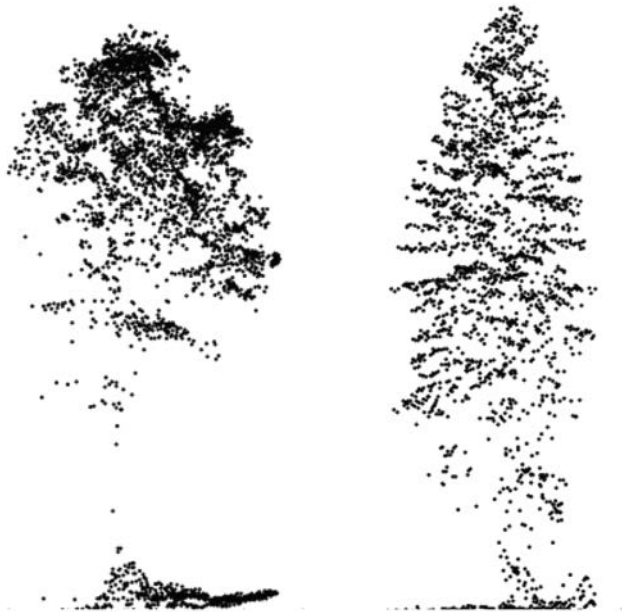
Vid skattning av skogliga variabler med Random Forests används inte klassning, utan regression. I regressionsfallet kan inte datamaterialet delas in i kategorier på det sätt som illustreras ovan. Istället konstrueras trädet så att varje slutnod innehåller en liten, relativt homogen grupp av observationer. Träningssdata, till exempel i form av fältinventerade provtytor, används för att bygga trädet. Skogliga data för en rastercell skattas sedan som medelvärdet av de träningsytor som tillhör samma slutnod som rastercellen. Random Forests använder flera klassnings- eller regressionsträd. Varje område som ska skattas körs genom samtliga träd, så att man får flera värden på virkesvolym etc. Slutresultatet beräknas som medelvärdet av resultaten från alla träd (i klassningsfallet är medelvärden meningslösa och resultatet avgörs istället genom "röstning").

Ett träd konstrueras genom att man tar ett så kallat *bootstrap sample* av provtytor, genom [dragning med återläggning](#). För att bygga första noden slumpas man fram m oberoende variabler att testa. Den variabel som bäst delar in samplet i två grupper väljs. Varje gren som går ut från noden leder till en ny nod, som konstrueras på samma sätt som den första. Trädet anses klart när antalet provtytor i varje slutnod nått under ett av användaren bestämt värde.

Skattningsresultatet kan utvärderas genom det så kallade *OOB Error Estimate* (OOB för *out-of-bag*). Det beräknas genom att de provtytor som *inte* ingått som träningsdata för att skapa ett visst träd körs en och en genom trädet för utvärdering.

7 Skattning av variabler för enskilda träd

Om pulstätheten i laserdata är tillräckligt hög får man flera returerna per trädkrona. Man kan då detektera enskilda träd och skatta variabler för dessa. Det finns naturligtvis ingen skarp gräns för hur många punkter som behövs, men ofta används omkring 10 pulser/m², även om lägre tätheter också kan fungera [13]-[15]. Figur 20 visar punktmolnsprofiler från tall och gran, skannade med ca 50 pulser/m².



Figur 20. Punktmolnsprofiler från tall och gran, pulstäthet ca 50 m². Bild: Johan Holmgren, SLU.

Förbearbetningen av data går till på det sätt som beskrivs i kapitel 3. Därefter kan arbetet grovt delas upp i följande steg:

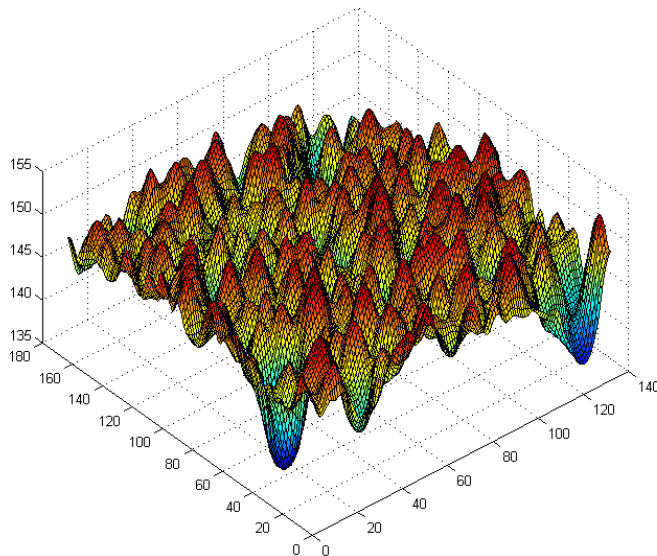
- Höjdsätt laserreturer över markmodellen.
- Detektera enskilda träd i laserdata och avgränsa trädkronor med hjälp av segmentering.
- Ta ut mått ur laserdata som beskriver de enskilda träden.
- Koppla samman träd i laserdata med träd som inventerats och koordinatsatts i fält.
- Ta fram regressionsfunktioner för variabler som ska skattas.
- Tillämpa funktionerna på alla detekterade träd.

Flera av bearbetningsstegen ovan kräver speciell programvara. Analys av enskilda träd i laserdata görs därför främst av forskare, samt av ett fåtal specialiserade företag.

7.1 Detektering av träd

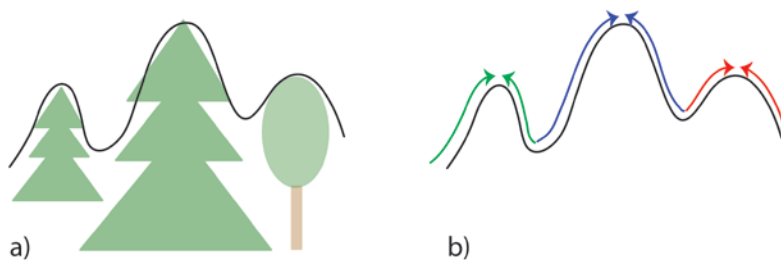
En vanlig metod för att detektera träden är att först skapa en kronhöjdsmodell (*Digital Canopy Model*, DCM), se figur 21. Lokala maxima (toppar) i kronhöjdsmodellen används som utgångspunkt i en segmentering. Målet är att varje trädkrona ska representeras av ett segment (för att inte missa några träd), och att ingen trädkrona ska ha fler än ett segment (för

att undvika ”falska” träd). Detta ställer krav på kronhöjdsmodellen, som i idealfallet ska ha exakt ett lokalt maximum per träd. En enkelt framställd kronhöjdsmodell som enbart följer de högsta punkterna i respektive rastercell uppfyller i regel inte detta villkor, eftersom den innehåller lokala höjdvariationer inom trädkronorna. Man använder sig därför av någon form av utjämnande filter. Filtret anpassas för att i möjligaste mån ta bort höjdvariationer inom trädkronorna utan att ta bort hela träd. De träd som ändå missas är ofta små som döljs av större. Två träd som står tätt ihop kan också tas för ett enda, medan träd med yvig krona och flera toppar kan tolkas som flera träd.



Figur 21. Kronhöjdsmodell med synliga trädtoppar. Bild: Åsa Persson, FOA.

En vanlig metod för segmentering av enskilda träd kallas *watershed segmentation* (watershed betyder vattendelare) och illustreras i figur 22. I varje rastercell över en viss höjd placeras ett ”frö”. Fröet får sedan klättra uppåt i den riktning som har brantast lutning, ända tills det når en punkt där alla omgivande celler har ett lägre värde. Denna punkt är ett lokalt maximum och tolkas som en trädtopp. Alla frön som klättrar till samma punkt kommer från samma segment, som antas motsvara utbredningen hos en trädkrona. Alternativt kan segmenteringen göras i tre dimensioner, genom någon form av klustring i punktmolnet eller genom att man använder så kallade voxlar, tredimensionella pixlar. Det finns ett par studier som jämför olika metoder för att detektera enskilda träd [14], [15].



Figur 22. Avgränsning av trädkronor med hjälp av watershed-segmentering. a) Kronhöjdsmodell filtrerad för att ge ett maximum per träd. b) I varje pixel i kronhöjdsmodellen sätts ett ”frö” som får klättra den brantaste vägen till en topp. Ett segment, eller träd, definieras som de pixlar vars frön klättrar till samma topp.

7.2 *Mått kopplade till enskilda träd*

Varje segment får ett ID-nummer, som också ges till de laserreturer som finns i segmentet. Man kan då koppla ihop alla laserreturer som hör till ett träd och beräkna olika mått för det trädet. Detta görs för alla träd. Om segmenteringen gjorts i två dimensioner, till exempel den ovan beskrivna *watershed*-segmenteringen, måste man dessutom hitta kronans nedre gräns för att inte få med punkter från undervegetationen. Bland fördelarna med laserskattning av enskilda träd märks att trädslag kan skattas från trädkronornas form, samt att bättre information om trädens storleksfördelning kan erhållas. Några mått som visat sig användbara för skattning av enskilda träd är

- trädhöjd och kronarea från segmenten
- höjdfördelningsmått i tabell 1, beräknade för enskilda träd, samt andelen returer från trädkronan
- andel av olika returtyper, till exempel enda-, första- eller andrareturer från trädkronan
- texturmått från DCM och flygbilder
- intensitet (har dock ingen entydig fysikalisk betydelse om ingen kalibrering kan göras, eftersom den beror av många olika faktorer inklusive systemegenskaper)
- geometriska mått på trädkronans form, till exempel parametrar för en parabolisk yta som anpassas till en trädkrona.

Måtten används i senare steg för skattning av stamdiameter, stamvolym, trädhöjd och för trädslagsklassning. Andra mått som kan vara till nytta vid trädslagsklassning är färginformation från flygbilder [23]. Ett sätt är att projicera segmenten för trädkronorna på flygbilderna.

7.3 *Sammankoppling av fält- och fjärranalysdata*

Vid skattning med enskilda träd-metoder räcker det inte att känna till provytans position; man måste även veta de enskilda trädens placering relativt provytecetrum. Den kan till exempel mätas med ultraljudsutrustning kopplad till klaven (Haglöfs PosTex) eller med syftkompass. Positionen för provytans centrum mäts med DGPS.

För att mönstret med lasermätta träd och fältmätta träd ska stämma geometriskt kan speciella program användas som matchar fältytorna till laserdata på trädnivå. En metod går ut på att passa ihop två syntetiska bilder med varandra, och sammanfattas i följande punkter [24]:

- Skapa en syntetisk bild av trädmönstret enligt laserdata från området kring provytan.
- Skapa en syntetisk bild av trädmönstret på provytan utifrån fältmätningarna.
- Flytta och vrid ”fältbilden” så att den passar så bra som möjligt med ”laserbilden”.
- Koppla ihop lasersegment med fältmätta träd på så sätt att trädtoppsavstånden minimeras.

De syntetiska bilderna består av en mörk bakgrund där träden representeras av ljusare fläckar. Ljusheten bestäms i laserbilden av segmentens höjd, och i fältbilden av trädens uppmätta diameter eftersom man vanligtvis inte mäter höjden för alla träd i fält.

7.4 Skattning av trädvariabler

Skattning av höjd, diameter, volym etc. för enskilda träd kan göras med hjälp av exempelvis regression eller k-MSN, på liknande sätt som vid areabaserad skattning (kapitel 6). Regressionsmodeller beskriver sambandet mellan beroende (skogliga) och oberoende variabler (från laser eller flygbilder). Sambanden tillämpas sedan på alla detekterade träd inom det skannade området.

Bland fördelarna med laserskattning av enskilda träd märks att trädslag kan skattas från trädkronans form, samt att bättre information om trädens storleksfördelning kan erhållas. För att få väntevärdesriktiga resultat, det vill säga att virkesvolym, stamantal etc. i genomsnitt ska bli rätt skattade vid summering på exempelvis beståndsnivå, så måste man dock kompensera för de träd som inte upptäcks i laserdata. En metod som ibland kallas *semi-ITC* åstadkommer detta genom att alla fältmätta träd kopplas till ett segment, även om det i vissa fall innebär att ett segment får flera fältmätta träd knutna till sig [25]. Resultat från några svenska försök med skattning av enskilda träd redovisas i tabell 4 [1].

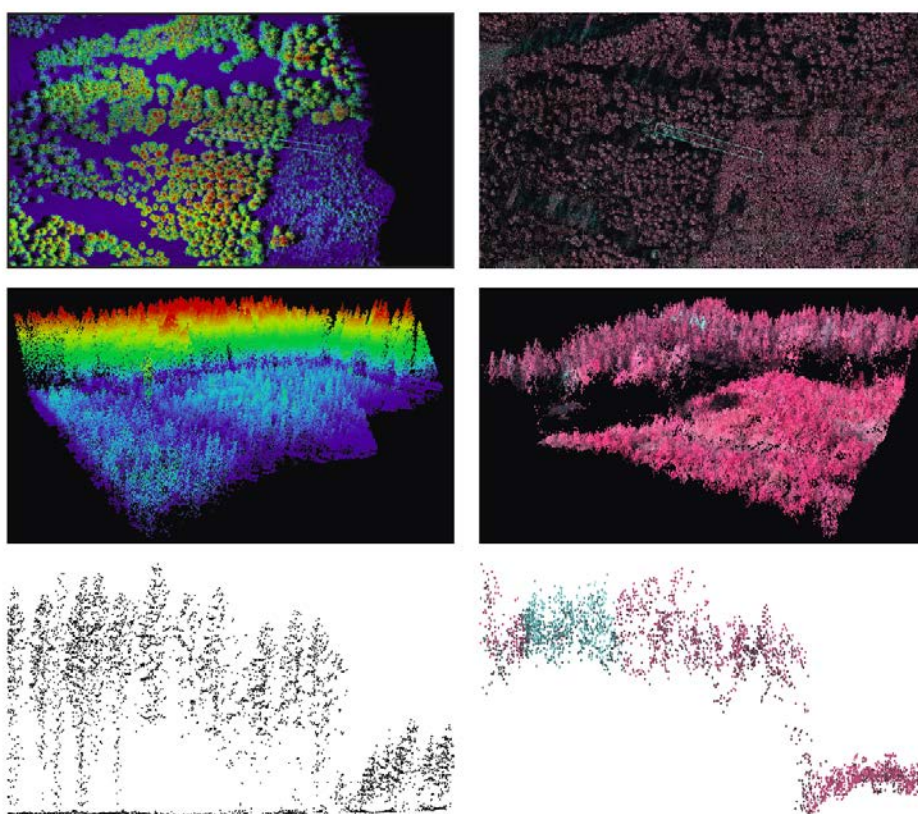
Tabell 4. Resultat från några svenska försök med skattning av enskilda träd, utvärderade på beståndsnivå och kompenserade för samplingsfel [1]

Skattad variabel	Medelfel (%)
Volym/ha	9-24
Grundytvägd medeldiameter	8-9
Stamantal/ha	6-33
Grundytvägd medelhöjd	1-2

8 Automatiserad digital fotogrammetri

Även flygbilder kan användas för att ta fram tredimensionell information om skogen. Bilder tagna i stereo kan användas för att skapa punktmoln liknande de från laserskanning, med två viktiga skillnader: *i*) punkterna från flygbilder innehåller även information om färg, vanligen blått, grönt, rött och nära infrarött, *ii*) eftersom kameran inte ”ser igenom” trädkronorna saknas i stort sett punkter från undervegetation och skogsbevuxen mark (figur 23). I Sverige finns god tillgång på flygbilder tack vare Lantmäteriets regelbundna fotografering, och med hjälp av den nya, nationella höjdmodellen (NNH) kan punkternas höjd över marken beräknas trots att markpunkter saknas. Tekniken har ännu inte fått samma spridning som laserskanning i skogsbruket, men forskningsresultaten är lovande och intresset stort.

Inspiration till figurerna i avsnitt 8.2-8.4 har hämtats i Anders Bobergs *Introduktion till fotogrammetrin* [26], som även är en utmärkt källa för den som vill veta mer om fotogrammetriens grunder.



Figur 23. 3D-punktmoln från laserdata (till vänster) och från matchning av digitala flygbilder (till höger). Bilderna visar data från samma område. I profilerna (nedersta raden) är det tydligt att laserdata ger mer information om marken och trädskiktets vertikala struktur. Den digitala fotogrammetrin ger dock bra information om trädskiktets höjd och dessutom färginformation som i detta fall bl a visar döda träd som blå punkter. Bild av Jonas Bohlin, SLU, baserad på data från Lantmäteriet.

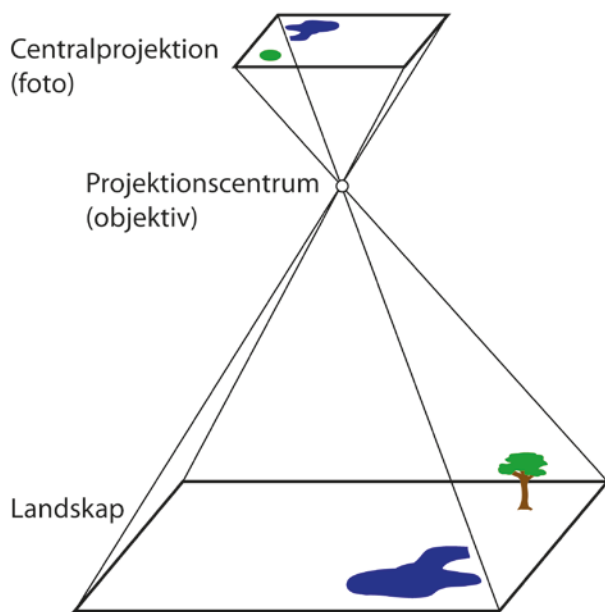
8.1 Färginformation från flygbilder

Digitala flygkameror registrerar oftast de fyra färgerna blått, grönt, rött och nära infrarött. Dessutom registreras ofta en pankromatisk kanal där ljus från en stor del av det synliga spektrumet används. Det pankromatiska bandet brukar ha mindre pixelstorlek och används för att förbättra den rumsliga upplösningen i bilden. Med färgerna blått, grönt och rött kan ”vanliga” färgbilder framställas där vegetationen framträder i grönt. En nackdel med dessa

bilder är att det blå bandet kan störas av dis i atmosfären, särskilt vid flyghöjder över 3000 m. Ofta används istället de gröna, röda och nära infraröda banden, men visade som blått, grönt respektive rött i de framställda bilderna. I dessa så kallade falskfärgsbilder framträder vegetationen i rött. En fördel med dessa bilder är att olika typer av vegetation lättare kan urskiljas i det nära infraröda våglängdsbandet.

8.2 Centralprojektion och ortofoto

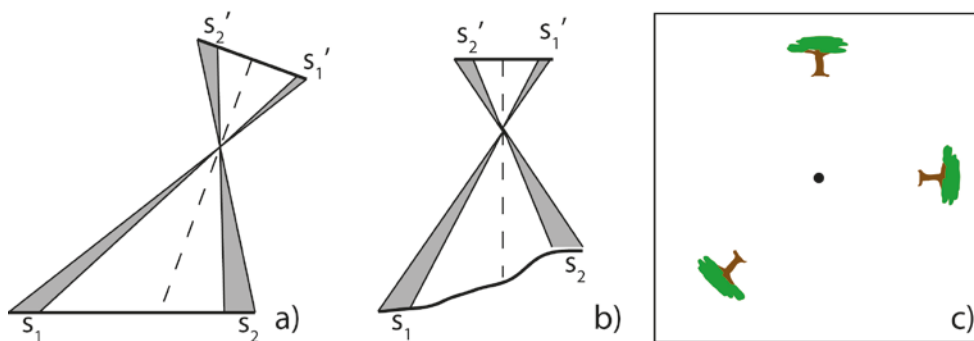
Den bild som kameran skapar av landskapet är en så kallad centralprojektion. Ljusstrålar från varje punkt i landskapet passerar genom kamerans objektiv (projektionscentrum) och fortsätter till detektorn. På så vis skapas en spegelvänd bild (figur 24).



Figur 24. Centralprojektion.

Om landskapet är plant och horisontellt, och kameran är riktad lodrätt mot marken, kommer centralprojektion (fotot) att vara en kartriktig bild av landskapet. I praktiken inträffar aldrig detta idealfall – kameran lutar, marken lutar och det finns höjder, sänkor, träd och byggnader i landskapet. Detta får till följd att bildens geometri inte stämmer överens med kartans. Figur 25 a) och b) visar hur skalan i bilden varierar på grund av höjdskillnader i terrängen och lutande kameraaxel. Höjder som träd, hus och berg ser ut att luta ut från bildens mitt, så kallad radiell förskjutning (figur 25 c). Förskjutningen är proportionell mot objektets höjd. På motsvarande sätt förskjuts sänkor in mot mitten.

Det finns flera olika kommersiella programvaror för digital framställning av ortofoton (kartriktiga bilder). Programmen räknar ut bildens läge pixel för pixel. Man kan tänka sig ortofotot som ett rutnät av pixlar som till att börja med saknar innehåll. Pixlarna i den ursprungliga flygbilden ska ges nya positioner i ortofotot. Det innebär att varje pixel i ortofotot ska fyllas med färg från någon eller några pixlar i flygbilden. Ortofotots pixlar har kända koordinater i planet. Höjden för motsvarande punkt på marken fås från en höjdmödel. Om kamerans position och vinkel är kända, kan man beräkna var i flygbilden denna del av landskapet har avbildats. Färgen från den delen av flygbilden överförs nu till den aktuella pixeln i det blivande ortofotot. Förutsättningarna för att göra ett digitalt ortofoto är alltså att man känner till kamerans orientering och har tillgång till en höjdmödel, alternativt kan skapa en ur flygfotona.



Figur 25. a) Kameraaxelns lutning och b) höjdskillnader i terrängen orsakar skalvariationer i bilden, så att de lika långa sträckorna s_1 och s_2 avbildas olika ($s_1' < s_2'$). c) Uppstickande objekt som höjder och träd förskjuts radiellt från bildens centrum.

8.3 Linjeskanning och cylinderprojektion

I den typ av digitalkamera som bland andra Lantmäteriet hittills har använt, liksom i analoga kameror, blir avbildningen en centralprojektion. Ett alternativ till den traditionella kameran är linjeskannern. Istället för att ta en sekvens av tvådimensionella bilder skannar den landskapet rad för rad. För att få stereobilder används ofta skannrar som tittar i två, eller oftare i tre riktningar: snett bakåt, rakt nedåt och snett framåt (Figur 26 a). Därmed fotograferas varje punkt på marken från tre vinklar. Skanningslinjerna är vinkelräta mot flygriktningen. Även här orsakar höjdskillnader och lutande kameraaxel skalskillnader. Liksom i fallet med centralprojektion förskjuts höjder och sänkor. Den lodrätt riktade skannern ger radiell förskjutning vinkelrätt mot flygriktningen (Figur 26 b). Framåt- och bakåtriktad skanner ger istället förskjutning snett ut mot sidorna. Förskjutningen är proportionell mot objektets höjd.

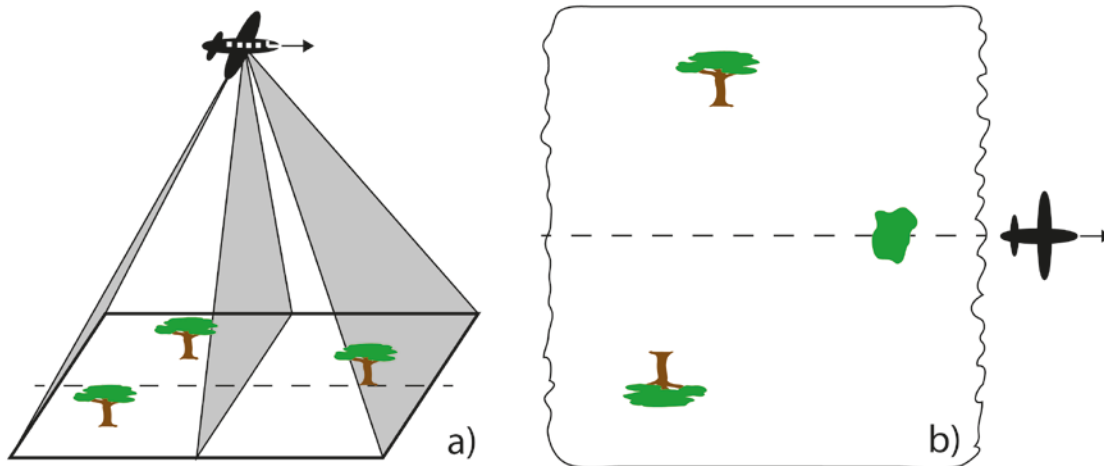
8.4 Stereofotogrammetri

Principen för stereofotogrammetri är densamma som för det mänskliga djupseendet: två bilder, från olika vinklar, kombineras till en tredimensionell modell med information om avstånd till olika objekt. Vanligen används minst 60 % övertäckning mellan bilderna, vilket med viss marginal ger stereotäckning i hela bildstråket. I de tvådimensionella bilderna förskjuts objekt ut från mitten, se figur 25. Förskjutningen är större ju närmare ögat eller kameran objektet befinner sig.

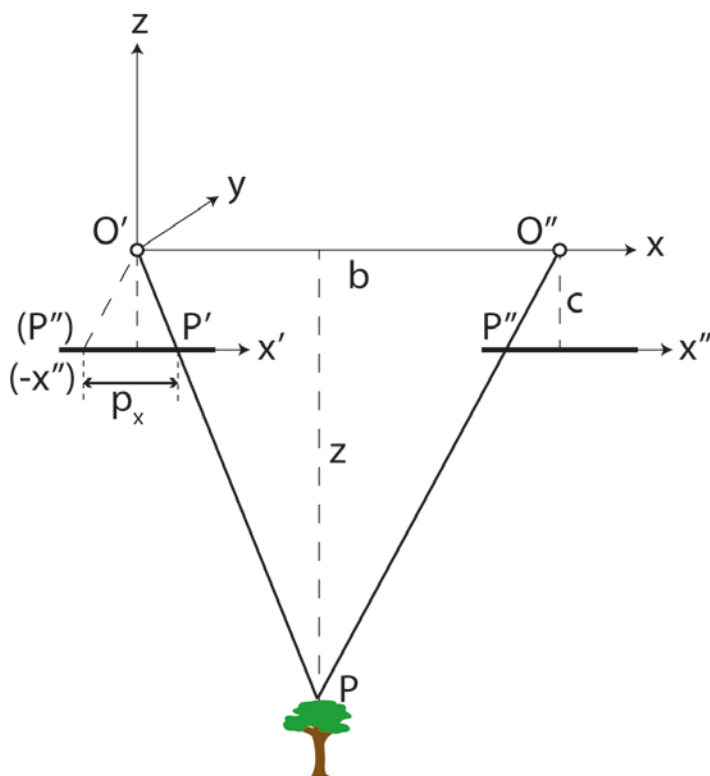
Ett objekt förskjuts på olika sätt i de två bilderna, eftersom de har olika centrum. Skillnaden i förskjutning kallas parallax och möjliggör stereoseende och avståndsbedömning. Flygbilder som används för stereotolkning överlappar varandra i flygriktningen. Ortofoton kan inte användas eftersom parallaxer orsakade av topografin har tagits bort. Numera finns speciella datorskärmar som i kombination med särskilda glasögon möjliggör stereotolkning av digitala flygbilder. Digitala fotogrammetriska arbetsstationer med sådana skärmar har ersatt tidigare analoga instrument för kartriktig tolkning av flygbilder.

Läget i plan och höjd kan beräknas analytiskt för objekt som syns i båda bilderna i paret. Det görs med hjälp av de så kallade parallaxformlerna. Figur 27 illustrerar hur parallaxformlerna härleds om kameraaxlarna är parallella med varandra och vinkelräta mot fotograferingsbasen (sträckan mellan de två punkter där kameran befann sig vid exponering). Det kallas för fotogrammetriens normalfall men är, namnet till trots, ett idealfall som i praktiken endast inträffar approximativt. I figuren har bildplanet ritats i så kallat positivläge, det vill säga på samma sida av projektionscentrum som det avbildade objektet (jämför med

figur 24 där bildplanet och det avbildade landskapet har ritats på varsin sida om projektionscentrum).



Figur 26. a) Linjeskanning i tre riktningar, där b) den lodrätt riktade skannern ger radiell förskjutning vinkelrätt mot flygriktningen. Framåt- och bakåtriktad skanner ger istället förskjutning snett ut mot kanten (visas ej).



Figur 27. En illustration av hur parallaxformlerna härleds. Koordinatsystemet xyz har origo i den vänstra bildens projektionscentrum, O' . Objektpunkten P har koordinaterna x, y, z . Koordinatsystemen markerade med $'$ och $''$ har origo i respektive bildcentrum. Avbildningen av punkten P har koordinaterna x', y', z' i den vänstra bilden och x'', y'', z'' i den högra. Kamerakonstanten c är bildens z -koordinat och är negativ. Fotograferingsbasen betecknas b .

Likformiga trianglar ger att

$$\frac{x}{x'} = \frac{z}{-c}, \quad (7)$$

vilket i sin tur ger

$$x = x' \cdot \frac{z}{-c}. \quad (8)$$

p_x , x-parallaxerna, är definierade som $x' - x''$. Återigen ger likformiga trianglar

$$\frac{z}{-c} = \frac{b}{p_x}. \quad (9)$$

Ekvation 9 i 8 ger slutligen

$$x = x' \cdot \frac{b}{p_x}. \quad (10)$$

På liknande sätt kan man visa att

$$y = y' \cdot \frac{b}{p_x}, \quad (11)$$

och (eftersom y-parallaxerna i normalfallet är noll och $y' = y''$)

$$y = y'' \cdot \frac{b}{p_x}, \quad (12)$$

samt att

$$z = -c \cdot \frac{b}{p_x}. \quad (13)$$

Höjden z är objektets höjd över havet. För att bestämma dess höjd över marken måste man antingen mäta markhöjden på samma sätt som ovan, eller ha tillgång till en höjdmodell.

8.5 Punktmoln från stereobilder

Förutsättningarna för att punktmoln ska kunna genereras ur flygbilder är att *i*) bilderna överlappar varandra, *ii*) kamerans inre orientering är känd och *iii*) kamerans position och vinkel är kända med stor noggrannhet. Kamerans inre orientering mäts upp i laboratorium. Den externa orienteringen (position och vinkel) registreras med GNSS och INS (avsnitt 2.4), men dessa värden är oftast inte tillräckligt noggranna för att en bra bildmatchning ska kunna göras. Finjustering görs med hjälp av blocktriangulering. En vanlig metod för detta är *bundle adjustment*. Strålkärvarna (*bundles*) från objekt som automatiskt detekteras i båda bilderna används för att länka ihop bilderna till bildblock. Väl synliga och noggrant inmätta punkter i terrängen, till exempel målade, vita kvadrater eller brunnslock, används för att finjustera (*adjust*) orienteringen.

När förutsättningarna ovan är uppfyllda kan bilderna inom blocket matchas till punktmoln. Det finns några metoder för matchning och de ger lite olika resultat. Objektsbaserad matchning innebär att så många objekt som möjligt identifieras och matchas. Pixelvis matchning (*semi-global matching*) är en nyare metod som innebär att varje pixel matchas, vilket ger mycket täta punktmoln. Efter matchningen beräknas objektens x-, y- och z-koordinater med hjälp av parallaxformlerna (avsnitt 8.4). Resultatet blir ett punktmoln mycket likt det som fås vid laserskanning, men en viktig skillnad är att punkterna kan kompletteras med färginformation från flygbilderna. Enligt vilken princip detta görs varierar mellan olika programvaror för bildmatchning.

Eftersom antalet markpunkter är mycket lågt vid matchning av flygbilder, framför allt i skog, krävs i praktiken att man har tillgång till en befintlig höjdmmodell.

8.6 Tillämpningar i skogsbruket

Ortofoton används allmänt som bakgrund till kartor i skogsbruket, liksom för indelning och ajourföring av skogsbruksplaner. Även kartering i fotogrammetriska instrument har använts, särskilt vid skogbruksplanering av större innehav. I den så kallade LMV-metoden används fotogrammetriska instrument för att göra indelningen av bestånd och mäta trädhöjden, samt för att uppskatta massaslutenhet och trädslagsfördelning. Höjden och massaslutenheten används sedan för att skatta virkesförrådet. Med införandet av digitala bilder och digitala fotogrammetriska instrument har detta arbetssätt blivit enklare. Det är dock inte så utbrett inom skogsföretagen utan används mest av konsultföretag.

Det finns vissa möjligheter att automatiskt bearbeta ortofoton, till exempel för segmentering av bestånd, men olika betraktningvinklar i olika delar av bilden fordrar att speciella program används. Dessutom innehåller en tvådimensionell bild endast begränsad information om skogens storlek.

Tekniken att genom matchning av flygbilder skapa 3D-punktmoln som avbildar krontaket på liknande sätt som laserdata innebär nya möjligheter att automatiskt få skoglig information från flygbilder. Detta är särskilt intressant för mindre fastigheter eftersom Lantmäteriet regelbundet fotograferar hela landet och distribuerar de digitala bilderna till en marginalkostnad.

Om punkterna görs om till rasterdata kan de användas för segmentering av bestånd med olika höjd och textur. Likaså bör det gå att använda 3D-modeller av detta slag för att upptäcka förändringar. Punktmoln från fotogrammetri kan även användas för skattningar av höjd, virkesförråd och grundyta på motsvarande sätt som med den areabaserade metoden. Ett nyligen rapporterat försök gav goda skattningsresultat då bilder från Lantmäteriets DMC-kamera med flyghöjden 4800 m användes (tabell 5).

Tabell 5. Noggrannheter på beståndsnivå vid skattning av trädhöjd och stamvolym med punktmoln från Lantmäteriets digitala flygbilder, från Bohlin m fl 2012 [27]

Variabel	Använda mått i punktdata	Noggrannhet på beståndsnivå (RMSE)
Grundytevägd medelhöjd	h_{80}	8,8 %
Stamvolym	h_{80} och densitetsmått	14,6 %

Det försök som återges i tabell 5 är mycket lovande eftersom det indikerar att skogliga skattningar kan göras automatiskt med relativt billig teknik, och med minst lika bra resultat som för manuella metoder. Förutsättningen är dock, precis som för laserbaserade skattningar, att det finns provytor med skogliga data. Skogen på den aktuella fastigheten har höga virkesförråd och är välkött. Försök av detta slag måste därför upprepas på fler fastigheter innan säkra slutsatser kan dras. Det torde dock stå klart att punktmoln från fotogrammetri är en mycket värdefull framtida datakälla för skogsbruket.

9 Lagring av 3D-punktdata

Vid laserskanning och digital bildmatchning genereras stora mängder data i form av punkter. Punkternas koordinater i plan (x , y) och höjd (z) måste lagras, eventuellt tillsammans med andra attribut för punkterna. Det finns flera tänkbara format för lagring av punktdata, till exempel kan man använda en textfil (ASCII) med en kolumn för varje koordinat/attribut och en rad för varje punkt. Alternativet är att spara data i binär form, ”ettor och nollor”. Utöver de enskilda punkterna vill man också spara information som är gemensam för alla punkter i filen, till exempel vilket geografiskt referenssystem (koordinatsystem) som används.

Tidigare använde olika dataleverantörer sina egna filformat, men allteftersom tekniken har blivit mer utbredd har ett behov av standardisering uppstått. *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) publicerade 2003 den första versionen av det så kallade LAS-formatet [28]. I skrivande stund (januari 2013) är den senaste versionen LAS 1.4. Formatet är i första hand gjort för lagring av LiDAR-data, men kan också användas för punktmoln från matchning av digitala flygbilder (digital fotogrammetri). Specifikationen är fritt tillgänglig så att vem som helst kan konstruera program för att läsa och skriva LAS-filer.

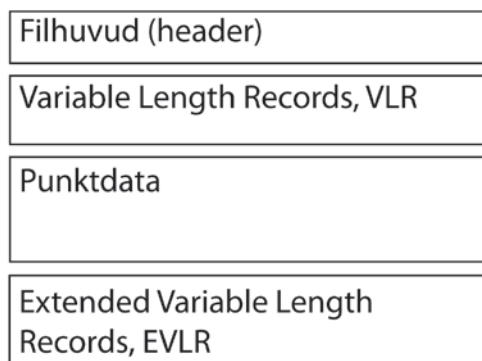
LAS-formatet är binärt. Binära filer behöver, till skillnad från textfiler, inte ”översättas” av datorn. Det går därför mycket snabbare att läsa och skriva binära filer än textfiler, vilket är av stor vikt under själva flygningen när stora mängder data snabbt måste sparas. Det är också en fördel vid databearbetning. Dessutom blir filstorleken mindre än om man hade använt text.

LASzip är ett programbibliotek för komprimering av LAS-filer till så kallat LAZ-format. Biblioteket har öppen källkod ([LGPL-licens](#)) och finns implementerat i flera kommersiella programvaror. Ofta blir en LAZ-fil bara en åttondel av storleken jämfört med om den sparats som en LAS-fil. [29]

9.1 LAS-filens uppbyggnad

Figur 28 visar schematiskt hur en LAS-fil är uppbyggd. De viktigaste delarna är filhuvudet (*header*) och den del som innehåller punktdata. Man kan lägga in ytterligare information i form av så kallade *Variable Length Records* (VLR) och *Extended VLR* (EVLR).

Filhuvudet innehåller uppgifter som gäller hela filen, bland annat geografisk utsträckning och antal punkter. Dessutom finns information som behövs för att filen ska kunna läsas korrekt. Punktdatadelen innehåller koordinater för varje punkt samt vissa andra attribut. Det finns olika format för punktdata och i princip kan man säga att skillnaden mellan dem består i vilka attribut som finns med. Några attribut, såsom intensitet, returnnummer och klass, finns alltid med. Andra attribut, till exempel färg, finns bara med i vissa punktdataformat. VLR och EVLR kan bland annat innehålla uppgifter om vilket geografiskt referenssystem som används (till exempel SWEREF99 TM).



Figur 28. Schematisk skiss över strukturen i en LAS-fil.

Eventuell klassning av punkterna, till exempel i mark- och vegetationspunkter, sker efter datainsamlingen. LAS-formatet har en uppsättning standardbeteckningar för klasser. De som har störst betydelse vid skogliga tillämpningar tas upp i tabell 6.

Tabell 6. Några ofta använda klasser

Klass	Beskrivning
0	Aldrig klassad (har inte genomgått klassning)
1	Oklassad (har genomgått klassning men inte tilldelats någon klass, t ex punkter som inte klassats som mark i markfiltreringen)
2	Mark
9	Vatten

10 Referenser

- [1] Brethvad, T. & Iversen, H. E. (2011). Nyindelning av Bergvik Skog. [Elektronisk] I: *SkogsGIS*. Stockholm 24-25 april 2012. Tillgänglig: http://www.uli.se/images/stories/seminarier/presentationer/2012/skogsgis2012_brethvadi_ersen.pdf [2012-09-01].
- [2] Nelson, R., Krabill, W. & Maclean, G. (1984). Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 15, ss. 201-212.
- [3] Aldred, A. H. & Bonnor, G. M. (1985). *Application of airborne laser to forest surveys*. Chalk River: Canadian Forest Service, Petawawa National Forestry Institute (Information Report PIX-51).
- [4] Maclean, G. A. & Krabill, W. B. (1986). Gross-merchantable timber volume estimation using an airborne LiDAR system. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 12:7-18.
- [5] Nilsson, M. (1994). *Estimation of tree heights and stand volume using airborne lidar systems*. Umeå: Institutionen för skogstaxering, Sveriges Lantbruksuniversitet, Rapport 57.
- [6] Nilsson, M. (1996). Estimation of tree heights and stand volume using an airborne LiDAR system. *Remote Sensing of Environment*, 56:1-7.
- [7] Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyypä, H., Hyypä, J., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, Å. & Söderman, U. (2004). Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19:482-499.
- [8] Toth, C (2010). Airborne LiDAR technology: the state-of-the art and future trends. [Elektronisk] I: ISPRS, *Latin American Remote Sensing Week 2010*. Santiago, Chile, 4-8 oktober. Tillgänglig: http://www.lars.cl/biblioteca/LARS_Thot.pdf [2012-09-01].
- [9] Wehr, A. (2009): LiDAR systems and calibration. I: Shan, J. & Toth, C. (red), *Topographic laser ranging and scanning*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, ss. 129-172.
- [10] Olsson, P., Rost, H. & Reshetyuk, Y. (2011). Laserskanning. I: Lantmäteriet m fl, *Geodetisk och fotogrammetrisk mätning- och beräkningsteknik*, ss 181-204. http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/HMK/nyaHMK/pdf/Utbildning/Kompendium_20110929.pdf [2012-09-01].
- [11] Axelsson, P. (2000). DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. I: *Proceedings of the XIXth ISPRS Congress, IAPRS, Vol. XXXIII*. Amsterdam, Nederländerna 16-23 juli 2000.
- [12] Kraus, K. & Pfeifer, N. (1998). Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53: 193-203.
- [13] Hyypä, J et al. (2001). HIGH-SCAN: The first European-wide attempt to derive single-tree information from laserscanner data. *The Photogrammetric Journal of Finland*, 17: 58-68.
- [14] Kaartinen, H. et al. (2012). An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. *Remote Sensing*, 4:950-974.
- [15] Vauhkonen, J. et al. (2012). Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. *Forestry*, 85:27-40.
- [16] Næsset, E. (2004). Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19:164-179.
- [17] 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: 543-553

- [18] Packalén, P. & Maltamo, M. (2007). The k-MSN method for the prediction of species-specific stand attributes using airborne laser scanning and aerial photographs. *Remote Sensing of Environment*, 109:328-341.
- [19] Skogshistoriska sällskapet (2011-05-20). *Faktablad 05 – Kolbottnar och kolarkojor*. <http://www.skogshistoria.se/05KOLBOTTNOKOLARKOJOR.htm> [2012-09-01].
- [20] Junttila, V. (2011). *Automated, adapted methods for forest inventory*. Diss. Lappeenranta University of Technology.
- [21] Moeur, M. & och Stage, A. R. (1995). Most Similar Neighbor: an improved sampling inference procedure for natural resource planning. *Forest Science*, 41:337-359.
- [22] Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45:5-32.
- [23] Holmgren, J. & Persson, Å. (2008). Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment*, 90:415-423.
- [24] Olofsson, K., Lindberg, E. & Holmgren, J (2008). A method for linking field-surveyed and aerial-detected single trees using cross correlation of position images and the optimization of weighted tree list graphs. I: *Proceedings of SilviLaser 2008*. Edinburgh, UK 17-19 September.
- [25] 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*, 114:911-924.
- [26] Boberg, A. (2001). *Introduktion till fotogrammetrin*. Stockholm: Kungliga Tekniska Högskolan, Institutionen för geodesi och fotogrammetri.
- [27] Bohlin, J., Wallerman, J. & Fransson, J. E. S. (2012). Forest variable estimation using photogrammetric matching of digital aerial images in combination with a high-resolution DEM. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 27:692-699.
- [28] ASPRS Standards Committee (2007-05-01). *LAS specification version 2.0 proposal*. http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/asprs_las_format_v20.pdf [2012-09-01].
- [29] Martin Isenburg (2013). LASzip – lossless compression of LiDAR data. *PE&RS*, 79:209-217.

Appendix: Förkortningar

ALS	Airborne Laser Scanning (flygburen laserskanning)
ASPRS	American Society of Photogrammetry and Remote Sensing
CART	Classification And Regression Tree (klassnings- och regressionsträd)
CHM	Canopy Height Model (kronhöjdsmodell), kallas ibland även Digital Canopy Model (digital kronhöjdsmodell, DCM)
DEM	Digital Elevation Model (digital höjdsmodell), kallas ibland Digital Terrain Model (digital terrängmodell, DTM)
DGPS	Differentiell GPS
DSM	Digital Surface Model (digital ytmodell)
FOA	Försvarets Forskningsanstalt (heter numera FOI)
FOI	Totalförsvarets Forskningsinstitut
GNSS	Global Navigation Satellite Systems (globala satellitnavigeringssystem)
GPS	Global Positioning System (globalt satellitpositioneringssystem från USA)
INS	Inertial Navigation System (tröghetsnavigeringssystem)
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (ljusförstärkning genom simulerad strålningsemission)
LiDAR	Light Detection and Ranging (avståndsmätning med laser)
NIR	Nära infrarött (används om ljus i våglängdsområdet 700–1 300 nm, det vill säga just bortom synligt, rött ljus)
NNH	Ny Nationell Höjdsmodell, från Lantmäteriets pågående nationella laserskanning
SLU	Sveriges Lantbruksuniversitet