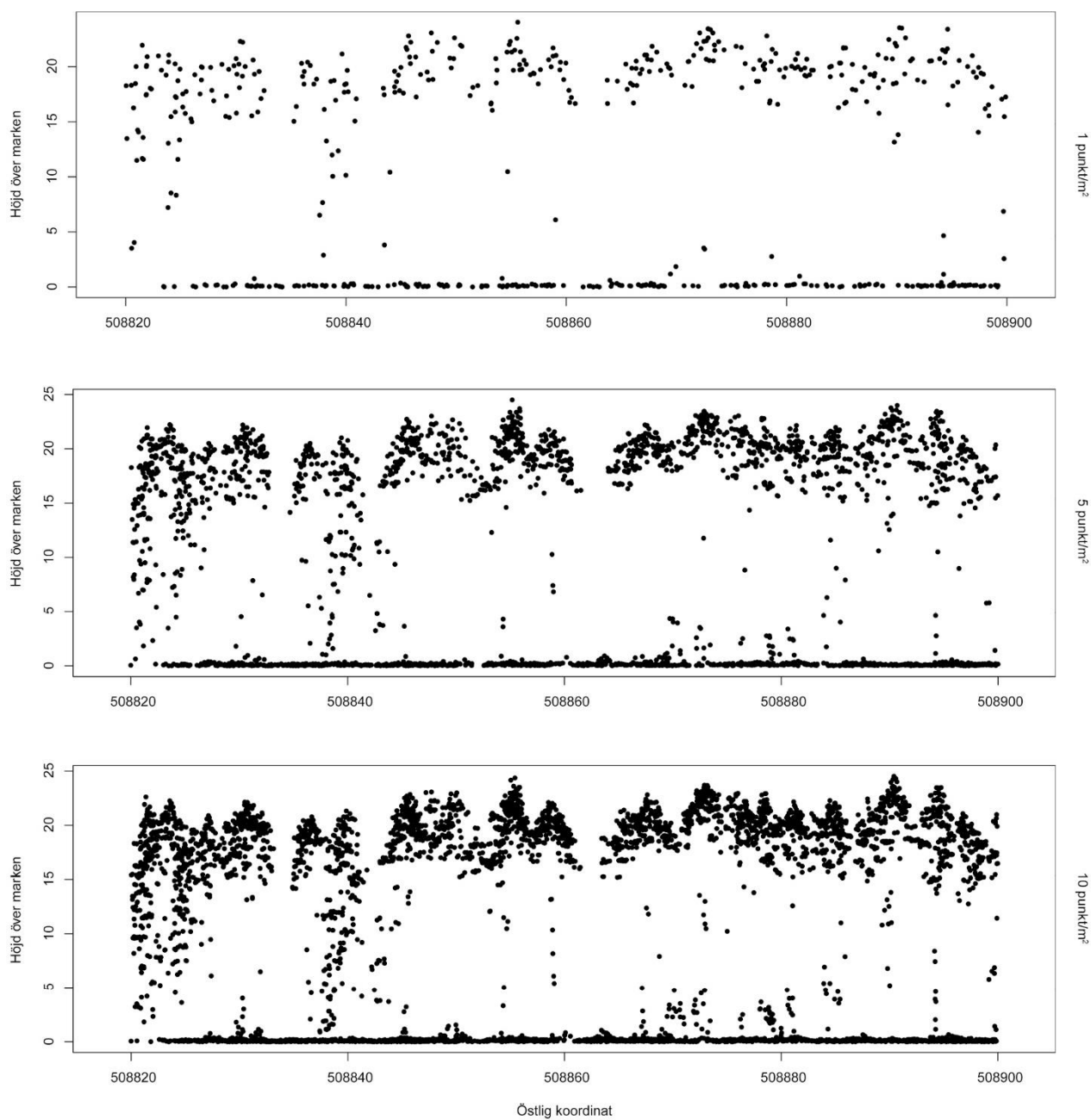


# Ökad punkttäthet vid nationell laserskanning

Kunskapsunderlag, kunskapssammanställning



© Skogsstyrelsen 2022

**Rapport** 2022–19

**Projektledare/redaktör**

Liselott Nilsson

**Projektgrupp/författare**

Håkan Olsson, Mats Nilsson, Eva Lindberg och Liselott Nilsson

### **Omslag**

Rapportens framsida illustrerar punkttätheter med 1, 5 och 10 punkter/m<sup>2</sup> i en 5 m bred transekt. Ca 1/3 av punkterna är från multipla laserreturer och räknas inte in i täthetsmättet. Laserdata registrerade med Riegl 1560 DW över Södras försöksområde Attsjö.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Förord</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Sammanfattning</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Summary</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Bakgrund och syfte</b>	<b>10</b>
4.1	Bakgrund	10
4.2	Syfte	11
<b>5</b>	<b>Utvecklingen av flygburen laserskanning</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>Skogliga skattningar med den areabaserade metoden</b>	<b>13</b>
6.1	Skattningsmetoder	13
6.2	Olika skannersystem, skanningsparametrar och årstider ger olika 3D punktmoln	13
6.3	Skattning av trädhöjd, grundyta, virkesförråd och medeldiameter	14
6.4	Skattning av trädslag med den areabaserade metoden	15
6.5	Ståndortsindex och tillväxt	15
6.6	Krav på punkttäthet vid areabaserade skattningar	16
6.7	Inverkan av skanningsvinkeln	16
6.8	Provytor för areabaserade skattningar	17
<b>7</b>	<b>Enskilda-träd metoder</b>	<b>19</b>
7.1	Förbättring av den areabaserade metoden med data om enskilda träd	19
7.1.1	Bättre positionering av provytor med laserdata där enskilda träds positioner har karterats	19
7.1.2	Användning av hela trädkronor för träden som finns inom provytan	19
7.2	Punkttäthetens påverkan på möjligheten att hitta och avgränsa trädkronor	20
7.3	Kompensation för missade träd	22
7.4	Trädslagsklassning med enskilda träd	22
7.5	Kombination av areabaserade och enskilda träd metoder	23
7.6	Förändringsanalys på enskilda träd-nivå	24
7.7	Koppling till träningsdata vid enskilda träd metoder	24
7.7.1	Fältmätta provytor	24
7.7.2	Markbaserad och mobil skanning	25
7.7.3	Skördardata som referensdata	25
<b>8</b>	<b>Naturvärden, skador och skogsskötsel</b>	<b>27</b>
8.1	Laserfjärranalys av naturvärden	27

8.2	Laserfjärranalys av skador på skog	28
8.3	Stöd vid beslut om skogsskötsel	30
<b>9</b>	<b>Kort om andra tillämpningar</b>	<b>31</b>
9.1	Trädhöjdsraster	31
9.2	Markmodeller	31
9.3	Terrängskuggning och kulturlämningar	31
9.4	Markfuktighetskartor och dikeskartor	32
9.5	Nationella marktäckedata	32
9.6	3D kartering av bebyggelse och infrastruktur	33
9.7	Orienteringskartor	33
<b>10</b>	<b>Något om andra fjärranalysdata</b>	<b>34</b>
10.1	Satellitbilder	34
10.2	2D och 3D data från flygbilder	34
10.3	Andra typer av laserdata	35
10.3.1	Single Photon LiDAR	35
10.3.2	Intensitet och multispektral laserskanning	36
10.3.3	Full vågform laser	36
<b>11</b>	<b>Erfarenheter från andra länder</b>	<b>38</b>
<b>12</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>39</b>
<b>13</b>	<b>Referenser</b>	<b>40</b>
<b>14</b>	<b>Muntliga uppgifter, e-postsvar, hemsidor och powerpointpresentationer</b>	<b>54</b>

# 1 Förord

Flygburen laserskanning har utvecklats mycket snabbt och produktionen av bland annat Skogliga grunddata har revolutionerat insamlandet av skogliga data. Det är idag även tekniskt möjligt att göra landstäckande skanningar med högre punkttäthet än tidigare. Under de senaste decennierna har också forskningen kring laserskanning av skog varit intensiv. Denna rapport syftar till att ta tillvara skogliga forskningsresultat som är av relevans för diskussioner om punkttäthet inför kommande upphandlingar av nationella laserskanningar. Rapporten har skrivits av forskare vid institutionen för skoglig resurshushållning, SLU, på uppdrag av Skogsstyrelsen.

Gävle 2023-05-21

Jens Rågvall  
Projektägare, Skogsstyrelsen

Liselott Nilsson  
Projektledare, Skogsstyrelsen

## 2 Sammanfattning

Rapporten går igenom skogligt inriktade vetenskapliga studier av relevans för valet av punkttäthet i en kommande tredje nationell laserskanning. Den är endast avsedd att vara ett av flera underlag i kommande diskussioner. Idag skattas Skogsstyrelsens Skogliga grunddata med regressionsanalys där förklarade variabler fås från Riksskogstaxeringen fältmätta provytor. Skattningarna görs som medelvärden för rasterrutor om 12,5 x 12,5 m. Denna punkttäthet om 1–2 punkter/m<sup>2</sup> (räknat som sista eller ensamma laserreturer) som används i den nu pågående andra nationella skanningen är tillräcklig för denna typ av så kallade areabaserade skattningar i dess grundutförande. De viktigaste förutsättningarna för att laserdata ska ge bra areabaserade skattningar är att den maximala skannervinkeln är låg; att stora områden täcks med laserdata som är insamlade under samma förutsättningar; samt att en god geometrisk passning mellan laserdata och fältmätta provytor kan erhållas.

Givet kapaciteten för dagens laserskanningssystem så är en punkttäthet om 5 punkter/m<sup>2</sup> eller mer fullt realistiskt vid en kommande tredje nationell skanning. Denna punkttäthet skulle medge kartering av de flesta trädkronorna som separata objekt. En stor nytta med kartering av enskilda träd även vid skattningar av rasterrutor är att provytor med koordinatsatta träd skulle kunna matchas geometriskt mot laserdata. En analys på trädnivå ger även möjlighet att inkludera laserdata från hela trädkronan, givet att stammen finns inom provytan och omvänt utesluta laserdata från trädkronor som tillhör träd vars stam finns utanför provytan. Det finns även vissa möjligheter att kombinera kartering av enskilda träd med de konventionella areabaserade skattningarna vilket kan ge mer information om bland annat trädens storleksfördelning.

Trädslag är den viktigaste skogliga variabeln där skattningarna skulle behöva förbättras. Med en punkttäthet om minst 5 punkter/m<sup>2</sup> kan viss trädslagsinformation fås från mått på individuella träds kronform, samt den returnerade laserstrålens intensitet. En ytterligare möjlighet är att kombinera laserdata med spektrala data från satellitbilder. Även om trädslagklassningen inte blir fullödlig med dessa metoder, så kommer ändå laserskattningar av andra skogliga variabler som till exempel virkesförråd att förbättras om trädslagsinformation används.

Kartering på trädnivå kan även ge viss ytterligare information om naturvärden. Alla träd kan dock inte karteras som enskilda trädkronor. När punkttätheten ökas från ca 5 punkter/m<sup>2</sup> till ca 10 punkter/m<sup>2</sup> sker en viss ökning av andelen träd som kan karteras automatiskt. Hur stor andel av träden som hittas beror även på analysmetod och skogstyp och det är främst andelen karterade undertryckta träd som ökar när punkttätheter ökar.

En punkttäthet om minst ca 5 punkter/m<sup>2</sup> som tillåter kartering av enskilda träd är också framtidssäker för de organisationer som själva vill utnyttja laserdata för att kalibrera skattningar på trädnivå med referensdata från till exempel mobil laserskanning på fordon eller med skördardata. Ett nationellt dataset som medger kartering av de flesta enskilda träden är även en potentiellt värdefull tidig referens

om extra skanningar ska göras till exempel efter större skadetillfällen. Andra tillämpningar som att använda terrängskuggning för att finna kulturminnen, att kartera diken eller att göra 3D modeller av byggnader kan ha ännu större nytta av punkttätheter kring 10 punkter/m<sup>2</sup> än den skogliga karteringen.

Utifrån vad som framkommer i denna rapport så vore det önskvärt om en upphandling av en tredje nationell laserskanning omfattade två alternativa punkttätheter: ca 5 punkter/m<sup>2</sup> samt ca 10 punkter/m<sup>2</sup>, alternativt att leverantören ombeds offerera en punkttäthet mellan 5 och 10 punkter/m<sup>2</sup>. Om skannersystemet även erbjuder kalibrerade intensitetsdata av jämn kvalitet är det en fördel. När det gäller nyttor för skogsbruket är dock frekventa omdrev, helst 5-årigt, rankat högre än högre punkttäthet.

### 3 Summary

The report reviews forest-oriented scientific studies relevant to point density selection in an upcoming third national laser scan. This report is only intended to be one of several inputs in future discussions. Today, the Swedish Forest attribute maps is estimated with regression analysis where explained variables are obtained from the National Forest Inventory of field-measured sample areas. The estimates are made as averages for squares of 12.5 x 12.5 m. This point density of 1-2 points/m<sup>2</sup> (counted as last or solitary laser returns) used in the current second national scan is sufficient for this type of so-called area-based estimates in its basic version. The most important conditions for laser data to provide good area-based estimates are that the maximum scanner angle is low; that large areas are covered with laser data collected under the same conditions; and that a good geometric fit between laser data and field-measured sample surfaces can be obtained.

Given the capacity of today's laser scanning system, a point density of 5 points/m<sup>2</sup> or more is realistic in an upcoming third national scan. This point density would allow mapping of most of the treetops as separate objects. A great advantage of mapping individual trees even when estimated in a grid is that sample surfaces with coordinate-set trees could be matched geometrically to laser data. A tree-level analysis also provides the opportunity to include laser data from the entire tree crown, given that the trunk is within the sample surface and, conversely, exclude laser data from tree crowns belonging to trees whose trunk is outside the sample surface. There are also some possibilities to combine mapping of individual trees with the conventional area-based estimates, which can provide more information about, among other things, the size and distribution of the trees.

Tree species are the most important forest variable where estimates would need to be improved. With a point density of at least 5 points/m<sup>2</sup>, some tree species information can be obtained from measurements of the crown shape of individual trees, as well as the intensity of the returned laser beam. An additional possibility is to combine laser data with spectral data from satellite imagery. Even if the tree species classification is not optimal with these methods, laser estimates of other forest variables such as timber stocks will still be improved if tree species information is used.

Tree level mapping can also provide some additional information about naturalness and conservation values. However, not all trees can be mapped as individual tree crowns. When the point density is increased from about 5 points/m<sup>2</sup> to about 10 points/m<sup>2</sup>, there is some increase in the proportion of trees that can be mapped automatically. The proportion of trees found also depends on the analysis method and forest type and it is the proportion of mapped suppressed trees that increases as the point density increases.

A point density of at least about 5 points/m<sup>2</sup> that allows mapping of individual trees is also future-proof for those organizations that want to use laser data to calibrate tree-level estimates with reference data from, for example, mobile laser scanning on vehicles or with harvester data. A national dataset that allows



mapping of most individual trees is also a potentially valuable early reference if extra scans are to be done, for example, after major damage. Other applications such as using terrain shading to find cultural heritage features, mapping ditches, or making 3D models of buildings can benefit even more from point densities around 10 points/m<sup>2</sup> than the forest mapping.

Based on what emerges from this report, it would be desirable if a procurement of a third national laser scan included two or more alternative point densities: about 5 points/m<sup>2</sup> and about 10 points/m<sup>2</sup>, or that the supplier is asked to offer a point density between 5 and 10 points/m<sup>2</sup>. It would also be an advantage if the scanner system offers calibrated intensity data of consistent quality. When it comes to benefits to forestry, however, frequent national cover, preferably 5-year, are ranked higher than higher point density.

## 4 Bakgrund och syfte

### 4.1 Bakgrund

Lantmäteriets första nationella laserskanning påbörjades år 2009. Den kom till som en del av satsningarna i klimatpropositionen (Miljödepartementet, 2008) och var primärt avsedd för produktion av en ny nationell markmodell som kunde ligga till grund för kartering av översvänningsrisker. Punkttätheten var 0,5 – 1 punkter/m<sup>2</sup>, räknat som sista eller ensamma laserreturer. Denna punkttäthet var även tillräcklig för skogliga skattningar med den så kallade areabaserade metoden, där skogliga variabler skattas för rasterrutor med stöd av fältmätta provytor. Flera skogsföretag använde dessa data för att i egen regi göra skogliga skattningar av variabler som virkesförråd, grundyta, medelhöjd och medeldiameter. Dessutom gjordes denna typ av skattningar i nationell skala av Skogsstyrelsen och SLU inom ramen för ett regeringsuppdrag (Landsbygdsdepartementet, 2012; Nilsson *et al.*, 2017). Den framtagna produkten benämns av Skogsstyrelsen Skogliga grunddata – skog och har blivit mycket använd av skogsbruket och näraliggande samhällssektorer. Förutom de skogliga skattningarna så har Skogliga grunddata även utvidgats med följdprodukter som till exempel gallringsbehov, detaljerade trädhöjdskartor och markfuktighetskarta med mera. Från karttjänsten [Skogliga grunddata](#) nås även andra nya produkter som bland annat bygger på användning av laserskannerdata. Exempel är Skogliga grunddata – mark, där skikt som visar terrängskuggning, lutning och markfuktighet finns. Andra produkter som nås från webbplatsen Skogliga grunddata är Naturvårdsverkets Nationella marktäckedata som bland annat producerats från laserdata och satellitbilder, samt SLU Skogskarta som producerats från 3D fotogrammetri och satellitbilder. I denna rapport används dock kortformen Skogliga grunddata för de skogliga skattningar av virkesförråd, grundyta, medelhöjd, medeldiameter och biomassa, samt det högupplösta trädhöjds-skikt som Skogsstyrelsen benämner Skogliga grunddata – skog.

När den första nationella laserskanningen och den åtföljande produktionen av Skogliga grunddata i det närmaste var klar år 2017 fanns det ett behov inom skogssektorn av ett nytt nationellt laserskanningsomdrev, alternativt att de intresserade skogsföretagen genomförde skannningar i egen regi. Lösningen på detta blev en överenskommelse där större delen av det svenska skogsbruket medfinansierar en andra nationell laserskanning i statens regi. Regeringsuppdraget tilldelades likalydande Skogsstyrelsen, Lantmäteriet och SLU med en löpnade budget på 12 miljoner SEK per år. Denna andra nationella skanning startade sommaren 2018 och täcker i princip all mark utom fjällen. Laserdata med en punkttäthet om 1–2 punkter/m<sup>2</sup> från detta andra nationella omdrev är öppna data och benämns av Lantmäteriet [Laserdata Nedladdning, skog](#). Skanningen görs i block om 25 x 50 km och utförs för närvarande av Hexagon på uppdrag av Lantmäteriet. SLU gör skogliga skattningar och Skogsstyrelsen leder projektet och distribuerar Skogliga grunddata som öppna data. Med en medfinansiering på drygt 3 miljoner SEK per år från skogsföretagen räcker nuvarande medel till ett drygt 7-årigt omdrev. Det nuvarande kontraktet med Leica Geosystems AB Hexagon löper ut under 2022 och då återstår cirka 2 år för att avsluta den andra nationella laserskanningen. Upphandling för slutförandet av skanningen har utförts under

hösten 2022 och Hexagon blir fortsatt leverantör av laserskanningen. Sannolikt finns dock en viss risk att en del mindre, främst fjällnära, områden vara svåra att skanna inom den planerade tiden på grund av molnigt väder.

En diskussion om utformningen av en tredje nationell skanning med förväntad start 2025 har också påbörjats. Hittills har de skogliga skattningarna gjorts för rasterrutor om 12,5 x 12,5 m och för detta ändamål har de hittills använda punkttätheterna varit tillräckliga. Det är dock numera tekniskt möjligt att skanna med högre punkttäthet även med de skannersystem och de flyghöjder som används vid nationell skanning, vilket bland annat skulle kunna innebära att de flesta träden i övre delen av krontaket också skulle kunna identifieras och mätas automatiskt som enskilda objekt.

## 4.2 Syfte

Syftet med denna rapport är att ta tillvara de erfarenheter om nyttan med en ökad punkttäthet för skogliga produkter baserade på flygburen laserskanning som dokumenterats i den vetenskapliga litteraturen inför ett kommande 3:e nationellt laserskanningsomdrev. De tillämpningar som täcks av rapporten är i första hand skattning av skogliga data. Dessutom berörs översiktligt näraliggande produkter som till exempel markfuktighetskartor. Mycket talar för att en punkttäthet om ca 5 punkter/m<sup>2</sup> är motiverad och också relativt enkel att åstadkomma med de laserskanningssystem som används för skanning av stora områden idag. Givet detta så är en viktig frågeställning att undersöka om det finns motiv för en ännu tätare skanning, kanske kring 10 punkter/m<sup>2</sup>.

Rapporten bör endast ses som ett av flera underlag till beslut om skanningsparametrar i samband med en upphandling. Det är viktigt att även beakta praktiska erfarenheter och pågående utveckling som kanske inte är dokumenterade i den vetenskapliga litteraturen. Dessutom behöver nyttan av data med högre upplösning för andra samhällssektorer, till exempel kartering av infrastruktur, for- och kulturmiljöer, miljövärden med mera vägas in i kommande beslut om skanningsparametrar. Framför allt så behöver tidsåtgången, kostnaden för olika skanningsalternativ, samt tillgängligheten av olika skanningssystem beaktas. Kostnaden för en tätare skanning behöver också vägas av mot behovet av en mer frekvent skanning. Skogsbruket är tydliga med att det är viktigare att få täta uppdateringar om skogen än en högre punkttäthet.

För att sätta frågan om punkttäthet i ett bredare perspektiv, så berörs i rapporten kortfattat även andra aspekter av produktion av skogliga data från flygburen laserskanning. Däremot görs inga ingående redovisningar av metoder eller skattningsnoggrannheter eftersom det inte behövs för syftet och texten då skulle bli mer tungläst. Forskningen kring flygburen laserskanning av skog har varit mycket omfattande de senaste två decennierna och det vore inte meningsfullt att göra en fullständig referenslista, men den särskilt intresserade kan komma vidare i ämnet via de listade referenserna. Vi kan särskilt rekommendera antologin [Forestry Applications of Airborne Laser Scanning](#) av Maltamo *et al.* (2014a) som nås gratis på Internet. Inom vissa område finns dock inga vetenskapliga studier att citera, exempel är val av omdrevstid, varför denna viktiga aspekt utelämnats i rapporten.

## 5 Utvecklingen av flygburen laserskanning

Flygburen laserskanning är ursprungligen en militär teknik som blev tillgänglig för den civila marknaden under 1990-talet. Vid laserskanning mäts tiden från att en laserpuls sänds ut, träffar ett objekt och returneras till en sensor i laserskanningssystemet. Tiden översätts sedan till ett avstånd. Mättekniken kallas lidar (light detection and ranging). Vid flygburen skanning så behöver även planets position och rörelser i luften registreras med mycket hög noggrannhet, vilket blivit möjligt genom att en kombination av GPS och tröghetsnavigering används. Laserdata utgörs av tredimensionella koordinater (X, Y, Z), för punkter på marken, byggnader och i trädskiktet som de utsända laserstrålarna returneras ifrån. Dessutom brukar intensiteten för varje returnerad laserpuls anges. Lägesnoggrannheten för skanning från ett par kilometers höjd är i storleksordningen någon decimeter. Beskrivningar på svenska av principerna för laserskanning finns i kapitel 4.7 i Harrie (2020) samt i Nordkvist *et al.* (2013).

Under 1990-talet gjordes tidiga tester med mätning av skog med flygburen laserskanning (Nilsson, 1996; Nelson, 2013). Den så kallade areabaserade metoden där skogliga skattningar görs för rasterrutor med stöd av fältmätta provytor började användas operationellt i Norge år 2002 (Næsset, 2002; Næsset *et al.*, 2004). I början av 2000-talet gjordes också många studier av hur punkttätheten och andra skanningsparametrar påverkade de skogliga skattningarna. Laserskannertekniken har dock fortsatt att utvecklas mycket snabbt även sedan dess. Frekvensen av utsända pulser har ökat från ett par tusen per sekund i mitten av 1990-talet till ett par miljoner per sekund för vissa system idag. Detta har bland annat möjliggjorts genom att systemen nu kan hantera att många utsända pulser finns i luften samtidigt. En utsänd laserpuls kan i sin tur ge upphov till flera detekterade laserreturer, till exempel från en trädtopp, en gren och från marken. Punkttätheten för en utförd laserskanning anges som antalet detekterade punkter/m<sup>2</sup>, dock så räknas då max en retur (den sista eller ensamman returen), per utsänd laserpuls.

Utvecklingen av laserskannersystem avsedda att täcka stora områden går mot användning av högre flyghöjder, man får då en större svepbredd utan att behöva öka skanningsvinkeln. Ytterligare exempel på teknisk utveckling är att den utsända energin och laserstrålens spridningsvinkel (divergens) har minskats. Detektorerna för att registrera den returnerade laserpulsen har också blivit känsligare med tiden. Algoritmerna för att detektera en punktmätning från den returnerade vågen med laserljus har sannolikt också vidareutvecklats, men dessa algoritmer är i regel inte öppet dokumenterade och sannolikt olika för olika laserskanningssystem (Roncat, 2014). Punktmolnet med detekterade laserreturer ändras också något när skannerparametrarna ändras. Forskningen om lämpliga systemparametrar för skogliga skattningar har dock avtagit på senare år och det råder en uppfattning bland forskare att laserskanningstekniken har utvecklats snabbare än forskningen kring effekten av olika systemparametrar (Keränen *et al.*, 2016; White *et al.*, 2016).

## 6 Skogliga skattningar med den areabaserade metoden

### 6.1 Skattningsmetoder

Vid användning av den areabaserade metoden görs skogliga skattningar för rasterutor som brukar representera från 10 x 10 m upp till 20 x 20 m på marken. För varje rasterruta beräknas statistiska mått från de laserpunkter som faller inom rutan. Måtten kallas metriker, enkla exempel är andelen returerna från trädsnittet, eller höjden över marken för den laserpunkt där 90% av alla punkter i trädsnittet är lägre. Sambandet mellan metriker och skogliga data som till exempel virkesförråd skattas med hjälp av ett sampel av fältnätta provytor som laserskannats under likadana förhållanden, varefter dessa samband kan appliceras på alla rasterrutor (Næsset, 2014; White *et al.*, 2017).

Vanligen skattas sambanden med regressionsanalys men även maskininlärningsmetoder som till exempel Random Forests (Breiman, 2001) förekommer. En fördel med regressionsanalys är att de skogliga skattningarna kan extrapoleras även utanför de värden som det finns referensdata för. Regressionsanalys och även maskininlärningsmetoder som Random Forests har dock egenskapen att höga värden på skogliga data, till exempel virkesförråd, underskattas, medan låga värden överskattas. Denna ”dragnings mot mitten” kan kompenseras med statistiska metoder som till exempel klassisk kalibrering, på bekostnad av ett större genomsnittligt skattningsfel, vilket är en möjlighet som bör övervägas i framtiden (Lindgren *et al.*, 2022).

Rasterrutorna bör teoretiskt sett ha samma areal som de provytor som används (Næsset, 2014). I praktiken är dock inverkan av ändrad rasterstorlek marginell för de flesta tillämpningarna och behöver främst beaktas om syftet är att göra väntevärdesriktiga skattningar för stora områden (Packalen *et al.*, 2019). Vid produktionen av Skogliga grunddata har rasterutor om 12,5 x 12,5 m = 156m<sup>2</sup> använts, trots att provytorna som används vid modelleringen har 10 m radie, dvs 314 m<sup>2</sup>. Detta har endast resulterat i en marginellt sämre skattningsnoggrannhet än om större rasterutor skulle ha valts (Nilsson *et al.*, 2017), samtidigt som rasterprodukten blir mer kartografiskt tilltalande. Mindre rasterstorlekar ger också färre rasterrutor med så kallade ”mixed pixels”, till exempel vid beståndsgränser. Det finns önskemål om att Skogliga grunddata i framtiden ska produceras med en rasterstorlek om 10 x 10 m. En sådan eventuell förändring skulle behöva föregås av ett utvecklingsarbete.

### 6.2 Olika skannersystem, skanningsparametrar och årstider ger olika 3D punktmoln

De skannersystem som används är kalibrerade för att göra en så noggrann mätning av markytans läge som möjligt. Krontaket är dock halvgenomskinligt för den utsända laserstrålen som ofta har en diameter om ca 50 cm när den når marken. En del laserljus passerar genom trädskronorna, en del laserljus sprids eller absorberas i trädskronorna och en del laserljus reflekteras tillbaka till skannerinstrumentets

sensor och kan då ge upphov till en laserpunkt som representerar ett läge i trädkronorna. Om en punkt genereras från trädkronorna och i så fall hur högt i trädkronan som punkten hamnar beror förutom på trädkronornas egenskaper även på den utsända laserpulsens träffyta och energi, samt hur skannersinstrumentet omvandlar det returnerade ljuset till en punkt i det skapade datasetet (Næsset, 2009). De punktmoln som avbildar trädskiktet kommer därför att skiljas sig något åt om skanningssystemet byts ut, eller om skanningsparametrarna ändras.

Om flyghöjden ökas blir det färre multipla returerna. På många laserskannersystem kan pulsfrekvensen ändras. En högre pulsfrekvens ger ofta lägre pulsenergi och ett något annorlunda punktmoln (Næsset, 2009; Goodwin *et al.*, 2006; Hopkinson *et al.*, 2007). Om en laserskanner ställs in för att sända ut kortare laserpulser brukar maxeffekt för den utsända pulsen bli högre vilket gör att fler laserpulser når marken (Bacher och Roth, 2021). Korta laserpulser ger också större möjlighet att separera näraliggande objekt, till exempel separera mark från buskar.

Även om punktmolnen och därmed metriker som beräknats från dem, skiljer sig något när skanningsparametrarna ändrats, så är korrelationen mellan metriker och skogliga data dock i regel god inom varje givet laserdataset. Skattningsnoggrannheten blir därför oftast bra för olika skanningsparametrar som till exempel flyghöjd (Yu *et al.*, 2015). Däremot så blir de exakta sambanden mellan metriker från laserdata och skogliga data annorlunda när skanningsparametrarna ändras. Den del av punktmolnet som avbildar trädskiktet ändras även med årstiderna (Næsset, 2005). Detta innebär att de skattade modellerna för sambandet mellan laserdata och skogliga data i princip endast bör appliceras på laserdata som är insamlat under likartade förhållanden (Næsset, 2009; Keränen *et al.*, 2016). I praktiken är dock ofta skillnaden i metriker liten om till exempel flyghöjden ändras något, särskilt om metriker beräknas på förstareturer (Næsset, 2004). Ofta kan man använda modeller med samma uppbyggnad men skatta om modellens parametrar om skanningsförutsättningarna ändras.

Vid framställning av Skogliga grunddata skattar SLU modellernas parametrar på nytt för varje område om 2,5 x 2,5 km. Som referensdata används Riksskogstaxeringens provytor i näraliggande områden om de skannats med samma sensortyp och under samma förhållanden beträffande årstid med eller utan löv. Skanning kring lövsprickning och lövfällning bör helst undvikas eftersom det då kan finnas stora lokala skillnader i naturens utveckling.

### **6.3 Skattning av trädhöjd, grundyta, virkesförråd och medeldiameter**

I Skogliga grunddata har grundtytevåg medelhöjd, grundtytevåg brösthöjdsdiameter, virkesförråd, grundyta och trädbiomassa ovan mark skattats (Nilsson *et al.*, 2017). Detta är variabler som korrelerar väl med trädens höjd och krontaket täthet, vilket är det som laserskanningen främst mäter, och som ger en noggrannhet som är användbar vid skoglig planering (Næsset, 2007). Exempel på ytterligare skogliga variabler som ibland skattas med den areabaserade metoden,

men med mer osäkert resultat är stamantal (Næsset, 2007) och diameterfördelning (Bollandsås *et al.*, 2013).

Skattningarna av bland annat virkesförråd kan med nuvarande metoder för att skatta skogliga grunddata, överskattas i lövrika bestånd som skannats under lövad årstid (Nilsson *et al.*, 2017). Næsset (2005) fann att skanning under avlövad årstid gav marginellt bättre skattningar. Eftersom perioden mellan snösmältning och lövsprickning är kort rekommenderade han ändå skanning under lövad säsong för norska förhållanden. Om data om trädslagsfördelning finns tillgängliga på rastercells nivå kan de skogliga skattningarna för övriga variabler, till exempel totalt virkesförråd, förbättras (Næsset och Gobakken, 2008).

#### 6.4 Skattning av trädslag med den areabaserade metoden

Uppdelning av skogliga data som till exempel virkesförråd per trädslag kan åstadkommas genom att kombinera laserdata med spektrala data. De finska skogscentralernas kartering har främst använt färg från digitala flygbilder, kombinerat med ett stort antal provytor för att komplettera laserdataprodukterna med trädslagsinformation (Maltamo och Packalen, 2014). Satellitbilder har en mer konstant radiometri över stora områden men ger i de flesta fall sämre upplösning på träd nivå. Kukkonen *et al.* (2018) visade att satellitbilder från Sentinel 2 satelliterna bidrog med ungefär lika mycket trädslagsinformation vid laserdata baserade skattningar som digitala flygbilder, medan resultat på provytenivå inte var lika bra för Landsat bilder som har lägre upplösning och färre våglängdsband. En fördel med att använda satellitbilder i stället för flygbilder är att det är lättare att få data med jämn kvalitet över stora områden.

SLU Skogskarta som baseras på satellitbilder och i den senaste versionen även använder 3D data, fast från digital fotogrammetri i stället för laser, ger också viss trädslagsinformation. Dock så är trädslagsinformationen från areabaserade produkter än så länge inte lika bra som i de manuellt upprättade skogsbruksplaner som de skogliga användarna är vana vid. Skattning av trädslag bör därmed ses som ett angeläget område för fortsatt utveckling, i synnerhet för bestånd med flera trädslag (Maltamo *et al.*, 2021).

#### 6.5 Ståndortsindex och tillväxt

När laserdata från två eller flera tidpunkter finns kan tillväxt och förändringar skattas (Yu *et al.*, 2008; Tompalski *et al.*, 2021). I Norge har man börjat att skatta ståndortsindex från laserdata operationellt (Noordermeer, 2020; Noordermeer *et al.*, 2021). När data från två tidpunkter jämförs får man dock även med sig fel i båda dataseten. Varje par av registreringar blir därmed ett unikt fall som behöver skattas separat. För att begränsa antalet unika kombinationer av data från olika tidpunkter är det även för denna tillämpning önskvärt att skanna så stora områden som möjligt med samma parametrar. Möjligheten att använda laserdata för att skatta tillväxt kommer att förbättras när man i framtiden får tillgång till längre tidsserier av laserdata.

## 6.6 Krav på punkttäthet vid areabaserade skattningar

Det finns ett stort antal studier som visar att de punkttätheter som hittills använts i Sverige (0,5 – 1 punkter/m<sup>2</sup>) för den första nationella skanningen och (1–2 punkter/m<sup>2</sup>) för den nu pågående andra nationella skanningen, är fullt tillräckliga för skogliga skattningar med den areabaserade metoden. Studierna visar också att skattningarna med denna metod inte förbättras nämnvärt med ökad punkttäthet (Holmgren, 2004; Maltamo *et al.*, 2006; Gobakken och Næsset, 2008; Treitz *et al.*, 2012; Strunk *et al.*, 2012; Jakubowski *et al.*, 2013; Singh *et al.*, 2015). Yu *et al.* (2015) jämförde bland annat areabaserade skattningar från 12 punkter/m<sup>2</sup> laserdata registrerade på 900 m höjd med skattningar över samma område från 1,2 punkter/m<sup>2</sup> laserdata registrerade på 2500 m höjd och erhöll skattningsnoggrannheter för virkesförråd på provytanivå om 15,9% respektive 16,7%. Næsset och Gobakken (2008) visade att metrikerna på provytanivå varierade något mer när punkttätheten sänktes från 1,13 till 0,25 punkter/m<sup>2</sup>, men att skattningsnoggrannheten ej förändrades nämnvärt när skattningarna utvärderades på beståndsnivå.

Adnan *et al.* (2017) utvärderade dock punkttäthetens inverkan på ett index för diameterspridningen och rekommenderade att skanningen görs med en punkttäthet om minst 3 punkter/m<sup>2</sup>. Även Ruiz *et al.* (2014) fann att sambandet mellan laserdata och virkesförråd förbättrades något för punkttätheter upp till ca 3 punkter/m<sup>2</sup> givet att provyteradien var 10 m som också är fallet vid produktionen av Skogliga grunddata.

## 6.7 Inverkan av skanningsvinkeln

En viktig parameter vid skanning för skogliga ändamål är den maximala skanningsvinkeln. Räknat från nadir används ofta max 15 eller max 20 grader. En större skanningsvinkel ger ett bredare skannerstråk och därmed en bättre skanningsekonomi. De skogliga skattningarna blir dock sämre när skanningsvinkeln ökas, dels för att andelen markträffar blir färre, dels för att en skanner som sveper tvärs flygriktningen mäter skogen rakt uppifrån när mätningen sker i nadir och snett från sidan i skannersvepets kant. Keränen *et al.* (2016) fann att skattningen av virkesförråd på provytanivå försämrades 1–1,5% när skanningsvinkeln för en Leica ALS70-HA skanner ökades från +/- 15 grader till +/- 20 grader. En Palmerskanner som har ett roterande skanningsmönster, till exempel TerrainMapper sensorn som används i den nu pågående andra nationella skanningen, ger en konstant skannervinkel om dess axel är riktad mot nadir. Nackdelen med varierande skanningsgeometri är då eliminerad, men nackdelen att mätningen sker snett genom krontaket kvarstår.

### **Krav på flygburen laserskanning för areabaserade skogliga skattningar**

Stora områden bör skannas under likartade förutsättningar beträffande:

- Skannertyp
- Alla system och skanningsparametrar som pulshastighet, flyghöjd mm
- Årstid, dock ej vid lövsprickning eller lövfällning
- Skannervinkeln, som ska avvika max 20 grader från nadir, gärna mindre.



## 6.8 Provytor för areabaserade skattningar

Antalet fältmätta provytor som behövs för att skatta sambandet mellan lasermetriker och skogliga data beror på hur varierad skogen är, samt vilken skattningsmetod och hur många metriker som används (Cosenza *et al.*, 2022). I forskningsstudier på begränsade testområden har ett mindre antal provytor ibland använts med framgång. Junttila *et al.* (2008) skattade bland annat virkesförråd på ett 1200 ha stort testområde med regression. När de minskade antalet provytor från 232 till 63, så försämrades skattningsnoggrannheten på provytenivå från 20,6% till 22,6%. I operationella projekt i Norge användes ursprungligen ca 150 provytor fördelade på tre strata för regressionsskattningar med den areabaserade metoden. En minskning av provyteantalet försämrade skattningsnoggrannheten (Gobakken och Næsset, 2008). I den finska skogsmyndighetens nationella projekt har ca 650 provytor per skanningsområde använts. Det högre antalet jämfört med det norska fallet motiveras bland annat av att man i Finland även skattat volym per trädslag med en närmaste grannemetod. Till skillnad från regression kan denna metod inte extrapolera skogliga data som ligger utanför de data som inmätts i fält (Maltamo och Packalen, 2014).

För produktionen av Skogliga grunddata använder SLU ca 350 provytor från Riksskogstaxeringen kring varje skattad ruta om 2,5 x 2,5 km. Efter att ytor som delas av till exempel beståndsgränser har uteslutits, så återstår cirka 300 provytor som använts för att skatta modellerna. Jämfört med att använda särskilt insamlade provytor som man gör i Finland så bör användningen av rikstaxprovytor ge något sämre skattningar eftersom ytor som är inventerade tidigare år behöver skrivas fram och eftersom även ytor från näraliggande block skannade under liknande, men ej identiska, förutsättningar behöver användas. En studie i Norge (Rahlf *et al.*, 2021) fann dock att användning av rikstaxprovytor kan ge ungefär lika bra skattningar som vid användning av särskilt insamlade provytor.

Om provytorerna placeras optimalt, till exempel med hjälp av en stratifiering som använder existerande fjärranalysdata, kan antalet ytor minskas. I en teoretisk studie visar Junttila *et al.*, (2013), att det kan räcka med 40 provytor för att skatta virkesförråd. Lantmäteriets laserskanning görs i block om 25 x 50 km som skannas under en eller ett par dagar. En organisation som vill samla in egna provytor för att skatta ett sådant block behöver investera cirka en manmånad i fältmätning av cirkelprovytor. Har man flera näraliggande block som skannats under samma förutsättningar behöver provyteantalet sedan bara ökas marginellt.

Skattningsnoggrannheten förbättras med ökad provytestorlek (Gobakken och Næsset, 2008, 2009; Ruiz *et al.*, 2014; Frazer *et al.*, 2011). Ju större provytan är, desto mindre andel av de inmätta träden kommer att ha delar av sin trädkrona utanför provytan. Likaså, så kommer en mindre andel av trädkronorna som berörs av provytan att tillhöra träd utanför provytan som inte mätts in. Vid valet av provytestorlek behöver man dock också beakta de starkt ökade kostnaderna för fältinventering när provyteradien ökas.

Felet vid positionsbestämning av provytan försämrar starkt de areabaserade skattningarna och bör därför vara så litet som möjligt, mer om detta under

avsnittet om enskilda träd. Inverkan av positioneringsfelet minskar dock om

**Skattningsnoggrannheten för areabaserade skattningar förbättras om provytorna:**

- är många samt om de är stratifierade efter skogstyp
  - är fältmätta nära tidpunkten för laserskanning
  - är stora, helst minst 10 m radie
  - är koordinatsatta med stor noggrannhet, gärna med högst 1 m fel
- Dock så måste dessa önskemål vägas mot de stora kostnaderna för fältinventering.

provytestorleken ökas (Gobbaken och Næsset, 2009; Frazer *et al.*, 2011).

## 7 Enskilda-träd metoder

Med högre punkttäthet så är det möjligt att automatiskt kartera och mäta de flesta enskilda träden, särskilt i äldre skog. Ofta anges 5 punkter/m<sup>2</sup> som en undre gräns för när enskilda-träd metoder är meningsfulla (White *et al.*, 2016). Holopainen *et al.* (2014) ger en vision av framtidens ”precision forestry” med trädkartor över den avverkningsmogna skogen, som tränas med skördardata och mobil laserskanning, eventuellt placerad på skördaren. I denna vision ingår också 3D visualisering av skogen på trädnivå samt bättre skattning av fördelning av stamdiametrar, träslag, virkeskvaliteter och tillväxt på trädnivå.

Möjligheterna att automatiskt identifiera enskilda träd med flygburna laserdata började rapporteras kring år 2000 (Hyypä och Inkinen, 1999). Forskare vid SLU och FOA visade tidigt att de flesta, men inte alla, träden kunde karteras som enskilda träd och mätas med god noggrannhet, men att det beror på skogstyp hur stor andel av träden som ej går att särskilja (Persson *et al.*, 2002). Dessa resultat har sedan bekräftats av ett stort antal studier i olika länder, för översikter se till exempel Hyypä *et al.* (2008), Koch *et al.* (2014), White *et al.* (2016), och Kankare *et al.* (2017).

### 7.1 Förbättring av den areabaserade metoden med data om enskilda träd

#### 7.1.1 Bättre positionering av provytor med laserdata där enskilda träd positioner har karterats

Felet i provytornas positionering är en av de viktigaste faktorerna som påverkar skattningsnoggrannheten vid den areabaserade metoden. Det bör vara så litet som möjligt och gärna under 1 m (Frazer *et al.*, 2011). I Europa har sju Riksskogstaxeringar börjat att framställa rasterprodukter genom sambearbetning av 3D data och rikstaxprovytor. Av dessa så har sex riksskogstaxeringar satsat på att koordinatsätta provytorna med satellitpositioneringssystem med högre noggrannhet än tidigare, för att förbättra möjligheten till sambearbetning med fjärranalysdata (Olsson och Nilsson, 2021).

På den svenska riksskogstaxeringens permanenta provytor finns varje träd position relativt provytecetrum inmätt. En framtida tätare skanning där enskilda träd framträder skulle kunna förbättra den geometriska passningen mellan provytor och laserdata och därmed även Skogliga grunddata produkten genom att matcha trädens positioner på provytan med motsvarande trädmönster i tätskannade laserdata (Olofsson *et al.*, 2008).

#### 7.1.2 Användning av hela trädkronor för träden som finns inom provytan

Ytterligare en potentiell möjlighet till förbättrade areabaserade skattningar med stöd av enskilda träd är att skatta modellerna baserat på hela trädkronorna för de träd vars stamcentrum faller inom provytan, samtidigt som laserträffar från de trädkronor som tillhör trädstammar utanför provytan inte beaktas även om delar av deras trädkronor ligger inom provytan. Detta åstadkoms genom att först segmentera de enskilda trädkronorna på provytorna. Packalen *et al.* (2015) kallar

detta för Enhanced Area Based Approach (EABA) och rapporterade att medelfelet på provytanivå vid skattning av virkesförråd förbättras med drygt 2 procentenheter.

**Koppling på trädnivå mellan laserdata och provytedata kan förbättra de areabaserade skattningarna genom att:**

- Matcha positionerna för provytans fältmätta träd med motsvarande mönster i laserdata
- Eventuellt endast använda laserdata för de trädkronor vars stammar finns inom provytan och samtidigt även bortse från delar av trädkronor som tillhör stammar utanför provytan.

## 7.2 Punkttäthetens påverkan på möjligheten att hitta och avgränsa trädkronor

Givet att en punkttäthet om minst 5 punkter/m<sup>2</sup> som medger avgränsning av enskilda trädkronor eftersträvas vid nästa nationella laserskanning, så är det av intresse att undersöka mervärdet av en ännu högre punkttäthet kanske kring 10 punkter/m<sup>2</sup>.

Kaartinen *et al.* (2012) jämförde algoritmer från nio olika forskargrupper med avseende på möjligheten att upptäcka enskilda träd. Alla algoritmer utvärderades mot fältmätningar från två testområden i Finland och med punkttätheterna 2, 4 och 8 punkter/m<sup>2</sup>. Det fanns en viss, men svag, tendens till ökad upptäckbarhet av enskilda träd med ökad punkttäthet, men inga direkta tröskeleffekter mellan 2, 4 och 8 punkter/m<sup>2</sup>. Däremot så fanns det stora skillnader mellan resultatet för de olika analysmetoderna.

Wang *et al.* (2016) använde samma data som i Kaartinen *et al.* (2012). De utvärderade möjligheten att upptäcka enskilda träd med 5 olika metoder och fann att de metoder som använder laserpunkter i stället för kronhöjdsraster fungerade gradvis bättre när punkttätheten ökade, särskilt för undertryckta träd. Med en metod från FGI i Finland ökade till exempel möjligheten att upptäcka de mest undertryckta träden från 20% till 30% när punkttätheten ökade från 4 till 8 punkter/m<sup>2</sup>.

Eysn *et al.* (2015) utvärderade möjligheten att kartera enskilda träd för 8 testområden i Alperna belägna i 5 olika länder. För varje område testades 8 olika algoritmer. Punkttätheten varierade mellan testområdena från 5 till 121 punkter/m<sup>2</sup>. Eftersom både skogstyp och punkttäthet varierade samtidigt så kan ingen strikt utvärdering av punkttäthetens betydelse göras från denna studie, men författarna nämner i diskussionen att skogens struktur verkar spela större roll än punkttätheten och att området med högst punkttäthet fick det sämsta resultatet. De betonar även vikten av 3D segmentering där trädkronor avgränsas i det 3Dimensionella punktmolnet även för undertryckta träd som inte når upp till krontaket. Behovet av att utveckla 3D segmentering betonas även i en översikt av Lindberg och Holmgren (2017).

Vauhkonen *et al.* (2008) utgick från laserdata med ca 40 punkter/m<sup>2</sup> som tunnades ut i 15 försökssteg ned till under 1 punkt/m<sup>2</sup>. För skattning av stamdiameter fann de att resultaten inte försämrades nämnvärt med minskad punkttäthet, men att metoderna för att identifiera trädskronorna behövde ändras när punkttätheten minskades.

Vauhkonen *et al.* (2012) jämförde möjligheterna att hitta enskilda träd för 4 testområden belägna i 4 länder samt med 6 olika metoder, fast med olika punkttäthet för de olika testområdena. Slutsatsen var även i detta fall att resultaten främst var beroende av skogens struktur och algoritmerna som användes.

Sumnall *et al.* (2022) testade möjligheten att upptäcka och avgränsa trädskronor med UAV-baserad laserskanning. Studien är inte helt relevant för flygburen nationell skanning eftersom skanningsvinkeln var +/- 60 grader, men är ändå intressant eftersom utvärderingen omfattade punkttätheterna 0.25, 0.5, 1, 5, 10, 50 och 100 punkter/m<sup>2</sup>. Man fann att den stora skillnaden när det gällde att avgränsa trädskronorna gick mellan punkttätheterna 1 och 5 punkter/m<sup>2</sup>, samt att resultatet inte förbättrades mycket med tätare data än 5 punkter/m<sup>2</sup>. I likhet med andra studier fann man att möjligheten att upptäcka enskilda träd var starkt skogstypsberoende och sjönk påtagligt när stamantalet ökade.

Kandare *et al.* (2016) utvärderade möjligheten att avgränsa trädskronor i italienska alperna. De använde flygregistrerade laserdata med skanningsvinkeln 60 grader och punkttätheten 60 punkter/m<sup>2</sup>. När punkttätheten minskades från 60 till 4 punkter/m<sup>2</sup> i 7 steg försämrades resultatet endast marginellt.

Holmgren *et al.* (2022) utvärderade 3D segmentering för 10 delbestånd i Sverige med två mycket högupplösta flygregistrerade laserdataset. De fann att andelen korrekt karterade stammar ökade från 92% till 99% när punkttätheten ökade från 69 till 2511 punkter/m<sup>2</sup>.

Även om sammanställningen ovan inte ger några starka motiv för en högre punkttäthet än 5 punkter/m<sup>2</sup> så nämns det i en del artiklar att en högre punkttäthet kan vara motiverad för särskilda tillämpningar som till exempel att kartera små träd nära trädgränsen eller hitta undertryckta träd (White *et al.*, 2016, Eysn *et al.*, 2015, Næsset *et al.*, 2021).

**Möjligheten att upptäcka och avgränsa enskilda träd med flygburna laserdata beror på:**

- Skogstyp, till exempel om skogen är flerskiktad
- Metoden som används för att automatiskt hitta och avgränsa träden
- Punkttätheten, som helst bör vara minst ca 5 punkter/m<sup>2</sup>, resultatet blir bättre med ökad punkttäthet, men det finns inga säkra tröskelvärden för rekommenderade punkttätheter.

### 7.3 Kompensation för missade träd

Från de ovan citerade studierna är det tydligt att en del träd inte kommer att identifieras som egna objekt vid automatisk analys av flygburna laserdata, särskilt undertryckta träd som växer nära större träd. Ett sätt att hantera detta är att segmentera trädkronorna med laserdata så gott det går, men anta att varje segment kan innehålla ett eller flera träd. Segmenten tilldelas sedan egenskaper för ett eller flera träd genom närmaste granne imputering. Tekniken brukar benämnas semi-ITC (Breidenbach och Astrup, 2014). En studie i Norge visade att skattning med en enskilda-träd metod korrigerad med semi-ITC var något bättre än areabaserade metoden för multivariat tilldelning av skogliga data, men sämre när en skoglig variabel i taget skattades (Rahlf *et al.*, 2015).

Det har även föreslagits metoder för att skatta trädens storleksfördelning utifrån den delmängd av främst större träd som kan karteras från laserdata (Kansanen *et al.* 2019).

**Man hittar sällan alla träd, men kan kompensera för detta genom att:**

- Anta att varje kronsegment kan motsvara ett eller flera segment och tilldela segmenten egenskaper från segment där det finns fältdata (semi ITC metoden).

### 7.4 Trädslagsklassning med enskilda träd

Trädslag är den kanske viktigaste skogliga variabeln som skulle behöva skattas säkrare med automatiska metoder. Med dagens metoder så blir inte automatiserad trädslagsklassificering så bra om det praktiska skogsbruket önskar (Maltamo *et al.*, 2021).

Holmgren och Persson (2004) visade att trädslag uppdelat på tall, gran, löv kunde skattas från kronform om laserdata med hög punkttäthet användes. Användning av kronform som indikator för trädslag kräver generellt tätare laserdata än vad som behövs för att bara identifiera enskilda träd.

Även Vauhkonen *et al.* (2008) klassade tall, gran och löv med mått på kronform. De använde täta laserdata som tunnades ut, klassningsnoggrannheten var ca 80% mått som kappa-koefficient och försämrades märkbart först efter att punkttätheten blev lägre än ca 2 punkter/m<sup>2</sup>. Dock så var datamaterialet ojämnt fördelat, med få lövträd och med tallar som var högre än övriga trädslag.

Li *et al.* (2013) klassade fyra trädslag på ett testområde i Ontario. De använde laserdata med ca 25 punkter/m<sup>2</sup> (90 punkter om alla multipla retur i vegetationen räknades med) för att extrahera olika mått på trädkronornas form och inre struktur. De fann att klassningsnoggrannheten minskade linjärt när punkttätheten minskades genom uttunning av laserdata.

De flesta system för flygburen laserskanning levererar returpulsens intensitet för respektive detekterad punkt och många system kan även leverera returpulsens fulla vågform. Alla system ger dock inte intensitetsdata som är direkt användbara vid klassificering och vågformsdata ger stora datamängder. Det finns också

många fallgropar när dessa datakällor skalas upp från testområden till operationell kartering över stora områden bland annat att skanningsvinkeln varierar (Koenig och Höfle, 2016).

Michalowska och Rapinski (2021) citerar 115 artiklar i en översiktsartikel om trädslagsklassning med flygburna laserdata. De listar tre sätt som högupplösta laserdata kan bidra till trädslagsklassning. Generellt erhöles bäst resultat i de studier som använde hela den returnerade vågformen i stället för enskilda punkter; därefter kom laserreturens intensitet och sist yttre kronform. Användningen av kronform kan med fördel också kombineras med full vågform eller intensitet. Lindberg *et al.* (2014) använde laserdata med 7 utsända pulser/m<sup>2</sup> och rapporterar en klassningsnoggrannhet för tall, gran och löv på 71% när full vågformsdata och rumsliga data kombinerades, till skillnad mot 53% när vanliga punktdata användes.

Ytterligare ett sätt att förbättra klassningsnoggrannheten är att kombinera enskilda-träd analyserna med spektrala data från en annan sensor. Holmgren *et al.* (2008) fick goda resultat på ett testområde genom att kombinera trädkronor från analys av högupplösta laserdata med spektrala data från flygbilder. Detta är dock svårare att upprepa för stora områden eftersom flygbilder, beroende på bland annat stora öppningsvinklar och fotografering med olika solvinklar, har mycket olika radiometri, både inom bilden och mellan olika flygstråk.

**Analys av laserdata på enskild trädnivå kan bidra med mått som förbättrar trädslagsklassning genom att använda:**

- Kronform, som skattas bättre ju högre punkttätheten är
- Intensitet för laserreturer från enskilda träd.

Analys av enskilda träd har fördelen att kronformen kan skattas samt att man undviker rasterrutor med en blandning av trädslag, men skattningar för enskilda träd kräver fälldata med positionerade träd. Ett annat möjligt alternativ för att undvika blandade trädslag är att dela in laserdata i små rasterrutor, exempelvis 0,5 x 0,5 m, och klassa trädslag i varje rasterruta baserat på intensiteten från laserdata med träningsdata från trädslagrena bestånd. Detta kräver täta laserdata med intensitetsdata men däremot inte fälldata med positionerade träd. Metoden har testats tillsammans med multispektrala laserdata som registrerar laserljus i flera färger (Lindberg *et al.* 2021).

## 7.5 Kombination av areabaserade och enskilda träd metoder

Den areabaserade metoden har fördelen att den, rätt implementerad, ger väntevärdesriktiga skattningar för de skogliga variabler som korrelerar med trädens höjd och beståndets täthet. Enskilda-träd metoder ger i sitt grundutförande inte väntevärdesriktiga resultat, men har bland annat större möjlighet att bidra med information om trädens storleksfördelning, samt trädslag. Holmgren och Wallerman (2006) visade att areabaserade skattningar av diameterfördelning från 7 punkter/m<sup>2</sup> laserdata förbättrades när även data för enskilda detekterade

trädkronor användes. Lindberg *et al.* (2010), använde areabaserad imputering för att framgångsrikt kalibrera en träddlista baserat på analys av enskilda träd. Xu *et al.* (2014) använde kartering av enskilda träd från 12 punkter/m<sup>2</sup> laserdata för att förbättra skattning av diameterfördelning med den areabaserade metoden, samtidigt förbättrades även skattningen av totalt virkesförråd. Rätty *et al.* (2020) upprepade en liknande studie, men fann att metoden inte självklart kan rekommenderas eftersom skattning av diameterfördelning med enskilda-träd metoder var starkt skogstypsberoende.

Skäl att i framtiden kombinera areabaserade och enskilda-träd metoder inkluderar förbättrade skattningar av diameterfördelning, stamantal (Martin-Alcón, 2021), trädslagsskattningar, samt användning av egenskaper från karterade enskilda träd som metriker i areabaserade skattningar. Innan kombinationen areabaserad och enskilda träd-skattningar kan rekommenderas för fullskalig implementering behöver dock metoderna utvecklas och testas ytterligare.

## 7.6 Förändringsanalys på enskilda träd-nivå

Det är även möjligt att skatta avverkning och tillväxt för enskilda träd. Yu *et al.*, (2004) visade tidigt detta med 10 punkter/m<sup>2</sup> laserdata. Solberg *et al.* (2019), skattade ståndortsindex genom mätning av enskilda träd i två laserdataset med 5 års mellanrum och 10 punkter/m<sup>2</sup> skanningstäthet. En nationell skanning med hög upplösning skulle förbereda för detta i framtiden och denna möjlighet kan vara av intresse för enskilda aktörer även om den inte skulle implementeras i skogliga grunddata.

## 7.7 Koppling till träningsdata vid enskilda träd metoder

När attribut från enskilda träd, till exempel höjd eller kron diameter enligt analys från laserdata används som metriker i en areabaserad skattning, kan provvytorna mätas in som vanligt, där positionen endast mäts in för provytecentrum.

Om man däremot vill skatta egenskaper för de enskilda träden direkt från laserdata med hög punkttäthet, eller bara vill passa in mönstret av träd enligt laserdata med motsvarande trädpositioner på marken, så behövs koordinater för de fältmätta trädens position. Nedan anges tre metoder för detta.

### 7.7.1 Fältmätta provytor

Vid laserfjärranalys av skog används ofta fältmätta provytor som positionsbestämts med satellitnavigering för att beräkna sambanden mellan laserdata och skogliga data. När enskilda-träd metoder används behöver även trädens position inom provytan vara inmätt. Trädkronornas position i laserdata kan sedan matchas mot motsvarande stammars position på provytan (Olofsson *et al.*, 2008). Detta ger en passning på trädnivå mellan fälldata och laserdata, samt även en bättre geometrisk passning av hela provytan mot motsvarande laserdata, vilket bidrar till bättre skattningar även med areabaserade metoder. Vid produktionen av Skogliga grunddata används Riksskogstaxeringens permanenta provytor, där trädpositionerna mäts in genom att manuellt mäta trädens avstånd och riktning mot provytecentrum. I många forskningsstudier har trädens



positioner på provytan i stället mätts in i samband med klavningen genom att använda automatisk triangulering med Haglöfs PosTex system.

### **7.7.2 Markbaserad och mobil skanning**

Det pågår en snabb utveckling av system och metoder som gör det möjligt att automatiskt mäta trädens form och position med markbaserad eller mobil laserskanning eller optisk teknik (Liang *et al.*, 2022). Stamform och kronform kan mätas med stationära laserskannrar placerade på stativ, eller med skannrar monterade på personbil, ATV, skördare eller drönare. Det går även att skapa 3D modeller av trädstammar från optiska bilder och det finns flera företag som har börjat marknadsföra programvara för mätning av skog med mobiltelefonens sensorer. Denna utveckling är ett starkt argument för att även den nationella laserskanningen ska ha en upplösning som medger analys på enskilda-träd nivå eftersom stammarnas positioner och form från markbaserad mätning sedan kan matchas ihop automatiskt med trädkronornas positioner i laserdata (Lindberg *et al.* 2012a; Kankare *et al.* 2015). Denna matchning på trädnivå kan göras även om det finns dolda sektorer utan data i den markbaserade mätningen.

### **7.7.3 Skördardata som referensdata**

HPR filer från skördarnas apteringsdatorer kan användas som referensdata för laserskattningar. För närvarande pågår forskning kring denna möjlighet i flera forskargrupper i Norden (Saukkola *et al.*, 2019; Söderberg *et al.*, 2021; Rätty *et al.*, 2021; Noordermeer *et al.*, 2022; Karjalainen *et al.* 2022). I likhet med markbaserad och mobil skanning av träd, så ger skördardata mer information än traditionella fältmätningar, till exempel om stammens avsmalning, timmerandel, och kvalitet. Skördardata är dock endast representativa för den typ av skog som skördas, och inte för skogen som helhet. Eftersom skördardata kan erhållas automatiskt i stora mängder och fälldata oftast är en knapp resurs så är skördardata en viktig framtida datakälla, särskilt för skogsföretag. Skogforsk har i samarbete med SLU utvecklat applikationer som använder en areabaserad ansats för att träna laserdata med skördardata (Söderberg *et al.*, 2021). Möjligheten att även koppla skördardata för enskilda träd mot motsvarande laserdata (Holmgren *et al.*, 2012) är av intresse för till exempel klassning av trädslag, skador och skaderisk. För att använda skördardata som träningsdata för till exempel skador, så kan det behövas att en kod för skador anges vid avverkningen av ett träd. Kopplingen på trädnivå kommer att kunna ge mycket stora referensdataset som lämpar sig för automatiserad skattning med maskininlärning och är ett starkt motiv för att nästa nationella laserskanning ska ha en punkttäthet som medger analys på trädnivå.

Nyckeln till användning av skördardata på enskilda träd-nivå är att skördaraggregatets position ska vara känd med en noggrannhet om ca 1 m. Detta är tekniskt möjligt att åstadkomma med kombinationer av satellitnavigering och tröghetsnavigering (Kaartinen, 2015) som blir allt bättre. Om skördaren har en lasersensor kan även SLAM-teknik som mäter förflyttningen jämfört med träden användas (Tang, 2015). Lösningarna för positionering av skördaren liknar de lösningar som behövs för positionering av mobila sensorer som mäter inne i beståndet, men i skördarfallet måste även läget för skördarens kranarm registreras.

**Flygburna laserdata där träden analyseras som enskilda objekt kommer att kunna tränas med:**

- Enskilda träd på provytor med koordinatsatta träd
- Trädstammar som registrerats med markbaserad eller mobil laserskanning eller digital fotogrammetri
- Skördardata om skördaraggregatets position är känd med ca 1 m noggrannhet.

## 8 Naturvärden, skador och skogsskötsel

### 8.1 Laserfjärranalys av naturvärden

Naturvärden kan karteras i olika former och olika användare har olika behov och önskemål. Tre olika alternativ är följande.

1. Grundläggande attribut relevanta för naturvärden (dvs indikatorer) som skiktning, horisontell struktur eller död ved. Användarna kan kombinera dessa kartlager med kartor över trädhöjd, trädslag, markfuktighet eller andra egenskaper beroende på vilka arter som är av intresse. Denna typ av kartor är förmodligen mest intressanta för forskare i ekologi eller specialintresserade ekologer.
2. Skogstyper eller habitattyper till exempel enligt Natura 2000 naturtypskartan. Ett förslag till detta är beskrivet i en rapport till Skogsstyrelsen om träningsdata för att identifiera naturvärden från fjärranalysdata (Lindberg *et al.*, 2022). Enligt förslaget ska skogsmark karteras som en kombination av skogstyp och nivå av naturvärden. Skogstyp och nivå av naturvärden bestäms av olika indikatorer.
3. Habitatkartor för olika arter eller artgrupper, även kallat "habitat suitability index". Sådana kartor blir per definition väldigt specialiserade och är därför förmodligen inte relevanta för en generell kartering på nationell eller regional nivå.

Alternativ 2 och 3 ovan kommer förmodligen att bygga på modeller där indikatorer från fjärranalysdata ingår. Alternativ 1 kommer alltså att vara ett mellansteg i beräkningarna. En möjlig lösning för att tillhandahålla information för olika ändamål kan därför vara att inkludera både en karta med naturvärden eller habitat och kartor med utvalda indikatorer.

Databehoven för att översiktligt karaktärisera indikatorer för naturvärden sammanfaller till stor del med de skogliga databehoven. Kartering av skogens höjd och täthet samt trädslag är en god start. Även kartering av enskilda större träd kan vara av intresse för bedömning av naturvärden (Müller och Vierling, 2014). I ännu högre grad än för de skogliga tillämpningarna så är skogens vertikala struktur av intresse för bland annat fågelhabitat (Klein *et al.*, 2020), vilket gör att laserdata är en relevant datakälla, gärna tillsammans med andra datakällor (Hill *et al.*, 2014; Müller och Vierling, 2014). Bäst resultat när det gäller kartering av trädskiktets vertikala struktur fås med 3D segmentering av enskilda träd, allra bäst fungerar detta om man använder full-vågformsdata (Lindberg *et al.*, 2014).

Även skogens horisontella struktur, som variationer i trädhöjd och luckighet är indikatorer för naturvärden (Korhonen och Morsdorf, 2014). Sverdrup-Thygeson (2016) använde denna typ av mått för att identifiera skogsområden som kan ha urskogskaraktär. Ørka, *et al.* (2022), bygger vidare på Sverdrup-Thygesons studie och presenterar ett ramverk för en möjlig skogsekologisk baskarta över i Norge. I

denna karta används befintliga datakällor som laserdata satellitbilder och digitala kartor och referensdata från den norska riksskogstaxeringen. Man tar bland annat med skogsbruksåtgärder genom förändringsanalys. Kartering av stående döda träd kan göras med tät laserskanning under lövad säsong (Maltamo *et al.*, 2014b). Även kartering av liggande död ved kan göras i viss utsträckning, och fungerar bättre ju högre punkttäthet som används, se avsnittet nedan om skador.

För kartläggning av naturvärden finns också ett behov av att karaktärisera andra naturtyper än produktiv skogsmark. Korpela *et al.* (2009) rapporterar ett framgångsrikt test med att kartera myrvarv med laserdata med 1–3 punkter/m<sup>2</sup>.

I en del forskningsstudier har man i stället för att ta fram habitatkartor utifrån antagna preferenser för olika arter, direkt undersökt hur starka sambanden är mellan förekomst av en art och olika metriker från laserdata. Eldegard *et al.* (2014) undersökte sambanden mellan lasermetriker kombinerat med spektrala data för 8 fågelarter och erhöll låga men rimliga klassningsnoggrannheter för 7 av de 8 arterna.

Sammanfattningsvis, så liknar systemkraven för laserskanning för naturvärdesbedömningar i stort kraven för skogliga ändamål. Värdet av att kunna kartera skogens vertikala och horisontella struktur är dock sannolikt ännu större för naturvärdesinriktade produkter. En punkttäthet som medger kartering av enskilda träd, gärna genom 3D segmentering, bidrar till detta. Det finns därmed skäl att rekommendera en punkttäthet om minst 5 punkter/m<sup>2</sup>. För enstaka ändamål, som kartering av liggande död ved, skulle en väsentligt högre punkttäthet vara fördelaktig, men det finns annars inga tröskelvärden att rekommendera, utan tillförlitligheten i analyserna tenderar att öka svagt med ökad punkttäthet.

## 8.2 Laserfjärranalys av skador på skog

Det går att upptäcka förändrade områden med den areabaserade metoden. Noordermeer *et al.* (2019) jämförde laserdata från perioden 2001–2004 med 1 punkt/m<sup>2</sup>, med laserdata från 2016 med 4–12 punkter/m<sup>2</sup> och upptäckte kring 90% av gallrade och skadade ytor, men typ av skador framgår inte av artikeln.

Solberg *et al.* (2006) använde också en areabaserad ansats när de skattade blad-  
yteindex (LAI) från laserdata kalibrerade med fältmätningar. De jämförde tre laserskanningar över en vegetationssäsong och kunde med förändringsanalys ta fram kartor med 10 x 10 m rasterceller över ändringar i LAI där tallar förlorat barr på grund av angrepp av tallstekel. Kantola *et al.* (2011) fann att angrepp av tallstekel klassades med noggrannhet om 67,4% med en areabaserad ansats, men bara 60,6% med en enskilda-träd metod, trots att laserdata med 20 punkter/m<sup>2</sup> användes.

Vastaranta *et al.* (2011a) hittade snöbrottskadad skog i Finland genom att jämföra två laserdataset med 7 respektive 12 punkter/m<sup>2</sup> för rasterrutor om 5x5 m. Områden med snöbrottskadad och stormskadad skog kan sannolikt upptäckas ännu bättre på enskilda-träd nivå, åtminstone för gallrings och

slutavverkningsbestånd och givet att det finns tillräckligt med oskadade träd kvar för att möjliggöra en matchning av trädmönstren. Att det går att upptäcka avverkade träd genom att jämföra trädmönster med laserdata med 5 punkter/m<sup>2</sup> från två tidpunkter visades av Yu *et al.* (2004). Vid större skadetillfällen kan en specialflygning göras för jämförelsen med data från närmast föregående nationella skanning före skadetillfället. Det är då en fördel om den nationella skanningen har en punkttäthet som medger jämförelse på trädnivå, 5 punkter/m<sup>2</sup> borde räcka för detta.

Flera studier har också visat att det går att upptäckt åtminstone en del liggande vindfällda träd i stående skog om högupplöst laserskanning används. Heinaro *et al.* (2021) använde laserdata med 15 punkter/m<sup>2</sup> och hittade 30% av de vindfällda träden över 10 cm diameter, men 78% av träden över 30 cm diameter. Nyström *et al.* (2014) använde mycket täta laserdata med 65 punkter/m<sup>2</sup> och kunde automatiskt kartera 82% av nyligen vindfällda tallar, men mycket färre granar, genom att med endast data efter skadorna ta fram och jämföra två markmodeller med olika känslighet för kartering av små objekt. Lindberg *et al.* (2013) fann 41% av alla stammar i samma dataset, men med en stor överklassning. Upptäckt av vindfällna är en tillämpning som fungerar bättre ju högre punkttäthet som används. Det är dock knappast meningsfullt att möjligheten att upptäcka nyligen stormfällda stammar ska vara styrande för punkttätheten i en nationell skanning. Skog behöver upparbetas snarast efter en storm varför det främst är specialflygningar efter en storm som skulle vara aktuella i stället. I det läget så går det som Nyström (2014) visade att upptäcka liggande stammar utan förändringsanalys mot tidigare laserdata. Dock så finns det en risk att objekt nära marken sammanblandas med markreturen utan att ge upphov till separata punkter.

En aspekt med stor utvecklingspotential är att använda laserdata för att kartera områden med risk för skador. Skogsstyrelsen tillhandahåller en riskindexkarta, som visar skog med risk för granbarkborre. Trädhöjd, medeldiameter och virkesförråd har tillsammans med SLU skogskarta och satellitbilder ingått i modellerna som tränats med data från befintliga angrepp. Områden med risk för stormskador har i finska studier modellerats som en funktion av skogens höjd och läge i terrängen (Saarinen *et al.*, 2015). De nämnda tillämpningarna har använt en areabaserad ansats som inte kräver tätare laserdata än idag. För att vidareutveckla och implementera denna typ av modeller krävs främst referensdata, till exempel från skördare. För träning med skördardata så kan matchning mot mönstret för enskilda träd som detekterats med laserdata med hög punkttäthet vara en tillgång i framtiden.

Skogliga grunddata har också redan spelat en viktig roll då myndigheter och försäkringsbolag ska värdera skog efter större skadetillfällen som stormar och bränder. Kraven för denna tillämpning är desamma som för skogsinventering.

**Kartering av skador på skog kan inte vänta till nästa nationella skanning, men data från det nationella omdrevet kan ändå vara värdefulla för:**

- Att vara en tidig referens vid förändringsanalys mot färsk specialflygningar, även på trädnivå
- Framställning av riskkartor, gärna tränade på trädnivå med skördardata
- Värdering i samband med till exempel försäkringsärenden

### 8.3 Stöd vid beslut om skogsskötsel

Vastaranta *et al.* (2011b) visade att fältbedömt gallringsbehov kunde modelleras bättre med laserdata än med mätningar på provytor. De använde en areabaserad ansats och laserdata med 10 punkter/m<sup>2</sup>.

Kartering av gallringsbehov, givet höjd och grundyta från laserdata och ståndortsindex från befintliga register, var tidigt en viktig tillämpning vid införandet av laserskanning vid Bergvik skog, som också var först i Sverige med att gå från försök till en fullständig operationell tillämpning av tekniken. En sådan applikation finns idag även i Skogliga grunddata. Trädens höjd är en viktig parameter vid beslut om förstagallring och med laserdata får man även en översikt av vilka rasterutor som har högst och tätast skog vilket minskar behovet att planera efter avdelningsgränser. Denna tillämpning bör kunna utvecklas med hjälp av tillväxtdata där två eller flera laserskanningar från olika år jämförts.

## 9 Kort om andra tillämpningar

I detta avsnitt kommenteras kortfattat den tänkbara nyttan med högre punkttäthet för ett antal tillämpningsområden för nationella laserskanningar som är näraliggande de skogliga produkter som nämnts i föregående avsnitt. Dock görs ingen ingående litteraturgenomgång eftersom detta ligger utanför rapportens syfte.

### 9.1 Trädhöjdsraster

Ett raster som visar högsta laserretur från trädskiktet i varje rasterruta om 2 x 2 m i första versionen av skogliga grunddata och 1 x 1 m i det nuvarande andra omdrevet normaliserat för markmodellens höjd, finns med i Skogliga grunddata. Denna produkt är inte kalibrerad mot fältdata, men har visat sig mycket användbar för visuell tolkning, till exempel kartering av beståndsgränser vid upprättande av skogsbruksplaner. Det har även använts för automatisk segmentering av beståndsgränser. Med högre punkttäthet skulle denna typ av produkt kunna kompletteras med ett skikt med segmenterade trädkronor, åtminstone i gallrings och slutavverkningsskog.

### 9.2 Markmodeller

Framställning av en rastermodell som anger markens höjd är oftast den primära produkten för nationella laserskanningar och Lantmäteriet uppdaterar fortlöpande sin markmodell med data från det nuvarande andra laserskanningsomdrevet. I många länder som likt Sverige gjorde den första skanningen med ca 1 punkt/m<sup>2</sup>, så har en senare skanning upprepats med högre punkttäthet, ofta kring 10 punkter/m<sup>2</sup>. En markmodell bör framställas mot bakgrund av ett givet syfte. Om till exempel syftet är att modellera vattnets flöde i landskapet, så behöver modellen kompletteras med bland annat uppgifter om kulvertar under vägar. För skogliga skattningar med stöd av fältdata enligt tidigare avsnitt, så är sällan markmodellens kvalitet kritisk. Däremot så skulle en mycket högupplöst markmodell till exempel kunna ge viss information om blockighet och jordart.

### 9.3 Terrängskuggning och kulturlämningar

I Skogliga grunddata – mark finns ett skikt med terrängskuggning beräknat från markmodellen. Terrängskuggningen kan ge relief åt kartsikt, samt vara underlag för tolkning av kulturlämningar, som husgrunder, stenmurar, kolbottnar, fångstgropar mm. Detta är värdefullt eftersom många kulturlämningar inte är kända, eller har fel position i befintliga register. Bollandsås *et al.* (2012) har gjort ett experiment där 4 arkeologer fick tolka noggrant fältmätta kulturlämningar i terrängskuggade bilder baserade på laserdata med olika punkttäthet. Resultatet var att 24%, 61% och 73% av kulturlämningarna hittades med punkttätheterna 1, 5 respektive 10 punkter/m<sup>2</sup>.

Utvecklingen går mot mera automatisk kartering till exempel så har kolbottnar nyligen karterats automatiskt av Skogsstyrelsen. Med hjälp av data laserdata och artificiell intelligens kunde till exempel över 100 000 kolbottnar som tidigare inte var kända hittats i svenska skogar. Arbete pågår för att testa fler lämningstyper.

**Fler kulturlämningar kan hittas när punkttätheten ökas:**

- Andelen visuellt tolkade kulturlämningar ökade från 61% till 73% när punkttätheten ökade från 5 till 10 punkter/m<sup>2</sup> vid ett försök i Norge.

## 9.4 Markfuktighetskartor och dikeskartor

Markfuktighetskartor är bland de mest använda av de produkter som tagits fram från laserskannerdata och tillhandahålls av Skogsstyrelsen. Sverige är ett föregångsland inom detta område (Hoffmann *et al.*, 2022). Det finns två typer av markfuktighetskartor i Skogliga grunddata-mark. DTW (Depth To Water) kartan visar fuktstråk i landskapet där körning med skogsmaskiner om möjligt bör undvikas (Ågren *et al.*, 2014). SLU markfuktighetskarta använder fler skikt från terrängmodellen, samt även jordartskartor och tränar fuktighetsskattningen med stöd av markklassificeringen av Riksskogstaxeringens provytor (Ågren *et al.*, 2021). Denna karta har blivit mycket använd av skogsbruket, bland annat för val av trädslag efter slutavverkning.

Lidberg *et al.* (2017) utvärderade användningen av markmodeller med 16, 8, 4 och 2 m rasterceller för utvärdering av DTW kartor och fann att kartorna förbättrades med högre upplösning ned till den högsta testade upplösningen med 2 x 2 m rasterceller. En annan forskargrupp (Mohtashami *et al.*, 2022) utvärderade också DTW kartor med markmodeller med 2 m, 1 m och 0,5 m rasterceller från tre olika laserskanningar i Sundsvallsområdet, den mest högupplösta med laserdata med 24 punkter/m<sup>2</sup>. De fann att en markmodell med 1–2 m rasterceller var tillfredställande för fuktighetskartor för planering av avverkningar.

SLU har också på uppdrag av Skogsstyrelsen producerat en dikeskarta för hela Sverige (Lidberg *et al.*, 2022). Detta har gjorts med hjälp av ett neuralt nätverk applicerat på nuvarande nationella laserdata. Resultatet blev bättre för de områden i Sverige där en andra nationell skanning med en punkttäthet om 1–2 punkter fanns tillgänglig från vilken en markmodell med 0,5 m raster kunde tas fram. Dock så fanns fortsatt problem på grund av mycket vegetation kring många diken. För produktion av framtida dikeskartor så är önskemålet därför att kunna använda tätare laserdata med 5–10 punkter/m<sup>2</sup> (Lidberg 2022, e-post). Sådana dikeskartor kommer även att kunna förbättra framtida versioner av markfuktighetskartan. Laserdata med hög upplösning kan även vara värdefulla för att ge indikationer om jordart, vilket i sin tur kan förbättra markfuktighetskartorna, (Lidberg, 2022, e-post).

## 9.5 Nationella marktäckedata

Vid produktionen av Naturvårdsverkets Nationella marktäckedata ([NMD](#)) används en kombination av satellitbilder och nationella laserskannerdata.



Potentialen till förbättringar med högre skanningstäthet liknar den som finns för Skogliga grunddata. För att utnyttja denna potential fullt ut krävs dock fälttyr med trädpositioner. Detta kan vara ett motiv för en ökad samverkan vid produktion av de två produkterna.

## 9.6 3D kartering av bebyggelse och infrastruktur

Kommuner, med flera beställer ofta laserskanning med hög punkttäthet för framställning av 3D stadsmodeller och kartering i samband med byggande och underhåll av infrastruktur. En nationell skanning med högre upplösning skulle öka möjlighet att ta fram detaljerade 3D modeller för hela landskapet inklusive byggnader. Även med dagens punkttäthet om 1–2 punkter/m<sup>2</sup> går det att ta fram enkla byggnadsmodeller (Vosselman och Dijkman, 2001), men generellt, så går det bättre att automatiskt ta fram 3D modeller av till exempel byggnader, ju högre punkttätheten är och för detta ändamål bör punkttätheten helst inte understiga 5 punkter/m<sup>2</sup>. Virtanen *et al.* (2017) skriver: "Generally speaking, the higher the density, the easier the reconstruction of the object automatically with high detail. For classification tasks, a density below 5 points/ m<sup>2</sup> has been found to reduce performance. In single tree detection, increase above 10 points/ m<sup>2</sup> did not significantly improve results. In building modeling, densities of 4–20 points/m<sup>2</sup> are used."

## 9.7 Orienteringskartor

Förekomsten av nationella laserdata har även revolutionerat kartritningen inom orienteringssporten. I första hand så framställs kartkoncept där höjdkurvor, öppen mark och tät skog karterats automatiskt från laserdata. Man tar utöver detta även fram objekthöjdsbilder som till exempel visar stenblock och byggnader, men dessa verifieras med fältbesök och editeras sedan mot bildskärm i program som till exempel [OCAD](#). Även skikt från skogliga grunddata, som markfuktighetskartan, har börjat användas i koncepten för fältinventering. En högre punkttäthet för markpunkter än idag välkomnas av de som ritat orienteringskartor eftersom det till exempel händer att en spetsig höjd filtreras bort med dagens skanning. Dock så är även aktualitet viktig varför man inte efterfrågar en mycket högre punkttäthet om detta skulle ske på bekostnad av ett glesare omdrev (Boman, 2022, muntlig uppgift).

## 10 Något om andra fjärranalysdata

Denna litteraturgenomgång har koncentrerats på den typ av så kallade linjära lasersystem som kommit att användas i stor omfattning för framtagning av markmodeller, men även för andra områden som skogsinventering. Nedan kommenteras kort användbarheten av några kompletterande datakällor, samt andra typer av laserskannersystem.

### 10.1 Satellitbilder

Jordresurssatelliter som Sentinel 2 och Landsat producerar optiska satellitbilder som numera distribueras som öppna data. Bilderna registreras med några få dagars mellanrum, men många bilder kan inte användas på grund av moln. Satellitbilder blir mörkare när virkesförrådet ökar och olika skogstyper får något olika färg. Det är därmed möjligt att framställa översiktliga skogskartor med satellitdata. Dock så visar erfarenheten att skattningar av viktiga skogliga data som till exempel virkesförråd från enbart satellitbilder inte är så noggranna att de kan rekommenderas för det praktiska skogsbruket (Reese *et al.*, 2003). Det är först när 3D data som till exempel laserdata, blivit tillgängliga som automatiserade skogliga skattningar av till exempel virkesförråd har ansetts bra nog för användning i skogsbruket (Olsson och Nilsson, 2022). Tillsammans med 3D data kan dock satellitbildernas färg ge data om trädslag som ger bättre areabaserade skattningar, även om inte trädslagsskattningen i sig skulle bli perfekt. Satellitbilderna ger även möjlighet till frekventa uppdateringar av avverkningar och skador.

### 10.2 2D och 3D data från flygbilder

Flygbilder är numera digitala bilder som registrerats i flera våglängdsband. Ofta används dessa som bakgrund i olika kartsystem, i form av ortofotomosaiker. I likhet med satellitbilder så kan färginformationen i flygbilderna användas för klassning av trädslag, vilket till exempel tillämpas i Finland. Dock så gör den stora öppningsvinkeln i en flygfotokamera i kombination med våra relativt låga solvinklar i Norden och ett träddominerat landskap att det inom bilden finns stora radiometriska skillnader. I delar av bilden avbildas träden i huvudsak i medljus och i andra delar huvudsakligen i motljus. För att utjämna dessa skillnader och göra bilderna mer visuellt tilltalande använder ibland producenterna av flygbilder digitala filter som ändrar radiometrin olika mycket i olika delar av bilden. Automatisk användning av färg från flygbilder för till exempel trädslagssklassning där färgskillnaderna är små kräver därför kännedom om bildernas framställningsprocess och tillgång till programvara som kan särskilja de solbelysta och skuggade delarna av trädkronorna. Det kan dock ändå vara svårt att få flygbilder som registrerats under olika dagar radiometriskt jämförbara om till exempel solhöjden är olika. För samtidig bearbetning av data över stora områden så är det enklare att använda satellitbilder, som tack vare den höga registreringshöjden har väsentligt mindre tittvinkelskillnader inom bilderna och därmed en jämnare radiometri.

För att skatta virkesförråd, grundyta och trädhöjd med god noggrannhet behövs sensordata som mäter skogens höjd. Förutom laserdata, så kan 3D punkmoln som visar krontakets läge fås från matchning av flygbilder. För markens läge används då en befintlig markmodell gjord med en tidigare laserskanning. Jämförande studier visar att krontakets höjd mäts med god noggrannhet med denna teknik men att skogens varierande täthet fångas bättre med laserdata (Vastaranta *et al.*, 2013; Rahlf *et al.*, 2014). Laserdata ger därför bättre skattningar än flygbilder. Eftersom punkmoln från flygbilder kan framställas kostnadseffektivt från befintliga omdrevsbilder kan de ändå ha en roll för framtida skogliga skattningar, till exempel genom att skatta höjdtillväxt med punktmoln från en serie av år.

## 10.3 Andra typer av laserdata

### 10.3.1 Single Photon LiDAR

Single Photon LiDAR (SPL) och Geiger-Mode LiDAR (GML) är två närbesläktade teknologier som använder en matris av sensorelement som vart och ett kan generera en datapunkt från en enda returnerad foton (Mandlbürger *et al.*, 2019). Systemen kan flygas på högre höjd (4000–10 000 m) än konventionella laserskanningssystem och samlar in 10–100 gånger mer data per tidsenhet. Dessa ursprungligen militära teknologier blev tillgängliga på den civila marknaden kring år 2015 och än så länge finns endast ett fåtal system. Datat är i sin ursprungsform mycket brusigt och egenskaperna för de laserpunkter som levereras från operatören är beroende av vilken filtrering som gjorts vid förbearbetningen. Vid ett försök i Sverige med Leicas sensor SPL100 (Wästlund *et al.*, 2018) fick SLU data med 25 punkter/m<sup>2</sup> från en flygning på 3800 m höjd. Resultatet för areabaserade skogliga skattningar med SPL100 blev i detta fall något bättre än med ett dataset med 39 punkter/m<sup>2</sup> flyget på 400 m höjd med ett konventionellt lasersystem. Ett försök i Finland bekräftade dessa resultat (Yu *et al.*, 2020) medan en annan studie i Finland gav marginellt sämre resultat med SPL100 data än med konventionella lasersystem (Räty *et al.*, 2022). Den höga punkttheten gör också att SPL data bör vara lämpligt för kartering av enskilda träd.

SPL och GML teknologierna visar att det kommer att gå att täcka stora områden snabbt med täta laserdata. SPL100 kan till exempel registrera upp till 1000 km<sup>2</sup>/timma med 8 punkter/m<sup>2</sup> (Mandlbürger *et al.*, 2019). Detta är en fördel vid datainsamling för nationella skogliga skattningar där det är önskvärt att stora områden kan skannas under samma förutsättningar. Det återstår dock att verifiera att datakvaliteten är jämförbar över stora områden även om det skulle finnas variationer i atmosfären, i synnerhet som SPL100 använder grönt laserljus som dämpas mer av atmosfären än de längre våglängder som vanligen används i laserskannrar. Än så länge finns det också så få system på denna marknad att om en upphandling skulle innefatta användning av dessa system bör den ske i konkurrens med konventionella laserskanningssystem. Om en upphandling av skanning med SPL eller GML system skulle bli aktuell så är det även viktigt att observera att mätnoggrannheter för markmodellen i hittillsvarande utvärderingar visat sig något sämre än den som uppnås med konventionella laserskanningssystem (Stoker *et al.*, 2016; Brown, *et al.*, 2020).

### 10.3.2 Intensitet och multispektral laserskanning

För klassning av trädslag och identifiering av skador är det värdefullt att kunna använda den returnerade laserpulsens intensitet (Holmgren och Persson, 2004). Lasern använder ett väl definierat våglängdsband och laserreturen påverkas inte av skuggor på samma sätt som flygbilder och satellitbilder. De flesta lasersystem levererar en intensitet för varje datapunkt som bör vara proportionell mot reflektansen, men som inte alltid är väl dokumenterad. När intensitetsdata ska användas bör de också kalibreras för att avståndet till sensorn varierar tvärs skanningstråket.

Multispektrala laserskanningssystem kombinerar lasrar som använder olika våglängdsband så att intensitetsdata kan erhållas från flera laserfärger. Exempel på system är Optech Titan som använder grönt (532 nm), NIR (1064 nm) och mellan-IR (1550 nm) ljus, samt Riegl VQ-1560-DW som använder 532 nm och 1064 nm. Användning av intensitet från flera spektralband ger en förbättrad möjlighet för klassning av trädslag jämfört med om intensitet från bara ett band används (Axelsson. *et al.*, 2018). Det enskilda intensitetsband som har mest information om trädslag är nära infrarött (1064 nm) (Yu *et al.*, 2017).

Det finns än så länge endast ett fåtal multispektrala laserskanningssystem och de existerande systemen måste dessutom flygas på relativt låg höjd för att leverera bra data. Multispektral laserskanning kan därför inte anses moget att i nuläget ingå som ett krav i en upphandling för landstäckande skanning. Däremot så är det en fördel för bland annat förbättrad trädslagsklassning om det system som väljs kan leverera intensitetsdata som kan anses vara proportionellt mot reflektansen, även om det endast är från ett våglängdsband.

### 10.3.3 Full vågform laser

De punktdata som erhålls från flygburen laserskanning genereras från topparna i den returnerade vågen med laserljus. Algoritmen för att beräkna punkternas läge på vågen med fotoner är däremot sällan dokumenterad vilket dock inte är något större problem när kalibrering sker mot fältdata. Det finns också ett minsta avstånd mellan två genererade punkter från samma utsända laserpuls, vilket till exempel kan försvåra analys av vegetation nära marken. En del laserskanningssystem kan i tillägg till punktdata, även leverera data för hela den returnerade vågformen, till exempel genom att intensiteten har samplats för varje decimeter på vågen. Det har visat sig att analys av full vågformsdata ger bättre information om skogens vertikala struktur och trädslag än konventionella punktdata (Lindberg *et al.*, 2012b; Lindberg *et al.*, 2014; Hollaus *et al.*, 2014). I likhet med intensitetsdata, så måste full-vågformsdata kalibreras för olika avstånd mellan sensor och mark. Det är dock tveksamt om vinsten med full-vågformsdata är så stor att den vid nationell skanning uppväger behovet av ökad bearbetning och datalagring och minskat antal lämpliga skannersystem. En nackdel med att samla in full vågformsdata är att det kräver mycket lagringsutrymme och att data måste bearbetas mer för att ta fram information relevant för skogliga tillämpningar.

Vissa laserskanningssystem sparar vågformsattribut för varje punkt. Detta kan vara ett sätt att få mer information för till exempel trädslagsklassning utan att behöva spara och bearbeta full vågformsdata.

## 11 Erfarenheter från andra länder

Inför ett föredrag hösten 2021 (Olsson och Nilsson, 2021) skickades en enkät om användningen av laserdata ut till [ENFIN](#) nätverket som är en samarbetsorganisation för Europas riksskogstaxeringar. Riksskogstaxeringarnas huvuduppgift är att ta fram skoglig statistik, vilket främst görs genom fältinventering av provytor. Enligt enkätsvaren har fem riksskogstaxeringar i Europa även börjat att i operationell skala ta fram rasterdatabaser med skogliga skattningar genom att kombinera laserdata med rikstaxprovytor. Dessa länder är: Österrike, Tyskland, Danmark, Sverige och Norge. Tjeckien och Schweiz använder på motsvarande sätt 3D punktmoln från digital fotogrammetri i stället för laserdata. Alla dessa länder använder laserdata eller fotogrammetripunktmoln från respektive lands nationella kartmyndighet. I de flesta fallen har laserdata med minst 5 punkter/m<sup>2</sup> använts. De flesta länderna har även kompletterat de laserdatabaserade analyserna med färg från flygbilder eller satellitbilder för att få viss information om trädslag och i vissa fall även skador.

I Finland använder riksskogstaxeringen sedan ca 30 år satellitbilder för att ta fram yttäckande rasterkartor samt förbättra de skogliga skattningarna för medelstora områden som kommuner. Gemensam datainsamling för skoglig planering görs i stället av Skogsstyrelsens finska motsvarighet, Skogscentralen. De använder laserdata med ca 5 punkter/m<sup>2</sup> i kombination med färg från flygbilder. Detta omfattande program har en egen insamling av såväl laserdata som fältmätta provytor. Omdrevstiden för att täcka hela Finland är för närvarande beräknad till 6 år, förutom i norra Lappland där den är 12 år (Magnus Nilsson, 2022). För distribution av de skogliga produkterna till skogsägare finns hemsidan [Min Skog](#) (Skogscentralen 2022).

Utanför Europa så har flera provinser i Kanada på liknande sätt som i Finland laserskannats för framställning av skogskartor i skogsmyndigheternas regi men utan koppling till den nationella riksskogstaxeringen.

Samtliga länder använder den areabaserade metoden, i vissa fall kompletterat med analys av enskilda träd, för bättre inpassning mot fältmätta provytor, eller för att få kompletterande egenskaper om till exempel förekomsten av träd med stora kronor.

## 12 Slutsatser

Den areabaserade metoden som används för skattning av Skogliga grunddata ger väntevärdesriktiga skattningar, är väl beprövad, och fungerar bra med dagens punkttäthet.

För att förbättra skattningsnoggrannheten är det ändå angeläget med en framtida högre punkttäthet om ca 5–10 punkter/m<sup>2</sup> vilket skulle medge matchning av trädmönster mellan laserdata och fältmätta provytor. Denna punkttäthet ger även en rad ytterligare möjligheter, exempel är: bättre klassning av trädslag och skador, samt mätning av de flesta träden på trädnivå; träning av modeller med data om enskilda stammar från mobil skanning eller skördare; bättre data om diameterfördelning och bestånds skiktning. Den extra nyttan med den högre punkttätheten ca 10 punkter/m<sup>2</sup> jämfört med 5 punkter/m<sup>2</sup> är mer påtaglig vid kartering av linjära element som diken, kulturlämningar och infrastruktur än vid kartering av trädkronor.

## 13 Referenser

Nedan listas de vetenskapliga referenser som ligger till grund för rapporten. Klickbara länkar till referenserna anges oftast med deras unika DOI nummer. I de flesta fall går det även att själv skriva in länken genom att byta ut DOI: mot <https://doi.org/> följt av det unika numret. En del artiklar finns bakom betalväggar, men nås oftast gratis av den som är inloggad via ett universitet. Ofta finns också kopior av artiklarna gratis på internet, till exempel på författarnas hemsidor.

Adnan, S., Maltamo, M., Coomes, D.A., Valbuena, R. 2017. Effects of plot size, stand density, and scan density on the relationship between airborne laser scanning metrics and the Gini coefficient of tree size inequality, *Can. J. For. Res.* 47: 1590–1602. [DOI: 10.1139/cjfr-2017-0084](https://doi.org/10.1139/cjfr-2017-0084)

Axelsson, A., Lindberg, E., Olsson, H. 2018. Exploring Multispectral ALS Data for Tree Species Classification, *Remote Sens.* 2018, 10, 183. [DOI: 10.3390/rs10020183](https://doi.org/10.3390/rs10020183)

Bacher, U., Roth, R. 2021. Airborne LiDAR systems optimization for foliage penetration. I: Hollas, M., Pfeifer, N. (ed). Proceedings of the Silvilaser conference 2021. [DOI: 10.34726/wim.18s61](https://doi.org/10.34726/wim.18s61)

Bollandsås, O.M., Maltamo, M., Næsset, E., Gobakken, T. 2013. Comparing parametric and nonparametric modeling of diameter distributions on independent data using airborne laser scanning, *Forestry.* 86:493–501. [DOI: 10.1093/forestry/cpt020](https://doi.org/10.1093/forestry/cpt020)

Bollandsås, O.M., Risbøl, O., Ene, L.T., Nesbakken, A., Gobakken, T., Næsset, E. 2012. Using airborne small-footprint laser scanner data for detection of cultural remains in forests: an experimental study of the effects of pulse density and DTM smoothing. *Journal of Archaeological Science*, 39:2733–2743. [DOI: 10.1016/j.jas.2012.04.026](https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.04.026)

Breidenbach, J., Astrup, R. The Semi-Individual Tree Crown Approach. I: Maltamo, M., Næsset, E., Vauhkonen, J. (ed). 2014. Forestry applications of airborne laser scanning: concepts and case studies. Managing forest ecosystems, Vol. 27. Springer, Dordrecht. pp. 113–135. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-8663-8>

Breiman, L. 2001. Random Forests. *Machine Learning* 45:5–32. [DOI: 10.1023/A:1010933404324](https://doi.org/10.1023/A:1010933404324)

Brown, R., Hartzell, P., Glennie, C. 2020. Evaluation of SPL100 Single Photon Lidar Data. *Remote Sens.* 2020, 12(4), 722. [DOI: 10.3390/rs12040722](https://doi.org/10.3390/rs12040722)

Cosenza, D.N., Packalen, P., Malatamo, M., Varvia, P., Rätty, J., Soares, P., Tome, M., Stunk, J.L., Korhonen, L. 2022. Effects of numbers of observations and predictors for various model types on the performance of forest inventory with airborne laser scanning. *Can. J. For Res.* 52:385–395. [DOI: 10.1139/cjfr-2021-0192](https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0192)



Eldegard, K., Dirksen, J.W., Ørka, H.O., Halvorsen, R., Næsset, E., Gobakken, T., Ohlson, M. 2014. Modelling bird richness and bird species presence in a boreal forest reserve using airborne laser scanning and aerial images. *Bird Study*, 61:204-219. [DOI: 10.1080/00063657.2014.885492](https://doi.org/10.1080/00063657.2014.885492)

Eysn, L., Hollaus, M., Lindberg, E., Berger, F., Monnet, J.M., Dalponte, M., Kobal, M., Pellegrini, M., Lingua, E., Mongus, D., Pfeifer, N. 2015. A Benchmark of Lidar-Based Single Tree Detection Methods Using Heterogeneous Forest Data from the Alpine Space. *Forests*, 2015, 6, 1721–1747. [DOI: 10.3390/f6051721](https://doi.org/10.3390/f6051721)

Frazer, G.W., Magnussen, S., Wulder, M.A., Niemann, K.O. 2011. Simulated impact of sample plot size and co-registration error on the accuracy and uncertainty of LiDAR-derived estimates of forest stand biomass. *Remote Sens. Environ*, 115:636–649. [DOI: 10.1016/j.rse.2010.10.008](https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.008)

Gobakken, T., Næsset, E. 2009. Assessing effects of positioning errors and sample plot size on biophysical stand properties derived from airborne laser scanner data. *Can. J. For Res.* 39:1036–1052. [DOI: 10.1139/X09-025](https://doi.org/10.1139/X09-025)

Gobakken, T., Næsset, E. 2008. Assessing effects of laser point density, ground sampling intensity, and field plot sample size on biophysical stand properties derived from airborne laser scanner data. *Can. J For Res.* 38:1095–1109. [DOI: 10.1139/X07-219](https://doi.org/10.1139/X07-219)

Goodwin, N.R., Coops, N.C., Culvenor, D.S. 2006. Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude. *Remote Sens. Environ*, 103:140–152. [DOI: 10.1016/j.rse.2006.03.003](https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.03.003)

Harrie, L. (Red) 2020. Geografisk informationsbehandling – Teori, metoder och tillämpningar. Sjunde upplagan, Studentlitteratur.

Heinero, E., Tanhuanpää, T., Yrttimaa, T., Holopainen, M., Vastaranta, M., 2021. Airborne laser scanning reveals large tree trunks on forest floor. *For. Ecol. Manag.* 491 (2021), 119225. [DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119225](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119225).

Hill, R.A., Hinsley, S.A., Broughton, R.K. 2014. Assessing habitats and organism-habitat relationships by airborne laser scanning. I: Maltamo, M., Næsset, E., Vauhkonen, J. (ed). 2014. Forestry applications of airborne laser scanning: concepts and case studies. *Managing forest ecosystems*, Vol. 27. Springer, Dordrecht. pp. 334–356. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-8663-8>

Hoffmann, S., Schönauer, M., Heppelmann, J., Asikainen, A., Cacot, E., Eberhard, B., Hasenauer, H., Ivanovs, J., Jaeger, D., Lazdins, A., Mohtashami, S., Moskalik, T., Nordfjell, T., Stereńczak, K., Talbot, B., Uusitalo, J., Vuillermoz, M., Astrup, R. 2022. Trafficability Prediction Using Depth-to-Water Maps: The Status of Application in Northern and Central European Forestry. *Current Forestry Reports*, 8:55–71. [DOI: 10.1007/s40725-021-00153-8](https://doi.org/10.1007/s40725-021-00153-8)

- Hollaus, M., Mücke, W., Roncat, A., Pfeifer, N., Briese, C. 2014. Full-Waveform Airborne Laser Scanning Systems and Their Possibilities in Forest Applications. I: Maltamo, M., Næsset, E., Vauhkonen, J (ed). Forestry applications of airborne laser scanning: concepts and case studies. Managing forest ecosystems, Vol. 27. Springer, Dordrecht. pp. 43–61. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-8663-8>
- Holmgren, J., Lindberg, E., Olofsson, K., Persson, H.J. 2022. Tree crown segmentation in three dimensions using density models derived from airborne laser scanning. *Int. J. Remote Sens.* 43:299-329. DOI: [10.1080/01431161.2021.2018149](https://doi.org/10.1080/01431161.2021.2018149)
- Holmgren, J., Barth, A., Larsson, H., Olsson, H. 2012. Prediction of stem attributes by combining airborne laser scanning and measurements from harvesters. *Silva Fennica*, 46:227–239. DOI: [10.14214/sf.56](https://doi.org/10.14214/sf.56)
- Holmgren, J., Persson, Å., Söderman, U. 2008. Species identification of individual trees by combining high resolution LiDAR data with multi-spectral images. *Int. J. Remote Sens.* 29:1537–1552. DOI: [10.1080/01431160701736471](https://doi.org/10.1080/01431160701736471)
- Holmgren, J., Wallerman, J. 2006. Estimation of tree size distribution by combining vertical and horizontal distribution of LIDAR measurements with extraction of individual trees. I: Proceedings of the workshop on 3D remote sensing in forestry, 14–15 Feb 2006. University of Natural Resources and Applied Life Science, Vienna, pp. 168–173. [https://boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H85000/H85700/workshops/3drsforestry/Proceedings\\_3D\\_Remote\\_Sensing\\_2006\\_rev\\_20070129.pdf](https://boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H85000/H85700/workshops/3drsforestry/Proceedings_3D_Remote_Sensing_2006_rev_20070129.pdf)
- Holmgren, J., Persson, Å. 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sens. Environ.* 90:415–423. DOI: [10.1016/S0034-4257\(03\)00140-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00140-8)
- Holmgren, J. 2004. Prediction of tree height, basal area and stem volume in forest stands using airborne laser scanning. *Scand. J. Forest Res.* 19:543–553. DOI: [10.1080/02827580410019472](https://doi.org/10.1080/02827580410019472)
- Holopainen, M., Vastaranta, M., Hyypä, J. 2014. Outlook for the next generation's precision forestry in Finland. *Forests*, 2014,5,1682–1694. DOI: [10.3390/f5071682](https://doi.org/10.3390/f5071682)
- Hopkinson, C. 2007. The influence of flying altitude, beam divergence, and pulse repetition frequency on laser pulse return intensity and canopy frequency distribution. *Can. J. Remote Sens.* 33 (4), 312–324. DOI: [10.5589/m07-029](https://doi.org/10.5589/m07-029).
- Hyypä, J., Hyypä, H., Leckie, D., Gougeon, F., Yu, X., Maltamo, M. 2008. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data. *Int. J. Remote Sens.* 29:1339–1366. DOI: [10.1080/01431160701736489](https://doi.org/10.1080/01431160701736489)
- Hyypä, J., Inkinen, M. 1999. Detecting and estimating attributes for single tree using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland* 16:27–42.

[https://www.researchgate.net/publication/258707378\\_Detecting\\_and\\_estimating\\_attributes\\_for\\_single\\_trees\\_using\\_laser\\_scanner](https://www.researchgate.net/publication/258707378_Detecting_and_estimating_attributes_for_single_trees_using_laser_scanner) Photogramm J Finl

Jakubowski, M.K., Guo, Q., Kelly, M., 2013. Tradeoffs between lidar pulse density and forest measurement accuracy. *Remote Sens. Environ.* 130:245–253. DOI: [10.1016/j.rse.2012.11.024](https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.11.024)

Junttila, V., Finley, A.O., Bradford, J.B., Kauranne, T. 2013. Strategies for minimizing sample size for use in airborne LiDAR-based forest inventory. *For. Ecol. Manag.* 292:75–85. DOI: [10.1016/j.foreco.2012.12.019](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.019)

Junttila, V., Maltamo, M., Kauranne, T. 2008. Sparse Bayesian estimation of forest stand characteristics from ALS. *Forest Science*, 54:543–552. DOI: [10.1093/forestscience/54.5.543](https://doi.org/10.1093/forestscience/54.5.543)

Kaartinen, H., Hyypä J., Vastaranta, M., Kukko, A., Jaakkola, A., Yu, X., Pyörälä, J., Liang, X., Liu, J., Wang, Y., Kajaluoto, R., Melkas, T., Holopainen, M., Hyypä, H. 2015. Accuracy of Kinematic Positioning Using Global Satellite Navigation Systems under Forest Canopies. *Forests*, 6, 3218–3236. DOI: [10.3390/f6093218](https://doi.org/10.3390/f6093218)

Kaartinen, H., Hyypä, J., Yu, X., Vastaranta, M., Hyypä, H., Kukko, A., Holopainen, M., Heipke, C., Hirschmugl, M., Morsdorf, F., Næsset, E., Pitkänen, J., Popescu, S., Solberg, S., Wolf, B.M., Wu, J-C. 2012. An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. *Remote Sens*, 4, 950–974. DOI: [10.3390/rs4040950](https://doi.org/10.3390/rs4040950)

Kandare, K., Ørka, H.O., Chan, J. C-W., Dalponte, M. 2016. Effects of forest structure and airborne laser scanning point cloud density on 3D delineation of individual tree crowns. *Eur. J. Remote Sens.* 49:337–359. DOI: [10.5721/EuJRS20164919](https://doi.org/10.5721/EuJRS20164919)

Kankare, V., Holopainen, M., Vastaranta, M., Liang, X., Yu, X., Kaartinen, H., Kukko, A., Hyypä, J. 2017. Outlook for the Single-Tree-Level Forest Inventory in Nordic Countries. I: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017. [Outlook for the Single-Tree-Level Forest Inventory in Nordic Countries | SpringerLink](#)

Kankare, V., Liang, X., Vastaranta, M., Yu, X., Holopainen, M., Hyypä, J. 2015. Diameter distribution estimation with laser scanning based multisource single tree inventory. *ISPRS J. Photogram. Remote Sens.* 108:161–171. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.07.007>

Kansanen, K., Vauhkonen, J., Lähivaara, T., Seppänen, A., Maltamo, M., Mehtätalo, L. 2019. Estimating forest density and structure using Bayesian individual tree detection, stochastic geometry, and distribution matching. *ISPRS J. Photogram. Remote Sens.* 152:66–78. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2019.04.007](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.007)

Kantola, T., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Vastaranta, M., Kankare, V., Yu, X., Holopainen, M., Talvitie, M., Solberg, S., Puolakka, P., Hyypä, J. 2011. Using high density ALS data in plot level estimation of the defoliation by the Common

- pine sawfly. I: Proceedings, SilviLaser 2011, Oct. 16–20, 2011 – Hobart, Australia. [http://www.iufro.org/download/file/8239/5065/40205-silvilaser2011\\_pdf](http://www.iufro.org/download/file/8239/5065/40205-silvilaser2011_pdf)
- Karjalainen, T., Mehtätalo, L., Packalen, P., Malinen, J., Næsset, E., Gobakken, T., Maltamo, M. 2022. In-situ calibration of stand level merchantable and sawlog volumes using cut-to-length harvester measurements and airborne laser scanning data. *Forestry*. 95:105–117. DOI: [10.1093/forestry/cpab031](https://doi.org/10.1093/forestry/cpab031)
- Keränen, J., Maltamo, M., Packalen, P. 2016. Effect of flying altitude, scanning angle and scanning mode on the accuracy of ALS based forest inventory. *Int. J. applied Earth observation and Geoinformation*. 52:349–360. DOI: [10.1016/j.jag.2016.07.005](https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.07.005)
- Klein, J., Haverkamp, P. J., Lindberg, E., Griesser, M., Eggers, S. 2020. Remotely Sensed Forest Understory Density and Nest Predator Occurrence Interact to Predict Suitable Breeding Habitat and the Occurrence of a Resident Boreal Bird Species. *Ecology and Evolution*. 10:2238–2252. DOI: [10.1002/ece3.6062](https://doi.org/10.1002/ece3.6062)
- Koch, B., Kattenborn, T., Straub, C, Vauhkonen, J. 2014. Segmenting forest into tree objects. In: Maltamo, M., Næsset, E., Vauhkonen, J. (ed) 2014. Forestry applications of airborne laser scanning: concepts and case studies. Managing forest ecosystems, Vol. 27. Springer, Dordrecht. pp. 251–252. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-8663-8>
- Koenig, K., Höfle, B. 2016. Full-Waveform Airborne Laser Scanning in Vegetation Studies—A Review of Point Cloud and Waveform Features for Tree Species Classification. *Forests*. 2016, 7, 198. DOI: [10.3390/f7090198](https://doi.org/10.3390/f7090198)
- Korhonen, L., Morsdorf, F. 2014. Estimation of canopy cover, gap fraction and leaf area index with airborne laser scanning. I: Maltamo, M., Næsset, E., Vauhkonen, J. (ed). 2014. Forestry applications of airborne laser scanning: concepts and case studies. Managing forest ecosystems, Vol. 27. Springer, Dordrecht. pp. 397–418. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-8663-8>
- Korpela, I., Koskinen, M., Vasander, H., Holopainen, M., Minkkinen, K. 2009. Airborne small-footprint discrete-return LiDAR data in the assessment of boreal mire surface patterns, vegetation, and habitats, *For. Ecol. Manage.*, 258:1549–1566. DOI: [10.1016/j.foreco.2009.07.007](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.007).
- Kukkonen, M., Korhonen, L., Maltamo, M., Suvanto, A., Packalen, P. 2018. How much can airborne laser scanning based forest inventory by tree species benefit from auxiliary optical data? *Int. J. Applied Earth observation and Geoinformation*. 72:91-98. DOI: [10.1016/j.jag.2018.06.017](https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.017)
- Liang, X., Kukko, A., Balenovic, I., Saarinen, N., Junttila, S., Kankare, V., Holopainen, M., Mokros, M., Surovy, P., Kaartinen, H., Jurjevic, L., Honkavaara, E., Nasi, R., Liu, J.B., Hollaus, M., Tian, J.J., Yu, X., Pan, J., Cai, S.S., Virtanen, J.P., Wang, Y., Hyypä, J. 2022. Close-Range Remote Sensing of Forests: The state of the art, challenges, and opportunities for systems and data acquisitions.

*IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, June 2022.

[DOI: 10.1109/MGRS.2022.3168135](https://doi.org/10.1109/MGRS.2022.3168135)

Lidberg, W., Paul, S., Westphal, F., and Ågren, A. 2022. Mapping Sweden's drainage ditches using deep learning and airborne laser scanning, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-4639, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-4639>.

Lidberg, W., Nilsson, M., Lundmark, T., Ågren, A.M., 2017. Evaluating preprocessing methods for of digital elevation models for hydrological modelling. *Hydrol. Process.* 31:4660–4668. [DOI: 10.1002/hyp.11385](https://doi.org/10.1002/hyp.11385)

Li, J., Hu, B., Noland, T.L. 2013. Classification of tree species based on structural features derived from high density LiDAR data. *Agric. For. Meteorol.* 171:104–114. [DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.11.012](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.012)

Lindberg, E., Löfroth, T., Adler, S., Dahlgren, J. 2022. Digitala naturvärden – framtagning av träningsdata och referensdata som underlag för modeller med syfte att identifiera naturvärden från fjärranalysdata. Rapport under publicering. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig resurshushållning.

Lindberg, E., Holmgren, J., Olsson, H. 2021. Classification of tree species classes in a hemi-boreal forest from multispectral airborne laser scanning data using a mini raster cell method. *Int. J. Applied earth observation and geoinformation.* 100, 102334. [DOI: 10.1016/j.jag.2021.102334](https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102334)

Lindberg, E., Holmgren, J. 2017. Individual Tree Crown Methods for 3D Data from Remote Sensing. *Current Forestry Reports.* 3:19–31. [DOI: 10.1007/s40725-017-0051-6](https://doi.org/10.1007/s40725-017-0051-6)

Lindberg, E., Eysn, L., Hollaus, M., Holmgren, J., Pfeifer, N., 2014. Delineation of tree crowns and tree species classification from full-waveform airborne laser scanning data using 3-D ellipsoidal clustering. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens.* 7:3174–3181. [DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2331276](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2331276)

Lindberg, E., Hollaus, M., Mücke, W., Fransson, J.E.S., Pfeifer, N. 2013. Detection of lying tree stems from airborne laser scanning data using a line template matching algorithm. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5/W2, 2013. *ISPRS Workshop Laser Scanning 2013*, 11–13 November 2013, Antalya, Turkey. <https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/II-5-W2/index.html>

Lindberg, E., Holmgren, J., Olofsson, K., Olsson, H. 2012a. Estimation of stem attributes using a combination of terrestrial and airborne laser scanning. *European Journal of Forest Research*, 131:1917-1931. [DOI: 10.1007/s10342-012-0642-5](https://doi.org/10.1007/s10342-012-0642-5)

Lindberg, E., Olofsson, K., Holmgren, J., Olsson, H. 2012b. Estimation of 3D vegetation structure from waveform and discrete return airborne laser scanning data. *Remote Sens. Environ.* 118:151-161. [DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.015](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.015)

- Lindberg, E., Holmgren, J., Olofsson, K., Wallerman, J., Olsson, H. 2010. Estimation of tree lists from airborne laser scanning by combining single-tree and area-based methods. *Int. J. Remote Sens.* 31:1175-1192. [DOI: 10.1080/01431160903380649](https://doi.org/10.1080/01431160903380649)
- Lindgren, N., Nyström, K., Saarela, S., Olsson, H., Ståhl, G. 2022. Importance of calibration for improving the efficiency of data assimilation for predicting forest characteristics. *Remote Sensing*, 2022, 14, 4627. [DOI: 10.3390/rs14184627](https://doi.org/10.3390/rs14184627)
- Maltamo, M., Packalen, P., Kangas, A. 2021. From comprehensive field inventories to remotely sensed wall-to-wall stand attribute data – a brief history of management inventories in the Nordic countries. *Canadian J. Forest Res.* 51:257-266. [DOI: 10.1139/cjfr-2020-0322](https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0322)
- Maltamo, M., Næsset, E., Vauhkonen, J. (ed) 2014a. Forestry applications of airborne laser scanning: concepts and case studies. *Managing forest ecosystems*, Vol. 27. Springer, Dordrecht. pp. 215–240. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-8663-8>
- Maltamo, M., Kallio, E., Bollandsås, O.M., Næsset, E., Gobakken, T., Pesonen, A. 2014b. Assessing dead wood by airborne laser scanning In: Maltamo, M., Næsset, E., Vauhkonen, J. (ed) 2014. *Forestry applications of airborne laser scanning: concepts and case studies. Managing forest ecosystems*, Vol. 27. Springer, Dordrecht. pp. 375–396. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-8663-8>
- Maltamo, M., Packalen, P. 2014. Species-Specific Management Inventory in Finland, In: Maltamo, M., Næsset, E., Vauhkonen, J. (ed) 2014. *Forestry applications of airborne laser scanning: concepts and case studies. Managing forest ecosystems*, Vol. 27. Springer, Dordrecht. pp. 251–252. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-8663-8>
- Maltamo, M., Eerikäinen, K., Packalén, P., and Hyyppä, J. 2006. Estimation of stem volume using laser scanning-based canopy height metrics. *Forestry*, 79:217–229. [DOI: 10.1093/forestry/cpl007](https://doi.org/10.1093/forestry/cpl007)
- Mandlbürger, G., Lehner, H., Pfeifer, N. A 2019. Comparison of Single Photon and Full Waveform Lidar. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2019, IV-2/W5, 397–404. <https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/IV-2-W5/397/2019/>
- Martín-Alcón, S., Duque-Lazo, J., Tomé Morán, J.L. 2021. Assessing the potential of adaptive individual tree detection to improve accuracy of area-based stand density modelling in ALS-assisted forest inventory. I: Hollas, M., Pfeifer, N. (ed) *Proceedings of the Silvilaser conference 2021*. Sid 274-276. [repositUM: Proceedings of the SilviLaser Conference 2021 \(tuwien.at\)](https://repositum.tuwien.at/Proceedings_of_the_SilviLaser_Conference_2021).
- Michalowska, M., Rapinski, J. 2021. A review of tree species classification based on airborne lidar data and applied classifiers. *Remote Sens.* 2021, 13, 353. [DOI: 10.3390/rs13030353](https://doi.org/10.3390/rs13030353).

- Miljödepartementet. 2008. En sammanhållen klimat- och energipolitik – Klimat. Prop. 2008/09:162. <https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/proposition/2009/03/prop.-200809162/>
- Mohtashami, S., Eliasson, L., Hansson, L., Willen, E., Thierfelder, T., Nordfjell, T. 2022. Evaluating the effect of DEM resolution on performance of cartographic depth-to-water maps, for planning logging operations. *Int. J. Applied Earth observation and Geoinformation*, 108:102728. DOI: [10.1016/j.jag.2022.102728](https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102728)
- Müller, J., Vierling, K. 2014. Assessing biodiversity by airborne laser scanning. In: Maltamo, M., Næsset, E., Vauhkonen, J. (ed) 2014. Forestry applications of airborne laser scanning: concepts and case studies. Managing forest ecosystems, Vol. 27. Springer, Dordrecht. pp. 356-374. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-8663-8>
- Nelson, R. 2013. How did we get here? An early history of forestry lidar. *Can. J. Remote Sens.* 39: S6–S17. DOI: [10.5589/m13-011](https://doi.org/10.5589/m13-011)
- Nilsson, M., Nordkvist, K., Jonzén, J., Lindgren, N., Axensten, P., Wallerman, J., Egberth, M., Larsson, S., Nilsson, L.L., Eriksson, J., Olsson, H. 2017. A nationwide forest attribute map of Sweden predicted using airborne laser scanning data and field data from the National Forest Inventory. *Remote Sens. Environ.* 194:447–454. DOI: [10.1016/j.rse.2016.10.022](https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.022)
- Nilsson, M. 1996. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sens Environ.* 56:1–7. DOI: [10.1016/0034-4257\(95\)00224-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00224-3)
- Noordermeer, L., Næsset, E., Gobakken, T. 2022. Effects of harvester positioning errors on merchantable timber volume predicted and estimated from airborne laser scanner data in mature Norway spruce forests. *Silva Fennica*, 56,1,10608. DOI: [10.14214/sf.10608](https://doi.org/10.14214/sf.10608)
- Noordermeer, L., Gobakken, T., Næsset, E., Bollandsås, O. M. 2021. Economic utility of 3D remote sensing data for estimation of site index in Nordic commercial forest inventories: a comparison of airborne laser scanning, digital aerial photogrammetry and conventional practices. *Scand. J. Forest Res.* 19:482-499. DOI: [10.1080/02827581.2020.1854340](https://doi.org/10.1080/02827581.2020.1854340)
- Noordermeer, L. 2020. Large-area Forest productivity estimation using bitemporal data from airborne laser scanning and digital aerial photogrammetry. Doktorsavhandling 2020:37. Norwegian University of Life Sciences, Ås. DOI: [10.13140/RG.2.2.27266.91841](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27266.91841)
- Noordermeer, L., Ökseter, R., Örka, H. O., Gobakken, T., Næsset, E., Bollandsås, O. M. 2019. Classification of forest change by using bitemporal airborne laser scanner data. *Remote Sensing*, 2019,11, 2135. DOI: [10.3390/rs11182145](https://doi.org/10.3390/rs11182145)
- Nordkvist, K., Sandström, E., Reese, H., Olsson, H. 2013. Laserskanning och digital fotogrammetri i skogsbruket, Andra upplagan. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig resurshushållning, Arbetsrapport 407. <https://pub.epsilon.slu.se/10956/>

- Nyström, M., Holmgren, J., Fransson, J.E.S., Olsson, H. 2014. Detection of windthrown trees using airborne laser scanning. *Int. J. Applied Earth observation and Geoinformation*, 30: 21–29. [DOI: 10.1016/j.jag.2014.01.012](https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.01.012)
- Næsset, E., Gobakken, T., Jutras-Perreault, M-C., Ramtvedt, E. 2021. Comparing 3D point cloud data from laser scanning and digital aerial photogrammetry for height estimation of small trees and other vegetation in a boreal-alpine ecotone. *Remote Sensing*, 13:2469. [DOI: 10.3390/rs13132469](https://doi.org/10.3390/rs13132469)
- Næsset, E. 2014. Area-based inventory in Norway - from innovation to an operational reality. In Maltamo, M., Næsset, E., Vauhkonen, J. (ed) *Forestry applications of airborne laser scanning: concepts and case studies. Managing forest ecosystems*, Vol. 27. Springer, Dordrecht. pp. 215–240. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-8663-8>
- Næsset, E. 2009. Effects of different sensors, flying altitudes, and pulse repetition frequencies on forest canopy metrics and biophysical stand properties derived from small-footprint airborne laser data. *Remote Sens. Environ.* 113:148-159. [DOI: 10.1016/j.rse.2008.09.001](https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.09.001)
- Næsset, E., Gobakken, T. 2008. Estimation of above- and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser. *Remote Sens. Environ.* 112:3079-3090. [DOI: 10.1016/j.rse.2008.03.004](https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.004)
- Næsset, E. 2007. Airborne laser scanning as a method in operational forest inventory: Status of accuracy assessments accomplished in Scandinavia. *Scand. J. Forest Res.* 22:433-442. [DOI: 10.1080/02827580701672147](https://doi.org/10.1080/02827580701672147)
- Næsset, E. 2005. Assessing sensor effects and effects of leaf-off and leaf-on canopy conditions on biophysical stand properties derived from small-footprint airborne laser data. *Remote Sens. Environ.* 98:356–370. [DOI: 10.1016/j.rse.2005.07.012](https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.012)
- 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. *Scand. J. Forest Res.* 19:482-499. [DOI: 10.1080/02827580410019553](https://doi.org/10.1080/02827580410019553)
- Næsset, E. 2004. Effects of different flying altitudes on biophysical stand properties estimated from canopy height and density measured with a small-footprint airborne scanning laser. *Remote Sens. Environ.* 90:243–255. [DOI: 10.1016/j.rse.2004.03.009](https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.009)
- Næsset, E. 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sens. Environ.* 80:88–99. [DOI: 10.1016/S0034-4257\(01\)00290-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00290-5)
- 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, 8th international conference on LiDAR applications in forest



assessment and inventory, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, 17-19 September 2008. [SilviLaser 2008 \(swan.ac.uk\)](http://silvilaser2008.swan.ac.uk)

Olsson, H., Nilsson, M. 2022. Fjärranalys och körsbärsplockning. I: Johansson, C., Nilsson, H-E., Öhman, P., Jonsson, B-G., Engberg, B., Englund, O., Simonsson, P., Axbrink, I. (Ed). Skogens värden. Mittuniversitet, S. 116–117. <https://www.miun.se/Forskning/arkiv/skogensvarden/>

Packalen P., Strunk J., Packalen T., Maltamo M., and Mehtätalo L. 2019. Resolution dependence in an area-based approach to forest inventory with airborne laser scanning. *Remote Sens. Environ.* 224:192–201. DOI: [10.1016/j.rse.2019.01.022](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.022)

Packalen, P., Strunk, J., Pitkanen, J., Temesgen, H., Maltamo, M. 2015. Edge-tree correction for predicting forest inventory attributes using area-based approach with airborne laser scanning. *IEEE J. of selected topics in Applied Earth observation and Remote Sensing*. 8(3):1274–1280. DOI: [10.1109/JSTARS.2015.2402693](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2402693)

Persson, Å., Holmgren, J., Söderman U. 2002. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 68:925–932.

Rahlf, J., Hauglin, M., Astrup, R., Breidenbach, J. 2021. Timber volume estimation based on airborne laser scanning – comparing the use of national forest inventory and forest management inventory data. *Annals of Forest Science*, 78:49. DOI: [10.1007/s13595-021-01061-4](https://doi.org/10.1007/s13595-021-01061-4)

Rahlf, J., Breidenbach, J., Solberg, S., Astrup, R. 2015. Forest parameter prediction using an image-based point cloud: A comparison of semi-ITC with ABA. *Forests*, 6:4059-4071. DOI: [10.3390/f6114059](https://doi.org/10.3390/f6114059)

Rahlf, J., Breidenbach, J., Solberg, S., Næsset, E., Astrup, R. 2014. Comparison of four types of 3D data for timber volume estimation. *Remote Sens. Environ.* 155:325-333. DOI: [10.1016/j.rse.2014.08.036](https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.08.036)

Reese, H., Nilsson, M., Granqvist Pahlén, T., Hagner, O., Joyce, S., Tingelöf, U., Egberth, M., Olsson, H. 2003. Countrywide estimates of forest variables using satellite data and field data from the National Forest Inventory. *Ambio*, 32: 542–548. DOI: [10.1579/0044-7447-32.8.542](https://doi.org/10.1579/0044-7447-32.8.542)

Landsbygdsdepartementet. 2012. [Regleringsbrev 2013 Myndighet Skogsstyrelsen - Ekonomistyrningsverket \(esv.se\)](http://regleringsbrev2013.myndighet.skogsstyrelsen-ekonomistyrningsverket.esv.se)

Roncat, A., Morsdorf, F., Briese, C., Wagner, W., Pfeifer, N. 2014. Laser pulse interaction with forest canopy: Geometric and radiometric issues. I: Maltamo, M. et al. (eds.). *Forestry applications of airborne laser scanning: concepts and case studies*. Managing forest ecosystems 27. Springer Science+Business Media, Dordrecht. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-8663-8>



estimate forest inventory variables. *Can. J. Remote Sens.* 38:644–654.

[DOI: 10.5589/m12-052](https://doi.org/10.5589/m12-052)

Sumnall, M.J., Albaugh, T.J., Carter, D.R., Cook, R.L., Hession, C., Campoe, O.C., Rubilar, R.A., Wynne, R.H., Thomas, V.A. 2022. Effect of varied unmanned aerial vehicle laser scanning pulse density on accurately quantifying forest structure. *Int. J. Remote Sens.* 43:721–750.

[DOI: 10.1080/01431161.2021.2023229](https://doi.org/10.1080/01431161.2021.2023229)

Sverdrup-Thygeson, A., Ørka, H.O., Gobakken, T., Næsset, E. 2016. Can airborne laser scanning assist in mapping and monitoring natural forests? *For. Ecol. Manage.* 369:116–12.

[DOI: 10.1016/j.foreco.2016.03.035](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.035)

Söderberg, J., Wallerman, J., Almäng, A., Möller, J.J., Willén E. 2021. Operational prediction of forest attributes using standardised harvester data and airborne laser scanning data in Sweden. *Scand. J. Forest Res.* 36: 306–314.

[DOI: 10.1080/02827581.2021.1919751](https://doi.org/10.1080/02827581.2021.1919751)

Tang, J., Chen, Y., Kukko, A., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Khoramshahi, E., Hakala, T., Hyypä, J., Holopainen, M., Hyypä, H. 2015. SLAM-Aided Stem Mapping for Forest Inventory with Small-Footprint Mobile LiDAR. *Forests*, 6:4588–4606. [DOI: 10.3390/f6124390](https://doi.org/10.3390/f6124390)

Tompalski, P., Coops, N.C., White, J.C., Goodbody, T.R.H., Hennigar, S.R., Wulder M.A., Socha, J., Woods, M.E. 2021. Estimating Changes in Forest Attributes and Enhancing Growth Projections: a Review of Existing Approaches and Future Directions Using Airborne 3D Point Cloud Data. *Current Forestry Reports*, 7:1–24. [DOI: 10.1007/s40725-021-00135-w](https://doi.org/10.1007/s40725-021-00135-w)

Treitz, P., Lim, K., Woods, M., Pitt, D., Nesbitt, D., Etheridge, D. 2012. LiDAR sampling density for forest resource inventories in Ontario. Canada. *Remote Sensing*. 4:830–848. [DOI: 10.3390/rs4040830](https://doi.org/10.3390/rs4040830)

Vastaranta, M., Wulder, M.A., White, J.C., Pekkarinen, A., Tuominen, S., Ginzler, C., Kankare, V., Holopainen, M., Hyypä, J., Hyypä, H. 2013. Airborne laser scanning and digital stereo imagery measures of forest structure: comparative results and implications to forest mapping and inventory update. *Can. J. Remote Sens.* 39:382–395. [DOI: 10.5589/m13-046](https://doi.org/10.5589/m13-046)

Vastaranta, M., Korpela, I., Uotila, A., Hovi, A., Holopainen, M. 2011a. Area-based snow damage classification of forest canopies using bi-temporal lidar data. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-5/W12, 2011 ISPRS Calgary 2011 Workshop, 29-31 August 2011, Calgary, Canada. <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-5-W12/169/2011/isprsarchives-XXXVIII-5-W12-169-2011.pdf>

Vastaranta, M., Holopainen, M., Yu, X., Hyypä, J., Hyypä, H., Viitala, R. 2011b. Predicting stand-thinning maturity from airborne laser scanning data. *Scand. J. Forest Res.* 26:187–196. [DOI: 10.1080/02827581.2010.547870](https://doi.org/10.1080/02827581.2010.547870)

Vauhkonen J., Ene L., Gupta S., Heinzl J., Holmgren J., Pitkänen J., Solberg S., Wang Y., Weinacker H., Hauglin K.M., Lien V., Packalén P., Gobakken T., Koch B., Næsset E., Tokola T., Maltamo M. 2012. Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. *Forestry*, 85:27–40.

[DOI: 10.1093/forestry/cpr051](https://doi.org/10.1093/forestry/cpr051)

Vauhkonen, J., Tokola, T., Maltamo, M., Packalén, P. 2008. Effects of pulse density on predicting characteristics of individual trees of Scandinavian commercial species using alpha shape metrics based on airborne laser scanning data. *Can. J. Remote Sens.* 2008, 34:441–459. [DOI: 10.5589/m08-052](https://doi.org/10.5589/m08-052)

Virtanen, J-P., Kukko, A., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Turppa, T., Hyypä, H., Hyypä, J. 2017. Nationwide Point Cloud—The Future Topographic Core Data. *Int. J. Geo-Inf.* 2017, 6, 243. [DOI: 10.3390/ijgi6080243](https://doi.org/10.3390/ijgi6080243)

Vosselman, G., Dijkman, S. 2001. [3D Building model reconstruction from point clouds and ground plans](#). International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Volume XXXIV-3/W4 Annapolis, MD. 22-24 Oct 2001.

Wang, Y., Hyypä, J., Liang, X., Kaartinen, H., Yu, X., Lindberg, E., Holmgren, J., Qin, Y., Mallet, C., Ferraz, A., Torabzadeh, H., Morsdorf, F., Zhu, L., Liu, J., Alho, P. 2016. International benchmarking of the individual tree detection methods for modelling 3-D canopy structure for silviculture and forest ecology using airborne laser scanning. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2016, 54, 5011–5027. [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2543225](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2543225)

White, J. C., Tompalski, P., Vastaranta, M., Wulder, M. A., Saarinen, N., Stepper, C., Coops, N. C. 2017. A model development and application guide for generating an enhanced forest inventory using airborne laser scanning data and an area-based approach. Natural Resources Canada, Information report FI-X-018. [38945.pdf \(d1ied5g1xfp8.cloudfront.net\)](#)

White, J.C., Coops, N.C., Wulder, M.A., Vastaranta, M., Hilker, T., Tompalski, P. 2016. Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: A review. *Can. J. Remote Sens.* 42:619–641. [DOI: 10.1080/07038992.2016.1207484](https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1207484)

Wästlund, A., Holmgren, J., Lindberg, E. Olsson, H. 2018. Forest variable estimation using a high altitude single photon lidar system. *Remote Sens.* 2018, 10, 1442. [DOI: 10.3390/rs10091442](https://doi.org/10.3390/rs10091442)

Xu, Q., Hou, Z., Maltamo, M., Tokola, T. 2014. Calibration of area based diameter distribution with individual tree based diameter estimates using airborne laser scanning. *ISPRS J. Photogram. Remote Sens.* 93:65–75.

[DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.03.005](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.03.005)

Yu, X., Kukko, A., Kaarinen, H., Wang, Y., Liang, X., Matikainen, L., Hyypä, J. 2020. Comparing features of single and multi-photon lidar in boreal forests. *ISPRS J. Photogram. Remote Sens.* 168:268–276.

[DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.08.013](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.08.013)

- Yu, X., Hyyppä, J., Litkey, P., Kaartinen, H., Vastaranta, M., Holopainen, M. 2017. Single-sensor solution to tree species classification using multispectral airborne laser scanning. *Remote Sens.* 2017, 9, 108. [DOI: 10.3390/rs9020108](https://doi.org/10.3390/rs9020108)
- Yu, X., Hyyppä, J., Karjalainen, M., Nurminen, K., Karila, K., Vastaranta, M., Kankare, V., Kaartinen, H., Holopainen, M., Honkavaara, E., Kukko, A., Jaakola, A., Liang, XL, Wang, YS, Hyyppä, H., Katoh, M. 2015. Comparison of laser and stereo optical, SAR and InSAR point clouds from air- and space-borne sources in the retrieval of forest inventory attributes. *Remote Sensing.* 7:15933–15954. [DOI: 10.3390/rs71215809](https://doi.org/10.3390/rs71215809)
- Yu, X., Hyyppä, J., Kaartinen, H., Maltamo, M., Hyyppä, H. 2008. Obtaining plotwise mean height and volume growth in boreal forests using multi-temporal laser surveys and various change detection techniques. *Int. J. Remote Sens.* 2008, 29:1367–86. [DOI: 10.1080/01431160701736356](https://doi.org/10.1080/01431160701736356).
- Yu, X., Hyyppä, J., Kaartinen, H., Maltamo, M. 2004. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sens. Environ.* 90:451–462. [DOI: 10.1016/j.rse.2004.02.001](https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.001)
- Ågren, A.M., Larson, J., Siddhartho, S.P., Laudon, H., Lidberg, W. 2021. Use of multiple lidar derived terrain indices and machine learning for high-resolution national-scale soil moisture mapping of the Swedish forest landscape. *Geoderma.* 404:115280. [DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115280](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115280)
- Ågren, A.M., Lidberg, W., Strömgren, M., Ogilvie, J., Arp, P.A., 2014. Evaluating digital terrain indices for soil wetness mapping - a Swedish case study. *Hydrol. Earth. Syst. Sc.* 18:3623–363. [DOI: 10.5194/hess-18-3623-2014](https://doi.org/10.5194/hess-18-3623-2014)
- Ørka, H.O., Marie-Claude Jutras-Perreault, M-C., Næsset, E., Gobakken, T. 2022. A framework for a forest ecological base map – AN example from Norway. *Ecological Indicators.* 136, 108636. [DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108636](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108636)

## 14 Muntliga uppgifter, e-postsvar, hemsidor och powerpointpresentationer

Avsikten med denna rapport har varit att ta tillvara relevanta resultat från den vetenskapliga litteraturen om laserskanning av skog. I ett fåtal fall har dessutom uppgifter från telefonsamtal, e-postförfrågningar, hemsidor och powerpointpresentationer använts. Dessa källor anges nedan.

Boman, Jerker, Oa-App GIS. Telefonsamtal juli 2022. [jerker.boman@oapp.se](mailto:jerker.boman@oapp.se)  
Om nyttan med eventuellt högre laserdatapunkttäthet vid ritning av orienteringskartor.

Lidberg, William, Institutionen för skogens ekologi och skötsel, SLU.  
Telefonsamtal maj 2022 om behov av upplösning för markfuktighetskartor, samt e-post i augusti 2022 om produktion av dikeskartor. [william.lidberg@slu.se](mailto:william.lidberg@slu.se)

Nilsson, Magnus, Skogsdatachef, Skogscentralen i Finland. E-post augusti 2022, samt Powerpointpresentation: Skogsinventeringen in på andra rundan. Skogsbrukets vinterdagar 2021. [magnus.nilsson@skogscentralen.fi](mailto:magnus.nilsson@skogscentralen.fi).

Olsson, H, Nilsson, M. 2021. Powerpoint presentation: Nationwide ALS-forest products supported by NFI:s – Current status and future trends. Key Note, Silvilaser September 2021 Vienna. (Powerpoint). [hakan.olsson@slu.se](mailto:hakan.olsson@slu.se) och [mats.nilsson@slu.se](mailto:mats.nilsson@slu.se). Sammanfattar resultat av enkät till Europas riksskogstaxeringar om användning av laserdata.

Skogscentralen 2022. <https://www.metsakeskus.fi/sv/arenden/minskogfi> (Länk till den finska skogscentralens Mina sidor för distribution av bland annat laserdataprodukter till skogsägare)