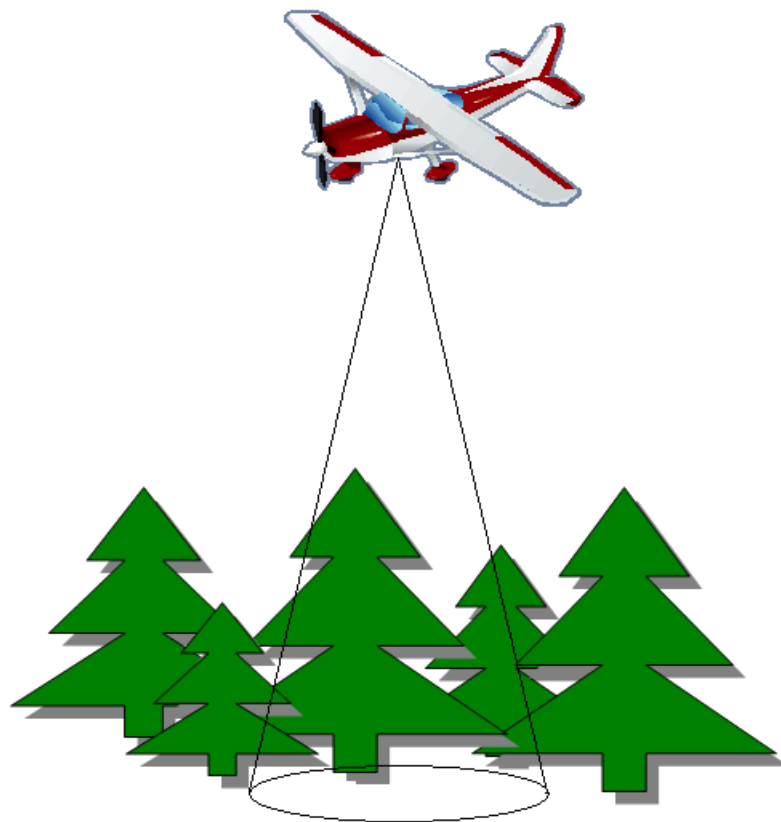


Identifiering av gallringsbehov med hjälp av flygburen laserskanning

Prioritizing thinning operations using airborne laser scanning



Joakim Halvarsson

Arbetsrapport 235 2008
Examensarbete 30hp D

Handledare:
Johan Holmgren

Identifiering av gallringsbehov med hjälp av flygburen laserskanning

Prioritizing thinning operations using airborne laser scanning

Joakim Halvarsson

Examensarbete i ämnet skogshushållning med inriktning fjärranalys

Handledare: Johan Holmgren

Examinator: Mats Nilsson

Förord

Detta examensarbete har utförts på institutionen för skoglig resurshushållning vid Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) Umeå. Arbetet omfattar 30 högskolepoäng på D-nivå och är en del av Jägmästarprogrammet. Examensarbetet är utfört på uppdrag av Statens Fastighetsverk fastighetsområde Mark (SFV Mark) i Östersund. Arbetet har genomförts under hösten och vintern 2007/2008.

Jag vill rikta ett stort tack till min handledare Johan Holmgren utan vars hjälp jag aldrig skulle ha klarat av programmeringen i Matlab samt min biträdande handledare Björn Elfving vilken hjälpt till med de fält- och skötselmässiga bitarna. Jag vill även tacka min examinator Mats Nilsson som har kommit med förslag till förbättringar av arbetet. Ett tack riktas även till min kontaktperson Jan Naumburg på Statens Fastighetsverk för uppslaget till arbetet och utlåning av utrustning samt ordnande av boende under fältinventeringen. Ytterligare tack riktas till Prevista AS för levererande av laserdata och Ola Lindgren på OL Skogsinventering AB för utlånande av GPS-utrustning samt hjälp med efterbearbetning av GPS-koordinaterna.

Joakim Halvarsson

Sammanfattning

Gallring är en av de viktigaste skogsvårdsåtgärderna i medelålders skog. Idag finns många olika täthetsindex vilka beskriver tätheten och därmed gallringsbehovet i skog. Studier har visat att skogliga variabler kan skattas med god noggrannhet med hjälp av flygburen laserskanning och tekniken kan därmed tänkas vara användbar även för att skatta täthetsindex.

I denna studie undersöktes hur väl täthetsindexet ΣH^2 beskriver gallringsbehov samt hur det kan skattas ur laserdata med en punkttäthet på 0,8 respektive 10 punkter/m². ΣH^2 mättes i fält på 30st 30x30m koordinatsatta provytor i skog med varierande struktur, höjd, ålder och trädslagsblandning. Olika sätt att beräkna variabler från laserdata som korrelerar mot fältmätt ΣH^2 provades.

Resultatet visar att ΣH^2 beskriver gallringsbehovet på ett relativt bra sätt för skog med varierande struktur, höjd, ålder och trädslagsblandning även om vissa undantag finns.

Metoden att omvandla rådata till ett raster med 6m rastercellstorlek gav ett gallringsindex med högst korrelation mot ΣH^2 . Metoden fungerade bra för både glest och tätt laserdata och justerad R^2 för korrelationen blev 89,7% för glest laserdata samt 90,8% för tätt laserdata. Då gallringsindexen omräknades till skattad ΣH^2 visade sig skattningarna ge ett relativt RMSE på 14,3% samt 13,5% för glest respektive tätt laserdata.

Nyckelord: LIDAR, laser, gallring, täthetsindex, höjdkvadratsumma

Summary

Thinning is one of the most important silvicultural activities in middle aged forests, partly to minimize damages and partly because it leads to earlier harvesting revenues and increases the value of the remaining trees. There are many different indices used to describe stand density and thereby the need of thinning in forests today. Studies have shown that forest variables can be estimated with high accuracy using airborne laser scanning and it is likely that the method could also be used to estimate forest density indices.

In this study, the possibility of using the forest density index ΣH^2 to determine and map priorities for thinning operations for a forest area was examined. The objective was to test how different variables derived from airborne laser scanning data can be used to estimate the index ΣH^2 . Tests were performed with low and high density laser data (densities of 0.8 and 10 measurements/m²). In field, ΣH^2 was measured on 30 field plots with a size of 30x30m. The field plots were allocated in forests with a variety in structure, height, age, and tree species mixture. Different thinning indices that correlated to field measured ΣH^2 were examined. These indices were computed directly from raw laser data, from raw laser data converted to a raster with different cell sizes, and using single tree detection.

The results show that ΣH^2 describes the need of thinning in a relatively good way for forests with a variety in structure, height, age and tree species mixture even though there are some exceptions. The method to convert raw laser data to a raster with 6m cell size gave a thinning index with the highest correlation to ΣH^2 . The method worked well for both low density (0.8 measurements/m²) and high density (10 measurements/m²) laser data with adjusted R² values of 89.7% and 90.8%, respectively. The relative RMSE was 14.3% and 13.5% for low and high resolution laser data, respectively.

Keywords: LIDAR, laser, thinning, stand density index, ΣH^2

Innehållsförteckning

Förord	2
Sammanfattning	3
Summary	4
Innehållsförteckning	5
Inledning	6
Laserskanning	6
Täthetsindex	7
Syfte	8
Material och metoder	9
Geografiskt område	9
Laserskanningen	9
Inventering i fält	9
Urval av bestånd	9
Provytornas utläggning	9
Inventeringens utförande	10
GPS koordinater	10
Efterbearbetning och beräkningar	10
GPS koordinater	10
Höjdtilldelning	10
Provytedata	13
Gallringsindex	14
Beräkning av laservariabler	14
Gallringsbehov	16
Resultat	18
Gallringsindex	18
Stamantal	18
Gallringsindex	19
Fältdata	19
Rådata	20
Returtypens inverkan	21
Rastermetoden	22
Träddetektering	24
Gallringsbehov	27
Rangordning	27
Skattning av ΣH^2	31
Diskussion	33
Möjliga felkällor	33
ΣH^2 som täthetsindex	34
Tolkning av resultat	34
Gallringsindex	34
Gallringsbehov	35
Slutsatser	36
Referenser	37

Inledning

Gallring är en av de viktigaste skogsvårdsåtgärderna i medelålders skog. Genom att gallra bort vissa individer ökar konkurrenskraften hos de kvarvarande träden (Smith 1997). Ur en ekonomisk synvinkel leder det till tidigare slutavverkningsintäkter samt ökar värdetillväxten på kvarvarande träd (Hyttiäinen & Tahvonen 2002). Gallringsbehovet bestäms dels av beståndets slutenhet eftersom kronorna blir ensidiga och stammarna gångliga vid för hög slutenhet, dels av dimensionsutvecklingen på grund av ekonomiska skäl eftersom ett tillräckligt bra netto är önskvärt (Söderström 1971). I orörda bestånd ökar konkurrensen om solljus och näring mellan träden vilket slutligen leder till självgallring. Alltför täta bestånd ökar även stormkänsligheten samt risken för snöbrott och det är därför viktigt att gallringsmogna bestånd återfinns i tid (Söderström 1971).

Grunden för all skoglig planering är att först ta reda på det aktuella skogstillståndet. För att dra beståndsgränser och skatta skogliga variabler vilka kan beskriva gallringsbehov har flygbildstolkning, ofta följd av en subjektiv fältinventering för att förbättra skattningar och gränsdragningar använts frekvent i Sverige och Norge (Magnusson et al. 2007). Ett annat sätt att återfinna gallringsmogen skog kan vara att använda sig av flygburen laserskanning vilket har visat sig ge skattningar av skogliga variabler med god noggrannhet (Næsset 2002, Næsset et al. 2004). Laserskanning ger även information om variationerna när det gäller höjder eller biomassa inom bestånden vilket kan vara värdefullt både för strategisk och operativ planering eftersom beståndsdata i Sverige annars vanligen anges som medelvärden per bestånd och ej innehåller information om variationen inom bestånden (Nilsson 1994).

Laserskanning

Historien bakom flygburen laserskanning går tillbaka till 1970- och 80-talet med ett tidigt NASA system och andra försök i USA och Kanada (Ackermann 1999). Så snart lasrar med hög mätfrekvens blev tillgängliga på marknaden kunde skannande lasersystem börja användas för att skapa avståndsbilder. Sådana system kallas vanligen LADAR (LAsER Detection And Ranging) eller LIDAR (LIght Detection And Ranging) (Wehr & Lohr 1999). Tekniken utvecklades från början för att skapa digitala markhöjdsmodeller (DTM) men kom under tidiga 1990-talet för första gången att användas för mätningar av skogliga variabler och har under de senaste fem åren börjat användas kommersiellt inom skogsbruket för att på ett kostnadseffektivt sätt få fram beståndsdata (Næsset 2004). Metoden går till på så sätt att lasern skickar laserpulser mot marken vilka kan tränga igenom trädvegetationen vertikalt och varje puls kan ge upphov till flera reflektioner när ljuset reflekteras på sin väg genom vegetationen. Vanligen registreras den första, sista eller både den första och sista reflektionen av systemet (Næsset & Bjercknes 2001). Differentiell GPS används i kombination med flygplanets INS (Internal Navigation System) för att beräkna lasersensornas X-, Y- och Z-koordinat samt orientering vid varje tidpunkt under flygningen samtidigt som lasersensorn mäter avståndet till reflektionerna av laserpulserna. Vid efterbearbetning av data kan sedan X, Y och Z koordinater för laserreflektionerna beräknas (Wehr & Lohr 1999).

Tidiga försök visade att de sanna beståndsmedelhöjderna underskattades kraftigt när höjderna skattades som ett medelvärde av reflektionerna (Næsset 1997). Tät skog gör dessutom att medelhöjderna av reflektionerna blir högre än i gles skog på grund av att färre laserpulser penetrerar kronorna ner till marken (Næsset & Bjercknes 2001). Enligt Nelson

(1997) påverkas höjdmätningarna även av kronornas form och det är därför troligt att relationen mellan höjderna som erhålls från laserdata och de sanna höjderna skiljer mellan olika trädarter eftersom olika trädarter ofta utvecklar olika kronformer (Næsset & Bjercknes 2001). Næsset (1997) visade att noggrannheten för skattningar av beståndsmedelhöjder ökade betydligt om laserdata konverterades till ett raster där endast den högsta returen inom varje cell togs med i beräkningen av medelvärdet för reflektionerna. Med denna metod kunde beståndsmedelhöjderna skattas lika bra eller bättre med laserskanning än med flygbildstolkning (Næsset 1997).

På senare år har utvecklingen gått från att skatta höjder på beståndsnivå till att kunna skatta även andra skogliga variabler samt deras variation inom bestånden genom att koordinatsatta provytor läggs ut systematiskt inom det skannade området för att bygga empiriska samband mellan laserdata och de variabler som mäts i fält. Därefter läggs ett raster ut över det skannade området och de framtagna regressionsfunktionerna används för att skatta de aktuella variablerna för varje rastercell (Næsset & Bjercknes 2001, Næsset 2002, Næsset et al. 2004, Eid et al. 2004). Denna metod används idag och ger skattningar med en högre precision än de traditionella inventeringsmetoderna baserade på fältinventering eller flygbildstolkning (Næsset 2002). Skattning av beståndsvariabler i lövsamt blandbestånd är dock mer problematiskt än rena barrbestånd (Næsset et al. 2004). Kostnaden för inventering av grundyta, övre höjd och stamantal med denna metod har visat sig vara ungefär hälften så stor som vid flygbildstolkning samtidigt som skattningarna blir bättre (Eid et al. 2004).

Ett sätt att minska kostnaderna för insamlandet av laserskanningsdata är att flyga på högre höjd vilket resulterar i lägre mätningsdensitet. (Holmgren 2004).

Ur laserdata med hög mätdensitet kan även enskilda träd detekteras (Brandtberg 1999). Persson et al. (2002) visade att 71% av träden med en stamdiameter över 5cm kunde detekteras i medelålders och äldre barrdominerad skog vid en mätningsdensitet av 5 mätningar per kvadratmeter.

Täthetsindex

Att hålla tätheten i skogen på en lagom nivå genom gallring är viktigt för att öka tillväxten samt kvaliteten på de kvarvarande stammarna (Zeide 2004). Nackdelen med att använda exempelvis grundyta, volym eller stamantal som täthetsmått är att de måste jämföras med tabeller för respektive ståndort, ålder etc. för att säga något om tätheten (Braathe 1957). Forskare har därför sökt efter mer objektiva täthetsmått och det finns idag många olika täthetsindex för att beskriva täthet i skog. Gemensamt för olika täthetsindex är att de bör uppfylla minst tre kriterier: (1) de ska vara lätta att mäta, (2) oberoende av ålder och ståndortsfaktorer för att de ska vara enkla och enhetliga att applicera, samt (3) kopplade till beståndstillväxt vilket i sin tur är kopplat till beståndstätheten på grund av att kronornas storlek och därmed tillväxten minskar vid ökad täthet (Dean & Baldwin 1996).

Täthetsindex har använts främst i likåldrig kulturskog men forskning har påvisat att de även kan användas i skiktad, olikåldrig skog (Sterba & Monserud 1993). Många täthetsindex bygger på matematiska kombinationer av medelträdstorlek (exv. diameter eller höjd) och stamantal (Bennet & Maguire 1995, Dean & Baldwin 1996). Täthetsindex som bygger på diameter exempelvis Reineke's (1933) Stand Density Index har varit populärare än de som bygger på höjd eftersom diametern är lättare och går snabbare att

mäta i fält medan diameterfördelningen samt diametertillväxten påverkas starkt av gallringar vilket gör det till en sämre variabel i gallrad skog än höjden som inte påverkas i samma grad av gallringar (Wilson 1946). Hart-Beckings Relative Spacing Index (Spathelf 1999) är ett erkänt täthetsmått som bygger på övrehöjd och förband och många andra forskare har använt sig av stamantal i relation till antingen övrehöjd eller någon form av medelhöjd för att beskriva tätheten i skog (Curtis 1970).

Höjdkvadratsumma (ΣH^2) vilken kan härledas ur Hart-Beckings Relative Spacing Index (ekvation 1) har tidigare använts av Elfving (1982) och är ett täthetsmått som skulle kunna vara lämpligt att använda som grund för ett gallringsindex att skatta med flygburen laserskanning då laserdata innehåller både höjd- och täthetsinformation. ΣH^2 är dock starkt beroende av stamantalet vilket är den variabel som skattas sämst ur laserskanningsdata (Næsset 2002, 2004) varför nya beräkningsmodeller för ett sådant index bör tas fram.

Hart-Beckings Relative Spacing Index:

$$S = \frac{f}{H} \times 100 = \frac{\sqrt{10000/N}}{H} \times 100 \Rightarrow S^2 = \frac{10000}{N \times H^2} \times 100^2 \quad (1)$$

$$\text{Höjdkvadratsumma} = \frac{10000}{S^2} \times 100^2 = N \times h^2 \Rightarrow \sum_1^N h^2$$

Där:

f = förband

H = övrehöjd

h = trädhöjd

N = stamantal

Syfte

Syftet med examensarbetet är att undersöka hur index som beskriver gallringsbehov hos skog med varierad täthet, trädslagsblandning, ålder, höjd och struktur kan skattas med hjälp av laserskanning samt undersöka hur väl gallringsindexen kan skattas ur tätt respektive glest laserdata.

Material och metoder

Geografiskt område

Studieområdet var skogsområden tillhörande Statens Fastighetsverk och omfattade ca 3300 ha runt sjön Fiskåvattnet (64° 25' N, 14° 41' E) i norra Jämtland. Området ligger nära fjällerna och höjden för de inventerade bestånden varierade mellan 370 – 520 meter över havet. I området finns bestånd i alla åldrar och skogen varierar från trädslagsrena kulturbestånd till blandbestånd och skiktad skog.

Laserskanningen

Laserskanningen utfördes mellan den 7 och 8 augusti och flygningen skedde på ca 600 meters höjd med en hastighet av 135 knop. Lasersensorn som användes var en Leica ALS50-II med en öppningsvinkel på ± 16 grader. Laserpulsens frekvens var 130 Hz och skanningsfrekvensen var 50 Hz. Skanningen skedde med sidoöverlapp på 20 % och en punkttäthet på ca 10 punkter/m².

Laserdata som använts för beräkningarna i det här arbetet bestod av två dataset, dels datasetet med ca 10 punkter/m² samt ett dataset med ca 0,8 punkter/m² vilket skapats genom att det täta datasetet glesades ut. Data innehöll information om varje punkts X- och Y-koordinat, höjd över marknivå samt typ av retur (första- resp. sistaretur).

Inventering i fält

Urval av bestånd

I området finns totalt drygt 100 bestånd och av dessa valdes 14 ut subjektivt av skogvaktaren för att ge maximal spridning vad gäller ålder, täthet, höjd och trädslagsblandning. Vissa av bestånden var redan helt eller delvis gallrade och följaktligen glesa medan två bestånd bestod av skiktad äldre skog med varierande täthet.

Provyornas utläggning

Under fältinventeringen lades 30st kvadratiska provytor om 30x30m ut i de 14 bestånden. I 3 av bestånden vilka bedömdes som homogena slumpades en provyta per bestånd ut medan bestånd med stor variation delades in i mindre delbestånd efter en subjektiv bedömning. Sex av bestånden delades in i två delbestånd och fem bestånd delades in i tre delbestånd. Efter indelningen slumpades en provyta per delbestånd ut.

Utläggningen av en provyta skedde genom att origo placerades sydväst om beståndet och x- och y-axlarnas längd anpassades så att beståndet innefattades helt. Därefter togs ett slumpstal mellan 0 och 1 fram för varje axel med hjälp av en slumpstalsgenerator och slumptalet multiplicerades med x- respektive y-axlarnas längd för att få ut koordinaten för provytans sydvästra hörn. Om provytan helt eller delvis hamnade utanför beståndet slumpades dess position om till dess att hela ytan hamnade inom beståndet. Inventeraren orienterade till en plats nära provytan med hjälp av GPS. Med hjälp av GPS positionen beräknades avstånd och riktning till provytan varpå bestämning av läget för provytans sydvästra hörn bestämdes med riktning från kompass och stegning.

Inventeringens utförande

Provytorna lades ut i nord-sydlig riktning med hjälp av syftkompass och sidorna mättes med måttband. Varje hörn markerades med en käpp och sisalgarn användes sedan för att markera sidorna samt dela in ytorna i 4st ca 7,5 x 30m rektangulära stråk för att underlätta klavningen. På provytorna räknades först alla träden av huvudträdslaget med dbh > 5cm och urvalssannolikhet beräknades för att få 8st provträd per provyta. Dessutom markerades 4st övrehöjdsträd per yta med snitselband för att senare mätas i samband med klavningen. Därefter klavades och trädslagsbestämdes alla träd med dbh > 5cm och provträden valdes ut aritmetiskt med hjälp av den beräknade urvalssannolikheten i den ordningsföljd som klavningen skedde. På samtliga provträd och övrehöjdsträd mättes höjd och dessutom borrades vart annat av dem för åldersbestämning. Om fler än 5st träd med dbh > 5cm av ett annat trädslag än huvudträdslaget fanns inom ytan mättes höjd på tre av dem. Döda träd räknades till antal och medelhöjd uppskattades. Dessutom antecknades subjektiva kommentarer om gallringsbehov etc. för varje yta.

GPS koordinater

Koordinaterna för alla hörnen på provytorna registrerades med en Thales MobileMapper GPS-navigatör med möjlighet till efterbearbetning av koordinaterna. Varje hörnkoordinat loggades i minst 15 minuter för att få så god noggrannhet som möjligt.

Efterbearbetning och beräkningar

GPS koordinater

Som basstation för differentialkorrigeringen användes Lantmäteriets SWEPOS-station i Gäddede ca 29 km västnordväst om Fiskåvattnet. Efter nedladdning av differentialkorrigeringsdata från Lantmäteriet utfördes efterbearbetning av GPS-koordinaterna i MobileMapper Office.

Trots att ytornas sidor uppmättes med måttband till 30m stämde GPS-koordinaterna ofta ej överens med det trots efterbearbetning. I extremfallen kunde två hörns GPS-koordinater ligga upp mot 36m ifrån varandra trots att den skattade noggrannheten efter efterbearbetning låg långt under 1m för båda koordinaterna. För att ytterligare korrigera GPS-koordinaterna användes minsta kvadratmetoden (Kraus 1993) för att på bästa sätt passa in en 30x30m kvadrat till hörnkoordinaterna. Hörnkoordinaterna viktades med den ur MobileMapper Office givna noggrannheten för respektive koordinat. En vridning av kvadraten tilläts för eventuell felnavigering i fält. För att utföra dessa beräkningar användes programmet Matlab 7.1.

Höjdtilldelning

Höjdtilldelningen till de träd som endast klavats skedde enligt Näslunds (1936) metodik för att skatta höjdkurvor. Höjdkurvans formel för olika trädslag:

Gran

$$h = 13 + d^3 / (a + b \times d)^3 \quad (2)$$

Tall, Björk och Övrigt löv

$$h = 13 + d^2 / (a + b \times d)^2 \quad (3)$$

Där:

d = diameter i bröst höjd (mm)

h = trädets höjd (dm)

a och b är koefficienter

Näslund (1936) använder sig av ett z -värde som har formen enligt ekvation 4 och 5 för att sedan skatta koefficienterna a och b med linjär regression enligt ekvation 6.

Gran

$$z = d / \sqrt[3]{h - 13} \quad (4)$$

Tall, Björk och Övrigt löv

$$z = d / \sqrt{h - 13} \quad (5)$$

Där:

d = diameter i bröst höjd (mm)

h = trädets höjd (dm)

$$z = a + b \times d \quad (6)$$

De skattade koefficienterna i ekvation 6 användes sedan i ekvation 2 och 3.

För varje provyta togs en höjdfunktion för huvudträdslaget fram med hjälp av provträden och tillämpades på resten av huvudträds lagsträden. Alla beräkningar för fältdata skedde i Microsoft Excel.

För övriga trädslag på ytorna togs en gemensam höjdfunktion fram för varje trädslag på grund av att för få träd höjdmättes per provyta. Höjdfunktionerna anpassades dock till de enskilda provytorna genom att fler förklarande variabler togs med enligt ekvation 7,8 och 9.

Gran

$$h = 12,38217 + 0,155864 \times d + -0,03559 \times mh \quad (7)$$

Tall

$$h = 9,137837 + 0,071657 \times d + -0,04386 \times mh \quad (8)$$

Björk och Övrigt löv

$$h = 5,933972 + 0,0775 \times d + -0,01407 \times mh + -0,0655 \times gy \quad (9)$$

Där:

h = trädets höjd (dm)

d = diameter i bröst höjd (mm)

mh = medelhöjden för provträden av huvudträdslaget på ytan (dm)

gy = ytans grundyta (m²/ha)

När alla höjder skattats beräknades den fältmätta höjdvadratsumman ($\sum H^2_{Fält}$) för samtliga träd inklusive de döda träden per provyta. Även stamantal, grundyta, övre höjd, grundtyvägd medelhöjd och grundtyvägd medelålder för huvudträdslaget i brösthöjd beräknades för samtliga provytor. Volym för den stående skogen på provytorerna beräknades med Brandels (1990) mindre volymsfunktioner.

Provytedata

Resultatet av sammanställningen av provytedata (tabell 1) visar att utläggningen gav den eftersträvade stora spridningen vad gäller höjder, åldrar, täthet och trädslagsblandning.

Tabell 1. Data för de 30 provytorna vilka mättes upp under fältinventeringen

Table 1. Data for the 30 field plots that were measured during the field inventory

Ytid	Övre	Medelhöjd	Stamantal (st/ha)	GY (m ² /ha)	Brh-ålder		Tall (%)	Gran (%)	Löv (%)	Volym (m ³ /ha)
	höjd (m)	GY-Vägd (m)			GY-vägd (år)					
1	14.6	12.1	1756	22.7	53	0	65	35	133	
2	16.7	14.0	789	14.0	55	11	82	6	95	
3	19.3	17.1	589	19.0	83	0	92	8	155	
4	15.6	14.0	989	17.3	41	84	1	15	119	
5	14.0	13.2	733	15.3	40	97	0	2	102	
6	12.6	9.9	2844	22.4	36	56	34	10	115	
7	7.1	5.9	1278	5.3	18	94	6	1	19	
8	21.5	20.4	489	26.0	86	73	27	0	246	
9	17.9	14.3	1500	25.5	84	31	64	5	177	
10	13.7	11.5	1767	20.1	40	61	39	0	119	
11	14.7	13.6	989	17.1	40	100	0	0	118	
12	15.6	13.7	789	15.2	39	95	1	4	104	
13	9.6	7.6	2733	14.1	31	0	94	6	59	
14	20.2	19.0	522	22.0	74	76	22	2	196	
15	21.4	19.0	1078	39.4	115	18	67	15	333	
16	18.7	14.7	2011	35.8	77	1	81	18	249	
17	13.9	11.3	2067	24.0	30	18	49	33	132	
18	10.6	8.9	2100	13.9	32	0	87	13	66	
19	7.5	6.7	1389	8.9	16	83	10	7	34	
20	11.3	9.2	1200	10.7	34	0	99	1	51	
21	8.8	7.0	1000	5.9	29	0	89	11	22	
22	11.0	9.2	1211	11.3	31	5	94	1	55	
23	14.5	11.7	2178	22.6	51	0	43	57	127	
24	9.7	7.5	1344	8.1	30	3	96	1	33	
25	10.3	8.3	1256	8.8	30	0	84	16	38	
26	15.2	12.9	722	13.5	117	15	75	9	83	
27	17.4	13.4	1400	20.3	115	8	86	6	131	
28	16.6	14.0	1100	20.5	105	6	72	22	132	
29	15.6	12.3	1722	23.9	112	3	82	14	145	
30	15.7	12.4	2156	26.6	79	12	62	26	161	

Gallringsindex

Täthetsindexet som valdes som grund för gallringsindexet var ΣH^2 (ekvation 1) eftersom höjder är en av de skogliga variabler som kan skattas med högst noggrannhet med laserskanning (Næsset 2002). Variablerna medelhöjd och övre höjd som normalt skattas ur laserdata går dock inte att använda för att skatta ΣH^2 eftersom den bygger på de enskilda trädens höjder, därför krävdes att helt nya beräkningsmetoder togs fram. Som stamantal användes antalet stammar med dbh > 5cm inom provytan och trädhöjderna angavs i dm.

Beräkning av laservariabler

Flera olika tillvägagångssätt testades för att undersöka hur olika gallringsindex är korrelerade till $\Sigma H^2_{Fält}$. Alla beräkningar för att beräkna gallringsindex utfördes i Matlab 7.1. Dessutom användes de gallringsindex för tätt respektive glest laserdata som visade bäst korrelation mot $\Sigma H^2_{Fält}$ för att skatta ΣH^2 med hjälp av linjär regression.

Till att börja med klipptes de beräknade 30x30m provytorna ut ur laserdata så att endast data inom dem kom med i beräkningarna. Eftersom ΣH^2 är starkt knuten till stamantalet krävdes att en variabel som är korrelerad till stamantalet beräknades. Variabeln F som beräknades enligt ekvation 10 valdes för detta ändamål och är korrelerad till stamantalet på grund av att vegetationskvoten blir högre om skogen är tät i och med att en större andel returerna då kommer från trädkronorna än i gles skog och att ett jämnt tätt krontak ger en lägre standardavvikelse än ett glest luckigt sådant. Gränsvärdet för vad som skall räknas som trädvegetation i vegetationskvoten sattes till 3m.

$$F = \text{vegetationskvot} / \text{standardavvikelse} \quad (10)$$

Där:

vegetationskvot = laserreturer över 3m / alla laserreturer.

standardavvikelse = standardavvikelsen för laserreturerna över 3m.

F beräknades för varje provyta både ur tätt respektive glest laserdata.

För att beräkna gallringsindex (G) som sedan kan användas för att skatta ΣH^2 togs en ekvation (11) fram vilken bygger på trädhöjdfördelningen i 10 höjdklasser inom varje yta samt stamantal. För att använda ekvationen sorterades höjdvärdena för antingen returerna, rasterceller eller enskilda träd efter deras höjdvärde från det lägsta till det högsta höjdvärdet. Sedan räknades percentiler ut baserat på de sorterade höjderna från den lägsta till den högsta i 10% steg dvs. 10%, 20%, ..., 100% för att ge information om höjdfördelningen inom ytan.

$$G = 0,1 \times H10^2 \times SA + 0,1 \times H20^2 \times SA + \dots + 0,1 \times H100^2 \times SA \quad (11)$$

Där:

H10 = höjdvärdet för 10% percentilen

H20 = höjdvärdet för 20% percentilen

H100 = höjdvärdet för 100% percentilen

SA = variabel korrelerad till stamantal eller verkligt stamantal för ytan

Ekvationen testades först på fältdata för att undersöka hur väl korrelerat det beräknade gallringsindexet är till $\sum H^2_{Fält}$. Det fältmätta stamantalet användes då som SA och percentilerna beräknades på de fältmätta trädens höjder.

Därefter beräknades gallringsindex med ekvation 11 direkt på rådata både för tätt och glest laserdata. Percentilerna beräknades då på returernas höjdvärden och som stamantal användes F.

För att testa om typen av retur inverkar på beräkningen av G gjordes samma beräkningar om på det täta rådata där endast första respektive sista returerna togs med i beräkningarna.

Laserdata konverterades sedan till ett raster i programmet Matlab 7.1 för att se om gallringsindexets koppling till $\sum H^2_{Fält}$ då blev bättre. Rastercellstorlekar om 0,5, 1, 3, 5, 6, och 8m testades för att se vilken storlek som gav gallringsindex med högst justerad R^2 när det gäller att förklara $\sum H^2_{Fält}$. Varje rastercell tilldelades värdet av den högst belägna returen inom rastercellen. Eftersom provytorna tilläts vara vridna kunde rastercellerna ej passas in perfekt i provytorna. Detta löstes genom att endast rastercellerna vars mittpunkt låg inom provytorna togs med i beräkningarna. Eftersom endast laserdata inom provytorna användes i beräkningarna tilldelades de rasterceller som delvis låg utanför provytorna men vars centrum låg inom ytan höjdvärdet av den högsta returen på den del av rastercellen som låg inom provytan. Alla laserreturerna togs med vid beräkningarna för rastercellerna.

Ekvation 11 användes sedan för att beräkna provytornas gallringsindex med percentiler beräknade på rastercellernas höjder och F som stamantal.

Samma beräkningar utfördes på glesa laserdata för den rastercellstorleken som gav högst justerad R^2 för att undersöka om laserdatas täthet påverkar gallringsindex förklaringsgrad av $\sum H^2_{Fält}$. Både F och percentilerna beräknades då för glesa laserdata innan de stoppades in i ekvation 11.

Träddetektering testades även för att skatta $\sum H^2$ utifrån de träd som detekterades ($\sum H^2_{Det}$). Träddetekteringen utfördes med en tidigare utvecklad automatisk metod. Denna metod använder geometriska modeller av träd för att skapa segment som beskriver trädkronans utbredning. Den högsta lasermätningen inom ett segment används för att bestämma trädhöjd (Holmgren & Wallerman 2006).

Träddetekteringen utfördes endast på täta laserdata på grund av svårigheten att detektera enskilda träd ur glest laserdata. Först testades att beräkna $\sum H^2_{Det}$ direkt utifrån de detekterade träden genom att summera de detekterade trädens höjdvadrater (12).

$$\sum H^2_{Det} = \sum_1^n h^2 \quad (12)$$

Där:

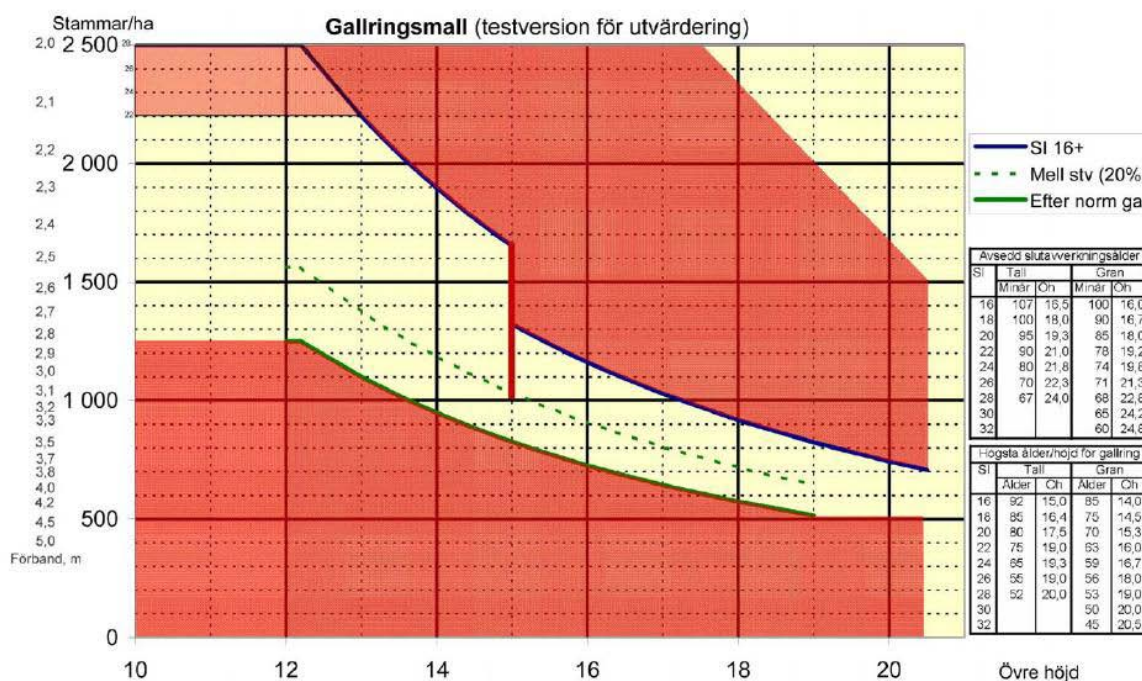
n = detekterat stamantal inom ytan

h = trädets höjd (m)

Sedan testades två beräkningar med ekvation 11 för att beräkna gallringsindex ur de detekterade träden. Beräkningen skedde med percentilerna beräknade på de detekterade trädens höjder och det detekterade stamantalet användes som stamantal i den första beräkningen medan F användes som stamantal i den andra beräkningen. Minitab 15 användes för samtliga beräkningar av G_{det} för att beräkna justerad R^2 när det gäller att förklara $\sum H^2_{Fält}$.

Gallringsbehov

För att undersöka hur väl ΣH^2 beskrev gallringsbehovet på ytorna användes en gallringsmall (Fig. 1) framtagen av Bergvik Skog AB som fungerar för tall och gran där SI ligger mellan 16 och 28. Ingångsvariablerna i gallringsmallen är övre höjd i meter samt stamantal/ha.



Figur 1. Gallringsmall framtagen av Bergvik Skog AB med stamantal på x-axeln och övre höjd på y-axeln.

Figure 1. Thinning schedule created by Bergvik Skog AB with number of stems on the x-axis and top height on the y-axis.

Ytorna rangordnades sedan efter $\sum H^2_{Fält}$ vilken jämfördes med gallringsbehovet enligt gallringsmallen samt de subjektiva kommentarerna från fältinventeringen.

Den metod vars gallringsindex gav högst justerad R^2 för det glesta respektive täta laserdata transformerades sedan med hjälp av regressionsanalys till skattad ΣH^2 ($\sum H^2_{Gles}$ respektive $\sum H^2_{Tät}$) för att bättre kunna jämföras med $\sum H^2_{Fält}$.

Relativ RMSE beräknades för $\sum H^2_{Gles}$ respektive $\sum H^2_{Tät}$ för att åskådliggöra skattningarnas noggrannhet.

RMSE beräknades genom att först beräkna ekvation 13 för alla provytorna och sedan beräkna kvadratroten ur medelvärdet av X för alla ytorna (ekvation 14).

$$X = (Y - Z)^2 \quad (13)$$

Där:

$$Y = \sum H^2_{Fält}$$

$$Z = \sum H^2_{Skattad}$$

$$RMSE = \sqrt{\bar{X}} \quad (14)$$

Relativ RMSE i procent beräknades sedan som RMSE dividerat med medelvärdet av $\sum H^2_{Fält}$ enligt ekvation 15.

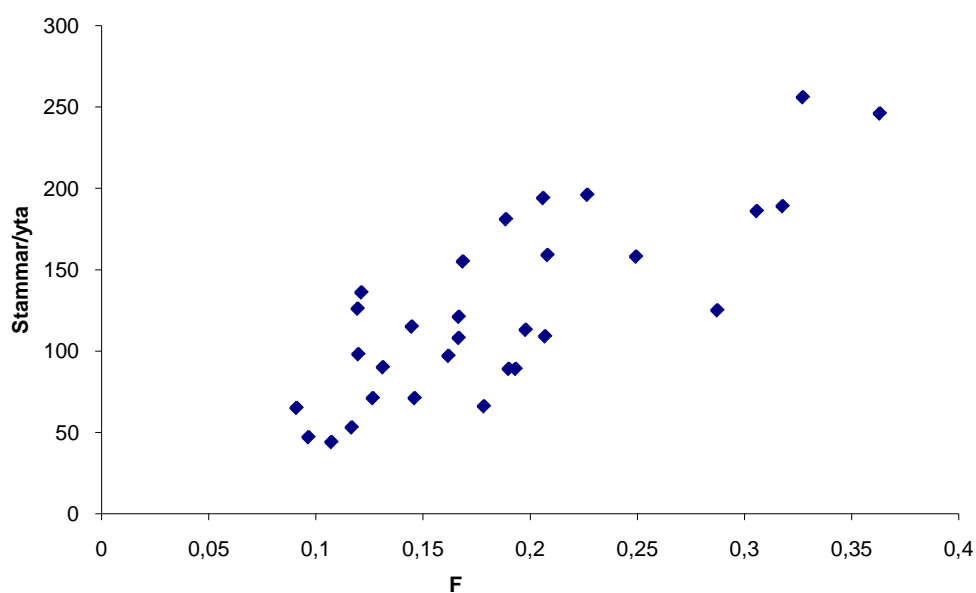
$$\text{Relativ RMSE} = (RMSE/\bar{Y}) \times 100 \quad (15)$$

Resultat

Gallringsindex

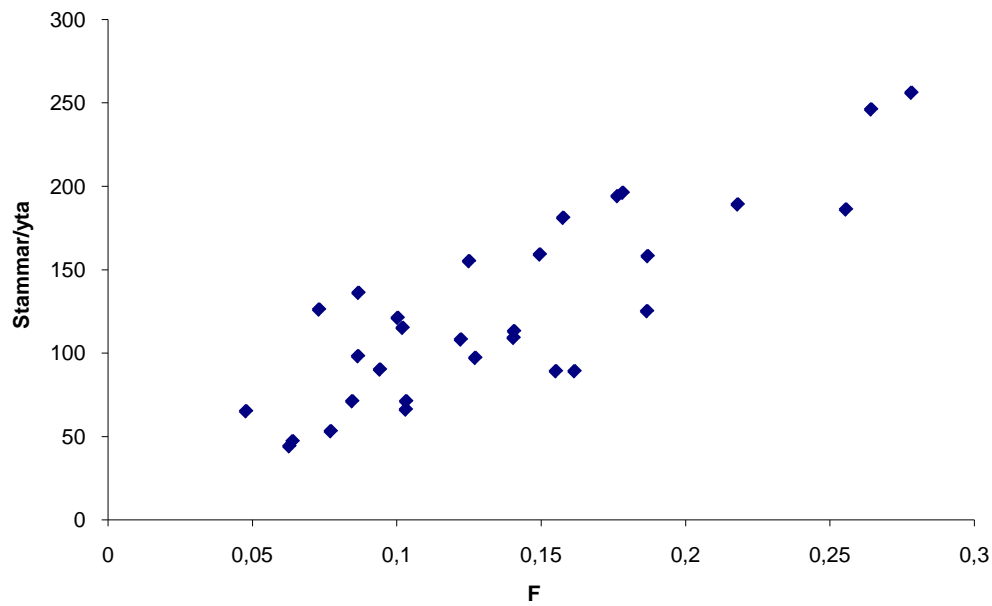
Stamantal

F visade en tydlig koppling mot det fältmätta stamantalet på provytorna både för det täta laserdata (Fig. 2) och det glesa laserdata (Fig.3). Regressionsanalys gav ett justerat R^2 på 63.5% då F beräknades på det täta laserdata (Fig. 2) medan justerad R^2 blev 70.3% då F beräknades på det glesa laserdata (Fig. 3).



Figur 2. Sambandet mellan det fältmätta stamantalet per yta och F beräknat på det täta laserdata med alla retur.

Figure 2. The correlation between the field measured number of stems per plot and F calculated on the dense laser data with all returns.



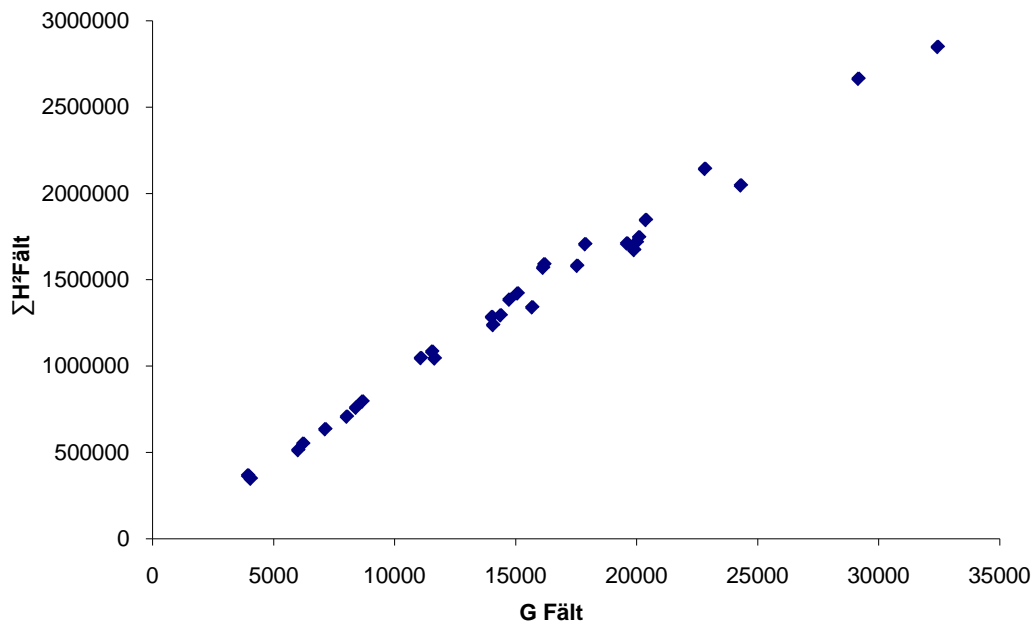
Figur 3. Sambandet mellan det fältmätta stamantalet per yta och F beräknat på det glesa laserdata med alla returerna.

Figure 3. The correlation between the field measured number of stems per plot and F calculated on the thin laser data with all returns.

Gallringsindex

Fältdata

$G_{\text{Fält}}$ beräknat med ekvation med 11 där percentilerna beräknats på de vid fältinventeringen inmätta träden samt i fält uppmätt stamantal istället för F visar en mycket god koppling mot $\sum H^2_{\text{Fält}}$ (Fig. 4) Justerad R^2 var i detta fall så hög som 98.9%.

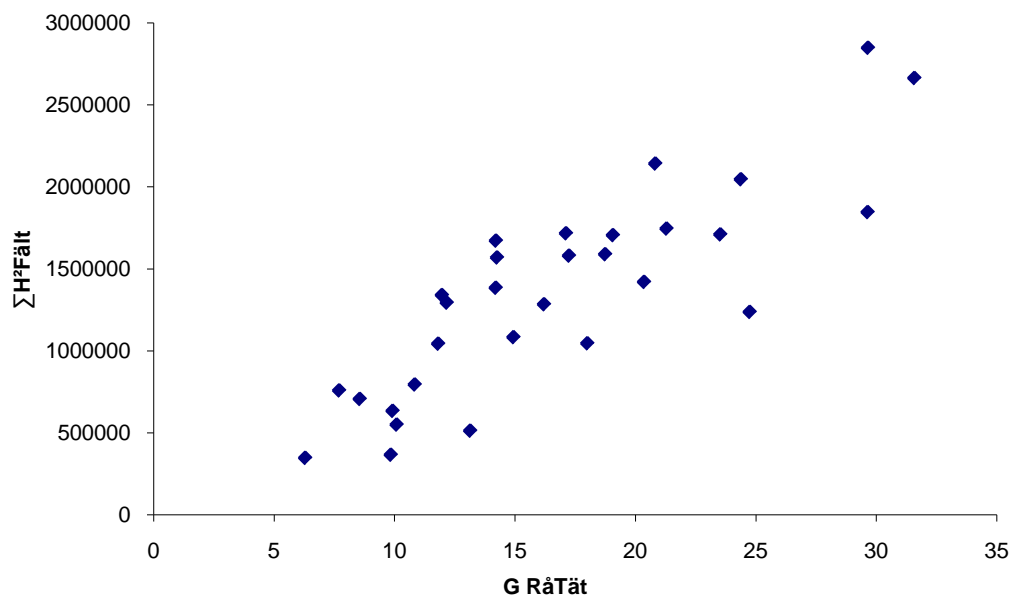


Figur 4. Sambandet mellan $\sum H^2_{Fält}$ per yta och $G_{Fält}$.

Figure 4. The correlation between $\sum H^2_{Fält}$ per plot and $G_{Fält}$.

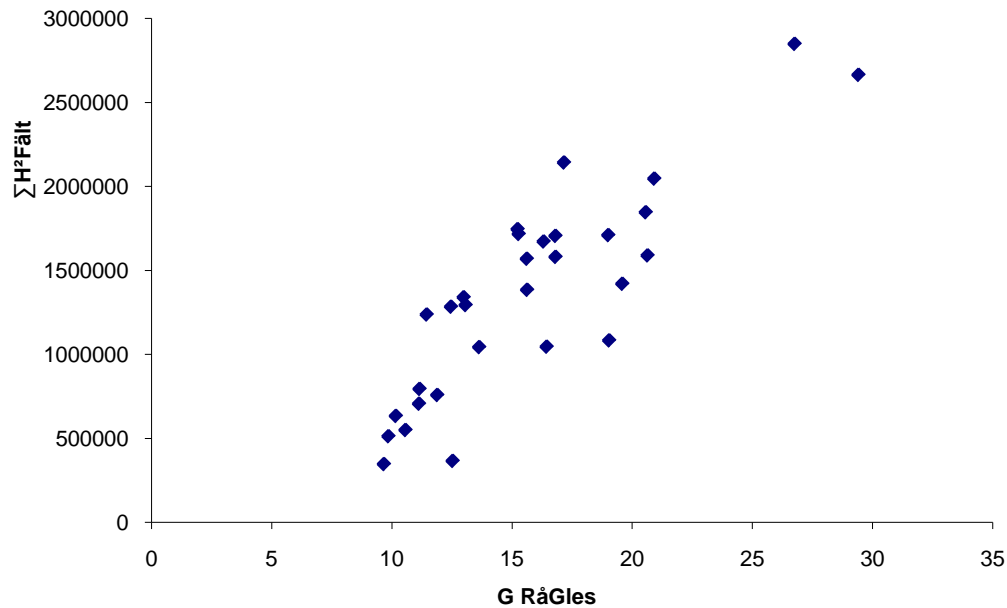
Rådata

Ekvation 11 användes för att beräkna gallringsindex för det glesta ($G_{RåGles}$) respektive täta laserdata ($G_{RåTät}$) direkt ur rådata. Kopplingen mellan $G_{RåTät}$ och $\sum H^2_{Fält}$ (Fig. 5) samt $G_{RåGles}$ och $\sum H^2_{Fält}$ (Fig. 6) gav ett justerat R^2 på 71.2% för det täta laserdata och 73.6% för det glesta laserdata.



Figur 5. Sambandet mellan $\sum H^2_{Fält}$ per yta och $G_{RåTät}$.

Figure 5. The correlation between $\sum H^2_{Fält}$ per plot and $G_{RåTät}$.

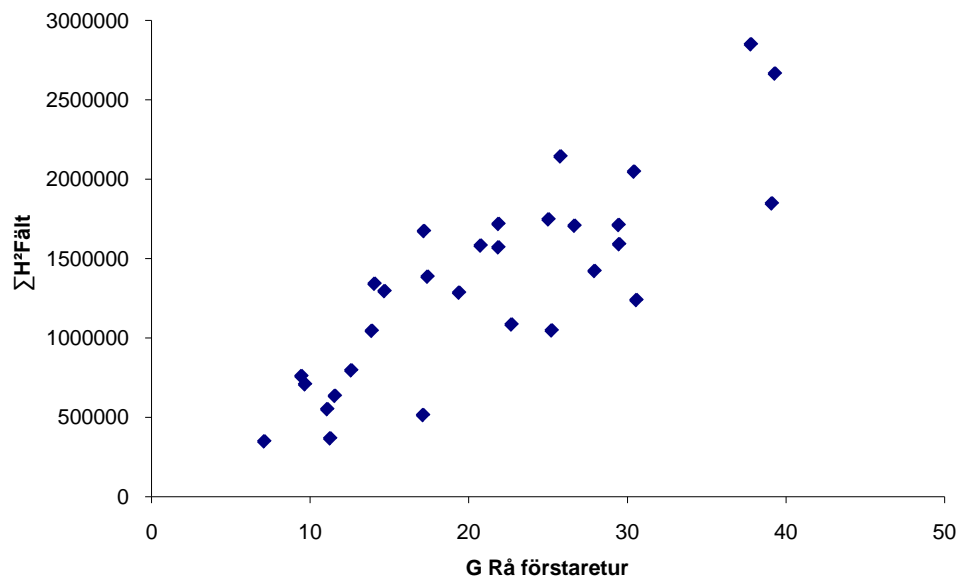


Figur 6. Sambandet mellan $\sum H^2_{Fält}$ per yta och $G_{RåGles}$.

Figure 6. The correlation between $\sum H^2_{Fält}$ per plot and $G_{RåGles}$.

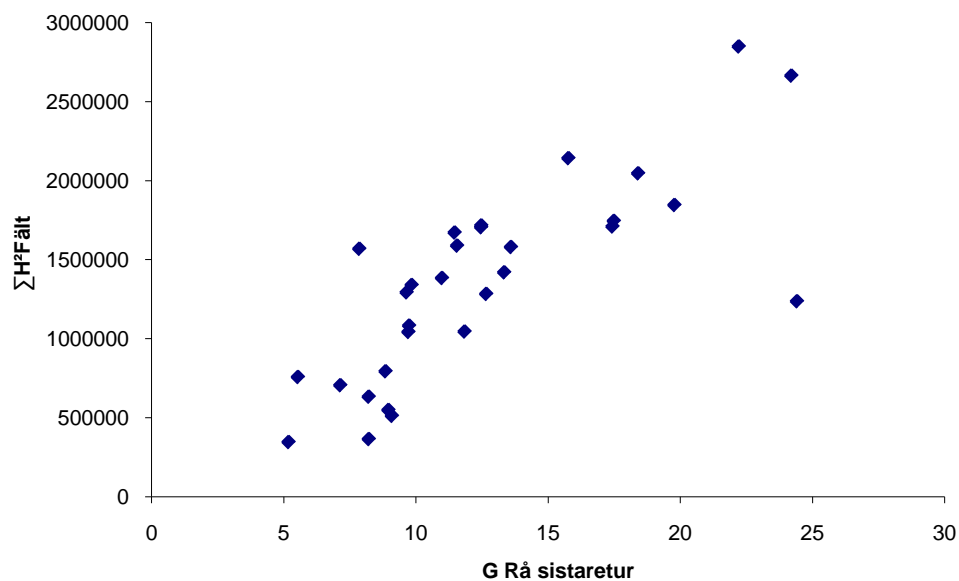
Returtypens inverkan

Ekvation 11 användes för att beräkna gallringsindex ur det täta laserdata då endast förstareturer ($G_{Rå\text{ förstaretur}}$) (Fig. 7) samt sistareturer ($G_{Rå\text{ sistaretur}}$) (Fig. 8) togs med i beräkningarna. Regressionsanalys visade att justerad R^2 blev 67.9% då endast förstareturerna togs med i beräkningarna samt 58.9% då endast sistareturerna togs med. Detta skall jämföras med tidigare beräkning då alla returerna togs med (Fig. 5) och resultatet visar då att det är bäst att ta med alla returerna vid beräkningarna.



Figur 7. Sambandet mellan $\sum H^2_{Fält}$ per yta och $G_{Rå\text{ förstaretur}}$.

Figure 7. The correlation between $\sum H^2_{Fält}$ per plot and $G_{Rå\text{ förstaretur}}$.



Figur 8. Sambandet mellan $\sum H^2_{Fält}$ per yta och $G_{Rå\text{ sistaretur}}$.

Figure 8. The correlation between $\sum H^2_{Fält}$ per plot and $G_{Rå\text{ sistaretur}}$.

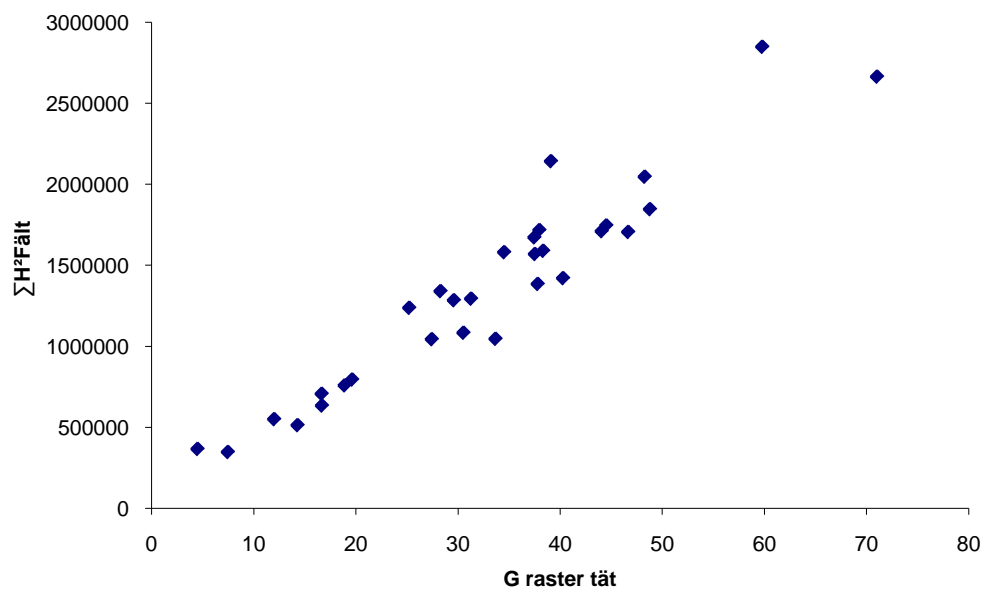
Rastermetoden

Rastercellstorlekar på 0,5, 1, 3, 5, 6, och 8m testades i beräkningarna på täta laserdata för att undersöka hur rastercellstorleken påverkar justerad R^2 (tabell 2).

Tabell 2. Justerad R^2 vid olika rastercellstorlekar beräknat på det täta laserdata
Table 2. Adjusted R^2 at different raster cell sizes calculated on the dense laser data

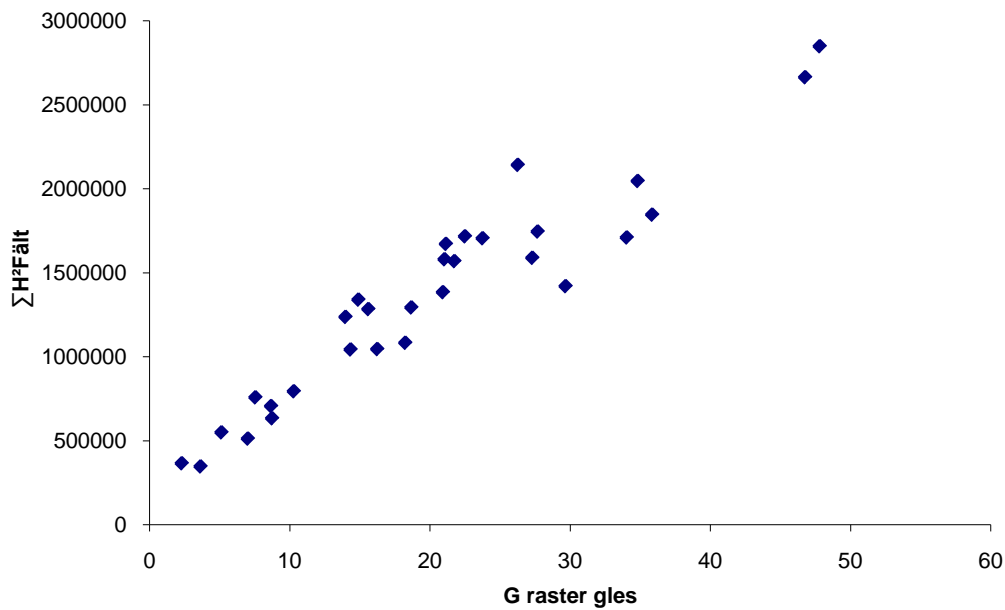
Rastercellstorlek (m)	Justerad R^2 (%)
0.5	81.8
1	83.5
3	85.9
5	87.5
6	90.8
8	88.1

Gallringsindex beräknat med 6m rasterceller på täta laserdata ($G_{\text{RasterTät}}$) visade sig vara bäst korrelerat till $\sum H^2_{\text{Fält}}$ (Fig. 9) därför användes samma metod på det glesa laserdata ($G_{\text{RasterGles}}$) (Fig. 10) vilket gav ett justerad R^2 på 89.7%.



Figur 9. Sambandet mellan $\sum H^2_{\text{Fält}}$ per yta och $G_{\text{RasterTät}}$.

Figure 9. The correlation between $\sum H^2_{\text{Fält}}$ per plot and $G_{\text{RasterTät}}$.

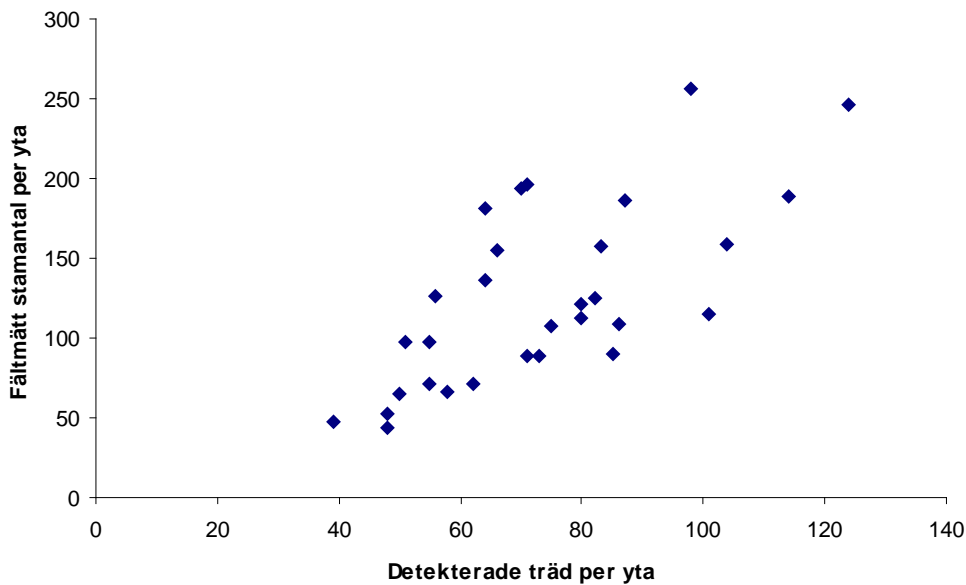


Figur 10. Sambandet mellan $\sum H^2_{Fält}$ per yta och $G_{RasterGles}$.

Figure 10. The correlation between $\sum H^2_{Fält}$ per plot and $G_{RasterGles}$.

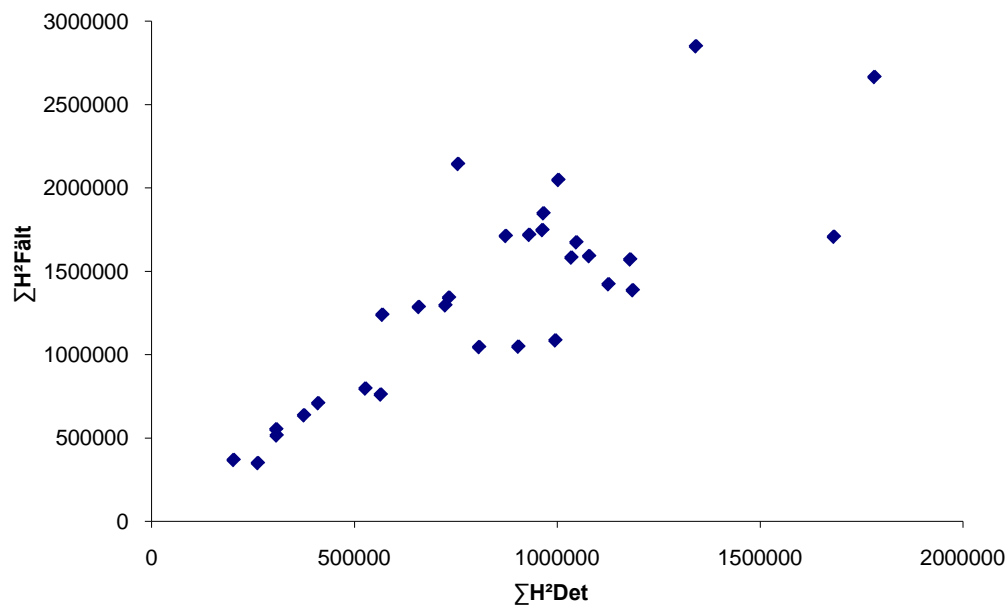
Träddetektering

Det detekterade stamantalet gav en relativt dålig överensstämmelse med det fältmätta stamantalet (Fig. 11). Regressionsanalys gav ett justerat R^2 på 46.5% för sambandet. Detta medförde att sambandet mellan $\sum H^2_{Fält}$ och $\sum H^2_{Det}$ blev svagt med ett justerat R^2 på 65.8% (Fig. 12).



Figur 11. Sambandet mellan det fältmätta stamantalet per yta och det detekterade stamantalet per yta.

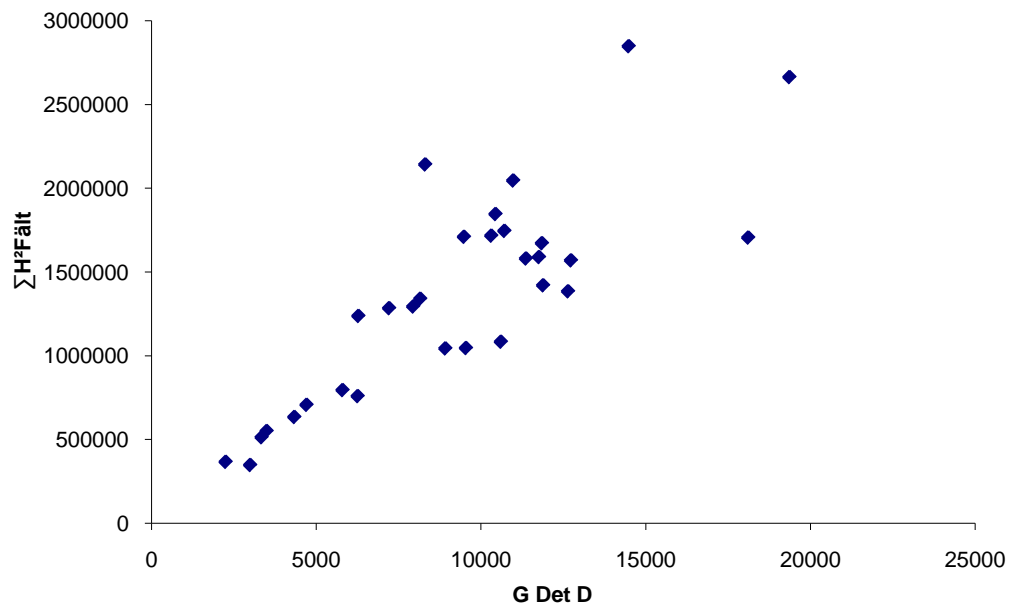
Figure 11. The correlation between the field measured number of stems per plot and the detected number of stems per plot.



Figur 12. Sambandet mellan $\sum H^2_{Fält}$ och $\sum H^2_{Det}$.

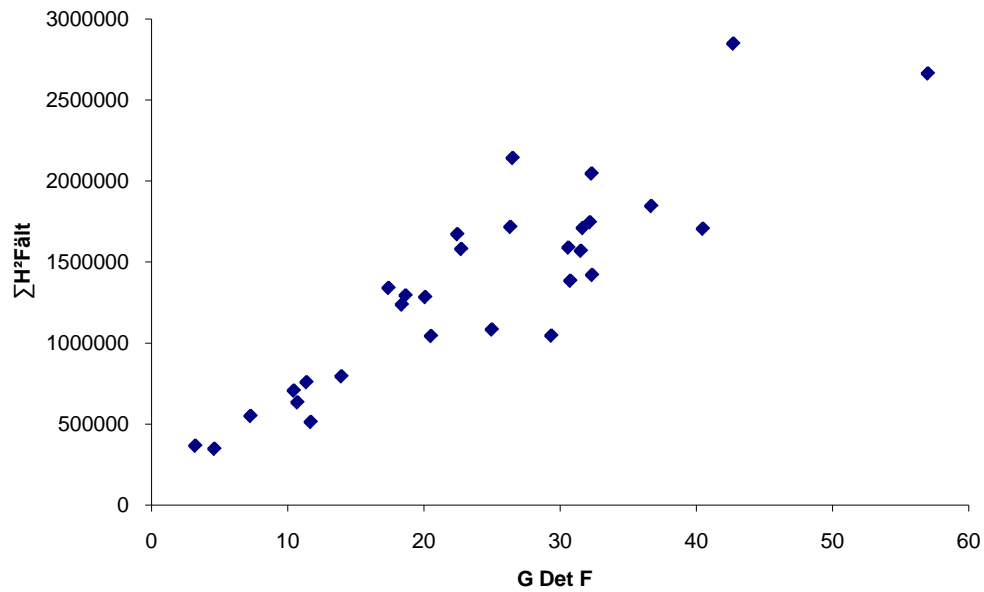
Figure 12. The correlation between $\sum H^2_{Fält}$ and $\sum H^2_{Det}$.

Två olika sätt att skatta gallringsindex utifrån de detekterade träden med ekvation 11 provades. För det ena gallringsindexet ($G_{Det D}$) beräknades percentilerna på de detekterade trädens höjder och det detekterade stamantalet användes istället för F (Fig. 13) vilket gav ett justerat R^2 på 67.1% och det plottade sambandet är mycket likt det i Figur 12. För det andra gallringsindexet ($G_{Det F}$) användes samma percentiler beräknade på de detekterande träden men F användes istället för detekterat stamantal (Fig. 14) vilket gav ett justerat R^2 på 78.4%.



Figur 13. Sambandet mellan $\sum H^2_{Fält}$ och $G_{Det D}$.

Figure 13. The correlation between $\sum H^2_{Fält}$ and $G_{Det D}$.



Figur 14. Sambandet mellan $\sum H^2_{Fält}$ och $G_{Det F}$.

Figure 14. The correlation between $\sum H^2_{Fält}$ and $G_{Det F}$.

Gallringsbehov

Rangordning

Övre höjd (ÖH) och stamantal (N) från fältdata användes som ingångsvariabler i Bergviks gallringsmall (Fig. 1) för att skatta gallringsbehovet på provytorna. Provytorna rangordnades efter $\sum H^2_{Fält}$ och det skattade gallringsbehovet jämfördes med de subjektiva kommentarerna som antecknades under fältinventeringen för att se hur väl $\sum H^2$ beskriver gallringsbehovet (tabell 3).

Tabell 3. Kopplingen mellan $\sum H^2_{Fält}$ och gallringsbehov**Table 3.** The connection between $\sum H^2_{Fält}$ and the need of thinning

Ytid	Fältmått höjdkvadrat- summa (dm)	Gallring enligt Bergviks gallringsmall	Subjektiv kommentar
16	2848243	Ja akut	Ogallrad granyta, tätt bör gallras eller slutavverkas
15	2663934	Ja, ÖH för hög för gallringsmallen	Ogallrad blandyta. Kan gallras men troligen slutavverkning
23	2142154	Ja	Björkdominerad yta som bör gallras
30	2046228	Ja stort behov	Ogallrad yta på dikad torvmark. Akut gallringsbehov
17	1845981	Ja	Ogallrad granyta. Gallring om 5-10 år
1	1745485	Ja gränsfall	Fuktigt parti med mycket gruppställt lövsly. Inget gallringsbehov
29	1716819	Ja	Relativt tät yta i skiktad skog. Kan gallras
6	1710092	Ja, N för hög för gallringsmallen	Ogallrad tallyta med mycket undervegetation av gran. Gallras snarast
8	1705476	Nej, ÖH för hög för gallringsmallen	Gallrad äldre tallyta, inget gallringsbehov
9	1671924	Ja stort behov	Luckig grandominerad yta i behov av gallring
11	1589166	Nej	Tät ogallrad tallyta med stickväg igenom. Bör gallras snarast
10	1580473	Nej	Ogallrad yta. Bör gallras så snart som möjligt
14	1569275	Nej	Gallrad tallyta. Inget gallringsbehov
4	1420361	Nej	Gallrad tallyta. Inget gallringsbehov
3	1384508	Nej	Gallrad granyta. Inget gallringsbehov
27	1340121	Ja	Relativt tät skiktad granyta. Kan gallras
28	1293624	Ja gränsfall	Luckig yta i skiktad skog. Inget gallringsbehov
18	1283906	Nej	Ogallrad granyta. Gallring om 10 år?
13	1237338	Nej, N för hög och ÖH för låg för gallringsmallen	Granungskog med gruppställt löv. Gallring om 10 år?
12	1083403	Nej	Gallrad tallyta med stickväg igenom. Inget gallringsbehov
5	1045898	Nej för glest	Gallrad tallyta med gruppställt löv. Inget gallringsbehov
2	1043475	Nej	Inget gallringsbehov
22	794535	Nej något glest	Granungskog med gruppställt löv. Gallring om 5-10 år?
26	758462	Nej något glest	Gles yta i skiktad granskog. Inget gallringsbehov
20	706552	Nej något glest	Gles granyta med gruppställt löv. Gallring om 10 år?
25	633880	Nej	Granungskog med gruppställt löv. Gallring om 5-10 år
24	549995	Nej, ÖH för låg för gallringsmallen	Granungskog med gruppställt löv. Gallring om 5-10 år
19	512893	Nej, ÖH för låg för gallringsmallen	Tallungskog. Gallring om 10 år?
7	366096	Nej, ÖH för låg för gallringsmallen	Tallungskog. Gallring om 15 år?
21	347231	Nej, ÖH för låg för gallringsmallen	Granungskog, luckigt och bitvis glest. Gallring om 15-20 år?

En rangordning av $G_{\text{RasterTät}}$ (tabell 4) respektive $G_{\text{RasterGles}}$ (tabell 5) utfördes för att undersöka var eventuella gränser för gallring kan dras.

Tabell 4. Provytorna rangordnade efter $G_{\text{RasterTät}}$

Table 4. The field plots ranked by $G_{\text{RasterTät}}$

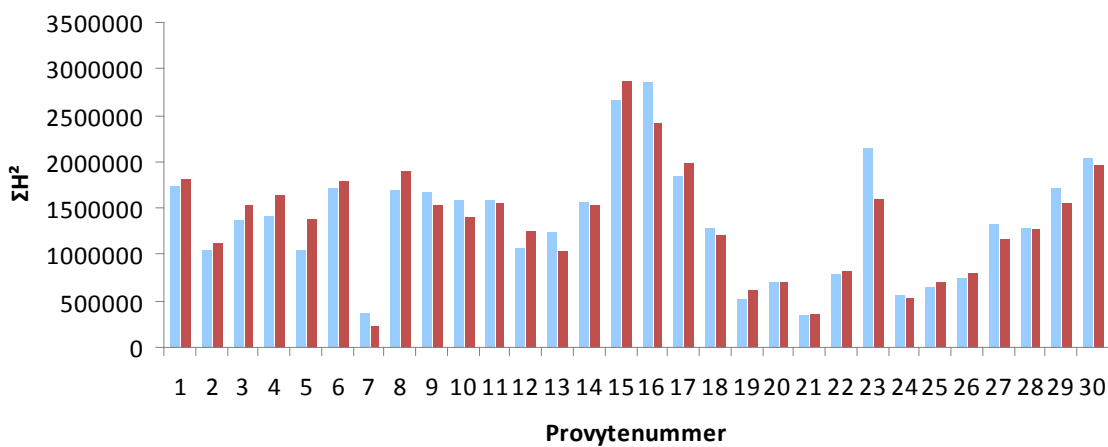
Ytid	$G_{\text{RasterTät}}$	$\sum H^2_{\text{Fält}}$	Gallring enligt Bergviks gallringsmall
15	71.0	2663934	Ja, ÖH för hög för gallringsmallen
16	59.8	2848243	Ja akut
17	48.8	1845981	Ja
30	48.3	2046228	Ja stort behov
8	46.6	1705476	Nej, ÖH för hög för gallringsmallen
1	44.5	1745485	Ja gränsfall
6	44.1	1710092	Ja, N för hög för gallringsmallen
4	40.3	1420361	Nej
23	39.1	2142154	Ja
11	38.3	1589166	Nej
29	38.0	1716819	Ja
3	37.8	1384508	Nej
14	37.5	1569275	Nej
9	37.5	1671924	Ja stort behov
10	34.5	1580473	Nej
5	33.7	1045898	Nej för glest
28	31.3	1293624	Ja gränsfall
12	30.5	1083403	Nej
18	29.6	1283906	Nej
27	28.3	1340121	Ja
2	27.4	1043475	Nej
13	25.2	1237338	N för hög och ÖH för låg för gallringsmallen
22	19.6	794535	Nej något glest
26	18.9	758462	Nej något glest
25	16.7	633880	Nej
20	16.6	706552	Nej något glest
19	14.3	512893	Nej, ÖH för låg för gallringsmallen
24	12.0	549995	Nej, ÖH för låg för gallringsmallen
21	7.5	347231	Nej, ÖH för låg för gallringsmallen
7	4.5	366096	Nej, ÖH för låg för gallringsmallen

Tabell 5. Provytorna rangordnade efter $G_{\text{RasterGles}}$ **Table 5.** The field plots ranked by $G_{\text{RasterGles}}$

Ytid	$G_{\text{RasterGles}}$	$\sum H^2_{\text{Fält}}$	Gallring enligt Bergviks gallringsmall
16	47.8	2848243	Ja akut
15	46.8	2663934	Ja, ÖH för hög för gallringsmallen
17	35.9	1845981	Ja
30	34.8	2046228	Ja stort behov
6	34.0	1710092	Ja, N för hög för gallringsmallen
4	29.7	1420361	Nej
1	27.7	1745485	Ja gränsfall
11	27.3	1589166	Nej
23	26.3	2142154	Ja
8	23.8	1705476	Nej, ÖH för hög för gallringsmallen
29	22.5	1716819	Ja
14	21.7	1569275	Nej
9	21.1	1671924	Ja stort behov
10	21.0	1580473	Nej
3	20.9	1384508	Nej
28	18.7	1293624	Ja gränsfall
12	18.2	1083403	Nej
5	16.2	1045898	Nej för glest
18	15.6	1283906	Nej
27	14.9	1340121	Ja
2	14.3	1043475	Nej
13	14.0	1237338	N för hög och ÖH för låg för gallringsmallen
22	10.3	794535	Nej något glest
25	8.7	633880	Nej
20	8.7	706552	Nej något glest
26	7.5	758462	Nej något glest
19	7.0	512893	Nej, ÖH för låg för gallringsmallen
24	5.1	549995	Nej, ÖH för låg för gallringsmallen
21	3.6	347231	Nej, ÖH för låg för gallringsmallen
7	2.3	366096	Nej, ÖH för låg för gallringsmallen

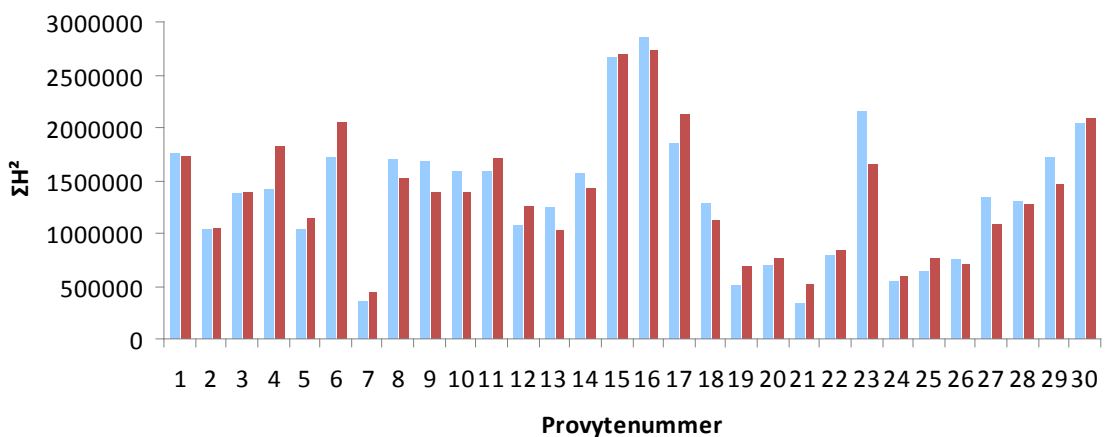
Skattning av ΣH^2

Metoden att beräkna gallringsindex genom att konvertera laserdata till ett raster med 6m rasterceller gav högst justerad R^2 av de testade metoderna i arbetet. $G_{\text{RasterTät}}$ respektive $G_{\text{RasterGles}}$ transformerades till skattad ΣH^2 för att lättare kunna jämföra med $\Sigma H^2_{\text{Fält}}$ genom att använda regressionsformler framtagna i Minitab 15 med gallringsindex som förklarande variabel. Skattningarna av ΣH^2 för de 30 provytorna ur det täta (Fig. 15) respektive glesa laserdata (Fig. 16) visar att metoden med 6m rasterceller fungerar bra för båda typerna av laserdata. Skattningen av $\Sigma H^2_{\text{Tät}}$ gav ett relativt RMSE på 13.5% medan skattningen av ΣH^2_{Gles} gav ett relativt RMSE på 14.3%.



Figur 15. $\Sigma H^2_{\text{Fält}}$ (blå) respektive $\Sigma H^2_{\text{Tät}}$ (röd) för de 30 provytorna.

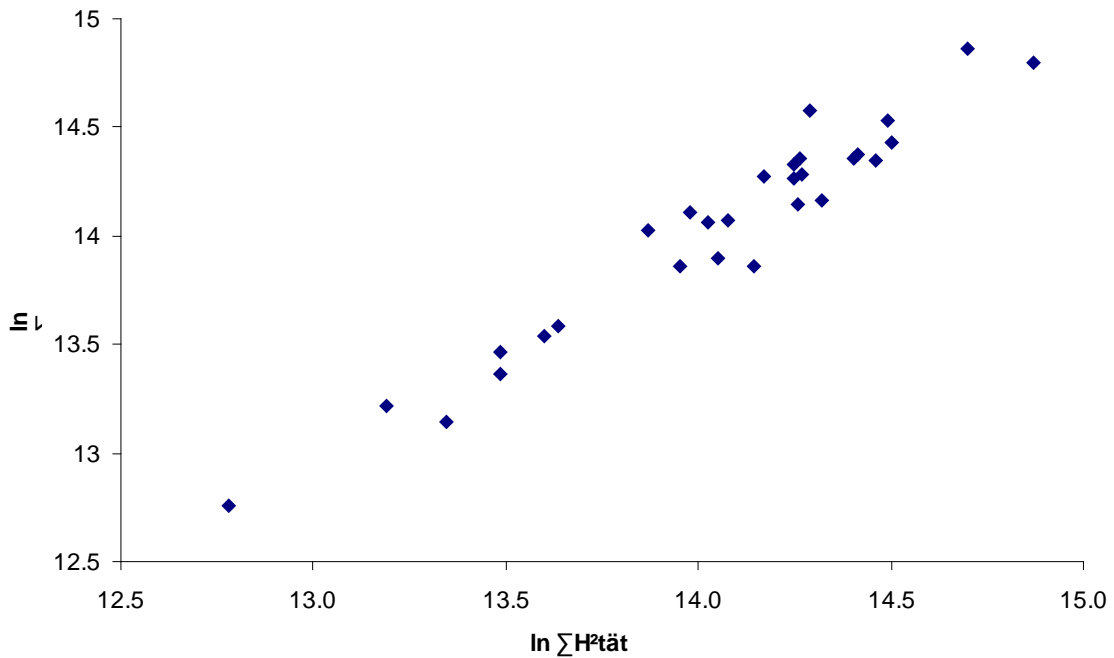
Figure 15. $\Sigma H^2_{\text{Fält}}$ (blue) and $\Sigma H^2_{\text{Tät}}$ (red) for the 30 field plots.



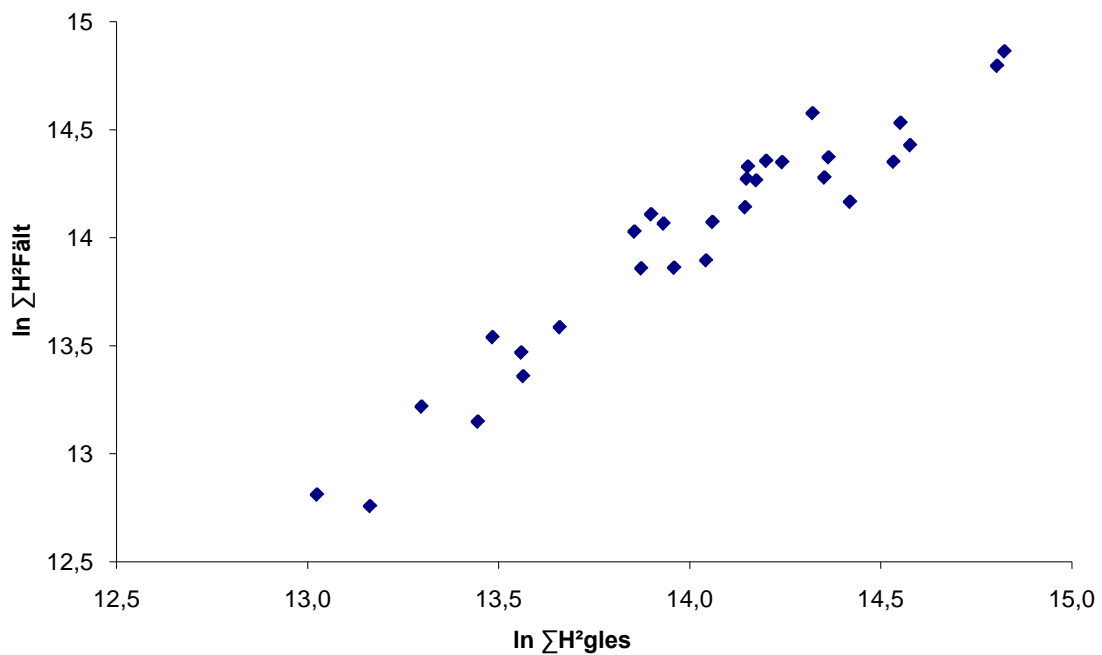
Figur 16. $\Sigma H^2_{\text{Fält}}$ (blå) respektive ΣH^2_{Gles} (röd) för de 30 provytorna.

Figure 16. $\Sigma H^2_{\text{Fält}}$ (blue) and ΣH^2_{Gles} (red) for the 30 field plots.

Den naturliga logaritmen för $\sum H^2_{Fält}$ respektive skattad ΣH^2 per provyta beräknades. Sambandet mellan de naturliga logaritmerna för $\sum H^2_{Fält}$ samt $\sum H^2_{Tät}$ (Fig. 17) respektive $\sum H^2_{Gles}$ (Fig. 18) visar en jämn spridning och en rak linje i båda fallen.



Figur 17. Sambandet mellan den naturliga logaritmen för $\sum H^2_{Fält}$ respektive $\sum H^2_{Tät}$.
Figure 17. The correlation between the natural logarithm for $\sum H^2_{Fält}$ and $\sum H^2_{Tät}$.



Figur 18. Sambandet mellan den naturliga logaritmen för $\sum H^2_{Fält}$ respektive $\sum H^2_{Gles}$.
Figure 18. The correlation between the natural logarithm for $\sum H^2_{Fält}$ and $\sum H^2_{Gles}$.

Diskussion

Möjliga felkällor

Målet med urvalet av bestånd var att få så stor spridning som möjligt med avseende på trädslagsblandning, täthet, höjd och ålder. Därför lämnades urvalet över till en skogvaktare vid Statens Fastighetsverk med god lokalkännedom i området vilken valde bestånd subjektivt för att bäst uppfylla urvalskriterierna. Att urvalet skedde subjektivt borde ej ha någon avgörande betydelse för resultatet eftersom studien skedde på provytanivå med slumpmässigt utlagda provytor inom de utvalda bestånden.

De kvadratiske provytorna visade sig vara svåra att lägga ut helt exakt då terrängen ofta var kuperad och siktlinjen för syftkompassen skymd av trädgrenar och stammar. Möjligen kan mindre förskjutningar av hörnen därmed ha uppkommit. Då marken ofta var kuperad och många provytor låg i sluttningar komprimerades den uppmätta längden på provytornas sidor i vissa fall subjektivt för att så bra som möjligt ge en kvadratisk provyta ovanifrån sett. Dessa felkällor kan innebära att några enskilda träd hamnade på fel sida om provytegränsen men med tanke på provytornas storlek bör de ej ha påverkat resultatet särskilt mycket.

När provytehörnens GPS-koordinater efterbearbetats visade det sig att formen på många provytor ej var kvadratiske. På några provytor låg någon av hörnkoordinaterna långt över 30m ifrån de övriga trots att GPS-noggrannheten för dessa koordinater var under en meter. En förklaring till detta kan kanske vara att sladden till GPS-antennen var skadad vilket ledde till att endast GPS-enhetens inbyggda antenn kunde användas samt att signalerna kan ha reflekterats av närstående träd. På grund av detta räknades GPS-koordinaterna om med minsta kvadratmetoden där viktning av hörnens GPS-noggrannhet användes för att så bra som möjligt passa in en 30x30m yta till de ursprungliga GPS-koordinaterna.

De subjektiva bedömningarna av gallringsbehovet kan ej sägas vara helt tillförlitliga men bör vara av relativt god kvalitet då förrättningsmannen tidigare arbetat med gallringsplanering och har erfarenhet av subjektiv inventering. Gallringsmallen som användes för att få fram gallringsbehovet ur fälldata är nyutvecklad och har nyligen tagits i drift av Bergvik Skog AB men det finns inte några studier som visar hur väl den fungerar. Anledningen till att den valdes istället för traditionella gallringsmallar var att bestånden i studien ofta var blandbestånd.

Då gallringsmallen är skapad för att fungera i likåldriga barrbestånd kan det utlästa gallringsbehovet för provytorna 26 – 29 vilka bestod av skiktad skog, samt yta 23 vilken var björkdominerad (tabell 1), ha blivit felaktigt. I vissa fall låg stamantalet eller övrehöjden utanför gallringsmallens gränser och i dessa fall användes gallringsgränslinjens tänkta fortsättning utanför mallen som gräns. I de fall övrehöjden låg under gallringsmallens gräns på 10m sattes nej som gallringsbehov oavsett stamantalet eftersom gallring normalt sett ej utförs i så låga bestånd.

ΣH^2 som täthetsindex

ΣH^2 bygger till skillnad från övriga liknande index på de enskilda trädens höjder istället för övrehöjd eller någon medelhöjd. Några studier om hur väl ΣH^2 fungerar som täthetsindex i olika skogstyper och för olika trädslag har ej utförts och vidare forskning krävs därför inom området.

På grund av att olika trädslag har olika ideala förband i förhållande till trädhöjden vilket Wilson (1946) visade har Hart-Beckings Relative Spacing Index olika ideala värden för olika trädslag (Spathelf 1999) och det är därmed troligt att så även är fallet för ΣH^2 vilket inte togs hänsyn till i detta arbete. Ett annat problem med Hart-Beckings Relative Spacing Index är att det ideala värdet för vissa trädslag varierar (oftast sjunker) med stigande ålder (Spathelf 1999). Braathe (1957) visade dock med en jämförelse av olika gallringstabeller för gran i norra Europa att det var stora variationer emellan när det gäller hur det ideala indexet varierar med åldern och resultaten indikerar att ett konstant index vore lämpligt som gallringsgräns för gran.

Få studier har utförts när det gäller täthetsindex för skiktad skog men Sterba & Monserud (1993) påvisade att sambandet mellan maximalt stamantal och diameter (Reineke 1933) påverkades starkt av beståndsstrukturen. Eftersom Hart-Beckings Relative Spacing Index är utvecklat för likåldrig skog är det troligt att det ideala värdet för ΣH^2 påverkas av beståndsstrukturen och att andra gränsvärden för gallring bör gälla i sådan skog.

Tolkning av resultat

Gallringsindex

F visade sig vara tydligt korrelerad till stamantalet på ytorna men spridningen var relativt stor och det verkliga stamantalet på ytorna kunde variera med upp mot 100 stammar för samma värde på F. Intressant är också att notera att skattningen av det verkliga stamantalet blev bättre då F beräknades på det glesa laserdata än på det täta.

$G_{Fält}$ visade en mycket god korrelation mot $\sum H^2_{Fält}$ vilket indikerar att metoden att dela in träden i 10 höjdklasser med lika många träd i varje klass fungerar bra.

Försöken att beräkna G direkt utifrån rådata visade sig ge alltför dålig korrelation mot $\sum H^2_{Fält}$ för att vara användbart som gallringsindex. Förhoppningar fanns om att resultaten skulle bli bättre när endast förstareturerna räknades med då de till större del borde komma från toppen av trädkronorna men försöken visade att det var bättre att ta med alla returerna i beräkningarna.

Resultaten förbättrades kraftigt då returerna räknades om till ett raster där endast den högsta returen inom varje rastercell togs med i beräkningarna. Det bästa resultatet för de rastercellstorlekar som testades i arbetet gavs vid en rastercellstorlek på 6m. Det är möjligt att resultatet skulle ha kunnat förbättras ytterligare om fler rastercellstorlekar hade testats. Resultaten indikerar att metoden fungerar i stort sett lika bra på tät och gles laserdata men G värdet blir lägre för det glesa data än för det täta och de båda G värdena måste ses som två skilda variabler. Figur 15 och 16 visar de båda G värdena omräknade till skattad ΣH^2 och den enda yta som sticker ut ifrån de övriga både för det glesa samt täta laserdata är yta

23 för vilken ΣH^2 tydligt underskattats. Intressant nog är yta 23 den enda björkdominerade ytan i materialet men underlaget är alltför litet för att dra några slutsatser om hur metoden fungerar för att skatta ΣH^2 i lövskog. Figur 15 och 16 indikerar även att skattningen av ΣH^2 fungerar lika bra för ytorna 26 – 29 vilka bestod av skiktad skog som för övriga ytor vilka bestod av mer likåldrig skog. Skattningarna av ΣH^2 gav ett relativt RMSE på 13.5% för täta laserdata och 14.3% för glesa laserdata vilket är liknande noggrannheter som tidigare studier visat när det gäller att skatta grundyta och volym på beståndsnivå ur laserdata (Naesset 2002, Holmgren 2004).

G beräknat med hjälp av träddektivering visade en dålig korrelation mot $\Sigma H^2_{Fält}$ för de två metoder som testades. En anledning till det är att det detekterade stamantalet kraftigt underskattar det verkliga stamantalet och att spridningen är mycket stor (Fig. 11). Dessutom är det troligt att de träd som detekteras ger en felaktig höjdfördelningskurva för provytan eftersom större träd lättare detekteras än mindre vilket Persson et al. (2002) visade.

Gallringsbehov

Gallringsbehovet enligt gallringsmallen stämde i de flesta fall väl överens med de subjektiva kommentarerna vilket tabell 3 visar. Dock kan vissa skillnader utläsas för ojämna provytor som exempelvis yta 11 vilken var mycket tät men med en stickväg som korsade den vilket gjorde att medelvärdet för ytan hamnade under gränsen i gallringsmallen trots att det var akut gallringsbehov. Tabell 3 visar att ΣH^2 verkar vara tydligt kopplad till gallringsbehovet även om vissa undantag finns. Som tidigare nämnts är det sannolikt att resultatet kunde ha förbättrats om provytorna delats in i olika strata med avseende på trädslag och struktur med olika gallringsgränsvärden för olika strata. Materialet för detta arbete var dock alltför litet för en sådan indelning.

För att rangordna gallringsbehovet i det skannade området kan $G_{\text{RasterTät}}$ och $G_{\text{RasterGles}}$ användas utan att kompletteras med fältinventering men någon skattning av $\Sigma H^2_{Fält}$ kan då ej utföras. Metoden skulle kunna utvecklas till en GIS-applikation där G visas i ett raster med 30x30m rasterceller över hela det skannade området där rastercellerna tilldelas olika färger beroende på G-värdet. En sådan applikation skulle vara helt oberoende av beståndsgränser och skulle tydligt visa var större samlade områden av tät skog finns. Det skulle sedan kunna kombineras med andra skogliga variabler som exempelvis höjd och grundyta vilka skattats ur laserdata för att bedöma om områdena kan vara aktuella för gallring. Ur tabell 4 och 5 skulle eventuella gallringsgränsvärden för G kunna tänkas dras vid 35 för $G_{\text{RasterTät}}$ och 21 för $G_{\text{RasterGles}}$. Om skanning sker med annan punkttäthet än de ca 10 punkter/m² respektive ca 0,8 punkter/m² som användes för framtagandet av $G_{\text{RasterTät}}$ respektive $G_{\text{RasterGles}}$ måste andra gränsvärden dras.

Slutsatser

Resultatet i denna studie visar att ΣH^2 beskriver gallringsbehovet på ett relativt bra sätt för skog med varierande struktur, höjd, ålder och trädslagsblandning även om vissa undantag finns. Det är dock troligt att det ideala värdet för ΣH^2 skiljer sig mellan olika trädslag.

ΣH^2 går att skatta med en hög noggrannhet ur både glest och tätt laserdata för det undersökta området om rådata omvandlas till ett raster med 6m rastercellstorlek och skattningarna verkar bli lika bra oavsett skogens struktur, höjd, ålder och trädslagsblandning.

För rangordning av gallringsbehovet på 30x30m ytor inom det skannade området behöver metoden ej kompletteras med fältdata utan det beräknade gallringsindexet G kan användas rakt av. För att finna gränsvärdet för gallring krävs dock att metoden kompletteras med fältinventering då det kan tänkas skilja beroende på geografisk position.

Om G skall jämföras mellan olika skannade områden krävs att laserdata har samma punkttäthet då värdet på G stiger med ökande täthet på laserdata.

Metoden skulle kunna utvecklas till en GIS-applikation där G visas i ett raster med 30x30m rasterceller över hela det skannade området där rastercellerna tilldelas olika färger beroende på G-värdet. Det skulle ge möjlighet till ett beståndsfritt skogsbruk eftersom det tydligt syns var större samlade områden med tät skog finns oberoende av beståndsgränser.

Mer forskning inom området krävs dock innan metoden kan rekommenderas då materialet i detta arbete var relativt litet.

Referenser

- Ackermann, F. 1999. Airborne laser scanning - present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3):64-67
- Bennett, W.S. & Maguire, D.A. 1995. A field procedure for thinning relative density specifications: Development, implementation, and relationship to stand structure. *Western Journal of Applied Forestry*, 10(3):85-90
- Braathe, P. 1957. Thinnings in even-aged stands: a summary of european literature. Frederiction: University of New Brunswick (Faculty of Forestry)
- Brandel, G. 1990. Volymfunktioner för enskilda träd : tall, gran och björk. Garpenberg: Sveriges lantbruksuniversitet. (SLU/Institutionen för skogsproduktion ; 26). ISBN 91-576-4030-0 ; 200:00
- Brandtberg, T. 1999. Automatic individual tree-based analysis of high spatial resolution remotely sensed data. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet. (Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Silvestria ; 118). ISBN 91-576-5852-8
- Curtis, R.O. 1970. Stand Density Measures: An Interpretation. *Forest Science*, 16(4):403-414
- Dean, T.J. & Baldwin, V.C. 1996. The relationship between Reineke's stand-density index and physical stem mechanics. *Forest Ecology and Management*, 81(1-3):25-34
- Eid, T., Gobakken, T., Naesset, E. 2004. Comparing stand inventories for large areas based on photo-interpretation and laser scanning by means of cost-plus-loss analyses. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6):512-523
- Elfving, B. 1982. HUGINs ungskogstaxering 1976-1979. Umeå: Sveriges lantbruksuniversitet. (SLU/Skogsvetenskapliga fakulteten Projekt HUGIN ; 27)
- Holmgren, J. 2004. Prediction of tree height, basal area and stem volume in forest stands using airborne laser scanning. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6):543-553
- Holmgren, J. & Wallerman, J. 2006. Estimation of tree size distribution by combining vertical and horizontal distribution of LIDAR measurements with extraction of individual trees. In: T. Koukal and W. Schneider (Eds.). *Proceedings from Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, Vienna, Austria, 14-15 February 2006*, pp. 168-173. University of Natural Resources and Applied Life Science, Vienna, Austria.

- Hyytiäinen, K. & Tahvonen, O. 2002. Economics of forest thinnings and rotation periods for Finnish conifer cultures. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17(3):274-288
- Kraus, K. 1993. *Photogrammetry*. 4. omarbetade uppl. Bonn: Drümmler
- Magnusson, M., Fransson, J.E.S. & Holmgren, J. 2007. Effects on Estimation Accuracy of Forest Variables Using Different Pulse Density of Laser Data. *Forest Science*, 53(6):619-626
- Naesset, E. 1997. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRIS Journal of Photogrammetry*, 52(2):49-56
- Naesset, E. 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment*, 80(1):88-99
- Naesset, E. 2004. Accuracy of forest inventory using airborne laser scanning: Evaluating the first Nordic full-scale operational project. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6):554-557
- Naesset, E. & Bjercknes, K.O. 2001. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 78(3):328-340
- Naesset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyyppä, H., Hyyppä, J., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, Å., Söderman, U. 2004. Laser scanning of forest resources: The Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6):482-499
- Nelson, R. 1997. Modelling Forest Canopy Heights: The Effects of Canopy Shape. *Remote Sensing of Environment*, 60:327-334
- Nilsson, M. 1994. Estimation of Tree Heights and Stand Volume Using Airborne Lidar Systems. Umeå: Sveriges lantbruksuniversitet. (SLU/Institutionen för skogstaxering ; 57). SLU-STAX-R—57--SE
- Näslund, M. 1936. Skogsförsöksanstaltens gallringsförsök i tallskog : primärbearbetning. Stockholm: Statens Skogsförsöksanstalt. (Meddelande från Statens skogsförsöksanstalt ; 29:1)
- Persson, Å., Holmgren, J. & Söderman, U. 2002. Detecting and Measuring Individual Trees Using an Airborne Laser Scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(9):925-932
- Reineke, L.H. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *J. Agric. Res.* 46:627-638.

- Smith, D.M. 1997. The Practice of Silviculture. 9. uppl. New York : John Wiley & Sons
- Spathelf, P. 1999. Determination of thinning intensity if *Pinus Elliottii* Engelm stands on the basis of the spacing indices Relative Spacing Index, Stand Density Index and Wachsraumzahl. Proceedings of the IUFRO International Symposium Long-Term Observation and Research in Forestry, Turrialba. 259-272.
- Sterba, H. & Monserud, R.A. 1993. The Maximum Density concept applied to uneven-aged mixed-species stands. Forest Science, 39(3):432-452
- Söderström, V. 1971. Ekonomisk skogsproduktion. Stockholm : LT
- Wehr, A. & Lohr, U. 1999. Airborne laser scanning - an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2-3):68-82
- Wilson, F.G. 1946. Numerical expression of stocking in terms of height. Journal of Forestry, 44(10):758-761
- Zeide, B. 2004. Optimal stand density: a solution. Canadian Journal of Forest Research, 34(4):846-854