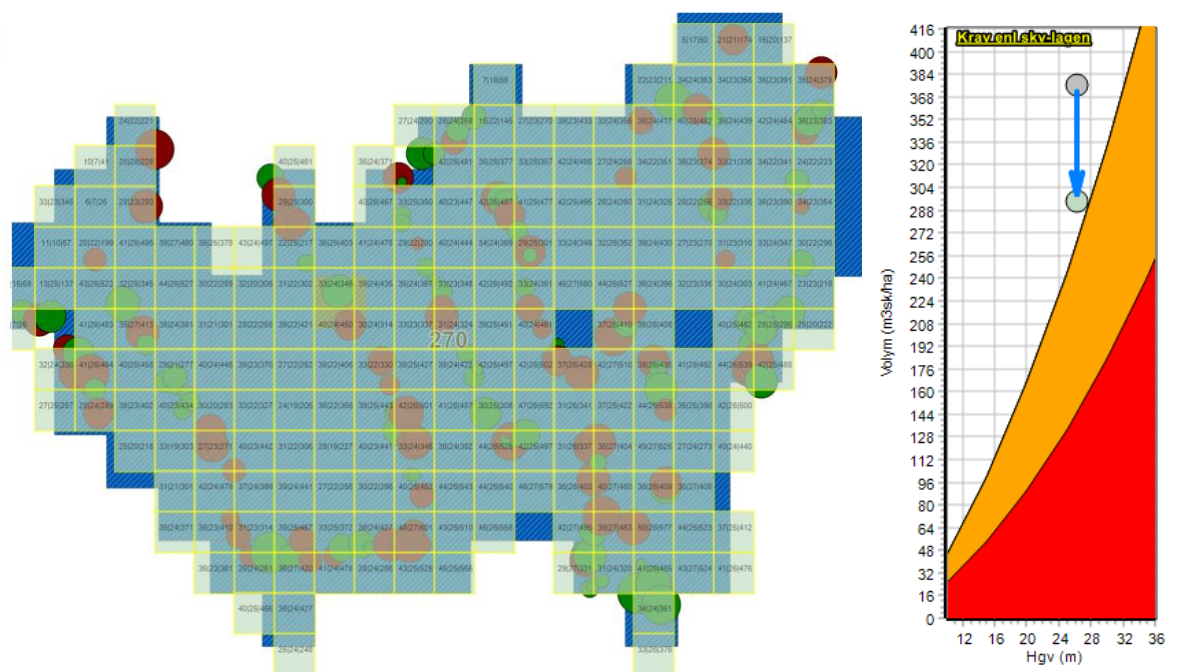


hprHyggesfritt – Utveckling och utvärdering av ett förarbeslutsstöd vid tillämpning av hyggesfria avverkningsmetoder

En vidareutveckling av hprGallring

Martin Whillans, Björn Hannrup och Johan J. Möller



Kartbild från hprHyggesfritt som visar för skördarföraren hyggesfri avverkad areal (blått rutnät), uttagna träd (färgade cirklar) och skogliga grunddata baserade på den nationella laserskanningen (gula rutnätet). Diagrammet till höger om kartbilden visar programmets återkoppling om objektets volym före och efter avverkning (grå cirklar) i förhållande till skogvårdslagens paragraf 10- och 5-kurvor. Den blåa pilen symboliserar uttagen volym.

Innehåll

Förord.....	4
Summary	5
Sammanfattning.....	7
Bakgrund	9
Syfte och mål	10
Material och metoder.....	11
Utveckling av hprHyggesfritt	11
Beräkningsflöde för hprHyggesfritt.....	11
1. Inläsning av data.....	13
2. Arealberäkning	13
3. Beskrivning av skogliga variabler före avverkning utifrån skogliga grunddata.....	13
4. Inläsning och lagring av skogliga grunddata	13
4. Prognos av kvarvarande skog.....	15
Återkoppling mot paragraf 5- och 10-kurvorna	14
Material och manuella referensmätningar	14
Beståndsuppgifter och utläggning av provytor för referensmätning	14
Metoder för utveckling och test av arealberäkning och prognos efter avverkning	16
Indelning av avverkningar i provytor	16
Fältmätning av areal och kvarvarande skog.....	17
Kontroll av hprHyggesfritt SGD-volymunderlag	17
Analys och utvärdering av areal, volym, gallringskvot, Hgv och Dgv.....	18
Resultat och diskussion.....	20
Areal.....	20
Volym före avverkning.....	21
Volym efter avverkning	24
Gallringskvot, Hgv och Dgv efter avverkning.....	25
Gallringskvot.....	25
Hgv efter avverkning	27
Dgv efter avverkning	28
Uppföljning mot skogsvårdslagens §5- och 10-kurvor	30
Fortsatt utveckling.....	33
Referenser	34
Bilaga 1 – Studieobjekt och tillhörande provytor.....	35

Bilaga 2 – Ändringar i programinställningar och grundalgoritmer	41
Bilaga 3 – Algoritm för inkludering av SGD-ruta och beräkning av medelvärde	42
Bilaga 4 – Algoritm för inkludering av SGD-ruta och beräkning av medelvärde	43
Bilaga 5 - Beräkning av medelvärde.....	44
Bilaga 6 - Volymprognosens variation beroende på antal avverkade stammar	45
Bilaga 7 – Algoritmens beräkningssteg för volym efter avverkning.....	46



Uppsala Science Park, 751 83 Uppsala
skogforsk@skogforsk.se
skogforsk.se

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts 5 september av Mia Iwarsson Wide, programchef Värdekedjor. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef, granskat och godkänt publikationen för publicering 11 september 2024.

Redaktör: Anna Franck, anna@annafranck.se
©Skogforsk 2024 ISSN 1404-305X

Förord

Denna rapport är utarbetad inom ramen för projektet ”Beslutsstöd för löpande uppföljning av kvarvarande volymer vid avverkning med hyggesfria metoder”. Projektet har finansierats av medel från Stiftelsen Seydlitz MP Bolagen, Karl Erik Önnesjös stiftelse för vetenskaplig forskning och utveckling och medel från Skogforsks ramanslag. Projektet har syftat till att utveckla ett beslutsstöd för skördarförare för uppföljning av kvarvarande volym vid användning av hyggesfria metoder. Det framtagna beslutsstödet har implementerats i programvaran hprHyggesfritt som kan ge skördarförare löpande återkoppling om kvarvarande volym och dess relation till skogsvårdslagens §5- och 10-kurvor. Avrapporteringen från projektet består av en beskrivning av genomförd utveckling, en utvärdering av det framtagna systemet, programvaran hprHyggesfritt samt denna rapport, där ett system för beräkning och återkoppling till skördarförare beskrivs.

Hannes Parlow, Skogsägarna Mellanskog ek. för., och Anders Ek, Södra Skogsägarna ek. för., har bidragit med värdefulla uppgifter från företagens hyggesfria avverkningar.

Projektet har varit organiserat med en projektgrupp som har bestått av Martin Whillans, Björn Hannrup och Johan Möller, samtliga från Skogforsk, samt av John Arlinger, JDA Forest AB och Ingemar Eriksson, Forbis AB.

Ett stort tack till samtliga som bidragit till studiens genomförande!

Uppsala 2024

Martin Whillans (Projektledare)

Summary

Interest in the application of non-clear-cut methods is increasing in Swedish forestry. Non-clear-cut is a broad concept encompassing several different management systems where the clear-cut phase is eliminated. Central to non-clear-cutting measures in Sweden, are paragraphs 5 and 10 of the Swedish Forestry Act, which, depending on management method, stipulate a minimum allowable volume after harvest. This result in more complexity when compared to clear-cutting, and there is a need for monitoring tools that allow harvester operators and forestry companies to ensure meeting operational targets in a cost-effective manner.

Today, the software hprThinning is widely used in Swedish forestry for automated thinning monitoring. The tool provides the harvester operator with ongoing feedback on harvested volume and key performance indicators describing the remaining stand after harvesting. The calculations in the program are based solely on data collected from the harvested trees. Evaluations have shown that the tool works well in first thinnings but can be expected to have lower precision in second and later thinnings. This is because the proportion of volume harvested from the strip roads is low, also referred to as the information used to map the stand's conditions before thinning. Non-clear-cutting methods are also expected to result in a low proportion of strip road trees, which necessitates the use of other data sources in a monitoring tool along with harvester data.

In this study, a new decision support tool was developed: hprNonClear-cut. A central part of this was the development of a function for importing basic forest data (based on the national LiDAR data) and adjustments of algorithms for calculating harvested area and volume before and after harvesting. A function was also integrated into the tool for displaying feedback to the harvester operator on how the standing volume after harvest relates to paragraphs 5 and 10 of the Swedish Forestry Act.

For the evaluation of the decision support tool, harvester data was collected from a total of 22 sample plots from five objects in Småland and Uppland that were harvested using non-clear-cut methods. Manual reference measurements were taken on all sample plots where all remaining stems after harvest were measured. Evaluation was done through comparison between stand variables calculated with hprNonClear-cut and corresponding data obtained from manual reference measurements.

The results of the study can be summarized as follows:

- Different algorithms should be used for determining area based on harvester data for smaller plots (0.25 – 0.7 ha) versus larger plots (>0.8 ha). The evaluated algorithms were free from systematic bias and had a spread, expressed as the standard deviation for the deviation between reference measurement and calculated area, of 7% and 16% for larger and smaller plots, respectively.
- For sample plots and objects with an average area of 0.44 ha and 1.92 ha, respectively, hprNonClear-cut's determination of volume per hectare before harvesting had a negligible systematic bias and a spread of 5.7% and 2.4%, respectively. The corresponding spread for hprNonClear-cut's determination of volume after harvesting was 11.6% and 5.2%. The results support that basic forest data can generate an accurate and precise estimate of volume before harvesting in the type of stands where non-clearcutting methods are applicable.
- The average thinning ratio for the five objects was 1.09 from the manual reference measurement, while the corresponding estimate from hprNonClear-cut was 1.18. The systematic overestimation from hprNonClear-cut generated a systematic underestimation for basal area weight height (Hbw) and basal area weighted diameter (Dbw). Further studies should focus on refining the methodology for estimating thinning ratio and thus achieving improved estimates of Dbw and Hbw.

- Based on the comparison with manual reference measurement, hprNonClear-cut provided relevant and accurate feedback on how the timber stock after harvesting related to paragraphs 10 and 5 of the Forestry Act. The evaluation also indicated that with the decision support tool, harvester operators can receive signals during ongoing harvesting on how the harvest can be adjusted to achieve a higher degree of compliance with the paragraph 10 curve for the harvested object.

In summary, the study has resulted in an operational decision support tool for use in the application of non-clear-cut methods. The tool's estimates of stand variables can be expected to maintain high accuracy and precision and be used to provide harvester operators with relevant and accurate feedback on how the remaining volume after harvesting relates to paragraphs 10 and 5 of the Forestry Act.

Sammanfattning

Intresset för tillämpning av hyggesfria metoder ökar i det svenska skogsbruket. Hyggesfritt är ett brett begrepp som omfattar flera olika skötselsystem där kalhyggesfasen elimineras. Centralt för hyggesfria åtgärder är kurvorna i skogsvårdslagens paragraf 5 och 10 som, beroende på skötselmetod, stipulerar en minimivolym som beståndet inte får understiga efter genomförd avverkning. Hyggesfria metoder ökar komplexiteten vid genomförandet och det finns ett behov av operativa uppföljningsverktyg så att skördarförare och skogsföretag kan säkerställa måluppfyllelse på ett kostnadseffektivt sätt vid praktiskt genomförande av metoderna.

Idag används programvaran hprGallring i bred omfattning i det svenska skogsbruket för automatiserad gallringsuppföljning. Verktöget ger skördarföraren löpande återkoppling om uttaget och om nyckeltal som beskriver det kvarstående beståndet efter avverkning. Beräkningarna i programmet utgår uteslutande från insamlade data om de avverkade träden. Utvärderingar har visat att verktöget fungerar väl i första gallring, men kan förväntas ha lägre precision vid andra och senare gallring. Detta beroende på att andelen av volymuttaget i stickvägarna är låg, det vill säga den information som används för att kartlägga beståndets utseende före gallring. Hyggesfria metoder förväntas också innebära låg andel stickvägsträd vilket medför behov av att i ett uppföljningsverktyg använda andra datakällor tillsammans med skördardata.

Skogliga grunddata baseras på den nationella laserskanningen och innehåller uppgifter om skogens virkesförråd i ett 10x10 meters rutnät med nationell täckning. Dessa data kan förväntas ge en precis information om beståndet före avverkning, i synnerhet för äldre bestånd där den löpande tillväxten klingat av. En ansats där skogliga grunddata och skördarmätt avverkad volym kombineras och byggs in i ett automatiserat förarbeslutsstöd skulle därmed kunna utgöra en kostnadseffektiv metod för uppföljning och säkerställande av utfört arbete vid tillämpning av hyggesfria metoder. I studien testades en sådan ansats i en tvåstegsprocess bestående av inledande anpassning av metodiken i hprGallring följt av utvärdering utifrån referensmätningar utförda efter avverkning med hyggesfria metoder.

I studien utvecklades ett nytt beslutsstöd: hprHyggesfritt. En central del utgjordes av framtagning av en funktion för inläsning av skogliga grunddata samt av anpassningar av algoritmer för beräkning av avverkad areal och volym före, respektive efter avverkning. En funktion för löpande återkoppling till skördarföraren om hur virkesförrådet efter avverkning förhåller sig till skogsvårdslagens paragraf 5- och 10-kurva integrerades i det nya beslutsstödet. För utvärdering av beslutsstödet samlades skördardata in från totalt 22 provytor från fem objekt i Småland och Uppland som avverkats med olika hyggesfria metoder. På provytorna gjordes manuella referensmätningar och samtliga kvarvarande stammar efter avverkning klavades. Utvärdering skedde genom jämförelse mellan bestandsvariabler beräknade med hprHyggesfritt och motsvarande uppgifter inhämtade från manuell referensmätning.

Resultaten från studien kan sammanfattas enligt följande:

- Olika algoritmer bör användas vid arealbestämning baserat på skördardata för mindre ytor (0,25–0,7 ha) respektive större ytor (>0,8 ha). De algoritmer som utvärderades var fria från systematisk avvikelse och hade en spridning, uttryckt som standardavvikelse för avvikelse mellan referensmätt och beräknad areal, på 7 procent respektive 16 procent för större respektive mindre ytor.
- För provytor och objekt med en genomsnittlig areal på 0,44 ha (mindre ytor) respektive 1,92 ha (större ytor) hade hprHyggesfritts bestämning av volym per hektar *före* avverkning en försumbar systematisk avvikelse och en spridning på 5,7 procent, respektive 2,4 procent. Resultaten ger stöd för att skogliga grunddata har förmåga att generera en noggrann och precis skattning av volym före avverkning i den typ av bestånd där hyggesfria metoder är aktuella.

- Motsvarande spridning för hprHyggesfritts bestämning av volym per hektar *efter* avverkning var 11,6 procent, respektive 5,2 procent. Resultaten ger stöd för att den föreslagna metoden att kombinera skogliga grunddata tillsammans med information om de avverkade träden, kan generera hög precision i skattning av volym efter avverkning i den typ av bestånd där hyggesfria metoder är aktuella.
- Den genomsnittliga gallringskvoten för de fem objekten var 1,09 baserat på data från den manuella referensmätningen, medan motsvarande skattning från hprHyggesfritt uppgick till 1,18. Den systematiska överskattningen från hprHyggesfritt genererade en systematisk underskattning av grundytvåg höjd (Hgv) och diameter (Dgv). Fortsatta studier bör inriktas mot att förfinas metodiken för skattning av gallringskvot och därmed åstadkomma förbättrade skattningar av Dgv och Hgv.
- Baserat på jämförelsen med manuell referensmätning gav hprHyggesfritt en relevant och korrekt återkoppling om hur virkesförrådet efter avverkning relaterade till skogsvårdslagens paragraf 10- respektive 5-kurva. Utvärderingen indikerade också att med beslutsstödet kan skördarförare under pågående avverkning få signaler hur uttaget kan förändras för att det avverkade objektet som helhet ska nå en högre grad av överensstämmelse med paragraf 10-kurvan.

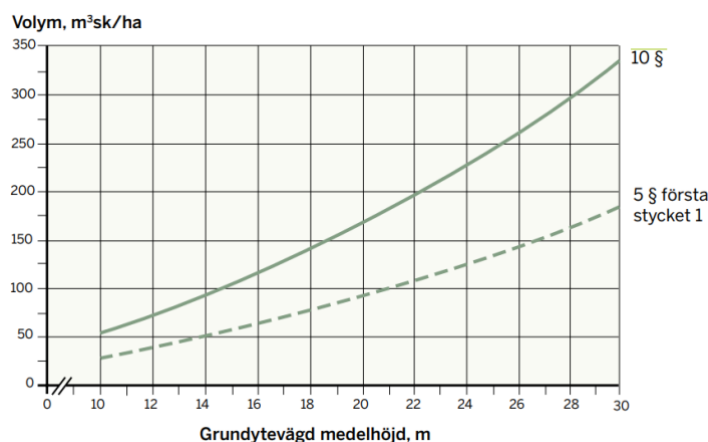
Sammanfattningsvis har studien medfört att ett operativt beslutsstöd vid användning av hyggesfria metoder nu finns framtaget. Beslutsstödet skattningar av bestandsvariabler kan förväntas hålla hög noggrannhet och precision och användas för att ge skördarförare relevant och korrekt återkoppling om hur kvarvarande volym efter avverkning förhåller sig till skogsvårdslagens paragraf 10- respektive 5-kurva.

Bakgrund

Intresset för hyggesfri avverkning ökar i det svenska skogsbruket. Från politiskt håll har intresset ökat både i och utanför Sverige. Skogsstyrelsen har sedan 2005 arbetat med ett regeringsuppdrag i syfte att sprida kunskap och verka för en ökning av hyggesfria metoder i det svenska skogsbruket (Appelqvist m.fl. 2021). EU-parlamentet antog under hösten 2022 en strategi för 2030 mot ett hållbart skogsbruk i Europa där hyggesfria metoder lyfts fram som ett hållbart sätt att bedriva skogsbruk (Anon. EU 2022). Även bland privata skogsägare och skogsföretag ökar intresset, där många ”provar sig fram” i mindre skala. Praktisk erfarenhet av metoderna saknas dock hos de allra flesta svenska skogsaktörer och kunskapsbehovet är stort och mångfacetterat (Sonesson m.fl. 2017). Därutöver är det angeläget att operativa uppföljningsverktyg utvecklas för säkerställande av måluppfyllelse vid praktiskt genomförande av metoderna.

Hyggesfritt är ett brett begrepp som omfattar flera olika skötselsystem där kalhyggesfasen elimineras. Exempel på dessa är blädning och måldiameterhuggning där en kontinuerlig beståndsstruktur eftersträvas över tid, och selektiva uttag av enskilda träd görs vid varje avverkningstillfälle på ett sätt som främjar beståndets utveckling samt skapar förutsättningar för mindre träd att växa in underifrån. Luckhuggning och överhållna skärmar är metoder som tillhör systemet för trakthyggesbruk, men som anses som hyggesfria per Skogsstyrelsens definition (Appelqvist m.fl. 2021). Vid luckhuggning avverkas trädgrupper och därigenom skapas kala ytor upp till 0,25 ha, utan att den totala volymtätheten för beståndet får understiga en bestämd volymtäthet.

Hyggesfria metoder som blädning och måldiameterhuggning innebär ökad komplexitet vid utförande jämfört med traditionellt trakthyggesbruk. När syftet är att bibehålla eller skapa en skiktad beståndsstruktur och en bestämd diameterklassfördelning i det kvarvarande beståndet, är det viktigt att ha kontroll på kvarvarande volym, grundyta och stamantal. Vid skötselsystem med luckhuggning är det viktigt att hålla reda på hur stora luckorna blir och områdets totala täthet efter åtgärd. Utöver den ökade komplexiteten jämfört med trakthyggesbruk, måste den som avverkar med hyggesfria metoder förhålla sig till skogsvårdslagens paragrafer 5 och 10 (Skogsstyrelsen 2022). Paragraf 10 reglerar åtgärder som utförs för att främja den växande skogens utveckling och är därmed relevant för till exempel blädning och måldiameterhuggning. Paragrafen anger den nivå på virkesförrådet som inte får understigas efter avverkning. Underskrids denna nivå anses förnygringsavverkning ha påbörjats vilket kräver inlämnande av avverkningsanmälan. Paragraf 5 har bäring på skyldigheten att anlägga ny skog; underskrids den nivå på virkesförrådet efter avverkning som anges i paragrafen inträder förnygringsskyldighet.



Figur 1. Virkesförrådsdiagram – Bilaga 1 av Skogsvårdslagen. Lägst virkesförråd efter en avverkning i barrskog som syftar till att främja skogens utveckling: 10§-kurva. 5§-kurvan beskriver virkesförråd i barrskog, björkskog och blandskog av barrträd och björk som anger den nivå där skyldighet att anlägga ny skog normalt inträder.

hprGallring är ett automatiserat förarbeslutsstöd som har utvecklats stegvis under de senaste tio åren (Bhuiyan m.fl. 2011, Hannrup m.fl. 2015 och 2021, Möller m.fl. 2015). Systemet ger löpande återkoppling till skördarföraren om utfört arbete, där resultatet presenteras med information om uttag, gallringsstyrka och nyckeltal för det kvarlämnade beståndet efter gallring. Systemet används i hög grad hos de flesta större skogsaktörer i Sverige idag. Systemets algoritmer för beräkning av skogsvariabler är i grunden uppbyggda på insamlade data från referensmätning i gallringsskog, representativa för enskiktad, skött produktionsskog. Därutöver kartlägger verktyget variabler för beståndet innan gallring med hjälp av information från de avverkade stickvägsträden. Utvärderingar visar att verktyget fungerar väl i första gallring (Möller m.fl. 2021), men prognoserna för andra och senare gallring kan förväntas ha lägre precision (Bengtsdahl & Nilsson 2023) eftersom information från stickvägsträd då inte finns att tillgå. På samma sätt kan prognoserna från hprGallring förväntas ha lägre precision vid avverkning med hyggesfria metoder eftersom uttagets sammansättning skiljer sig från vanliga gallringsingrepp och stickvägarna oftast är etablerade.

Ett möjligt sätt att förbättra prognoserna från hprGallring vid avverkning med hyggesfria metoder och för senare gallringar är att nyttja andra datakällor än skördarens, för att uppskatta beståndets variabler före gallring (Bengtsdahl & Nilsson 2023). I en inledande pilotstudie testade Arlinger m.fl. (2017) med positiva resultat en funktion för att importera skogliga grunddata från den nationella laserskanningen till hprGallring. En ansats där skogliga grunddata och skördarmätt avverkad volym kombineras och byggs in i ett automatiserat förarbeslutsstöd, skulle därmed kunna utgöra en kostnadseffektiv metod för uppföljning och säkerställande av utfört arbete vid tillämpning av hyggesfria metoder. I studien testas en sådan ansats i en tvåstegsprocess bestående av inledande anpassning av metodiken i hprGallring följt av utvärdering utifrån referensmätningar utförda efter avverkning med hyggesfria metoder.

Den framtagna anpassningen benämns härafter hprHyggesfritt.

Syfte och mål

Det övergripande syftet med studien var att utveckla och utvärdera ett online-beslutsstöd som skördarförare kan använda vid hyggesfri avverkning. Beslutsstödet bör kunna generera skattningar av kvarstående volymer efter avverkning med en noggrannhet som medger att uppföljning mot paragraf 5- respektive 10-kurvorna i skogsvårdslagen blir relevant. Skattningarna ska kunna användas vid återkoppling till föraren, i en frekvens och upplösning, som underlättar uppföljning av arbetet mot paragraf kurvorna.

Projektet har haft följande delmål:

- Att anpassa hprGallring så att volym- och höjduppgifter från skogliga grunddata läses in och vävs ihop med information om aktuellt uttag. Därigenom kan skördarföraren löpande få information om kvarvarande volym och dess relation till skogsvårdslagens §10- och §5-kurvor.
- Att med hjälp av manuella referensmätningar utvärdera med vilken noggrannhet nyckeltal före och efter avverkning kan skattas med stöd i den metodik som utvecklas i projektet. De nyckeltal som utvärderades med hjälp av data från referensmätning var:
 - Areal
 - Volym före avverkning
 - Volym efter avverkning
 - Gallringskvot
 - Grundtevägd medelhöjd (Hgv) efter avverkning
 - Grundtevägd medeldiameter (Dgv) efter avverkning

Studien, som omfattar fem objekt avverkade med hyggesfria metoder, avgränsades till en utveckling och utvärdering av beslutsstödet. Det ursprungliga delmålet att låta några skördarförare använda programmet för att utvärdera användarvänlighet och identifiera områden för förbättring, har inte varit möjligt att utföra inom ramen för studien. Programmet installerades i tre maskiner under projektets gång och har använts av förare under avverkning, men inte vid avverkning av studieobjekten, och analys och kartläggning av förarnas upplevelser har därför inte gjorts. Tester med förare, tillsammans med utökad datainsamling från referensmätning efter avverkning, kommer därför att ske i en efterföljande studie.

Material och metoder

Projektet var indelat i två delstudier. I den första delstudien vidareutvecklades metodiken från automatiserad gallringsuppföljning för användning vid avverkning med hyggesfria metoder. Den nya metodiken implementerades i programvaran hprHyggesfritt. I den andra delstudien utvärderades framtagna metodik utifrån ett insamlat material med manuella referensmätningar. Delstudierna beskrivs närmare nedan.

Utveckling av hprHyggesfritt

Utvecklingen av hprHyggesfritt baserades på nedanstående lista med vägledande krav.

1) Nyckeltal för hyggesfri avverkning:

- a. Programmet ska automatiskt kunna beskriva för skördarföraren relevant information för uppföljning av uttagsandelar och gallringskvot.
- b. Programmet ska också kunna göra en prognos för det kvarvarande beståndet.
- c. Programmet ska automatiskt kunna ge en prognos som beskriver den kvarvarande volymen i relation till Skogsvårdslagens kurvor enligt paragraf 5 och 10.

2) Areal och behandlingsenheter:

- a. Programmet ska automatiskt beräkna av skördaren behandlad areal anpassat för hyggesfria uttag, utifrån skördarens eller aggregatets/stammens position (koordinater).
- b. Programmet ska automatiskt dela upp stora objekt i mindre delar efter objektets övre höjd (enligt Möller m.fl. 2015) för att beskriva uttag och prognos på kvarvarande skog.
- c. Summering/medelvärdesberäkning ska kunna göras för hela avverkningen eller för separata beräkningsytor.

3) Datahantering

- a. Programmet ska baseras på standardiserade produktionsdata (hpr-filer) enligt StanForD 2010 version 3.0 eller senare och laserdata nedlagrat som ett Forestand-meddelande.
- b. Programmet ska automatiskt kunna läsa in laserdata/skogliga grunddata.
- c. Programmets generella hantering för automatisk inläsning, lagring av skördardata, uppdatering av resultat samt särskilt av objektsspecifika (virkesorder) data, tidigare utvecklat av Möller m.fl. (2015) ska gälla.

Beräkningsflöde för hprHyggesfritt

Beräkningsflödet för programmet hprHyggesfritt från inläsning och bearbetning av data till att en prognos på kvarvarande skog och återkoppling mot skogsvårdslagens paragrafcurvor åskådliggörs i Figur 2 samt i tillhörande text.



Figur 2. Beräkningsflöde för hprHyggesfritt.

1. Inläsning av data

Inläsning, lagring och bearbetning av produktionsdata utfördes enligt Möller m.fl. (2015).

2. Arealberäkning

Efter inläsning av data från hpr-filerna beräknas den avverkade arealen. Detta görs i en stegvis process där inledningsvis ett rutnät, med 13 meters sidlängd, läggs ut över aktuellt objekt och basmaskinens positioner vid avverkning av stammar läggs in i rutnätet. Därefter sker en genomgång av kvadrater som innehåller avverkade stammar eller som har grannar med stammar för att uppskatta arealen. En detaljerad beskrivning av algoritmen för arealberäkning finns redovisad i Möller m.fl. (2015, 2024) och Bhuiyan m.fl. (2016). Efter arealberäkning, delar programmet upp avverkningsobjekt i så kallade beräkningsytor för uträkning av arealberoende nyckeltal.

I studien valdes hprGallrings algoritmen för arealberäkning som motsvarar den som används vid objekt där skärmträd avvecklas (Möller m.fl. 2024). Detta gjordes då antalet uttagna träd per hektar är relativt lågt vid användning av hyggesfria metoder och uttagstätheten i hög grad efterliknar den som förekommer vid avveckling av skärmträd (**benämns hprHyggesfritt mindre ytor**). Mindre anpassningar av inställningarna gjordes dock när det gäller filtreringsfunktioner för trädslag och stamstorlek.

För arealberäkning av ytor större än 1,0 hektar, gjordes en modifiering av arealalgoritmen för skärmavveckling genom reduktion av rutor i ytans ytterkant, benämns **hprHyggesfritt större ytor** (se vidare Bilaga 2). Detta gjordes så att områden med proportionellt låga uttag inte ska tilldelas för stor areal. Modifieringen påverkar huvudsakligen arealrutor i yttergränsen av ett större objekt.

3. Beskrivning av skogliga variabler före avverkning utifrån skogliga grunddata

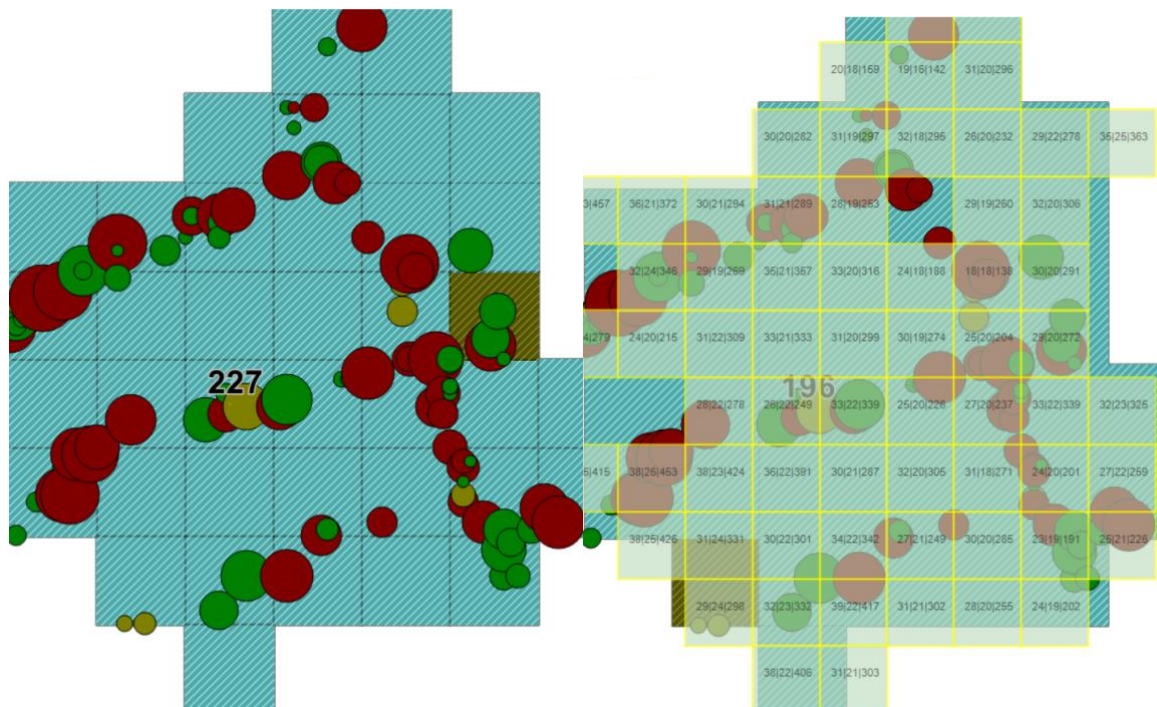
Skogliga grunddata (SGD) används för beräkningen av nyckeltal för beståndet före avverkning. Av de SGD-rutor som läses in, är det bara ett urval som aktiveras för presentation i kartfönstret. De aktiverade SGD-rutorna väljs av en algoritm som beräknar överlappning med programmets arealrutnät (för regler, se bilaga 4 – algoritmen för inkludering av SGD-rutor). De SGD-rutor som inkluderas av algoritmen syns för användaren i kartbilden som ett gult rutnät som läggs över det befintliga arearutnätet (Figur 3, höger, Figur 4). Rutnätet utgör underlaget för beräkning av nyckeltal för beståndet före avverkning och görs genom att räkna ett aritmetiskt medel per beräkningsyta för varje ingående parameter av datasetet. I fönstret för nyckeltal presenteras aritmetiska medelvärden för importerad SGD-volym (Laser vol), grundyta (Laser Gy) och Hgv (Laser Hgv), för vald eller valda beräkningsytor (Figur 5).

4. Inläsning och lagring av skogliga grunddata

Skogliga grunddata baseras på data från de nationella laserskanningarna (Nilsson m.fl. 2016) och innehåller information om skogens volym, grundyta, grundytavägd medelhöjd (Hgv) och diameter (Dgv). Informationen finns lagrad i ett rutnät om 10 x 10 m för omdrev 2, vilket pågår och beräknas på nationell täckning under 2024. Omdrev 1 har upplösningen 12,5 x 12,5 m. I studien användes en funktion (Arlinger m.fl. 2017) som konverterar skogliga grunddata till ett format som följer standarden för stående skog (Forestand). Detta format används vid inläsningen av SGD-data till hprHyggesfritt. Nedladdning av skogliga grunddata till hprHyggesfritt sker via ett datagränssnitt (API) som automatiskt anropar en databas vid Skogforsk innehållande geografisk information.

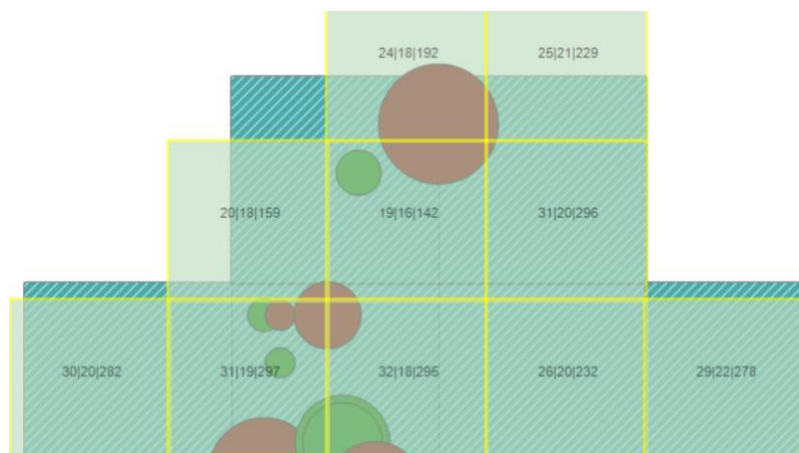
Som en del av anropet inkluderas en geografisk avgränsning som specificerar inom vilket område skogliga grunddata ska extraheras. Den geografiska avgränsningen för det efterfrågade området är uttryckt i form av hörnkoordinater som beräknas i hprHyggesfritt, baserat på positionsinformation om de avverkade stammarna lagrade i skördarens hpr-fil. Vid inläsning lagras Forestand-filen i samma objektsspecifika katalog som hpr-data.

Anropet från hprHyggesfritt till Skogforsks databas initieras av programanvändaren via en enkel knapptryckning i hprHyggesfritts kartgränssnitt. Efter nerladdning, presenteras berörda SGD-data för objektet och beräkningsytor i kartbilden.



Figur 3. Bilden till vänster visar skärmlapp av kartgränssnitt i hprHyggesfritt för en provyta tillhörande objekt M1. Programmets arealberäkning lägger ut ett 13x13 m rutnät (blå) utifrån skördarens position vid avverkning av stammar, där röda cirklar symboliserar tall, gröna gran och gula löv. Cirklarnas storlek är proportionella mot trädens brösthöjdsdiametrar. Värdet 227 i bildens centrum visar beräkningsytans uppskattade volym/ha före avverkning innan import av skogliga grunddata.

Bilden till höger visar kartbilden när skogliga grunddata har lästs in. Det gula rutnätet är de SGD-rutor (10x10 m) som uppfyller ett överlappningskrav och aktiveras för beräkning av volym. Värdet 196 i bildens centrum är volym i m^3sk/ha före avverkning, ett aritmetiskt medel (arealvägt) av volymuppgifterna från skogliga grunddata i det gula rutnätet.



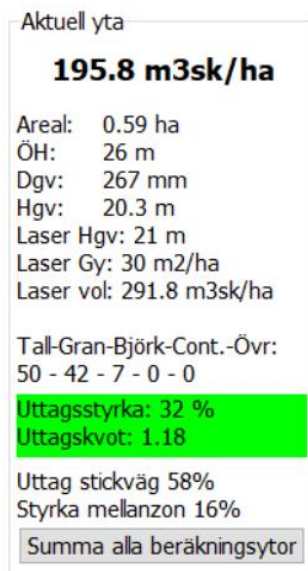
Figur 4. Närbildsperspektiv av skogliga grunddatas gula rutnät som visas i hprHyggesfritts kartfunktion med värden i svarta siffror för grundyta (m^2/ha), Hgv (m) och volym (m^3sk/ha).

4. Prognos av kvarvarande skog

I hprHyggesfritt beräknas volym efter avverkning baserat på SGD-volym och uttagen volym mätt av skördaren. Övriga nyckeltal efter avverkning beräknas genom att utgå från befintlig gallringsmodell (Möller m.fl. 2024) och indata i form av skogliga grunddata och produktionsdata (hpr) från skördaren för de avverkade stammarna. I korthet kan det beskrivas enligt följande:

1. Volym före avverkning: Efter inläsning av SGD beräknas volym före avverkning (SGD hprHyggesfritt) baserat på beräkningsytans rutnät och SGD volym per yta.
2. Volym efter: Volymen efter bestäms av SGD hprHyggesfritt volym/ha minus skördarens uttagna volym/ha enligt hpr-filerna. Båda värdena baseras på arealen beräknad i hprHyggesfritt utifrån hpr-data. Genom att dividera uttagen volym med SGD hprHyggesfritt Volym före erhålls gallringsstyrkan.
3. Gallringsmodell: Utifrån gallringsstyrka och default gallringskvot, initieras gallringsmodellens algoritm (utvecklad för hprGallring). Algoritmen strävar efter att matcha gallringsstyrkan med en gallringskvot utifrån insamlade data om de avverkade träden (Möller m.fl. 2011 & 2024, och Bhuiyan m.fl. 2016). När algoritmen hittar en lämplig matchning, kan gallringsstyrka och gallringskvot rubbas från sina ursprungliga startvärden. Vid avverkningstyperna hyggesfri avverkning och dimensionsavverkning används default gallringskvoten 1,2. Vid körning av gallringsmodellen använder programmet gallringsstyrkan baserad på grundyta.

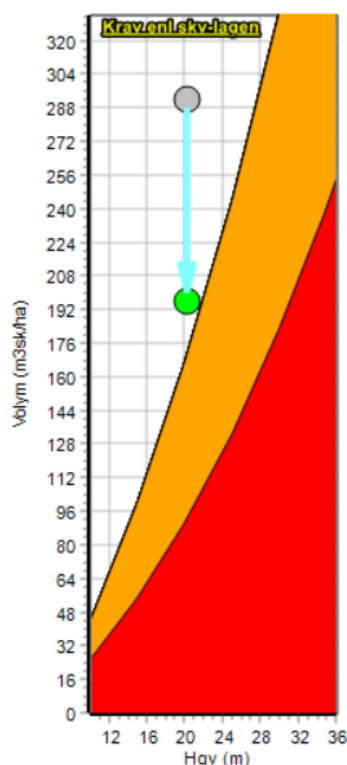
Nyckeltalen för Hgv, Dgv och trädslagsfördelning bestäms utifrån skattningarna av gallringsstyrka och gallringskvot i kombination med information om hur uttagen grundyta är fördelad på olika diameterklasser (Möller m.fl. 2011). Beräknade nyckeltal som beskriver beståndet efter avverkning presenteras i programmets gränssnitt. Nyckeltalen som presenteras är areal, övre höjd, Dgv, Hgv och volym i m³sk/ha, alternativt grundyta/ha. (Figur 5).



Figur 5. I programmets gränssnitt presenteras resultat efter avverkning för vald beräkningsyta. Nyckeltal för areal, övre höjd, Dgv och Hgv samt volym/ha alternativt grundyta/ha visas tillsammans med uppgifter om skogens tillstånd före avverkning Hgv (Laser Hgv), grundyta (Laser Gy) och volym (Laser vol) från SGD. Dessutom visas gallringsstyrka och använd gallringskvot för beräkning av Hgv och Dgv.

Återkoppling mot paragraf 5- och 10-kurvorna

För återkoppling av avverkningsresultat och hur dessa förhåller sig till paragraf 5- och 10-kurvorna enligt skogsvårdslagen, visas i gränssnittet kurvorna i ett diagram med Hgv på x-axeln och volym/ha på y-axeln (Figur 6). Prognos för den aktuella ytans volym före, respektive efter avverkning, presenteras i form av två cirklar sammanbundna med en pil för aktuell Hgv efter avverkning.

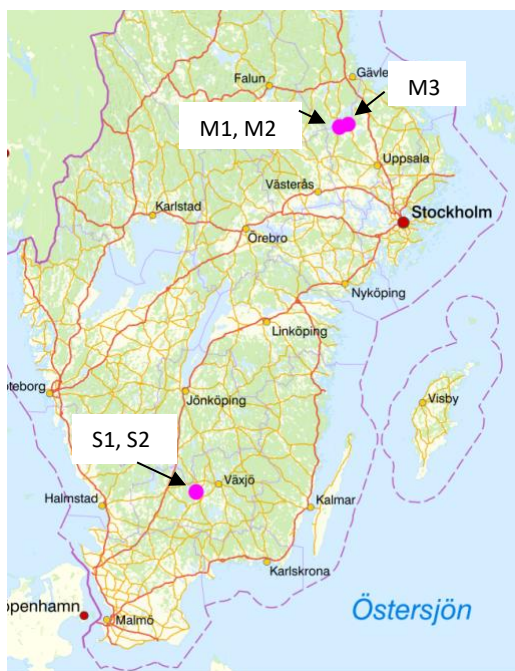


Figur 6: Mall paragraf 5 och 10. Skärmklipp från hprHyggesfritt som visar en beräkningsytas volym före och efter avverkning sammanbundet med en pil och i förhållande till både paragraf 5 (nedre kurvan) och 10 (övre kurvan) av skogsvårdslagen. Hgv är höjden efter avverkning enligt hprHyggesfritts prognosberäkning.

Material och manuella referensmätningar

Beståndsuppgifter och utläggning av provtytor för referensmätning

Fem avverkningsobjekt har studerats, två i Småland och tre i Uppland (Figur 7). Alla fem skördades under 2022–2023 med hyggesfria metoder, två blädningar och tre måldiameterhuggningar (Tabell 1). Dessa metoder är relevanta för uppföljning mot paragraf 5 och 10 av skogsvårdslagen. Inga regelrätta luckor eller överhållna skärmar har skapats i något av objekten.



Figur 7. Karta över studieobjektens belägenhet och beteckning.

Objekten valdes tillsammans med Södra och Mellanskog. Inledande granskning gjordes baserat på insamlade skördardata för att säkerställa att avverkningarna uppfyllde kriterier för hyggesfritt skogsbruk och att fällning och stamupparbetning utförts uteslutande av skördarna.

Baserat på koordinater för de avverkade träden lagrade i skördardata delades objekten upp i separata provytor av varierande storlek från 0,3–0,8 ha, totalt 22 provytor. Fältmätningar gjordes i mars 2023 av objekten i Småland och under december 2023 och januari 2024 av objekten i Uppland. Då objekten i Uppland referensmättes fanns ett snötäcke på 20–30 cm.

Tabell 1. Beskrivning av beståndsp parametrar före avverkning för de fem studieobjekten enligt facitmätning, det vill säga referensmätning av kvarlämnade träd inklusive skördaruttaget för aktuella ytor. ÖH och SI är skattade av hprHyggesfritt enligt tidigare utvecklad modell (Bhuiyan m.fl. 2011).

Avverkande företag	Objekt	Åtgärd	Areal (ha)	Volym (m ³ sk/ha)	Grundyta (m ² /ha)	Dgv (mm)	Hgv (m)	ÖH (m)	SI (m)	Trädslagsfördelning
Södra	S1	Blädning	1,71	318,4	32,2	271	22,1	26	G33	44-52-3-0-1
Södra	S2	Blädning	2,07	324,8	30,2	315	24,3	29	G34	31-67-2-0-0
Mellanskog	M1	Måldiameterhuggning	2,01	304,3	31,1	311	23,0	26	T28	78-18-3-0-0
Mellanskog	M2	Måldiameterhuggning	1,86	280,2	27,8	325	23,7	26	T28	81-17-2-0-0
Mellanskog	M3	Måldiameterhuggning	1,96	380,3	33,5	316	26,0	30	T32	57-37-4-0-2

Tabell 2. Beskrivning av skördarna som avverkade på studieobjekten samt datum för laserskanning, avverkning och referensmätning.

Objekt	Basmaskin	Aggregat	Apteringsdator	Datum för laserskanning	Startdatum Avverkning	Inventerings-period
S1, S2	Komatsu 931XC – 3	C144	Maxi XT 1.7.0.44202	2022-03-09	2022-03-22	Mars 2023
M1, M2	John Deere 1270G	H425	Timbermatic H 2.8.23	2020-02-21	2023-11-23	December 2023
M3	Eco Log 580F131	W.413	Forester H70 1.7.10	2020-02-23	2023-08-18	Januari 2024

Syftet med blädningen i Smålandsobjekten var uttag av de grövsta stammarna, men även gallring bland klenare träd i täta partier. Av de grövre träden avverkades främst gran för att gynna tall. I de delar som var dominerade av gran sparades även en del grövre granar. Beståndsstrukturen varierade mellan delvis skiktad till enskiktad. Beståndsåldern var cirka 90 år.

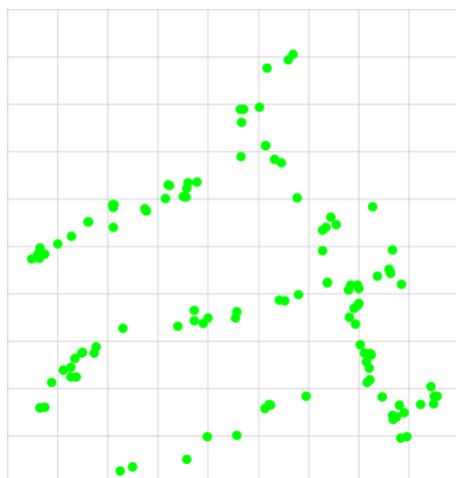
Syftet med måldiameterhuggningen för objekten M1 och M2 var uttag av grövre träd, med fokus på gran. Klenare träd avverkades i stickvägarna för maskinens framkomlighet. Objekt M1 var till viss del skiktad med fler uttagna och kvarstående klenare träd efter avverkning jämfört med M2 som inte var skiktad. Beståndsåldern uppgick till cirka 80 år.

Syftet med måldiameterhuggningen i objekt M3 var uttag av de grövsta träden, vilka var märkta i förväg under planeringsarbetet. Utöver de märkta träden gjordes ett begränsat uttag i stickvägarna. Beståndet var enskiktad och sedan tidigare genomgallrat. Beståndsåldern uppgick till cirka 90 år.

Metoder för utveckling och test av arealberäkning och prognos efter avverkning

Indelning av avverkningar i provytor

Inför referensmätningen bearbetades data från skördarnas hpr-filer i programmet hprAnalys. Vid bearbetningen delades objekten in i provytor med en storlek i intervallet 0,3–0,8 ha. Vid indelningen i provytor, delades hpr-data längs zonen mitt emellan stickvägarna, för att på så sätt koppla uttagna träd med tillhörande stickvägar. Respektive provytas stamdata exporterades i SHAPE-format för vidare bearbetning i QGIS.



Figur 8. Skärmsklipp från kartfunktionen i hprAnalys som tillhör provyta 1 för objekt M1. Gröna cirklar visar basmaskinens positioner vid fällningsmomentet för varje avverkat träd. Uppdelning av produktionsdata gjordes genom stamurval i hprAnalys kartfunktion.

Fältmätning av areal och kvarvarande skog

En kontroll av gränsstammar för provytorna, baserat på klippt produktionsdata, gjordes i QGIS. Utifrån de skapade provytorna togs kartmaterial fram för provytornas polygoner. I fält avgränsades provytorna efter förslagen i kartmaterialet men med hänsyn tagen till faktiskt åtgärdad areal. Provytornas yttergräns märktes med snitselband och ett gnss-loggspår för provytornas yttergräns lagrades för en referensmätning av areal. Som sista steg i referensmätningen mättes DBH och trädslag för samtliga kvarvarande stammar vars brösthöjdsdiameter var över 6 cm.

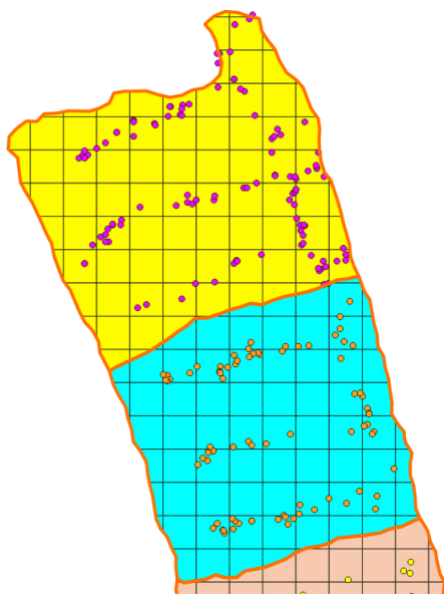


Figur 9. Indelning av objekt M1 i mindre provytor mellan 0,3–0,8 ha. De färgade cirkelarna symboliserar basmaskinens position vid fällning. Röda cirklar symboliserar tall, blåa gran och vita övriga trädslag. Provytornas yttergränser är bestämda med ett gnss-loggspår lagrat i fält vid referensmätning av areal.

Kontroll av hprHyggesfritt SGD-volymunderlag

hprHyggesfritt algoritmen för beräkning av volym före (SGD hprHyggesfritt) baseras på aritmetiska medel av SGD-rutor som uppfyller ett överlappningskrav mot programmets internt beräknade areal. Överlappningskravet innebär att SGD-rutan ska finnas inom den avverkade ytan. För att kontrollera programmets funktion för inläsning och beräkning av SGD-volym, grundyta, Hgv och Dgv, gjordes ett manuellt SGD-kontrollunderlag i GIS-program för jämförelse (SGD Kontroll). Detta gjordes för att få fram en så exakt uppskattning som möjligt av skogens värden före avverkning baserad på SGD-rutnätet och den referensmätta arealens polygon. Kontrollen gjordes enligt följande steg:

1. SGD-data i Forestand-format laddades ner via separat anrop utifrån en rektangel med hörnkoordinater som täcker hela den avverkade ytan enligt hprHyggesfritt arealrutnät.
2. Underlaget omvandlades till SHAPE-format.
3. I ett GIS-program skars SHAPE-filen enligt referensmätt polygon för areal. SGD-rutor som överskred provytors yttergräns skars vid gränserna.
4. Gränsrutorna kontrollerades för dubletter.
5. Utifrån provytornas skurna SGD SHAPE-filer, beräknades arealvägda medel för volym/ha, grundyta/ha, Hgv och Dgv.



Figur 10. Provytevisa SGD-rutor omvandlade till SHAPE-fil och skurna efter provytans polygon för referensmätt areal. De gula rutorna tillhör provyta 1 för objektet M1, blåa provyta 2, och så vidare. Efter bearbetning i GIS-program arealvägdes provytornas skogliga parametrar för att få en kontroll av beräkning av SGD före avverkning för jämförelse med hprHyggesfritts skattning av volym före avverkning.

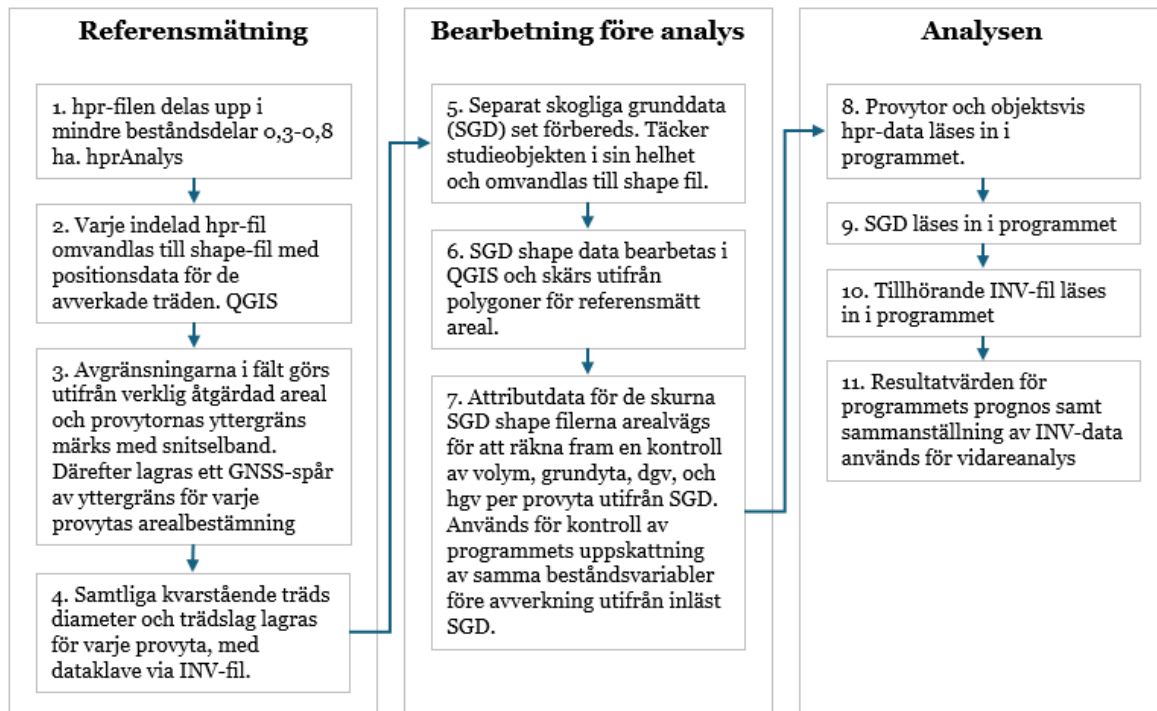
Analys och utvärdering av areal, volym, gallringskvot, Hgv och Dgv

Utvärdering av hprHyggesfritts arealberäkning på provyte- och objektsnivå har gjorts i Excel genom att jämföra hprHyggesfritts arealberäkning med referensmätt areal. Vid utvärderingen inkluderades areal beräknad med hprHyggesfritts två algoritmer: *hprHyggesfritt mindre ytor* och *hprHyggesfritt större ytor*.

Data från fältinventeringen analyserades genom inläsning till hprHyggesfritt av data från kontrollklavning lagrad i INV-filer. Vid inläsning av kontrolldata, tilldelar programmet volym och höjd till de klavade träden utifrån skördarmätta träd i samma DBH-klass. Sammanställningsfliken för uppföljning av inventeringsdata presenterar värden för uttaget och beståndet efter avverkning, och summerar värden för uträkning av beståndet före avverkning, som görs trädslagvis och för totalen. Beståndet före avverkning är en summering av de avverkade träden från skördardata och de kontrollmätta träden från INV-filen. Värden från klavdata ställs mot referensmätt areal, och matas in i programmets flik för sammanställning av referensdata efter inläsning av INV-fil. Baserat på de avverkade och kontrollmätta träden beräknas volymer (m^3sk), Dgv, Hgv, gallringsstyrka, gallringskvot, medelstam, medelhöjd och medeldiameter. Alla data beräknas totalt och per trädslag uppdelade totalt före avverkning, på uttaget och efter avverkning.

Export från sammanställningsfliken har gjorts till Excel för vidare analys av allt material, för värden baserade på både beräknad och referensmätt areal.

Resultatvärden från programmets algoritm för beståndet före respektive efter avverkning har sammanställts i samma Excel-fil.

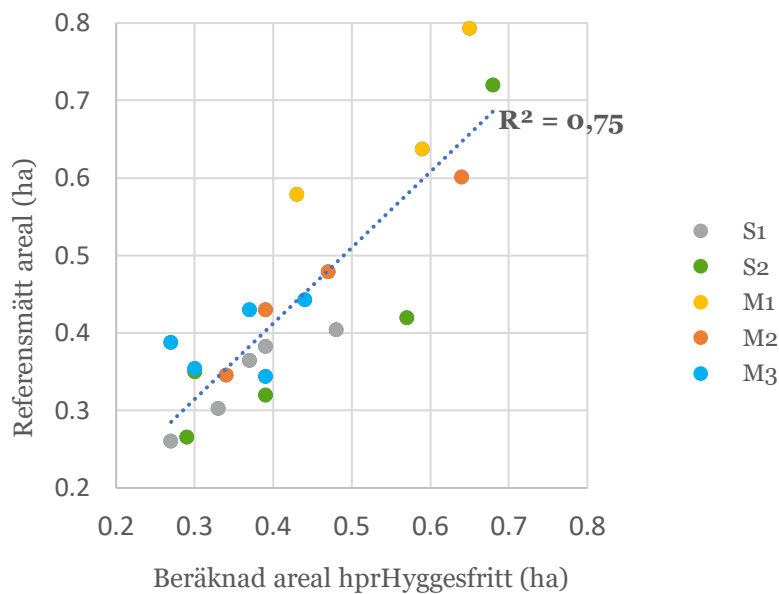


Figur 11. Schema för studiens arbetsflöde, bestående av kronologiska steg för referensmätning och förberedande steg innan analys.

Resultat och diskussion

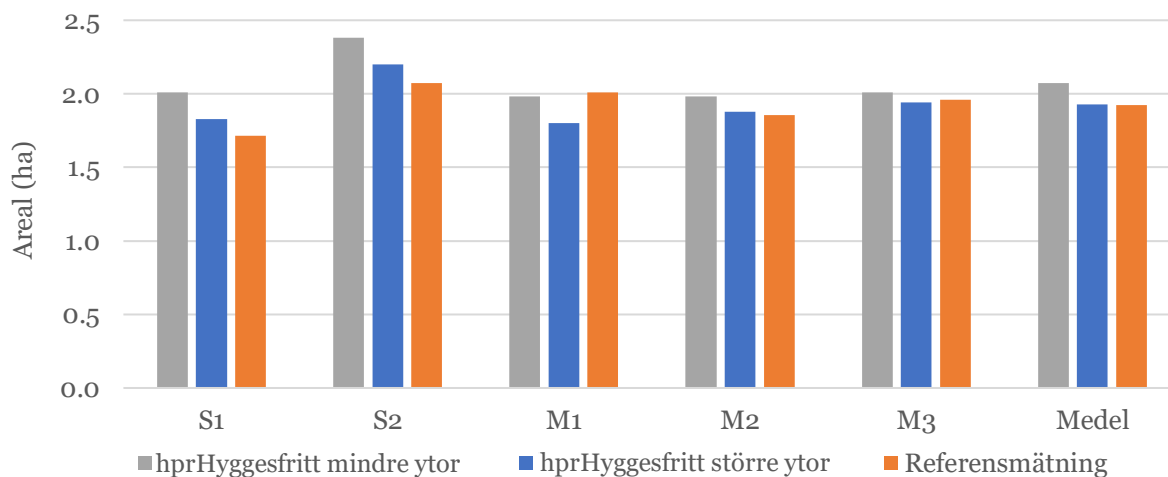
Areal

I figur 12 redovisas sambandet mellan beräknad och referensmätt åtgärdsareal för de 22 provytorna från de fem objekten i studien. I genomsnitt var avvikelsen mellan referensmätt och beräknad areal 0,01 ha. Spridningen, uttryckt som standardavvikelsen för avvikelserna mellan referensmätt och beräknad areal, uppgick till 0,07 ha, motsvarande 16,3 procent (Tabell 3).



Figur 12. Regressionsdiagram på provytanivå som visar sambandet mellan algoritmen *hprHyggesfritt mindre ytor* beräknad areal och referensmätt areal.

Resultaten indikerar att den utvärderade algoritmen för arealbestämning *hprHyggesfritt mindre ytor* är lämplig för att skatta areal för ytor under 1,0 ha. Den referensmätta arealen för provytorna varierade inom intervallet 0,25–0,8 ha. Den beräknade arealen för de större objekten baserades på den modifierade arealalgoritmen *hprHyggesfritt större ytor*. Detta eftersom den algoritm som användes på provytanivå gav en systematisk överskattning av areal vid tillämpning på arealer större än 0,8 ha (Tabell 3). I genomsnitt var avvikelsen mellan referensmätt areal och areal för objekten beräknad med algoritmen *hprHyggesfritt större ytor* 0,01 ha, standardavvikelsen uppgick till 0,14 ha (7,0 procent) (Tabell 3). Den uppmätta spridningen är därmed i nivå med den som kan förväntas vid arealbestämning baserad på skördardata för objekt motsvarande 2 ha (Bhuiyan m.fl. 2016).



Figur 13. Jämförelse på objektsnivå mellan referensmätt areal och två alternativa metoder för arealberäkning.

Tabell 3. Medelvärden och avvikelser för de två algoritmerna för arealberäkning jämfört med referensmätt areal. Medelvärden på provyte- och objektsnivå anges som aritmetiska medelvärden för de 22 ingående provytorna, respektive de fem ingående objekten.

Areal	Avvikelse	Måttslag	Referensmätning	hprHyggesfritt mindre ytor	hprHyggesfritt större ytor
Provytor	Medel	ha	0,44	0,43	0,36
Provytor	Systematisk avvikelse	ha (%)		0,01 (2,7)	0,08 (17,4)
Provytor	Standardavvikelse	ha (%)		0,07 (16,3)	0,09 (20,3)
Objektsvis	Medel	ha	1,92	2,07	1,93
Objektsvis	Systematisk avvikelse	ha (%)		-0,15 (7,8)	-0,01 (0,4)
Objektsvis	Standardavvikelse	ha (%)		0,15 (7,7)	0,14 (7,0)

Sammanfattningsvis visar resultaten att hprHyggesfritt bör anpassa vilken algoritm som används för arealberäkning beroende på storlek för ytan som ska arealbestämmas. För bestämning av areal för mindre ytor bör algoritmen för arealbestämning vid avverkning av skärmtred användas (*hprHyggesfritt mindre ytor*) medan den modifierade algoritmen bör användas vid arealbestämning för större ytor (*hprHyggesfritt större ytor*). Denna studie indikerar att den arealmässiga brytpunkten för användning av respektive algoritm är cirka 0,8 ha. Det innebär att när en avverkning består av en eller två ytor så används algoritmen för mindre ytor, men när den totala arealen för en avverkning överstiger 0,8 hektar byts algoritmen till den för större ytor för hela den avverkade arealen, det vill säga även för de mindre ytor som då skapas. Dock är det angeläget att kompletterande material samlas in för att ytterligare belysa vilken brytpunkt som ska användas.

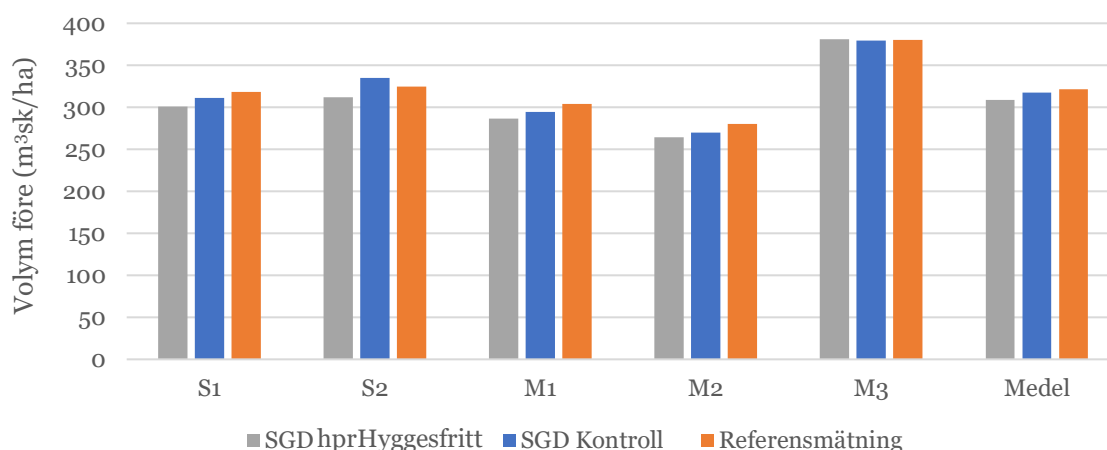
Volym före avverkning

Analysen av volym före avverkning kretsade kring två centrala frågor: *i)* hur väl beskriver skogliga grunddata volymen före avverkning, jämfört med referensmätt volym före avverkning, och *ii)* hur väl överensstämmer volym före avverkning beräknad med hprHyggesfritts algoritm för import och hantering av skogliga grunddata, jämfört med referensmätt volym före avverkning.

Figur 14 visar jämförelser på objektsnivå mellan referensmätt volym före avverkning och motsvarande volym bestämd av två olika metoder för hantering av skogliga grunddata. Den första metoden (SGD Kontroll) baserades på skogliga grunddata och den referensmätta arealen. SGD Kontroll ger den mest exakta beskrivningen av volym före som är möjlig att nå utifrån skogliga grunddata. Den andra

metoden (SGD hprHyggesfritt) är programmets beräknade volym före avverkning baserad på hprHyggesfritts arealalgorithm och importerade skogliga grunddata. I genomsnitt var avvikelserna mellan referensmätt volym före avverkning och SGD Kontrolls volym 3,8 m³sk/ha på objektsnivå. Standardavvikelsen för avvikelserna uppgick till 8,4 m³sk/ha (2,6 procent) (Tabell 4). På provytanivå, var avvikelserna i genomsnitt 3,3 m³sk/ha, med en standardavvikelse på 20,1 m³sk/ha (6,1 procent) (Tabell 4, Figur 15). De mått på precisionen vid skattning av volym före avverkning, baserade på skogliga grunddata som noterats i vår studie, harmoniserar väl med tidigare undersökningar utförda i äldre bestånd (Naesset 2004). I vår studie var det tillfälliga felet på provytanivå 6,1 procent. Motsvarande fel, uppmätt i en studie av Naesset (2004), uppgick i medeltal till 7,2 procent då den utfördes på provytor med storleken 0,37 ha, det vill säga en areal som motsvarade den provytorna hade i vår studie.

I genomsnitt på objektsnivå var avvikelserna mellan referensmätt volym före avverkning och SGD hprHyggesfritts volym före avverkning 12,9 m³sk/ha, standardavvikelsen uppgick till 7,8 m³sk/ha (2,4 procent) (Tabell 4). På provytanivå, var avvikelserna före avverkning 7,5 m³sk/ha, med en standardavvikelse på 18,9 m³sk/ha (5,7 procent) (Tabell 4, Figur 16).

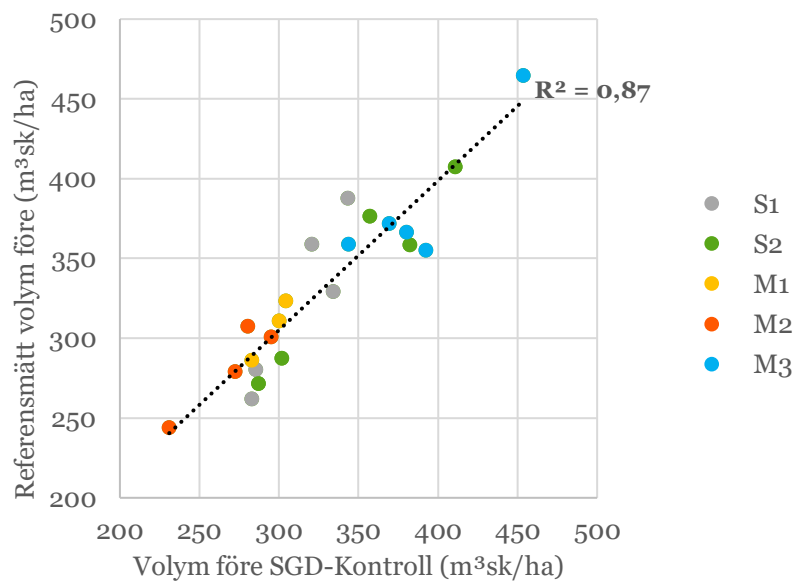


Figur 14. Stapeldiagrammet visar objektsvis volym/ha före för: SGD hprHyggesfritt (grå), SGD Kontroll (blå) och referensmätning. Se texten för närmare beskrivning av försöksleden.

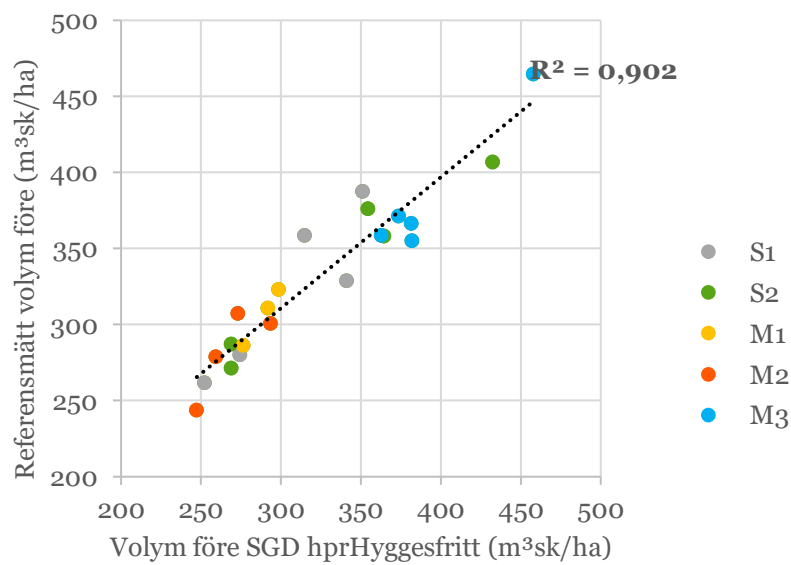
Sammanfattningsvis indikerar resultaten från studien att volymen före avverkning kan bestämmas med försumbart systematiskt fel och hög precision baserat på skogliga grunddata. Detta gällde såväl för provytor med arealer inom intervallet 0,26–0,79 som för objekt med arealer inom intervallet 1,71–2,07 ha. Liknande resultat uppnåddes då volymen beräknades direkt från skogliga grunddata baserat på uppmätt areal och för hprHyggesfritts beräkning.

Tabell 4. Medelvärden och avvikelser mellan referensmätt volym före och i) SGD Kontrolls volym före och ii) SGD hprHyggesfritts för volym före. Referensmätt volym är summan av inventerad volym efter avverkning och skördarmätt volym för uttaget. Medelvärden på provyte- och objektsnivå anges som aritmetiska medelvärden för de 22 ingående provytorna, respektive de fem ingående objekten.

Volym Före	Avvikelse	Måttslag	Referensmätning	SGD Kontroll	SGD hprHyggesfritt
Provytor	Medel	m ³ sk/ha	331,1	327,8	322,8
Provytor	Systematisk avvikelse	m ³ sk/ha (%)		3,3 (1,0)	8,3 (2,5)
Provytor	Standardavvikelse	m ³ sk/ha (%)		20,1 (6,1)	18,8 (5,7)
Objektsvis	Medel	m ³ sk/ha	321,6	317,8	308,7
Objektsvis	Systematisk avvikelse	m ³ sk/ha (%)		3,8 (1,2)	12,9 (4,0)
Objektsvis	Standardavvikelse	m ³ sk/ha (%)		8,4 (2,6)	7,8 (2,4)



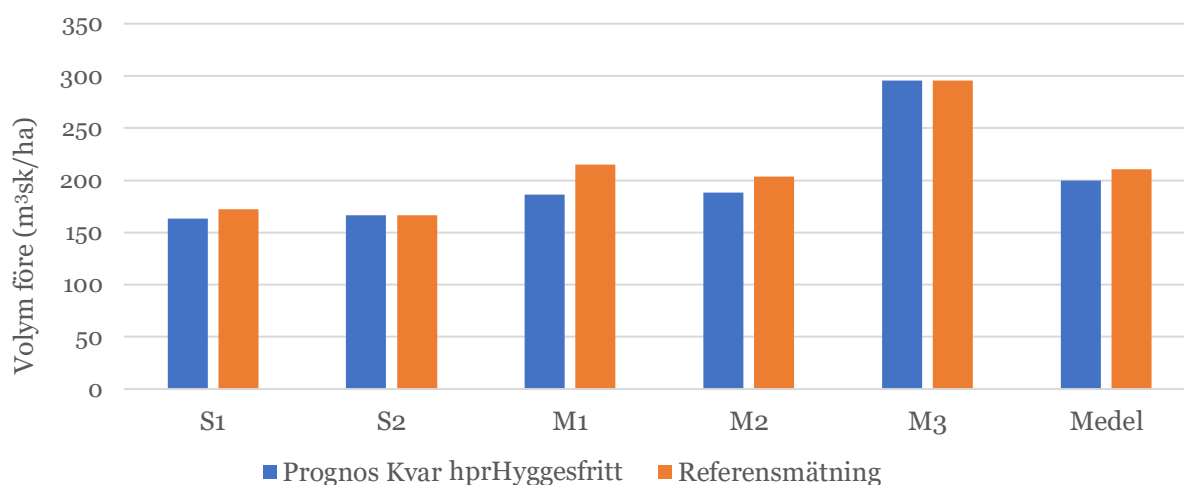
Figur 15. SGD Kontrolls provytevisa volym före avverkning, plottad mot volym före avverkning från referensmätning.



Figur 16. SGD hprHyggesfritts provytevisa volym före avverkning, plottad mot volym före avverkning från referensmätning.

Volym efter avverkning

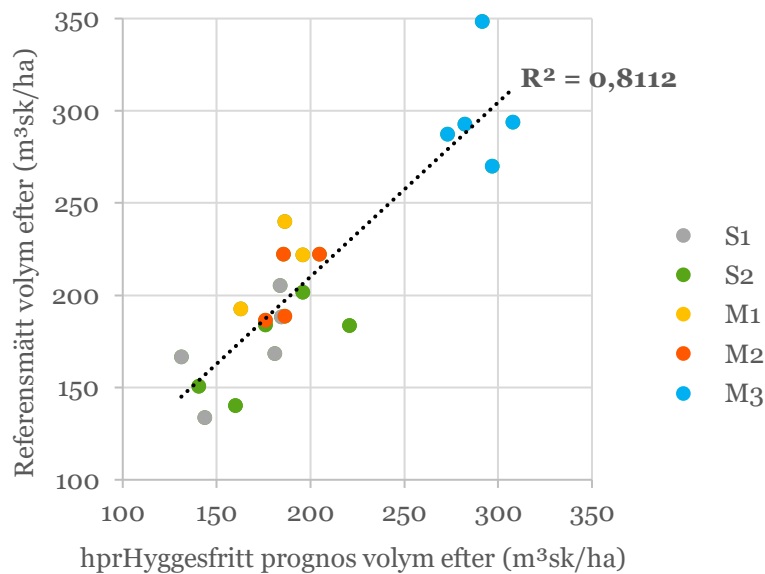
Volymen efter avverkning skattades med hprHyggesfritts prognosberäkning. Figur 17 visar jämförelser på objektsnivå mellan referensmätt volym/ha efter avverkning och hprHyggesfritts volymprognos för kvarvarande skog. I genomsnitt var avvikelsen mellan referensmätt och hprHyggesfritt prognos 11,2 m³sk/ha på objektsnivå. Standardavvikelsen för avvikelserna uppgick till 11,0 m³sk/ha (5,2 procent) (Tabell 5). På provytelnivå, var avvikelsen 8,8 m³sk/ha, med en standardavvikelse på 24,7 m³sk/ha motsvarande 11,6 procent (Tabell 5, Figur 18). Ingående analys av enskilda provytor indikerar att en stor del av differenserna beror på fel i hprHyggesfritts arealbestämning. Dessa fel sprider sig direkt till bestämningen av den arealberoende volymen efter avverkning. Vid bestämning av areal på objektsnivå minskas felet i arealskattningen (Tabell 3). Detta är den huvudsakliga orsaken till att spridningen för hprHyggesfritts prognos av volym efter avverkning halveras på objektsnivå i jämförelse med prognosen på provytelnivå.



Figur 17. Objektsvis volym/ha efter avverkning för: 1) hprHyggesfritt prognos för volym efter (blå) och 2) referensmätt volym (orange).

Tabell 5. Medelvärden och avvikelser mellan referensmätt volym efter avverkning och hprHyggesfritts prognos för volym efter avverkning. Medelvärden på provyte- och objektsnivå anges som aritmetiska medelvärden för de 22 ingående provytorna, respektive de fem ingående objekten.

Volym Efter	Avvikelse	Måttslag	Referensmätning	Prognos hprHyggesfritt
Provytor	Medel	m ³ sk/ha	212,9	203,1
Provytor	Systematisk avvikelse	m ³ sk/ha (%)		8,8 (4,1)
Provytor	Standardavvikelse	m ³ sk/ha (%)		24,7 (11,6)
Objektsvis	Medel	m ³ sk/ha	210,6	199,4
Objektsvis	Systematisk avvikelse	m ³ sk/ha (%)		11,2 (5,3)
Objektsvis	Standardavvikelse	m ³ sk/ha (%)		11,0 (5,2)



Figur 18. Provytevis volym efter avverkning enligt hprHyggesfritt plottad mot referensmätt volym.

Vår studie indikerar att metodiken som används i hprHyggesfritt kan skatta volymen efter avverkning för objekt med en areal överstigande cirka ett hektar med ett mindre systematiskt fel och ett tillfälligt fel på sex procent. Detta är att betrakta som en noggrann och mycket precis bestämning. Andra metoder som finns att tillgå för skattning av volymen direkt efter avverkning, som subjektivt utlagda relaskopytor eller ett rimligt antal utslumpade cirkelprovytor, kan förväntas ge en väsentligt lägre precision (Ståhl 1992, Barth m.fl. 2008).

Vilken noggrannhet och precision kan förväntas av den utvecklade metodiken ifall den tillämpas generellt i det svenska skogsbruket? Vår studie kan inte ge direkt svar på den frågan. hprHyggesfritts skattningar av volym före och efter avverkning kommer dock att vara direkt beroende av noggrannhet och precision för skogliga grunddata som utgör centrala indata. Publicerade studier (Naesset 2004) indikerar att volymskattningar baserade på information från laserskanning är noggranna och mycket precisa för skogar där det är aktuellt med avverkning med hyggesfria metoder, det vill säga äldre skogar. I studien av Naesset (2004) var det tillfälliga felet för skattning av volym i äldre skog 7,2 procent för provytor om 0,37 ha. Med metodiken i hprHyggesfritt kommer det inte vara möjligt att nå en sådan hög precision för mindre ytor på grund av osäkerhet i arealskattningen, men för ytor överstigande cirka en hektar kan precisionen från laserskanningen utnyttjas fullt ut.

Sammanfattningsvis ger jämförelsen stöd för att den prestanda som uppmäts i studien för metodiken i hprHyggesfritt också kan nås då den tillämpas generellt i skogsbruket.

Gallringskvot, Hgv och Dgv efter avverkning

Gallringskvot

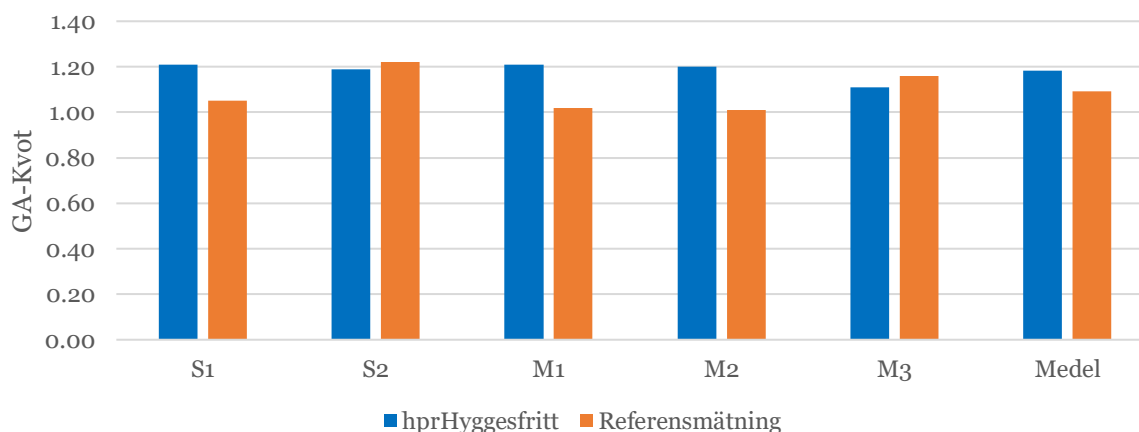
Gallringskvoten definierades i studien som relationen mellan grundtyevägd medeldiameter i uttaget och grundtyevägd medeldiameter i den kvarstående skogen, och uttrycks som Dgv_{Uttag} / Dgv_{Kvar} . hprHyggesfritt använder hprGallrings gallringsmodell (Möller 2024) för att beräkna Hgv och Dgv efter gallring. För att styra gallringsmodellen är gallringskvoten central ingångsdata tillsammans med uttagsstyrka och avverkade stammar. I hprGallring beräknas en gallringskvot baserad på avverkningstyp och avverkade stammar i stickväg om kranvinkeldata finns i produktionsdata från skördaren. Vid avverkning med hyggesfria metoder är stickvägsnätet vanligen etablerat sedan tidigare och i hprHyggesfritt användes i stället en defaultgallringskvot på 1,2 som startvärde i programmet för

studien. Utifrån beräkningar baserade på de avverkade träden, justeras gallringskvoten från default startvärdet.

När modellen har bestämt gallringskvot, i hprHyggesfritt default 1,2, används kvoten för att göra en prognos på kvarvarande skog med hjälp av avverkade stammar och beräknad målgrundyta som tas fram med uttagen grundyta för den avverkade ytan och beräknad uttagsandel. Modellen skapar med dessa ingångsdata en ny skog bestående av kopierade stammar per diameterklass från avverkningen. För prognosstammarna beräknas sedan Dgv och Hgv för den prognostiserade skogen efter avverkning.

I Figur 19 redovisas beräknad och referensmätt gallringskvot för de fem objekten. För tre av de fem studerade objekten (S1, M1 och M2) noterades större avvikelser. I genomsnitt var defaultgallringskvoten (1,2) en markant överskattning av den referensmätta gallringskvoten som uppgick till 1,09 (Tabell 6). Överskattningen innebär att Hgv och Dgv efter avverkning kommer att underskattas, det vill säga i hprHyggesfritts prognos kommer den kvarvarande skogen att vara lägre och klenare jämfört med den referensmätta.

I vår studie har vi valt att använda en default gallringskvot på 1,2 som startpunkt för gallringsmodellens beräkningssteg. Defaultkvoten användes oberoende av trädslag. Utifrån referensmätningarna beräknades trädslagsspecifika kvoter vilka visade på stora skillnader mellan trädslag (Tabell 7). För tall noterades gallringskvoter inom intervallet 0,85–1,10. För gran och björk var motsvarande intervall 1,21–1,58 respektive 0,76–1,12. Resultaten visar att default gallringskvot bör korrigeras och troligtvis variera beroende på trädslag. För gran bör defaultkvoten vara högre, närmare 1,3 och för tall och löv lägre, runt 1,0. Här behövs dock mer data innan ett säkrare mönster kan urskiljas.



Figur 19. Figuren visar objektsvisa värden för total gallringskvot enligt hprHyggesfritt prognos och referensmätning.

Tabell 6. Medelvärden och avvikelser mellan referensmätt volym gallringskvot och hprHyggesfritts prognos. Medelvärden på provyte- och objektsnivå anges som aritmetiska medelvärden för de 22 ingående provytorna, respektive de fem ingående objekten.

Total gallringskvot	Avvikelse	Måttslag	Referensmätning	Prognos hprHyggesfritt
Provytor	Medel	kvot	1,10	1,17
Provytor	Systematisk avvikelse	kvot (%)		-0,07 (6,1)
Provytor	Standardavvikelse	kvot (%)		0,12 (10,9)
Objektsvis	Medel	kvot	1,09	1,18
Objektsvis	Systematisk avvikelse	kvot (%)		-0,09 (7,9)
Objektsvis	Standardavvikelse	kvot (%)		0,12 (11,1)

Tabell 7. Total gallringskvot och gallringskvot per trädslag enligt referensmätning. Under kolumnrubriken TGL visas volymbaserad trädslagsandel före avverkning och i uttaget, för tall, gran och löv uttryckt i tiondelar.

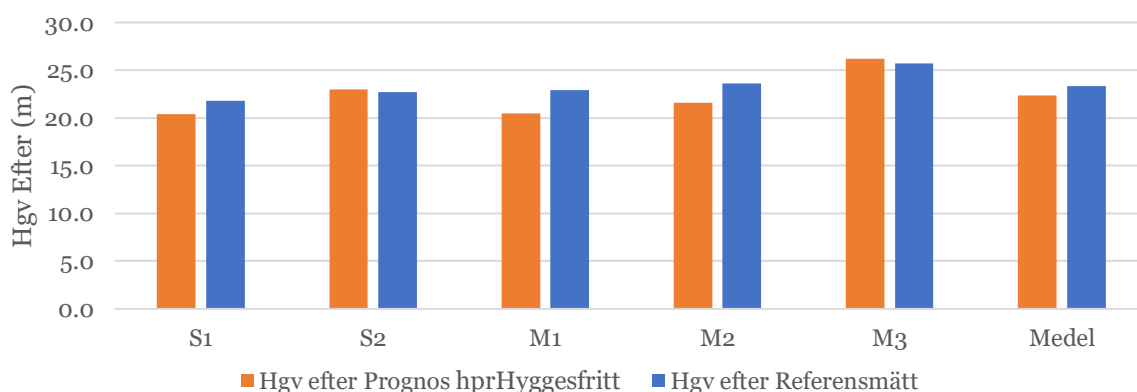
Objekt	Totalt	Tall	Gran	Tgl före	Tgl uttag
S1	1,05	0,85	1,43	450	370
S2	1,22	0,89	1,58	370	190
M1	1,02	1,06	1,58	820	550
M2	1,01	1,08	1,40	820	640
M3	1,16	1,10	1,21	640	640
Medel	1,09	1,00	1,44	640	460

Tabellen ovan beskriver gallringskvot enligt referensmätning. Kvoten för gran blev mycket högre än kvoten för tall. Att den totala gallringskvoten kan blir lägre än respektive trädslagsspecifik kvot, som i fallet med M1- och M2-objekten, har att göra med den stora diameterskillnaden mellan tall och gran, det vill säga granuttaget var av mycket lägre diametrar än tallens uttag. Samtidigt togs en större andel av granen ut och tallandelen blev generellt större efter avverkning. Högst gallringskvot hade objektet med högst granandel.

Hgv efter avverkning

Enligt skogsvårdslagens kurvor för paragraf 5 respektive 10 bestäms den minsta tillåtna volymen efter avverkning av beståndets medelhöjd efter avverkning. Därför är det av central betydelse att hprHyggesfritt kan skatta Hgv med tillräckligt hög precision vid hyggesfri avverkning. I hprHyggesfritt beräknas Hgv efter avverkning baserat på skattningen av gallringskvot från gallringsmodellen (Möller m.fl. 2011).

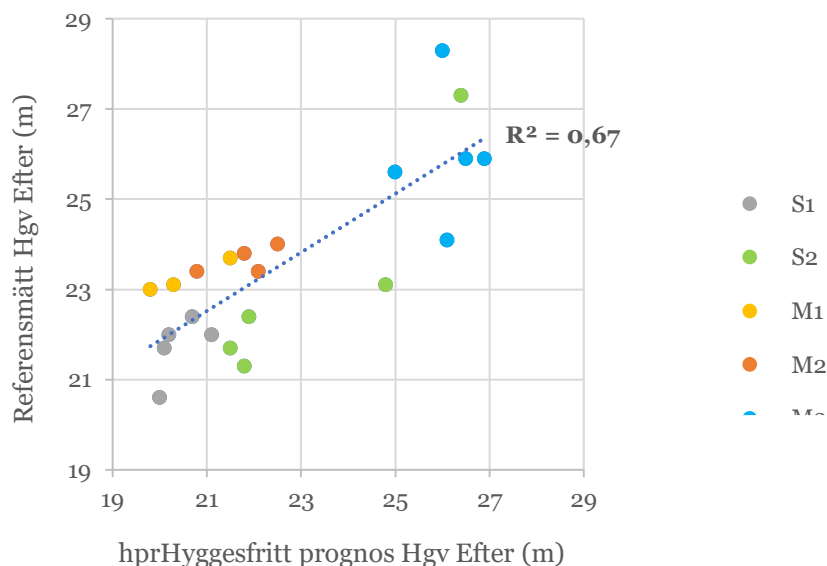
I genomsnitt var avvikelsen mellan referensmätt Hgv efter avverkning och hprHyggesfritts prognos för Hgv efter, 1,0 m med en standardavvikelse på 1,3 m (5,7 procent) (Figur 20, Tabell 8) på objektsnivå. På provytenivå var avvikelsen i genomsnitt 1,0 m med en standardavvikelse på 1,4 m (6,0 procent).



Figur 20. Figuren visar objektsvisa värden för Hgv efter avverkning enligt hprHyggesfritt prognos och referensmätning.

Tabell 8. Medelvärden och avvikelser mellan referensmätt Hgv efter avverkning och hprHyggesfritts prognos. Medelvärden på provyte- och objektsnivå anges som aritmetiska medelvärden för de 22 ingående provytorna, respektive de fem ingående objekten.

Hgv Efter	Avvikelse	Måttslag	Referensmätning	Prognos hprHyggesfritt
Provytor	Medel	m	23,6	22,6
Provytor	Systematisk avvikelse	m (%)		1,0 (4,1)
Provytor	Standardavvikelse	m (%)		1,4 (6,0)
Objektsvis	Medel	m	23,3	22,3
Objektsvis	Systematisk avvikelse	m (%)		1,0 (4,3)
Objektsvis	Standardavvikelse	m (%)		1,3 (5,7)

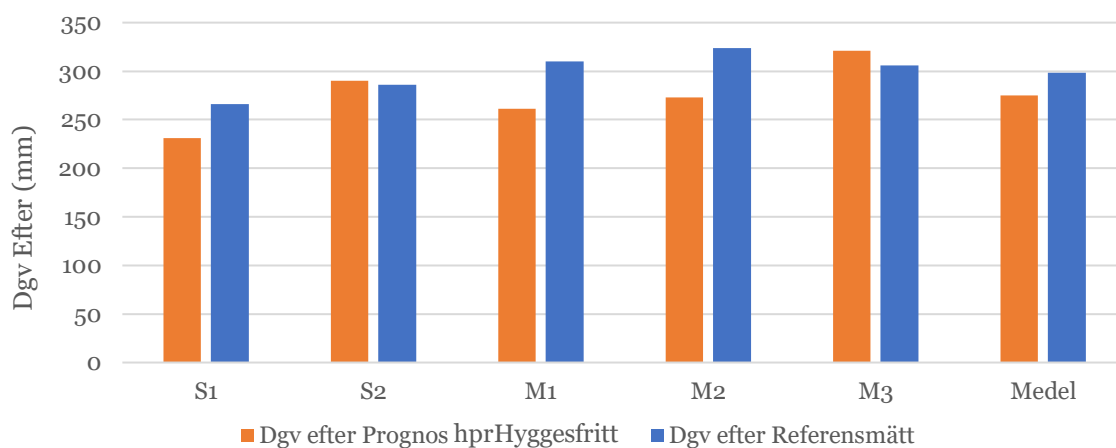


Figur 21. Provytevisa Hgv efter, enligt hprHyggesfritts prognos plottad mot referensmätning.

Figur 21 visar hprHyggesfritts prognos för Hgv efter avverkning mot referensmätt Hgv på provytenivå. Spridningen i prognosens förmåga att skatta Hgv efter avverkning var hög. Underskattningen av Hgv var tydligast för provytorna från objekten M1, M2 och S1, det vill säga de tre objekt där störst överskattning noterades för hprHyggesfritts skattning av gallringskvot. För dessa provytor var underskattning med nästan två meter vanligt. Enligt 10§-kurvan motsvarar varje meters ökning i Hgv vid värden över 24 meter en volymökning på 25 m³sk/ha. Avvikelser i skattningen av Hgv efter avverkning i denna omfattning kan potentiellt leda till missvisande återkoppling mot paragraf-kurvorna om programmets prognosverktyg för Hgv efter inte anpassas. För att utveckla hprHyggesfritts prognos av Hgv och hitta rätt gallringskvot behövs fler referensmätningar.

Dgv efter avverkning

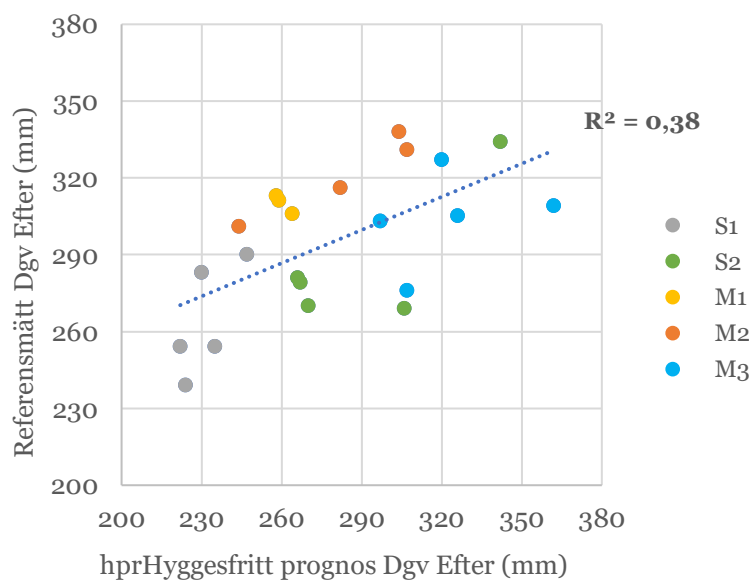
I genomsnitt var avvikelsen mellan referensmätt Dgv efter avverkning och hprHyggesfritts prognos 23 mm med en standardavvikelse på 31 mm (10,3 procent) på objektsnivå. På provytenivå var avvikelsen 16 mm, med en standardavvikelse på 31 mm (10,5 procent) (Tabell 9).



Figur 22. Figuren visar objektsvisa värden för Dgv efter avverkning enligt hprHyggesfritt prognos och referensmätning.

Tabell 9. Medelvärden och avvikelser mellan referensmätt Dgv efter avverkning och hprHyggesfritts prognos. Medelvärden på provyte- och objektsnivå anges som aritmetiska medelvärden för de 22 ingående provytorna, respektive de fem ingående objekten.

Dgv Efter	Avvikelse	Måttslag	Referensmätning	hprHyggesfritt Prognos
Provytor	Medel	mm	295	279
Provytor	Systematisk avvikelse	mm (%)		16 (5,4)
Provytor	Standardavvikelse	mm (%)		31 (10,5)
Objektsvis	Medel	mm	298	275
Objektsvis	Systematisk avvikelse	mm (%)		23 (7,8)
Objektsvis	Standardavvikelse	mm (%)		31 (10,3)



Figur 23. Provytevisa Dgv efter enligt hprHyggesfritts prognos plottad mot referensmätt Dgv efter.

I figur 23 redovisas hprHyggesfritts prognos av Dgv efter avverkning mot referensmätt Dgv. På samma sätt som för Hgv noterades störst underskattning av referensmätt Dgv för provytorna från objekten S1, M1 och M2, det vill säga de tre objekt där störst överskattning noterades för hprHyggesfritts skattning av gallringskvot.

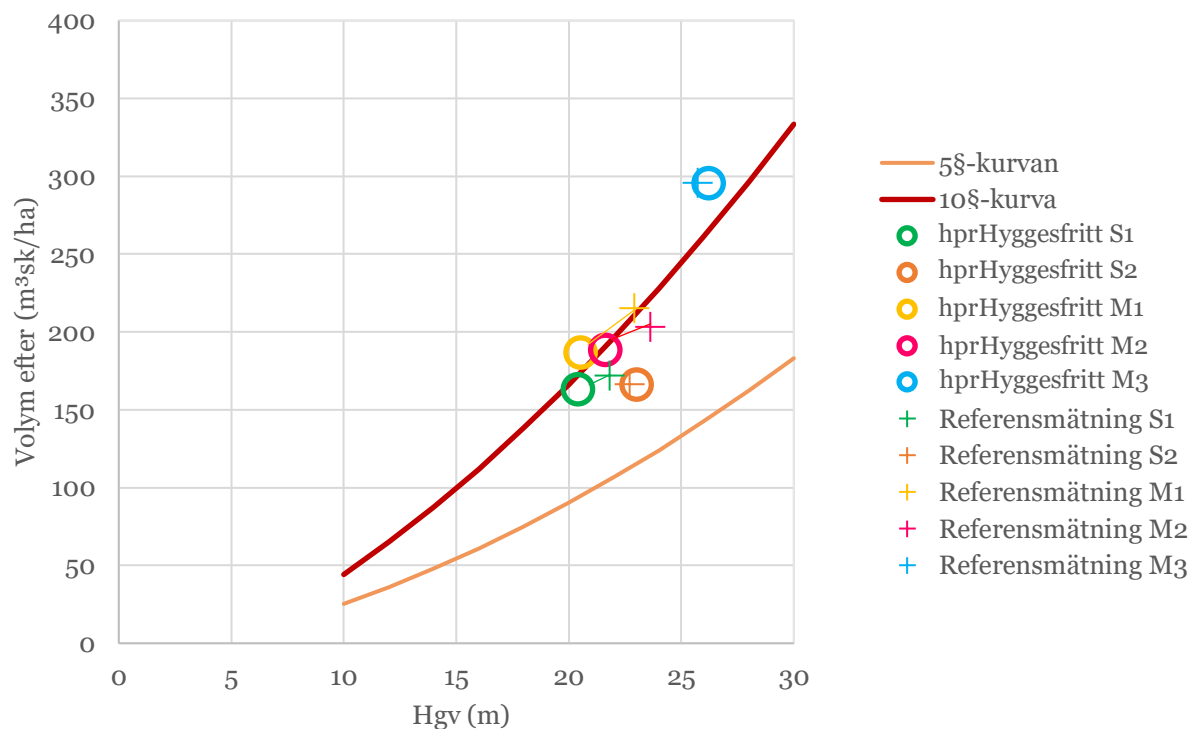
Uppföljning mot skogsvårdslagens §5- och 10-kurvor

Centralt för beslutstödet är återkoppling till skördarförare i form av skattningen av skogens kvarstående volym efter avverkning i förhållande till paragrafkurvorna i skogsvårdslagen. För samtliga fem studerade objekt, är 10§ relevant. Kurvan anger den nivå på virkesförrådet som inte får understigas efter avverkning med hyggesfria metoder som blädning eller måldiameterhuggning. Underskrids denna nivå anses föryngringsavverkning ha påbörjats, vilket kräver inlämnande av avverkningsanmälan.

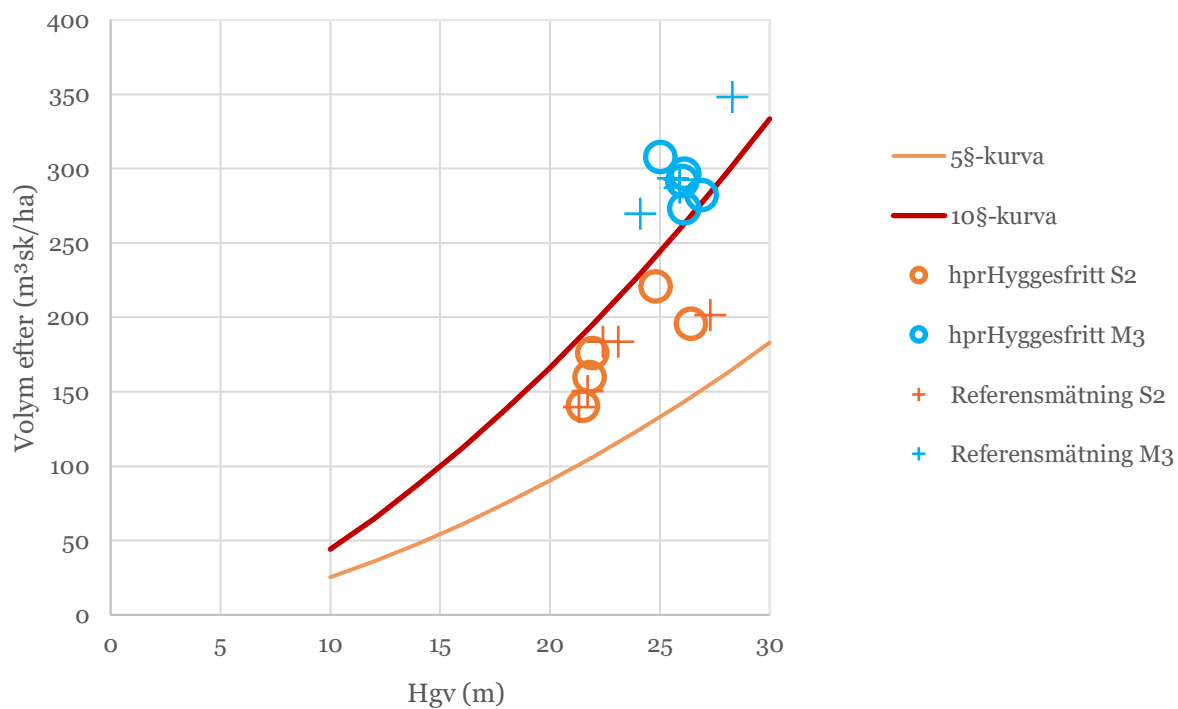
I figur 24 redovisas hur de objektsvisa skattningarna av Hgv och volym efter avverkning från hprHyggesfritt förhåller sig till kurvorna i skogsvårdslagens paragraf 5 och 10. I figuren visas på motsvarande sätt de objektsvisa värdena för Hgv och volym efter avverkning från referensmätningen. Figuren kan användas för att undersöka i vilken mån skattningarna från hprHyggesfritt förmedlar en likartad bild av hur objekten förhåller sig till paragrafkurvorna som hur de "sanna värdena" från referensmätningen förhåller sig till kurvorna.

Utifrån referensmätningen förmedlades en bild där; i) två objekt, M3 och S2, hade en volym efter avverkning som tydligt låg över, respektive under paragraf 10-kurvan, ii) två objekt, M1 och M2, hade en volym efter avverkning som låg mycket nära paragraf 10-kurvan och iii) ett objekt, S1, hade en volym efter avverkning som låg något under paragraf 10-kurvan. Den bild som förmedlades utifrån skattningarna i hprHyggesfritt var närmast identisk för fyra av objekten; objekten M3 och S2 låg tydligt över, respektive under paragraf 10-kurvan medan objekten M1 och M2 låg mycket nära kurvan. En mindre skillnad noterades för objektet S1 som utifrån skattningarna från hprHyggesfritt låg mycket nära kurvan men utifrån referensmätningen låg något under kurvan.

Sammanfattningsvis indikerar ovanstående resultat att hprHyggesfritts skattningar av volym efter avverkning på objektsnivå och Hgv har tillräcklig precision för att förmedla en korrekt bild av tillståndet efter avverkning vid uppföljning mot paragraf 10-kurvan i skogsvårdslagen.



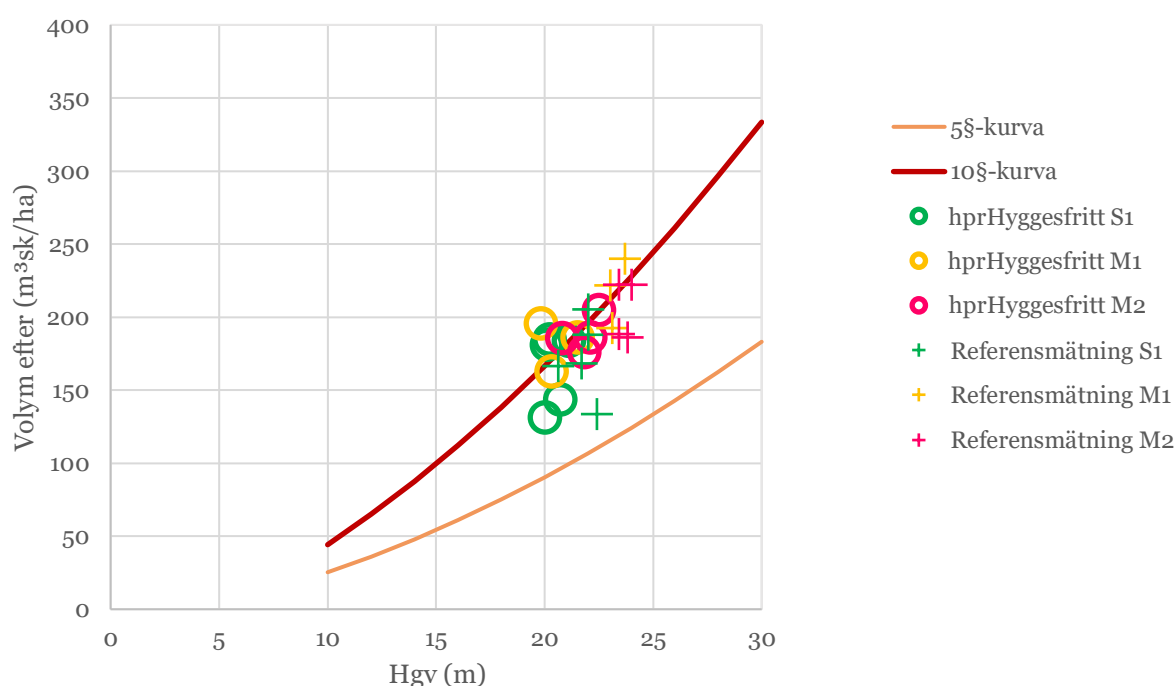
Figur 24. Objektsvisa värden för Hgv och volym efter avverkning från referensmätning respektive skattade från hprHyggesfritt. Värden från samma objekt är sammanbundna med ett streck. I diagrammet visas även kurvorna i skogsvårdslagens paragraf 10 och 5.



Figur 25. Provytevisa värden för objekten M3 och S2 för Hgv och volym efter avverkning från referensmätning respektive skattade från hprHyggesfritt. I diagrammet visas även kurvorna i skogsvårdslagens paragraf 10 och 5.

I figur 25 och 26 redovisas hur referensmätning respektive skattningar från hprHyggesfritt förhåller sig *på provytenivå* till kurvorna i skogsvårdslagens paragraf 5 respektive 10. Figuren kan användas för att undersöka hur den löpande återkopplingen till skördarföraren skulle ha förmedlats under pågående avverkning i takt med att avverkningen färdigställts för enskilda provytor.

För objektet S2 (Figur 25), som på objektsnivå låg tydligt under paragraf 10-kurvan, indikerade skattningarna från hprHyggesfritt att samtliga provytor låg under paragraf 10-kurvan. I takt med att skördarföraren har arbetat sig igenom detta objekt har alltså den återkommande signalen till skördarföraren varit att volymen efter avverkning var lägre än paragraf 10-kurvan. Detta innebär att ifall en målsättning med avverkningen skulle ha varit att inte understiga paragraf 10-kurvan så skulle det ha funnits möjlighet för skördarföraren att reagera på återkopplingen och minska uttaget för att på objektsnivå nå paragraf 10-kurvan. På samma sätt indikerade skattningarna från hprHyggesfritt att samtliga provytor från objektet M3 (Figur 25) låg över paragraf 10-kurvan. Detta objekt låg på objektsnivå tydligt över paragraf 10-kurvan och på motsvarande sätt som för objekt S2 innebär det att signalen till skördarföraren under pågående avverkning skulle ha varit att uttaget skulle kunna ha ökats utan att paragraf 10-kurvan skulle ha understigits för objektet som helhet.



Figur 26. Provytevisa värden för objekten S1, M1 och M2 för Hgv och volym efter avverkning från referensmätning respektive skattade från hprHyggesfritt. I diagrammet visas även kurvorna i skogsvårdslagens paragraf 10 och 5.

För objekten M1 och M2 (Figur 26) låg skattningarna från hprHyggesfritt för de ingående provytorna samlade runt paragraf 10-kurvan. På objektsnivå låg dessa objekt mycket nära paragraf 10-kurvan. Den löpande återkopplingen till skördarföraren har alltså varit korrekt och signalerat att uttaget varit på en lämplig nivå för att nå paragraf 10-kurvan. För objektet S1 (Figur 26) har återkopplingen till skördarföraren varit att uttaget i huvudsak varit i balans med en tendens till för hårt uttag för att nå paragraf 10-kurvan. Även för detta objekt förefaller den återkoppling som signaleras till skördarföraren ha varit korrekt eftersom objektet som helhet låg något under paragraf 10-kurvan.

Sammanfattningsvis indikerar resultaten att den återkoppling till skördarföraren som genererats från hprHyggesfritt på provytenivå varit korrekt och har inneburit att skördarförarna under pågående

avverkning fått signaler hur uttaget skulle kunna ha förändrats för att en högre överensstämmelse med paragraf 10-kurvan skulle ha nåtts.

Fortsatt utveckling

I de avverkade objekten visade volymprognoserna från hprHyggesfritt hög överensstämmelse med volymerna från referensmätningen. En nyckel var att laserdata inte hade några större systematiska eller tillfälliga fel. För att få en bild över studiens generaliserbarhet bör fler objekt avverkas och kontrolleras. En möjlighet att göra den uppföljningen är att jämföra slutavverkade objekts laservolym med skördad volym. Utifrån dessa resultat kan eventuellt en kalibreringsmodell tas fram baserad på resultat och variation i geografier och utifrån laserdatas ålder.

Eftersom Hgv är central för att jämföra volym med paragraf 5- och 10-kurvorna är det angeläget att jobba vidare med Hgv-skattning efter avverkning. För rätt Hgv är gallringskvoten den viktigaste parametern. Fortsatta studier bör därför inriktas mot att förfinas metodiken för skattning av gallringskvot och därmed åstadkomma förbättrade skattningar av Dgv och Hgv. Studien har visat att defaultkvoten kan förbättras och visar att för tall och löv bör den vara lägre än för gran. Här är alltså trädslag centralt. En möjlig utveckling för att få bättre defaultkvot kan vara att skilja på trädslag. Ett spår att utvärdera är att använda SLUs trädslagsgrid som är baserad på laser- och satellitdata.

En tredje komponent att utveckla är bättre arealskattning. Vad gäller arealskattning öppnas nya möjligheter med den teknik som nu införs i vissa skördare där stammarnas position vid avverkning bestäms med hög precision. Med denna information kommer också arealen på mindre objekt att kunna bestämmas med högre precision.

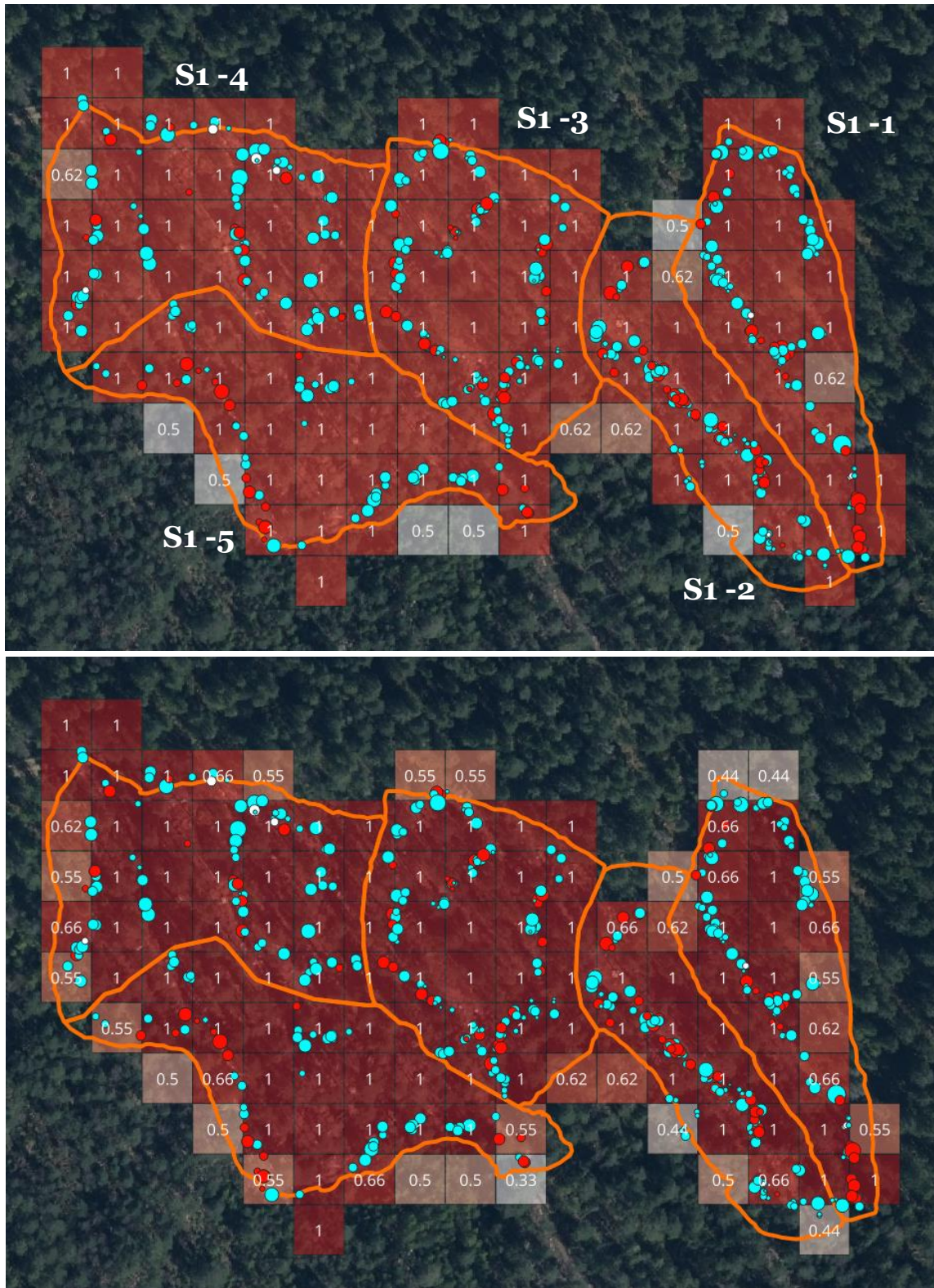
Förutom att undersöka och vidareutveckla ovanstående komponenter är det viktigt att få fler skördarlag att testa programvaran i skördare. Praktiska test leder ofta till att brister upptäcks, men även att värdefull feedback från användarna leder till förbättringar.

Referenser

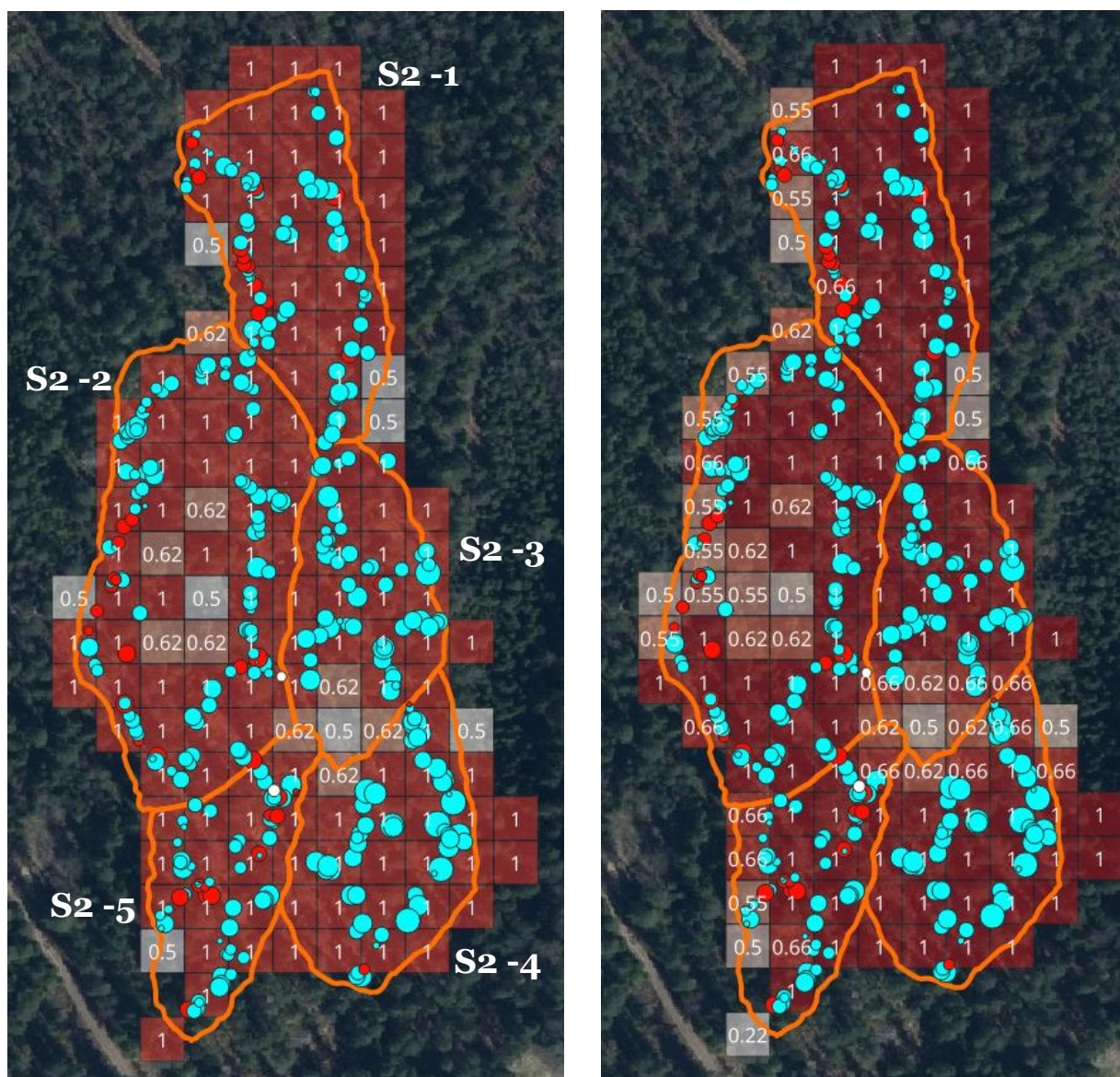
- Arlinger, J., Möller, J., Eriksson, I. & Bhuiyan, N., 2017. Forestand – Skördardata. Standardisering av: Skördardatabaserade beskrivningar av uttag och kvarvarande skog efter gallring. Arbetsrapport 929. Skogforsk.
- Appelqvist, C., Sollander, E., Norman, J., Forsberg, O. & Lundmark, T., 2021. Hyggesfritt Skogsbruk - Skogsstyrelsen definition. Rapport 2021/8.
- Barth, A., Hannrup, B., Möller, J.J., & Wilhelmsson, L. 2004. Validering av FORAN Single Tree® Method. Arbetsrapport 666 Skogforsk. 21 s.
- Bhuiyan, N., Arlinger, J. & Möller, J.J., 2011. Utveckling och utvärdering av en standardiserad metod för volymbestämning och stamräkning vid avverkning med flerträdshanterande skördaraggregat. Arbetsrapport 747. Skogforsk.
- Anon. 2022. Ny EU-skogsstrategi för 2030 – hållbart skogsbruk i Europa. Europaparlamentets resolution av den 13 september 2022 om en ny EU-skogsstrategi för 2030 – hållbart skogsbruk i Europa (2022/2016(INI)). P9_TA(2022)0310. P. 30. www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0310_SV.pdf.
- Hannrup, B., Bhuiyan, N. & Möller, J.J., 2015. Rikstäckande utvärdering av ett system för automatiserad gallringsuppföljning. Arbetsrapport 857. Skogforsk.
- Hannrup, B., Möller, J.J., Arlinger, J. & Eriksson I., (2021). Förbättrad styrning av gallringsarbetet för ökad tillväxt i yngre och medelålders skog. Arbetsrapport 1085. Skogforsk.
- Möller, J. J., Bhuiyan, N. & Hannrup, B. (2015). Utveckling och test av beslutsstöd vid automatiserad gallringsuppföljning. Arbetsrapport 862. Skogforsk.
- Möller, J.J., Bhuiyan, N., Arlinger, J., Hannrup, B., Eriksson, I. & Söderberg, J. 2024. hprYield – beräkningsmodul för generering av geografiskt uppdelade nyckeltal baserat på skördardata. Opublicerat manuskript. Skogforsk.
- Naesset, E. 2004. Accuracy of forest inventory using airborne laser scanning: evaluating the first Nordic full-scale operational project. Scand. J. For. Res. 19: 554-557.
- Nilsson, M., Nordkvist, K., Jonzén, J., Lindgren, N., Axensten., Wallerman., Egberth, M., Larsson, S., Nilsson, 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. Scand. J. For. Res. 194: 447-454.
- Sonesson, J., Eliasson, L., Jacobson, S., Wallgren, M., Weslien, J. & Wilhelmsson, L., 2017. Hyggesfritt skogsbruk på landskapsnivå. Arbetsrapport 926. Skogforsk.
- Skogsstyrelsen 2022. Skogsvårdslagstiftning. Gällande regler 1 september 2022. www.skogsstyrelsen.se/globalassets/lag-och-tillsyn/skogsvardslagen/skogsvardslagstiftningen-2022.pdf
- Ståhl, G. 1992. En studie av kvalitet i skogliga avdelningsdata som insamlas med subjektiva inventeringsmetoder. Institutionen för biometri och skogsindelning. Rapport 24. Sveriges lantbruksuniversitet. Umeå. 127 s.

Bilaga 1 – Studieobjekt och tillhörande provvytor

Figur A och B. Objekt 1 – Södra 1 (1,71 ha) med beteckning på tillhörande provvytor. Övre figuren visar arealberäkningsrutor för hela objektet enligt arealalgoritmen för skärmavverkning. Nedre figuren visar arealrutorna enligt den modifierade arealalgoritmen. Den vita siffran i varje arealruta visar rutans arealandelbidrag.

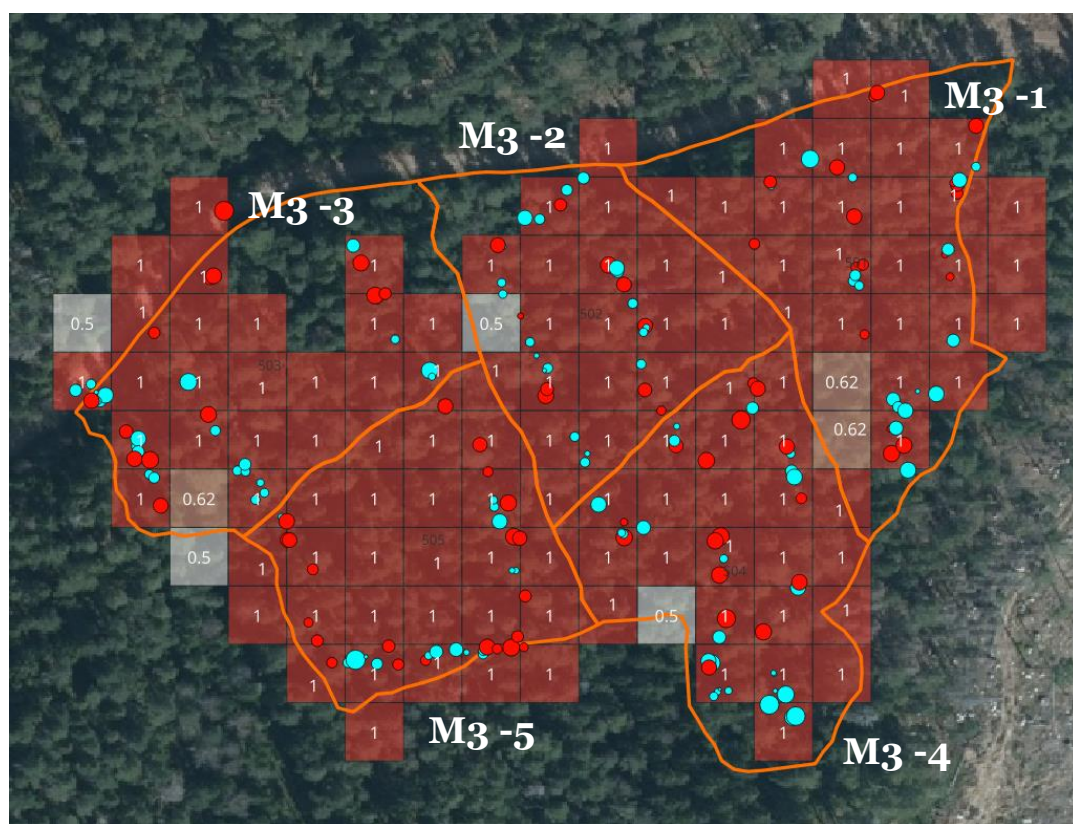


Figur C och D. Objekt 2-Södra 2 (2,08 ha) med beteckning på tillhörande provvytor. Vänstra figuren visar arealberäkningsrutor för hela objektet enligt arealalgoritmen för skärmavverkning. Den till höger visar arealrutorna enligt den modifierade arealalgoritmen. De vita siffrorna i varje arealruta visar rutornas arealandelbidrag.





Figur I och J. Objekt 5 – Mellanskog 3 (1,96 ha) med beteckning på tillhörande provvytor. Vänstra figuren visar arealberäkningsrutor för hela objektet enligt arealalgoritmen för skärmavverkning. Nedre figuren visar arealrutorna enligt den modifierade arealalgoritmen. De vita siffrorna i varje arealruta visar rutans arealandelbidrag.



Bilaga 2 – Ändringar i programinställningar och grundalgoritmer

Följande förändringar är gjorda för hantering av skogliga grunddata och generering av resultat:

Ändringar till generella inställningar för arealberäkning:

- Default-storlek för rutor (13 m).
- Minsta areal beräkningsyta (0,2 ha).
- Minsta medelstamvolym för skärmställning (0,01 m³sk).
- Minsta andel tall för skärmställning (0 %).

Ändringar i inställningsdokumentet:

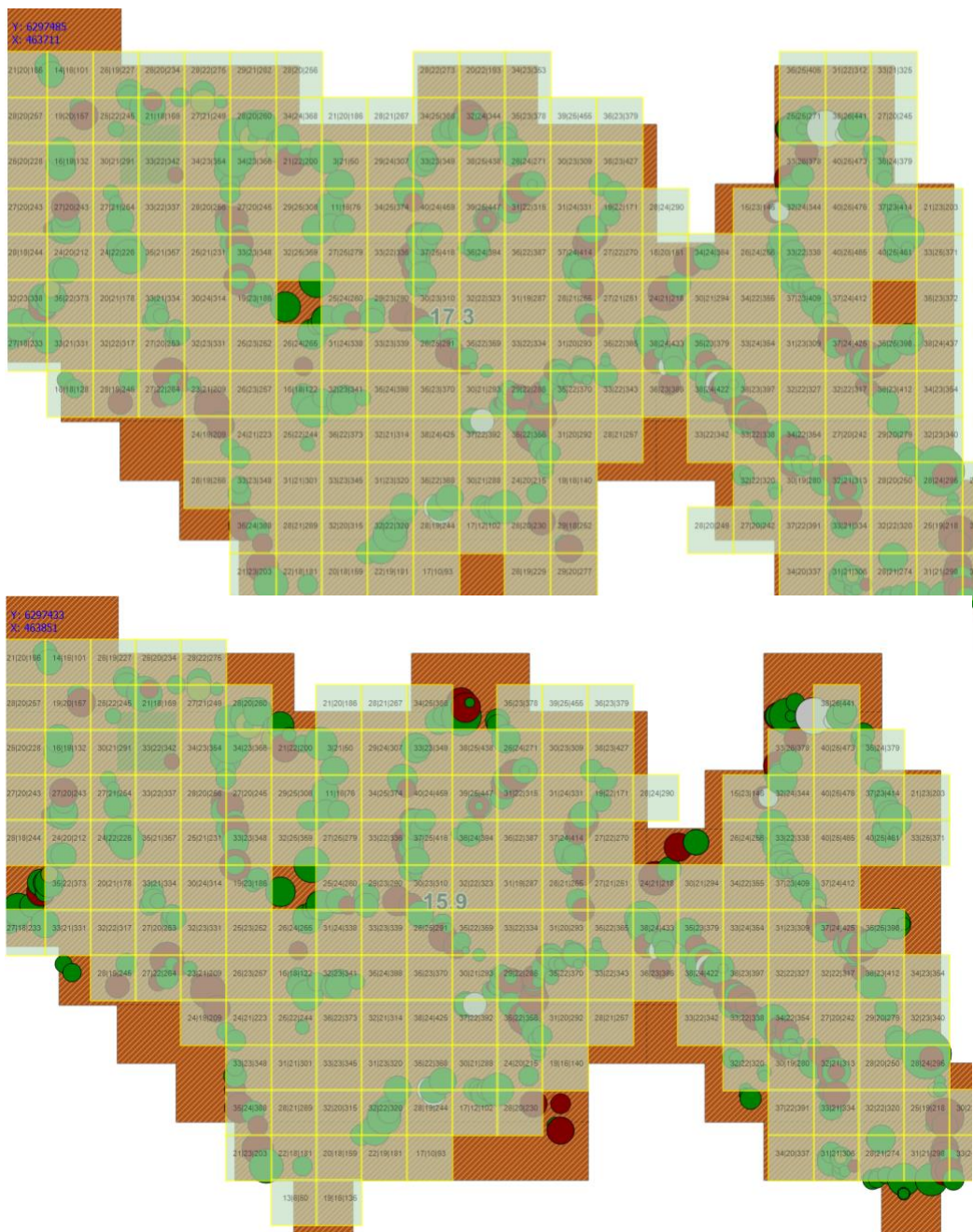
- Minsta antal övre höjdsstammar från 50 till 25.
- Minsta stamantal för prognosgenerering från 100 till 30.
- Default gallringskvot från 0,81 till 1,2
- Ny mall enligt Skogsvårdslagens krav enligt paragraf 5 och 10. Diagram med Hgv (m) på x-axeln och volym (m³sk/ha) på y-axeln.

Ändringar i grundalgoritmen:

- Prognos görs alltid oavsett avverkningsform och uttagen grundyta.
- Korrektion så att överlapp mellan SGD-ruta och ”intern ruta” beräknas på samma sätt med nya mindre SGD-rutor på 10 x 10 meter jämfört med första omgångens 12,5 x 12,5 metersupplösning. Detaljer om överlappningsregler samt korrigering för 10x10 m rutor finns i bilaga 4.
- För SGD-rutor som uppfyller överlappskraven för vald/valda beräkningsyta/-or, beräknar algoritmen ett aritmetiskt medel för alla fyra variabler: volym i m³sk/ha, grundyta i m²/ha, hgv och dg.
- SGD grundyta används i beräkning av gallringsstyrka innan algoritmens gallringsmodell initieras.

Bilaga 3 – Algoritm för inkludering av SGD-ruta och beräkning av medelvärde

Figurerna nedan visar kartbildsfönstret i hprHyggesfritt med de avverkade stammarnas position, arealrutnätet enligt arealalgoritmen (underliggande bruna rutor 13 x 13 m) och SGD-rutor (gula 10 x 10 m) som ligger till grund för beräkning av volym före. Den övre visar resultat av algoritmen som styr inkluderingen av SGD-rutor vid användning av arealalgoritmen för skärmavverkning. Nedre figuren visar resultatet när den modifierade arealalgoritmen används för större objekt. Resultterande arealbidragsandel för rutorna i yttergränsen leder till att SGD-underlaget krymper i ytterkanten av objekten.



Bilaga 4 – Algoritm för inkludering av SGD-ruta och beräkning av medelvärde

Alt 1) Areal 1

SGD-rutan inkluderas

eftersom $45/169 > 1,25 - 1$ är sant

Alt 2) Areal 0,9

SGD-rutan inkluderas INTE

eftersom $45/169 > 1,25 - 0,9$ är falskt

Max överlapp är 59 % vid SGD-ruta 10 m

Max överlapp är 92 % vid SGD-ruta 12,5 m

SGD-ruta	Överlappning	Grid-ruta
10*10 m	5*9 m	13*13 m
100 m ²	45 m ²	169 m ²
	Relativt överlapp	Areal-andel
	$45/169 = 27 \%$	1 eller 0,9

Alt 1) Areal 0,8

SGD-rutan inkluderas INTE

eftersom $55/169 > 1,25 - 0,8$ är sant

SGD-ruta	Överlappning	Grid-ruta
10*10 m	5,5*10 m	13*13 m
100 m ²	55 m ²	169 m ²
	Relativt överlapp	Areal-andel
	$55/169 = 33 \%$	0,8

Alt 1) Areal 0,75

SGD-rutan inkluderas

eftersom $100/169 > 1,25 - 0,75$ är sant

Alt 2) Areal 0,65

SGD-rutan inkluderas INTE

eftersom $100/169 > 1,25 - 0,65$ är falskt

SGD-ruta	Överlappning	Grid-ruta
10*10 m	10*10 m	13*13 m
100 m ²	100 m ²	169 m ²
	Relativt överlapp	Areal-andel
	$100/169 = 59 \%$	0,75
		Eller
		0,65

Bilaga 5 - Beräkning av medelvärde

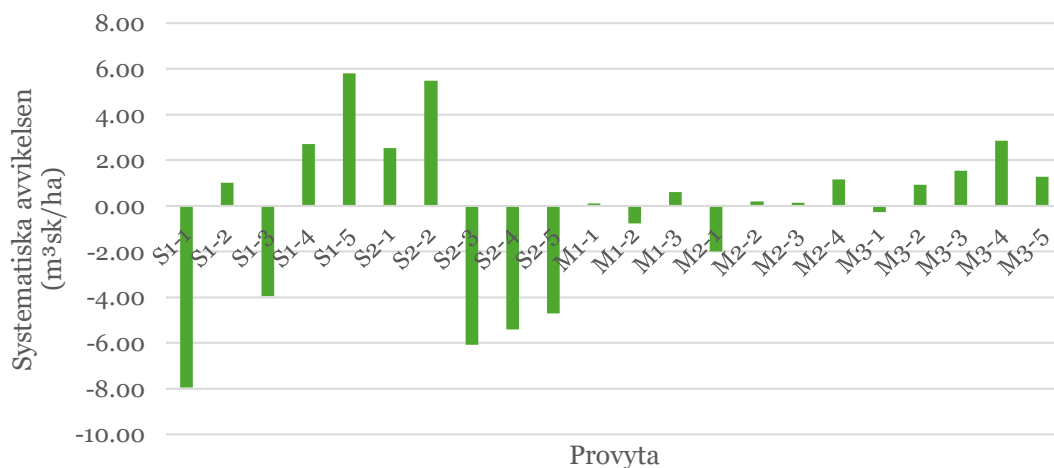
```
for k := 0 to Length(laserActiveArr) - 1 do
  if laserActiveArr[k] then
    begin
      Inc(n);
      laserGyHa := laserGyHa + laserGrid[k].gyHa;
      laserm3skHa := laserm3skHa + laserGrid[k].m3skHa;
      laserHgv := laserHgv + laserGrid[k].hgv;
    end;
  if n > 0 then//Aritmetiskt medelvärde
    begin
      laserGyHa := laserGyHa/n;
      laserm3skHa := laserm3skHa/n;
      laserHgv := laserHgv/n;
    end;
```

Bilaga 6 - Volymprognosens variation beroende på antal avverkade stammar

Referensmått volym bestäms av följande två moment. Den första är manuell mätning av diameter och trädslag för alla kvarvarande träd i beståndet efter avverkning. Dessa stammar delas upp i diameterklasser. I nästa moment kopieras skördarens mätning per diameterklass från de avverkade träden på samma yta för att beskriva volymen och höjden av de kvarvarande stammarna. Detta görs av hprHyggesfritt när inventeringsfilen läses in till programmet. För diameterklasser utan avverkade träd, räknar programmet ut ett värde för klassen genom interpolering mellan angränsande klasser med stammar. Om de avverkade träden är för få eller inte representativa för beståndet, kan metoden leda till fel i bestämmande av referensvolym.

Antal avverkade träd per provyta som utgör underlaget för beräkning av trädslagvis medelvolum per diameterklass varierar i materialet från 31 till 146 stammar per yta. Låga antal träd innebär få stammar per diameterklass, och för de provytor med minsta antal avverkade stammar finns det flera diameterklasser utan stammar. Att basera facitmätningar på ett relativt lågt antal avverkade träd kan tillföra fel i skattningen av det kvarstående beståndet, om de avverkade träden är för få och inte representativa för de kvarvarande träden efter avverkning. I syfte att utvärdera möjliga fel, analyserades varje provyta genom att jämföra provytans totalvolym baserad på klassvis medelvolum från provytans avverkade träd, med provytans totalvolym baserad på klassvis medelvolum för hela objektets (alla provytor) alla avverkade träd. (Notera att programmet hanterar klasser utan träd genom interpolering mellan angränsande klasser med stammar.)

Jämförelsen av metoderna på provytenivå gav en systematisk differens på $-0,216 \text{ m}^3\text{sk/ha}$, och standardavvikelse på 3,0 procent när klassvis medelvolum baseras på provytans egna avverkade träd, jämfört med klassvis medelvolum baserad på objektets träd.



Figur A. Stapeldiagram som beskriver skillnaden mellan 1) provytans totalvolym när den bestäms av ytans egna avverkade träd klassvisa medelvolum och 2) provytans totalvolym bestämt av objektets klassvisa medelvolum.

Material insamlat från Uppland (M1–M3) visar att provytornas egna klassvisa medelvolum avviker mindre jämfört med objektets, medan större variation finns i Sydsverigeobjekten. Detta kan förklaras av allmänt större variation i struktur inom bestånden för S1- och S2-objekten.

Bilaga 7 – Algoritmens beräkningssteg för volym efter avverkning

För skattning av kvarvarande volym efter avverkning räknar hprHyggesfritt-modellen fram ett värde enligt följande steg:

1. Om laserdata läses in, tillåt avsteg från gallringsmodellens regler.
2. Om laser-Hgv överstiger noll i värde, kontrolleras laser-Hgv enligt $(\text{Hgv uttag}+1) / \text{Hgv laser}$ för att beräkna en procentuell avvikelse.
3. Om den procentuella avvikelsen överstiger 35 procent meddelar systemet att laserdata är föråldrad. Ingen korrektion av laser Hgv, volym eller grundyta görs till ingångsvärden för beräkning.
4. Efter kontroll av laserdatagiltighet, sker ingen korrektion av Hgv eller grundyta för ålder (tillväxt).
5. SGD-rutor som uppfyller överlappningskrav (Bilaga Ö) på systemets internberäknade arealrutnät, används för underlag till beräkning av aritmetiska medel för alla fyra skogliga grunddatavariabler, (volym $\text{m}^3\text{sk/ha}$), grundyta (m^2/ha), Hgv och Dgv. Detta görs på beräkningsytanivå.
6. Gallringsstyrkan bestäms enligt grundytan i uttaget (uttagen grundyta/internberäknad areal) genom grundytan före enligt laserdata (aritmetiskt medel från steg 2).
7. Skattning av kvarvarande volym och grundyta.
 - a. Gallringsmodellen initieras och utgår från gallringsstyrka från steg 3 och en default gallringskvot av 1,2. En kvot över 1 tillåter modellen att räkna med högre uttagsandelar med stigande diameterklass.
 - b. Beståndet före avverkning beräknas genom att antalet uttagna träd per DBH-klass divideras med uttagsandelen för klassen.
 - c. Beståndet efter räknas ut diameterklassvis som differensen mellan beståndet före gallring och stammar i uttaget. De uttagna trädens egenskaper kopieras till det kvarvarande trädens per DBH-klass.