ARBETSRAPPORT 1152-2023

Förbättrat uppföljningsverktyg för diametermätning i skördare

– erfarenheter från praktiska tester

Björn Hannrup, Maria Nordström, John Arlinger & Fredrik Carlsson

Klas Johansson, Åseda Skogsentreprenad AB. Bild: Bitzer.

skogforsk

Innehåll

Förord **3**

Summary **4**

Sammanfattning **5**

Bakgrund **6**

Syfte och mål **6**

Material och metoder **7**

Skogforsks modell 7

Genomförande 8

hprStamhållning – prototypprogram för analys 10

Deltest kring ”modifierad kvalitetssäkring” 14

Resultat och diskussion **15**

Kontinuerlig uppföljning av den samlade produktionen 15

Olika typer av skördare 15

Identifiering av tekniska fel 18

Effekt av egenskaper hos den avverkade skogen 18

Effekt av förarens körsätt 20

hprStamhållning 21

Deltest kring ”modifierad kvalitetssäkring” 21

Sammanfattande diskussion 21

Litteratur **23**

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

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts 31 augusti 2023 av Petrus Jönsson, Bitr. programchef. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef, granskat och godkänt publikationen för publicering 7 september 2023.

Redaktör: Caroline Rothpfeffer, caroline.rothpfeffer@skogforsk.se
©Skogforsk 2023 ISSN 1404-305X

Förord

Skogforsk har nyligen utvecklat en modell som utifrån skördarnas egna mätdata möjliggör kontinuerlig uppföljning av skördarnas precision i diametermätningen. Denna studie sammanfattar resultat och erfarenheter från användning av modellen under ett och ett halvt års tid på ett antal skördare som avverkar åt Vida. Studien har finansierats av medel från EU-projektet ”Advanced Virtual Aptitude and Training Application in Real Time”; WP 3 och Mistra Digital Forest (Förarstöd och feedback).

Vida har varit företagsvärd under studien. Fredrik Carlsson och Pierre Quist från Vida har varit mycket delaktiga och deras engagemang har varit avgörande för de resultat som uppnåtts. En central del av studien var att utifrån ett användarperspektiv identifiera nyckeltal som sammanfattar skördarnas status när det gäller precisionen i diametermätningen. Processen att identifiera nyckeltal har baserats på kontinuerlig uppföljning och löpande kontakt med ett stort antal skördarförare. Fredrik Carlsson har varit drivande i detta arbete.

John Arlinger, JDA Forest, har implementerat den utvecklade modellen för uppföljning av skördarnas mätprecision i ett prototypprogram ”hprStamhållning”. Programvaran har successivt utvecklats under studieperioden.

Som en del av studien har inledande tester utförts för att undersöka hur den utvecklade modellen för uppföljning av skördarnas mätprecision kan användas inom ramen för kvalitetsuppföljningssystemet för skördarnas dimensionsmätning. I gruppen medverkade Klas Johansson (Åseda Skogsentreprenad AB), Fredrik Carlsson (Vida) samt Jonas Hemmingsson och Martin Sahlberg, Biometria.

Studieupplägg och analys av data har utförts av Maria Nordström och Björn Hannrup, Skogforsk.

Ett stort tack till samtliga som bidragit till studiens genomförande!

/Björn Hannrup

Summary

Swedish forestry produces timber by order from sawmills, and orders have become increasingly specific and variable over time. This particularly applies to log dimensions, where orders commonly include specific requirements regarding the length distribution of logs, both in total and by diameter class. This places high demands on the work of the harvesters, particularly regarding measurement of dimensions, which form the basis of bucking the processed stems into logs.

Skogforsk has recently developed a model for following up diameter measurement of harvesters. The model uses the machines' own measurement data to estimate the precision in the measurement. The model has potential to give prompt feedback that describes measurement precision based on the harvester's total production. This contrasts with current follow-up methods based on samples of all stems. Initial assessment of the model has shown promising results, but it is important to supplement the results with experiences from practical use before the model is implemented in forestry. The overall aim of the study was to generate and record these experiences on half-scale.

Fifteen harvesters operating for Vida were monitored over an 18-month period. The harvesters were in two categories: final-felling harvesters and all-round machines capable of use for both thinning and final felling. Data from the harvesters was analysed using Skogforsk's model implemented in the prototype program, hprStamhållning. The results were sent back to the harvester operators monthly. Recurrent dialogue with the operators formed the basis of transforming the primary estimates of measurement precision from the model. The outcome was measurement precision expressed in a more accessible form, as the proportions of the total cut volume whose measurements were approved/rejected.

The key experiences from the study can be summarised as follows:

- Results from Skogforsk's model could be used to identify technical faults in the harvester head, e.g. malfunction in the sensor to the delimbing knives. The large quantities of data generated from continual follow-up of the entire production enabled rapid feedback. If the model is implemented in systems, it should be possible to design algorithms that automatically identify deviations and warn the operator.
- The final-felling harvesters showed higher average measurement precision than the group of all-round machines. For the all-round machines, there was a clear tendency towards less precise measurement as stem size increased, which was not the case for the final-felling harvesters.
- The follow-up with the model made it possible to identify and describe factors that influence precision in diameter measurement, such as the operator's driving style and properties of the felled forest. The effect of such factors on measurement precision has previously been known, but it has been difficult to quantify the effect because of limited data.

In summary, the experiences indicate that Skogforsk's model can contribute in a number of ways to improving and streamlining follow-up of harvesters' diameter measurement. Based on the model's theoretical foundation, in combination with the practical experiences gathered in this study, we conclude that the model can be regarded as ready for large-scale implementation in Swedish forestry.

Sammanfattning

Skogsbruket producerar idag virke mot beställningar från sågverken som blivit alltmer specifika och variabla över tid. Framför allt gäller detta dimensionskraven, där beställningarna vanligen innehåller krav kring stockarnas längdfördelning, både totalt sett samt per diameterklass. Detta ställer höga krav på skördarnas arbete och framför allt på skördarnas dimensionsmätning som är grundbulten för apteringen av de upparbetade stammarna till stockar.

Skogforsk har nyligen utvecklat en modell för uppföljning av skördarnas diametermätning som utifrån maskinernas egna mätdata skattar precisionen i mätningen. Modellen har potential att ge en snabb återkoppling som beskriver mätprecisionen utifrån skördarens totala produktion. Detta i kontrast till dagens uppföljning som är baserad på ett stickprov av alla stammar. Inledande utvärdering av modellen har visat lovande resultat men det är angeläget att resultaten kompletteras med erfarenheter från praktisk användning innan modellen implementeras i skogsbruket. Det övergripande syftet med studien var att utifrån användning i halvstor skala generera och dokumentera sådana erfarenheter.

Sammanfattningsvis ger erfarenheterna stöd för att Skogforsks modell kan bidra på en rad sätt för att förbättra och effektivisera den uppföljning som görs av skördarnas diametermätning. Baserat på modellens teoretiska grund, i kombination med denna studies praktiska erfarenheter, drar vi slutsatsen att modellen kan betraktas som färdig för storskalig implementering i det svenska skogsbruket.

De centrala erfarenheterna från studien kan sammanfattas enligt följande:

- I studien kunde resultat från Skogforsks modell användas för att identifiera tekniska fel på aggregatet, till exempel då givare till kvistknivarna gått sönder. De stora datamängder som genererades från den kontinuerliga uppföljningen av hela produktionen möjliggjorde att återkoppling kunde ske snabbt. Implementeras modellen i system bör det vara möjligt att utforma algoritmer som automatiskt identifierar avvikelser och varnar skördarförarna.

- I studien hade gruppen av rena slutavverkningsskördare en högre genomsnittlig mätprecision än gruppen av maskiner som används i både gallring och slutavverkning. För denna grupp av maskiner fanns en tydlig tendens till försämrad mätprecision med ökad stamstorlek vilket inte var fallet för gruppen av rena slutavverkningsskördare.

- Uppföljning med modellen gjorde det möjligt att identifiera och beskriva faktorer som påverkar precisionen i diametermätningen. Exempel på sådana faktorer var skördarförarnas körstil och egenskaper hos den avverkade skogen. Att sådana faktorer har effekt på mätprecisionen har tidigare varit känt men de har varit svåra att kvantifiera på grund av begränsade dataunderlag.

I studien följdes 15 skördare som avverkar åt Vida under ett och ett halvt års tid. Två kategorier av skördare ingick i studien: rena slutavverkningsskördare, respektive maskiner som utförde både gallring och slutavverkning. Data från skördarna analyserades med Skogforsks modell implementerad i prototypprogrammet hprStamhållning. Resultaten återfördes till skördarförarna på månadsbasis. Utifrån en återkommande dialog med skördarförarna omformades de primära skattningarna av mätprecision från modellen så att de uttryckte mätprecisionen i mer lättillgänglig form som andel av den totalt avverkade volymen med godkänd respektive ej godkänd mätning.

Bakgrund

Den svenska sågverksindustrin har transformerats sedan 90-talet så att man idag i stor utsträckning skräddarsyr sin produktion efter kundernas behov (Hugosson & McCluskey 2008, Nordström m. fl. 2021). För skogsbruket har detta inneburit att man producerar mot beställningar från sågverken som blivit alltmer specifika och alltmer variabla över tid (Nordström m. fl. 2021). Framför allt gäller detta dimensionskraven, där beställningarna vanligen innehåller krav kring stockarnas längdfördelning, både totalt sett samt per diameterklass. Detta ställer höga krav på skördarnas arbete och framför allt på skördarnas dimensionsmätning som är grundbulten för apteringen av de upparbetade stammarna till stockar. Skördarnas dimensionsmätning är därför central, såväl för skogsbrukets förmåga att leverera stockfördelningar enligt sågverkens beställningar, som för den totala lönsamheten inom den trämekaniska värdekedjan.

Kvaliteten på skördarnas dimensionsmätning styrs av den tekniska potentialen för mätutrustningen samt hur väl denna potential tillvaratas av den samlade skördarflottan vid avverkning. Resultat från de återkommande Virkesvärdestesterna (Nordström m. fl. 2018) visar på en successiv förbättring av mätutrustningens tekniska potential under de senaste 20 åren, till en nivå som är mycket nära den som är teoretiskt möjligt att nå inom ramen för den teknik som används (Andersson 2004). Detta innebär att vältrimmade skördare har förmåga att mäta i nivå med eller bättre än huvuddelen av de mätramar som används vid sågverk (Hyll m. fl. 2021).

För att i så stor utsträckning som möjligt tillvarata skördarnas mätutrustnings tekniska potential är insatser riktade mot uppföljning och återkoppling centrala. I Sverige är en stor andel av skördarna anslutna till ett kvalitetssäkringssystem för dimensionsmätningen (Arlinger & Möller 2006), vilket utgör ett kraftfullt verktyg för att följa och förbättra mätningen (Aldén 2013). I systemet gör förarna en egenkontroll av mätningen utifrån manuella mätningar på cirka en utslumpad stam per skift, vilket ungefär motsvarar en kontrollstam per 650 avverkade stammar. Detta ger en bra bild av skördarnas mätningar över längre tidsperioder. För att snabbare kunna identifiera avvikelser bör denna uppföljning kompletteras med uppföljningsverktyg som ger en mer löpande beskrivning av hur mätprecisionen utvecklas och till exempel medger uppföljning av mätprecision per diameterklass för kortare tidsperioder.

Nyligen har Skogforsk utvecklat en modell som möjliggör kontinuerlig uppföljning av skördarnas precision i diametermätningen (Hannrup m. fl. 2020). Modellen utnyttjar skördarnas egna mätdata och skattar mätprecisionen per avverkad stam utifrån en framtagen parameter som beskriver förekomsten av planområden, det vill säga stampartier utan registrerad avsmalning. Resultat från utvärdering av modellen är lovande och indikerar att modellen kan ge relevant information som potentiellt kan användas i olika situationer och av flera olika kategorier av användare. För att närmare undersöka modellens användbarhet är det angeläget att komplettera gjorda utvärderingar med erfarenheter från praktisk användning. Därigenom bör ett lämpligt underlag skapas för en eventuell vidare implementering.

Syfte och mål

Det övergripande syftet med studien var att generera och dokumentera erfarenheter från praktisk användning av Skogforsks modell för skattning av precisionen i skördarnas diametermätning. Tillsammans med resultat från tidigare utvärdering kan därigenom ett relevant underlag skapas till stöd för en eventuell vidare implementering.

Projektet har haft följande delmål:

- Att använda Skogforsks modell vid avverkning med ett femtontal skördare som avverkar åt Vida.
- Att implementera modellen i ett prototypprogram.
- Att kontinuerligt föra en dialog med skördarförare där resultat från modellen återkopplas och synpunkter inhämtas allmänt men också specifikt kring vilken information som är mest relevant för förarna.
- Att baserat på dialogen med förarna utveckla nyckeltal som sammanfattar den information som är mest relevant för användare.
- Att dokumentera erfarenheter från användning av modellen för att belysa situationer där informationen kan ge direkt praktisk nytta eller utgöra grund för fortsatt utveckling.
- Att utföra inledande tester hur den utvecklade modellen för uppföljning av skördarnas mätprecision kan användas inom ramen för kvalitetsuppföljningssystemet för skördarnas dimensionsmätning.

Material och metoder

Det övergripande syftet med studien var att generera och dokumentera erfarenheter från praktisk användning av Skogforsks modell för skattning av precisionen i skördarnas diametermätning. Nedan ges en kort beskrivning av modellen – en fullständig beskrivning återfinns i Hannrup m.fl. (2020). Därefter följer en redogörelse för projektets genomförande.

Skogforsks modell

Indata till Skogforsks modell utgörs av skördarnas högupplösta diametervektor innehållande diametervärden varje decimeter längs de avverkade stammarna. *Utdata* från modellen utgörs av en *stamvis* skattning av mätprecisionen i diametermätningen. Mätprecisionen uttrycks som spridningen för maskinens mätning när det gäller avvikelserna mellan maskinens mätning och en simulerad referensmätning utförd av en kvalitetstekniker från Biometria, det vill säga en utförare som har expertkompetens när det gäller diameterbestämning med hjälp av klavning. Spridningsmåttet som används är standardavvikelsen per stam (i mm) för avvikelsen mellan referensmätning av en kvalitetstekniker och skördarens diametermätning.

Det använda måttet kan betraktas som ett mått på stamhållningen där en hög standardavvikelse (stor spridning) indikerar att skördaraggregatets mätande organ (kvistknivar eller matarvalsar) tidvis tappat kontakt med stammen. Omvänt indikerar ett lågt värde att de mätande organen haft god kontakt med stammen och att utrustningen ger korrekta värden förutsatt att den är väl kalibrerad för systematisk avvikelse.

Beräkningarna i modellen baseras på information om förekomsten av planområden, det vill säga stampartier där skördarens registrerade diametervärden är oförändrade och inte, som i normalfallet, minskar i riktning mot stammens topp. Planområden kan vara naturligt plana områden eller initierade av minvärdesfiltreringen som görs i skördarna. Filtreringen innebär att stigande diametermått mot toppen inte accepteras utan ersätts av föregående mått tills ett minskande mått registrerats. En styrka med modellen är att det för varje planområde görs en beräkning av planområdets inverkan på mätprecisionen. Detta innebär att modellen har en inneboende förmåga att hantera den mix som finns i

indata av naturligt plana områden på stammarna och planområden initierade av felaktig diametermätning där de mätande organen tappat kontakt med stammen.

Modellen har utvecklats utifrån en nationell databas med data från kvalitetssäkringssystemet för skördarnas dimensionsmätning (hqc-filer). Materialet omfattade drygt 4 000 stammar som referensmätts av kvalitetstekniker från Biometria. Modellen har validerats med gott resultat på ett oberoende material av motsvarande storlek (Hannrup m.fl. 2020).

De potentiella fördelar modellen kan erbjuda jämfört med dagens uppföljning, är framför allt kopplade till snabbare och mer kontinuerlig återkoppling. I dagens system genereras till exempel mätinformation från 20 till 30 manuellt klavade kontrollstammar under en månads arbete. Med en modellbaserad uppföljning av mätprecisionen kommer samma informationsmängd att kunna genereras då en skördare avverkat under 20 till 30 minuter.

Genomförande

Arbetet i studien har haft en processliknande karaktär där huvudkomponenterna varit datainsamling, analys samt återkoppling och dialog. Baserat på denna process har erfarenheterna från användning av Skogforsks modell för skattning av precisionen i skördarnas diametermätning systematiserats. Arbetet i studien beskrivs närmare nedan.

Datainsamling

Insamling av data skedde genom kontinuerlig lagring av produktionsfiler (hpr – harvester production) och filer med information om kvalitetssäkringen av skördarens mätning (hqc – harvester quality control) från skördare som avverkade åt Vida. Antalet skördare ökade successivt under studietiden och omfattade totalt 15 maskiner (tabell 1, figur 1). Ambitionen var att inkludera skördare från många olika tillverkare och att inkludera såväl rena slutavverkningsskördare som kombimaskiner, det vill säga mindre till medelstora skördare som utför såväl gallring som slutavverkning.

På maskinerna som ingick i studien aktiverades lagring av den högupplösta diametervektorn, det vill säga den information som används som indata i Skogforsks modell. Vektorn lagras i skördarnas produktionsfil (hpr) och innehåller diametervärden varje decimeter längs de avverkade stammarna. Utöver aktiveringen gjordes inga åtgärder på de ingående skördarna.

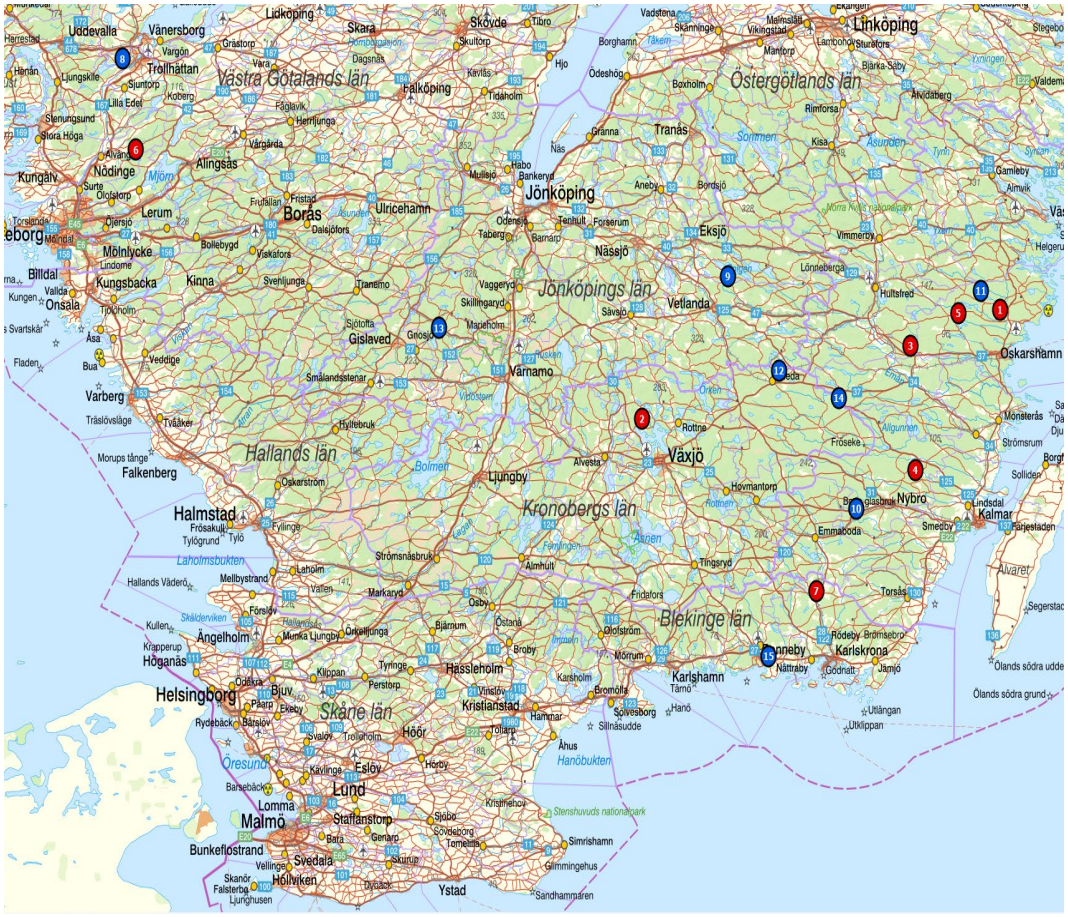
Analys och löpande återkoppling

Data från skördarna analyserades med hjälp av prototypprogrammet ”hprStamhållning”. I programmet finns Skogforsks modell implementerad. En första programversion fanns tillgänglig vid start av studien och under studietiden utvecklades programmet i takt med att nya behov uppstod (se vidare nedan).

Återkommande analys av data skedde systematiskt. Tidsperioden mellan analystillfällena var fyra till sex veckor, det vill säga analyserna genomfördes ungefärligen på månadsbasis. Resultaten av analyserna återkopplades till skördarförarna i en återkommande process. Återkoppling på månadsbasis var lämpligt eftersom det gjorde det möjligt att koppla resultaten från analysen med förarnas minnesbilder av vad som inträffat sedan föregående analys. Till exempel hur egenskaperna hos den avverkade skogen varierat och ifall något speciellt inträffat som potentiellt skulle kunna påverka mätningarna. Exempel på sådana händelser var att man haft något tekniskt problem, förändrat inställningar på skördaraggregatet eller bytt förare.

Tabell 1. Basmaskin, skördaraggregat och aggregatstyp för de skördare som medverkade i studien. Identitetsnummer kopplar till maskinernas avverkningsområden redovisade i figur 1.

Id	Basmaskin	Aggregat	Aggregattyp
1	EcoLog 560	EcoLog 561 (SP)	Kombi
2	John Deere 1170G	H413	Kombi
3	Komatsu 911	C93 (tidigare C123)	Kombi
4	Komatsu 931	C124	Kombi
5	Rottne H11	SP 561 LF	Kombi
6	Rottne H11	SP 561 LF	Kombi
7	Rottne H11	LogMax 4000	Kombi
8	EcoLog 590	Warratah 480	Slutavv.
9	John Deere 1470G	H415	Slutavv.
10	John Deere 1470	H415	Slutavv.
11	Komatsu 951	C144	Slutavv.
12	Ponsse Bear	H8	Slutavv.
13	Ponsse Ergo	H7	Slutavv.
14	Rottne H21	EGS706	Slutavv.
15	RottneH21	EGS706	Slutavv.



Figur 1. Karta som illustrerar ungefärligt centrum för avverkningsområde för kombimaskiner (röda cirklar) respektive slutavverkningsskördare (blå cirklar). Siffrorna anger maskinidentitet enligt tabell 1.

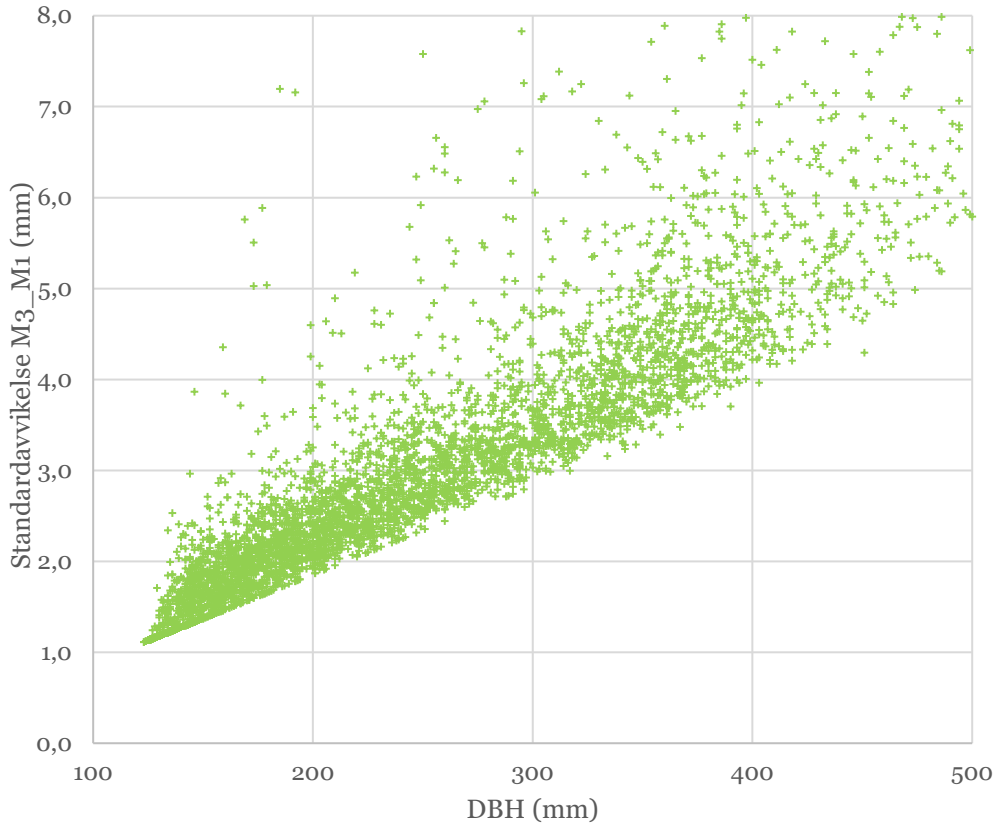
hprStamhållning – prototypprogram för analys

Prototypprogrammet hprStamhållning har genomgående använts för analys av data från skördarna i studien. I programmet finns funktionalitet implementerad för;

1. inläsning av hpr-filer innehållande högupplöst diametervektor,
2. beräkning av mätprecision enligt Skogforsks modell samt
3. en rad alternativa sätt att visualisera resultaten t. ex. möjlighet till jämförelse av mätprecision i diametermätningen över tid: mellan trädslag, utifrån trädstorlek och mellan maskiner.

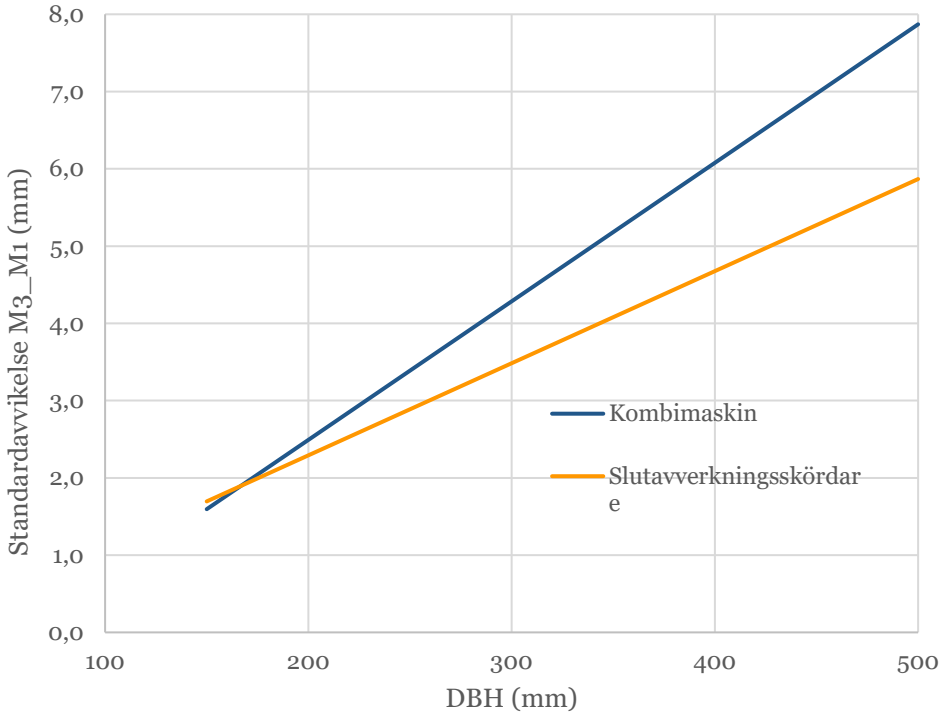
Därutöver finns olika möjligheter för filtrering av indata samt en funktion för export av resultaten i text-format.

Ett exempel på hur resultat från de primära skattningarna med Skogforsk modell visualiseras i hprStamhållning återfinns i figur 2. I figuren representerar varje punkt en stam. Diagrammet innehåller data för totalt drygt 5 000 stammar, cirka en månads produktion. På diagrammets x- och y-axel återfinns stammarnas brösthöjdsdiameter respektive mätprecisionen uttryckt som standardavvikelsen för avvikelserna mellan referensmätning av en kvalitetstekniker och skördarens diametermätning. Sambandet mellan trädens brösthöjdsdiameter och standardavvikelsen som tonar fram utifrån punktsvärmen är generellt för alla skördare. Det orsakas av att större stammar är svårare att mäta än de mindre, eftersom de tenderar att ha högre ovalitet, vara tyngre och ha tjockare grenar.



Figur 2. Exempel på hur primära skattningar från Skogforsks modell återges i hprStamhållning i form av sambandet mellan brösthöjdsdiameter och standardavvikelsen för avvikelserna mellan referensmätning av en kvalitetstekniker och skördarens diametermätning. I diagrammet representerar varje punkt standardavvikelsen för en stam.

För att jämföra olika skördare är det lämpligt att generalisera sambandet mellan brösthöjdsdiameter och standardavvikelse med hjälp av en trend- eller regressionslinje. I hprStamhållning kan olika maskiner jämföras på detta sätt, se exempel i figur 3. I diagrammet återfinns regressionslinjer för en slutavverkningsskördare och en kombimaskin. Det inbördes förhållandet mellan regressionslinjerna indikerar att slutavverkningskördaren har en bättre stamhållning (lägre standardavvikelse) än kombimaskinen och att skillnaden mellan maskintyperna ökar i takt med att stammarna blir grövre. På samma sätt som för jämförelsen mellan maskiner är det möjligt i hprStamhållning att inom en maskin jämföra mätprecision för olika trädslag eller mellan olika tidsperioder.

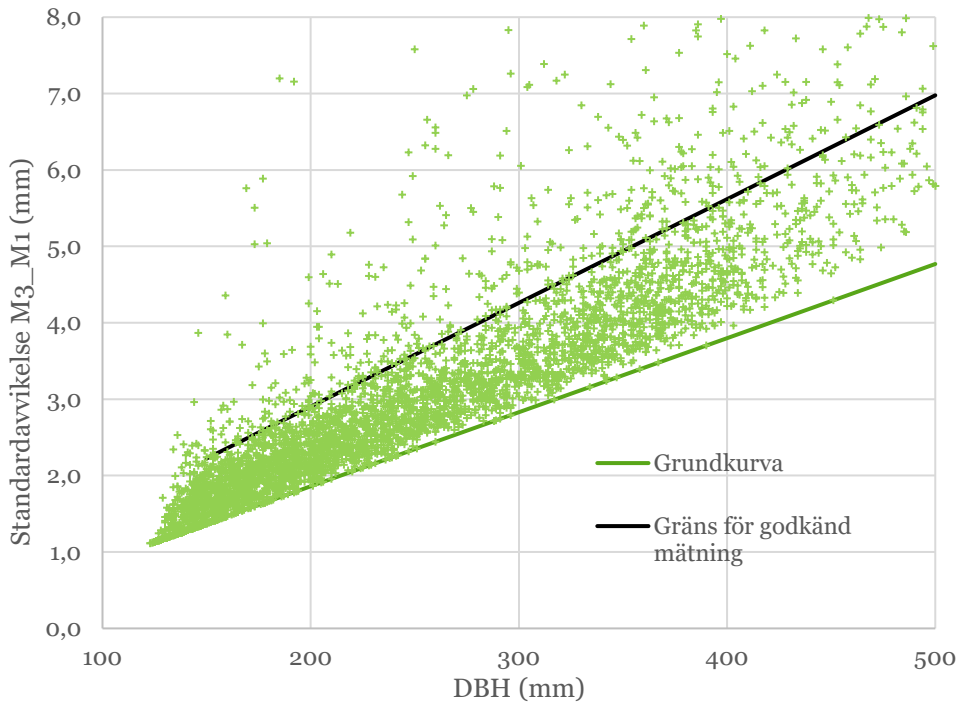


Figur 3. Exempel på hur mätprecisionen kan jämföras mellan skördare i hprStamhållning. Linjerna för de två skördarna i diagrammet representerar regression av brösthöjdsdiameter på standardavvikelsen för avvikelserna mellan referensmätning av en kvalitetstekniker och skördarens diametermätning.

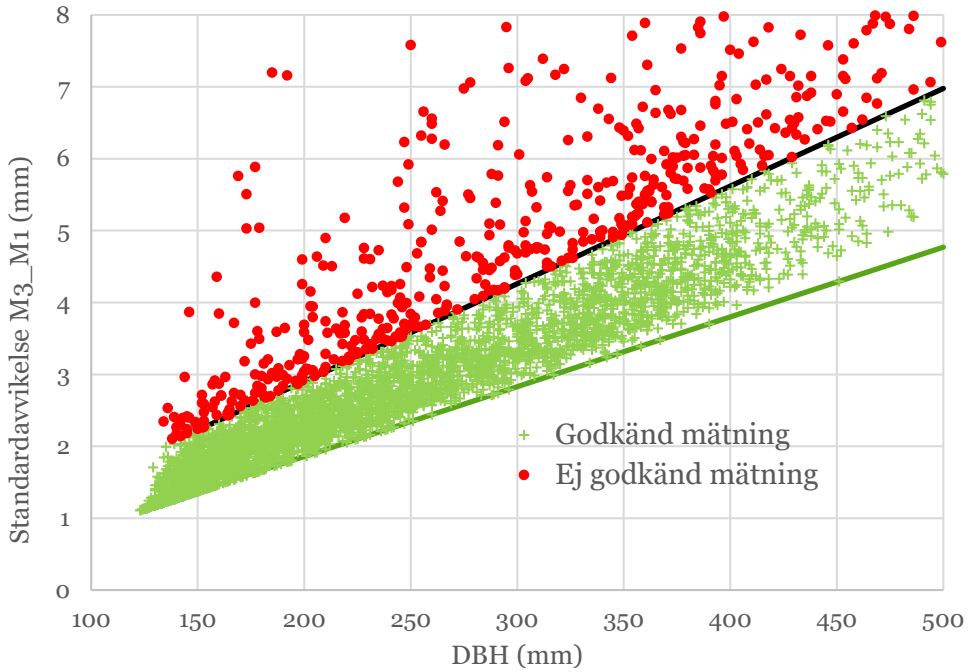
I studien gjordes ansträngningar för att bearbeta de primära skattningarna av mätprecision från Skogforsks modell och uttrycka resultaten i form av nyckeltal. Syftet var att förenkla informationen som presenterades och göra den mer anpassad och lättillgängligare för skördaförare och andra användare av uppföljningsmetodiken. Nedan beskrivs den ansats som användes.

I ett första steg användes den grundkurva som finns i Skogforsks modell och som motsvarar den mätprecision som kan förväntas för stammar som inte har några planområden alls (figur 4), det vill säga en helt ideal diametermätning. Därefter upprättades en linje som beskriver gränsen för vad som kan accepteras som godkänd mätning. Linjen har en nivå som ligger 40 % över nivån för grundkurvan plus 0,3 mm. Linjen upprättades genom att med hjälp av plottar undersöka hur mätprecisionen varierade över tid för de skördare som ingick i studien.

Med hjälp av linjen som representerade gränsen för godkänd mätning klassificerades datapunkterna för de avverkade stammarna som ”godkänd mätning” respektive ”ej godkänd mätning” beroende på om de låg under eller över kurvan för godkänd mätning (figur 5).



Figur 4. Figur som illustrerar ett delsteg vid framtagningen av nyckeltal. Den nedre kurvan (grön linje) representerar grundkurvan från Skogforsks modell, det vill säga stammar med ideal diametermätning där mätdata inte innehåller några planområden. Den övre linjen (svart kurva) representerar den övre nivån för acceptabel mätning.



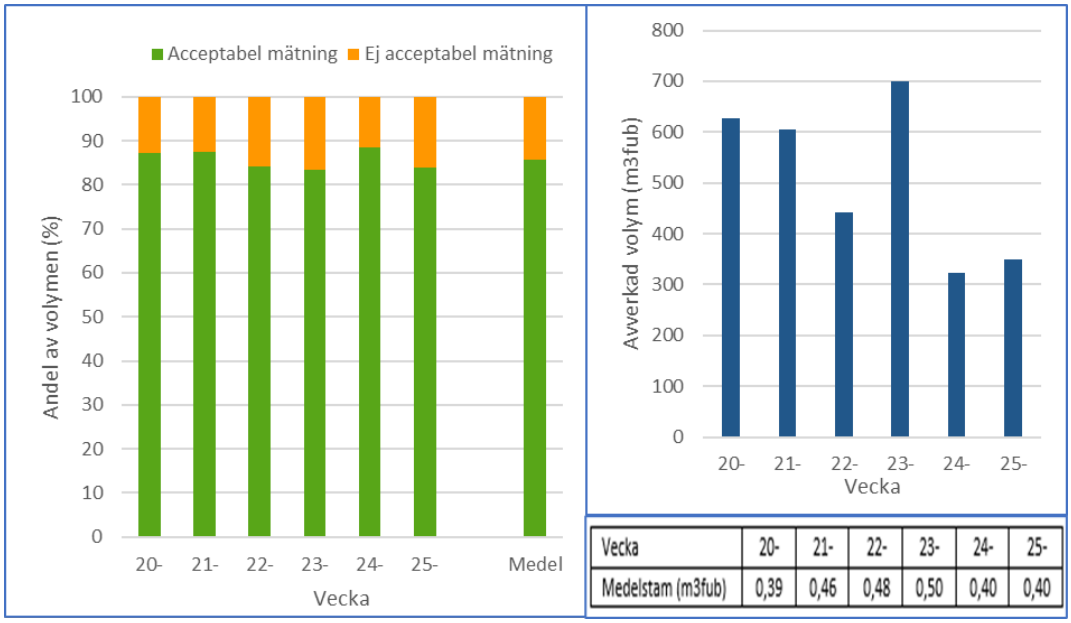
Figur 5. Figur som illustrerar hur datapunkter för enskilda stammar klassificerats som godkänd respektive ej godkänd mätning.

De slutliga nyckeltalen togs fram genom att summera informationen från de klassificerade datapunkterna. Centralt var att beräkna den volymmässiga andelen avverkade stammar med godkänd diametermätning enligt följande:

$$A_Vol_{GM} = \frac{Vol_{GM}}{(Vol_{GM} + Vol_{EGM})} * 100$$

där A_Vol_{GM} är den volymmässiga andelen stammar med godkänd mätning uttryckt i procent, Vol_{GM} är volymen av stammarna med godkänd mätning och Vol_{EGM} är volymen av stammarna med ej godkänd mätning.

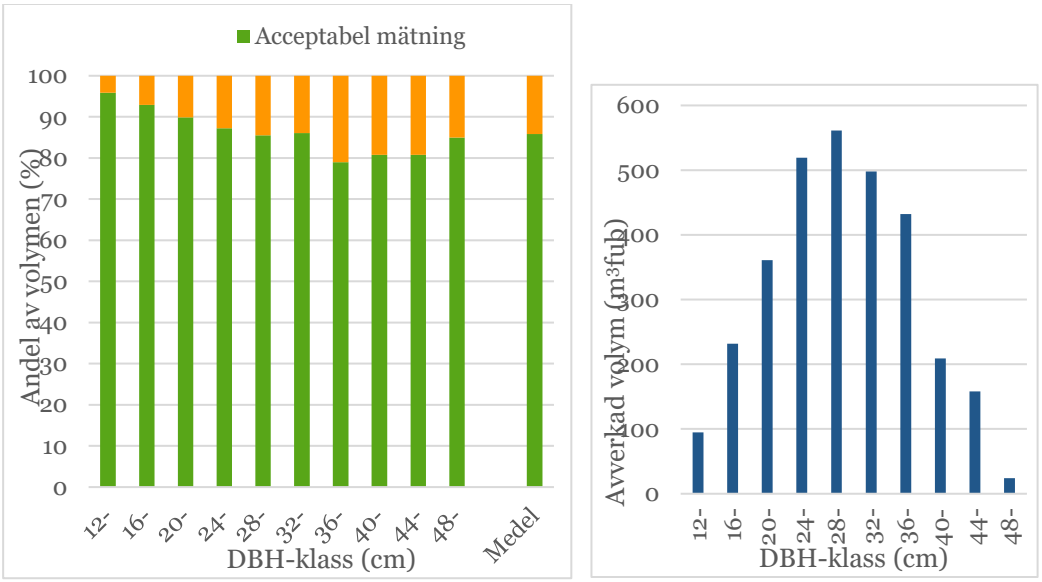
I hprStamhållning presenteras den volymmässiga andelen avverkade stammar med godkänd diametermätning nedbrutet på olika fraktioner. För att belysa utvecklingen över tid innehåller hprStamhållning en resultatflik med information om den volymmässiga andelen stammar med godkänd mätning per vecka (figur 6). I den aktuella resultatfliken presenteras även stödjande information om avverkad volym för motsvarande period. Därtill finns information om aritmetisk medelstam, vilket beroende på typ av skördaraggregat kan ha en betydande inverkan på mätprecisionen.



Vecka	20-	21-	22-	23-	24-	25-
Medelstam (m3fub)	0,39	0,46	0,48	0,50	0,40	0,40

Figur 6. Exempel på nyckeltalsredovisning i hprStamhållning där information om den volymmässiga andelen stammar med godkänd mätning presenteras per vecka samt som volymvägt medeltal över den aktuella tidsperioden (vänster figur). I högra delen av figuren visas stödjande information om avverkad volym respektive aritmetisk medelstam per vecka

Skördaraggregatens förmågan att vidmakthålla en hög mätprecision med ökande storleken på de avverkade stammarna, varierar mellan aggregat. För att belysa effekten av trädstorlek på mätprecisionen i diametermätningen innehåller hprStamhållning en resultatflik med information om den volymmässiga andelen stammar med godkänd mätning per dbh-klass (diameter brösthöjd-klass) (figur 7). Informationen presenteras tillsammans med stödjande information om den avverkade volymens fördelning på dbh-klasser.



Figur 7. Exempel på nyckeltalsredovisning i hprStamhållning där information om den volymmässiga andelen stammar med godkänd mätning presenteras per dbh-klass (vänster figur). I högra delen av figuren visas stödjande information om avverkad volym per dbh-klass.

Deltest kring ”modifierad kvalitetssäkring”

Som en del av studien utfördes inledande tester för att undersöka hur den utvecklade modellen för uppföljning av skördarnas mätprecision kan användas för att förenkla de kontrollmätningar som görs inom ramen för kvalitetsuppföljningssystemet för skördarnas dimensionsmätning. För skördare som är kvalitetssäkrade klavar skördarförarna en slumpad stam per skift. Data från förarens klavning ligger till grund för bestämning av skördarens mätprecision och systematisk avvikelse i diametermätningen. Under testerna var ansatsen att använda Skogforsks modell för att följa mätprecisionen och begränsa förarnas klavning till att enbart följa den systematiska avvikelsen.

Testerna i studien utfördes på en slutavverkningsskördare. På denna maskin minskade föraren ned mängden klavning till cirka en stam per vecka. Stammarna som klavades var ej slumpade utan valda av föraren utifrån aspekten att de skulle vara gynnsamma att mäta för skördaraggregatet. Eftersom stammarna var valda skapades också förutsättningar för att kontrollmätningarna av förarna kunde göras så bra som möjligt, till exempel att stockarna kunde läggas upp på ett gynnsamt sätt.

Resultat och diskussion

Det samlade projektarbetet som bedrivits under ett och ett halvt års tid har genererat en rad värdefulla erfarenheter kring användbarheten av Skogforsks modell för skattning av mätprecision i diametermätningen. De viktigare erfarenheterna beskrivs nedan.

Kontinuerlig uppföljning av den samlade produktionen

Skogforsks modell möjliggör uppföljning av mätprecisionen för skördarens samlade produktion. Detta i kontrast till uppföljning inom dagens kvalitetssäkringssystem som baseras på skördarförarnas klavning på utslumpade stammar. Skillnaden i dataunderlag illustreras i figur 8 där det övre diagrammet visar resultat för en automatiserad uppföljning av en skördare för cirka sex månaders produktion. Totalt omfattar uppföljningen 24 344 stammar. I diagrammet är det generella sambandet mellan brösthöjdsdiameter och standardavvikelsen för avvikelserna mellan referensmätning av en kvalitetstekniker och skördarens diametermätning utritat i form av en streckad svart linje.

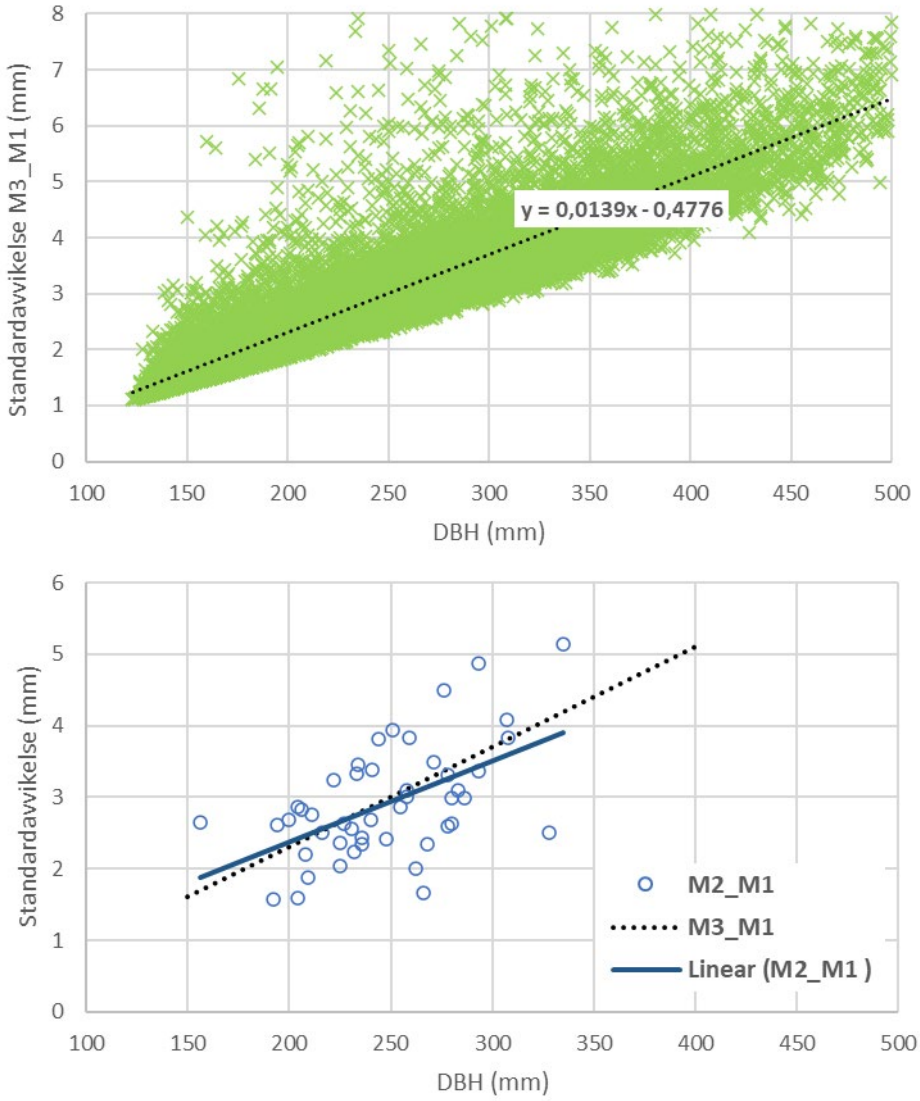
I figurens nedre diagram visas resultat från uppföljning av samma skördare baserat på förarens klavning under samma tidsperiod. Totalt omfattar uppföljningen 47 stammar. I diagrammet är det generella sambandet mellan brösthöjdsdiameter och standardavvikelsen för avvikelsen mellan diameter från förarens klavning och skördarens diametermätning utritat (Linear M2_M1) tillsammans med motsvarande samband från den automatiserade uppföljning (M3_M1). Som framgår av diagrammet ger de två sambanden en mycket likartad bild av skördarens generella mätprecision. De är dock baserade på dataunderlag med radikalt olika storlek.

Exemplet ovan illustrerar möjligheter med automatiserad uppföljning: den genererar stora datamängder som möjliggör snabbare återkoppling och den beskriver mätprecisionen för skördarens *samlade* produktionen. Därigenom bör uppföljningsmetoden ha potential att ersätta/komplettera dagens manuella uppföljning. Det bör dock poängteras att Skogforsks modell enbart ger information om mätprecisionen, information om eventuell systematisk avvikelse fångas inte. Information kopplad till systematisk avvikelse/kalbrering måste inhämtas på annat sätt – i dagsläget med hjälp av manuell klavning.

Olika typer av skördare

I studien samlades data från två olika typer av skördare: rena slutavverkningsskördare respektive ”kombimaskiner”, det vill säga mindre till medelstora skördare som utför såväl gallring som slutavverkning. De skördaraggregat som används för slutavverkningsskördare är konstruerade för att hantera stammar i alla trädstorlekar medan aggregaten för kombimaskiner är framtagna för att hantera företrädesvis mindre till medelgrova stammar.

I figur 9 återges sambandet mellan medelstam och mätprecision för diametermätningen på granar, uttryckt som andel av volymen med godkänd mätning, för gruppen av kombimaskiner och gruppen av slutavverkningsskördare. För respektive skördare utgörs dataunderlaget av sex månaders produktion, med undantag för tre av skördarna där dataunderlaget täckte en något kortare tidsperiod. I Skogforsks modell skattas mätprecisionen enbart för stampartier med diameter ned till 12 centimeter. Detta innebär att stammar med brösthöjdsdiameter under cirka 14 centimeter inte ingår i beräkningen av medelstam.

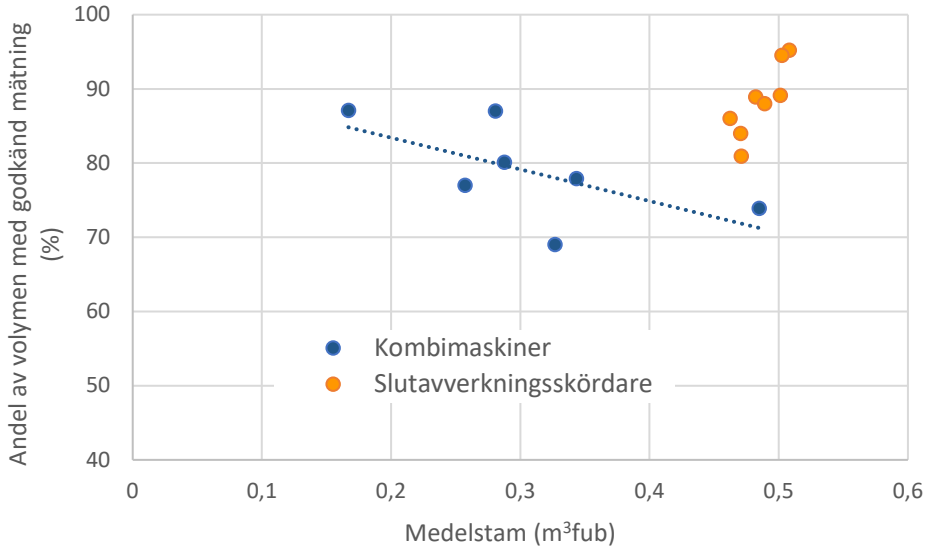


Figur 8. Illustration av uppföljning av mätprecisionen för samma skördares diametermätning baserat på information från Skogforsks modell (övre diagram) respektive förarens klavning (nedre diagram). I båda fallen är data inhämtade från cirka sex månaders produktion.

För gruppen av kombimaskiner fanns en mycket stor spridning i medelstam och en tydlig tendens till försämrad mätprecision med ökande stamstorlek (figur 9). Kring detta generella samband (streckad linje) fanns en betydande variation mellan de enskilda skördarna. Denna variation återspeglar effekter av andra variationskällor, till exempel förarnas körsätt och varierande egenskaper hos den avverkade skogen (se vidare nedan). En ytterligare källa till variation är kopplad till fabrikat för aggregaten. Att närmare studera skillnader mellan olika fabrikat har legat utanför ramen för vår studie. En sådan studie kommer dock att vara möjlig att utföra framöver och då lämpligen baserad på Skogforsks modell och ett stort dataset.

Bland skördarna i gruppen av rena slutavverkningsskördare varierade den volymmässiga andelen avverkade stammar med godkänd diametermätning mellan 81 och 95 % (figur 9). Det var en begränsad variation i medelstam mellan skördarna och för gruppen som helhet fanns ingen tendens till försämrad mätprecision med ökad stamstorlek. Vidare var det uppenbart att gruppen av rena slutavverkningsskördare hade en högre förmåga att åstadkomma god mätprecision än gruppen av kombimaskiner. För

slutavverkningsskördarna var den genomsnittliga volymmässiga andelen avverkade stammar med godkänd mätning 88 % medan motsvarande genomsnittliga värde var 79 % för gruppen av kombimaskiner.



Figur 9. Sambandet mellan aritmetisk medelstam och mätprecision för diametermätningen på granar uttryckt som andel av volymen med godkänd mätning för gruppen av kombimaskiner och gruppen av slutavverkningsskördare.

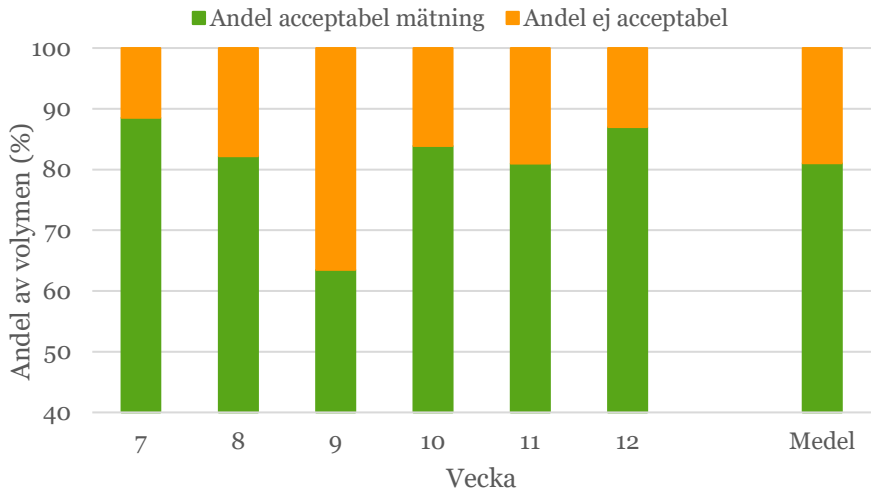
I figur 10 finns ett fördjupat exempel som illustrerar sambandet mellan mätprecision och stamstorlek. I exemplet illustreras förhållandet inom en maskin för en kombimaskin (vänster figur) respektive en slutavverkningsskördare (höger figur). Exemplet illustrerar hur kombimaskinen tappar i mätprecision då stamstorleken ökar medan motsvarande påverkan är begränsad för slutavverkningsskördaren. Exemplet är någorlunda representativt för de två grupperna även om det bör poängteras att sambanden kan se olika ut för skördare inom respektive grupp.

Figur 10. Volymmässig andel avverkade stammar med godkänd mätning per dbh-klass för kombimaskin (vänster figur) respektive ren slutavverkningsskördare (höger figur).

Identifiering av tekniska fel

Dagens skördare avverkar dagligen stora volymer virke. Tekniska fel som påverkar mätningen riskerar därför att ge stora följdverkningar ifall de inte kan upptäckas snabbt. Uppföljning av mätprecisionen i diametermätningen med Skogforsks modell ger möjlighet till sådan snabb detektion. I figur 11 exemplifieras detta med data från en av slutavverkningsskördarna i studien. Veckovis uppföljning indikerade en markant försämring av mätprecisionen under vecka 9. Försämringen berodde på att en givare som registrerar en av de två rörliga kvistknivarnas lägen gått söder. Efter byte av givare återgick mätprecisionen till samma nivå som tidigare.

I studien identifierades den försämrade mätprecisionen genom manuell granskning av resultaten från Skogforsks modell. Implementeras modellen i ett system, till exempel inom Biometrias kvalitetssäkringssystem, bör det dock vara möjligt att utforma algoritmer som automatiskt identifierar avvikelser och larmar när sådana fall uppstår.

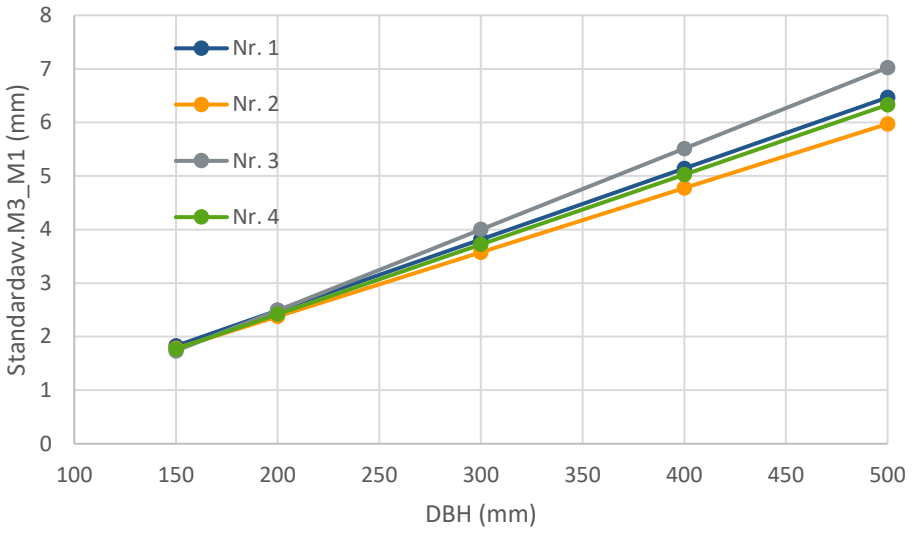


Figur 11. Volymmässig andel avverkade stammar med godkänd mätning per vecka för en slutavverkningsskördare. Försämringen av mätprecisionen under vecka 9 orsakades av en trasig givare till kvistknivarna.

Effekt av egenskaper hos den avverkade skogen

Det har varit ”allmänt känt” bland skördarförare och kvalitetstekniker att egenskaper hos den avverkade skogen har effekt på mätprecisionen i diametermätningen. Denna effekt har dock varit svår att beskriva med data från manuell klavning eftersom variationen inom bestånd kan vara stor och det krävs stora datamängder för att identifiera skillnader. Vår studie indikerar dock att Skogforsks modell har tillräcklig känslighet för att identifiera beståndseffekter på mätprecisionen och nedan ges två exempel.

I figur 12 visas data från fyra objekt avverkade i tidsmässig följd av samma skördare och med samma förare. I figuren redovisas det generella sambandet mellan brösthöjdsdiameter och standardavvikelsen för avvikelsen mellan diameter från en kvalitetsteknikers klavning och skördarens diametermätning per objekt. Linjerna, som är statistiskt åtskilda med en hög grad av säkerhet ($p<0,0001$), indikerar att det finns skillnader i mätprecision mellan objekten.



Figur 12. Objektsvisa samband mellan brösthöjdsdiameter och standardavvikelsen för avvikelserna mellan referensmätning av en kvalitetstekniker och skördarens diametermätning för fyra objekt avverkade med samma skördare och en förare.

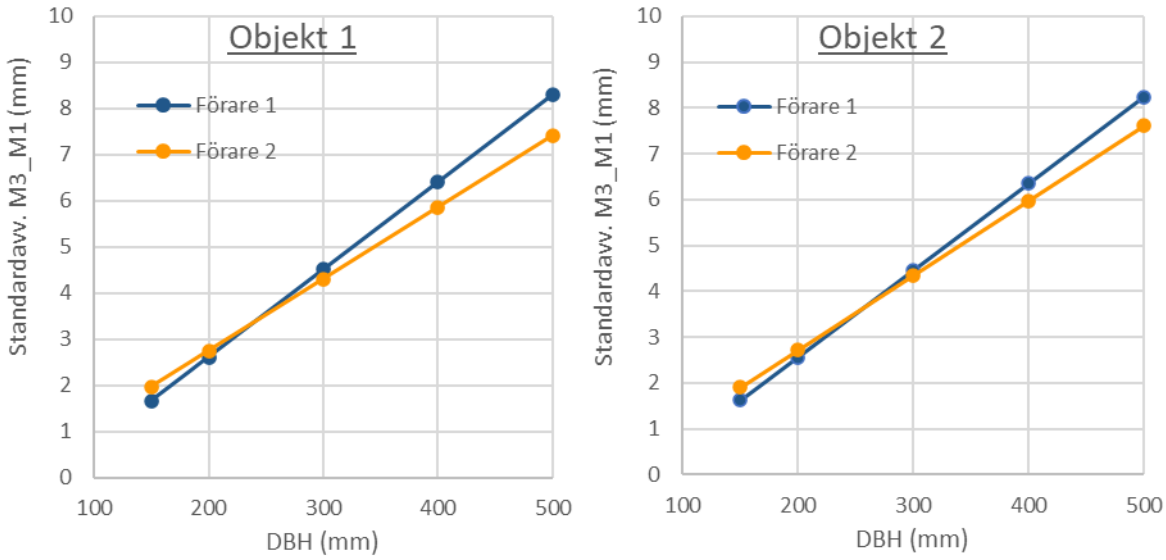
Ett ytterligare exempel återfinns i figur 13. I exemplet är data hämtade från en renodlad slutavverkningsskördare som under studietiden genomgående hade en mycket hög och stabil mätprecision. Dock inträffade en plötslig försämring av mätprecisionen under två veckor (v. 32, 33). Efter samtal med föraren konstaterades att under dessa två veckor avverkade skördaren skog som uppkommit på en före detta mossodling. De avverkade granarna hade växt upp glest, längs diken vilket medfört att de fått grova grenar med stora kvistbulor (figur 14) och därmed var svåra att mäta. Efter att objektet på den före detta mossodlingen avverkats återgick skördarens mätprecision till samma höga nivå som tidigare.

Figur 13. Mätprecision för en slutavverkningsskördare som under två veckor (v. 32, 33) avverkade skog med avvikande egenskaper. Exemplet indikerar att Skogforsks modell har en tillräcklig känslighet för att detektera beståndseffekter på mätprecisionen.

Figur 14. Foto från objektet som avverkades under vecka 32-33 beläget på en förde detta mossodling.

Effekt av förarens körsätt

Genom att använda data från samma skördare som körts av två olika förare är det möjligt att analysera förareffekter på mätprecisionen. I vår studie kördes de olika skördarna nästan uteslutande av enbart en förare. Undantaget utgjordes av en kombimaskin som tidvis kördes av två förare. I figur 15 åskådliggörs mätprecisionen för denna kombimaskin för de två förarna för två objekt. Jämförelsen indikerade att det fanns skillnader i mätprecision mellan förarna och att de två förarna rangordnade sig på samma sätt mellan de två objekten. För båda objekten var skillnaden mellan förarna statistiskt säkerställd med en hög grad av sannolikhet ($p<0,05$).



Figur 15. Samband mellan brösthöjdsdiameter och standardavvikelsen för avvikelserna mellan referensmätning av en kvalitetstekniker och skördarens diametermätning för två objekt som avverkats med två olika förare.

Resultaten indikerar att Skogforsks modell har tillräcklig känslighet för att detektera förareffekter på mätprecisionen. Sådan information bör kunna vara användbar, till exempel vid metodstudier och i utbildningssammanhang.

hprStamhållning

Prototypprogrammet hprStamhållning har varit det huvudsakliga analysverktyget i studien och programmet har successivt utvecklats under studiens gång. Den samlade erfarenheten från de omfattande analyser som genomförts är att programmet har fungerat väl och kan utgöra en värdefull grund för vidare implementering.

En viktig del av utvecklingsarbetet kring prototypprogrammet har varit de ansträngningar som gjorts för att uttrycka resultaten från beräkningarna med Skogforsks modell i form av nyckeltal. Skördarförarna i studien uppskattade dessa nyckeltal och de bidrog till att engagemanget hos skördarförarna ökade. Denna erfarenhet är i linje med tidigare erfarenheter från utvecklingsarbete vid Skogforsk – information som presenteras i uppföljningsverktyg av beslutsstödskaraktär bör vara bearbetad så att den kan uttryckas i lättillgänglig form och gärna färglagd utifrån trafikljuspedagogik.

Deltest kring ”modifierad kvalitetssäkring”

Följande erfarenheter noterades från testen av hur den utvecklade modellen för uppföljning av skördarnas mätprecision kan användas för att förenkla de kontrollmätningar som görs inom ramen för kvalitetsuppföljningssystemet för skördarnas dimensionsmätning.

- Skördaren som användes i testen hade stabil och bra mätning innan testperioden och behöll mätningen på samma höga nivå under testperioden.
- Föraren var mycket positiv till använda Skogforsks modell som grund för att löpande kunna följa mätprecisionen. Det gav trygghet.
- Föraren såg fördelar med att begränsa klavningen till valda stammar där skördaraggregatet haft gynnsamma förutsättningar för mätning. Det minskade risken att felaktiga mätningar från klavningen inkluderades i underlaget för kalibrering.
- Eftersom föraren själv valde stammar fanns en risk att målet om en klavad stam per vecka inte nåddes.
- Kvalitetssäkringen omfattar kontrollmätning av både diameter och längd. När frekvensen klavning minskade till en stam per vecka så minskade frekvensen för kontrollmätningen av längd på samma sätt. Ska frekvensen klavning minskas behöver kontrollmätningen av längd förändras så att mätfrekvensen upprätthålls.

Sammanfattande diskussion

Studien har genererat en rad praktiska erfarenheter som belyser användbarheten av Skogforsks modell för skattning av mätprecision i skördarnas diametermätning. Sammanfattningsvis ger erfarenheterna stöd för att modellen kan bidra på en rad sätt för att förbättra och effektivisera den uppföljning som görs av skördarnas diametermätning. Därtill ger erfarenheterna stöd för att modellen kan användas som grund i fortsatta studier, till exempel metodinriktade studier eller studier av skillnader i mätprecision mellan skördaraggregat av olika fabrikat.

Baserat på modellens teoretiska grund och dess tidigare validering (Hannrup m.fl. 2020) i kombination med de praktiska erfarenheter som genererats i denna studie, drar vi

slutsatsen att modellen kan betraktas som färdig för storskalig implementering i det svenska skogsbruket. En sådan implementering bör kunna leda till en förbättrad diametermätning för skördarna och därmed en ökad förmåga för skogsbruket att producera stockar enligt industrins beställningar.

Litteratur

Aldén, G. Förbättrar en kvalitetssäkring skördarens dimensionsmätning? Examensarbete från Skogsmästarprogrammet. 29 s.

Andersson, M. 2004. Simulering av dimensionsmätare för skördare. Arbetsrapport Skogforsk nr 577, 14 s.

Arlinger, J. & Möller J.J. 2006. Kvalitetssäkring av skördarnas mätning. Resultat från Skogforsk, nr 20. 4 s.

Hannrup, B., Nordström, M., Arlinger, J. & Andersson, M. 2020. Nya uppföljningsverktyg för förbättrad diametermätning i skördare. Arbetsrapport Skogforsk nr 1055, 29 s.

Hugosson, M & McCluskey, D. 2008. Strategy transformations of the Swedish sawmilling sector 1990-2005. Studia Forestalia Suecica, 217. 33 p.

Hyll, K. & Nordström, M. 2021. Kartläggning och utvärdering av mätramar och mätramsmiljöer i sågverk. Arbetsrapport Skogforsk nr 1093, 73 s.

Nordström, M., Arlinger, J., Hannrup, B., Jonsson, R., Jönsson, P. & Möller, J.J. 2018. Virkesvärdestest 2016. Rapport Skogforsk, 48 s.

Nordström, M., Möller, J.J., Hyll, K. & Björklund, L. 2021. Egenskaper och kvalitetsparametrar med relevans för sågtimmer av tall och gran. Arbetsrapport Skogforsk nr 1101, 24 s.