

Nya uppföljningsverktyg för förbättrad diametermätning i skördare

New monitoring tools for improved diameter measurement in harvesters



FOTO: BJÖRN HANNRUP, SKOGFORSK

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	4
Summary	6
Bakgrund	8
Syfte och mål	9
Material och metoder	10
Kartläggning av planområden	10
Naturliga planområden	10
Planområden genererade från skördarnas diamettermätning	11
Karaktärisering av planområden	13
Slutsatser från kartläggning	17
Modellutveckling	17
Framtagning av planområdesparameter	17
Anpassning av slutlig modell	21
Residualanalys och utvärdering av modellens prestanda	22
Resultat och diskussion	24
Medelvärden och parameterskattningar	24
Utvärdering av modellens prestanda	26
Praktisk tillämpning	28
Referenser	29
Bilaga 1. Residualplottar från modellvalidering	30

Förord

Denna rapport är utarbetad inom ramen för projektet ”Nya uppföljningsverktyg för förbättrad diametermätning i skördare”. Projektet har finansierats av medel från Rundvirkestiftelsen, Södras Stiftelse för Forskning, Utveckling och Utbildning samt av rammedel från Skogforsks ramprogram.

Det rikstäckande materialet som använts i studien är framtaget inom ramen för det system som används för kvalitetssäkring av skördarnas dimensionsmätning. De kontrollmätningar av längd och diameter som utgör en viktig del av materialet har utförts av skördarrevisorer verksamma vid virkesmätningföreningarna – idag Biometria.

Planering av studien samt analys och avrapportering har utförts av en arbetsgrupp vid Skogforsk bestående av Mikael Andersson, John Arlinger, Björn Hannrup och Maria Nordström.

Under den inledande fasen av projektet gjorde John Deere och Dasa värdefulla ansträngningar med att utarbeta metodik för insamling av data om mätningsspåverkande faktorer som aggregatsinställningar, signaler från diametergivare och matningsriktning. Svårigheter med att säkerställa ett tillräckligt underlag för modellering i kombination med en successivt ökad tillgång på hqc-filer gjorde dock att vi under projektet fick byta spår för datainsamlingen. Vi vill tacka John Deere och Dasa särskilt för deras engagemang, vilket bidragit till ökad kunskap om vilka faktorer som påverkar mätningen och hur data om dessa faktorer kan samlas in.

Ett varmt tack till alla som bidragit till studiens genomförande!
Maria Nordström (projektledare)

Sammanfattning

Sågverksindustrin skräddarsyr idag i allt högre utsträckning sin produktion till kunden. Detta ställer stora krav på skördarens arbete att göra "rätt från början", det vill säga att kunna leverera stockar med rätt egenskaper i specificerade dimensioner och med minimalt spill. En väl fungerande dimensionsmätning i skördarna är mycket viktig för skogsbrukets förmåga att leverera enligt sågverkens beställningar och indirekt för skogsägarens förtjänst.

En tidigare studie indikerar möjligheter att förbättra mätprecisionen i skördarnas diametermätning genom att arbeta med skördarnas tryckinställningar för kvistknivar och matarvalsar samt med förarnas körstil. För att möjliggöra detta bör dagens uppföljningsverktyg kompletteras med verktyg som ger en mer löpande beskrivning av hur mätprecisionen utvecklas. Ett intressant alternativ för att generera löpande information om mätprecisionen baserat på stora datamängder är att utnyttja förekomsten av så kallade planområden i skördarnas egna mätdata. Planområden är stampartier utan registrerad avsmalning. Till viss del uppkommer dessa då skördaren registrerat felaktiga diametervärden.

Målen med studien var: i) att studera sambanden mellan mätprecision från manuell kontrollmätning och indirekta precisionsmått som genererats från skördarnas egna mätdata för diametermätningen, ii) kartlägga den naturliga förekomsten av så kallade planområden och iii) att utveckla uppföljningsverktyg som möjliggör en löpande uppföljning av skördarnas mätprecision.

Förekomsten av naturligt plana stampartier kartlades utifrån ett material med tomograferade stammar. Motsvarande kartläggning av skördarinducerade planområden gjordes med hjälp av material insamlat från det svenska systemet för kvalitetssäkring av skördarnas dimensionsmätning. Det senare materialet (hqc-data) är rikstäckande och sammansatt av en utslumpad population av stammar för vilka högupplöst data från skördarnas diametermätning registrerats (ett mätvärde per tio cm längs stammarna). Därutöver innehåller materialet data från manuell referensmätning (ett mätvärde per meter) utförd av förarna och skördarrevisorer.

hqc-data insamlat under tidsperioden 2015–2018 användes för att utveckla en modell som med hjälp av skördarnas egna mätdata och en framtagna planområdesparameter predikterade mätprecisionen för skördarnas diametermätning. I datasetet som användes för modellering ingick 4203 tall- och granstammar. Den utvecklade modellen validerades på ett oberoende material med hqc-data, insamlat under 2019 och bestående av 2725 stammar.

Resultaten från studien kan sammanfattas enligt följande:

- Kartläggningen av planområden visade att bland planområden som genereras från skördarnas diametermätning ingår naturliga planområden *tillsammans* med planområden som genererats av felaktig diametermätning från skördaren. För längre planområden (> 50 cm) utgjordes cirka hälften av områdena av naturligt plana områden, medan resterande del var inducerade från felaktig mätning i skördarna.
- Den framtagna planområdesparametern, summerad triangelarea, gav ett kvantitativt mått på hur mycket respektive planområde bidrog till försämrade mätprecision. Parametern inkluderade information om planområdenas längd och aktuell avsmalning i stammen. Parametern bedöms ha förmåga att i hög grad särskilja naturligt plana områden från planområden som är inducerade av felaktig mätning i skördarna.
- En ny modell utvecklades som predikterade skördarnas mätprecision för varje stam, uttryckt som standardavvikelsen för avvikelserna mellan revisorsmätt och skördarmätt diameter. Modellens oberoende variabler utgjordes av planområdesparametern summerad triangelarea samt stammens brösthöjdsdiameter, det vill säga mätdata genererade från skördarens egen mätning.
- Resultaten från valideringen på det oberoende datasetet visade att den utvecklade modellen var kapabel att skatta skördarnas mätprecision i diameter mätningen med ett försumbart systematiskt fel. Modellens tillfälliga fel (RMSE) uppgick till cirka 1 mm. Det tillfälliga felet från modellen var något högre men i nivå med det fel som uppkommer då skattningen av skördarnas mätprecision baseras på förarnas klavning.

Sammanfattningsvis har studien bidragit med en modell som möjliggör löpande uppföljning av skördarnas mätprecision för diametermätningen. I rapporten diskuteras potentiella tillämpningar av detta resultat.

Summary

Sawmills are increasingly tailoring production to customer requirements, so it is important that harvesters can produce logs with the right properties, in specified dimensions and with minimal waste. Accurate dimension measurement in harvesters is vital for the forestry industry's capability to deliver wood according to sawmill orders, and indirectly for the forest owner's profit.

An earlier study indicated how precision in harvesters' diameter measurement could be improved by using the pressure settings for delimbing knives and feed rollers, and through operator technique. Consequently, existing follow-up tools should be supplemented with tools that enable continual monitoring of changes in measurement precision.

An interesting alternative for generating continual information about measurement precision, based on large quantities of data, is to utilise the occurrence of 'flat areas' in the harvester's own measurement data. The flat areas are stem sections with no recorded tapering. To a certain extent, these areas occur when the harvester has recorded incorrect diameter values.

The aims of the study were: i) to examine the association between the precision generated by manual control measurement and precision obtained indirectly from the harvester's own diameter measurement data, ii) to map the natural occurrence of 'flat areas', and iii) to develop tools that enable continual monitoring of the harvester's measurement precision.

The occurrence of naturally flat stem sections was mapped using tomography data for stems. The corresponding survey of harvester-induced flat areas was carried out using data collected from the Swedish system for quality assurance of harvesters' dimension measurement. This hqc-data is nationwide and compiled from a random population of stems for which high-resolution data from the harvesters' diameter measurement is recorded (one measurement per 10 cm along the stems). The material also includes data from manual reference measurements (one measurement per metre) carried out by operators and harvester auditors.

A model was developed, based on hqc-data collected during the period 2015-2018. The model used the harvesters' own measurement data and a flat area parameter developed in the study, and predicted the measurement precision of the harvesters' diameter measuring. The dataset used in the modelling comprised 4203 pine and spruce stems. The model was validated against independent hqc-data, collected in 2019, comprising 2725 stems.

The results from the study can be summarised as follows:

- Among flat areas generated from the harvesters' diameter measurement, natural flat areas were included *together* with the flat areas generated by incorrect diameter measurement from the harvester. For longer flat areas (> 50 cm), approximately half comprised areas of naturally flat areas, while the remainder were induced from incorrect measurement in the harvesters.
- The flat area parameter, total triangle area, gave a quantitative measure of how much each flat area contributed to reduced precision in diameter measurement. The parameter included information about the length and actual tapering in the stem in the flat areas. Our assessment is that the parameter has great capability to distinguish between natural flat areas and flat areas induced by incorrect measurement in the harvesters.
- A new model was developed that predicted the harvesters' measurement precision for each stem, expressed as the standard deviation between auditor-measured and harvester-measured diameter. The model's independent variables comprised the flat area parameter (total triangle area) and the stem's breast height diameter, i.e. measurement data generated from the harvester's own measurement.
- The validation against the independent dataset showed that the developed model could estimate the harvesters' precision in diameter measurement with a negligible systematic error. The root mean square error (RMSE) of the model was approximately 1 mm. This RMSE was slightly higher, but generally at a level similar to the error that occurs when an estimate of the harvesters' measurement precision is based on calliper measurement by the operator.

The study has contributed a model that enables continual monitoring of harvesters' precision when measuring diameter. Possible applications of these results are discussed in the report.

Bakgrund

Den svenska skogen representerar ett stort ekonomiskt värde, såväl för skogsägare som för den virkesförbrukande industrin. Sågverksindustrin har transformerats sedan 90-talet så att man idag i allt högre utsträckning skräddarsyr sin produktion till kunden (Hugosson & McCluskey 2008; Ågren m. fl. 2017). Ett resurseffektivt och värdeskapande skogsbruk förutsätter därför precision i utförandet, vilket ställer stora krav på skördarens arbete att göra ”rätt från början”, det vill säga att kunna leverera stockar med rätt egenskaper i specificerade dimensioner och med minimalt spill. I skördarna mäts längd och diameter kontinuerligt längs stammarna och denna mätinformation utgör grundbulten för optimeringen av stammarnas uppdelning till stockar. En väl fungerande dimensionsmätning i skördarna är därmed avgörande för skogsbrukets förmåga att leverera enligt sågverkens beställningar och indirekt för skogsägarens förtjänst och lönsamheten i den trämekaniska värdekedjan, eftersom råvaran utgör sågverkens helt dominerande kostnadspost (Lindman 2005).

I skördarna mäts diametern med berörande teknik utifrån information från givare placerade i kvistknivar eller matarvalsar. Mätprecisionen för sådana mätsystem styrs av ett antal faktorer. I en nyligen genomförd studie har några underliggande faktorer påverkan studerats utifrån data insamlade från åtta slutavverkningsskördare som följts under en längre tidsperiod (Nordström & Hannrup 2017). Resultaten indikerade; i) att förarens körstil hade en stark påverkan, ii) att det inom skördare fanns ett starkt samband ($R^2=0,95$) mellan tryckinställningarna för det mätande organet (kvistknivar eller matarvalsar) och mätprecisionen samt iii) att det för gruppen av skördare som följdes var möjligt att förbättra mätprecisionen med 25 procent genom att förändra tryckinställningarna. Sammanfattningsvis indikerar studien att det bör finnas goda möjligheter att förbättra mätprecisionen genom att arbeta med skördarnas tryckinställningar, förarnas körstil samt samspelet mellan dessa två faktorer.

Nya verktyg för att förbättra skördarnas diametermätning bör utgå från och komplettera de existerande mätningsbefrämjande verktyg som används idag. Många slutavverkningsskördare använder ett kvalitetssäkringssystem för diametermätningen (Arlinger & Möller 2006), vilket utgör ett kraftfullt verktyg för att följa och förbättra mätningen (Aldén 2013). I systemet gör förarna en egenkontroll av mätprecisionen utifrån manuella kontrollmätningar på cirka en utslumpad stam/skift vilket ungefär motsvarar en kontrollstam per 650 avverkade stammar. Detta ger en bra bild av skördarens mätprecision över tid. För att snabbt kunna identifiera avvikelser i skördarens mätprecision bör denna uppföljning dock kompletteras med uppföljningsverktyg som ger en mer löpande beskrivning av hur mätprecisionen utvecklas och till exempel medger att mätprecisionen kan följas upp per diameterklass för kortare tidsperioder.

Ett intressant alternativ för att generera löpande information om mätprecisionen baserat på stora datamängder är att utnyttja skördarnas egna mätdata. Data från studien av Nordström & Hannrup (2017) indikerade ett starkt, negativt, icke-linjärt samband mellan mätprecisionen för diametermätningen utifrån manuell kontrollmätning och ett beräknat stamhållningsmått, det vill säga ett mått genererat från skördarens lagrade diametervärden, vilket beskriver förekomsten av stampartier där stammen sannolikt inte legat an mot de mätpunkter som utnyttjas i diametermätningen. Sambandet bör verifieras i vidare studier, men kan det visas vara allmängiltigt bör det vara mycket värdefullt för att utveckla uppföljningsverktyg som underlättar för förare att i realtid identifiera avvikelser i mätprecision samt för servicetekniker att justera tryckinställningarna på de enskilda maskinerna. För att detta ska kunna realiseras krävs dock att riktade utvecklingsinsatser genomförs.

Syfte och mål

Det övergripande syftet med projektet var att utveckla uppföljningsverktyg som ger löpande information om mätprecisionen för skördarnas diamettermätning.

Projektet har utgjorts av följande delmål:

- att studera sambanden mellan mätprecision från manuell kontrollmätning och indirekta precisionsmått som andel planområde och stamhack, det vill säga stamhållningsmått som genererats från skördarnas egna mätdata för diamettermätningen.
- att utifrån rikstäckande data från tomograferade stammar kartlägga den naturliga förekomsten av planområden.
- att baserat på resultaten från ovanstående analyser utveckla uppföljningsverktyg som möjliggör en löpande uppföljning av skördarnas mätprecision. Förarstödet ska integreras i Skogforsks programvara "Virkesvärde".

Förväntade resultat på kort sikt kopplar till projektmålen till exempel att sambanden mellan mätprecision från manuell kontrollmätning och indirekta precisionsmått ska bli väl beskrivna samt att den/de varianter av stamhållningsmättet som maximerar detta samband ska kunna identifieras.

Förväntade resultat på längre sikt är att vidareutvecklade varianter av det framtagna förarstödet ska användas för att förbättra tryckinställningar för kvistknivar/matarvalsar, för att uppmärksamma och utbilda förare kring körstilens betydelse för mätprecisionen samt inom kvalitetssäkringssystemet som ett komplement till nuvarande mätningar. Sammantaget förväntas det bidra till en förbättrad mätprecision för skördarnas diamettermätning.

Material och metoder

Ett centralt begrepp i studien är ”planområde”, det vill säga stampartier där skördarens registrerade diametervärden är oförändrade och inte, som i normalfallet, minskar i riktning från rot mot stammens topp. Sådan partier kan vara naturligt plana områden men ifall de är längre utgörs de ofta av partier med ”felaktig” diametermätning, där de berörande mätande organen (kvistknivar/matarvalsar) inte legat an mot stammen. Att diametervärdena i den senare typen av planområden är oförändrade beror på den minvärdesfiltrering som sker i skördarna, det vill säga eventuellt stigande diametermått mot toppen accepteras inte utan ersätts av föregående mått tills ett minskande mått registrerats.

Studien var uppbyggd av två delar: en inledande del där förekomsten av naturliga och skördarinducerade planområden kartlades och en efterföljande del där ansträngningar gjordes för att etablera samband mellan skördarnas mätprecision för diametermätning direkt uppmätt med hjälp av manuell kontrollmätning och motsvarande mätprecision indirekt skattad från parametrar som beskriver förekomsten av planområden. Delstudierna beskrivs närmare nedan.

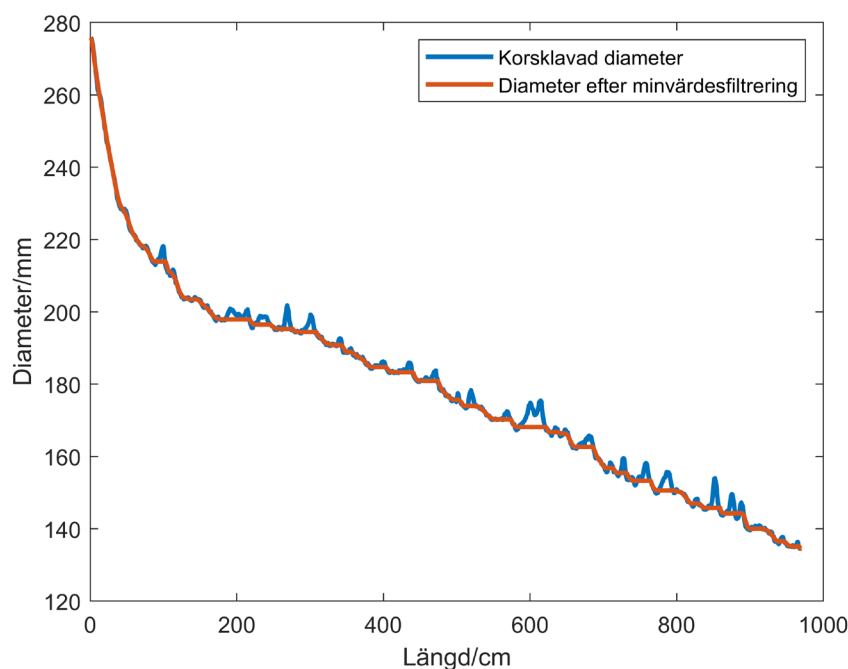
KARTLÄGGNING AV PLANOMRÅDEN

Naturliga planområden

Vid kartläggningen av förekomsten av naturliga planområden användes material från de svenska tall- (Grundberg m.fl. 1995) och granstambankerna (Björklund m.fl. 1998). Både tall- och granstambanken utgörs av rikstäckande material bestående av cirka 200 slutavverkningsmogna träd från SLU:s fasta försöksytor, det vill säga skötta provytor med känd historik. Från varje försöksyta ingår två mindre, två medelstora och två stora träd och ytorna representerar olika föryngringsmetoder, skötselhistorik, ståndorter och geografiska lägen.

Samtliga träd i stambanken har mätts in noggrant i fält och därefter röntgats i en medicinsk röntgen vid Luleå tekniska universitet i Skellefteå. För tall togs röntgenbilder varje cm längs stammen i kvistvarven och var fjärde cm mellan kvistvarven. För gran var intervallet mellan röntgenbilderna genomgående en cm. Bilder togs från roten av trädet till gränsen mellan timmer och massaved motsvarande en diameter på cirka 14 cm.

För träden i stambankerna beräknades diametermått längs stammarna enligt tidigare använd metodik (Andersson 2004), vilket resulterade i detaljerade diameterprofiler längs stammarna (Figur 1). Det vågformade mönster som uppkommer i diameterprofilerna längs stammarna (Figur 1) återspeglar den diameterökning som oftast uppkommer vid kvistvarv. För att efterlikna skördarnas diameterprofiler minvärdesfiltrerades därefter de beräknade diametervärdena. Detta innebar att planområden bildades för stampartier som innehöll ökande diametervärden (Figur 1). För att möjliggöra efterföljande analys av populationen naturliga planområden karaktäriserades samtliga planområden som var längre än tio cm med avseende på längd, aktuell diameter och läge i stammen.



Figur 1. Exempel på diameterprofil för en granstam från stambanken. Blå linje representerar diametervärden från mätning varje cm längs stammen. Röd linje representerar den diameterprofil som uppkommer efter minvärdesfiltrering av de mätta värdena, det vill säga en filtrering där ökande diametermått i riktning mot toppen av stammen inte accepteras utan ersätts av föregående mått tills ett minskande mått registrerats.

Planområden genererade från skördarnas diamettermätning

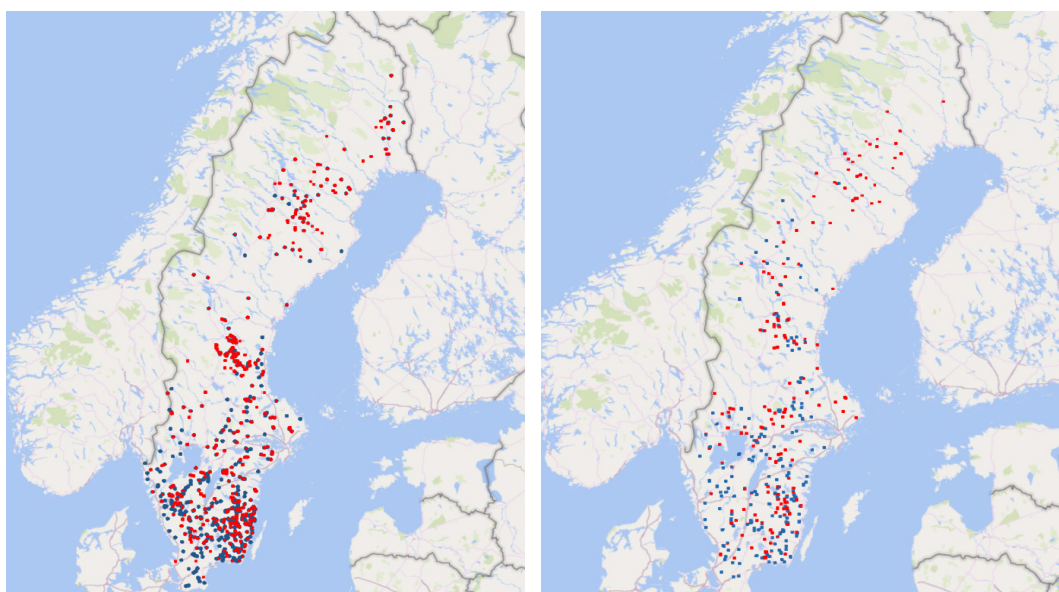
För att studera hur indirekta mått genererade från planområdesparametrar kan användas för att beskriva precisionen för skördarnas diamettermätning utnyttjades material från det svenska systemet för kvalitetssäkring av skördarnas dimensionsmätning (Arlinger & Möller 2006). I systemet kontrollerar maskinförarna längd och diameter på en utslumpad population av de avverade träden, normalt ett till två träd per arbetsskift. På en mindre delmängd av dessa stammar görs en förnyad kontrollmätning i form av en tredjepartskontroll. Denna kontrollmätning utförs i normalfallet av skördarrevisorer, det vill säga utbildade virkesmätare, verksamma vid någon av landets virkesmätningsföreningar, numera Biometria.

Maskinförarnas och skördarrevisorerens kontroll av diamettermätningen sker i form av korsklavning. Klavningen utförs varje meter längs stammarna samt i toppändan på samtliga stockar. Data från kontrollmätningen lagras tillsammans med skördarnas mätning i ett standardiserat dataformat, vilket följer standarden för kommunikation mellan datorer i skogsmaskiner, StanForD (Arlinger & Möller 2020). I den senaste versionen av standarden, StanForD 2010, lagras data från skördarnas diamettermätning i en högupplöst vektor motsvarande ett mätvärde per tio cm längs stammarna. Detta möjliggör att en detaljerad stamvis analys av planområdesparametrar kan göras, vilket inte var fallet tidigare då enbart mätdata motsvarande mätpunkterna från den manuella mätningen lagrades.

Skogforsk har för forskningsändamål under de senaste åren systematiskt byggt upp en databas med data från skördare (Arlinger m. fl. 2018). I studien utnyttjades den del av denna databas där data från kontrollmätningarna finns samlade, så kallade hqc-meddelanden (harvester quality control). Denna informationsmängd erbjuder en unik

möjlighet att på ett rikstäckande material med utslumpade stammar knyta data från noggranna manuella referensmätningar av diameter till detaljerad mätinformation från skördarna.

I studien delades den totala mängden hqc-data i två delar. Data för tidsperioden december 2015 till januari 2019 användes för att utveckla en modell som utifrån plan-områdesparametrar syftade till att prediktera mätprecisionen för skördarnas diametermätning. Mätdata insamlade under tidsperioden februari 2019 till januari 2020 användes för att validera den framtagna modellen. I de två dataseten inkluderades enbart stammar där kontrollmätning hade genomförts av skördarrevisor, det vill säga stammar som enbart hade diametermått från maskinen och föraren exkluderades. I båda dataseten var stammarna fördelade över hela landet (Figur 2).

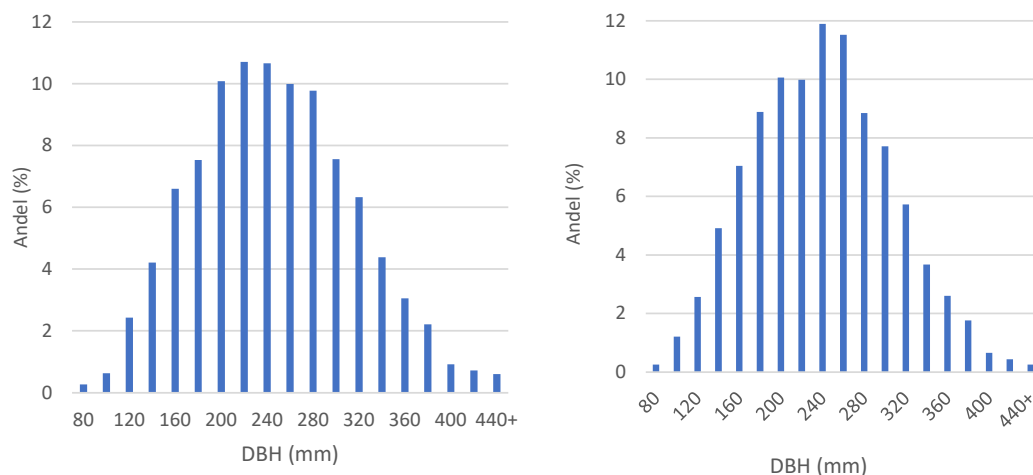


Figur 2. Geografisk fördelning för stammarna som ingick i datasetet som användes för modellutveckling (vänster figur), respektive validering (höger figur). Röda kvadrater indikerar tallstammar och blå kvadrater granstammar.

I datasetet som användes för modellutveckling ingick 4203 stammar där 42 respektive 58 procent utgjordes av tall- och granstammar (Tabell 1). Motsvarande fördelning för de 2725 stammarna i datasetet som användes för validering var 38 procent tall och 62 procent gran. Genomsnittlig brösthöjdsdiameter för stammarna var 246 mm med en spännvidd från 76 till 493 mm (Figur 3). För stammarna i valideringsdatasetet var den genomsnittliga brösthöjdsdiametern 239 mm med en spännvidd från 82 till 458 mm (Figur 3). Tre styrsystem var representerade fördelade på Dasa Forester (20 procent), MaxiXplorer (33 procent) och Timbermatic (47 procent). Motsvarande fördelning i valideringsdatasetet var Dasa Forester (17 procent), MaxiXplorer (35 procent), Timbermatic (47 procent) samt LogMate (<1 procent) och Ponsse (<1 procent).

Tabell 1. Använd tidsperiod (år, månad) samt antal stammar, skördare och styrsystem för dataseten som användes för modellutveckling respektive validering.

Dataset	Tidsperiod	Antal stammar	Antal skördare	Antal styrsystem
Modellutveckling	1512–1901	4203	234	3
Validering	1902–2001	2725	284	5

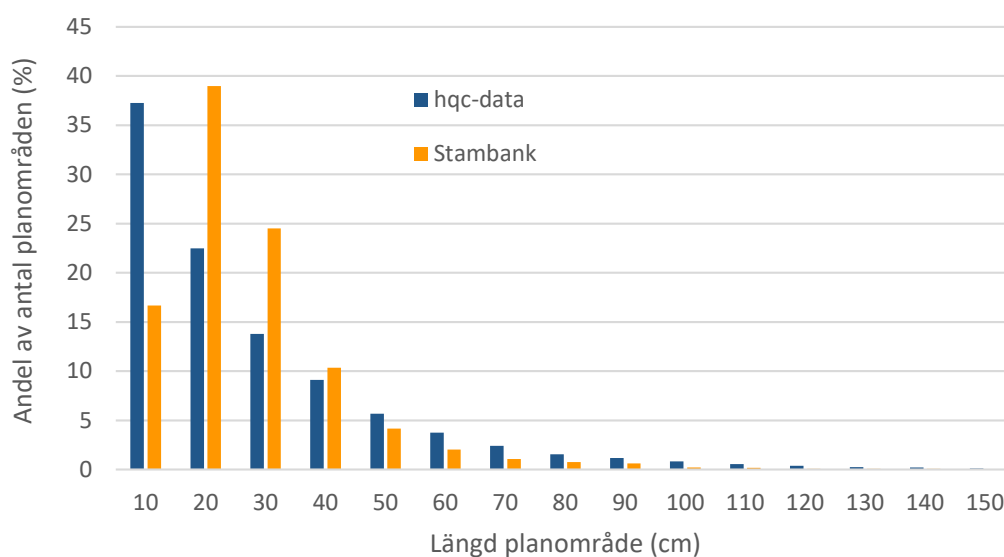


Figur 3. Fördelning av brösthöjdsdiameter för stammarna i datasetet som användes för modellutveckling (vänster figur) respektive validering (höger figur).

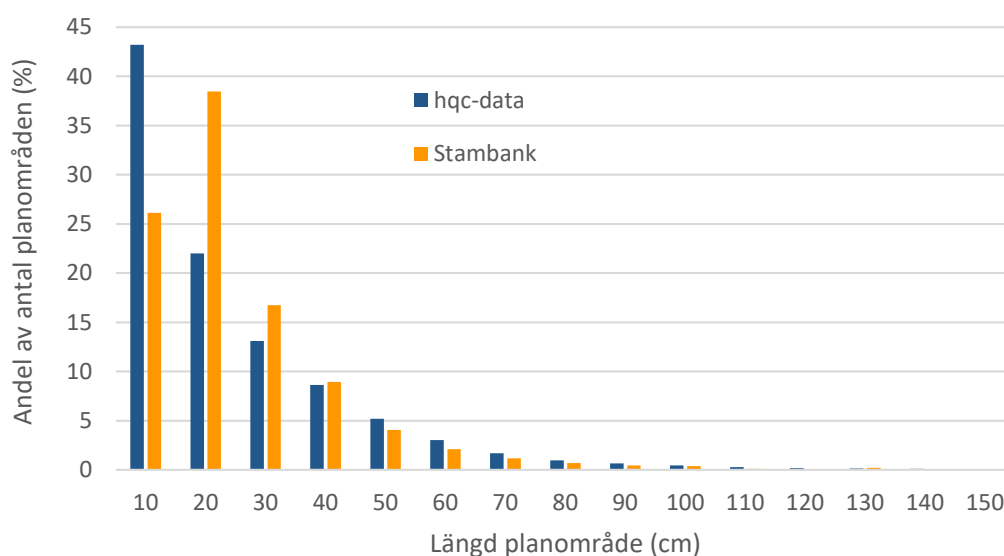
Karaktärisering av planområden

För materialet med stamvisa vektorer med diametervärden från skördarnas mätning gjordes inledningsvis motsvarande beräkningar som för stambanksmaterialet, det vill säga samtliga planområden som var längre än tio cm identifierades och karaktäriserades med avseende på längd, aktuell diameter och läge i stammen.

Fördelningen för planområdenas längder var något olika för planområden beräknade för materialet från diametermätningen från skördarna respektive stambanksmaterialet. För planområden beräknade för materialet från skördarnas diametermätning var de allra kortaste planområdena (tio cm) vanligast förekommande medan motsvarande topp för planområdena från stambanksmaterialet inträffade något senare vid 20 cm (Figur 4 och 5). För båda materialen avtog därefter andelen planområden exponentiellt med ökande planområdeslängd vilket resulterade i att längre planområden, exempelvis planområden längre än 100 cm, utgjorde en mycket begränsad del av det totala antalet planområden (<1 procent). I stambanksmaterialet var de kortare planområdena, som var de vanligast förekommande, starkt förknippade till den diameterökning som uppkommer vid kvistansvällningar (Figur 1).



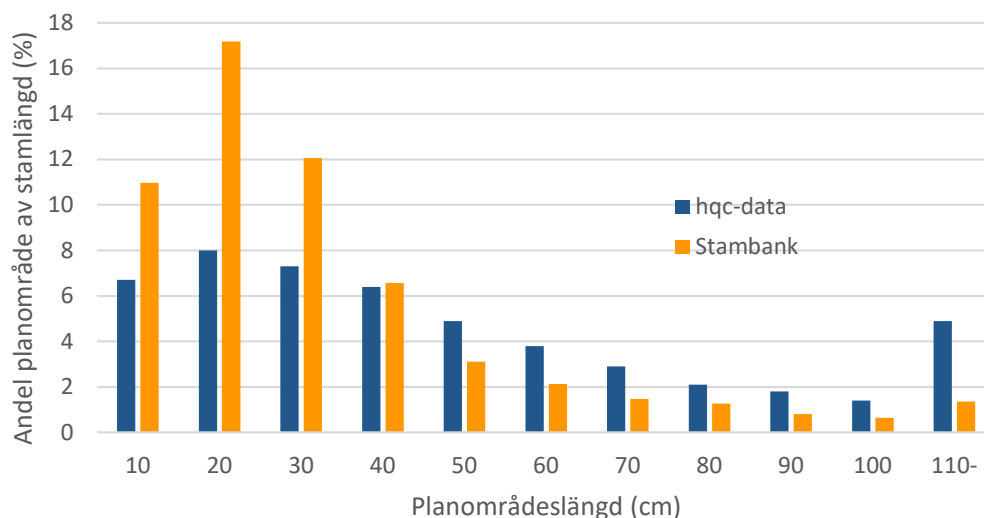
Figur 4. Tall. Antalsmässig fördelning av planområden per längdklass för planområden beräknade utifrån data från skördarnas diametermätning respektive stambanksmaterialet.



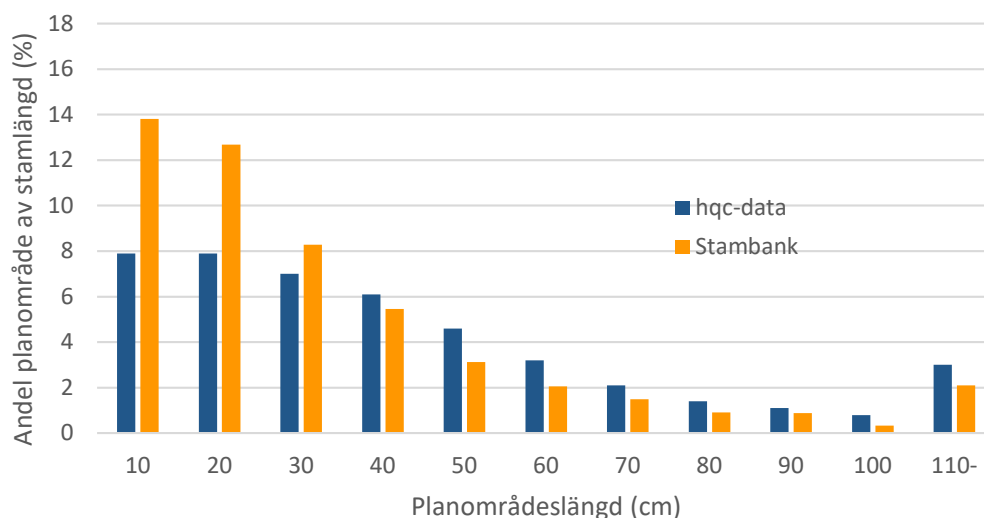
Figur 5. Gran. Antalsmässig fördelning av planområden per längdklass för planområden beräknade utifrån data från skördarnas diametermätning respektive stambanksmaterialet.

I figur 6 och 7 redovisas hur stor andel planområde med varierande längd utgjorde av den totala stamlängden för planområde beräknade för materialet från skördarnas diametermätning respektive stambanken. I jämförelse med stambanksmaterialet var planområden beräknade från materialet med diametermätning från skördare överrepresenterade när det gäller planområden längre än 40–50 cm medan det omvända gällde för kortare planområden. I studien betraktas nivån på förekomsten av planområden från stambanksmaterialet som en skattning av förekomsten av naturliga planområden. Den högre förekomsten av längre planområden i materialet från skördarnas diametermätning tolkas

som en effekt av felaktig diametermätning där de mätande organen inte legat an mot stammen. På samma sätt tolkas den lägre förekomsten av kortare planområden i skördarnas data som en effekt av att skördarnas mätsystem för diametermätning inte förmått registrera de kortaste planområdena.



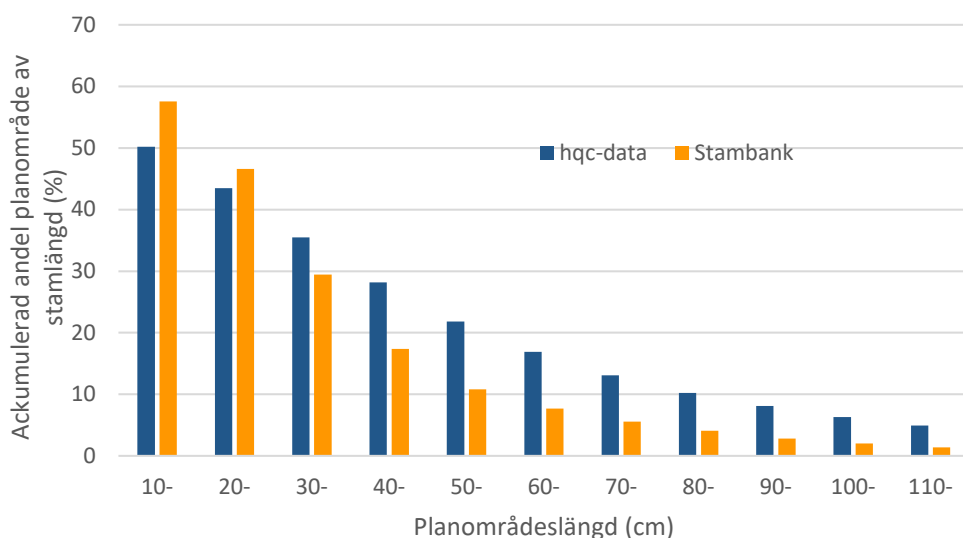
Figur 6. Tall. Andel planområden av total stamlängd för planområden av varierande längd beräknade utifrån data från skördarnas diametermätning respektive stambanksmaterialet.



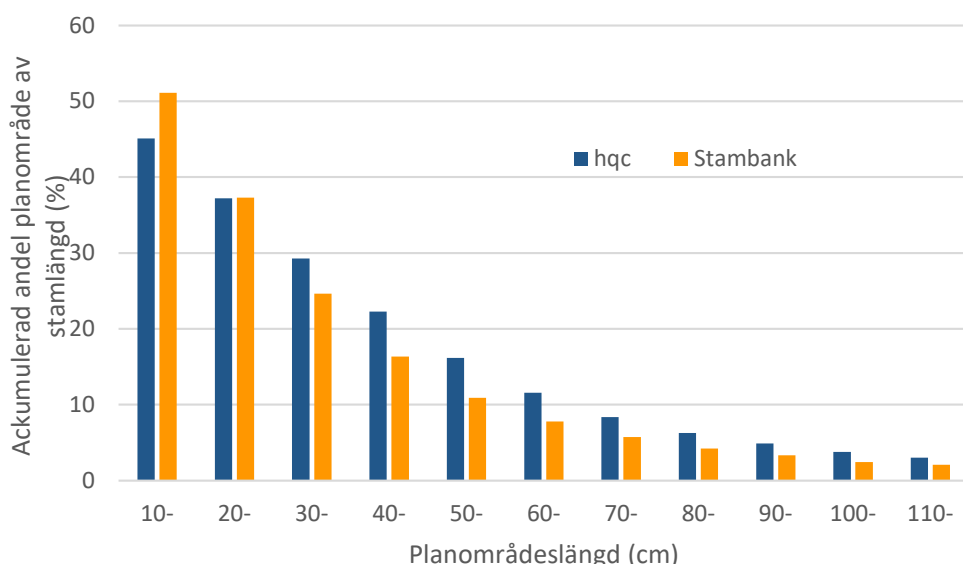
Figur 7. Gran. Andel planområden av total stamlängd för planområden av varierande längd beräknade utifrån data från skördarnas diametermätning respektive stambanksmaterialet.

För att illustrera hur stor andel av stamlängden som planområden av olika längd utgjorde ackumulerades den totala planområdeslängden räknat från de längsta planområdena. Utifrån data från skördarnas diametermätning och stambanksmaterialet utgjorde till exempel planområden med längden 50 cm eller längre, 22 respektive 11 procent för tall (Figur 8) medan motsvarande siffror för gran var 16 respektive 11 procent (Figur 9). För stambanksmaterialet var den ackumulerade andelen planområden mycket lika mellan tall

och gran för planområden som var 40 cm eller längre. För data från skördarnas diametermätning var den ackumulerade andelen planområden genomgående högre för tall än för gran, framförallt för längre planområden. För tall var det alltså större skillnad mellan förekomsten av naturliga planområden och förekomsten av planområden utifrån mätdata från skördarna än för gran. Skillnaden mellan trädslagen tolkas som att det är vanligare att skördarna inducerar planområden på grund av felaktig diametermätning för tall än för gran.



Figur 8. Tall. Ackumulerad andel planområden av total stamlängd för planområden av varierande längd beräknade utifrån data från skördarnas diametermätning respektive stambanksmaterialet. Ackumulering har skett från höger, det vill säga den ackumulerade andelen för en viss planområdeslängd inkluderar även de planområden som har en högre planområdeslängd.



Figur 9. Gran. Ackumulerad andel planområden av total stamlängd för planområden av varierande längd beräknade utifrån data från skördarnas diametermätning respektive stambanksmaterialet. Ackumulering har skett från höger, det vill säga den ackumulerade andelen för en viss planområdeslängd inkluderar även de planområden som har en högre planområdeslängd.

Slutsatser från kartläggning

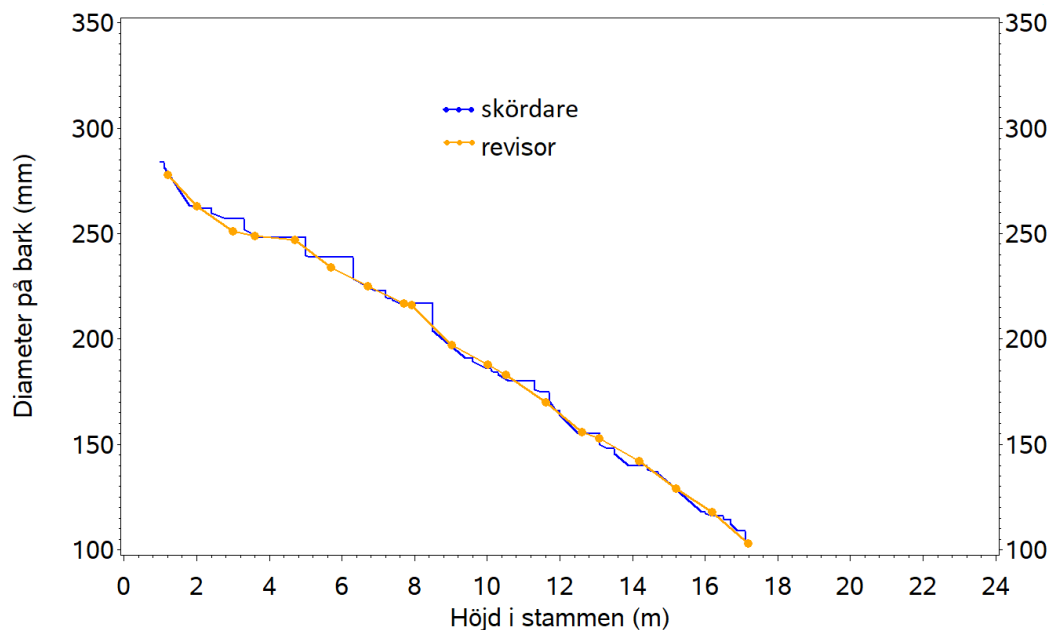
I studien användes kartläggningen av förekomsten av planområden som en grund för att utveckla en modell som predikterar skördarnas mätprecision utifrån planområdesparametrar. Utifrån kartläggningen dras följande slutsatser med relevans för modelleringsarbetet:

1. I populationen planområden som genereras från skördarnas diamettermätning ingår naturliga planområden, det vill säga stampartier med obefintlig avsmalning *tillsammans* med planområden som genererats av felaktig diamettermätning från skördaren. En modell som använder planområdesparametrar för att prediktera skördarnas mätprecision bör ha förmåga att hantera denna sammansättning, eftersom det enbart är den senare delen som ger upphov till försämrad mätprecision.
2. Det är de längre planområdena som är överrepresenterade i skördarnas diamettermätning jämfört med stambanksmaterialet. En planområdesparameter som används för att beskriva skördarnas mätprecision bör därför framförallt inkludera planområden som är längre än cirka 40 cm.
3. En styrka med skördarnas mätning av diameter är att den sker kontinuerligt längs stammarna. Eftersom längre planområden förekommer relativt sparsamt längs stammarna bör den planområdesparameter som används för prediktion av mätprecision snarare grundas på mätinformation från en längre sträcka än från en enskild mätpunkt. En lämplig nivå kan vara prediktion av mätprecision på stamnivå.
4. Det finns trädslagsskillnader. Förekomsten av planområden som inducerats av felaktig diamettermätning i skördarna är högre för tall än för gran.

MODELLUTVECKLING

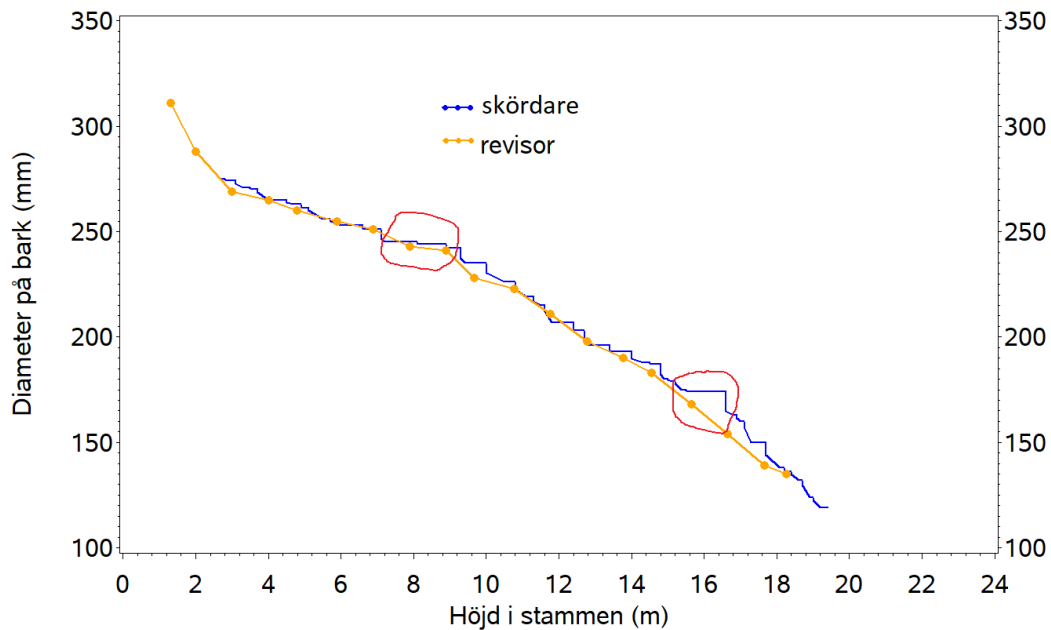
Framtagning av planområdesparameter

Vid modellutvecklingen plottades inledningsvis den skördarmätta och den revisorsmätta diametern mot höjden i stammen för samtliga stammar (Figur 10). Tidigare studier (Nordström & Hannrup 2017) har visat på ett samband mellan förekomsten av planområde och mätprecisionen för skördarnas diamettermätning utifrån manuell kontrollmätning; ett samband som även indikeras i data för exempelstammen nedan.



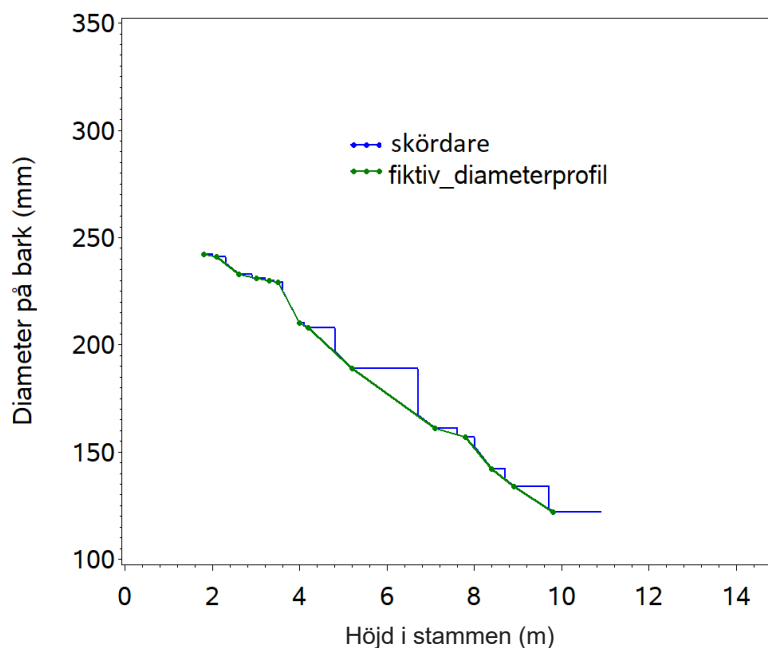
Figur 10. Exempel på diameterprofiler längs en stam genererade från skördarens diametermätning och från revisorns klavning. Skördarens mätning är kontinuerlig längs stammarna medan klavning skett ungefärligen varje meter. Klavningspunkterna symboliseras med fyllda cirklar och i figuren har diametervärdena för dessa punkter sammanbundits med en linje.

Granskningen av diameterprofilerna från samtliga stammar i studien styrkte att stampartier med planområden från skördarens mätning tenderar att vara förknippade med ökad avvikelse mellan skördarmätt och revisorsmätt diameter. Granskningen visade också att den aktuella avsmalningen är mycket betydelsefull för vilken effekt ett visst planområde kommer att få på avvikelsen mellan skördarmätt och revisorsmätt diameter. Ett planområde som inträffar i ett stamparti med låg avsmalning medför en liten inverkan på avvikelsen mellan skördarmätt och revisorsmätt diameter, medan ett planområde som inträffar i stamparti med hög avsmalning kommer att få en betydligt kraftigare inverkan (Figur 11). En planområdesparameter som används i en modell för att prediktera mätprecisionen för skördarnas diametermätning bör alltså för varje planområde innehålla information om både planområdets längd och den aktuella avsmalningen i stammen.



Figur 11. Diameterprofiler längs en stam genererade från skördarens diametermätning och från revisorns klavning. Det inringade stampartiet till vänster har låg avsmalning och planområden i detta parti har liten inverkan på avvikelsen mellan skördarmätt och revisorsmätt diameter. I det inringade stampartiet till höger är det hög avsmalning och planområdet i detta parti har stor inverkan på avvikelsen mellan skördarmätt och revisorsmätt diameter.

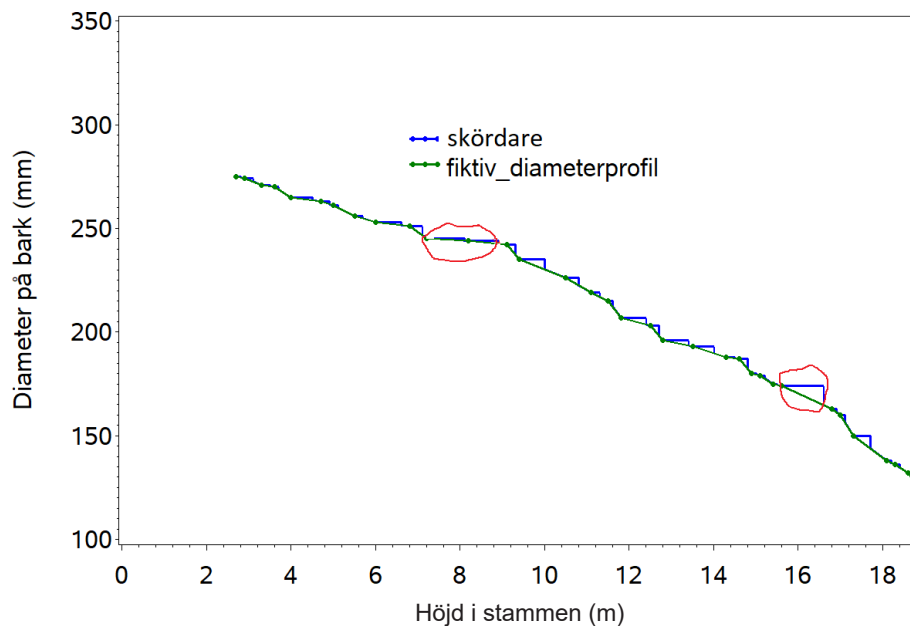
För att inkludera information om den aktuella avsmalningen utifrån data från skördarens diametermätning skapades en fiktiv diameterprofil. Den fiktiva diameterprofilen togs fram genom att binda samman startpunkterna för samtliga planområden som detekterades i skördarnas diametermätning, vilket exemplifieras i figur 12. Detta innebär att i den fiktiva stamprofilen kommer diametervärden för ett visst planområde att "ersättas" av diametervärden motsvarande en linjär avsmalning för partiet mellan startpunkten för det aktuella planområdet och startpunkten för det närmast efterföljande planområdet. I studien antogs att de fiktiva diameterprofilerna i betydligt högre grad återspeglar stammarnas "sanna" diameterprofiler än de ursprungliga diameterprofilerna från skördarnas diametermätning. Detta antagande var centralt för det fortsatta modelleringsarbetet.



Figur 12. Diameterprofil längs en stam genererad från skördarens diametermätning samt en fiktiv diameterprofil som skapats genom att binda samman startpunkterna för samtliga planområden utifrån skördarens diametermätning.

Då den fiktiva diameterprofilen plottas tillsammans med diameterprofilen från skördarens mätning uppkommer ett mönster med rätvinkliga trianglar där varje triangel motsvarar ett planområde (Figur 12). Triangelareorna motsvarar den ytmässiga skillnaden mellan den fiktiva stamprofilen och diameterprofilen från skördarens mätning. I studien har triangelarean använts som ett kvantitativt mått på varje planområdes inverkan på avvikelsen mellan skördarmätt och revisorsmätt diameter.

En viktig slutsats från den inledande kartläggningen av planområden var att i populationen planområden som genereras från skördarnas diametermätning ingår naturliga planområden tillsammans med planområden som genererats av felaktig diametermätning från skördaren. Naturliga planområden är stampartier där den sanna diameterprofilen saknar avsmalning. För sådana planområden kan triangelarean förväntas vara mycket liten (Figur 13). I motsats kommer planområden som infaller i stampartier med hög avsmalning och därmed har en uppenbar stark inverkan på avvikelsen mellan skördarmätt och revisorsmätt diameter att få en stor triangelarea. Sammantaget innebär det att vi betraktar användande av triangelarea som en lämplig parameter för att hantera den population av planområden som genereras från skördarnas diametermätning.



Figur 13. Exempel som visar hur triangelarean blir marginell för längre planområden som infaller i ett parti med låg avsmalning (vänstra inringade stampartiet) medan triangelarean ökar markant för ett planområde med motsvarande längd som infaller i ett parti med hög avsmalning (högra inringade stampartiet).

Anpassning av slutlig modell

Syftet med modelleringsarbetet var att finna en modell som baserat på planområdesinformation predikterade skördarnas precision för diametermätningen. Som uttryck för skördarnas mätprecision användes standardavvikelsen för avvikelsen mellan den revisorsmätta och den skördarmätta diametern. Standardavvikelsen beräknades stamvis. Vid beräkningen användes stampartiet från 2,5 m upp till en diameter motsvarande 120 mm. Anledningen till att det nedersta stampartiet exkluderades var att skördarnas diametermätning ofta innehåller extremt avvikande värde för detta parti. Mätprecisionen för skördarnas mätning har störst betydelse för sågtimmerdelen och detta var orsaken till att enbart diametrar över 120 mm inkluderades.

Som planområdesparameter användes triangelarean, beskriven ovan. Beräkning av triangelarean skedde i två steg enligt följande:

- I ett första steg summerades planområdenas triangelareor (mm^2) per stam. Olika gränsvärden prövades när det gäller längden på ingående planområden men i den slutliga modellen inkluderades triangelareor kopplade till planområden som var 30 cm och längre. Vid summeringen användes samma stamsektion som användes vid beräkningen av standardavvikelsen mellan avvikelsen för den revisorsmätta och den skördarmätta diametern.
- I ett andra steg relaterades den summerade triangelarean till längden på det ingående stampartiet, det vill säga längden för respektive stams parti från 2,5 m upp till en diameter motsvarande 120 mm. Eftersom skördarna registrerar längd i cm blev den slutliga enheten för variabeln summerad triangelarea mm^2/cm .

Stammar med avvikande gles klavning, längre stammar där enbart någon enstaka stock klavats och stammar som saknade sågtimmerstockar på grund av låg diameter exkluderades i analysen. Sammantaget innebar det att 3233 stammar användes i den slutliga modellen.

Stammarnas brösthöjdsdiameter hade en statistiskt säkerställd, linjär effekt på standardavvikelsen mellan avvikelsen för den revisorsmätta och den skördarmätta diametern. Brösthöjdsdiametern inkluderades därför i modellen.

Följande linjära modell anpassades till materialet:

$$[1] \quad \sigma_{M3_M1} = \alpha_0 + \alpha_1 * dbh + \alpha_2 * ta + \varepsilon$$

där σ_{M3_M1} är standardavvikelsen mellan avvikelsen för den revisorsmätta M3 och den skördarmätta diametern (M1) per stam, dbh är brösthöjdsdiametern, ta är den summerade triangelarean per längdenhet, α_0 är interceptet, α_1 och α_2 regressionskoefficienter och ε det slumpmässiga felet. Anpassning av modellen skedde dels separat för tall och gran och dels för hela materialet. Modellerna som anpassades separat för trädslagen benämndes Sf_plan_tall respektive Sf_plan_gran. Modellen som anpassades till hela materialet benämndes Sf_plan_tot.

Residualanalys och utvärdering av modellens prestanda

Medelfelet eller spridningen till modellen, Root Mean Square Error (RMSE), beräknades som

$$[5] \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum(obs-pred)^2}{n}}$$

där obs och $pred$ är de observerade och predikterade värdena på standardavvikelsen för avvikelsen mellan revisorsmätt och skördarmätt diameter och n antalet observationer. De observerade värdena utgörs av standardavvikelsen för avvikelsen mellan revisorsmätt och skördarmätt diameter medan predikterade värden motsvaras av skattningarna från den framtagna modellen, alternativt av standardavvikelsen för avvikelsen mellan diameter från förarnas klavning och motsvarande diametermätt från skördarnas mätning.

Den genomsnittliga systematiska avvikelsen ($bias$) beräknades som

$$[6] \quad bias = \frac{\sum(obs-pred)}{n}.$$

Vid utvecklingen av den nya modellen gjordes alla statistiska analyser med programvaran SAS, version 9.4. Modellanpassningen utfördes med Proc GLM.

Följande analyser gjordes för att utvärdera modellens prestanda:

- Plottning av residualerna från den framtagna modellen mot modelltermerna samt mot latitud och longitud för att åskådliggöra eventuella systematiska avvikelser. Plottning skedde såväl på datasetet som användes för modellutveckling som på datasetet som användes för validering.
- Jämförelse av systematisk (*bias*) och tillfällig (*RMSE*) avvikelse då dessa parametrar beräknades på datasetet som användes för modellutveckling respektive validering.
- Jämförelse av *bias* och *RMSE* från den framtagna modellen med motsvarande parametrar beräknade från förarnas diameterbestämning. I det svenska systemet för kvalitetssäkring av skördarnas dimensionsmätning korsklavar förarna en till två stammar per skift och dessa mätdata (M2-mätning) används för att löpande följa skördarnas mätprecision. Vid beräkningen av *bias* och *RMSE* utifrån förarnas diamettermätning användes samma stamparti som vid modellutvecklingen, det vill säga stampartiet från 2,5 m upp till en diameter motsvarande 120 mm. Denna jämförelse gjordes enbart på datasetet som användes för validering.

Resultat och diskussion

Medelvärden och parameterskattningar

Medelvärden och spridningsmått för standardavvikelsen mellan avvikelsen för den revisorsmätta och den skördarmätta diametern per stam redovisas i tabell 2 och 3. I tabellerna visas också motsvarande mått för brösthöjdsdiametern och den summerade triangelarean per längdenhet, det vill säga de oberoende variablerna i den framtagna funktionen.

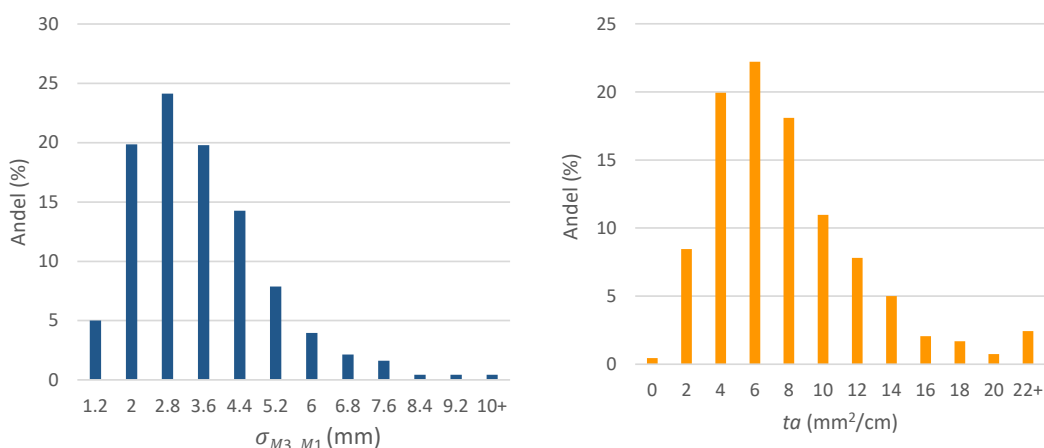
Tabell 2. Tall. Antal observationer, aritmetiskt medelvärde samt min- och maxvärde för standardavvikelsen mellan avvikelsen för den revisorsmätta och den skördarmätta diametern per stam (σ_{M3_M1}), brösthöjdsdiametern (dbh) och den summerade triangelarean per längdenhet (ta).

Variabel	N	Enhet	Medel	Min.	Max
σ_{M3_M1}	1359	mm	3,5	0,8	12,5
dbh	1359	mm	258	140	493
ta	1359	mm ² /cm	8,0	0,5	65,2

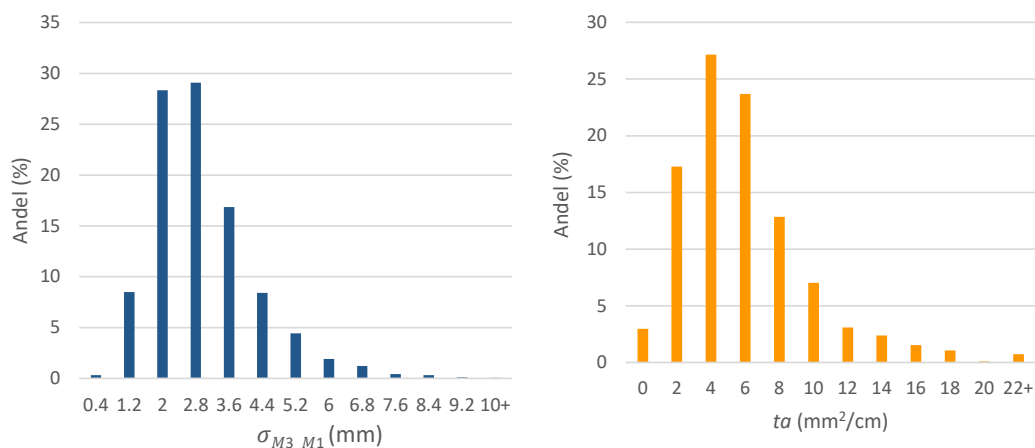
Tabell 3. Gran. Antal observationer, aritmetiskt medelvärde samt min- och maxvärde för standardavvikelsen mellan avvikelsen för den revisorsmätta och den skördarmätta diametern per stam (σ_{M3_M1}), brösthöjdsdiametern (dbh) och den summerade triangelarean per längdenhet (ta).

Variabel	N	Enhet	Medel	Min.	Max
σ_{M3_M1}	1874	mm	3,0	0,5	11,7
dbh	1874	mm	263	142	471
ta	1874	mm ² /cm	6,0	0,2	43,0

Fördelningen av mätvärden för standardavvikelsen mellan avvikelsen för den revisorsmätta och den skördarmätta diametern per stam och för den summerade triangelarean per längdenhet redovisas i figur 14 och 15.



Figur 14. Tall. Fördelningen av mätvärden för standardavvikelsen mellan avvikelsen för den revisorsmätta och den skördarmätta diametern per stam (vänster figur) och för den summerade triangelarean per längdenhet (höger figur).



Figur 15. Gran. Fördelningen av mätvärden för standardavvikelsen mellan avvikelsen för den revisors-mätta och den skördarmätta diametern per stam (vänster figur) och för den summerade triangelarean per längdenhet (höger figur).

Ekvation 1 användes i studien för att modellera skördarnas mätprecision i diameter-mätningen som en funktion av brösthöjdsdiametern och den framtagna planområdes-parametern, summerad triangelarea per längdenhet.

$$[1] \quad \sigma_{M3_M1} = \alpha_0 + \alpha_1 * dbh + \alpha_2 * ta + \varepsilon$$

Parameterskattningar till funktionen samt tillhörande 95-procentiga konfidensintervall redovisas i tabell 4. Skattningar gjordes per trädslag samt för hela materialet. Konfidensintervallen visar att modellparametrarna i samtliga fall var signifikant skilda från noll. Undantaget utgjordes av interceptet som för båda trädslagen och för hela materialet inte var statistiskt skilda från noll.

Tabell 4. Parameterskattningar samt tillhörande 95-procentiga konfidensintervall för den framtagna funktionen baserad på planområdesparametern summerad triangelarea per längdenhet (Ekvation 1).

Modell	Parameter	Skattning	95-% konfidensintervall	
			Nedre gräns	Övre gräns
Sf_plan_tall	α_0	-0,2211	-0,5025	0,0603
Sf_plan_tall	α_1	0,0116	0,0105	0,0127
Sf_plan_tall	α_2	0,0937	0,0811	0,1063
Sf_plan_gran	α_0	0,0183	-0,1974	0,2340
Sf_plan_gran	α_1	0,0088	0,0080	0,0097
Sf_plan_gran	α_2	0,1028	0,0908	0,1148
Sf_plan_tot	α_0	-0,0806	-0,2561	0,0950
Sf_plan_tot	α_1	0,0097	0,0090	0,0104
Sf_plan_tot	α_2	0,1087	0,1002	0,1172

Utvärdering av modellens prestanda

Granskning av plottar av de framtagna modellernas residualer mot modellparametrarna samt mot latitud/longitud visade inte på några systematiska avvikelser. Detta gällde för samtliga modeller och såväl då residualplottarna baserades på datasetet som användes för modellutveckling som då de baserades på datasetet som användes för validering (Bilaga 1).

I tabell 5 redovisas systematisk och tillfällig avvikelse för de trädslagsvisa modellerna (Sf_plan_tall och Sf_plan_gran) och för modellen som baserades på hela materialet (Sf_plan_tot) då modellerna applicerades på datasetet som användes för modellutveckling, respektive validering. Resultaten från valideringen på det oberoende datasetet visar att modellerna är kapabla att skatta skördarnas mätprecision i diametermätningen med ett försumbart systematiskt fel ($<0,3$ mm). Detta gällde såväl då den systematiska avvikelsen beräknades utifrån de trädslagsvist anpassade modellerna som för modellen som anpassats till hela materialet oberoende av trädslag.

Tabell 5. Utvärderad modell, antal observationer, systematisk avvikelse (*bias*) och tillfällig avvikelse (RMSE) då utvärdering skedde på dataseten som användes för modellutveckling, respektive validering.

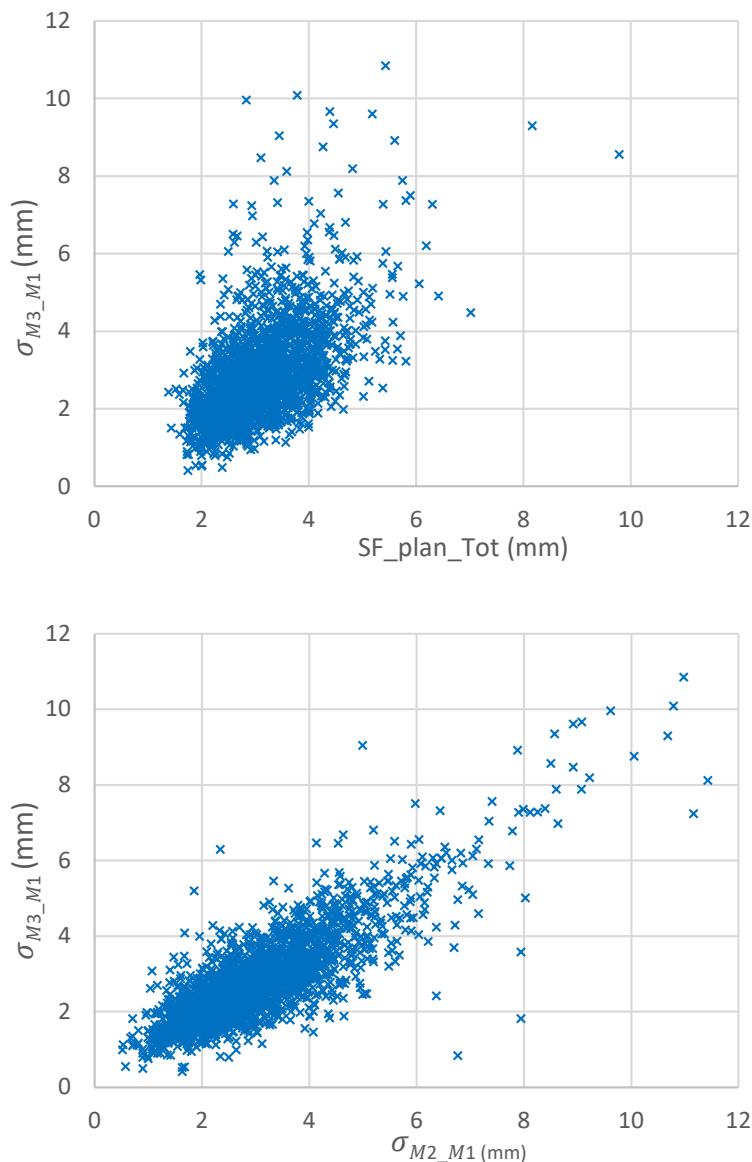
Dataset	Modell	N	bias (mm)	RMSE (mm)
Modellutveckling	Sf_plan_tall	1359	0,000	1,21
Modellutveckling	Sf_plan_gran	1874	0,000	1,04
Modellutveckling	Sf_plan_tot	3233	0,000	1,13
Validering	Sf_plan_tall/Sf_plan_gran	2174	-0,22	1,00
Validering	Sf_plan_tot	2174	-0,27	1,02
Validering	M2	2169	-0,23	0,76

Den tillfälliga spridningen för modellerna uppgick till cirka 1 mm utifrån valideringen. Detta innebär att i flertalet fall kan den modellbaserade skattningen av mätprecisionen för skördarens diametermätning förväntas ligga inom ± 1 mm från den "sanna" mätprecisionen, uttryckt som standardavvikelsen för avvikelsen mellan revisorsmätt och skördarmätt diameter. Vidare var den tillfälliga avvikelsen närmast identisk då de trädslagsvisa modellerna applicerades på valideringsdatasetet som då den trädslagsoberoende modellen applicerades (1,00 respektive 1,02 mm). Detta indikerar att det framtagna grund sambandet inte är trädslagsberoende och att det är tillräckligt att använda modellen som anpassats för hela materialet oberoende av trädslag.

För att ytterligare belysa den framtagna modellens prestanda användes data från förarnas klavning. Mätningarna används i kvalitetssäkringssystemet för att löpande följa skördarnas mätprecision, uttryckt som standardavvikelsen för avvikelsen mellan förarmätt och skördarmätt diameter (σ_{M2_M1}). I studien beräknades bias och RMSE för sambandet mellan skördarnas mätprecision skattad från förarnas mätning och motsvarande mätprecision skattad från revisorernas mätning, det vill säga sambandet mellan σ_{M2_M1} och σ_{M3_M1} . För valideringsdatasetet var den systematiska avvikelsen för detta samband nära noll ($-0,23$ mm), det vill säga liknande värde som då mätprecisionen skattades från den framtagna modellen (Tabell 5).

Den tillfälliga avvikelsen uppgick till 0,76 mm, att jämföra med motsvarande värde på 1,02 mm för mätprecision skattad med SF_Plan_Tot. Den framtagna modellen i studien skattade alltså skördarnas "sanna" mätprecision" med en större spridning än då förarnas klavning användes. Detta illustreras också i figur 16 där standardavvikelsen för avvikelsen mellan revisorsmätt och skördarmätt diameter plottats mot skattningen från den framtagna modellen (SF_Plan_Tot) respektive mot standardavvikelsen för avvikelsen mellan förarmätt och skördarmätt diameter.

Sammanfattningsvis visar jämförelsen att den framtagna modellen kan skatta skördarnas mätprecision i diametermätningen med liknade systematiskt fel som för förarnas klavning fast med en något större spridning.



Figur 16. Samband mellan standardavvikelsen för avvikelsen mellan revisorsmätt och skördarmätt diameter och motsvarande standardavvikelse predikterade med den framtagna modellen i studien (övre figuren), respektive standardavvikelsen för avvikelsen mellan förarmätt och skördarmätt diameter (nedre figuren).

PRAKTISK TILLÄMPNING

Hur kan resultaten från studien användas?

I en diskussion kring praktiska tillämpningar av studien vill vi framhålla att den framtagna modellen utvecklats för att ge relevant information om skördarnas mätprecision. Modellen ger ingen information om de absoluta avvikelserna för skördarens diametermått, det vill säga information om status för den aktuella kalibreringen. Information kopplad till kalibrering måste inhämtas på annat sätt – i dagsläget med hjälp av manuella mätningar.

Med detta sagt är det företrädesvis tillämpningar med fokus på skördarnas mätprecision som bör diskuteras. I dagens system som används för kvalitetssäkring av skördarnas diametermätning sker uppföljning av mätprecisionen genom att förarna kontrollmäter diametern på ett slumpmässigt urval av de avverkade stammarna. Uppföljning av mätprecisionen med hjälp av predikterade värden från den framtagna modellen skulle kunna vara ett komplement till dagens manuella uppföljning, alternativt ersätta en del av denna.

En potentiell fördel med modellbaserad uppföljning är snabbare 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. Uppföljningen av mätprecisionen kan därmed få en mer kontinuerlig karaktär. Avvikelser kan identifieras och åtgärdas snabbare, till exempel avvikelser orsakade av givare som gått eller är på väg att gå sönder.

En ytterligare potentiell fördel med modellbaserad uppföljning är ökad detaljeringsgrad. De stora datamängder som snabbt kan ansamlas bör medge uppföljning av hur mätprecisionen för diametermätningen varierar med till exempel diameterklass och läge i stammen. En sådan ökad detaljeringsgrad skulle kunna användas i utbildningssammanhang för analys av körstilens inverkan på mätprecisionen. Ett annat användningsområde, som dock kräver tyngre utvecklingsinsatser, vore att använda informationen från uppföljningen i skördarnas styrsystem så att tryckinställningar för kvistknivar/matarvalsar automatiskt optimerades efter rådande förhållanden.

Referenser

- Aldén, G. Förbättrar en kvalitetssäkring skördarens dimensionsmätning? Examensarbete från Skogsmästarprogrammet. 29 s.
- Andersson, M. 2004. Simulering av dimensionsmätare för skördare. Arbetsrapport från Skogforsk, nr 577. 14 s.
- Arlinger J., Bhuiyan N., Möller J.J., Nordström M., Söderberg J. & Eriksson I. 2018. Skördardatabasen – digital infrastruktur för skördardata. Del av rapporten ”Intressentmedelsprojekt 2017”. <https://www.skogforsk.se/produkter-och-evenemang/trycksaker/2018/intressentmedelsprojekt-2017>. Tillgänglig 200207.
- Arlinger, J. & Möller J. J. 2006. Kvalitetssäkring av skördarnas mätning. Resultat från Skogforsk nr 20. 4 s.
- Arlinger, J. & Möller J. J. 2020. StanForD 2010 modern kommunikation med skogsmaskiner. <https://www.skogforsk.se/english/projects/stanford/>. Tillgänglig 200207.
- Björklund, L., Moberg, L. & Lindström, H. 1998. Stand and tree selection, field measurements of stand, tree and log properties. SLU, Inst. för Skog-Industri-Marknad studier, FAIR CT 96-1915 Improved Spruce Timber Utilisation ”STUD”, Final Report sub-task AB1.1, 23pp. Uppsala.
- Grundberg, S., Grönlund, A. & Grönlund, U. 1995. The Swedish Stem Bank – a database for different silvicultural and wood properties. Research report TULEA 1995:31, Luleå University of technology, 14 pp. ISSN 0347–0881.
- Hugosson, M & McCluskey, D. 2008. Strategy transformations of the Swedish sawmilling sector 1990-2005. Studia Forestalia Suecica, 217. 33 p.
- Lindman, M. 2005. Sågutbytets påverkan för den svenska sågverksindustrins lönsamhet. C-uppsats, Inst. för industriell ekonomi och samhällsvetenskap. ISSN 1402 – 1773. 35 s.
- Nordström, M. & Hannrup, B. 2017. Förbättrad diamettermätning i skördare – en pilotstudie med åtta Ponsse slutavverkningsskördare. Arbetsrapport från Skogforsk, nr 940: 47 s.
- Ågren, K. Arlinger, J. Hannrup, B. Möller J. J. Nordström, M. & Wilhelmsson, L. 2017. Utvecklingsbehov i gränssnittet skog-såg – en förstudie baserad på intervjuer. Arbetsrapport från Skogforsk, nr 952: 15 s.

Bilaga 1.

Residualplottar från modellvalidering

Figurer genererade från datasetet som användes för validering, vilka visar modellens (Sf_plan_tot) residualer plottade mot modellparametrarna samt mot latitud och longitud.

