

Kontrollmetoder för diameter, längd och volym vid stockmätning

Dagens metoder och möjliga alternativ

Kari Hyll, Monika Strömgren och Maria Nordström



Kontrollmätare vid stockar upplagda för kontrollmätning. Foto: Kari Hyll, Skogforsk.

Innehåll

Förord	4
Summary	5
Sammanfattning.....	7
Definitioner och begrepp.....	9
Bakgrund	11
Daglig tillsyn och periodisk kontroll av mätutrustning	11
Krav på kontrollmetod för virkesmätning.....	11
Kontroll av olika mätmetoder för rundvirke	12
Kontroll av stockmätning i mätram (enbart sågtimmer)	12
Kontroll av travmätning.....	13
Kontroll av kollektivmätning.....	13
Kontroll av skördarmätning	13
Kontrollsystem i andra branscher.....	14
Motiv för studien	14
Syfte	15
Material och metoder	15
Krav och syn på dagens metod för kontroll av stockmätning.....	15
Utvärdering av den manuella kontrollmätningens osäkerhet	16
Beräkning av osäkerhetens miniminivå.....	16
Beräkning av osäkerhetens maximinivå	17
Alternativ mätteknik för kontrollmätning av stockar	18
Litteraturgenomgång.....	18
Test av prototyp för mätning under bark med mikrovågsradar	18
Resultat och diskussion	19
Krav och syn på dagens metod	19
Många perspektiv och några trender	21
Osäkerhet i dagens kontrollmätning	22
Stor variation i osäkerhet mellan olika tillfällen	22
Stor spridning i osäkerhet mellan olika mätplatser.....	22
Potential till förbättrad noggrannhet om kontrollmätningen skulle vara utan fel.....	23
Minimera eventuella systematiska fel.....	24
Kontrollmätningens osäkerhet av mindre betydelse på de flesta mätplatser	24
Alternativ mätteknik för kontrollmätning av stockar	25

Mätning av diameter och volym.....	25
Metoder för längdmätning	31
Mätning av diameter under bark genom barktjockleksmätning	31
Kontrollsystem i andra branscher.....	33
Finns det några intressanta alternativ till klaven?.....	34
Möjliga vägar framåt	34
Förbättring av dagens manuella kontrollmätning	35
Diversifierat system för kontroll av mätramar	35
Jämförelse av mätresultat från skördare och mätram	36
Slutsatser	36
Referenser.....	38
Personlig kommunikation.....	39
Bilagor	39
Bilaga 1. Enkät- och intervjufrågor	40
Enkätfrågor	40
Intervjufrågor till utrustningstillverkare	40
Tillverkare av mätramar/riggare.....	40
Tillverkare av klavar	41
Intervjuer med utförare av kontrollmätning (Biometria)	41
Bilaga 2. Inledande tester med en prototyp för barktjockleksmätning med radarteknik	42



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

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts i maj 2023 av Johan J Möller, Bitr. programchef Värdekedjor. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef, granskat och godkänt publikationen för publicering den 27 januari 2024.

Redaktör: Caroline Rothpfeffer, caroline.rothpfeffer@skogforsk.se
©Skogforsk 2024 ISSN 1404-305X

Förord

Vi vill tacka referensgruppen (Jonas Törnsten, Fredrik Hansson och Håkan Rönnbäck, samtliga Biometria) för deras engagemang och stöttning i projektet. Vi särskilt tacka Christer Forsmark, Jonny Wigert, Pelle Nyberg, Gunnar Karlsson, Wictoria Heney Mussikka, Jonas Skogen Ludvigsson och Lars Björklund på Biometria för deras bidrag vid intervjuer och workshops. Ett tack går även till övriga köpare, säljare, entreprenörer, transportörer och tillverkare som bidragit med sina erfarenheter. Slutligen vill vi tacka Rundvirkestiftelsen och Biometria för deras finansiella stöd, vilket möjliggjort genomförandet av projektet.

Uppsala i januari 2024,

Kari Hyll, Monika Strömgren och Maria Nordström

Summary

In Sweden, most all compensation-based timber measurements in industry are carried out by Biometria. To ensure that the original measurement is sufficiently accurate, a check is conducted where each measured log or stack can be randomly selected. For roundwood, the final check of the log's diameter is done by measuring the diameter in two directions by a caliper, and its length with a tape measure. The diameter is measured under bark, which means that the bark is removed with an axe for timber measurement in industry or by a bark gauge when the check is done for logs after harvester measurement.

A uniform reference facilitates the comparison between different measurement methods and assortments, but as the log measurement in harvesters and with log scanners has become increasingly accurate, the legitimacy of using calipers and tape measures as a check has started to be questioned. Mainly, it is pointed out that the checked diameter measurement has a higher uncertainty than many of the modern log scanners.

The purpose of this study is to impartially investigate the current system and methods for controlling roundwood measurements at the log level, as well as any alternatives and their advantages and disadvantages compared to the current method. The study was limited to the check measurement of logs in industry and in the forest (harvester measurement), and the measurement of the logs' length, diameter, and volume.

The study was conducted as four separate sub-studies:

1. Survey of requirements and views on the current method among relevant stakeholders such as quality leaders (those who perform the check measurements), equipment manufacturers, and users of the control results.
2. Quantification of the uncertainty of the manual check scale.
3. Literature review of alternative measurement techniques for checking log measurements.
4. Testing of new technology for measuring bark thickness using microwave radar technology.

Requirements and views on the current method

The perception of how well the current method for check measurement works varies among different stakeholders. The main advantage of the current method is its flexibility, being applicable both in the forest and in industry. Disadvantages include the fact that the measurement can be influenced by who performs it, the results vary seasonally, there is a clear limitation in how much data can be manually collected, and there are deficiencies in the working environment for the quality leaders.

A new control method for log measurement was deemed to need to maintain at least the same accuracy as the current one. It's important that it can handle snow and ice.

The uncertainty of check measurement is of little significance

For most measurement sites with log scanners, the uncertainty of the check measurement is of minor significance, and therefore, the current control method is relevant. It's challenging to precisely specify the uncertainty of check measurement, but expressed as standard deviation, the current measurement errors should be within the following ranges:

Diameter: 1.5–2.3 mm

Length: 0.6–0.8 cm

Volume: 0.6–2.4%

There is potential to improve the current check method, among other things, by measuring length in mm instead of cm.

During calibration and adjustment of the log scanner, it's important that the control results are based on a sufficiently large number of control logs. If the uncertainty, either in the control method or the regular method, is larger, more control objects are needed. It's crucial to continuously minimize the risk of potential systematic errors in control measurements.

Alternative Measurement Techniques for Control Measurement

The literature review highlights several alternatives using handheld laser scanners and mobile apps for determining primarily diameter and volume, but also length. These methods offer ergonomic advantages and are less dependent on the individual conducting the measurements.

However, the accuracy of these alternative methods is currently significantly lower than the current control method. Moreover, the measurements are performed on bark, which means they would need to be supplemented with a bark thickness gauge. Overall, this means that among these methods, there is currently no good alternative to the current method. Whether these methods could be suitable alternatives if placed on stands during measurement or conducted under more controlled conditions needs further investigation.

Testing of New Technology for Measuring Bark Thickness with Radiotechnology

In this sub-study, a prototype for measuring bark thickness using microwaves developed by Radarbolaget was also tested. It proved to be a viable technology, which should also work on frozen wood if adapted for it, but requires further development to achieve higher measurement accuracy and to become usable in practice.

Potential to Reduce Control Measurements

Even though there currently don't seem to be good alternatives to the existing control measurements, there are some ways to reduce the need for such measurements. For instance, this can be achieved through increased self-diagnostics of log scanners, allowing errors in timber measurements to be detected more quickly. For this, information already collected by the measuring equipment can be used in conjunction with IT support and alarm systems. The potential in this approach, the existing information available, which additional sensors might be of interest, and what an IT support/alarm system would look like, needs further investigation. There is potential in utilizing comparisons with harvester data to identify errors more quickly in industrial measurements.

Sammanfattning

I Sverige utförs merparten av all ersättningsgrundande virkesmätning vid industri av Biometria. För att säkerställa att mätningen är tillräckligt noggrann utförs kontroller, där varje inmätt stock eller trave slumpmässigt kan väljas ut för kontrollmätning. För rundvirke görs den yttersta kontroll av stockens diameter genom korsklavning och dess längd med måttband. Diametern mäts under bark, vilket gör att barken avlägsnas med yxa för virkesmätning vid industri eller genom barkmätare när kontroll görs vid skördarmätning.

En enhetlig referens underlättar jämförelsen mellan olika mätmetoder och sortiment, men i takt med att stockmätningen i skördaren och med mätram blivit alltmer noggrann har klavens legitimitet som kontrollmetod börjat ifrågasättas. Framför allt pekas det på att den klavningsbaserade diametermätningen har en högre mätosäkerhet än många av de moderna stockmätramarna.

Syftet med den här studien är att förutsättningslöst utreda dagens system och metoder för kontroll av rundved på stocknivå samt eventuella alternativ och deras för- och nackdelar jämfört med dagens metod. Studien avgränsades till kontroll av stockmätning vid industri och i skog (skördarmätning), och mätning av stockarnas längd, diameter och volym.

Studien genomfördes som fyra separata delstudier:

1. Kartläggning av krav och syn på dagens metod hos relevanta aktörer som utförare av kontrollmätning, utrustningstillverkare samt användare av kontrollresultaten
2. Kvantifiering av den manuella kontrollmätningens osäkerhet
3. Litteraturgenomgång av alternativ mätteknik för kontrollmätning av stockar
4. Test av ny teknik för mätning av barktjocklek med mikrovågsradarteknik

Krav och syn på dagens metod

Synen på hur väl dagens metod för kontrollmätning fungerar varierar hos olika intressenter. Den huvudsakliga fördelen med dagens metod är att den är flexibel och kan användas såväl i skog som vid industri. Nackdelar inkluderar att mätningen kan påverkas av vem som utför mätningen, resultatet varierar över säsong, det finns en tydlig begränsning i hur mycket data man samlar in manuellt och att det finns brister i arbetsmiljön för kontrollmätaren.

En ny kontrollmetod för stockmätning ansågs behöva hålla minst samma noggrannhet som den nuvarande. Viktigt att den kan hantera snö och is.

Kontrollmätningens osäkerhet har liten betydelse

För majoriteten av mätplatser med mätrammar, är kontrollmätningens osäkerhet av mindre betydelse och dagens kontrollmetod därför relevant. Det är svårt att exakt ange kontrollmätningens osäkerhet, men uttryckt som standardavvikelse bör dagens mätfel ligga inom följande intervall:

Diameter: 1,5–2,3 mm

Längd: 0,6–0,8 cm

Volym: 0,6–2,4 %

Det finns potential att förbättra dagens kontrollmetod bland annat genom att mäta längd i millimeter, istället för centimeter.

Vid kalibrering och justering av mätramar är det viktigt att kontrollresultatet bygger på ett tillräckligt stort antal kontrollstockar. Om osäkerheten, antingen i kontrollmetoden eller ordinarie metod, är större behövs fler kontrollobjekt. Det är viktigt att hela tiden minimera risken för eventuella systematiska fel i kontrollmätningen.

Alternativ mätteknik för kontrollmätning

Litteraturgenomgången visar flera alternativ med handhållna laserskannrar och mobilappar för bestämning av framför allt diameter och volym men även längd. Metoderna har ergonomiska fördelar och är mer oberoende av individen som genomför mätningarna.

Noggrannheten i de alternativa metoderna är däremot i nuläget betydligt lägre än dagens kontrollmetod. Dessutom utförs mätningarna på bark, vilket gör att den skulle behöva kompletteras med en barktjockleksmätare. Sammantaget innebär detta att det i dagsläget inte finns något bra alternativ till dagens metod. Huruvida dessa metoder skulle kunna vara lämpliga om de vid mätningen placerades på stativ eller kan utföras under mer kontrollerade förhållanden, behöver utredas vidare.

Test av ny teknik för mätning av barktjocklek med radioteknik

I denna studie testades en prototyp för barktjockleksmätning med mikrovågor framtagen av Radarbolaget. Det visade sig vara en möjlig teknik, som även borde fungera på frusen ved om anpassning görs för det. Metoden kräver vidare utveckling för att nå högre mätsäkerhet och för att bli användbar i praktiken.

Potential att minska kontrollmätning

Även om det idag inte verkar finnas bra alternativ till dagens kontrollmätning, finns några sätt att minska behovet av kontrollmätning, exempelvis genom ökad självdiagnostik av mätramar, som gör att fel i virkesmätningen kan hittas snabbare. För detta kan bland annat information som redan samlas in av mätutrustningarna användas i kombination med IT-stöd och larmsystem. Potentialen i detta, vilken information som redan finns, vilka ytterligare sensorer som skulle vara intressanta samt hur ett IT-stöd/larmsystem skulle se ut, behöver utredas vidare. Det finns också en potential i att nyttja jämförelser med skördardata för att snabbare kunna identifiera fel i industrimätningen.

Definitioner och begrepp

I rapporten förekommer ett antal definitioner och begrepp som är specifika för virkesmätning. En sammanställning ges nedan (se även Biometria 2022abc, 2023, samt Biometris hemsida www.biometria.se).

Fastvolym under bark (m³fub)

Måttslag för ersättningsgrundande kvantitet som avser stocks fastvolym under bark då avdrag för eventuella utbuktningar gjorts. Anges i kubikmeter.

Kerattbana

En transportbana för stockar vid sågverk, där stockarna kan matas in genom en mätram.

Kontrollmätning

Den mätning som syftar till att kontrollera ordinarie mätningens noggrannhet av kvalitet och/eller kvantitet.

Kontrollstock

Stock som slumpas ut vid stockmätning för kontroll av ordinarie mätning av kvalitet och/eller kvantitet.

Kontrolltrave

Trave som slumpas ut vid travmätning för kontroll av ordinarie mätning av kvalitet och/eller kvantitet. Kontrollen görs genom stockmätning.

Kontrollobjekt

Objekt som slumpas ut för kontroll av ordinarie mätning av kvalitet och/eller kvantitet. Objekt kan avse olika enheter såsom stock eller trave.

Kvalitetstekniker

Person vid Biometria som ansvarar för kvalitetssäkring av skördares mätnoggrannhet. Personen utför kontroll och uppföljning av skördarens mätning samt skördarförarnas kontrollrutiner.

Kvalitetsledare

Person vid Biometria som ansvarar för och utför kontroll och uppföljning av virkesmätning vid mätplatser på industrin.

Ordinarie mätning

De mätningens aktiviteter som leder fram till en ersättningsgrundande kvantitet och kvalitet. Kan innehålla omvandlings- eller omräkningstal.

Stickprovslag

Mätare som utför manuell mätning av kontrolltravar eller stickprovstravar.

Stickprovstrave

Trave som slumpas ut vid kollektivmätning med syfte att ta fram ett omräknings- eller omvandlingstal. Används även för kontroll av ordinarie mätning av kvalitet och/eller kvantitet.

Stocklängd

Med stocks längd avses ”det kortaste avståndet mellan stockens ändcentra” (Biometria 2022b). Eventuell fällkam eller ojämnheter ska bortses från. För massaved och bränsleved mäts stockens längd till sortimentets mindiameter, vanligtvis 30 eller 50 mm under bark, även om stocken i sig är längre än så.

Topp cylindervolym (m³to)

Måttslag för ersättningsgrundande kvantitet som avser stocks toppcylindervolym beräknas som volymen av en cylinder med en diameter som är lika med stockens toppdiameter under bark. Anges i kubikmeter.

Topp- och rotdiameter

Stockens topp- respektive rotdiameter mäts 10 cm från topp- respektive rotända, förutom för rotstockar då diametern ska mätas 130 cm in för sågtimmer som stockmäts och 50 cm in för travmått sågtimmer samt övriga sortiment. Om diametermåttstället hamnar på en utbuktning på stocken, finns instruktioner för hur måttstället ska flyttas så att diametern inte kan öka mot stocks toppända. Kontrollmätningen görs alltid genom korsklavning med 90 graders vinkel mellan mätriktningarna.

Virkesmätning

Beskrivs i Lag (2014:1005) om virkesmätning som ”bestämmande av virkes kvantitet och virkes lämplighet för avsedd användning”.

Bakgrund

I Sverige utförs merparten av all ersättningsgrundande virkesmätning vid industri av Biometria, en ekonomisk förening som ägs av såväl köpare som säljare av virke på den svenska virkesmarknaden. Biometria har som uppgift att säkerställa en trygg virkesaffär genom opartisk mätning och redovisning av produkter från skogen utifrån ett branschgemensamt regelverk i form av instruktioner för virkesmätning som antagits av såväl köpare som säljare.

De juridiska grunderna för handel med virke i Sverige regleras i virkesmätninglagen (SFS 2014:1005) och därtill kopplade föreskrifter från Skogsstyrelsen (SKSFS 2014:11). Dessa reglerar bland annat med vilken noggrannhet ersättningsgrundande virkesmätning måste utföras och hur mätningen ska kontrolleras. Enligt föreskrifterna får det dels endast förekomma ”obetydliga systematiska fel” (14§), dels ska avvikelser vid inmätning av ett virkesparti ligga inom definierade gränser (15§). I Skogsstyrelsens föreskrifter om virkesmätning anges även att ”den som utför virkesmätning ska systematiskt och ändamålsenligt kontrollera” så att virkesmätningen uppfyller föreskrifternas krav på mätnoggrannhet.

Daglig tillsyn och periodisk kontroll av mätutrustning

I föreskrifterna anges inte bara att virkesmätningen ska kontrolleras utan även att ”den som utför virkesmätning ska vid användning kontrollera mätnoggrannheten för mätutrustningen” (SKSFS 2014:11). Detta ska kontrolleras dagligen eller ”vid behov oftare”, medan det för handredskap kan räcka med årliga kontroller. Inom Biometria uttrycks denna kontroll som daglig tillsyn eller periodisk kontroll. Vad som ska göras beskrivs i Biometrias kontrollanvisningar (Biometria 2022a), men det kan även finnas ytterligare instruktioner från utrustningstillverkarna. Den dagliga tillsynen kan handla om allt ifrån att en provkropp körs genom en mätram under varje skift för att se att diameter och längd håller sig inom den tolerans som är satt, till kontroll av att klave och måttband håller sig inom rätt tolerans innan en kontrollmätning påbörjas. Exempel på periodisk kontroll är de tester med diameterprovkroppar som ska utföras vid två tillfällen per år (Biometria, 2022b).

Motsvarande tillsyn/kontroll finns även för skördarmätning, där skördarförarna dagligen gör manuella ommätningar för att följa upp och vid behov kalibrera skördarens inställningar. För detta ändamål ska minst en slumpvist utvald stam tas ut per skift (se Biometria 2021b). Diametrarna mäts då på bark eftersom skördarmätningen görs på bark.

Krav på kontrollmetod för virkesmätning

Skogsstyrelsens föreskrifter anger inte hur kontrollen av virkesmätningen ska gå till utan det är upp till det mätande företaget att utforma. Biometria beskriver i ett offentligt dokument deras kontrollsystem för att säkerställa att virkesmätningen följer lagens krav på mätnoggrannhet (Biometria, 2023). Kontrollen anpassas efter mätmetod, men en princip är att kontrollmetoden ska ”utföras med samma, eller noggrannare, mätmetod som vid ordinarie mätning”. I Biometrias dokument om kontroll av virkesmätning (2023) anges också:

”En kontrollmetod ska vara noggrann, stabil och likformig vilket innebär att kontrollmätningen inte får uppvisa systematisk variation mellan ommätningar, från tid till annan, från område till område, eller mellan mätplatser. Kontrollmetodens noggrannhet måste vara dokumenterad.”

Kontroll av olika mätmetoder för rundvirke

Biometrias kontroll är utformad så att varje stock eller trave som mäts in, slumpmässigt kan väljas ut för kontrollmätning. Antalet kontrollobjekt ska vara tillräckligt stort för att mätningens kvaliteten kan följas upp för varje ”kontrollpopulation”. En kontrollpopulation utgörs ofta av ett specifikt sortiment inmätt med en mätmetod på en specifik mätplats, exempelvis sågtimmer av gran inmätt med stockmätning vid ett visst sågverk. För varje mätmetod och kontrollpopulation har Biometria tagit fram interna kravnivåer (Biometria 2021a). Kontrollmätningen är anpassad efter mätmetod.

De vanligaste metoderna för mätning av rundvirke är travmätning och stockmätning. Travmätning utförs för såväl sågtimmer, massaved och bränsleved, även om stockmätning är den vanligaste metoden för sågtimmer. Stockmätning används också för kontroll av både travmätning och stockmätning. Det finns även så kallad kollektivmätning, som kan innehålla flera mätmetoder i olika mätsteg. Ett stickprov tas då ur ordinarie mätningens flöde och mäts in med en noggrannare mätmetod för att få fram en justeringsfaktor för volym eller mer information för prissättning. En relativt vanlig variant av kollektivmätning för sågtimmer är att travmätning görs för allt timmer inom ett kollektiv. Sedan tas stickprovstravar ut för stockmätning, som då kan ligga till grund för att ta fram volymkorrektion och även för stockarnas fördelning av dimensioner och kvalitet för bestämning av virkets pris (exempelvis kr/m³fub).

Rundvirke kan också mätas in direkt i skogen genom ersättningsgrundande skördarmätning. Då är Biometria inte formellt mätande företag, men Biometria kan kvalitetssäkra skördarmätning och ansvarar då för att kontrollera och följa upp att mätningens noggrannhet håller givna krav (se Biometria, 2021b).

Kontroll av stockmätning i mätram (enbart sågtimmer)

Kontrollstockar väljs slumpmässigt ut för ommätning direkt efter att sågtimmerstockarna har passerat mätramen. Kontrollstocken märks upp och när tillräckligt många kontrollstockar fallit ut kommer en av Biometrias kvalitetsledare att mäta om dem manuellt. Kvalitetsledarna bestämmer varje stocks kvalitet och mäter längd och toppdiameter med en digital klave utrustad med ett måttband. Diametern, som bestäms genom korsklavning, mäts under bark genom att barken avlägsnas med yxa. Då det ersättningsgrundande måttslaget är fastvolym under bark (m³fub) kan även rot diameter mätas.

Sedan 2020 praktiserar en flexibel kontrollmätning, vilket innebär att alla kontrollstockar kvalitetsbedöms, men att längd och diametrar kan mätas på ett urval av kontrollstockarna. Detaljerad beskrivning av arbetsgång finns i Biometrias nationella bestämmelser för virkesmätning (Biometria 2022b).

För att undvika grova fel i kontrollmätningen, exempelvis orsakade av att fel kontrollstock är uppmärkt, kan kvalitetsledaren ladda ner information om resultatet från den ordinarie mätningen i klaven för kontrollmätning. Om avvikelsen mellan ordinarie mätning och kontroll är så hög att kvalitetsledaren bedömer att det skett en sammanblandning av stockar, kommer stocken att undantas från underlaget för kontroll.

Kontroll av travmätning

Då mätmetoden är travmätning, slumpas hela kontrolltravar ut för kontroll genom stockmätning. Stockmätningen, som utförs på travens alla stockar, kan genomföras på flera sätt. För sågtimmer görs mätningen ofta med hjälp av en mätram. Det vanligaste sättet för massaved och bränsleved, men som även förekommer för sågtimmer, är att stockmätningen görs manuellt, antingen av ”stickprovslag” eller av en kvalitetsledare. Kontrollmätningen har också kunnat göras genom mobil automatisk stickprovsmätning (MAS), dvs en mätram monterad på en lastbil som kan nyttjas på flera mätplatser, men Biometria har av ekonomiska skäl tagit det systemet ur drift under mars 2023.

Vid kontroll av travmätning, till skillnad från kontroll av stockmätning, kan diametermätningen göras på bark. Diameter under bark beräknas då genom att dra bort barktjockleken efter att tjockleken bedömts eller mätts. Vid klavning kan mätarna justera barktjockleken genom att registrera i klaven att barken är tjockare eller tunnare än normalt. Vid mätramsmätning kan mätningen göras automatiskt eller så anger mätaren en barkkod som styr hur stort barkavdrag som ska göras då mättrams mätning utförs på bark.

En annan skillnad från kontroll av stockmätning är att rotdiametern på rotstockarna i en trave alltid mäts 50 cm från rotändan, även för sågtimmer där mätningen normalt utförs 130 cm från rotändan. För sågtimmer beräknas diametern vid 50 cm dock om till diametern vid 130 cm för att kunna nyttja samma volymfunktioner som för sågtimmer. Diametermätningen vid 50 cm görs av ergonomiska skäl då det anses tungt att mäta så långt in vid stockmätning av travar och varje trave innehåller många stockar.

Vid stockmätning av kontrolltravar slumpas även enskilda stockar ut för en ytterligare kontroll, med undantag för då stockmätningen gjorts av en kvalitetsledare. Dessa kontrollstockar mäts i princip på samma sätt som kontrollstockarna som slumpas ut vid stockmätning i mätram, vilket innebär att diametern mäts under bark. En skillnad när det gäller rotstockar från sågtimmer är att kontroll av rotdiameter kommer att utföras på 50 cm i stället för på 130 cm från rotändan. Diametern vid 130 cm beräknas utifrån detta mått för att kunna användas i volymfunktionerna för sågbara sortiment.

Kontroll av kollektivmätning

Vid alla former av kollektivmätning av rundvirke förekommer något mätsteg där travmätning eller del av trave/knippe volymbestäms. För detta objekt görs en kontroll på motsvarande sätt som för travmätning. Vid kontroll av kollektivmätning är det den kollektivomräknade volymen som avses.

Kontroll av skördarmätning

Vid kvalitetssäkrad skördarmätning utför Biometrias kvalitetstekniker både en uppföljning av skördarmätningens noggrannhet av fastvolym under bark (m^3_{fub}) och den kontroll som skördarförarna utför av skördarens automatiska mätning av längd och diameter vid varje skift (Biometria 2021b). Hela stammar slumpas ut kontinuerligt, vilka mäts om av skördarförarna. Kvalitetsteknikernas kontroll görs i skogen minst två gånger per år. Eftersom kvalitetsteknikerna behöver veta att skördarförarna är på plats, är det av praktiska skäl inte möjligt att göra kontrollen helt utan förarnas vetskap (Jonas Hemmingsson, Biometria, pers. komm. 2023-01-26).

Kontroll av skördarmätningen görs på liknande sätt som den kontroll som görs av stockmätning i mätram (jämför Biometria 2021b och 2022a). En skillnad är att

klavningen görs på bark (både av förare och kvalitetstekniker) och att barktjockleken bestäms med barktjockleksmätare (enbart kvalitetstekniker) för att kunna beräkna diameter under bark (Jonas Hemmingsson, Biometria, pers. komm. 2023-01-26). Detta ger möjlighet att kontrollera skördarens diametermätning, som görs på bark, men även den diameter som fås fram under bark, som baseras på både skördarmätning och barkfunktioner.

Kontrollsystem i andra branscher

Inom många industrier är produktionens mål att uppnå en beställd dimension (exempelvis verkstadsindustrin) eller koncentration (exempelvis läkemedelsindustrin). Den ordinarie mätningens roll blir då att mäta avvikelser mellan den beställda kvantiteten och den uppnådda, med en viss tolerans. Detta kan göras på alla enheter eller på ett stickprov av enheter. Med andra ord påminner den ordinarie mätningen i dessa fall om virkesmätningens kontrollmätning.

Kvalitetssäkringssystem för mätning förekommer även det i många branscher. Formerna för kvalitetssäkringen kan vara företagsspecifika, branschgemensamma överenskommelser eller lagstadgade. Det kan finnas nationella eller internationella standarder (SIS/ISO), både smala för olika ordinarie mätmetoder och breda för kontrollsystem. Industriföretag som är certifierade enligt kvalitetsledningsstandarden ISO 9001 har till exempel krav på sig att alla mätningar som är viktiga för verksamheten måste utföras med kalibrerade mätinstrument som kan spåras till nationella eller internationella mätnormaler (SIS 2015). Kalibrering innebär att systematiska avvikelser mäts och dokumenteras. En justering innebär att instrumentet ställs om så att avvikelser tas bort, vilket ofta görs av instrumenttillverkaren. Inom vissa branscher behöver kalibreringen vara ackrediterad av myndigheten Swedac, vilket innebär ytterligare krav. Skattning och reducering av slumpmässiga avvikelser är ofta mindre systematiserat än mätningen av systematiska avvikelser. Om kvalitetsegenskapen är av sådan art att den inte kan kontrolleras genom mätning och kalibrering ska den i stället valideras enligt en standardiserad process.

Det finns även standarder som beskriver kontrollsystem, dock ofta i vid mening. Begreppet kontrollorgan används för företag och organisationer som fyller motsvarande Biometrias funktion och som verkar inom områden där lagen ställer krav på att kontrollen är ackrediterad. Kraven för ackreditering inbegriper bevisad kompetens, oberoende och opartiskhet.

Motiv för studien

Utförare brukar lyfta fram att klavningen snarare bör ses som en referens än ett facit, och att en enhetlig referens underlättar jämförelsen mellan olika mätmetoder och sortiment. I takt med att stockmätningen i skördare och med mätram blivit alltmer noggrann har klavens legitimitet som kontrollmetod börjat ifrågasättas. Framför allt pekas det på att den klavningsbaserade diametermätningen har en högre mätosäkerhet än många av de moderna stockmätramarna. Detta kan potentiellt vara hindrande för teknikutvecklingen, då förbättringar av mätramsmätningen inte självklart slår igenom i mätresultatet när utrustningen kalibreras mot en trubbigare referensmetod. Det är därför motiverat att undersöka lämpliga alternativ till klaven samt deras för- och nackdelar.

Stockvis kontroll av virkesmätning sker idag i stor utsträckning genom manuell korsklavning av diametern och längdmätning med måttband. I proceduren finns ett stort antal steg där osäkerhetskällor introduceras, inte minst beroende på den mänskliga

faktorn. Längdmåttet ska mätas från ändcentra till ändcentra. Eftersom stocken i praktiken ofta har någon grad av ovalitet och krök, samt olika barktjocklek under olika årstider blir mätresultaten en approximation av stockens sanna mått. Diametermåttet ska ges under bark, vilket innebär att barken antingen avlägsnas med en yxa och mätningen sker under bark, eller att en barktjockleksmätare används för att dra bort barkmåttet efter mätning på bark. Särskilt vintertid innebär barkningen respektive barktjockleksmätningen ett tungt arbetsmoment som vore önskvärt att ersätta med en mer skonsam metod eller en metod som mäter direkt under bark. Det är därför motiverat att genomlysas hur stor del av mätosäkerheten i virkesmätning som härrör från osäkerhet i kontrollmetoden samt undersöka alternativa metoder till mätning av stockens diameter under bark.

Syfte

Syftet med studien var att förutsättningslöst utreda dagens system och metoder för kontroll av rundved på stocknivå samt eventuella alternativ och deras för- och nackdelar jämfört med dagens metod.

Studien avgränsades till kontroll av stockmätning vid industri och i skog (skördarmätning), och mätning av stockarnas längd, diameter och volym (ej kvalitet).

Studien genomfördes som fyra separata delstudier, vilka utgjorde studiens delmål:

1. Kartläggning av krav och syn på dagens metod hos relevanta aktörer som utförare av kontrollmätning, utrustningstillverkare samt användare av kontrollresultaten
2. Kvantifiering av den manuella kontrollmätningens osäkerhet
3. Genomgång av alternativ mätteknik för kontrollmätning av stockar (litteraturstudie)
4. Test av ny teknik för mätning av barktjocklek med radioteknik

Material och metoder

Krav och syn på dagens metod för kontroll av stockmätning

Översynen av krav och syn på dagens kontrollmetod genomfördes baserat på en enkät och en serie intervjuer under våren 2022, samt en uppföljande workshop med Biometria i slutet av 2022. Kärnan i materialinsamlingen bestod av frågor kring:

1. Upplevda fördelar respektive nackdelar med dagens kontrollsystem ur tre perspektiv:
 - a) Organisation (frekvens, tidsåtgång, kostnad, datahantering, m.m.)
 - b) Mätningens kvalitet (noggrannhet, känslighet, repeterbarhet, m.m.)
 - c) Arbetsmiljö (hantering, säkerhet)
2. Förslag på förändringar eller alternativ

Tre intressentgrupper identifierades bland de svarande, vilket beskrivs närmare i Tabell 1.

Tabell 1. Intressentgrupper för krav och syn på dagens metod, samt beskrivning av frågemetodik.

	Användare av kontrollresultat	Ansvariga för kontrollmätning	Utrustnings-tillverkare
Undergrupper	<ul style="list-style-type: none"> • Säljare av virke • Köpare av virke • Avverknings-entreprenörer • Transportörer 	<ul style="list-style-type: none"> • Kvalitetsledare • Kvalitetstekniker • Kvalitetsutvecklare • Affärsutvecklare 	<ul style="list-style-type: none"> • Utrustning för ordinarie mätning • Utrustning för kontrollmätning
Frågemetod	Enkät	Videointervjuer, workshop	Videointervjuer
Antal tillfrågade	20	4 (intervjuer) + 6 (workshop)	7
Antal svarande	7	4 + 6	6*

* Avser 6 intervjuer med utrustningstillverkare, vid intervjun deltog ibland fler än en representant för företaget.

Enkätfrågorna till användare av kontrollresultat samt förberedelsefrågorna inför intervjuerna med utförare och tillverkare finns i Bilaga 1.

Det insamlade materialet sammanställdes baserat på fördelar respektive nackdelar med dagens system samt förslag på förändringar eller alternativ till dagens metoder.

Utvärdering av den manuella kontrollmätningens osäkerhet

Att exakt beräkna kontrollmätningens osäkerhet är knappast möjligt. Det är däremot möjligt att skatta inom vilket intervall osäkerheten borde ligga genom att nyttja data som redan samlats in av Biometria (se nedan). Osäkerheten uttrycks i denna studie som standardavvikelse och beräknades för mätning av stockarnas längd, toppdiameter och toppcylindervolym (m^3to). Osäkerheten i längd och toppdiameter har i denna rapport uttryckts i absoluta tal, medan volymmätningen uttryckts som procent av de inmätta stockarnas medelvolym, vilket normalt görs vid volymmuppföljning inom Biometria.

Beräkning av osäkerhetens miniminivå

Beräkning av osäkerhetens miniminivå baserades på underlag från fyra av Biometrias interna kalibreringsmätningar (Biometria, 2023) för sågtimmer som genomfördes under åren 2017–2021 (bl.a. Edlund 2018). Kalibreringsövningarna syftar till att säkerställa att den personal som utför kontrollmätningar, kvalitetsledarna, mäter och bedömer virke på samma sätt. Under övningarna genomfördes kontrollmätning på 50–100 stockar av flera lag med två kvalitetsledare i varje. Skillnaderna mellan lagen ger ett mått på kontrollmätningens osäkerhet och ska ses som en miniminivå eftersom den görs under ideala förhållanden. Kvalitetsledarna vet exempelvis om att det är en övning, vilket kan leda till att de blir mer noggranna. Osäkerheten i diametermätning som orsakas av att olika kvalitetsledare avlägsnar bark med yxa finns inte med eftersom det enbart är första laget vid en stock som kan utföra den. Korsklavningen görs dessutom på samma måttställe för alla lag.

Osäkerheten under kalibreringsövningarna togs fram genom att först beräkna standardavvikelsen (s_j) mellan kvalitetsledarlagen för varje uppmätt stock:

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Där x är den uppmätta diametern, längden eller volymen av kvalitetsledarlag i för stocken j , \bar{x} det aritmetiska medelvärdet för respektive mått och antalet mätande lag var n . Sedan beräknades en poolad standardavvikelse (s_{ij}) över alla stockar, där antalet stockar var m :

$$s_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m s_j^2}{m - n}}$$

Beräkning av osäkerhetens maximinivå

Beräkning av osäkerhetens maximinivå baserades på den kontrollmätning av sågtimmerstockar som utfördes av Biometria på olika mätplatser med mätrammar. På en mätplats orsakas den totala osäkerheten både av osäkerheten i ordinarie mätning och i kontrollmätningen. Om vi antar att stockmätningen vid mätplatser med de noggrannaste mätramarna skulle vara utan mätfel, skulle osäkerheten helt orsakas av kontrollmätningen. Detta ger en teoretisk maximinivå på kontrollmätningens osäkerhet.

Osäkerheten för ett trädslag på en mätplats, beräknades som standardavvikelse (s) och följde samma beräkningsmetodik som används av Biometria (2023):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - x)^2}{n - 1}}$$

där y är ordinarie mätning och x kontrollmätningens uppmätta diameter, längd eller volym för stock i . Det sammanlagda antalet stockar var n .

Som underlag i beräkningarna användes kontrollstockar av tall och gran inmätta under 2021. För att minska risken att få med mätningar som orsakats av grova fel, såsom att ordinarie mätning och kontrollmätning inte gjorts på samma stock, användes endast stockar med en toppdiameteravvikelse på högst 30 mm eller en längdavvikelse på högst 10 cm. Totalt 76 093 stockar av 76 237 stockar uppfyllde dessa krav. Beräkningar utfördes endast då minst 100 stockar fanns för ett trädslag på en mätplats.

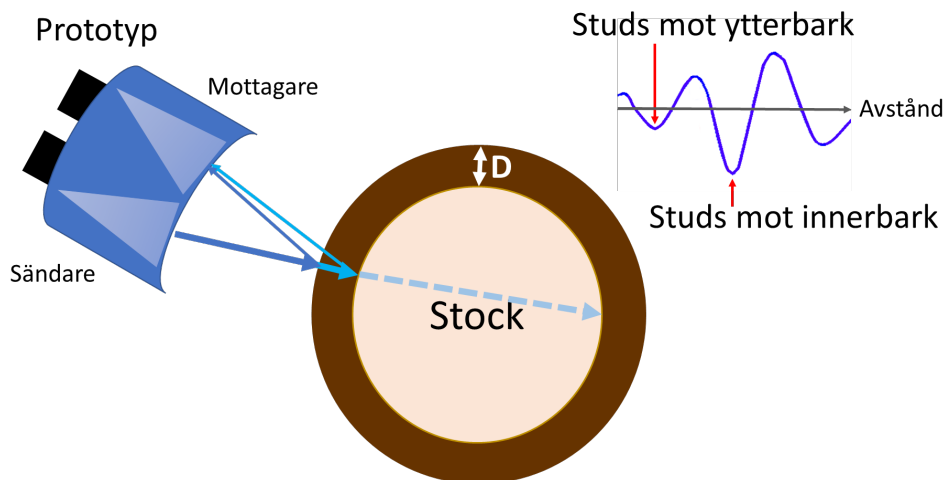
Alternativ mätteknik för kontrollmätning av stockar

Litteraturgenomgång

Baserat på intervjumaterialet (se Tabell 1) bedömdes mätning med mobil respektive handhållen laserskanner som två intressanta alternativ för mätning av diameter eller volym hos stockar. Stockmätning med fast/statisk laserskanning (Terrestrial Laser Scanning, TLS) undersöktes inte då mobilitet var en tydlig önskan hos utförare av kontrollmätning. En databassökning gjordes efter rapporter och vetenskapligt publicerade artiklar som både använt klavning och handhållen laserskanner för att mäta diameter/brösthöjdsdiameter eller volym på stockar eller enskilda stående träd. Fem artiklar med hög relevans hittades. Ytterligare ett antal artiklar gick igenom, men kunde inte användas eftersom det var oklart vilken referensmetod som använts. Slutligen gjordes även en ansats att hitta relevanta kontrollsystem i andra branscher. Detta gjordes genom litteraturgenomgång samt mejlkontakt med ämnesnära forskare och tjänstemän.

Test av prototyp för mätning under bark med mikrovågsradar

Kring år 2010 gjordes flera förstudier som visade potential för att mäta barktjocklek med mikrovågsmätning i radarläge. Bland annat har opublicerade försök gjorts av Chalmers Tekniska Högskola med en egenutvecklad mikrovågstomograf (Mikael Persson, Chalmers, pers. komm. 2022-10-04), SP Träteknik med kommersiell markradar (Anders Lycken, RISE, pers. komm. 2022-12-13) och Radarbolaget med deras egen mikrovågsteknik (Patrik Ottosson, Radarbolaget, pers. komm. 2022-04-10). En ny prototyp togs fram av Radarbolaget och testades inom ramen för detta projekt (för detaljer, se Bilaga 2). Prototypen baserades på två ultra-wideband (UWB) antenner med storleken 10 x 10 cm och centrumfrekvens kring 2,5 GHz. Antennerna monterades i ett antennhus till en handhållen enhet designad för ett mätavstånd om 20 cm från mantelytan hos en stock. Mätprincipen baserades på principen att signalen som genereras av sändaren reflekteras tillbaka mot mottagaren vid flera olika gränsskikt i stocken. Hypotesen var att den kraftfullaste reflektionen skulle ske mellan bark och splintved. Genom att analysera skillnaden i tid för de olika reflekterade signalerna, så kallad time-of-flight analys, bör ett avstånd som motsvarar dubbla barktjockleken kunna beräknas, se Figur 1.



Figur 1. Schematisk illustration över mikrovågsprototypens radarmätning (reflekterande mätning) av effektiv barktjocklek (D). I bilden syns även ett diagram över den mätta signalens amplitud (styrka) som funktion av avståndet signalen har färdats.

En prototypurustning togs fram med målsättningen att den inte skulle vara mer skrymmande än att den skulle kunna bäras i en ryggsäck. Prototyp, signalbehandling och analysmetod utvärderades först i labb på rumstempererade stockar med olika barktjocklek, samt på en frusen stock. Prototypurustningen testades sedan i samarbete med Biometria under en kontrollmätning på Kastets sågverk i Gävle. Klavning på och under bark användes som referensmått, där yxa användes för att avlägsna barken. Totalt mättes 26 diametrar på gran och tall. En utmaning var att utföra radarmätningen på exakt samma punkt som klavningen. För att stötta detta markerades klavningspunkten med blå färg. Mikrovågsmätaren har ett mätområde på omkring 10–20 mm i diameter, vilket innebär att den mäter barktjockleken på den punkt på mantelytan som ligger inom mätområdet och samtidigt är närmast mottagaren.

Resultat och diskussion

Krav och syn på dagens metod

Av fördelar med dagens metod för kontroll av stockmätning vid industri och i skog (skördarmätning) lyftes följande fram:

Tabell 2. Fördelar med dagens kontrollmetoder- och system som framkom vid enkät och intervjuer.

Organisation	Mätningens kvalitet	Arbetsmiljö
Bra med standardiserad mätning	God repeterbarhet	Klaven är lätt att bära med både på industri och i skog
Bra med återkoppling	Barkmätaren ger underlag till utvärdering av barkfunktioner (skog)	
Vi behöver kalibrera oss själva mot andra mättekniker oavsett	Kontrolldata bra för att träna AI och göra smidiga övergångar till nya mätningar	

De nackdelar som lyftes med dagens metod redovisas i Tabell 3.

Tabell 3. Nackdelar med dagens kontrollmetoder- och system som framkom vid enkät och intervjuer.

Organisation	Mätningens kvalitet	Arbetsmiljö
Antalet mätningar är för få för kontroll av t.ex. nedklassningsorsak. Detta innebär att vi bara kan använda data för helår och inte enskild månad, annars blir det för få datapunkter.	<p>Effekten av barkningen blir olika beroende på säsong, barkning med yxa t ex blir sämre vintertid (industri)</p> <p>Barkmätaren fungerar dåligt på frusen bark/ved och massaved, samt om man råkar vicka till den (skog)</p> <p>Kontrollmätarna har slumpmässig vinkel på klaven när de korsklavar – kan ge outliers</p> <p>Eftersom klavningen bara görs i två riktningar, hur ska man kunna jämföra med något som man mäter i en massa riktningar (mätramen)?</p> <p>Ingen kontroll görs på bark trots att det är det enda måttet som mäts av vissa mätramar</p>	<p>Barkning med yxa är ett farligt och tungt moment, särskilt vintertid (industri)</p> <p>Svårt att föra in barkjockleksmätaren (skog)</p> <p>Det går inte att utföra kontrollmätning alla dagar på vintern när väderförhållandena är dåliga</p>

Förslag på alternativ till dagens kontrollmetoder som lyftes redovisas i Tabell 4.

Tabell 4. Tankar och förslag kring alternativ för kontrollmetoder och system som framkom vid enkät och intervju.

Organisation	Mättningskvalitet	Arbetsmiljö
Ha barkmaskinen innan stockmätningen	Jämför skördarmätning med ersättning vid industri för att snabbt upptäcka avvikelser	Klave som mäter under bark
Vill få använda kalibrerad/kontrollerad provkropp som "facit"	Fokusera på kontroll i början – när du kalibrerat och kört in en mätram bör den sedan vara ok (förekommer i Tyskland/Österrike). Tänk på att installationsperioden är en outlier. Gör kontroll efter ett tag. Bra om någon form av data på stocknivå fortfarande finns tillgängligt även med sådant system.	Barktjockleksmätning med separat mätare skulle ta lång tid eftersom den inte är inbyggd i klaven. Skulle behöva göra det på fyra ställen med tanke på korsklavningen
Kontrollresultaten borde publiceras öppet på kvartalsnivå för respektive mätplats för att skapa trovärdighet i kvalitetsuppföljningen från skördartillredning till industri	Potential att nyttja och vidareutveckla den inbyggda självdiagnostik som vissa mätrammar har för att fånga mätfel	Kontrollmätning med tak och standardiserad höjd vore bra
Använd en mobil mätram med röntgen som flyttas mellan olika kontrollplatser där stockarna körs igenom av kontrollmätaren, likt MAS:en	Nyttja skördardata för att löpande hålla koll så att mätramsmätningen inte avviker i ökande omfattning	
Dagens system är anpassat för skogsägare-virkesköpare. Anpassa systemet även till fallet skogsbolag-sågverk		
Ett system med ökad tillit till kalibrering skulle kräva nya sensorer för att upptäcka stötar och andra tillfälliga fel som kalibreringen missar		

Många perspektiv och några trender

Vissa utmaningar fanns i inhämtandet av krav och syn på dagens metod. Enkäten till köpare, säljare, entreprenörer och transportörer hade en låg svarsfrekvensen, totalt sju svar efter två påminnelser. Det kan antingen tyda på att nödvändig kunskap för att besvara enkäten är utspridd hos flera roller på samma företag, vilket skulle försvåra genomförandet av enkäten, eller att frågan inte är intressant för målgruppen. För utförare samt tillverkare gjordes bedömningen att mättnad i informationsinsamlingen uppnåddes genom intervjuerna samt workshopen.

Många olika perspektiv framhölls men några lyftes fram återkommande. En ny kontrollmetod ansågs behöva hålla minst samma mätnoggrannhet som den nuvarande. Värdet i klavens mobilitet framhölls; att den kan användas som referensmetod både vid industri och vid mer utmanande förhållanden, exempelvis i skogen. Att metoden bör kunna hantera förekomst av snö och is framhölls också. Dock ansågs barkning med yxa vara en stor nackdel med klavningsmetoden. En klave med integrerad beröringsfri underbarksmätning var önskad. Även barktjockleksmätarens ergonomiska utmaningar vintertid framhölls. Mätning med mobiltelefon sågs också som ett attraktivt alternativ om mätnoggrannheten var tillräcklig.

Ett annat tema var förändringar i mätplatsmiljön, framför allt vid industri, som skulle verka koncentrationsfrämjande och homogeniserande och därmed minska mätosäkerheten från de manuella momenten i kontrollmätningen. Exempel var bättre

belysning, standardiserad och ergonomisk mät höjd samt tak för att skydda mot snö och regn.

Vissa tillverkare hade ett önskemål om ökad grad av egenkontroll, medan andra tillverkare inte hade några särskilda önskemål på utformandet av kontrollsystemet. I ett scenario med ökad grad av egenkontroll framhölls att nya sensorer skulle först behöva utvecklas för att fånga upp tekniska sällanfel som inte skulle upptäckas av mätramen själv, exempelvis efter att mätramen utsatts för stötar. Även ökad frekvens av diameter-test framhölls som nödvändigt.

Ökat nyttjande av skördardata för att snabbt kunna identifiera större fel i industrimätningen lyftes också fram. På motsvarande sätt bör mätramsdata kunna nyttjas i större utsträckning för att identifiera fel i skördarmätningen.

Osäkerhet i dagens kontrollmätning

Stor variation i osäkerhet mellan olika tillfällen

Det var en stor variation i osäkerhet mellan Biometrias olika kalibreringsövningar vid mätning av stockarnas diameter, längd och volym (Tabell 5). Den senaste kalibreringsövningen uppvisade de lägsta standardavvikelse för alla mått. Den första uppvisade högst osäkerhet för diameter och volymmätningen, men inte för längd.

Orsaken till skillnader i standardavvikelse vid olika tillfällen har inte undersökts, men utöver eventuella skillnader i stockmaterialet, kan det också bero på att kalibreringsövningarna ändrats något över tid. Följande förändringar har gjorts:

- Kalibrering och vid behov justering av klave och måttband innan och efter övning har införts
- Markering på stockar om vad som är ”uppåt” på stocken, vilket gör att klavningen görs på samma måttställen

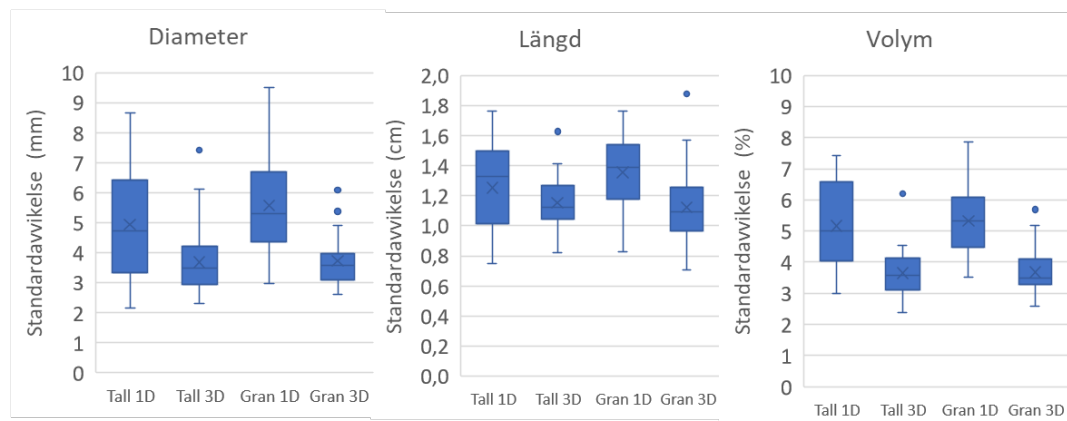
Tabell 5. Osäkerhet vid kontrollmätning baserat på kalibreringsövningar utförda på sågtimmer under 2017–2021 uttryckt i standardavvikelse. Osäkerheten motsvarar den miniminivå som kontrollmätningen kan tänkas ha.

År	Plats	Trädslag	Medelvolym (dm ³)	Standardavvikelse		
				Diameter (mm)	Längd (cm)	Volym (%)
2017	Moheda	Tall	203	3,8	1,1	3,4
2018	Notnäs	Gran	203	2,4	1,8	2,1
2018	Siljan	Tall	223	2,4	1,9	2,0
2021	Östanskär	Tall	169	1,9	0,7	0,9
2021	Östanskär	Gran	144	1,5	0,6	0,6

Stor spridning i osäkerhet mellan olika mätplatser

Eftersom kontrollmätningen vid en kalibreringsövning görs under ideala förhållanden, är den verkliga osäkerheten troligen högre än så. Genom att beräkna osäkerheten på mätplatser med mer än 100 kontrollstockar av tall eller gran år 2021 kunde en skattning göras av vilken högsta nivå som kontrollmätningen kunde tänkas ha. Resonemanget bygger på att osäkerheten på mätplatsen med lägst osäkerhet (standardavvikelse) helt skulle orsakas av kontrollmätningen och att mätramen i sig skulle mäta utan fel. Standardavvikelsen på de noggrannaste mätplatserna var för mätning av diameter 2,3 mm, längd 0,8 cm och volym 2,4 procent (Figur 2). Intervallet för kontrollmätningens

verkliga standardavvikelse borde då ligga någonstans mellan resultatet från den kalibreringsövning med lägst standardavvikelse och mätplatsen med allra lägst standardavvikelse (Tabell 6). De skattningar som tidigare gjorts av Örneberg (2013) med osäkerhetsbudget ligger i mitten av dessa intervall för diameter (2 mm) och volym (1,4 %, avser fastvolym). För längd skattade Örneberg (2013) en högre mätosäkerhet än det intervall som togs fram i den här studien (1 cm).



Figur 2. Standardavvikelse vid mätning av diameter, längd och volym på mätplatser med mätramare där diametern mäts i en (1D) eller tre dimensioner (3D) på tall eller gran. Lådidiagrammen visar mätplats med lägst standardavvikelse, nedre kvartil, median, medel (kryss), övre kvartil, högst standardavvikelse samt utliggare (punkt). Diagrammet baseras på alla mätplatser där Biometria mätte minst 100 kontrollstockar under 2021. Totalt ingick 60 mätplatser med tall och 72 med gran.

Tabell 6. Beräknat intervall inom vilket standardavvikelse vid kontrollmätning av diameter, längd och volym för sågtimmer borde ligga.

Måttslag	Enhet	Min	Max
Diameter	mm	1,5	2,3
Längd	cm	0,6	0,8
Volym	%	0,6	2,4

Potential till förbättrad noggrannhet om kontrollmätningen skulle vara utan fel

Hur mycket skulle osäkerheten på en genomsnittlig mätplats för sågtimmer kunna minska om kontrollmätningen blev mer noggrann? Om vi antar att (1) de mätfel som finns nu är oberoende av varandra vid ordinarie mätning och kontrollmätning, (2) nuvarande kontrollmätning ligger nära maximinivån skattad i Tabell 6 och (3) kontrollmätningen skulle bli helt utan fel, kan potentialen av förbättringen beräknas. För en genomsnittlig mätplats skulle standardavvikelsen då sjunka enligt följande:

- Från 4,3 mm till 3,6 mm för toppdiametern
- Från 1,2 cm till 0,9 cm för längd
- Från 4,2 % till 3,4 % för volym (m3to)

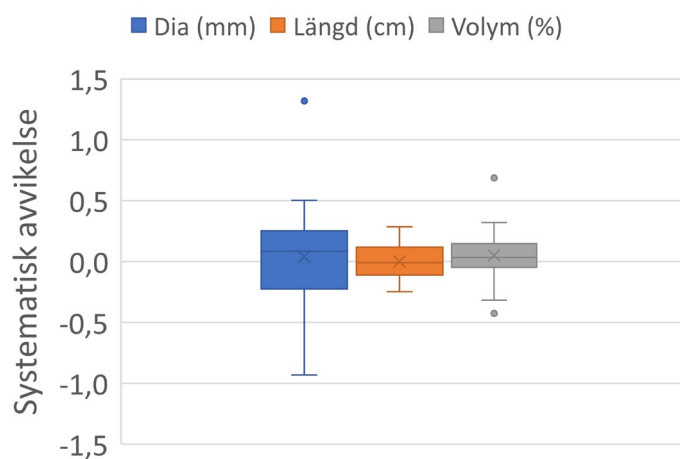
Detta är alltså den maximala potentialen till förbättring. Om kontrollmätningens noggrannhet däremot ligger på sin bästa nivå (som vid den bästa kalibreringsövningen) skulle standardavvikelsen sjunka till 4,0 mm för toppdiametern, 1 cm för längd och inte vara märkbar för volymen.

Det kan också konstateras att det var en stor variation i standardavvikelse mellan olika mätplatser (Figur 2). Mätplatser där mätramarna kunde mäta diameter i flera riktningar

(3D) hade generellt en lägre standardavvikelse på både diameter- och volymmätningen än de mätrammar som bara kunde mäta diametern i en riktning (1D) (Strömgren 2017; Hyll & Nordström 2021). Även längdmätningen var bättre för mätrammar med 3D-teknik, men eftersom mättekniken av längd var ganska lik för alla mätramstyper (Strömgren 2017) var skillnaden inte lika tydlig där. Sammantaget kan konstateras att noggrannheten i dagens kontrollmätning borde vara lägre än noggrannheten på de flesta mätplatser (jämför Figur 2 och Tabell 2).

Minimera eventuella systematiska fel

I den här studien har fokus varit på kontrollmätningens osäkerhet, uttryckt som standardavvikelse. Det ger ett mått på hur noggrann mätningen på en enskild stock förväntas vara. Det är viktigt att vara medveten om att en mätram inte justeras utifrån resultatet från kontrollmätning av endast en stock, utan utifrån resultatet från många kontrollstockar. Om osäkerheten i ordinarie mätning eller kontrollmätning är stor behövs fler kontrollstockar, men även då kan tillförlitlig information om en mätrams eventuella systematiska fel fås så länge kontrollmätningen i sig inte *har betydande systematiska fel*. Det är därför av yttersta vikt att arbeta för att minimera eventuella systematiska fel vid kontrollmätningen, det vill säga ett av syftena med kalibreringsövningarna. En vägledning kring vilken nivå det systematiska felet kan ligga på mellan enskilda kontrollmätningar är att jämföra olika kvalitetsledarlag under en kalibreringsövning. Resultat från en sådan övning visar på att mätningen av diameter kan ligga i storleksordning inom ± 1 mm, längd $\pm 0,3$ cm och volym på $\pm 0,5$ procent (Figur 3).



Figur 3. Spridning i systematisk avvikelse mellan olika kvalitetsledarpar vid kalibreringsövning i Östanskär 2021. Totalt utförde 13 par kontrollmätning på 60 stockar, varav hälften på tall och hälften på gran. Låddiagrammet visar par med lägst avvikelse, nedre kvartil, median, medel (kryss), övre kvartil, högst avvikelse samt utliggare (punkt).

Kontrollmätningens osäkerhet av mindre betydelse på de flesta mätplatser

Sammanfattningsvis kan konstateras att en förbättrad noggrannhet i kontrollmätningen skulle kunna leda till en bättre mätnoggrannhet i hela mätsystemet, men hur stor denna effekt är beror på var i intervallet den verkliga osäkerheten finns (se Tabell 6). För majoriteten av mätplatser med mätrammar, är kontrollmätningens osäkerhet av mindre betydelse och dagens kontrollmetod därför relevant. Vid kalibrering och justering av

mätning är det viktigt att kontrollresultatet bygger på ett tillräckligt stort antal kontrollstockar. Det är också viktigt att hela tiden arbeta för att minimera risken för eventuella systematiska fel i kontrollmätningen (se Figur 3).

Alternativ mätteknik för kontrollmätning av stockar

Nedan presenteras resultat från litteraturgenomgången av alternativ mätteknik för mätning av stockars diameter, längd och volym samt för mätning av barktjocklek.

Mätning av diameter och volym

Xylometermätning

Xylometermätning är en vanlig metod i Finland vid industrimätning i köp mellan olika företag, det vill säga för mätning i köpledd två eller senare (Björklund 2020). Vid xylometermätning doppas en stock eller del av trave i vatten och dess volym bestäms genom att mäta hur mycket vatten som trängs undan (Özçelik m.fl. 2008). Metoden ger en fysikalisk volym på bark och inkluderar en större volym än den som normalt avses som fastvolym på bark i Sverige eftersom volymen orsakad av utbuktningar eller kvistvarv längs stockarna ingår. I Finland används metoden framför allt för att ta fram ett omvandlingstal från en vikt till en volym på bark. Eftersom de finska virkesaffärerna baseras på volym inklusive befintlig bark (m^3_{fpb}), behövs ingen ytterligare volymkorrigering, som behövs för svenska förhållanden.

Omkretsmätning

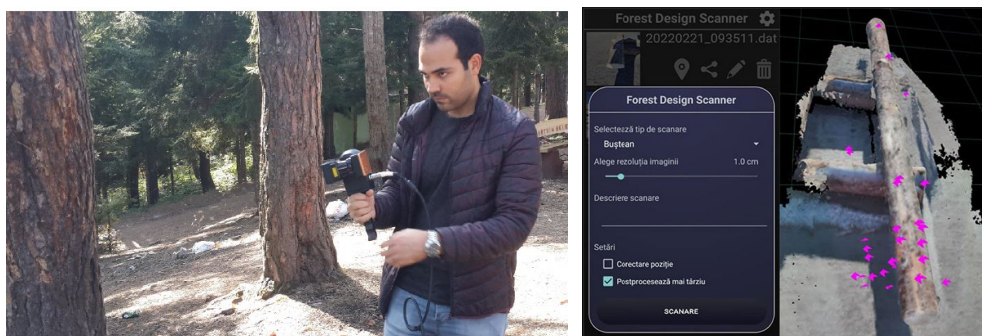
Omkretsmätning med ett diametermåttband kan användas för att beräkna stockens ekvivalenta diameter på bark vid måttstället. Med ekvivalent diameter menas den diameter som en cirkel skulle ha haft om den hade haft samma omkrets som den mätta stocken. Vi hittade inte några studier där noggrannheten av omkretsmätning med diametermåttband har utvärderats, men enligt en tillverkare av mätutrustning för fältbruk brukar diametermåttband överskatta diametern, jämfört med korsklavning, när stocken är oval (Haglöf 2020). Omkretsmätning bör däremot ha en lägre standardavvikelse än klavning eftersom klavning är mer känslig för var den sätts an mot stocken. I svensk kontrollmätning av virke är det diametern under bark som är relevant, vilket innebär att mätningen antingen behöver kompletteras med en metod för att beräkna barktjockleken eller enbart kan göras på redan barkade stockar. Att barka en stock runt om för att sedan mäta omkretsen skulle bli för omständligt. Mätning av diametermåttband på det sätt det kan göras nu, skulle dessutom troligen medföra större arbetsmiljöproblem.

Handhållen laserskanner

Laserskannrar skickar ut ljuspulser som reflekteras mot objekt och används för att skapa ett punktmoln av 3D-koordinater. Om metoden ska användas för att mäta diameter behöver punktmolnet filtreras från brus och en elips behöver anpassas till datamängden, se Figur 6. Exempel på laserskanningsmetoder är handhållen Mobile Laser Scanning (MLS) och fastmonterad/statisk Terrestrial Laser Scanning (TLS). Gemensamt brukar metoderna kallas för LiDAR (Light Detection and Ranging).

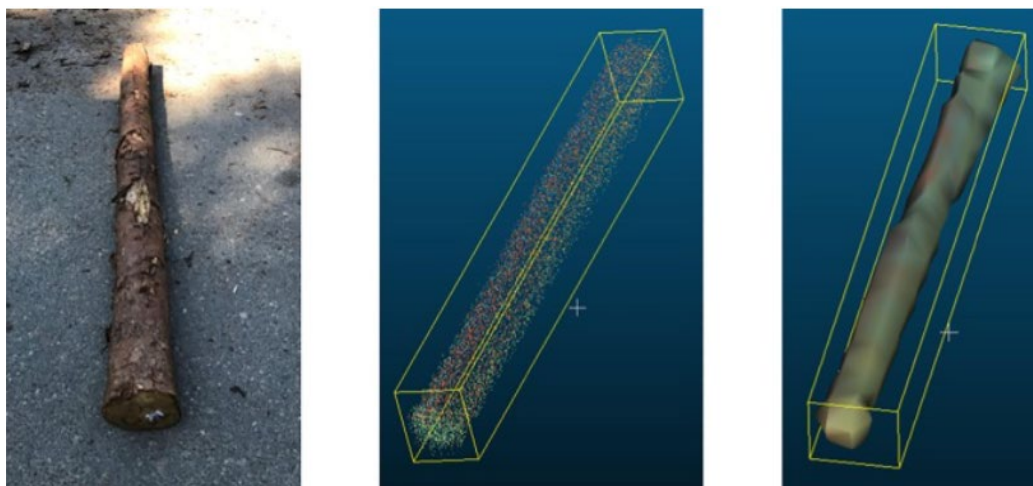
Tre studier har utvärderat handhållna laserskannrar för mätning av diameter eller volym hos enskilda stockar eller träd (Vatandaşlar & Zeybek 2020; Borz & Proto 2022; de Miguel-Diez m.fl. 2022). En av studierna jämförde tidsåtgång och de övriga jämförde mätnoggrannhet. Punktmolnstätheten redovisades inte i någon av studierna. En fjärde

studie undersökte mätning av brösthöjdsdiameter med laserklave av märket Haglöf Gator Eyes (Ucar m.fl. 2022). Samtliga mätningar utfördes på bark. I de studier som redovisas här tycks mätningarna ha genomförts med sensorn hållen i handen, det vill säga utan stativ, vilket innebär att handskakningar och vibrationer bidrar till mätosäkerheten (Figur 4).

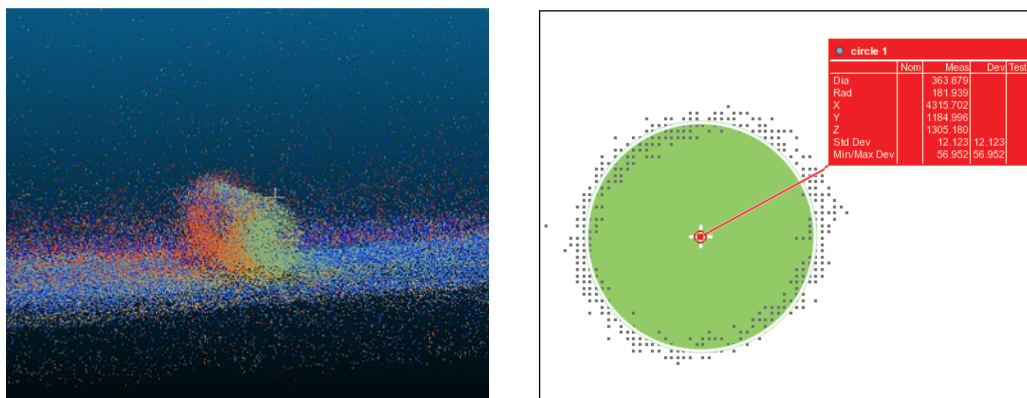


Figur 4. Vänster: positionering av den handhållna laserskannern Zeb Revo (Vatandaşlar & Zeybek 2020). Höger: ett användargränssnittet för den handhållna laserskannern Zeb Revo (Borz & Proto 2022).

Diametermätning med laserskanner kräver flera databearbetningssteg, då data rensas från brus och elipser (stamtvärsnitt) och en modell för att definiera stockens diameter anpassas till punktmolnet (Figur 5, Figur 6).



Figur 5. Användargränssnittet för den handhållna laserskannern Zeb Horizon (de Miguel-Díez m.fl. 2022). Vänster: kamerabild av stock. Mitten: uppmätt punktmoln och bounding box. Höger: ytmodell baserat på punktmolnet.



Figur 6. Metodexempel av mätning av brösthöjdsdiameter hos tall med handhållen laserskanner. Vänster: Punktmoln från stock innan dataprocessering (de Miguel-Díez m.fl. 2022). Höger: cirkelanpassning av diameter till det processade punktmolnet (Vatandaşlar & Zeybek 2020).

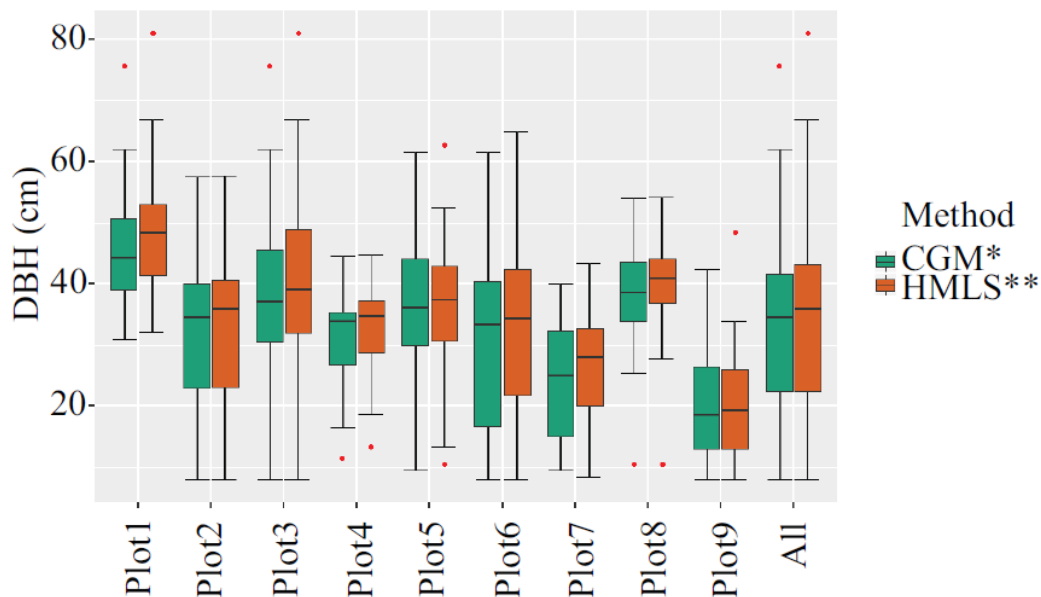
En av studierna jämförde den handhållna laserskannern dels med xylometermätning som referens, dels med tre olika sätt att kubera volym från manuell klavning av diameter (de Miguel-Díez m.fl. 2022). Jämfört med xylometermätningen hade den handhållna laserskannern en standardavvikelse på 3,5 procent (Tabell 7).

Studien visade även att standardavvikelsen halverades för stockar som klavats på tre måttställen över stocken jämfört med de som bara mittmätts eller de som topprotmätts. Rent principiellt borde osäkerheten minska ju fler måttställen som görs över en stock, dels för att stamformen då fångas bättre, dels att de tillfälliga felen vid mätningen slår ut varandra. Att det inte fanns någon skillnad i standardavvikelse mellan mittmätning och topprotmätning kan vara en konsekvens av osäkerheten i diametermätning nära rotstocks rotända är stor. I en studie av Edlund m.fl. (2018), där diametermåttet togs 1,3 m in från rotstocks rotända uppvisade topprotmätning en lägre standardavvikelse än mittmätning för rotstockar, medan skillnaden för övriga stocktyper var liten. I den studien underskattades volymen av rotstockar vid mittmätning eftersom den metoden inte tog hänsyn till stockarnas rotansvällning.

Tabell 7. Resultat från jämförelse av mätnoggrannheten hos mätning av volym på granstockar mellan tre metoder: xylometermätning, handhållen laserskanner och manuell klavning, där tre olika sätt att kubera volymen från den manuella klavningen testades (de Miguel-Díez m.fl. 2022).

Statistik	Xylometer	Handhållen laserskanner	Mitt (Huber)	Topprot (Smalian)	Toppmittrot (Newton)
Medelvolym, dm ³	81	81	86	87	83
Standardavvikelse, dm ³	28	28	34	34	29
Systematisk avvikelse %	–	0,12	5,8	6,3	2,1
Standardavvikelse %	–	3,5	11,1	11,9	5,9

Resultatet av en jämförelse av brösthöjdsdiameter mätt med korsklavning respektive handhållen laserskanner visas i Figur 7 (Vatandaşlar & Zeybek 2020).



Figur 7. Resultat av mätning av brösthöjdsdiameter hos tall hos nio olika provtytor ("Plot"), med korsklavning (grön, CGM) respektive handhållen laserskanner (orange, HMLS) (Vatandaşlar & Zeybek 2020).

Författarna kommenterade att den handhållna laserskannern tenderade att överskatta brösthöjdsdiameteren jämfört med resultatet från den manuella klavningen. Det spekulerades att förekomst av skorpbark kunde ha bidragit.

Tabell 8. Avvikelse i mätning av brösthöjdsdiameter (DBH) på bark mellan manuell klavning och mätning med laserklaven Haglöf Gator Eyes hållen på olika avstånd från stående träd av tall (Ucar m.fl. 2022)*.

	0,5 m avstånd	1,0 m avstånd	1,5 m avstånd
Systematisk avvikelse (mm)	15	20	14
Standardavvikelse (mm)	26	33	19

* Värdena är visuellt skattade från översta delen av Figur 4 i studien och bör betraktas som grova. Systematiska avvikelserna tolkades som boxplotens medianvärde och standardavvikelsen skattades utifrån avståndet mellan boxplotens minsta och högsta värde (dvs det intervall som 50 % avvikelserna finns inom) samt ett antagande om att avvikelserna är normalfördelade och att 67 % av avvikelserna därför ligger inom en standardavvikelse).

Resultaten från tidsstudien (Borz & Proto 2022) visas i Tabell 9.

Tabell 9. Skillnad i tidsåtgång för mätning av volym hos enskilda stockar av gran och bok med manuell klavning respektive handhållen laserskanner (Borz & Proto 2022). Volymen beräknades från diametermätning på bark samt längdmätning. Manuell sektionsmätning innebär mätning var 50:e cm.

	Manuell stockmätning	Manuell sektionsmätning	Handhållen laserskanner
Tidsåtgång/stock (s)	30	99	72

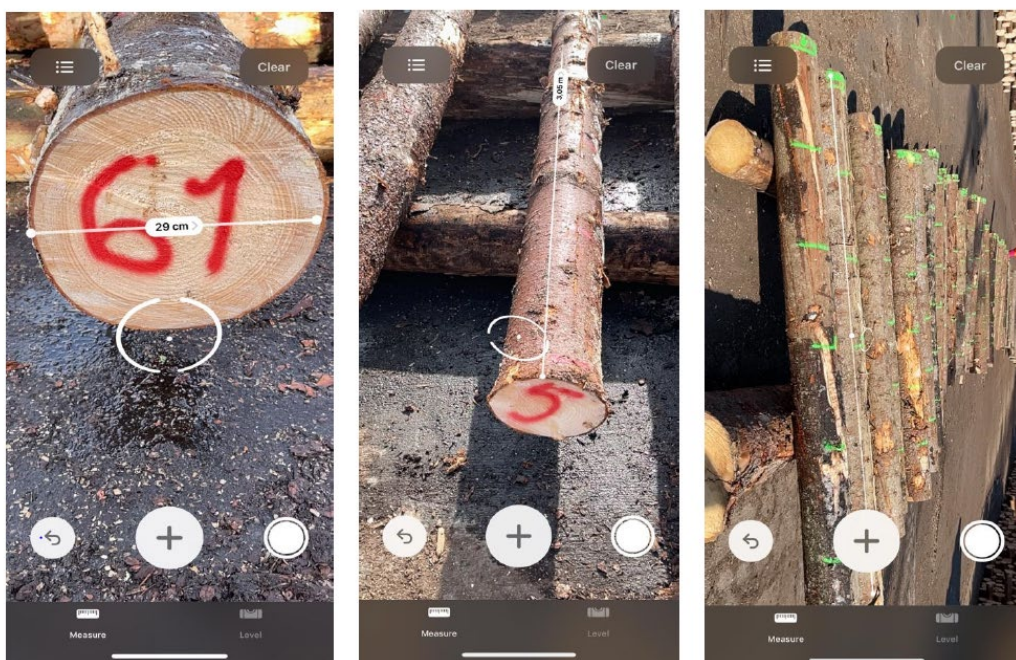
Sammantaget tycks handhållen laserskanner ge en spridning för mätningen av diameter från 25 mm vilket är betydligt högre än spridningen hos den manuella klavning som

används för kontrollmätning i Sverige. Sannolikt beror största delen av osäkerheten på dataprocesseringen och anpassningen av stamellips till punktmolnet.

Mobilapp

Kamerabaserade mobilappar har länge kunnat användas för mätning, men de har vanligen krävt att användaren samtidigt fotar en fysisk referens, exempelvis en linjal, för att appens mått ska kunna översättas till ett verkligt mått. Vissa mobiltelefoner har nu kamerabaserade mätappar som kombinerar kamera- och LiDAR-sensorer, vilket gör att de kan skapa ett internt referenssystem som inte kräver att en fysisk referens används.

Tre studier har undersökt appen *Apple Measure* för mätning av volym hos enskilda stockar (Borz m.fl. 2022a; Borz & Proto 2022; Ucar m.fl. 2022). En studie undersökte tidsåtgången i mätningen och de två andra studierna mätnoggrannheten. Samtliga studier gjordes på bark och referensmätningar utgjordes av manuell klavning. Trädslag inkluderade gran, tall, bok, ek och poppel. Exempel från appens användargränssnitt visas i Figur 4 och Figur 5.



Figur 8. Vy från diameter- och längdmätning med appen Apple Measure (Borz m.fl. 2022a). Vänster: exempel på diametermätning med augmented reality (AR). Mitten: exempel på längdmätning. Höger: exempel på vy över multipla stockar.



Figur 9. Närbild från diameter- och längdmätning med appen Apple Measure (Borz m.fl. 2022a). Vänster: Exempel på placering av en mätpunkt. Höger: Punkterna 1: start- och slutpunkter för diametermätning. Punkten 2: startpunkt för längdmätning.

Statistiska mått från studiernas jämförelser visas i Tabell 10, Tabell 11 och Tabell 12.

Tabell 10. Avvikelse mellan manuell mätning av diameter på bark och längd hos stockar av gran med klave och mätning med mobilappen Apple Measure (Borz m.fl. 2022a).

	Diameter (mm)	Längd (cm)
Systematisk avvikelse	6,8	1,81
Standardavvikelse	9,6	2,55

Tabell 11. Avvikelse i mätning av brösthöjdsdiameter (DBH) på bark mellan manuell klavning och mätning med mobilappen Apple Measure hållen på olika avstånd från stående träd av tall (Ucar m.fl. 2022).*

	0,5 m avstånd	1,0 m avstånd	1,5 m avstånd
Systematisk avvikelse (mm)	30	17	05
Standardavvikelse (mm)	48	26	63

* Värdena är visuellt skattade från översta delen av Figur 4 i studien och bör betraktas som grova. Systematiska avvikelsen tolkades som boxplotens medianvärde och standardavvikelsen skattades utifrån avståndet mellan boxplotens minsta och högsta värde (dvs det intervall som 50 % avvikelserna finns inom) samt ett antagande om att avvikelserna är normalfördelade och att 67 % av avvikelserna därför ligger inom en standardavvikelse).

Författarna kommenterade att mobilappen tenderade att underskatta diametern, jämfört med den manuella referensmätningen. Att resultaten skiljde sig åt för olika avstånd tolkades som att avståndsberoende belysningsförhållanden och intryck av barken gav utslag i mätningen.

Tabell 12. Skillnad i tidsåtgång för mätning av volym hos enskilda stockar av gran och bok med manuell klavning respektive mobilappen Apple Measure (Borz & Proto 2022). Volymen beräknades från diametermätning på bark samt längdmätning. Manuell sektionsmätning innebär mätning var 50:e cm.

	Manuell stockmätning	Manuell sektionsmätning	Mobilapp
Tidsåtgång/stock [s]	30	99	91

Sammantaget visar resultaten att mätning med dagens mobilappsteknik ger en grov skattning av både diameter, längd och volym. Hade mätningarna använt diameter under bark är det troligt att mätosäkerheten hade ökat ytterligare.

Ergonomi

Borz m.fl. (2022b) beräknade ett ergonomiskt riskindex för stockmätning med manuell klavning på bark, mobilapp respektive handhållen laserskanner. Resultatet visade att de beröringsfria metoderna hade lägre riskindex, och laserskanner lägre än mobilapp (Tabell 13).

Tabell 13. Ergonomiskt riskindex för tre olika metoder för att mäta volym på bark (Borz m.fl. 2022b). Ju högre värde desto högre risk för skador.

	Klavning	Mobilapp	Laserskanner
Riskindex	250	180	151

Övriga metoder för diamettermätning

Vid intervjun med det finska företaget Masser nämndes två tidigare utvecklingsprojekt:

- Laserbaserad klave utan manuell ansättning, MasLog, för mätning av diameter på bark. Produkten har dock inte släppts av immaterialrättsliga orsaker
- En klave med radiobaserad koordinatmätning. Produkten bedömdes få för hög kostnad i relation till antalet sålda enheter

Metoder för längdmätning

Den här studien har framför allt fokuserat på alternativ för diamettermätning och till viss del volym. Mobilappen ovan ger även möjlighet till längdmätning, men den hade en betydligt högre osäkerhet än dagens kontrollmetod för längdmätning. Finns det några andra alternativ för dagens kontrollmetod av längd?

I Strömgren (2017) beskrivs olika alternativ för en noggrannare längdmätning vid industri, där en förbättrad kontrollmätning kan vara ett sätt att förbättra noggrannheten generellt. Där anges ingen ny teknik för längdmätningen, men det nämns andra förändringar i kontroll eller rutiner som kan leda till en bättre noggrannhet:

- Att mäta längd i mm i stället för cm för att minska osäkerhet orsakad av avrundning.
- Göra resultat från daglig tillsyn tillgängligt digitalt och utforma ett IT-stöd för att snabbare hitta avvikelser
- Skärpta krav på provkroppens formstabilitet
- Lägga till en periodisk kontroll
- Koppla ihop information från andra längdmätningar såsom i skördare och i sågverket för att upptäcka drift eller avvikelser snabbare

Fokus i rapporten av Strömgren (2017) var längd, men många av dessa punkter skulle även kunna appliceras på diamettermätning.

Mätning av diameter under bark genom barktjockleksmätning

Idag avlägsnas bark på måttstället med yxa för att få diametermått under bark vid industri, medan den berörande barktjockleksmätaren Haglöf manuella barkmätare används som alternativ vid kontrollmätning i skogen. Vilken metod som ska användas

regleras inte av bestämmelser utan baseras snarare på tradition. Ett antal alternativ till yxa eller barkmätare framkom i intervjuer och genom litteraturstudier:

- I enkäten tipsades om en finsk, kurvad "hyvel" som användes i stället för yxa vid barkning
- Företaget Masser testade underbarksmätning med ultraljud. Noggrannheten bedömdes som lovande (Kari-Pekka Urtamo, Masser, intervju 2022-05-12). Marknadspotentialen ansågs dock vara för låg
- Trakeidmetoden, det vill säga att laserljus reflekteras olika på bark jämfört med på bar ved. Kräver barkavskav på måttstället
- Handhållen backscatter-röntgen (reflekterande röntgen) kan ha potential att mäta barktjocklek. Metoden är dock oprövad
- Skogforsks barkfunktioner, som baseras på skördardata och varierar med stockens diameter
- Hugga ett snitt genom barken och mäta barktjockleken med skjutmått (används av VMF Latvia i Lettland) eller någon form av mobilapp
- Mikrovågsmätning i radarläge (reflekterande läge), se nedan

I denna studie har alternativet barktjockleksmätning med **mikrovågor** utvärderats närmare. Resultaten presenteras i sin helhet i Bilaga 2 och summeras kort här.

I de fälttester av prototypustrustningen som utfördes i samarbete med Biometria (Figur 10) var den klavmätta barktjockleken något större än den mikrovågsmätta barktjockleken. Skillnaden mellan klavmått barktjocklek (diameter på bark minus diameter under bark) och mikrovågsmätt barktjocklek hade en systematisk avvikelse på 3,0 mm och en standardavvikelse på 6,2 mm. Den klavmätta barktjockleken låg mellan 3 och 47 mm.



Figur 10. Foton från fälttestet av den mikrovågsbaserade barktjockleksmätaren. Foto: Monika Strömngren.

Av testerna kan följande tekniska slutsatser dras:

1. Det är möjligt att mäta och bestämma den effektiva barktjockleken, det vill säga den verkliga barktjockleken multiplicerad med refraktionsindex för barken. Genom att anta eller mäta refraktionsindex fås den verkliga barktjockleken
2. Mikrovågsmätningen har starkaste reflektionen vid gränsskiktet mellan bastbarken (floemet) och skorpbarken. Bastbarkens tjocklek räknas därför inte med i den effektiva barktjockleken. Det kan vara en anledning till att mikrovågsmätningens barktjocklek är mindre än klavningens
3. Mätprincipen fungerar på frusen ved och bör fungera på ved med visst snölager. Ett annat värde på barkens refraktionsindex behöver dock anges, eftersom det skiljer sig mellan frusen och ofrusen bark

Med andra ord behöver bastbarkens tjocklek samt refraktionsindex anges som parametrar vid mikrovågsmätning av barktjocklek. Hannrup (2004) bedömde bastbarkens tjocklek till 0,9 mm för tall och 1,5 mm för gran, baserat på mätningar med CT-skanning. Variationen specificerades ej. Om tjockleken på bastbarken bedöms vara relativt konstant kan dessa värden användas för att addera även dess bidrag till totala barktjockleken. Refraktionsindex kommer att variera med årstiden och bestånd. Vid beräkning kan refraktionsindex sättas till en konstant eller variera med årstiden. Ett rimligt standardvärde (förvalt värde) för refraktionsindex hos bark är $n_{\perp} = 1,4$ (Torgovnikov 1993). Om barken ökar i fukthalt, exempelvis under savningssäsongen, ökar refraktionsindex och därmed felet ifall standardvärdet används. Om refraktionsindex ökar till 1,7 utan att kompensation görs blir mätosäkerheten upp mot 20 % av barktjockleken (se Tabell 4 i Bilaga 2). Bäst vore därför att ha en modell för hur refraktionsindex varierar med säsong.

Det vore intressant att jämföra mikrovågsmetodens preliminära mätosäkerhet, inte minst standardavvikelsen på 6,2 mm, med den hos andra metoder för att mäta barktjocklek, exempelvis stockmätramars eller Haglöfs Barkmätare. Data på mätosäkerheten på barktjocklek hos andra metoder fanns vad vi vet inte tillgänglig när denna rapport skrevs. Den preliminära mätosäkerheten för barktjocklek är dock större än den som redovisas i den här studien för diameter under bark (1,5–2,3 mm).

Kontrollsystem i andra branscher

En ansats i detta projekt var att undersöka om andra branscher hade kontrollsystem som kunde tjäna som inspiration för virkesmätningens utvecklingsarbete. Det visade sig finnas få jämförbara och relevanta kontrollsystem i andra branscher. Inom exempelvis tillverkningsindustrin handlar den ordinarie mätningen om att se ifall objektets dimension ligger tillräckligt nära en känd specifikation, givet en fastställd tolerans. Det gör att tillverkningsindustrins ordinarie mätning mer påminner om virkesmätningens kontrollmätning. Inom jordbrukssektorn, exempelvis fiskeindustrin, slakteri eller grönsaksodling, är det vanligare med mätning av objekt vars dimensioner inte är väl kända utan bara är grovt klassade. Dock är det ovanligt med styckmätning av objekt i jordbrukssektorn, och vägning snarare än volymsbestämning är den dominerande mätmetoden. Sågtimmermätningens mätning av kvantitet har därför få paralleller. Närmaste analogin till virkesmätning tycks ändå vara slakteribranschen, där kvantitet mäts genom vägning och kvalitet fås genom manuell klassificering och där utförarna tränas på bilder av slaktkroppar. (Annika Kihlstedt, RISE, pers. komm. 2022-11-07).

Finns det några intressanta alternativ till klaven?

Xylometermätning av volym har en hög mätnoggrannhet för volym på bark. Eftersom ersättningsgrundande volym av rundvirke i Sverige gäller under bark, kräver en sådan metod dels att en volymkorrigering behöver göras för barkförekomsten, dels att en ytterligare kontroll behövs av noggrannheten i xylometermetodens volymbestämning. Det gör den mindre lämplig för svenska förhållanden.

Diameter- och volymmätning baserat på mobilapp eller mobil laserskanning (MLS) har i dagsläget för låg mätnoggrannhet för att kunna ersätta klavning. Den slutsatsen dras baserad på studier där mätningen gjorts på bark, vilket gör att mätnoggrannheten lär minska ytterligare om barktjockleksmätning också ska adderas som moment. För laserskanning kan mätnoggrannheten sannolikt ökas något genom att använda en stationär sensor (TLS), vilket minskar mätosäkerheten från handrörelser. En stationär utrustning skulle dock göra metoden svårare använd i skogen. Belysningsförhållanden är en generell utmaning, särskilt solljusets variation över dygnet och årstiderna. Laserskanning anses vara mindre känslig än kamerabaserade metoder, då laserskannern är en aktiv metod som sänder ut eget ljus medan kameror är beroende av extern belysning. Förekomst av sand, smuts och is kan också ändra belysningsförhållandena eller göra det oklart var gränserna för mantelyta eller bark går. Ytterligare utmaningar för mobilappar är att dagens appar utvecklas för enskilda mobilmodeller, som snabbt kan bli inaktuella, att apparna inte är anpassade för att mäta i millimeterskala, och att kalibreringsfunktion inne i bilderna behövs.

Laserbaserade metoder måste kompletteras med en metod för barktjockleksmätning. Kamerabaserade mobilappar har teoretisk potential att mäta diameter under bark, dock enbart på stockens ändtytor. På en ren ändyta bör bildanalys kunna användas för att skilja mellan splintved och bark i ett foto samt att mäta stockens diameter. Om fotot tas på nära håll bör mätnoggrannheten kunna bli relativt god. I praktiken kan dock inte en kontrollmetod vara beroende av att ändtytor är fria från smuts eller is, samt att dagens instruktion för stockmätning säger att diametern bör mätas 20 cm från stockens ändyta.

Klaven kommer troligen att användas i vissa sammanhang under lång tid framöver. En klave med inbyggd underbarksmätning, exempelvis baserad på mikrovågor, kapacitans eller akustiska vågor, framstår som ett utvecklingsspår värt att gå vidare med. Fälttesterna med mikrovågsbaserad barktjockleksmätning gav tillräckligt lovande resultat för att motivera ytterligare tester, inte minst fälttester på frusna stockar. För praktisk användning skulle utrustningen behöva komprimeras något samt göras oberoende av extern energikälla. Tekniken har även användningspotential vid travmätning, där en mätning av barktjockleken på ett antal stockar skulle förbättra bedömningen av fastvolymprocenten.

Möjliga vägar framåt

Baserat på kartläggning och analyser inom projektet identifierades tre huvudsakliga vägar framåt när det gäller att utveckla systemet för kontrollmätning av stockar:

1. Förbättringar av dagens manuella kontrollmätning
2. Diversifierat system för kontroll av mätningar
3. Jämförelse av mätresultat från skördare och mätningar

De tre huvudspåren diskuterades vid en workshop med deltagare från Skogforsk och Biometria i december 2022.

Förbättring av dagens manuella kontrollmätning

Att utveckla metoder för mätning av diameter under bark ansågs prioriterat för att undvika dagens metod där barken avlägsnas alternativt mäts med en barkmätare. Några möjligheter som ansågs intressanta:

- Alternativa tekniker för att mäta tjocklek där man i stället för mikrovågor kunde utnyttja skillnader i elektriskt motstånd i bark respektive ved vid penetration av stocken med någon form av instrument.
- Mobilapp som stöd för att mäta barkens tjocklek i stockens ändar.
- Man skulle även kunna tänka sig en modifiering av barkning med yxa där man mäter tjockleken i ett snitt som huggs på måttstället. Erfarenhet från en liknande metod finns i Lettland, även om själva mätningen i det fallet gjordes med skjutmått.
- Ett intressant steg ansågs vara att göra fler tester med att använda mikrovågsbaserad (eller motsvarande) mätning av barktjockleken. Prioriterat är att göra tester med frysta stockar, undersöka effekterna av olika fukthalt i barken samt arbeta med någon tillverkare kring hur ny teknik kan integreras med en klave. En liten givare borde kunna integreras i en framtida dataklave för mätning av diameter på bark och med ett presenterat underbarksmått.

En övergång till någon sorts skanner eller app för kontrollmätning bedömdes även kunna ge mervärden när det gäller att beskriva stockens form, t. ex. krök och förekomsten av kvistar.

Även om dagens längdmätning, varken manuell eller automatisk, kan anses ha en noggrannhet på millimeternivå, kan längdmätning som registreras i millimeter bidra till att minska mätosäkerheten. Längdmätning i millimeter av såväl kontrollstockar som provkropp kommer leda till att de tillfälliga felet generellt minskar, men också att en eventuell drift i den automatiska längdmätningen kan upptäckas tidigare. Det är näst intill även en förutsättning för att kunna skärpa gränsen vid daglig tillsyn.

Diversifierat system för kontroll av mätramar

För mätramar som har bevisat låg spridning i mätningen diskuterades ett upplägg med en längd- och diameterkontroll av stockar som kan utföras av ordinarie mätare i stället för av en kvalitetsledare. Detta skulle kunna leda till snabbare uppföljning eftersom det kan mätas dagligen jämfört med nuvarande kontrollmätning som utförs när det fallit ut tillräckligt många kontrollstockar. Detta förfaringsätt kan kompletteras med återkommande tester av repeterbarhet (ommätning av stockar i mätramen), kontroll av kalibrering med provkroppar samt tilläggsinformation från olika sensorer för att upptäcka förändringar i mätram och mätplatsmiljön som riskerar att påverka mätningen. Modellen skulle reducera behovet av någon form av "revisionsmätning" (eventuellt enligt dagens metod för kontrollmätning) till ett par gånger per år. Modellen baserat på kontroll som utförs av ordinarie mätare liknar den som i dagsläget används för kvalitetssäkring av skördarens mätning.

Ett antal fördelar med en mer diversifierad modell för kontroll av mätramar identifierades:

- Möjlighet att fånga problem kopplade till mätplatsen som inte fångas upp idag som slitage i utrustningen (lasrar etc.), ökade vibrationer i keratten, etc. Andra faktorer som bedömdes intressanta att ha kontroll på var omgivande temperatur och aktuella ljusförhållanden.
- Modellen skulle ge virkesmätaren ett utökat ansvar för mätningens kvaliteten, vilket sågs som positivt och utvecklande.
- Ledtiden mellan att en kontrollstock slumpas ut och att resultatet från kontrollmätningen blir tillgängligt kortas, vilket ökar chanserna att avvikelser kan justeras innan de påverkat stora volymer timmer.
- Kontrollmätaren som genomför den återkommande revisionen skulle fokusera mindre på att kontrollera kvantiteten och i stället kunna fokusera på virkesmätarens bedömning av kvalitet.
- Potential att förbättra arbetsmiljön vid kontrollmätning om det är färre stockar som ska kontrollmätas per gång (t ex en gång per skift).
- Mätplatsägarens ansvar skulle bli tydligare när det gäller att se till att utrustning och mätplats är väl underhållna och fungerande. Problem identifieras snabbare.

För mätramar med en lägre mätnoggrannhet skulle dagens modell för kontroll fortfarande kunna användas.

Jämförelse av mätresultat från skördare och mätram

Att nyttja mer av den information som skapas i och med att skördaren mäter och registrerar de producerade stockarna skulle systematiska avvikelser kunna fångas. Genom att koppla ihop skördardata med data från inmätningen kan jämförelser göras på partinivå och/eller med högre upplösning som till exempel för olika diameterklasser och längder. Genom att ge virkesmätaren tillgång till sådan information skulle avvikelser, såväl i skördarens som i mätramens mätning, kunna identifieras.

Slutsatser

Från den här studien drar vi följande övergripande slutsatser:

- Kontroll av virkesmätning har inte så många relevanta paralleller i andra branscher där kontrollen ofta är relativt ett förbestämt mått snarare än relativt en första mätning.
- Synen på hur väl dagens metod för kontrollmätning fungerar varierar hos olika intressenter. Den huvudsakliga fördelen med dagens metod är att den är flexibel och kan användas såväl i skog som vid industri. Nackdelar inkluderar att mätningen kan påverkas av vem som utför mätningen, resultatet varierar över säsong, det finns en tydlig begränsning i hur mycket data man samlar in manuellt och att det finns brister i arbetsmiljön för kontrollmätaren.
- För majoriteten av mätplatser med mätramar, är kontrollmätningens osäkerhet av mindre betydelse och dagens kontrollmetod därför relevant. Det är svårt att exakt ange

kontrollmätningens osäkerhet, men uttryckt som standardavvikelse bör dagens mätfel ligga inom följande intervall:

- Diameter: 1,5–2,3 mm
- Längd: 0,6–0,8 cm
- Volym: 0,6–2,4 %

Det finns potential att förbättra dagens kontrollmetod bland annat genom att mäta längd i millimeter, istället för centimeter.

- Vid kalibrering och justering av mätram är det viktigt att kontrollresultatet bygger på ett tillräckligt stort antal kontrollstockar. Om osäkerheten, antingen i kontrollmetoden eller ordinarie metod, är större behövs fler kontrollobjekt. Det är viktigt att hela tiden minimera risken för eventuella systematiska fel i kontrollmätningen.
- En ny kontrollmetod för stockmätning ansågs behöva hålla minst samma noggrannhet som den nuvarande. Viktigt att den kan hantera snö och is.
- Litteraturgenomgången visar på flera alternativ med handhållna laserskannrar och mobilappar för bestämning av framför allt diameter, volym men även längd. Metoderna har ergonomiska fördelar och är mer oberoende av individen som genomför mätningarna.
- Noggrannheten i de alternativa metoderna är i nuläget betydligt lägre än dagens kontrollmetod. Dessutom utförs mätningarna på bark, vilket gör att den skulle behöva kompletteras med en barktjockleksmätare. Sammantaget innebär detta att det bland dessa metoder i dagsläget inte finns något bra alternativ till dagens metod. Huruvida dessa metoder skulle kunna vara lämpliga alternativ om de vid mätningen placerades på stativ eller kan utföras under mer kontrollerade förhållanden behöver utredas vidare.
- Genom ökad självdiagnostik av mätningar kan fel i virkesmätningen hittas snabbare och behovet av kontrollmätning av kontrollstockar minskas. För detta kan bland annat information som redan samlas in av mätutrustningarna användas i kombination med IT-stöd och larmsystem. Potentialen i detta, vilken information som redan finns, vilka ytterligare sensorer som skulle vara intressanta samt hur ett IT-stöd/larmsystem skulle se ut, behöver utredas vidare.
- Det finns en potential i att nyttja jämförelser med skördardata för att snabbare kunna identifiera fel i industrimätningen.

Referenser

- Biometra 2022a. Kontroll av utrustning för automatisk mätning av stocks diameter och längd. Biometrias kontrollanvisningar, Biometria. Published 2022-06-08. 9 s.
- Biometra 2022b. Mätning av stocks volym under bark. Nationella instruktioner för virkesmätning, Biometria. Published 2022-08-01. 31 s.
- Biometria 2021a. Krav- och åtgärdsnivåer: Mätningens kvalitet. Biometria. Published 2021-12-13. 4 s.
- Biometria 2021b. Kvalitetssäkrad mätning med skördare. Biometria. 22 s.
- Björklund, L. 2020. Svensk vs finsk virkesmätning – reflektioner från studiebesök. Biometria. 12 s.
- Borz, S. A., Morocho Toaza, J. M., Forkuo, G. O. & Marcu, M. V. 2022a. Potential of Measure App in Estimating Log Biometrics: A Comparison with Conventional Log Measurement. *Forests*, 13(7) [Online]. DOI: 10.3390/f13071028
- Borz, S. A., Papandrea, S. F., Marcu, M. V., Bacenetti, J. & Proto, A. R. 2022b. Postural Assessment of Three Wood Measurement Options by the OWAS Method: Digital Solutions Seem to Be Better. *Forests*, 13(12) [Online]. DOI: 10.3390/f13122007
- Borz, S. A. & Proto, A. R. 2022. Application and accuracy of smart technologies for measurements of roundwood: Evaluation of time consumption and efficiency. *Computers and Electronics in Agriculture*, 197, 106990.
- de Miguel-Díez, F., Reder, S., Wallor, E., Bahr, H., Blasko, L., Mund, J.-P. & Cremer, T. 2022. Further application of using a personal laser scanner and simultaneous localization and mapping technology to estimate the log's volume and its comparison with traditional methods. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 109, 102779.
- Edlund, J. 2018. Kommissionsmätning av grantimmer enligt nationella instruktioner för virkesmätning. Notnäs sågverk 25-27 september 2018. SDC. Published 2018-10-05. s.
- Edlund, J., Björklund, L. & Strömgren, M. 2018. Topprotmätning anpassad för sågbara sortiment av tall och gran., SDC. 34 s.
- Haglöf. 2020. Diameter measuring. [Online].
- Hannrup, B. 2004. Funktioner för skattning av barkens tjocklek hos tall och gran vid avverkning med skördare. Arbetsrapport 575, Skogforsk. 34 s.
- Hyll, K. & Nordström, M. 2021. Kartläggning och utvärdering av mätningar och mättramsmiljöer i sågverk. Skogforsk Arbetsrapport, Skogforsk. 77 s.
- SFS 2014:1005 2014. Lag (2014:1005) om virkesmätning. Svensk författningssamling. 4 s.
- SIS 2015. Ledningssystem för kvalitet - Krav (ISO 9001:2015). SIS, SS-EN ISO 9001:2015, 88 s.
- SKSFS 2014:11 2014. Skogsstyrelsens föreskrifter om virkesmätning. Skogsstyrelsens författningssamling, Skogsstyrelsen. 9 s.
- Strömgren, M. 2017. Noggrannare längdmätning av sågtimmer. SDC. 25 s.
- Torgovnikov, G. I. 1993. Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials, Springer Verlag Berlin, 196 s.
- Ucar, Z., Değermenci, A., Zengin, H. & Bettinger, P. 2022. Evaluating the Accuracy of Remote Dendrometers in Tree Diameter Measurements at Breast Height. *Croatian journal of forest engineering*, 43.
- Vatandaşlar, C. & Zeybek, M. 2020. Application of handheld laser scanning technology for forest inventory purposes in the NE Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry Turk J Agric For*, 44, 229-242.
- Örnemark, U. 2013. Uppskattning av mätosäkerhet för några tillämpningar inom området virkesmätning. Intern rapport, VMF Qbera. 39 s.
- Özçelik, R., Wiant, H. V. & Brooks, J. R. 2008. Accuracy using xylometry of log volume estimates for two tree species in Turkey. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23, 272-277.

Personlig kommunikation

Hemmingsson, Jonas (2023). Biometria. 2023-01-26.

Kihlstedt, Annika (2022). RISE. 2022-11-07.

Lycken, Anders (2022). RISE. 2022-12-13.

Ottosson, Patrik (2022). Radarbolaget. 2022-04-10.

Persson, Mikael (2022). Chalmers. 2022-10-04.

Bilagor

1. Enkät- och intervjufrågor
2. Inledande tester med en prototyp för barktjockleksmätning med radarteknik

Bilaga 1. Enkät- och intervjufrågor

Nedanstående frågor användes som utgångspunkt för A) den enkät som skickades ut till olika aktörer som påverkas på olika sätt av kontrollmätning av stockar och B) som utskickat underlag inför intervjuerna med tillverkare och utförare av (kontroll)mätning av stockar.

Enkätfrågor

1. Samtycker du till att Skogforsk får lagra och bearbeta resultatet från denna undersökning i enlighet med GDPR? Enskilda svaranden kommer ej gå att identifieras när resultaten sammanställs.
2. Vad heter du, vilket företag/organisation jobbar du på och vilken yrkesroll har du?
3. Vilken är din huvudsakliga roll i skogsbranschen?
4. Vilka typer av ordinarie mätning förekommer hos er?
5. Vilka rundvedssortiment hanterar ni?
6. Vilka måttslag handlar ni rundved med?
7. Hur ofta får du resultat från kontrollmätning av rundved?
8. Hur ofta skulle du vilja få resultat från kontrollmätning, eller att kontrollmätningen utfördes?
9. Vilka kvantitetsrelaterade parametrar ingår i resultaten från kontrollmätningen?
10. Vad är bäst ur ett organisatoriskt perspektiv (frekvens, tidsåtgång, kostnad, datahantering, m.m.)
11. Vad är bäst ur ett mätvärdesperspektiv (noggrannhet, känslighet, repeterbarhet, m.m.)
12. Vad är bäst ur ett arbetsmiljöperspektiv (hantering, säkerhet)
13. Vilka nackdelar har kontrollen ur ett organisatoriskt perspektiv (frekvens, tidsåtgång, kostnad, datahantering, m.m.)
14. Vilka nackdelar har kontrollen ur ett mätvärdesperspektiv (noggrannhet, känslighet, repeterbarhet, m.m.)
15. Vilka nackdelar har kontrollen ur ett arbetsmiljöperspektiv (hantering, säkerhet)
16. Är kontrollen av kvantitet tillräckligt noggrann för era behov?
17. Gör ni kontroll/uppföljning/kalibrering av stockmätning som inte är ersättningsgrundande i er verksamhet?
18. Vilka kontrollmetoder använder ni för er egen kontroll/uppföljning/kalibrering?
19. Ser du ett behov av ett byte av kontrollmetod eller annan ändring av kontrollen av ersättningsgrundande mätning, och i så fall varför?
20. Finns det något annat upplägg för ett kontroll/kvalitetssäkringssystem av ersättningsgrundande mätning som ni tycker är intressant?
21. Är det något annat som du vill förmedla till studien?

Intervjufrågor till utrustningstillverkare

Tillverkare av mätrammar/rigg

1. Vilka behov har ni av en etablerad referens (på stocknivå) för att kontrollera hur väl er utrustning mäter?
2. Hur upplever ni att dagens metod för kontrollmätning av stockar uppfyller era behov?
3. Hur tar ni del av resultat från kontroller av utrustning som ni levererar? Önskemål om förändringar?
4. Har ni idéer om alternativa metoder för att ta fram en referens för att kontrollera mätningen?
5. Något annat ni vill skicka med?

Tillverkare av klavar

1. Hur har utvecklingen av klaven som hjälpmedel för kontrollmätning av stockar sett ut?
2. Vilka ytterligare möjligheter att utveckla klaven som redskap för kontrollmätning ser ni?
3. Hur upplever ni att dagens metod för kontrollmätning av stockar fungerar?
4. Om klaven skulle ersättas med någon annan metod för kontrollmätning av stockar, vad skulle det kunna vara?
5. Något annat ni vill skicka med?

Intervjuer med utförare av kontrollmätning (Biometria)

1. Vilka fördelar har dagens kontrollsysteem
 - a. ur ett organisatoriskt perspektiv (frekvens, tidsåtgång, kostnad, datahantering, m.m.)
 - b. ur ett mätvärdesperspektiv (noggrannhet, känslighet, repeterbarhet, m.m.)
 - c. ur ett arbetsmiljöperspektiv (hantering, säkerhet)
2. Vilka nackdelar har dagens kontrollsysteem
 - a. ur ett organisatoriskt perspektiv (frekvens, tidsåtgång, kostnad, datahantering, m.m.)
 - b. ur ett mätvärdesperspektiv (noggrannhet, känslighet, repeterbarhet, m.m.)
 - c. ur ett arbetsmiljöperspektiv (hantering, säkerhet)
3. Finns det något annat upplägg för ett kontroll/kvalitetssäkringssystem av ersättningsgrundande mätning som ni tycker är intressant?

Bilaga 2. Inledande tester med en prototyp för barktjockleksmätning med radarteknik

Patrik Ottosson och Daniel Andersson, Radarbolaget

Bakgrund

Kontrollmätning av rundvirke görs för att verifiera mätramar och mätriggjar (exempelvis CIND eller Mabema), vilka används för bestämning av diametern på rundvirke under bark. Kontrollmätning kan också göras för att kontrollera skördarnas inställning vid avverkning. Uppmätning och kontrollmätning görs på timmer, bränsleved och massaved. Vid kontrollmätning har ett antal kontrollstockar valts ut för verifierande mätning. Då mäts diameter av toppända och rotända. Vid sågverk är syftet att kalibrera mätramen för optimal sågning. Vid kontrollmätning i anslutning till skördare i fält eller vid inmätning av massaved och bränsleved är syftet att säkerställa rätt betalning mellan köpare och säljare. Biometria gör inte idag någon mätning på rot, men en effektiv mätteknik skulle kunna möjliggöra även sådan mätning. Förr i tiden användes klavning som underlag för bestämning av bonitet och volym, se figur 1. Idag används lasermätningar från flygplan och andra skogsinventeringsmetoder för bestämning av volym på rot. Klavning är den metod som används vid kontrollmätning av diameter under bark.



Figur 1. Klavning för volymsbestämning. Bilden är från 1950-talet vid en exkursion för lantmätare på KTH.

Befintliga mätmetoder

Idag används olika former av mätramar och mätriggar för hel- eller halvautomatisk inmätning av volym och diameter, se figur 2a. På skördaren är det själva aggregatet som används för mätning. Där anges en genomsnittlig barktjocklek som räknas bort. I en skördare används mekaniska sensorer som måste kalibreras med varje dag (enligt muntlig uppgift). I mätramar och mätriggar är det olika former av beröringsfria tekniker som används, exempelvis kamera, röntgen och laser, se figur 2c. Kontrollmätning görs genomgående med klave, se figur 2b. Dagens klavar registrerar diametern digitalt och en hel mätserie kan laddas upp i en dator för senare analys. Det behövs dock en yxa för att ta bort skorp- och bastbarken.



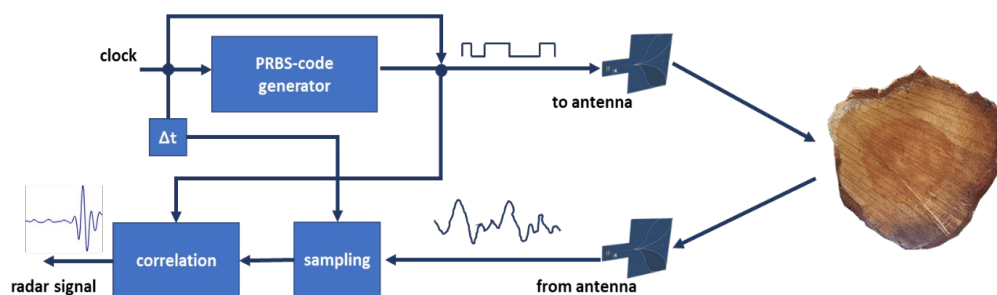
Figur 2. a) Inmätning av volym med en CIND-rigg. b) Klave för mätning av stockdiameter. c) Inmätning av timmer i mätram med en RS-LogProfiler3DX från RemaSawco.

Inmätning med laser och bilder i mätramar torde kunna fungera om barken är borttagen, men om barken finns kvar så funkar inte metoden direkt. Då används mätningarna (exempelvis diameter, skrovlighet, trädsort) för klassificering i olika barktjockleksklasser (enligt muntlig uppgift). Vid stora avvikelser mellan automatisk inmätning och kontrollmätning införs manuell inmätning tills nya kalibrering är gjord. Befintlig kontrollmätning med klave och yxa fungerar bra, men borttagning av bark är tidsödande och kan vara fysiskt betungande för mätpersonalen. Det sätter därför begränsningar kring hur många stockar, hur mycket av stocken som mäts och hur snabbt mätningarna kan göras. På årlig basis mäter Biometria in 150 000–200 000 stockar i Sverige. Under en genomsnittliga mätdag och kontroll mäts 50–100 stockar. Det innebär att det görs 1 000–2 000 kontroller varje år. I vissa fall kan säkert inmätning i mätramar vara noggrannare än kontrollmätningarna. Exempelvis är

antalet mätningar och det statistiska underlaget mångdubbelt större i en mätram än vid klavning. Syftet med kontrollmätningen är dock att ha samma metod vid alla inmätningstationer.

UWB radar- och radioteknik

Radarbolaget har en proprietär UWB-teknik som kan användas för barkmätning. Det består av ett digitalt radio- och radarsystem, inkluderande en M-sekvensradar (digital radar) och antenner. Det digitala radio- och radarsystem skickar ut en unik binärkod (PRBS, pseudo random binary sequence) som korreleras efter mottagning. Korrelationsresultatet skapar den bredbandiga UWB-signalen, se figur 3. Ett UWB-system har fördelen att det kan bestämma time-of-flight (radiovägens restid) med hög noggrannhet (≈ 1 mm). Ett UWB-system är också relativt immunt mot störningar och radiointerferens. Systemet kan byggas ihop till en enhet med beräknings- och kommunikationsenheter, vilket ger ett intelligent system med mycket beräkningskapacitet. Enheten kan vara molnbaserad (IoT, internet of things) och ihopkopplad med databaser och visualiseringsprogramvara i molnet.



Figur 3. UWB-signalen skapas genom att skicka ut unik binärkod och korrelera den.

Mätmetoden i detta sammanhang bygger på reflektionsmätning (radar). Hypotesen är att barken är mer genomsläpplig för radiovågor än kambium. Därigenom erhålls en kraftigare radiosignal från kambium och en svagare signal från barken. Det är svårt att analysera råa radarsignaler då de innehåller interfererande reflektioner från alla mål framför radarn. Förfarandet för att åstadkomma en analyserbar radiosignal är enligt följande (punkt 1–2 görs en gång vid ett kalibreringstillfälle, punkt 3–4 görs vid varje mätning):

1. En referensmätning görs upp mot himlen (referenssignal)
2. En nollmätning görs mot sensorns anläggningsyta (nollsignal). Det görs genom att exempelvis förse sensorn med tunn metallplatta eller mot kontrollrör. I experimenten har en aluminiumfolie lagts runt trädets. Det kan också göras genom att mäta direkt mot trädets kambiumdel (under bark)
3. Mätningar görs mot rundvirket med bark (mätsignal)
4. Analys av mätsignal för barktjockhetsbestämning görs genom att
 - a) Subtrahera nollsignal med referenssignal, $X_{diff_noll} = X_{noll} - X_{ref}$
 - b) Subtrahera mätsignal med referenssignal, $X_{diff_mät} = X_{mät} - X_{ref}$

- c) Jämföra ovanstående differenssignaler med varandra. Förskjutningen mellan dem ska då ge den dubbla barktjocktjockleken (dubbelt eftersom mätningen görs i radarläge)

Inledande mätningar

Inför utformningen av en enkel prototyp genomfördes mätningar på tre stockar. En enkel mätanordning togs fram och kopplades till radarsystemet, se figur 4. Antennerna placerades 200 mm ifrån varandra. Det visade sig att mätavståndet till stocken också skulle vara 200 mm.

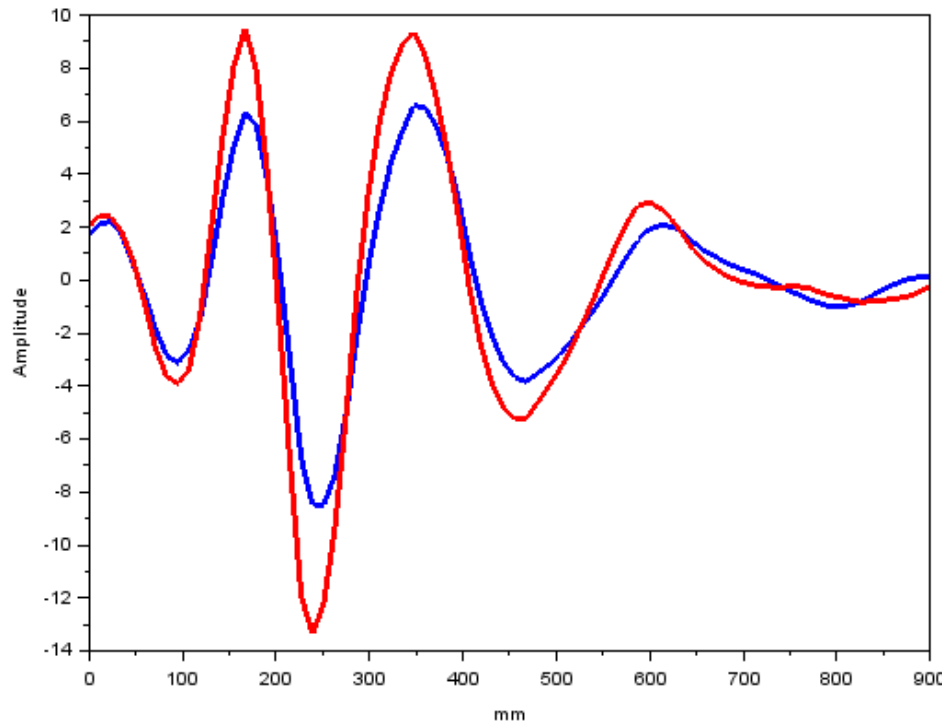


Figur 4. Mätanordning för inledande mätningar.

I enlighet med beskriven mätprocess under stycke 3 gjordes referensmätning i luften, nollmätning mot en aluminiumfolie och mätning mot själva stocken. Försöket genomfördes genom mätning mot en stock utan eller lite bark, mot en stock med mellantjock bark och mot en stock med tjock bark, se figur 5–7. I figuren redovisas även differenssignalerna och uppmätt barktjocklek med skjutmått.



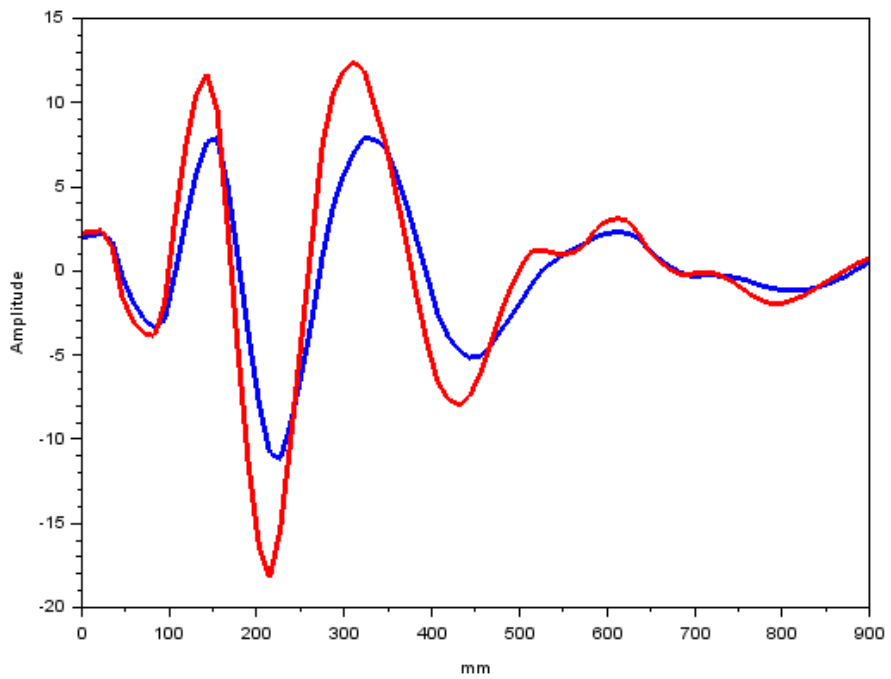
Figur 5a. Mätning mot en stock utan bark.



Figur 5b. Blå signal är mätning utan folie och röd signal är mätning med folie.



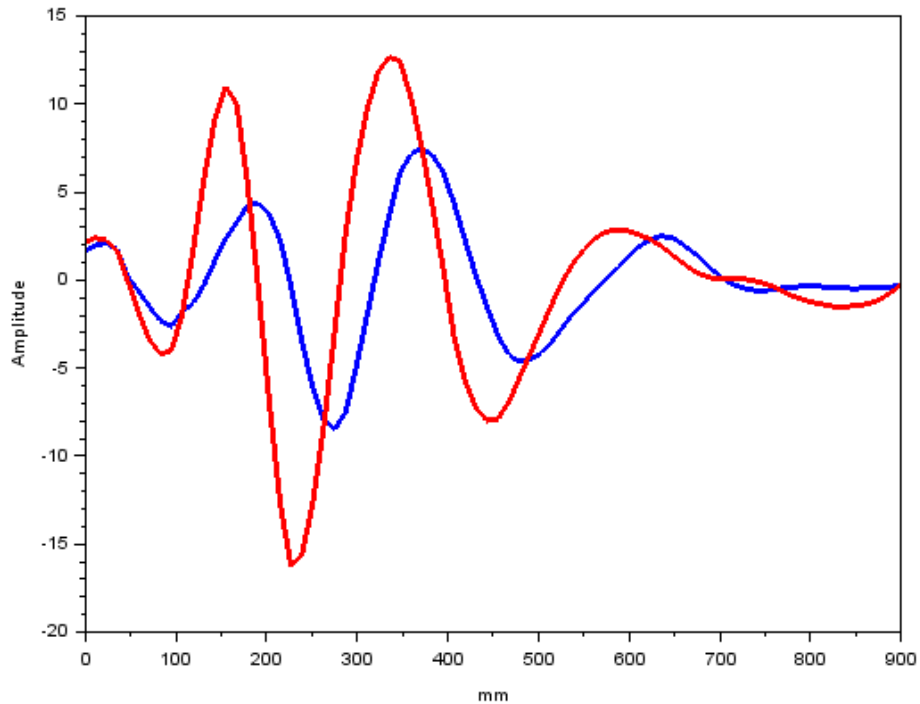
Figur 6a. Mätning mot en stock med mellantjock bark. Kontrollmätning med skjutmått.



Figur 6b. Blå signal är mätning utan folie och röd signal är mätning med folie.



Figur 7a. Mätning mot en stock med mellantjock bark. Kontrollmätning med skjutmått.



Figur 7b. Blå signal är mätning utan folie och röd signal är mätning med folie.

Vid en jämförelse av signalerna i figur 5–7 går det att se hur den blå signalen skjuts längre bort vid ökad barktjocklek. Även för första stocken utan skorpbark erhöles en viss tjocklek, vilket antagligen berodde på att aluminiumfolien skapade ett något tjockare stock. Det ska nämnas bastbarken inte togs bort under några av mätningarna. De jämförande mätningarna med skjutmått tar inte heller hänsyn till bastbarken. Mätningarna avser sålunda endast skorpbarken. Uppmätta och jämförda barktjocklekar finns redovisade i tabell 1.

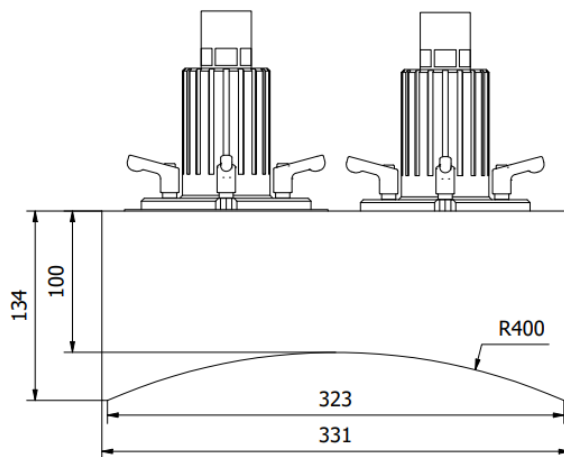
Tabell 1. Uppmätta barktjocklekar med radarmätning och jämförande mätningar med skjutmått

	Skjutmått	Radarmätning
Prov 1 - Ingen bark	0	2,4 mm
Prov 2 - Mellantjock bark	4–9 mm	4,75 mm
Prov 3 - Tjock bark	15–20 mm	17,75 mm

De inledande mätningarna enligt tabell 1 påvisade att barktjockleken kan mätas med konstruerad mätanordning. Nollmätningen mot stockarna funkade också. Den kan ersättas, i ett senare skede, med en mätning mot en metallyta i själva mätapparaten eller mot en kontrollrör. Det torde också gå att mäta mot kambium under bastbarken. Det förutsätter att den avskalade stocken har lämplig geometri.

Prototyp

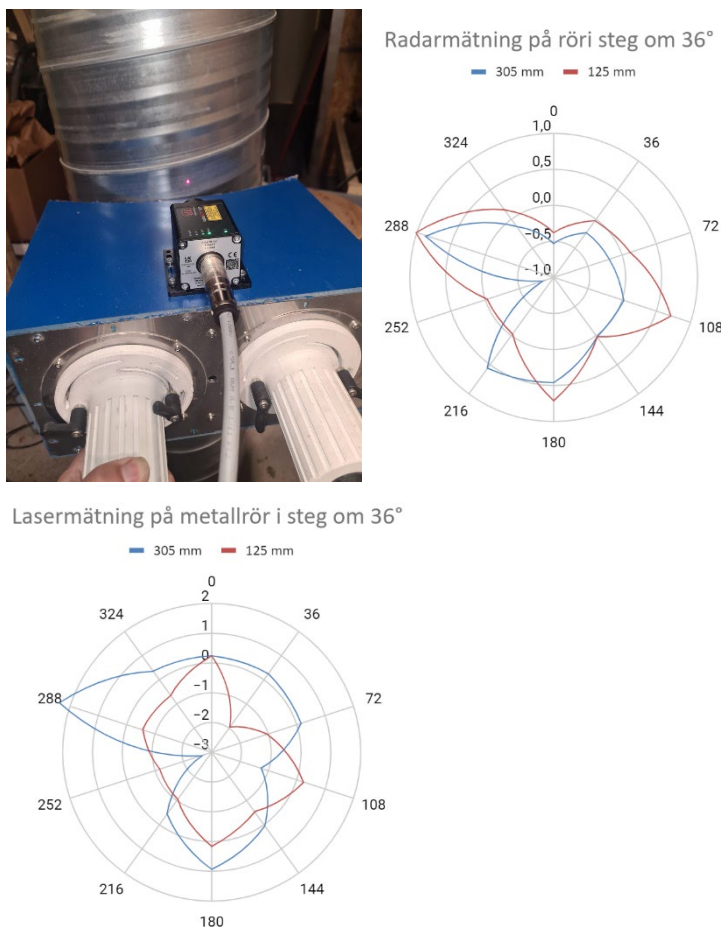
Med hjälp mekaniklabbet på Högskolan i Gävle konstruerades en enkel prototyp utifrån de hållarna som användes vid de inledande försöken, se figur 4–7. Ett mäthus i trä och plast konstruerades, se figur 8. Tanken var att bygga in antennerna i en låda och att ha en välvd yta för att klara av stockar med radier upp till 400 mm. Prototypen spraymålades i blått. För att möjliggöra den så kallade nollmätningen användes koppartejp. I en senare prototyp eller skarp utrustning skulle koppartejpen kunna ersättas med en välvd återanvändbar metallplåt. Prototypen är konstruerad med antenner av storleken 100 x 100 mm. Det finns mindre antenner. Därför kan mätaren bli både smalare och mindre. Prototypen är lagom stor om den ska fungera för mätning för sig själv. Ska den däremot monteras på en klave måste utrustning göras mindre. I dagsläget är elektronik och beräkningsenheten monterade i ett apparatus. Denna utrustning kan exempelvis placeras i en mätryggsäck.



Figur 8. Design av barktjockleksmätare och tillverkad prototyp.

Referens- och jämförande mätningar

Prototypens mätnoggrannhet granskades efter tillverkning. Den utrustades även med en laser för att erhålla ett oberoende längdmått. Lasern har en millimeters upplösning och noggrannhet. Först gjordes referensmätningar med prototypen mot ett stålrör för kalibrering, se figur 9. Referensmätningarna gjordes mot ett smalt (125 mm) och ett brett (305 mm) metallrör för att utröna ifall krökningsradien påverkar radarmätningen på något sätt. Standardavvikelse för ett smalt rör var 0,4 mm och för ett brett rör 0,5 mm. Motsvarande värden för lasern var något högre (0,7 och 1,3 mm), vilket påvisar att radarn mäter ett medel snarare än alla detaljer på röret. Det går inte att se att krökningsradien påverkar radarmätningarna på ett nämnvärt sätt. Rören var inte helt runda och de hade dessutom några skarvar.



Figur 9. Referensmätningar mot metallrör och avvikelser mellan radar och laser (millimeter).

Jämförande mätningar gjordes därefter på stockar med olika mycket bark. Den första stocken hade ingen eller lite bark, den andra hade ett mellantjockt lager bark och den tredje hade ett tjockt lager bark, se figur 10. Utrustning placerades mot stocken där lasern mätte en längd mot barken och radarn mätte barktjockleken.

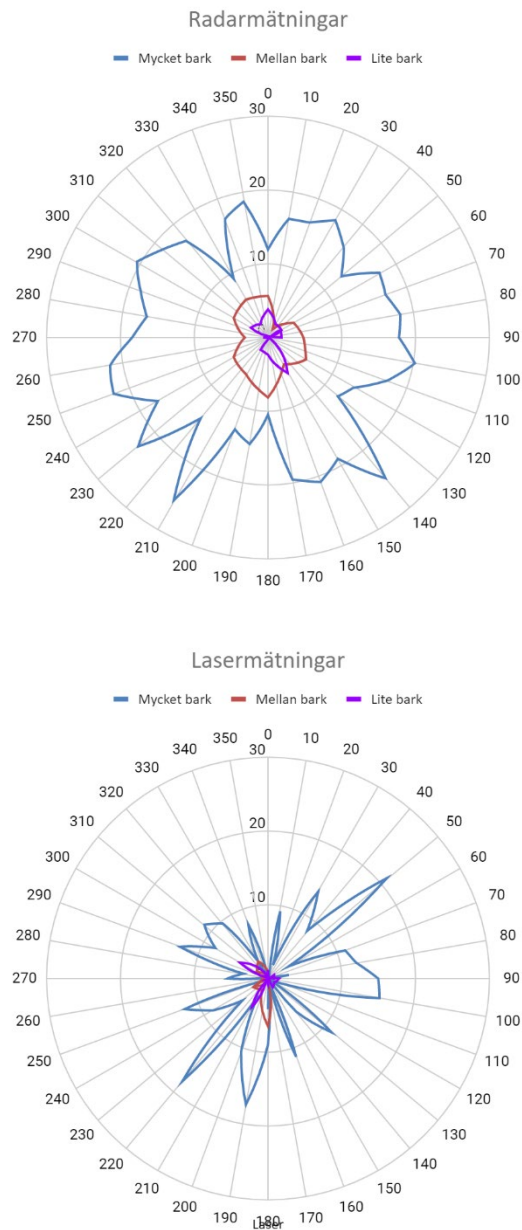
Vid laserskanning av stockar i en mätram, torde barktjockleken kunna bestämmas ifall en stor del av barken är borttagen. Genom en stor mängd lasermätningar torde det gå att

filtrera mätningarna så att endast diameter under bark erhålls. Barkens skrovlighet torde också kunna användas för ungefärliga bestämning av barktjocklek.



Figur 10. Tre stockar med olika mycket bark: ingen/lite bark, mellantjockt lager bark och tjockt lager bark.

Lasern (i våra mätningar) har naturligtvis vissa utmaningar med att bestämma barktjockleken i de fall barken inte är bortnött. Då mäts enbart dalar och toppar i barken, se figur 11. Radarmätningarna bestämmer barktjockleken kontinuerligt, se figur 11. Den faktiska barktjockleken runt stocken är inte bestämd eller kontrollmätt i detta fall, men den stämmer ganska väl överens med mätningarna enligt tabell 1. Den genomsnittliga barktjockleken var för ingen/lite bark 1,5 mm, för mellantjockt lager bark 5,0 mm och för tjock bark 17,4 mm (jämför med tabell 1).

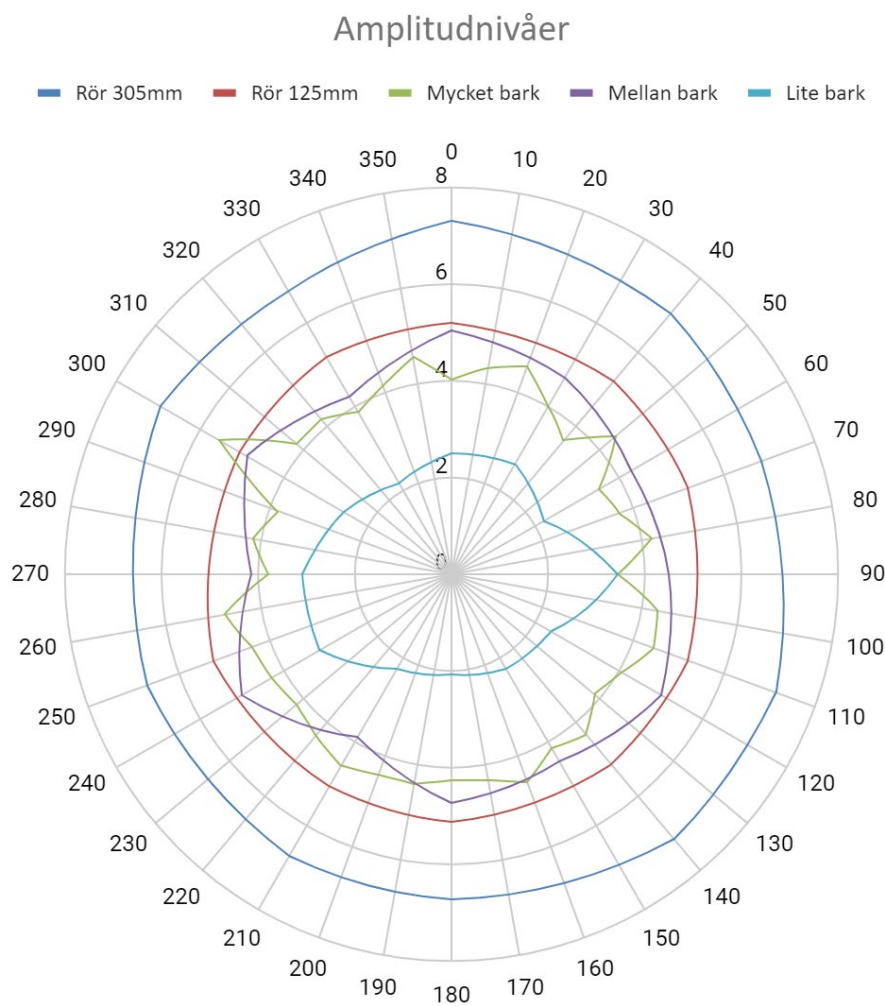


Figur 11. Radarmätning (barktjocklek) och lasermätningar (avstånd till barken) på tre olika stockar med olika mycket bark. Angivna mått är i millimeter.

Amplitudnivåerna anger hur stark radarsignalerna är. Principen är att ett större radartvärsnitt (ytan som reflekterar tillbaka signalen) ska ge en högre amplitudnivå. Därutöver ska även en högre reflekterande yta såsom metall ge en högre amplitudnivå än trä, se tabell 2 och figur 12. Det är en tydlig skillnad på metallrör och trästockar. Det är också tydligt att en stor stock har ett större radartvärsnitt än en liten stock. Den enda avvikelser i resonemanget är stocken med tjockt lager bark och stocken med mellantjockt lager. Det kan bero på att barken i sig stör och försvagar signalen en aning. Fukthalt i skorpbarken samt skillnader i skorpbarkens hårdhet och geometri kan också ha påverkat mätningarna.

Tabell 2. Amplitudvärden för rör och stockar.

Objekt	Medelamplitud	Diameter (mm)
Metallrör	6,9	305
Metallrör	5,2	125
Tjockt lager bark	4,2	350
Mellantjockt lager av bark	4,6	300
Ingen eller lite bark	2,6	200



Figur 12. Amplitudnivåer för alla mätningar på rör och stockar i olika riktningar (cirkulärt).

Fältmätningar

Radarbolaget genomförde mätningar på kontrollstockar hos Setra på Kastet i Gävle. Mätningarna gjordes tillsammans med Biometria och Skogforsk. Biometria genomförde referensmätningar enligt gängse metoder. Dessa mätningar gjordes genom att avbarka stocken (skorpark och bastbark togs bort). Klaven användes för att mäta diametern före och efter avbarkning, se figur 13.



Figur 13. Avbarkning av skorpark och bastbark med yxa samt mätning med klave före och efter avbarkning.

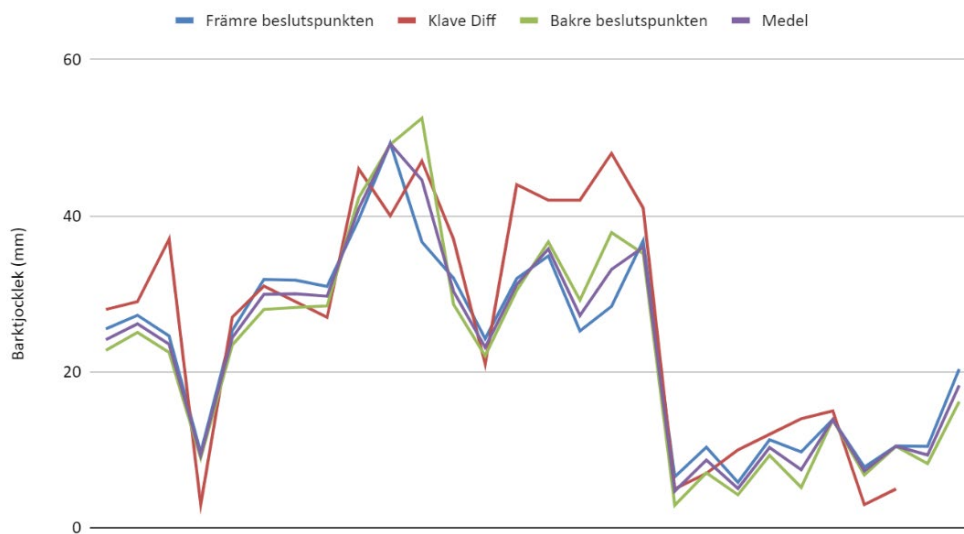
Radarmätningarna gjordes genomgående före avbarkning. En blå markering sprayades på barken så att radarmätningarna och klavningarna skulle göras i samma punkt, se figur 14. Det gick relativt bra att centrera radarmätaren över den blå punkten.



Figur 14. Märkning av mätpunkt med blå färg och mätning med radarsystem.

Under försöket på Kastet genomfördes mätningar på tall och gran. Totalt radarmättes och referensmättes 26 stockar. Radarbolaget genomförde vederbörlig signalanalys varvid olika beslutspunkter i signalen granskades. Det kunde konstateras att radarsystemet till viss del ”såg” barken som ett svagt första mål och ”såg” kambium som ett starkt efterföljande mål. Målet dyker upp som en puls, se figur 5–7. Nollgenomgångarna (där signalen passerar noll på y-axeln) är tillförlitliga beslutspunkter vid signalbehandlingen. Resultatet baseras på mätningar från två olika beslutspunkter. Redovisad barktjocklek baseras på summan av två radarmätningar från varsin sida av stocken respektive differensen mellan två klavningar, se figur 15.

Radarmätning och klavmätning



Figur 15. Resultat från mätningar på 26 stockar. Röd=klavning, Blå=främre beslutspunkt, Grön=bakre beslutspunkt, Lila=medel av främre och bakre beslutspunkt.

Radarmätningarna och klavningarna följer varandra. Den bakre beslutspunkten ger lägst standardavvikelse på 6,2 mm. Medelvärdet på avvikelserna är 2,6–3 mm för främre och bakre beslutspunkt, vilket indikerar att klavningarna är något längre än radarmätningarna. Avvikelser mellan radarmätningarna och klavningarna kan ha olika förklaringar:

- Det är svårt att mäta i exakt **samma mätpunkt** för radarmätningar och klavningar. Detta fel torde vara normalfördelat för många mätningar, varvid medelvärdet borde bli noll för många mätningar. I enskilda mätningar kan felet bli stort.
- Radarmätningarna kan eventuellt se **bastbarken** istället för kambium som det tydliga målet. Det kan vara anledningen till att medelvärdet för klavningarna är något högre än radarmätningarna (2,6–3 mm).
- **Appliceringen** av radarmätaren mot stocken kan påverka mätningen. Det behöver göras upprepade mätningar i samma punkt för att undersöka hur stor repeterbarheten är. Detta gjordes inte under försöket.
- **Klavningen** uppvisade skillnader på någon millimeter vid upprepade mätningar på samma punkt. Det felet är således litet och troligtvis försumbart.
- Vid **borttagning av barken** med yxa, vid den på blå markeringen, kan det vara svårt att mäta med klaven exakt i den underliggande mätpunkten. Vid klavning görs mätningarna mot de bredaste diametrarna med och utan bark. Dessa två diametrar behöver ju inte sammanfalla. Felet torde vara normalfördelat och ge ett medelvärde på noll för många mätningar. I enskilda mätningar kan felet vara stort.
- Barken kan ha olika fukthalt. Vid förhöjd fukthalt kommer radarmätningarna ge en för stor barktjocklek eftersom radarsignalen går långsammare igenom en fuktig bark än igenom en torr bark. Omfattningen på detta eventuella problem är okänt, men det borde inte handla om ett fel på mer än 10–15%. Felet torde vara större på gran än på

tall. Samtidigt är granbark tunnare medan tallbark är tjockare vilket gör att det absoluta felet blir mindre.

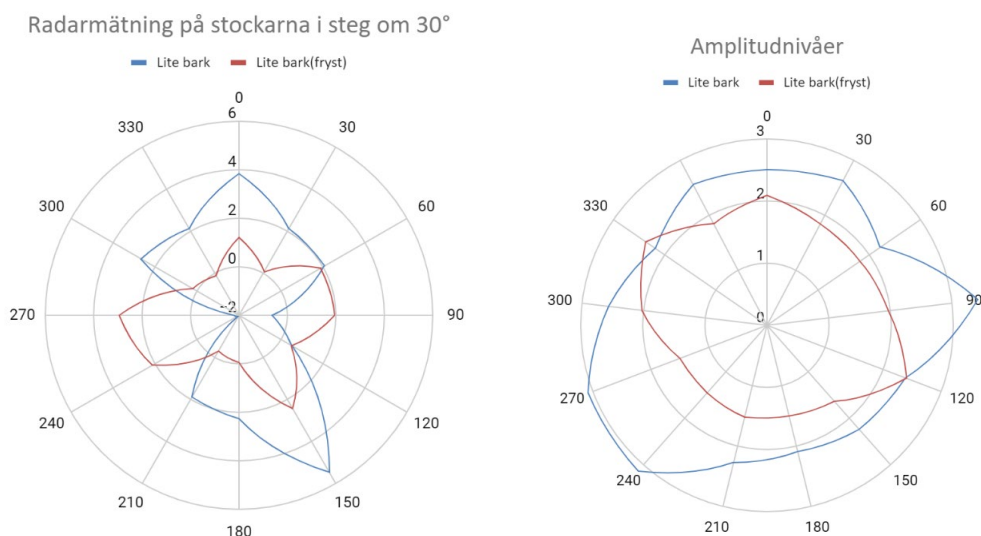
Frusen stock

Det är känt att tempererat och fruset vatten beter sig annorlunda i relation till radarsignaler i gigahertz-området (mikrovågor). Fruset vatten består av kristaller. Dessa kristaller påverkas lite av mikrovågornas oscillation medan det tempererade fria vatten påverkas starkt av mikrovågorna. Vattenmolekylen är dipolär och svänger kraftigt då den utsätts för ett varierande elektromagnetiskt fält. Stocken med lite/ingen bark kapades i två delar. Det är samma stock som har använts och mätts på tidigare, se figur 10. Stockdelarna frystes ner i en frys i tre dygn till -18°C , se figur 16.



Figur 16. Nedfrysta stockdelar i frys.

Mätningar på stockdelarna gjordes före och efter nedfrysning, se figur 17. Syftet med mätningarna var att identifiera om mätningarna mot kambium skiljdes åt mellan tempererad och fryst stock. Det är ingen större skillnad i mätningarna för tempererad och fryst stock. Den uppmätta genomsnittliga barktjockleken var 1,5 mm (tempererad) respektive 1,1 mm (fryst). Amplitudnivåer (medel) uppvisar dock en signifikant skillnad på 2,5 mot 1,8. Det beror då sannolikt på att fruset vatten är ett mindre tydligt mål för radarn än tempererat vatten.



Figur 17. Radarmätningar på bark (barktjocklek) och amplitudnivåer. Blå=tempererat, röd=fryst.

Analys – fukthalt i bark och årstidsvariationer

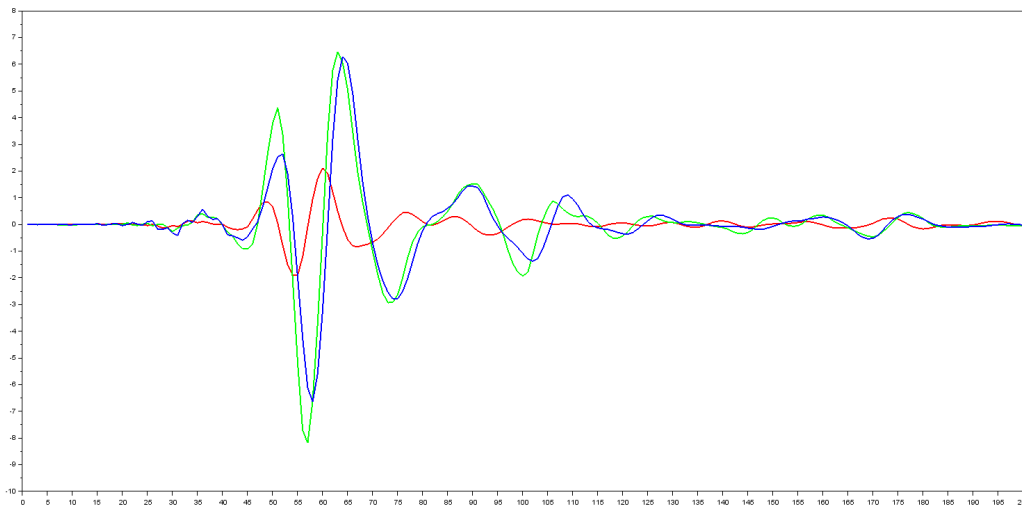
I stycke 3 anges hur signalbehandlingen ska gå till för att beräkna barktjockleken. Det beräknings sättet förbiser att barken kan ha olika fukthalt, vilket kommer att inträffa kopplat till årstider och trädslag. Enligt ett examensarbete av Ellen Bergvall vid SLU (https://stud.epsilon.slu.se/15485/1/bergvall_e_200423.pdf) varierar fukthalten mellan årstiderna. En kombinerad röntgen och 3D-mätningen skulle kunna vara en lösning, men rapporten menar på att denna teknik inte kan lösa problemet fullt ut. Varierande fukthalt kommer att påverka alla sorters mätningar med elektromagnetiska vågor (exempelvis röntgen och mikrovågor). Påverkan är frekvensberoende. Därutöver finns det skillnader till om refraktionsindex kan mätas eller endast bestämmas från amplitudnivåer. Det finns också skillnader mellan smalbandig och bredbandig (UWB) teknik.

Signalbehandlingen under stycke 3 är ett förenklat sätt att hantera radarsignalerna. Sättet förbiser vissa saker. Signalbehandlingen antar att skillnaden mellan en nollmätning (nollsignal) och en barkmätning (mätsignal) ger barktjockleken genom att det är företrädesvis kambium som är dominerande i mätsignalen. Summan av signalen på enbart bark (barkmätning) och signalen på enbart kambium (ytmätning) är dock inte exakt den signal som erhålls från en kombinerad bark- och kambiummätning, se figur 18. Det beror på att barken fördröjer signalen innan den träffar den underliggande ytan (ytmätningen). För att exemplifiera detta så genomfördes tre mätningar utan att flytta mätaren: på bark, på aluminiumfolie och på bark med aluminiumfolie.

I figur 19 går det att se radarsignalerna från respektive mätning. Det går att se att mätningen på aluminiumfolie (grön) och mätningen på bark med aluminiumfolie (blå) är förskjutna mot varandra (det är den jämförelse som användes under stycke 3). Enbart bark (röd) är inte osynlig för radarn och den signalen interfererar med signalen från folien vid mätning på bark med aluminiumfolie. Ju fuktigare barken blir desto större kommer barksignalen att bli, vilket därmed påverkar signalen i ännu större omfattning. Barksignalen kommer sålunda överlagras ytmätning samt variera med fukthalt och tjocklek.



Figur 18. Mätning på bark som ligger på frigolit (frigolit är i princip osynligt för radarn), mätning på aluminiumfolie (ej bild) och mätning på bark med aluminiumfolie.



Figur 19. Mätning på enbart bark (röd), mätning på aluminiumfolie (grön) samt mätning på bark med aluminiumfolie (blå)

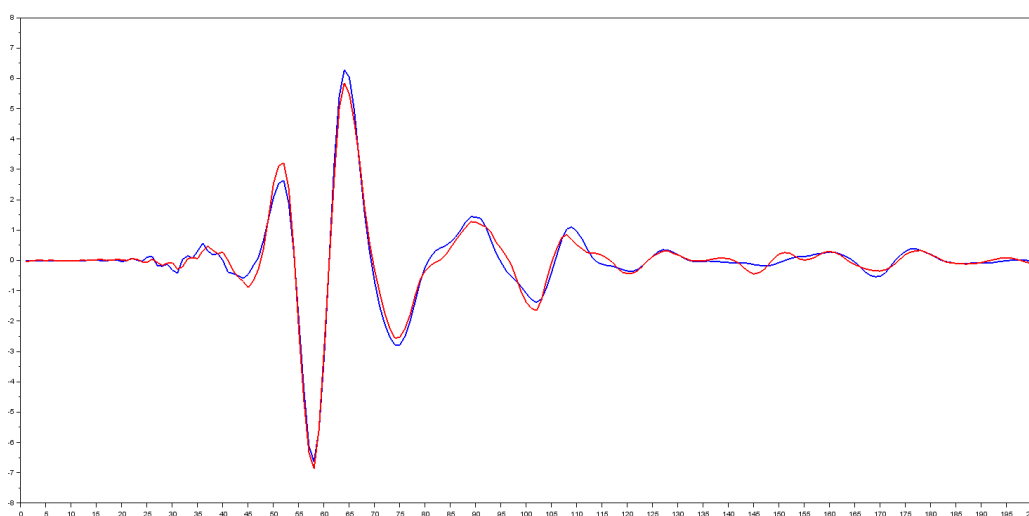
I ovanstående mätningar var barken relativt torr. Den torde ha ett bryningsindex på ungefär 1,4, vilket innebär att mätningarna fördröjs med 40 procent. Den går att analysera signalerna på ett annat sätt. I figur 19 borde den sammanlagda mätningen (blå) vara summan av ursprunglig barkmätning (röd) och foliemätningen förflyttad. Detta går att göra genom analys i den så kallade frekvensdomänen. Överräkning från tidsdomänen (signaler i figur 19) görs med FFT (fast Fourier transform). Stegen är:

1. sätta foliemätningen till en template-signal
2. förflytta och förstärka/förminska template-signalen (i frekvensdomänen)

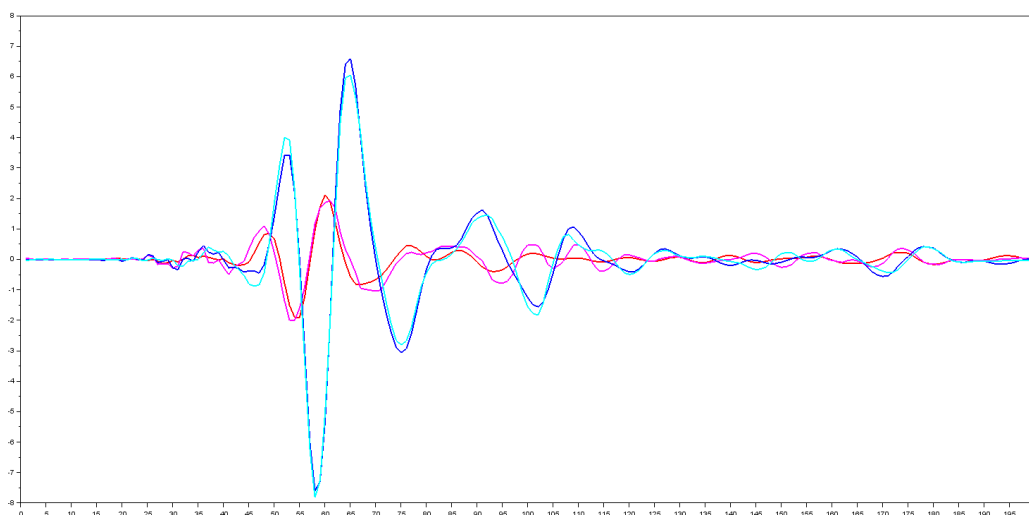
3. addera ursprunglig signal för barkmätningen med förflyttad och förstärkt template-signal

4. jämföra med mätt bark med aluminiumfolie.

Den bästa matchningen ger tidsskillnaden mellan dessa två signaler, se figur 20–21. I detta fall mättes ju barken och folien, men det är ju intressant att jämföra hur väl modellering och anpassningen blev, se figur 21. Det går att konstatera att den fungerar bra.



Figur 20. Mätning på bark med aluminiumfolie (blå) samt mätning på bark adderad med förflyttad och förstärkt template-signal (röd).



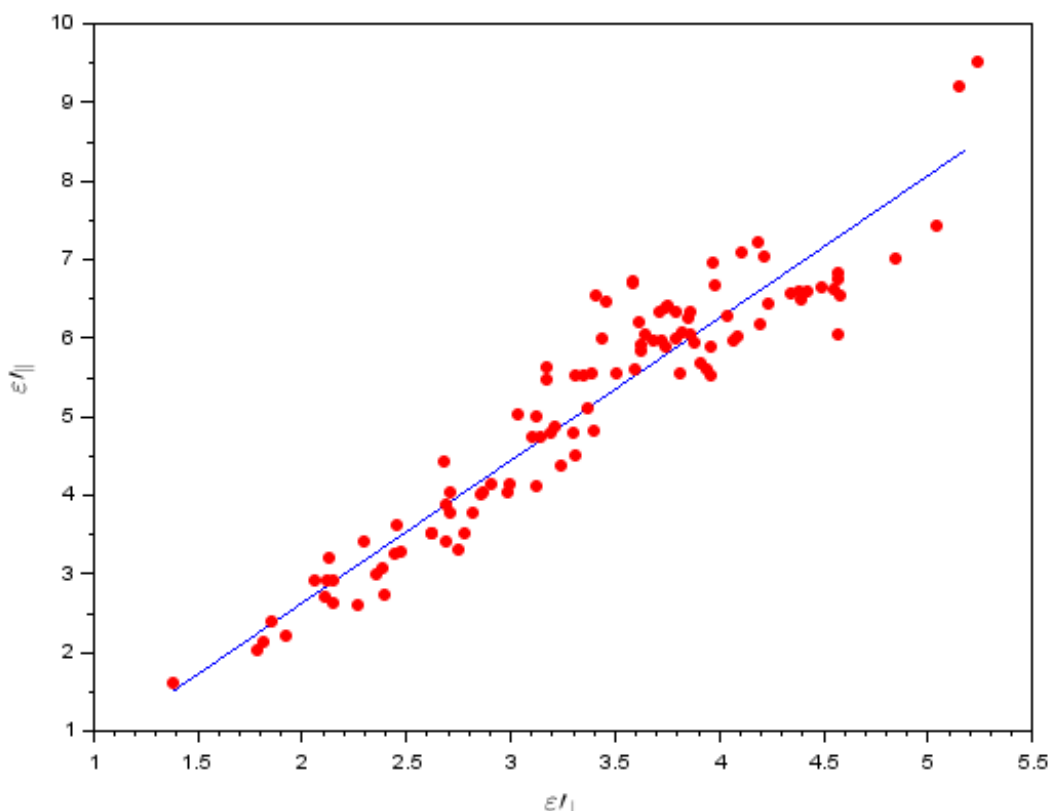
Figur 21. Jämförande mellan mätning på bark med aluminiumfolie (blå) och beräknad bark med aluminiumfolie (cyan). Jämförelse mellan mätning på bark (röd) och beräknad bark (magenta).

Om refraktionsindex är känt så kan den faktiska barktjockleken beräknas. Om barktjockleken är känd så går det att beräkna refraktionsindex. Tidsskillnaden mellan dessa två signaler var 0,061 nanosekund (se figur 20–21), vilket motsvarar en

avståndsskillnad på 18,3 mm (dubbla avståndet i radarläge). Kontrollmätt barktjocklek var 21 mm. Det ger ett refraktionsindex på $(21 + 18,3/2)/21 = 1,44$, vilket är ett rimligt mått och stämmer väl överens med tidigare mätningar gjorda av Radarbolaget. I det verkliga fallet är varken refraktionsindex eller barktjockleken känd. Fukthalten i barken kommer att variera med säsongen. Det är sålunda möjligt att mäta den effektiva barktjockleken (verklig tjocklek multiplicerad med refraktionsindex) med denna metod. Även om man skulle kunna mäta på flera ställen på stocken om refraktionsindex anses konstant så är det ändå inte möjligt att både beräkna faktiskt tjocklek och faktiskt refraktionsindex. Det blir en gummisnoddseffekt i beräkningarna, antingen kan refraktionsindex vara lika mycket större som barken är tjockare. Det ger samma resultat.

Analys – korspolarisation

Det är känt att refraktionsindex skiljer sig åt mellan en polarisation parallellt och vertikalt mot fiberriktningen i träet. Det gäller även för bark. Det finns en tydlig skillnad mellan parallell och vertikal polarisation för barkflis, se figur 22 (<https://ieeexplore.ieee.org/document/8466878>). I figuren används dielektricitetskonstanten, ϵ , istället för refraktionsindex. Dielektricitetskonstanten är refraktionsindex i kvadrat ($\epsilon = n^2$).



Figur 22. Dielektricitetskonstanten i två polarisationsriktningar från 104 mätningar med barkflis.

Kvoten (ekvation 4) mellan parallell och vertikal polarisation ökar ned fukthalten, se figur 23. Hypotesen är att kvoten inte förändras med packningsdensiteten. Spridningen i figur

23 borde sålunda inte bero på varierande packningsdensitet utan på felaktiga referensmätningar av fukthalten eller andra mätfel. Följande formler kan sättas upp:

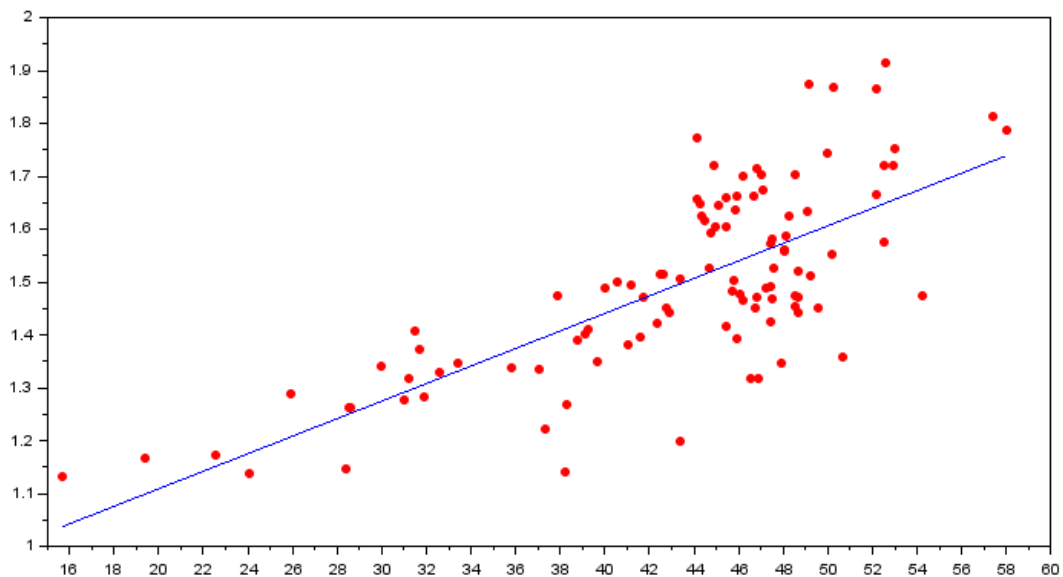
$$n_{eff}^{\perp} = 1 + f_1 \cdot (n_{\perp} - 1) \quad (1)$$

$$n_{eff}^{\parallel} = 1 + f_1 \cdot (n_{\parallel} - 1) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} (n_{eff}^{\perp} - 1)/(n_{eff}^{\parallel} - 1) &= (f_1 \cdot (n_{\perp} - 1))/(f_1 \cdot (n_{\parallel} - 1)) \\ &= (n_{\perp} - 1)/(n_{\parallel} - 1) \end{aligned} \quad (3)$$

$$q = n_{\parallel}/n_{\perp} \quad (4)$$

där f_1 är fraktionen flis, n_{\perp} och n_{\parallel} är refraktionsindex i vertikal och parallell polarisationsriktning för en viss fukthalt, n_{eff}^{\perp} och n_{eff}^{\parallel} är uppmätt effektivt refraktionsindex i vertikal och parallell polarisationsriktning för en viss fukthalt och viss packningsdensitet. Enligt ekvation (3) elimineras fraktionen eftersom den finns både i täljaren och nämnaren. Detta resonemang torde kunna användas för beräkning av barktjockleken.



Figur 23. Kvoten för dielectricitetskonstanten i två polarisationsriktningar från 104 mätningar med barkflis.

I figurerna 22–23 var inte densiteten eller fraktionen barkflisen känd och kan inte heller återskapas. Därför genomfördes förnyade mätningar där densiteten var känd. Mätningarna gjordes på 1–10 lager plankor för verifiering av ekvationerna 1–3, se figur 24. Mätningarna gjordes omväxlande i vertikal och parallell polarisationsriktning genom att vrida antennerna 0° till 90° . Höjden på plankorna har ingen betydelse för mätningarna. Refraktionsindex ansågs vara ungefär lika för alla plankor. De hade torkat under lång tid. Några plankor var dock mer tätvuxna (fler årsringar) än de andra.



Figur 23. Mätningar olika antal lager av plankor i olika polarisationsriktningar.

n_{\perp} och n_{\parallel} kan enkelt beräknas genom att utgå från ekvationerna (1–3). Fraktionen (tjockleken på plankan) är känd och n_{eff}^{\perp} samt n_{eff}^{\parallel} har mätts upp. I vidare beräkningar måste kvoten i ekvation 4 bestämmas. Den bestämdes utifrån n_{\perp} och n_{\parallel} från sista beräkningen med 10 lager plankor eftersom den mätningen troligtvis var behäftat med minst fel. Genom att använda mätningarna av n_{eff}^{\perp} och n_{eff}^{\parallel} samt kvoten q så ska fraktionerna f_1 samt n_{\perp} och n_{\parallel} kunna beräknas för varje lager plank genom minstakvadratberäkning, se tabell 3. Mätningar och beräkningar stämmer väl överens. Avvikelser kan bero på att respektive planklager inte hade exakt samma refraktionsindex.

Tabell 3. Mätt och beräknat refraktionsindex i olika riktning samt fraktion.

Plankor	Mätt n_{\perp}	Mätt n_{\parallel}	Mätt f_1	Beräknad n_{\perp}	Beräknad n_{\parallel}	Beräknad f_1
1	1,38	1,57	8,9%	1,34	1,51	9,9%
2	1,42	1,63	17,8%	1,35	1,52	21,7%
3	1,43	1,60	26,8%	1,45	1,63	25,6%
4	1,42	1,60	35,7%	1,41	1,59	36,2%
5	1,42	1,60	44,6%	1,40	1,58	46,4%
6	1,42	1,60	53,5%	1,42	1,60	54,0%
7	1,42	1,61	62,4%	1,40	1,58	65,4%
8	1,41	1,61	71,4%	1,38	1,55	78,2%
9	1,40	1,59	80,3%	1,38	1,55	86,0%
10	1,40	1,58	89,2%	1,40	1,58	89,7%

Nu borde motsvarande ekvationer, mätningar och beräkningar också kunna göras för barkmätningar. Det är dock så att fraktionen alltid är 100% för bark. Här varierar dock tjockleken på barken. För barktjockleken kan följande formler sättas upp:

$$h_1^\perp = h_0 \cdot n_\perp \quad (5)$$

$$h_1^\parallel = h_0 \cdot n_\parallel \quad (6)$$

$$h_1^\perp/h_1^\parallel = (h_0 \cdot n_\perp)/(h_0 \cdot n_\parallel) = n_\perp/n_\parallel \quad (7)$$

där h är barktjockleken, n_\perp och n_\parallel är refraktionsindex i vertikal och parallell polarisationsriktning för en viss fukthalt, h_1^\perp och h_1^\parallel är uppmätt effektiv barktjocklek (inte verklig) i vertikal och parallell polarisationsriktning för en viss fukthalt och viss barktjocklek. Enligt ekvation (7) elimineras den faktiska höjden eftersom den finns både i täljaren och nämnaren. Kvoten q från ekvation 4 ska också användas. Det finns sålunda två mätningar och två obekanta, vilket torde göra det möjligt att beräkna de obekanta. Tyvärr multipliceras faktorerna i ekvationerna (4–5) med varandra vilket skapar en gummisnoddseffekt i minstakvadratanpassningen. Det går att sätta vilket värde som helst på n_\perp , n_\parallel och h_0 så länge de relativt sätt ger h_1^\perp och h_1^\parallel . Sålunda är det inte möjligt att lösa ut både barktjockleken och refraktionsindex.

Feluppskattning

Det är som sagt möjligt att mäta och bestämma den effektiva barktjockleken (se figurerna 20–21), som inte är verklig utan den verkliga tjockleken multiplicerad med refraktionsindex (jämför med ekvationerna 5–6). Det är ett faktum att refraktionsindex kommer att variera med årstiden och bestånd. Vid beräkning kan refraktionsindex kan sättas till en konstant eller variera med årstiden. Ett rimligt standardvärde (förvalt värde) för refraktionsindex är $n_\perp = 1,4$ (se tabell 3). Detta värde skulle kunna användas vid mätningar enligt figur 14 för beräkning av den verkliga barktjockleken. Det är ju framför allt granen som kommer att ha ett högre refraktionsindex. Även tall kan förväntas ha ett något högre värde, men borde inte vara lika högt som gran. Hur stort är då felet ifall barken blir fuktigare? I tabell 4 görs feluppskattningar gällande tall (10–50 mm barktjocklek) och gran (5–15 mm barktjocklek).

Tabell 4. Uppskattat barktjocklek (som kommer att mätas) vid olika faktiska tjocklekar och fukthalter (FH). I detta fall användes $n_\perp = 1,4$ som referensvärde för refraktionsindex.

	Tjocklek (mm)	FH, 20% n=1,4	FH, 30% n=1,5	FH, 40% n=1,6	FH, 50% n=1,7
Tall	10	10	10,7	11,4	12,1
	20	20	21,4	22,9	24,3
	30	30	32,1	34,3	36,4
	40	40	42,8	45,7	48,6
	50	50	53,6	57,1	60,7
Gran	5	5	5,4	5,7	6,1
	10	10	10,7	11,4	12,1
	15	15	16,1	17,1	18,2

Det absoluta felet är naturligtvis större för tjockare bark. Därför kommer fuktig tallbark ge störst fel i absoluta termer. Granbarken blir ju inte lika tjock som tallbarken, men troligtvis är granbarken fuktigare. Även om maxfelet kan vara 20–25% så torde felet i absoluta termer inte bli så stort. Det borde också vara möjligt att sätta schablonvärden för refraktionsindex vid olika tider på året. Därigenom skulle felet kunna minskas, kanske halveras.

Slutsatser och framtid

De första mätningarna på bark med radarteknik gjordes för 7–8 år sedan i samarbete med Skogforsk. Dessa mätningar syftade till att hitta en teknik för dimensionsmätning på skördare. Det gjordes ett antal mätningar, liknande de mätningar som gjordes under stycke 4. Mätningarna från det tillfället och från denna förstudie visar tydligt att tekniken har potential. Då precis som nu var avvikelserna 2–3 mm. Inte vid någon av dessa mätningar togs dock bastbarken bort. Bastbarkens existens förstods först vid fältmätningarna. Vid fältmätning med klave togs bastbarken bort. Standardavvikelse var då 6,2 mm och medlet var 2,6–3 mm högre för klavningarna än för radarmätningarna. Den logiska slutsatsen är att halva felet kan bero på hanteringen av bastbarken. Med största sannolikhet kommer bastbarken alltid att mätas och identifieras av radarsystemet eftersom den är vattenrik. Troligtvis har bastbarken en tjocklek som inte varierar lika mycket som skorpbarken. Därför skulle bastbarken kunna räknas bort med ett schablonvärde.

Noggrannheten i övrigt torde kunna bli högre genom en bättre mätapparat och mätförfarande. Under försöken användes en handburen prototyp. I de tidigare diskussionerna med Skogforsk diskuterades om att göra en klo som inneslöt själva stocken. Då skulle mätningarna kunna göras i ett flertal punkter. **Fler mätningar** är ett bra sätt att nå en högre noggrannhet. Det skulle också kunna göras med någon form av skannande anordning där större delen av stocken mäts i hundratals, tusentals eller miljontals punkter. I ett eventuellt kommande projekt bör de tre olika förslagen till prototyper (handhållen, klo eller skanner) diskuteras. Den handburna prototypen fungerar trots allt riktigt bra, men den bör kompletteras med någon form av sikte samt göras lite smalare och mindre. Om en bärbar prototyp görs måste även radarsystemet paketeras på ett bärbart sätt, exempelvis i en ryggsäck. Den mobila utrustningen måste också ha en batterilösning för elförsörjning. Därutöver måste utrustningen tåla oöm behandling och ha hög IP-klassning för både damm och vatten.

Det finns ingen signifikant skillnad mellan **tempererad och frusen stock** gällande möjligheten att mäta barktjockleken. Amplituden blir något lägre för den frusna stocken. Snö på stocken borde vara relativt osynligt för radarn, men stora iskakor borde dock synas. Detta är inte testat och bör därför undersökas vidare.

En radarbaserad fukthaltsmätare kräver antingen känt **refraktionsindex** eller att refraktionsindex är konstant mellan mätningarna. Så kommer inte vara fallet över olika säsonger. Det är inte möjligt att beräkna både barktjockleken och refraktionsindex. Det är däremot möjligt att bestämma den effektiva barktjockleken, vilken är den verkliga höjden multiplicerad med refraktionsindex. Felet i bestämningen av verklig barktjocklek borde inte vara större än 20–25% (se tabell 4). Den borde kunna halveras om det är möjligt att sätta schablonvärden för refraktionsindex vid olika tidpunkter på året.

I dagsläget används laser och bildigenkänning för klassning av barktjocklekar. Röntgen i kombination med laser och bildigenkänning används inte i någon större omfattning då

metoden anses vara otillförlitlig. Dagens metoder mäter sålunda inte barktjockleken utan uppskattar den och klassificerar den i olika intervaller. **Radartechniken kan mäta** den effektiva barktjockleken, men mätningarna kommer att vara behäftade med fel beroende på hur refraktionsindex varierar med fukthalten över säsongen.

I det stora hela gick mätningarna bra. Den ursprungliga mätmetoden måste dock dömas ut eftersom den förutsatte att barken var mer eller mindre osynlig, vilket den inte är. Prototypen gjorde sitt jobb. Noggrannheten torde kunna förbättras om bastbarken hanteras på ett schablonmässigt sätt. Regressionsanalys är ett sätt att hantera avvikelserna mellan radarmätningarna och klavningarna. Den effektiva barktjockleken kan dock mätas och refraktionsindex torde kunna användas schablonmässigt för bestämning av den faktiska barktjockleken. Bestämningen av barktjockleken kommer alltid att vara behäftad med ett **visst fel**. Biometria och Skogforsk får bestämma om felet är acceptabelt.

Slutsatsen är att tekniken har potential att fungera i ett skarpt läge. Ett eventuellt projekt kan relativt snabbt utveckla en **fältnässig mätutrustning** med nuvarande utseende. Då skulle mätningarna mer fokusera på att samla ihop data, göra referensmätningar och ställa olika metoderna mot varandra. Det är inte ett jättestort steg att utveckla någon form av skanningutrustning, roterande utrustning eller klo heller. Det skulle vara fördelaktigt ifall lösningen skulle kunna användas inom flera områden, exempelvis på skördare och för inmätning (mättrigar). Det är också fullt möjligt att utveckla flera prototyper i ett kommande projekt och benchmarka dem mot varandra.