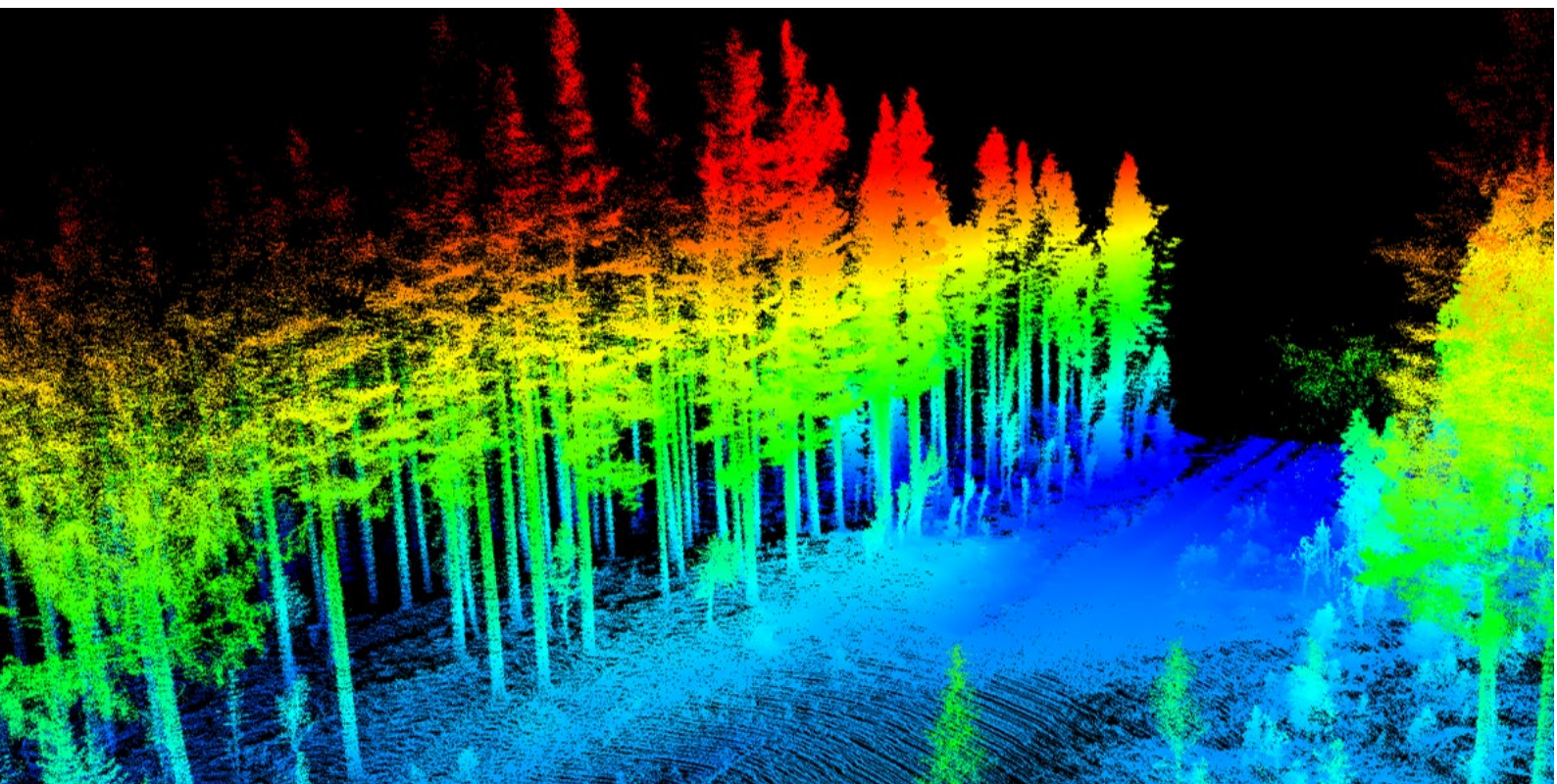


# Mätning av krök och virkeskvalitet med mobila sensorer på skördare

Mot en bättre aptering med laserskanner och kamera på skördare

Nils Lindgren, Björn Hannrup, Johan Möller (Skogforsk), Johan Fransson, Mattias Nyström, Mikael Hertz, Niklas Förster (Komatsu Forest AB), Aleksis Pirinen (RISE), Johan Holmgren, Kenneth Olofsson, Petter Ideström (SLU)



Laserpunktmoln från laserskanner monterad på skördare. Bild: Johan Fransson.

# Innehåll

<b>Förord</b> .....	<b>4</b>
<b>Summary</b> .....	<b>5</b>
<b>Sammanfattning</b> .....	<b>6</b>
<b>Bakgrund</b> .....	<b>7</b>
<b>Syfte och mål</b> .....	<b>11</b>
<b>Material och metoder</b> .....	<b>11</b>
Försöksområden samt TLS mätning .....	12
Insamling av provträd för CT-skanning .....	13
Mobila personburna sensorer .....	14
Utrustning på skördare .....	15
Laserskanner på skördaren .....	15
Kamerautrustning på skördaren .....	16
GNSS / IMU .....	17
SLAM och filtrering av punktmolnet .....	17
Algoritm för stamform från TLS data .....	18
Algoritm för stamform från handhållen MLS .....	19
Algoritm för stamform från skördarmonterad MLS .....	19
Detektion och segmentering av stamytor .....	19
Cirklar från enskilda skanningsvarv .....	20
Beräkning av stamprofiler .....	20
Beräkning av mått på krök .....	21
Utvärdering av krökmåttens mätnoggrannhet .....	21
Apteringssimuleringar .....	22
Genomförande av simulering .....	23
AI-modeller på bilder .....	23
<b>Resultat</b> .....	<b>23</b>
Bearbetning av lasermätningar från skördarmonterad MLS .....	23
Utvärdering av krökmätning med TLS .....	24
Utvärdering av krökmätning med handhållen MLS .....	25
Utvärdering av krökmätning med skördarmonterad MLS .....	26
Detektion av stamdel .....	26
Utvärdering av krökmätning .....	28
Apteringssimuleringar med hänsyn till krök .....	29

Identifiering av lyror med kamera .....	30
<b>Slutsatser .....</b>	<b>33</b>
<b>Referenser.....</b>	<b>33</b>
<b>Bilaga 1: AI-detektion av lyror i bilder .....</b>	<b>36</b>
Insamling av tränings- och valideringsdata.....	36
Insamling av data med mobila enheter .....	36
Insamling av data med skördare.....	37
Beskrivning av slutgiltiga data för träning och validering.....	37
Resultat baserat på ovan beskrivna data.....	37
Resultat med kamera monterad på skördare.....	38
Framåtblick .....	39



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

---

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts juni månad 2026 av Maria Iwarsson Wide, programchef. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef, granskat och godkänt publikationen för publicering 29 juni 2026.

Redaktör: Caroline Rothpfeffer, caroline.rothpfeffer@skogforsk.se  
©Skogforsk 2026 ISSN 1404-305X

# Förord

Denna rapport sammanfattar arbetet inom projektet ”Mätning av krök och virkeskvalitet med mobila sensorer på skördare” som finansierats av TräCentrum Norr, Mistra Digital Forest, Åforsk (anslagsnummer 23–520), Norra Skogs Forskningsstiftelse (anslagsnummer 23–02), Önnesjöstiftelsen samt av medel från Skogforsks ramanslag.

Projektet har varit ett samarbete mellan Skogforsk, SLU, RISE och Komatsu Forest AB där Komatsu Forest AB:s insats finansierats av projektet EU-projektet AGRARSENSE.

Vi vill tacka alla de som delat med sig av sina erfarenheter, ni har bidragit med mycket värdefull information. Ett speciellt tack riktas till de som varit engagerade i referensgruppen till projektet:

- Jonas Byström, Norra skog
- Henrik Sjölander, SCA
- Magnus Bergman, SCA
- Dan Olofsson, Stenvalls trä
- Anders Nordmark, SCA
- Göran Wikman, Norra Skog

Maskinförarna Mikael Sundling och Joakim Henningsson har förutom att avverka försöksområdena bidragit med kunskaper om aptering i praktiken, stort tack!

Tack även till Holmen Skog som var markvärd för försöken och bidrog med kostnad för transport av virke.

# Summary

For Scots pine, sweep is the most common reason why logs are downgraded or rejected at Swedish sawmills. At the same time, current harvesters lack technical tools to objectively measure sweep prior to felling, meaning that assessments largely rely on the operator's experience and visual judgment.

The overall aim of the project was to investigate whether mobile laser scanning (MLS) mounted on harvesters can be used to measure sweep in standing trees, and how such information can be applied to improve bucking decisions. The project also included an initial study on AI-based detection of bole scars using images.

The study was conducted at two pine-dominated final felling sites near Umeå. High-resolution terrestrial laser scanning (TLS) was used as reference data, complemented by CT scanning of selected trees. The forest was scanned using both handheld MLS and MLS mounted on a harvester. New algorithms were developed to identify tree stems, reconstruct stem shape, and calculate various curvature metrics, including bow height, radius of curvature, and yield loss.

The results show that it is possible to measure sweep in standing trees using harvester-mounted MLS. For the portion of the stem where data quality was highest (1–5 meters above ground), the measurement accuracy achieved is considered promising for future operational use. At the same time, several challenges were identified, including tree movement during harvesting, interference from the harvester crane, and difficulties in measuring both higher sections of the stem and areas close to the ground.

Bucking simulations based on TLS-derived stem geometry demonstrated that accounting for curvature can increase timber yield and tree value by avoiding logs that would otherwise be rejected by industry. The gains were greatest for trees with pronounced curvature in the lower stem. These results indicate that automated measurement of stem form can contribute to more efficient raw material utilization and increased value creation in the forest and wood industry.

The study also shows that camera-based AI has potential for detecting wood defects such as bole scars, although substantially larger training datasets are required for practical application.

Overall, the project demonstrates that mobile laser scanning on harvesters has strong potential to provide future decision support for quality-adapted bucking. However, further development is needed to improve detection of stem sections near the ground and higher up in the tree, handle complex stem geometries, and evaluate economic impacts at larger scales.

# Sammanfattning

Krök på tallstammar är en av de vanligaste orsakerna till att timmer vrakas vid svenska sågverk. Samtidigt saknar dagens skördare tekniska hjälpmedel för att objektivt mäta krök före avverkning, vilket innebär att bedömningen i stor utsträckning bygger på förarens erfarenhet och visuella uppskattning. Projektets övergripande syfte var att undersöka om mobil laserskanning (MLS) monterad på skördare kan användas för att mäta krök på stående träd och hur sådan information kan användas för att förbättra apteringen. Projektet omfattade även en inledande studie av AI-baserad detektion av virkesfelet lyra med hjälp av kamerabilder.

Studien genomfördes på två talldominerade slutavverkningstrakter utanför Umeå. Som referens användes högupplöst terrester laserskanning (TLS), kompletterat med CT-skanning av ett urval träd. Skogen skannades dels med handhållen MLS, dels med laserskanner monterad på en skördare. Nya algoritmer utvecklades för att identifiera trädstammar, rekonstruera stamform och beräkna olika mått på krök, bland annat båghöjd, bågradie och utbytesförlust.

Resultaten visar att det är möjligt att mäta långkrök på stående träd med MLS monterad på skördare. För den del av stammen där datakvaliteten var bäst (1–5 meter över mark) uppnåddes en måtnoggrannhet som bedöms vara lovande för framtida operativ användning. Samtidigt identifierades flera utmaningar kopplade till träd som rör sig under avverkning, störningar från skördarens kran samt svårigheter att mäta högre upp i stammen samt nära marken.

Apteringssimuleringar baserade på uppmätt stamform från TLS visade att hänsyn till krök kan öka timmerutbytet och värdet av virket genom att undvika stockar som annars riskerar att vrakas vid industrin. Vinsten var störst för träd med tydliga krökar i den nedre delen av stammen. Resultaten indikerar därmed att automatiserad mätning av stamform kan bidra till effektivare råvaruutnyttjande och högre värdeskapande i skogs- och träindustrin.

Studien visar också att kamerabaserad AI har potential att identifiera virkesfel som lyra, men att betydligt större träningsdatamängder krävs för praktisk tillämpning.

Sammantaget visar projektet att mobil laserskanning på skördare har god potential att ge framtida beslutsstöd för kvalitetsanpassad aptering. Ytterligare utveckling behövs dock för att förbättra detektion av stamdelar nära marken och högre upp i trädet, hantera komplicerade former på stammar samt utvärdera de ekonomiska effekterna i större skala.

# Bakgrund

Krök är idag den vanligaste orsaken till vrak vid inmätning av tall på svenska sågverk (Björklund & Erkstam, 2019). För tall är krök också den i särklass vanligaste orsaken till att man vid avverkning apterar massaved i timmerdimensioner (Personlig kommunikation: J. Hemmingsson, Biometria). I dagens skördare saknas hjälpmedel för att identifiera krökar på stammarna. Förarna är därför hänvisade till en visuell bedömning som är svår att utföra med hög precision och samtidigt upprätthålla en normal produktionstakt. Den tid som föraren lägger på att syna stockarna är nödvändig för att hålla nere vrakandelen men innebär en mental belastning och tar fokus från andra arbetsmoment. Förarens arbetsmiljö präglas av högt tempo och stora krav på informationsbearbetning och beslutsfattande, vilket gör att avlastning av vissa moment skulle förbättra arbetsmiljön och ge utrymme att fokusera på andra uppgifter. Sammantaget finns en potential att skapa mer värde av skogen genom att utveckla stöd som avlastar maskinföraren i dessa beslut.

Vid avverkning i Sverige används cut-to-length-systemet, vilket innebär att virket kapas till stockar direkt i skogen. Dagens skördare mäter längd och diameter med hög precision, vilket är nödvändigt för en ändamålsenlig tillredning av virket. Skördarens apteringsdator beräknar optimal tillredning baserat på en prognos av stammens form och skördarens kontinuerliga mätning av längd och diameter i aggregatet. Genom att simulera tusentals kombinationer av stockar i olika längder och diametrar, baserat på prislister och ekonomiskt utfall, optimeras värdet av varje träd. Däremot lämnas upptäckt och hantering av virkesfel, såsom krök, till maskinföraren.

Det sker en snabb teknikutvecklingen kring mobila laserskannrar (MLS). Denna sensorteknik har seglat upp som ett lovande alternativ i syfte att mäta krök och andra egenskaper hos träden. Laserskannrar ger en tredimensionell beskrivning av omgivningen inklusive träden, och erbjuder en möjlighet att förse apteringsdatorn med en mer fullständig information om trädets beskaffenhet till grund för en bättre aptering. Om denna utveckling realiserar har den potential att förbättra produktivitet och arbetsmiljö vid avverkning, öka andelen timmer och därmed höja det totala värdet i de skogliga värdekedjorna. Detta projekt har studerat laserskanning av stående träd som möjlig lösning på problemen kopplade till träd med olika typer av krök.

Kröken beskrivs ofta i minst två typer: tvärkrök och långkrök. Tvärkrök beror av olika störningar i toppens tillväxt, så som avbrutna toppar vilket orsakar en fiberstörning och kortare avvikelser från en rak stam (figur 1). Långkrökar har andra orsaker och uttrycks som en längre svepande avvikelse från en rak stam (figur 1). Långkrökar är mycket svåra att upptäcka för skördarföraren, speciellt då kröken är riktad med böjningen rakt mot eller från maskinen så att kröken inte syns i profil.



Figur 1 Till vänster en bild på en så kallad tvärkrök, till höger en längre typ av krök. Studien har främst fokuserat på den senare typen av krök.

För att beskriva långkrök används flera olika mått, vilka skiljer sig åt både i hur de definieras och i vilken grad de fångar krökens praktiska betydelse vid industriell användning. Vanliga exempel är:

- **Båghöjd samt båghöjd i procent av stockens längd**, enligt tidigare virkesmättningsbestämmelser (Virkesmättningsrådet, 1999) (figur 2)
- **Bågradie**, exempelvis beräknad enligt (Prendes m.fl., 2022)
- **Utbytesförlust**, enligt aktuella bestämmelser för virkesmätning (Biometria, 2025) (figur 3)



Figur 2. Båghöjd som mått på krök, där avvikelser från en rak linje mellan stockens ändar utgör måttet. Måttet har uttryckts i procent av stockens längd i tidigare virkesmättnings bestämmelser. (Virkesmättningsrådet, 1999)



Figur 3. Beskrivning av utbytesförlust (A) som mått på krök. Bild: Biometria (2025)

Båghöjd definieras som avvikelser från en rak linje mellan stockens ändpunkter och har ofta uttryckts i procent av stockens längd (Virkesmättningsrådet, 1999). Måttet är enkelt att tolka och används frekvent i operativa sammanhang.

Bågradie härleds ur båghöjden och beskriver krökens styrka geometriskt: en liten radie motsvarar en kraftigt krökt stam, medan en stor radie indikerar en svag krök (Prendes m.fl., 2022).

Utbytesförlust är måttet som används i nuvarande virkesmättningsbestämmelser. Måttet beskriver den volym- eller längdförlust som uppstår när en rak produkt (till exempel en sågstock eller sågcyllinder) extraheras ur en krokig stam (Biometria, 2025). Till skillnad från båghöjd och bågradie tar utbytesförlust hänsyn till både stockens form och diameter, vilket har relevans för sågverksindustrin men måttet är därmed även mer komplext.

En laserskanner skickar ut laserstrålar i olika riktningar, ofta över en miljon pulser i sekunden. Varje puls ger ekon från träffade objekt, exempelvis stam, blad eller markvegetation, vilket registreras som punkter i ett punktmoln. Med hjälp av datorseende-algoritmer kan man ur dessa mätvärden identifiera objekt av intresse och skilja dessa från ointressanta mätpunkter. Till exempel indikerar cylindriska former stammar och linjära delar grenar (Lalonde m.fl. 2006, Raumonon m.fl. 2013, Liang m.fl. 2016, Olofsson & Holmgren 2016). När stamsegmenten identifierats kan modeller, exempelvis cylindrar, anpassas för att beräkna skogliga parametrar som diametrar, stamvolym, grenvolym, avsmalning och krök.

Det finns två huvudsakliga tekniker för laserskanning i skog: **stationära (TLS)** och **mobila (MLS)** system.

- **TLS (Terrester Laserskanning, figur 4)** använder stationära skannrar, monterade på stillastående stativ, vilket ger hög punkttäthet och noggrann positionering.
- **MLS (Mobil Laserskanning)** kan röra sig samtidigt som de skannrar och kan vara handhållna eller monterade på fordon eller ryggsäckar. De ger lägre punkttäthet och lägre positioneringsnoggrannhet, vilket kräver särskilda algoritmer för databehandling.

För TLS finns många algoritmer för stamdetektering (Olofsson & Holmgren 2016, Liang m.fl. 2016). För MLS börjar algoritmutvecklingen ta fart (de Paula Pires m.fl. 2022), men utvecklingsbehovet är fortfarande stort. MLS har fördelen att de insamlade data täcker större områden snabbt, vilket möjliggör realtidssystem som kan ge information under pågående åtgärder.



Figur 4. TLS under mätning i skog. Skannern står still på stativ och flyttas runt i skogen.

Ett viktigt steg vid mätning med MLS är så kallade SLAM-algoritmer (Simultaneous Localization and Mapping). SLAM är tekniker för att med en sensor mäta in omgivningen samtidigt som systemet lokaliserar sig själv i den karta som mätningarna skapar. När skannern rör sig genom skogen samlar den in lasersvep, det vill säga ett varv som skannern snurrar för att mäta in omgivningen. Varje nytt svep jämförs med tidigare svep för att hitta gemensamma strukturer, till exempel stammar eller markytor. Genom att matcha dessa överlappande punkter kan algoritmen beräkna hur skannern har förflyttat sig och korrigera sin position. På så sätt skapas en sammanhängande ”karta” eller mätning av omgivningen där flera skannervarv byggs ihop till en bild av omgivningen. SLAM är nyckelteknik för mätning med MLS; utan SLAM skulle små fel i positioneringen snabbt ge ett förvriddt punktmoln.

Tidigare studier har indikerat en potential att med TLS mäta krök på stammar (Thies m.fl. 2004, Pyörälä m.fl. 2019, Fan m.fl., 2025). Studierna har använt sig av stationära laserskannrar med hög punkttäthet som står stilla under mätningen. Studier där man använder sig av mobil laserskanning (MLS) för mätning av träd vid avverkning finns sedan tidigare endast som fallstudier. Exempelvis Pohjala m.fl. (2025) studerade effekten på förarens produktivitet om MLS på skördaren användes som stöd vid gallring, för att nå rätt uttag vid gallring. Effekten på produktiviteten var begränsad, men är ett exempel på användning av laserskanner monterad på skördare. Sagar m.fl. (2024, 2025, 2026) har i flera studier använt laserskanner monterad på skördare för att mäta på träd. Bland annat simulerades laserdata på krökta träd som träningsdata för AI-modeller, för att sedan utvärdera på verkliga träd. Studierna utvärderar krökmätning på endast tre träd, och använder inte mätningen till aptering även om det enligt författarna är syftet med deras utveckling. I studierna lyfts även utmaningarna med att laserskotten från den typ av skanner som används breder ut sig, det vill säga har stor stråldivergens. Själva laserskottet blir alltså större och tappar upplösning längre från skannern.

Att aptera optimalt med hänsyn till krök har testats av Prendes m.fl. (2023). I den studien användes TLS för att beräkna krokighet hos de stockar som potentiellt kunde kapas till, med olika gränsvärden för olika typer av produkter som tex fanerstockar. Ansatsen att utvärdera de stockar som potentiellt kan tillredas av ett träd har utgjort grunden i tankesättet även för denna studie.

Tidigare studier med sågsimulering pekar på att inkludering av stamform i aptering kan öka värdet med upp till ca 4–6 % för sågad vara (Nordmark 2005, Rummukainen m.fl. 2021). Detta i fallet då en CT-skanner fanns vid sågverket, men aptering baserades på stammens 3D-form. Utvecklingen av sensorer och algoritmer öppnar nya möjligheter för

automatisk mätning av stamform vid avverkning med skördare, vilket öppnar för att en del av den potential som identifierats med sågsimulering kan realiseras vid avverkning med cut-to-length metoden. Tidigare studier har främst studerat mätning av krök på stående skog med hjälp av TLS. För att tekniken skall bli gångbar i praktiken krävs dock mätning med rörliga sensorer (MLS), företrädesvis monterad på skogsmaskiner.

## Syfte och mål

Laserskannrar monterade på skogsmaskiner utvecklas snabbt och skapar nya möjligheter att mäta trädens egenskaper före avverkning. Tidigare studier av krök har främst använt stationära laserskannrar (TLS), men för praktisk tillämpning krävs mätning med rörliga sensorer (MLS) monterade på skogsmaskiner. Projektet syftar därför till att undersöka hur MLS kan användas för att mäta krök och andra kvalitetsrelaterade egenskaper som stöd för aptering och råvarustyrning.

Målen med projektet var att:

- Utveckla och utvärdera metoder för mätning av krök på trädstammar med laserskanner monterad på skördare.
- Utveckla en grundläggande modell för hur mätinformationen kan integreras i apteringen.
- Utvärdera maskininlärningsmodeller för detektion virkesfelet lyra

Syftet med att mäta trädens form innan avverkning är att minska vrakandelen vid industrin, och aptera träden bättre. Detta väntas i sin tur ge en högre timmerandel samt mer och bättre anpassad råvara till sågverken. I förlängningen ger detta större nytta från den svenska skogen och sågverksindustrin, i form av bland annat större andel långlivade produkter som lagrar koldioxid i till exempel byggnader.

## Material och metoder

Tall är det trädslag som enligt Biometria (Björklund & Erksam, 2019) har störst problem med krök, och merparten av det talltimmer som avverkas i Sverige kommer från slutavverkning. Studien har därför avgränsats till slutavverkning i talldominerad skog. Vidare har studien fokuserat på den typ av krök som täcker en längre del av stammen (långkrök), snarare än kröken som beror av gamla toppbrott (tvärkrök). Tvärkrök har studerats i angränsande projekt på samma försöksområden (de Paula Pires m.fl., 2026).

Detta avsnitt beskriver metodiken som användes i syfte att studera om krök kan mätas med MLS och hur uppmätt krök kan användas för att förbättra apteringen. Arbetsflödet var:

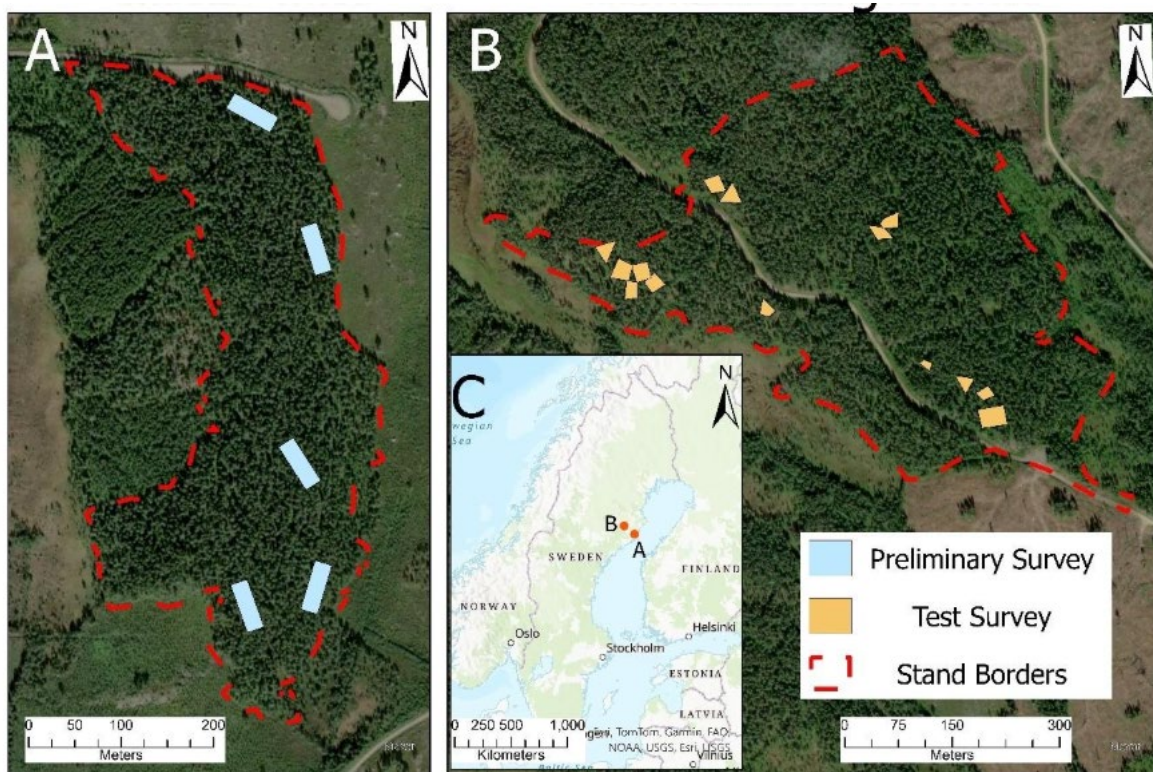
1. Kravställning och metodval genom intervjuer och litteraturstudier
2. Inmätning av referensdata på försöksområden
3. Inmätning av försöksområden med handhållen MLS
4. Avverkning av försöksområden med MLS monterad på skördare

5. Beräkning av stamform från referensdata samt utveckling av algoritmer för rekonstruktion av stamform från MLS
6. Utvärdering av mobila sensorer
7. Apteringsmodellering med krökmått integrerat

Inledningsvis fokuserades arbetet på att beskriva problematiken och fastställa lämpliga mått på stockars krökning. Därefter beskrivs arbetet med att skapa försöksområden där mätningen kunde utvärderas, vilka mättes in med TLS och ett urval av träd skickades till CT-skanning. Försöksområdena skannades sedan med handhållen MLS och avverkades till sist med laserskanner fäst på skördaren. Data från laserskanningen omvandlades till mätvärden av stammens krök vilket utvärderades, och slutligen integrerades mätvärdena från TLS in i en apteringsmodellering.

### Försöksområden samt TLS mätning

Denna studie genomfördes med data från två försöksområden: 1) Sävar (Figur 5 A – lat. 64,0° N, long. 20,6° E) och 2) Tribbladsberget (Figur 5 B – lat. 64,3° N, long. 19,8° E), båda belägna i närheten av Umeå (figur 5 C). Försöksområdena utgjordes av två slutavverkningstrakter dominerade av tall, med god bärighet för både mark och vägar till trakterna. Valet av försöksområden gjordes genom att besöka trakter planerade för avverkning på Holmen Skog AB:s marker, och valet föll på två trakter med något mer krokiga träd än vad som är vanligt inom detta område. Inom varje försöksområden valdes provytor ut subjektivt, där vi sökte variation i trädens kvalitetsegenskaper, främst gällande krök och tvärkrök.



Figur 5. (A) Försöksområdet Sävar, med rektangulära provytor utlagda i beståndet. (B) försöksområdet Tribbladsberget med utlagda oregelbundna provytor (Från de Paula Pires m.fl., 2026)

Som referens för mätning av stammens form valde vi att arbeta med terrester laserskanner (TLS), vilket är laserskannern med hög precision som ställs upp på stativ för att skanna omgivningen. En mängd studier om att skanna träd med TLS har publicerats under senare år. Fördelarna med att arbeta med TLS som referens till andra mätningar är att det är relativt lätt att samla relativt många träd, och att trädets hela form beskrivs. Det senare till skillnad mot alternativet att märka upp apterade stockar och mäta formen i någon form av mätram, då endast de tillredda stockarnas form mäts, men inte hela stammen. Det blir då svårt att uttala sig om hur virket kunde tillretts annorlunda.

På båda lokalerna samlades TLS-data in med ett Leica RTC360-system. Systemet sänder ut två miljoner laserskott per sekund och registrerar träffade objekt som en punkt med 3D koordinater. Det valda skanningsläget gav ett laserpunktsavstånd på cirka sex millimeter vid 10 meter avstånd från skannern. Punktpositioneringsnoggrannheten är 1,9 millimeter vid 10 meter (Leica Geosystems, inget årtal)

Sävar försöksområdet dominerades av tall, med grundtyevägd medelhöjd på 18 meter och en grundtyevägd medeldiameter på 22,5 cm. Datainsamlingen utfördes i fem rektangulära provytor, vardera 15 x 50 meter (Figur 5A). TLS-skanningen genomfördes från flera positioner genom att skannern placerades längs ytans omkrets med 5–10 meters mellanrum. Varje yta krävde totalt 15–20 skanningar. På denna lokal mättes 287 stammar in på detta sätt.

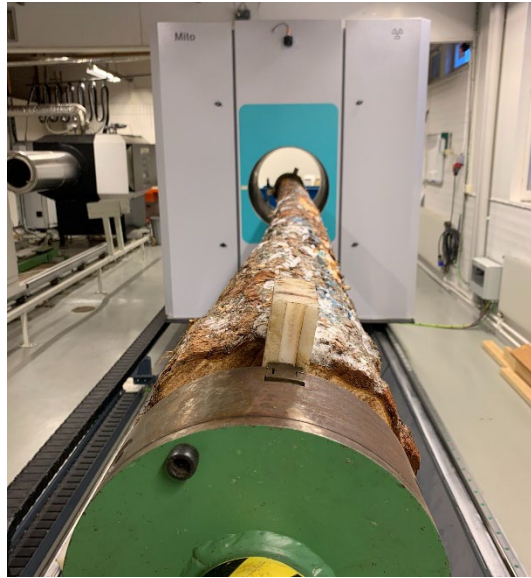
På Tribbladsberget dominerades skogen också av tall, med en grundtyevägd medelhöjd om 20,4 m och grundtyevägd medeldiameter om 25,8 cm. I denna inventering hade provytorna inga fasta storlekar. I stället utfördes skanning i områden med hög koncentration av krokiga träd genom att placera skannern runt dessa områden för att säkerställa att krokiga träd var synliga från olika vinklar. I genomsnitt gjordes 4–10 TLS-skanningar runt enskilda krokiga träd eller kluster, fördelat på 14 ytor. Sammanlagt mättes 310 stammar från TLS-punktmolnen insamlade på Tribbladsberget.

Försöksområdet Sävar användes till att utveckla och pröva algoritmer, medan Tribbladsberget användes för utvärdering.

## Insamling av provträd för CT-skanning

Stockarna från totalt 30 träd som avverkats på försöksområdena skickades även för CT-skanning till LTU i Skellefteå. Data från träden används i angränsande projekt men 10 stycken kom även detta projekt till nytta som ett litet, men mycket noggrant data för trädets form.

I skogen valdes träd ut för CT-skanning och markerades med snitslar. Trädets position registrerades med cm-noggrannhet med hjälp av nätverks-RTK och handburen GNSS-mottagare. Via koordinatinformationen kunde dessa träd kopplas samman med de data som samlades in i efterföljande steg (TLS, MLS och skördarmätning). Träden valdes ut med olika kriterier, dels träd med långkrök, dels träd som valdes slumpmässigt, träd med något mer grenar längre ned, några träd med dubbeltopp och några med tvärkrökar. Träden fälldes och kvistades som hela stammar med skördare, men kapades upp i stockar med motorsåg och märktes med ett för trädet unikt identitetsnummer. Varje stock märktes med både träd-identitetsnummer samt ordningsnummer för respektive stock med början 1 för stocken längst ned och en rotationsriktning för hur stockarna satt ihop, vilket gör det möjligt att rekonstruera träden som helhet i efterhand. Stockarna från dessa träd skannades sedan hos LTU i Skellefteå (figur 6).



Figur 6. Skanning med CT-skanner hos LTU i Skellefteå. Stocken hålls fastspänd och skannern rör sig över stocken. (Bild: Johannes Huber)

### Mobila personburna sensorer

Före avverkning skannades provytorna på försöksområdet Tribbladsberget med en handhållen MLS, en kommersiell produkt som heter Hovermap ST-X (figur 7) från tillverkaren Emesent (Emesent, 2025). Vi genomförde skanningen i syfte att undersöka hur väl kommersiella system mäter skogen med avseende på krök, vilket ger en benchmark och målbild för prototypsystemen som monterades på skördaren. Vid skanningen gick inmätaren runt provytorna längs samma stråk som skördaren senare körde vid avverkning, med ungefär 20 meter mellan stråken.



Figur 7. Handhållna MLS systemet Hovermap STX från Emesent användes för att skanna skogen innan avverkning. Den blå "burken" längst fram är själva laserskannern.

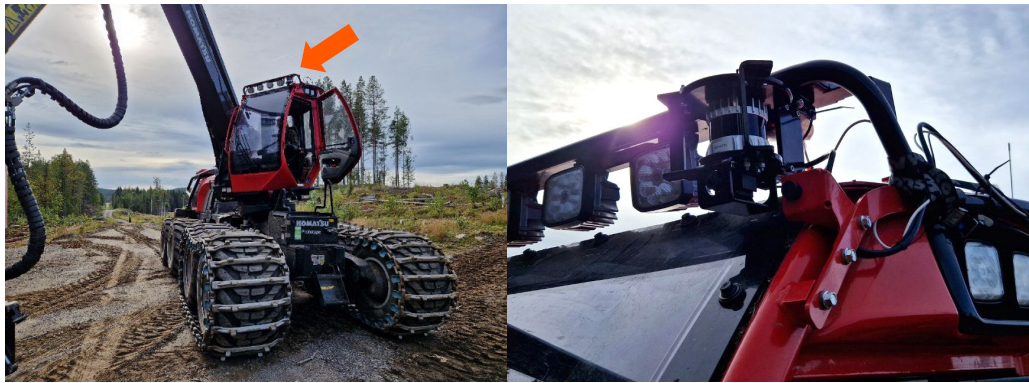
## Utrustning på skördare

Skördaren som användes vid avverkningen var en av Komatsu Forest AB:s testmaskiner (modell 951XC), som hade det så kallade "Precision"-systemet vilket positionerar träden med mycket hög precision (Hannrup & Möller 2022). Positionen är mycket viktig i denna studie eftersom skannade träd med TLS och handhållen MLS kopplades samman med skördarens mätningar med hjälp av trädens koordinater.

## Laserskanner på skördaren

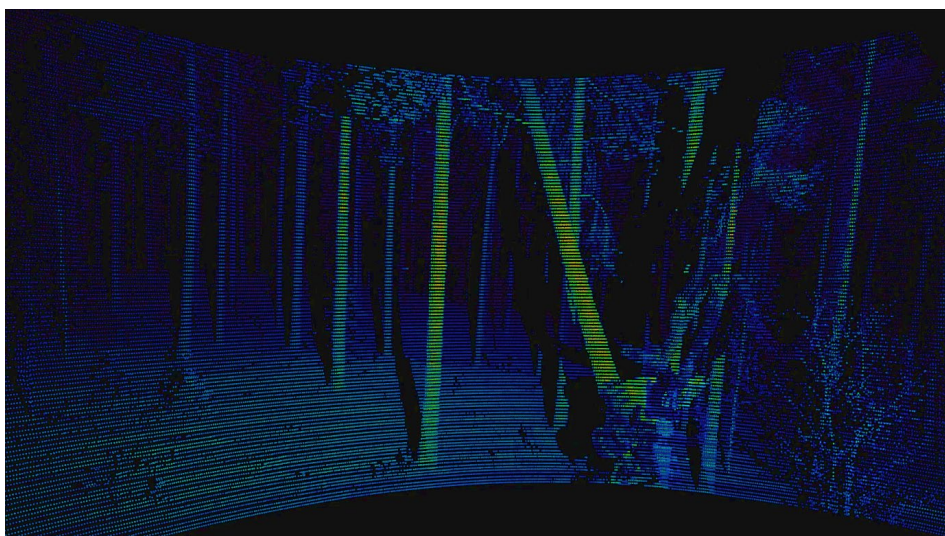
Skördaren utrustades med en prototyp för laser- och kameramätning, som monterades på taket på skördaren (figur 8). Både kamera och laserskanner var monterade på ljusrampen ovanpå hytten, dels för att ha bra uppsikt över omgivningen från en hög placering, dels för att rotera tillsammans med hytten.

De relevanta sensorerna för att identifiera stamform som monterades på skördaren var en LiDAR och ett GNSS / IMU system. Utrustningen skyddades delvis från skador av den störtbåge som är monterad ovanför lamporna.



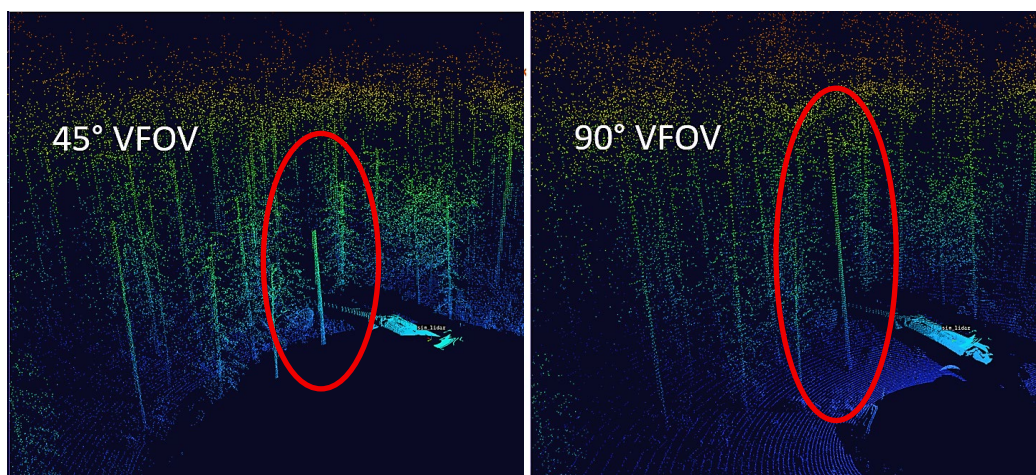
Figur 8. Kamera och LiDAR var monterade på ljusrampen.

De laserutrustningar som användes i projektet roterar 10 gånger per sekund och skickar ut laserstrålar i omgivningen, och registrerar då något träffats av ett laserskott. Därigenom fås avstånd och riktning till det som träffats, vilket sparas som en mängd koordinater till träffade objekt i ett så kallat punktmoln (figur 9).



Figur 9. Delen av LiDAR-punktmolnet från en rotation av skannern, för området framför maskinen. Till höger i bild ses kranen och aggregatet strax efter fällning av ett träd. Vissa laserpunkter har alltså reflekterats från skördaraggregatet och kranen.

Två modeller av laserskanner testades under projektets gång. Dels en Ouster OS0-128, som har ett vertikalt synfält på  $\pm 45^\circ$  (uppåt och nedåt), och i senare tester användes Ouster OS1-128, som har ett vertikalt synfält på  $\pm 22,5^\circ$  (figur 10). Fördelen med Ouster OS1-128 är att den fördelar de 128 mätlinjerna över en mindre vinkel, vilket ger en högre vertikal upplösning längs stammen på träden. Båda dessa laserskannrar har en horisontell upplösning på 2048 punkter per mätlinje för varje skanningsvarv.



Figur 10. Simulerade data från de två olika laserskannermodellerna som användes monterade på skördaren under avverkning. Till vänster smal vertikal öppningsvinkel (Ouster OS1-128), till höger skannern med hög öppningsvinkel (Ouster OS0-128). Samma träd inringar där en större del syns till höger, men med lägre upplösning.

### Kamerautrustning på skördaren

Den kamera som monterades på skördaren var en digital RGB 5MP-kamera. Den var riktad framåt mot aggregatet, så att den hade uppsikt över trädstammar som greppades av maskinen. Bilderna från kameran är normalt distorderade p.g.a. linsförvrängning, men

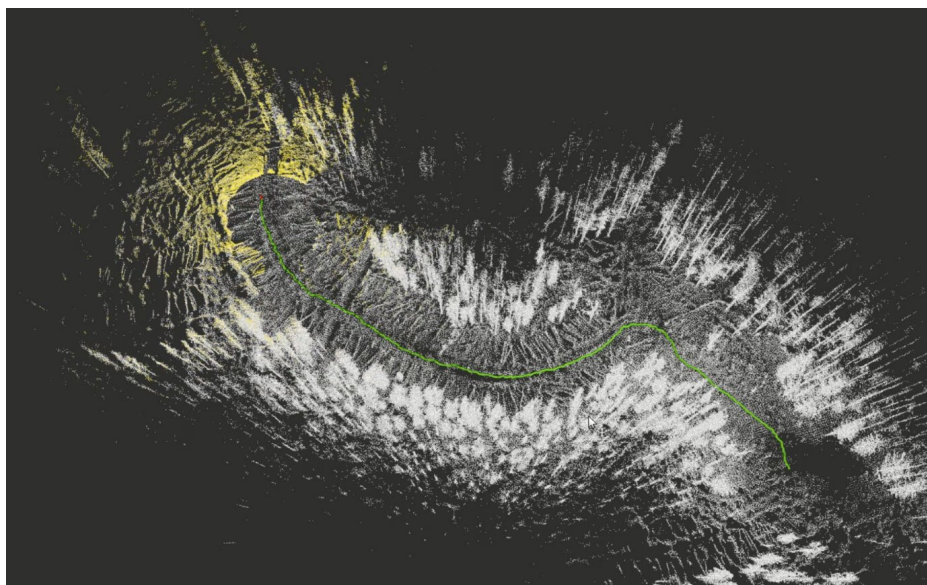
kalibrerades efter datainsamlingen för distorsionen. Detta gjordes specifikt för de bilder som sedan blev analyserade med AI för att identifiera olika typer av lyror.

### **GNSS / IMU**

Ett annat viktigt system för att kunna använda laserdata och jämföra med andra manuella mätningar är GNSS (positioneringssystemet, t.ex. GPS) och IMU (Inertial Measurement Unit) systemet. En IMU registrerar små rörelser och skakningar. Dessa sensorer medför att de insamlade punktmolnen från laserskannern kan läggas in i ett globalt refererat koordinatsystem. För att dra nytta av laserskannerns alla mätningar, samlas de in i ett och samma punktmoln, alltså i en SLAM.

### **SLAM och filtrering av punktmolnet**

Data från laserskanner och IMU spelades in och sparades. De ursprungliga koordinaterna sparas i laserskannerns koordinatsystem. Dessa koordinater är inte direkt användbara eftersom sensorn är i rörelse under datainsamlingen. Därför används en SLAM-algoritm för att beräkna ett sammansatt punktmoln. SLAM av laserskannerdata innebär att beräkna skannerns position i rörelse genom att matcha nya mätningar mot tidigare mätningar och på så sätt beräkna laserskannerns förflyttning. På detta vis kan varje enskilt skanningsvarv läggas ihop till ett samlat punktmoln. Figur 11 visar punktmoln sammansatt med SLAM-teknik. Punkterna i gult representerar det senaste skanningsvarvet och punkterna i vitt de tidigare sammansatta skanningsvarven.

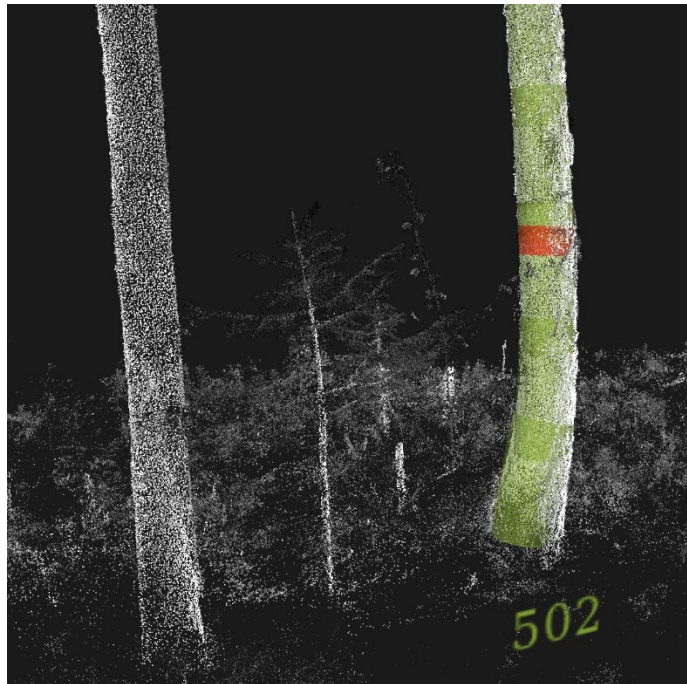


Figur 11. SLAM:ens totala punktmoln byggs upp av data från alla individuella skanningsvarv.

För att minimera risken att punkter från skördarens kran och aggregat skall "förorena" det SLAM:ade punktmolnet filtreras punkter på nära avstånd bort innan de läggs in i SLAM:en. För att minska risken för lågkvalitativt data från långa avstånd, filtreras även de punkter bort ur punktmolnen som är för långt bort från laserskannern.

## Algoritm för stamform från TLS data

Den algoritm som användes för stamdetektering i TLS data beskrivs i Olofsson och Holmgren (2016) och är en 3D-grid baserad lösning som letar efter platta objekt i laserdata som kan vara delar av stammarnas yta. Därefter kopplas dessa ytor samman; och de som bildar cylinderlika objekt antas vara delar av en stam. De cylindrar som ligger över varandra i vertikalled kopplas samman och bildar enskilda stammar där cylindrarna tillåts avsmalna och följa krökningen på ett träd. Figur 12 visar exempel på punktmoln från TLS med cylindrar i grönt.



Figur 12. Exempel på referensdata från TLS med anpassade cylindrar, och brösthöjdsdiametern i rött. (Bild Kenneth Olofsson)

Algoritmerna enligt Olofsson och Holmgren (2016) kompletterades med manuell kontroll. I den nedre delen av stammen avviker trädets form i större utsträckning från en ideal cylinder och dessutom förekommer ofta markvegetation som kan introducera störningar och fel. Detta leder till att cylinderanpassningen i vissa fall misslyckas, vilket resulterar i cylindrar med felaktig diameter, position eller båda.

För att åtgärda detta beslutades att genomföra en postprocessning av data. Under antagandet att endast ett fåtal cylindrar i den nedre delen av stammen är avvikande filterades dessa bort och ersattes med värden från en funktion anpassad till trädets nedre hälft. Nedan följer en beskrivning av processen:

1. Utgångspunkten var cylindrar för ett antal träd beräknade från provytorna 1–14 på Tribbladsberget. Därefter begränsades området till mindre zoner centrerade kring respektive provytecentrum för att säkerställa god täckning i LiDAR-data.
2. Ett mindre antal träd exkluderades då de bedömdes olämpliga för studien, exempelvis träd kortare än sex meter, samt träd med DBH <0,15 meter.

3. För kvarvarande stammar beräknades båghöjd för två segment: 0–5 meter och 1–6 meter. Stora avvikelser mellan dessa beräkningar indikerar problem i cylinderanpassningen och användes för att identifiera felaktiga träd.
4. Med hjälp av en RANSAC-algoritm (Fischler m.fl. 1981) anpassades en funktion (polynom av grad 2) till den nedre halvan av stammen, baserat på kurvor för radie samt x- och y-position för stammens centrum. RANSAC säkerställer en robust anpassning genom att minska påverkan från outliers.
5. Slutligen ersattes uppenbart avvikande datapunkter med värden från den anpassade funktionen.

Den föreslagna metoden förbättrar stamprofilernas kvalitet genom att korrigera felaktiga cylindrar i den nedre delen av stammen. Genom att kombinera robust funktionsanpassning med filtrering av avvikande datapunkter minskas risken för fel som kan påverka beräkningen av båghöjd.

### Algoritm för stamform från handhållen MLS

Handhållen MLS av typen Hovermap ger data med hög upplösning och kvalitet. Därför kunde samma algoritm som för TLS användas, med något justerade parametrar. Resultatet blev även här cylindrar med trädstammens diameter och centrumkoordinat var 10:de centimeter längs stammen.

### Algoritm för stamform från skördarmonterad MLS

#### Detektion och segmentering av stamytor

Laserskannerns mätningar sparas som punkter med 3D-koordinater. Punkterna kan i sin tur omvandlas till en bild där pixelvärdena motsvarar avstånd till skannern, där en avståndsbild skapas för varje gång skannern roterat runt och mätt in omgivningen. I varje avståndsbild identifierades områden i bilden som motsvarar delar av stammar, så kallad segmentering. Segmenteringen gjordes med en algoritm som slår samman närliggande områden som har liknande egenskaper ("region growing algorithm"). I detta fall användes skillnaden i avstånd för att bestämma om en rastercell ska associeras till en angränsande rastercell för att bygga upp ett segment. Först togs alla mätvärden närmare än sju meter bort i syfte att filtrera bort laserskott som bara träffat skördarens kran. Sedan beräknades avståndsvariationen inom ett fönster med rasterceller runt varje rastercell som då var centrum. På detta sätt beräknades ett mått på lokal variation för varje rastercell i avståndsbilden. Sedan startade algoritmen med den rastercell som hade lägst variationsmått och avståndet i den rastercellen jämfördes med värdena hos de angränsande rastercellerna. Om skillnaden var lägre än ett visst tröskelvärde inkluderades "grannen" i samma segment som den centrala rastercellen. Sedan jämfördes de nyligen inkluderade rasterceller på samma sätt med sina grannar. Detta upprepades så länge som det fanns grannar som kunde inkluderas i samma segment. Sedan upprepades samma procedur med en ny rastercell som start för ett nytt segment. Det var då den rastercell som hade näst minst variation i sin omgivning bland de rasterceller som ännu inte hade blivit inkluderade i något segment. Eftersom varje rastercell var beräknade från en 3D koordinat så kunde varje laserretur (3D-punkt) märkas med en segmentsidentitet.

Samma sorts segmenteringsmetod användes som för segmentering av stamytor, men höjd i vertikal led användes i stället för avstånd till sensorn. Dessutom var fönstrets utformning annorlunda eftersom det nu inte var frågan om objekt med större utbredning

i en viss riktning som skulle segmenteras. Segment med en viss minsta storlek sparades för vidare beräkningar. Se avsnittet ”beräkning av en markhöjdmodell”.

### **Cirklar från enskilda skanningsvarv**

För varje segment valdes laserreturer ut som kom från samma laser bland de 128 lasrar som var placerade på rad vertikalt. För ett sådant urval anpassades en cirkel till data. I samband med detta gjordes också en korrigering för att minska systematiska fel som beror på laserstrålens utbredning (Faitli m.fl. 2024). Resultatet var cirklar anpassade till trädstammar från varje skanningsvarv och eftersom lasern roterade cirka 10 varv per sekund beräknades många cirklar från olika skanningsvarv för samma trädstam.

En segmenteringsmetod användes för att associera cirklar till samma trädstam. För detta användes både cirklarnas centrum och radie. Först beräknades egenskaper för varje cirkels centrum genom att använda andra cirklars centrum som kom från samma skanningsvarv och stamyta (se ”segmentering av stamytor”). En linje i tre dimensioner anpassades till dessa punkter och medelavvikelsen från denna linje beräknades. Sedan startade segmenteringen genom att välja det cirkelcentrum som hade grannar med den bäst anpassade linjen. Den anpassade linjen användes för att avgöra om närliggande cirklar skulle inkluderas i samma segment. En närliggande cirkel inkluderades i samma segment om linjen var inom cirkeln. Varje inkluderad cirkel användes sedan som ny start och proceduren med att inkludera närliggande cirklar om linjen var inom dem upprepades, då genom att använda den nya startcirkeln linje. Detta upprepades till dess att inga fler cirklar kunde inkluderas i samma segment. Då valdes den cirkel som hade den näst bästa linjeanpassningen bland de cirklar som ännu inte var inkluderade i ett segment som första startcirkel för det nya segmentet. Proceduren med att inkludera cirklar upprepades på samma sätt som tidigare så länge som det fanns närliggande cirklar att inkludera. Den totala proceduren, med skapande av ett segment och sedan initiering av ett nytt segment när fler cirklar inte längre kunde inkluderas, upprepades så länge som det fanns cirklar som inte hade testats att inkluderas i ett segment. Detta resulterade i att alla cirklar tilldelades en segmentsidentitet. Ett tröskelvärde användes för att filtrera bort segments som innehöll mycket få cirklar eftersom dessa troligen inte kommer från någon riktig trädstam.

### **Beräkning av stamprofiler**

Stammens form beskrevs med utgångspunkt från marken, så att eventuella krökars position angavs i läge över marken. Därför skapas en modell av marken genom sammanslagning av data från alla skanningsvarv, för att sedan modellera markytans höjd. På detta sätt användes alla laserretur (3D-punkter) från segmentering av markytor för att skapa en modell med en kontinuerlig yta av markens höjd. En elastisk yta tryckes upp mot 3D punkterna underifrån. Eftersom ytan är elastisk kan den följa markens form och samtidigt säkerställs det att den inte går upp för högt om det är någon 3D punkt som skulle komma från vegetationen och inte från marken.

Cirklar inom ett stamsegment användes sedan för att beräkna stamprofiler för varje detekterat träd. För cirklar tillhörande ett segmenterat träd beräknades först medianvärden för koordinater och radie med 0,1 meters höjdsteg från marknivån och uppåt. Sedan beräknades radien för varje höjdsteg med hjälp av dessa medianvärden. Detta gjordes genom att beräkna ett medelvärde inom ett höjdistintervall runt höjdsteg. För denna beräkning nyttjades också kunskap om trädstammars generella form som hämtades från skördardata. Stammen centrum beräknades för varje höjdsteg genom att

anpassa en utjämnande funktion till medianfiltreade data, och denna utjämnande funktion ger sedan stammens skattade form.

## Beräkning av mått på krök

Positioner från MLS och TLS på vart stammens centrum befinner sig användes för att med olika mått beskriva hur krokig olika delar av skannade trädstammar var. För varje möjlig stock som kan tillredas från trädet används den del av stamprofilen som motsvarar stockens höjdintervall i trädet. Stamprofilen klipps till så att endast centrumkoordinater mellan stockens nedre och övre kapställe ingår i krökmåttet. Tre olika mått på krökning implementerades och testades:

Båghöjd (figur 2) definieras som det maximala ortogonala avståndet mellan stammens faktiska centrumlinje och en rät linje dragen mellan stockens ändpunkter. Beräkningen utfördes i ett tredimensionellt koordinatsystem för att säkerställa invarians avseende krökningens riktning, och uttrycktes även i procent av stockens längd (Virkesmättningsrådet, 1999).

Bågradie beräknades genom att approximera stammens krökning som en cirkelbåge. Baserat på stockens längd och maximala båghöjd beräknades bågradie enligt Prendes m.fl. (2022, 2023).

Utbytesförlust beräknades med en egenutvecklad algoritm. Metoden bygger på en optimeringsalgoritm för att minimera utbytesförlusten genom att iterativt justera den raka sågcyklinders centrumlinje relativt stockens centrum koordinater. För varje punkt längs stocken beräknas avståndet mellan stammens centrum och sågcyklinders centrumlinje vilket jämförs med hur mycket cylindern tillåts avvika från stockens centrum givet stammens diameter. Stammens diameter hämtades från skördarens mätning, medan centrumkoordinaterna kommer från laserskanning.

## Utvärdering av krökmåttens mät noggrannhet

För att möjliggöra en kvantitativ utvärdering av krökmått beräknade från skördarmonterad MLS krävdes en noggrann koppling mellan MLS-data och referensdata från TLS. Detta gjordes med stöd i trädens positioner. MLS-koordinaterna hade vissa systematiska avvikelser och dessa korrigerades genom att matcha mönstret hos trädstammarnas position mot motsvarande mönster uppmätt med TLS (Iterative closest point, ICP) (Schlanger 2017). Efter att positionerna korrigerats länkades varje MLS-träd till närmaste TLS-träd inom ett maximalt avstånd om 1 meter. Om flera MLS-segment matchade samma TLS-träd valdes det segment med störst antal skannervarv som representativt. Flera trädsegment på samma träd uppträder om skördaren kört förbi trädet för att sedan komma tillbaka från andra hållet och avverka det. Träd där stammen inte upptäckts i toppen av första stocken bortsågs från i utvärderingen, vilket gjorde att 175 träd återstod utav ursprungliga 202.

Krökmåttet som utvärderades var båghöjd för en definierad stamdel, huvudsakligen mellan en och fem meter över mark, vilket valdes för att minimera påverkan av bristfällig detektion nära mark och i övre delarna av stammen. För varje träd extraherades båghöjd från både MLS och TLS, och skillnaderna analyserades i termer av RMSE och bias. Analysen genomfördes både med och utan identifierade extrema avvikare, samt uppdelat på skannermodell. Därutöver analyserades sambandet mellan mätosäkerhet i båghöjd och olika kvalitetsindikatorer i MLS-data, såsom antal skannervarv, spridning i stamcentrum mellan olika skannerrotationer, observerat höjdintervall samt trädets

relativa position i förhållande till maskinens kran, för att bättre förstå vilka faktorer som påverkar krökmätningens noggrannhet.

Krökmätningens prestation illustrerades med måtten kvadrat viktat medelfel (RMSE, root mean squared error) och systematiskt fel (bias):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(\text{referens-skattning})^2}{n}} \quad (1)$$

$$Bias = \frac{\sum(\text{referens-skattning})}{n} \quad (2)$$

Här benämns referens som det värde för krökmåttet som betraktas som sant och skattning för det värde som skall utvärderas, till exempel båghöjd mätt med skördarmonterad MLS. Notera att i denna uppställning är en negativ bias en överskattning, det vill säga motsvarar det värde man skall lägga till skattningen för att den i medel skall bli rätt.

## Apteringssimuleringar

Dagens aptering bygger på att identifiera alla möjliga stockar som kan apteras ur ett träd, baserat på en initial prognos över stammens avsmalning, vilken successivt uppdateras med information från skördaraggregatets längd- och diametermätning under upparbetningen av trädet. Varje potentiell stock prissätts sedan enligt en styrprislista utifrån diameter, längd och trädslag. Målet är att hitta den kombination av stockar som ger trädets högsta totalvärde. Det grundläggande flödet är alltså:

Längd/diameter → Prislista → Pris per stock

För att kunna hantera virkesfel, särskilt långkrök, skapades ett ramverk där kvalitet mäts individuellt för varje potentiell stock och tillåts styra prissättningen. Flödet blir då i stället:

Längd/diameter → **Kvalitet** → Prislista → Pris per stock

I detta projekt har vi simulerat en sådan aptering med två kvalitetsnivåer: Sågbar och Vrak. Massaved kvalitetsbedöms inte. Potentiella timmerstockar (baserat på längd/diameter) som bedöms som ej sågbara (vrak) får värdet noll kronor. Därefter beräknar algoritmen värdet för alla möjliga kombinationer och väljer den med högst totalvärde. I den prototyp som utvecklats har fokus helt legat på värdemaximering utan inslag av fördelningsaptering.

För att inkludera virkesfel i apteringen krävs automatiska funktioner som sätter en kvalitetsklass på varje stockalternativ. För fel som tvärkrök, klyka eller sprötkvist är detta relativt enkelt, då felet har en fast position i stammen. Det drabbade området klassas då som massaved, vilket hindrar apteringsdatorn från att lägga en timmerstock över det läget i stammen. Långkrök är mer komplext eftersom felet inte är knutet till en specifik punkt utan beror på hur stammen kapas. En stock som tas ut mellan 0–430 cm kan vara rak nog, medan en stock mellan 0–550 cm kan bli för krokig. Därför måste varje potentiellt stockalternativ som algoritmen föreslår prövas individuellt mot krökmåtten båghöjd, bågradie eller utbytesförlust. Detta gjordes genom att centrumpositioner, mätta med laser för stockens aktuella läge i stammen, användes för att beräkna krökmått enligt tidigare beskrivna metoder.

## Genomförande av simulering

Simuleringarna utgick från skördarens diameter och längdmätningar, registrerade var 10:e centimeter längs stammen. Med hjälp av Skogforsks programvara Timan 4.0 genererades först alla teoretiskt möjliga kapalternativ (start- och slutpunkter i stammen) baserat på en prislista för talltimmer (600 kr/m<sup>3</sup>fub) och massaved (250 kr/m<sup>3</sup>fub), utan längdkorrekationer. Lump-bitar, avkap av kortare bitar som lämnas kvar på hygget, tilläts inte.

Därefter lades det nya steget till: Kvalitetskontroll via lasermätning. Med hjälp av tidigare beskrivna cylindrars centrumkoordinater från lasermätning (TLS användes här) beräknades krökmått för varje möjlig timmerstock. De potentiella stockar som inte uppfyllde kraven på rakhet klassades ned, och prissattes till noll kronor. När algoritmen sedan summerade värdet för olika stockkombinationer, och den kombination som har högst värde väljs, kommer den bästa lösningen därmed inte innehålla några stockar som beräknats vara vrak.

För att jämföra det ekonomiska utfallet av de olika apteringsalternativen (med eller utan hänsyn till krök) sattes ett pris för vrakade timmerstockar. Samma pris som massaved användes, 250 kr/m<sup>3</sup>.

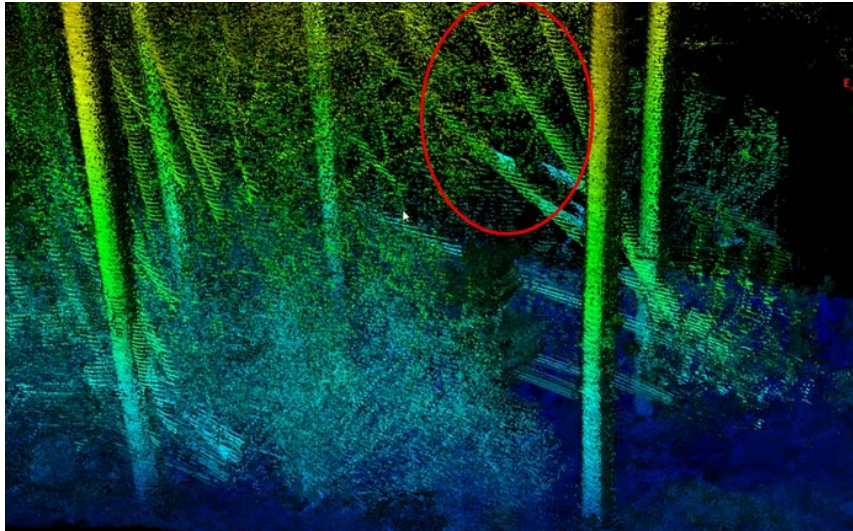
## AI-modeller på bilder

Utrustningen som fästs på skördaren användes främst till att beskriva stamform genom lasermätningar, men kameran i utrustningen öppnar andra möjligheter. Vissa virkesfel utmärker sig med form på stammen, så som tvärkrök och långkrök, andra med utseende såsom lyror. Ett delprojekt i det större projektet använde sig av AI-modeller för att automatiskt identifiera öppna lyror från bilder, i syfte att på sikt kunna använda informationen för bättre aptering. Resultat och metod redogörs för i högre detalj i Bilaga 1. Metoden utgick från att träna upp en AI-modell för att känna igen lyror genom att samla ett träningsdatamaterial med hjälp av mobilkameror. Modellen testades senare på bilder insamlade med skördarens kamera.

# Resultat

## Bearbetning av lasermätningar från skördarmonterad MLS

SLAM är en nyckel teknik för att skapa data för träden mätta med rörlig sensor. Punktmolnen innehöll för det mesta data av bra kvalitet, vilket visar sig genom att många detaljer kan utskiljas i de sammansatta punktmolnen. Ett antal problem i punktmolnen uppdagades. Ett problem var att kran och skördaraggregat i vissa fall finns med i punktmolnen. Vår nuvarande metod för att ta bort kran och aggregat från det SLAMade materialet var att exkludera punkterna som var närmare än sju meter från laserskannern. På längre sikt vore det bra att mer specifikt exkludera maskin-punkter från punktmolnen. Ett andra problem i den slutgiltiga SLAMen är att träd som fällt kommer att spelas in på flera positioner, se figur 13.



Figur 13. SLAM:en innehåller på ett antal ställen punktmoln från fallande träd som förorenar data, vilket leder till svårigheter med identifiering av stammens riktiga form.

Det tredje problemet som identifierats i det SLAM:ade materialet är träd som rör sig, till exempel på grund av att andra träd fälls mot dem, se figur 14.



Figur 14. Punktmoln producerat med SLAM innehåller på ett antal ställen punktmoln med svajande träd.

Vi kan konstatera att ansatsen att processa data för skannervarven var för sig och sedan lägga ihop informationen hanterar att vissa skannervarv förskjuts av trädens rörelser, vilket gör skattningen mer robust.

### Utvärdering av krökmätning med TLS

Hög noggrannhet vid mätningen av krök är viktigt för att aptera träden så optimalt som möjligt. I denna studie använde vi stillastående laser TLS som "facit" till mobila utrustningar, men ett antal träd skickades även för CT-skanning hos LTU i Skellefteå. Utvärderingen av båghöjd mätt med TLS mot båghöjd mätt med CT-skanner omfattade

inte många stockar men gav följande resultat för beräkning av båghöjd för tillredda stockar (tabell 1).

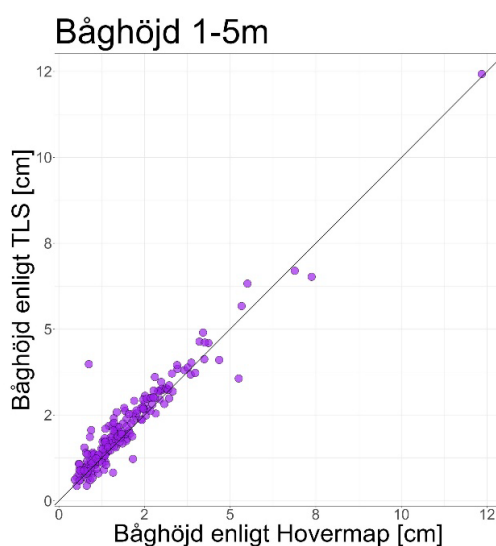
Tabell 1. Utvärderingsresultat för båghöjd mätt med TLS utvärderat mot CT-skanning av 10 träd. Stock i ordningen indikerar vilket läge i stammen stockarna som utvärderats har, första stock närmast marken.

Stock i ordningen	Bias (cm)	RMSE (cm)	Medelvärde CT (cm)
1	0,2	0,7	4,0
2	-0,4	0,8	1,5
3	-0,1	0,8	1,6
4	-1,0	1,5	1,1

Resultaten står sig väl mot CT-data generellt. TLS mäter bra på de nedre stockarna, och endast fyra träd hade 4:de stockar i timmerdimension. Notera att alla stockar inte var identiskt långa, men de flesta var omkring fyra meter. Vissa skillnader mellan CT och TLS uppstår då skördarens matarvalsar slirar och fräser bort lite av stammen, vilket påverkar båghöjdsmått.

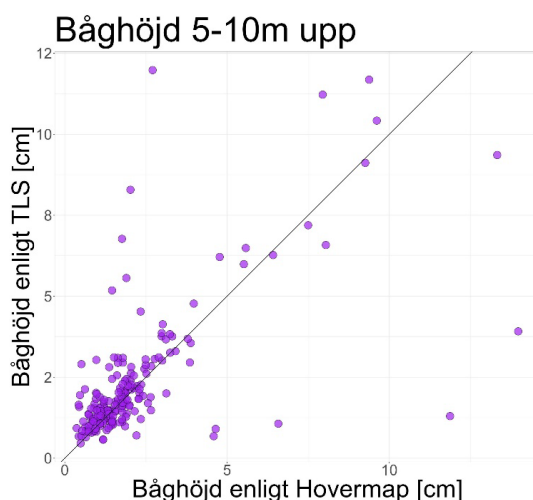
## Utvärdering av krökmätning med handhållen MLS

För handhållen MLS av typen Hovermap beräknades båghöjd för träd som även skannats med TLS. Tidigare beskrevs hur referensdatat från TLS har problem närmare marken. För att få en uppfattning om mätnoggrannheten hos det handhållna MLS systemet beräknades båghöjden från en meter upp i trädet till fem meter (figur 15). Resultatet blev då ett RMSE om 4,4 millimeter och en bias om 1,8 millimeter.



Figur 15. Båghöjd för TLS (y-axeln) jämfört med MLS av typen Hovermap (x-axeln) för höjd i träden mellan 1 och 5 meter.

Högre upp i trädet, motsvarande andra stocken, skiljde sig sensorernas mätvärden åt mer (figur 16). I detta fall beror det på att befintliga algoritmer inte kan hantera tvärkrökar och träd med dubbla toppar. Algoritmerna är helt enkelt inte anpassade för detta, även om det vore mycket värdefullt för apteringen att ta hänsyn även till dessa. RSME för detta utsnitt av stammarna var 17 millimeter och bias 1,6 millimeter, men notera att facit (TLS) inte heller fångar stamformen korrekt vilket gör att man endast kan konstatera att vidare utveckling behövs.



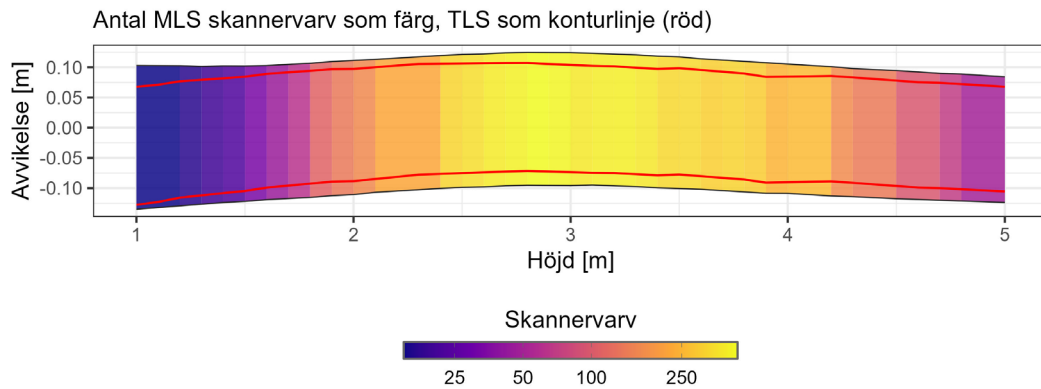
Figur 16. Båghöjd för TLS jämfört med MLS (Hovermap) för höjder i träden på 5 till 10 meter över marken. Tvärkrök och dubbeltopp orsakar stora avvikelser.

## Utvärdering av krökmätning med skördarmonterad MLS

Mätningen av stammar med laser kan delas upp i viktiga delar, i första hand om en viss del av stammen detekterats och därefter hur väl stammens form mäts. Vi dyker först ned i hur ofta stammen detekteras och vad som påverkar om stamdelen detekteras, därefter kommer ett avsnitt om hur väl stammens form mäts.

### Detektion av stamdel

Mätningen visade sig detektera stammen i flest skannerrotationer kring tre meter över mark, för att avta över fem meter. Även närmare marken verkar stammen vara svårare att urskilja. I figur 17 visas ett exempel på ett utsnitt ur en stam, där antalet gånger skannern detekterat en del av stammen från MLS och profilen på stamdelen lagts över stamprofil som mätts med TLS. Detektionsgraden avtar betydligt över cirka sju meter. Mönstret för hur ofta vi detekterar stammen skiljde sig åt mellan skannern med smal öppningsvinkel och hög öppningsvinkel. Den med hög öppningsvinkel har i grunden ett glesare punktmoln då samma antal punkter sprids ut över ett större område som skannern tittar över i vertikal led. Antalet detekterade stamdelen är som högst cirka tre meter över marken, vilket är ungefär samma höjd som där skannern sitter monterad på maskinen.



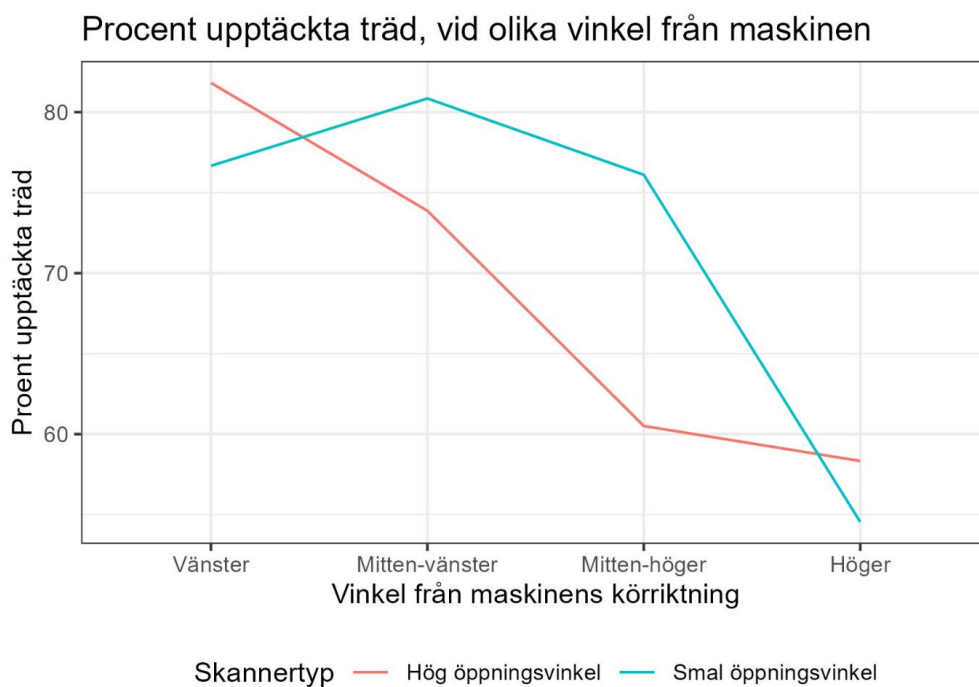
Figur 17. En stam där färgen representerar hur ofta stamdelen detekterats med MLS, gult är oftare. Stamdelens profil som erhållits från MLS mätvärdena jämförs med den krökning som erhöles från TLS (i rött).

Detektionen av stammar påverkades även av vilken sida som maskinen trädet står på, i förhållande till maskinens körriktning. På en Komastu skördare sitter kranen till höger och skannern var monterad till vänster på hytten (se figur 18). Skannern och kranen roterar med hytten när maskinen arbetar och avverkar träd i olika riktningar från maskinen, vilket gör att träd även till höger syns då kranen är riktad långt åt höger, men sektorn skymms ändå oftare än sektorn till vänster om maskinen. I våra algoritmer har vi tagit bort laserpunkter till höger om kranen för att ta bort laserpunkter på träd som hamnat på träd under upparbetning, som faller eller apteras. Det gör att träd till vänster skymms betydligt mer sällan, och fler mätningar erhålls.



Figur 18. Antal skannervarv där stam detekterats vid 3 meter över marken (medeltal), fördelat över olika riktning från maskinens körriktning och skannertyp. Mitten är rakt fram, kranen sitter till höger, medan skannern sitter monterad på hyttens tak till vänster.

Vi hade 288 träd inmätta med TLS med diameter i brösthöjd över åtta cm och algoritmerna hittade 202 träd inom en meter från dessa med hjälp av MLS. Om två träd länkats till samma TLS träd, vilket sker till exempel då samma träd skannats från två stråk, har det med flest skannervarv valts. Det motsvarar en detektionsandel på 74 procent. Andelen detekterade träd varierade med vinkeln från maskinen, med färre träd som upptäcks till höger där kranen skymmer (figur 19). Vänster-bakåt respektive Höger-bakåt från maskinens riktning har mycket få träd avverkats och sådana träd har exkluderats från analysen

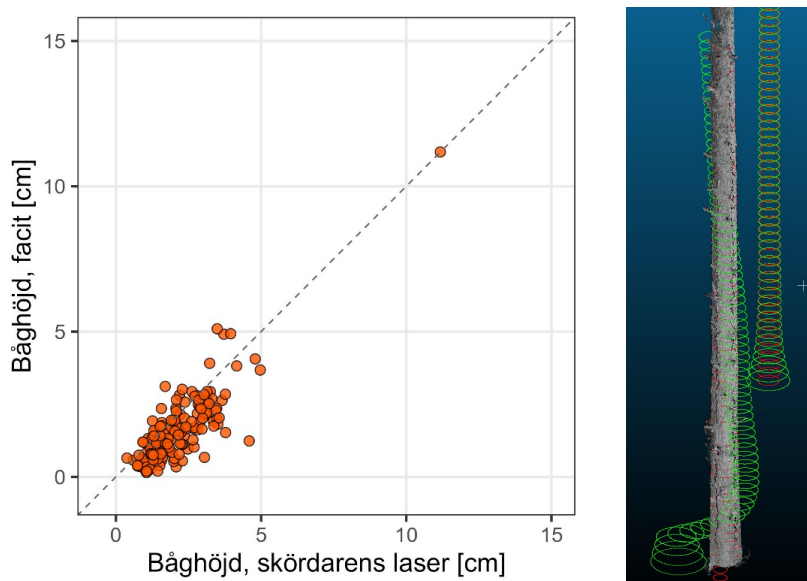


Figur 19. Andel upptäckta träd med DBH högre än 15 cm vid olika vinkel från maskinens körriktning. Till vänster skymmer inte kranen, vilket tycks leda till att fler träd upptäcks. Längst till höger respektive vänster avverkas få träd vilket gör siffrorna mindre tillförlitliga, och dessa har exkluderats i denna graf.

### Utvärdering av krökmätning

Mätning av båghöjd med MLS monterad på skördare beräknades för olika höjdlägen i stammarna som fasta tänkta stocklängder i stammarna. Fokus ligger på första stocken i trädet där det högsta värdet finns. Med ledning av figur 17, som visar hur väl stammen detekteras i olika lägen framgår att det uppstår problem nära marken. Krökmätningen beräknades från fem ned till 0,5 meter över mark med relativt brusiga resultat. Om beräkningen fokuserades till den del som detekterades mer frekvent, mellan en och fem meter upp i träden, blev resultaten mycket tillförlitligare. Delen av träden över 1 meter detekterades betydligt oftare och tycks mätas betydligt bättre.

Figur 20 visar båghöjd mätt med MLS jämfört med TLS (facit) för alla träd som detekterats i utvärderingsdata. Skillnaden mellan de olika skannermodellerna (hög respektive låg öppningsvinkel) var liten. En outlier togs bort ur figur 20, detta träd har råkat skannas under tiden trädet avverkas och faller mot marken (till höger i figur 20). Detta indikerar att algoritmer för att upptäcka fallande träd behöver utvecklas vidare.



Figur 20. Båghöjd beräknad för MLS (x-axeln) jämfört med båghöjd beräknad från TLS (y-axeln). Resultaten visas för både skanner med hög och smal öppningsvinkel. En större outlier där trädet skannats samtidigt som det faller under avverkningen har tagits bort (till höger, stamform från MLS i grönt).

Utvärdering i siffror visas i tabell 2. Bias, systematisk avvikelse, har beräknats så att en negativ bias betyder en överskattning. Både RMSE och bias anges här i millimeter, och anges för de olika skannermodellerna för sig, samt med och utan en stor outlier som tidigare nämnts.

Tabell 2. Utvärderingssiffror för de två skannertyperna i testet, för mätning av båghöjd mellan 1 och 5 meter från marken. Utvärderat mot TLS. Inom parentes anges värden utan en stor outlier. Utan outlier är skillnaden mellan smal och hög öppningsvinkel liten

Skanner	Rmse [mm]	Bias [mm]	Medel båghöjd [mm]
<b>Smal öppningsvinkel</b>	29 (8,5)	-7,3 (-4,7)	17,6
<b>Hög öppningsvinkel</b>	9,1	-5,7	17,3

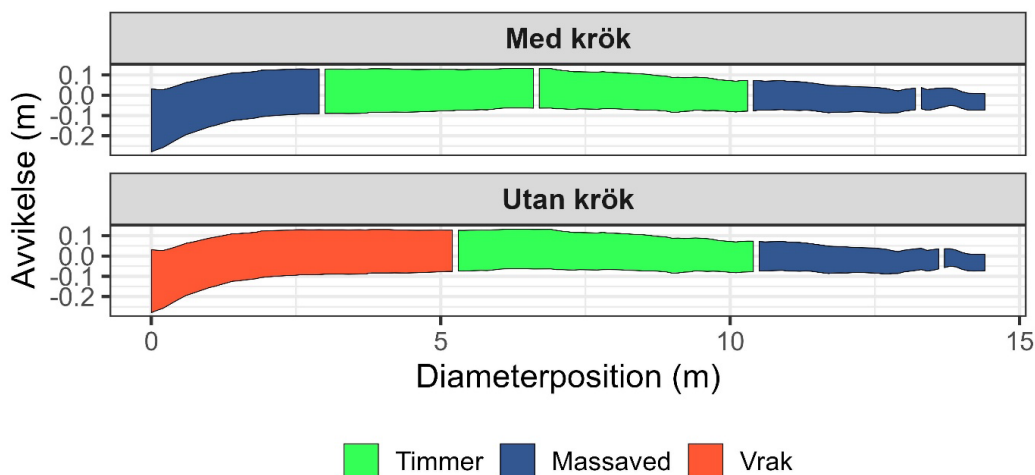
Medelvärdet av båghöjden för alla träd var dryga 17 millimeter, vilket får betraktas som att medelträdet är rakt i första stocken. Det kommer ofta vara fallet eftersom de flesta träd inte har krök som är nära att orsaka nedklassning till vrak.

### Apteringssimuleringar med hänsyn till krök

Simuleringarna visar att en apteringsalgorithm som tar hänsyn till stammens krökning genererar ett högre beräknat värde för krokiga träd jämfört med en standardapting. I en traditionell aptering kapas ofta stockar som senare måste klassas som vrak (och prissätts därefter), vilket drar ner det totala värdet.

Ett tydligt exempel på detta visas i figur 21. Trädet i exemplet apterades först på traditionellt vis utan hänsyn till krök, vilket resulterade i att den krokiga rotstocken vrakades och endast en timmerstock kunde utvinnas (totalt värde: 112,8 kr). När apteringslösningen i stället integrerade mätvärdena för krök, kapades medvetet en

kortare massavedsstock ut över stammens krokigaste del. Detta möjliggjorde ett uttag av två raka timmerstockar högre upp på stammen. Genom denna krökanpassade aptering ökade timmerandelen och trädets totala värde steg till 156,5 kr. Vinsten med att aptera med hänsyn till krök varierar starkt mellan olika träd, där vinsten är störst då första stocken vrakas på grund av krök.



Figur 21. Profil av ett träd apterat med och utan hänsyn till krökar, med y-axeln i meter. Måttet på krök som använts vid apteringen är utbytesförlust. Värdet för detta träd var vid normal aptering 112,8 kr medan aptering med hänsyn till krök genererade värdet 156,5 kr. Timmerandelen ökar vid aptering inkluderande krökberäkning.

Simuleringarna belyste även att valet av virkesmättningsregelverk påverkar utfallet. Det äldre regelverket VMR 99 (där båghöjd i procent av stockens längd används) är mer tillåtande och genererar färre vrak. Det nyare regelverket VMR 07 som baseras på utbytesförlust (Biometria 2025) är strängare och resulterar i fler vrakade stockar. Beräkningshastigheten var betydligt högre för båghöjds måttet jämfört med utbytesförlust, dessutom bedöms beräkningen av utbytesförlust vara mer känslig för mätosäkerhet.

En praktisk begränsning vid användning av en laserskanner är sensors förmåga att upptäcka stammen uppåt i trädkronan. Ofta syns inte hela stammen ända upp till den sista potentiella timmerstocken, vilket skapar utmaningar i apteringssimuleringen eftersom krökmått saknas för dessa sektioner. Detta gäller både TLS och MLS. Den nuvarande lösningen är en hybridmodell: de stockar som inte täcks fullt ut av lasermätningen hanteras som vid en standardaptering, det vill säga att de apteras enbart baserat på skördaraggregatets mätning av diameter och längd.

## Identifiering av lyror med kamera

Resultaten av arbetet med att identifiera lyror med hjälp av bilder visade att metoden har potential. Detta trots att ett mycket litet träningsdatamaterial använts. Ska metoden användas vid skörd med kamera monterad på skördaren behöver ett mycket större träningsdata samlas, och då företrädesvis med data som kommer från samma kamera som sitter på skördaren, och med samma avstånd till träden. Mobilbilderna som modellen tränats på visar lyror på bilder tagna från lägre höjd över marken och närmare träden. Utförligare resultat beskrivs i bilaga 1.

## Diskussion

Resultaten visar att terrester laserskanning (TLS) generellt ger en god representation av stammarnas krökning. Samtidigt framträder tydliga begränsningar, särskilt i de övre delarna av kronan där grova grenar och skymd sikt försämrar datakvaliteten. Även i den nedre delen av stammen uppstod i vissa fall avvikelser, vilka dock i stor utsträckning kunde korrigeras genom efterbearbetning (se metodavsnitt). En viktig begränsning i både TLS- och MLS-baserade analyser är att de algoritmer som använts inte kan hantera komplexa stamformer såsom dubbeltopp och tvärkrök (Olofson & Holmgren, 2016), vilket orsakar problem. Ett arbete startades därför inom ett annat projekt för att skapa metoder att automatiskt identifiera tvärkrök, vilket resulterat i en artikel (de Paula Pires m.fl., 2026).

De störningar som uppstår när träd fällt samtidigt som de skannas med MLS monterad på skördaren visade sig endast i begränsad omfattning påverka skattningen av stamform. De utvecklade algoritmerna uppvisade en relativ robusthet mot denna typ av brus, vilket är ett positivt resultat. Att den utvecklade metoden använder enskilda rotationer hos skannern var för sig är troligen en framgångsfaktor.

Två skanners testades i projektet, med huvudskillnaden att den ena kan skanna både högre upp och längre ned från där den sitter monterad. Det ökade synfältet medför fördelar: att "se högre upp i träden" kan vara värdefullt genom att virkesfel för fler stockar i stammen kan detekteras. Dock kommer denna modell samtidigt med en nackdel, eftersom laserstrålarna från denna skanner har högre divergens. Det innebär att de breder ut sig mer när de färdas genom luften så att när de träffar ett objekt täcker de en större area, så kallade footprint. Större footprint leder till att detaljer förloras och att mätningen ser mer suddig ut.

I denna studie exkluderades den nedre delen av stammen, under en meter över mark, från analyserna. Detta utgör en betydande begränsning, eftersom första stocken i trädet oftast har störst ekonomiskt värde. För att möjliggöra tillförlitliga mätningar i denna zon krävs vidare algoritmutveckling av både TLS- och MLS-system. Som referens, i stället för TLS, kan möjligen mer precisa metoder såsom CT-skanning användas i framtida studier. Även detektionen av stammen högre upp i träden behöver förbättras, många träd i utvärderingsmaterialet togs bort då översta delen av första stocken inte detekterats. Detta kan troligen förbättras genom bättre algoritmer, men även genom inställningar i laserskannern. I de tester som genomfördes registrerade skannern endast en laserpunkt per utsänt skott, medan laserstrålen ofta fortsätter och det är möjligt att detektera fler mätpunkter. Detta skulle kunna underlätta att upptäcka stammen då den skymms bakom grenar.

Frekvensen av träd med krök i materialet var relativt låg, vilket begränsar möjligheten att fullt ut utvärdera metodernas prestanda. Virkesfelen på försöksområdet dominerades av tvärkrök och dubbeltopp snarare än långkrök. Framtida studier bör därför inkludera större och mer varierade dataset för att bättre kunna karakterisera mätprecisionen i bestånd där krök på träden är mer vanligt förekommande, och inkludera metoder för att detektera och anpassa apteringen till tvärkrök och dubbeltopp.

Tre olika mått på krök implementerades: båghöjd, bågradie och utbytesförlust. Utbytesförlust utgör det mest komplexa måttet, där en rak sågcylander optimeras inom stamformen. Tidigare studier har visat att mer komplexa mått tenderar att ge lägre repeterbarhet i industriella tillämpningar (Edlund & Warensjö, 2005). Detta bekräftas även i denna studie, där beräkningen av utbytesförlust visade sig vara avsevärt mer

resurskrävande än de enklare måtten. För att möjliggöra användning i realtidssystem, exempelvis i skördare, krävs antingen betydande optimering av beräkningstiden eller användning av enklare krökmått. Produktionshastigheten är avgörande för skördarens lönsamhet, vilket begränsar möjligheten att implementera beräkningsintensiva metoder.

En central observation är att alla krökmått inte är lika lämpliga för realtidsapplikationer i skördare. Utbytesförlust kräver detaljerad information om stamdiameter, vilken blir tillgänglig först när aggregatet har gripit och börjat mata trädet. Lasersystemen som används har för dålig precision för mätning av diameter för apteringsändamål, även om det finns gott om studier för hur man skattar diameter på träd med liknande system (exv. Faitli m.fl., 2024). Detta innebär att en skattad utbytesförlust kan komma först sent i apteringsprocessen. I kombination med den höga beräkningskostnaden medför detta att användning av utbytesförlust riskerar att sänka produktionstakten.

Den ekonomiska potentialen av krök-anpassad aptering beror huvudsakligen på två faktorer:

- förekomsten av krokiga träd i beståndet
- systemets förmåga att mäta och klassificera krök korrekt.

Det senare, som handlar om mätprecisionen, påverkar det ekonomiska utfallet på minst tre sätt:

- Korrekt identifierad krök ger ett ökat värde genom förbättrad aptering.
- Underskattad krök leder till att krokigt virke felaktigt klassas som timmer och senare vrakas.
- Överskattad krök innebär att en i grunden rak stock nedklassas till massaved, vilket minskar värdet avsevärt.

För att tekniken ska bli ekonomiskt försvarbar måste systemets mätprecision vara tillräckligt hög för att vinsterna från undvikta vrak med god marginal ska täcka förlusterna från felklassificeringar. Kvantifiering av denna balans kräver dock studier i större skala.

Nästa steg i utvecklingen bör vara att skala upp testerna, förbättra behandling av punktmoln, och utvärdera ekonomiska effekter i större skala. Nya sensorer blir tillgängliga och ett arbete med att hitta bäst lämpade laserskanner bör genomföras. De skannermodeller och inställningar som testats ger problem högre upp i kronan. Även sensorers placering på maskinen bör utvärderas, vi ser i resultaten att sikten begränsas av maskinens kran och att hitta andra placeringar av sensorn kan bidra till bättre mätning och att fler träd upptäcks.

Detta projekt har fokuserat på långa svepande krökar. Tvärkrök har behandlats i viss mån (de Paula Pires m.fl., 2026) samt lyra, men referensgruppen till projektet har uttryckt behovet av fler kvalitetsegenskaper så som sprötkvist. Framtida utveckling kan utvidga arbetet, och forskning pågår i världen (exempelvis Kankare m.fl., 2014). Man bör vara medveten om att sprötkvist kräver att mindre objekt än hela stammar identifieras, vilket sannolikt ställer högre krav på laserskannerns kvalitet, upplösning och stråldivergens.

# Slutsatser

Projektet har visat att mätning av krök med laserskanner är tekniskt möjlig. Resultaten från både handhållen MLS och skördarmonterad MLS visar att krökmått som båghöjd kan mätas med relativt hög noggrannhet. Sammantaget pekar resultaten mot att tekniken har potential att öka värdet av svensk skogsråvara och bidra till en mer hållbar och konkurrenskraftig träindustri. Dock har förenklingar gjorts, som att bortse från stammens form under en meter över mark.

Apteringssimuleringarna indikerar att en metod som tar hänsyn till krök kan öka timmerandelen och minska vrak, vilket stärker skogsbaserade värdekedjan. Noggrannheten är avgörande då felaktig klassning av stockar kan snabbt äta upp vinsterna med förbättrad aptering. Därför krävs fortsatt utveckling av algoritmer för att hantera problem som SLAM-fel, rörelser i träden och komplexa former som tvärkrök, dubbeltopp och stamdel nära marken.

För att nå industriell nytta måste lösningen integreras i skördarnas apteringsdatorer utan att sänka produktionstakten. Hårdvaruval, särskilt laserskannerns stråldivergens, och algoritmer för robust stamdetektion är centrala framgångsfaktorer.

# Referenser

- Biometria 2025. Kvalitetsbestämning av sågtimmer av tall och gran – Nationella bestämmelser för virkesmätning. Biometria.
- Björklund, L. & Erksam, B. 2019. Beaktande av virkesfel vid kvalitetsbestämning av sågtimmer. Biometria.
- Bomark, P. 2024. Automatisk vederlagsmätning av timmer med AI/visionteknik: Förstudie. Slutrapport. TräCentrum Norr.
- Edlund, J. & Warensjö, M. 2005. Repeatability in automatic sorting of curved Norway spruce saw logs. *Silva Fennica*, 39(2), 265–275.
- Emesent 2025. Hovermap ST-X. Hämtad från <https://emesent.com/emesent-product/hovermap-series/> [Tillgänglig: 2025-12-05].
- Faitli, T.; Hyyppä, E.; Hyyti, H.; Hakala, T.; Kaartinen, H.; Kukko, A.; Muhojoki, J.; Hyyppä, J. 2024. Integration of a Mobile Laser Scanning System with a Forest Harvester for Accurate Localization and Tree Stem Measurements. *Remote Sens.* 2024, 16, 3292. <https://doi.org/10.3390/rs16173292>
- Fan, C., Lan, Y. & Zhang, F. 2025. Tree Trunk Curvature Extraction Based on Terrestrial Laser Scanning Point Clouds. *Forests*, 16(5), 797. <https://doi.org/10.3390/f16050797>
- Fischler, M. A., & Bolles, R. C. 1981. *Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography*. *Communications of the ACM Workshop on Image Understanding*, 24(6), 381–395.
- Hannrup, B. & Möller J.J. 2022. Positionering av enskilda träd vid avverkning med skördare. Arbetsrapport Skogforsk. 18 s.

- Kankare, V., Joensuu, M., Vauhkonen, J., Holopainen, M., Tanhuanpää, T., Vastaranta, M., Hyypä, J., Hyypä, H., Alho, P., Rikala, J., Sipi, M. 2014. Estimation of the Timber Quality of Scots Pine with Terrestrial Laser Scanning, *Forests*, 5, 1879–1895, 2014. <https://doi.org/10.3390/f5081879>
- Lalonde, J.-F., Vandapel, N., Huber, D. & Hebert, M. 2006. Natural terrain classification using three-dimensional lidar data for ground robot mobility. *Journal of Field Robotics*, 23, 839–861.
- Leica Geosystems. Inget årtal. *Leica RTC360 3D Reality Capture Solution*. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland.
- Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A. & Guan, F. 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 63–77.
- Nordmark, U. 2005. Value recovery and production control in bucking, log sorting, and log breakdown. *Forest Products Journal*, 55(6), 73–79.
- Olofsson, K. & Holmgren, J. 2016. Single Tree Stem Profile Detection Using Terrestrial Laser Scanner Data, Flatness Saliency Features and Curvature Properties. *Forests*, 7, 207.
- de Paula Pires, R., Olofsson, K., Persson, H. J., Lindberg, E. & Holmgren, J. 2022. Individual tree detection and estimation of stem attributes with mobile laser scanning along boreal forest roads. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 187, 211–224.
- de Paula Pires, R., Lindgren, N., Persson, H. J., Holmgren, J. 2026. Stem crook detection in terrestrial laser scanning data using semi-empirical simulations, *Forestry: An International Journal of Forest Research*, Volume 99, Issue 3, July 2026, cpag026, <https://doi.org/10.1093/forestry/cpag026>.
- Pohjala, J., Kankare, V., Hyypä, J., Kärhä, K. 2025. Effects of a mobile LiDAR-based thinning density assistant (TDA) system on harvester operator performance. *Eur J Forest Res* 144, 1301–1322. <https://doi.org/10.1007/s10342-025-01808-y>.
- Prendes, C., Canga, E., Ordoñez, C., Majada, J., Acuna, M. & Cabo, C. 2022. Automatic Assessment of Individual Stem Shape Parameters in Forest Stands from TLS Point Clouds: Application in *Pinus pinaster*. *Forests*, 13, 431. <https://doi.org/10.3390/f13030431>.
- Prendes, C., Acuna, M., Canga, E., Ordoñez, C. & Cabo, C. 2023. Optimal bucking of stems from terrestrial laser scanning data to maximize forest value. *Scandinavian Journal of Forest Research*. <https://doi.org/10.1080/02827581.2023.2215544>.
- Pyrälä, J., Kankare, V., Liang, X., Saarinen, N., Rikala, J., Kivinen, V.-P., Sipi, M., Holopainen, M., Hyypä, J. & Vastaranta, M. 2019. Assessing log geometry and wood quality in standing timber using terrestrial laser-scanning point clouds. *Forestry*, 92(2), 177–187.
- Raunonen, P., Kaasalainen, M., Åkerblom, M., Kaasalainen, S., Kaartinen, H., Vastaranta, M., Holopainen, M., Disney, M. & Lewis, P. 2013. Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. *Remote Sensing*, 5, 491–520.

- Rummukainen, H., Makkonen, M. & Uusitalo, J. 2021. Economic value of optical and X-ray CT scanning in bucking of Scots pine. *Wood Material Science & Engineering*, 16(3), 178–187. <https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1672787>.
- Sagar, A., Kärhä, K., Einola, K., & Koivusalo, A. 2024. Assessing the Potential of Onboard LiDAR-Based Application to Detect the Quality of Tree Stems in Cut-to-Length (CTL) Harvesting Operations. *Forests*, 15(5), 818. <https://doi.org/10.3390/f15050818>
- Sagar, A., Karha, K., Jarvelin, K. & Ghabcheloo, R. 2025. Evaluation of Simulation Framework for Detecting the Quality of Forest Tree Stems. *Forests*, 16, 1023. <https://doi.org/10.3390/f16061023>.
- Sagar, A., Pohjala, J., Muhojoki, J., Dhital, A., Kaartinen, H., Kärhä, K., Järvelin, K., Ghabcheloo, R., Hyyppä, J., & Kankare, V. 2026. Utilising mobile laser scanning point clouds to assess harvesting quality in thinning stands. *\*Science of Remote Sensing*, 13\*, 100374. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2026.100374>.
- Schlager S. 2017. “Morpho and Rvcg - Shape Analysis in R.” In Zheng: G, Li S, Szekely G (eds.), *Statistical Shape and Deformation Analysis*, 217-256. Academic Press. ISBN 9780128104934.
- Thies, M., Pfeifer, N., Winterhalder, D. & Gorte, B. 2004. Three-dimensional reconstruction of stems for assessment of taper, sweep and lean based on laser scanning of standing trees. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6), 571–581.
- Virkesmättningsrådet 1999. Mättningsinstruktioner för rundvirkessortiment rekommenderade av Virkesmättningsrådet. Virkesmättningsrådet.
- Wang, C. Y., Bochkovskiy, A. & Liao, H. Y. M. 2023. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 7464–7475).

# Bilaga 1: AI-detektion av lyror i bilder

Vissa virkesfel utmärker sig med form på stammen, så som tvärkrök och långkrök, andra med utseende så som lyror. Med erfarenheter från projektet "Vederlagsmätning med AI/visionteknik" (Bomark, 2024) där bilder använts för att identifiera virkesfel undersökte vi om bilder kan användas för att identifiera virkesfel redan i skogen. Målsättningen är att kunna identifiera viktiga virkesfel innan trädet upparbetas till stockar, så att apteringen kan anpassas efter eventuella virkefel.

Resultaten i detta avsnitt är från en liten pilotstudie utförd inom projektet av RISE. Vi valde att fokusera testerna på lyror, då dessa utmärker sig främst i bilder snarare än mättekniken som används i övrigt i projektet det vill säga laserskanning. Lyor är ett virkesfel som ingår i nuvarande kvalitetsklassningssystem för talltimmer. Lyr är en ovanlig anledning till att tallstockar vrakas, men skattas som den vanligaste anledningen till diameternedsättning vid inmätning vid industri av Biometria (Björklund 2019).

## Insamling av tränings- och valideringsdata

Grundläggande för all form av användning av AI och datorseende är data för att träna AI-modeller (här detektionsmodeller) så att de uppnår ett önskat resultat. I vårt fall innebär det att vi behöver bilder och annoteringar på det vi vill att detektionsmodellen ska känna igen, och i vårt fall är detta typiskt bilder på olika träd i skogen med boxar ritade kring diverse skador, såsom lyror.

När väl detektionsmodellen tränats på träningsdata behöver man undersöka hur väl modellen betar sig under nya förutsättningar, dvs på data som den inte exponerats för under träningsfasen (det kan till exempel vara bilder från en annan skog, eller en annan del av skogen). Detta kallas validering, och för detta behövs liknande (men inte samma!) bilder och annoteringar, så att man kan få ett mått på hur väl modellen betar sig på sådan tidigare ej observerad data.

I nedanstående delkapitel skriver vi mer i detalj om de olika datatyper vi använt i detta delprojekt.

## Insamling av data med mobila enheter

Bilder togs i skogen på lyror, som sedan delades in i en grupp som användes för träning av ett AI för detektion och en annan grupp som användes för validering av AI modellen. Bilderna är tagna från marken av en person med mobiltelefoner och en platta, och kommer dels från försöksområdet Tribbladsberget som senare avverkades, dels från andra skogar.

- Mobil: Samsung S22+
- Mobil: Apple iPhone 12
- Platta: Samsung Galaxy TabActive3

Träden med lyror koordinatsattes med högprecisions GPS. Totalt samlades 61 bilder in med lyror på.

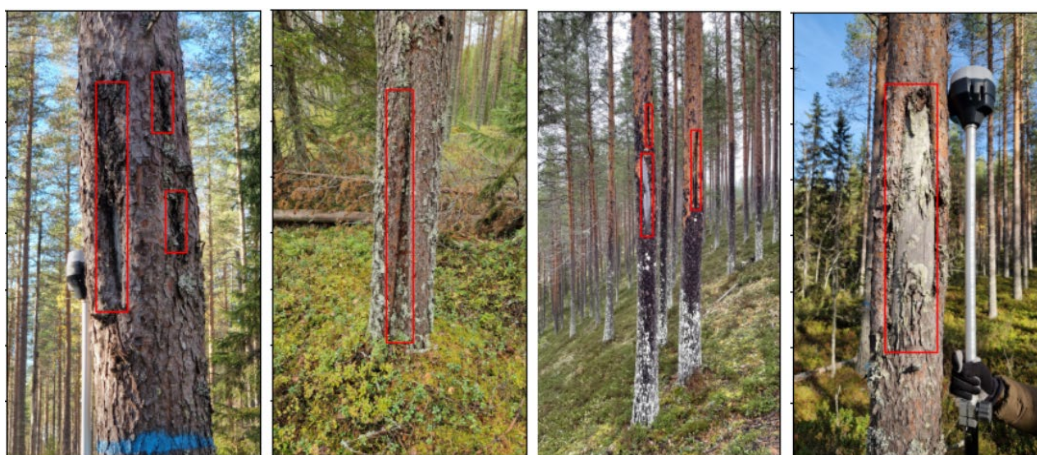
## Insamling av data med skördare

Under avverkningen samlades bilder in från en kamera monterad på skördaren. Bilderna samlades in med 10Hz under tiden skördaren arbetar, och är tagna med en digital RGB kamera kopplad till vårt lokala datorsystem för att sparas. Upplösningen på bilderna är 2880 x 1860 pixlar (~5.4Mpixlar). För att underlätta användningen av dessa bilder har suddiga bilder filtrerats bort baserat på om den ingående kontrasten i bilderna är för låg. Därefter har de kvarvarande bilderna kompenserats mot optisk distorsion introducerat från kamerans lens; horisontella och vertikala linjer som är raka i verkligheten böjer sig annars i bilden, vilket är möjligt att korrigera för. Slutligen valdes ett antal bilder ut från tidpunkter när träd med lyror var synliga, baserat på koordinatsatta träd med lyror.

## Beskrivning av slutgiltiga data för träning och validering

Bilderna tagna med mobil användes för att annotera, det vill säga manuellt identifiera lyror och markera dessa med en box. Den slutgiltiga datamängden består av 61 bilder, med totalt 88 annoteringar av "Lyra" (i snitt: 1.44 boxar per bild).

Vi delade in denna data i tränings- och valideringsdata. Träningsdata består av 49 bilder, med totalt 68 annoteringar av lyror. Valideringsdata består av 12 bilder, med totalt 20 annoteringar av lyror. Exempel på bilder med annoteringar (röda rektanglar som ringar in lyror) finns i figur 22 nedan.



Figur 22. Exempel på bilder och associerade annoteringar (röda rektanglar) för skadetypen "Lyra".

## Resultat baserat på ovan beskrivna data

Givet den ovan beskrivna datamängden (dvs tränings- respektive valideringsdata), så tränade vi objekt-detektionsmodellen "YOLOv7" på träningsdata (Wang, 2023). YOLO är en av de mest använda detektionsmetoderna idag. Modellen tar en bild som input, och förutspår sen var olika typer av objekt finns – i vårt fall lär den sig utifrån träningsdata att förutspå var "Lyra"-boxar finns i bilden. Modellen ger dessutom en uppskattning av sannolikheten (värde mellan 0 och 1) för att en given box innehåller lyra. När modellen sedan ska användas så sätter man manuellt en "sannolikhets-tröskel", där man antar att en box är en lyra om sannolikheten överstiger tröskeln (i detta projekt satt till 0,03, vilket visade sig fungera bäst empiriskt – det är för övrigt vanligt i litteraturen kring objekt-detektion att en så pass låg tröskel kan behövas).

Nedan, i figur 23, finns exempel på resultat på valideringsdata, dvs data som modellen inte alls sett under träningsfasen. I varje exempel så är övre raden annoteringar, medan undre raden visar modellens förutsägelser. Detta gör det enkelt att få en visuell överblick över hur modellen presterar på valideringsdata.



Figur 23. Annoteringar (övre raden) och prediktioner från AI-modellen YOLOv7 (undre raden). Vi ser att modellen förutsår alla sanna boxar, men i vissa fall förutsåps ytterligare, boxar i bilden varav några faktiskt är korrekta medan andra är inkorrekta. Till höger är resultatet dock riktigt bra.

Utöver ovanstående kvalitativa resultat, så visar de kvantitativa resultaten på ett mAP@0.5 på ca 0,75. Metriken förklaras i denna referens: <https://kili-technology.com/data-labeling/machine-learning/mean-average-precision-map-a-complete-guide>.

## Resultat med kamera monterad på skördare

Vi provade även att använda den modell som tränats på mobilbilder för att detektera lyror i bilder som samlats in från kameran monterad på skördare under avverkning.

Utmaningar uppstår när man applicerar en modell som tränats på en viss typ av bilder på annan data. I detta fall skiljer sig bilderna tagna från skördarens kamera på flera sätt: Bildvinkeln är högre upp från marken, träden är längre från kameran och kameran som sådan ger skillnader i bildkvalitet. När den data som man vill testa sin modell på skiljer

sig markant från den data som modellen tränats på brukar man i AI-litteratur referera till s.k. “domain generalization”, vilket är ett svårt och öppet problem rent generellt. Därmed är också förväntningen här att modellen kan ha svårt att få bra resultat i denna helt nya domän (dvs på bilder tagna från Komatsus skördare).

Kvalitativa exempel finns nedan i figur 24. Modellen gick att applicera, men slutsatsen blir att mer träningsdata måste samlas in för pålitliga prediktioner.



Figur 24. Kvalitativt exempel på detektioner på skördardata. Varje röd rektangel med en 1a markerar en förutspådd skada av typen “Lyra”.

## Framåtblick

Med tanke på det mycket begränsade träningsdata materialet fungerade modellen förvånansvärt bra för mobilbilderna. Träningsdatamängder som är tiofalt större är vanliga i AI-detektionssammanhang. Att detta lilla test fungerar så väl får ändå ses som en framgång för metoden, och att det är möjligt att träna en modell förutsatt att ett betydligt större data med annoterade lyror kan byggas upp.

Ska metoden kunna användas behöver vi i framtiden bygga en bildbank med betydligt mer annoterade träningsdata, även från kamera monterad på skördare. Om man samlar in data med mobiler bör man tänka på att ta bilder där trädet med lyran är en bit bort, mellan 7 och 20 meter eftersom det antagligen efterliknar hur det ser ut på skördaren. Även bilder där lyran inte är direkt riktad mot kameran behövs.