ARBETSRAPPORT 1126–2022

CT-skanning som verktyg för detektering av törskateangrepp på tall

En förstudie

Kari Hyll, Sheng Joevenller, Henrik Svennerstam, Maria Nordström, Olof Broman, Johan Oja, Dick Sandberg

CT-skannern vid Luleå tekniska universitet, med törskateskadade stockar i bakgrunden. Foto: Kari Hyll.

skogforsk

LULEÅ TEKNISKA UNIVERSITET

Innehåll

Förord **4**

Summary **5**

Sammanfattning **6**

Bakgrund **7**
Törskate 7

CT-skanning av stockar 8

Material och metod **10**
Provinsamling 10

Yttre karaktärisering 11

Inre karaktärisering 13

CT-skanning 13

Förprocessering 14

Mätning av vedens densitet 16

Mätning längdutbredning och skadetyp hos skadad ved 17

Resultat **20**
Detektion och intensitetsskillnader 20

Extern vs. intern skadeutbredning 21

Övriga observationer 22

Ingångspunkt 22

Radiella mönster 22

Perifera skadans utbredning i längdled 24

Vårved vs. sommarved 24

Flammig skadeprofil 25

Kompensatorisk tillväxt och asymmetri 26

Detektion av törskate-DNA i veden 26

Diskussion **28**
Materialval 28

Metodutveckling 28

Förståelse av törskatens natur 28

Slutsatser **31**

Referenser **32**

Appendix **34**
Foton, visuellt av mantelytor 34

Grunddata stamsår 37

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

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts 5 oktober 2022 av Maria Nordström, processledare. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef, granskat och godkänt publikationen för publicering den 9 november 2022.

Redaktör: Hanna Andtbacka, hanna.andtbacka@skogforsk.se
©Skogforsk 2022 ISSN 1404-305X

Förord

Denna studie har genomförts i samarbete mellan Skogforsk och avdelningen för Träteknik vid Luleå tekniska universitet (LTU Träteknik) i Skellefteå, där projektet ingått i det strategiska forskningsprogrammet CT WOOD. Projektet har kunnat genomföras tack vare ekonomiskt stöd från Gunnar Hedlunds Hedersfond.

Författarna vill särskilt tacka Stiftelsen Gunnar Hedlunds Hedersfond för deras finansiella bidrag till projektet, och Norra Skogs forskningsstiftelse för deras administrativa insats. Författarna vill också tacka José Couceiro och Lars Hansson på LTU Träteknik för deras stöd med bildbehandlingen.

Summary

Scots pine blister rust fungi (*Cronartium pini*) is expected to become an increasing problem for both forest owners and sawmills in the Nordic region, and there is great uncertainty about the economic consequences. There is also a lack of knowledge about the biology of Scots pine blister rust, as well as the tree's response and defence against ongoing infection. The tree is known to defend itself by enriching resin at the infected area, creating a damaged area of resin-wood. There is currently no reliable way to detect and assess the degree of damage in sawn timber, which leads to waste, as entire sawlogs are usually downgraded when parts or most of the timber could possibly be used.

The objectives of this preliminary study were to: (1) investigate whether X-ray computed tomography (CT scanning) can detect blister rust damage in pine timber, in order to optimise sawing and save the value of the sawn timber; (2) to compare the 3-dimensional CT image description of the fungal attack with how the damage looks on the outside, to enable recommendations for external assessment of the damage attack, for example during felling; and (3) to assess the possibilities for describing the course of the damage and the tree's defence against the fungal attack.

Eight rust-infested and two non-infested trees (Scots pine) were collected from a thinning stand and a mature stand outside Bjurselet, Norsjö municipality in Västerbotten. The trees were felled in January 2022. After felling, the stems were visually inspected, and infected parts were marked with paint on the mantle surface. The stems were cut into logs of suitable length for transport and scanning. Cuts through fungal-infested regions were avoided. The wood was transported to LTU's Wood Science and Engineering facility in Skellefteå for CT scanning.

The CT scan of the sample trees showed that damage due to pine blister rust can be detected in a way that enables further development of an industrial detection method and optimisation of the wood decomposition. However, one difficulty discovered was that fungal-infested sapwood areas have similar image intensity as non-infested heartwood. It could also be established that the distribution of damage inside the volume of the stem is greater than can be detected visually on the mantle, especially in the longitudinal direction.

In this study the temporal development of the infection from the time of infestation to the time of CT scanning could not be analysed. However, annual rings could be distinguished in both damaged and undamaged wood, making it possible to monitor the evolution of the damage from year to year. DNA analysis detected the presence of blister rust fungus in the wood, both in and outside resin-rich areas. The highest amount of fungus-specific DNA was measured outside the resin-rich area in the outer parts of the sapwood.

Sammanfattning

Törskateangrepp på tall förväntas bli ett allt större problem för både skogsägare och sågverk i Norden. Det finns samtidigt stora kunskapsluckor om törskate generellt och om hur man ska hantera angripet timmer för att minska de ekonomiska konsekvenserna av angreppen. Det finns exempelvis inget tillförlitligt sätt att detektera och bedöma skadegraden hos sågtimmer, vilket leder till ökat spill vid sågning då hela stockar oftast nedklassas där man eventuellt skulle kunna använda delar eller merparten av timret. Osäkerheten om de ekonomiska konsekvenserna är stor. Det saknas även kunskaper kring törskatesvampens biologi, samt trädets respons och försvar mot pågående infektion.

Syftet med denna förstudie var att (1) undersöka om röntgenbaserad datortomografi (CT-skanning) kan detektera törskateangrepp hos talltimmer, för att därmed kunna optimera sågningen och "rädda" det sågade virkets värde, (2) att jämföra CT-bildernas 3-dimensionella beskrivning av törskateangreppet med hur skadorna ser på utsidan, för att kunna ta fram rekommendationer för yttre bedömning av skadeangrepp till exempel vid avverkning, samt (3) att bedöma möjligheterna att beskriva skadeförloppet och trädets försvar mot svampangreppet.

Åtta törskateangripna och två icke angripna träd (tall) insamlades från ett gallringsbestånd och ett slutavverkningsbestånd utanför Bjurselet, Norsjö kommun i Västerbotten. Träden avverkades under januari månad 2022. Efter fällningen gjordes en okulär besiktning av trädstammarna, där de törskateskadade delarna märktes med färg på mantelytan. Stammarna apterades i lämpliga längder för transport, samtidigt som det undveks att utföra apteringen i de törskateskadade områdena. Virket transporterades till LTU Träteknik i Skellefteå för CT-skanning.

CT-skanningen av provträden visade att törskate kan detekteras på ett sätt som möjliggör fortsatt utveckling av en industriell detektering av törskate och optimering av timrets sönderdelning. En svårighet som dock uppdagades var att törskateangripna områden i splintveden har snarlika bildanalystekniska egenskaper som icke angripen kärnved. Det kunde även konstateras att törskatens utbredning i stammens volym är större än vad som kan detekteras okulärt på stammens mantelyta, framför allt i stammens längdriktning. I de preliminära analyser som ligger till grund för denna rapport är det dock inte möjligt att urskilja svampens tidsmässiga utbredning från angrepp till tidpunkten då CT-skanningen genomfördes. Däremot kan det konstateras att årsringar går att urskilja både i skadad och oskadad ved vilket ger möjligheten att från år till år följa skadeutvecklingen. DNA-analys detekterade förekomst av törskatesvamp i veden, både i och utanför kådrika områden. Den högsta mängden av törskatespecifikt DNA uppmättes utanför det kådrika området i splintvedens yttre delar.

Sammanfattningsvis visar studien att de tekniska förutsättningarna för att detektera de inre skadorna av törskate med CT-skanning är goda och att utveckling av algoritmer för bildbehandling är ett viktigt nästa steg för automatiserad detektion av törskate i tall.

Bakgrund

Törskate

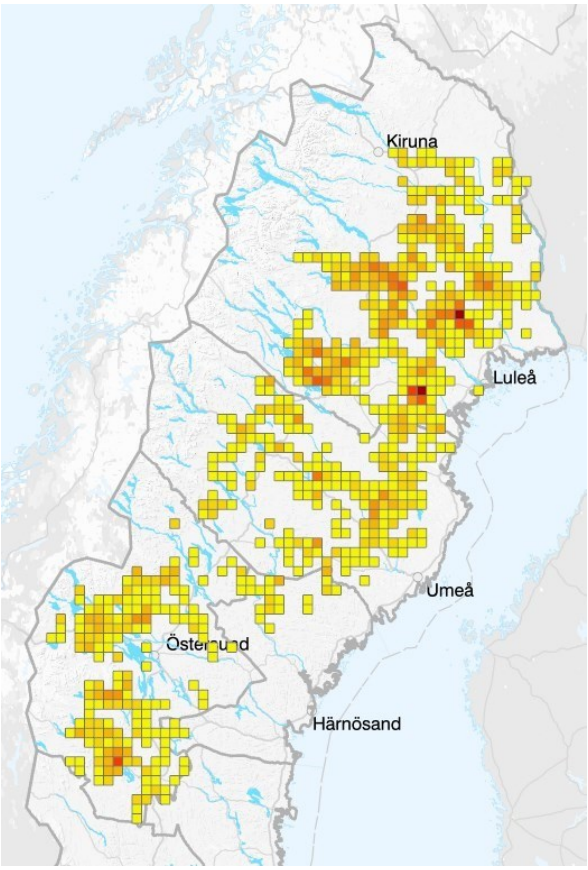
Törskate (*Cronartium pini*) är en rostsvamp som kan infektera flera tallarter, inklusive den i Norden vanligaste förekommande tallen (*Pinus sylvestris*), Montereytall (*P. radiata*) och Aleppotall (*P. halepensis*) (Kim m.fl. 2022; Samils & Stenlid 2022). Två undertyper av törskate har identifierats i nordiska skogar; en värdväxlande form som är beroende av ytterligare en art för att fullborda sin livscykel och en kronal form som angriper trädets övre del. Den främsta värdväxten för törskate i Sverige anses vara kovall (*Melampyrum* spp.) även om arter som pion och tulkört även kan agera mellanvärd (Metla 2007; Adolfsson 2022). De olika törskatevarianterna förekommer generellt i skilda geografier men har även påträffats i samma bestånd.

Infektionen kommer in i trädet genom framför allt årsbarr (under året nya barr), men det är möjligt att infektering även kan ske via färska skott eller skador (Kim m.fl. 2022). Svampen tar sig till innerbarken där den nyttjar trädets vatten och näringsämnen. Tallen försvarar sig genom att berika intilliggande ved med extraktivämnen (kåda), vilket resulterar i så kallade fetved. Det är i nuläget oklart om svampen stannar i innerbarken eller även förekommer i fetveden. Kådanrikningsprocessen stoppar transporten av vatten och näringsämnen i den infekterade delen av trädet, vilket stoppar tillväxten i det angränsande kambiet. Infektionen sprider sig runt trädet på liknande sätt som bältrosinfektion hos människor. Om svampinfektionen når runt trädets periferi dör veden ovanför det skadade området. Det finns stora kunskapsluckor kring hur denna process går till och vad det är som gör att vissa tallar klarar sig bättre än andra.

En del av de överlevande träden når dimensioner som är lämpliga för sågning, samtidigt som de behåller skadan (fetveden) som skapats på grund av infektionen. Infektionen kan synas på utsidan av trädet som orange fläckar på stammen i perioder då svampen är sporbildande, eller som svarta zoner, hartsläckage eller lossad bark (se foton i Appendix). Det är dock möjligt för trädet att övervalla skadan, vilket kan göra den i stort sett osynlig från utsidan. Träd som påverkas av den kronala varianten har ofta en torr, död topp (törgadd). Infekterade träd kan också utveckla betydande asymmetri i stammens tvärsnitt.

Fetveden har egenskaper som är oönskade för användning i de flesta furuprodukter (Kaitera m.fl. 1994). Timmer med synlig skada från törskate (hög andel ej levande stamdel) får inte bli sågtimmer eller massaved utan ska nedklassas till bränsleved. Uppskattningar har visat betydande ekonomiska effekter av törskate, med sågutbytesförluster mellan 22 procent och 34 procent, och upp till 18 procent förlust i marknadsvärde för det sågade virket (Kaitera m.fl. 1994).

De två i Sverige hårdast drabbade regionerna, Norrbotten och Västerbotten, har cirka 150,000 ha törskateinfekterad skog (Stenlid 2021). Andra regioner, exempelvis norra Finland, är också påverkade, men i mindre utsträckning (JMMI 2012; Eriksson m.fl. 2016) (Figur 1). Det befaras även att törskateproblematiken i Sverige är på uppgång och spridningen sker mer söderut (JMMI 2012) även om helt säkra data saknas (Gramner & Jernberg 2022). En möjlig förklaring till en eventuell ökning tros vara kopplad till klimatet, där i synnerhet varma och fuktiga höstar antas gynna sporbildning och spridning.



Figur 1. Satellitbaserad intensitetskarta över så kallad multiskadad ungskog i norra Sverige. Den multiskadade ungskogen är drabbad av en eller flera skadegörare, där viltbete och törskate är de dominerande skadeorsakerna (Gramner & Jernberg 2022). Rödare nyans betyder högre skadenivå.

CT-skanning av stockar

Röntgenskanning av stockar används av många sågverk till att fånga den inre strukturen, främst kvistar, för att sortera virket och optimera sågprocessen. Röntgenskanning ger en densitetskarta över stocken, vilket möjliggör detektering av strukturer och defekter som har en annan densitet jämfört med normalt trä. Detta görs mestadels med så kallade diskreta röntgenmätramar, som avbildar stockarna i en eller två riktningar (Hyll & Nordström 2021).

3D-röntgenskanning, även kallad datortomografi (CT-skanning), är ett kraftfullare verktyg för att avbilda stockens inre med dess högre rumsliga upplösning. Träteknik vid Luleå tekniska universitet (LTU) är en av endast tre platser i världen där forskning pågår om stockmätning med CT-skanning (Nyström & Kline 2000; Stängle m.fl. 2015; Fredriksson m.fl. 2019). Banbrytande utveckling av tekniken i samarbete med företaget Microtec och forskningsorganisationen Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) har lett till att det idag finns industriella CT-skannrar installerade vid tre svenska sågverk och ett begränsat antal andra sågverk världen över. Dessa industriella CT-skannrar har lägre mätupplösning jämfört med laboratoriebaserade CT-skannrar, delvis beroende på behovet av högre driftshastighet vid operativ drift, men de överträffar de tidigare nämnda diskreta röntgenmätramarnas upplösning. Forskningen har fokuserat på att utveckla algoritmer för att extrahera materialegenskaper från 3D-röntgendata (Oja 1997; Skog 2013; Berglund 2014).

Törskate är dock en egenskap som ännu inte har testats för detektering med CT-skanning (Nordström m.fl. 2021).

En annan variant av CT-skanning, så kallad mikro-CT (µCT) har använts för att studera svampangrepp i ved (Van den Bulcke m.fl. 2009). Denna typ av CT-skanning har mycket hög upplösning men kan bara användas på små prover och skanningen tar i förhållande till stockröntgen lång tid.

Syfte

Syftet med denna förstudie var att (1) undersöka om röntgenbaserad datortomografi (CT-skanning) kan detektera törskateangrepp hos talltimmer, för att därmed kunna optimera sågningen och "rädda" det sågade virkets värde, (2) att jämföra CT-bildernas 3-dimensionella beskrivning av törskateangreppet med hur skadorna ser på utsidan, för att kunna ta fram rekommendationer för yttre bedömning av skadeangrepp till exempel vid avverkning, samt (3) att bedöma möjligheterna att beskriva skadeförloppet och trädets försvar mot svampangreppet.

Material och metod

Provinsamling

Törskateinfekterade tallstockar insamlades från ett gallringsbestånd och ett slutavverkningsbestånd utanför Bjurselet, Norsjö kommun i Västerbotten, 2022-01-28 (Figur 2). Stammar av timmerdimension prioriterades. Fyra skadade stammar och en oskadad stam valdes ut i gallring respektive slutavverkningsbeståndet, baserat på visuell bedömning. Flera av stammarna hade multipla skador. Stammarna märktes och kapades till stockar så att skadan låg så centrerat på stocken som möjligt. Provmaterialet transporterades till LTU Träteknik i Skellefteå för skanning och fortsatt bedömning. Då provinsamlingen skedde vintertid bedöms transport och lagring inte ha påverkat stockarna med avseende på uttorkning och påbörjad biologisk nedbrytning. Provstammarnas egenskaper beskrivs i Tabell 1.

Figur 2. Provtagningsområdet (rosamarkerat område).

Tabell 1. Beskrivning av provstammar. *Död topp, lämnades i skogen. ** 3,4 m topp lämnades i skogen. Skadad = visuellt synlig törskate på stammen, Referens = ej visuellt synligt törskateangrepp.

STAM #	BESTÅNDS - TYP	PROVTYP	LÄNGD (M)	ANTAL STOCKAR	TILLVÄXT 5 ÅR (M)	BARR-FÖRLUST (%)
1	Gallring	Skadad	12,9	3	1,2	15–20
2	Gallring	Skadad	12,9	3	1,2–1,5	60–70
3	Gallring	Skadad	12,3	3	2	?
4	Gallring	Referens	12,7	3	1,9	10
5	Gallring	Skadad	11,4	3*	Död topp	25
6	Slutavverkning	Skadad	16,9	3**	0,9	15–25
7	Slutavverkning	Skadad	18,0	4	0,6	15–25
8	Slutavverkning	Referens	17,7	3	1,2–1,6	15–25
9	Slutavverkning	Skadad	16,6	2	Ej mätbart	15–25
10	Slutavverkning	Skadad	18,8	4	1,0	15–25

Stockarna märktes enligt nomenklaturen stamnummer-stocknummer, exempelvis 1–1, 1–2, och så vidare. Ett märke sågades på stockarna för att markera sidan som varit orienterad mot norr. Foton på skadade stockar visas i Appendix.

Yttre karaktärisering

En yttre karaktärisering av provstockarna genomfördes genom visuell bedömning (Tabell 2 och Tabell 3). Totalt åtta stammar med misstänkta stamsår till följd av törskate identifierades.

Tabell 2. Data för stamproverna från gallringsbeståndet baserat på visuell bedömning. *Död topp, lämnas i skogen. ”Stamsår avst. Nerifr” definieras som avståndet från stockens rotända till stamsårets nedre kant.

STOCK #	LÄNGD (M)	STAMSÅR (JA/NEJ)	STAMSÅR AVST. NERIFR. (M)	STAMSÅR LÄNGD (M)
1–1	3,2	Ja	1,2	2
1–2	3,9	Ja	0,7	0,7
1–3	3,9	Ja	0,1	0,5
2–1	4	Misstänkt/ja	0,2	0,7
2–2	3,9	Ja	2	0,6
2–3	2,9	Nej		
3–1	3,5	Nej		
3–2	4	Ja	1,1	0,9
3–3	4	Nej		
4–1	4,1	Nej		
4–2	3,1	Nej		
4–3	3,4	Nej		
5–1	4	Ja	1,5	1,2
5–2	4	Ja	1,5	0,9
5–3	3,4	Ja		

Tabell 3. Data för stamproverna från slutavverkningsbeståndet, baserat på visuell bedömning.

STOCK #	LÄNGD (M)	STAMSÅR (JA/NEJ)	STAMSÅR AVST. NERIFR. (M)	STAMSÅR LÄNGD (M)
6–1	4,5	Nej		
6–2	4,5	Ja	2,1	0,9
6–3	4,5	Nej		
7–1	4,0	Nej		
7–2	4,0	Nej		
7–3	4,0	Ja	1,8	0,8
7–4	3,5	Nej		
8–1	4,5	Nej		
8–2	4,5	Nej		
8–3	4,5	Nej		
9–1	4,5	Nej		
9–2	4,9	Ja, 2 st	1,1 | 3,3	1,0 | 0,6
10–1	4,1	Nej		
10–2	4,5	Ja	1,7	0,9
10–3	3,0	Nej		
10–4	3,8	Nej		

Inre karaktärisering

CT-skanning

Stockarna skannades med en Microtec Mito CT-skanner (Figur 3). Röntgenröret genererar en ström på 5,55 mA och en spänning på 180 kV, vilket ger fotoner med genomsnittlig energi om 81 keV. Vid skanning fixerades den undersökta stocken i dess ändar och vid montering roterades stockarna så att nordmärket på träd från samma stam hamnade i samma riktning. Vid skanning förflyttar sig CT-skannern med förinställd hastighet i stockens längdriktning (Z-led). Förinställd upplösning för skanning av törskatestockarna var 0,5 x 0,5 mm (X-Y-led) med ett skanningsdjup på 0,5 millimeter i Z-led. Upplösningen ges av tredimensionella voxlar (0,5x0,5x0,5mm) där varje voxel representeras av ett heltal som är direkt proportionellt mot det skannade materialets densitet i denna position.

Figur 3. Mätning av stock med CT-skannern.

Data gavs i form av bilder i TIFF-format. Varje bild-fil innehöll ett tvärsnitt i gråskala med 16 bitars värdedjup. Antalet tvärsnitt var Z = 2N bilder per stock, där N är stockens längd i millimeter. Den totala filstorleken för en stock var 1–4 gigabyte).

Förprocessering

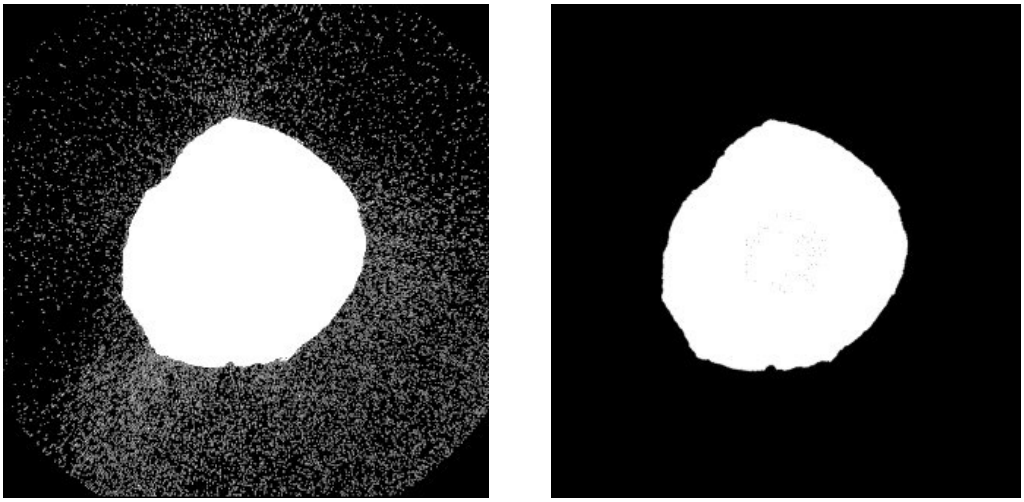
Bildbehandlingen utfördes i Python, kompletterad med 3D Slicer för visuell inspektion. Python-paketen *rioxarray* (bildinläsning och spatiala operationer), *cc3d* (länkade komponenter i 3D), *labelme* (bildklassning), *geopandas* (hantering av regioner från bildklassning) och *napari* (3D-visualisering) användes i huvudsak.

Bilderna omformades till formatet 900 x 900 x Z voxlar (bildelement/3D-pixlar), där Z är antalet tvärsnitt för en stock, baserat på en MATLAB-algoritm som tagits fram av LTU Träteknik (Lars Hansson, LTU, personlig kommunikation 2022-05-05). De bilder från stockens ändytor som innehöll fixeringsanordningen togs bort genom att exkludera de 300 första respektive sista tvärsnitten, motsvarande 15 cm från topp- respektive rotände. Detta påverkade inte de törskatedrabbade områdena.

Bilderna visade stockens tvärsnitt omgivet av en betydande mängd luft (pixelvärde 0, svart). För att minska datavolymen reducerades bildernas storlek med 150 pixlar i X- och Y-riktning i bildernas periferi. Dessa pixlar innehöll endast luft. Slutliga bildstorleken var därmed 750 x 750 x (Z – 600) voxlar.

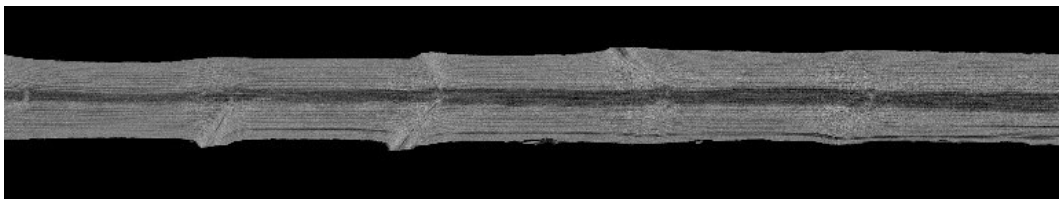
CT-skanningen genererar vanligen brus i ett spiralformat mönster, som är starkare ju högre densiteten i det avbildade området är (José Couceiro, LTU, personlig

kommunikation 2022-04-03). Bilderna rensades från brus baserat på morfologisk bildbehandling med operationerna “erodering” och “dilatering” (Figur 4).

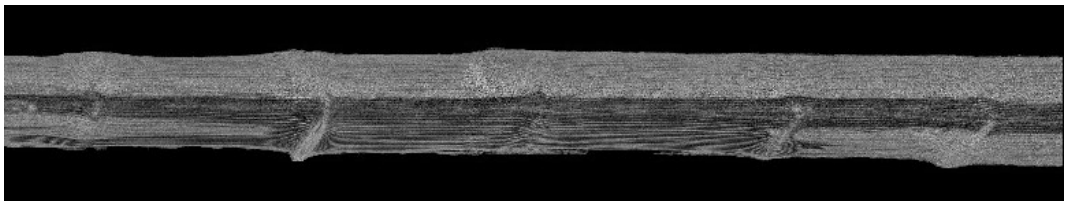


Figur 4. Representation av tvärsnittet hos en stock innan (vänster) respektive efter (höger) brusborttagning.

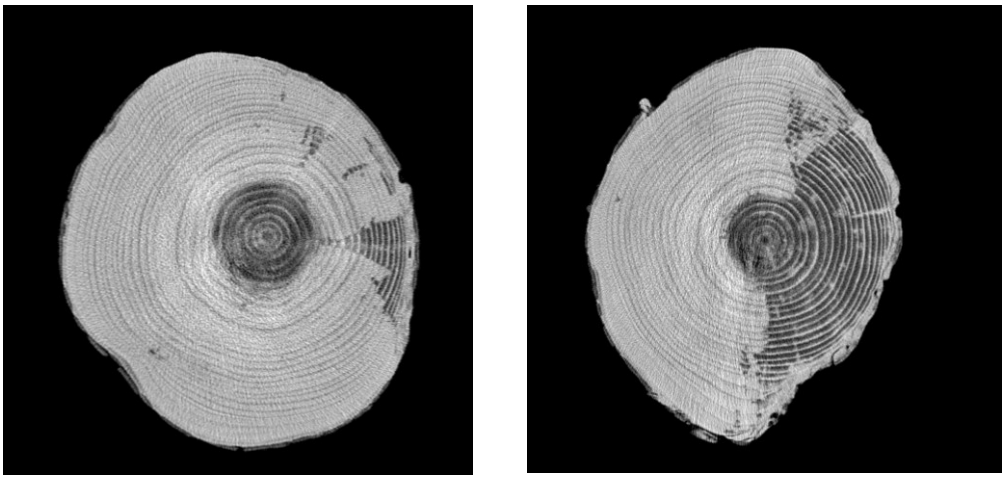
Exempel på färdigprocessade bilder visas i Figur 5–7.



Figur 5. Stock 1–2 i X-Z-led vid maximal kärnvedsdiameter. Skadan syns som mindre svarta stråk i bildens nederkant; i mitten syns kärnveden som ett mörkt sammanhängande område. Total längd i bild = 3,7 m.



Figur 6. Stock 1–2 i Y-Z-led vid maximal kärnvedsdiameter. Skadan syns som ett stort svart område. Total längd i bild = 3,7 m.



Figur 7. Stocktvärsnitt (X-Y-led) i två olika lägen i Z-led hos en och samma stock (stock 1–2). Kärnveden utgörs av det mörkare centrala området. Törskateangreppet återfinns i tvärsnittets högra del och har medfört att stocktvärsnittet blivit starkt osymmetriskt. Vänster: små stråk av fetved ca. 0,7 m från törskate-angreppets startområde; Höger: kraftig inlagring av kåda vid angreppets startområde.

Under förprocesseringen upptäcktes en trolig törskaterelaterad skada i stock 2–1 som inte detekterats på stockens utsida.

Mätning av vedens densitet

CT-bildernas intensitetvärden (gråskalevärden) är proportionella mot densiteten i motsvarande område i stocken. För att omvandla gråskalevärdena till faktisk densitet (kg/m^3) krävs en kalibrering mot vatten och luft, vilket låg utanför detta projekt. Därför utvärderades de olika vedtyperna baserat på relativ intensitet i stället för som i vanliga fall densitet, vilket dock inte ger någon skillnad i de resultat som tagits fram i denna studie.

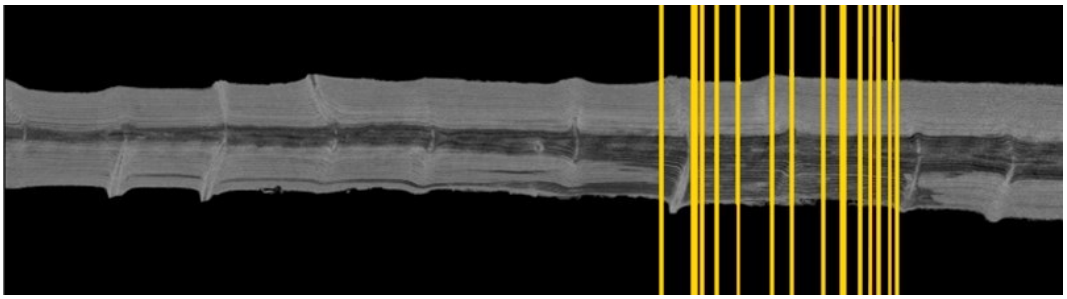
För att bestämma eventuella intensitetsskillnader mellan olika vedkomponenter gjordes manuell klassning (labeling) i Python-verktyget *labelme*. Om det finns statistisk bestämbar skillnad i intensitet mellan de olika vedkomponenterna, är det möjligt att även kunna särskilja dessa i CT-bilderna och därmed automatiskt kunna detektera törskate.

Från var och en av de tolv skadade stockarna (Tabell 2–3) valdes cirka tio tvärsnitt med en betydande andel skada ut (Figur 8). Klassningsverktyget krävde 8-bitars bilder och de ursprungliga 16-bitarsbilderna konverterades därmed:

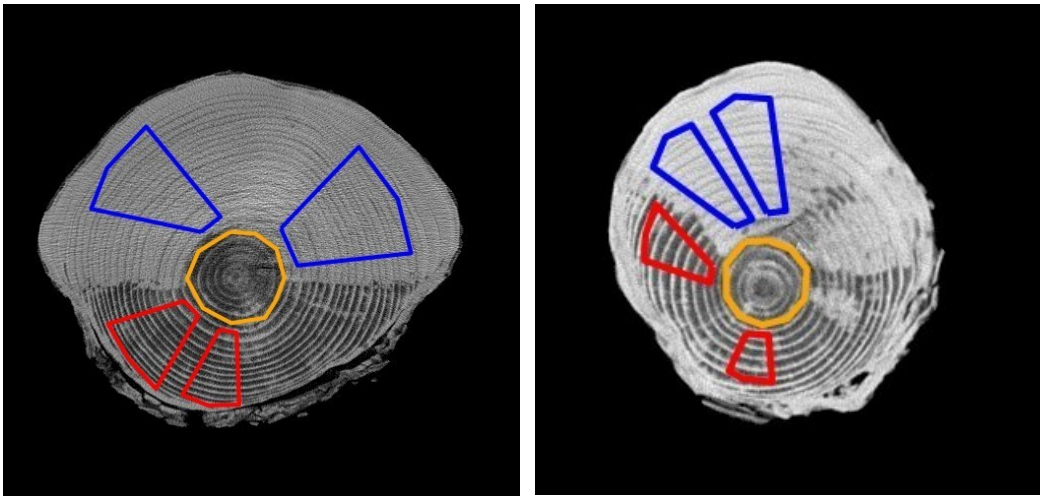
$$bild_{8bit} = 255 \frac{bild_{16bit} - \min(bild_{16bit})}{\max(bild_{16bit}) - \min(bild_{16bit})}$$

där min och max står för bildens lägsta respektive högsta värde. Klassningsområdet ritades runt eller i kärnved, splintved och skada baserat på visuell bedömning och namngavs med vedtyp (Figur 9). För varje tvärsnitt ritades ett klassningsområde för kärnved, ett till två områden för skadad ved och ett till tre områden för splintved. Totalt innebar detta cirka 240 klassningsområden per vedtyp. Klassningsområdena sparades

som JSON-filer, lästes in och konverterades till geometriska objekt. Varje ursprunglig (16-bitars) utvald tvärsnittsbild klipptes sedan med de geometriska objekten för att få ut bilder som endast innehöll kärnved, splintved och skada. Medelvärde och standardavvikelser beräknades sedan på de beskurna bilderna på tvärsnitts-, stock- och totalnivå.



Figur 8. Exempel på positioner (gula linjer) i stockens längdled där tvärsnitt för bedömning av klassningsområden genomfördes.



Figur 9. Höger: Exempel på manuell klassning av virkestyper i tvärsnittet (klassningsområden) med polygoner. Blått område = splintved utan kådinlagring; orange område = kärnved; rött område = tydlig fetved.

Mätning längdutbredning och skadetyp hos skadad ved

Mätning av skadans längdsutbredning på mantelytan gjordes genom visuell bedömning av skadade områden. Två typer av synliga skador registrerades och mättes in i stockens längdriktning:

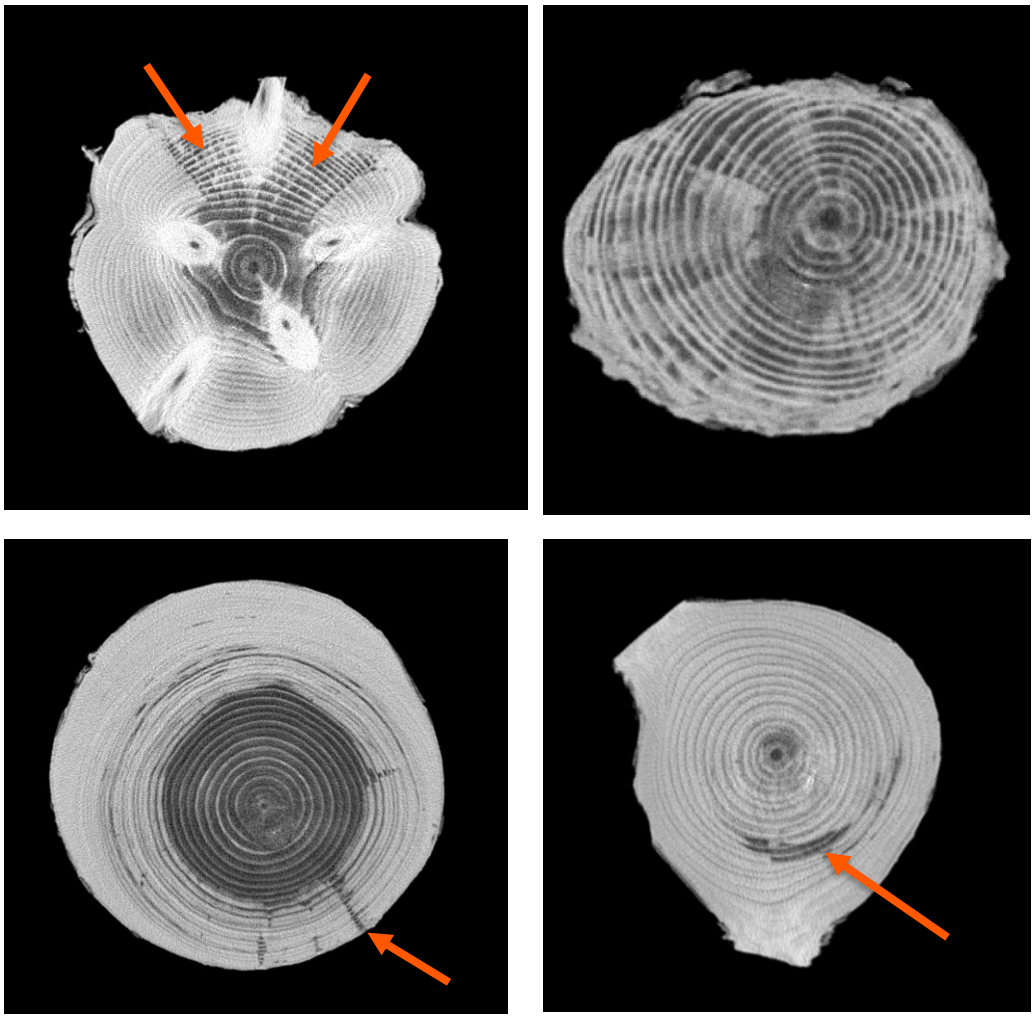
1. Synligt stamsår präglat av avsaknad av bark, mörk-svart bark, död-döende innerbark och/eller kådflöde (färskt och gammalt). Om möjligt noterades trolig ingångspunkt för infektionen
2. Deformation och asymmetri av stammen ovan och nedan stamsåret

För bedömning av inre skada användes två mått:

1. **Central skada**: en skada som går från stockens mantelyta ända in till kärnveden (Figur 10, vänster). Den centrala skadelängden definierades som skillnaden mellan det minsta och största höjdvärde som innehöll central skada.

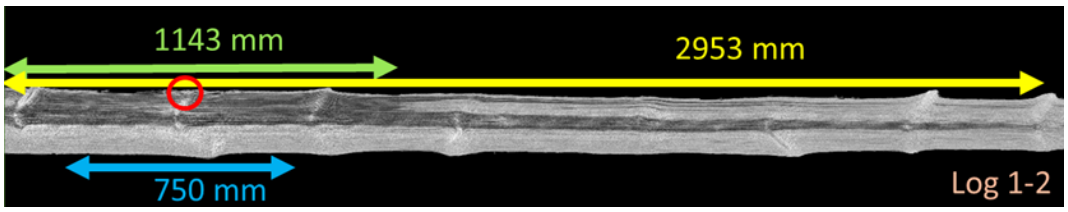
2. **Perifer skada**: en skada som ej når in till kärnveden, oftast isolerad inom splintveden (Figur 10, höger). Den perifera skadelängden definierades som skillnaden mellan det minsta och det största höjdvärde som innehöll skada (i CT-bild synlig kådved).

Exempel på skademåtten visas i Figur 10.



Figur 10. Exempel på tvärsnitt med centrala eller perifera skador. Övre vänster: begränsad central skada samt kvistvarv. Övre höger: central skada som täcker 100% av tvärsnittet. Nedre vänster: liten central skada. Nedre höger: perifer skada.

Ett exempel på mätning av skadelängd i stockens Y-Z-led visas i Figur 11.



Figur 11. Mätning av inre och yttre skador. Blå pil = yttre skada okulärt bestämd. Gul pil = perifer skada bestämd i CT-bilden (CT-perifer). Notera att en del av skadan (mörkt område som ej är kärnved) går upp längs innerbarken. Grön pil = central skada bestämd i CT-bilden (CT-central). Notera att en del av skadan går från innerbarken till märgen. Infektionens troliga ingångspunkt är markerad med en röd cirkel.

Resultat

Detektion och intensitetsskillnader

De uppmätta intensitetsvärdena för de olika vedtyperna kärnved, frisk splintved och skadad splintved visas i Tabell 4.

Tabell 4. Medelintensitetsvärden för kärnved, frisk splintved och skadad splintved. Värdena är beräknade från ca 10 tvärsnitt per stock och 1–4 områden i varje tvärsnitt och anges ± 1σ standardavvikelse.

STOCK	KÄRNVED	FRISK SPLINTVED	SKADAD SPLINTVED
1–1	676	1071	731
1–2	580	1040	636
1–3	679	984	722
2–1	567	1040	632
2–2	673	1033	671
3–2	503	948	649
5–1	484	998	712
5–2	469	979	645
7–3	510	1036	710
6–2	485	1005	686
9–2	494	1032	607
10–2	530	1064	680
Medel	554 ± 80	1019 ± 37	673 ± 40

Det finns en betydande intensitetsskillnad mellan frisk (oskadad) och skadad splintved. Övergången mellan skadad och oskadad splintved tycks i de flesta fall vara mycket skarp, det vill säga det finns inga tecken på en successiv övergång i intensitet mellan oskadad och skadad splintved. Det tyder på låg risk för ”milda” angrepp som CT-skannern inte upptäcker. Angreppen kan däremot vara ”milda” i avseendet att de har liten utbredning eller är positionerade på ett gynnsamt ställe i stocken.

Det är liten till ingen skillnad i intensitet mellan kärnved och skadad splintved. CT-bilderna visar att det framför allt är sommarveden hos skadad splintved som har högre intensitet jämfört med sommarveden hos kärnved.

Extern vs. intern skadeutbredning

Bedömningen av yttre och inre skadeutbredning visas i Tabell 5. Värdena som ligger till grund för tabellen återges i Appendix.

Tabell 5. Jämförelse av inre skadelängd (centralt och perifert mått) jämfört med yttre mätningar av stamsårets längd och längden på ev. stamdeformation/asymmetri. Värden anger procentuell skillnad mellan yttre mätning och CT-mätning (en positiv siffra anger hur mycket längre skadan är på insidan jämfört utsidan).

STOCK	STAMSÅR VS. CT-CENTRAL +/- (%)	STAMSÅR VS. CT-PERIFER +/- (%)	DEFORMATION VS. CT-CENTRAL +/- (%)	DEFORMATION VS. CT-PERIFER +/- (%)
1–1	121	220	-49	-26
1–2	52	294	-29	86
1–3 (1) *	27	1009	-53	316
1–3 (2) *	-	272	-	-
2–1	30	315	30	315
2–2	190	529	66	259
3–2	65	647	-65	59
5–1	63	399	-59	25
5–2	-3	181	-30	100
6–2 (1) *	63	168	-32	13
6–2 (2) *	-6	141	-	-
7–3	33	187	-52	4
9–2 (1) *	71	308	16	175
9–2 (2) *	56	419	-	-
10–2	58	326	-	-
Medel	59	361	-23	12

Generellt sträcker sig de detekterbara skadorna i stockens inre betydligt längre i trädets längdriktning än de på mantelytan synliga skadorna. I jämförelse med det synliga

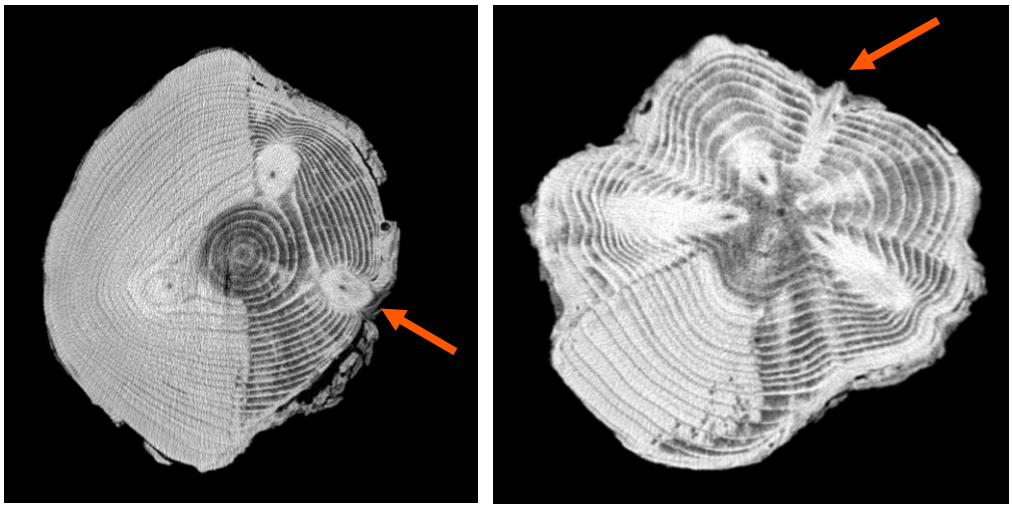
stamsårets utbredning sträcker sig tydliga, sammanhållna förändringar (centralt) inne i trädet i genomsnitt 59 procent längre och som mest 190 procent längre. Den invändiga utbredningen av mindre tydliga, ej sammanhålla skador (perifert) är mycket omfattande, i genomsnitt 361 procent längre än de synliga stamsåren.

För deformation och asymmetri är de tydliga sammanhållna förändringarna (centralt) inne i trädet i genomsnitt 23 procent kortare än de ytligt synliga. Den invändiga utbredningen av mindre tydliga, ej sammanhålla skador (perifert) är avsevärt större, i genomsnitt 120 procent längre än de synliga stamsåren.

Övriga observationer

Ingångspunkt

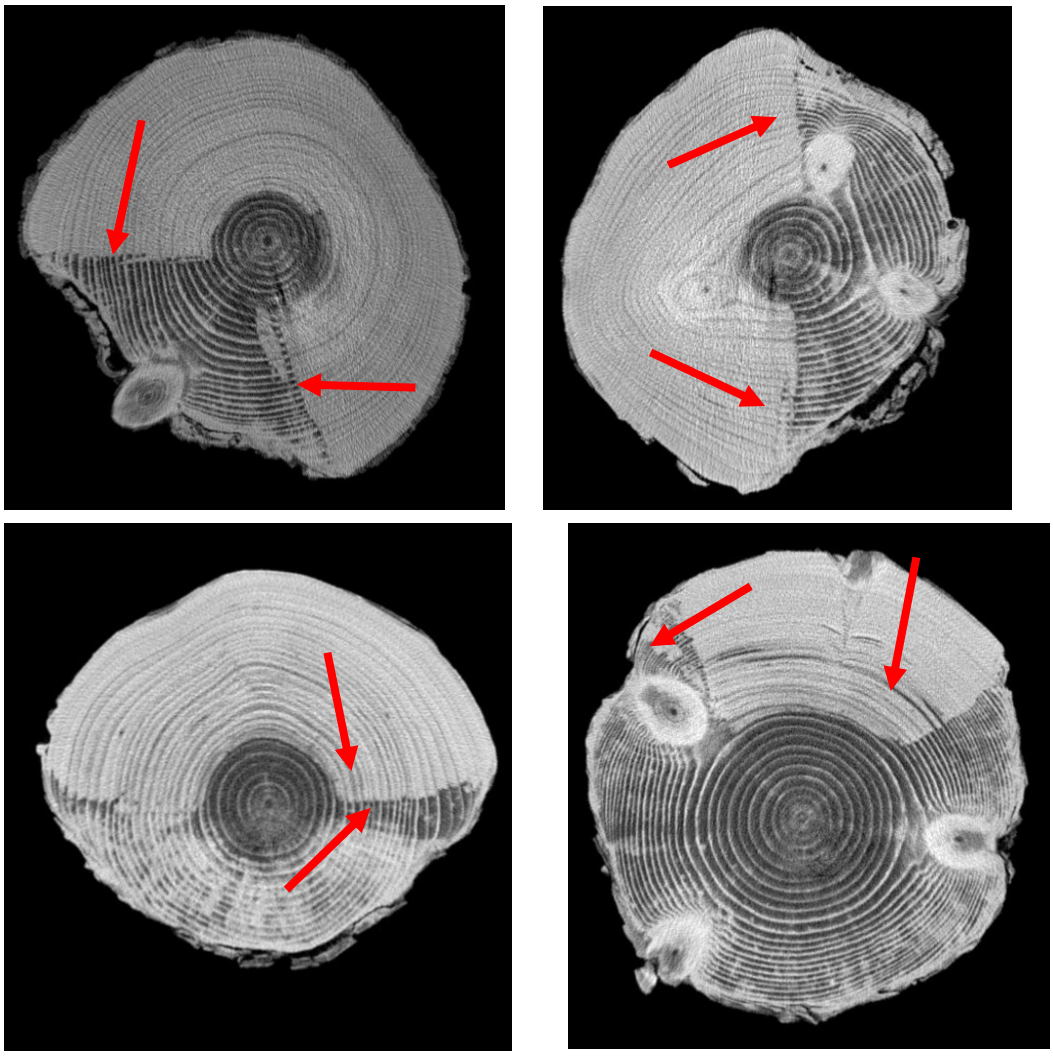
För åtta av skadorna bedömdes ingångspunkten för infektionen vara kopplad till kvist, baserat på yttre inspektion (Figur 12). I samtliga fall kunde denna hypotes styrkas, då CT-bilderna visade kvist vid den höjd där skadans utbredning var som störst, och att sagda kvist befann sig i skadans pericentrum, det vill säga i mitten av skadans gränszon mot barken.



Figur 12. Tvärsnitt med kvist som dels befinner sig i den höjd där skadan har sin största utbredning, dels är lokaliserad i skadans pericentrum (i mitten av skadans gränszon mot barken). Vänster: stock 1–2; höger: Stock 5–2.

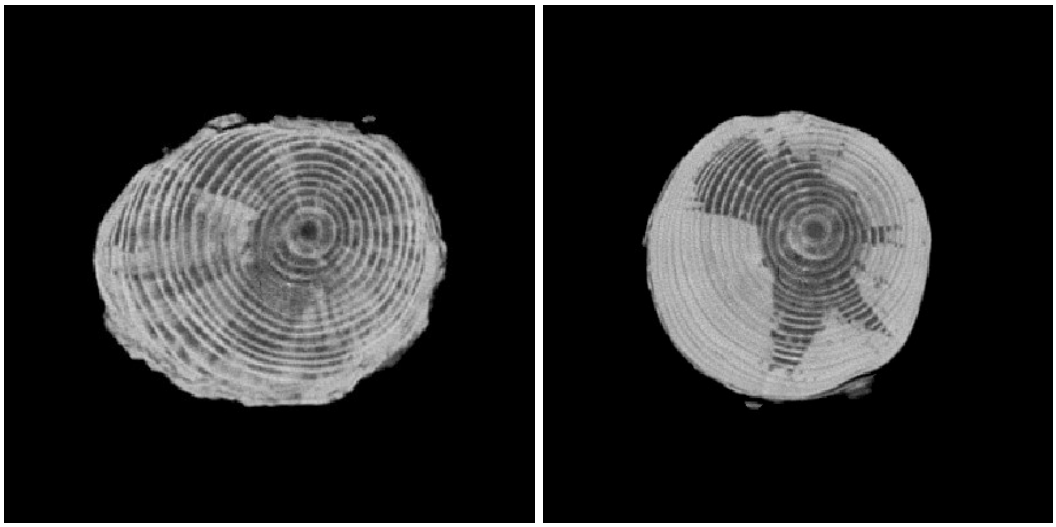
Radiella mönster

Den kådrika vedens utbredning i stammens längdriktning sker med en viss vridning runt stammens längdriktning (Figur 13), vilket kan tyda på att märgstrålarna spelar en roll i trädets initiering av kådbildning.



Figur 13. Exempel på radiella mönster i skadans utbredning, indikerade med röd pilspets. Överst till vänster: stock 1–1, ca 1,0 m från rotskäret. Överst till höger: stock 1–2, ca 2,3 m från rotskäret. Nederst till vänster: stock 7–3, ca 2,0 m från rotskäret. Nederst till höger: stock 10–2, ca 2,5 m från rotskäret.

Radiella mönster finns oftast på centrala skador. I vissa fall finns dessa mönster även på perifera skador (Figur 14).



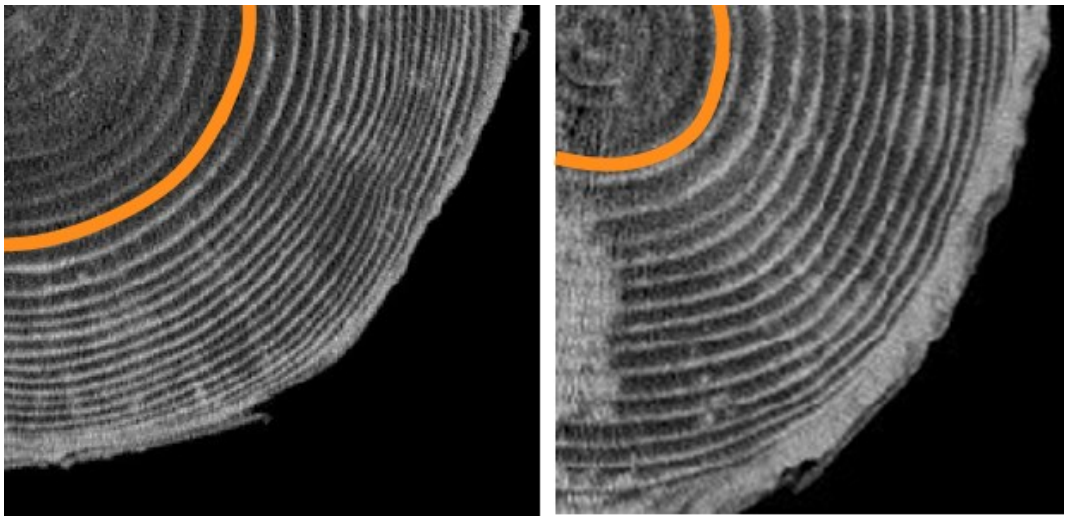
Figur 14. Exempel på två olika skadeprofiler i samma stock (stock 2–2). Vänster: Nästan 100 % andel skadad ved vid 2,2 m höjd, med stark asymmetrisk stamform. Höger: perifer del av skadan vid 1,9 m höjd, med radiell reaktionsvedsbildning som inte sträcker sig till innerbarken.

Perifera skadans utbredning i längdled

Hos flera stockar breder skadan ut sig som tunna långa stråk från den centrala skadan (lång perifer skada i relation till central skada). I dessa fall tycks skadan ofta bre ut sig antingen längs innerbarken eller längs med kärnvedens ytterområde, och mer sällan i mitten av splintveden.

Vårved vs. sommarved

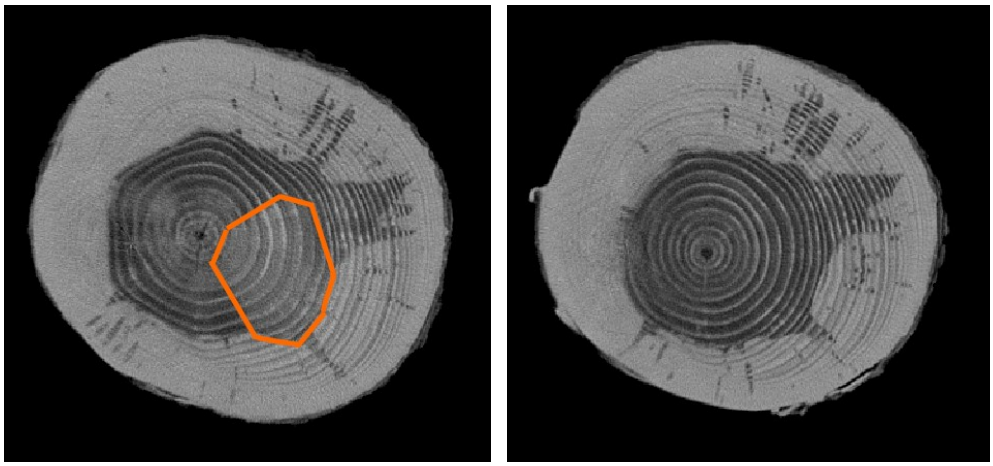
För splintveden tycks finnas en tendens att skadan orsakar lägre intensitetsvärden (minskad densitet) i vårveden och högre intensitetsvärden (högre densitet) i sommarveden (Figur 18). Det är svårt att bedöma om kärnveden alls förändras av reaktionsvedsbildningen, men om så sker är förändringen liten.



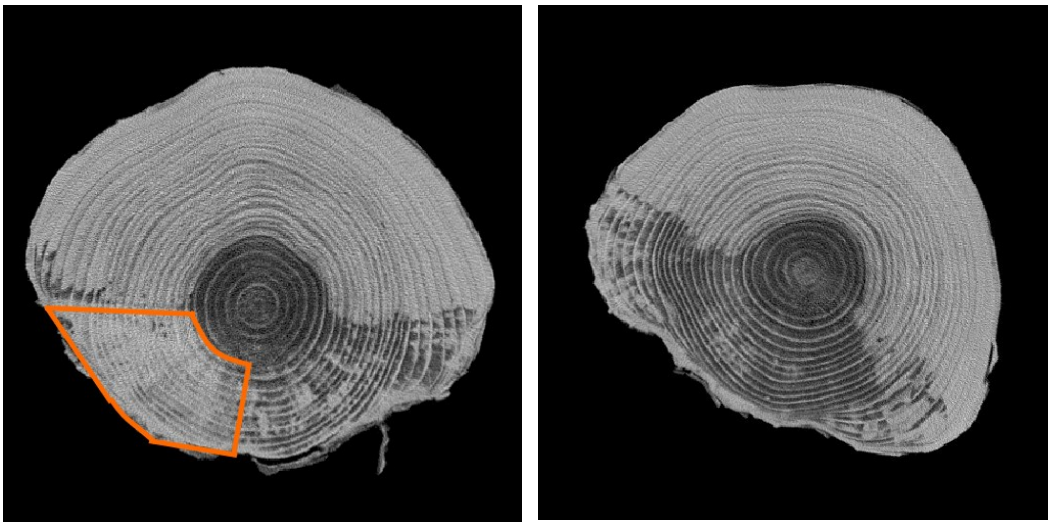
Figur 15. Exempel på intensitetsskillnader mellan sommarved i skadad splintved respektive sommarved i kärnved. Orange linje = gräns mellan kärnved och skadad splintved. Vänster: stock 10–2, höjd 1,8 m från rotskär; höger: stock 1–2, höjd 1,5 m från rotskär.

Flammig skadeprofil

På flera stockar uppvisar skadan ett flammigt mönster och/eller ljusa zoner, vanligen precis under grenvarven men i vissa fall även ovanför grenvarven (Figur 16–17). En möjlig förklaring är lokalt högre kådinlagring, med följd att densiteten blir så hög att det yttrar sig som högre bildintensitet. En annan möjlighet är måttlig kådinlagring i tjurved eller annan typ av reaktionsved som redan existerade i stocken vid tidpunkten för törskateinfektionen.



Figur 16. Exempel på ljus zon (innanför orange område) i stock 2–1. Vänster: ljust område (höjd 1,8 m från kap). Höger: samma skada men utan ljust område (höjd 1,7 m från kap).



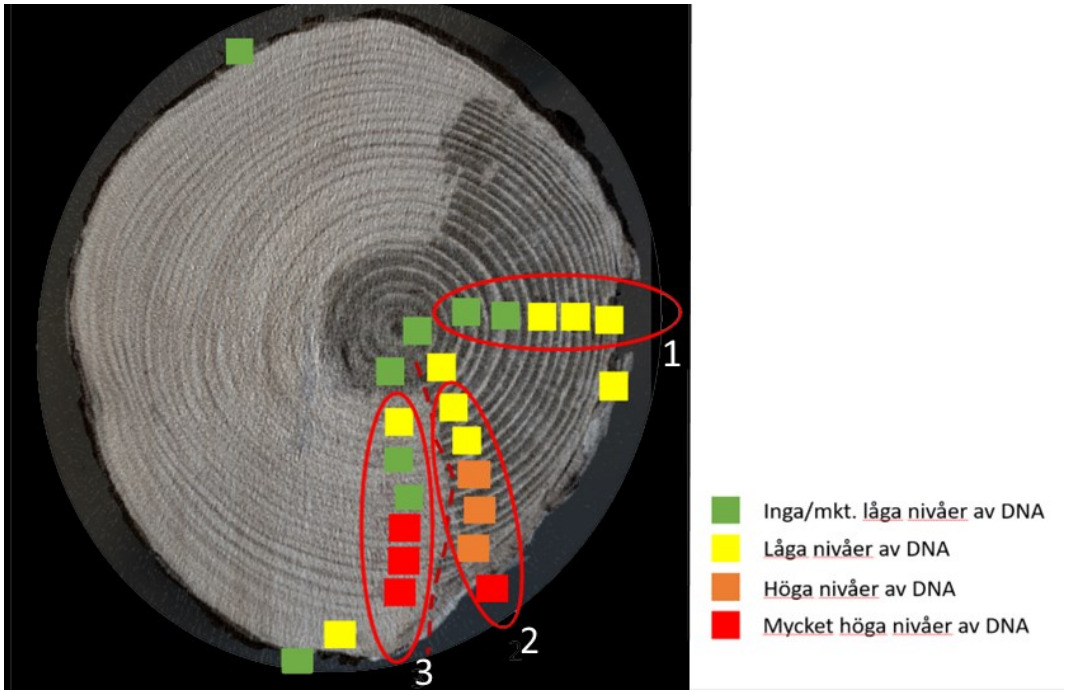
Figur 17. Exempel på flammig och ljus zon (innanför orange område) i stock 7–3. Vänster: Ljus/flammig zon i skada (höjd 2,2 m från kap). Höger: Icke flammig del av samma skada (höjd 2,5 m från kap).

Kompensatorisk tillväxt och asymmetri

I radiell riktning är ofta en betydande andel av stocken skadad och inlagrad med kåda. Därmed är vatten- och näringstillförseln i dessa områden blockerad, men trädet kompenserar för detta genom att öka tillväxten inom det friska området (Figur 16). Ju större skada desto mer frodvuxen tycks denna kompensatoriska tillväxt vara, med splintved som har bred vårved. Detta leder till en alltmer asymmetrisk stam i takt med att en ökande andel skada.

Detektion av törskate-DNA i veden

I CT-bilderna kännetecknas trädets reaktion mot svampinfektionen som mörka områden. Denna reaktion behöver dock inte nödvändigtvis avspegla svampens utbredning. För att undersöka var i trädet svampen faktiskt existerar analyserades i samarbete med forskare på SLU en trissa som kapats ur en törskateangripen stock. Provtagning och DNA-extraktion gjordes i och i närheten av områden där CT-bilder visat törskaterelaterad skada. Sedan kvantifierades DNA specifikt för törskatesvampen med rt-PCR. Analysen pekar på inga till låga nivåer av DNA från centrum av det kådinlagrade området till barken (1) (Figur 18). I ytterkanten av det kådinlagrade området återfanns från trissans centrum och mot barken (2) successivt ökande nivåer av DNA. Strax utanför det kådinlagrade området (3) återfanns inga till låga nivåer av DNA nära centrum, för att i de yttre delarna av splintveden övergå i mycket höga nivåer av DNA.



Figur 18. Provtagningspunkter samt resultat av DNA-analys.

Diskussion

Materialval

Materialvalet styrdes främst av två faktorer: (1) relevans för sågverkets produktion (timmerdimensioner) och (2) kostnaden för CT-skanningen. Om den inre skadebilden ser likadan ut för ungskog är därmed oklart. Urvalet skedde inte slumpmässigt utan framför allt stammar med tydliga yttre skador eller asymmetrier valdes ut, vilket gör att resultaten speglar stockar med en hög andel skada. Provmaterialet togs även från två närliggande områden. Därmed ska resultaten tolkas med försiktighet vad gäller generell geografisk giltighet. Framtida studier där nya provstockar tas ut kan med fördel inhämta dessa så att den totala geografiska spridningen ökas.

Metodutveckling

CT-skanning för att detektera törskate har inte tidigare utförts. Förbehandling och analys av CT-bilder i denna studie har varit av semi-manuell karaktär. För ökad automatisering krävs att skadan kan segmenteras – särskiljas – från övriga vedtyper. Den enklaste formen av automatisk segmentering, tröskling, baseras på skillnader i intensitetsvärden. Studien har visat att intensitetsvärden mellan oskadad och skadad splintved skiljer sig tydligt åt, medan det är svårare att särskilja skadad splintved och kärnved. Det är dock troligt att kärnveden, som har en väldefinierad utbredning, kan särskiljas med hjälp av utvecklade mjukvarualgoritmer. Intensiteten för vår- och sommarveden för de olika vedtyperna överlappar. Om detta har någon betydelse för detektering av törskate behöver utredas vidare. En metod som bör prövas är att köra manuellt klassade bilder genom en AI-algoritm anpassad för bildigenkänning, då dessa metoder ofta kan ta hänsyn till både intensitetsskillnader och spatiala mönster.

För automatisk karaktärisering av asymmetri kan mått som ovalitet och formfaktor beräknas baserat på stockens tvärsnittsform. Dessa kan kompletteras med identifikation av märgens position och beräkning av dess avvikelse mot den placering som den borde ha om stocken inte varit asymmetrisk. Den algoritm som LTU har tagit fram för att beräkna märgens position är anpassad för de intensitetsvärden som är karaktäristiska för frisk ved, vilket gör att den kan behöva anpassas för att tillämpas på törskateskadad ved.

För vissa analyser vore det fördelaktigt om antalet årsringar kan räknas automatiskt. Detta är normalt sett mycket utmanande, då CT-bilderna har otillräcklig kontrast och spatial upplösning för att särskilja tätvuxna årsringar. I den skadade veden blir dock kontrasten mellan vår- och sommarved betydligt högre till följd av kådinlagringen. Det gör att automatisk årsringsräkning kan underlättas. Det är dock oklart om det räcker att få den informationen ifrån det skadade området, eftersom trädet fortsätter att växa i det oskadade området.

Förståelse av törskatens natur

CT-bilderna kontra de ytligt visuella skadorna ger en helt unik och spännande inblick i trädets reaktion/kamp mot törskateinfektionen. Begränsningen i dagsläget är att själva svampens utbredning i veden inte går att detektera med CT-skanning med den upplösning som använts i denna studie. Oavsett så är det tydligt att utbredningen av de

inre skadorna är betydligt mer omfattande än stamsårets utbredning. Sannolikt är det så att den reaktion CT-bilderna avslöjar, med en ofta omfattande kådinlagring i trädets längdriktning, även kan indikera svampens utbredning. En sådan reaktion är logisk när trädet vill begränsa möjligheten att invadera nya vävnader. Kådinlagringen av splintveden förefaller även följa radiella mönster, eventuellt initierat via märgstrålarna i splintveden. Det ibland radiella mönstret för kådinlagring kan vara trädets sätt att avgränsa svampens möjlighet för spridning. Hur trädet känner av svampinfektionen och initierar kådproduktion är dock inte känt. För flera av provträden observerades även att utbredningen av stamsår och asymmetri följer trädets växtvridenhet. Denna observation pekar på att svampinfektionen sprids längs trädets fibrer. Samma fenomen kan även förklaras av att trädets reaktion mot infektion är snabb i trädets längdriktning och dessa vävnader. Viktigt därför att kunna fastställa svampens faktiska utbredning.

Som tidigare nämnts avslöjar inte CT-bilderna var i trädet svampen förekommer, information som vore mycket värdefull att ha. Som ett led i det arbetet har ett antal trissor kapats från olika höjder av ett enskilt stamsår. En av dessa trissor har analyserats i samarbete med forskare på SLU. För denna trissa visar analysen att DNA specifikt för törskatesvampen förekommer nära kärnveden, i splintveden och på ytan/barken, både i och utanför de kådrika regioner som uppstår när trädet reagerar på törskateinfektion. Detta är mycket intressanta data då det aldrig tidigare publicerats data om var svampen förekommer i vedanatomin. Den relativa förekomsten av törskatespecifikt DNA varierar dock stort och de högsta nivåerna uppmätes främst i de yttre delarna av splintveden, utanför den kådindränkta regionen. Detta kan tolkas som att svampen försöker sprida sig och förekomma trädets reaktion då det kan antas att möjligheterna för svampen att leva i kådindränkta områden sannolikt är begränsade. Att DNA även återfinns i de kådindränkta partierna tolkas som att kådindränkningen sker efter svampens kolonisation. Det bör dock nämnas att provtagningen och DNA-analyserna som gjorts på trissan är de första i sitt slag och kan vara behäftade med vissa problem. Själva detektionen av törskatespecifikt DNA är sannolikt inget problem. Däremot så kan kvantifieringen av DNA ha påverkats av minst två faktorer: 1) DNA extraktion och rtPCR-metoden kan ha påverkats negativt av kemin som kådindränkning medför 2) DNA-stabiliteten i kådrika regioner är okänd, men det kan inte uteslutas att DNA-kvaliteten försämras där. Oavsett så är dessa data av stort vetenskapligt intresse och motiverar fortsatta studier och metodoptimering

Ett av projektets mål var att undersöka om CT-bilderna gör det möjligt att på olika sätt tidsbestämma skadorna och hur snabbt skadorna breder ut sig. Kort sagt är svaret ja, i alla fall med avseende på utbredningen av detekterbart avvikande kådrik ved. I kombination med att årsringar avtecknas tydligt i framför allt den avvikande kådindränkta veden så är det möjligt att följa skadeutvecklingen mellan år. Det ska dock framhållas att mätning och analys av skadeutveckling över tid kommer vara helt beroende av väl utvecklad automatisk bildbehandling.

Sågning och virkesvärde

Resultaten visar hur törskate leder till förändringar i vedens densitet på grund av kraftig kådinlagring i kombination med minskad fuktkvot, samt asymmetrisk stamform på delar av stammen. Kådinlagring försämrar möjligheten att använda virket till produkter som målas eller impregneras. Det är oklart i vilken utsträckning törskaten leder till förändringar av fibrernas egenskaper. Möjligen kan den kompensatoriska tillväxten leda till högre andel vårved i den friska delen av stammen. Den asymmetri som

uppkommer som en reaktion på törskateangreppet kommer också påverka värdeutbytet vid sågningen av en angripen timmerstock.

När automatisk detektion av skadan har utvecklats bör ett klassningssystem av skadan utvecklas. Mått som andel skadad volym i relation till total volym hos stocken kan tas fram, i likhet med ”andel ej levande stamdel” som finns i dagens kvalitetsklassningssystem. Dock tar ett klassningssystem lämpligen hänsyn till var i stocken skadan befinner sig, exempelvis genom att relatera till utbytesförlust. Det tycks vara vanligt att den perifera skadan endast finns i ena halvan av stocken (Figur 5–6), vilket ger möjlighet att anpassa sågningen och få ut virke med frisk ved. Detta kan studeras närmare med sågutbytessimuleringar.

Slutsatser

- Skada i splintved till följd av törskate (definierad som förekomst av fetved) går utmärkt att särskilja från frisk splintved med CT-skanner.
- Det är oklart ifall kärnveden förändras av skadan, dock är påverkan i sådant fall liten.
- Den inre skadelängden var i det studerade materialet 60–350 procent längre än den yttre synliga skadan, vilket visar på behovet av en metod för inre detektion.
- Törskatesvampen förekommer både i och utanför de kådindränkta områdena i veden.
- I tvärsnittet (radiell riktning) utbreder sig skadan i karaktäristiska radiella mönster, som möjligen kan härledas till spridning längs märgstrålar.
- Existerande CT-algoritmer utvecklade för oskadade stockar kommer att behöva anpassas för att fungera på törskateskadade stockar.

Referenser

Adolfsson, H. 2022. Förekomst av törskate (Cronartium pini) i tallungskog i norra Sverige: En studie av törskates utbredning och eventuella faktorer som påverkar förekomst. B.Sc. thesis, Umeå University, s.

Berglund, A. 2014. Efficient utilization of sawlogs using scanning techniques and computer modelling. PhD Thesis, Luleå Tekniska Universitet, 316 p. s.

Eriksson, H., Bergqvist, J., Hazell, P., Isacsson, G., Lomander, A. & Black-Samuelsson, S. 2016. Effekter av klimatförändringar på skogen och behov av anpassning i skogsbruket. Skogsstyrelsen, s.

Fredriksson, M., Cool, J. & Avramidis, S. 2019. Automatic knot detection in coarse resolution cone-beam of CT images of softwood logs. Forest Products Journal, 69, 187-187.

Gramner, T. & Jernberg, B. 2022. Satellitbilder avslöjar: ju längre norrut desto sämre ungskogar. Skogsstyrelsen. URL: https://via.tt.se/pressmeddelande/satellitbilder-avslojar-ju-langre-norrut-desto-samre-ungskogar?publisherId=415163&releaseId=3319676 [Hämtad 2022-04-20].

Hyll, K. & Nordström, M. 2021. Kartläggning och utvärdering av mätramar och mätramsmiljöer i sågverk. Skogforsk Arbetsrapport, Skogforsk, 77 s.

JMMI 2012. Jord- och skogsbruksministeriets beredskapsplan för skogsskador. Jord- och skogsbruksministeriet, 24 p. s.

Kaitera, J., Aalto, T. & Jalkanen, R. 1994. Effect of resin-top disease caused by Peridermium pini on the volume and value of Pinus sylvestris saw timber and pulpwood. Scandinavian Journal of Forest Research, 9, 376-381.

Kim, M.-S., Hantula, J., Kaitera, J., Zambino, P. J., Woodward, S., Richardson, B. A., Stewart, J. E., Spaine, P., Shaw, D. C., Takeuchi, Y. & Klopfenstein, N. B. 2022. Recovery Plan for Scots Pine Blister Rust Caused by Cronartium pini. Plant Health Progress 2022, 23, 105-130.

Metla. 2007. Several plant species in Finland support rapid spread of cronartium rust and white-pine blister rust, URL. Metla. URL: http://www.metla.fi/tiedotteet/2007/2007-02-07-tervasroso-en.htm [Hämtad 2022-04-10].

Nordström, M., Möller, J. J., Hyll, K. & Björklund, L. 2021. Egenskaper och kvalitetsparametrar med relevans för sågtimmer av tall och gran. Arbetsrapport, 1-24 s.

Nyström, J. & Kline, E. D. 2000. Automatic classification of compression wood in green southern yellow pine. Wood and Fiber Science, 32, 301-310.

Oja, J. 1997. Measuring Knots and Resing Pockets in CT-images of Norway Spruce. Licentiate Thesis, Luleå Tekniska Universitet, 1-78 s.

Samils, B. & Stenlid, J. 2022. A review of biology, epidemiology and management of Cronartium pini with emphasis on Northern Europe. Scandinavian Journal of Forest Research, 37, 153-171.

Skog, J. 2013. Charaterization of sawlogs using industrial X-ray and 3D scanning. Doctoral thesis, Luleå Universitet, 1-162 s.

Stenlid, J. 2021. Törskate i multiskadade skogar i norr. Department of Forest Mycology and Plant Pathology, 17 p. s.

Stängle, S. M., Brüchert, F., Heikkila, A., Usenius, A. & Sauter, U. H. 2015. Potentially increased sawmill yield from hardwoods using X-ray computed tomography for knot detection. Annals of Forest Science, 72, 57-65.

Van den Bulcke, J., Boone, M., Van Acker, J. & Van Hoorebeke, L. 2009. Three-Dimensional X-Ray Imaging and Analysis of Fungi on and in Wood. Microsc. Microanal., 15, 395–402.

Appendix

Foton, visuellt av mantelytor

Följande bilder visar de stockar som uppvisade visuella skador. Inga bilder togs på skadorna från stam 9.

Figur 19. Vänster: Stam 1–1. Mitten: Stam 1–2. Höger: Stam 1–3. Bilderna är kontrastjusterade.

Figur 20. Vänster: Stock 2–1. Mitten: Stock 2–2. Vänster: Stock 3–2. Bilderna är kontrastjusterade.

Figur 21. Vänster: stock 5–1. Mitten: Stock 5–2. Höger: Stock 6–2. Bilderna är kontrastjusterade.

Figur 22. Vänster: stock 7–3. Mitten: Stock 9–2, skada #1. Höger: Stock 9–2, skada #2. Bilderna är kontrastjusterade.

Grunddata stamsår

Tabell 6. Yttre mätningar av utbredningen för stamsår och deformation/assymetri i stockens längd. Siffrorna under kolumnerna botten och topp anger avståndet från rotändan av stocken till början av stamsår eller deformation (botten) och avståndet från rotändan till slutet av stamsår eller deformation (topp). Differensen mellan botten och topp anger längden på stamsår eller deformation. *siffra inom parentes anger nummer på skada ifall stocken hade fler än ett stamsår.

Stocknr	Trolig ingång (m)	Ingångs-typ	Stamsår-synligt (m)			Deformation (m)		
	(parentes = gissning)		Botten	Topp	Längd	Botten	Topp	Längd
1–1	2,33	Kvist	2,14	2,57	0,43	1,3	3,15	1,85
1–2	1,08	Kvist	0,7	1,45	0,75	0,5	2,1	1,6
1–3 (1) *	0,3	Kvist	0,15	0,45	0,3	0	0,8	0,8
1–3 (2) *	1,48	Kvist	1,35	1,5	0,15	-	-	-
2–1	(0,4)	-	0	0,9	0,9	0	0,9	0,9
2–2	2,28	Kvist	2,1	2,5	0,4	1,9	2,6	0,7
3–2	1,65	Kvist	1,5	1,85	0,35	1,1	2,75	1,65
5–1	(1,93–2,05)	-	1,8	2,3	0,5	1,3	3,3	2
5–2	1,85	Kvist	1,4	2,4	1	1,4	2,8	1,4
6–2 (1) *	(2,10–2,50)	-	1,85	2,9	1,05	1,7	4,2	2,5
6–2 (2) *	3,38	Kvist	3,05	3,6	0,55	-	-	-
7–3	(2,22)	-	1,9	2,55	0,65	1,4	3,2	1,8
9–2 (1) *	(1,50–2,00)	-	1,1	2,25	1,15	0,9	2,6	1,7
9–2 (2) *	-	-	3,4	4,3	0,9	-	-	-
10–2	(2,10–2,60)	-	1,8	2,8	1	-	-	-

Tabell 7. Jämförelse av inre skadelängd (perifert respektive centralt mått) och yttre skadelängd.

STOCK #	SÅR #	CT CENTRALT LÄNGD (MM)	CT PERIFERT LÄNGD (MM)	YTTRE SÅRLÄNGD (MM)
1–1	1	951	1376	430
1–2	1	1143	2952	750
1–3	1	380	3328	300
1–3	2	70	558	150
2–1	1	1171	3735	900
2–1	2	1535	3735	-
2–2	1	1159	2516	400
3–2	1	576	2615	350
5–1	1	817	2494	500
5–2	1	974	2806	1000

6–2	1	1712	2817	1049
6–2	2	516	1324	550
7–3	1	864	1867	650
9–2	1	1969	4675	1150
9–2	2	1405	4675	900
10–2	1	1580	4264	1000