



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 18/2025

Männyn pinta- ja sydänpuun ominaisuudet ja käytettävyys

Anni Harju, Erkki Verkasalo ja Martti Venäläinen

**Luke**

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 18/2025

Männyn pinta- ja sydänpuun ominaisuudet ja käytettävyys

Anni Harju, Erkki Verkasalo ja Martti Venäläinen



Euroopan unionin
osarahoittama



POHJOIS-KARJALA
Maakuntaliitto

Viittausohje:

Harju, A., Verkasalo, E. ja Venäläinen, M. Männyn pinta- ja sydänpuun ominaisuudet ja käytettävyys. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 18/2025. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 65 s.

Anni Harju ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5938-1851>



ISBN 978-952-419-027-5 (Verkojulkaisu)

ISSN 2342-7639 (Verkojulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-419-027-5>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Anni Harju, Erkki Verkasalo ja Martti Venäläinen

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2025

Julkaisuvuosi: 2025

Kannen kuva: Kuhmo-talon Lentua-salin seinärakenteita (Anni Harju)

Julkaisun kuvat ovat tekijöiden ottamia, ellei muuta mainita.

Tiivistelmä

Anni Harju, Erkki Verkasalo ja Martti Venäläinen

Luonnonvarakeskus Savonlinna, Vipusenkuja 5, 57200 SAVONLINNA

Mäntyrun-gossa on erotettavissa pinta- ja sydänpuu, jotka poikkeavat toisistaan, rakenteelli-sesti, kemiallisesti ja käyttöominaisuuksiltaan. Tyvitukista saatu oksaton ja tasaisen vaalea pin-tapuu soveltuu erilaisiin sisäkäytön tuotteisiin. Pintapuuta on helppo kyllästää sen kestävyyttä parantavilla yhdisteillä, jolloin pintapuuta voidaan käyttää vaativissakin ulkokäyttökohteissa. Männyn sydänpuulla sen sijaan on luonnostaan monia pitkäaikaiskestävyyteen sekä mittojen ja muodon pysyvyyteen liittyviä, ympäristöystävällisen ”luomukestopuun” ominaisuuksia. Sel-laisenaan käytettynä siitä ei luonnonmateriaalina koskaan muodostu ongelmajätettä.

Puuta luonnossa hajottavat lahottajasienet ja -organismit eivät ole tervetulleita puisiin raken-teisiin, joissa ne uhkaavat pitkää käyttöikää tavoittelevien rakenteiden kestävyyttä. Käyt-tökään voidaan vaikuttaa valitsemalla kestävyyttä vaativiin kohteisiin niihin parhaiten sovel-tuvaa puutavaraa, kuten runsaasti luontaisia lahonsuoja-aineita, pinosylviinejä, sisältävää männyn sydänpuuta. Varttuneen männyn aikuispuuhun muodostunut sydänpuu soveltuu la-honkestävyyttä ja mitta- ja muotopysyvyyttä vaativiin kohteisiin kuten ikkunoiden ja ovien puitteisiin, terasseihin ja muihin säälle altistuviin rakenteisiin, jotka eivät kuitenkaan ole suo-raan kosketuksissa maahan.

Puunkäyttäjien piirissä suurimpia esteitä sydänpuun laajamittaiselle käytölle ovat tietämättö-myys sydänpuun hyvistä ominaisuuksista, tuotestandardien puuttuminen ja sydänpuutavaran tarjonnan puute. Heikkoutena on myös laajasta luontaisesta vaihtelusta johtuva sydänpuuta-varan laadun epätasaisuus. Lahonkestävyys ja siihen vaikuttavien uuteaineiden pitoisuus vaih-televat suuresti sekä runkojen sisällä että runkojen välillä. Varttuneen männyn sydänpuun ul-kokehälle aikuispuuhun syntynyt sydänpuu on kestävämpää kuin nuorpuualueelle syntynyt sydänpuu. Vaihtelun hallitsemiseksi ja hyvän laadun varmistamiseksi tarvitaan luotettavia ja nopeita puumateriaalia rikkomattomia lajitteluteknologioita.

Kun puurakenteet ja -tuotteet valmistetaan kullekin tuotteelle parhaiten sopivasta puuraaka-aineesta, hyödynnetään käytössä oleva raaka-aine viisaasti ja tehokkaasti. Tässä julkaisussa kuvaamme männyn puuaineen käytön kannalta tärkeitä ominaisuuksia ja niissä esiintyvää luontaista vaihtelua keskittyen erityisesti sydänpuun ominaisuuksiin ja sen käytön edistämi-seen. Julkaisun taustaksi olemme koonneet ja analysoineet männyn pinta- ja sydänpuuta kos-kevaa, myös aiemmin julkaisematonta, tutkimustietoa.

Asiasanat: Mänty, pintapuu, sydänpuu, pitkäaikaiskestävyys, luontainen lahonkestävyys, pi-nosylviinit, stilbeenit, puutavara, hiilivarasto, ilmastoviisaus

Sisällys

1. Johdanto	6
2. Männyn puuaineen muodostuminen ja rakenne	7
2.1. Männyn kasvutapa	7
2.2. Nuorpuu ja aikuispuu.....	8
2.3. Pinta- ja sydänpuu	8
2.4. Sisäoksat.....	10
2.5. Reaktiopuu	12
3. Männyn puuaineen käytön kannalta tärkeät ominaisuudet.....	13
3.1. Tiheys	13
3.2. Lujuus ja jäykkyys	13
3.3. Kovuus	14
3.4. Hygroskooppisuus ja kosteuseläminen	14
3.5. Pitkäaikaiskestävyys.....	15
3.6. Haihtuvat yhdisteet.....	15
3.7. Kasvuympäristön ja syntyvän vaikutus puun laatuun ja ominaisuuksiin.....	17
3.8. Kaatoajankohdan vaikutus puun ominaisuuksiin.....	18
4. Männyn pintapuun koostumus, tehtävät ja käyttöominaisuudet	19
4.1. Pintapuun koostumus ja tehtävät	19
4.2. Pintapuun käyttöominaisuudet.....	21
5. Männyn sydänpuun ominaisuudet ja niissä esiintyvä luontainen vaihtelu ...	22
5.1. Sydänpuun määrä	22
5.2. Sydänpuun uuteaineet	26
5.3. Luontainen lahonkestävyys ja sitä selittävät tekijät.....	32
6. Männyn sydänpuun luontaisen kestävyysvaihtelun hyödyntäminen	40
6.1. Sydänpuutavaran lajittelu.....	40
6.2. Metsänjalostuksen mahdollisuudet.....	42
6.2.1. Metsänjalostuksen tavoitteet Suomessa	42
6.2.2. Männyn sydänpuuominaisuuksien periytyminen	42
7. Männyn puuraaka-aine rakentamisessa ja puutuotteissa.....	44
7.1. Puuraaka-aineen käytön merkitys.....	44
7.2. Sahatavara ja sen jalosteet.....	45
7.3. Rakenne- eli insinööripuutuotteet	48
7.4. Käyttökohteet.....	49
8. Männyn sydänpuun käytön edistäminen.....	52
9. Viitteet.....	54

Alkusanat

Euroopan unionin Uudistuva ja Osaava Suomi 2021-2027 ohjelma myönsi EAKR-osarahoituksen Kainuun liitolle Itäisen Suomen elinvoiman vahvistamiseen ja Pohjois-Karjalan maakuntaliitolle kehittämis- ja investointihankkeisiin. Kainuun liitto kohdensi osarahoitusta Itäisen Suomen puutuoteklusteri (ITÄPUU) -hankkeelle ja Pohjois-Karjalan maakuntaliitto Puu-TKI-hankkeelle. Myönnetyt rahoitukset mahdollistivat tämän pitkään suunnitteilla olleen mäntypuun optimaaliseen hyödyntämiseen liittyvän julkaisun kirjoittamisen. Kiitämme hankkeiden rahoittajia niiden antamasta taloudellisesta tuesta. Kiitämme sekä ITÄPUU-hankkeen päätoteuttajaa Kuhmon kaupunkia että osatoteuttajien edustajia Oulun yliopistosta, Koillis-Suomen kehittämissyhtiötä Naturpolis Oy:stä ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Oy:stä myönteisyydestä ja kannustuksesta. FT Anna Happonen ja MMT Seppo Ruotsalainen kommentoivat käsikirjoitusta, mistä heitä kiitämme.

Savonlinnassa ja Joensuussa 19. helmikuuta vuonna 2025

Anni Harju

Erkki Verkasalo

Martti Venäläinen

1. Johdanto

Puu on Suomen merkittävin uusiutuva luonnonvara. Sen käyttö rakentamisessa, rakenne- eli insinööripuutuotteissa sekä puutuoteteollisuudessa edistää metsien kestävää hyödyntämistä ja kansallisen hiilineutraaliustavoitteen toteutumista. Kun puurakenteet ja -tuotteet valmistetaan kullekin tuotteelle parhaiten sopivasta puuraaka-aineesta, hyödynnetään käytössä oleva raaka-aine viisaasti ja tehokkaasti. Mitä pitempi elinkaari puurakenteilla ja -tuotteilla on, sitä pitempään niiden sitoma hiili säilyy varastoituneena pois kierrosta. Tätä on hyvä jatkuvasti painottaa puutuotteiden markkinoinnissa sekä puu- ja hybridirakentamisen myynninedistämässä.

Puuaineeseen sitoutuneen hiilen pitkäaikaista varastoitumista voidaan parantaa hyvin suunnitelluilla rakenteellisilla ratkaisuilla, pintakäsittelyillä sekä käyttöolosuhteiden sitä vaatiessa luontaisesti lahonkestävien puulajien ja modifioidun, kyllästetyn tai palosuojatun puutavaran käytöllä. Puulajit poikkeavat toisistaan puun käyttö- ja käsittelyominaisuuksiltaan. Suomalaisista pääpuulajeista havupuut mänty ja kuusi sopivat korkealaatuisen rakennesahatavaran sekä liima- ja viilupuun ja monikerroslevyn raaka-aineeksi. Koivu puolestaan vaaleana ja lujana on parhaimmillaan huonekalujen ja vanerin raaka-aineena.

Monilla puulajeilla voidaan erottaa pinta- ja sydänpuu, jotka poikkeavat toisistaan sekä rakenteellisesti että kemiallisesti. Männyn sydänpuulla on monia pitkäaikaiskestävyyteen sekä mittojen ja muodon pysyvyyteen liittyviä, ympäristöystävällisen "luomukestopuun" ominaisuuksia. Sellaisenaan käytettynä siitä ei luonnonmateriaalina koskaan muodostu ongelmajätettä. Suurimpia esteitä sydänpuun laajamittaiselle käytölle ovat sydänpuuta koskevan tiedon liian vähäinen tuntemus puunkäyttäjien piirissä, tuotestandardien puuttuminen ja sydänpuutavaran tarjonnan puute. Heikkoutena on myös laajasta luontaisesta vaihtelusta johtuva sydänpuutavaran laadun epätasaisuus. Sen hallitsemiseksi tarvitaan luotettavia ja nopeita puumateriaalia rikkomattomia lajitteluteknologioita.

Tämän julkaisun taustaksi olemme koonneet ja analysoineet männyn pinta- ja sydänpuuta koskevaa, myös aiemmin julkaisematonta, tutkimustietoa. Sydänpuutietoa on karttunut ja koottu yhteen tieteelliseksi julkaisuiksi jo yli 100 vuoden ajan. Useiden puulajien sydänpuuta ja uuteaineita käsittelee esim. Hillisin (1987) tunnettu oppikirja "Heartwood and Tree Exudates". Kotimaisen männyn sydänpuuta käsittelevä Löyttyniemen (1986) julkaisu "Männyn sydänpuu – luonnon kestopuuta" sisältää edelleen pätevää tietoa ja on innoittanut tekemään tämän uudella tiedolla päivitetyn koosteen. Olemme pyrkineet muokkaamaan tässä julkaisussa tutkimustiedon yleistajuisiksi tekstiksi, paikoin akateemisia mutkia oikoen. Viitteet alkuperäisiin tutkimusartikkeleihin ja alan parhaisiin oppikirjoihin palvelevat syvällisemmän tiedon tarvitsijoita.

Tavoitteemme on, että oikea tieto, tekninen osaaminen, uudet innovaatiot ja onnistunut markkinointi yhdessä johtavat tämän luonnonvaran jalostusarvon kasvattamiseen.

2. Männyn puuaineen muodostuminen ja rakenne

Tässä luvussa kuvataan puuaineen muodostumiseen ja rakenteeseen liittyviä käsitteitä ja määritelmiä: kasvutapa, ydin, kevätpuu, kesäpuu, vuosilusto eli vuosirengas, nuorpuu, aikuispuu, pinta- eli mantopuu, sydänpuu, sisäoksa ja reaktiopuu eli lyly.

2.1. Männyn kasvutapa

Puun rakenne palvelee elävän puuyksilön elintoimintoja, sen kasvua ja lisääntymistä. Rungon rakenne muodostuu kevään ja kesän kasvukauden aikana pituus- ja paksuuskasvun myötä. Männyllä kuluvan vuoden latvaverson kasvu määräytyy suurelta osin ennalta edellisen kesän kasvuolosuhteiden perusteella. Kasvukauden loppupuolella latvaan ja oksiin muodostuvat päätesilmut, joihin syntyvät neulasten aiheet. Seuraavana vuonna kasvun alkaessa silmut puhkeavat ja vuosikasvaimet sekä neulaset venyvät täyteen mittaansa. Pituuskasvu ajoittuu kasvukauden alkuun. Samanaikaisesti pituuskasvun kanssa alkaa rungon paksuuskasvu, joka on kiivaimmillaan pituuskasvun loppuvaiheessa.

Männyllä oksat kehittyvät säännöllisinä oksakiehkuroina saaden alkunsa päätesilmun ympärillä olevista sivusilmuista. Kiehkuroiden väliin ei synny missään vaiheessa uusia oksia, joten runkopuussa on vuotuisen pituuskasvun verran oksatonta puuta. Pituuskasvun lisäksi oksakulma vaikuttaa jossain määrin siihen, kuinka pitkäksi oksakiehkuroiden välissä oleva oksaton alue muodostuu. Mitä lähempänä oksakulma on suorakulmaa, sitä enemmän häiriötöntä runkopuuta oksakiehkuroiden väliin jää.

Puun paksuuskasvun tapa käy ilmi mäntytykin päästä rungon poikkileikkausta tai puusta kairattua lastua (Kuva 1) tarkastelemalla. Sisimpänä rungossa on muutaman millimetrin halkaisijaltaan oleva hohkainen **ydin**. Ydintä ympäröivät samankeskiset vaaleat ja tummat renkaat, joista vaaleat renkaat ovat **kevätpuuta** ja tummat **kesäpuuta**. Saman kasvukauden alussa syntyvä kevätpuu ja loppupuolella syntyvä kesäpuu muodostavat vuosirenkaan eli **vuosiluston** (ks. esim. Kuvat 1 ja 2). Vuosilustossa ohutsoluseinäinen kevätpuu on aina ytimen puolella ja ulkolaidaltaan tarkkarajainen paksusoluseinäinen kesäpuu on puolestaan kuoren puolella. Jokainen vuosilusto vastaa siis yhden kasvukauden, eli yhden vuoden, kasvua. Puun iän voikin arvioida laskemalla vuosilustojen lukumäärän joko kasvukairalla puun rungosta ydinkeskisest otetusta lastusta, kaadetun rungon tyveltä tai kannon päästä (ks. Liite 1).



Kuva 1. Mäntyrunгон läpi ytimen kautta kairattu kasvukairanlastu. Rungon ydin näkyy keskellä tummana laikkuna. Vaaleat juovat ovat kevätpuuta ja tummat kesäpuuta. Sydänpuu erottuu vaaleana ja kuivana, pintapuu tummana ja kosteana.

Yksittäisessä puussa kunkin vuosiluston leveys on riippuvainen puun kasvutilasta, kasvupaikan ravinteisuudesta, kasvukauden sääolosuhteista sekä puun iästä tai mahdollisista puuta kiuksanneista hyönteisistä tai sienistä. Yleensä puun vanhetessa vuosilustot kapenevat

paksuuskasvun myötä, paitsi metsikön harvennuksen ja lannoituksen jälkeen ne voivat myös levetä. Jos puut kasvavat vähäravinteisessa maaperässä ja ankarissa ilmasto-olosuhteissa, vuosilustot jäävät kapeiksi jo nuorissa puissa.

2.2. Nuorpuu ja aikuispuu

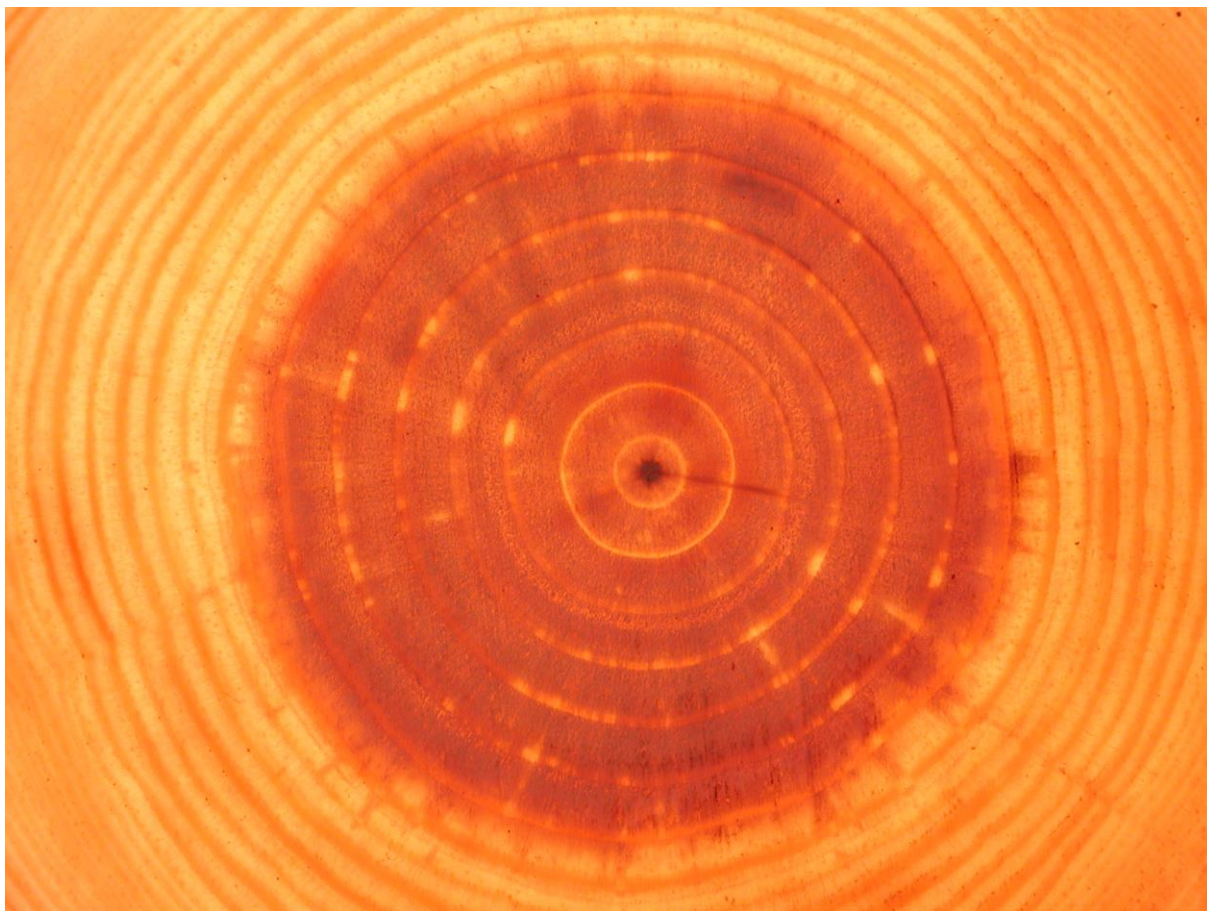
Rungon ydintä ympäröiviä sisimpiä, usein leveitä vuosilustoja kutsutaan **nuorpuuksi**. Nuorpuu syntyy puun latvan alueella nuoren jäljen muodostamana. Tärkeimmät nuorpuun rakenteelliset piirteet ovat soluseinän suuri mikrofibrillikulma sekä solujen lyhyys ja ohutseinäisyys (Kärkkäinen 2003, luku 15.7.5). Nämä kaikki ovat puun käyttökelpoisuuden kannalta ei-toivottuja ominaisuuksia.

Jäljen ikääntyessä ja puun samalla kasvaessa paksuutta uudet syntyvät lustot ovat yhä enemmän **aikuispuun** kaltaisia. Aikuispuu muodostuu ominaisuuksittain eritahtisesti, joten rajanveto nuorpuuhun vaihtelee ja sen rajaaminen on riippuvainen kuhunkin käyttötarkoitukseen vaikuttavista anatomisista piirteistä. Mutz ym. (2004) havaitsivat, että männyllä kesäpuun tiheys muuttui selvästi keskimäärin 22 vuoden kohdalla. Tiheysmuutos osui 18–27 ikävuoden kohdalle 95 % todennäköisyydellä. Karlsson ym. (2013) tekemässä tutkimuksessa mäntykuidun pituuden mukaan tehdyissä arvioissa aikuispuuta alkoi rinnankorkeudella muodostua 17–28 ikävuoden kohdalla. Heidän tutkimuksessaan istutustiheydellä ja metsänhoitotoimenpiteillä oli suuri vaikutus nuorpuun määrään. Tiheällä alkuvaiheen kasvatuksella saatiin nuorpuulustojen leveyttä ja nuorpuuosuuden läpimittaa pienennettyä rungon tyviosassa. Wilhelmsson ym. (2002) määrittelivät nuorpuuhun kuuluvaksi 15 sisintä lustoa, mutta eivät kerrooneet, millä perusteella olivat määritelleet nuorpuun.

2.3. Pinta- ja sydänpuu

Kuoren alla olevaa puunrungon ulointa osaa kutsutaan **pintapuuksi**, joskus siitä käytetään myös termiä **manto**. Nuorilla männyillä puuaine on kauttaaltaan veden ja ravinteiden kuljetussolukkona toimivaa ja eläviä soluja sisältävää pintapuuta. Pintapuun solut muodostuvat rungon ulko-osaan jäljen sisäänpäin jakautuneista soluista. Ulospäin jakaantuneista jäljen soluista muodostuu nila.

Männyn ikääntyessä ja kasvaessa paksuutta pintapuun sisäosissa ydintä ympäröivät elävät solut kuolevat ja rungon sisimpään osaan muodostuu vain kuolleita soluja sisältävää **sydänpuuta**. Etelä-Suomessa sydänpuun muodostuminen alkaa puiden saavuttaessa 20–40 vuoden iän (Lappi-Seppälä 1952, Uusitalo 2004). Sydänpuuta kertyy ytimeistä kuoreen päin vajaan luston verran vuosittain (esim. Björklund 1999, Uusitalo 2004) ja kyseessä on palautumaton tapahtumaketju. Aluksi sydänpuu muodostuu raaka-aineominaisuuksiltaan heikolle nuorpuualueelle, jota voidaan kutsua **nuorsydänpuuksi** (Kuvat 1, 2 ja 3 vasen). Rungon kasvaessa paksuutta ja tuottaessa uusia pintapuulustoja, sydänpuun määrä kasvaa vuosi vuodelta ja lusto lustolta ja lopulta se ulottuu nuorpuualueelta aikuispuualueelle. Muutos sydänpuuksi tapahtuu sydänpuuta ympäröivällä kapealla **vaihettumisvyöhykkeellä** monimutkaisten säädelyjen prosessien ohjaamana, joiden seurauksena solut kuivuvat, kuolevat ja niissä varastoravintona toimineet yhdisteet käytetään soluonteloihin, soluseiniin ja huokoskalvoihin kertyvien sydänpuuyhdisteiden tuottamiseen (Fengel 1970, Gustafsson 2001, Kampe & Magel 2013, Nakaba & Funada 2024). Sydänpuun raja ei kuitenkaan seuraa tarkasti vuosilustoja missään suunnassa (Kuva 2) (esim. Lappi-Seppälä 1952).



Kuva 2. Sydänpuun muodostuminen on alkanut noin 40 vuotta vanhan istutusmännyn rungossa. Valopöydän päälle asetellussa ohuessa puukiekossa kuiva sydänpuu näkyy tummana ja veden kyllästämä pintapuuta vaaleana.

Vastakaadetun mäntyrunгон poikkileikkauspintaa tarkasteltaessa sydänpuu erottuu selvästi pintapuuta kuivempana ja vaaleampana (Kuva 3, vasen). Kun vettä latvukseen kuljettaneen pintapuun kosteus haihtuu, sydänpuuta voi olla hetken aikaa vaikea erottaa kuivuneesta pintapuusta (Kuva 3, keskellä). Silloin sydänpuun tunnistamiseksi tarvitaan erikoismenetelmiä, kuten jotain sydänpuureagenssia (esim. Nordic requirements ... 2017) tai pinosylviinien fluoresenssin hyödyntämistä (Antikainen ym. 2012, Belt ym. 2022) (Kuva 5). Pitkäaikaisen UV-säteilyn vaikutuksesta sydänpuussa olevissa uuteaineissa tapahtuu kemiallisia muutoksia, joiden seurauksena sydänpuun väri muuttuu selvästi pintapuuta tummemmaksi (Kuva 3, oikealla). Kuusella vastaavia värimuutoksia ei tapahdu ja lehtikuusella tuoreenkin puun sydänpuu on tummaa. Puulajien väliset erot johtuvat erilaisista uuteainekoostumuksista.

Kun puurakenne altistuu sääräsitukselle eli auringonvalon, lämpötilavaihtelun ja sateen yhteisvaikutukselle, käsittelemättömän puun pintakerros harmaantuu ajan myötä (kuva 4).



Kuva 3. Männyyn pinta- ja sydänpuun ulkoasu: Vasemmalla tuore puu heti kaatamisen jälkeen, keskellä kuivunut puu ja oikealla kuivunut auringon säteilylle altistunut tukin pää. Vasemmanpuoleisessa kuvassa sydänpuuta on muodostunut vasta nuorpuualueelle, kun taas oikeanpuoleisessa kuvassa sydänpuuta on myös aikuispuualueella.



Kuva 4. Säärasitukselle altistumisen seurauksena harmaantunut tuulimyllyn puupinta.

2.4. Sisäoksat

Kun mäntyrunko sahataan pituussuunnassa, useimmiten saheissa näkyy useita rungon sisällä olevia oksan osia, sisäoksia (ks. Kuva 3 keskellä, Kuva 5, Kuva 6). Sisäöksassa on aina kiinteästi runkopuuhun yhteydessä oleva oksan elävä osa ja sen lisäksi saattaa olla runkopuusta irrallaan oleva kuollut osa (kuva 5). Elävät oksat ovat kiinteässä yhteydessä runkopuuhun ja puun kasvaessa paksuutta elävän oksan tyvi jää vähitellen yhä enemmän rungon sisään. Tätä osaa kutsutaan **terveeksi sisäöksäksi**. Kun alimmat oksat kuolevat ja kuivuvat, niiden tyven yhteys

runkopuuhun estyy. Puun kasvaessa paksuutta kuivan oksan tyvi jää vähitellen rungon sisään ja muodostuu runkopuusta irti oleva **kuiva sisäoksa** (Kuva 5).

Oksien koko on riippuvainen puun läpimitan kasvunopeudesta. Mitä leveämpiä runkopuun vuosilustot ovat, sitä nopeammin oksatkin kasvavat paksuutta ja sitä enemmän niitä on (esim. Kärkkäinen 2003). Jos kasvavassa puussa oleva oksa katkeaa tai se karsitaan pois, oksan tynkä peittyy eli kylestyy muutaman kasvukauden kuluessa rungon sisään (Kuva 6). Oksien synty-
mekanismiin vuoksi sisäoksia on väistämättä rungon nuorpuualueella sekä sitä ympäröivän aikuiskuun alueella. Mitä aikaisemmin kuolleet oksat karsiutuvat tai ne karsitaan metsänhoito-
toimenpiteenä, sitä enemmän muodostuu oksatonta aikuiskuuta. Oksatonta sydänpuuta syn-
tyy merkittävän paksuinen kerros vain hyvin vanhojen mäntyjen tyville. Pystykarsituissa run-
goissa oksaton sydänpuu alkaa lähempää ydintä.



Kuva 5. Sisäoksa mäntyrungon pitkittäisleikkauksessa. Vasemmalla on UV-säteilylähteen alla otettu kuva ja oikealla huonevalaistuksessa otettu kuva. UV-säteily (n. 315-318 nm aallonpituus) paljastaa eri sinisen sävyinä ilmenevänä fluoresenssina asioita, joita ei näy huonevalaistuksessa. Männyksen sydänpuu erottuu kirkkaan sinisenä sekä runkopuussa että sisäoksassa ja pintapuuna näyttyy tumman sinisenä. Kummassakin kuvassa näkyy sekä tervettä että kuollutta, ruskeareunaista, sisäoksa. (Kuvan näytteenottoa viittaa julkaisussa Karppanen ym. (2007) tutkittuun sisäoksa-aineistoon.)



Kuva 6. Pystykarsinnan jälkeen nopeasti kylestynyt sisäoksa. Kuva: Luke/Erkki Oksanen

2.5. Reaktiopuu

Jos puu joutuu jostain syystä kasvamaan vinossa asennossa, muodostuu sen runkoon **reaktiopuuta**, jota havupuilla kutsutaan **lylyksi**. Lisäksi sitä syntyy suurten oksien ja eri syistä alkunsa saaneiden mutkien kohdalle. Havupuilla reaktiopuu muodostuu vinon rungonosan alapuolelle puun pyrkiessä oikaisemaan sen avulla kasvutapaansa. Rungon poikkileikkauksessa reaktiopuu havaitaan tummina paksuina luistoina ja rungon epäkeskisyytenä (Kuva 7). Sahapuussa reaktiopuu tuottaa suuria ongelmia, koska se on tuoreena erittäin kovaa, kuivana haurasta ja koska solurakenteensa vuoksi lylyinen puu kiertyy kuivuessaan. Sahatavarassa reaktiopuu onkin lujuteen vaikuttava rakennevika samoin kuin sisäoksat, vinosyisyys ja nuorpuu. (Kärkkäinen 2003, Pohjoismainen sahatavara 2020)



Kuva 7. Lylyksi kutsuttu reaktiopuu näkyy männyn rungon poikkileikkauksessa tummina paksuina luistoina, jotka tekevät rungosta ytimen suhteen epäkeskisen. Kuva: Luke/Erkki Oksanen.

3. Männyn puuaineen käytön kannalta tärkeät ominaisuudet

3.1. Tiheys

Puuaineen tiheys on puutavaran käytön kannalta olennainen ominaisuus, koska se vaikuttaa puun painoon, kovuuteen, lujuuteen ja kosteuselämiseen. Puuaines on sitä tiheämpää, mitä enemmän vuosilustoissa on tummaa paksuseinäistä kesäpuusolukkoa suhteessa vaaleaan ohutseinäiseen kevätpuusolukkaan. Tätä määräsuhdetta kutsutaan kesäpuuosuudeksi ja se ilmaistaan kesäpuuprosenttina. Lisäksi tiheyteen vaikuttaa erityisesti kevätpuun solujen koko: mitä isommat kevätpuun soluontelot ovat, sitä alhaisempi on tiheys (Hannrup ym. 2001).

Puuaineen tiheydellä ja vuosiluston leveydellä on tilastollinen riippuvuus. Kärkkäisen (2003) mukaan tämä johtuu yleisen käsityksen mukaan siitä, että vuosiluston leveyden kasvaessa kevätpuun osuus lisääntyy. Tiheyden aleneminen luston leveyden kasvaessa on kuitenkin vähäinen, jos vertaillaan saman ikäisiä lustoja. Aikuispuun kapeiden lustojen tiheyden ja nuorpuun leveiden lustojen tiheyden välillä on paljon voimakkaampi negatiivinen korrelaatio. Kärkkäisen (2003) mukaan suomalaisissa mäntytutkimuksissa nuorpuun mukaan ottaminen tai sen poistaminen on vaikuttanut siihen, kuinka suuren osuuden tiheysvaihtelusta vuosiluston leveys on selittänyt (10–30 %).

Männyn kuorettoman puuaineen kuivatuoretiheydelle (paino kuivana, tilavuus tuoreena, ks. esim. Saranpää 1997) esitetään arvoja, jotka vaihtelevat välillä 370–550 kg/m³. Vaihteluväli onkin pelkkää keskiarvolukua parempi tapa kuvata muuttujaa, jossa on suuri luontainen vaihtelu. Merkittävä osa vaihtelusta pystytään selittämään yksittäisen rungon sisäisellä systemaattisella vaihtelulla. Säteensuuntaista vaihtelua selittää Grekinin ja Verkasalon (2010) aineisto, jossa sisimmän nuorpuun tiheys oli Etelä- ja Keski-Suomen männyillä yli 100 kg/m³ alhaisempi kuin aikuispuun eli tukin pintaosan. Koska nuorpuun suhteellinen osuus kasvaa latvaa kohti, se selittää Tammisen (1962) tutkimukseen perustuvan nyrkkisäännön ”tyvipuun tiheys on 100 kg/m³ korkeampi kuin latvapuun” (Puuinfo <https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/manty-ja-kuusi/>). Sydänpuuksi muuttumisen yhteydessä uuteaineiden kasautuminen kasvattaa puuaineen tiheyttä jonkin verran. Maantieteellisellä alueella on merkittävä vaikutus keskimääräiseen tiheyteen: Etelä- ja Keski-Suomessa mäntypuu on selvästi painavampaa kuin Pohjois-Suomessa (Grekin ja Verkasalo 2010).

3.2. Lujuus ja jäykkyys

Puuaineen lujuudella tarkoitetaan sen kykyä vastustaa voimaa, joka pyrkii muuttamaan puukappaleen kokoa tai muotoa. Rasittava voima voi olla taivutusta, vetoa, puristusta tai leikkausta. Jäykkyydellä tarkoitetaan puukappaleen kykyä palautua alkuperäiseen muotoonsa tai kokoonsa voiman vaikutuksen loputtua. Jos kappale palautuu ennalleen voiman vaikutuksen lakattua, ainetta sanotaan kimmoisaksi eli elastiseksi. Puu käyttäytyy lyhytaikaisessa kuormituksessa elastisesti, ellei murtorajaa ylitetä. Pitkäaikaisessa kuormituksessa muodonmuutokset voivat muuttua pysyviksi. Lujutta mittaavana suurena käytetään murtolujuutta (MOR, lyhenteenä termistä Modulus of Rupture). Jäykkyyttä mittaava suure on puolestaan kimmo-kerroin (MOE, Modulus of Elasticity). (Aiheesta tarkemmin esim. Kärkkäinen 2003).

Puuaineen lujuus- ja jäykkyysominaisuudet vaihtelevat säteen, tangentin ja pituusakselin suunnassa kuten tiheyskin. Ominaisuuksiin vaikuttavat lisäksi rakenteessa olevat epäsäännöllisyydet kuten sisäoksat, halkeamat ja reaktiopuu. Lujuusominaisuuksiltaan mänty ja kuusi ovat suunnilleen tasaveroisia kantavien rakenteiden materiaalina, erot syntyvät lähinnä tiheys- ja oksaisuuseroista. Puutuotteiden raaka-aineena koivu on lujempaa, mutta myös painavampaa.

3.3. Kovuus

Kovuudella tarkoitetaan puuaineen kykyä vastustaa kiinteän kappaleen painumista puun sisälle. Se on suhteellinen käsite, jonka lukuarvo on täysin riippuvainen koekappaleen tiheydestä, mittaussuunnasta, mittausmenetelmästä ja mittayksiköstä. Tämä vaikeuttaa huomattavasti eri lähteistä saatavien lukuarvojen vertaamista. Tällä hetkellä useimmilla verkkosivuilla näkyvät lukuarvot ovat Brinell-menetelmän mukaisia (HB) ja lukuarvojen (mainitsematta jätetty, ei SI-järjestelmän mukainen) yksikkö on kp/mm^2 (ks. esim. <https://puuinfo.fi/puu-tieto/puulajit/manty-pinus-silvestris/>, <https://triofloor.fi/wp-content/uploads/1puula-jiopas2013.pdf>). Männyn ja kuusen puuaineen kovuus on suunnilleen sama silloin kun niiden tiheys on sama. Kuusi keskimäärin keveämpänä on käytännössä jonkun verran pehmeämpää kuin mänty. Molemmilla puulajeilla pölkyn päädyn kovuus on kaksinkertainen verrattuna tangentin tai säteen suuntaan (Holmberg 2000, Grekin & Verkasalo 2013). Rauduskoivu on havupuita huomattavasti kovempaa. Jos männyn keskimääräistä kovuutta merkittäisiin arvolla 100, kuusen kovuus olisi keskimäärin 85 ja rauduskoivun 170 (Kärkkäinen 2003).

3.4. Hygroσκοoppisuus ja kosteuseläminen

Puu on hygroσκοoppinen materiaali eli se pyrkii imemään vettä ympäröivän ilman vesihöyrystä, kunnes saavuttaa tasapainokosteuden ympäröivän ilman kosteuden kanssa. Puuaineen rakennemolekyyleistä erityisesti hemiselluloosalla ja selluloosalla on voimakas vedensitomiskyky. Veden imeytyessä soluseiniin ne turpoavat, kun taas veden haihtuessa soluseinät kutistuvat, mikä havaitaan myös puukappaleen ulkomittojen muutoksena. Tätä ilmiötä kutsutaan kosteuselämiseksi. Soluseinä pystyy sitomaan vain rajallisen määrän vettä. Maksimitasoa kutsutaan **puun syiden kyllästymispisteeksi** tai kuitukyllästyspisteeksi. Tämä piste on samalla käänneaste soluseinän muodonmuutoksille. Soluonteloon ja soluseinien välisiin rakoihin tunkeutuva vapaa vesi tai sen kuivuminen eivät aiheuta puukappaleessa muodonmuutoksia.

Männyn sydänpuulla on Koposen (1985) mukaan alhaisempi tasapainokosteus kuin pinta-puulla. Tässäkin ominaisuudessa on havaittu puiden välistä vaihtelua (Karppanen 2008: Kuva 2). Sääkaappikokeessa koekappaleiden sydänpuuosuuden kasvu johti pienempiin kosteusmuutoksiin (Venäläinen ym. 2016). Koska useilla muillakin puulajeilla kuin männyllä tehdyt kokeet osoittavat puuaineen uuttamisen nostavan tasapainokosteutta on päätelty, että sydänpuun alhaisempi tasapainokosteus johtuu uuteaineista (Kärkkäinen 2003). Alhaisemman tasapainokosteuden ansiosta sydänpuun kosteuseläminen ja siitä johtuvat muodonmuutokset ovat vähäisempiä kuin pintapuulla. Puurakenteessa, kuten esimerkiksi laitalattiassa tai seinäpaneelissa, voimakas kosteuseläminen aiheuttaa saumojen rakoilua.

Puun ominaisuudet vaihtelevat eri leikkaussuunnissa (anisotrooppinen materiaali), ja se ilmenee myös puupinnan kosteuselämisessä. Kutistuminen ja turpoaminen tapahtuvat eri tavoin pituuden, säteen sekä tangentin suunnassa ja ne ovat voimakkaimmillaan tangentin

suuntaisissa pinnoissa. Tämän ilmiön vuoksi sahaussuunnalla voidaan vaikuttaa saheen kosteuselämiseen. Säteensuuntainen sahauspinta halkeilee kuivuessaan vähemmän kuin tangentin suuntainen pinta (Venäläinen ym. 2016) ja esimerkiksi säteensuuntaisista saheista tehty lattiapinta tai ulkopaneeli rakoilee vähemmän.

Turpoamisen, kutistumisen ja halkeilun lisäksi puun kosteuseläminen aiheuttaa kieroutumiseksi, vääntymiseksi ja kupertumiseksi kutsuttuja muodonmuutoksia. Nämä ilmenevät erityisesti puutavaran kuivauksessa ja aiheuttavat puutavaraan muotovikoja (Pohjoismainen sahatavara 2020).

3.5. Pitkäaikaiskestävyys

Pitkäaikaiskestävyydellä tarkoitetaan puuaineen luontaista tai erilaisilla käsittelyillä aikaan saatua kykyä vastustaa elollisista tai elottomista syistä johtuvaa puutuotteen tai -rakenteen käyttöiän lyhenemistä. Elollisia syitä ovat lahottaja- ja homesienet, bakteerit ja hyönteiset. Elottomia syitä ovat auringon UV-säteily, lämpö ja vesi, jotka yhdessä aiheuttavat säärasi-tukseksi kutsutun ilmiön. Käyttöiän lyheneminen voi johtua teknisten tai esteettisten ominaisuuksien heikkenemisestä. Käyttöikään vaikuttavaa mekaanisen kulutuksen kestävyyttä ei yleensä ajatella pitkäaikaiskestävyyden käsitteeseen kuuluvaksi.

Männyn pinta- ja sydänpuun pitkäaikaiskestävyyttä käsitellään seikkaperäisesti luvussa 5.

3.6. Haihtuvat yhdisteet

Puun hajuun liittyy varsinkin vanhempiin sukupolviin kuuluvilla henkilöillä voimakkaita tunnelatauksia, sillä haju on tuttua ja sitä pidetään yleensä miellyttävänä (Englund 1999). Haju johdetaan puun pinnalta haihtuvista kemiallisista yhdisteistä. Käsittelemättömästä puusta haihtuu päästöinä ensisijaisesti puuhun luontaisesti sen kasvun aikana syntyneitä orgaanisia haihtuvia yhdisteitä, jotka luokitellaan eri ryhmiin niiden haihtumislämpötilan perusteella (Taulukko 1). Ympäristön olosuhteiden vaikutuksesta puusta voi vapautua myös erilaisia puun rakenneosien hajoamistuotteita, joiden koostumus on riippuvainen sekä puulajista että rungon osasta (Pitkäranta 2016). Ajan myötä materiaaleja hajottavat esimerkiksi mekaaninen kuluminen, otsoni, UV-säteily, kosteus ja lämpö (Wolkoff 1999). Sekä ilmanvaihdon tehokkuus että sisäilma- massa olevat muut yhdisteet vaikuttavat haihtuvien yhdisteiden pitoisuuteen sisäilmassa (Hänninen & Asikainen 2013, Pohleven ym. 2019). Puusta haihtuvia yhdisteitä voidaan tutkia joko määrittämällä niiden päästöjä puuaineesta tai esimerkiksi mittaamalla niiden pitoisuuksia sisätiloissa (esim. Alapieti ym. 2020).

Taulukko 1. Haihtuviin yhdisteisiin liittyvät lyhenteet ja niiden määritelmät. (Harju ym. 2021)

Lyhenne	Englanniksi	Suomeksi	Määritelmä
VOC	Volatile organic compounds	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet	Kiehumispiste 50-100...240-260 °C, höyrynpaine >10 ⁻² kPa
VVOC	Very volatile organic compounds	Erittäin haihtuvat orgaaniset yhdisteet	Kiehumispiste >0...50-100 °C, höyrynpaine >15 kPa
SVOC	Semi volatile organic compounds	Puoli haihtuvat orgaaniset yhdisteet	Kiehumispiste 240-260...380-400 °C, höyrynpaine 10 ⁻² -10 ⁻⁸ kPa
TVOC	Total volatile organic compounds	Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaismäärä	

Lyhyen aikaa asennettuna olleet puutuotteet voivat aiheuttaa hyvinkin suuria päästöarvoja sisäilmaan (THL 2023). Tuoreen havupuun aineen päästöt saattavat olla jopa satakertaiset lehtipuun aineen päästöihin verrattuna (Jensen ym. 2001). Männyllä suurin haihtuvien yhdisteiden ryhmä on terpeenit (Harju ym. 2021: Liitteet 1–3) ja männyn sydänpuun päästöjen on todettu olevan moninkertaiset pintapuun päästöihin verrattuna (Czajka ym. 2020). Sivula (2020) osoitti suomalaisen männyn VOC-päästöjen vaihtelevan voimakkaasti sen mukaan, mikä on ympäröivän ilman suhteellinen kosteus ja sitä vastaava puun kosteussuhde. Ilman suhteellisen kosteuden kasvaessa päästöt lisääntyivät ja suhteellisen kosteuden laskiessa päästöt taas alenivat. Tuoreen mäntytavaran sydänpuun päästöissä vallitsivat terpeenit ja pintapuun päästöissä aldehydit (Sivula 2020).

Ajan kuluessa puutuotteista haihtuvien yhdisteiden määrä sisäilmassa alenee voimakkaasti (Harju ym. 2021: Liitteet 1–3). Silloin muiden säännöllisesti käytettävien päästölähteiden, kuten hajustettujen siivouskemikaalien, suhteellinen merkitys rakennusten sisäilman laadun muokkaajana kasvaa (Harju ym. 2021). Jos rakennuksessa on koneellinen ilmanvaihtojärjestelmä, sillä on huomattavasti suurempi vaikutus sisäilman laatuun kuin rakennusmateriaaleista tai sisustustuotteista vapautuvilla päästöillä.

Vaikka kaikista puulajeista haihtuu yhdisteitä sisäilmaan, niiden pitoisuudet ovat yleensä niin alhaisia, ettei puun käyttöä sisätiloissa ole rajoitettu. Sekä EU- että kansallisella tasolla on määritetty raja-arvoja, jotka eivät saa ylittyä. Suomalaisessa päästöluokituksessa puu luokitellaan vähäpäästöiseen M1-luokkaan (ks. Sivula 2020). Eniten puusta haihtuvat yhdisteet vaikuttavat esimerkiksi hirsirakenteissa, joissa on laajoja käsittelemättömiä puupintoja.

Pintakäsittelyillä voidaan vähentää puupinnoilta haihtuvien yhdisteiden määriä, mutta samalla tuotetaan uudenlaisia päästöjä ja menetetään käsittelemättömään puupintaan liittyvät hyödyt. Puun pinnoittaminen vähentää tai jopa estää puusta haihtuvat päästöt ja pinnoitteet itsessään saattavatkin tuottaa enemmän päästöjä kuin pinnoitteen peittämä puu.

Tutkimustulokset viittaavat siihen, että puun ikääntymiseen verrattavissa olevat modifiointiprosessit, kuten lämpökäsittely, laskevat aldehydi- ja terpeenipäästöjä. Lämpökäsittelyn jälkeen havupuutavaran VOC-päästöt ovat sitä alhaisemmat, mitä korkeampi käsittelylämpötila on ollut (Pohleven ym. 2019).

3.7. Kasvuympäristön ja syntyvän vaikutus puun laatuun ja ominaisuuksiin

Kasvupaikan viljavuus ja erityisesti yksittäisen puun käytössä oleva kasvutila ja valon määrä vaikuttavat rungon pituus- ja tilavuuskasvuun sekä oksien paksuuteen ja elinikään. Kasvupaikan luontaista viljavuutta ei voi säädellä, kun taas kasvutilaan sekä valon määrään voi vaikuttaa puuston alkutiheydellä ja harventamisen ajoituksella ja voimakkuudella. Vuotuinen pituuskasvu näkyy mäntypuutavarassa oksakiehkuroiden välissä olevan oksattoman alueen puituutena, ja tilavuuskasvun nopeuserot näkyvät vuosilustojen leveydessä. Rungon lopulliseen kokoon hakkuuhetkellä vaikuttaa ratkaisevasti puun ikä ja tehdyt harvennukset. Terveiden ja kuolleiden sisäoksien koko puunrungon tyven alueella on riippuvainen oksien paksuudesta puun nuoruusvaiheessa. Puutavaran laatua voidaan parantaa pystykarsinnalla, jonka ansiosta sisäoksa saadaan tyhistettyä ja kylestymisen ansiosta runkoon alkaa muodostua oksaton vaippa (Kuva 6).

Pohjoisen karuilla ja etelän rehevämmillä kasvupaikoilla kasvaneiden puiden välisistä laatueroista on yleisiä käsityksiä, joita kaikkia tutkimustulokset eivät tue. Grekinin ja Verkasalon (2010) tutkimusaineiston perusteella Pohjois-Suomen mäntyjen keskimääräinen tiheys vakiintuu iästä riippumattomaan arvoon 440 kg/m³ ja Etelä-Suomessa arvoon 480 kg/m³ (tiheyden vaikutuksesta puun käyttöominaisuuksiin kerrotaan luvussa 3.1.).

Tulos on yhtenevä Kärkkäisen (2003) päätelmän kanssa: ”Mikäli kapeina lustoina näkyvän hitaamman kasvun vaikutus eliminoidaan tarkastelemalla ytimeä päin laskettuna saman ikäisiä ja paksuisia vuosilustoja, puuaineen lujuusominaisuudet ovat sekä männyllä että kuusella parhaimmillaan Etelä- ja Keski-Suomen hyvillä kasvupaikoilla” Sama saattaa päteä myös uuteainemääristä johtuvaan pitkäaikaiskestävyyteen, vaikka kiistattomia tutkimustuloksia ei ole julkaistu. Puuaineen kosteuseläminen oli kuitenkin pohjoisen männyillä vähäisempää etelän puuhun verrattuna, erityisesti verraten runsaassa sydänpuussa (Grekin & Verkasalo 2010).

Kasvuympäristöllä, maantieteellisellä alueella tai metsänhoitotoimilla voisi teoriassa olla vaikutusta puun anatomiaan, soluseinien rakenteeseen sekä uuteaineiden määrään ja koostumukseen ja sitä kautta esimerkiksi sään- ja lahonkestävyyteen, mutta tutkimustuloksia merkittävistä vaikutuksista ei ole. Kasvuympäristön ja -tilan vaikutuksesta sydänpuun muodostumisnopeuteen ja sitä kautta pinta- ja sydänpuun määrien suhteeseen ei myöskään ole havaintoja. Vaikutusten oletetaan olevan vähäisiä puun iän ja puiden välisen perinnöllisen vaihtelun rinnalla.

Päättehakkuista saatavat järeät mäntytukit ovat toistaiseksi olleet enimmäkseen peräisin luontaaisesti syntyneistä tai kylvetyistä männiköistä. Istutettujen männiköiden väljennyksistä ja päättehakkuista saatavaa tukkia on kuitenkin tulossa koko ajan enenevässä määrin teolliseen käyttöön. Tämän vuoksi kysymys metsikön syntyvän vaikutuksesta puun laatuun on aiheellinen. Männyntaimien istutuksen yleistyttyä 1960-luvulla tehtiin aluksi puun laatuun vaikuttavia virheitä, joista näkyvin oli männyn istuttaminen liian reheville kasvupaikoille. Puun laatua pilasivat myös istutustekniikka, siemenaineiston heikko geneettinen laatu ja liian pitkät alkuperäsiirrot pohjoiseen päin. Tuloksena oli liian harvassa kasvaneita, oksikkaita, usein lenkoja ja mutkaisia tyvitukkeja, jotka sisälsivät reaktiupuuta. Männyn istutus vakiintui 1980-luvulla rehevydeltään sopiville kasvupaikoille. Silloin ryhdyttiin käyttämään tarkoituksenmukaista maanmuokkausta ja siirryttiin paljasjuuristen taimien kuokkaistutuksesta kennotaimien potti-putki-istutukseen, jolla istutusten onnistumista ja puun laatua saatiin olennaisesti

parannettua. Kylvettyjen mäntyjen laatu ei nykyisin juurikaan poikkea saman tyyppisille kasvupaikoille luontaisesti syntyneistä männiköistä. Istutusmänniköiden laatuodotukset ovat kuitenkin edelleen jossain määrin heikommat suuremman kasvutilan ja viljavampien kasvupaikojen aikaan saaman nopeakasvuisuuden vuoksi. Tämä on todettu myös olemassa olevissa ainespuukokoisissa puustoissa VMI-aineiston perusteella (Verkasalo & Kilpeläinen 2014). Käytännössä puumateriaalin valinta käyttökohteeseen voidaan tehdä tukeissa ja saheissa näkyvien ja helposti mitattavien ominaisuuksien perusteella (esim. rungon ikä, koko ja oksikkuus; luston leveys ja kesäpuuosuus; sydänpuun määrä) eli ilman taustatietoa syntytavasta tai kasvulosuhteista.

3.8. Kaatoajankohdan vaikutus puun ominaisuuksiin

Talvikausi on ollut Pohjoismaissa perinteistä metsänhakuun aikaa, koska tällöin miehillä ja hevosilla on ollut vähemmän maatalouteen liittyviä töitä. Lisäksi jäänyt maa ja vesistöt ovat helpottaneet raskaiden puukuormien kuljetusta. Koneellistumisen myötä 1960-luvulta alkaen puunkorjuusta ja sahauksesta on tullut ympärivuotista toimintaa, eikä kuivattua puutavaraa eritellä kaatoajankohdan perusteella. Monet pitävät edelleenkin talvella kaadettua puutavaraa laadultaan parhaimpana ja siksi kaatoajankohdan vaikutusta puutavaran laatuun on syytä tarkastella.

Havupuurunkojen pintapuussa olevan veden määrä on, toisin kuin yleisesti luullaan, talvella suurempi kuin kesällä (Kärkkäinen 2003). Jos talvella korjattua puuta on tarpeen varastoida, se kuitenkin ehtii kuivua kevätssä ennen sinistäjäisienien kasvulle otollisia lämpötiloja, minkä vuoksi talvikorjuuseen liittyy pienempi pilaantumisriski kuin kesäkorjuuseen. Sinistymisen riski ei kuitenkaan koske sydänpuuta edes kesäaikaan. Elowsonin ym. (2003) mukaan korjuuajankohta ei vaikuta puumateriaalin myöhempään kosteuskäyttäytymiseen.

Terziev ja Boutelje (1998) totesivat, että männyn pintapuussa tärkkelyksen sekä alhaisen molekyylipainon sokereiden, sokerialkoholien ja typpiyhdisteiden määrä on talvella 1,6 kertaa korkeampi kuin keväällä kaadetuissa puissa. Myös sokereiden koostumus on erilainen. Keino-kuivauksessa ravinteet rikastuvat sahatavarakappaleiden pintaan, mikä voi lisätä talvella kaadetun puun homehtumisherkkyttä (Sehlfstedt-Persson ym. 2011).

Kansanperinteen mukaisesta uskomuksesta kuunvaiheiden vaikutuksesta kasveihin ei ole saatu tieteellistä näyttöä (Karala 2019). Puun kaatoajankohdan ja kuun sen hetkisen sijainnin yhteisvaikutuksesta vuosia aiemmin syntyneen puusolukon ominaisuuksiin on vaikea johtaa hypoteesia, jota voisi testata. Näin ollen väitteet ylä- ja alakuun aikaan kaadetun puutavaran laatueroista ovat uskomuksia, vaikka niitä Keski-Euroopassa käytetäänkin puutavaran markkinoinnissa.

4. Männyn pintapuun koostumus, tehtävät ja käyttöominaisuudet

4.1. Pintapuun koostumus ja tehtävät

Pintapuussa olennainen osa sen toimintaa on pituus- ja säteensuuntainen solujen muodostama verkosto, jota myöten kulkevat vesi, ravinteet ja yhteyttämistuotteet kaikkialle, missä niitä tarvitaan puussa. Havupuilla veden ja ravinteiden kuljetusreittinä toimivan johtosolukon muodostavat elottomat **trakeidit** (vesisolut, putkisolut). Trakeidit ovat pitkänomaisia soluja, joita yhdistävissä suipoissa päissä on veden ja siihen liuenneiden aineiden kulun mahdollistavia **huokosia**. Pintapuussa on myös eläviä, fysiologisesti aktiivisia **tylppysoluja ydinsäteissä** ja **pihkatiehyissä**. (ks. esim. Pyykkö 1980).

Rungon pituussuunnassa ja säteen suunnassa olevien pihkatiehyiden onteloja ympäröivät pihkaa tuottavat elävät tylppysolut. Säteen suuntaiset pihkatiehyet sijaitsevat ydinsäteissä, joissa vain osassa on pihkatiehyt. Suurin osa ydinsäteistä koostuu pelkästään tylppysoluista, joissa tuotetaan, varastoidaan tai kuljetetaan niissä tuotettuja yhdisteitä kuten tärkkelystä, liukoisia sokereita sekä rasva-aineita (esim. Wiedenhoef & Miller 2005). Männyn pintapuussa uuteaineet ovat lähinnä pihkatiehyissä sijaitsevaa **pihkaa**, joka muodostuu hartsihapoista ja herkästi haihtuvista monoterpeeneistä.

Jos elävän puun kuoren antama mekaaninen ja kemiallinen suojaus pettää, pintapuun suojautumisen perustuu aktiiviseen puolustautumiseen. Mekaaninen vaurio (Kuva 8) tai hyönteisen hyökkäysyritys kiihdyttää pihkantuotantoa ja käynnistää sydänpuulle tyypillisten uuteaineiden synteesin (Gustafsson ym. 2003, viitteet Harju ym. 2009 artikkelissa) sekä aiheuttaa **haava-sydänpuun** muodostumisen (Lyr 1967). Pintapuun pihka toimii kemiallisena ja mekaanisena esteenä sulkien elävään puuhun tulleet vauriot. Kun runko vaurioituu, siinä jo oleva pihka kulkeutuu vaurioalueelle, minkä lisäksi käynnistyy traumaattisen pihkan tuotanto. Kun pihka päätyy kosketuksiin ilman kanssa, terpeenit haihtuvat ja hartsihapot jähmettyvät paikalleen. Kuolleiden tai kaadetun rungon pintapuussa aktiivinen puolustus ei enää toimi, ja sen vuoksi sinistäjäsenet ja hyönteiset valtaavat kuolleen ja kostean pintapuun nopeasti (Kuva 9).



Kuva 8. Kasvukairan aiheuttama vaurio männyn pintapuussa noin vuosi kairauksen jälkeen. Lähinnä kairanreikää on voimakkaasti pihkoittunut alue. Sydänpuureagenssilla oranssiksi värjättyjä pinosylviinejä näkyy sydänpuun alueella ja vauriokohtaa koteloiduna huntuna.



Kuva 9. Kuollut pintapuu sinistyy nopeasti sinistäjäsiementen rihmastojen tunkeutuessa runsasravinteisiin pihkatiehyisiin.

4.2. Pintapuun käyttöominaisuudet

Männyn pintapuun trakeidien väliset huokokset eivät sulkeudu kuivumisen seurauksena, toisin kuin kuusella, ja siksi vettä kuljettava johtosolukko säilyy avoimena myös kuivatussa puutavarassa. Tämän takia männyn pintapuuta on helppo kyllästä liuoksilla, mutta toisaalta avoimien huokosten vuoksi pintapuu myös vetty nopeasti. Koska pintapuussa on selvästi vähemmän uuteaineita kuin sydänpuussa (esim. Verkasalo ym. 2021), sen käsittely erilaisilla pintakäsittelyaineilla (maalit, lakat, vahat) on ongelmattonta. Sydänpuulle ominaiset pinosylviinit puuttuvat vaurioitumattomasta pintapuusta (esim. Venäläinen ym. 2003), minkä vuoksi pintapuun värimuutos auringonvalon vaikutuksesta on vähäinen verrattuna nopeasti tummuvaan sydänpuuhun.

Männyn pintapuu on väritään tasaisen vaaleaa (Kuva 10) ja fysikaalisilta, mekaanisilta ja kemiallisilta ominaisuuksiltaan se on varsin tasalaatuista. Pintapuulauta ei kuivattaessa tai käytössä pahemmin kieroudu eikä vääntyile, mutta kupertua se voi voimakkaastikin. Tukkipuukokoisessa männnyssä pintapuun vuosilustot ovat kapeita. Tyven alueella pintapuu on ulko-osiltaan oksatonta tai pienioksaista, mutta sisäosiltaan usein kuivaoksaista. Oksaton pintapuu soveltuu erilaisiin sisäkäytön tuotteisiin, joissa arvostetaan sen esteettisiä piirteitä. Tuotteen käyttötarkoitukset ja käyttäjän arvostukset ratkaisevat, onko vaalean pintapuun ja tumman sydänpuun esiintyminen sekaisin toivottavaa samassa puukappaleessa esimerkiksi seinässä tai huonekalussa.



Kuva 10. Männyn pintapuu on tasaisen vaaleaa ja hyvälaatuisena oksatonta tai vähäoksaista. Kuva: Lopen rakennuspuu Oy.

5. Männyn sydänpuun ominaisuudet ja niissä esiintyvä luontainen vaihtelu

5.1. Sydänpuun määrä

Yksittäisen elävän puun sydänpuun määrää ei voida mitata suoraan eikä arvioida puun ulkoisten ominaisuuksien perusteella. Sydänpuun määrä vaihtelee suuresti puuyksilöiden ja metsiköiden välillä eikä sitä voida selittää kasvupaikkaan, metsikköön tai puuyksilön ilmiasuun liittyvillä muuttujilla (Björklund 1999). Sydänpuun määrän suurta vaihtelua puutavarassa voidaan havainnoida mäntytukkipinoja tarkastelemalla (Kuva 11). Koska puun ikä ja kasvunopeus vaikuttavat sydänpuun absoluuttiseen määrään sekä osuuteen rungon tilavuudesta, voidaan iän ja kasvatietojen perusteella kuitenkin arvioida metsikön keskimääräistä sydänpuuvarantoa (esim. Gjerdrum 2003, Uusitalo 2004 ja niissä olevat viitteet).



Kuva 11. Sydänpuun määrä vaihtelee tukkipokoittaisesti. Sydänpuuosuus ei ole suurimmillaan kannon korkeudella, vaan noin 20 % korkeudella puun pituuden suhteen.

Sydänpuun suhteellinen osuus on männyllä suurimmillaan noin 20 % korkeudella rungon pituudesta, ja nuorilla puilla osuus laskee latvaan päin nopeammin kuin vanhoilla puilla (Kärkäinen 2003). Hakkilan ym. (2020) tutkimuksessa koko mäntyrunгон sydänpuuosuus oli Suomen etelä- ja keskiosien päätehakkuissa 34 % ja toisissa harvennuksissa 19 %, tukkiosassa vastaavasti osuudet olivat 36 % ja 23 %. Kun verrataan saman läpimittaisia mäntyjä eri leveysasteilla, männyn sydänpuuosuus on pohjoisessa suurempi kuin etelässä. Sydänpuuosuuden kasvu johtuu pohjoisten puiden hitaammasta kasvusta, jolloin samankokoiset puut ovat pohjoisessa vanhempia kuin etelässä. Tämä ilmeni, kun tutkittiin pohjoismaisen mäntysahapuun ominaisuuksien alueellista vaihtelua Etelä-Ruotsista Pohjois-Suomeen ulottuvilla osa-alueilla (Verkasalo ym. 2005).

Kaikki puuyksilöt eivät kerrytä sydänpuuta samaan tahtiin. Taulukossa 2 havainnollistetaan sydänpuun kertymistä luontaisesti syntyneessä Punkaharjun Ruhvanalla sijaitsevassa Ranta-Hailolan mäntymetsikössä (Kuva 12), josta tarkasteltiin 373 puuta. Metsikön keski-ikä oli noin 90 vuotta tutkimusvuonna 2010. Nuorin puu oli 43 vuoden ja vanhin 145 vuoden ikäinen. Puista kairattiin rinnankorkeudelta puun läpi näytteet, jotka sisälsivät ytimen. Kairanlastuista laskettiin sydän- ja pintapuulustojen lukumäärä, mitattiin sydänpuun säde ja koko lastun säde.

Sydänpuuosuus määritettiin sydänpuun säteen osuutena koko säteestä ilman kuorta (ei siis pinta-ala- tai tilavuusosuutena).

Vaikka sekä sydänpuun säde, että sydänpuulustojen määrä kasvoivat puiden vanhetessa, puuyksilöiden välillä oli kummassakin ominaisuudessa suuri vaihtelu ikäluokkien sisällä. Samoin ikäluokittainen keskimääräinen sydänpuuosuus kasvoi puiden vanhetessa, kun jätettiin huomiotta tutkimuksen vanhin, vain kolme puuta käsittävä ikäluokka. Suurin yksittäinen sydänpuusäteen osuus, 88 %, oli ikäluokkaan 101–120 vuotta kuuluneella puuyksilöllä. Suurin sydänpuun säde, 114 mm, oli puolestaan ikäluokkaan 121–140 vuotta kuuluneella puuyksilöllä. Koko metsikön tasolla vaihteluväli sydänpuun säteessä oli 86 mm, sydänpuulustojen lukumäärässä 45 vuosilustoa ja sydänpuun säteen osuudessa 64 %. Koko aineiston keskiarvo sydänpuun säteen osuudessa, 49 %, vastaa noin 25 % poikkileikkauspinta-alasta.



Kuva 12. Punkaharjun Ruhvanalla sijaitseva Ranta-Halolan mäntymetsikkö, joka kuuluu eurooppalaiseen Intensive Study Sites (ISS) -verkostoon. (Kuva: Tarja Salminen)

Taulukko 2. Rinnankorkeusläpimitta sekä sydän- ja pintapuun kertyminen rinnankorkeudella luontaisesti syntyneessä, eri ikäluokkien puita käsitävässä, Ranta-Halolan männikössä Punkaharjulla. Ka, keskiarvo; SD, keskihajonta.

Ikäluokka	Puita kpl	Rinnankorkeusläpimitta, mm			Sydänpuun säde, mm			Sydänpuulustojen lkm.			Sydänpuuosuus, %			Pintapuun leveys, mm			Pintapuulustojen lkm.		
		Ka (SD)	Min.	Maks.	Ka (SD)	Min.	Maks.	Ka (SD)	Min.	Maks.	Ka (SD)	Min.	Maks.	Ka (SD)	Min.	Maks.	Ka (SD)	Min.	Maks.
41–60	37	254 (43)	172	432	48 (11)	28	85	13 (2)	9	21	38 (5)	27	51	64 (11)	41	88	39 (3)	31	45
61–80	80	273 (44)	189	363	56 (16)	29	91	19 (4)	13	40	41 (7)	28	56	65 (13)	31	105	53 (5)	38	65
81–100	135	271 (39)	189	402	59 (15)	29	113	28 (3)	21	38	43 (7)	27	63	61 (10)	26	93	64 (4)	55	74
101–120	99	292 (38)	213	395	67 (14)	36	108	35 (4)	24	44	46 (6)	28	77	62 (12)	15	93	74 (4)	57	84
121–140	19	323 (46)	249	431	81 (19)	40	114	44 (3)	37	52	50 (9)	28	67	63 (14)	29	86	82 (4)	75	88
141–160	3	332 (83)	245	410	73 (20)	50	85	50 (4)	46	54	44 (4)	41	49	75 (17)	62	94	93 (4)	91	97
Kaikki ikäluokat	373	278 (44)	172	432	61 (16)	28	114	27 (9)	9	54	43 (7)	27	77	62 (12)	15	105	63 (12)	31	97

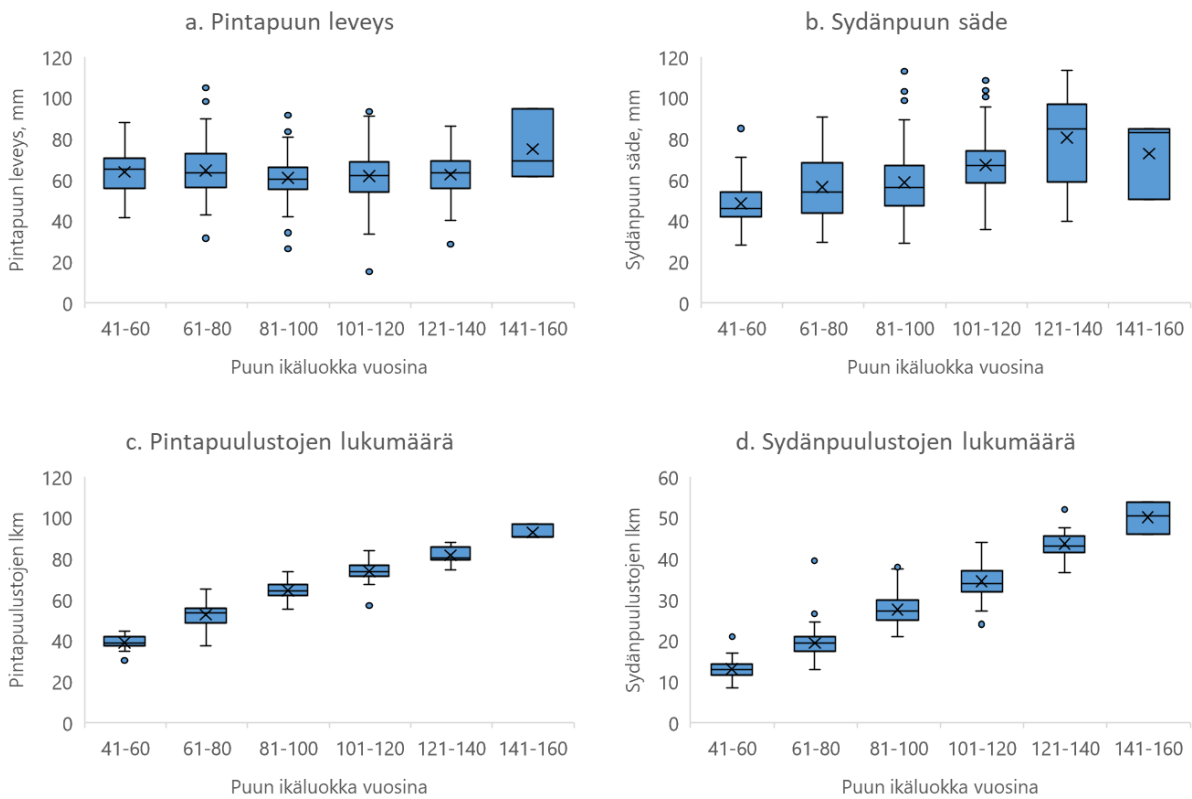
*Sydänpuuosuus= 100 x (sydänpuun säde kairanlastussa/kairanlastun säde)

Ranta-Halolan tutkimusmetsikössä puun rinnankorkeusläpimitalla oli voimakas yhteys (korrelaatiokerroin, r) sydänpuun säteeseen kyseisellä korkeudella ($r = 0,81$; $p < 0,001$) ja heikompi yhteys sydänpuulustojen lukumäärään ($r = 0,39$; $p < 0,001$) ja sydänpuuosuuteen ($r = 0,38$; $p < 0,001$). Kaikissa ikäluokissa metsikön paksuissa puissa oli läpimittana ilmaisuna enemmän sydänpuuta kuin ohuissa, kuten myös Björklund (1999) oli todennut. Tulosta voidaan pitää positiivisena, sillä sydänpuun käytön kannalta sen läpimitta on tärkeämpi kuin sen lustojen lukumäärä tai sen suhteellinen osuus rungon läpimitasta tai tilavuudesta.

Koska sydänpuuta kertyy vajaan vuosiluston verran vuodessa, pintapuun lustojen lukumäärä lisääntyy tasaisesti puun ikääntyessä ja kasvaessa paksuutta (Taulukko 2, Kuva 13). Vastavasti, koska puun kasvun myötä vuosilustot kapenevat rungon pintaa kohden, sydänpuun säteen absoluuttinen kertymä ei etene yhtä suoraviivaisesti. Pintapuulustojen kavetessa, niiden lukumäärä kasvaa pintapuun leveyden pysyessä keskimäärin lähes vakiona (Kuva 13).

Gjerdrumin (2003) ja Uusitalon (2004) sydänpuumallit ennustavat sydänpuulustojen lukumäärää jälleen iän perusteella. Kun malleja sovellettiin tähän Ranta-Halolan tutkimusmetsiköstä rinnankorkeudelta kairattujen näytteiden aineistoon, kummankin mallin ennustamat sydänpuulustojen määrät korreloivat sekä keskenään ($r=0,99$) että Ranta-Halolan aineistosta lasketujen sydänpuulustojen lukumäärän kanssa ($r=0,93$). Korkeasta korrelaatiosta huolimatta kumpikin malli yliennusti Ranta-Halolan aineiston sydänpuulustojen lukumäärää keskimäärin puolitoistakertaisesti. Yliarvioinnistaan huolimatta Gjerdrumin (2003) malli antoi jonkin verran lähempänä havaittuja arvoja olevia ennusteita. Kuten aikaisemmin todettiin, käytännössä sydänpuun hyödyntämisen kannalta sydänpuun absoluuttinen määrä (säde, läpimitta) on tärkeämpi kuin sydänpuulustojen lukumäärä tai sydänpuun suhteellinen osuus rungon tilavuudesta tai poikkileikkauspinta-alasta.

Männyn jälkeläiskokeilla tehdyissä tutkimuksissa on todettu, että iän lisäksi sydänpuun kertymiseen vaikuttavat suuresti myös perinnölliset tekijät (Ericsson ym. 2001, Partanen ym. 2011), minkä vuoksi samanikäisillä ja samankokoisillakaan puilla ei kerry sydänpuuta samaa vauhtia.



Kuva 13. Pinta- ja sydänpuun määrä ikäluokittain Ranta-Halolan männikössä.

5.2. Sydänpuun uuteaineet

Puuaine muodostuu pääosin, 90–98 %, **selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä**, jotka ovat pitkäketjuisia soluseinien rakennusaineita (Morrell ja Gartner 1998). Soluseinien perusrakennusaineiden lisäksi puussa on myös suuri joukko pienimolekyylisiä yhdisteitä, **uuteaineita**, joiden pitoisuuksia on yleensä määritetty uuttamalla jauhettua puuainesta erilaisilla liuottimilla kuten esimerkiksi vedellä, asetonilla tai eetterillä (Miller 1999) ja tekemällä uuteaineiden tunnistus esimerkiksi kaasukromatografimassaspektrometrilla (GC-MS) (Willför ym. 2003, Nisula 2018) tai kaasukromatografiliekki-ionisaatio tunnistusmenetelmällä (GC-FID) (esim. Ekman & Holmbom 1989). Laajasti käsitettynä uuteaineita ovat kaikki muut yhdisteet paitsi ensin mainitut puun rakenneyhdisteet (Nisula 2018). Uuteaineisiin kuuluvat siten liukoiset sokeirit, tärkkelys, rasvat ja vahat, valkuaisaineet sekä sekundääriyhdisteet kuten hartsihapot, terpeenit ja polyfenoliset yhdisteet, ja jopa epäorgaaniset suolat (Sjöström 1993, Nisula 2018). Uuteaineet voivat olla osa puiden peruselintoimintoja tai puuta mm. mikrobeilta, sieniltä ja hyönteisiltä suojaavia puolustusyhdisteitä (Nisula 2018). Näitä yhdisteitä löytyy kaikkialta puiden solukoista, mutta niiden koostumus ja pitoisuus vaihtelevat suuresti puulajien, puun eri osien ja eri solukkojen välillä.

Kun sydänpuu muodostuu pintapuun ja sydänpuun välisellä vaihtumisvyöhykkeellä, siihen kertyy pintapuun varastoyhdisteistä tuotettavia sydänpuulle tyypillisiä uuteaineita. Männyn sydänpuun ja pintapuun uuteainekoostumukset poikkeavat toisistaan (esim. Verkasalo ym. 2021). Suurin osa sydänpuuhun kertyneistä uuteaineista on **hartsihappoja**, joiden lisäksi on luontaisina lahonsuoja-aineina toimivia fenolisia **pinosylviinejä** sekä vapaita **rasvahappoja** (Belt 2018, Fang ym. 2013).

Tietolaatikko A: Pinosylviinien lyhyt historia

Männyn sydänpuun fenolisia uuteaineita alettiin epäillä 1920-luvulla syyksi siihen, että mäntypuun selluloosan ja ligniinin erottaminen toisistaan sulfiittikeitolla ei sakkautumisen vuoksi onnistunut (Nisula 2018 ja siinä olevat viitteet). Saksalaiset kemistit Koch ja Krieg keksivät vuonna 1938 väriaineen, joka tarttui kiusallisiin yhdisteisiin. Näin syntyi ensimmäinen männyn sydänpuun värjäysmenetelmä "mit bisdiazotiertem Benzidin". Pian tämän jälkeen kemisti Erdtman määrittä kaksi uutta stilbeenyhdistettä ja nimesi ne männyn tieteellisen nimen (*Pinus sylvestris*) perusteella pinosylviiniksi (PS) ja pinosylviinimonometyylietteriksi (PSM) (Erdtman 1939). Erdtman ja Rennerfelt (1944) päättelivät jo hyvin varhain värjäyksen perusteella, että pinosylviiniä syntyy ydinsäteiden typpysoluissa.

Männyn sydänpuun kohtalaisen hyvä lahonkestävyys oli tunnettu jo vuosisatoja. Pinosylviinien vaikutusta tähän kokemuseräiseen ilmiöön käytiin tutkimaan heti yhdisteiden löytymisen jälkeen. Erdtman alkoi välittömästi testata löydettyjen yhdisteiden myrkyllisyyttä eläinkokeilla ja totesi, että yhdisteet tappoivat Lesbites-sukuiset akvaariokalat. Ensimmäisen raportin pinosylviinien vaikutuksesta lahottajasieniin julkaisi Rennerfelt (1943). Raportti sisälsi Erdtmanin puhtailla yhdisteillä ja sienikannoilla tekemät kokeet ja Rennerfeltin pilottiluonteiset lahotuskokeet pinosylviineillä kyllästetyillä puupalikoilla. Pinosylviinien "myrkyvaikutuksista" lahottajasieniin julkaistiin pian lisääkin tuloksia (Erdman & Rennerfelt 1944, Rennerfelt 1945). Useissa myöhemmissä tutkimuksissa yritettiin päätellä, kumpi on lahottajasienille myrkyllisempi, PS vai PSM, mutta yksiselitteistä vastausta ei saatu.

Eri sienilajien kyky eliminoida niille haitalliset puuta suojaavat uuteaineet on askarruttanut tutkijoita tähän päivään saakka (esim. Belt ym. 2022). Jo Loman (1970 a, b) totesi, että sienien lahottamassa puuaineessa olevat pinosylviinipitoisuudet ovat monta kertaa suuremmat kuin puhtaiden yhdisteiden kuolettavat pitoisuudet. Tämän havainnon perusteella tehty johtopäätös on edelleen pätevä: uuteaineen ja lahottajasienen välistä vuorovaikutusta täytyy tutkia puuaineessa eikä pelkästään kasvatusalustalla.



Professori Holger Erdtman (1902–1989). Kuvan lähde: Kungliga Tekniska Högskolan.

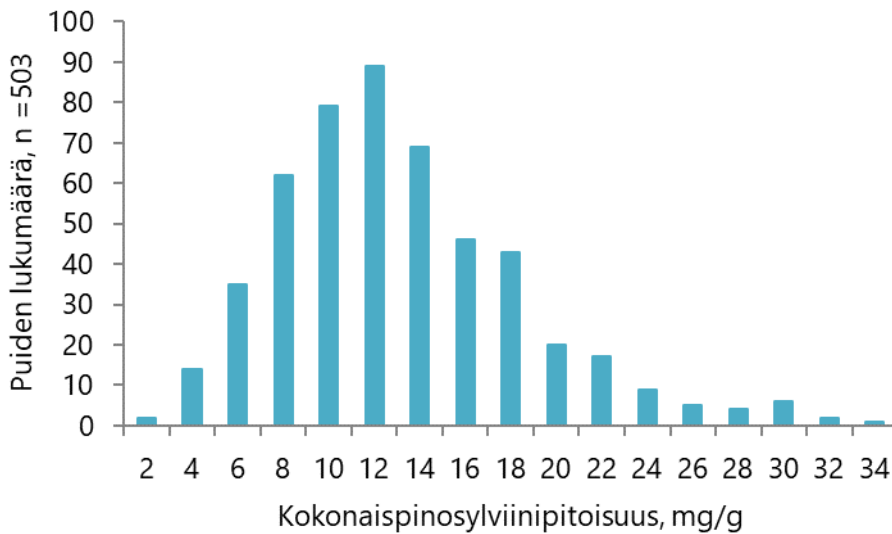
Männyn sydänpuun pinosylviinit eristi ensimmäisenä ruotsalainen kemisti Holger Erdtman (Erdtman 1939) (Tietolaatikko A). Pinosylviinit (pinosylviini ja sen monometyylieetteri), jotka kuuluvat kemiallisesti stilbeeneihin, muodostuvat pinta- ja sydänpuun vaihettumisvyöhykkeellä (Hillis 1987, Hart 1981, Lim ym. 2016), kun taas pihka-aineet muodostuvat pintapuualueella, mistä ne kuljetetaan muodostuvaan sydänpuuhun ydinsäteissä (esim. Lim ym. 2016). Kyseisten uuteaineiden pitoisuudet vaihtelevat sekä runkojen välillä että yksittäisen rungon sisällä säteen- ja pituussuuntaisesti (esim. Venäläinen ym. 2003). Kasvavien mäntyjen sydänpuussa pinosylviinien pitoisuus on yleensä suurimmillaan sydänpuun ulko-osissa, mistä niiden pitoisuus alenee kohti rungon ydintä (Venäläinen ym. 2003, Erdtman & Rennerfelt 1944, Erdtman ym. 1951, Bergström ym. 1999, Bergström 2003).

Puuyksilöiden välistä vaihtelua sydänpuun uuteainepitoisuudessa tutkittiin keräämällä puunäytteitä Leppävirran Ahvenisen kylässä sijaitsevalta, silloin 43-vuotiaalta, männyn jälkeläiskokeelta (Tietolaatikko B). Sydänpuunäytteet kerättiin kasvukairalla pystypuista (Kuva 14). Esimerkkinä suuresta puuyksilöiden välisestä vaihtelusta sydänpuun uuteainepitoisuudessa esitetään pinosylviinipitoisuuden (Kuva 15) ja hartsihappopitoisuuden (Kuva 16) jakaumat kyseisen männyn jälkeläiskokeen sydänpuunäytteissä.

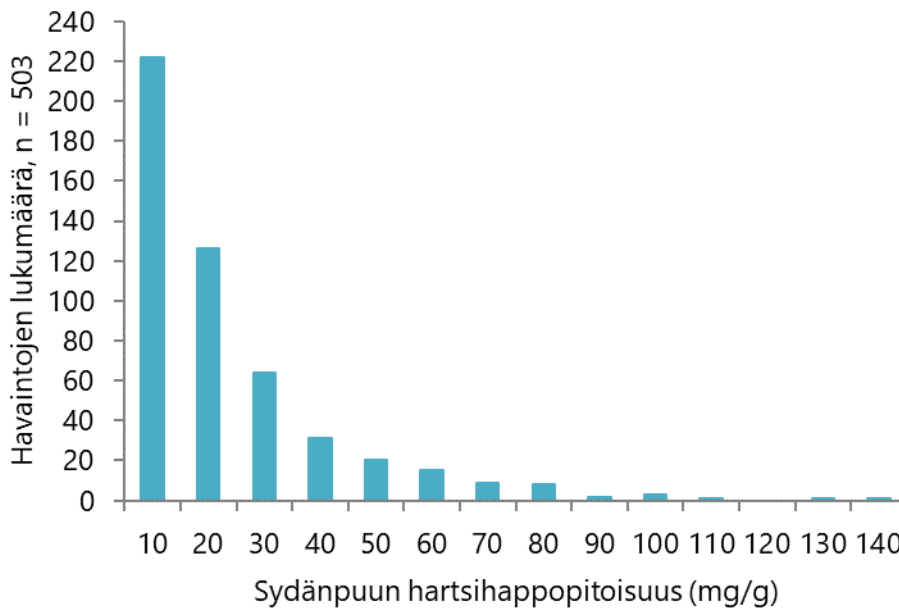
Tietolaatikko B: Jälkeläiskoe on metsänjalostuksen koeviljelys, jossa puiden alkuperä tunnetaan vähintään äidin tarkkuudella. Koeviljelys perustetaan ja hoidetaan kulloinkin käytössä olevan metsänviljelytavan mukaisesti, ts. käyttäen samaa taimityyppiä, istutustiheyttä, maanmuokkausta ja istutusvälinettä. Esimerkiksi Leppävirran jälkeläiskoe edustaa tyyppillistä vuonna 1968 istutettua mäntymetsää. Jälkeläiskokeessa ei sallita luontaisesti syntyneitä taimia, joten kaikki puut ovat täsmälleen saman ikäisiä.



Kuva 14. Puunäytteen kairaaminen akkuporakoneella männyn jälkeläiskokeella.



Kuva 15. Kokonaispinoisyliinipitoisuuden vaihtelu 43-vuotiaan Leppävirralla sijaitsevan männyn jälkeläiskokeen puiden sydänpuussa (n = 503). Kokonaispinoisyliinipitoisuuden keskiarvo oli 10,9 mg/g kuivaa puuta (SD = 4.2).



Kuva 16. Hartsihappopitoisuuden vaihtelu 43-vuotiaan Leppävirralla sijaitsevan männyn jälkeläiskokeen puiden sydänpuussa (n = 503). Hartsihappopitoisuuden keskiarvo oli 18,3 mg/g kuivaa puuta (SD = 19,6).

Ikäluokkien välistä vaihtelua uuteainepitoisuuksissa sydänpuun ulko-osassa tarkasteltiin Ranta-Halolan tutkimusmetsiköstä Punkaharjulta kairatuista näytteistä. Ikäluokkien uuteainepitoisuudet eivät näytä juurikaan poikkeavan toisistaan, vaan suurin osa vaihtelusta on ikäluokkien sisällä ja puuyksilöiden välillä (Taulukko 3). Nuoren ja tasaikäisen Leppävirran jälkeläiskokeen näytteissä havaittiin selvästi alhaisemmat hartsihappopitoisuudet kuin tämän luontaisesti syntyneen metsikön näytteissä (vrt. Kuva 16 ja Taulukko 3).

Taulukko 3. Männyn sydänpuun ulko-osan kokonaisfenolien (Folin Ciocalteu -testi), pinosylviinien (GC-MS-analyysi) ja hartsihappojen (GC-MS-analyysi) pitoisuudet grammassa kuivaa puuta luontaisesti syntyneen mäntymetsikön eri ikäluokkien puissa. Ka, keskiarvo; SD, keskihajonta.

Ikäluokka (näytämäärä)	Kokonaisfenolipitoisuus, mg TAE/g*			Pinosylviinien pitoi- suus, mg/g			Hartsihappopitoisuus, mg/g		
	Ka (SD)	Min.	Maks.	Ka (SD)	Min.	Maks.	Ka (SD)	Min.	Maks.
41–60 (37)	11 (4)	5	18	11 (3)	5	19	38 (26)	4	121
61–80 (80)	10 (4)	5	24	12 (5)	2	31	31 (26)	3	135
81–100 (135)	11 (4)	5	26	12 (5)	3	27	38 (29)	4	134
101–120 (99)	11 (3)	5	20	12 (4)	3	27	35 (29)	2	154
121–140 (19)	10 (5)	5	23	10 (4)	4	21	37 (30)	6	104
141–160 (3)	11 (4)	7	15	6 (3)	4	9	58 (38)	16	90
Kaikki ikäluokat (373)	11 (4)	5	26	11 (5)	2	31	36 (28)	2	154

*Kokonaisfenolipitoisuus on ilmoitettu tanniinihappoekvivalentteina grammassa kuivaa puuta, eikä tulosta voi määrällisesti verrata kaasukromatografisen analyysin tulokseen.

Tutkimuspuiden kokoon ja sydänpuun määrään liittyvien muuttujien sekä sydänpuun uuteainepitoisuuden välille ei löytynyt yhteyttä Ranta-Halolasta kerätyssä aineistossa. Rinnan- korkeusläpimitalla ei ollut käytännön kannalta merkittävää yhteyttä ulomman sydänpuun kokonaisfenolipitoisuuteen ($r = -0,01$, $p < 0,788$), pinosylviinien pitoisuuteen ($r = -0,10$, $p < 0,046$) eikä hartsihappopitoisuuteen ($r = 0,06$, $p < 0,279$). Myöskään sydänpuun säde tai sydänpuun lustojen lukumäärä eivät korreloineet ulomman sydänpuun uuteainepitoisuuden kanssa. Vaikuttaa siis siltä, että ilmiasun tasolla puiden kasvuun liittyvillä ominaisuuksilla ei ole vaikutusta sydänpuun uuteainepitoisuuksiin. Tässä aineistossa ulomman sydänpuun pinosylviinien pitoisuuden ja hartsihappopitoisuuden välillä oli heikko korrelaatio ($r = 0,13$, $p < 0,011$).

Leppävirran jälkeläiskokeelta kaadettiin 40 puuta sisältävä kaatokoepuuaineisto vuonna 2003. Puut valittiin aikaisemmin tutkittujen puiden joukosta kattamaan koko kokonaisfenolipitoisuuden jakauma (ks. Harju & Venäläinen 2006). Kaadetuista puista sahattiin sydänpuun ulko-osista näytteitä useisiin koeasetelmiin (Karppanen ym. 2007, Karppanen ym. 2008, Tiitta ym. 2009, Tomppo ym. 2009, Tomppo ym. 2011), kuten esimerkiksi lahotuskokeisiin ja mäntyrungon ja sisäoksien sydänpuun kemiallisen koostumuksen tarkasteluun.

Tutkimustulosten mukaan männyn oksissa sydänpuun suhteellinen määrä ja uuteainepitoisuus olivat suurempia kuin rungon sydänpuussa (Karppanen ym. 2007). Kaatokoepuuaineistoon kuuluneiden mäntyjen sisäoksien sydänpuussa oli viisi kertaa enemmän hartsihappoja ja pinosylviinejä kuin rungon sydänpuussa ja kokonaisfenolipitoisuus oli nelinkertainen verrattuna rungon sydänpuuhun. Sen sijaan puuyksilöiden välillä uuteaineiden pitoisuudet vaihtelivat sisäoksissa suhteellisesti vähemmän kuin sydänpuussa, kuten taulukon 4 variaatiokerroin (CV%) osoittaa. (Karppanen ym. 2007 ja siinä olevat viitteet). Tulokset antoivat viitteitä siitä, että sydänpuun ja sisäoksien pinosylviinien pitoisuudella on yhteys, jota voitaisiin mahdollisesti hyödyntää sydänpuun lahonkestävyyden ennustamisessa. Edellä mainittujen sydänpuuyhdisteiden lisäksi männyn sisäoksien sydänpuussa on lignaaneja ja oligolignaaneja, erityisesti nortrachelogeniinia (Willför ym. 2003, 2004). Oksien korkea uuteainepitoisuus vaikuttaa

männyn sydänpuun käytettävyyteen maalatuissa kohteissa, koska pihkat tihkuvat ajan myötä maalikerroksen läpi aiheuttaen oksien läpilyönniksi kutsutun ilmiön.

Taulukko 4. Mäntyrungon ja terveiden sisäoksien sydänpuun uuteainepitoisuus grammassa kuivaa puuta Leppävirran jälkeläiskokeen kaatokoepuissa.

Muuttuja	n	Keskiarvo	CV%*	Vaihteluväli
Rungon sydänpuu				
Hartsihapot, mg/g	40	37,3	73	6,5–96,6
Pinosylviinit, mg/g	40	9,7	48	0,9–21,1
Kokonaisfenolit, mg TAE/g	40	10,5	49	1,9–21,7
Sisäoksien sydänpuu				
Hartsihapot, mg/g	39	202,0	10	167,8–237,9
Pinosylviinit, mg/g	40	45,9	22	27,7–64,6
Kokonaisfenolit, mg TAE/g	39	43,3	10	36,1–52,6

Tiedot ovat artikkelin Karppanen ym. (2007) Taulukosta 2.

*CV%=keskihajonta (SD)/keskiarvo, vaihtelee välillä 0–100 %.

Leppävirran 40 puun otoksessa pinosylviinien pitoisuus männyn sydänpuussa oli keskimäärin 1 % puun kuivapainosta ja sisäöksissä 3–6 %, mutta niitä ei löytynyt juuri lainkaan pintapuusta. Erdtman ym. (1951) on todennut, että vain 3 % mäntyrungoista sisälsi enemmän kuin 1 % pinosylviinejä (vrt. Kuva 14). Tutkimassamme Ranta-Halolan luonnonmetsikön kairanlastuaineistossa pinosylviinien pitoisuus kuiva-aineessa oli sydänpuussa 0,2–3,1 % (Taulukko 3) ja Leppävirran jälkeläiskoemetsikön kairanlastuaineistossa 0,2–3,4 % (ks. Kuva 15) kuiva-aineesta. Leppävirran jälkeläiskoemetsikön kaatokoepuiden rungon sydänpuussa pinosylviinejä oli 0,1–2,1 % ja sisäoksien sydänpuussa 2,8–6,5 % kuiva-aineesta (Taulukko 4). Hartsihappojen pitoisuus kuiva-aineessa oli Ranta-Halolan puiden sydänpuussa 0,2–15,4 % (Taulukko 3) ja Leppävirran jälkeläiskokeen kairanlastuaineistossa 0,1–14 % (Kuva 15). Kaatokoepuiden runkojen sydänpuussa oli hartsihappoja 0,6–9,7 % ja sisäoksien sydänpuussa 16,8–23,8 % (Taulukko 4). Nisula (2018) toteaa, että männnyllä on sydänpuussa moninkertainen määrä hartsihappoja (1,6–2,2 %) verrattuna pintapuuhun (0,2 %).

Vanhojen mäntyrunkojen säteensuuntaisesta vaihtelusta antaa käsityksen Venäläisen ym. (2003) aineisto, joka on määritetty Punkaharjun harjualueen 150–190-vuotiaista männnyistä (Taulukko 5). Merkittävin havainto on, että pinosylviinipitoisuudessa ja lahonkestävyydessä on hyvin suuri ero aikuispuuhun syntyneen sydänpuun uloimman ja nuorpuualueelle syntyneen sisimmän osan välillä. Kestävintä puutavaraa saadaan siis sydänpuun pintaosasta.

Taulukko 5. Puuaineen tiheyden, uuteainepitoisuuden ja lahonkestävyyden vaihtelu säteen suunnassa keskimäärin 170-vuotiaissa männnyissä 5 metrin korkeudella (n=16). Sydänpuun pintaosa on muodostunut aikuispuualueelle ja sisin osa nuorpuualueelle. Lähde: Venäläinen ym. 2003.

	pintapuu	sydänpuun pintaosa	sydänpuun sisin osa
Tiheys, g/dm ³ (SD)	439 (32)	456 (38)	411 (37)
Hartsihappopitoisuus, % (SD)	0,4 (0,1)	1,8 (1,3)	1,9 (1,1)
Pinosylviinipitoisuus, % (SD)	0,0 (0,0)	2,0 (0,6)	1,0 (0,4)
painohäviö lahotuskokeessa, % (SD)	32 (4)	12 (6)	26 (6)

5.3. Luontainen lahonkestävyys ja sitä selittävät tekijät

Puuaineen lahoaminen on monivaiheinen ja monimutkainen tapahtumaketju, jossa puumateriaali, sieni ja ympäristöolosuhteet ovat vuorovaikutuksessa keskenään. Kullakin sienilajilla on lajityypillinen tapa päästä hajottamaan puuaineen soluseiniä, joiden rakennusaineita sienet käyttävät ravinnokseen. Lahottajasienet voidaan jakaa lahottamistyyppinsä mukaan **valkolahottajiin, ruskolahottajiin ja pehmytlahottajiin** (Fengel & Wegener 2011, Lundell & Mäkelä 2013). Havupuutavaran lahottajasienet ovat yleensä ruskolahottajia, jotka hajottavat ja käyttävät ravinnokseen puuaineen sokereita, hemiselluloosaa ja selluloosaa jättäen jälkeensä muokatun ligniinin. Lahottajille altistunut puuaine menettää lujuuttaan jo hyvin varhaisessa lahoamisen vaiheessa oletettavasti hiilihydraattiketjujen ja ligniinin sisäisten sidosten katkaisemisen vuoksi (Lundell & Mäkelä 2013). Venäläisen ym. (2016) tekemässä lahotuskokeessa männyn pintapuun lujuus puoliintui painohäviön ollessa vasta 10 %.

Elävillä männyllä on sekä aktiivisia (indusoituvia) että passiivisia (rakenteellisia ja kemiallisia) puolustuskeinoja lahottajia ja tuhohyönteisiä vastaan. Nila, korkkijälsi, jälsi ja pintapuu ovat tärkeimmät eläviä soluja sisältävät rungon osat. Passiivisesti niitä suojaavat kaarna ulkopuolelta ja varttuneessa puussa sydänpuu sisäpuolelta. Elävät solukot pystyvät suojautumaan mekaanisten, fysikaalisten ja kemiallisten häiriötekijöiden vaikutukselta aktiivisilla reaktioilla sulkemalla haavat pihkaa valuttamalla ja alkamalla tuottaa puolustusaineita (Kuva 8). Koska männyn sydänpuu on kuollutta solukkoa, siellä ei tapahdu aktiivisia puolustusreaktioita, vaan sen kestävyys on elävissäkin puissa passiivista perustuen sydänpuun muodostumisen yhteydessä kertyneisiin kemiallisiin yhdisteisiin sekä solukkojen rakennemuutoksiin (Merrill 1992).

Luonnossa lahottajasienet ovat tärkeitä ravintoketjujen toimijoita, mutta niitä ei haluta rakenteisiin, joissa puulle toivotaan pitkää käyttöikä. Lahottajasienet uhkaavat kuitenkin puurakennetta aina, mikäli se joutuu alttiiksi jatkuvalla kosteudelle esimerkiksi rakennusvirheen vuoksi (Kuva 17, Tietolaatikko D). Tällöin lahoamista voivat estää vain passiiviset suojausmekanismit. Suomessa on perinteisesti käytetty männyn sydänpuusta valmistettua puutavaraa lahonkestävyyttä vaativiin rakenteisiin (Kuva 18). Koska männyn pintapuuhun ei ole kertynyt luontaisia lahonsuoja-aineita, se lahoaa kosteissa olosuhteissa selvästi nopeammin kuin uute-aineiden kyllästämä sydänpuu (Kuva 19).



Kuva 17. Aggressiivisesti leviävä lattiasieni hyökkäsi nopeasti varastorakennuksen virheellisesti rakennetun puulattian kimppuun (lattian alapuoli imi kosteutta, mutta ei tuulettunut).



Kuva 18. Kesälahden kirkon kellotapulin mäntypaanukattoa vaihdettiin uuteen vuonna 2006. Vanhan, männyn sydänpuusta valmistetun, katon iäksi määritettiin 170 vuotta. Aluskatteena käytettiin koivun tuohta. Sinistymien perusteella uudet paanut näyttivät sisältävän myös pin-tapuuta.

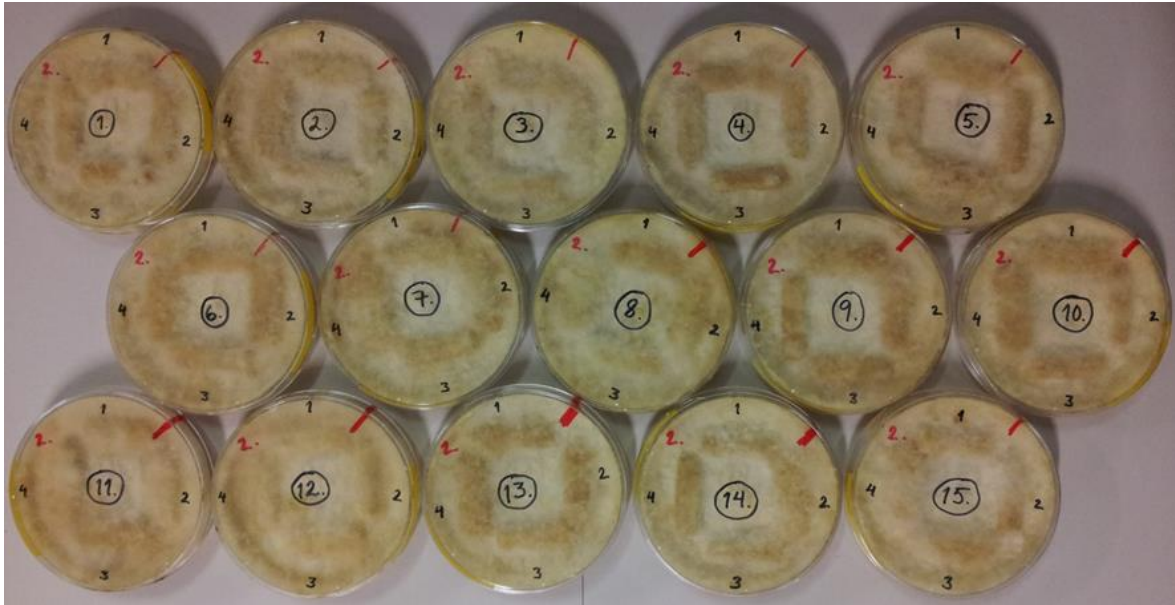


Kuva 19. Luontaisten uuteaineiden kyllästämä männyn sydänpuu on jäänyt jäljelle, kun pinta-puu on lahonnut pois kokonaan tai osittain. Vasemmalla on vuosikymmenten ajaksi maakosketukseen joutunut heinäladon alin hirsi. Oikealla puolella olevat, polttopuiksi sahatut lankut ovat olleet säälle alttiina noin 20 vuotta, mutta eivät maakosketuksessa.

Lahottajasienen kasvu ja lahoamisen alku puuaineessa vaativat kosteutta. Puuaineen kosteus on riippuvainen ympäröivän ilman kosteudesta ja lämpötilasta sekä rakenteen altistumisesta vapaalle vedelle sekä altistumisen kestosta. Eri lähteissä kriittisenä rajana vaarallisen korkealle puun kosteudelle pidetään 25–30 % kosteussuhdearvoja (MC, moisture content). Ratkaiseva on puun kuitujen kyllästymispiste (FSP, fiber saturation point). Kosteussuhteen ylittäessä tämän pisteen soluonteloihin ja soluvälien aukkoihin alkaa muodostua vapaata vettä, joka on sienirihmaston kasvun edellytys (Zabel & Morrell 1992). Vaikka kosteus olisikin sienelle riittävä, voivat sienen elintoimintoja haittaavat puun uuteaineet estää tai viivästyttää lahon alkamista.

Puuaineksen lahonkestävyyden tutkimiseksi voidaan tehdä nopeutettuja lahotuskokeita laboratorio-olosuhteissa, jotka luodaan lahottajasienen toiminnalle ihanteellisiksi ja samalla puun kannalta mahdollisimman ankariksi. Kokeita säädellään yhteisesti sovitulla normeilla, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia (ks. Tietolaatikko C).

Normien mukaiset lahotuskokeet eivät monestikaan sovellu tutkimukselliseen tarkasteluun. Tutkimuksissa puunäytteet voivat olla elävistä puista otettuja kasvukairalastuja tai kaato-koepuista tai puutavarasta työstettyjä näytekappaleita. Näytteet steriloidaan, jotta niiden mukana tulleet tai näytteiden käsittelyvaiheiden aikana niihin tarttuneet mikro-organismit saadaan poistettua häiritsemästä kontrolloitua lahotuskoetta. Steriloinnin jälkeen näytteet asetellaan koestettä kasvavalle alustalle, missä ne saavat olla alttiina koesiemen lahotustoiminnalle, kunnes koe lopetetaan (Kuva 20). Kustakin kokeeseen menevästä näytteestä punnitaan kuivapaino ennen ja jälkeen lahotuksen. Alkupainon ja loppupainon erotus kertoo painohäviön, joka suhteutetaan alkupainoon, jolloin saadaan selville painohäviöprosentti. Laboratoriokokeet soveltuvat aineistojen lahonkestävyyserojen tutkimiseen, mutta niiden perusteella ei voi ennustaa puuaineen käyttöikää todellisessa käyttökohteessa.



Kuva 20. Kellarisientä kasvavia lahotuskoemaljoja kokeen päättymisvaiheessa. Näytteenä oli pystypuista kasvukairalla kerätyistä kairanlastuista otetut sydänpuunäytteet (neljä sydänpuunäytettä/malja).

Lahotuskokeissa usein käytetty kellarisieni (*Coniophora puteana* (Schum.ex Fr) Karst.) on ruskolahottaja, jonka jäljiltä puukappaleet ovat ruskeita ja hauraita (Kuva 21). Jotta saataisiin selkeä käsitys painohäviövaihtelusta, on tärkeää osuttaa lahotuskokeen lopetus siten, että painohäviössä on mahdollisimman suuri vaihtelu. Tällöin ei voida noudattaa normeissa annettuja koeaikoja, vaan koeaika on säädettävä tutkimuskysymyksen asettaman tarpeen mukaiseksi.



Kuva 21. Lahotuskokeessa kahdeksan viikkoa olleita ja eri asteisesti kellarisienen lahottamia männyn kaatokoepuista valmistettuja sydänpuukappaleita. Kukin puukappale on eri puuyksilöstä. Vasemmalla ylhäällä olevassa kappaleessa ei ollut havaittavissa painohäviötä, kun taas alhaalla oikealla olevasta kappaleesta oli jäljellä enää vajaa puolet ennen lahotusta mitatusta alkupainosta.

Tietolaatikko C: Puuaineen lahonkestävyyden testaus

Puuaineen lahon- ja säänkestävyyden testaamista säädellään yhteisesti hyväksytyillä normeilla, jotta puutavaran käyttäjille tarkoitetut testaustulokset olisivat vertailukelpoisia. Lahotustestausmenetelmiä on kolmea päätyyppiä: yksittäisillä lahottajasienikannoilla laboratorio-oloissa tehtävät testit, ulkona maanpinnan yläpuolella tai maakosketuksessa tehtävät kenttätestit sekä sisätiloissa tehtävät nopeutetut maakosketustestit eli ns. multalaatikko-testit (Taulukko 1). Normien mukaiset testit on suunniteltu kyllästysaineiden tehon osoittamiseksi. Samoja testejä voidaan soveltaen käyttää myös puulajien luontaisen tai modifioimalla aikaan saadun kestävyyden testaamiseen (CEN/TS 15083-2:2005, EN113-2:2020).

Taulukko 1. Tavallisimmat lahonkestävyyden testaamiseen käytetyt testit.

Normi	Menetelmä	Tarkoitus	Testin kesto
EN 252	Kenttätesti	Kestävyyden testaus maassa eläviä hajottajaeliöitä (sienet, bakteerit, selkärangattomat) vastaan	5–15 vuotta
ENV807	Multalaatikko-testi	Sama tarkoitus kuin EN252 testillä, mutta tulos saadaan nopeammin	32 viikkoa
EN113	Laboratoriotesti	Kestävyyden testaus tunnettuja lahottajasienikantoja vastaan	16 viikkoa

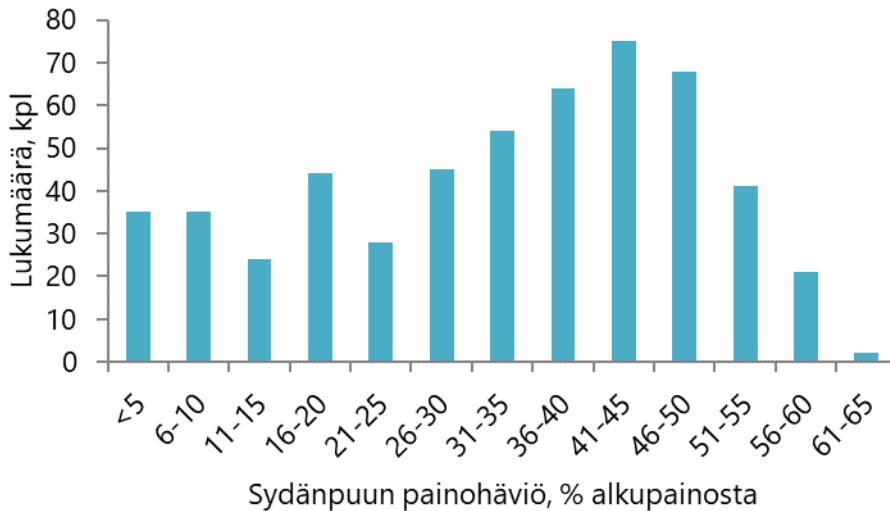
Tutkimustyössä ja tuotekehitysvaiheessa on hyvin tavallista tehdä tutkimushypoteesien ehdoilla räätälöityjä lahotuskokeita, jotka eivät ole kaupallisten tuotteiden testaamiseen tarkoitettujen normien mukaisia. Normissa EN113 määriteltyä testiä mukailemalla voidaan esimerkiksi tavoitella kustannustehokkuutta pienemmän näytekoon ja lyhyemmän lahotusajan ansiosta. Yleisesti käytetty EN113-muunnelma on kuvattu esim. raportissa Lu ym. (2016). Maanpäällisten ulkotestien muunnelmia on raportoitu noin 60 (Mayer 2012).

Havupuiden puuaineen laboratoriotestauksessa vaaditaan käytettäväksi ainoastaan kantasieniin kuuluvia ruskolahottajia (Taulukko 2). Luontaisen lahonkestävyyden testauksessa pakollisia sieniä on kaksi: kellarisieni ja istukkakääpä. Kyllästeiden testauksessa vaaditaan kolmanneksi sieneksi saunakääpä. Lehtipuuaineen testaukseen täytyy ottaa mukaan yksi valkolahottaja, silkkivyökääpä. Rakennusten kannalta vaarallisinta ruskolahottajaa lattiasientä (*Serpula lacrymans*) (Kuva 16) käytetään laboratoriotesteissä harvoin sen "oikullisuuden" vuoksi. Rakennusalan kirjallisuudessa esiintyvällä "laakakäävällä" tarkoitetaan muotoryhmää, johon on luettu *Poria*- ja *Antrodia*-sukujen sieniä.

Taulukko 2. Laboratoriotesteissä käytettävät tavallisimmat lahottajasienet.

Suomenkielinen nimi	Tieteellinen nimi	Aiempiä tieteellisiä nimiä
Kellarisieni, virallisesti kellarikesikkä	<i>Coniophora puteana</i>	mm. <i>Coniophora cerebella</i>
Istukkakääpä	<i>Rhodonía placenta</i>	mm. <i>Poria placenta</i> , <i>Poria monticola</i> , <i>Postia placenta</i>
Saunakääpä, aiemmin saunasieni	<i>Gloeophyllum trabeum</i>	mm. <i>Lenzites abietina</i> , <i>L. trabea</i>
Silkkivyökääpä	<i>Trametes versicolor</i>	mm. <i>Coriolus versicolor</i>

Kuvassa 22 havainnollistetaan mänty-yksilöiden välillä ilmenevää sydänpuun painohäviövaihtelua esittämällä tulos kahdeksan viikkoa kestäneestä lahotuskokeesta. Puumateriaalina oli sydänpuunäytteet, jotka oli kairattu männyn jälkeläiskokeesta Korpilahdelta ja jotka altistettiin kellarisienen hajotustoiminnalle. Tässä kokeessa ajoitus osui melko hyvin kohdalleen, sillä painohäviön keskiarvo oli 33 % (SD = 16) ja painohäviön vaihteluväli oli 0–65 % (Harju & Venäläinen 2002).



Kuva 22. Männyn sydänpuun painohäviöjakauma 536 puun aineistossa kahdeksan viikon laboratoriolahotuskokeessa. (Harju & Venäläinen 2002).

Lukuisissa tutkimuksissa on osoitettu pinosylviinin ja sen monometyylieetterin vaikuttavan männyn puuaineen lahonkestävyyteen. Sekä pinosylviineillä kyllästettyjä puukappaleita (Rennerfelt 1943, 1947, Seppänen ym. 2004, Lu ym. 2016) että käsittelemättömiä sydänpuunäytteitä (Leinonen ym. 2008, Harju ym. 2003, Venäläinen ym. 2003, 2004, Belt ym. 2021) tutkimmalla on osoitettu, että pinosylviineillä on selvä rooli lahoamisen hidastajina (esimerkki taulukossa 6). Mitä enemmän pinosylviinejä on, sitä hitaammin puuaine lahoaa. Kuvassa 21 vähiten hajonneessa kappaleessa oli eniten pinosylviinejä ja eniten hajonneessa niitä oli vähiten. Myös Folin Ciocalteu -menetelmällä mitatulla kokonaisfenolipitoisuudella on todettu olevan yhteys laboratoriolahotuskokeissa ilmenevään männyn sydänpuun painohäviöön (Heijari ym. 2005, Harju ym. 2006, Leinonen ym. 2008). Leppävuiran 40 puun kaatokoepuuotoksessa myös hartsihappojen pitoisuus korreloi puunäytteiden lahonkestävyyden kanssa (Leinonen ym. 2008). Soluseinien rakennekomponenteilla ei sen sijaan ole todettu olevan vaikutusta lahonkestävyyteen (Taulukko 6).

Taulukko 6. Lahotuskokeessa ilmenevän nuorpuualueelle syntyneen männyn sydänpuun painohäviön selittäjiä. Puunäytteet olivat peräisin 34-vuotiaasta Korpilahden jälkeläiskokeesta. (esim. Harju ym. 2002)

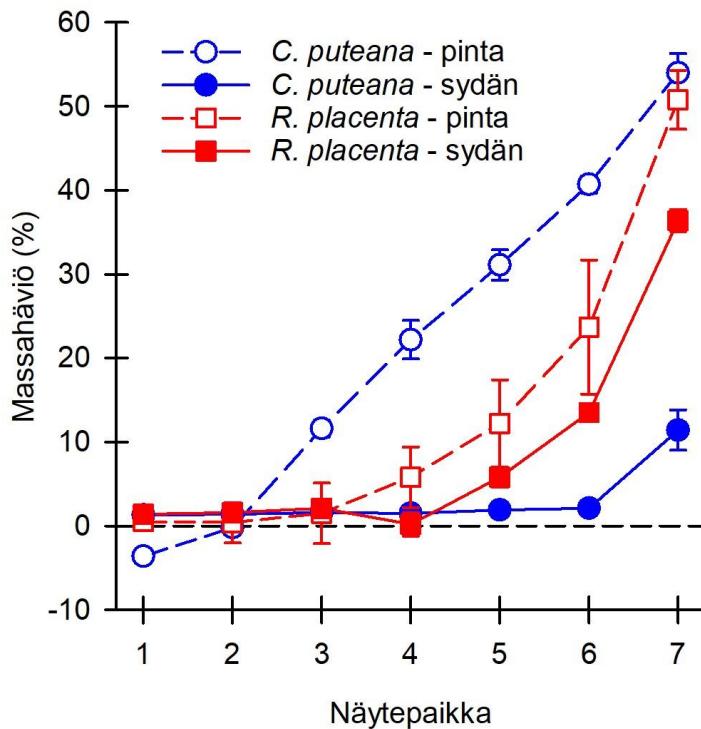
Yhdiste	Hitaasti lahoavat POIKKEAVAT nopeasti lahoavista	Hitaasti lahoavat EIVÄT POIKKEA nopeasti lahoavista	M-W-W- testi*
Hartsihapot ^a	x		0,004
Pinosylviini (PS) ^b	x		<0,001
Pinosylviinin monometyylieetteri (PSM) ^b	x		0,007
PS+PSM ^b	x		0,001
Fenoliset yhdisteet ^b	x		<0,001
Veden määrä tasapainotilassa ^b	x		0,060
Hemiselluloosa ^c		x	0,345
α-Selluloosa ^c		x	0,421
Ligniini ^c		x	0,500
Asetoniin liukenevat uuteaineet ^c	x		0,029

^aHarju ym. 2002, ^bVenäläinen ym. 2004, ^cHarju ym. 2003

*Mann-Whitney-Wilcoxon testi yksisuuntaisena (Sokal ja Rohlf 1995)

Vaikka lukuisat tutkimukset liittävät uuteaineet lahonkestävyyteen (Scheffer & Cowling 1966, ks. Taylor ym. 2002), uuteaineetkaan eivät tee sydänpuusta täysin lahoamatonta (ks. Hart & Shrimpton 1979), sillä sienet kykenevät vähitellen inaktivoimaan tai hajottamaan puun puolustusyhdisteitä (Karppanen ym. 2008, Lu ym. 2016, Belt ym. 2022). Eri lahottajasienten lahottamismekanismit poikkeavat toisistaan ja männyn sydänpuun onkin todettu olevan selvästi vastustuskykyisempi kellarisienen kuin istukkakäävän lahotustoiminnalle (Belt ym. 2022).

Belt ym. (2022) tekivät kokeen, jossa koeputkessa olevan lahottajasienikasvuston päälle pinotti mäntykappaleita, pintapuu- ja sydänpuukappaleet eri putkiin. Kokeen kesto aikana sienikasvustot kasvoivat vähitellen kohti näytepinon yläosaa alimmasta näytepaikasta kohti ylintä näytepaikkaa. Kun koeasetelma purettiin ja puunäytteiden painohäviö määritettiin, pinon pohjimmaiset kappaleet (näytepaikka 7) olivat lahonneet eniten ja pinon päällimmäiset (näytepaikka 1) vähiten (Kuva 23). Painohäviön määrittämisen jälkeen analysoitiin kunkin puunäytteen pinosylviinien pitoisuus. Istukkakääpä pystyi jo varhaisessa lahoamisen vaiheessa hajottamaan sydänpuunäytteiden pinosylviinit nopeasti ja tehokkaasti, kun taas kellarisienen vaikutuksesta pinosylviinipitoisuus ei juurikaan laskenut kokeen kesto aikana (Belt ym. 2022).



Kuva 23. Männyn pinta- ja sydänpuun massahäviöt lahotuskokeessa, jossa puukappaleet oli pinottu koeputkiin sienikasvuston päälle seitsemän kappaleen pinoihin. Lahottajasieninä olivat kellarisieni (*C. puteana*) ja istukkakääpä (*R. placenta*). Näytekappaleiden numerointi: 1, päällimmäinen näytekappale; 7, lähinnä sienikasvustoa ollut pohjimmainen näytekappale. Virhepalkit +/- SD, n = 5. (Kuva: Tiina Belt). (Belt ym. 2022).

Lukuisten tutkimusten perusteella sydänpuun tiheys ei merkittävästi vaikuta sen lahonkestävyyteen (Southam & Ehrlich 1943, Rennerfelt 1947, Richards 1950, Harju & Venäläinen 2002, Venäläinen ym. 2003, Leinonen ym. 2008). Tiheys itsessään ei estä lahoamista, mutta tiheässä puussa on enemmän ainesta, jolloin lahoaminen kestää pitempään kuin kevyessä puussa. Käyttäjäkokeusten perusteella on esitetty, että tiheästä puusta valmistettu rakenne kestää pitempään kuin kevyestä puusta valmistettu.

Tietolaatikko D: Mitä lahottajasieniä rakennuksissa tavataan yleisimmin?

Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa (VTT) tehtiin yhteenveto vuosina 1978–1984 tarkastelluista VTT:lle lähetetyistä lahovaurionäytteistä (Viitanen 1986). Rakennuksissa eniten tuhoa aiheuttavat sienet olivat ruskolahottajia. Lähes puolella tapauksista vaurion aiheuttaja oli ollut lattiasieni, kellarisienen osuus oli noin 14 % ja ”laakakääpälajien” osuus oli n. 9 % (ks. Tietolaatikko Puuaineen lahonkestävyyden testaus). Lattia- ja seinärakenteiden vauriot olivat saaneet yleisimmin alkunsa vesivahingosta, rakennusvirheestä tai rakenteiden puutteellisen tuuletuksen vuoksi (Viitanen 1986).

6. Männyn sydänpuun luontaisen kestävyysvaihtelun hyödyntäminen

6.1. Sydänpuutavaran lajittelu

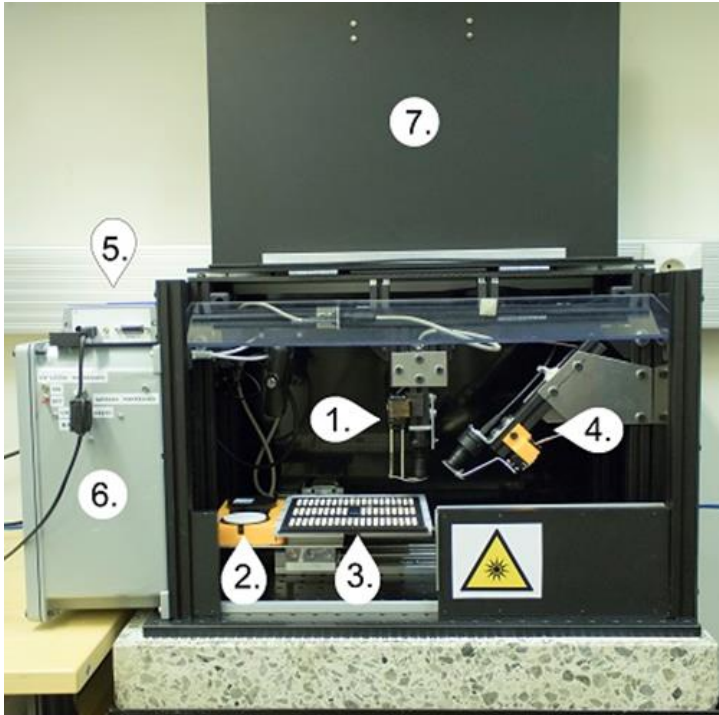
Kun puuraaka-aine sopii hyvin käyttötarkoitukseensa, sen laatua voidaan pitää hyvänä. Kohteissa, joissa rakenteet eivät altistu niitä turmeleville sääolosuhteille, voidaan käyttää vaikkapa männyn pintapuuta. Männyn pintapuun kestävyyttä säätä ja hajottajaeliöitä vastaan voidaan parantaa painekyllästyksellä ja pintakäsittelyillä. Kyllästettyä puutavaraa voidaan käyttää maakosketuksessa ja olosuhteissa, joissa puurakenne ei pääse välillä kuivumaan. Silloin on riskinä kyllästykseen käytettyjen aineiden huuhtoutuminen ympäristöön.

Männyn sydänpuuta ei voida sen läpäisemättömyyden vuoksi kyllästää kuin pinnalta. Luontaisesti runsaasti uuteaineita sisältävää, lahonkestävää männyn sydänpuuta voidaan käyttää sellaisenaan kyllästetyn puutavaran asemesta kohteissa, joissa se altistuu säälle ja satunnaiselle kastumiselle. Maakosketuksessa männyn sydänpuun lahonkestävyys ei yleensä riitä pitkää, yli 10–15 vuoden käyttöikää vaativissa kohteissa. Sydänpuun uuteainepitoisuudessa ja lahonkestävyydessä ilmenevä luontainen vaihtelu hankaloittaa sydänpuun hyödyntämistä kohteissa, joissa luontainen lahonkestävyys voisi olla riittävä rakenteen elinkaaren kannalta.

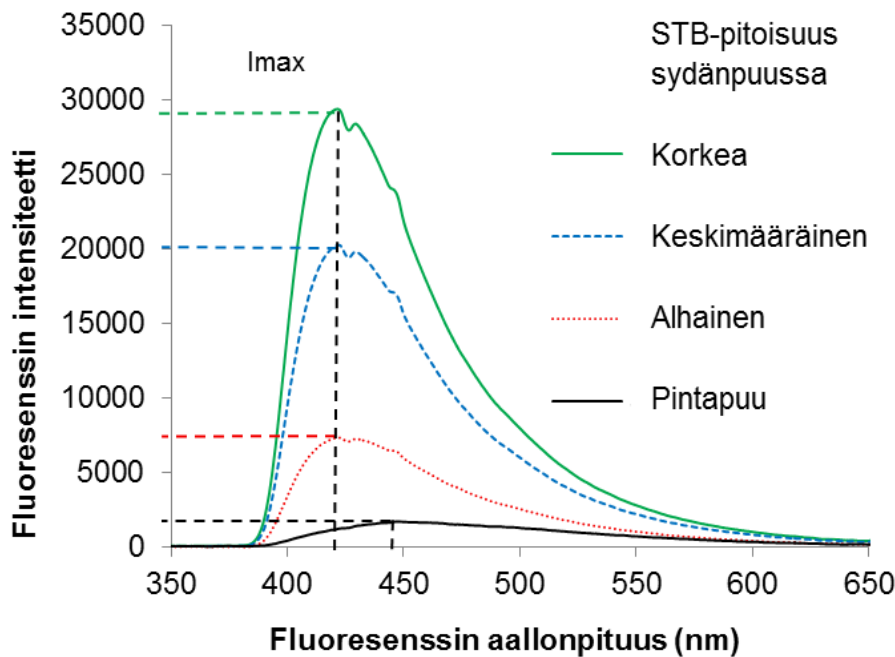
Kaikilla suurilla ja useilla keskisuurilla suomalaisilla sahoilla käytössä olevalla tukkien läpivalaisumenetelmällä, tukkiröntgenillä, voidaan mitata tukkien mittasuhteiden ja tilavuuden lisäksi esimerkiksi oksien paksuus ja sijainti sekä sydänpuun määrä. Mitattavien tunnusten avulla voidaan jakaa tukit laatuluokkiin, optimoida sahausasetteet sekä tunnistaa tukeissa mahdollisesti olevia vierasesineitä. Myös tukkien lajittelu sydänpuun määrän mukaan on mahdollista. Tukkiröntgenillä ei voida kuitenkaan mitata sydänpuun kestävyteen vaikuttavien uuteaineiden pitoisuuksia.

Sydänpuun lajittelu uuteainepitoisuuden perusteella lahonkestävyyden ja kosteudensiedon ennusteeltaan erilaisiin laatuihin parantaisi sydänpuun hyödynnettävyyttä. Sahauslinjan yhteydessä tapahtuva lajittelu olisi mahdollista suoraan puun pinnasta tehtävillä nopeilla mittauksilla. Lähi-infrapunaspektroskopia (near-infrared spectroscopy, NIRS) on todettu toimivaksi menetelmäksi puun uuteaineiden pitoisuuden tunnistamiseksi ja lahonkestävyyden ennustamiseksi monilla puulajeilla, myös männyllä (Flæte & Haartveit 2004, Leinonen ym. 2008; Pulkka ym. 2016). NIRS-menetelmä on kuitenkin herkkä esimerkiksi raaka-aineen kosteuden ja tiheyden vaihtelulle (Hein ym. 2010, Leblon ym. 2013, Chaix ym. 2018).

Männyn sydänpuun pinosylviinien pitoisuuden määrittämisessä ja sen perusteella tehtävässä laatulajittelussa voitaisiin hyödyntää myös Johanssonin (2003) ehdottamaa fluoresenssispektroskopiamenetelmää. On todettu, että pinosylviinit fluoresoivat kirkkaan sinisenä, kun niihin kohdistetaan UVB-säteilyä (Johansson 2003, Antikainen ym. 2012) (Kuva 5, vasen). Luonnonvarakeskuksessa laboratoriomittakaavan prototyypilaitteistolla (Kuva 24) tehdyillä mittauksilla todettiin, että mitä enemmän sydänpuussa oli pinosylviinejä, sitä voimakkaammin se fluoresoi (Kuva 25) (Belt ym. 2021). Yhteys mitatun fluoresenssin ja laboratoriokeudessa todetun sydänpuun painohäviön välillä oli kohtalainen (Belt ym. 2021). Näyttää siltä, että kaikkein lahonkestävin ja lahoamiselle herkin sydänpuu pystytään erottelemaan keskimääräisen lahonkestävyyden omaavasta sydänpuusta.



Kuva 24. Fluoresenssin mittauslaite. 1 = UV-LED-herätelähde ja näkyvän valon suodatin, 2 = valkoinen standardi, 3 = askeltaen liikkuva näytealusta, 4 = fluoresenssin rekisteröinti (UV – suodatin, linssi ja optinen kuitu), 5 = spektrometri, 6 = ohjausyksikkö, 7 = kansi. Mittauksen alkaessa näytekammion kansi suljetaan estämään valon pääsy mittauskammioon ja turvallisen työskentelyn varmistamiseksi. (Belt ym. 2021).



Kuva 25. Esimerkkejä männyn sydänpuun (korkea, keskimääräinen ja alhainen fluoresenssin intensiteetti) ja pintapuun fluoresenssin emissiospektreistä. Fluoresenssin voimakkuuden mitattana käytettiin spektrin intensiteettimaksimin arvoa (I_{max}). STB = kokonaispinoisylinipitoisuus.

Koemittauksissa todettiin kuivana ja kosteana mitattujen puunäytteiden fluoresenssin voimakkuuksien poikkeavan toisistaan, mutta niiden välillä oli voimakas korrelaatio (Belt ym. 2021). Puutavarakappaleita ei siis tarvitsisi kuivata ennen fluoresenssimittausta ja lajittelua. Kunhan kaikki mittaukset tehdään samanlaisissa olosuhteissa, mittausmenetelmä vaikuttaisi soveltuvan männyn sydänpuun laatulajitteluun. Koska pintapuussa ei ole pinosylviinejä (Kuva 25), fluoresenssimenetelmää voidaan hyödyntää myös sydän- ja pintapuun erottamiseen toisistaan (Antikainen ym. 2012).

Lyhyen aikavälin sovelluksissa spektroskooppisia menetelmiä voidaan hyödyntää puutavaran lajittelussa ja pitkällä aikavälillä metsänjalostuksessa etsittäessä runsaasti pinosylviinejä sydänpuuhunsa tuottavia mänty-yksilöitä tulevien puusukupolvien vanhemmiksi.

6.2. Metsänjalostuksen mahdollisuudet

Metsikköaineistot ilmentävät fenotyyppistä eli ilmiasussa ilmenevää vaihtelua. Vaihtelu on todella laajaa ja osa siitä on periytyvää eikä pelkästään ympäristön aiheuttamaa.

6.2.1. Metsänjalostuksen tavoitteet Suomessa

Puun monet käyttömuodot asettavat sille erilaisia laatuvaatimuksia, jotka on huomioitava metsänviljelyssä käytettävän siemen- ja taimiaineiston jalostuksessa. Hyvälaatuista raaka-ainetta on tuotettava sekä kemiallisen että mekaanisen puunjalostusteollisuuden tarpeisiin.

Metsänjalostuksen tavoitteena on suunnata viljelymetsissä kasvavien puiden ominaisuuksia siten, että puusta valmistettaville tuotteille saadaan enemmän lisäarvoa. Männyn jalostuksessa on keskitytty tilavuuskasvun, viljelyvarmuuden ja sahapuun laatuominaisuuksien parantamiseen (ks. Haapanen & Mikola 2008). Jalostusohjelman toimintamalleilla varmistetaan perinnöllisen muuntelun tehokas hyödyntäminen ja sopeutuminen muuttuvaan ilmastoon. Jalostetun siemenen käytöllä metsänuudistamisessa on parannettu selvästi puuntuotosta ja ulkoista laatua verrattuna luonnonmetsiköiden siemenellä uudistamiseen (Ruotsalainen & Persson 2013).

Luonnonvarakeskuksen Metsänjalostus-verkkosivuilta löytyy tietoa metsänjalostuksesta sekä jalostetun metsänviljelyaineiston tuotannosta ja käytöstä (Luonnonvarakeskus).

6.2.2. Männyn sydänpuuominaisuuksien periytyminen

Ominaisuuksien periytymisellä tarkoitetaan sitä, että keskenään sukua olevat yksilöt muistuttavat toisiaan enemmän kuin muita, ei sukua olevia yksilöitä. Jotta metsänjalostukseen liittyvää valintaa tietyssä puun ominaisuudessa voidaan tehdä, on ominaisuudessa oltava periytyvää muuntelua. Silloin jälkeläistöt muistuttavat vanhempiaan ja valinnan seurauksena metsänviljelyaineistoissa ominaisuuden keskiarvo muuttuu haluttuun suuntaan. Useissa tutkimuksissa on todettu, että männyn sydänpuun uuteaineiden, varsinkin pinosylviinien ja hartsihappojen, pitoisuudet periytyvät voimakkaasti (Fries ym. 2000, Ericsson ym. 2001, Harju ym. 2009, Partanen ym. 2011). Laboratoriossa tehdyissä lahotuskokeissa männyn sydänpuun lahonkestävyyden periytyvyysaste on vaihdellut alhaisesta kohtalaiseen (Harju ym. 2001, Harju & Venäläinen 2002). Sydänpuun lahonkestävyyden jalostaminen olisi siis periaatteessa mahdollista (Venäläinen 2002). Sydänpuun tiheyden periytyvyysasteen on myös todettu olevan kohtalaisen korkea (esim. Velling 1974, Harju ym. 2001, Harju & Venäläinen 2002, Fries & Ericsson

2006, Fries & Ericsson 2009, Hong ym. 2014). Kasvua kuvaavien tunnusten (esim. pituus, rinnankorkeusläpimitta) ja sydänpuun määrää kuvaavien tunnusten periytyvyysaste on ollut selvästi alhaisempi kuin uuteainepitoisuuden ja tiheyden (Haapanen ym. 1997, Fries 2012). Myös ominaisuuksien väliset perinnölliset riippuvaisuussuhteet olisi otettava huomioon sydänpuun laatuun liittyvän valintajalostuksen suunnittelussa.

Jotta jalostuksessa valinta säilyy tehokkaana, on samanaikaisesti jalostettavien ominaisuuksien määrää rajoitettava jalostuspopulaatioissa. Erityisesti silloin, jos hyväkasvuiset puut tuottaisivat vähemmän sydänpuuta tai muodostuva sydänpuu sisältäisi lahoamiselta suojaavia yhdisteitä vain vähän, näiden ominaisuuksien samanaikainen jalostaminen olisi vaikeaa. Eri ominaisuuksien jalostamiseen keskittyvien erillisten jalostuspopulaatioiden ylläpitäminen ei yleensä ole kustannussyistä mahdollista (esim. Byram ym. 2005). Tulevaisuudessa metsänviljelyaineiston jalostuksessa saattaa olla kannattavaa hyödyntää puiden taudinkestävyydessä ja puuraaka-aineen pitkäaikaiskestävyydessä esiintyvää perinnöllistä vaihtelua. Yksi mahdollisuus jalostusohjelmiin kuulumattomien ominaisuuksien perinnöllisen vaihtelun hyödyntämiseen voisi olla testatuilla siemenviljelyksillä tehtävä valikoiva siemenen keruu (Partanen ym. 2011).

7. Männyn puuraaka-aine rakentamisessa ja puutuotteissa

7.1. Puuraaka-aineen käytön merkitys

Kasvaessaan puut sitovat yhteyttämisreaktioissa ilmakehän hiilidioksidia solurakenteidensa hiiliyhdisteisiin ja toimivat hiilinieluinä sekä vapauttavat happea ilmakehään. Käyttämällä puuraaka-ainetta pitkäikäisiin tuotteisiin saadaan puuhun sitoutunut hiili pidettyä varastoituna mahdollisimman pitkään ennen sen mahdollista palautumista ilmakehään.

Puun ominaisuuksien muotoutumiseen vaikuttavat puuyksilön perimä, kasvupaikka ja alati vaihtelevat ympäristöolosuhteet. Puuraaka-aineelle on tyypillistä laaja vaihtelu kaikissa myös käytön kannalta tärkeissä ominaisuuksissa. Mänty-yksilöt ovat keskenään erilaisia ja myös rungon sisäinen vaihtelu on suurta. Koska uusia puusoluja tuottavan jälleen ikä sekä luston syntyvuoden aikaiset olosuhteet vaikuttavat puuaineksen ominaisuuksiin, on runkojen sisällä vaihtelua sekä pituus- että säteensuuntaisesti. Männyn puuaineksen hyödyntämisessä onkin huomioitava ominaisuuksien luontainen vaihtelu. (Liite 1)

Kaikkien puun käyttöominaisuuksien taustalla vaikuttavat puuaineksen perusominaisuudet (solu- ja solukkorakenne, vuosilistorakenne, tiheys, uuteaineet). Männyn puuaineksen käytettävyyteen vaikuttavat laatuominaisuudet poikkeavat kahden keskeisen puutuoteteollisuuden segmentin eli puusepän-teollisuuden ja rakentamisen välillä (Grekin 2006). Huonekaluja valmistavan puusepän-teollisuuden ja sisustustuotteiden kannalta tärkeitä ovat esteettiseen ilmeeseen vaikuttavat visuaaliset ominaisuudet (väri, kuviointi, oksaisuus, syysuunnat, harmonia), työstettävyys ja kulutuksenkesto (kovuus, syysuunnat, oksaisuus, liimautuvuus, soveltuvuus pintakäsittelyihin), mitta- ja muotopysyvyys ja haihtuvien yhdisteiden laatu ja määrä. Rakentamisessa käytettäviä puutuotteita ovat mm. sahatavara, viilupuu (LVL), ristiinliimattu monikerroslevy (CLT) ja rakennusliimapuu (GLT) (ks. esim. Puufon verkkosivut). Niiden kannalta tärkeimpiä ominaisuuksia ovat lujuus, jäykkyys, mitta- ja muotopysyvyys, halkeilemattomuus, lohkeilemattomuus, työstettävyys, liimattavuus, pintakäsitteltävyys ja kyllästettävyys sekä homeensieto ja sään-, lahon- ja UV-valon kestävyys.

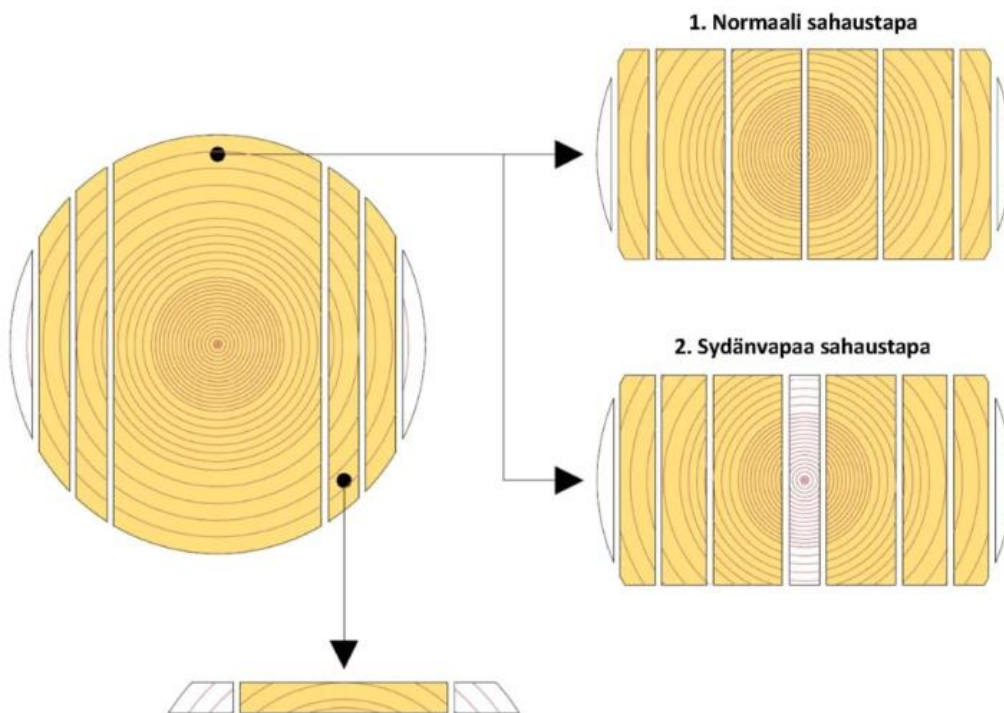
Yli 70 % saha- ja puutuoteteollisuuden tuotteista käytetään rakentamiseen, jossa ne joutuvat kilpailemaan muiden pitkälle hioutuneiden ja vakiintuneiden materiaalien, tuotteiden, tuotantoverkostojen ja toimintamallien kanssa (Nyyssölä ym. 2023). Merkittävistä rakennusmateriaaleista puu on ainoa, joka uusiutuu ja joka toimii pitkäaikaisena hiilivarastona. Rakennusten hiilijalanjäljen laskenta on tullut osaksi suomalaisia rakennusmääräyksiä 1.1.2025 alkaen. Rakennustuotteiden ympäristöselosteilla (EPD) esitetään niiden ympäristövaikutukset koko elinkaar-ajalle. Männyn sydänpuun käyttö edistää osaltaan viisasta ja pitkäikäistä puun käyttöä.

Ympäristöministeriö hallinnoi vuosina 2016–2023 puurakentamisen ohjelmaa, jonka tavoitteena oli edistää ja monipuolistaa puun käyttöä rakentamisessa sekä nostaa puutuotteiden jalostusarvoa ja tukea vientiä. Ohjelman aikana rahoitettujen hankkeiden perustiedot, tiivistelmät ja linkit hankkeiden aineistoihin löytyvät julkaisusta Le Roux 2020 (toim.). Julkaisussa todetaan, että ohjelman päätyttyä jäi iso vaje puurakentamisen tutkimuksen ja kehittämisen rahoitukseen. Tarvitaan toimia, joilla ohjelmassa saadut tulokset ja hyvät käytännöt saataisiin siirrettyä käytännön toimintaan.

7.2. Sahatavara ja sen jalosteet

Suomen sahateollisuus käytti vuonna 2023 mäntytukkia 12,0 miljoonaa m³, josta tuontipuuta oli vain 20 000 m³. Mäntysahatavaraa tuotettiin yhteensä 6,2 miljoonaa m³ (Luonnonvarakeskus, Tilastotietokanta).

Poikkileikkaukseltaan pyöreä tukki jalostuu sahalinjalla erilaisiksi kantikkaiksi sahatavarakappaleiksi. Suomen sahoilla noudatetaan yleisimmin pohjoismaista sahauskäytäntöä, nelisahausta (Kuva 26). Sahapintaiselle puutavaralle on annettu leveyden ja paksuuden perusteella erilaisia nimityksiä: rima, lauta, soiro, lankku ja parru. Tukin sisäosasta saatavia, yleensä vähintään 32 mm paksuja, kappaleita kutsutaan keski- tai sydäntavaraksi, mutta ne eivät ole aina kokonaan sydänpuuta. Sydänvapaaksi kutsutaan sellaista keskitavaraa, josta ydintä ympäröivä nuorpuu, paksuudeltaan vähintään ohuin lautapaksuus, on sahattu pois. Tukin pintaosasta sahattavat pintalaudat ja usein myös niiden alta sahattavat sivulaudat ovat lähes poikkeuksetta pelkkää pintapuuta. Koko saannosta suurin osa on sekä sydän- että pintapuuta sisältäviä ns. sekasaheita (Kuva 27).



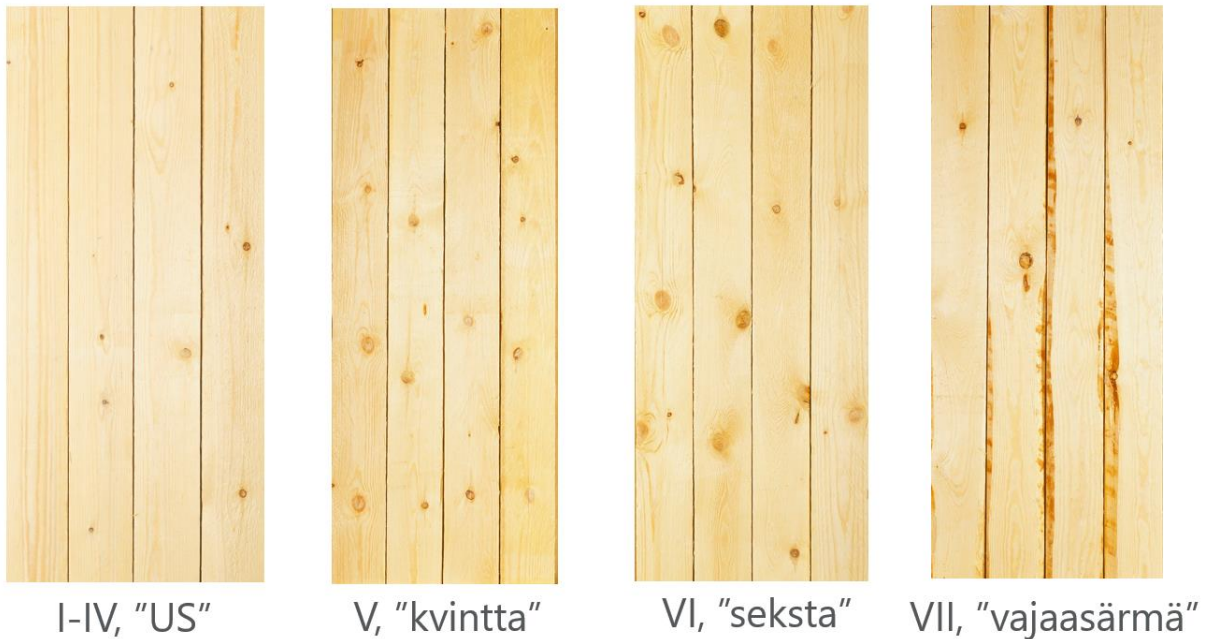
Kuva 26. Pohjoismaisen sahauskäytännön eli nelisahauksen mukaisia sahaustapoja ovat normaali ja sydänvapaa sahaustapa, joista jälkimmäisessä ydintä ympäröivä sisin osa, joka on nuorpuuta, erotetaan omaksi kappaleekseen muusta sahatavaraista. On huomattava, että tässä piirroksessa esitetty puun vuosilistorakenne poikkeaa männylle luontaisesta kasvutavasta, jossa lustot kapenevat pintaa kohden (vrt. esim. Kuvat 3 ja 27). Kuvakaappaus sivustolta <https://puuinfo.fi/puutieto/sahatavara-ja-sen-jalosteet/tukin-sahaus/>.



Kuva 27. Sydän- ja pintapuuta sisältäviä keskitavaralankkuja, joissa on mukana myös sydänpuuksi muuttunut nuorpuu.

Sahauksen ja kuivauksen jälkeen sahatavaran jalostamista voidaan jatkaa höylämällä saheet mitallistetuksi puutavaraksi tai muotohöylätyiksi vakiotuotteiksi. Oksaton pintapuuri voidaan höylätä listaksi, laudat voidaan höylätä ulko- tai sisäverhouslaudoiksi tai lattialaudoiksi ja soivot sekä lankut esimerkiksi liimapuulamelleiksi. Oksaisesta saheesta voidaan leikata oksainen kohta pois ja liimata oksattomat osat yhteen sormijatkoksella. Sormijatkoksilla voidaan tuottaa oksattomia kokonaan sydänpuuta olevia pitkiä ja suoria sahatavarakappaleita. Sormijatkamista käytetään sekä rakennusliimapuun, huonekaluliimalevyjen että ikkuna- ja ovikomponenttien ja lattia-, kynnyksen- ja porraslautojen valmistukseen. Rakenteisiin käytettävän sormijatkettujen sahatavaran valmistus on luvanvaraista ja siinä on oltava sormijatkamisen ilmaiseva leima (Puutavaraopas 2023).

Metsä- ja puualan ammattilaisten sekä metsänomistajien mielikuvaa laatupuusta on vuosikymmenten ajan muovannut vientiin menevän havusahatavaran laatuluokitus, koska se on määrännyt tukeista ja varsinkin sahatavarasta saatavan hinnan. Pohjoismaisessa vientiluokituksessa männyn sahatavara luokitellaan ulkonäön perusteella seitsemään luokkaan (Pohjoismainen sahatavara, 2016) (Kuva 28). Neljä parasta luokkaa muodostavat vientiin kelpaavan, korkeat ulkonäkövaatimukset täyttävän ns. US-laadun. Näitä parhaita laatuja käytetään tietysti myös kotimaassa puusepäntuoteisiin, paneelisiin ja listoihin. Muut laadut, jotka tunnetaan nimityksillä kvintta, seksta ja vajasärmä käytetään monenlaisiin rakentamisen tarkoituksiin ja muihin käyttökohteisiin. Sahatavaran lajittelua on jo pitkään tarkennettu asiakkaiden vaatimusten perusteella, jolloin sekä lajittelukriteerit että vaatimusasteet poikkeavat asiakkaiden välillä.



Kuva 28. Pohjoismaisen vientiluokituksen mukaiset mäntysahatavaran laatuluokat. Kuvat: Seppo Kaksonen/Puuinfo Oy.

Tärkein vientilaatuun vaikuttava tekijä on oksaisuus eli oksien koko, lukumäärä, laatu ja sijainti. Parhaassa laatuluokassa, US I, edellytetään lähes täydellistä oksattomuutta. Hyvälaatuisessa saheessa ei myöskään sallita halkeamia eikä ulkonäköön vaikuttavia vikoja kuten sinistymää. Lisäksi kappaleen täytyy olla suora eli lenkoutta tai kieroutta ei sallita. Vuosiluston paksuus eli kasvunopeus ei vaikuta laatuluokkaan.

Puutavaran laatu voidaan luokitella ulkonäön ohella myös sen lujuuden perusteella. Lujuuutta tarvitaan silloin, kun puutavarasta tehdään kantavia rakenteita. Silmänvaraisessa lujuusluokittelussa käytetään osittain samoja kriteerejä kuin ulkonäköluokittelussa (Kuva 29). Suuria oksia ei sallita, koska ne aiheuttavat saheen syyrakenteeseen heikon epäjatkuuskohdan eli lankku voi murtua läheltä oksaa. Lujuuslajittelun toinen päätekijä on kasvunopeus, joka ilmenee vuosiluston paksuutena. Hyvin nopeasti kasvanut puu (keskimääräinen lustonpaksuus yli 4 mm) ei kelpaa kaikkein vaativimpiin lujuusluokkiin. Nykyään lujuuslajittelu tapahtuu enimmäkseen koneellisesti. Tällöin myös silmälle näkymättömät lujuuteen vaikuttavat tekijät, erityisesti puuaineen tiheys, vaikuttavat lajittelutulokseen.



Kuva 29. Koulutuksen saanut henkilö voi tehdä mäntypuutavaran lujuuslajittelun silmänvaraisesti INSTA 142 -standardin mukaisesti. Kuva: Jouni Silvast/Metsäkeskus.

Suuri osa Suomessa tuotetusta laadukkaasta sahatavarasta menee vientiin jalostamattomana tai vain vähän jalostettuna, kuten höylätavarana, tolppina ja paaluina tai kyllästettynä puuna. Olisi tärkeää tarjota sekä vientiin että kotimaiseen käyttöön mahdollisimman pitkälle jalostettuja pitkäikäisiä puutuotteita, kuten puuelementtejä, rakennuspuusepäntuotteita, erityyppisiä levyjä ja fysikaalisesti tai kemikaalisesti modifioituja puutuotteita (Verkasalo ym. 2005. Nyys-sölä ym. 2023).

Suomessa huonekaluteollisuudella on jalostusarvona mitattuna puutuoteteollisuuden korkein taso, mutta kotimaan huonekalumarkkinoiden rajallisuuden ja kuluttajavetoisuuden sekä vientimarkkinoiden ankaran kilpailun ja kulttuurisidonnaisten vaatimusten vuoksi alan kasvattaminen on vaikeaa (Nyys-sölä ym. 2023).

7.3. Rakenne- eli insinööripuutuotteet

Massiivipuusta ja muista puumateriaaleista erilaisilla tekniikoilla koostettuja puuvalmisteita kutsutaan rakenne- eli insinööripuutuotteiksi. Näillä tekniikoilla voidaan tuottaa laattoja, pila-reita ja palkkeja, joiden fyysistä kokoa tai muotoa eivät rajoita yksittäisestä rungosta saatavan sahatavarakappaleen mitat. Toinen suuri rakennepuutuotteen etu on, että se on laadultaan tasaisempi kuin yksittäinen runko tai sahe, jossa on useimmiten vikoja. Puulajina mänty sopii hyvin näiden tuotteiden raaka-aineeksi (Kuva 30).

Rakennepuutuotteet tarjoavat sahatavaraan verrattuna useita ratkaisevia etuja teolliseen puu-rakentamiseen. Tärkeimmät Suomessa käytettävät rakennepuutuotteet tällä hetkellä ovat sahatavaralamelleista liimattu liimapuu (GLT), sorvatuista viiluista liimattu viilupuu (LVL) ja ristiinliimattu monikerroslevy (CLT), joka saadaan liimaamalla yhteen ristikkäisiä lautakerroksia. Perinteinen vaneri, jonka valmistusta viilupuu valmistus muistuttaa, luokitellaan levytuotteeksi. Erityyppisten rakennepuutuotteiden kuvaukset löytyvät esimerkiksi Puufon sivus-tolta.



Kuva 30. Mäntylankuista liimattua monikerroslevyä.

7.4. Käyttökohteet

Pohjoismainen männyn sahauskäytäntö (Kuva 26) tuottaa kolmen tyyppisiä sahatavaroita: tuokin pintaosista saatavat saheet ovat pelkkää pintapuuta ja paksun tyvitukin sydänosasta saatetaan saada pelkkää sydänpuuta olevia lankkuja, mutta suuri osa saheista on pinta- ja sydänpuuta sisältäviä sekakappaleita. Useimmissa mäntypuutavaran käyttökohteissa ei ole tarvetta erotella sydän- ja pintapuuta (Taulukko 7). Mikäli käyttökohteeseen tarvitaan erityisesti jompaakumpaa, joudutaan raaka-aine ja saheet valitsemaan huolellisesti (Taulukko 8). Sydän- ja pintapuukappaleiden ja sekakappaleiden erottaminen välittömästi kuivauksen jälkeen on epävarmaa ilman erikoislaitteita (UVB-säteilylähde tai NIR-spektroskopia). Käytännössä lajitteluun sovelletaan nykyisin kameralajittelua, esim. FinScan-laitteistolla.

Männyn erityisiä sydän- ja pintapuutuotteita on valmistettu Suomessa asiakastuotteina vuosikymmeniä, mutta varsinaisia tuotekonsepteja tai volyymituotantoa ei ole syntynyt. Eräät suuret ja keskisuuret sahayritykset, esimerkiksi Pölkky Oy ja Kuhmo Oy, lajittelevat sydänpuutukkeja sahaukseen ja valmistavat paljon sydänpuuta sisältävää sahatavaraa asiakastoimituksiin käytettäväksi muun muassa ovien, ikkunoiden, lattiamateriaalien ja piha- ja puutarharentamisen tuotteisiin.

PK-sektorilla on edelleenkin saha- ja jatkojalostusyhtiöitä, jotka toimivat tuotestrategialla, jossa sovelletaan joko sydänpuulle sovitettua sirkkeli- tai vannesahausta tai sahaustapojen yhdistelmiä (mm. FinnStamm Oy, Savitaipale (ks. BRANCHES: Parhaita käytäntöjä); Kurikka Timber Oy, Äänekoski). Toiminnassa on myös muutamia yrityksiä, jotka valmistavat männyn sydänpuusta erityisesti ikkunoita ja ovia, kuten Profin Sydänpuu Oy, Joutsa (Pihla Groupin osa). Kiinnostusta valmistuksen lisäämiseen on puutuotealan kehittyvissä yrityksissä erityisesti Pohjois-Suomessa.

Vuosituhanen alkuvuosina kehitettiin suursahateollisuuteen soveltuvat rinnakkaiset sydän- ja pintapuutuotteet, jotka perustuivat tukkiröntgenlajittelun tehokkaaseen soveltamiseen ja jatkojalostuksen ja tuotesuunnittelun erityiseen yhdistämiseen (Stora Enso Wood Products,

Honkalahden saha). Lajitelluista sydänpuutukeista sahattiin omilla asetteillaan täyssydänpuista sahatavaraa (WoodHeart-tuotemerkki), josta valmistettiin edelleen sormijatkamalla aihioita ikkuna-, ovi-, kaide- ja huonekalutuotteiden valmistukseen (EffexDura-tuotemerkki). Pintapuusahatavaran ja erityisesti sivulautojen hyödyntämiseksi kehitettiin puolestaan sisäseinärakenne, jonka pohjalta valmistettiin eri kokoon muunneltavia elementtituotteita sisustamiseen (EffiWood tuotemerkki). Kummankaan tuoteryhmän kysyntä ei vastannut kaikkia tavoitteita viennissä eikä kotimaan myynnissä, mutta sydänpuutuotteet ovat edelleen markkinoilla.

Taulukko 7. Mäntypuutavaran käyttökohteita, joissa pinta- ja sydänpuuta ei tarvitse erotella.

Männyn sydän- tai pintapuu tai molempia sisältävät sekakappaleet
Käyttökohteet
<ul style="list-style-type: none"> - erityyppiset sahatavarat rakennusten rungoissa, välipohjissa, kattorakenteissa, ulkovuorauksessa, lattioissa ja sisustuksissa joko puupintaisina tai maalattuina - tilapäiset rakenteet kuten siltavalujen tukirakenteet - teollisessa puurakentamisessa käytettävät rakenne- eli insinööripuutuotteet: liimapuu (GLT), viilupuu (LVL), ristiinliimattu monikerroslevy (CLT), havuvaneri (voidaan tehdä myös männystä) - massiiviset ja liimatut rakennushirret, hirsitalot ja -huvilat - liimapuulevyt kalusteiden kuten pöytien, hyllyjen ja laatikostojen valmistukseen sekä askarteluun - puusepäntuotteet ja käyttöesineet - puupintaiset ruumisarkut - lämpöpuun raaka-aine - palosuojatun paneelin raaka-aine - kuormalavat, pakkauslaudat - kuivaus- ja paketointiritat - kyllästettynä puuna: A- ja AB-luokan kestopuu, sähkö-, valaisin- ja telepylväät, mastot, tolpat ja paalut, rata- ja kaivospölkkyt, piha- ja ympäristörakentaminen

Taulukko 8. Milloin tarvitaan sataprosenttista männyn pinta- tai sydänpuuta?

Käyttökohteesta johtuvat erityisvaatimukset	Käyttökohteet
Männyn pintapuu	
<ul style="list-style-type: none"> • oksattomuus (ilman sormijatkoksia) • värin tasaisuus myös pitkään jatkuvassa altistumisessa auringon valolle • kyllästeiden ja muiden käsittelyaineiden tasainen imeytyminen koko kappaleen läpi • hyvä liimattavuus erikoiskohteissa 	<ul style="list-style-type: none"> • sisustuslistat • taideteosten kehyslistat • puupintaiset paneelit ja sisustustuotteet, joiden halutaan säilyvän vaaleina ja tasavärisinä • puusepäntuotteet, joiden halutaan säilyvän vaaleina ja tasavärisinä • leikatut viilut erikoistarkoituksiin liimattavaksi (venelaudat, lentokoneenrakennus) • viilut levyjen pinnoittamiseen ja askarteluun • läpikyllästettävä tai läpivärjättävä puutavara
Männyn sydänpuu	
<ul style="list-style-type: none"> • kohtalainen luontainen lahonkestävyys (uuteainekyllästys) • pintapuu alhaisempi hygroskooppisuus • mitta- ja muodonmuutokset pieniä kosteuden vaihdellessa • kestävyys säärasitusta vastaan • kestävyys sinistymistä ja pintahomeita vastaan • lahonkestävyys pitkään jatkuvassa kosteusalituksessa maanpinnan yläpuolella, kun halutaan tai on pakko välttää kyllästysaineita • lahonkestävyys suhteellisen lyhyessä maakosketuksessa tai vedessä, kun halutaan välttää kyllästysaineita 	<ul style="list-style-type: none"> • design-tasoiset puusepäntuotteet • keittiössä käytettävät puuesineet • ikkunoiden ja ulko-ovien puitteet ja kehykset • ulko-ovet ja niiden kehykset • ulkovuorauslaudat • kattopaanut • erityiset hirsitalot, -huvilat ja -katokset • pihakalusteet ja muut ulkokäyttöön tarkoitetut kalusteet • kosteisiin tai talvisin kylmillään oleviin tiloihin tarkoitetut kalusteet • terassit, patiot ja laitureiden kansirakenteet • ulkoilu- ja viheralueiden rakenteet, kuntoportaat, pitkospuut • leikkikenttärakenteet • eläinten karsinat ja aitaukset • kasvihuoneet • paalut, joiden käyttöikä vähemmän kuin 10 (Etelä-Suomi) – 15 (Pohjois-Suomi) vuotta ja jotka eivät muodosta heiketessään turvallisuusriskiä • veneet

8. Männyn sydänpuun käytön edistäminen

Männyn sydänpuusta voidaan valmistaa tuotteita sekä sisä- että ulkokäyttöön. Koeteltuja käyttökohteita, joilla on markkinat olemassa, ovat ovien ja ikkunoiden puitteet ja kehykset, lattiat, terassit, ulkovuoraukset, laiturit, ulkokalusteet sekä retkeily- ja ulkoilualueiden rakenteet (Taulukko 7). Männyn sydänpuu soveltuu erittäin hyvin myös kulttuurihistoriallisesti tärkeiden kohteiden restaurointiin. Sydänpuutuotteita ei tarvitse välttämättä pintakäsitellä, ja niiden voidaan joissakin käyttökohteissa antaa harmaantua ajan myötä. Pitkää, yli 10–15 vuoden, suoraa maakosketusta sydänpuutuotteet eivät yleensä kestä. Puisissa sähkö-, valaisin- ja telepylväissä, joissa pintapuu on kyllästetty tehokkailla suoja-aineilla, kyllästymätön sydänpuu säilyy lahoamatta pylvään koko käyttöiän ajan (50–60 vuotta). Männyn sydänpuulle tyypillisiä hyviä ominaisuuksia voidaan hyödyntää myös rakenne- eli insinööripuutuotteissa.

Runsaimmin sydänpuuta on pitkään kasvaneissa hyvin järeissä männyissä. Järeästä vanhasta männystä on mahdollista saada myös oksattomia sydänpuusaheita. Täten tavallista pitempi kiertoaika lisäksi sydänpuun saantoa ja tuotteiden arvoa sahatavaran valmistuksessa ja mahdollisesti myös viilun sorvauksessa ja leikkauksessa. Puutuotteiden pitkäaikaiskestävyyden kannalta paras raaka-aine on mäntytuokeissa sydänpuun ulkoreunalla. Ydintä ympäröivää nuorsydänpuuta tulee puolestaan välttää vaativiin ja pitkän käyttöiän rakenteisiin tarkoitusta puutavarassa. Säännöllisten oksakiehkuroiden ja oksavälien ansiosta myös tyypillisen päätehakkuukokoisen männyn saheista on mahdollista valmistaa sormijatkamalla oksattomia sydänpuuaihioita.

Sydänpuutukkien tehokas sahaaminen, jolla laadukas sydänpuu saadaan hyödynnettyä täysimääräisesti, vaatii järeiden runkojen jalostamiseen erikoistuneen sahalaitoksen ja laitteiston. Nelisahauksen sijaan tulee harkita vaihtoehtoisia sahaustapoja kuten läpisahausta, pinnanmyötäistä sahausta, radiaalisahausta, kvarterisahausta tai pohjoisruotsalaisen mallin mukaisia erikoissahausten menetelmiä, joita ovat tähtisahausta, trapetsisahausta ja vinkkelisahausta, tässä suosittelavuusjärjestyksessä (Grönlund 1987, Sandberg 1992). Sahaustekniikan valinnassa ja soveltamisessa on otettava huomioon tukin mahdollisimman tarkka hyödyntäminen ja raaka-aineen hukkan minimointi kuten myös tuottavuus ja ajanmenekki. Tukit on myös kuorittava ennen sahausta, mikäli halutaan saada myyntikelpoista selluhaketta ja samalla polttohaketta parempia sivutuotetuloja.

Männyn sydänpuuraaka-aineen mekaanisessa jalostuksessa syntyy sivutuotteina huomattavia määriä haketta ja purua. Sydän- ja pintapuu sisältävät erilaisin määrin erilaisia uuteaineita, joita voidaan hyödyntää modernissa biojalostuksessa eri tavoin erilaisiin arvonlisätuotteisiin. Sydänpuussa on verraten korkea uuteainepitoisuus ja erityisiä uuteaineita voidaan ajatella eroteltavan sivutuotteista moniin käyttötarkoituksiin, sekä kuluttajatuotteisiin että teollisuuskemikaaleiksi (Näyhä ym. 2011, Bergström & Matisons 2014, Nisula 2018, Verkasalo ym. 2021, 2022).

Uusien vastuullisten ja kestävien männyn sydänpuutuotteiden suunnittelu ja toteutus onnistuvat parhaiten, kun lähtökohdaksi otetaan materiaalin ominaisuudet, joita voidaan hyödyntää ekologisten, kulutusta kestävien tuotteiden valmistamisessa sekä sisä- että ulkokäyttöön. Käyttäjäkokemusten lisäksi on otettava huomioon tuotteiden toimivuus, esteettisyys, muoto-kieli sekä valmistettavuus (Rytkönen & Rissanen 2024).

Tuotteiden ja käyttökohteiden suunnittelussa ja toteutuksessa olisi mahdollista huomioida uudella tavalla sydänpuuraaka-aineen ominaisuuksia hyödyntämällä tuotemuotoilun työvälineitä. Lähtökohtana uusien tuotteiden tai rakenneratkaisujen ideoimiselle olisi ongelman havaitseminen, johon haetaan kekseliästä ratkaisua. Matka ideasta ja tuotesuunnittelusta markkinoille on pitkä. Ekologisen tuotteen on kestävä aikaa ja sitä on oltava helppo huoltaa, korjata ja kierrättää (Rytkönen & Rissanen 2024).

9. Viitteet

- Alapieti, T., Mikkola, R., Pasanen, P. & Salonen, H. 2020. The influence of wooden interior materials on indoor environment: a review. *European Journal of Wood and Wood Products* 78: 617–634.
- Antikainen, J., Hirvonen, T., Kinnunen, J. & Hauta-Kasari, M. 2012. Heartwood detection for Scotch pine by fluorescence image analysis. *Holzforschung* 66: 877–881.
- Belt, T. 2018. Interactions between Scots pine heartwood extractives and wood decaying fungi. Aalto University Publication Series, Doctoral Dissertations 227/2018, 130 s. ISBN 978-952-60-8300-1 (pdf)
- Belt, T., Venäläinen, M. & Harju, A. 2021. Non-destructive measurement of Scots pine heartwood stilbene content and decay resistance by means of UV-excited fluorescence spectroscopy. *Industrial Crops and Products* 164: 113395.
- Belt, T., Harju, A., Kilpeläinen, P. & Venäläinen, M. 2022. Fungal degradation of extractives plays an important role in the brown rot decay of Scots pine heartwood. *Frontiers in Plant Science* 13: 912555.
- Bergström, B., Gustafsson, G., Gref, R. & Ericsson, A. 1999. Seasonal changes of pinosylvin distribution in the sapwood/heartwood boundary of *Pinus sylvestris*. *Trees*, 14(2): 65–71.
- Bergström, B. 2003 Chemical and structural changes during heartwood formation in *Pinus sylvestris*. *Forestry* 76: 45–53.
- Bergström, D. & Matisons, M. (toim.) 2014. Forest Refine 2012–2014: Efficient Forest Biomass Supply Chain Management for Biorefineries. Synthesis Report. Rapport 18, Department of Forest Biomaterials and Technology, Swedish University of Agricultural Sciences: Uppsala, Sweden. 113 s.
- Björklund, L. 1999. Identifying heartwood-rich stands or stems of *Pinus sylvestris* by using inventory data. *Silva Fennica* 33(2): 119–129.
- BRANCHES. Parhaita käytäntöjä: Sydänpuutavaraa ylijäreistä mäntytyukeista. Saatavilla internetistä: https://www.branches.fi/fi/branches-verkosto/parhaita-kaytantoja/?get_page=fi-leviewer&file=https://www.branches.fi/openfile/MTY2OTEyMzY3MV9QQTQzX03-DpG5ueW4gc3lkw6RuchHV1LnBkZg== Päivitetty 2025. Viitattu 10.2.2025.
- Byram, T.D., Myszewski, J.H., Gwaze, D.P. & Lowe, W.J. 2005. Improving wood quality in the western gulf forest tree improvement program: the problem of multiple breeding objectives. *Tree Genetics & Genomes* 1: 85–92.
- CEN/TS 15083-2:2005. Durability of wood and wood-based products - Determination of the natural durability of solid wood against wood-destroying fungi, test methods. Part 2: Soft rotting micro-fungi. 26 s.

- Chaix, G., Giordanengo, T., Segura, V., Mourey, N., Charrier, B. & Charpentier, J.P. 2018. Near infrared spectroscopy, a new tool to characterize wood for use by the cooperage industry. Teoksessa: Stevanovic, T. (toim.). Chemistry of lignocellulosics: Current trends. Boca Raton, Fla.:CRC Press. s. 42–65.
- Czajka, M., Fabisiak, B. & Fabisiak, E. 2020. Emission of volatile organic compounds from heartwood and sapwood of selected coniferous species. *Forests* 11(92): 1–14.
- Ekman, R. & Holmbom, B. 1989. Analysis by gas chromatography of the wood extractives in pulp and water samples from mechanical pulping of spruce. *Nordic Pulp & Paper Research Journal* 4: 16–24.
- Elowson, T., Bergström, M. & Hämäläinen, M. 2003. Moisture dynamics in Norway spruce and Scots pine during outdoor exposure in relation to different surface treatments and handling conditions. *Holzforschung* 57(2): 219-227
- EN 113-2:2020. Durability of wood and wood-based products. Test method against wood destroying basidiomycetes. Part 2: Assessment of inherent or enhanced durability. 30 s.
- Englund, F. 1999. Emissions of volatile organic compounds (VOC) from wood. Trätekt, Rapport I 9901001, 44 s. ISSN 1102–1071.
- Erdtman, V.H. 1939. Die phenolischen Inhaltsstoffe des Kiefernherzholzes, ihre physiologische Bedeutung und hemmende Einwirkung auf die normale Aufschließbarkeit des Kiefernherzholzes nach dem Sulfitverfahren. *Justus Liebigs Annalen der Chemie* 539: 116–127.
- Erdtman, V.H. & Rennerfelt, E. 1944. Der Gehalt des Kiefernherzholzes an Pinosylvin-Phenolen. Ihre quantitative Bestimmung und ihre hemmende Wirkung gegen Angriff verschiedener Fäulpilze. *Svensk Papperstidning* 47: 45–56.
- Erdtman, H., Frank, A. & Lindstedt, G. 1951. Constituents of pine heartwood. XXVII. The content of pinosylvin phenols in Swedish pines. *Svensk Papperstidning* 54: 275–279.
- Ericsson, T., Fries, A. & Gref, R. 2001. Genetic correlations of heartwood extractives in *Pinus sylvestris* progeny tests. *Forest Genetics* 8(1): 73-79.
- Fang, W.W., Hemming, J., Reunanen, M., Eklund, P., Pineiro, E.C., Poljanšek, I., Oven, P. & Willför, S. 2013. Evaluation of selective extraction methods for recovery of polyphenols from pine. *Holzforschung* 67: 843–851.
- Fengel, D. 1970. Ultrastructural changes during aging of wood cells. *Wood Science and Technology* 4(3): 176-188.
- Fengel, D. & Wegener, G. 2011. *Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions*. De Gruyter, Inc., Berlin/Boston, 626 s.
- Flæte, P.O. & Haartveit, E.Y. 2004. Non-destructive prediction of decay resistance of *Pinus sylvestris* heartwood by near infrared spectroscopy. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 55–63.

- Fries, A. 2012. Genetic parameters, genetic gain and correlated responses in growth, fibre dimensions and wood density in a Scots pine breeding population. *Annals of Forest Science* 69: 783–794.
- Fries, A., Ericsson, T. & Gref, R. 2000. High heritability of wood extractives in *Pinus sylvestris* progeny tests. *Canadian Journal of Forest Research* 30: 1707–1713.
- Fries, A. & Ericsson, T. 2006. Estimating genetic parameters for wood density of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Silvae Genetica* 55(2): 84–92.
- Fries, A. & Ericsson, T. 2009. Genetic parameters for earlywood and latewood densities and development with increasing age in Scots pine. *Annals of Forest Science* 66: 1–8.
- Gjerdrum, P. 2003. Heartwood in relation to age and growth rate in *Pinus sylvestris* L. in Scandinavia. *Forestry* 76(4): 413–424.
- Grekin, M. 2006. Nordic Scots Pine vs. selected competing species and non-wood substitute materials in mechanical wood products. Literature survey. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 36. 66 s.
- Grekin, M. & Verkasalo, E. 2010 Variations in Basic Density, Shrinkage and Shrinkage Anisotropy of Scots Pine Wood from Mature Mineral Soils Stands in Finland and Sweden. *Baltic Forestry* 16: 113–125.
- Grekin, M. & Verkasalo, E. 2013. Variations in and Models for Brinell Hardness of Scots Pine Wood from Finland and Sweden. *Baltic Forestry* 19(1): 128–136.
- Grönlund, A. 1987. Trapetssågning, vinkelsågning, fyrsågning. En jämförelse av volymsutbytet. Technical report / Luleå University of Technology, 1987:01. Luleå University of Technology, Department of Engineering Sciences and Mathematics, Wood Science and Engineering. ISSN 0349-3571
- Gustafsson, G. 2001. Heartwood and lightwood formation in Scots pine - A physiological approach. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Genetics and Plant Physiology, Umeå. *Silvestria* 193. 38 s.
- Gustafsson, G., Bergström, B., Gref, R. & Ericsson, A. 2003. Changes in chemical constituents in the sapwood of *Pinus sylvestris* due to debarking. *Scandinavian Journal of Forest Research* 18: 90–96.
- Haapanen, M. & Mikola, J. 2008. Metsänjalostus 2050 – pitkän aikavälin metsänjalostusohjelma. *Metlan työraportteja* 71. 60 s.
- Haapanen, M., Velling, P. & Annala, M.-L. 1997. Progeny trial estimates of genetic parameters for growth and quality traits in Scots pine. *Silva Fennica* 31(1): 3–12.
- Hakkila, P., Repola, J., Lindblad, J., Kalaja, H. & Verkasalo, E. 2020. Mänty- ja kuusikuitupuun ominaisuudet Etelä-Suomessa – Laadun vaihtelu ja hallinta. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 25/2020. Luonnonvarakeskus. 94 s.
- Hannrup, B., Danell, Ö., Ekberg, I. & Möel, M. 2001. Relationships between wood density and tracheid dimensions in *Pinus sylvestris* L. *Wood and Fiber Science* 33: 173–181.

- Harju, A.M., Kainulainen, P., Venäläinen, M., Tiitta, M. & Viitanen, H. 2002. Differences in resin acid concentration between brown-rot resistant and susceptible Scots pine heartwood. *Holzforchung* 56: 479–486.
- Harju, A., Möttönen, V., Heräjärvi, H., Hyttinen, M., Lampela, J., Pasanen, P. & Sivula, A. 2021. Massiivipuun päästöt sisäilmaan: Kirjallisuuskatsaus. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 17/2021. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 47 s.
- Harju, A.M. & Venäläinen, M. 2002. Genetic parameters regarding the resistance of *Pinus sylvestris* heartwood to decay caused by *Coniophora puteana*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17: 199–205.
- Harju, A.M. & Venäläinen, M. 2006. Measuring the decay resistance of Scots pine heartwood indirectly by the Folin-Ciocalteu assay. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 1797–1804.
- Harju, A.M., Venäläinen, M., Anttonen, S., Viitanen, H., Kainulainen, P., Saranpää, P. & Vapaavuori, E. 2003. Chemical factors affecting the brown-rot decay resistance of Scots pine heartwood. *Trees* 17: 263–268.
- Harju, A.M., Venäläinen, M., Laakso, T. & Saranpää, P. 2009. Wounding response in xylem of Scots pine seedlings shows wide genetic variation and connection with the constitutive defence of heartwood. *Tree Physiology* 29: 19–25.
- Hart, J.H. 1981. Role of phytostilbenes in decay and disease resistance. *Annual Review of Phytopathology* 19: 437–158.
- Hart, J.H., Shrimpton, D.M. 1979. Role of stilbenes in resistance of wood to decay. *Phytopathology* 69(10): 1138–1143
- Hein, P.R.G., Lima, J.T. & Chaix, G. 2010. Effects of sample preparation on NIR spectroscopic estimation of chemical properties of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake wood. *Holzforchung* 64: 45–54.
- Heijari, J., Nerg, A.-M., Kaakinen, S., Vapaavuori, E., Raitio, H., Levula, T., Viitanen, H., Holopainen, J.K., & Kainulainen, P. 2005. Resistance of Scots pine wood to brown-rot fungi after long-term forest fertilization. *Trees* 19: 728–734.
- Hillis W.E. 1987. Heartwood and tree exudates. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlin. 268 s.
- Holmberg, H. Influence of grain angle on Brinell hardness of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). 2000. *Holz als Roh- und Werkstoff* 58: 91–95.
- Hong, Z., Fries, A. & Wu, H.X. 2014. High negative genetic correlations between growth traits and wood properties suggest incorporating multiple traits selection including economic weights for the future Scots pine breeding programs. *Annals of Forest Science* 71: 463–472.
- Hänninen, O. & Asikainen, A. 2013. Efficient reduction of indoor exposures: health benefits from optimizing ventilation, filtration and indoor source controls. National Institute for Health and Welfare (THL), Report 2, 93 s. Helsinki 2013. ISBN 978-952-245-821-6

- Jensen, L.K., Larsen, A., Mølhave, L., Hansen, M.K. & Knudsen, B. 2001. Health evaluation of volatile organic compound (VOC) emissions from wood and wood-based materials. *Archives of Environmental Health: An International Journal* 56: 419–432.
- Johansson I., 2003. AB Träteck, Förfarande för kvalitetsbestämning av trämaterial. Patent SE520447.
- Kampe, A. & Magel, E. 2013. New insights into heartwood and heartwood formation. Teoksessa: Fromm, J. (toim.). *Cellular Aspects of Wood Formation. Plant Cell Monographs*, vol 20. Springer, Berlin, Heidelberg. s. 71–95.
- Karlsson, L, Mörling, T. & Bergsten, U. 2013. Influence of silvicultural regimes on the volume and proportion of juvenile and mature wood in boreal Scots pine. *Silva Fennica* 47(4): article id 938. 17 s.
- Karppanen, O., Venäläinen, M., Harju, A.M., Willför, S., Pietarinen, S., Laakso, T. & Kainulainen, P. 2007. Knotwood as a window to the indirect measurement of the decay resistance of Scots pine heartwood. *Holzforschung* 61: 600–604.
- Karppanen, O., Venäläinen, M., Harju, A.M. & Laakso, T. 2008. The effect of brown-rot decay on water adsorption and chemical composition of Scots pine heartwood. *Annals of Forest Science* 65(6). 8 s.
- Karala, M. 2019. Kuu rytmittää elämää. *Tiede Luonto* 3: 24–29.
- Koponen, H. 1985. Sorption isotherms of Finnish birch, pine and spruce. *Paperi ja Puu* 67(2): 70–77.
- Kärkkäinen, M. 2003. Puutieteen perusteet. Kustannusosakeyhtiö Metsälehti, Karisto Oy, Hämeenlinna. 451 s. ISBN 952-5118-51-7
- Lappi-Seppälä, M. 1952. Männyn sydänpuusta ja runkomuodosta. Referat: Über Verkernung und Stammform der Kiefer. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 40(25): 1–26.
- Leblon, B., Adedipe, O., Hans, G., Haddadi, A., Tsuchikawa, S., Burger, J., Stirling, R., Piroux, Z., Groves, K., Nader, J. & LaRocque, A. 2013. A review of near-infrared spectroscopy for monitoring moisture content and density of solid wood. *The Forestry Chronicle* 89(5): 595–606.
- Leinonen, A., Harju, A.M., Venäläinen, M., Saranpää, P., Laakso, T., 2008. FT-NIR spectroscopy in predicting the decay resistance related characteristics of solid Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) heartwood. *Holzforschung* 62: 284–288.
- le Roux, S. (toim.) 2023. Puurakentamisen ohjelman avustetut hankkeet 2018–2023. Ympäristöministeriö, 146 s.
- Lim, K.J., Paasela, T., Harju, A., Venäläinen, M., Paulin, L., Auvinen, P., Kärkkäinen, K. & Teeri, T.H. 2016. Developmental changes in Scots pine transcriptome during heartwood formation. *Plant Physiology* 172(3): 1403–1417.

- Loman, A. 1970a. Bioassays of fungi isolated from *Pinus contorta* var. *latifolia* with pinosylvin, pinosylvinmonomethyl ether, pinobanksin, and pinocembrin. *Canadian Journal of Botany* 48: 1303–1308.
- Loman, A. 1970b. The effect of heartwood fungi of *Pinus contorta* var. *latifolia* on pinosylvin, pinosylvinmonomethyl ether, pinobanksin, and pinocembrin. *Canadian Journal of Botany* 48: 737–747.
- Lu, J., Venäläinen, M., Julkunen-Tiitto, R. & Harju, A.M. 2016. Stilbene impregnation retards brown-rot decay of Scots pine sapwood. *Holzforschung* 70: 261–266.
- Lundell, T. & Mäkelä, M. 2013. Puunlahottajat. Teoksessa: Timonen, S. & Valkonen, J. (toim.). *Sienten biologia*. Gaudeamus. s. 259–279.
- Luonnonvarakeskus (Luke). Luonnonvaratieto: Metsänjalostus. Saatavissa internetistä: <https://www.luke.fi/fi/luonnonvaratieto/tiedetta-ja-tietoa/metsanjalostus>. Viitattu 29.1.2025.
- Lyr, H. 1967. Über den jahrezeitlichen Verlauf der Schutzkernbildung bei *Pinus silvestris* nach Verwundungen. *Archiv für Forstwesen* 16: 51–57.
- Löyttyniemi, K. 1986. Männyn sydänpuu – luonnon kestopuuta: Männyn sydänpuun luontaisen lahon- ja hyönteistuhonkestävyyden hyväksikäytöstä. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 231. 50 s.
- Mayer, L. 2012. Comparative wood durability studies in the field with particular reference to the material climate. Master thesis. Leibniz University Hannover. Institute of Vocational Sciences in the Building Trade. 85 s.
- Merrill, W. 1992. Mechanism of resistance to fungi in woody plants: a historical perspective. In: Blanchette, R.A. & Biggs, A.R. (toim.). *Defence mechanisms of woody plants against fungi*. Springer, Berlin Heidelberg New York. s. 1–12.
- Miller, R.B. 1999. Structure of wood. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General technical report FPL; GTR-113: Pages 2.1-2.4.
- Morrell, J.J. & Gartner, B.L. 1998. Wood as a material. In: Bruce, A. & Palfreyman, J.W. (toim.). *Forest products biotechnology*. Taylor and Francis, London. s. 1–14.
- Mutz, R., Guilley, E., Sauter, U.H. & Nepveu, G. 2004. Modelling juvenile-mature transition in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using nonlinear mixed-effects models. *Annals of Forest Science* 61: 831–841.
- Nakaba, S. & Funada, R. 2024. Cell death of long-lived ray parenchyma cells during heartwood formation in trees. *Journal of Wood Science* 70: 46.
- Nisula, L. 2018. Wood extractives in conifers: a study of stemwood and knots of industrially important species. Åbo Akademi University Press. 253 s. + liitteet.
- Nordic requirements for quality control of industrially protected wood. 2017. Part 1: Scots pine and other permeable softwoods. NWPC Document No 3:2017. 22 s.

- Nyyssölä, T., Silvast, J., Kangasniemi, M. & Oinas, E. 2023. Tulevaisuuskaatsaus: saha- ja puutuoteala. Metsäkeskus. 11 s. Saatavilla internetistä: <https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/document/tulevaisuuskaatsaus-saha-ja-puutuoteala.pdf> ja <https://www.metsakeskus.fi/fi/ajankohtaista/saha-ja-puutuotealalle-lisaa-tuottavuutta-ja-kasvua>
- Näyhä, A., Hämäläinen, S. & Pesonen, H.-L. 2011. Forest Biorefineries—A Serious Global Business Opportunity. Teoksessa: Alén, R. (toim.). Biorefining of Forest Resources. Paperi ja Puu Oy: Espoo, Finland. s. 131–148.
- Partanen, J., Harju, A.M., Venäläinen, M. & Kärkkäinen, K. 2011. Highly heritable heartwood properties of Scots pine: possibilities for selective seed harvest in seed orchards. Canadian Journal of Forest Research 41(10): 1993–2000.
- Pitkäranta, M. (toim.) 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Ympäristöopas 2016. 234 s. Rakennustieto Oy, Hansaprint, Turenki. ISBN 978-952-11-4626-8.
- Pohjoismainen sahatavara – Lajitteluohjeet. 2020. Suomen Sahateollisuusmiesten Yhdistys STMY. 82 s.
- Pohleven, J., Burnard, M.D. & Kutnar, A. 2019. Volatile organic compounds emitted from untreated and thermally modified wood—A review. Wood and Fiber Science 51(3): 231–254.
- Pulkka, S., Segura, V., Harju, A., Tapanila, T., Tanner, J., Pac, L. & Charpentier, J.-P. 2016. Prediction of stilbene content from heartwood increment cores of Scots pine using NIRS methodology. Journal of Near Infrared Spectroscopy 24: 517–528.
- Puuinfo 2024. Saatavilla internetistä: <https://puuinfo.fi/> Päivitetty 2024. Viitattu 27.1.2025
- Puutavaraopas – Sahatavara ja puutuotteet. Puu-lehden erikoisnumero. 2023. PUUWOOD 79 s. Puuinfo Oy, Helsinki, Suomi. Saatavilla internetistä: <https://puuinfo.fi/puu-tieto/puutavaraoppaat/puutavaraopas-sahatavara-ja-puutuotteet/>
- Pyökkö, M. 1980. Kasvianatomia. Gaudeamus, Arvi A. Karisto Osakeyhtiön kirjapaino, Hämeenlinna. 292 s. ISBN 951-662-269-0.
- Rennerfelt, E. 1943. Die Toxizität der phenolischen Inhaltsstoffe des Kiefernkernholzes gegenüber einigen Fäulnispilzen. Svensk Botanisk Tidskrift 37: 83–93.
- Rennerfelt, E. 1945. The influence of the phenolic compounds in the heartwood of Scots pine (*Pinus silvestris* L.) on the growth of some decay fungi in nutrient solution. Svensk Botanisk Tidskrift 39: 311–318.
- Rennerfelt, E. 1947. Några undersökningar över olika rötsvampars förmåga att angripa splint och kärnved hos tall. Meddelanden från Statens Skogsforskningsinstitut 36(9): 1–24.
- Richards, D.B. 1950. Decay resistance and physical properties of wood. Journal of Forestry 48: 420–422.
- Ruotsalainen, S. & Persson, T. 2013. Scots pine - *Pinus sylvestris* L. In: Mullin T.J. & Lee, S.J. (eds.). Best practice for tree breeding in Europe. Skogforsk, Uppsala. s. 49–63.

- Rytkönen, S. & Rissanen, J. 2024. Sydänpuusta tuotteeksi, kaluste kotimaisesta männyn sydänpuusta. AMK opinnäytetyö, Savonia ammattikorkeakoulu. 106 s. Saatavilla internetistä: <https://www.theseus.fi/handle/10024/160891/browse?type=author&value=-Rytk%C3%B6nen%2C+Sanna>
- Sandberg, D. 1992. Jämförelse mellan genomsågning, firsågning och stjärnsågning med avseende på torkningsdeformationer. Institutionen för träteknologi, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm. Examensarbete nr 8/92. Saatavilla internetistä: https://www.researchgate.net/publication/277812840_Jamforelse_mellan_genomasagning_firsagning_och_stjarnsagning_med_avseende_pa_torkningsdeformationer
- Saranpää P. 1997. Puun rakenne, ominaisuudet ja kasvu. Metsätieteen aikakauskirja 1: 86–89.
- Scheffer, T.C. & Cowling, E.B. 1966. Natural resistance of wood to microbial deterioration. Annual Review of Phytopathology 4: 147-170.
- Sehlstedt-Persson, M., Karlsson, O., Wamming, T. & Morèn, T. 2011, Mold growth on sapwood boards exposed outdoors: the impact of wood drying. Forest Products Journal 61(2): 170–179.
- Seppänen, S., Syrjälä, L., von Weissenberg, K., Teeri, T., Paajanen, L., & Pappinen, A. 2004. Antifungal activity of stilbenes in in vitro bioassays and in transgenic Populus expressing a gene encoding pinosylvin synthase. Plant Cell Reports 22: 584–593.
- Sivula, A. 2020. Sisäilman kosteusolosuhteiden vaikutus puumateriaalin emissioihin. Itä-Suomen yliopisto, Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta, Ympäristötiede. Pro gradu -tutkielma. 119 s.
- Sjöström, E. 1993. Wood chemistry. Fundamentals and applications. 2nd ed. Academic Press. San Diego. 293 s.
- Sokal, R.R. & F.J. Rohlf. 1995. Biometry. W.H. Freeman and Company, New York. 887 s.
- Southam, C.M. & Ehrlich, J. 1943. Effects of Extract of western red-cedar heartwood on certain wood-decaying fungi in culture. Phytopathology 33: 517–524.
- Tamminen, Z. 1962. Fuktighet, volymvikt m.m. hos ved och bark. I Tall. Kungliga Skogshögskolan, Institutionen för virkeslära. Rapport Nr 41. 46 s.
- Taylor, A.M., Gartner, B.L. & Morrell, J.J. 2002 Heartwood formation and natural durability—A Review. Wood Fiber Science 34: 587–611.
- THL 2023. Ympäristöterveys, sisäilma Saatavilla: <https://thl.fi/aiheet/ymparistoterveys/sisailma>. Päivitetty 7.12.2023. Viitattu 28.11.2024.
- Terziev, N. & Boutelje, J. 1998. Effect of felling time and kiln-drying on color and susceptibility of wood to mold and fungal stain during an above-ground field test. Wood and Fiber Science 30(4): 360–367.

- Tiitta, M., Tomppo, L., Järnström, H., Löjja, M., Laakso, T., Harju, A., Venäläinen, M., Iitti, H., Paajanen, L., Saranpää, P., Lappalainen, R. & Viitanen, H. 2009. Spectral and chemical analyses of mould development on Scots pine heartwood. *European Journal of Wood and Wood Products (Holz als Roh- und Werkstoff)* 67: 151–158.
- Tomppo, L., Tiitta, M., Harju, A., Venäläinen, M. & Lappalainen, R. 2009. Dielectric spectroscopy of Scots pine. *Wood Science and Technology* 43(7–8): 653–667.
- Tomppo, L., Tiitta, M., Laakso, T., Harju, A., Venäläinen, M. & Lappalainen, R. 2011. Study of stilbene and resin acid content of Scots pine heartwood by electrical impedance spectroscopy (EIS). *Holzforschung* 65(5): 643–649.
- Uusitalo, J. 2004. Heartwood and extractive content of Scots pine in southern Finland: models to apply at harvest. *Wood and Fiber Science* 36(1): 3–8.
- Velling, P. 1974. Männyn (*Pinus sylvestris* L.) puuaineen tiheyden fenotyypisistä ja geneettisistä vaihtelusta. *Folia Forestalia* 188. 29 s.
- Venäläinen, M. 2002. Decay resistance of heartwood timber as a quality characteristic in Scots pine breeding. Seloste: Sydänpuutavaran lahonkestävyys laatuominaisuutena männynjalostuksessa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 880. Finnish Forest Research Institute, Research Papers 880. Academic dissertation. 53 + 69 p. ISBN 951-40-1866-4. ISSN 0358-4283.
- Venäläinen, M., Harju, A.M., Kainulainen, P., Viitanen, H. & Nikulainen, H. 2003. Variation in the decay resistance and its relationship with other wood characteristics in old Scots pines. *Annals of Forest Science* 60: 409–417.
- Venäläinen, M., Hu, Y. & Verkasalo, E. 2016. Checking of radially sawn Scots pine and Norway spruce wood. *Natural Resources* 7: 505–514.
- Venäläinen, M., Velling, P., Harju, A.M., Saranpää, P., Kainulainen, P. & Tiitta, M. 2004. The concentration of phenolics in brown-rot decay resistant and susceptible Scots pine heartwood. *Wood Science and Technology* 38: 109–118. doi:10.1007/s00226-004-0226-8
- Verkasalo, E. & Kilpeläinen, H. 2014. Puutuoteteollisuuden raaka-aineen laatu ja kilpailukyky: Muuttuva raaka-ainepohja – Viljelypuu. Teoksessa: Heräjärvi, H., Kettunen, L. & Murto-vaara, I. (toim.). Uudistuvat puutuote-erätyöt ja puunhankintaratkaisut (PUU). Tutkimus- ja kehittämisohjelman keskeiset tulokset. Metlan työraportteja 284: 9–15.
- Verkasalo, E., Möttönen, V., Roitto, M., Vepsäläinen, J., Kumar, A., Ilvesniemi, H., Siwale, W., Julkunen-Tiitto, R., Raatikainen, O. & Sikanen, L. 2021. Extractives of Stemwood and Sawmill Residues of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) for Biorefining in Four Climatic Regions in Finland—Phenolic and Resin Acid Compounds. *Forests* 12(2): 192.
- Verkasalo, E., Riekkinen, M. & Lindström, H. 2005. Specific wood and timber properties and competitive ability of Nordic Scots pine in mechanical wood processing. Teoksessa: Teischinger, A. & Van Acker, J. (toim.). Proceedings of the COST Action E44 Conference “Broad Spectrum Utilisation of Wood”; COST Action E44 “Wood Processing Strategy”, June 14th–15th 2005. BOKU Vienna, Austria. *Lignovisionen* 9: 27–38.

- Verkasalo, E., Roitto, M., Möttönen, V., Tanner, J., Kumar, A., Kilpeläinen, P., Sikanen, L. & Ilvesniemi, H. 2022. Extractives of tree biomass of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) for biorefining in four climatic regions in Finland – lipophilic compounds, stilbenes and lignans. *Forests* 13: 779.
- Viitanen, H. 1986. Vuosina 1978–1984 tutkitut lahovaurionäytteet. VTT, Tiedotteita 593. 40 s.
- Wiedenhof, A.C. & Miller, R.B. 2005. Structure and function of wood. Teoksessa: Rowell, R.M (toim.). Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton, Fla.: CRC Press. s. 9–13.
- Wilhelmsson, L., Arlinger, J., Spångberg, K., Lundqvist, S.-O., Grahn, T., Hedenberg, Ö & Olsson, L. 2002. Models for predicting wood properties in stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden, *Scandinavian Journal of Forest Research* 17(4): 330–350.
- Willför, S., Hemming, J., Reunanen, M. & Holmbom, B. 2003. Phenolic and lipophilic extractives in Scots pine knots and Stemwood. *Holzforschung* 57: 359–372.
- Willför, S., Reunanen, M., Eklund, P., Sjöholm, R., Kronberg, L., Fardim, P., Pietarinen, S. & Holmbom, B. 2004. Oligolignans in Norway spruce and Scots pine knots and Norway spruce stemwood. *Holzforschung* 58(4): 345–354.
- Wolkoff, P. 1999. How to measure and evaluate volatile organic compound emissions from building products. A perspective. *Science of the Total Environment* 227: 197–213.
- Zabel R.A. & Morrell J.J. 1992. *Wood Microbiology: Decay and its Prevention*, Academic Press Inc., California, 576 s.

LIITE 1

Minkä ikäisiä ovat 100-vuotiaan puun solut?

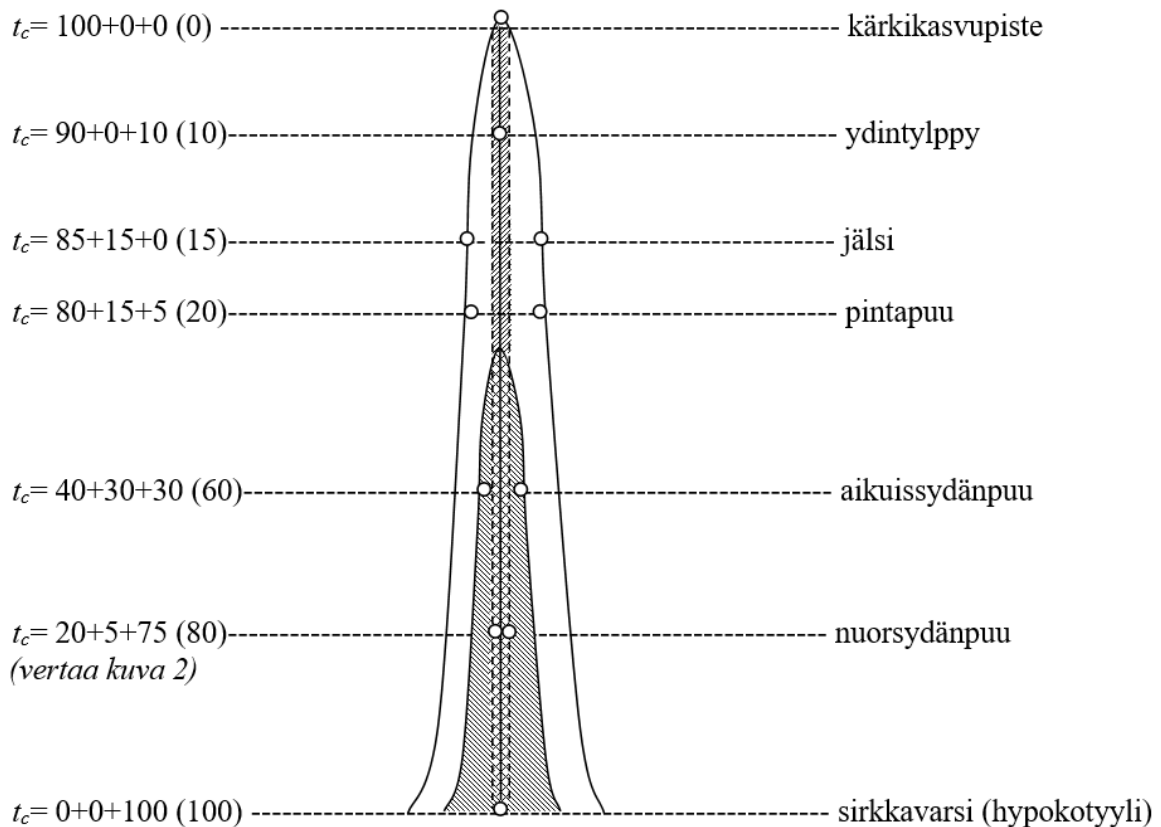
Kuva 1. Kaavakuva 100 vuotta vanhan elävän puun solujen iästä puun eri osissa.

Jokaisen solun todelliseksi iäksi (t_c) voidaan väittää 100 vuotta, jos todellinen ikä jaetaan kolmeen osatekijään: kärkikasvupisteen (apikaalisen meristeemin) ikä (t_m), jällen ikä (t_b) ja erilaistuneen solun ikä (t_d). Tällöin $t_c = t_m + t_b + t_d = 100$ vuotta. Kuvassa on esitetty esimerkkejä solujen ikärakenteesta puun eri osissa. Solukoiden iän ymmärtäminen on erityisen tärkeää puutieteellisten näytteiden otannassa. Puun käyttöominaisuuksien kannalta tärkein osatekijä on jällen ikä, koska se vaikuttaa syntyvien solujen seinien rakenteeseen. Solun erilaistumisesta kulu-
nut aika määrää, onko solu pinta- vai sydänpuuta.

Ympyrässä olevan solun ikä

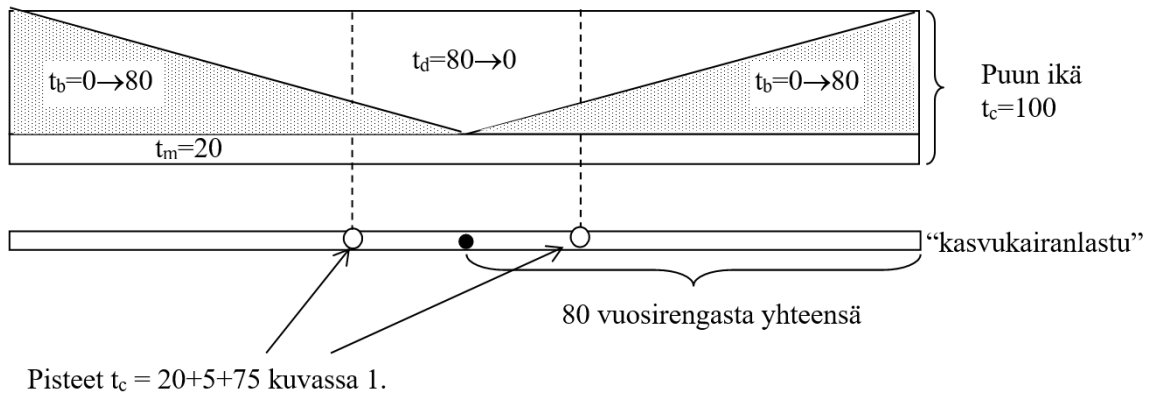
Solun anatominen olemus

$t_c = t_m + t_b + t_d = 100$ (suluissa vuosirenkaiden lukumäärä tarkastelukorkeudella)



Kuva 2. Kasvukairanlastun solujen ikärakenne.

Solujen ikä kolmen osatekijän summana kasvukairanlastussa, joka on porattu puun läpi ytimen kohdalta 1,3 m korkeudelta 100 vuotta vanhasta puusta.



Kaaviot on käännetty suomeksi alkuperäisestä lähteestä (Venäläinen 2002).



**Löydät meidät
verkosta**

luke.fi



Luonnonvarakeskus (Luke) Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki