

Anu Kantola

## Puu pintaa syvemmältä: kuusen rungon rakennetta ennustavat simulaattorit – osa tulevaisuuden tuotantoteknologiaa

### Oikeanlaista puuta jatkojalostukseen

Suomalaisen sahateollisuuden kilpailukyvyyn kannalta on ensisijaisen tärkeää saada oikeanlaista puuraaka-ainetta metsistä jatkojalostukseen. Asiakas- ja tuotelähtöisessä ajattelutavassa tiettyä asiakkaan ostamaa tuoteryhmää varten korjataan sopivanlaatuista runkopuuta, sekä katkotaan ja sahataan se optimaalisesti tulevaa käyttöä ajatellen. Sahateollisuusyritysten kannattavuutta onkin pyritty parantamaan entistä tehokkaammalla raaka-aineen käytön suunnittelulla, jotta asiakkaan toivoman laadun tuotanto voidaan maksimoida.

Sahatavaran laatua ja käyttökelpoisuutta erilaisissa tuotteissa arvioidaan puuaineen ulkonäön ja lujituksen perusteella. Tukiin sahaus voidaan suunnitella paremmin, kun sen runkomuoto ja sisäinen rakenne tunnetaan. Runkomuoto vaikuttaa sahausasetteiden valintaan ja saheiden saantoon. Sahatavaran ulkonäön kannalta tärkein, puun kasvun myötä kehittyvä laatuominaisuus on oksaisuus. Sydänpuuosuus vaikuttaa sahausasetteiden valintaan ja puuaineen tiheys puutavaran lujuuteen. Erilaiset konenäköön, esimerkiksi röntgenkuvaukseen, perustuvat menetelmät ovat yleistyneet sahoilla. Tällä tavoin tukit voidaan laatuluokitella ja valita käytettäväksi sopiviin tuotteisiin. Myös sahausasetteet voidaan edeltäkäs in määrittellä ja huonolaatuiset osat voidaan sahata pois tuotteesta. Tällainen toiminta edellyttää kuitenkin,

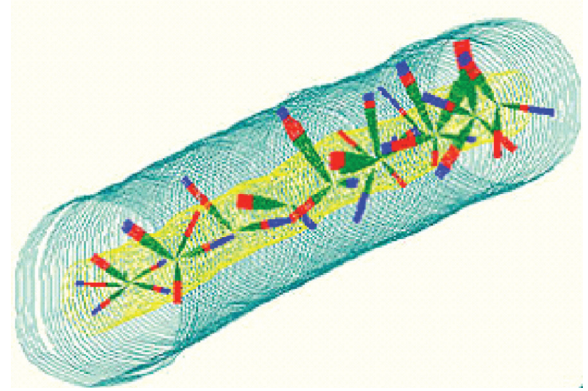
että yritys on onnistunut ostamaan riittävästi raaka-puuta, joka lähtöominaisuuksiltaan on sopivaa haluttuihin tuotteisiin. Sahayrittäjiä kiinnostaakin, miten sopivan raaka-aineen saanti olisi mahdollista optimoida puutuotteiden kysynnän perusteella. Jos leimikon puuston runkomuoto ja puuaineen oksaisuus olisivat tiedossa leimikon ostohetkellä, voisi ostaja valita tarkemmin raakapuunsa.

Puun ulkoisen olemuksen perusteella voidaan tiettyssä mittakaavassa arvioida puun sisäistä rakennetta. Jos puulla on paljon kasvutilaa, sillä on mahdollisuus kasvaa suureksi. Vankkarunkoisen puun oksat ovat kookkaita ja latvus suuri. Jos puun elävä latvus on lähellä maanpinnan rajaa, on suurin osa puuaineesta terveoksaista. Jos puusta sen sijaan töröttää paljon kuolleita oksatappeja, saadaan puusta todennäköisesti paljon kuiva- ja laho-oksaisia saheita. Terve- ja kuivaoksarajalla voidaankin ennustaa erityisesti mäntytukista saatavan sahatavaran laatua. Mäntyrungosta voidaan erotella oksaton tyvitukki, kuivaoksainen välitukki ja terveoksainen latvatukki. Sen sijaan kuusella selkeitä oksavyöhykkeitä on hankalampi erotella puun ulkoisen oksaisuuden perusteella; oksatonta tyvitukkia ei välttämättä ole ja elävän latvuksen sisältä löytyy niin tuoreita kuin kuiviakin oksia.

Metsässä kasvavan puun sisäistä rakennetta voidaan tarkemmin arvioida erilaisia puun kasvua ja kolmiulotteista rakennetta ennustavia simulaattorei-

ta apuna käyttämällä, jolloin ketju kasvavasta puusta tuotteeksi lyhenee, kun pystytään korjaamaan juuri tavoitetuotteeseen sopivaa raaka-ainetta. Tällaisia simulaattoreita onkin viimeaikoina kehitetty ympäri maailman työkaluiksi muun muassa sahateollisuuden ja metsänomistajien tarpeisiin. Simulaattorit ovat joko staattisia tai dynaamisia. Staattiset simulaattorit ennustavat rungon rakenteen puun kasvun simuloinnin jälkeen siten, että rungon ja oksien aiempaa kasvua ei oteta huomioon. Sen sijaan dynaamisissa simulaattoreissa puun rakennetta päivitetään säännöllisesti takaisinkytkennän avulla siten, että esimerkiksi oksien ominaisuuksia ennustetaan vuosittain simuloinnin aikana. Simulaattoreilla voidaan pyrkiä ennalta mitatun metsikön puuston tarkkaan rakennekuvaukseen tai toisaalta niiden avulla halutaan hahmottaa tilannetta tai olosuhteita, josta ei ole vielä saatavilla tarkkoja mittauksia. Esimerkiksi erilaisten käsittelyketjujen tai kasvuolosuhteiden vaikutusta runkojen rakenteeseen on mahdollista vertailla. Simulaattoreilta voidaan odottaa, että ne kertovat “mitä” tai “paljonko” mutta myös “miksi”, eli selittävät puun rakenteen kehitykseen johtavia kasvumekanismeja, ja kuvaavat puun eri kasvuprosesseja. Simulaattoreita on lisäksi rakennettu liitettäviksi toisiinsa laajemmiksi ohjelmistoiksi esimerkiksi siten, että rungon kolmiulotteisen rakenteen (runkomuoto ja oksat) ennusteet ovat vietävissä vaikkapa sahaussimulaattoriin (kuva 1).

Suomessa männiköiden kasvua ja mäntyrunгон kolmiulotteista rakennetta ennustavia simulaattoreita on kehitetty 1990-luvulta lähtien Helsingin ja Joensuun yliopistoissa sekä Metsäntutkimuslaitoksessa. Tänä vuonna valmistuneessa väitöskirjassaan Ikonen on kehittänyt edelleen Kellomäen tutkimusryhmän männyn kasvua ja rungon rakennetta kuvaavaa FinnFor-simulaattoria, sekä laatinut kuusen puuaineen tiheyttä, kevätpuun osuutta ja kuidun pituutta ennustavat empiiriset mallit. Omassa väitöskirjatyössäni olen sovittanut Mäkelän tutkimusryhmässä männylle kehitetyt PipeQual ja RetroSTEM-simulaattorit kuvaamaan kuusen kasvua ja rungon kolmiulotteista rakennetta (runkomuoto, oksat, puuaineen kuivatuoretiheys).

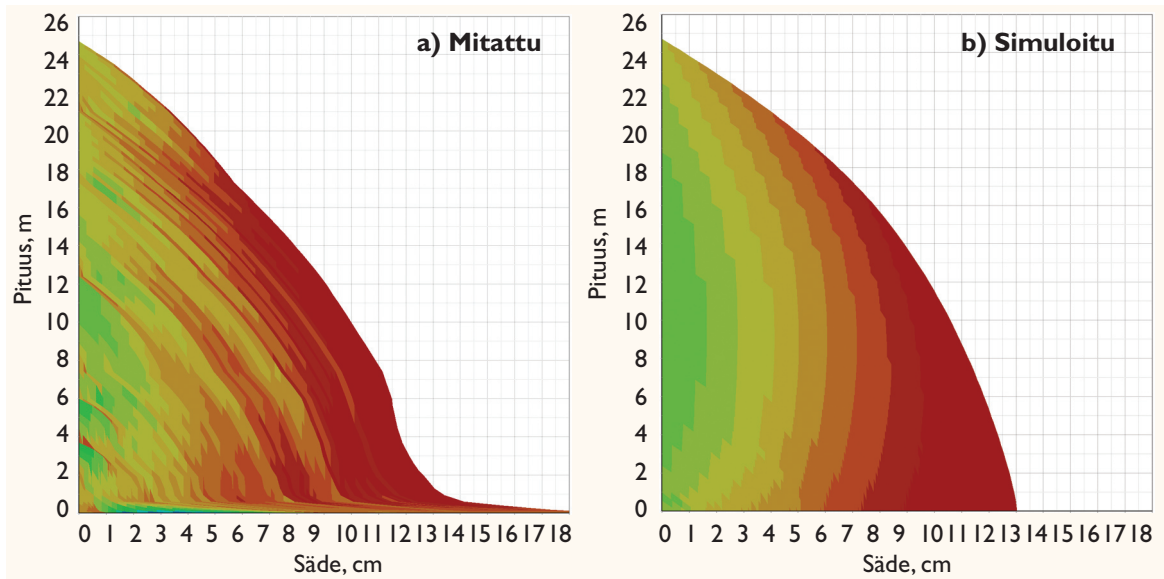


**Kuva 1.** Kolmiulotteinen sahaussimulaattorin rekonstruktio tukista sisäoksineen. Vihreä oksan osa on tuore, punainen kuiva ja sininen laho. Sydänpuu erottuu keltaisena. (Kuva:VTT)

### PipeQual ja RetroSTEM -simulaattorit kuusen runkorakenteen ennustajina

PipeQual on kehitetty ennustamaan metsiköiden kasvua ja runkojen kolmiulotteista rakennetta taimikosta kiertoaajan loppuun, kun kasvatettavien taimien lukumäärä ja kokojakauma tunnetaan. RetroSTEM sen sijaan on kehitetty ennustamaan rungon kolmiulotteinen rakenne, kun puun pituus, rinnankorkeusläpimitta, latvussuhde ja ikä tunnetaan, aloittaen rakenteen muodostamisen iästä nolla ja päätyen puun olemassa olevaan ikään sekä mittoihin. PipeQualissa puun kasvu johdetaan fotosynteesissä yhteytetyn hiilen määrästä ja RetroSTEMissä empiiristen pituuskasvumallien perusteella.

Sekä PipeQual että RetroSTEM -simulaattorit ennustavat kasvuprosessissa syntyvän puun rakenteen dynaamisesti perustuen teoreettisiin oletuksiin puun säännönmukaisista rakennesuhteista, joiden perusteella vuosittainen kasvu jaetaan puun eri osiin eli runkoon, oksiin ja neulasiin. Putkimalliteorian mukaan rungon ja oksien mantopuun pohjapinta-ala on verrannollinen mantopuun ylläpitämään neulasmassaan. Lisäksi molemmissa simulaattoreissa käytetään oletusta latvuksen neulasmassan ja pituuden välillä vallitsevasta allometrisestä riippuvuudesta. Kyseiset rakennesuhteet ovat puulajille tyypillisiä ja puulajin sisällä niiden on havaittu muuttuvan metsiköstä toiseen suhteellisen vähän. Simulaattoreissa



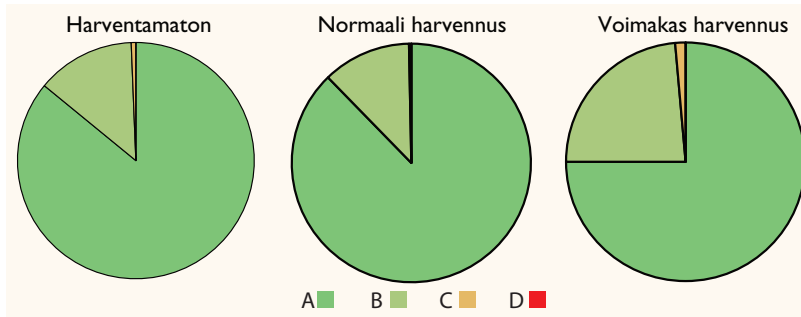
**Kuva 2.** Puuaineen kuivatuoretiheyden ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) jakautuminen yhden esimerkkirungon sisällä: a) mitattu koepuu ja b) RetroSTEM-simulaattorilla simuloitu puu (puuaineen tiheys kasvaa vihreästä sävystä keltaiseen ja edelleen punaiseen). Simulaattori ei ennusta rungon tyvilaajennosta. Kuvat ja tiheydet on tuotettu TreeViz visualisointiohjelmalla.

on tehty myös latvuksen dynamiikkaan liittyviä oletuksia, esimerkiksi latvuksen leveyden ja pituuden tai neulastiheyden kehittymisestä kasvun myötä.

Rakennesuhteiden puulajikohtainen säännönmukaisuus kasvupaikoittain on testattava empiirisellä aineistolla, jotta simulaattorin toiminnan luotettavuutta erilaisissa kasvuympäristöissä voidaan arvioida. Väitöskirjani ensimmäinen tavoite olikin selvittää, missä määrin latvuksen rakenteen tai rungon, oksien ja latvuksen välisten rakennesuhteiden kehitys noudattaa teoreettisia säännönmukaisuuksia iältään ja kasvutilaltaan erilaisissa kuusikoissa. Esimerkiksi kuusen rungon ja oksien kumulatiivisen pohjapinta-alan välillä havaittiin riippuvuus, joka säilyi lineaarisena latvan kärjestä alaspäin erilaisissa puissa ja metsäkoissa. Rakenteellisia säännönmukaisuuksia havaittiin niin ikään myös kuusen neulasmassan ja latvuksen pituuden tai latvusrajalta mitatun rungon pohjapinta-alan välillä. Latvuksen neulastiheyden todettiin saavuttavan maksimin noin viidessä metrissä latvuksen kärjestä alas riippumatta kuusen iästä tai sen asemasta latvuskerroksessa. Viiden metrin alapuolella latvuksen pituus ja leveys sekä samalla neulastiheys vaihtelevat kuusen iän ja kasvutilan mukaan.

Jotta simulaattori olisi käyttökelpoinen työkalu käytännön metsätaloudessa tai -teollisuudessa, on sen luotettavuutta testattava ensin riippumattomalla aineistolla. Sekä PipeQual että RetroSTEM -simulaattorit on aiemmin todettu luotettaviksi männyn rungon rakenteen ennusteissa. Molempien simulaattoreiden ennusteet myös kuusen runkomuodon, oksien läpimitan ja puuaineen tiheyden osalta osoittautuivat puutasolla suhteellisen harhattomiksi. Puuaineen tiheysennusteet rungon eri korkeuksilla olivat niin ikään samaa suuruusluokkaa mitatuissa ja simuloituissa rungoissa (kuva 2). Parannettavaakin löytyi. RetroSTEM-simulaattori yliarvioi hieman rungon läpimittaa puun keskivaiheilla ja PipeQual rungon yläosassa. Molemmat simulaattorit aliarvioivat myös hieman elävien oksien läpimittoja latvusrajan alueella. Edellä mainittu ennusteharha rungon eri korkeuksilla vaatii lisättestausta ja jatkotoimenpiteitä simulaattoreiden kehittämisessä.

Oleellista rungon kolmiulotteisen rakenteen ja sahaussimulaattorien kehityksessä on niiden käyttökelpoisuus käytännön metsätaloudessa ja -teollisuudessa. Kuten simulaattoreiden ennustuskykyäkin, myös niiden käyttökelpoisuutta käytännön työkaluna on testattava. Näin ollen rungon kolmiulotteista raken-



**Kuva 3.** Sydäntavaran suhteellinen laatujaakauma eri voimakkuuksin harvennetussa päätehakkuukäisessä kuusikossa. Parasta laatua (A) saatiin suhteessa eniten ja huonointa (D) ei ollenkaan. Voimakas harvennus vähensi A-laadun suhteellista osuutta. Laatuiluokitus: Pohjoismaisen sahatavara. 1997. Suomen Sahateollisuusmiesten Yhdistys (2. painos).

netta ennustava RetroSTEM-simulaattori yhdistettiin VTT:llä kehitettyyn InnoSIM-sahaussimulaattoriin ja uudella yhdistelmätyökalulla kokeiltiin, miten yksittäisen leimikon rungoille on mahdollista ennustaa niiden kolmiulotteinen rakenne, katkoa rungot tukeiksi ja sahata ne virtuaalisesti. Sahaus toteutettiin normaalein sahateollisuuden käyttämin sahausasettein ja saheet laatuiluokiteltiin pohjoismaisten laatuiluokitusohjeiden mukaisesti A, B, C ja D -luokkiin, joista A on paras ja D huonoin.

Tutkimuksen tulokset noudattivat aiempia näkemyksiä eri harvennusvoimakkuuksien vaikutuksesta sahatavaran laatuun. Kun metsikköä oli käsitelty voimakkain harvennuksin, olivat sieltä päätehakkuussa korjattavat tukit selvästi järeämpiä verrattuna metsikköön, jota oli harvennettu lievemmin tai ei ollenkaan. Runkojen järeytyessä lasi erityisesti sydäntavaran laatu (kuva 3). Tapaustutkimus osoitti, että rungon kolmiulotteista rakennetta ennustava simulaattori on yhdistettävissä sahaussimulaattoriin, ja että kyseisellä yhdistelmällä on mahdollista ennustaa kuusisahatavaran laatujaakaumaa eritavoin käsitellyissä metsiköissä.

### Tulevaisuuden teknologiaa

Metsätaloutta ja sahateollisuutta on perinteisesti kehitetty erillään omina osa-alueinaan. Entistä tarkempi tieto puuraaka-aineen ominaisuuksista läpi puunkorjuu- ja jalostusketjun helpottaisi kuitenkin raaka-aineen käytön suunnittelua ja sillä voisi olla

jopa selkeää merkitystä koko sahateollisuuden kannattavuudelle. Nyt metsikön kasvua sekä samalla puiden kolmiulotteista rakennetta ennustavien simulaattoreiden yleistyessä, yksityiskohtaisia ennusteita puun sisäisestä rakenteesta voidaan hyödyntää metsäsuunnittelussa myös kuusileimikoiden osalta. Käytännössä esimerkiksi harvennuksien ajankohtaa ja voimakkuutta suunniteltaessa voidaan tilavuuskasvun ohella tarkemmin kontrolloida esimerkiksi puun runkomuodon ja sisäoksaisuuden kehitystä. Niin ikään lähestytään mahdollisuutta, jossa tiettyä puutuote-erää varten voidaan ostaa entistä tarkemmin määriteltyjä leimikoita, joista juuri sopivaa raaka-ainetta tähän tuotteeseen löytyy. Esimerkiksi lujutta vaativia puuelementtejä varten raaka-aineen hankintaa voitaisiin kohdentaa runkorakennesimulaattorin analyysien avulla tarkemmin tuore- ja pienioksaasiin sekä tiheäsyisiin runkoihin. Raaka-aineen laadun määrittäminen alustavasti toteuttaa jo leimikko-ostojen suunniteltaessa ja tarkemmin vaikkapa hakkuukoneeseen liitettävän simulaattorisovelluksen avulla siten, että hakkuukoneen mitatessa rungon läpimitan ja pitoisuuden, pystyisi simulaattori näiden sekä puuston ikä- ja latvusrajatietojen pohjalta laatimaan ennusteen rungon sisäisestä rakenteesta. Tämän tiedon avulla tukit olisi mahdollista katkoa ja lajitella metsässä tulevaa käyttökohtaa ajatellen. Tällainen kehitysaskel saattaisi muuttaa vähitellen nykyistä puuraaka-aineen hinnoittelukäytäntöä, kun raaka-aineen määrän ohella myös laatu vaikuttaisi ostopäätökseen.

## Kiitokset

Lämpimät kiitokset tohtori Harri Mäkiselle (Metla) käsikirjoituksen kommentteista.

## Kirjallisuus

- Ikonen, V.-P. 2008. Modelling the growth and properties of stem and wood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as related to silvicultural management with implications for sawing yield and properties of sawn pieces. *Dissertationes Forestales* 65. 41 s.
- Kantola, A. 2008. The structure of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) stems in relation to wood properties of sawn timber. *Dissertationes Forestales* 70. 42 s.
- Mäkelä, A., Mäkinen, H., Vanninen, P., Hynynen, J., Kantola, A. & Mielikäinen K., 2000. Männiköiden tuotoksen ja laadun ennustaminen. *Metsäntutkimuslaitoksen Tiedonantoja* 794. 89 s.
- , Mäkinen, H. & Usenius, A. 2002. Predicting 3D stem structure from simple sample tree measurements. *Julkaisussa: Nepveu, G. (toim.). IUFRO WP S5.01.04 Fourth workshop, Connection Between Forest Resources and Wood Quality: Modelling Approaches and Simulation Software. Harrison Hot Springs, British Columbia, Canada, September 8–15, 2002. s. 298–307.*
- Song, T. & Usenius, A. 2007. InnoSim – a simulation model of wood conversion chain, *Conference proceedings, COST Action E44 Conference on Wood Processing Strategy Helsinki, September, 2007. s. 95–108.*
- Verkasalo, E., Sairanen, P. & Melén, P. 2002. Kuusirunkojen ja -tukkien arvon riippuvuus metsikön, rungon ja tukin ominaisuuksista sekä runkojen ja niistä saatavan sahatavaran laatu ja arvo perinteisessä ja erikoistuvassa sahauksessa. *Julkaisussa: Saranpää, P. & Verkasalo, E. (toim.). Kuusen laatu ja arvo. Metsäntutkimuslaitoksen Tiedonantoja* 841. s. 91–113.

■ MMT Anu Kantola, Metla, Vantaan toimintayksikkö.  
anu.kantola@metla.fi