Metsätehon raportti 243
10.8.2017

Tukkiröntgendata sahapuun ohjauksessa

Forest Big Data
DIGILE Oy:n Data to Intelligence (D2I) -ohjelma

Tapio Räsänen
Arto Usenius
Antti Heikkilä
Pertti Holmila
Timo Usenius

ISSN 1796-2374 (Verkkojulkaisu)

METSÄTEHO OY
Vernissakatu 1
01300 Vantaa

www.metsateho.fi

Tukkiröntgendata sahapuun ohjauksessa

Forest Big Data
DIGILE Oy:n Data to Intelligence (D2I) -ohjelma

Tapio Räsänen
Arto Usenius
Antti Heikkilä
Pertti Holmila
Timo Usenius

Metsätehon raportti 243
10.8.2017

ISSN 1796-2374 (Verkkojulkaisu)

© Metsäteho Oy

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ **3**

SUMMARY **5**

1. JOHDANTO **7**

2. TUTKIMUKSEN TAVOITTEET **8**

3. TUTKIMUSMENETELMÄT SEKÄ TUTKIMUKSEN SUORITUS JA RAJOITUKSET **12**

4. TUTKIMUSAINEISTOT JA PUUSTOA KUVAAVAT TUNNUKSET **13**

4.1 Sahoilta saadut tutkimusaineistot 13

4.2 Leimikko- ja hakkuukoneaineistojen hankintamenetelmät 13

4.3 Korjuukohteiden ja tukkien määrä ja kohteiden jakaumat 14

4.4 Hakkuukoneen mittausdatasta lasketut puuston tunnukset 16

5. TUKKIEN MITTAUKSET SAHOILLA JA SAHAUSTAVAT **17**

5.1 Tukkien geometristen ominaisuuksien mittaus 18

5.2. Tukkien röntgenmittaukset 19

5.3. Tukkien röntgenmittauksen hyödyntäminen sahausprosessissa 22

5.4. Tukkien geometrian ja laadun mittaukset sekä tiedon hyväksikäyttö 24

6. TULOKSET **26**

6.1 Hakkuukoneen ja sahan tukkimäärien ja läpimitta-, pituus- ja kartiokkuusjakaumien vastaavuudet 26

6.2 Tukkien jakaumat laatuluokittain 32

6.3 Vuosirengasvälin jakaumat 33

6.4 Leimikoiden ikä läpimitan ja vuosirengasvälin avulla 36

6.5 Oksaisuustunnukset 39

6.6 Oksaisuus ja leimikon metsätyyppi 46

6.7 Sydänpuun läpimittajakaumat 48

7 FOREST BIG DATA -SAHAUSSIMULAATTORI **51**

8 TUTKIMUKSEN JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMENPITEET **57**

LIITTEET

TIIVISTELMÄ

Tutkimus oli osa Forest Big Data -ohjelmaa, jonka tavoitteena oli uusien tietolähteitä ja aineistoja hyödyntävien järjestelmien ja menetelmien kehittäminen metsätalouden ja puunhankinnan tarpeita varten. Tutkimuksessa paneuduttiin puuston laatutietovaraston muodostamisen edellytysten selvittämiseen sekä sahaussimulaattorin kehittämiseen leimikoiden arvon määrittämiseksi. Tutkimuksen toteuttivat Metsäteho Oy ja TimberVision Oy yhteistyössä Metsätehon osakkaiden (Metsä Group, Stora Enso Oyj ja UPM-Kymmene Oyj) kanssa.

Tutkimuksessa keskityttiin mäntytukin laatutunnuksiin ja kohdesahoiksi valittiin kolme osakkaiden mäntysahaa. Tavoitteena oli, että tutkimukseen hankitulla aineistolla (60 korjuukohdetta ja n. 58 000 mäntytukkia) voidaan kokeilla puunhankinnassa ja puun vastaanotossa syntyvien mittausaineistojen yhdistämistä big data -tyyppiseksi tietovarastoksi. Mittausdatan hankinnan edellytyksiä arvioitiin alustavasti, mutta varsinaiseen pilotointiin ei vielä ollut edellytyksiä eikä tietokantamuotoista tietovarastoa muodostettu. Tietovaraston käyttömahdollisuuksia sahateollisuuden arvoketjussa ja raaka-aineen ohjauksen prosesseissa tarkasteltiin. Tutkimuksen lähtökohtana oli, että leimikoiden puuston laatutietoa voidaan hyödyntää erityisesti kehitteillä olevassa dynaamisessa katkonnan ohjauksessa. Siinä leimikot voitaisiin luokittaa niiden estimoitujen laatutekijöiden keskitunnusten ja jakaumien sekä niistä lasketun jalostusarvon mukaan ja hakkuukoneiden katkonta-automatiikkaa ohjaavat parametrit määrittää siten kohdekohtaisina. Tämän edellytyksenä on, että leimikoiden puusto pystytään riittävän luotettavasti kuvaamaan ja että puusto- ja leimikkotunnusten sekä puun sisäistä laatua ja arvoa kuvaavien attribuuttien välillä on korrelaatiota.

Sahatukin jalostusarvoon vaikuttavat useat eri tekijät, joiden painotukset ovat muuttuvia ja tuote- tai tuoteryhmäkohtaisia, eikä niitä voida yleisinä esittää. Tukin järeydellä on jalostusarvon määräytymiseen suurin merkitys erityisesti sahatavaran määräsaannon kautta. Lisäksi se yhdessä tukin aseman kanssa näyttää tämänkin tutkimuksen tulosten perusteella korreloivan voimakkaasti mm. oksaisuustunnusten kanssa. Muista tekijöistä merkittävimpiä ovat männyllä erilaiset oksaisuustunnukset (oksaindeksi / oksavolyymi / oksaisuusaste, oksaryhmäväli), sydänpuuosuus, sydänpuuhalkaisija ja vuosirengasväli (vuosiluston leveys), joka indikoi puuaineksen tiheyttä. Ko. tunnuksista saadaan mittausdataa kehittyneillä useamman mittaussuunnan tukkiröntgenlaitteistoilla tuotantomittakaavassa vastaanottomittausten yhteydessä. Tunnuksissa on alueellista ja metsiköiden välistä vaihtelua sekä järeydestä ja tukin asemasta (rungonosa) riippumatonta vaihtelua, jota pystyttiin leimikko- ja puustotunnuksia analysoimalla osoittamaan.

Tutkimusaineistoista lasketut tulokset eivät ole aineiston suppeuden vuoksi yleistettäviä, vaan esimerkinomaisia ja pikemminkin ilmiöitä ja tunnusten

välisiä korrelaatioita havainnollistavia kuin niitä selittäviä. Useiden tukkiröntgendatasta mitattujen tunnusten osalta leimikoiden sisäinen hajonta oli suurta, eikä selittäviä tekijöitä ollut mahdollista kohdentaa leimikkotasoa tarkemmin tukkeihin. Sahojen erilaiset mittausjärjestelmät ja mitattavat tunnukset aiheuttivat myös sen, että tuloksia ei voida esittää koko aineistoa koskevina kattavasti. Perusteellisempi tunnusten vaihtelun ja korrelaatioiden selvittäminen edellyttääkin huomattavasti monipuolisempia ja laajempia aineistoja ja mahdollisesti kohdennettua aineistonhankintaa.

Toisena tutkimuksen tavoitteena oli kehittää leimikoiden jalostusarvon laskentaan demonstraatiosimulaattori. TimberVisionin kehittämällä sahauksen simulointiohjelmalla voidaan laskea tukista tai tukkiluokasta määrätyllä asetteella saatavan sahatavaran määrä, laatu ja arvo sekä sivutuotteiden – hake ja puru – määrä ja arvot. Kun leimikko muodostuu rungoista, jotka katkotaan tukeiksi ja sahataan sahatavaraksi, voidaan simulaattorilla määrittää yksittäisen rungon, tukkiosuuden ja koko leimikon arvo. Sahauksen simulointiohjelma tuottaa tietoa leimikoiden valinnaksi, runkojen katkontaan tukeiksi, tukkien lajittelemiseksi tukkiluokkiin sekä edelleen sahausasetteen valintaan ja optimointiin. Tavoitteena on, että kehitetty sahaussimulaattori on osana laatutietovarastoa ja sitä voidaan käyttää yrityskohtaisissa analyyseissä jalostusarvon laskennassa ja tyyppileimikkoluokituksen muodostamisen tukena.

Tutkimus osoitti, että yhdistämällä metsässä suoritetut mittaukset ja sahoilla olevat mittaukset voidaan tuottaa sellaista informaatiota, jota voidaan käyttää sahauksen liiketoiminnan asiakaslähtöisessä ohjauksessa puunhankinnasta tuotannon suunnitteluun. Johtopäätöksenä on, että laatutietovarasto voi olla hakkuun ja sahan vastaanottomittausten aineistoja yhdistävä tietokanta, joka voidaan muodostaa metsäyhtiön omista lähtökohdista ja aineistoista. Se voi myös olla teollisuuden toimijoiden yhteisessä käytössä oleva palvelu, johon dataa toimittavat ja sitä käyttävät useat eri osapuolet yhteisesti sovituin pelisäännöin. Tällöin alkuperäisistä mittausaineistoista otetaan mukaan ehkä vain keskeiset puun laatuominaisuuksia kuvaavat tunnukset ja liiketoimintaa sekä tuotantoa kuvaavat tunnukset jätetään pois. Jatkokehitystä ajatellen tukkiröntgenmittareiden tuottama sisällöltään erilainen data olisi kuvattava tietovaraston käsite- ja tietomallia, datan prosessointia sekä katkonnan ja sahauksen simulointeja varten tarkasti sekä standardisoitava tai muuten määritettävä tiedonsiirron rajapinnat mittausjärjestelmien ja tietovaraston välillä.

SUMMARY

The study was part of Forest Big Data program, which aimed at developing new systems and methods utilizing data sources and materials for the needs of forestry and wood procurement. The work focused on studying and assessing the preconditions for the formation of a wood quality data repository and the development of a sawing simulator for determining the value of the logs. The study was carried out by Metsäteho Oy and TimberVision Oy in cooperation with Metsäteho's shareholders (Metsä Group, Stora Enso Oyj and UPM-Kymmene Oyj).

The research focussed on the quality attributes of pine saw logs and three pine sawmills of the partners were chosen as targets. The aim was to study the acquired material (60 harvested stands and approx. 58 000 pine logs) in order to test initially the acquisition of data arising from the wood procurement operations and timber reception measuring systems and to combine them into a Big Data type of data repository. However, the actual piloting could not yet been done in the project. The use of the data repository in the value chain of the sawmill industry and in the raw material control processes were examined. The starting point of the study was that the quality data of the harvesting objects and processed trees can be utilized to support especially the new dynamic bucking control systems. A raised idea is that stands can be classified according to their estimated quality factors and the calculated production value. A prerequisite for this is that the quality attributes of the stands can be reliably described and that there is a correlation between stand and tree factors and internal quality attributes of the saw logs.

The added value of a saw log is influenced by a number of factors with varying product-specific weightings which can not be generalized. The size (diameter) of the log has the greatest significance for determining the added value, in particular through the yield of sawn timber. The most significant of the other factors are the various knot properties (e.g. knot volume and knottiness index), heartwood proportion, heartwood diameter and annual ring width. Data of these factors can be provided with advanced multi-directional x-ray measuring devices at production-scale from daily timber receptions.

The results of the study are not generalizable because of the limited material, but are illustrative rather than explanatory. The variation of the log characteristics was quite high between and also within the harvesting objects, and it was possible to explain the factors only on the stand level. The different measurement systems and the measuring parameters of the sawmills also caused that the results can not be generalized for the entire material.

The second aim of the study was to develop a demonstration simulator for analysing the processing value of the logs. The sawing simulation program developed by TimberVision can be used to calculate the amount, quality and value of sawn timber as well as the amount and value of by-products (chips

and saw dust) based on given sawing patterns and set of logs. The aim is that the developed sawing simulator is part of the wood quality repository and can be used in company-specific analyses for calculating the value of harvesting objects and logs and for supporting the classification of the objects based on their estimated stock and wood quality properties.

1. JOHDANTO

Forest Big Data -vision tavoitteeksi on asetettu seuraavan sukupolven metsävaratietoa hyödyntävien järjestelmien ja menetelmien kehittäminen. Kehittämistyöllä tavoitellaan muun muassa korkeaa metsävarojen hyödyntämisastetta, nykyistä kustannustehokkaampaa puutavaralogistiikkaa sekä lisätuottoja arvoketjuun. Puutuoteteollisuudessa arvoketjun hallinnan parantamiseen tähdätään tehostamalla raaka-aineen hankintaa ja käyttöä tietovarastoja hyödyntämällä. Tarkentuvan metsävaratiedon avulla puutuoteteollisuuden raaka-ainevirtaa on mahdollista kohdentaa jo puukaupasta alkaen tuotannon laatuvaatimusten ja markkinatilanteiden mukaan.

Jalostusarvon määräytymisessä keskeiset tekijät on tunnettava ja pystyttävä kuvaamaan ja ottamaan huomioon niissä tuotantoketjun vaiheissa, joissa lopputuotteiden arvoon voidaan vaikuttaa. Sahojen raaka-aineen hankinnassa tämä tarkoittaa leimikoiden ostoa, niiden sijoittamista korjuuohjelmaan sekä puutavaran optimaalista ja kaikki toimitustarpeet huomioivaa katkontaa. Puustojen laatuominaisuuksien kuvauksen ja ennustamisen monilähteiset menetelmät ovatkin kehitystyön painopisteitä jatkossa. Pitkällä aikavälillä tavoitteena on myös uusien, puun eri laatuominaisuudet ja tukin jalostusarvon paremmin huomioon ottavien katkontaperiaatteiden kehittäminen ja niiden käyttöönotto hakkuukoneiden katkonta-automatiikassa. Katkontaa on myös tarkoituksenmukaista automatisoida lisää tuomalla koneenkuljettajan avuksi erilaisia rungon laatua kuvaavia teknisiä ratkaisuja ja ennustemenetelmiä.

Metsävarojen mahdollisimman tehokas hyödyntäminen edellyttää puun arvoketjujen hallintaa kaikissa vaiheissaan – metsästä hakkuun ja kuljetuksen kautta sahan tukkien lajitteluun, sahaukseen, sahatavaran tuorelajitteluun ja edelleen rimoitukseen ja kuivaukseen, loppulajitteluun, paketointiin, varastointiin ja kuljetukseen loppukäyttäjille. Tavoitteena on asiakkaan laatutavoitteiden täyttäminen sekä mahdollisimman korkean asiakastyytyväisyyden saavuttaminen. Sahatavaraliiketoiminnan parantaminen edellyttää uusien tuotantoteknologioiden, tuotteiden ja palvelujen kehittämistä sekä niiden teollista hyödyntämistä.

Puutuoteteollisuus ry:n loppuvuodesta 2015 julkaistun tutkimusagendan yhdeksi painopistealueeksi on valittu resurssitehokkuuden parantaminen. Siinä tavoitellaan mm. raaka-ainepohjan parempaa hyödyntämistä, materiaalitehokkuutta sekä tuotearvon maksimointia. Kokonaisvaltaisten kannolta asiakkaalle ulottuvien informaatiojärjestelmien kehittäminen sekä informaatiovirtojen yhdistäminen tuotekohtaiseen tuotannon ja raaka-aineen ohjaukseen on nimetty näitä tavoitteita tukeviksi tutkimusaiheiksi.

Metsäteho Oy ja TimberVision Oy olivat mukana TEKESin rahoittamassa DIGILE Oy:n D2I -ohjelman Forest Big Data -hankkeessa tuottamassa vastauksia kappaleessa 2 esitettäviin tutkimuskysymyksiin.

2. TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Tutkimukseen valittiin kaksi kehittämiskokonaisuutta:

1. Laatutietovaraston (aineistot metsä- ja sahamittauksista) esiselvitys
2. Sahaussimulaattorin kehittäminen leimikoiden arvon määrittämiseksi

Hankkeen keskeisenä tavoitteena oli laatutietovarastoa koskevan esiselvityksen tekeminen sekä sitä tukevan tutkimusaineiston hankinta ja analysointi. Selvitys päätettiin tehdä Forest Big Data -ohjelman resurssien puitteissa suhteellisen pienellä aineistolla ja keskittyä mäntytukin laatutunnuksiin. Kohdesahoiksi valittiin kolme Metsätehon osakkaiden mäntysahaa. Tavoitteena oli, että hankittavalla aineistolla voidaan jo kokeilla puunhankinnassa ja puun vastaanotossa syntyvien mittausaineistojen yhdistämistä big data -tyyppiseksi tietovarastoksi. Varsinaiseen big data -analytiikkaan hankitut aineistot eivät vielä antaneet mahdollisuuksia. Toisena tavoitteena oli kehittää sahaussimulaattori leimikon runkojen tukkiosuuden arvon määritykseen. Tutkimuksen aineiston simulointi oli osa projektia.

Laatutietovaraston kehittämisen esiselvitys

Laatutietovaraston kehittämisen perustaksi tavoitteena oli puunhankinnan ja sahamittausdatan analysoinnin avulla selvittää seuraavia kysymyksiä:

- Mitä ja miten tarkkaa dataa arvoketjuissa on saatavissa, miten se on taltioitu ja miten sitä käytetään?
- Mitä ja minkälaisia ongelmia on datan saatavuudessa ja mitkä ovat niiden seuraukset?
- Mitä tietoa, informaatiota ja dataa ei ole olemassa – puuttuva data? Miten sitä saataisiin ja miten sitä käytettäisiin? Mitkä olisivat seurausvaikutukset arvosaantoon ja asiakaspalveluun?
- Lähtöarvodatan kerääminen tutkimuksen tarpeisiin. Datan luotettavuuden tutkiminen. Datan jalostaminen ja käyttö.
- Miten ketju data – informaatio – tieto toimii ja miten sitä voidaan kehittää?

Tutkimuskysymysten asettamisen tavoitteena oli selvittää puuraaka-aineen laatua kuvaavan laatutietovaraston muodostamisen edellytyksiä ja arvioida sen käyttömahdollisuuksia sahateollisuuden arvoketjussa ja raaka-aineen ohjauksen prosesseissa.

Puustotunnusten ja jalostusarvon välisten yhteyksien sekä laatuun vaikuttavien tekijöiden (mm. alkuperä, kasvupaikka ja puuston käsittely) parempi tuntemus on edellytys sille, että ominaisuustietoja voidaan käyttää paremmin hyödyksi raaka-aineen jalostusarvoon perustuvassa hankinnassa, hinnoittelussa ja tuotantoon ohjauksessa. Yleisellä tasolla yhteydet tunnetaan, mutta puunhankinnan suunnittelun ja ohjauksen elementeiksi tietämystä ei

ole viety. Systemaattista erilaisia mittausaineistoja ja -tunnuksia yhdistävää tarkastelua, joka tähtäisi laatua kuvaavien mallien muodostamiseen, ei ole myöskään Suomessa aiemmin tehty.

Jalostusarvoon vaikuttavat tekijät ja niiden painotukset ovat tuote- tai tuoteryhmäkohtaisia. Jalostusarvon suuruus on lopulta tuotteiden hinnoista ja tuotantokustannuksista riippuva. Yleisesti kuitenkin tiedetään, että tukin järeydellä on jalostusarvon määräytymiseen suurin merkitys. Järeydellä on suora yhteys sahatavaran saantoon, mutta korrelaatiota myös muihin jalostusarvotekijöihin, mm. oksien määrään ja laatuun sekä sydänpuuosuuteen. Leimikon puulajin rungonkoko eli keskijäreys selittää siten merkittävästi – mutta ei kokonaan – leimikon puuston suhteellista jalostusarvoa (€/m^3). Muista tekijöistä merkittävimpiä ovat erilaiset oksaisuustunnukset. Niissä on tukin järeydestä ja asemasta (rungonosa) riippumatonta vaihtelua, jota voidaan selvittää leimikko- ja puustotunnuksia analysoimalla sekä osittamalla mittausaineistoja eri taustatekijöiden suhteen. Rajoitteena on kuitenkin usein puuston kasvuun ja mm. oksien karsiutumiseen vaikuttaneiden toimenpiteiden eli puuston kehityshistorian huono tuntemus.

Tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli selvittää jalostusarvon kuvaamiseksi sahamittaus- ja hakkuukoneaineistojen muuttujien välisiä korrelaatioita:

Selitettävät, jalostusarvoa parhaiten kuvaavat muuttujat ovat

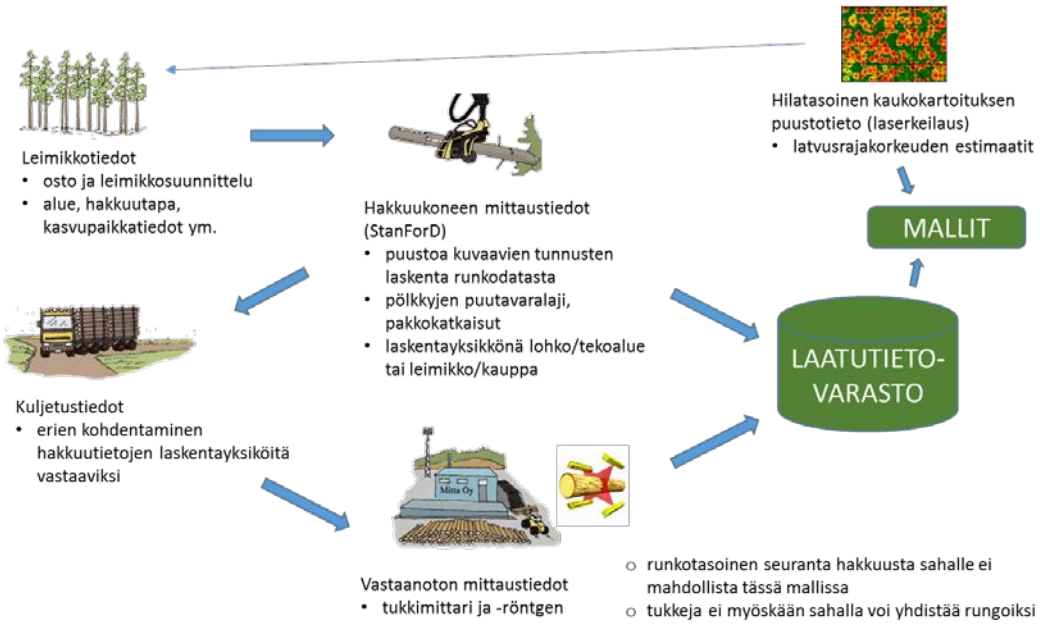
- oksaisuustunnukset (oksaindeksi / oksavolyymi / oksaisuusaste, oksaryhmäväli)
- sydänpuuosuus, sydänpuuhalkaisija
- vuosirengasväli, (tiheys).

Selittäjät hakkuukonedatasta

- järeyttä kuvaavat tunnukset (rinnankorkeusläpimitta, keskitilavuus)
- puuston määrää kuvaavat tunnukset (männyn ja mäntytukin määrä)
- männyn osuus (pää- / sivupuulaji)
- puuston ikä (tukkiröntgendatasta laskettuna)
- tukkiosasta katkotun kuidun ja raakin osuus (leimikon laatu).

Leimikon ominaisuuksia kuvaavat selittäjät

- maantieteellinen alue
- hakkuutapa
- kasvupaikka ja maalaji.



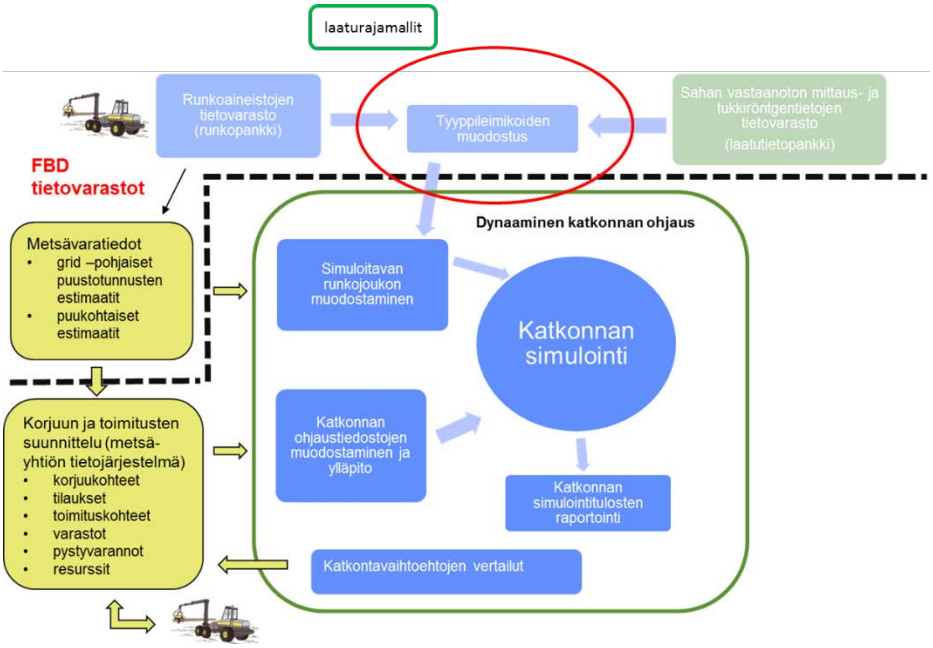
Kuva 1. Periaatekuva laatutietovaraston muodostamisesta.

Leimikoiden puuston laatutietoa on tarkoitus hyödyntää erityisesti katkonnan ohjauksessa. Kehitteillä olevassa katkonnan ohjauksen ja simuloinnin tietojärjestelmässä puuston laatuparametrit olisivat osa laskennan kohteena olevan leimikon puustoa kuvaavia tietoja. Nykyisen katkonnan ohjauksen toimintamallin ongelmana on todettu olevan, ettei se mukaudu tarpeeksi joustavasti sahojen raaka-ainetarpeiden ja tukkijakaumien muutoksiin. Katkonta-asetukset ovat myös leimikoiden puustosta riippumattomia eli samoilla puutavaralajien katkontatavoitteilla hakataan kaiken tyyppisissä leimikoissa ja pitkiä jaksoja ennen kuin toimitustarpeista johtuvat muutokset päivitetään jakaumatavoitteiden uusiksi parametriarvoiksi.

Katkonnan ohjauksen uudessa toimintamallissa ajatuksena on, että korjuukohteilla olisi erilaiset toimitustavoitteisiin ja puuston ominaisuuksiin joustavasti mukautuvat katkonta-asetukset. Välineeksi tähän on hahmoteltu tyyppileimikointia, jossa kohteet luokitettaisiin niiden tiedossa olevien tai laskennallisesti ennustettujen ominaisuuksien mukaan eri tyyppileimikkoluokkiin. Puunhankintaorganisaatio määrittää ne tekijät, joita se haluaa luokittelussaan käyttää. Näitä ovat esim. maantieteellinen alue, pääpuulaji, hakkuutapa, kasvupaikkaluokka ja puuston keskijäreys. Oleellista on, että tekijöillä kokonaisuutena on merkitystä puuston jalostusarvon kannalta. Tyyppileimikkoluokkien kriteerit voivat vaihdella tuotantotavoitteiden ja leimikkovarannon mukaan. Tyyppileimikkoluokituksen onnistumista tuotantolaitosten toimitustarpeisiin ja katkonnan ohjaukseen nähden voidaan tarkastella jälkikäteen tekemällä vertailuja korjuukohteiden toteutuneen katkonnan ja simuloinnilla saadun kertymäennusteen välillä. Mikäli tyyppileimikkoluokkien välillä ei esim. ole haluttuja eroja, voi olla tarpeen päivittää luokitus uusilla perusteilla.

Tavoitteena on, että katkonnan ohjauksen tietojärjestelmäkokonaisuuteen kuuluu myös laatutietovarasto, joko kiinteänä osana sitä tai rajapintojen kautta. Sitä voidaan käyttää katkontavaihtoehtojen laskennassa simuloitavien runkojoukkojen muodostukseen niin, että runkoihin lasketaan katkontaa ohjaavat parametrit (esim. laaturajakorkeudet) joko mallipohjaisesti käyttäen syötetietoina runkodimensioita ja laatutietovarastosta tai tyyppileimikkokuvauksista saatavia keskitunnuksia, suoraan laatutietovarastosta lasketuilla keskitunnuksilla tai jakaumilla tai käyttäen hakkuukoneen mittausdatan (stm ja hpr) pakkokatkaisutietoja. Aineistoista voidaan muodostaa myös perusteet laaturajatoleranssin asetukseen katkonnan ohjauksen pin-tiedostoissa (esim. per alue / puulaji / rungonosa / läpimittaluokka).

Laaturajamallien kehittäminen laatutietovarastossa olevan datan pohjalta voidaan asettaa yhdeksi tärkeimmistä tietovaraston käytön tavoitteista. Malleilla tulisi voida ennustaa paitsi ulkoisesti näkyviä oksaisuusvyöhykkeiden alkamis- ja päättymiskorkeuksia, myös runkojen sisäisiä oksaisuusvyöhykkeitä ja -tunnuksia. Tyvilahon esiintymistä rungon sisällä on myös tarve ennustaa malleilla, mutta tässä hankkeessa kuvattu laatutietovaraston toimintamalli tuskin sopii sen kehittämiseen, koska tyvilaho poistetaan jo katkonnassa eikä lahon määrästä eri korkeuksilla synny mitattua dataa.



Kuva 2. Puuston laatua kuvaavan tiedon muodostaminen hakkuukoneen ja sahan mittausdatoista sekä sen käyttö katkonnan ohjauksessa ja simuloinnissa.

3. TUTKIMUSMENETELMÄT SEKÄ TUTKIMUKSEN SUORITUS JA RAJOITUKSET

Tutkimuksen toteuttivat Metsäteho ja TimberVision Oy yhteistyössä Metsätehon osakkaiden (Metsä Group, Stora Enso ja UPM) kanssa. Tutkimuksen kohdesahoina olivat ko. metsäyhtiöiden kolme mäntysahaa. Osakkaat toimittivat tutkimusta varten aluksi tukkiröntgen- ja tukkimittaridatan koeaineiston, jonka perusteella suunniteltiin varsinaisen tutkimusaineiston hankinta keväällä 2015.

Tutkimuksen suorituksen vaiheet ja menetelmät olivat

1. Korjuukohteiden valinta sekä leimikko- ja hakkuukoneaineistojen hankinta
   - kohteiden valinta sahadatan saatavuuden ja vastaanottoajan mukaan
   - leimikkotietojen poiminta metsäyhtiöiden metsäjärjestelmistä ja yhdistäminen sahan mittaustietoihin
   - valittujen kohteiden hakkuukoneen runkokohtaisten mittaustietojen (stm-tiedostot) poiminta joko metsäjärjestelmästä tai suoraan hakkuukoneiden mittalaitteilta
2. Aineistojen toimitus Metsätehoon ja prosessointi
   - stm-datojen valinta, purku ja runkoprofiilien, katkontatietojen ja puuston tunnuslukujen laskenta
   - datan toimitukset TimberVisionille
3. Datan analysointi
   - korrelaatioiden laskenta ym. analysointi
4. Sahaussimulaattorin asetuksissa käytettävien tietojen hankinta ja muodostaminen
5. Sahaussimulaattorin ohjelmointi
6. Simulointi
   - sahauksen simulointi aineistoilla
7. Tulosten analysointi ja vertailu

Tulosten tulkinnan ja johtopäätösten kannalta arvioitiin jo ennakolta, että tutkimuksella on seuraavia rajoituksia:

- Tutkimuksen aineisto on melko pieni ja se hajaantuu eri alueille ja erityyppisiin leimikoihin.
- Data kerätään eri lähteistä, jolloin se ei ole sisällöltään yhtenäistä.
- Hakkuun ja sahan vastaanoton tukkeja on vaikea ilman erillisiä koejärjestelyitä saada täysin vastaamaan toisiaan
  - Kuljetuksissa usein yhdistetään eri kauppojen ja korjuulohkojen tukkeja samaan kuormaan.
  - Osa leimikon tukeista voidaan kuljettaa toiselle laitokselle.
- Sahoilla on eri valmistajien tukki- ja röntgenmittarit, minkä vuoksi data on sisällöltään erilaista ja mittarin tyypistä riippuen myös rajallista.

4. TUTKIMUSAINEISTOT JA PUUSTOA KUVAAVAT TUNNUKSET

4.1 Sahoilta saadut tutkimusaineistot

Tutkimuksen kohteena olivat kolme mäntysahaa, jotka sijaitsivat maantieteellisesti eri alueilla Länsi-, Keski- ja Itä-Suomessa (kuva 3).

Kuva 3. Tutkimuksen korjuukohteet Länsi-, Keski- ja Itä-Suomessa.

4.2 Leimikko- ja hakkuukoneaineistojen hankintamenetelmät

Aineistojen hankinta päätettiin keskittää vuoden 2015 alkupuolella tutkimussahoilla mitattuihin tukkitoimituseriin, joihin puunkorjuun aineistot olivat yhdistettävissä. Aineistot muodostuivat mäntytukkien röntgenmittaustiedoista yhdistettyinä tukkimittaritietoihin, leimikko- tai lohkotietoihin sekä hakkuukoneiden runkokohtaisiin mittaustietoihin (stm-tiedostot). Korjuukohteita ei erikseen valittu eikä niiltä mitattu ennen hakkuuta mitään puustoa kuvaavia tunnuksia.

Aineistoon ei otettu mukaan sellaisia toimituseriä, joita ei voitu yksiselitteisesti yhdistää korjuukohdetietoihin. Tällaisia ovat mm.

- samaan kuormaan yhdistetyt eri kauppojen erät, joita ei voida vastaanottomittauksessa aukottomasti pitää erillään
- vierastoimituserät (ei korjuutietoja); toimituserien tiedot sahoilta mutta ei leimikoista.

Lähtökohtana oli, että tukkidatan tulisi olla sellaista, että se pystytään yhdistämään leimikko- tai korjuulohkotietoihin ostosopimusnumeron tai vastaavan tiedon avulla. Yhdessä kuormassa voi kuitenkin olla samaan kauppaan kuuluvia eri korjuulohkojen tukkeja. Tällöin niiden kasvupaikkaa kuvaavat tiedot voivat olla virheellisiä. Lisäksi lohkojen välillä voi olla merkittävääkin puuston koko- ja ominaisuusvaihtelua. Isoissa leimikoissa puustotunnusten vaihtelu voi olla jo suurta ja vaikka hakkuukoneen mittaustiedot saataisiinkin kattavasti, voivat niistä lasketut hakatun puuston keskitunnukset olla liian keskiarvoistuneita selittämään tukkiröntgendatasta laskettuja jalostusarvotekijöitä.

Metsäyhtiöiden aineistovastaavat valitsivat sahoilta saatavissa olevan tukkidatan perusteella korjuukohteet ja toimittivat hakkuukoneen mittaustiedot (stm-tiedostot). Etukäteen kuitenkin varmistettiin, että stm-tietojen keruu on ko. sahoille hakkaavilta koneilta riittävän laajasti mahdollista, sillä stm-tallennuksessa on konemerkki- ja mittalaitteen ohjelmistoversiokohtaisia eroja. Leimikoiden stm-tiedot kerättiin Ponssen ja John Deeren hakkuukoneilta.

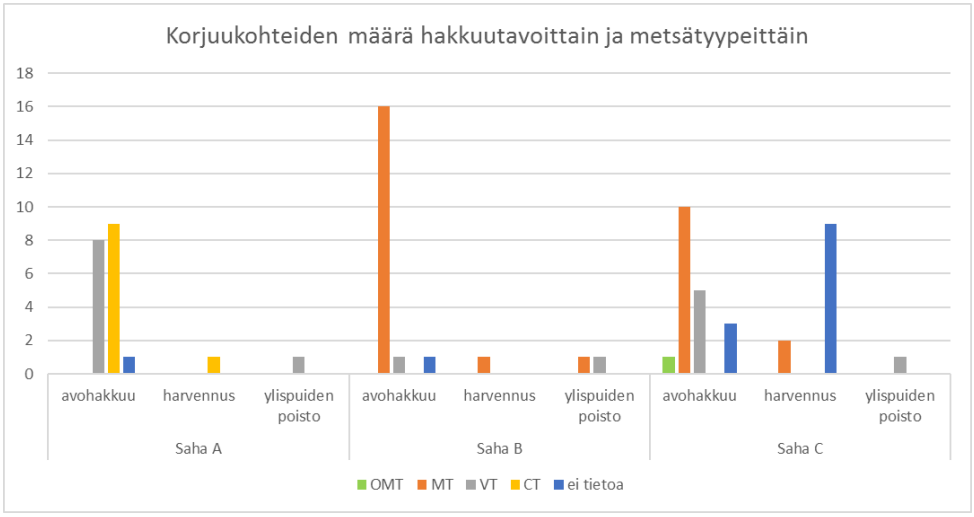
4.3 Korjuukohteiden ja tukkien määrä ja kohteiden jakaumat

Tutkimusaineistoon valikoitui lopulta 60 korjuukohdetta, joiden tukkiröntgenmittausdataan voitiin yhdistää hakkuukonemittaukset. Osassa kohteita eri korjuulohkojen tukit olivat toimituksissa yhdistyneet samaan vastaanottoerään. Erillisiä korjuulohkoja oli yhteensä 72. Sahalla mitattuja mäntytukkeja oli aineistossa 58 000, kun taas hakkuukonemittausten mukaan mäntytukkeja leimikoilla katkottiin n. 67 300. Kaikki kohteilta hakatut tukit eivät siis olleet mukana sahoille toimitetuissa vastaanottoerissä. Tutkimussahakohtaiset korjuukohde- ja tukkimäärät, hankinta-aika ja -alue on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Tutkimusaineisto.

Saha	Korjuukohteita saha / hakkuukone (erillisiä lohkoja)	Mäntytukkeja, saha	Mäntytukkeja, hakkuu	Ajanjakso (2015)	Alue
Saha A	16 / 20	31076	38035	1.4. – 1.7.	Pirkanmaa – Etelä-Pohjanmaa
Saha B	19 / 21	13435	15169	14.7. – 6.8.	Keski-Suomi
Saha C	25 / 31	13492	14117	27.1. – 7.8.	Pohjois-Karjala – Itä-Savo
Yhteensä	60 / 72	58003	67321		

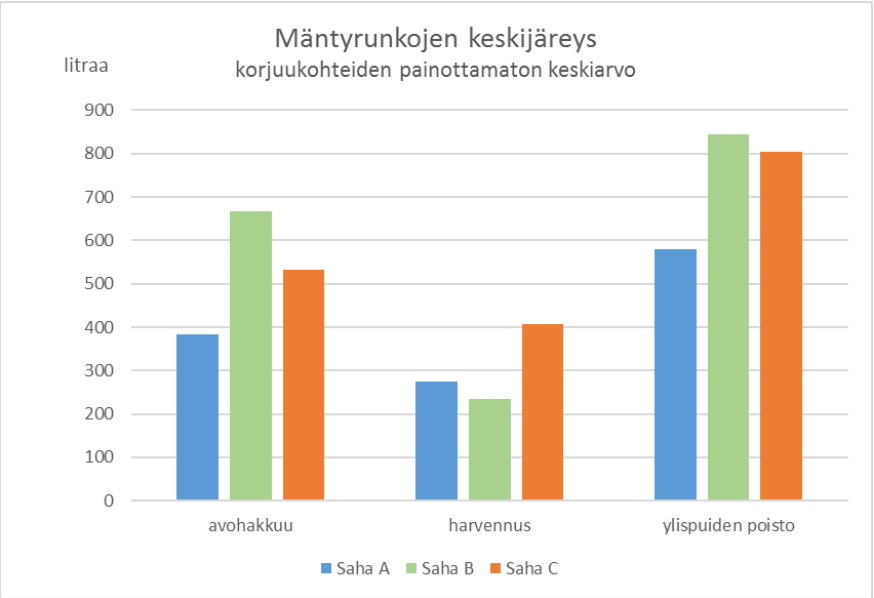
Avohakkuukohteita aineistossa oli 76 % ja loput harvennusta tai ylispuiden poistoa. Kasvupaikkatyypeistä yleisin oli tuore kangas (MT), joita kohteista oli 42 % loppujen ollessa lähinnä VT- ja CT -metsätyypin kasvupaikkoja. Kasvupaikkatyyppi ei ollut tiedossa 19 %:lla kohteista. Yhtiökohtaisesti aineistojen kasvupaikkatyyppijakauma oli varsin erilainen (kuva 4).



Kuva 4. Tutkimusaineiston korjuukohteiden jakauma hakkuutavoittain ja metsätyypeittäin.

Männyn tukkiprosentti (tukkipuutavaralajin osuus männyn hakkuukertymästä pylväät ja pikkutukki mukaan lukien) oli avohakkuukohteilla keskimäärin 69,7 % (vaihteluväli 36–89 %). Harvennuksilla männyn tukkiprosentti oli keskimäärin 40,5 % ja ylispuiden poistoissa 79,5 %.

Keskijäreydeltään tutkimussahojen kohteet olivat hyvin erilaiset: sahan A leimikoiden männyn keskijäreys oli 384 dm^3, kun taas sahan B leimikoiden männyn keskijäreys oli 668 dm^3. Ylispuuleimikoissa keskijäreys oli vielä suurempi: kahdella sahalla se oli keskimäärin yli 800 dm^3.



Kuva 5. Tutkimusaineiston mäntyrunkojen keskijäreys korjuukohteilla hakkuukonemittauksen mukaan.

4.4 Hakkuukoneen mittausdatasta lasketut puuston tunnukset

Tutkimuskohteiden hakkuukoneiden runkokohtaiset mittaustiedot saatiin metsäyhtiöistä stm-tiedostoina. Tiedostot luettiin ja tunnusten laskenta tehtiin Metsätehon ohjelmalla. Niistä muodostettiin analysoitavat tiedostot:

1. runkoprofiilit (runkojen läpimitat 10 cm välein)
2. pölkkytiedot (toteutunut katkonta, pölkkyjen puutavaralaji ja mitat)
3. hakkuun summa- ja keskiarvoluvut (mm. puutavaralajimäärät, runko- ja pölkkymäärät, tukki-%, keskijäreydet ja järeästä rungonosasta katkotun kuidun ja raakin määrä ym. tunnuksia).

Liitteessä 2 on esitetty lista kaikista lasketuista tunnusluvuista, jotka on liitetty korjuukohteen yleistietoihin. Hakkuukonedatasta ja leimikkotiedoista muodostetut tiedostot toimitettiin TimberVisionille yhdistettäväksi sahamittaustietoihin ja jalostusarvotekijöiden korrelaatioanalyyseja varten.

5. TUKKIEN MITTAUKSET SAHOILLA JA SAHAUSTAVAT

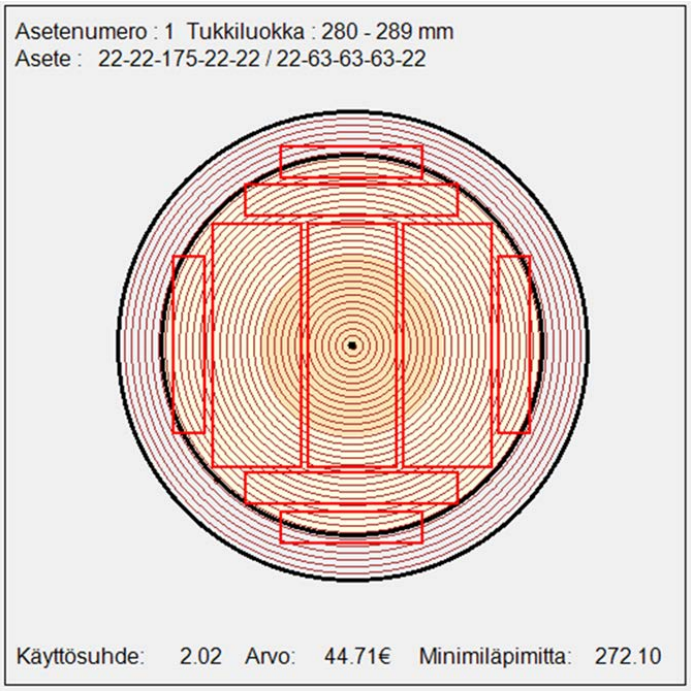
Sahoilla suoritettavat tukkien mittaukset voidaan jakaa kahteen osaan:

1. Tukkien geometrian mittaukset
2. Tukkien laatuominaisuuksien mittaukset

Tukkien geometrian mittaus on ensisijainen mittaus, joka tuottaa dataa ja informaatiota tukin geometrisistä ominaisuuksista kuten latvaläpimitta, pituus, kartiokkuus (kapeneminen), soikeus ja lenkous (kaarimaisuus). Nämä tukin perusominaisuudet määräävät tukille mahdolliset sahauksen asetevaihtoehdot.

Tukin laadun mittaus tuottaa tietoa tukin sellaisista ominaisuuksista, jotka vaikuttavat saatavan sahatavaran laatuun ja siten myös sahatavaran arvoon. Tällaisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi oksikkuus ja yksittäiset oksat ja niiden sijainti, laho, vuosirengasväli, tukissa sijaitsevat halkeamat, hyönteisvauriot jne. Verrattaessa mitoiltaan kahta täysin saman kokoista sahatavarakappaletta toisiinsa, laatuominaisuuksiltaan paremman kappaleen hinta voi olla jopa viisinkertainen huonompaan kappaleeseen verrattuna.

Perinteisessä nelisahauksessa (kuva 6) sahauksen saanto ja siten rahallinen tulos riippuvat ratkaisevasti tukin ominaisuuksista sekä sahaustavasta. Tavallisin pohjoismainen sahaustapa on ns. nelisahaus, jonka ensimmäisessä, pelkkasahausvaiheessa tukin keskeltä sahataan paksumpi pelkka, ja samanaikaisesti tukin sivuilta sahataan ohuempia lauta-aihioita. Pelkka sahataan jakosahausvaiheessa sydäntavaraksi - keskeltä otettavat paksummat kappaleet. Pelkan sivuilta saadaan lauta-aihioita, jotka särmätään laudoiksi.



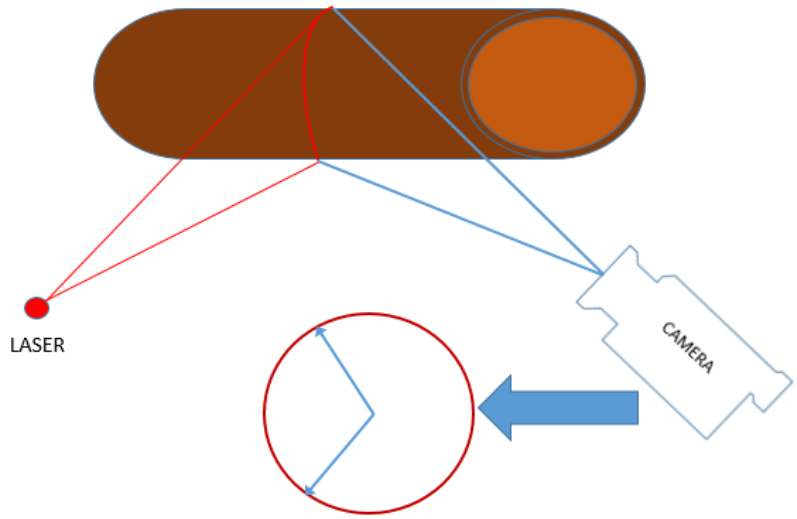
Kuva 6. Periaatekuva tyypillisestä pohjoismaisesta nelisahauksesta.

Sahauksen määrä- ja arvosaanto riippuvat

1. Tukin koosta: latvaläpimitasta, pituudesta, kartiokkuudesta ja lenkoudesta. Latvaläpimitaltaan suurempi tukki tuottaa paremman saannon ja syntyvien tuotteiden arvon.
2. Pelkkasahan ja jakosahan asetevalinnasta: sydäntavara ja sivulaudat.
3. Tukin pyörityksestä ja tukin pyörityskulmasta, jossa tukki etenee kuljettimella ensimmäisen vaiheen sahakoneeseen (pelkkasahaan).
4. Pelkan suuntauksesta jakosahaan ja jakosahan asetevalinnasta.
5. Tukin ja pelkan sivuilta sahattavien sivulauta-aihioiden särmäyksestä, jossa lauta-aihion leveys ja suuntaus särmäsahaan määräytyy.

5.1 Tukkien geometristen ominaisuuksien mittaus

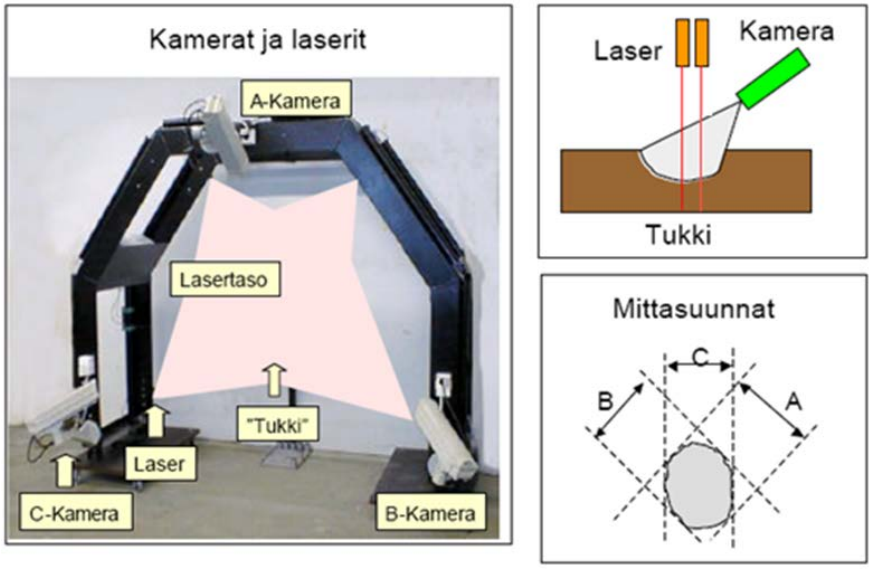
Tukeista mitatut geometriset suureet kuvaavat tukkia. Perinteisellä sahan tukkimittarilla tukin geometrisiä ominaisuuksia ja erityisesti tukin halkaisija mitataan koko tukin pituudelta. Tyypillisessä tukin läpimitan mittauksessa, tukin ”kylkeen” projisoidaan laserilla 45 asteen kulmassa laservalojuova. Tätä juovaa kuvataan 2D-kameralla tukin kulkusuuntaan myös 45 asteen kulmassa. Näin ollen kokonaishavainto-kulmaksi muodostuu 90 astetta. Näitä laserin mittaussuuntia ja kameroita on tavallisesti kolme kappaletta. Mitä enemmän mittaussuuntia on, sitä tarkemmin tukki saadaan kuvattua. Tällä menetelmällä saadaan tukin poikkileikkauksesta tarkka kuvaus ja siten myös tukin läpimitta-arvot koko tukin pituuden matkalla.



Kuva 7. Periaatekuva tukin poikkileikkauksen mittauksesta.

Tukkien mittaustapahtuma voidaan jakaa kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa mitataan tukin halkaisija mittausta vastaan kohtisuorassa suunnassa.

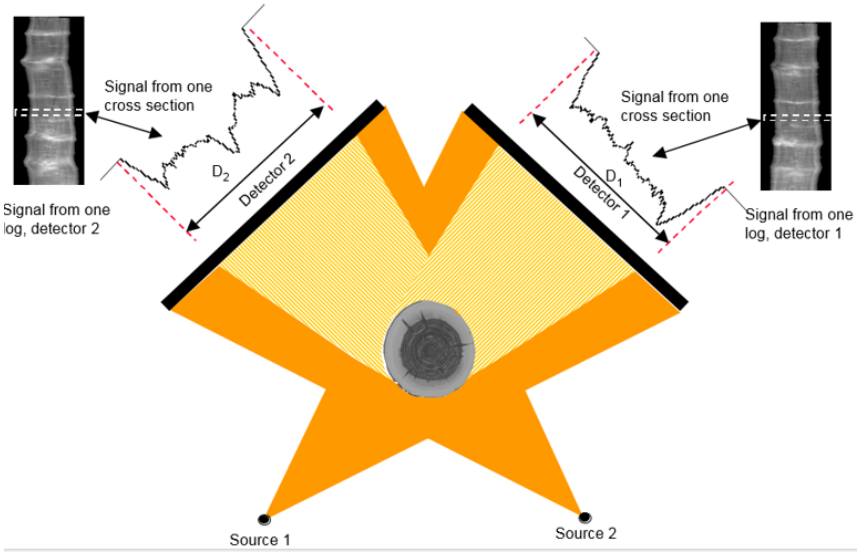
Tämän jälkeen mitattua dataa käsitellään siten, että mitattu läpimittatulos olisi mahdollisimman oikea. Esimerkiksi irronneet kuoret suodatetaan pois mittaustuloksista. Tällaisen eliminoinnin on tapahduttava kaikissa mittaussuunnissa. Ohjelmakäsittelyn jälkeen tukki voidaan kuvata kolmiulotteisessa koordinaatistossa mahdollisimman tarkasti.



Kuva 8. Esimerkki tukkimittarin toimintaperiaatteesta.

5.2. Tukkien röntgenmittaukset

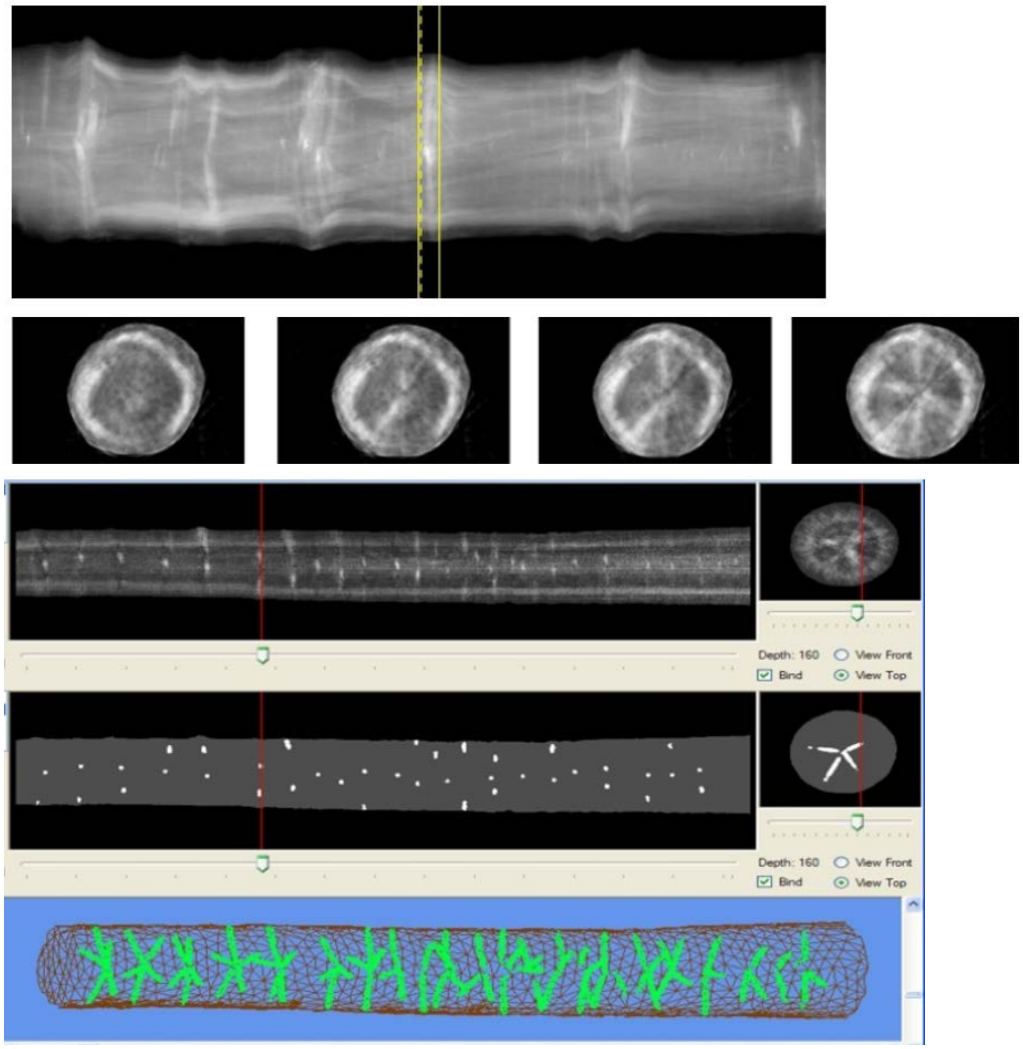
Kuvassa 9 esitetään tukin röntgenmittauksen periaate, jolla tuotetaan dataa ja informaatiota tukin sisäisestä rakenteesta, esimerkiksi oksaisuudesta. Järjestelmässä on kaksi röntgenlähdettä, jotka lähettävät röntgensäteitä. Tukin takana on herkkä detektori, joka mittaa tukin läpi tulleen säteilyn voimakkuuden. Kun säde osuu puuhun, vaimeneminen on sitä voimakkaampaa mitä enemmän puumateriaalia on lähettimen ja vastaanottimen välillä. Suurin vaimennus tapahtuu silloin, kun säde kulkee tukin ytimen kautta. Osa säteistä ohittaa tukin sivusta, jolloin säteen vaimenemista ei tapahdu. Vaimenemiseen vaikuttavat röntgensäteen puussa kulkeman matkan pituus, tukin eri osien vaihteleva tilavuuspaino, tukin vesipitoisuus tukin eri osissa, tukin oksikkuus, sydänpuun ja pintapuun määrät, vuosiluston paksuus jne. Mitä enemmän mittaussuuntia röntgenmittauksessa on, sitä tarkempi kuvaus tukista saadaan. Olennainen osa tukin röntgenmittausta on datan käsittely ja analysointi.



Kuva 9. Tukkien röntgenmittauksen periaate.

Tukkien röntgenmittareissa on tavallisesti yhdestä neljään mittaussuuntaa. Näin saadaan puun laatuun liittyvää tietoa mm. oksista, oksaväleistä, sydänpuun osuudesta ja halkaisijoista sekä puun kosteudesta (kuva 10). Jos halutaan tietoa yksittäisistä oksista ja niiden ominaisuuksista, mittaussuuntia pitäisi olla vähintään 7- 8.

Yksisuuntaisilla mittareilla voidaan mitata oksakiehkuroiden välejä ja siten saada tietoa oksattoman puun osuudesta sahatavaroissa. On kehitetty myös röntgenmittari, jossa röntgenlähde ja detektori pyörivät muodostaen spiraalin. Mittarilla saadaan teoriassa tarkempi kuva tukin ominaisuuksista.



Kuva 10. Tukista mitattuja röntgenkuvia.

Sahauksen onnistumisen kannalta tukin laadun tietäminen on oleellista. Sahalla operaattori voi silmävaraisesti määrittää, mihin laatuluokkaan tukki kuuluu. 3D-mittarilla voidaan tukin laatua arvioida esimerkiksi kyhmyisyyteen perustuen. Tarkin tieto ja määritys tukin laadulle saadaan röntgenmittareiden tuottamilla tukin laatuun liittyvillä parametreilla. Tällaisia parametreja ovat esimerkiksi tukin oksikkuus, oksaväli, oksaisuusindeksi, oksien koko, oksien tilavuus ja puun tiheys.

5.3. Tukkien röntgenmittauksen hyödyntäminen sahausprosessissa

Taulukossa 2 esitetään esimerkkejä mitattavista suureista 3D-vastaanottomittarilla ja tukkien lajittelumittarilla mitattavista suureista. Mitattavat suureet poikkeavat vain vähän eri mittarivalmistajien välillä.

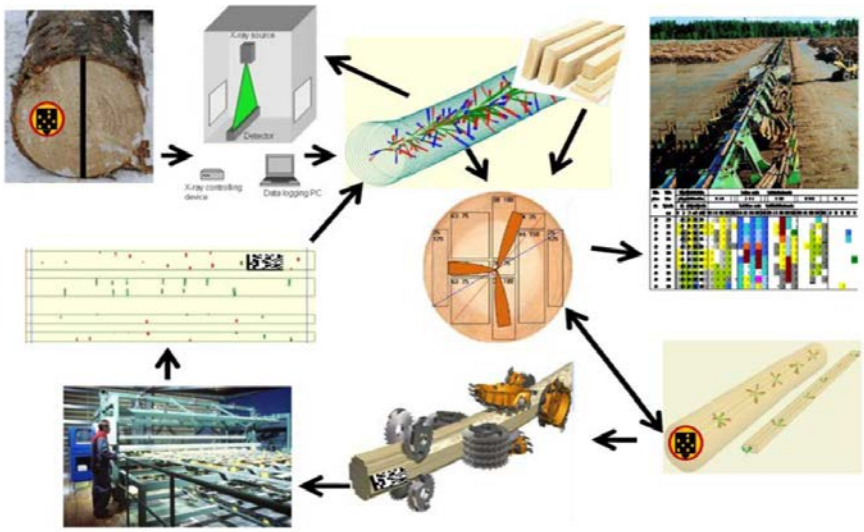
Taulukko 2. Esimerkkejä mitattavista suureista 3D -vastaanottomittarilla ja tukkien lajittelumittarilla mitattavista suureista.

	3D-vastaanottomittari Mitattavat suureet
1	Tukkinumero
2	PituusMm
3	MitattuTilavuus
4	KartioLatva
5	KartioTyvi
6	KartioKoko
7	TyviEdella
8	SoikeusPros
9	LenkousPerMetri
10	LenkousMax
11	LenkousLiuku
12	LenkoudenSuunta
13	LatvaHalkaisija
14	TyviHalkaisija
15	TyviMaxHalkaisija
16	HalkTyvestaTaulu[0]
17	HalkTyvestaTaulu[1]
18	HalkTyvestaTaulu[2]
19	HalkTyvestaTaulu[3]
20	HalkTyvestaTaulu[4]
21	HalkTyvestaTaulu[5]
22	knotPerM
23	nylinder_grade
24	parrun_lavistaja_mm
25	tukki_numero
26	LatvaMinHalkaisija
27	knot_count
28	knot_min_distance
29	knot_avr_distance
30	DiaMin0
31	DiaMin1
32	DiaMin2
33	DiaSuoraSov
34	DiaSuuntaProj

	Lajittelumittarit (2D ja röntgen) Mitattavat suureet
1	No
2	Varastolaatu
3	HalkaisijaLka
4	PituusLka
5	2D halkaisija
6	2D pituus
7	2D tilavuus
8	2D kartiokkuus
9	2D lokero
10	Tukin sijainti (1 = tyvi, 2 = keski, 3 = latva)
11	Pituus mm
12	Laatuindeksi (0.00–1.00)
13	Kuoreton minimihalkaisija
14	Maksimi kuoreton halkaisija
15	Tilavuus, kuoreton 1/10l
16	Oksaryhmien lukumäärä
17	Oksaryhmäväli keskimäärin
18	Oksaryhmäväli minimi
19	Oksaryhmäväli maksimi
20	Oksaryhmäväli hajonta
21	Oksaisuusindeksi (0.0–100)
22	Sydänpuu, minimihalkaisija
23	Sydänpuu, minimihalkaisijan paikka
24	Maksimi kuorellinen halkaisija
25	Tilavuus, kuorellinen
26	Kartiokkuus
27	Kartiokkuus, tyvi
28	TYHJÄ Parametri
29	Vierasesineiden määrä
30	Tyhjä/Laho
31	Tiheys
32	TiheysHajonta
33	OksaRyhMinLaatu
34	OksaRyhKaLaatu
35	OksaRyhLaHajinta
36	Oksaindeksi / oksaryhmien lukumäärä
37	Sydänpuu, maksimihalkaisija
38	Lustopaksuus keskimäärin
39	Oksaton pituus
40	Liukuva oksaindeksi keskiarvo
41	Liukuva oksaindeksi maksimi
42	Sydänpuutiheys

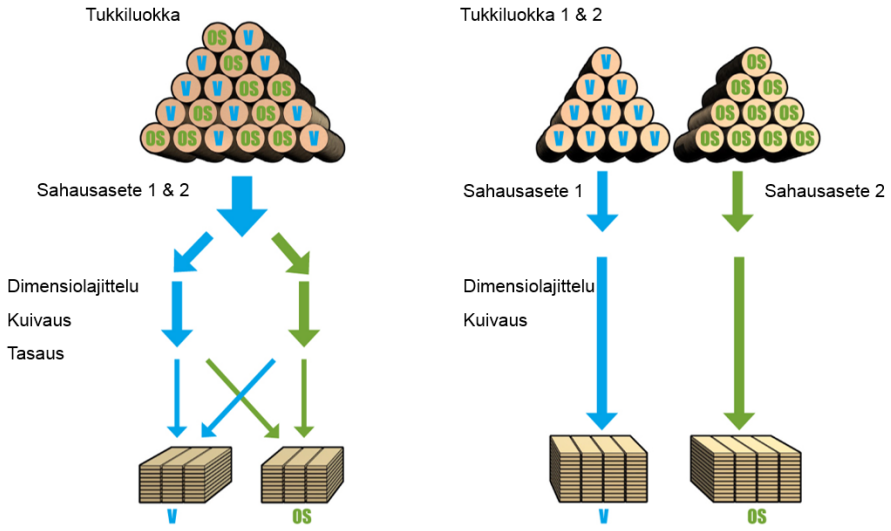
Tukkien lajittelu yhtenäisiin ja homogeenisiin tukkiluokkiin on tärkeä prosessivaihe, koska siinä muodostetaan tukkiryhmiä, jotka sahataan samalla asetteella, terien asetuksella. Homogeenisten tukkiluokkien muodostaminen mahdollistaa tukkien sahaamisen ”pää päässä”. Tukkien väli merkitsee aina sahauskapasiteetin putoamista, koska sahauksessa joudutaan jättämään riittävä välimatka sahausasetteen muuttamisen tarpeeksi.

Kuvassa 11 esitetään sahan jalostusprosessi tukin röntgenmittauksesta valmiiksi sahatavaratuotteiksi. Tukin tultua sahalle sen geometriset ominaisuudet mitataan ja samanaikaisesti tukin laatuominaisuudet, erityisesti oksat, mitataan röntgenskannerilla, joka tuottaa parhaimmillaan yksilöllisen kuvauksen jokaisesta oksasta ja oksan sijainnista tukin geometriassa.



Kuva 11. Tukin röntgenmittaus osana sahan tuotantoprosessia (DigiPOS).

Kuvassa 12 esitetään tukkien lajittelun periaate. Tukit, joiden geometriset ja laadulliset ominaisuudet ovat lähellä toisiaan, muodostavat tukkiluokan, jonka tukit sahataan samalla tai lähes samalla asetteella. Tukkien luokittelu merkitsee sitä, että sahauksessa syntyy sydäntavaran osalta poikkileikkaukseltaan samanlaisia sahatavarakappaleita. Tämä merkitsee sahauksen jälkeisten prosessien yksinkertaistamista.



Kuva 12. Tukkien lajittelu laadun mukaan röntgenmittarilla.

5.4. Tukkien geometrian ja laadun mittaukset sekä tiedon hyväksikäyttö

Sahojen tukkimittareilta (3D-mittari ja röntgenmittari) saadaan mitattua suuri määrä dataa ja informaatiota koskien jokaista yksittäistä tukkia. Tukkia kuvaavia parametreja voi olla hyvinkin paljon. Perusinformaatiota, jota saadaan sekä 3D- että röntgenmittareilla ovat esimerkiksi tukin geometriaa kuvaavat suureet. Sellaisia ovat muun muassa latvaläpimitta, pituus, kapeneminen (kartiokkuus), soikeus ja lenkous. Laskettuja ominaisuuksia ovat esimerkiksi erilaiset tilavuudet. Taulukossa 3 esitetään tukkimittareilla mitattavia suureita.

Tukin mitattujen ominaisuuksien hyväksikäyttö edellyttää, että on määritetty koordinaatisto, johon reaalitukin mittauksista generoitu ”virtuaalinen” tukki sijoitetaan. Tässä tarkoituksessa on tärkeää, että tiedetään tukin pyörityksen asema mittauskuljettimella.

Taulukko 3. Tukkia kuvaavia mittaussuureita.

Mittaussuureita
Vastaanottolaatu
Kuoreton latvaläpimitta
Kuorellinen latvaläpimitta
Pituus
Kartiokkuus
Lenkous
Soikeus
Tiheys
Kuoreton tilavuus
Kuorellinen tilavuus
Vuosiluston paksuus
Sydänpuun minimihalkaisija
Oksaryhmien lukumäärä
Oksatilavuus
Oksatonta puuta %
Oksaryhmien väli

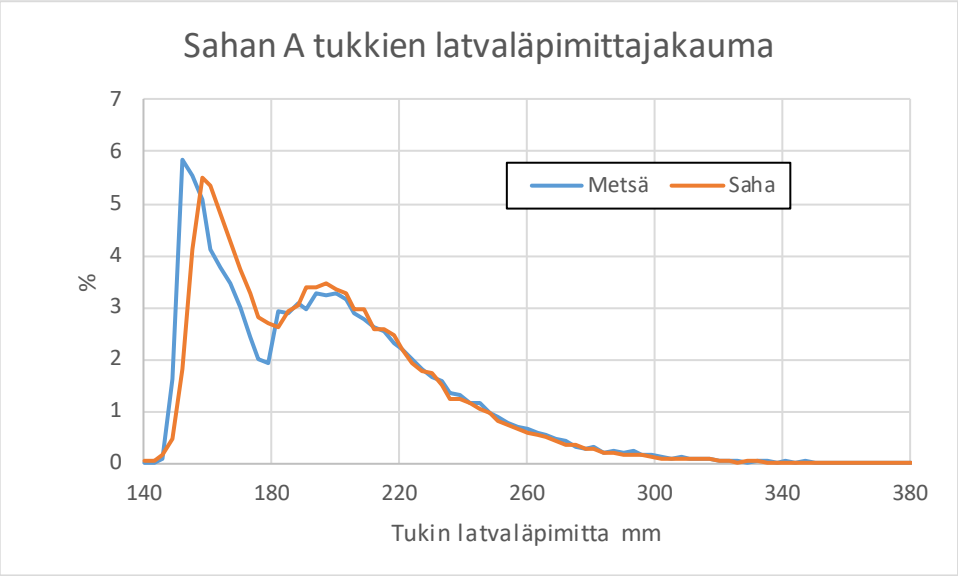
6. TULOKSET

Tutkimusaineistoista lasketut tulokset eivät ole aineistojen suppeuden vuoksi yleistettäviä, vaan esimerkinomaisia ja pikemminkin ilmiöitä ja tunnusten välisiä korrelaatioita havainnollistavia kuin niitä selittäviä. Useiden tukkiröntgendatasta mitattujen tunnusten osalta leimikoiden sisäinen hajonta oli suurta, eikä selittäviä tekijöitä ollut mahdollista kohdentaa leimikkotasoa tarkemmin tukkeihin. Sahojen erilaiset mittausjärjestelmät ja mitattavat tunnukset aiheuttivat myös sen, että tuloksia ei voida esittää koko aineistoa koskevina kattavasti. Esitettävät tulokset ovat siten valikoituja saha- tai leimikkokohtaisia, mutta havainnollistamaan pyrkiviä osatuloksia.

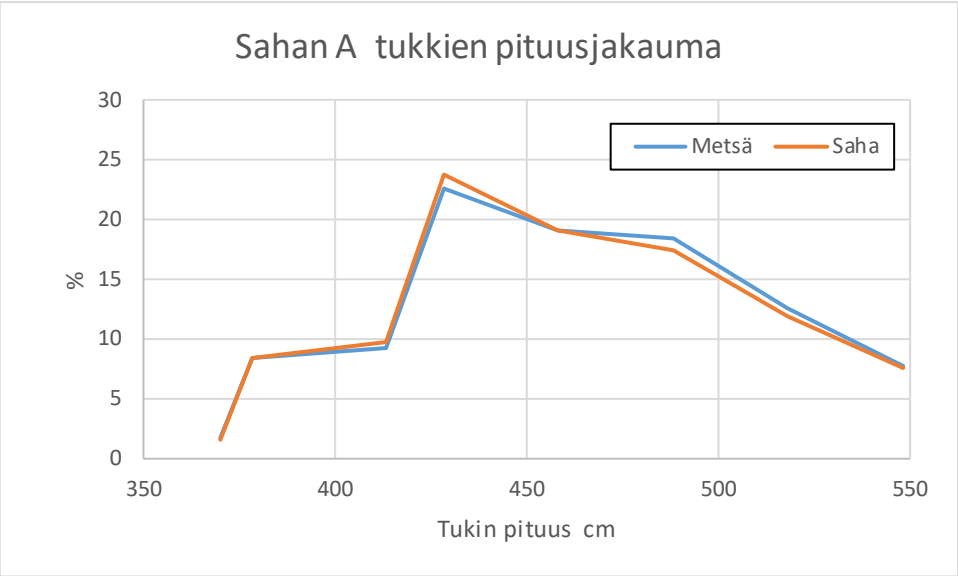
6.1 Hakkuukoneen ja sahan tukkimäärien ja läpimitta-, pituus- ja kartiokkuusjakaumien vastaavuudet

Sahojen A, B ja C hakkuukoneilla ja sahojen mittareilla mitattujen tukkien latvaläpimitta-, pituus- ja kartiokkuusjakaumat laskettiin. Hakkuukoneella mitattujen tukkien kartiokkuudet (mm/m) laskettiin runkokäyristä tukin latvasta 3 metrin matkalta regressiosuoran avulla.

Kuvassa 13 esitetään sahan A tukkien latvaläpimittajakauma (tukkeja sahan vastaanottomittauksissa 31 701 kpl ja hakkuussa 38 035 kpl). Läpimittajakaumassa alle 180 mm läpimitoissa hakkuukoneen ja sahamittarin jakaumat eivät aivan vastaa toisiaan. Ilmeisesti tukkeja on mennyt toiselle sahalle ja vastaavasti muita tukkeja on tullut sahalle. Hakkuukoneen ja tukkimittarin prosentuaaliset tukkien pituusjakaumat ovat kuitenkin hyvin lähellä toisiaan (kuva 14).

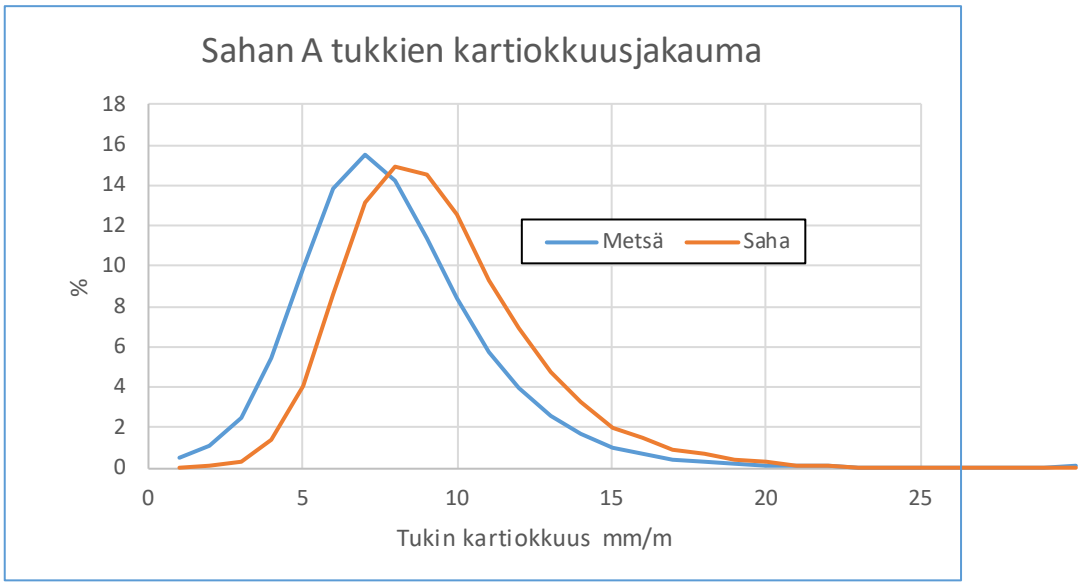


Kuva 13. Sahan A tukkien latvaläpimittajakaumat hakkuukoneen ja sahan tukkimittarin mukaan.



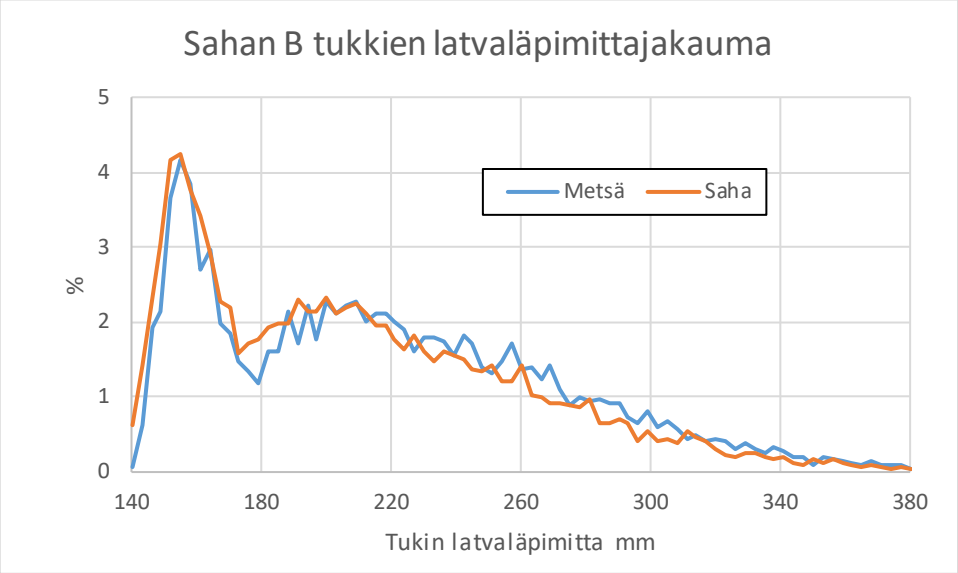
Kuva 14. Sahan A tukkien pituusjakaumat hakkuukoneen ja sahan tukkimittarin mukaan.

Kuvassa 15 esitetään hakkuukoneen runkokäyristä laskettu ja sahan tukkimittarin tuottama tukkien kartiokkuuden jakauma, jotka ovat muodoltaan hyvin lähellä toisiaan. Sahan tukkimittarin mittaama kartiokkuus on keskimäärin noin 2 mm/m suurempi kuin hakkuukonemittauksista laskettu kartiokkuus. Ero johtuu mittaustapojen erilaisuudesta ja laskennan erilaisuudesta. Keskimääräinen kartiokkuus on sahamittarilla 8 mm/m ja hakkuukoneen tuloksena 6 mm/m. Ero on merkittävä.

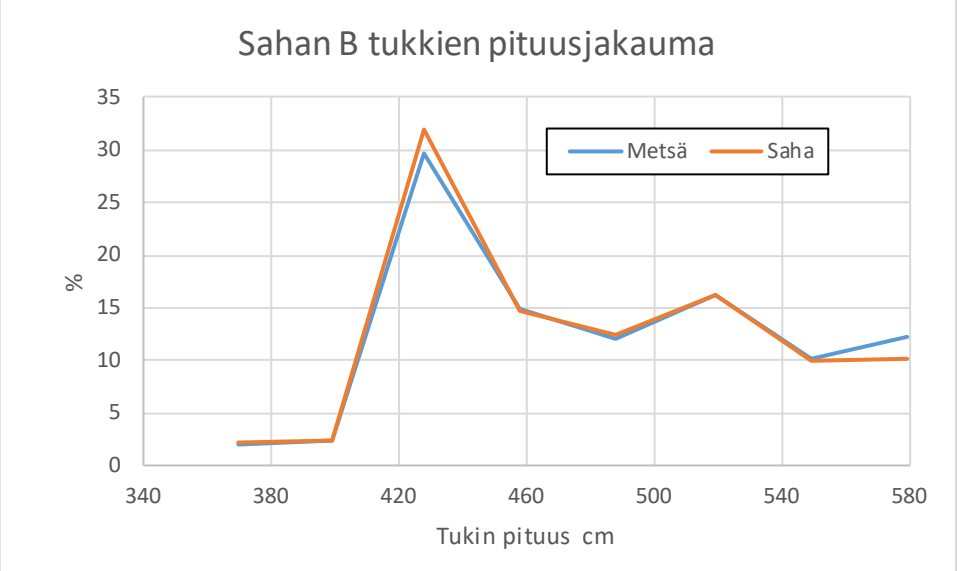


Kuva 15. Sahan A tukkien kartiokkuusjakaumat hakkuukoneen ja sahan tukkimittarin mukaan.

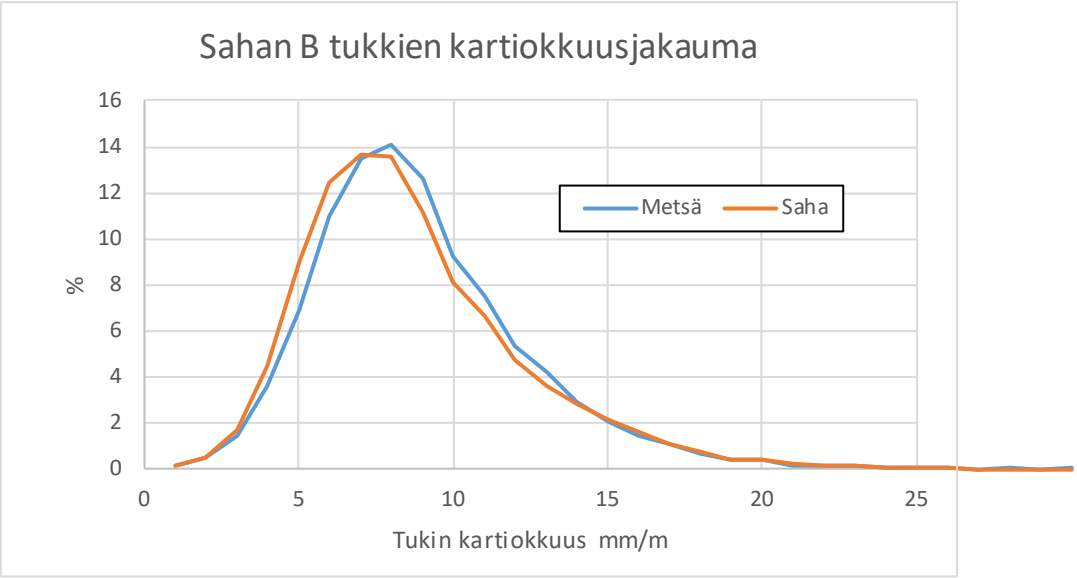
Kuvissa 16–18 esitetään sahan B tukkien läpimitta-, pituus- ja kartiokkuusjakaumat. Hakkuukoneella ja sahalla mitatut jakaumat vastaavat hyvin toisiaan.



Kuva 16. Sahan B tukkien latvaläpimittajakaumat hakkuukoneen ja sahan tukkimittarin mukaan.

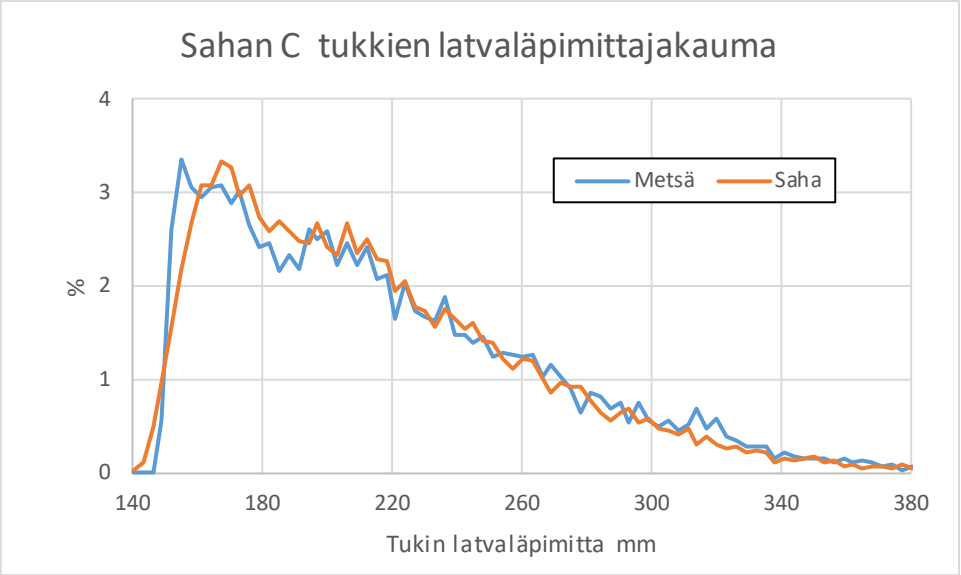


Kuva 17. Sahan B tukkien pituusjakaumat hakkuukoneen ja sahan tukkimittarin mukaan.

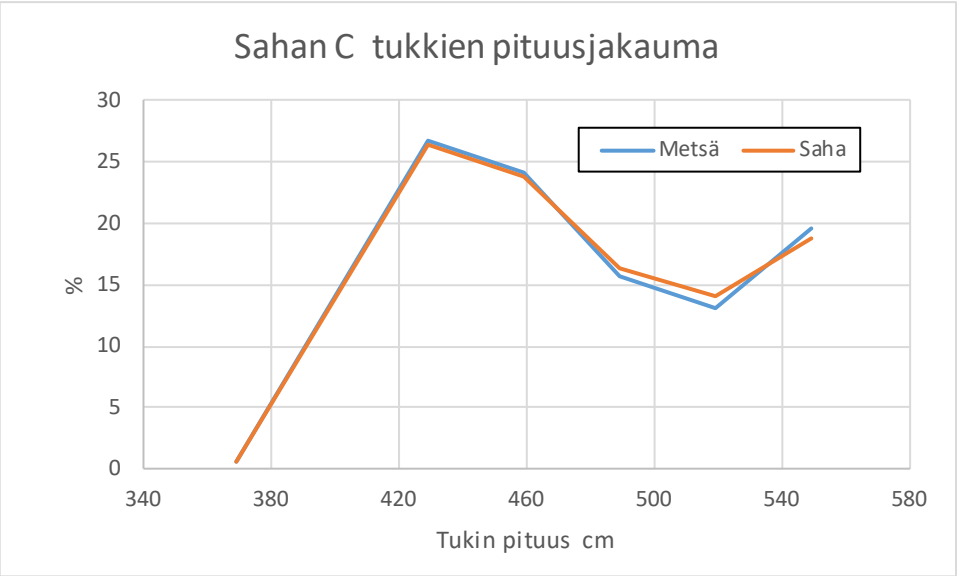


Kuva 18. Sahan B tukkien kartiokkuusjakaumat hakkuukoneen ja sahan tukkimittarin mukaan.

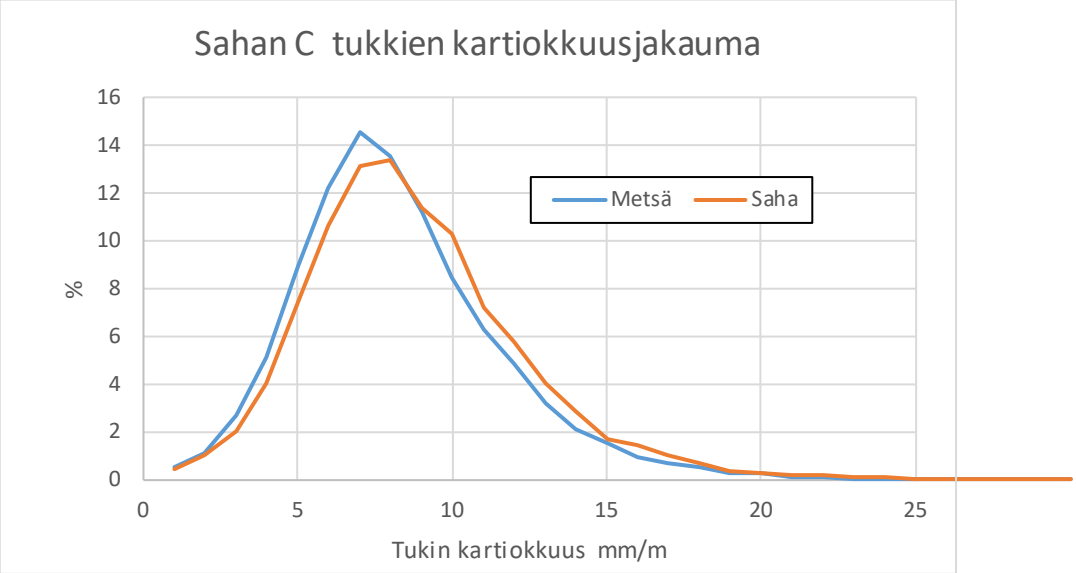
Sahan C tukkien latvaläpimitta-, pituus ja kartiokkuusjakaumat on esitetty kuvissa 19, 20 ja 21. Metsässä ja sahalla mitattujen tukkien jakaumat vastaavat hyvin toisiaan.



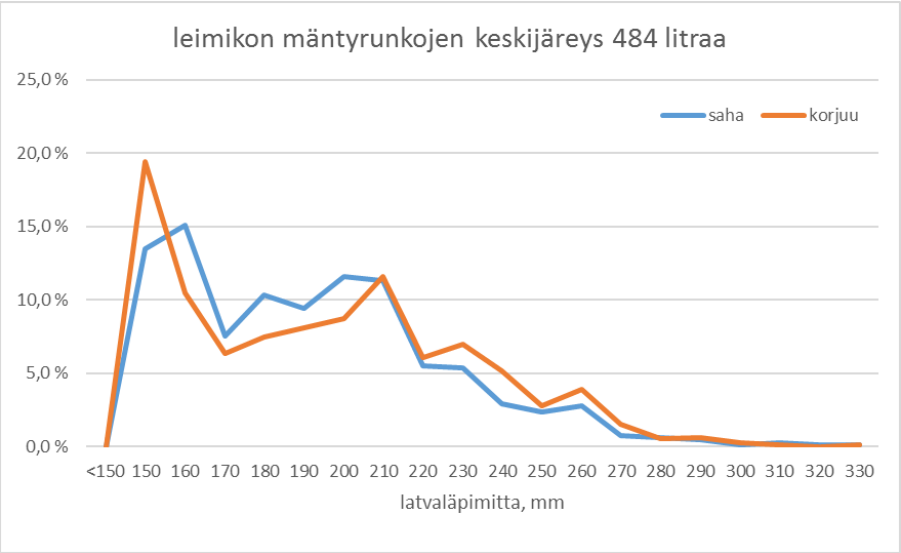
Kuva 19. Sahan C tukkien latvaläpimittajakaumat hakkuukoneen ja sahan tukkimittarin mukaan.



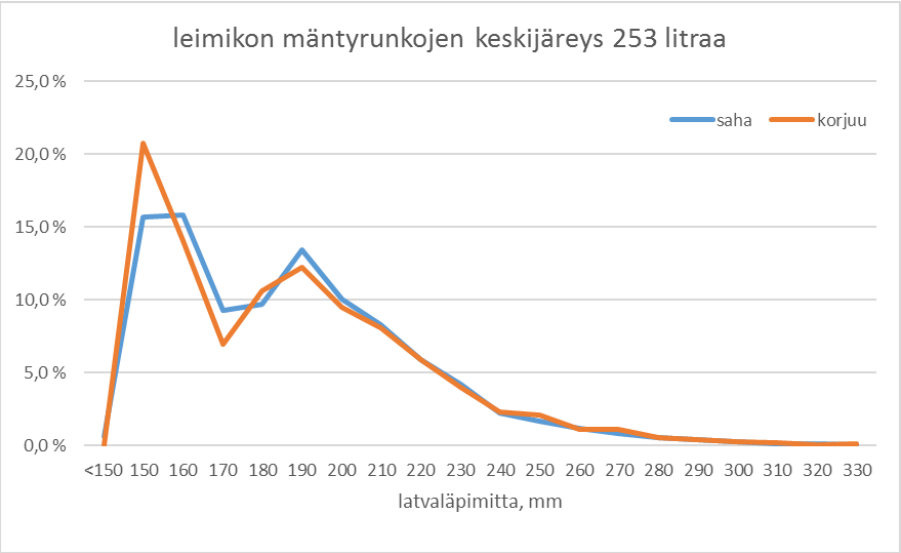
Kuva 20. Sahan C tukkien pituusjakaumat hakkuukoneen ja sahan tukkimittarin mukaan.



Kuva 21. Sahan C tukkien kartiokkuusjakaumat hakkuukoneen ja sahan tukkimittarin mukaan.



Kuva 22. Rungonkooltaan keskijäreän leimikon mäntytukkien latvaläpimitta-luokkien jakaumat hakkuukone- ja sahamittauksissa.

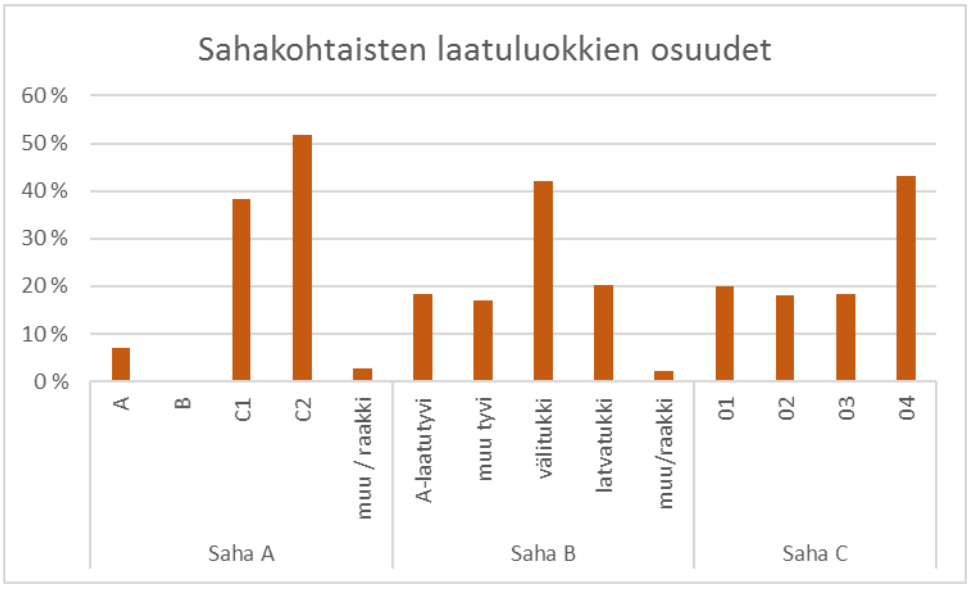


Kuva 23. Rungonkooltaan pienen leimikon mäntytukkien latvaläpimittaluok-kien jakaumat hakkuukone- ja sahamittauksissa.

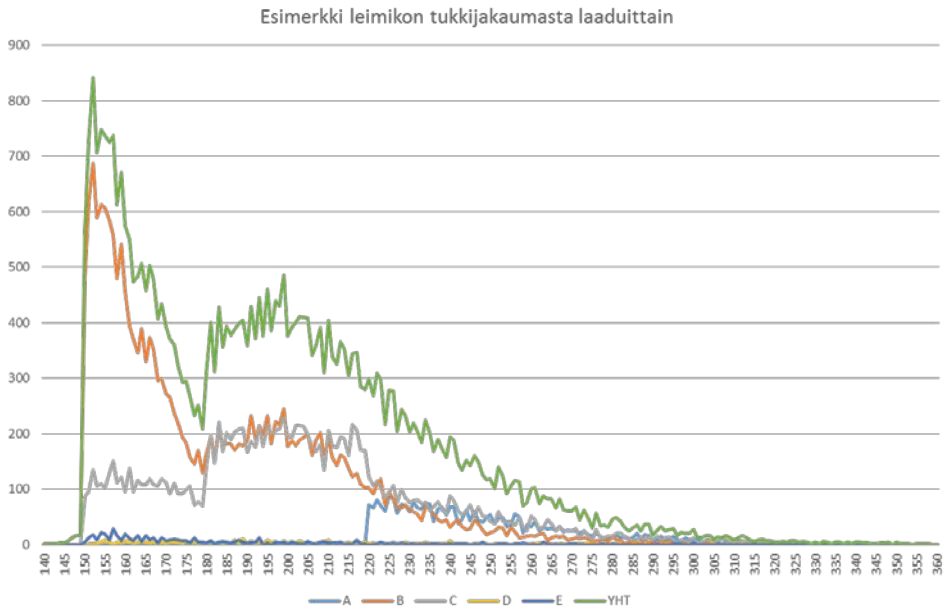
6.2 Tukkien jakaumat laatuluokittain

Yhtiö- tai sahakohtaisia tukkien laatuluokituksen perusteita ei tutkimuksessa selvitetty, koska laatuluokkia ei ollut tarvetta yhdistää analyysien vuoksi. Vastaanottomittauksessa tehtävä laadutus perustuu kaikilla mäntysahoilla sen arviointiin, onko tukki A-laatuinen tyvitukki, muu tyvitukki, kuivaoksainen välitukki tai terveoksainen latvatukki. Laadutuksessa arvioidaan myös kaikki raakkisyyt.

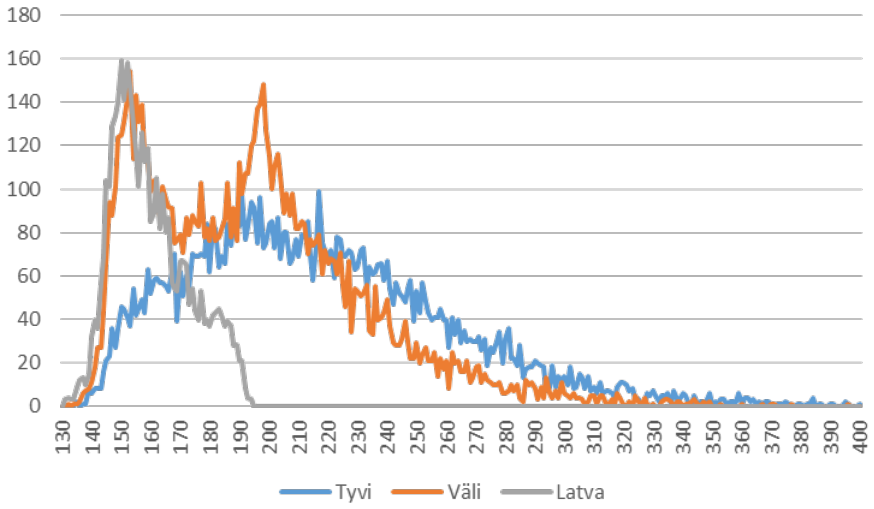
A-laatutyvien osuus sahan tukkijakaumassa on normaalisti sitä isompi mitä suurempi on tukkisuman keskijäreys. Tutkimusaineistossa sahan B tukkien keskijäreys oli suurin ja samoin sen A-laatutyvien osuus. Järeys- ja laatujakauma on syytä ottaa huomioon sahakohtaisia tuloksia tarkasteltaessa. Tutkimuksessa tarkasteltiin vastaanottolaadun ja tukkiröntgentunnusten välisiä korrelaatioita epäsuorasti luokittaen tukkeja tyvi-, latva- ja välitukkeihin sekä latvaläpimitan mukaan.



Kuva 24. Tukkien vastaanottolaatujen jakaumat. Yhtiökohtaisia laatuluokkia ei luokituskriteereiden erilaisuuden vuoksi ole yhdistetty.



Kuva 25. Esimerkkileimikon tukkijakauma laaduittain. A-tukkia saadaan pääasiassa alkaen latvaläpimitasta 220 millimetriä.



Kuva 26. Esimerkkileimikon tyvi-, väli- ja latvatukkien jakauma.

6.3 Vuosirengasvälin jakaumat

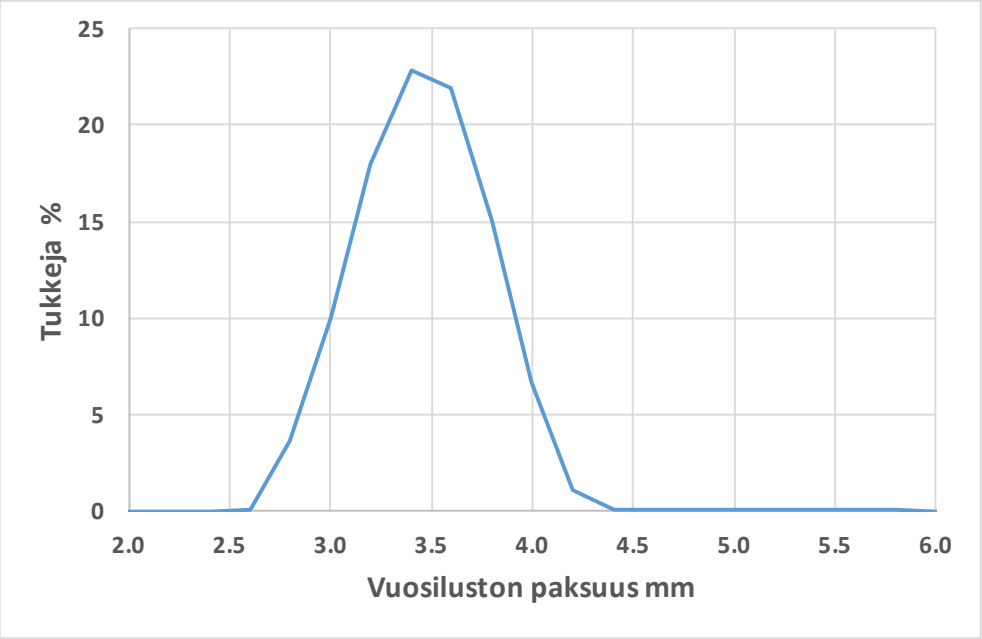
Vuosilustot kertovat puun iän sekä arvion puun vuotuisesta kasvusta ja kasvun vaihtelusta. Sahoilla havaittiin eroavaisuuksia sahalle tulleiden tukkien vuosirengasvälin tarkasteluissa. Tutkimuksessa leimikoiden välillä havaittiin suuriakin eroja vuosirengaskasvujen välillä (kuvat 27–31).

Vuosilustojen kasvun vaihteluun vaikuttavia tekijöitä ovat mm.:

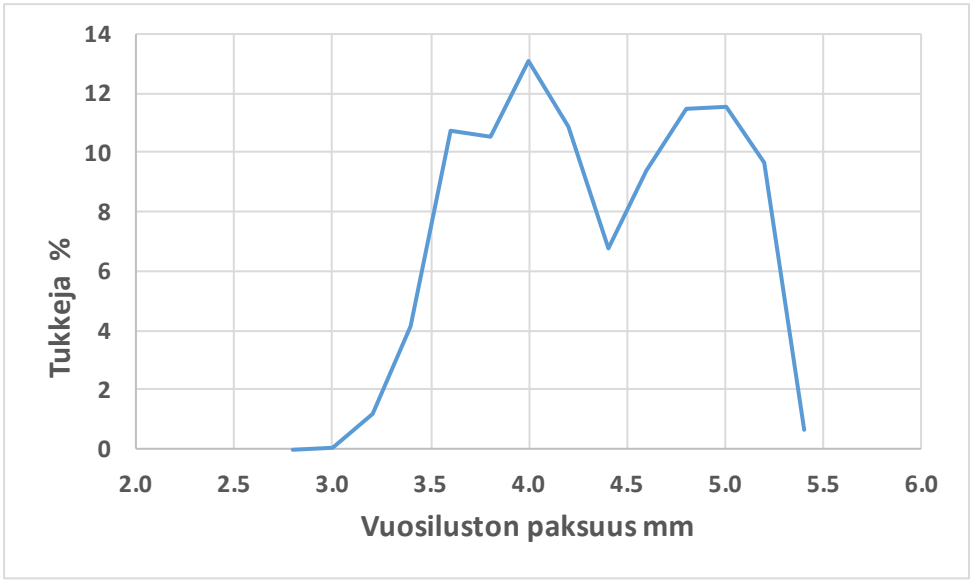
Ilmasto- ja säätekijät: Säätekijöistä lustojen kasvuun vaikuttavat Etelä-Suomessa sekä kasvukauden lämpötila että sateisuus, Pohjois-Suomessa merkittävimmin kasvukauden lämpötila. Kylmät tai kuivat vuodet näkyvät kapeina, lämpimät tai kosteat vuodet leveinä vuosilustoina.

Puun ikääntyminen: Nuoret puut kasvattavat suhteessa leveitä, vanhat kapeita lustoja. Lustojen leveyskasvussa näkyvät myös metsäpalot, hyönteistuhot ja taudit, ilman epäpuhtaudet, tuulet, tulvat ja myrskyt. Metsänkäsittely, kuten ojitukset, lannoitukset ja metsän harvennukset ja niistä seuraava varjostuksen ja puiden kilpailun väheneminen näkyvät usein kasvun voimistumisena.

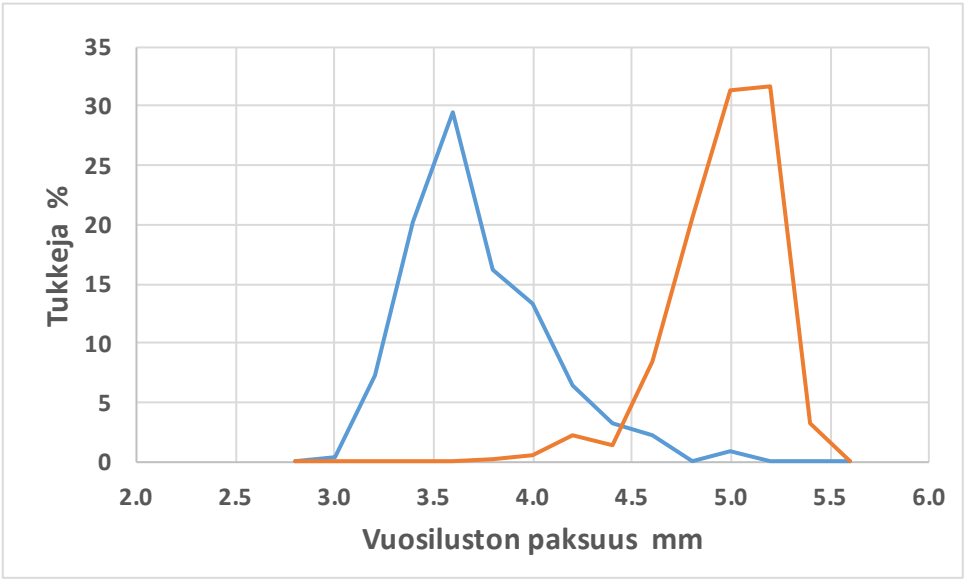
Metsän luontaiset tekijät: Kasvupaikan puuntuotoskyky, johon vaikuttavat erityisesti maaperätekijät, vesitalous ja onko kasvupaikka kivennäis- vai turvemaalla. Kasvupaikkaa kuvataan metsätaloudessa perinteisesti metsätyypeillä (lehto, tuore kangas, kuivahko kangas, karu kangas ja vastaavat suotyypit).



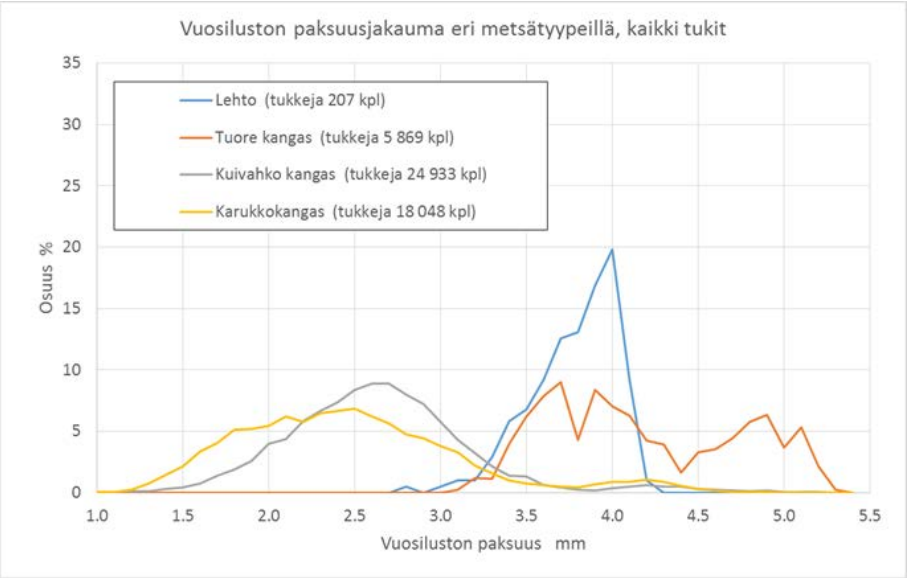
Kuva 27. Sahan C vuosirengasvälin jakauma kaikille tukeille.



Kuva 28. Sahan B vuosirengasvälin jakauma kaikille tukeille.

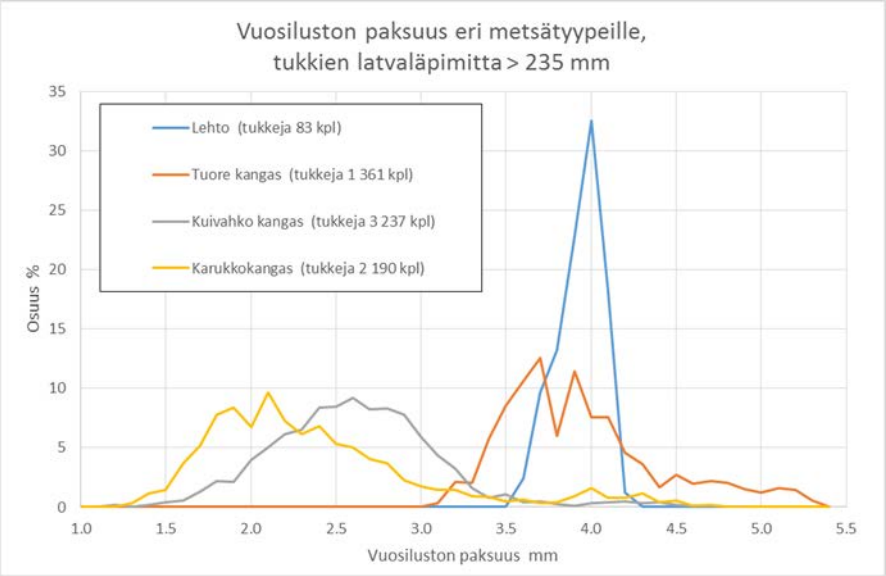


Kuva 29. Kahden erilaisen kasvupaikan leimikon tukkien vuosirengasvälit (oranssi = tuore kangas, sininen = kuiva kangas).



Kuva 30. Vuosiluston paksuusjakauma eri metsätyypeillä.

Kuvassa 31 esitetään erilaisten kasvupaikkatyyppien vuosiluston paksuusjakaumia eri metsätyypeillä, kun lasketaan mukaan vain suurimmat tukit (latvaläpimitta > 235 mm).



Kuva 31. Vuosiluston paksuusjakauma eri metsätyypeillä, tyvitukit.

6.4 Leimikoiden ikä läpimitan ja vuosirengasvälin avulla

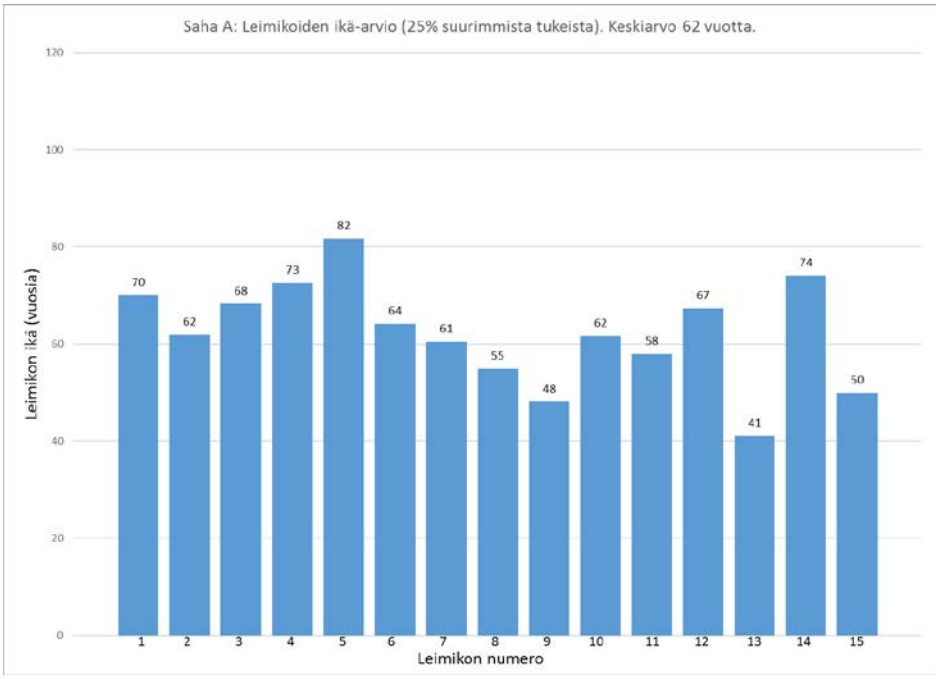
Leimikoiden iän arviointiin sovellettiin tukin läpimittaan ja vuosirengasväliin perustuvaa laskentamenetelmää. Arvio tehdään leimikon suurimpien tukkien perusteella. Koska tukkimittarin antama tyvitukkitieto ei anna riittävän hyvää arviota, valitaan 25 % leimikon suurimmista tukeista arviointia varten. Valituista tukeista lasketaan ikäarvio tukin parametrien avulla.

Ikäarvioon käytettävät mittariparametrit:

- keskimääräinen vuosikasvu (=vuosiluston leveys)
- kuoreton latvaläpimitta
- kartiokkuus
- pituus
- taimivaiheen lisäyksenä on arviossa käytetty 3 vuotta.

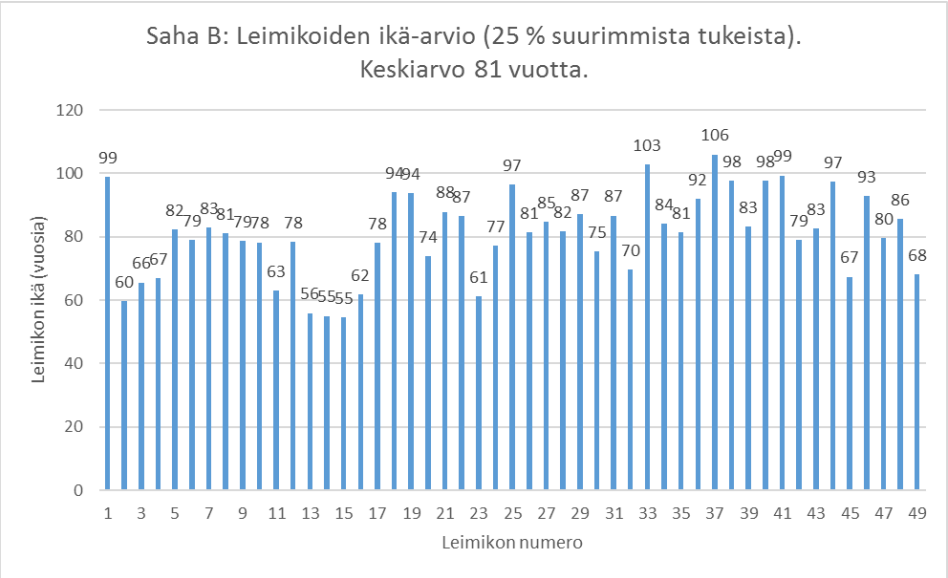
Ikäarvio saadaan kaavalla: $ikä = \frac{latvaläpimitta + \left(\frac{kartiokkuus}{1000.0}\right) * pituus}{keskimääräinen\ vuosikasvu} + 3$

Ikäarvion kaavassa lasketaan mittaustietojen perusteella leimikon rungon tyviläpimitta. Keskimääräisen vuosikasvun avulla saadaan arvio iästä jakamalla rungon tyviläpimitta vuosikasvun arvolla. Arviossa lisätään kolme vuotta taimivaiheen kasvuun arvioidulla ajalla.



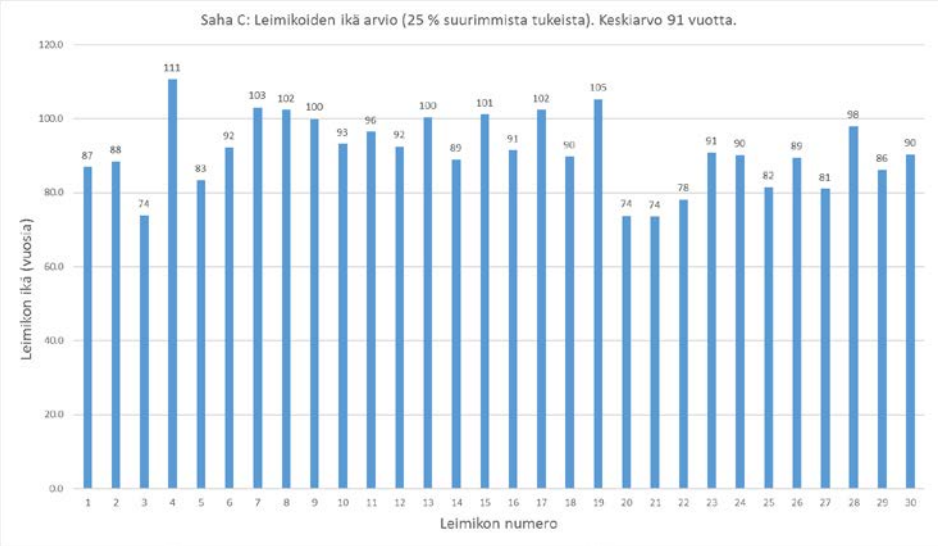
Kuva 32. Sahan A leimikoiden ikäarviot.

Kuvassa 33 esitetään sahan B korjuulohkojen ikäarviot. Leimikko voi koostua yhdestä tai useammasta lohkosta. Lohkojen keskimääräiseksi iäksi saadaan noin 81 vuotta. Miltei kaikki leimikot ovat päätehakkuuleimikoita.



Kuva 33. Sahan B leimikoiden (korjuulohkojen) ikäarviot.

Saha C leimikoiden ikäarviot on esitetty kuvassa 34. Keski-iäksi saadaan 91 vuotta. Leimikoiden keskimääräinen koko oli noin 400 tukkia, jolloin ikäarvioon käytettiin noin 100 tukin tietoja.



Kuva 34. Sahan C leimikoiden ikäarviot.

6.5 Oksaisuustunnukset

Tukkien oksaisuuteen liittyvät tunnukset kuvaavat samalla tukkien laatua. Erilaisia tukin laatua kuvaavia oksaisuuteen liittyviä mittareita on useita, seuraavassa esimerkkejä:

Oksaisuusaste: Kuvaa tukin oksaisuutta; mitä suurempi luku, sitä oksaisempi.

Oksaisuusindeksi: Kuvaa tukin oksaisuutta; mitä suurempi luku, sitä oksaisempi. Esimerkiksi luku välillä 0.0 – 1000.0 (osuus %(*10)).

Oksatilavuus/Volyymi: Volyymi, esimerkiksi kuutiosenttimetriä tukkia kohden.

Oksaryhmien väli (min, max, keski): Ilmaisee tukissa oksaryhmien minimi-, maksimi- ja keskimääräisen välin (arvo esimerkiksi millimetreinä).

Oksaryhmien lukumäärä: Oksaryhmien lukumäärä tukkia kohden.

Suurimman oksaryhmän koko: Koko esimerkiksi kuutiosenttimetreissä ilmaistuna.

Taulukossa 5 esitetään sahan A tukin oksavolyymin ja leimikoiden tunnuslukujen välisiä riippuvuuksia. Mäntytukkien koon ja oksavolyymin välillä on selvä korrelaatio.

Taulukko 5. Oksaisuuden ja leimikkomuuttujien välisiä korrelaatioita (saha A).

Leimikkomuuttuja	Oksavolyymi
MÄNTYJÄ PER HA	0.336
KOKONAISKERTYMÄ	0.246
KOKONAISKERTYMÄ PER HA	-0.549
MÄT PER HA	-0.402
MÄNNYN OSUUS	0.397
MÄT TUKKI-%	-0.574
d1.3	-0.332
d1.3_MÄ	-0.659
D1.3_MÄT	-0.652
RUNKOJEN KESKITILAVUUS	-0.406
MÄNTYRUNKOJEN KESKITILAVUUS	-0.672
MÄT KÄYTTÖOSAN PITUUS	-0.422
MÄT TUKKIOSAN PITUUS	-0.492
MÄT KESKITUKKILKM	-0.383
MÄT KESKIPITUUS	-0.042
TUKKIOSAN KUITU	0.197
JÄREÄT KUITURUNGOT	0.467

Taulukossa 6 esitetään sahalla B mitattujen tukkien oksatilavuuden ja leimikoiden tunnuslukujen välisiä riippuvuuksia. Sahan B leimikoissa oli järeyden suhteen vähän vaihtelua ja korrelaatiot ovat huomattavasti sahan A vastaavia alhaisempia.

Taulukko 6. Oksaisuuden ja leimikkomuuttujien välisiä korrelaatioita (saha B).

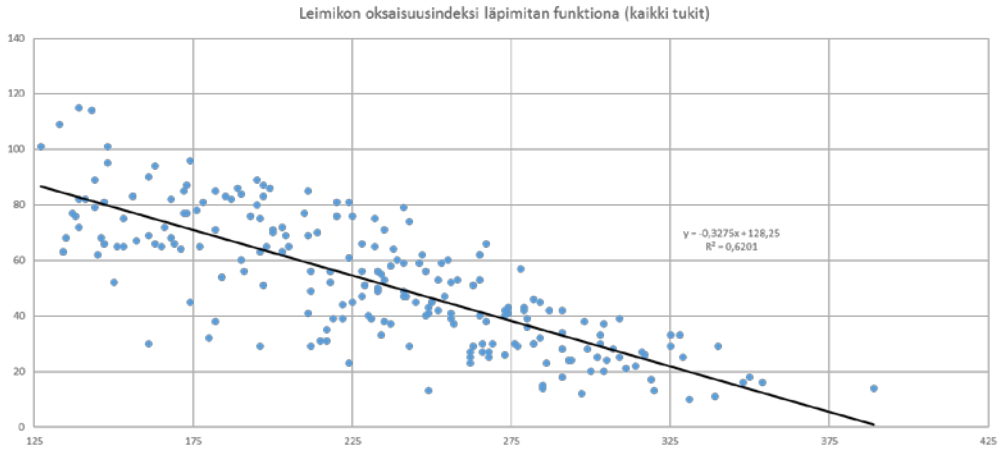
Leimikkomuuttuja	Oksatilavuus
MÄNTYJÄ PER HA	0.043
KOKONAISKERTYMÄ	0.361
KOKONAISKERTYMÄ PER HA	-0.059
MÄT PER HA	-0.042
MÄNNYN OSUUS	-0.048
MÄT TUKKI-%	0.119
d1.3	-0.225
d1.3_MÄ	-0.165
D1.3_MÄT	-0.165
RUNKOJEN KESKITILAVUUS	-0.314
MÄNTYRUNKOJEN KESKITILAVUUS	-0.267
MÄT KÄYTTÖOSAN PITUUS	-0.373
MÄT TUKKIOSAN PITUUS	-0.165
MÄT KESKITUKKILKM	-0.219
MÄT KESKIPITUUS	0.546
TUKKIOSAN KUITU	-0.257
JÄREÄT KUITURUNGOT	-0.178

Taulukossa 7 on esitetty sahalla C mitattujen tukkien oksaisuusasteen ja leimikkotunnusten välisiä riippuvuuksia. Sahan leimikot olivat samankaltaisia ja korrelaatiot hyvin ristiriitaisia.

Taulukko 7. Oksaisuuden ja leimikkomuuttujien välisiä korrelaatioita (saha C).

Leimikkomuuttuja	Oksaisuusaste
RUNKOJA PER HA	-0.230
KOKONAISKERTYMÄ	-0.131
KOKONAISKERTYMÄ PER HA	-0.130
MÄT PER HA	0.092
MÄNNYN OSUUS	0.336
MÄT TUKKI-%	0.261
d1.3	0.367
d1.3_MÄ	0.163
D1.3_MÄT	0.009
RUNKOJEN KESKITILAVUUS	0.392
MÄNTYRUNKOJEN KESKITILAVUUS	0.149
MÄT KÄYTTÖOSAN PITUUS	0.123
MÄT TUKKIOSAN PITUUS	0.263
MÄT KESKITUKKILKM	0.092
MÄT KESKIPITUUS	0.759
TUKKIOSAN KUITU	-0.218
JÄREÄT KUITURUNGOT	-0.250

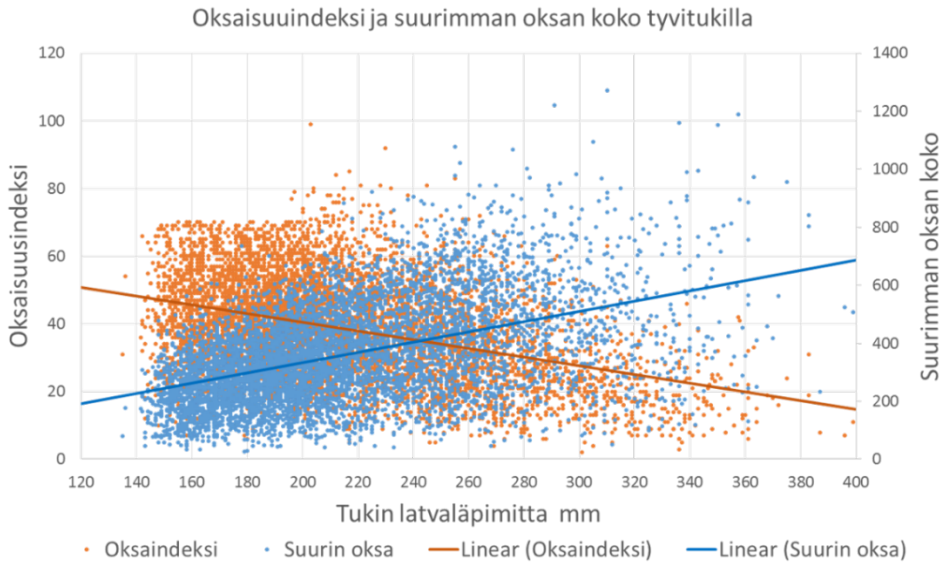
Oksaisuusindeksiä voidaan käyttää tukin laadun mittarina. Kuvassa 35 on esitetty erään leimikon tukkien oksaisuusindeksi läpimitan funktiona. Kuvasta nähdään selvästi, että oksaisuusindeksi pienenee tukin läpimitan kasvaessa. Tieto sopii hyvin siihen, että tiedetään tyvitukkien olevan yleisesti oksattomampia kuin väli- ja latvatukit.



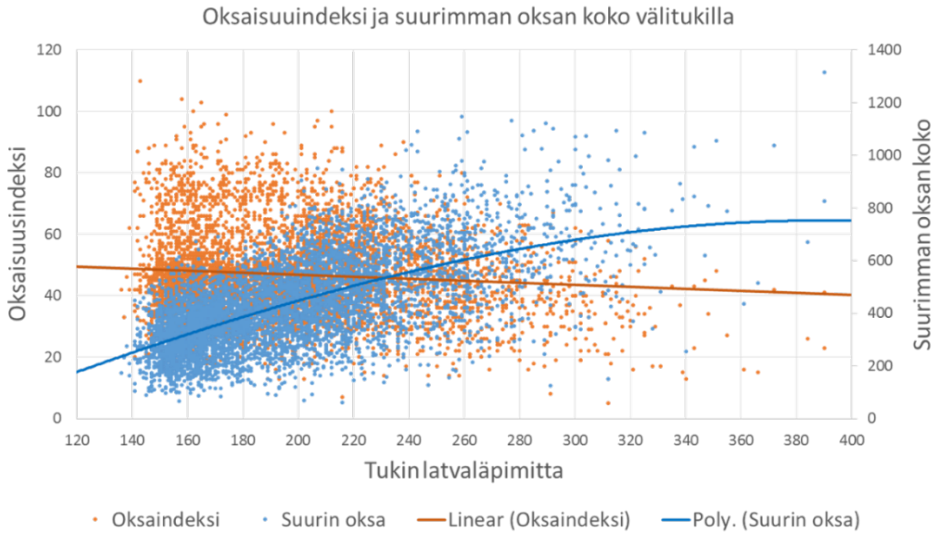
Kuva 35. Oksaisuusindeksi esimerkkileimikon tukin latvaläpimitan funktiona.

Seuraavissa kuvissa on esitetty oksaisuusindeksit ja suurimman oksan koot tukin latvaläpimitan funktiona tyvi-, väli- ja latvatukeille. Oksaisuusindeksi pienenee tukin latvaläpimitan kasvaessa (suhteellinen oksamäärä pienenee) riippumatta tukin asemasta. Tukin latvaläpimitan kasvaessa suurimman ok-

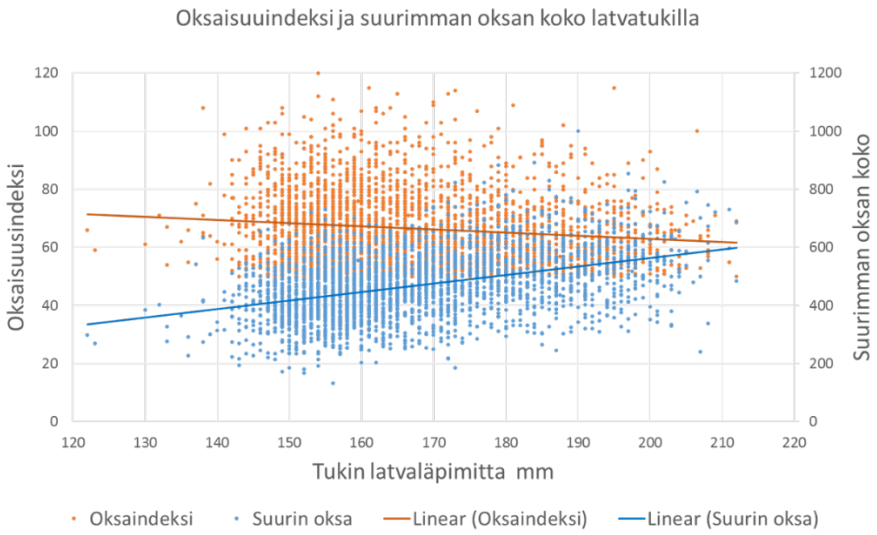
san koko kasvaa (tarkemmin liitteessä B). Tulosten mukaan tyvitukilla suurimman oksan koko kasvaa tukin koon kasvaessa, mutta samalla tukin oksaisuus pienenee.



Kuva 36. Oksaisuusindeksi ja suurimman oksan koko tyvitukeilla.

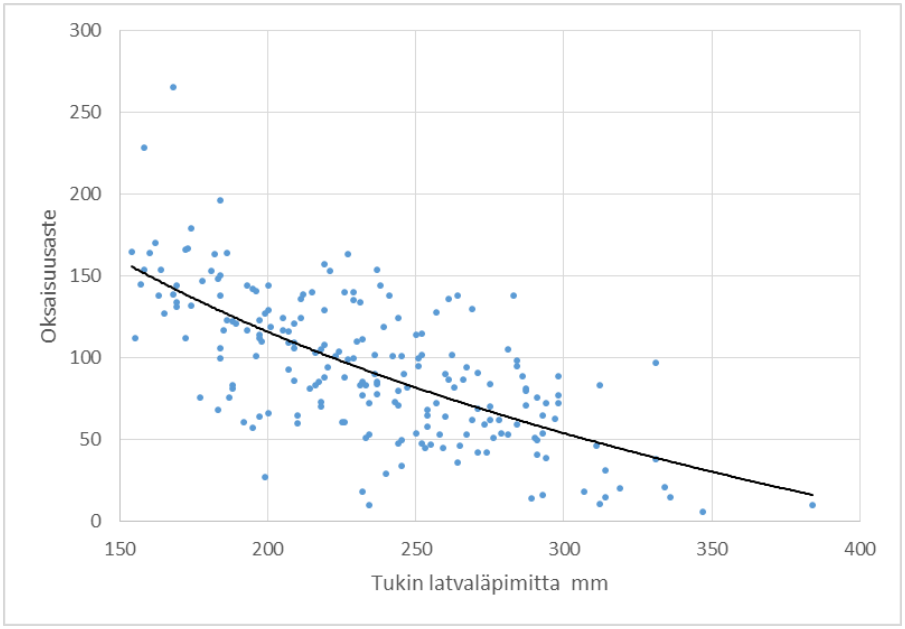


Kuva 37. Oksaisuusindeksi ja suurimman oksan koko välitukeilla.

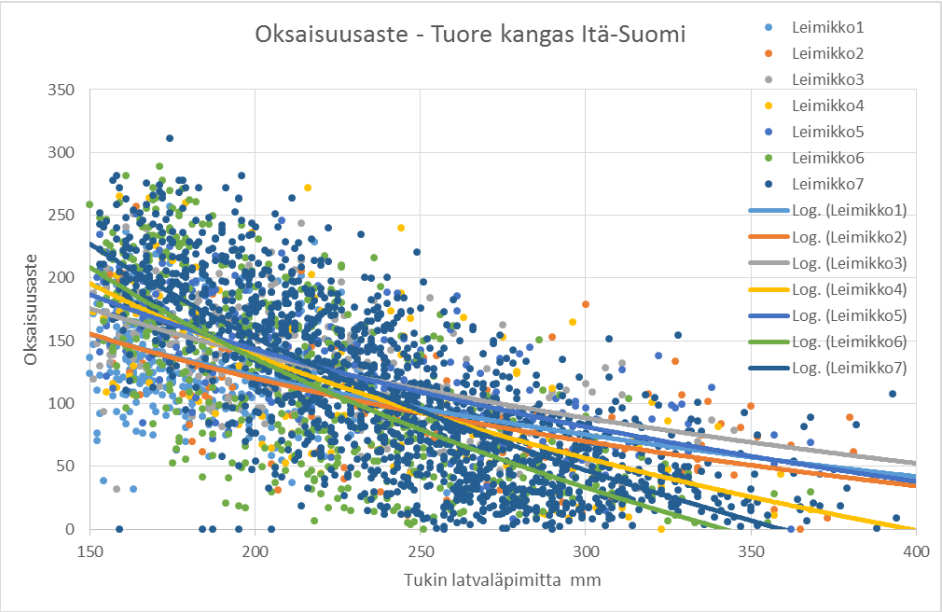


Kuva 38. Oksaisuusindeksi ja suurimman oksan koko latvatukeilla.

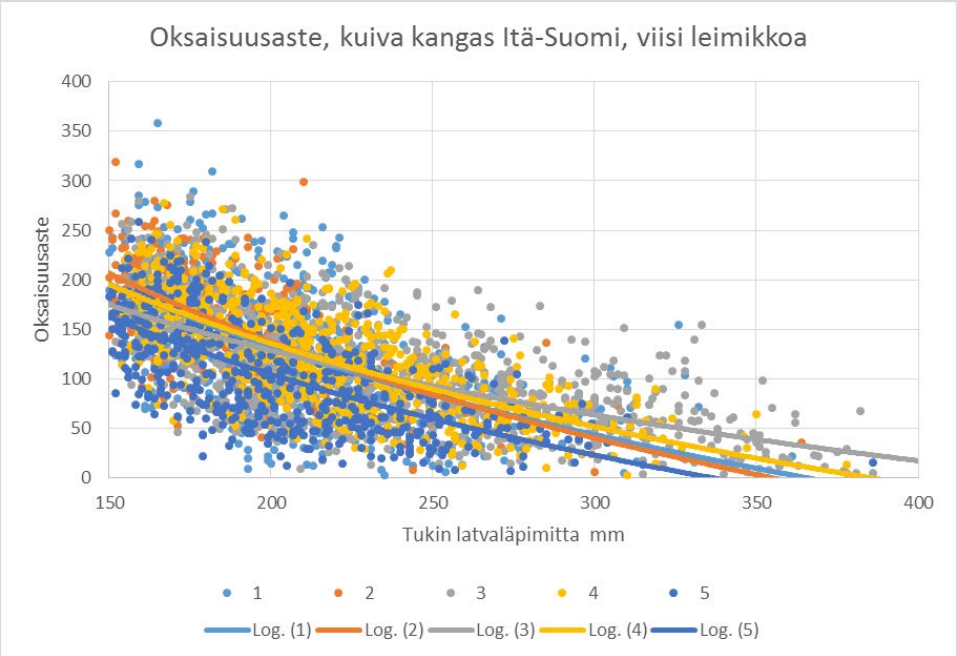
Oksaisuusasteita tarkasteltiin myös kasvupaikan mukaan Itä-Suomen leimikkoaineistolla, jossa mukana oli kaikkia kasvupaikkatyyppejä.



Kuva 39. Oksaisuusaste tukin latvaläpimitan funktiona lehtomaisen kasvupaikan leimikossa.

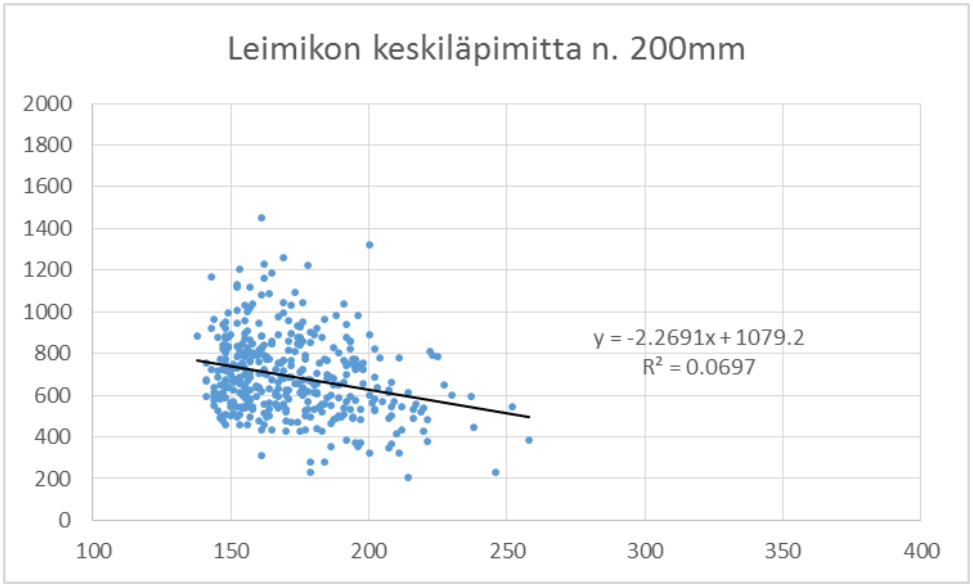


Kuva 40. Oksaisuusaste tukin latvaläpimitan funktiona seitsemässä leimikossa. Kasvupaikkana tuore kangas.

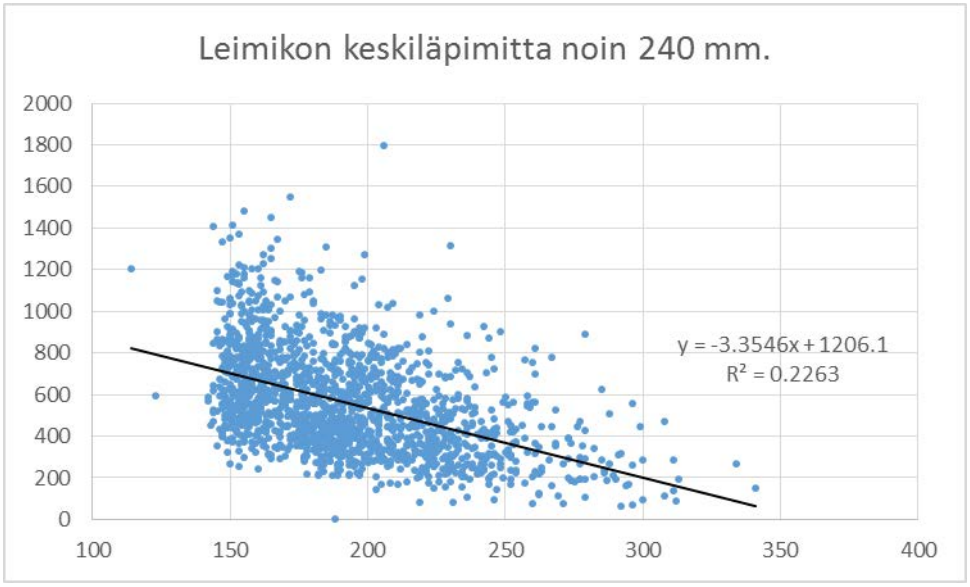


Kuva 41. Oksaisuusaste tukin latvaläpimitan funktiona viidessä leimikossa. Kasvupaikka karu kangas.

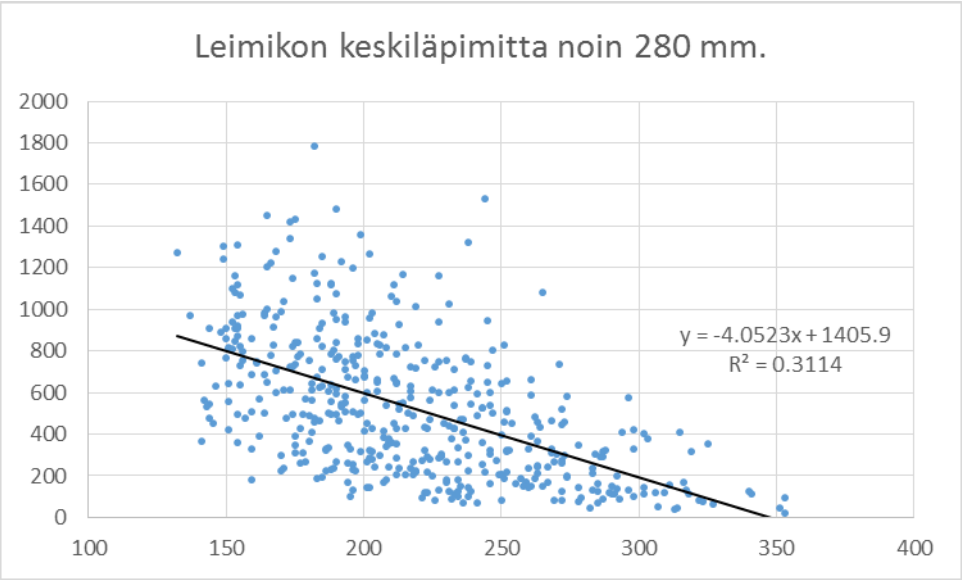
Kuvissa 42–44 esitetään oksavolyymit keskiläpimitaltaan erikokoisissa leimikoissa. Leimikoiden keskiläpimitat ovat noin 200 mm, 240 mm ja 280 mm. Kaikenkokoisista leimikoista voidaan havaita, että oksavolyymi pienenee tukin koon kasvaessa.



Kuva 42. Oksavolyymi leimikossa, jonka keskiläpimitta on noin 200 mm.



Kuva 43. Oksavolyymi leimikossa, jonka keskiläpimitta on noin 240 mm.



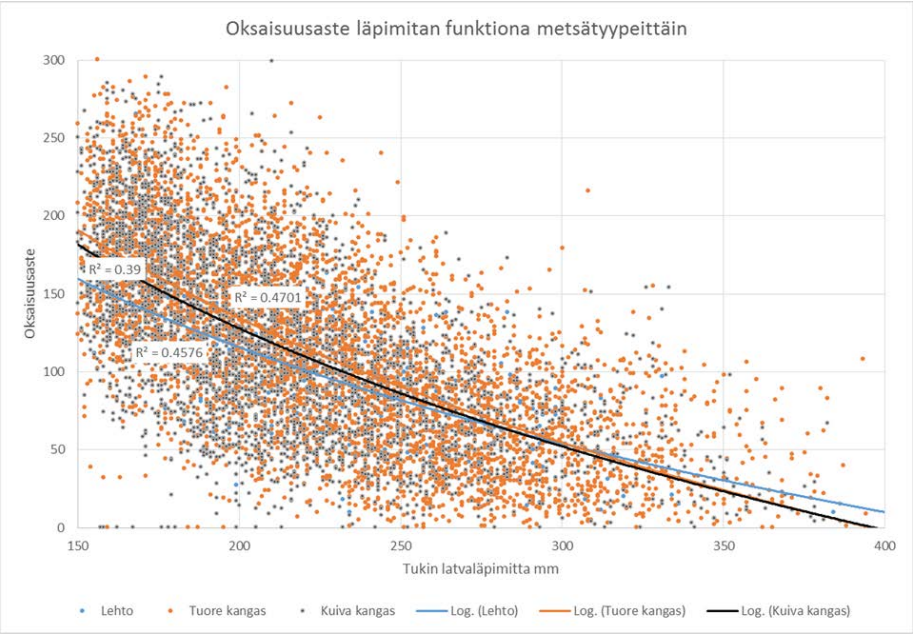
Kuva 44. Oksavolyymi leimikossa, jonka keskiläpimitta on noin 280 mm.

6.6 Oksaisuus ja leimikon metsätyyppi

Oksaisuuden riippuvuutta leimikon kasvupaikasta tarkasteltiin aineistossa laskemalla metsätyypeittäin tukin latvaläpimitan ja oksaisuusasteen välisiä korrelaatioita. Metsätyypit on jaettu neljään luokkaan:

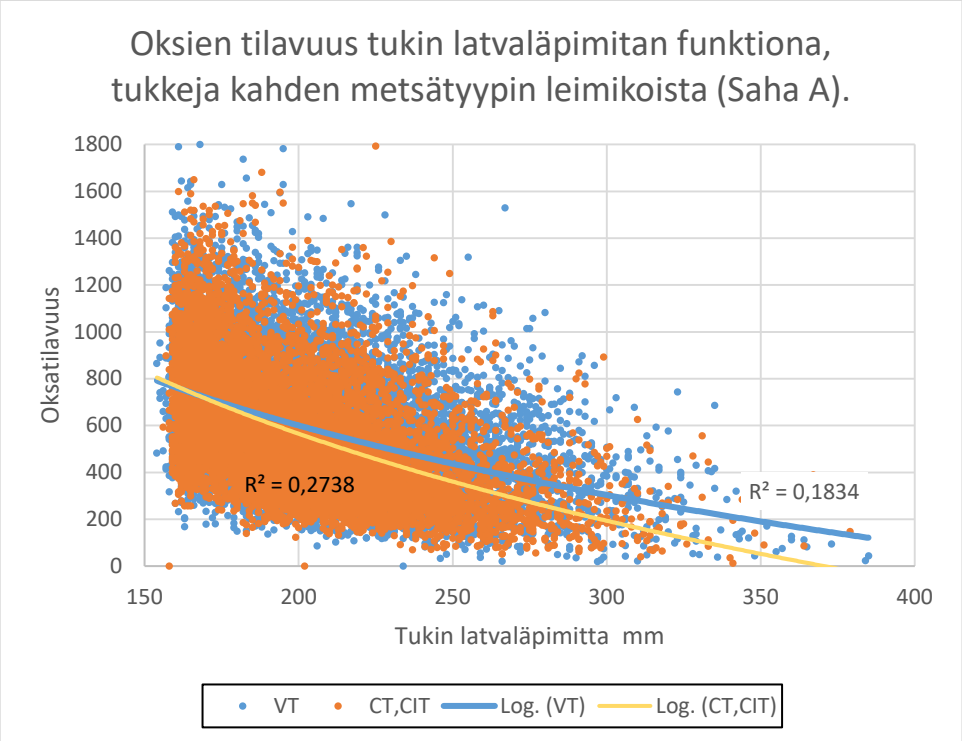
1) Lehto (OMaT) ja lehtomainen kangas (OMT)
2) Tuore kangas (MT)
3) Kuivahko kangas (VT)
4) Kuiva kangas (CT) tai karukkokangas (ClT).

Kuvassa 45 on kolmen eri metsätyypin leimikot (lehto/lehtomainen kangas, tuore kangas ja kuiva kangas). Kuvasta voidaan havaita, että tuoreen kankaan leimikoiden rungot ovat oksaisempia kuin kuivempien kasvupaikkojen rungot. Lehtomaisen kankaan leimikoita oli aineistossa vain yksi, joten sen perusteella johtopäätöksiä ei voi tehdä.



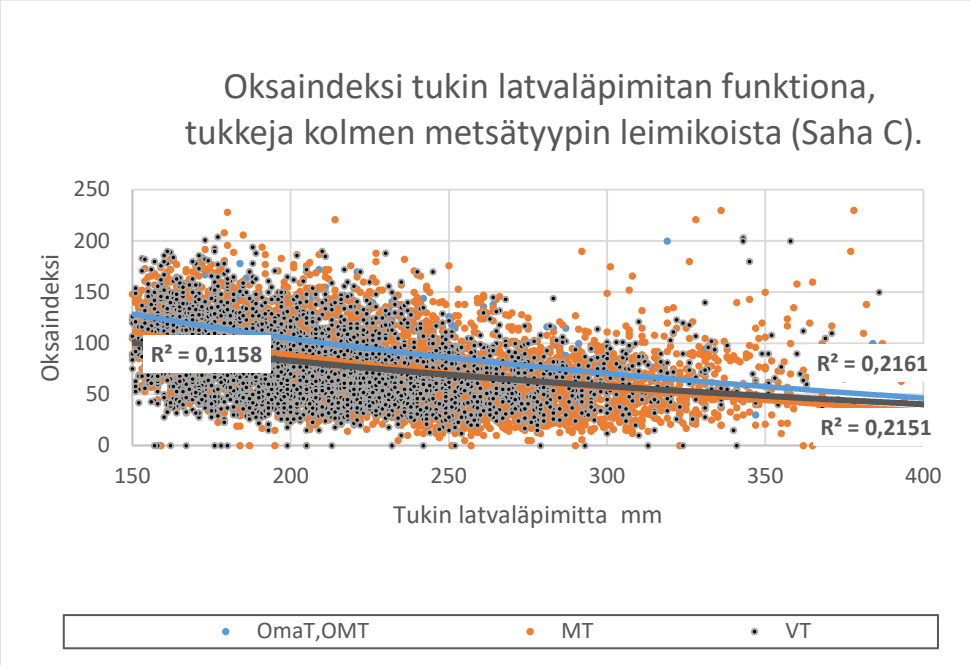
Kuva 45. Kasvupaikan rehevyyden vaikutus tukkien oksaisuuteen.

Kuvassa 46 esitetään oksatilavuus tukin latvaläpimitan funktiona sahan A kahden metsätyypin leimikoissa: kuivahko kangas (VT) sekä kuiva tai karukkokangas (CT, ClT). Pienien tukkien välillä ei oksatilavuudessa näyttäisi olevan juuri eroa. Suuremmissa puissa oksatilavuus näyttäisi olevan keskimäärin pienempi kuivalla ja karulla kankaalla kuin kuivahkolla kankaalla.



Kuva 46. Oksatilavuus sahan A kahden metsätyypin leimikossa.

Kuvassa 47 esitetään oksatilavuus tukin latvaläpimitan funktiona sahan C kolmen metsätyypin leimikossa: lehto tai lehtomainen kangas (OMaT–OMT), tuore kangas (MT) ja kuivahko kangas (VT). Lehtomaisen kasvupaikan oksaindeksi on suurempi kuin tuoreen tai kuivan kankaan kasvupaikkojen leimikoilla.



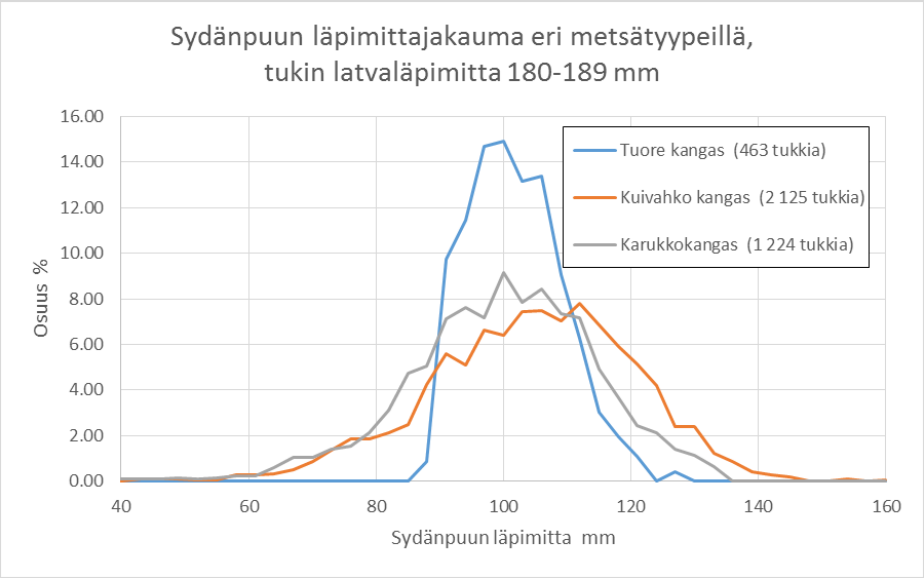
Kuva 47. Oksaindeksi sahan C kolmen metsätyypin leimikoissa.

6.7 Sydänpuun läpimittajakaumat

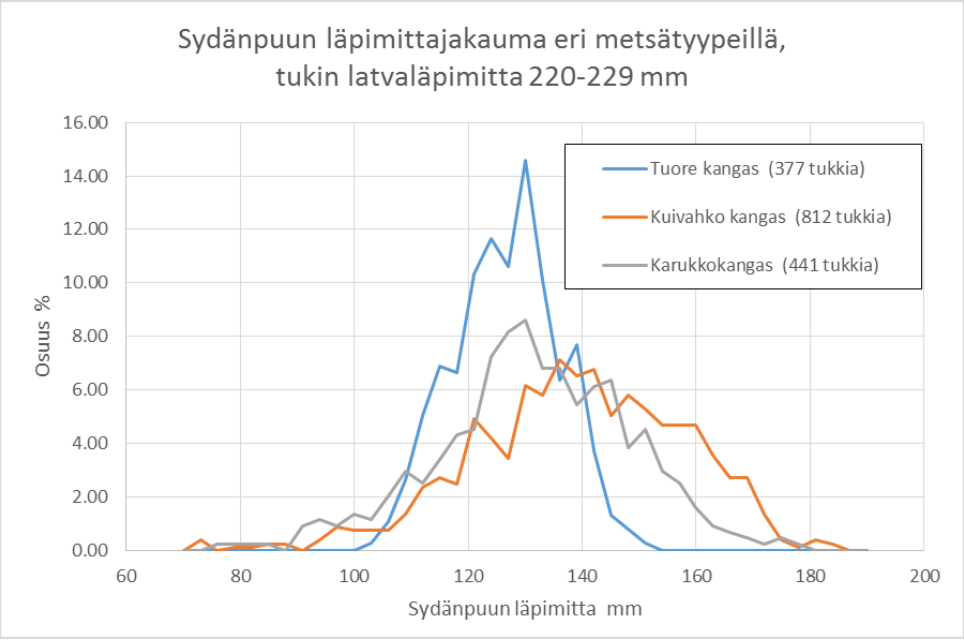
Sydänpuuosan (kuolleen solukon) määrä on keskeinen laatukriteeri tietyissä tuoteryhmissä, mm. ikkunanpuiteaihioissa. Sydänpuun määrä ja osuus voidaan tunnistaa tukista röntgenmittarilla tietyllä tarkkuudella. Eri kokoluokan puilla sydänpuuosuus vaihtelee. Tutkimuksessa selvitettiin läpimittaluokkien (180–189 mm), (220–229 mm) ja (260–269 mm) välisiä eroja eri kasvupaikkatyyppien leimikoissa.

Tulosten perusteella tukin latvaläpimitan ollessa 180–189 mm, sydänpuun läpimitan vaihteluväli on pienin 50 mm (85–135 mm) tuoreelta kankaalta hakatuilla mäntytukeilla. Kuivan ja karukkokankaan tukeilla vaihteluväli on 80 mm (55–135 mm) ja kuivahkon kankaan tukeilla 95 mm (55–150 mm) (kuva 48). Vastaavasti tukin latvaläpimitan ollessa 220–229 mm, sydänpuun läpimitan vaihteluväli on pienin 55 mm (100–155 mm) tuoreelta kankaalta hakatuilla mäntytukeilla. Kuivahkon kankaan tukeilla arvo on 115 mm (70–185 mm) ja kuivan tai karukkokankaan tukeilla 90 mm (90–180 mm) (kuva 49). Järeämmillä rungoilla (tukin latvaläpimitta 260–269 mm), sydänpuun läpimitan vaihteluväli on edelleen pienin 60 mm (125–185 mm) tuoreelta kankaalta hakatuilla mäntytukeilla. Kuivahkon kankaan tukeilla vaihteluväli on

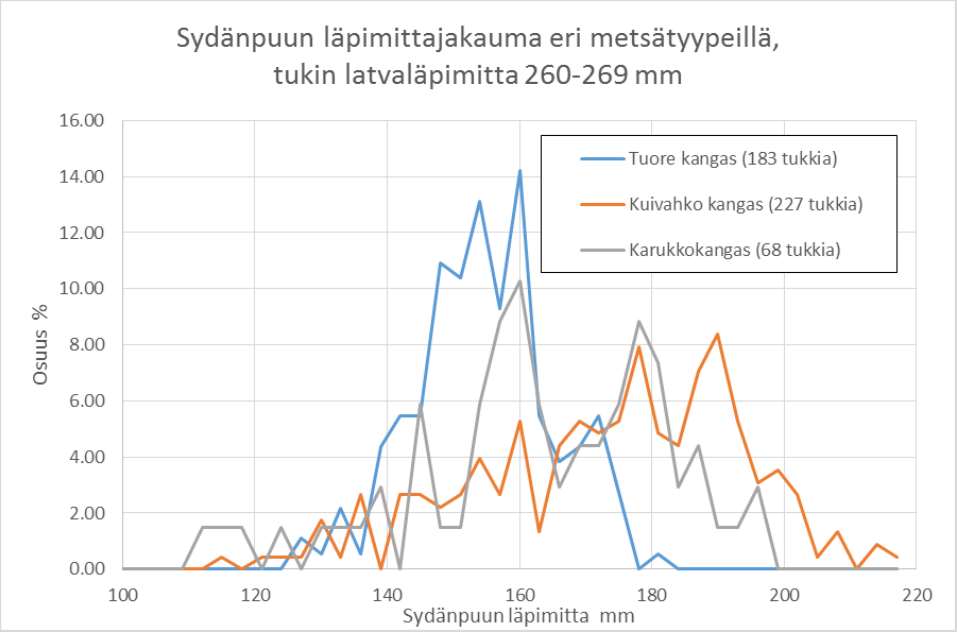
100 mm (115–215 mm) sekä kuivan tai karukkokankaan tukeilla 85 mm (115–200 mm) (kuva 50).



Kuva 48. Sydänpuun läpimittajakauma eri metsätyyppien tukeilla (latvaläpimitta 180–189 mm).



Kuva 49. Sydänpuun läpimittajakauma eri metsätyyppien tukeilla (latvaläpimitta 220–229 mm).



Kuva 50. Sydänpuun läpimittajakauma eri metsätyyppien tukeilla (latvaläpimitta 260–269 mm).

7 FOREST BIG DATA -SAHAUSSIMULAATTORI

Sahaussimulaattorin kehittäminen ja sen käyttö

TimberVision Oy on kehittänyt leimikoiden jalostusarvon laskentaan demonstraatiosimulaattorin. Kehitystyössä on otettu huomioon kolme keskeistä osa-aluetta:

1. leimikoista saatavat tukit
2. sahan prosessien tiedot
3. haluttujen tuotteiden ja tulosten ominaisuudet, arvot ja kertymät.

Simuloinnin lähtöarvoina ensimmäisenä ovat valitut, leimikosta toimitetut tukit. Tukeilla on ominaisuuksia, jotka otetaan huomioon simuloinnin myöhemmissä vaiheissa. Tällaisia ominaisuuksia ovat muun muassa tukin latvaläpimitta, pituus ja kartiokkuus. Nämä tiedot saadaan sahojen tukkimittareiden avulla. Ominaisuuksien perusteella leimikon tukit voidaan lajitella erilaisiin tukkiluokkiin.

Sahauksen simuloinnissa tukkiluokat sahataan halutuiksi tuotteiksi muun muassa tuotteiden hintaan perustuen siten, että tukeista saatava arvo on mahdollisimman suuri. Tukkiluokkaan käytetään erilaisia asetevaihtoehtoja ennalta määrättyjen mittareista saatavien luokittelutietojen perusteella. Simulaatiota varten jokaiselle leimikon tukille olisi löydettävä yksiselitteinen sahausasete, jolla tukki sahataan sahatavaratuotteiksi. Lisäksi jokaiselle tuotteelle tulee olla määritelty hinta. Näiden tietojen perusteella on kehitetty demonstraatiosimulaattori leimikon arvosaannon laskemiseksi. Simulaattorin laskennan tuloksen tarkkuuteen vaikuttaa suoraan annettujen lähtöarvojen tarkkuus.

Tutkimuksessa kehitettiin sahauksen simulointiohjelma, jolla voidaan laskea tukista tai tukkiluokasta määrätyllä asetteella saatavan sahatavaran määrä, laatu ja arvo sekä sivutuotteiden – hake ja puru – määrä ja arvot. Arvon laskemista varten tarvitaan erilaisten sahatavarakokojen ja laatujen hinnat samoin kuin sivutuotteiden hinnat.

Kun leimikko muodostuu rungoista, jotka katkotaan tukeiksi ja sahataan sahatavaraksi, voidaan simulaattorilla määrittää yksittäisen rungon, tukkiosuuden ja koko leimikon arvo. Sahauksen simulointiohjelma tuottaa tietoa leimikoiden valinnaksi, runkojen katkontaan tukeiksi, tukkien lajittelemiseksi tukkiluokkiin sekä edelleen sahausasetteen valintaan ja optimointiin.

Tutkimuksessa tullaan toteuttamaan simulaattorilla demonstraatioita, joiden lähtöarvotietoina käytetään hyväksi projektissa tuotettua tutkimuksen aineistoa.

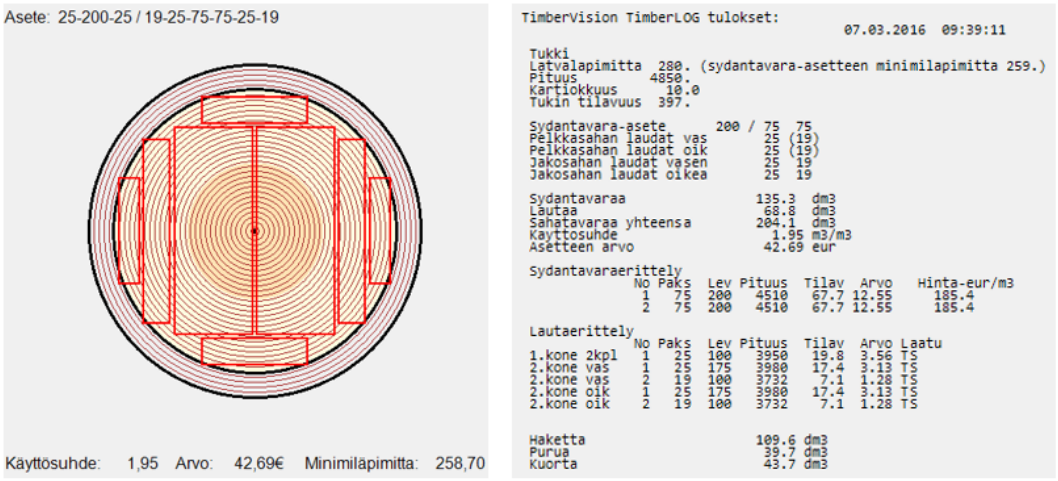
Tavoitteena on, että TimberVisionin sahaussimulaattori on osana laatutietovarastoa ja sitä voidaan käyttää yrityskohtaisissa analyyseissä esimerkiksi jalostusarvon laskennassa. Simulaattorilla voidaan luoda tyyppileimikoita erilaisille kasvupaikoille ja maaperätyypeille.

Simulointiohjelma vaatii lähtötiedoikseen:

- tukin kuvauksen (latvaläpimitta, pituus ja kartiokkuus)
- asetteen kuvauksen (exlog, paksuus, leveys, sivulautamallit)
- tuotteiden hinnat (sydäntavara, laudat, sivutuotteet)
- saantoprosentit sydäntavaroille ja eri lautalaaduille
- sahatavaradimensioiden tuoremitat.

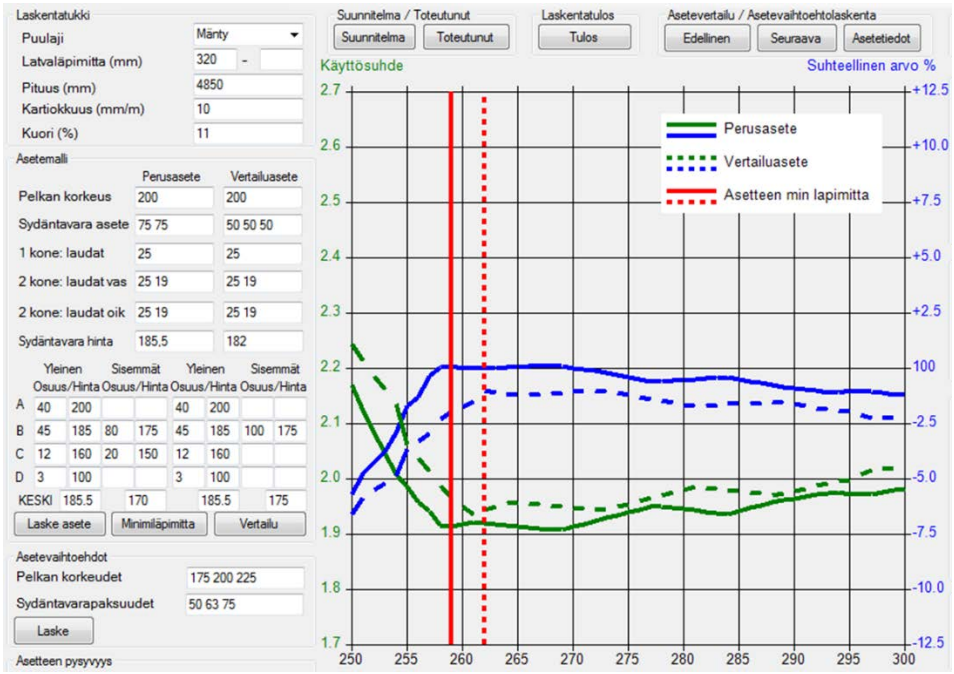
Simulointiohjelmalla voidaan:

- laskea asetteen sahaustulos yhdelle tukille tai tukkiluokalle (kuva 51)
- verrata kahden asetteen sahaustulosta
- antaa haluttuja sydäntavarapaksuuksia ja leveyksiä, joista ohjelma generoi asetteita ja laskee niille sahaustuloksen
- tutkia yhden tai kahden asetteen sahaustulosta (arvo ja käyttösuhde) tukin latvaläpimitan funktiona yhden millimetrin sahausluokissa (kuva 52).



*Kuva 51. Esimerkkisimulointi yhdelle tukille: asetteen 2*75*200 TimberLOG-simulaattorilla laskettu sahaustulos yhdelle tukille (latvaläpimitta 280 mm, pituus 4850 mm ja kartiokkuus 10 mm/m).*

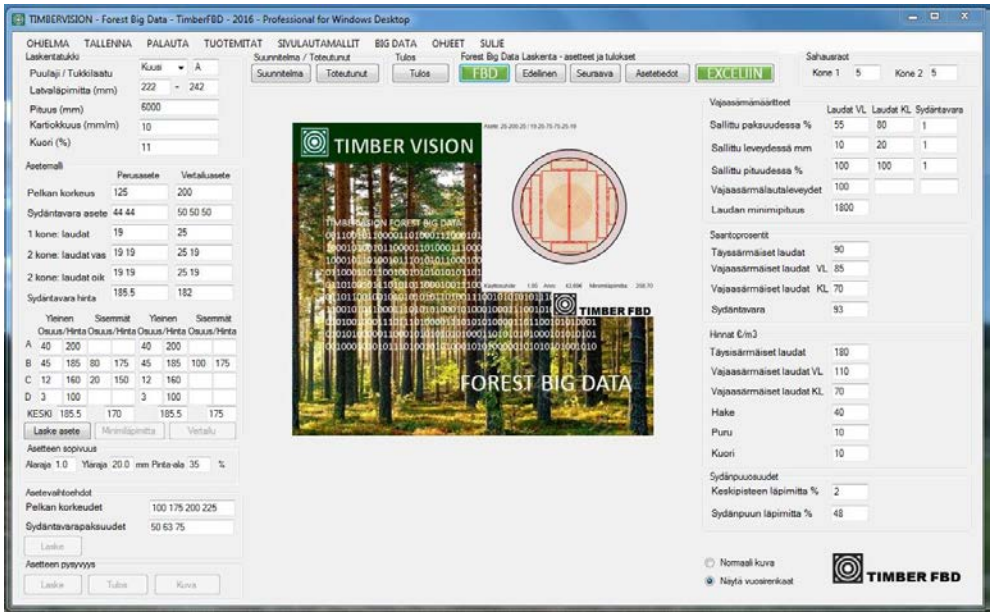
Kuvassa 52 esitetään esimerkkisimulointi asetteen pysyvyydestä. Asetteiden 2*75*200 (perusasete) ja 3*50*200 (vertailuasete) sahaustulos millimetrin luokissa tukkiläpimitan funktiona. Asetteen minimiläpimitta tarkoittaa läpimittaa, jolla sydäntavara tulee täysisärmäisenä koko tukin pituudelta. Käyttösuhde (tukki-m3/sahatavara-m3) kuvassa vihreällä viivalla ja arvo (€/tukki-m3) sinisellä viivalla.



Kuva 52. Esimerkkisimulointi TimberLOG-simulaattorilla: asetteen pysyvyys.

FBD-simulaattorin toiminnallinen kuvaus

Forest Big Data -simulaattorin lähtöarvoista osa annetaan samalla tavalla kuin TimberLOG-simulaatorissa (esim. tuoremitat, sahausraot, sivutuotteiden hinnat). Leimikoiden tukkitiedot ja sahan asetetiedot annetaan Excel-taulukoissa. Simulaattorin käyttöliittymä on esitetty kuvassa 53.



Kuva 53. FBD-simulaattorin käyttöliittymä.

Sahan asetetiedoissa (kuva 54) kuvataan asetteet tukkilaaduittain ja läpimittaluokittain. Asetteille voidaan antaa läpimitan tukkilaadun lisäksi tukin mitattujen ominaisuuksien mukaan viisi poimintatekijää mittausarvojen ala- ja ylärajoina. Tällaisina ominaisuuksina voivat olla tukin geometriaan perustuvat ominaisuudet (pituus, lenkous, soikeus jne.) ja/tai röntgenmittaukseen perustuvat ominaisuudet (oksaisuus, vuosirengasväli, sydänpuuosuus jne.).

Excel-asetetaulukossa annetaan myös sydäntavaran ja lautojen hinta- ja saantotiedot. Hintatiedot on määritettävä asetteen ennustettujen laatujakaumien mukaisesti. Erillisiä laatujakaumia ei asetteille anneta. Kussakin tukkilaatu-latvaläpimittaluokassa tulisi olla viimeisenä asete, jolla sahataan ne tukit jotka eivät tule sahatuiksi poimintaluokissa.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1	Tukki-	Tukkiluokka		Poiminta: mittausarvojen ala- ja ylärajat										A s e t e				Hinnat €/m3				Saantoprosentit %				Sydäntavara
2	laatu	ala	ylä	P1a	P1y	P2a	P2y	P3a	P3y	P4a	P4y	P5a	P5y	Pelkor	Syd-paks	1.lauda	2.lauda	Sydtav	TS-lau	VL-lau	KL-lau	Sydtav	TS-lau	VL-lau	KL-lau	Täysimittainen
3	C2	120	141	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	100	47 47			147	214	150	110	95	90	90	80	1
4	C2	142	147	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	112	31 31		25	187	214	150	110	95	90	90	80	1
5	C2	142	147	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	100	38 38		25	187	214	150	110	95	90	90	80	1
6	C1	148	154	-1	-1	43	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	125	32 32		25	191	214	150	110	95	90	90	80	
7	C1	148	154	-1	-1	43	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	100	50 50	16	16	189	214	150	110	95	90	90	80	
8	C2	148	154	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	112	34 34		25	187	214	150	110	95	90	90	80	1
9	C1	155	159	-1	-1	45	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	100	50 50	19	19	190	214	150	110	95	90	90	80	
10	C2	155	159	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	115	38 38		25	190	214	150	110	95	90	90	80	1
11	C1	160	168	-1	-1	45	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	100	50 50	19	19	190	214	150	110	95	90	90	80	
12	C2	160	168	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	100	50 50	19	19	189	214	150	110	95	90	90	80	1
13	A	169	180	70	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	100	38 38 38	25	19	200	214	150	110	95	90	90	80	
14	A	169	180	70	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	115	50 50	19	19	205	214	150	110	95	90	90	80	
15	C1	169	180	-1	-1	45	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	115	50 50	19	25	190	214	150	110	95	90	90	80	
16	C2	169	180	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	112	34 34 34	19	25	190	214	150	110	95	90	90	80	1
17	A	181	191	54	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	115	38 38 38	25	19	198	214	150	110	95	90	90	80	
18	A	181	191	54	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	125	50 50	19	25	199	214	150	110	95	90	90	80	
19	C1	181	191	-1	-1	50	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	135	50 50	19	25	190	214	150	110	95	90	90	80	
20	C2	181	191	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	150	32 32 32	16	25	190	214	150	110	95	90	90	80	1
21	C2	181	191	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	132	55 55	19	25	188	214	150	110	95	90	90	80	1
22	A	192	203	62	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	125	38 38 38	25	25	198	214	150	110	95	90	90	80	
23	C2	192	203	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	150	32 32 32	19	25	190	214	150	110	95	90	90	80	
24	A	204	215	58	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	150	50 50	19	19 19	202	214	150	110	95	90	90	80	
25	C1	204	215	-1	-1	-1	-1	140	-1	-1	-1	20	-1	123	46 46	25	25	191	214	150	110	95	90	90	80	
26	C1	204	215	-1	-1	-1	-1	140	-1	-1	-1	20	-1	118	53 53	25	25	191	214	150	110	95	90	90	80	
27	C2	204	215	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	112	34 34 34 34	25	19	190	214	150	110	95	90	90	80	1
28	C2	204	215	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	125	75 75	25	16	175	214	150	110	95	90	90	80	1
29	A	216	228	64	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	150	63 63	25	25	205	214	150	110	95	90	90	80	
30	C1	216	228	-1	-1	52	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	150	32 32 32 32	25	25	191	214	150	110	95	90	90	80	

Kuva 54. Leimikkolaskennan asetetiedot.

Leimikoiden tukkitiedot Excel-lähtöarvotaulukkoon saadaan tukkilajittelijan 3D-mittarin ja röntgenmittarin tukki-tukilta mittaustuloksista (kuva 55). Esimerkkitaulukossa on tukin laatu, geometria (latvaläpimitta, pituus, kartiokkuus) sekä viisi röntgenmittarin poiminta-arvoa. Ohjelman käyttäjän on järjestettävä tukkimittarin mittaustuloksista halutut poiminta-arvot taulukossa tukin kartiokkuus -sarakkeen oikealla puolella oleviin sarakkeisiin.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	LEIMIKKO	145115005							
2	KONV_LAATU_KDI	LATVALPM_ALTA_MM	TOD_PITUUS_CM	KARTIOKKUUS	USMALLI	TERVEOKSAMALLI	SYDANPUU_HALK	VUOSIRENGASVALI	KOMPOMALLI
3	145115005								
4	A	225	489	72	114	0	145	19	17
5	C1	197	413	86	103	0	112	21	16
6	C1	202	491	62	77	0	99	15	0
7	C1	185	457	68	86	0	86	14	0
8	C1	209	432	108	63	0	147	19	0
9	2	173	413	98	55	5	111	22	0
10	C1	208	488	109	105	0	115	15	0
11	C1	209	490	94	81	0	122	21	0
12	A	242	493	130	115	0	145	14	0
13	C2	193	414	85	0	31	134	25	0
14	C2	182	456	95	57	26	102	23	42
15	C2	187	414	106	25	22	105	22	0
16	C1	197	548	114	87	0	113	15	0
17	C2	182	378	98	44	0	84	24	0
18	C2	173	428	84	42	16	102	23	63
19	A	228	429	106	83	0	130	16	0
20	C2	148	545	85	7	37	89	20	0

Kuva 55. Esimerkki leimikon tukkitiedoista.

FBD-simulaattorin laskentatuloksissa esitetään kuhunkin tukkiluokkaan tulevien tukkien lukumäärä, tilavuus ja sahaustulos. Kuvan tuloksissa on esitetty tukkiluokittain sydäntavaran ja lautojen saanto (m^3), asetteen tukkien kokonaisarvo (€), käyttösuhde (m^3/ m^3), asetteen arvo (€/tukki- m^3), sahatavaran keskihinta (€/m^3) sekä luokan tukkien keskimääräinen tilavuus (dm^3). Viimeisellä rivillä esitetään leimikon kokonaisarvo. Lisäksi ilmoitetaan niiden tukkien lukumäärä, jotka eivät tulleet simuloiduksi missään luokassa (kuva 56). Taulukossa 8 esitetään 14 esimerkkileimikon arvolaskennan tuloksia. Mitä järeämpi puusto, sitä suurempi on leimikon suhteellinen arvo.

L E I M I K K O 145115005 19.04.2016 10:10:00

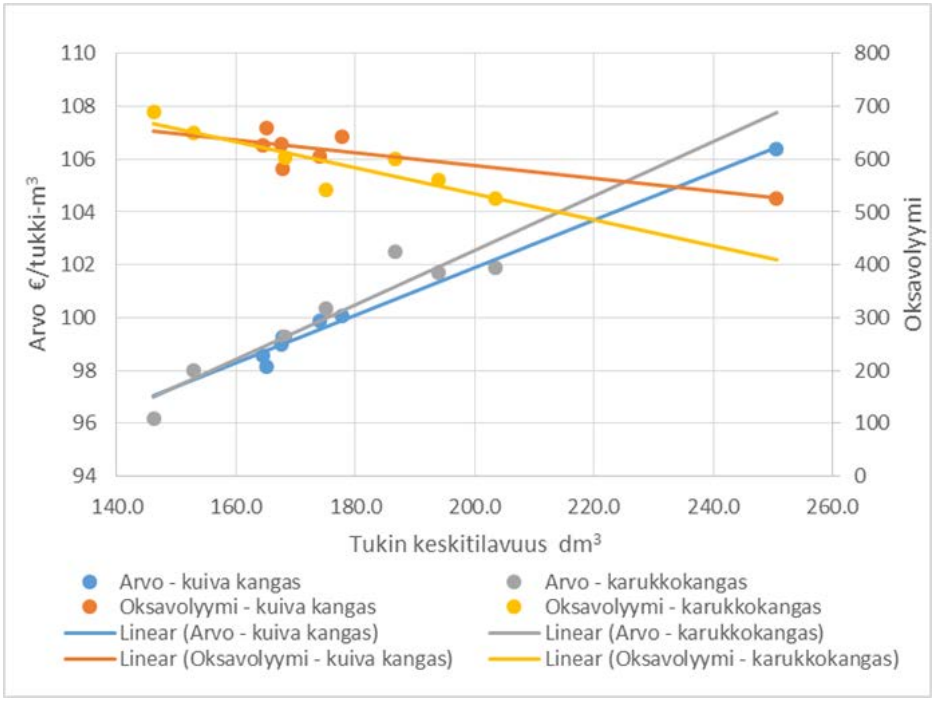
USMALLI ala	yla	TERVEOKSAM ala	yla	SYDANPUU_H ala	yla	VUOSIRENGA ala	yla	KOMPOMALL ala	yla	Tkla	Luokka	Tukit kpl	A	s	e	t	e	Sydtav m3	Lautaa m3	Sahatav m3	Arvo eur	K-S m3/m3	Arvo e/t-m3	Khinta e/s-m3	Tukki dm3
										C2	120-141	19	100	47	47	0	0	0.717	0.000	0.717	239.57	3.04	68.92	147.00	102
										C2	142-147	51	112	31	31	0	0	1.573	0.472	2.045	671.24	2.98	81.93	183.94	106
		43+								C1	148-154	32	125	32	32	0	0	1.112	0.435	1.547	466.26	2.74	88.53	190.21	117
										C2	148-154	21	112	34	34	0	0	0.748	0.155	0.904	294.30	2.96	82.17	183.48	113
		45+								C1	155-159	11	100	50	50	0	0	0.516	0.191	0.707	188.46	2.42	96.40	191.98	138
										C2	155-159	13	115	38	38	0	0	0.543	0.107	0.650	204.50	2.86	84.75	185.95	127
		45+								C1	160-168	15	100	50	50	0	0	0.666	0.279	0.944	254.86	2.45	96.81	194.84	137
										C2	160-168	24	100	50	50	0	0	1.045	0.383	1.428	368.60	2.35	95.70	185.50	124
70+										A	169-180	21	100	38	38	38	0	0.983	0.322	1.305	340.25	2.37	98.88	194.46	131
		45+								C1	169-180	11	115	50	50	0	0	0.568	0.222	0.790	217.55	2.50	93.52	189.82	160
										C2	169-180	19	112	34	34	34	0	0.900	0.166	1.066	305.07	2.60	90.81	188.59	129
54+										A	181-191	32	115	38	38	38	0	1.821	0.500	2.322	610.46	2.39	98.58	195.07	154
										C2	181-191	29	150	32	32	32	0	1.504	0.318	1.821	484.15	2.42	96.09	190.78	135
62+										A	192-203	40	125	38	38	38	0	2.602	0.956	3.557	904.11	2.31	102.38	198.68	182
										C2	192-203	39	150	32	32	32	0	2.342	0.855	3.197	802.76	2.28	100.89	193.37	166
58+										A	204-215	32	150	50	50	0	0	2.149	1.195	3.344	798.69	2.17	110.00	205.69	201
				140+				20+		C1	204-215	2	123	46	46	0	0	0.102	0.076	0.177	47.99	2.46	96.86	195.26	194
										C2	204-215	22	112	34	34	34	34	1.469	0.619	2.088	541.18	2.36	99.86	195.92	199
64+										A	216-228	40	150	63	63	0	0	3.229	1.314	4.544	1080.38	2.16	109.83	204.55	218
		52+								C1	216-228	3	150	32	32	32	32	0.267	0.102	0.369	93.98	2.32	100.10	193.75	253
										C2	216-228	7	123	62	62	0	0	0.469	0.261	0.730	188.74	2.35	101.63	199.59	218
48+										A	229-238	21	150	50	50	0	0	1.338	1.233	2.571	615.34	2.18	108.88	203.59	237
								20+		C2	229-238	3	175	63	63	0	0	0.280	0.127	0.407	93.65	2.09	109.65	198.84	252
										C2	229-238	6	150	75	75	0	0	0.606	0.208	0.814	180.96	2.02	112.48	199.19	244
43+										A	239-247	22	150	38	38	38	38	2.266	0.867	3.133	765.59	2.22	105.35	199.15	281
								20+		C2	239-247	1	175	63	63	0	0	0.096	0.045	0.141	31.36	2.02	112.39	198.98	253
										C2	239-247	1	150	75	75	0	0	0.091	0.035	0.126	28.29	2.04	112.03	199.60	228
43+										A	248-252	4	150	38	38	38	38	0.377	0.161	0.538	130.70	2.21	105.86	199.49	264
70+										A	253-266	11	200	50	50	0	0	1.021	0.835	1.855	440.28	2.16	111.98	208.89	323
				170+						C2	253-266	2	200	50	50	0	0	0.168	0.129	0.297	69.69	2.13	105.46	193.05	281
70+										A	267-287	11	225	50	50	0	0	1.101	1.014	2.115	488.41	2.10	114.14	208.87	359
70+										A	288-305	3	225	50	50	50	0	0.479	0.237	0.716	165.35	2.10	113.25	206.98	445
Yhteensa												568						33.148	13.818	46.965	11073.42	2.34	100.56	196.77	193
- ei asetetta											0														

Kuva 56. Leimikkosimuloinnin sahaustulos.

Taulukko 8. Esimerkkileimikoiden tuloksia.

Forest Big Data		12.05.2016										
Paikkakunta	Metsä-tyyppi	Leimikon tunnus	Tukit kpl	Sydtav m^3	Lautaa m^3	Sahatav m^3	Arvo €	Käyttösuhde m^3/m^3	Arvo €/t-m^3	Keskihinta €/s-m^3	Tukki dm^3	Oksa-volyymi
Karijoki	3	218115062	3632	190.92	91.38	282.30	60 298.51	2.16	99.01	180.90	167.7	628.9
Ilmajoki	4	145115005	568	33.34	17.49	50.83	11 198.13	2.17	101.69	187.29	193.9	560.1
Ilmajoki	3	145115029	2859	148.02	74.95	222.96	47 636.00	2.15	99.27	181.12	167.9	583.0
Ilmajoki	3	145115713	436	33.40	19.00	52.40	11 620.02	2.08	106.37	191.50	250.6	525.6
Ilmajoki	4	145115714	296	15.84	8.26	24.09	5 196.17	2.15	100.33	183.24	175.0	541.5
Kauhava	4	975115545	347	20.21	10.81	31.02	6 639.47	2.09	102.52	183.67	186.6	600.5
Kauhava	4	975115554	387	18.60	8.86	27.47	5 800.40	2.15	98.00	178.55	153.0	649.5
Ähtäri	3	989145009	4978	274.78	137.61	412.39	88 524.57	2.15	100.07	182.37	177.7	643.4
Virrat	3	936114300	1983	100.46	49.49	149.96	32 139.72	2.18	98.13	180.72	165.2	659.4
Virrat	4	936145006	6990	365.25	181.32	546.57	116 721.90	2.15	99.27	181.05	168.2	603.6
Virrat	3	936145009	2658	135.84	65.91	201.75	43 085.90	2.17	98.55	180.53	164.5	626.8
Kurikka	3	175115730	679	36.80	18.25	55.05	11 795.01	2.15	99.88	181.98	173.9	606.2
Ylöjärvi	4	932245029	401	18.70	8.23	26.93	5 635.37	2.18	96.17	175.95	146.1	690.4
Laihia	4	399115001	177	10.84	5.77	16.62	3 669.48	2.17	101.91	187.81	203.4	525.8

Kuvassa 57 esitetään simuloinnin tuloksena saadut leimikon arvot eri metsätyypeillä. Näissä tapauksissa leimikon arvo kasvaa suhteellisen oksavolyymin pienentyessä tai tukkikoon kasvaessa.



Kuva 57. Leimikon arvo metsätyypeittäin.

8 TUTKIMUKSEN JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMENPITEET

Tutkimusaineisto koostui 60 mäntyleimikosta Länsi-, Keski- ja Itä-Suomesta. Tukkeja mitattiin sahoilla 58 000 kappaletta. Leimikon perustietojen lisäksi aineisto sisälsi hakkuukoneen runkokohtaiset mittaustiedot sekä sahojen 3D- ja röntgenmittareiden mittausdatat.

Tutkimuksen perusteella voidaan tehdä seuraavia päätelmiä:

- Erilaisista leimikoista on helpommin löydettävissä eroja. Samanlaisista leimikoista on vaikea löytää eroavaisuuksia. Röntgenin avulla pystytään löytämään leimikoiden välisiä eroja.
- Puuston järeyden lisäksi oksaisuustekijät määrittävät laadun.
- Tulosten perusteella on mahdollista valita tyyppileimikoita määrittävät tekijät.
- Leimikoita on ollut big data -tutkimukseen pieni määrä.
- Riittävästi dataa analysoimalla pystytään leimikkovalintaa parantamaan.

Huomioitavaa

- Leimikon puustotunnusten ja kasvupaikkatekijöiden kuvaamiseen ja ennakkotiedon tarkkuuteen olisi tulevaisuudessa kiinnitettävä enemmän huomiota röntgendatan hyödyntämistä silmällä pitäen.
- Osittaisena ongelmana oli aineiston samankaltaisuus. Tutkimusta olisi helpottanut, jos leimikkovalinta olisi pystytty järjestämään siten, että leimikoiden välillä olisi ollut suuremmat vaihtelut.
- Leimikoiden kuvaus olisi tutkimuksessa voinut olla tarkempi tutkimuksen kannalta.
- Jatkotutkimuksissa kannattaa harkita mahdollisuutta käyttää laserkeilausdataa puuston latvuspiirteiden kuvaamiseen sekä maastolaserkeilaus- ja muuta kuvadataa puuston oksaisuutta kuvaavien tunnusten tarkennetussa kuvauksessa ja tulosten analysoinnissa.

Laatutietovaraston sisältö, laajuus ja sen käyttösovellukset on tarkoitus kuvata ja määritellä myöhemmin mahdollisesti aloitettavassa laajemmassa kehittämishankkeessa kun ensin on saatu käsitys sen hyödyntämispotentiaalista ja tietovaraston muodostamisen vaihtoehdoista. Keskeisenä aineistona olevien tukkiröntgenmittareiden tuottama sisällöltään erilainen data olisi kuvattava tietovaraston käsite- ja tietomallia, datan prosessointia sekä katkonnan ja sahauksen simulointeja varten tarkasti sekä standardisoitava tai muuten määritettävä tiedonsiirron rajapinnat mittausjärjestelmien ja tietovaraston välillä.

Laatutietovarasto voi olla hakkuun ja sahan vastaanottomittausten aineistoja yhdistävä tietokanta, joka voidaan muodostaa metsäyhtiön omista läh-

tökohdista ja aineistoista. Se voi myös olla teollisuuden toimijoiden yhteisessä käytössä oleva palvelu, johon dataa toimittavat useat eri osapuolet yhteisesti sovituin pelisäännöin. Tällöin alkuperäisistä mittausaineistoista otetaan mukaan ehkä vain keskeiset puun laatuominaisuuksia kuvaavat tunnukset ja liiketoimintaa sekä tuotantoa kuvaavat tunnukset jätetään pois.

Tutkimus osoitti selvästi, että yhdistämällä metsässä suoritetut mittaukset ja sahoilla olevat mittaukset voidaan tuottaa sellaista informaatiota, jota voidaan käyttää sahauksen liiketoiminnan asiakaslähtöisessä ohjauksessa. Tästä syystä hankkeen jatkamiselle on hyvin selkeät perusteet. Erityistä huomiota jatkoprojektissa tulisi kiinnittää leimikkovalintaan ja leimikoissa tehtäviin ennakkomittauksiin.

Röntgenmittarin mittaussuureiden välisiä korrelaatioita (saha A)

Röntgenmittarin mittaussuureet. Oksavolyymin ja muiden mittaussuureiden välinen korrelaatio.

Taulukko 1a. Oksavolyymin ja muiden mittaussuureiden välisiä riippuvuuksia.

Leimikko 145115005	Korrelaatio
OKSAVOLYYMI	1.000
LISAMALLI1	0.935
LISAMALLI3	-0.901
TERVEOKSAMALLI	0.874
USMALLI	-0.834
LUJUUSMALLI	-0.728
VUOSIRENGASVALI	0.522
MIN_LATVA_HALK	-0.480
LATVA_HALK1	-0.478
KA_LAPIMITTA	-0.477
LATVALPM_ALTA_MM	-0.476
OKSATON_ALUE_PROS	-0.474
LATVALPM_MM	-0.474
LATVA_HALK2	-0.472
SYDANPUU_HALK	-0.465
TEKN_TILAVUUS	-0.456
MOD_L	-0.442
TOD_L	-0.442
TOD_TIL_KUORETTA	-0.424
LENKOUS	-0.261
KOMPOMALLI	0.259
OKSARYHMAVALI	0.253
TIHEYS	-0.241
SYDANPUU_TIHEYS	-0.233
SOIKEUS	-0.215

Leimikko 145115029	Korrelaatio
OKSAVOLYYMI	1.000
LISAMALLI1	0.941
LISAMALLI3	-0.924
TERVEOKSAMALLI	0.871
USMALLI	-0.846
LUJUUSMALLI	-0.732
VUOSIRENGASVALI	0.576
SYDANPUU_HALK	-0.405
TIHEYS	-0.388
SYDANPUU_TIHEYS	-0.370
KOMPOMALLI	0.366
LATVA_HALK1	-0.351
MIN_LATVA_HALK	-0.349
KA_LAPIMITTA	-0.347
LATVA_HALK2	-0.341
LATVALPM_ALTA_MM	-0.340
MOD_L	-0.334
TOD_L	-0.334
LATVALPM_MM	-0.334
OKSARYHMAVALI	0.331
TEKN_TILAVUUS	-0.331
TOD_TIL_KUORETTA	-0.308
OKSATON_ALUE_PROS	-0.286
MUTKAISUUSARVO	0.193
LENKOUS	-0.134

Leimikko 145115713	Korrelaatio
OKSAVOLYYMI	1.000
LISAMALLI1	0.941
LISAMALLI3	-0.927
TERVEOKSAMALLI	0.874
USMALLI	-0.796
LUJUUSMALLI	-0.776
OKSATON_ALUE_PROS	-0.620
SYDANPUU_HALK	-0.618
LATVA_HALK2	-0.568
MIN_LATVA_HALK	-0.565
LATVALPM_MM	-0.565
KA_LAPIMITTA	-0.564
MOD_L	-0.562
TEKN_TILAVUUS	-0.561
TOD_L	-0.560
LATVALPM_ALTA_MM	-0.558
LATVA_HALK1	-0.557
VUOSIRENGASVALI	0.546
TOD_TIL_KUORETTA	-0.542
MUTKAISUUSARVO	0.368
SOIKEUS	-0.315
TIHEYS	-0.304
SYDANPUU_TIHEYS	-0.304
TOD_PITUUS_CM	-0.191
MOD_PITUUS_CM	-0.190

Taulukko 1b. Oksavolyymin ja muiden mittaussuureiden välisiä riippuvuuksia.

Leimikko 145115714	Korrelaatio
OKSAVOLYYMI	1.000
LISAMALLI1	0.957
LISAMALLI3	-0.941
TERVEOKSAMALLI	0.899
USMALLI	-0.861
LUJUUSMALLI	-0.787
VUOSIRENGASVALI	0.616
SYDANPUU_HALK	-0.552
LATVA_HALK1	-0.551
MIN_LATVA_HALK	-0.547
LATVALPM_ALTA_MM	-0.544
KA_LAPIMITTA	-0.543
LATVALPM_MM	-0.541
LATVA_HALK2	-0.528
TEKN_TILAVUUS	-0.493
TOD_L	-0.474
MOD_L	-0.474
SYDANPUU_TIHEYS	-0.467
TIHEYS	-0.466
TOD_TIL_KUORETTA	-0.435
OKSATON_ALUE_PROS	-0.392
KOMPOMALLI	0.325
OKSARYHMAVALI	0.274
LENKOUS	-0.198
SOIKEUS	-0.193

Leimikko 846115024	Korrelaatio
OKSAVOLYYMI	1.000
LISAMALLI1	0.963
LISAMALLI3	-0.951
TERVEOKSAMALLI	0.923
USMALLI	-0.882
LUJUUSMALLI	-0.823
LATVA_HALK1	-0.708
MIN_LATVA_HALK	-0.707
KA_LAPIMITTA	-0.706
LATVA_HALK2	-0.698
LATVALPM_MM	-0.690
LATVALPM_ALTA_MM	-0.689
SYDANPUU_HALK	-0.659
TEKN_TILAVUUS	-0.640
VUOSIRENGASVALI	0.638
OKSATON_ALUE_PROS	-0.636
MOD_L	-0.581
TOD_L	-0.580
TOD_TIL_KUORETTA	-0.567
TIHEYS	-0.363
SYDANPUU_TIHEYS	-0.344
SOIKEUS	-0.310
MUTKAISUUSARVO	0.267
KARTIOKKUUS	0.212
LENKOUS	-0.123

Leimikko 975115545	Korrelaatio
OKSAVOLYYMI	1.000
LISAMALLI1	0.958
LISAMALLI3	-0.943
TERVEOKSAMALLI	0.914
USMALLI	-0.856
LUJUUSMALLI	-0.810
VUOSIRENGASVALI	0.603
OKSATON_ALUE_PROS	-0.596
SYDANPUU_HALK	-0.588
LATVA_HALK1	-0.555
MIN_LATVA_HALK	-0.553
KA_LAPIMITTA	-0.548
LATVA_HALK2	-0.539
LATVALPM_MM	-0.534
LATVALPM_ALTA_MM	-0.533
TIHEYS	-0.527
SYDANPUU_TIHEYS	-0.527
TEKN_TILAVUUS	-0.494
MOD_L	-0.464
TOD_L	-0.460
TOD_TIL_KUORETTA	-0.445
SOIKEUS	-0.313
MUTKAISUUSARVO	0.278
LENKOUS	-0.144
KARTIOKKUUS	0.124

Taulukko 1c. Oksavolyymin ja muiden mittaussuureiden välisiä riippuvuuksia.

Leimikko 975115554	Korrelaatio
OKSAVOLYYMI	1.000
LISAMALLI1	0.941
LISAMALLI3	-0.909
USMALLI	-0.854
TERVEOKSAMALLI	0.821
LUJUUSMALLI	-0.699
SYDANPUU_HALK	-0.590
VUOSIRENGASVALI	0.513
LATVA_HALK1	-0.505
KA_LAPIMITTA	-0.504
MIN_LATVA_HALK	-0.502
LATVA_HALK2	-0.496
LATVALPM_MM	-0.471
LATVALPM_ALTA_MM	-0.469
TEKN_TILAVUUS	-0.422
MOD_L	-0.358
TOD_L	-0.355
OKSATON_ALUE_PROS	-0.342
TOD_TIL_KUORETTA	-0.337
OKSARYHMAVALI	0.294
TIHEYS	-0.289
SYDANPUU_TIHEYS	-0.268
MOD_PITUUS_CM	0.188
LENKOUS	-0.186
TOD_PITUUS_CM	0.184

Leimikko 989145009	Korrelaatio
OKSAVOLYYMI	1.000
LISAMALLI1	0.936
LISAMALLI3	-0.909
TERVEOKSAMALLI	0.860
USMALLI	-0.809
LUJUUSMALLI	-0.648
SYDANPUU_HALK	-0.473
OKSATON_ALUE_PROS	-0.465
MIN_LATVA_HALK	-0.458
LATVA_HALK1	-0.458
KA_LAPIMITTA	-0.456
LATVALPM_ALTA_MM	-0.451
LATVA_HALK2	-0.450
LATVALPM_MM	-0.448
VUOSIRENGASVALI	0.399
TEKN_TILAVUUS	-0.397
MOD_L	-0.354
TOD_L	-0.352
TOD_TIL_KUORETTA	-0.335
TIHEYS	-0.283
SYDANPUU_TIHEYS	-0.271
KARTIOKKUUS	0.257
SOIKEUS	-0.224
LENKOUS	-0.197
MUTKAISUUSARVO	0.186

Leimikko 936114300	Korrelaatio
OKSAVOLYYMI	1.000
LISAMALLI1	0.932
LISAMALLI3	-0.868
USMALLI	-0.792
TERVEOKSAMALLI	0.746
LUJUUSMALLI	-0.693
KA_LAPIMITTA	-0.476
MIN_LATVA_HALK	-0.475
LATVA_HALK1	-0.474
LATVA_HALK2	-0.473
LATVALPM_ALTA_MM	-0.472
LATVALPM_MM	-0.469
OKSATON_ALUE_PROS	-0.446
TEKN_TILAVUUS	-0.435
SYDANPUU_HALK	-0.422
VUOSIRENGASVALI	0.389
MOD_L	-0.373
TOD_L	-0.372
TOD_TIL_KUORETTA	-0.363
KARTIOKKUUS	0.238
SOIKEUS	-0.184
MUTKAISUUSARVO	0.150
LENKOUS	-0.139
TOD_PITUUS_CM	0.081
MOD_PITUUS_CM	0.078

Taulukko 1d. Oksavolyymin ja muiden mittaussuureiden välisiä riippuvuuksia.

Leimikko 936145006	Korrelaatio
OKSAVOLYYMI	1.000
LISAMALLI3	-0.920
LISAMALLI1	0.918
TERVEOKSAMALLI	0.866
USMALLI	-0.831
LUJUUSMALLI	-0.642
KA_LAPIMITTA	-0.586
MIN_LATVA_HALK	-0.586
LATVA_HALK1	-0.584
LATVA_HALK2	-0.581
LATVALPM_ALTA_MM	-0.571
LATVALPM_MM	-0.570
SYDANPUU_HALK	-0.560
TEKN_TILAVUUS	-0.517
MOD_L	-0.476
TOD_L	-0.474
TOD_TIL_KUORETTA	-0.467
Leimikko 936145007	**Korrelaatio**
OKSAVOLYYMI	-0.826
LISAMALLI1	-0.881
LISAMALLI3	-0.937
TERVEOKSAMALLI	-0.992
USMALLI	-1.047
LUJUUSMALLI	-1.103
KA_LAPIMITTA	-1.158

Leimikko 936145009	Korrelaatio
OKSAVOLYYMI	1.000
LISAMALLI1	0.937
LISAMALLI3	-0.894
USMALLI	-0.818
TERVEOKSAMALLI	0.813
LUJUUSMALLI	-0.708
VUOSIRENGASVALI	0.518
LATVA_HALK1	-0.498
MIN_LATVA_HALK	-0.495
KA_LAPIMITTA	-0.495
SYDANPUU_HALK	-0.494
LATVALPM_ALTA_MM	-0.492
LATVALPM_MM	-0.491
LATVA_HALK2	-0.487
TEKN_TILAVUUS	-0.460
MOD_L	-0.456
TOD_L	-0.455
TOD_TIL_KUORETTA	-0.436
TIHEYS	-0.344
SYDANPUU_TIHEYS	-0.341
SOIKEUS	-0.225
LENKOUS	-0.218
OKSARYHMAVALI	0.206
OKSATON_ALUE_PROS	-0.182
MUTKAISUUSARVO	0.111

Leimikko 175115730	Korrelaatio
OKSAVOLYYMI	1.000
LISAMALLI1	0.939
LISAMALLI3	-0.928
USMALLI	-0.859
LUJUUSMALLI	-0.797
TERVEOKSAMALLI	0.628
VUOSIRENGASVALI	0.569
SYDANPUU_HALK	-0.556
KA_LAPIMITTA	-0.552
MIN_LATVA_HALK	-0.551
LATVA_HALK1	-0.551
LATVA_HALK2	-0.549
LATVALPM_MM	-0.544
LATVALPM_ALTA_MM	-0.539
TEKN_TILAVUUS	-0.494
MOD_L	-0.474
TOD_L	-0.471
TOD_TIL_KUORETTA	-0.447
OKSATON_ALUE_PROS	-0.440
SYDANPUU_TIHEYS	-0.403
TIHEYS	-0.403
OKSARYHMAVALI	0.323
SOIKEUS	-0.307
LENKOUS	-0.249
MOD_PITUUS_CM	0.144

Taulukko 1e. Oksavolyymin ja muiden mittaussuureiden välisiä riippuvuuksia.

Leimikko 932245029	Korrelaatio
OKSAVOLYYMI	1.000
LISAMALLI1	0.882
LISAMALLI3	-0.771
TERVEOKSAMALLI	0.699
USMALLI	-0.665
LUJUUSMALLI	-0.550
OKSATON_ALUE_PROS	-0.477
LATVA_HALK2	-0.271
KA_LAPIMITTA	-0.266
MIN_LATVA_HALK	-0.265
LATVALPM_ALTA_MM	-0.264
LATVA_HALK1	-0.261
LATVALPM_MM	-0.260
TEKN_TILAVUUS	-0.255
SYDANPUU_HALK	-0.237
VUOSIRENGASVALI	0.233
MOD_L	-0.213
TOD_L	-0.212
TOD_TIL_KUORETTA	-0.211
OKSARYHMAVALI	-0.125
MUTKAISUUSARVO	0.122
KARTIOKKUUS	0.093
SOIKEUS	-0.080
MOD_PITUUS_CM	0.064
TOD_PITUUS_CM	0.062

Leimikko 399115001	Korrelaatio
LISAMALLI1	1.000
OKSAVOLYYMI	0.951
LISAMALLI3	-0.943
USMALLI	-0.931
LUJUUSMALLI	-0.855
TERVEOKSAMALLI	0.832
VUOSIRENGASVALI	0.636
LATVALPM_MM	-0.603
KA_LAPIMITTA	-0.601
LATVALPM_ALTA_MM	-0.601
LATVA_HALK2	-0.600
LATVA_HALK1	-0.597
MIN_LATVA_HALK	-0.595
SYDANPUU_HALK	-0.591
MOD_L	-0.524
TOD_L	-0.521
TEKN_TILAVUUS	-0.518
SYDANPUU_TIHEYS	-0.516
TIHEYS	-0.516
TOD_TIL_KUORETTA	-0.493
OKSATON_ALUE_PROS	-0.381
SOIKEUS	-0.337
TOD_PITUUS_CM	0.300
MOD_PITUUS_CM	0.297
KARTIOKKUUS	-0.254

Leimikko 218115062	Korrelaatio
OKSAVOLYYMI	1.000
LISAMALLI3	-0.921
LISAMALLI1	0.914
TERVEOKSAMALLI	0.877
USMALLI	-0.816
LUJUUSMALLI	-0.651
OKSATON_ALUE_PROS	-0.536
MIN_LATVA_HALK	-0.504
KA_LAPIMITTA	-0.502
LATVA_HALK2	-0.501
LATVA_HALK1	-0.498
LATVALPM_ALTA_MM	-0.482
LATVALPM_MM	-0.480
SYDANPUU_HALK	-0.477
TEKN_TILAVUUS	-0.409
TOD_TIL_KUORETTA	-0.343
MOD_L	-0.343
TOD_L	-0.343
VUOSIRENGASVALI	0.307
MOD_PITUUS_CM	0.224
TOD_PITUUS_CM	0.217
LENKOUS	-0.212
SOIKEUS	-0.207
KARTIOKKUUS	0.198
TIHEYS	-0.189

Röntgenmittarin mittaussuureiden välisiä korrelaatioita (saha B)

Taulukko 2. Oksaindeksin ja muiden mittaussuureiden välisiä riippuvuuksia.

Kaikki leimikot	Korrelaatio	Kaikki leimikot	Korrelaatio	Kaikki leimikot	Korrelaatio
KNOTTINESS_INDEX_BOTTOM_2	1.000	DIAMETER_MIN_WITH_BARK	-0.474	HEART_WOOD_MIN_DIAMETER	-0.397
KNOT_VOLUME_PER_TOT_VOLUME_2	0.988	COL_135	-0.473	CONICALITY_TOTAL	0.387
KNOT_INDEX_MOVING_AVERAGE	0.977	DIAMETER_MIN_WITHOUT_BARK_2	-0.472	MAXIMUM_KNOT_CLUSTER_END_POS	0.385
KNOT_INDEX_MOVING_AVERAGE_MAX	0.923	DIAMETER_MIN_WITHOUT_BARK	-0.471	COL_147	-0.382
KNOTTINESS_INDEX_BOTTOM	0.828	OKSAJAK2	-0.470	KNOT_VOLUME_2	0.381
KNOT_VOLUME_PER_TOT_VOLUME	0.816	DIAMETER_MAX_WITHOUT_BARK	-0.465	MAXIMUM_KNOT_CLUSTER_START_POS	0.377
SLIDING_KNOT_INDEX_AVG	0.807	COL_127	-0.465	HEART_WOOD_MAX_DIAMETER	-0.370
KNOTTINESS_INDEX_TOP_2	0.799	DIAMETER_MAX_WITHOUT_BARK_2	-0.462	MAXIMUM_KNOT_END_POS	0.365
KNOT_INDEX_PER_KNOT_COUNT_2	0.777	KNOTLESS_LENGTH	-0.453	MAXIMUM_KNOT_START_POS	0.363
SLIDING_KNOT_INDEX_MAX	0.720	COL_144	-0.447	COL_152	-0.347
OKSAJAK6	0.700	VOLUME_WITH_BARK	-0.444	KNOT_CLUSTER_DIST_AVG_2	-0.343
KNOTTINESS_INDEX_TOP	0.657	VOLUME_WITH_BARK_2	-0.444	COREWOOD_MAX_DIAM	-0.341
KNOT_INDEX_PER_KNOT_COUNT	0.657	COL_128	-0.443	COL_126	-0.338
LOG_POSITION_2	0.643	KNOT_CLUSTER_DIST_MAX_2	-0.442	COL_148	-0.338
KNOT_CLUSTER_QUAL_AVG	0.588	KNOT_VOLUME	0.437	DENSITY_HEART	-0.333
KNOTLESS_LENGTH_2	-0.522	COL_145	-0.435	MAXIMUM_KNOT_SIZE	0.333
CLEAR_SAPWOOD_LENGTH	-0.486	OKSAJAK5	0.435	KNOT_CLUSTER_DIST_DEV_2	-0.331
KNOT_CLUSTER_QUAL_DEV	-0.486	VOLUME_WITHOUT_BARK	-0.430	OKSAJAK1	-0.325
QUALITY_WORST_CLUST	0.482	VOLUME_WITHOUT_BARK_2	-0.429	KNOT_CLUSTER_DIST_DEV	-0.310
COL_143	-0.480	CONICALITY_AT_BOTTOM	-0.427	DENSITY_SAP	-0.310
KNOT_CLUSTER_LENGTH_AVG_2	0.480	CONICALITY_BOTTOM	-0.425	KNOT_CLUSTER_DIST_AVG	-0.305
DIAMETER_MAX_WITH_BARK	-0.479	COL_146	-0.421	MAXIMUM_KNOT_CLUSTER_KNOT_SIZE	0.303
COL_137	-0.476	KNOT_CLUSTER_LENGTH_AVG	0.419	OKSAJAK4	-0.299
DIAMETER_MAX_WITH_BARK_2	-0.476	KNOT_CLUSTER_DIST_MAX	-0.411	COREWOOD_MIN_DIAM	-0.297
DIAMETER_MIN_WITH_BARK_2	-0.475	COL_139	-0.399	OKSAJAK3	-0.270

Röntgenmittarin mittaussuureiden välisiä korrelaatioita (saha C)

Taulukko 3. Oksaisuusasteen ja muiden mittaussuureiden välisiä korrelaatioita.

Kaikki leimikot							
150-999 11877 kpl Tukin tilavuus 218.		150-179 2861 kpl Tukin tilavuus 166.		180-229 4913 kpl Tukin tilavuus 203.		230-999 4103 kpl Tukin tilavuus 270.	
inRayOksaisuusAste	1.000	inRayOksaisuusAste	1.000	inRayOksaisuusAste	1.000	inRayOksaisuusAste	1.000
inRayOksatontaPuutaP	-0.941	inRayOksatontaPuutaP	-0.881	inRayOksatontaPuutaP	-0.914	inRayOksatontaPuutaP	-0.912
inRayPituus_1_Tukist	-0.720	inRayPituus_1_Tukist	-0.640	inRaySuurimmanOksaRy	0.656	VastaanOttoLaatu	0.763
inRaySuurimmanOksaRy	0.671	inRaySuurimmanOksaRy	0.590	inRayOksaisuusInd	0.593	inRayOksaisuusInd	0.720
inRayOksaisuusInd	0.641	inRayOksaRyhmiaPerM	0.433	inRayPituus_1_Tukist	-0.568	inRaySuurimmanOksaRy	0.688
LatvaLapimittaKuorel	-0.634	inRayOksaisuusInd	0.381	inRaySydanPuunProsOs	0.394	inRayOksaRyhmiaPerM	0.634
inRayOksaRyhmiaPerM	0.600	inRayOksaRyhmienLkm	0.372	inRayOksaRyhmiaPerM	0.380	inRayOksaRyhmienLkm	0.622
TilavuusKuorellinen	-0.591	inRayKeskimOksaValiM	-0.349	inRayOksaRyhmienLkm	0.353	inRayPituus_1_Tukist	-0.552
inRayOksaRyhmienLkm	0.576	VastaanOttoLaatu	-0.349	inRayAsemaRungossa	0.309	inRayVuosiLustonPaks	-0.409
inRaySydanPuunMinimi	-0.431	inRayAsemaRungossa	0.226	Kartiokkuus	0.256	LatvaLapimittaKuorel	-0.372
VastaanOttoLaatu	0.393	inRaySydanPuunProsOs	0.192	inRayKeskimOksaValiM	-0.256	TilavuusKuorellinen	-0.366
inRayAsemaRungossa	0.361	inRaySydanPuunMinimi	0.169	inRaySydanPuunMinimi	0.254	inRayKeskimOksaValiM	-0.324
inRayKeskimOksaValiM	-0.360	Kartiokkuus	0.167	LatvaLapimittaKuorel	-0.250	inRayAsemaRungossa	0.289
Lenkous	-0.203	LatvaLapimittaKuorel	-0.122	VastaanOttoLaatu	0.205	inRaySydanPuunProsOs	0.268
inRayVuosiLustonPaks	-0.160	MittariPituus	-0.121	TilavuusKuorellinen	-0.189	Lenkous	-0.131
Kartiokkuus	0.152	TilavuusKuorellinen	-0.081	Lenkous	-0.169	inRaySydanPuunMinimi	-0.110
Soikeus	0.065	inRayVuosiLustonPaks	-0.080	inRayVuosiLustonPaks	-0.087	Soikeus	0.073
MittariPituus	0.003	Soikeus	0.041	Soikeus	0.087	MittariPituus	0.022
inRaySydanPuunProsOs	0.002	Lenkous	-0.004	MittariPituus	-0.041	Kartiokkuus	-0.011

Tutkimusaineistossa hakkuukoneen mittausdatasta (stm-tiedoista) lasketut korjuukohteen hakattua puustoa kuvaavat tunnukset

- hakkuukertymä puutavaralajeittain
    - = päätehakkuilla puuston kokonaistilavuus
    - hehtaarikohtainen hakkuukertymä kuvaa puuston määrää
- korjattujen runkojen lukumäärä yhteensä ja per ha
    - kuvaa kohteen puuston tiheyttä
- mäntytukkirunkojen lukumäärä kohteella ja per ha
- mäntytukkirunkojen keskimääräinen rinnankorkeusläpimitta ja sen jakauma
    - mäntytukkirunkojen lukumäärä 1 cm:n läpimittaluokittain
- puuston pohjapinta-ala (m^2/ha)
    - koko puusto ja puulajeittain
- mäntytukkirunkojen käyttöosan keskipituus
- mäntytukkirunkojen tukkiosan keskipituus
- mäntytukkirunkojen kokonaispituuden keskiarvo
    - rungon käyttöosan pituuteen lisätään laskennallisesti hukkalatvan pituus
    - sama kohteen koko puustolle, josta voidaan laskea yleisesti käytetyt tunnukset puuston keski- ja valtapituus
- mäntytukkirunkojen keskitilavuus (keskijäreys)
    - käyttöosan tilavuus = rungon pölkkyjen tilavuuksien summa
- männyn tukkiprosentti
    - männyn tukkipuutavaralajien osuus männyn koko hakkuukertymästä, %
- mäntytukkirunkojen tukkiprosentti
    - rungon tukkipölkkyjen tilavuuden osuus käyttöosan tilavuudesta
- mäntytukkirunkojen tukkiprosentti rinnankorkeusläpimittaluokittain
- mäntytukkirunkojen puutavaralajijakauma
    - mäntytukkirungoista katkottujen puutavaralajien tilavuudet
- mäntytukkien lukumäärä / tukkirunko keskimäärin
    - laaduittain ja kaikki laadut yhteensä
- mäntytukkien keskipituus yhteensä sekä tukkijärjestysnumeroittain ja pituusjakauma
    - kaikki mäntytukit ja laaduittain
- mäntytukkien keskilatvaläpimitta tukkijärjestysnumeroittain ja latvaläpimittajakauma
    - kaikki mäntytukit ja laaduittain

- niiden runkojen osuus mäntytukkirungoista, joiden tukkiosasta on katkottu kuitupuupölkkyjä tai leikkoja
- tukkiosasta katkottujen kuitupuupölkkyjen lukumäärä keskimäärin / mäntytukkirunko
- tukkiosasta katkottujen kuitupuupölkkyjen yhteispituus keskimäärin / mäntytukkirunko
- tukkiosasta katkotun yksittäisen kuitupuupölkyn pituus keskimäärin / mäntytukkirunko (rungot, joissa kuituleikkoja on tehty)
- tukkiosasta katkottujen leikkojen lukumäärä keskimäärin / mäntytukkirunko
- tukkiosasta katkottujen leikkojen yhteispituus keskimäärin / mäntytukkirunko
- tukkiosasta katkotun yksittäisen leikon pituus keskimäärin / mäntytukkirunko
- rungon läpimittaprofiili
    - läpimitat (mm) 10 cm välein kannolta käyttöosan päättymisläpimittaan