

Metlan työraportteja **173**

<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp173.htm>

ISBN 978-951-40-2255-5 (PDF)

ISSN 1795-150X

Puuta koskemattoman mittauksen mahdollisuudet ja menetelmiä raakapuun laadun määrittämiseen

Erkki Pesonen, Harri Mäkinen ja Erkki Verkasalo

Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute -sarjassa julkaistaan tutkimusten ennakkotuloksia ja ennakkotulosten luonteisia selvityksiä. Sarjassa voidaan julkaista myös esitelmiä ja kokouskoosteita yms.

Sarjassa ei käytetä tieteellistä tarkastusmenettelyä.

Sarjan julkaisut ovat saatavissa pdf-muodossa sarjan Internet-sivuilta.

<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/>
ISSN 1795-150X

Toimitus

PL 18
01301 Vantaa
puh. 010 2111
faksi 010 211 2101
sähköposti julkaisutoimitus@metla.fi

Julkaisija

Metsäntutkimuslaitos
PL 18
01301 Vantaa
puh. 010 2111
faksi 010 211 2101
sähköposti info@metla.fi
<http://www.metla.fi/>

Tekijät Pesonen, Erkki, Mäkinen, Harri & Verkasalo, Erkki			
Nimeke Puuta koskemattoman mittauksen mahdollisuudet ja menetelmiä raakapuun laadun määrittämiseen			
Vuosi 2010	Sivumäärä 42 s. + liitteet 4 kpl.	ISBN 978-951-40-2255-5 (PDF)	ISSN 1795-150X
Yksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet Etelä-Suomen alueyksikkö / 3453 Puuraaka-aine eri tavoin hoidetuissa metsiköissä, 7147 Puun laadun mallintaminen kuvaan perustuvista mittauksista; Itä-Suomen alueyksikkö / 3503 Puuraaka-aineen mittaus, laadutus ja arvonnäyttö puukaupan ja puunhankinnan tukena			
Hyväksynyt Jukka Malinen, varttunut tutkija, 11.10.2010			
Tiivistelmä Raakapuun laadun määrittäminen on kehitettävä entistä kustannustehokkaammaksi, tarkemmaksi ja nopeammaksi, arvoketjuille lisähyötyjä tuottavaksi ja nykyaikaiseen informaation hankintaan, hallintaan ja käyttöön soveltuvaksi. Tämä edellyttää uusien mittausten menetelmien tutkimista ja soveltamista ja puun jalostusarvoon vaikuttavien ominaisuuksien ja niiden hallintamahdollisuuksien ymmärtämistä. Aihepiiriin kehitysalustaksi on toteutettu Metsäteho Oy:n johdolla PUULA-hanke (2003-2005). Tässä raportissa esitellään Metlan osahankkeessa ja aihepiiriin myöhemmissä jatkotoissa tuotetut päätulokset. Aluksi määriteltiin tärkeimmät laatutekijät puuta koskemattomien mittausten menetelmien kannalta sahoilla ja vaneri- ja puumassatehtailla tehdyin täsmähaastatteluin, sekä lopputuotekohtaisen merkityksen että käytännön mitattavuuden ja realistisen mittaustarkkuuden näkökulmista. Aistivaraisen laadutuksen automatisointia tutkittiin sumean logiikan pohjalta eräiltä sahoilta ja sellutehtailta kerätyllä aineistolla. Sahan laadutusprosessin tarkentamiseen kehitettiin laskentamalli, johon kuuluu sahausolosuhteiden ja tukkien laatuominaisuuksien mukainen, tällä sovelluksella kylläkin melko työläs mallin opetusjakso. Lisäksi selvitettiin olemassa olevien puun laatua kuvaavien mallien käyttökelpoisuutta kuvatulkinnaissa. Laboratoriotutkimuksissa kehitettiin laserdiffraktioon perustuva, tarkkuudeltaan optisen mikroskopian tasoinen mutta sitä nopeampi menetelmä kuusen kuitujen dimensioiden mittaamiseen. Teollisuusympäristössä soveltamiseen laitteistolta vaaditaan kompaktin pakkaamisen ja luotettavan näytteenottomekanismien kehittämistä. Kuusen tyvilahoalueen muodon ja koon ennustamiseen kehitettiin laskentamenetelmä ja ohjelmisto fotoluminesenssimittauksiin perustuvan aineiston pohjalta. Käytännön soveltaminen edellyttää lahon puuaineen aiheuttamaa värinmuutosta eri nousukorkeuksilla rungossa kuvaavan eksponenttifunktion generointia ja lisätutkimuksia lahon nousukorkeuden ennustamisesta. Mikroaallot soveltuivat tukin katkaisupäiden kosteusjakaumien mittaamiseen; erotuskyky tukin pinnasta oli emissiomittauksissa 2 %-yksikköä ja absorptiomittauksissa 5 %-yksikköä. Tukin ulko-oksien poikkileikkauksen pinta-alan mittaustarkkuus oli mikroaalloilla vajaat 0,5 cm ² . Jatkokehitystyössä tulisi panostaa erotuskyvyn parantamiseen ja puuaineen tiheyserojen määrittämiseen. Ultraäänimittauksella pystyttiin erottamaan tukin poikkileikkauksesta kuorettomat ja kuorelliset alueet, mutta kuoren paksuudesta ei saatu vakuuttavaa tulosta. Jatkokehitystyö on perusteltua menetelmän edullisuuden ja kenttäkelpoisuuden johdosta. Tavoitteena tulee olla kartoittava ultraäänitaajuuksien vasteiden voimakkuus puun erilaisista kuorikerroksista ja määrittellä mittauksiin optimaalinen taajuus ja sopivat tehokaistat.			
Asiasanat puutavaran mittaus, laadutus, lajittelu, mallit, puun laatu, sumea logiikka, vuosilustot, trakeidi, kosteus, tiheys, kuori, laho, kuvamittaus, laserdiffraktio, fotoluminesenssi, mikroaaltospektroskopia, ultraääni			
Julkaisun verkko-osoite http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp173.htm			
Tämä julkaisu korvaa julkaisun			
Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla			
Yhteydenotot Erkki Pesonen, Metla, Etelä-Suomen alueyksikkö, PL 18, 01301 Vantaa. Erkki.Pesonen@metla.fi			
Muita tietoja			

Sisällys

Alkusanat	5
1 Tausta.....	6
1.1 Raakapuun laadunmääritys.....	6
1.2 Laadutusprosessi.....	7
1.3 Laadun mittauksen kehittämistarpeita	10
1.4 Laadun mittaustutkimusten kehityssuuntia	12
2 PUULA-hanke.....	13
2.1 Organisointi	13
2.2 Tavoitteet	13
3 Kokeelliset tutkimukset: menetelmät, laitteistot ja tulokset	15
3.1 Lähtökohtia	15
3.2 Laserdiffraktio	15
3.3 Fotoluminesenssi	18
3.4 Mikroaaltomenetelmät.....	21
3.5 Akustinen menetelmä	22
3.6 Lahoalueen määrittäminen tukin poikkileikkauspinnalta.....	23
3.7 Aistivaraisen laadutuksen muuntaminen laitepohjaiseksi	25
4 Puun laatutekijät ja niiden mittausmahdollisuudet	25
4.1 Laatutekijät	25
4.2 Mittausmahdollisuudet	28
5 Puun laatutekijöiden mallintaminen.....	30
5.1 Laatua kuvaavia malleja	30
5.2 Mallien luotettavuus	31
6 Johtopäätökset ja kehitysnäkymät	32
6.1 Mittausmenetelmien käyttömahdollisuudet.....	32
6.2 Kustannustehokkuus.....	35
7 Tulevaisuuden visioita.....	35
8 PUULA- hankkeen julkaisut ja tiedonsiirtomateriaalit –	
Metlan osahanke	37
8.1 Julkaisut.....	37
8.2 Tiedonsiirtomateriaalit.....	38
Lähdekirjallisuus	39
Liitteet (4 kappaletta).....	42

Alkusanat

Vuonna 2001 kokoontui Saariselällä Metsäntutkimuslaitoksesta (Metla), Suomen metsäkonserneista ja metsäkoneiden ja mittalaitteiden valmistajista koottu puutavaran mittauksen innovaatio-ryhmä ns. Suomen Kupiikki -vuosiseminaariin. Tärkein johtopäätös seminaarista oli seuraava:

Suomalainen metsäteollisuus panostaa tuotannossaan ja osaamisessaan korkeaan laatuun. Kansainvälisen kilpailun kiristyessä osaaminen saa yhä suuremman merkityksen. Jotta metsäteollisuutemme säilyisi elinvoimaisena, on panostettava tuotekehitykseen ja tuotantomenetelmiin, jotka parantavat teollisuuslaitostemme kannattavuutta, tehostavat puuraaka-aineen tarkoituksenmukaista käyttöä ja lisäävät metsäteollisuuden positiivista imagoa metsäluonnon hyödyntäjänä. Valittiinpa mikä keino tahansa kilpailukyvyyn säilyttämiseksi keskeinen avainsana on aina laatu: yksittäisen lopputuotteen korkea laatu ja tuote-erän laadun tasaisuus.

Suunnitteluprosessi johti syksyllä 2003 Tekesin, Suomen metsäkonsernien, Metlan, Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) ja Teknillisen korkeakoulun (TKK) rahoittamaan PUULA-hankkeeseen. Sen tavoitteena oli selvittää puuta koskemattomien mittausmenetelmien käyttöä puun laadun ja määrän mittauksessa. Metla, TTY ja TKK tekivät hankkeessa tieteellisen työn. Metlan Vantaan tutkimuskeskus (nyk. Etelä-Suomen alueyksikkö) vastasi puuta koskemattomien menetelmien tutkimuksista, vastuullisena johtajana varttunut tutkija Erkki Pesonen. Hän myös kehitti hankkeessa sähkömagneettiseen säteilystä perustuvia puun laadutusmenetelmiä ja puun laatua kuvaavien aistivaraisten havaintojen muuntamista numeerisiksi mittauksiksi. PUULA-hankkeessa valokuvaukseen perustuvia mittausmenetelmiä tutki TTY ja stereokuvamenetelmiä TKK. Hankkeen tulosten viemisestä käytäntöön huolehti Metsäteho Oy, joka myös koordinoi hanketta.

Tämä julkaisu perustuu Metlan PUULA-hankkeessa tuottamiin tuloksiin ja eräisiin jatkotöihin tässä aihepiirissä, kolmeen opinnäytetyöhön (Mikael Agopovin ja Sasu Haminan pro gradu -työt, Tuukka Heikuran diplomityö) ja Oulun yliopiston Mittalaitelaboratorion (MILA-laboratorio) hankkeelle tekemään erillisselvitykseen.

Tutkimusjohtaja Leena Paavilainen ja dosentti Jari Varjo (Etelä-Suomen alueyksikön johtaja) olivat mukana tämän julkaisun loppuunsaattamisessa. Professori Erkki Verkasalo toi puuteknologisia näkökulmia johdantoon ja johtopäätöksiin ja tuki julkaisun valmistumista. Vanhempi tutkija Harri Mäkinen osallistui hankkeessa puun laatutekijöiden mallinnusmahdollisuuksien arviointiin ja julkaisun viimeistelyyn. Hankkeen käyttöön antoivat arvokasta tietoa ja apua myös dosentti Pekka Saranpää, tutkija Jari Perttunen, vanhemmat tutkijat Jari Ala-Ilomäki ja Tuula Piri sekä virallinen mittaaaja Lauri Hjelm. Julkaisun taittoi tutkimussihteeri Seija Sulonen.

Vantaalla ja Joensuussa, 30.9.2010

Erkki Pesonen, Harri Mäkinen ja Erkki Verkasalo

1 Tausta

1.1 Raakapuun laadunmääritys

Tuotteiden ominaisuudet osoitetaan teollisessa tuotannossa usein tuotteita käyttäville ja välittäville asiakkaille ja raaka-aine-hankinta-valmistus-markkinointi-käyttö ketjun muille osapuolille ryhmittelemällä tuotteet ominaisuuksiensa perusteella luokkiin. Myös metsäteollisuudessa tuotteet jaetaan laatuluokkiin rakenteellisten, teknisten ja visuaalisten piirteiden pohjalta, tai ilmoitetaan tuotteen ominaisuuksia osoittavia luonteenomaisia laatusuureita mitattujen tai mallinnettujen tulosten perusteella. Laadunmääritys ja luokittelu alkavat puunhankinta- ja jalostusketjussa hakeutuvasta puustosta tai hakkuista päättyen tuotantolinjoilta saataviin ja edelleen myytäviin tuotteisiin. Puun laatu varmistetaan arvioimalla ja mittaamalla useaan kertaan raakapuun hankinnassa ja metsäteollisuuden eri tuotantovaiheissa, pitäen kuitenkin tavoitteena mittauskertojen ja -paikkojen määrän minimointia.

Raakapuun laadun mittaaminen on osa puutavaran mittaamista, joskin määrän mittaaminen on nykyäänkin suuremmissa osissa kuin laadun mittaaminen. Puutavaran mittaamista tehdään seuraaviin tarkoituksiin:

- 1) luovutusmittaus: kauppahintojen määrittämiseen;
- 2) työmittaus: urakointimaksujen ja työpalkkojen määrittämiseen;
- 3) suunnittelumittaus: puunoston, -hankinnan ja -ohjauksen suunnittelutehtäviin;
- 4) valvontamittaus: määrien ja laatuojen tarkkailuun hankintaketjussa, laatuojjärjestelmien sovelluksiin, varastojen valvontaan ja optimointiin;
- 5) tutkimus- ja kehittämistehtäviin.

Lisäksi puuta käyttävien jalostuslaitosten tuotannon suunnittelua ja talouden seurantaan palvelevista mittauksista on tullut tärkeä sovellusalue 1990-luvulta lähtien.

Metsäteollisuudessa korkealaatuinen tuote perustuu korkealaatuiseen raaka-aineeseen. Raakapuun on luonnonmateriaalina epähomogeenista. Metsäteollisuudessa raakapuun laadun mittauksen tavoite on mahdollistaa valmistettävien tuotteiden korkea saanto ja laatu ja tuotteiden tasalaatuisuus. Mittaamiseen perustuva laadunmääritys edellyttää sekä puun ulkoisen että sisäisen rakenteen tuntemista ja tietoa siitä miten puun rakenne näkyy sen visuaalisissa ja teknisissä ominaisuuksissa. Tätä tietoa kertyy runsaasti puunhankinnan eri vaiheissa, mutta sen hyödyntäminen metsäteollisuuden tarpeisiin mittauksen kautta on vasta alkutaipaleellaan.

Metsästä kaadettavat puut valittiin vielä 50 vuotta sitten täsmävalinnalla kulloisenkin käyttötarkoituksen mukaan. Käyttötarkoitus määritteli laatuvaatimukset ja tieto laadusta perustui kokeeseen. Laadunmääritysmenetelmät olivat pääasiassa aistivaraisia. Metsäteollisuuden kehitys viime sotien jälkeen kasvatti tehtaiden puuvirrat suuriksi, toi uusia jalostusmuotoja ja tuotteita ja johti kaiken hakkuualueelta kertyvän puutavaran käyttöön siten, että puun täsmävalinta ja aistivarainen laadunmääritys eivät enää olleet mahdollisia. Laadun määritykseen kiinnitettiin metsässä huomiota lähinnä leimikoiden puunostossa ja katkotun puutavaran laadunvalvonnassa tienvarsimittauksen yhteydessä.

Raakapuun laadunmääritys siirtyi vähitellen metsästä tehtaille, joilla sitä käytettiin tuotantoprosessien vaatimassa raakapuun lajittelussa ja jossain määrin puutavarakirjanpidossa. Teollisuuslaitoksiin koulutettiin henkilökuntaa tunnistamaan raakapuun laatua aistivaraisesti teollisuusprosessien eri vaiheissa. Aistivaraisessa laadutuksessa puutavaran laatu riippui edelleen laaduttajasta.

Viime vuosikymmeninä on kehitetty vähemmän subjektiivisia laadutusmenetelmiä. Elektroniikan sekä tieto- ja kameratekniikan kehitys on mahdollistanut nopeiden laadunvalvontajärjestelmien rakentamisen teollisuusprosessien yhteyteen. Sahojen ja vaneritehtaiden tukkilajitteluun ja sahalaitosten tuotantolinjoille on asennettu kamerapohjaisia laadutusjärjestelmiä. Nämä perustuvat matriisikameroilla tuotettuun dataan, josta lasketaan kuvankäsittelyn keinoin parametreja esimerkiksi tukkien pituus- ja läpimittalajitteluun, saheiden dimensio- ja laatulajitteluun ja särmäyksen optimointiin. Menetelmät ovat kehittyneet teknisesti, mutta ongelmia on edelleen sekä mitattavan materiaalin erityispiirteiden että mittausolosuhteiden vaativuuden vuoksi (esim. värikalibroinnit). Tukkien laatulajittelussa ei vielä pystytä erottamaan kuivia ja tuoreita oksia tai tunnistamaan aukottomasti värivirheitä. Myös sahatavaran ulkonäön vaihtelu on ongelma. Näiden haasteiden ratkaisemiseksi on yritetty kehittää esimerkiksi IT-pohjaisia itseoppivia järjestelmiä (SOM), mutta käytännön sovelluksiin ei vielä ole päästy (Niskanen 2000).

Tekniikan kehitys ei ole kokonaan poistanut aistivaraista laadutusta. Se on käytössä esim. sahoilla tukkien lajittelussa todettaessa laatuluokitukseen vaikuttavia vikoja, puumassatehtailla määrittäessä vajaalaatuisen puutavaran määrää auto- ja junakuormissa ja koneellisessa hakkuussa määrittäessä runkojen optimaalisia katkaisukohtia ulkoisen laadun perusteella niiden apteerauksessa.

Tutkimuskohteena raakapuun laatu on haasteellinen, koska ei ole olemassa yksikäsitteistä tapaa arvioida laatua riippumattomana esimerkiksi käyttötarkoituksesta, tuotantolinjasta tai puulajista. Yleiset standardit ovat myös puutteellisia raakapuun laadun mittaukseen ja sen kalibrointiin. Puutavaralajin laatu muodostuu useiden dimensiotekijöiden, morfologisten ja fysikaalisten ominaisuuksien ja visuaalisten ja teknisten vikavaikutusten yhteistuloksena. Siksi on tärkeää mitata useita puun laatuun vaikuttavia tekijöitä, mieluiten samanaikaisesti. Tämän mahdollistamiseksi on tehtävä perustutkimusta yhdistellen puusta eri menetelmin saatua mittaustietoa ja analysoiden, minkä prosessien välityksellä mitattu tieto puusta saadaan (esim. Sipii 2002, Hämäläinen ym. 2006, Anttila 2008, Asikainen ym. 2009).

Metsäteollisuuden kilpailuympäristön edelleen kiristyessä ja lisäarvo- ja kustannustehokkuusvaatimusten kasvaessa on tarve kehittää raakapuuvirran hallintaa. Tässä on kehitettävä raakapuun laadutusta entistä tarkemmaksi, nopeammaksi ja kustannustehokkaammaksi ja koko arvoketjulle lisähyötyjä tuovaksi sekä nykyaikaiseen informaation hankinta-, siirto- ja käyttöympäristöön soveltuvaksi. Tavoitteena on täten ulottaa laadituksen vaikutus koko puunhankintaketjuun. Tässä onnistuminen edellyttää uusien mittausmenetelmien kehittämistä ja soveltamista ja puun laatuominaisuuksiin vaikuttavien tekijöiden entistä parempaa ymmärtämistä.

1.2 Laadutusprosessi

Puutavaran laadutusprosessi alkaa metsässä pystypuustosta leimikon oston ja korjuun suunnittelun yhteydessä ja viimeistään puiden kaadossa ja puutavaralajien valmistuksessa, ja päättyy puutavaran tehdasvastaanotossa, lajittelussa ja prosessin ohjauksessa. Leimikon oston ja korjuun suunnittelun yhteydessä tehdään pääasiassa aistivaraista arvioita puutavaralajien kertymistä ja laatu jakaumista ja runkojen koosta. Tietoja käytetään ostotarjouksen ja hinnoittelun perusteena ja kaupan toteutuessa puutavaran ohjauksessa eri tuotantolaitoksille.

Hakkuussa koneenkuljettaja arvioi ennen kaatoa silmämääräisesti puun järeyttä, katkaistavien tukkien oksikkuutta sekä muuta teknistä vikaisuutta. Hakkuukoneen mittalaitte mittaa rungon kuorellista läpimittaa tihein välein ja pituutta juoksevasti, ja uusissa mittalaitteissa on myös run-

komuodon ennustejärjestelmiä. Hakkuukoneen mittausinformaatiojärjestelmä antaa rungon mitaustietojen ja leimikon puutavaran katkontatavoitteet sisältävän apterauksen ohjaustiedoston perusteella katkaisuehdotuksen rungolle (kuva 1). Koneenkuljettaja voi korjata ehdotusta silmämääräisten havaintojen perusteella, näin lähinnä männyn ja koivun tyvitukkien ja erikoispuutavaralajien hakkuussa. Koneenkuljettaja hyväksyy rungon lopullisen katkonnan. Katkottujen pölkkyjen laadunmäärittystä ei tehdä erikseen, ellei sellaiseksi katsota puutavaralajien tai kokoluokkien lajittelua. Samalta leimikolta voidaan hakata jopa 20 eri puutavaralajia, joten hakkuukone merkitsee pölkkyjen päätyyn värikoodin saman puulajin eri tavaralajien tunnistamiseksi metsä- ja kaukukuljetuksessa, metsävarastoissa ja puutavaraterminaaleissa. Lähi ja kaukukuljetuksessa ei yleensä tarkenneta laadutusta. Tavoitteena on pitää hakkuussa ja lähikuljetuksessa tehty lajittelutulos samana, korkeintaan siirtää mahdollisesti väärin laadutettuja pölkkyjä oikeaan puutavaralajierään.

Tehtaan portilla tehdään vastaanottomittaus eli mitataan puutavarakuormien kuorellinen tilavuus erittäin ja puutavaralajeittain ja määritetään vajaalaatuisen puutavaran määrä ja mahdolliset vähennykset tilavuudesta silmämääräisten havaintojen perusteella. Kuitupuulle ei tehdä yleensä muuta laadunmäärittystä. Puutavara siirretään suoraan tehtaan puunkäsittelyn vastaanottokuljettimelle tai välivarastoon tehdasalueelle.

Sahoilla ja vaneritehtailla tukit (ml. pikkutukit ja vastaavat sahattavat tavaralajit) puretaan kuormista yleensä suoraan tukkilajittelijaan, joskus lajittelemattomien tukkien välivarastoon. Kaikki tukit mitataan kuorellisen tilavuuden määrittystä ja lajittelua varten (puoli)automaattisilla optisilla tukkimittareilla kuorellisten läpimittojen ja piteuden mittausten perusteella, pienimpiä sahoja lukuunottamatta. Tulosta korjataan tarvittaessa silmämääräisesti arvioidun lumen ja jään määrän ja tukkien kuoriutuneisuuden perusteella.



Kuvat: Metsäteho Oy, Bintec Oy

Kuva 1. Hakkuukonemittauksessa laadutuksen merkitys tulee esiin puutavaralajien apterauksessa.



Kuva 2. Aistivarainen mäntytukkien lajittelu sahalla. Kuva: Erkki Pesonen.

Tukkien (puoli)automaattisia laatulajittelulaitteistoja on ollut käytössä Suomessa toimivissa suurissa ja keskisuurissa sahalaitoksissa yli 20 vuotta (kuva 2). Tukkimitarit perustuvat kamera- ja lasertekniikkaan, ja läpimitan mittaukseen useasta suunnasta. Tukkien lajittelussa läpimittaluokka saadaan tukkimittarin mittaustietojen perusteella, mutta laatuluokka määritetään edelleen lähes kokonaan silmämääräisesti järeyden, suoruuden, oksikkuuden ja laatua alentavien teknisten vikojen perusteella. Uusimmilla tukkimittareilla voidaan määrittää myös kapenemista ja tietyllä tarkkuudella suoruutta ja tukkilajia (tyvitukki / muu tukki). Viime vuosina on suurilla sahoilla otettu käyttöön tukkiröntgeneitä, josta saatavia tietoja käytetään jo tukkien loppukäyttölähtöisen lajittelun ja arvonmäärityksen tukena.

Tukit ohjataan lajittelun jälkeen tuotantolinjoille joko lajiteltujen tukkien välivaraston kautta (yleensä) tai suoraan (täsmälajittelussa). Ennen sahausta tai sorvausta mitataan uudestaan tukkien kuorettomat dimensiot. Tällä perusteella valitaan sahatukeille sahausasete ja -suunta ja määritetään vaneritukeille katkontakohdat sorvipölkyiksi.

Sahoilla ja vaneritehtailla ovat yleistyneet automaattiset sahatavaran ja viilujen laadutuslinjat, joilla lasadutus perustuu varsin yksinkertaisiin sääntöihin sallittavien vikojen esiintymisestä, esimerkiksi oksien laadusta, koosta ja sijainnista, halkeamista, koloista ja pihkaraoista ja muista teknisistä vioista. Näillä voi olla mahdollista hyödyntää myös tukkien laadutuksessa saatavia tietoja, mikäli tukkeja ja saheita tai viiluja koskevia tietoja pystytään yhdistämään toisiinsa.

Automaattisten laatulajittelulaitosten käyttöön ottaminen on lisännyt metsäteollisuuden kiinnostusta raakapuun kuvantavaan mittaukseen perustuviin laadutus- ja määränmittausmenetelmiin. Uusien mittausmenetelmien tuottaman tiedon hyödyntämistä voitaisiin kuitenkin tehostaa.

1.3 Laadun mittauksen kehittämistarpeita

Raakapuuta mitataan tai arvioidaan useaan kertaan puunhankintaprosessin aikana: ensimmäisen kerran pystyvuustosta ostoa ja korjuuta suunniteltaessa, tämän jälkeen puita kaadettaessa ja puutavaraksi valmistettaessa ja edelleen puutavaraa tehtaalla vastaanotettaessa ja lajiteltaessa. Perus- ja tarkastusmittauksia varten voidaan tehdä tämänkin jälkeen kuormien, nippujen ja osanippujen ja pölkkyjen otosten mittauksia. Kaukokuljetuksessa ja terminaalivarastoissa tehdään joskus vielä uusintamittauksia määrä- ja laatusurannan tarpeisiin. Erikseen tulevat vielä tuotannon suunnittelun edellyttämät mittaukset sahoilla ja vaneritehtailla (ks. luku 1.2). Puunhankinnan tavoitteena on ollut pitkään ja on edelleen mittauskertojen vähentäminen; jossain määrin siinä on onnistuttu, kun on otettu käyttöön hakkuukonemittaus ja erilaisia tehdasmittausmenetelmiä.

Jotta mittaustiedoista on hyötyä erityisesti puunhankinnan ja tuotevalmistuksen toimintojen rationalisoimiseksi, puun hankintaketjussa ja tehtaalla mitattujen laatutietojen tulee olla käytettävissä nopeasti ja joustavasti kulloiseenkin tarpeeseen, ja uusia mittauksia tulee tehdä eri prosesseissa vain, mikäli mitattavia suureita on lisättävä tai mittaustarkkuutta on parannettava. Teollisuuslaitosten puunhankinnan, tuotannon ja myynnin logistisia toimintoja ohjaavaa tietoverkkoa on kehitettävä näiden tavoitteiden saavuttamiseksi siten, että eri vaiheissa saadut raakapuun mittaus- ja laadutustulokset ja tuotannon ja myynnin tarpeet voidaan liittää joustavasti yhteen ja niitä voidaan käyttää toiminnan ohjaamiseen kaksisuuntaisesti. Raakapuun hankinnan eri vaiheissa kerätyn laatutiedon hyödyntäminen edellyttää sen siirtämistä metsästä tehtaalle. Tähän tarvitaan halpa puutavaraerä-, kuorma- tai tukkikohtainen merkkaujärjestelmä. Vaikka puutavaran todellinen kuorellinen tilavuus, joka vastaa kyseisten rungonosien tilavuutta pystyvuuna, on vakiintunut mittasuure Suomessa, kuoreton tilavuus on kansainvälisesti käytetyin mittaussuure erityisesti tukeille. Varsinkin useissa Euroopan maissa toimivat metsäyhtiöt pitävät yhtenäistä mittaussuureta tarpeellisenä mittauksen vertailukelpoisuuden, puutavarakirjanpidon ja puunjalostuksen saannon ja arvon arvioinnin kannalta.

Esimerkiksi sahojen tuotannon suunnittelu hyötyisi olennaisesti siitä, jos hakkuukone voisi määrittää tukkien pienimmän kuorettoman läpimitan sekä vaippapinnan kuorettoman muodon ja apteerata tukit näiden tietojen mukaisesti. Samoin olisi tarpeen määrittää tukeista lahoisten alueiden rajapinnat. Näissä kaikissa tarkoituksissa tarvitaan todennäköisesti pölkyn päistä tehtäviä mittauksia. Samat tarpeet koskevat tietysti sahojen tukkivastaanoton tukkimittareita, joskin tähän on jo olemassa eräitä mittausten menetelmien yhdistelyyn perustuvia ratkaisuja (ks. luku 1.2).

Tukin kuorettoman tilavuuden määrittäminen on ajateltu tehtäväksi myös kaadon yhteydessä. Mittaus perustuisi tällöin runkokäyrämenetelmään, mutta erityisesti tyvitukin tilavuuden määrittäminen on osoittautunut epätarkaksi (Laasasenaho 1982).

Tukkien apteerauksen ja (esi)lajittelun tehostamiseksi on esitetty myös menetelmiä, joissa hyödynnetään pölkkyjen päistä mitattavien visuaalisten suureiden, kuten pölkyn soikeuden, vuosiluston leveyden ja ytimen sijainnin sekä sydän- ja pintapuun rajapintojen tilastotieteellisiä yhteyksiä pölkyn käyttöarvoluokkaan. Näiden menetelmien teknisenä rajoitteena on hakkuukonemittauksessa käyttöympäristö, joka mahdollistaa vain karkean laadunarvioinnin ja laatuluokituksen. Laadunarvioinnin epäsuoraa määrittäminen voidaan sen sijaan pitää teknisesti realistisena tehdasmittauksessa. Tässä ovat kuitenkin mahdollisia ja osin jo käytettävissä myös laatusuureiden suorat mittaukset.

Sekä tukkien että kuitupuun vastaanottotarkastuksen yhteyteen onkin suunniteltu pölkkyjen päädyistä laatutietoja tallentavaa mittaussuunnitelmaa. Tällä tavoitellaan järeyden tarkan mittauksen lisäksi vääran puulajin, lahon, halkeamien, oksaisuuden ja sydänpuupitoisuuden määrittämistä, jolla pyritään parantamaan pölkkyjen tuotantolinjalle ohjausta, laadunvalvontaa ja mahdollisesti puuerien hinnoittelua. Myös kierteisyyden ja reaktioppuun tunnistamista on ajateltu sahojen tarpeisiin, mutta menetelmät eivät ole toteutuneet toistaiseksi. Kehityshankkeita on käynnissä erityisesti sahoilla ja vaneritehtailla tukkiröntgenympäristöissä ja sellu- ja paperitehtailla otantamittauslaitteiden tai vastaanottokuljettimien yhteydessä sovellettaviksi. Menetelmän nopeuteen ja objektiivisuuteen perustuvat edut ovat ilmeiset suurten puumäärien tarkastelussa, erityisesti otosnippujen ja pölkkyjen tarkasteluun perustuvassa mittauksessa. Tässä voidaan ainakin periaatteessa ottaa käyttöön myös uusia laatusuureita. Esimerkiksi pölkkyjen päistä mitattavat lustotiheys, tiheysjakauma tai tiheyden homogeenisuus ja kuitujen dimensiot ja mikrofibrillikulma ovat mahdollisia sovelluksia.

Tukkilajittelija saa päätöstensä tueksi tukeista otettuja päätykuvia ja automaattisesti mitattuja tukin dimensiota jo nykyisessä mittaussuunnitelmissa ja lajittelukäytännössä. Laadutusta on kuitenkin tarpeen kehittää entistä automaattisemmaksi ja objektiivisemmaksi. Samalla on tarpeen pohtia raakapuun käyttöarvoa ja laatua nykyistä paremmin ja tarkemmin kuvaavien mittaussuureiden ja indeksien käyttöönottoa. Tässä ollaan vielä kehitysvaiheessa, joskin eräillä suurilla tuotantolaitoksilla on testattavana pilot-vaiheessa olevia sovelluksia.

Sahalaitoksissa pystyttäisiin laatimaan sahaussuunnitelmat laadun mittausta täsmentäen siten, että lopputuotteen laatu ja käytettävissä oleva raaka-aine voidaan ottaa entistä paremmin huomioon. Tällaisten laatutietojen hyödyntäminen edellyttäisi tukkikohtaisen kytkennän tukin tarkan laatutiedon, sahausasetteiden ja saheiden laatutiedon välille.

Puutavaran kosteuden hallinta on olennaista mekaanisten puumassojen valmistuksessa ja bioenergiasovelluksissa, varsinkin raaka-aineen varastointitarpeiden ollessa kasvussa puunkorjuun olosuhteiden ja puutavaralajien menekin vaihtelun vuoksi. Kosteuden hallinnalla on myös merkitystä sahatukkien ja varsinkin vaneritukkien laadun säilyttämisen kannalta. Massapohjaisten mittaussuureiden mahdollisesti yleistyessä lisääntyvät myös kosteuden mittaussuureet, jos mittaussuure on kuivamassa ja tilavuus- ja massapohjaisten tulosten vertailua varten tarvitaan muuntokertoimeksi kuiva-tuoretiheys. Jos puutavarapölkkyjen kosteuden mittauksessa sovelletaan epäsuoria menetelmiä, on tämä ilmeisesti tehtävä katkaisupintojen eli pölkyn päiden kautta – ellei mittaus perustu hake- tai purunäytteiden analysointiin.

Vastaanottotarkastukseen tulevan puutavaran kuorman vertaaminen kuormauspaikalta lähteneeseen antaa potentiaalisesti mahdollisuuden kontrolloida entistä tarkemmin kuorman tilavuutta, puutavaran kosteutta ja kuormassa olevan lumen ja jään määrää. Puutavaran punnitus kuormauksen yhteydessä kuormainvaaoilla ja niiden tulosten vertailu tehtaiden silta- ja kurottajavaakojen tuloksiin mahdollistaa tämän periaatteessa. Tähän ei ole kuitenkaan vielä päästy käytännössä.

Uusien mittaussuureiden kehittämisen ohella tulisi panostaa myös puun laatuominaisuuksien ja kasvun välisen dynamiikan ymmärryksen lisäämiseen. Samoin pitäisi kehittää pystyvuuston ennakoarviointimenetelmiä, joita soveltaen olisi mahdollista valita hakattavaa puustoa käyttötarkoituksen ja lopputuotteilta haluttujen laatuominaisuuksien pohjalta. Tämä voi olla tarpeen myös puukaupan sujuvuuden vuoksi, jos raakapuumarkkinoilla ryhdytään käyttämään laajasti tavaralajikaupalle vaihtoehtoisia kauppatapoja ja niiden edellyttämiä hinnoittelumenetelmiä

(leimikoiden ja puutavaran laatuhinnoittelu, runko- ja osarunkohinnoittelu, matriisihinnoittelu). Myyntitarjousten vertailu ja ostotarjousten teko muuttuu tällöin nykyistäkin monimutkaisemmaksi, erityisesti jos markkinoilla toimii erilaisia hinnoittelumenetelmiä käyttäviä puunostajia.

Yksi mahdollisuus on kytkeä puuston ennakkomittaus ja kaatovaiheen mittaukset leimikoiden ja runkojen loppukäyttölähtöistä arvoa kuvaaviin alueellisiin tietopankkeihin, jotka sisältävät lopputuotteiden ja runkojen ja puutavarapölkkyjen välisten riippuvuussuhteiden perusteella muodostettuja ennustemalleja. Tällainen tietokanta on käytössä Ruotsissa, mutta sitä on hyödynnetty lähinnä tutkimus- ja kehittämishankkeiden tarkoituksiin.

1.4 Laadun mittaustutkimusten kehityssuuntia

Puutavaran mittausten menetelmien yleinen kehitys on kulkenut mittauksen kohdetta koskettavasta sitä koskemattomaan mittaukseen ja manuaalisesta ensin kauko-ohjattavaan ja edelleen automaattiseen mittaukseen. Mitattavien kappaleiden lukumäärä on suuri ja mittauksen on oltava mahdollisimman yksilöllistä mutta nopeata, mikä korostaa automaattisten mittausten menetelmien etuja. Nykyään nopeimmat mittaukset saadaan aikaan niillä tekniikoilla, joissa mittalaite voi olla paikallaan ja kohteesta saadaan lyhyessä ajassa runsaasti mittaustuloksia, yhden millisekunnin kestävästä mittauksesta jopa useita tuhansia havaintoja.

Kuvantavien mittausten menetelmien ja päätteilykykyisten ohjelmistojen kehitys digitaalikameroiden myötä on innostanut tutkijoita soveltamaan kuvamittaustekniikkaa metsäteollisuuden tarpeisiin. Menetelmiä on testattu koko kuluvaan vuosituhannen sahoilla sekä tukkien vastaanottomittauksessa että saheiden laatulajittelussa. Määrän mittauksesta ja laatulajittelusta saadut kokemukset ovat olleet lupaavia ja kehitystyö jatkuu edelleen. Digitaalikameroiden kuvasensorit ovat kehittyneet vuosi vuodelta tarkemmiksi. Edullistenkin kameroiden resoluutio yltää tällä hetkellä jo tasolle 10 megapikseliä.

Mitä enemmän ja mitä tarkempaa tietoa raakapuusta saadaan, sitä pienempiä laatueroja pystytään havaitsemaan. Tämä trendi näkyy puun laadun mittausten menetelmien kehityksessä. Tässä ollaan tosin vasta puuta koskemattoman ja automaattisen mittauksen alkutaipaleella, vaikka tukkien optinen mittaaminen ja puutavaran ippujen laserpohjaiset mittausten menetelmät ovat jo käytössä tehtaiden vastaanottomittauksessa. Esimerkiksi laser-pohjainen mittaaminen on osoittautunut nopeaksi, luotettavaksi ja tarkaksi menetelmäksi kuitupuukuormien mittauksessa verrattuna hitaisiin upotusmenetelmiin, käsin tehtäviin keppimittauksiin tai hankalasti kalibroitavaan valokuvapohjaisiin mittauksiin. Kuitupuukuormien lasermittauksiin on ollut suunnitelmissa liittää myös tietoa kuitupuun ominaisuuksista, mutta käytännön sovelluksista ei ole raportoitu (Codator Oy).

Raakapuun kosteuden mittausta on kehitetty lukuisien fysikaalisten periaatteiden ja tekniikoiden pohjalta. Lupaavimpiin kuuluvat mikroaaltomenetelmät, joita on kehitetty sekä rakennustekniikan että metsäteollisuuden sovelluksiin MILA-laboratoriossa ja VTT Elektronikassa. Samoin on kehitetty puuaineen lahon ja oksien mittausten menetelmää, joka perustuu mikroaaltoihin ja infrapunaspektroskopiaan. Kehitystyötä on jatkettu MILA-laboratoriossa Plommi-hankkeessa (2005–2007) ja sen jatkohankkeissa. Näitä mittauksia on tehty puutavarapölkkyjen päädyistä. Menetelmillä on ilmeisiä edellytyksiä kehittyä käytännön sovelluksiksi raakapuun mittaukseen.

Sähkömagneettiseen säteilyyn perustuvien menetelmien soveltaminen puun laadutukseen on myös herättänyt kiinnostusta. Tämä johtuu ilmiöön perustuvien laitteiden kyvystä mitata kerralla esimerkiksi puutavaran ippun tilavuus ja useita laatuominaisuuksia. Sähkömagneettisen säteilyn käyttö

mahdollistaa näkevän mittausrobotin tai mittausautomaatin valmistuksen. Tämän suuntaisia kehityshankkeita on ollutkin 2000-luvun loppupuolella, esim. Metrix ja Forestrix. Metrix-hankkeessa kehitettiin uusia mittaustekniikoita hakkuukoneen harvesteripään yhteyteen ja Forestrix-hankkeessa menetelmiä, laitteita ja ohjelmistoja metsäkoneiden aistinjärjestelmiin, puuston kartoittamiseen ja hakkuukoneen puoliautomaattiseen ohjaukseen. Hankkeita johti TKK:n automaatio- ja systeemitekniikan laitos. Metla osallistui Forestrix-hankkeeseen.

2 PUULA-hanke

2.1 Organisointi

Puutavaran mittauksen kehittäjien ja käytännön toimijoiden joka vuotisessa Suomen Kupiikki-seminaarissa todettiin vuonna 2001 yhteisesti tarve lähteä kehittämään kuvamittausten pohjalta uusia laadun mittausmenetelmiä metsäteollisuuteen ja metsäntutkimukseen. Tätä toteuttamaan perustettiin PUULA-hanke (**Puun laatu**), joka toteutettiin vuosina 2003–2005.

Hankkeen laajuudesta ja perustutkimusluonteesta johtuen sen tutkimustehtävät jaettiin ja osahankkeistettiin kolmen tutkimusyksikön kesken. Sähkömagneettisten menetelmien kartoituksesta vastasi Metla, Vantaan tutkimuskeskus (nyk. Etelä-Suomen alueyksikkö) (tutkimusosapuoli 1), 3D-mittauksiin perustuvien menetelmien tutkimuksista Teknillinen korkeakoulu TKK (tutkimusosapuoli 2) ja digitaalikuvaan perustuvien menetelmien tutkimuksista Tampereen teknillinen yliopisto TTY (tutkimusosapuoli 3). Hankkeen koordinaattorina toimi Metsäteho Oy (tutkimusosapuoli 4).

Eri osapuolet kävivät hankkeen aikana keskenään tieteellistä keskustelua työn etenemisestä ja ratkoivat yhdessä eteen tulleita ongelmia. Metla antoi muille osapuolille puun ominaisuuksiin ja niiden hyödyntämiseen ja fysiikan ilmiöiden hallintaan liittyvää tukea, TKK stereokuvamittaukseen ja kalibroinnin hallintaan liittyvää tukea ja TTY ilmiöiden mallintamiseen tarvittavaa kuvamittausinformaatiota ja tukea.

Metlan osahankkeen vastuuhenkilönä oli varttunut tutkija Erkki Pesonen. Mittauksissa, joihin Metlalla ei ollut omaa mittauskalustoa, käytettiin MILA-laboratorion ja TKK:n analyttisen kemian laboratorion palveluita. Vastuuhenkilöinä oli MILA-laboratoriossa FT Matti Sarén ja TKK:n laboratoriossa professori Sakari Kulmala.

Perustutkimusluonteisten tulosten käytäntöön viemiseksi tutkijat pitivät koko hankkeen ajan yhteyttä useisiin metsäteollisuuden yrityksiin ja tuotantolaitoksiin. Lisäksi pidettiin yhteyttä hakkuukonevalmistajiin.

2.2 Tavoitteet

PUULA-hankkeen tavoitteena oli tutkia kuvamittauksen soveltamismahdollisuuksia puuraaka-aineen määrän ja laadun mittauksessa. Tavoitteena oli tutkia mahdollisuuksia määrittää puulaji ja mitata rungon tilavuus ja geometrisia ominaisuuksia, kasvunopeus, rakenteellisia ominaisuuksia ja erilaisia rungon vikoja kuvamittauksilla sekä kehittää näistä soveltuvimmat prototyyppiasteelle ratkaisujen käytännön toimivuuden osoittamiseksi.

Tavoitteena oli kehittää edelleen selvitystyön tuloksena saatuja menetelmiä hankkeeseen osallistuneiden tutkimuslaitosten eli Metlan, TTY:n ja TKK:n toimesta niiden jatkohankkeissa. Jatkokehitykseen oli tavoitteena saada mukaan laitevalmistukseen ja tietotekniikkaan erikoistuneita yrityksiä.

Metlan vastuulla olleen osahankkeen tavoitteet olivat PUULA-hankkeessa:

- koota hankkeen tarvitsema metsällinen perustieto,
- määritellä tärkeimmät laatutekijät ja arvioida niiden mitattavuutta ja mittauksilta vaadittava tarkkuutta,
- tutkia laatuominaisuuksien mittausta laboratorio-olosuhteissa ja maastokokein,
- järjestää tutkimusosapuolille 2 ja 3 niiden tarvitsemat testausympäristöt,
- selvittää olemassa olevien puun laatua kuvaavien mallien käyttökelpoisuus kuvauksissa.

Tutkimusosapuolten 2 ja 3 kanssa sovittiin, että hankkeen toteutuksen kannalta tarpeellinen metsällinen perustieto toimitetaan heille erikseen järjestetyissä hankekokouksissa, seminaareissa ja metsäteollisuusyrityksiin tehtävillä tutustumiskäynneillä. Tutkimusosapuolen 4 kanssa sovittiin, että heille ei metsällistä perustietoa tarvitse toimittaa, koska se on heillä jo olemassa.

Hankkeen johtoryhmän kanssa sovittiin, että puun laatutekijät määritellään ja priorisoidaan metsäteollisuuslaitoksissa tehtävien haastattelujen pohjalta. Tulokset sovittiin sisällytettäväksi pro gradu -tutkielmaan (Sasu Hamina).

Tutkimusosapuolten 2 ja 3 kanssa sovittiin, että heille järjestetään mahdollisuus testata omia mittaussovelluksiaan kenttäolosuhteissa. Hankkeen johtoryhmän kanssa sovittiin, että Metlan laboratorio-koekäytöt tehdään TKK:n, Oulun yliopiston MILA-laboratorion ja Metlan Vantaan tutkimuskeskuksen (nyk. Etelä-Suomen alueyksikkö) puulaboratorion tiloissa.

Osahankkeen erityistavoitteiksi asetettiin:

- 1) kehittää kuusen tyvilahon laajuuden ennustavaa mallia, pohjana Tammisen (1985) esittämät tulokset – tästä sovittiin tehtäväksi diplomityö (Tuukka Heikura);
- 2) kehittää sahatavaran laatulajitteluun menetelmää, jolla voidaan automatisoida aistivaraista laadun mittausta – tulokset sovittiin sisällytettäväksi pro gradu -tutkielmaan (Sasu Hamina);
- 3) kehittää kokeellista menetelmää ja laskentamallia, jolla puusolun poikkileikkauspinnan dimensiot pystytään laskemaan – tästä sovittiin tehtäväksi pro gradu -tutkielma (Mikael Agopov).

Hankkeen loppuraportissa pääpaino on johtoryhmän päätöksen mukaisesti tulosten esittelyssä ja johtopäätöksissä. Tärkeimmät jatkotutkimustarpeet esitetään johtopäätösten yhteydessä.

3 Kokeelliset tutkimukset: menetelmät, laitteistot ja tulokset

3.1 Lähtökohtia

Tutkimusten lähtökohtana oli puuta koskevan mittaus puutavarapölkyn päistä. Tässä päädyttiin kuvamittausmenetelmiin, jotka perustuvat sähkömagneettiseen säteilyyn ja akustisiin aaltoihin, pääasiassa ultraäänitaajuuksiin. Menetelmien valinnassa tukeuduttiin hyvin tunnettujen sähkömagneettisen ja akustisen säteilyjen luonteista ja ominaisuuksista johdettuun tietoon. Mittausmenetelmiä sovellettaessa oli keskeistä, että hahmotetaan etukäteen aineen kemiallinen ja fysikaalinen rakenne, jolloin sähkömagneettisista ja akustisista mittauksista on mahdollista ennustaa säteilyjen ja aineen väliset vuorovaikutustapahtumat ja etsiä mittausdatasta laskennallisista menetelmistä informaatiota aineen ominaisuuksista.

Kokeellisessa työssä käytettyjen sähkömagneettisten aallonpituuksien ja ultraäänitaajuuksien valintaa säätelivät mitattavien ilmiöiden dimensiot ja vuorovaikutusenergiat:

- puusolujen dimensiot havaitaan näkyvän valon alueella, esim. aallonpituudella 640 nm;
- luminoivat ilmiöt selluloosassa tapahtuvat aallonpituusalueella 200–400 nm;
- puuaineen kosteus ja pinnan rakenne nähdään mikroaalloilla, joiden aallonpituus on noin 1 cm;
- akustiselta alueelta on käytettävissä kuoren paksuuden mittaukseen ultraäänien taajuus 120 kHz.

Testattavien menetelmien valinnassa kiinnitettiin huomiota myös siihen, että valituilta säteilyalueilta ei ollut julkistettu aiemmin paljoa raakapuun laadun mittaukseen liittyviä sovelluksia, mutta näillä säteilyalueilla toimivien mittalaitteiden kehitystyö oli voimakasta. Lopuksi varmistettiin, että valitut mittausmenetelmät ovat hyvin tunnettuja, laitteistojen ja komponenttien valikoima on suuri ja menetelmillä on metsäteollisuudessa uutuusarvoa.

Käytetyt tutkimusmenetelmät ja mitattavat ilmiöt määriteltiin hankkeen perustutkimusluonteen vuoksi väljästi tukeutuen mahdollisimman yleisluonteiseen tietoon sähkömagneettisen säteilyn ja akustisten aaltojen vuorovaikutuksista erilaisten aineiden kanssa. Kvanttavat mittausmenetelmät valittiin sähkömagneettisen säteilyn ja akustisten aaltojen alueilta siten, että ennusteet tavoiteltujen puun ominaisuuksien onnistuneeseen havaitsemiseen ja mittaamiseen olivat hyvät.

Edellä esitetyistä syistä testattaviksi mittausmenetelmiksi valittiin laserdiffraktio, fotoluminesenssi, mikroaaltoemissio ja -absorptio, ultraääniemissio ja valokuvaus.

3.2 Laserdiffraktio

Ilmiö

Diffraktio on ilmiö, jossa sähkömagneettinen tai väliaineessa mekaanisesti syntyvä aaltorintama törmää periodisen hilarakenteen omaavaan materiaan ja törmäystapahtumassa aaltorintamaan talentuu tietoa em. hilan periodisesta rakenteesta. Ehtona diffraktiolle on, että aaltorintaman aallonpituus on samaa suuruusluokkaa kuin materiaan jaksollista rakennetta kuvaavan hilan hilaperiodi (Hecht 1998).

Diffraktiomittauksella saadaan tietoa aineen jaksollisesta rakenteesta. Mittauksen kohteena voi olla pieni ainepisara, reikä materiassa, ohut tanko tai säännöllinen tai epäsäännöllinen verkkomainen rakenne. Laserdiffraktio soveltuu erityisen hyvin säännöllisten jaksollisten rakenteiden mittaamiseen.

Yksinkertaisessa sähkömagneettisen säteilyn diffraktiomallissa d on verrannollinen λ ja $(\sin(\theta))^{-1}$, missä d on sirontakeskusten välinen etäisyys, θ on sirontakulma kulma ja λ on sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus:

$$d \sim \lambda (\sin(\theta))^{-1} \quad (1)$$

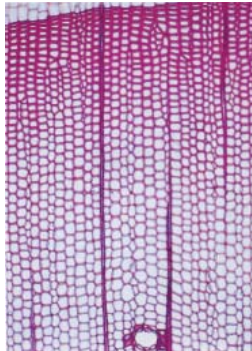
Esimerkiksi kun valo osuu pieneen reikään, reiän takana olevalle pinnalle muodostuu diffraktiokuvio eli kirkkaiden ja pimeiden alueiden verkosto. Diffraktiokuvioista on johdettavissa sen muodostaneen systeemin geometria ja dimensiot, ja tunnetusta jaksollisesta rakenteesta on johdettavissa siitä muodostuva diffraktiokuvio.

Säteilylähteenä diffraktiomittauksissa voidaan käyttää mitä tahansa monokromaattista sähkömagneettista säteilyä tuottavaa laitetta. Laserlaite on käytännöllinen, koska se on edullinen ja tuottaa polarisoitua monokromaattista säteilyä. Laserlaitteella saadaan helposti aikaan koherentti säteily ja säteilykentän tasoaltomaisuus, mikäli niitä tarvitaan mittauksessa. Lasersäteilyllä saadaan aikaan yksinkertaisin mittausjärjestelyin myös Fraunhoferin diffraktio, joka on käytännöllinen mittauksen vasteena saatavan sähkömagneettisen spektrin analysoinnin kannalta.

Mitattaessa näkyvällä valolla esimerkiksi aallonpituudella 640 nm, mikä vastaa ihmisaivojen tulkitsemana punaista väriä, saadaan tietoa jaksollisista rakenteista, joissa jakson pituus on alueella 10 nm – 100 μm . Mitä säännöllisempi on jaksollisen rakenteen pitkän kantaman järjestys, sitä täsmällisemmin ja yleensä helpommin voidaan diffraktiomittauksen tuottamasta tiedosta tulkita rakenteen geometria (Ziman 1979).



Kuva 3. Laserdiffraktometri. Kuva: Erkki Pesonen.



Kuva 4. Mikroskooppikuva kuusen puusolukkonäytteestä. Kuvan yläosassa näkyy alhaalta ylöspäin katsottuna kevätpuun vaihtuminen kesäpuuksi. Kuva: Pekka Saranpää.

Laserlaitteen valinnassa on kiinnitettävä huomiota työturvallisuuteen. Yleissääntönä on, että säteilyn kirkkaus vastaa yhden milliwatin tehoisen, punaista valoa tuottavan laserlaitteen ulostuloikkunan pinnassa 1-kertaista auringon kirkkautta, kahden milliwatin tehoisen ulostuloikkunan pinnassa 2-kertaista auringon kirkkautta jne. Vastaavuus kasvaa lineaarisesti aina muutamaan kymmeneen milliwattiin saakka. Työturvallisuus säilytetään hyvänä huolehtimalla siitä, että säteilyä ei siirry mittausalueen ulkopuolelle.

Laitteisto

Mittauksia varten rakennettiin laserdiffraktometri (kuva 3). Säteilylähteenä oli teholtaan 4 mW helium-neon putkilaser, joka tuotti aallonpituudeltaan 632,8 nm tasopolarisoitua monokromaattista valoa. Säteilykeilan divergenssi oli 1 mrad ja säteen halkaisija ulostuloikkunassa n. 0,8 mm. Sädekimppua supistettiin mittauksissa jonkin verran kapeammaksi linssisysteemillä ja sädekimppu kohdistettiin näytteeseen. Näyte asetettiin moottoroituun xy-siirtojärjestelmään. Mittaus ja tulosten analysointi automatisoitiin (liite 1).

Laitteiston testauksessa käytettiin kuusipölkyn katkaisupinnalta jäämikrotomilla leikattuja ohuita solukkonäytteitä (kuva 4), jotka mitattiin laserdiffraktometrin säteilykentässä 0,1 mm:n askelein. Mittaustulokset kalibroitiin hilaverkolla, joka muodostui ympyrän muotoisista aukoista, jotka vastasivat tulosten laskennassa käytettyä hilamallia. Näytekappaleen mikroskooppikuva osoittaa, että puusolukon poikkileikkaukset muodostavat viisi- tai kuusikulmaisia renkaita. Diffraktioanalyysissä solujen muototekijän hyvä approksimaatio on ympyrä.

Tulokset

Tutkimusten tavoitteena oli kehittää menetelmä havupuun trakeidien soluseinämän paksuuden nopeaan määrittämiseen. Diffraktiomittauksista voitiin laskea puusolujen keskimääräiset dimensiot ja niiden tarkkuus. Taulukossa 1 on verrattu kuusen trakeidien valomikroskooppimenetelmällä saatuja keskimääräisiä läpimittoja laserdiffraktiomenetelmällä saatuihin. Tulokset olivat yhtäpitäviä virherajojen puitteissa. Taulukossa 2 on verrattu kuusen trakeidien valomikroskoopilla ja laserdiffraktiolla mitattuja soluseinämän kaksinkertaisia paksuuksia. Tulokset olivat kohtuullisen yhtäpitäviä.

Taulukko 1. Valomikroskoopilla ja laserdiffraktiomenetelmällä mitatut kuusen puuaineen trakeidien läpimitat (keskiarvo ja keskivirhe) - esimerkkejä.

Näyte	Mikroskooppi	Laser	Mikroskooppi	Laser
	Säteen suuntaan, μm		Tangentin suuntaan, μm	
2	26,7 \pm 4,5	24,0 \pm 4,5	18,9 \pm 6,4	27,1 \pm 5,5
34	29,4 \pm 4,5	33,3 \pm 10,9	27,5 \pm 6,9	28,8 \pm 2,8
42	40,6 \pm 6,1	34,1 \pm 3,5	30,4 \pm 9,2	40,2 \pm 7,9

Taulukko 2. Valomikroskoopilla ja laserdiffraktiomenetelmällä mitatut kuusen puuaineen trakeidien soluseinämän paksuudet (keskiarvo ja keskivirhe) - esimerkkejä.

Näyte	Mikroskooppi	Laser	Mikroskooppi	Laser
	Säteen suuntaan, μm		Tangentin suuntaan, μm	
2	6,1 \pm 0,8	6,9 \pm 5,9	8,2 \pm 4,1	5,1 \pm 5,9
34	9,9 \pm 2,1	17,2 \pm 11,7	9,8 \pm 4,1	18,0 \pm 3,5
42	6,5 \pm 0,6	8,5 \pm 3,8	7,3 \pm 2,5	9,9 \pm 8,5

Kehitetyllä menetelmällä trakeidien keskimääräinen läpimitta pystyttiin määrittämään 2 cm²:n laajuudesta näytteestä 2–3 sekunnissa. Mittauksissa käytetyllä laitteistolla tulosten tarkkuus oli n. 10–20 % ja tarkkuus oli samaa suuruusluokkaa trakeidien läpimitan ja soluseinämän paksuuden määrittämisessä. Soluseinämien keskipaksuudet saatiin laskettua, mutta käytetty laskentamalli ja laseroptiikan laatu eivät riittäneet hyvään tulostarkkuuteen. Laserdiffraktiomenetelmällä saadut keskimääräiset soluseinämien paksuudet olivat samaa suuruusluokkaa kuin optisessa mikroskooppinnissa, mutta virherajat olivat yli 50 %. Merkittävää tietoa saatiin solujen keskimääräisistä läpimitoista, mutta tarkkaa tietoa ei saatu soluseinämien paksuudesta.

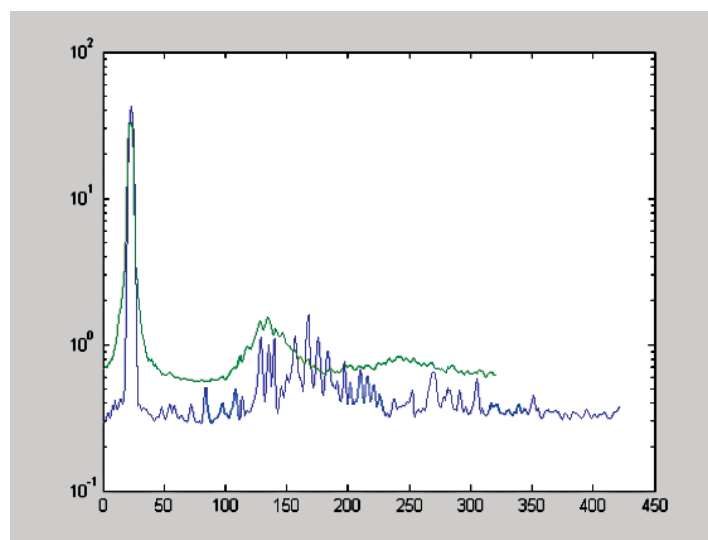
Laserdiffraktiomenetelmällä saadut tulokset on esitetty yksityiskohtaisesti Mikael Agopovin pro gradu -tutkielmassa (liite 1).

3.3 Fotoluminesenssi

Ilmiö

Fotoluminesenssi on sähkömagneettinen ilmiö, jossa lyhytaaltainen säteily virittää aineen atomin tai molekyylin ja viritys purkautuu alkuperäistä viritysenergiaa alemman energiatilan kautta. Purkautumismekanismista riippuen syntyy joko pitempikestoista fosforensisäteilyä tai lyhytkestoista fluoresenssisäteilyä (kuva 5). Emittoitunut säteily on aina pitempiaaltoista kuin atomin virittänyt säteily. Säteilyn kesto on fosforensissa jopa useiden sekuntien mutta fluoresenssissa vain nanosekuntien luokkaa. Fotoluminesenssimittauksella saadaan tietoa esimerkiksi aineen atomien viritysenergioista ja atomien ja molekyylien elektronirakenteista

Fosforenssi ja fluoresenssi syntyvät kun aineeseen osuu sähkömagneettinen säteily, joka hetkellisesti lisää aineen molekyylien energiaa. Ehtona ilmiölle on, että aineeseen osuneen säteilyn energia on suurempi kuin molekyyllissä virittyvän elektronin virittämiseen tarvittava energia. Mittauksissa tutkittavaan kohteeseen yleensä suunnataan aallonpituudeltaan ultraviolettialueella olevaa valoa. Tämä kuljettaa molekyyliin energiaa. Mikäli valon energia on valittu oikeaksi ja kohteena on fotoluminoiva aine, atomi tai molekyyli virittyy ja syntyy joko fluoresenssi- tai fosforenssi-ilmiö tai molemmat.



Kuva 5. Luminoivan ilmiön virittävän valolähteen spektri. Ylempi käyrä kuvaa fluoresenssisäteilyä ja alempi käyrä fosforensisäteilyä.

Joskus fosforensi on helppo havaita kvalitatiivisesti jopa paljaalla silmällä. Fosforensin kuten myös fluoresenssin tarkka mittaaminen vaatii sen sijaan huolellisuutta ja hallitut mittaolosuhteet. Merkittävimmät häiriölähteet ovat ilmiön virittävän valon ei toivottu sirona tai heijastus tai kohteeseen laitteiston ulkopuolelta osuva säteily. Näiden häiriöiden vaikutus voidaan poistaa esittämällä sekundäärisäteily ja ajastamalla eli ikkunoimalla mittaustapahtuma oikein.

Fosforensissa ja fluoresenssin mittauksessa on kyse erittäin pienten energiamäärien havainnoinnista. Yhdessä molekyyllisessä kahden energiatilan välinen energiaero on suuruusluokkaa yksi elektronivoltti. Mittaamalla aineen säteilemän fluoresenssi- tai fosforensisäteilyn aallonpituus ja intensiteetti, joka on verrannollinen aineessa säteilyn vaikutusalalla aikayksikössä tapahtuvien viritysten lukumäärään, pystytään emittoitunut energia sekä fluoresenssin ja fosforensin suhteellinen määrä laskemaan helposti. Fosforensi-ilmiön todennäköisyys on huomattavasti pienempi kuin fluoresenssi-ilmiön. Täten fosforensin mitatut intensiteetit ovat useita kertalukuja pienemmät kuin fluoresenssin.

Laitteisto

Mittaukset tehtiin spektrofotometrillä (luminesenssi spektrometri Perkin-Elmer LS-50B). Virityssäteilyn lähteenä laitteessa oli ksenonlamppu, joka tuotti lyhyitä valopulseja. Luminesenssimittauksissa käytettiin levymäisiä 3 cm paksuja kuusipölkkyjen päistä moottorisahalla sahattuja kiekkonäytteitä, jotka olivat tervettä ja osin lahoa puuta. Spektrofotometrin luminesenssin ilmaisimen aallonpituuden erotuskyky oli vähintään 0,1 nm ja ajoituksen ohjaus vähintään 10 ns.

Tulokset

Tutkimusten tavoitteena oli kehittää kuusen tyvilahon laajuuden ennustavaa mallia. Tuloksista saatiin terveen puun fotoluminesenssispektri ja aallonpituudet, jotka virittävät tyvilahon ilmaisevan fluoresenssisäteilyn ja tyvilahon olemassaolon osoittavan karakteristisen emissio-, sekä virittävän ja emittoituneen säteilyn ajoitus.

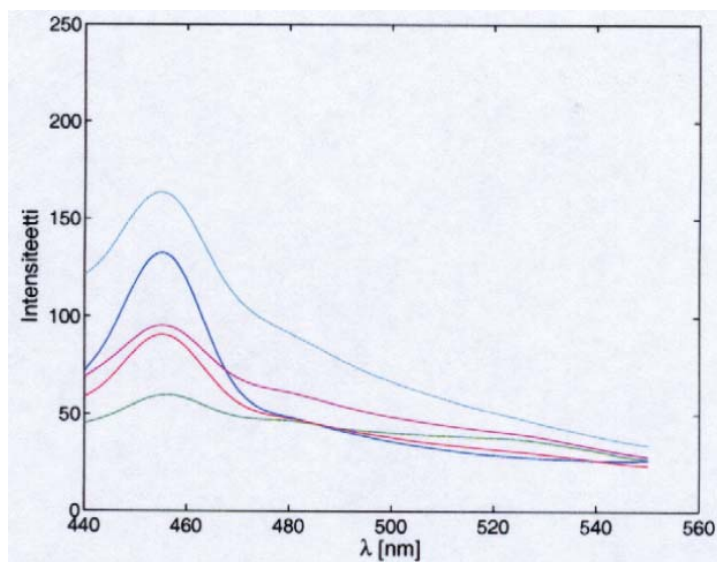
Fluoresenssimittauksessa sopivat ultraviolettiviritysenenergiat olivat aallonpituusvälillä 330 – 400 nm. Materiaalin säteilytyksestä aiheutuvat Rayleigh- ja Raman-sirona häiritsevät mittauksia silloin kun oltiin viritysenenergioiden ulkopuolella. Fluoresenssimaksimi oli viritysenenergioilla 330 – 400 nm leveä ja pienempi kuin viritysenenergialla 500 nm (kuva 6).

Mittaamalla eriasteisesti lahoja kappaleita havaittiin yhteys lahopitoisuuden ja emittoituvan säteilyn intensiteetin välillä. Lahon puun ja terveen puun emissiospektrin maksimaalinen intensiteettiero oli noin 50 %. Karakteristisen fluoresenssin tunnistus tapahtui luotettavasti 0,1 nm:n ikkunasta, jolloin laho havaittiin herkästi.

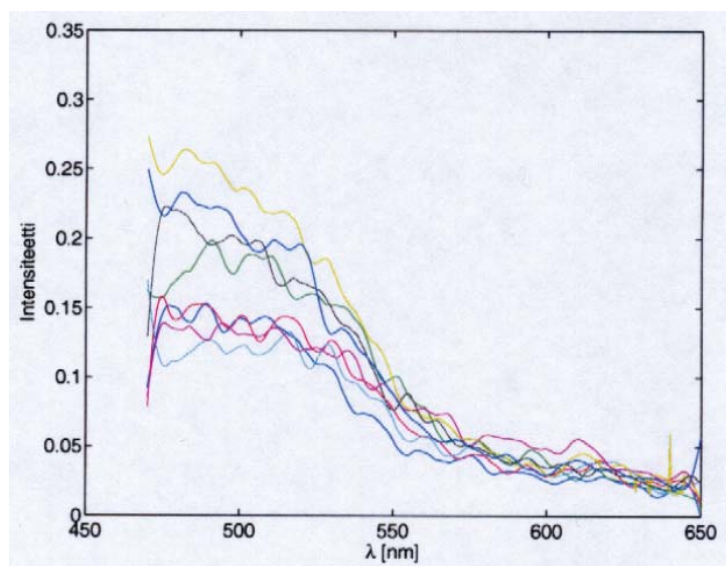
Fosforenssimittauksessa viritysenenergia oli n. 300 nm ja emissio tapahtui aallonpituusvälillä 550 – 650 nm (kuva 7). Taustakohina häiritsee fosforensispektrin erottumista ja ylittää helposti sen intensiteetin, joka on vähemmän kuin 1/10 koko emissiospektrin suurimman heijastuksen integroidusta intensiteetistä. Silmin erottumattoman lahon ja terveen puun välillä havaittiin spektrissä 2–3 kertaisia intensiteettieroja. Karakteristisen fosforenssin tunnistus tapahtui fluoresenssimittauksen tavoin luotettavasti 0,1 nm:n ikkunasta, joten laho havaittiin tässäkin herkästi.

Fotoluminesenssin viritysaallonpituudeksi saatiin fluoresenssissa 400 nm ja fosforenssissa 305 nm ja sopiva fosforenssin aikaikkuna oli 2 ms. Näiden parametrien muuttaminen sammutti hyvin nopeasti lahon vasteelle ominaisen luminenssi-ilmiön.

Fluoresenssi on riippuvainen lahon määrästä ja fosforenssi on laholle karakteristinen - siksi fosforenssimittaus on luotettavampi menetelmä kuin fluoresenssimittaus. Käytännön sovelluksessa fluoresenssimittaus soveltuu hyvin lahon määrän mittaukseen ja laholle karakteristinen fosforenssimittaus lahon tunnistukseen. Tutkimukset tehtiin moottorisahalla sahatuista näytteistä, joten voidaan olettaa että myös suoraan puurungon katkaisupinnalta on mahdollista mitata fluoresenssi- tai fosforenssispektri.



Kuva 6. Fluoresenssin virittävä säteilytaajuus. Käyrät tarkoittavat eri viritysenergioita, joista sinisellä merkitty tuotti parhaan resoluution.



Kuva 7. Fosforenssin virittävä säteilytaajuus. Käyrät tarkoittavat eri viritysenergioita, joista keltaisella merkitty tuotti parhaan resoluution.

3.4 Mikroaaltomenetelmät

Ilmiö

Mikroaallot ovat sähkömagneettista säteilyä taajuusalueella 10^9 Hz – 10^{12} Hz. Mikroaaltojen aallonpituus on suuruusluokkaa 1 cm. Niiden vuorovaikutusmekanismit aineissa ovat samankaltaisia kuin valolla. Mikroaaltojen energia on noin neljännes vastaavasta näkyvän valon aaltojen energiasta. Tästä syystä mikroaallot kykenevät virittämään atomien ulkokuorilta vain hyvin lähellä toisiaan olevia energiatiloja.

Mikroaalloilla tehty emissio- tai absorptiomittaus välittää tietoa aineen pinta- ja sisäosien rakenteesta. Mikroaallot absorboituvat nopeasti veteen ja kuumentavat sen. Mikroaaltosovelluksista yksi tunnetuimmista onkin aineen kosteuden mittaus: energiaspektristä tunnistetaan vesi ja sopivin kalibrointi ja mallinnusmenetelmin päätellään aineen kosteusprosentti (Nyström & Dahlquist 2003).

Mikroaalloilla tehty polarisaatiomittaus on toinen sovellus saada tietoa aineesta. Tämä perustuu siihen, että aineissa joissa molekyylien ja sähkökentän välinen kytkentä on erilainen kentän eri värähtelysuunnissa syntyy muutoksia sähkökentän muotoon, mm. polarisaatioon. Kolmas sovellus on interferenssimittaus, jossa tutkitaan mikroaaltokenttään syntyneitä aaltojen vaihe-eroja. Polarisaatio-, vaihe-ero- ja interferenssimittauksissa havainnoitavat yksityiskohtat ovat yleensä säteilyn aallonpituuden suuruusluokkaa. Mikroaallot soveltuvatkin hyvin aineen suurikokoisten eli kokoluokan 1 mm – 10 cm yksityiskohtien havainnointiin (Towness ym. 1975, Currie & Brown 1987).

Laitteisto

Mittaukset tehtiin automaattisesti ohjatulla ristisiirtopöydällä Agilent Technologies 8722ET vektoripiirianalysointilaitteella. Mikroaallot tuotettiin aaltoputkiantenneilla, joiden apertuurit olivat taajuuskaistoilla 4–6 GHz: 20*40 mm ja 8–10 GHz: 9*19 mm (liite 2). Mittaukset tehtiin 25 mm paksuista puukiekoista lähikenttämittauksella, jolloin näytteeseen osui palloaaltorintama.

Tulokset

Tavoitteena oli tutkia mikroaaltomenetelmällä puutavarapölkyn kosteuden ja oksikkuuden mittausta ja rungon homogeenisuuden määrittämistä (sydän- ja pintapuun erottaminen). Mittaukset tehtiin uunikuivalle (kosteussuhde 1,8 %), ilmakehille (kosteussuhde 16,2 %) ja tuoreelle (kosteussuhde 81,3 %) kuusipuulle.

Mikroaaltojen heijastuessa puun pinnasta polarisaation vaihe-eromittauksella saatiin selvä ero tuoreen, ilmakehän ja uunikuivan puun välille (liite 2). Vaihe-ero oli erityisen selvä mikroaaltotaajuudella 8–10 GHz, jolloin se oli suurimmillaan noin 150 MHz.

Taajuuskaistalla 5,2–5,6 GHz emissiomittauksessa saatiin sydänpuussa selvä ero eri kosteustasojen välille; vaihe-ero oli vähintään 0,5 GHz. Vaikuttaisi realistiselta tavoitteelta päästä kosteussuhteen mittauksessa taajuuskaalaa tihentämällä jo tässä käytetyllä menetelmällä jopa noin 2 %-yksikön tarkkuuteen. Vastaavissa absorptiomittauksissa saatiin tällä taajuuskaistalla kosteussuhteen erotuskyvyksi sydänpuussa noin 5 %-yksikköä. Sydänpuussa ja pintapuussa mikroaallot käyttäytyivät hieman eri tavoin primäärisäteilyn taajuuden kasvaessa, jolloin sydän- ja pintapuun kosteussuhteen mittauksen havainnot lähenivät toisiaan.

Erilaiset oksat ja muut poikkeavat kohdat puuaineessa aiheuttavat vaihe-eroja emittoituneen mikroaallon polarisaatioon. Tähän ilmiöön perustuen tutkittiin oksakiehkuroiden paikan määrittystä mikroaaltojen polarisaatioon perustuvalla menetelmällä. Tässä käytetyllä aallonpituudella oksa-alan erotuskyky oli n. 1 cm². Tämä riittää sinänsä sahatukkien laatuoluokitukseen, mutta ei yksittäisten oksien laadun ja koon tarkkaan määrittämiseen. Yksittäisten oksien tarkkaa mittaamista vaikeuttivat pölkyn pyörimisestä koetilanteesta aiheutunut mittaustäsisyyden muuttuminen ja toisten oksien sijainti mitattavan oksan läheisyydessä.

Mikroaaltomenetelmistä saadut tulokset on esitetty yksityiskohtaisesti MILA-laboratorion koostamassa raportissa (Haapalainen ym. 2005, liite 2).

3.5 Akustinen menetelmä

Ilmiö

Ultraääni on lyhytaaltoista ääntä. Sen taajuus alkaa kuuloalueen ylärajalta (20 kHz) päättyen alueelle, missä ultraäänien energia riittää murtamaan atomien välisiä sidoksia (10 THz). Ultraääntä synnytetään ja vastaanotetaan esimerkiksi kvartsikiteellä. Samalla kvartsikiteellä pystytään sekä tuottamaan että vastaanottamaan ultraääntä. Kiteiden ominaisvärähtelyihin perustuvat ultraäänilaitteet tuottavat vain tiettyjä mikroaaltotaajuuksia, mikä on otettava huomioon mittausmenetelmää suunniteltaessa.

Ultraääni etenee puhutun äänen tavoin vain väliaineessa ja sen käyttäytymistä rajapinnassa säätelee aineiden akustinen ominaisimpedanssi. Tämän perusteella pystytään valmistamaan sovitimet, joilla värähtelevästä kiteestä saadaan siirtymään väliaineeseen aikayksikössä maksimaalisesti energiaa. Osuessaan kahden aineen rajapintaan, joiden akustinen ominaisimpedanssi on erisuuruinen, osa ultraäänestä heijastuu rajapinnasta ja osa läpäisee sen. Mittaamalla ja analysoimalla tämä vuorovaikutustapahtuma saadaan tietoa mm. ainekerrosten paksuudesta, homogeenisuudesta ja materiaalin rakenteesta.

Ultraäänien energiasta heijastuu suurin osa rakenteen ulkopinnasta, kun tarkastellaan kerrosmaista rakennetta. Esimerkiksi puun tai pölkyn kaarnasta heijastuu signaalista noin 99 %, seuraavaan kerrokseen jää 1 %, josta takaisin heijastuu taas 99 %, jne. Signaalin kantama informaatio kerroksen paksuudesta siis vähenee äänipurskeen edetessä syvemmälle aineeseen. Tämänkin informaatio sisältää enemmän rakennetietoa kuin kerroksen paksuustietoa. Rakennetiedon suodatuksen jälkeä jää jäljelle paksuustieto.

Laitteisto

Mittauksissa käytettiin yhdysvaltalaisista ultraäänilaitteistoa Sonda 007 CX Airscan, joka toimii kosketuksetta taajuudella 120 kHz. Laitteistolla pystyttiin mittaamaan sekä läpäisy- että heijastusspektrejä. Tässä pitäydettiin pelkästään heijastusspektreissä, jotka syntyivät osittain kuorituista kuusitukeista. Mitattava puukappale oli kiinnitetty siirtopöytään. Se ja anturit oli tahdistettu niin, että mittauskohteen pinnasta saatiin automaattisesti paikkaresoluutiolla 1 mm:n ultraäänikuva.

Tulokset

Kuusitukin kuoren paksuuden mittaus ultraäänimenetelmällä vaikutti lupaavalta. Paljas kuoreton poikkileikkaus erottui mittauksissa selvästi kaarnaisesta alueesta ja kaarnaisella alueella havaittiin rakennevaihteluita (liite 2). Heijastuneen äänisignaalin voimakkuus oli suurin paljaasta rungosta. Kuoresta tapahtuva heijastus vaimeni sitä enemmän mitä useammasta kaarnakerroksesta se heijastui. Kaarnasta heijastunut ultraääni sisälsi myös kaarnan pintarakennetietoa.

Ultraäänimenetelmällä saadut tulokset on esitetty yksityiskohtaisesti MILA-laboratorion koostamassa raportissa (Haapalainen ym. 2005, liite 2).

3.6 Lahoalueen määrittäminen tukin poikkileikkauspinnalta

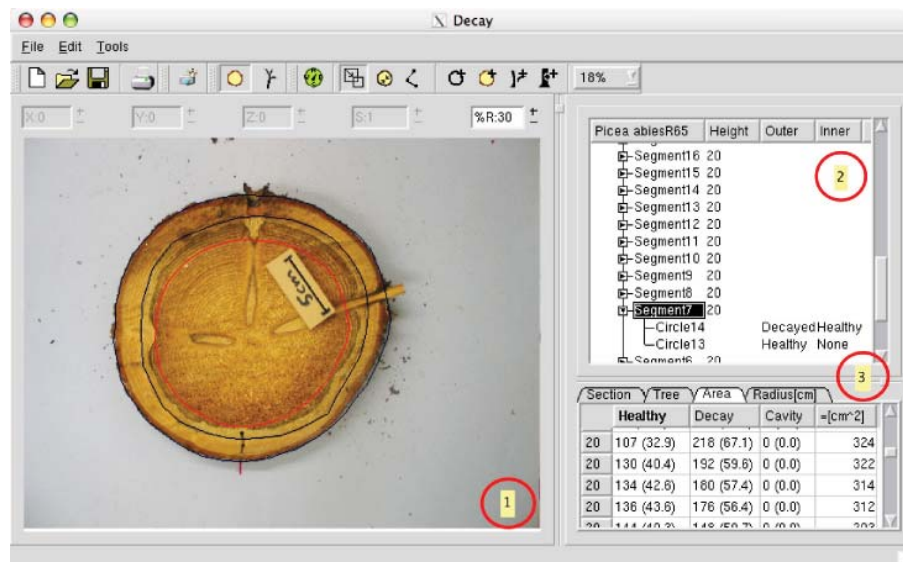
Tässä kehitetty menetelmä oli osa Tuukka Heikuran diplomityötä (liite 3). Tavoitteena oli tehdä pohjatyötä menetelmälle, joka pystyisi tunnistamaan automaattisesti lahoalueen muodon ja laskemaan sen pinta-alan pölkyn poikkileikkauspinnalta. Pohjatyössä lahoalue merkittiin kuvatiedostoon aistivaraisesti, mutta tästä eteenpäin laskenta tapahtui automaattisesti.

Lahoalueen mallintamiseen maannousemasiemenen infektoimista kuusista kaadettiin Tuusulan Ruotsinkylästä 6 kpl kuusirunkoja. Kaadetuista puista sahattiin 20 cm:n välein kiekot, jotka valokuvattiin digitaalikameralla. Kiekkojen digitaalikuvista laskettiin puukohtaisesti perättäisten kiekkojen lahojen ja terveiden alueiden pinta-alat tutkimuksessa kehitetyllä Decay-ohjelmalla (liite 3). Kokeellista tietoa verrattiin lahon leviämismallilla saatuihin tuloksiin (kuva 8). Tässä pääteltiin dimensioanalyysin avulla lahon puuaineksen pinta-ala rungon eri korkeuksilla. Mallin funktioksi määriteltiin

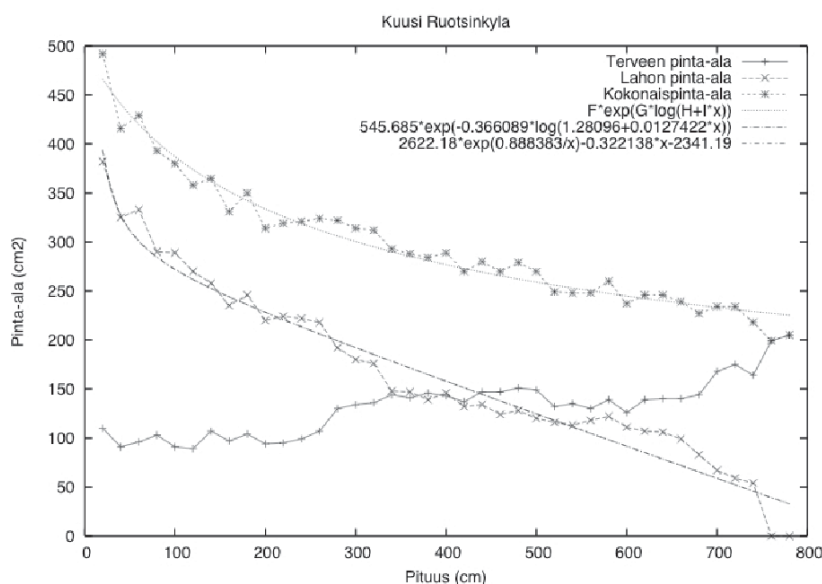
$$V = K * \exp(f(x) + C) \quad (2)$$

missä V on lahoalueen pinta-ala, K on verrannollisuuskerroin, x on lahon nousukorkeus ja C on skaalaustekijä.

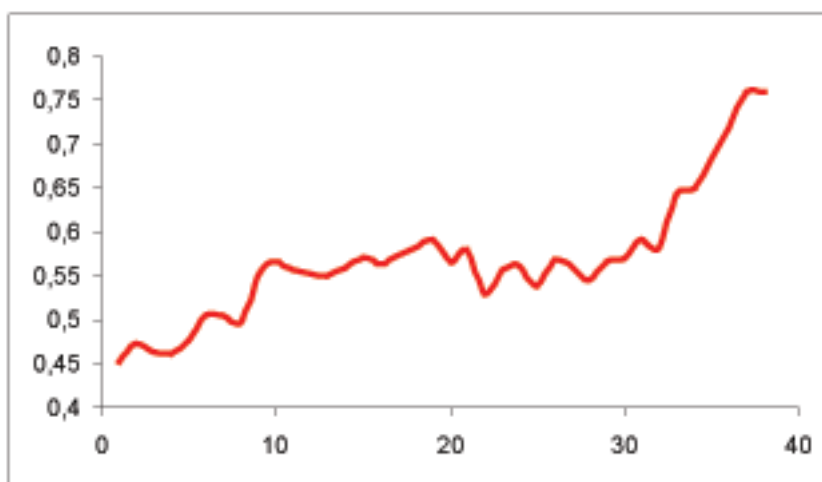
Kuvassa 8 näkyvät lahoalueen väri vaihtelut ja trendi siten, että viimeiseksi lahoamaan alkaneella alueella väri lähenee terveen puun väriä.



Kuva 8. Laho kuusen kaatoleikkauksesta sahattun kiekon poikkileikkaus. Decay-ohjelman mallilla lasketut kiekon ulkoreuna ja terveen puun raja on merkitty mustilla kehäviivoilla ja lahoalueen raja punaisella kehäviivalla. Lahoaluetta on 50 % pinta-alasta.



Kuva 9. Levenbergin ja Marquardtlin menetelmän tuottamat profiilit erään Ruotsinkylän kuusen lahoalueiden pinta-aloille eri korkeuksilla lähtien rungon tyvestä.



Kuva 10. Esimerkki kuusen lahon värimuutosta kiekon pinnasta ytimeen suhteellisena vaaleusarvona havainnollistavasta raakadatasta.

Tuukka Heikuran diplomityössä kehitetyllä laskentatavalla mitattiin viidestä lahoppuusta tyvestä lukien puolen metrin välein sahatuista kiekkoista lahoalueen pinta-alat ja määritettiin tämän jälkeen Levenbergin ja Marquardtlin optimointimenetelmää käyttäen Gnuplot-ohjelmassa lahoalueen etenemistä puun korkeussuuntaan kuvaavat yhtälöt (kuva 9). Gnuplot-ohjelma on funktioiden ja kuvaajien tekoon tarkoitettu interaktiivinen komentopohjainen ohjelma. Malli kuvaa hyvin lahoalueen sijaintia ja lahon kehittymistä kuusirungossa. Koska funktio on jatkuva, se on katkaistava terveen puun alkaessa (kuva 10). Tähän kehitettiin oma katkaisufunktio, jossa käytettiin karkeasti laskettuja parametreja; niitä on tarkoitus täsmentää myöhemmissä tutkimuksissa.

Menetelmän tarkkuus riippuu siitä, miten onnistuneesti katkaisufunktioon saadaan mitattua lahon suhteellinen vaaleus ja miten paljon satunnaiset tekijät vaikuttavat tähän suhteeseen. Yläraja lahon nousukorkeudelle voidaan laskea Tammisen (1985) lahon etenemistä kuusirungossa kuvaavalla mallilla.

3.7 Aistivaraisten laadutuksen muuntaminen laitepohjaiseksi

Sasu Haminen pro gradun -tutkielman osana kehitettiin sumean logiikan pohjalta menetelmää laskentamalliksi puutavaran kustannustehokkaan ohjauksen tueksi. Tavoitteena oli kehittää mäntysahan tuotantolinjalta saatava aistivarainen laatu-tieto numeerisesti mitattavaksi ja analysoitavaksi, ja laatia ennustemalli, jolla saheet voidaan jakaa visuaalisiin laatu-luokkiin tarkemmin kuin pelkässä aistivaraissa luokituksessa. Laatulajittelun lähtökohtana käytettiin pohjoismaisen havusahatavaran laatu-luokitusääntöjä, ns. NT-laatu-luokitusta (Nordic Timber ... 1994). Ohjausparametreina käytettiin saheiden laatu- ja hintatietoja. Tulokset otettiin kaksikäyttöön mäntysahaa.

Menetelmän testaamiseksi selvitettiin, miten kuvamittaukseen perustuvaa laadutusjärjestelmää voitaisiin kehittää riippumattomaksi aistivaraista laadun tarkastuksesta. Saheiden laatu-parametrit priorisoitiin, niille annettiin sopivat painokertoimet ja kehitettiin sumeaa logiikkaa soveltaen parannusta vanhaan laadutusmenetelmään. Menetelmän soveltamista rajoittaa se, että käytännön sovellus on aina saha- ja tuotantolinjakohtainen.

Mäntysahoilla sahatavaran laatuvaatimukset olivat lähellä toisiaan. Sahatavaran hinta osoittautui merkittäväksi ohjausparametriksi. Sahatavarasumasta saatavaan hintaan pystyttiin vaikuttamaan tarkentamalla sahatavaran laatu-luokitusta luokkarajoilla. Havaittiin myös, että parhaiden laatu-luokkien saannon maksimointi tehostuu laaduttamalla tukit entistä tarkemmin ennen sahausta ottaen huomioon sahojen erityisvaatimukset sahatavaran lajittelun ja tuotantolinjojen teknisten vaatimusten suhteen.

Sahatavaran hinnan ja laatu-tunnusten painokertoimien pohjalta laadittu laskentamalli pystyy myös ennustamaan ja tekemään ehdotuksia siitä, millä tuotantolaitoksella puutavaranippu tai yksittäinen pölkky kannattaisi jalostaa tuotteiksi. Tuloksena saadaan myös sekä sanallinen että numeerinen tieto valmistetun sahatavaran ominaisuuksista.

Tulokset on esitetty yksityiskohtaisesti Sasu Haminan pro gradu -tutkielmassa (liite 4).

4 Puun laatu-tehtävät ja niiden mittausmahdollisuudet

4.1 Laatu-tehtävät

Taustaa

Raakapuun laatu vaikuttaa olennaisesti puusta saatavien tuotteiden laatuun. Vaikutus on suurin puutuoteteollisuuden perustuotteissa, sahatavaraissa, vanereissa ja viiluissa. Raaka-aineen suhteellinen merkitys pienenee jalostusasteen kohotessa. Korkealaatuiseen raaka-aineeseen nojaavissa erikoistuotteissa raaka-aine säätelee kuitenkin huomattavasti enemmän tuotteen yksikköarvoa kuin standardituotteissa.

Raakapuun laatu-tehtäviä määritetään nykyään sekä subjektiivisesti aistivaraisten havainnoin että tiettyjen objektiivisesti mitattavien ominaispiirteiden pohjalta. Huomioon otettavat laatu-tehtävät ovat ajan myötä valikoituneet tarkoituksenmukaisuuden sekä lopputuotteiden ja tuotantoprosessien vaatimusten mukaisesti. Niihin ovat vaikuttaneet kokemusperäinen tieto, käytettävissä olevat mittaus- ja arviointimenetelmät, tuotantomenetelmät, jatkojalostustavat, tuotesovellukset ja asiakasarvostukset. Siten puun laatu-tehtävät kuvastavat tuotteissa niin teknisiä ominaisuuksia kuin esteettisiä piirteitä.

Raakapuun fysikaaliset ominaisuudet riippuvat mm. kasvuympäristöstä, puulajista, puuyksilöistä, puun käsittelystä ja varastoinnista sekä vuodenajasta (esim. Kärkkäinen 2007). Fysikaalisiksi ominaisuuksiksi luetaan joukko yksiselitteisesti mitattavissa olevia fysikaalisia piirteitä kuten rungossa ja pölkyssä tarkastelusuunnasta riippuvat lujuus- ja jäykkyysominaisuudet (esim. Alméras 2005). Fysikaalisiin ominaisuuksiin voidaan lukea myös näkyviä ominaisuuksia kuten puun ja puutavarapölkyn dimensiot, muoto, kierteisyys ja oksikkuus, kuoren ja poikkileikkauspintojen väri ja sileys sekä puutavaran kunto näkyviltä osiltaan (väri, laho, korot, halkeamat, jne.).

Raakapuun laatua suhteessa tuotevaatimukseen lähestytään usein laatuluokitusten kautta. Vaikeinta laatuluokituksessa on useimmiten päättää siitä, miten laatuluokka määräytyy eri laatupiirteiden kombinaatioista ja mihin määritellään rajat naapuriluokkien välillä.

Laatutekijät eivät ole toisistaan riippumattomia suureita. Esimerkiksi luston leveys, rungon paksaus ja muoto riippuvat kaikki puuaineen solutason ominaisuuksista. Solujen ominaisuudet taas riippuvat mm. puiden perimästä, kasvuolosuhteista ja satunnaisista bioottisista luonnonilmiöistä (esim. sieni- ja hyönteisvial) ja abiottisista häiriötekijöistä (esim. lumen tai tuulen vaikutukset). Solujen kasvu rungon eri kohdissa ei ole samanlaista säteen ja pituuden suunnassa, joten tietyistä rungon kohdista saatua tulosta ei voida yleistää koskemaan koko puuta. Mittauksia ja havaintoja on tehtävä koko rungon tai puutavarapölkyn alueelta, jotta sen laatupiirteistä saataisiin luotettava kuva.

Tulokset

Metlan osahankkeessa määriteltiin tärkeimmät laatutekijät, joihin PUULA-hankkeessa tuli keskittyä puuta koskemattomien ja erityisesti kuvantavien mittausten menetelmien tutkimuksissa sovellusten kehitysalustoja rakennettaessa, yhtäältä laatutekijöiden lopputuotemerkityksen kannalta ja toisaalta käytännöllisen mitattavuuden ja realistisen mittaustarkkuuden näkökulmista. Selvitys tehtiin täsmähaastatteluin kahdelta suomalaiselta ja yhdeltä ruotsalaiselta sahalla, yhdeltä suomalaiselta vaneritehtaalta ja kahdelta suomalaiselta puumassatehtaalta (hiomo, sulfaattisellulosaatehdas). Haastatellut henkilöt olivat yritysten tuotanto- ja kehityspäälliköitä. Selvityksellä pyrittiin muodostamaan kuva asiasta erityisesti männyn käytön näkökulmasta. Tulokset on esitetty yksityiskohtaisesti osana Sasu Haminan pro gradu -tutkielmaa (liite 4). – Metsäteho Oy teki hankkeessa rinnakkaisia selvityksiä mitattavista suureista ja kohteista ja tulosten mahdollisista sovelluksista runkojen apteerauksen ja tärkeimpien puutavarylajien lajittelun kannalta. Nämä tulokset on julkaistu osana Metsätehon osahankeraporttia (Sorsa ym. 2004).

Taulukkoon 3 on koostettu haastatteluisia esille tulleet raakapuun laatutekijät yleisesti ja arvio kuvantavilla mittaustekniikoilla mahdollisuuksien rajoissa määritettävissä olevista laatutekijöistä selvityksen kohteena olleilla metsäteollisuuden aloilla. Alataulukot on rakennettu siten, että tuotantolinjakohtaisissa luetteloissa alkupäässä esitetyt laatutekijät ovat tärkeämpiä kuin loppupäässä esitetyt. Tämä ei tarkoita välttämättä sitä että loppupään laatutekijät eivät voisi olla tärkeitä, vaan mahdollisesti sitä, että niiden mittaamiseen ei koettu olevan käytettävissä luotettavia menetelmiä.

Eri laatutekijöiden yksikäsitteinen priorisointi ei ollut mahdollista, koska laatutekijät painottuvat eri tavoin eri metsäteollisuuden prosesseissa, tuotantolinjoilla ja tuotteissa. Laatutekijöiden painotus voi olla erilainen myös sellaisilla periaatteella samoja perustuotteita valmistavilla tehtailla, joilla oman tuotannon jalostusaste on erilainen. Laatutekijöiden erilainen painotus sahoilla ja vaneritehtailla voi johtua myös sahalle tulevien tukkien alueellisista laatueroista.

Taulukko 3. Raakapuun keskeiset laatutekijät tärkeysjärjestyksessä selvityksen kohteena olleilla metsäteollisuuden aloilla ja arviot mahdollisista mittausmenetelmistä ja niiden käytännöllisistä toteutusmahdollisuuksista täsmähaastattelujen perusteella.

Laatutekijä	Mahdollinen mittausmenetelmä	Käytännöllinen toteutettavuus
A. Mäntysaha		
Puulajin tunnistus	(va)	?
Tukkilajin tunnistus	(va)	+
Oksaisuus	(va, ma)	+
Lenkous ja mutkat	(va)	+ (la, ke)
Tukin muoto	(va)	+
Tukin pituus ja läpimitta	(va)	++ (ke)
Kasvunopeus (luston leveys- jakauma pölkyn päässä)	(va)	+ (la, ke)
Lustokenttä (lustojen leveys- jakaumakenttä)	(va)	+ (la, ke)
Lustojen lukumäärä (puun ja puuaineen ikä)	(va)	++ (la)
Lustotiheys (lustojen leveys)		
Väri ja väriviat	(va)	+ (la, ke)
Laho	(va, lu)	+ (la, ke)
Kuori	(va, lu, uä, ma)	+
Kierteisyys	(va)	?
B. Mäntysellutehdas (sulfaatti)		
Puulajin tunnistus	(va)	?
Kuidun ominaisuudet	(va, uä, ma)	?
Kuiva-aineen määrä	(uä, ma)	?
Kuori	(va, uä, ma)	+
Pölkyn läpimitta	(va)	++ (ke)
Pölkyn pituus	(va)	++ (ke)
Pihkaisuus	(va, lu)	?
Laho	(va, lu, ma)	+ (la, ke)
Tuoreus	(ma)	?
Väriviat	(va)	+ (la, ke)
Noki	(va, lu)	?
Oksaisuus	(va, ma)	+
C. Kuusihiertäjä		
Puulajin tunnistus	(va)	?
Väri ja väriviat	(va)	+ (la, ke)
Kuidun ominaisuudet	(va, ma, uä)	?
Kosteus	(ma, uä)	?
Jäisyys	(uä, ma)	?
Tuoreus	(ma)	?
Kuorittavuus	(va, ma)	?
Laho	(va, ma, lu)	+ (la, ke)
Pölkyn pituus ja läpimitta	(va)	++ (la, ke)
D. Kuusihio		
Puulajin tunnistus	(va)	?
Pölkyn pituus ja läpimitta	(va)	++ (la, ke)
Pölkyn muoto	(va)	+
Vaaleus	(va)	+
Väriviat	(va)	+ (la, ke)
Kuorittavuus	(va, ma)	?
Laho	(va, lu, ma)	+ (la, ke)
Kuidun ominaisuudet	(va, ma)	?

Taulukko 3 (jatkuu)

Laatutekijä	Mahdollinen mittausmenetelmä	Käytännöllinen toteutettavuus
E. Vaneritehdas		
Tukin läpimitta	(va)	++
Tukin pyöreys	(va)	+
Tukin kapeneminen	(va)	+
Tukin pituus	(va)	++
Lenkous	(va)	+ (la, ke)
Oksaisuus	(va, ma)	+
Laho	(va, lu, ma)	+ (la, ke)
Väri	(va)	+ (la, ke)
Väri viat	(va, lu)	+
Lustotiheys	(va)	+
Ytimen sijainti poikkileikkauksessa	(va)	?

Selitteet:

Mahdollinen mittausmenetelmä:

uä = ultraäänimittaus, ma = mikroaaltomenetelmät, va = valokuvaus, lu = luminesenssimenetelmät

Käytännöllinen toteutettavuus:

? = mahdollinen mutta ei ennakkotietoja, + = mahdollinen mutta sisältää epävarmuustekijöitä,

++ = mahdollinen ennakkotietoon perustuen, - = onnistuminen epävarmaa,

la = mitattu laboratorio-olosuhteissa, ke = samantapainen menetelmä käytössä tehdasympäristössä

Kaikilla tuotantolaitoksilla oli tärkeätä tunnistaa puulaji oikein ja pystyä määrittämään pölkyn muoto ja dimensiot sekä laho- ja väri viat. Tärkeänä pidettiin myös mahdollisuutta määrittää lustotiheysjakaumia, lustokentän ominaisuusjakaumia ja paksuuskasvun dynamiikkaa ajatuksena, että niistä pystyttäisiin ennustamaan esim. kuitujen ominaisuuksia tai tarkentamaan sahaussuunnitelmia.

Sahapuulla tärkeitä laatutekijöitä olivat kaikilla tuotantolaitoksilla myös yleinen oksaisuus, oksajakaumat ja oksien laatu. Mekaanisen puumassan valmistuksessa prosessointimenetelmä saneli osan laatutekijöistä, joita olivat ennen kaikkea kuorittavuus, jäisyys ja pölkyn dimensiot. Osa laatutekijöistä liittyi puumassan jatkokäytön prosesseihin ja lopputuotteeseen, esim. väri, kosteus ja kuidun ominaisuudet ja ominaisuuksien tasaisuus. Tärkeitä mutta vaikeasti mitattaviksi arvioituja ominaisuuksia olivat mm. kuorittavuus ja kuidun ominaisuudet. Myös vanerin valmistusprosessiin liittyi tavanomaisin menetelmin vaikeasti mitattavia laatutekijöitä, kuten sorvipölkyn lustotiheys ja ytimen sijainti pölkyn poikkileikkauksessa.

4.2 Mittausmahdollisuudet

Arviot puuta koskemattomien mittausmenetelmien käyttömahdollisuuksista on esitetty taulukossa 3. Silmin nähtävien laatutekijöiden mittaukseen soveltuu periaatteessa aina valokuvaus. Sen soveltamista rajoittaa tarve sijoittaa kameroita tuotantoprosessin eri vaiheisiin ja optisesti vaikeisiin olosuhteisiin.

Useiden silmin näkymättömien laatutekijöiden mittaukseen soveltuvat mikroaallot, ultraäänimittaus ja fotoluminesenssimenetelmät. Näistä varmistettiin kokeellisesti puuaineen oksaisuuden ja kosteuden mittaus mikroaaltomenetelmällä (luku 3.4) ja kuorellisen rungonosan erottaminen kuo-

rettomasta ultraäänimenetelmällä (luku 3.5) sekä lahon ja selluloosan määrän mittaus fotoluminesenssimenetelmällä (luku 3.3). Samalla tehtiin havainto pihkaisuuden erottumisesta fotoluminesenssimenetelmällä. Laserdiffraktiomenetelmällä voitiin mitata onnistuneesti kuusen trakeidien dimensioita ja saatiin hyvä ennuste selluloosapitoisuuden määrittämisessä (luku 3.2). Muiden taulukoissa 3 esitettyjen laatutekijöiden mittausmahdollisuudet em. menetelmillä arvioitiin näiden kokeiden ja olemassa olevien biofysikaalisten tietojen pohjalta.

Mittaustarkkuudet riippuvat sekä menetelmästä että mitattavasta suureesta. Tukkien ja pölkkyjen geometriset mitat on mahdollista mitata vähintään yhden prosentin tarkkuudella. Vaikeasti erottuvien laatutekijöiden identifiointi edellyttää useiden eri mittausmenetelmien yhteiskäyttöä. Esimerkiksi onko kyseessä pieni oksa, lika- tai lahojälki vai muu pieni värivirhe on mahdollista arvioida oikein vähintään 50 prosentin todennäköisyydellä. Todellisten ja tarkkojen virherajojen määrittäminen vaatii lisätutkimuksia.

Seuraavassa on esitetty luettelona, minkä puutavarapölkyn ja puuaineen ominaisuuksien mittaamiseen voitiin tehtyjen selvitysten perusteella suositella kuvamittausmenetelmien jatkotestausta, kun tarkastellaan pölkkyjen päätykuvia:

1. Kasvunopeus ja luston leveysjakaumat
 - keskimäärin vuodessa (leveys ja poikkileikkauspinta-ala)
 - vuosivaihtelu
 - kehitys ytimeistä pintaan ja läpimitan kasvun loppuminen
 - suuntajakaumat
 - radiaalijakaumat
2. Lustojen lukumäärä (puun ja puuaineen ikä)
3. Kevät- ja kesäpuun pinta-alaosuus
 - keskiluvut
 - kartat
 - histogrammikartat
4. Pölkyn läpimitta
5. Kuoren paksuus
6. Poikkileikkauksen pyöreys tai epäpyöreys
7. Ytimen sijainti poikkileikkauksessa
8. Oksakiehkuroiden lukumäärä
9. Sydänpuun ja pintapuun osuus
10. Laho
 - toteaminen
 - määrä
 - aste
 - tyvilahon nousukorkeus
11. Värivirheet
12. Pölkyn puuaineen kosteus

Lisäksi voitiin suositella jatkotestauksia kuorellisten pölkkyjen sivukuvien käytön pohjalta tavoitteena puulajin tunnistaminen sekä lenkouden ja mutkaisuuden ja kierteisyyden määrittäminen.

5 Puun laatutekijöiden mallintaminen

5.1 Laatua kuvaavia malleja

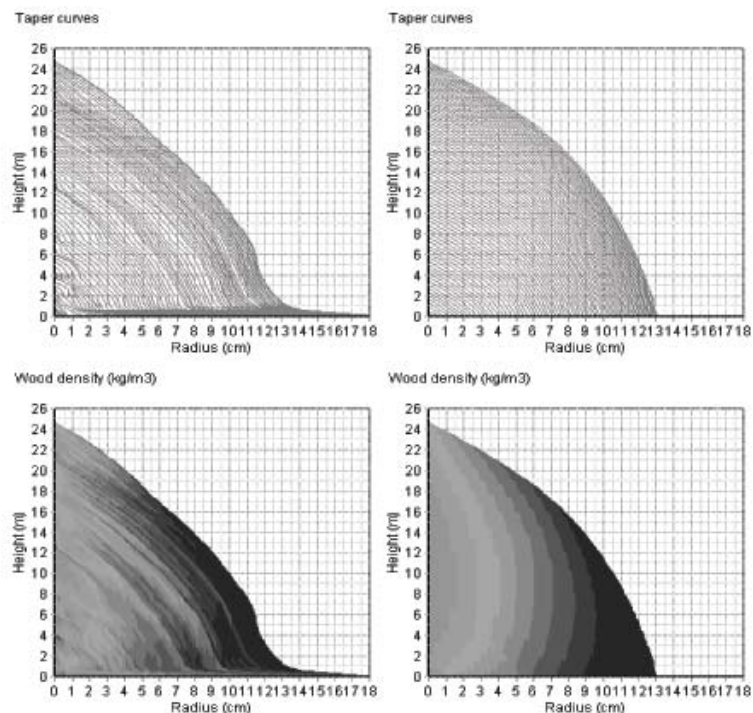
Puun laatumalleja on laadittu perinteisesti ennustamaan tukkipuuprosenttia (tukkipuun osuus koko rungon tai käyttöpuun tilavuudesta) tai tukkivähennystä (tukkiosan pituuteen tai tilavuuteen teknisten vikojen takia tehtävä vähennys). Rungon puutavaralajien tilavuudet on tavallisesti laskettu Laasasenahon (1982) runkokäyrien ja erilaisten apterausmallien perusteella (esim. Päivinen 1983). Rungot on jaettu puutavaralajeihin minimilatvaläpimittojen perusteella. Periaatteiltaan vastaavia malleja on laadittu myös yksittäisten runkojen tukkiosuuden ennustamiseen (esim. Laasasenaho & Sevola 1971). Pelkkiin läpimittoihin perustuvat ennusteet runkojen tukkiosuudesta ovat kuitenkin yliarvioita saha- tai vaneripuuta heikkolaatuisempien rungon osien muihin puutavaralajeihin siirtymien vuoksi.

Aikaisemmissa puun laatua kuvaavissa malleissa ennustettiin usein puun tilavuutta tietyn laatuluokituksen mukaisissa luokissa. Tällaisten mallien hyödyntämismahdollisuus rajoittuu kyseiseen laatuluokitukseen ja luokituksen muuttuessa joudutaan aina laatimaan uusia malleja. Näin ollen puun laatua kuvaavat mallit kannattaa laatia koskemaan ensi vaiheessa puun rakennetta. Ennustamalla puun rakenne riittävän tarkasti voidaan laatu esittää kulloinkin voimassaolevan laatuluokituksen mukaan.

Puun rakennetta sekä puun ja puuaineen ominaisuuksia käsittelevä tutkimustoiminta on ollut aktiivista Metlassa. Mäkinen ym. (1999) julkaisivat oksikkuuden ennustemallit männylle ja hieman myöhemmin kuuselle (Mäkinen ym. 2003a) ja koivulle (Mäkinen ym. 2003b). Tähän asti mallit ovat kuvanneet puun rakennetta lähinnä sahapuun laadun näkökulmasta. Viime vuosina on tehty tutkimuksia, joiden perusteella myös puuaineen ominaisuuksia, kuten puuaineen tiheys, kevät- ja kesäpuun osuus, sydänpuun määrä ja kuitujen dimensiot voidaan kytkeä puiden kasvunopeuteen (Mäkinen ym. 2007). Niin ikään on tehty tutkimus puuaineen tiheyden vaihtelun estimointimenetelmästä (Repola 2006).

Laatutekijöitä kuvaavia malleja on liitetty metsän kehitysmalleihin. Edellä mainitun tutkimustyön perusteella laadittuja ennustemalleja on hyödynnetty Metlassa kehityssä Motti-ohjelmistossa (Hynynen ym. 2002, Salminen ym. 2005). Sen avulla voidaan tarkastella leimikkokohtaisten lähtötietojen perusteella erilaisten puuntuotantovaihtoehtojen vaikutuksia hakkuukertymiin, puuston laadun kehittymiseen ja metsänkasvatuksen kannattavuuteen. Hakkuukertymien osalta voidaan tarkastella puutavaralajeittaisia kertymiä sekä puun ominaisuuksia niin tukki- kuin kuitupuun kannalta tärkeimpien laatuominaisuuksien osalta. Puuston laadun ennustemallit on kytketty myös Helsingin yliopistossa kehitettyyn PipeQual simulaattoriin (Mäkelä 1997, 2002, Mäkelä & Mäkinen 2003). PipeQual mallissa ennustetaan runkomuodon kehitys ja osa oksien kehityksestä puun elintoimintoihin perustuen.

Helsingin yliopiston ja Metlan yhteistyönä on kehitetty RetroSTEM-simulointiohjelma (Retrospective Stand and Tree Evaluation Model) (Vanninen ym. 2006). Motti- ja RetroSTEM-simulaattorit tuottavat kolmiulotteisia virtuaalisia runkoja, joissa syöttötietoina ovat rungon pituus, rinnankorkeusläpimitta ja latvussuhde. Rungoissa on kuvattuna geometrinen muoto, oksien sijainti, koko ja laatu, lustojen leveys ja puuaineen ominaisuuksia (kesäpuuosuus, sydänpuun osuus, tiheys, kuitujen dimensiot). Ohjelmistot on parametrisoitu kuuselle ja männylle ja testattu eteläsuomalaisissa ja ruotsalaisissa aineistoissa, joissa mallien ja ohjelmistojen toiminta on osoittautunut luotettavaksi (Kantola ym. 2008). Jos puun menneestä kasvusta ei ole mitattua tietoa, malleissa käytetään lähtötietoina rungon läpimittaa, pituutta ja ikää ennustettaessa rungon sisärakennetta.



Kuva 11. Mitattu ja simuloitu luston leveyden ja puuaineen tiheyden jakauma kuusirungon eri korkeuksilla. Mitä tummempi väri sitä suurempi tiheys. (Kantola ym. 2007)

Motti- ja RetroSTEM-mallien nykyversiot voivat jo hyödyntää mitattua tietoa puiden kasvunopeudesta (luston leveydet), jos sitä on saatavissa (kuva 11).

Jos Motti- tai RetroSTEM-malli kytketään hakkuukoneeseen, voidaan laskea ennusteita kaadetavan puun ja siten koko leimikon puuston sisäisestä laadusta. Ennuste sisältää tiedon kaikista edellä mainituista ominaisuuksista. Tieto on kolmiulotteisessa muodossa. Mallien ennusteita raaka-aineen sisäisestä laadusta voitaisiin täten hyödyntää puunkorjuussa (katkonnan ohjaus) ja puutavaran lajittelussa, käytössä ja jatkojalostuksessa.

5.2 Mallien luotettavuus

Mallien luotettavuutta käsittelevä tutkimustoiminta ei ole ollut kovinkaan vilkasta. Mallien luotettavuutta ja ennusteiden loogisuutta riippumattoman empiirisen testiaineiston avulla ovat raportoineet mm. Hynynen ym. (2002) ja Mäkinen ym. (2005). Mallien luotettavuutta on testattu lähinnä tapauskohtaisten tarkastelujen avulla vertaamalla tietyn laatukomponentin ennustetta mitatuille rungoille (Mäkelä 1997, 2002, Mäkelä & Mäkinen 2003).

Tilastollisiin poikkileikkausaineistoihin perustuvien tutkimusten mukaan rungon oksikkuus (Kärkkäinen 1986, Mäkinen & Colin 1998, 1999, Mäkinen ym. 2003a, 2003b) ja puuaineen ominaisuudet (Mäkinen ym. 2007) eivät riipu merkittävästi metsikön kasvupaikka- ja puustotunnuksista, jos rungon kasvunopeus, koko, runkomuoto ja latvusrajan korkeus vakioidaan. Kun rungon koon, muodon ja latvusrajan kehitys tunnetaan, voidaan puun laatutekijöiden odotusarvojen kehitys ennustaa oksikkuusmallien ja puun laatuominaisuusmallien avulla. Jos tunnetuissa rungon dimensioissa ja kasvunopeuksissa on systemaattisia virheitä, aiheuttavat ne harhaa myös laatutekijöiden ennusteisiin.

Simuloiduissa kehitysennusteissa on rungon dimensioissa aina virhettä, joka voi olla myös systemaattista eri ilmiöiden kuten harvennusohjelman suhteen. Jos kasvusimulaattorin ennustaman runkomuodon ennustevirhe ei ole riippumaton metsän käsittelyketjusta, saadaan kasvatusketjun suhteen harhaisia laatutekijöiden ennusteita. Kun puun koko ja runkomuoto tämän lisäksi vaikuttavat suoraan rungon laatuun, on kasvunopeuden ja runkomuodon kehityksen luotettava ennustaminen edellytys laadun kehityksen ja käsittelyriippuvuuden ennustamiseksi metsikkösimulaattorilla. Kehitettyjä menetelmiä voidaan kalibroida ennakkomittausten tai hakkuukoneen tuottamien mittausten perusteella.

Leimikko- ja kuviotasolla päätöksentekijää kiinnostaa hakkuusta saatavan puutavaran laatuja-kauma. Tätä jakaumaa ei voida kuvata oikein käyttämällä laatumallien odotusarvoja. Syynä on rungon laatuominaisuuksien epälineaarinen ja epäjatkuva vaikutus laatuun. Esimerkiksi tilanteessa, jossa laadun odotusarvo on niukasti huonomman laatuluokan puolella mutta 25 % rungoista kuuluu parempaa laatuluokkaan, odotusarvoon perustuva ennuste tuottaa vain huonompaa laatuluokkaa. Ilmiö voi aiheuttaa merkittävän aliarvion parhaiden laatuluokkien kertymiselle. Leimikko- tai kuviotasoon laatujauman harhaton kuvaaminen edellyttää laatutunnusten odotusarvon lisäksi niiden jakauman tuntemista metsikössä tarpeisiin.

6 Johtopäätökset ja kehitysnäkymät

6.1 Mittausmenetelmien käyttömahdollisuudet

Yleistä

Kuvantavin teknisin menetelmin on mahdollista havaita kaikki se puun ominaisuustieto, jonka ihmissilmäkin havaitsee. Tämän lisäksi esimerkiksi diffraktio-, fotoluminesenssi- ja mikroaltonetelmin saadaan suuri joukko ihmissilmälle näkymätöntä puun ominaisuustietoa. Yksinkertaisten laatutekijöiden, kuten rungon dimensioiden ja muodon mittauksen kautta kuvantavat menetelmät mahdollistavat rungon tilavuuden (kuorellisen ja kuorettoman) mittauksen käyttämättä mekaanisten mittausten soveltamisessa välttämättömiä runkokäyrämalleja. Tosin mallien käyttö nopeuttaa käytännön tilanteissa tulosten laskentaa, esimerkiksi Suomessa yleisissä Modus 2000 puutavarakuormien vastaanottomittauslaitteissa käytetään kuormien tilavuuksien laskennassa hyväksi viuhkalaserilla tuotettua paikkatietoa ja sen pohjalta tehtävää tilavuuden mallinnusta.

Seuraavassa esitetään yhteenvetona laserdiffraktion, fotoluminesenssin, mikroaltojen ja akustisten aaltojen käyttömahdollisuuksia ja jatkokehitystarpeita raakapuun laadutuksessa.

Laserdiffraktio

Kehitetty menetelmä soveltuu nykyisessä muodossaan tutkimusaineistojen keruuseen, kun tavoitteena on tutkia esimerkiksi havupuun trakeidien läpimitan ja puun mekaanisten ominaisuuksien riippuvuussuhteita. Optiseen mikroskopointiin verrattuna diffraktiomittaus on n. 2000 kertaa nopeampaa. Tämä mahdollistaa suurten näyttemäärien mittauksen kohtuullisessa ajassa, mikäli näytteiden valmistuksen ajanmenekki saadaan sovitettua mittauksen nopeuteen, ja todennäköisesti menetelmän kehityksen osaksi käytännön tuotantoprosessia. Seuraava askel voisi olla näyttö- oton järjestelmän kehittäminen tavoitteena laserdiffraktiomenetelmän soveltaminen laatulajitteleluun sahojen tukki- tai sahauslinjalla. Jotta tukin tai saheen lujuus- ja jäykkyysominaisuuksien arviointiin voitaisiin soveltaa diffraktiomittausta, puuaineen mekaanisia ominaisuuksia kuvaavien ominaisuuksien tutkimusta olisi jatkettava solukkotasolla ja selvitetävä yhteyksiä solujen koon

ja lukumäärän ja niiden vuotuisen kasvun ja kasvuympäristötekijöiden välillä. Tarvitaan jatkotutkimusta, jotta ilmiöiden mallinnusta voidaan viedä eteenpäin.

Tässä kehitetty laserdiffraktiomenetelmä soveltuu laboratoriotasolla lähes sellaisenaan havupuun trakeidien soluseinämiä keskimmäisen paksuuden mittaukseen ja edelleen kehitettynä selluloosan määrän runko- ja pölkkykohtaiseen arviointiin. Tehokkaita ja tarkkoja mittauksia varten on kuitenkin kehitettävä kertaluokkaa tarkempi laseroptiikka ja parannettava tässä aikaan saatua laskentamallia.

Fotoluminesenssi

Tässä tutkittiin kuusen tyvilahon tunnistamista sähkömagneettisella säteilyllä. Sovellusesimerkkejä metsäteollisuudessa voivat olla runkojen apteeraus puutavaralajeiksi, puutavaran automaattinen laadun tarkkailu sahoilla ja puuvarastoissa, puutavaran prosessiin ohjaus (mekaaninen kuidutus) ja energiapuun luokittelu.

Fotoluminesenssiin perustuvan lahonmääritysmenetelmän tuotteistaminen vaatii vielä paljon perustutkimusta. Jatkotutkimuksissa on kartoitettava tietyillä aallonpituusalueilla rungon katkaisupinnalta löytyvien vieraiden aineiden (kura, noki, yms.) luminoivat piirteet ja eri lahoasteiden fluoresenssi- ja fosforensispektrit. Lisäksi on tutkittava kosteuden ja lumen vaikutuksia ilmiöön ja vasteisiin ja määritettävä menetelmän erotuskyky. Tässä on otettava huomioon, että havaitun fluoresenssin intensiteetti riippuu likimain toiseen potenssiin fluoresoivien lähteiden lukumäärästä. Tästä seuraa, että fluoresenssimenetelmässä lahon erotuskyky pienenee nopeasti lahon määrän pienentyessä.

Seuraava askel menetelmän kehittämisessä on kenttäkelpoisen laitteiston rakentaminen, jonka suorituskyky olisi vähintään yhtä hyvä kuin tässä käytetyllä laitteistolla. Kenttäkelpoisen mittalaitteen rakentaminen on haastava mutta ei mahdoton tehtävä. Laitteistossa tarvittavat komponentit ovat kaupallisesti saatavissa, kuten Led-lamppu NS400L-ERLM, joka emittoi tarkasti 400 nm:n säteilyä.

Lahoalueen määrittäminen pölkyn poikkileikkauspinnalta

Digitaalikuviin ja Decay-ohjelmaan perustuvaa menetelmää ei saatu tässä tutkimuksessa valmiiksi tyvilahon ennustamiseen, mutta menetelmä näyttää lupaavalta mahdollisuudelta lahon vikaantuneen alueen ennustamiseen rungossa. Etuna tässä olisi aikaisempiin menetelmiin verrattuna mahdollisuus tyvilahon nousukorkeuden automaattiseen ja entistä tarkempaan mittaukseen rungossa. Sovelluskohteet voisivat olla sekä hakkuukoneissa että tehdasmittauslaitteissa, jolloin sekä puunkäyttäjät, koneurakoitsijat että puunmyyjät hyötyisivät raaka-aineen tehokkaamman käytön kautta.

Menetelmä saatiin toimimaan rungon katkaisupinnalla lahoalueen pinta-alan määrittämiseen yhteinäisillä lahoalueilla ja myös lahoalueilla, jotka muodostavat rengasmaisia vyöhykkeitä. Kokonaan automaattista laskentaa varten menetelmään olisi kehitettävä lahon reunakäyrän automaattisesti tunnistava komponentti. Teknisesti menetelmä voisi perustua valokuvaukseen ja luminoivaan mittaukseen. Ajatuksena olisi tallentaa kameran muistiin terveen puuaineen ja lahoalueen emittoiman luminenssisäteilyn signaalitieto ja laskea tästä myöhemmin luminoivan alueen pinta-ala.

Mikroaallot

Puukiekon kosteuden mittaaminen osoittautui helpoksi mikroaaltomenetelmällä. Vaste-erot eri kosteusasteiden välillä olivat selvät sekä absorptio- että emissiomittauksissa. Kosteuden mittaaminen tällä

menetelmällä edellyttää puun kosteusjakautuman hyvän mallinnuksen, mikä voidaan tehdä mikroaltdatan pohjalta. Periaatteena olisi parametrisoida malli siten, että pölkyn molemmilta poikkileikkauspinnoilta ytimestä, sydänpuusta ja pintapuusta saadun datan pohjalta määritetään puuaineen senhetkinen kosteusjakauma ja tämän jälkeen kalibroidaan pölkyn tai pölkynosan kosteus reaaliajassa tukin ulkopuolella vallitsevaa lämpötilaa, höyrynpainetta (suhteellinen kosteus) ja ilmanpainetta seuraten. Tämä on haastava tehtävä sekä metodologisesti että logistisesti. Laskentaan voitaisiin soveltaa esim. röntgentomografiassa käytettyjä menetelmiä.

Käytännön sovellukseen olisi laadittava mikroaltdokentän absorption pohjalta tuotantoon kelpaava kosteusasteikko, määritettävä sen tarkkuus ja kehitettävä laskentamenetelmä, jolla pölkyn läpäisseeistä mikroaltdokentästä erotetaan oksa- ja kosteusjakaumat toisistaan. Vastaava kosteusasteikko olisi laadittava myös puun katkaisupinnalta tehtävää emissiomittausta varten. Emissiomittauksia voidaan perustella sillä, että kosteuserojen voitiin osoittaa näkyvän emittoituneen säteilyn taajuuseroina. Kosteuden mittaaminen perustuisi emittoituneiden mikroaltdokentäajuuksien vaihe-eromittaukseen. Tämän pohjalta kannattaisi valmistaa ensimmäinen prototyyppilaite, jota voitaisiin testata esimerkiksi tukkilajittelun yhteydessä tai kuitupuun otantamittausasemilla.

Myös oksakiehkuroiden koon ja sijainnin mittaaminen on mahdollista mikroaltdokentämenetelmillä, mutta sijainnin määrittämisen tarkkuus riippuu ilmaisimesta ja oksien sijainnista sinänsä. Mikroaltdokentät eivät kyenneet erottamaan pölkyn säteen suunnassa päällekkäin olevia oksia toisistaan; tämä on kylläkin tyypillistä myös mm. röntgenmittaukselle. Mikroaltdokentämenetelmien tuotteistamiseksi tähän tarkoitukseen olisi kehitettävä mittausgeometriaa. Aluksi mitattaisiin tukista mikroaltdokentädataa samanaikaisesti kolmesta eri suunnasta 120 asteen välein, jolloin tuloksen laskenta varmistuisi ja mahdollisuudet yksittäisten oksien havaitsemiseen paranisivat.

Lisäselvityksiä vaatii myös havainto, että kuvaamalla tukkia sivulta sen vastakkaisilta puolilta ja vähentämällä tukin läpäissee mikroaltdokentät toisistaan saadaan yhteys tukin sisäisen rakenteen homogeenisuuteen. Jatkotoimenpiteenä olisi kehittää uusi laatutunnus ”pölkyn sisäinen homogeenisuus”, ja sille mittaaminen menetelmä, suure ja yksikkö tai indeksi. Tämän pohjalta saattaisi olla mahdollista lajitella sahattavia tukkeja niiden tasalaatuisuuden perusteella.

Ultraääni

Tässä oli tavoitteena mitata kuoren paksuutta puuta koskemattomalla menetelmällä. Saavutettu mittaustulos oli pelkästään kvalitatiivinen, johtuen osaksi tutkimuslaboratorion mittauskalustosta. Tulokset osoittivat että rungon tai pölkyn säteen suunnassa voidaan kuorellinen osa erottaa kuorettomasta osasta. Kuorella on huokoisena materiaalina erilainen akustinen resonanssitaajuus kuin tätä kiinteämmällä puuaineella. Pari kertaluokkaa tässä käytettyä tehokkaammalla ultraäänilähteellä olisi jo mahdollista saada kuoren läpi akustista dataa, joka erottuisi kuoren pinnalta emittoituneesta datasta. Menetelmälle olisi suuri sovelluspotentiaali, mikäli se mahdollistaisi rungon kuorettoman profiilin määrittämisen tarkasti hakkuukoneella tehtävän apterauksen pohjaksi ja kuorellisten tukkien entistä tarkemman lajittelun tilavuus- ja arvosaannon hallitsemiseksi sahausksessa ja sorvauksessa.

Käytännön tehdasmittauksessa käytettävää sovellusta varten on etsittävä paras ultraäänitaajuus ja paras lähettimen tehoalue kuoren paksuuden ilmaisemiseksi ja selvitettävä häiritsevätkö sovellusympäristössä muodostuvat akustiset hälyt ultraäänianturin toimintaa. Tulosten pohjalta on mahdollista tehdä käsin käytettävä prototyyppilaite, jolla selvitetään kuoren määrän mittaustarkkuus kvantitatiivisesti.

Aistivarainen laadutus

Sumean logiikan pohjalta kehitettyä laskentamallia on räätälöitävä ja opetettava tietojärjestelmälle tuotantolaitoskohtaisesti. Mikäli laskentamallia halutaan soveltaa sellaisenaan tukkien ohjaukseen ja saheiden lajitteluun, tukkierien keskilaatua on seurattava ja parametrit säädettävä tarvittaessa sahaus- ja arvosaannon maksimoimiseksi. Nykyisen laskentaohjelman opetukseen kuluva aikaa olisi lyhennettävä ja laskentamallin opetus olisi automatisoitava. Malliin olisi kehitettävä kalibrointijärjestelmä ja sumeutusalgoritmit siten, että automaattisen päättelyn luotettavuutta voidaan arvioida.

6.2 Kustannustehokkuus

Puun laatutekijöiden mittaumahdollisuuksia arvioitaessa on kiinnitettävä huomiota kustannustehokkuuteen. Tässä avainsanoja ovat nopeus, mittauskertojen lukumäärä, luotettavuus, investoinnin takaisinmaksuaika ja käyttökustannukset. Kustannustehokkuuden arvioinnissa on otettava huomioon myös lisäarvot, joita uuden menetelmän käyttöönotto tuo mukanaan, esim. laadun tasaisuus, ympäristöystävällisyys, työturvallisuus ja lisääntynyt työmotivaatio.

Tässä ei voitu määrittää erikseen mittausten menetelmien euromääräisiä kustannuksia eikä varsinkaan tuotantolaitoskohtaisesti, koska useimmat tutkitut menetelmät olivat laboratoriotutkimusvaiheessa. Käytäntöön sovelluskelpoisia kaupallisia laitteita, laiteyhdistelmiä ja ohjelmistoja joko ei ole lainkaan tarjolla tai kokemukset niiden käytöstä ovat rajalliset. Seuraavassa esitetään kuitenkin muutamia näkökulmia, joiden pohjalta kysymystä kustannustehokkuudesta voidaan lähestyä:

- Valon diffraktioon perustuvat menetelmät ovat käyttökelpoisia pääsääntöisesti puutavaran kontrollimittaukseen. Yksinkertaisen tekniikkansa vuoksi ne ovat huokeita ja kustannustehokkaita osana tuotantoprosessia.
- Kuusen tyvilahaisen alueen entistä tarkempi määrittäminen runkojen apteerauksessa fotoluminenssin keinoin voi yhtäältä säästää tervettä tunkkia tai hiomokuitupuuta useita metrejä yhtä runkoa kohti ja toisaalta estää lahoisten rungonosien joutumista väärään käyttötarkoitukseen. Mittaustulos on riippumaton mittaajasta.
- Mikroaaltomenetelmillä on mahdollista saada samanaikaisesti useita eri laatutietoja pölkyistä, kuten kosteus, oksaisuus, halkeamat ja kuoren paksuus. Monimuuttujamittarien kustannustehokkuus on korkea, mikäli kaikkea niiden mittaamaa tietoa voidaan hyödyntää. Investointi mikroaaltolaitteistoon on selvästi huokeampi kuin vastaavaan röntgenlaitteistoon.
- Akustiset menetelmät vaativat vielä paljon kehitystyötä. Laitteistot ovat edullisia mutta tulosten analysointi on erittäin vaativaa. Mikroaaltomenetelmillä voidaan tehdä samat mittaukset kuin akustisilla menetelmillä.
- Päättelviin ohjelmiin kuten sumeaan logiikkaan perustuva prosessin ohjaus parantaa sahoilla parhaiden sahatavaran laatuluokkien saantoa ja puutavaran lajittelua loppukäyttölähtöisiin laatuluokkiin. Keskikokoinen saha voi kattaa järjestelmästä koituvat investointikulut arviolta yhdessä vuodessa.

7 Tulevaisuuden visioita

Sähkömagneettista säteilyä on käytetty pitkään tuottamaan tietoa mm. aineiden muodosta, rakenteesta ja pinnan ominaisuuksista, esimerkkeinä sahatavaran oksaisuus, mikrohiukkasten muoto,

asteroidien muoto ja koko, aineen kiderakenne ja pinnan sileys (kiilto). Myös akustisia aaltoja on käytetty pitkään orgaanisten järjestelmien sisärakenteiden selvittämiseen, esimerkkinä mammoografia ja sikiön kuvaus. Laajojen soveltamismahdollisuuksien perusteella puuta koskemattomat mittausten menetelmät voisivat mahdollistaa multimittareiden rakentamisen. Niillä pystyttäisiin mittaamaan samanaikaisesti puun eri ominaispiirteitä ja valtaosa tarpeellisista raaka-aineen mittauksista voitaisiin tehdä samassa tuotantoprosessin vaiheessa.

Kehittämällä puun laadunmäärittämenetelmiä monipuolisesti siten, että uusien mittausten menetelmien ohella panostetaan myös laatuominaisuuksien ja puun kasvun välisen dynamiikan ymmärtämiseen on tulevaisuudessa ehkä mahdollista päästä täsmävalitsemaan metsästä puuta käyttötarkoituksen ja lopputuotteilta vaadittavien ominaisuuksien pohjalta. Tässä voitaisiin päästä ensimmäisiin kaupallisiin sovelluksiin alle 10 vuodessa, jos tarvittavan ennakkomittausaineiston koostaminen vanhoista aineistoista ja lisäaineistojen hankinta käynnistetään suunnitelmallisesti.

Puuston ennakkomittauksesta saatavat runkokohtaiset tulokset liitettäisiin hakkuiden yhteydessä mitattavaan tietoon, jota verrattaisiin leimikko- ja runkokohtaisesti lopputuotteista mitattaviin laatuominaisuuksiin. Aineiston käsittelyyn olisi kehitettävä bijektiivinen malli, jolla pystyttäisiin aluksi ennustamaan tukista mitattujen laatuominaisuuksien pohjalta esimerkiksi saheiden määrä ja jolla pystyttäisiin rakentamaan tarkka kuva tukin laatuominaisuuksista.

Laadittu malli laajennettaisiin myöhemmin koskemaan pystypuuta. Näiden laatuominaisuuksien mitattaisiin monipuolisesti metsiköittäin edustavilta koealoilta alkaen taimista, ja kaadettujen puiden laatu määritettäisiin kaatotilanteessa mahdollisimman tarkasti hakkuukoneeseen asennetuilla antureilla. Saaduilla laatuominaisuustiedoilla päivitetäisiin jokaisen mittaustapahtuman yhteydessä metsiköstä valmistettu virtuaalinen paikkatarkka puustokartta.

Mikäli runkojen laatu- ja paikkatiedot olisivat ajan tasalla leimikon virtuaalisessa puukartassa, voitaisiin jo kaatotilanteessa valita sahapuiksi loppukäyttötarkoituksen mukaan sellaisia puuta, joista suurimmalla todennäköisyydellä tulisi lopputuotteiden laatu- ja laatuvaatimukset täyttäviä tuotteita. Tällöin päästäisiin tehokkaisuuteen metsävarojen säästäviin hakkuuksiin, jossa leimikosta otettaisiin puut siten, että kaadetut tukit täyttäisivät optimaalisesti käyttötarkoituksen asettamat laatuvaatimukset.

Tukkien dimensioiden ja laadun liittäminen tuotantolinjalta saatavien lopputuotteiden laatuun mahdollistaisi esimerkiksi sahausprosessiin tulevien tukkien täsmäohjauksen siten, että sahauslinjalle tulisi vain niitä tukkeja, joista saataisiin lopputuotteille asetettujen laatuvaatimukset täyttäviä saheita. Laadunmittausta täsmentäen pystyttäisiin sahalaitoksissa laatimaan sahaussuunnitelmat ottaen entistä paremmin huomioon lopputuotteen laatu. Tarkan oksajakauman ja ytimen sijaintitiedon pohjalta voitaisiin minimoida esimerkiksi viisto-oksia saheissa ja ydinjuovia sydäntavarassa. Soikeuden ja ytimen sijainnin huomioon ottaminen helpottaisi ydinvaraavan sahatavaran ja muiden erikoislaatuisten tuotannossa samoin kuin vaha- ja sahatavaran minimoinnissa tarvittavaa tukkien pyöryksen ja sahausasetteiden suunnittelua. Tällaisten sahaussuunnitelmaan vaikuttavien laatuominaisuuksien hyödyntäminen vaatii tukkikohtaisen kytken tukin tarkkan laatuominaisuuksien, sahausasetteiden ja saheiden laatuominaisuuksien välille.

Sähkömagneettiseen säteilyyn perustuvat raakapuun laadunmittausmenetelmät tuottavat lyhyessä ajassa riittävästi informaatiota mittaustarkoituksista tarkkojen tilastomatematiikan ja todennäköisyystulkintojen tekemiseen (esim. Manninen ym. 2007). Erityisenä vahvuutena tässä on, että samanaikaisesti pystyttäisiin mittaamaan ja käsittelemään 5–10 eri laatuominaisuuksia ja niiden eri-

laisia kombinaatioita. Tämä mahdollistaisi myös joustavat analyysit laatuluokkien rajapinnoilla. Esimerkiksi tuoreen ja kuivan oksan erottelu saattaisi onnistua kuvaamalla oksa digitaalikameralla, johon on liitetty paikkatarkasti korkearesoluutioinen kosteuden tunnistava mikroaaltotutka tai NIR- eli lähi-infrapuna-ilmaisin ja pihkaisuuden ja selluloosapitoisuuden tunnistava spektroskoopi. Jälkimmäisillä menetelmillä tallennettaisiin puun ja oksan kosteustieto sekä varmistettaisiin että mittauskohde on oksa. Valokuvaukseen perustuvalla mittauksella tallennettaisiin oksan paikkatieto ja kuvasta tehdyllä struktuurianalyysillä oksan esiintymismahdollisuus. Tässä tarkoitettua multi-ilmaisimen kehittäminen olisi jo nyt mahdollista samoin kuin kyllin laajakajaisen primäärisäteilyn ohjaus.

Mittaustarkkuuden lisääminen ei ole jatkossa välttämättä oleellisin asia puun laadun mittauksessa. Merkittävämpää olisi pystyä erottamaan raakapuusta eri laatupiirryhmät ja niiden jakaumat sekä kyetä seuraamaan laatupiirteitä, jotka muuttuvat läpi puunhankinnan ja tuotteiden valmistuksen ja käytön prosessin. Perustana tässä olisivat jo olemassa oleva puun kasvu- ja laatutieto sekä mittausprosessien virtuaalimallit.

Puutavaran ominaispiirteet ovat niitä kuvaavien suureiden odotusarvoja esimerkiksi pölkkyjen katkaisupinnoilla, jotka voidaan yhdistettynä yleistää koko runkoa koskeviksi (Mäkinen ym. 2007). Kunkin ominaispiirteen kuvaamiseen riittäisi piirteen malli ja muutama mitattu parametri. Aistivaraiset tai käsituntumalla tehdyt mittaukset eivät sovellu tarkoitukseen. Jäljelle jäävät mahdollisimman pitkälle automatisoidut menetelmät, joissa informaatio kohteesta saadaan analysoimalla kohteen ja säteilykentän vuorovaikutuksessa kenttään syntyneitä muutoksia.

Tällä hetkellä ei ole käytettävissä riittävästi tietoa sähkömagneettisista ilmiöistä puussa ja puuaineessa, jotta niitä voitaisiin hyödyntää puiden tai puuraaka-aineen laadun mittauksessa. Panostus perustutkimukseen, jossa selvitetäisiin erilaisten puiden tai puuaineen ja säteilykenttien väliset vuorovaikutusilmiöt tuottaisi tietoa, jota käyttäen pystyttäisiin identifioimaan puun ja puuaineen ominaispiirteitä. Tietoa soveltaen laiterakentajilla olisi mahdollista valmistaa puun laatupiirteiden mittaukseen spesifioituja laitteita ja tutkijoilla mahdollisuus perehtyä entistä syvällisemmin puuraaka-aineen ominaispiirteisiin.

8 PUULA- hankkeen julkaisut ja tiedonsiirtomateriaalit – Metlan osahanke

8.1 Julkaisut

Agopov, M. 2004. Terveen ja lahon kuusen UV-viritteisten fluoresenssi- ja fosforensispektrien mittaus ja vertailu. Helsingin yliopisto, fysikaalisten tieteiden laitos. Laudatur-työ. 35 s.

Agopov, M. 2004. Puusolukon keskimääräisten dimensioiden mittaaminen optiseen diffraktioon perustuvalla menetelmällä. Helsingin yliopisto, fysikaalisten tieteiden laitos. Pro gradu -tutkielma. 53 s.

Haapalainen, M., Hyvönen, V., Nieminen, S., Sarén, M.-P. & Sorjonen, M. 2005. Selvitys- ja tutkimustyö mikroaaltojen ja ultraäänen soveltuvuudesta puun laadun mittaukseen. Oulun yliopisto, Kajaanin yliopistokeskus, Mittalaitelaboratorion raportti 05-02. 28 s. + liitteet 4 kpl.

- Hamina, S. 2005. Sumeaan logiikkaan pohjautuva puutavaran ohjaus raaka-aineen laatuparametrien avulla. Helsingin yliopisto, metsävarojen käytön laitos. Metsäteknologian pro gradu -tutkielma maatalous- ja metsätieteiden maisterin tutkintoa varten. 38 s. + liitteet 18 s.
- Heikura, T. 2007. Puiden lahovaurioiden analysointi kolmiulotteisen rakennemallin ja kuvamittauksen avulla. Teknillinen Korkeakoulu. Tietotekniikan osasto, tietoliikenneohjelmistojen ja multimedian laboratorio. Diplomityö. 67 s. + liite 2 s.
- Korpilahti, A., Österberg, P., Pesonen, E. & Jokinen, O. 2005. Digitaalikuviavain puun laadun mittaukseen. Metsätehon Katsaus nro16/2005. Päivitetty 8.3.2006. 4 s.
- Verkasalo, E. 2005. Puutavaran laadutus ja arvon määrittäminen. Julkaisussa: Heräjärvi, H. & Hakkila, P. (toim.). Metsän ja puun asialla - Professori Matti Kärkkäinen 60 vuotta. Silva Carelica 51: 74-87. Joensuu yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta.

8.2 Tiedonsiirtomateriaalit

- Pesonen, E. 2002. PUULA-hankkeen esittely. Tekes, Helsinki, 29.01.2003. Esitelmä.
- Pesonen, E. 2003. Epälineaarisen tietoverkon periaatteita. Metsäklusterin prosessit, informaatiojärjestelmät ja logistiikka - tieteellinen kokous. Helsinki, 19.11.2003. Esitelmä.
- Pesonen, E. 2003. Logistiikkaketjun mallinnus. Metsäklusterin prosessit, informaatiojärjestelmät ja logistiikka - tieteellinen kokous. Helsinki, 17.12.2003. Esitelmä.
- Pesonen, E. 2004. Mikael Agopov: Puusolukon keskimääräisten dimensioiden mittaaminen optiseen diffraaktioon perustuvalla menetelmällä. Helsingin yliopisto, fysiikan laitos. Pro gradu -tutkielman tarkastajan lausunto.
- Pesonen, E. 2004. Muut kuvannustekniikat. Konenäköä puutavaralogistiikkaan –seminaari, Teknillinen Korkeakoulu, Otaniemi, 23.9.2004. Metsäteho Oy & Teknillinen korkeakoulu, maanmittaustekniikan osasto. Esitelmä.
- Pesonen, E. 2005. Metsäntutkimuslaitoksen tulosten esittely PUULA-hankkeessa. Digitaalikuviavatekniikka puutavaralogistiikkaan –seminaari, Teknillinen Korkeakoulu, Otaniemi, 27.10.2005. Metsäteho Oy & Teknillinen korkeakoulu, maanmittaustekniikan osasto. Esitelmä.
- Verkasalo, E. 2005. Puun laatuominaisuudet ja niiden selitysvoima. Digitaalikuviavatekniikka puutavaralogistiikkaan –seminaari, Teknillinen Korkeakoulu, Otaniemi, 27.10.2005. Metsäteho Oy & Teknillinen korkeakoulu, maanmittaustekniikan osasto. Esitelmä (PowerPoint-esitys, 15 s.)
- Verkasalo, E. 2005. Sasu Hamina: Sumeaan logiikkaan pohjautuva puutavaran ohjaus raaka-aineen laatuparametrien avulla. Helsingin yliopisto, metsävarojen käytön laitos. Pro gradu -työn tarkastajan lausunto.
- Verkasalo, E. 2009. Petri Österberg: Wood Quality and Geometry Measurements Based on Cross Section Images. Tampereen teknillinen yliopisto, Automaatio-, kone- ja materiaalitekniikan tiedekunta. Tampere, 9.6.2009. Väitöskirjan vastaväittäjän lausunto.

Verkasalo, E. 2009. Puutuoteteollisuuden laadutustarpeet ja visio. Suomen Kubiikin mittausseminaari 2009, Kittilä, Levi, 22.-24.01.2009. Esitelmä (PowerPoint-esitys, 61 s.).

Verkasalo, E. & Lindblad, J. 2005. On-going R&D Issues in Finnish Timber Scaling. Nordic-Baltic Wood Measurement and Excursion, 20-22 September 2005 in South-East Finland. Metsäteho Oy, Stora Enso Oyj, Osuuskunta Metsäliitto, UPM-Kymmene Oyj, VMR/SDC & Norsk Virkesmåling. Esitelmä (PowerPoint-esitys, 40 s.).

Lähdekirjallisuus

Anttila, S. 2008. Paperi - ja massateollisuus. Tapion Taskukirja, 25. uudistettu painos. Metsäkustannus Oy. Ss. 460-468.

Almérás, T., Thibaut, A. & Gril, J. 2005. Effect of circumferential heterogeneity of wood maturation strain, modulus of elasticity and radial growth on the regulation of stem orientation in trees. *Trees - Structure and Function*, Springer-Verlag GmbH, Vol.19: 457-467.

Currie, N.C. & Brown, C.H. 1987. Principles and Applications of Millimeter-Wave Radar, Artech House Inc.

Hecht, E. 1998. Optics, Addison-Wesley Publishing Company.

Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salminen, H. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA System. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 835. 116 s.

Hämäläinen, J., Hujo, S. & Korpilahti, A. 2006. Puutavaran mittauksen tutkimus- ja kehitysohjelma. Metsätehon katsaus 191. 18 s. + liitteet.

Kantola, A., Härkönen, S., Mäkinen, H. & Mäkelä, A. 2008. Predicting timber properties from tree measurements at felling: Evaluation of the RetroSTEM model and TreeViz software for Norway spruce. *For. Ecol. Manage.* 255: 3524-3533.

Kärkkäinen, M. 1986. Malli männyn, kuusen ja koivun puuaineen oksaisuudesta. *Silva Fenn.* 20: 107-116.

Kärkkäinen, M. 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. Metsäkustannus Oy. 468 s.

Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Commun. Inst. For. Fenn.* 108. 74 s.

Laasasenaho, J. & Sevola, Y. 1971. Mänty- ja kuusirunkojen puutavaralajisuhteet ja kantoarvot. *Commun. Inst. For. Fenn.* 74(3). 87 s.

Manninen, T., Penttilä, A. & Lumme, K. 2007. C-band scattering simulation of a Scots pine shoot. *Waves in Random and Complex Media*, Vol. 17, No.1: 85-98.

Mäkelä, A. 1997. A carbon balance model of growth and self-pruning in trees based on structural relationships. *For. Sci.* 43: 7-24.

- Mäkelä, A. 2002. Derivation of stem taper from pipe theory in a carbon balance framework. *Tree Physiol.* 22: 891-905.
- Mäkelä, A. & Mäkinen, H. 2003. Generating 3D sawlogs with a process-based growth model. *For. Ecol. Manag.* 184: 337-354.
- Mäkinen, H. 1990. Tyvilahon esiintymistodennäköisyys etelärannikon kuusissa ja lahon korkeuden ennustaminen. Joensuu Yliopisto. Pro gradu -työ.
- Mäkinen, H. & Colin, F. 1998. Predicting branch angle and branch diameter of Scots pine from usual tree measurements and stand structural information. *Can. J. For. Res.* 28:1686-1696.
- Mäkinen, H. & Colin, F. 1999. Predicting the number, death, and self-pruning of branches in Scots pine. *Can. J. For. Res.* 29: 1225-1236.
- Mäkinen, H., Hynynen, J., Colin, F. & Mäkelä, A. 1999. Predicting branch characteristics of Scots pine from usual tree measurements and stand structural information. Julkaisussa: Nepveu, G. (toim.). Proceedings of IUFRO WP S5.01-04 Workshop 'Connection between silviculture and wood quality through modeling approaches and simulation softwares', La Londe-Les-Maures, France, September 5-12, 1999. Ss. 42-49.
- Mäkinen, H., Hynynen, J. & Isomäki, A. 2005. Effect of intensive management on wood production of Scots pine stands in southern Finland. *For. Ecol. Manage.* 215: 37-50.
- Mäkinen, H., Jaakkola, T., Piispanen, R. & Saranpää, P. 2007. Predicting wood and tracheid properties of Norway spruce. *For. Ecol. Manage.* 241: 175-188.
- Mäkinen, H., Ojansuu, R., Sairanen, P. & Yli-Kojola, H. 2003a. Predicting branch characteristics of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) from simple stand and tree measurements. *Forestry* 76(5): 525-546.
- Mäkinen, H., Ojansuu, R. & Niemisto, P. 2003b. Predicting external branch characteristics of planted silver birch (*Betula pendula* Roth.) on the basis of routine stand and tree measurements. *For. Sci.* 49(2): 301-317.
- Niskanen, M. 2000. Sahatavaran tarkastus itseorganisoituvilla kartoilla. Diplomityö. Oulun yliopisto.
- Nordic timber grading rules. 1994. Föreningen Svenska Sågverksmen, Suomen Sahateollisuusmiesten yhdistys, Treindustriens Tekniske Forening. Stockholm - Helsinki - Oslo. 64 s.
- Nyström, J. & Dahlquist, E. 2003. Methods for determination of moisture content in woodchips for power plants - a review. *FUEL* 83: 773-779.
- Päivinen, R. 1983. Metsikön tukkiosuuden arviointimenetelmä. *Folia For.* 564. 16 s.
- Repola, J. 2006. Models for vertical density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density. *Silva Fenn.* 40: 673-685.
- Salminen, H., Lehtonen, M. & Hynynen, J. 2005. Reusing legacy FORTRAN in the MOTTI growth and yield simulator. *Comp. Electr. Agric.* 49(1): 103-113.

- Sipi, M. 2002. Sahatavaratuotanto. Opetushallitus, 213 s.
- Sorsa, J.-A., Imponen, V., Hujo, S., Korpilahti, A., Poikela, A. & Räsänen, T. 2004. Kuvaan perustuva mitaus apteerauksessa ja puutavaran lajittelussa. Metsätehon raportti 194. 23 s. + liitteet.
- Tamminen, P. 1985. Butt-rot in Norway spruce in Southern Finland. Comm. Inst. For. Fenn. 127: 1-52.
- Townes, C.H. & Scawlow, A.L 1975. Microwave Spectroscopy, Dover Publications, Inc., New York.
- Vanninen, P., Härkönen, S., Enkenberg, J. & Mäkelä, A. 2006. PuMe – Interactive learning environment employing the PipeQual model for forest growth and wood quality. N. Z. J. For. Sci. 36: 280-292.
- Ziman, J.M. 1979. Models of disorder. Cambridge University Press.

Liitteet

- Liite 1. Mikael Agopov: Puusolukon keskimääräisten dimensioiden mittaaminen optiseen diffraktioon perustuvalla menetelmällä (2004). Helsingin yliopisto, fysikaalisten tieteiden laitos. Pro gradu -tutkielma. 53 s.
- Liite 2. Mikko Haapalainen, Ville Hyvärinen, Sari Nieminen, Matti-P. Sarén ja Mika Sorjonen: Selvitys- ja tutkimustyö mikroaaltojen ja ultraäänen soveltuvuudesta puun laadun mittaukseen (2005). Oulun yliopisto, Kajaanin yliopistokeskus, Mittalaitelaboratorion raportti 05-02. 28 s. +liitteet 4 kpl.
- Liite 3. Tuukka Heikura: Puiden lahovaurioiden analysointi kolmiulotteisen rakennemallin ja kuvamittauksen avulla (2007). Teknillinen korkeakoulu. Tietotekniikan osasto, tietoliikenneohjelmistojen ja multimedian laboratorio. Diplomityö. 67 s. + liite 2 s.
- Liite 4. Sasu Hamina: Sumeaan logiikkaan pohjautuva puutavaran ohjaus raaka-aineen laatuparametrien avulla (2005). Helsingin yliopisto, metsävarojen käytön laitos. Metsäteknologian pro gradu -tutkielma maatalous- ja metsätieteiden maisterin tutkintoa varten. 38 s. + liitteet 18 s.



Pro gradu -tutkielma
Fysiikka

Puusolukon keskimääräisten
dimensioiden mittaaminen optiseen
diffraktioon perustuvalla menetelmällä

Mikael Agopov

2004

Ohjaaja: Fil. lis. Erkki Pesonen

Tarkastajat: Fil. lis. Erkki Pesonen ja prof. mvs. Seppo Manninen

HELSINGIN YLIOPISTO
FYSIKAALISTEN TIETEIDEN LAITOS
PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)
00014 HELSINGIN YLIOPISTO

Sisältö

1	Johdanto	4
1.1	Puun rungon rakenne	5
1.1.1	Puun rungon solurakenne	5
1.1.2	Puusolun rakenne	9
1.2	Puun solurakenteen tutkimus	12
1.2.1	Optinen mikroskopia	12
1.2.2	Elektronimikroskopia	12
1.2.3	NMR- ja IR-mittaukset	12
1.2.4	Röntgendiffraktio	13
1.2.5	Optisen diffraktion käyttäminen solurakenteen tutkimuksessa	13
2	Teoriaa	14
2.1	Valon diffraktio	14
2.2	Diffraktio viivan muotoisesta raosta	14
2.3	Diffraktio ympyrän muotoisesta raosta	17
2.4	Diffraktio jaksollisesta rakohilasta	17
2.4.1	Intensiteettijakauman muoto	23
3	Mittalaitteet ja mittaukset	26
3.1	Diffraktiokuvion mittaaminen	26
3.1.1	Laser	26
3.1.2	Linssit	28
3.1.3	Näyteteline	28
3.1.4	Ilmaisim	29
3.1.5	Ristisyöttöpöytä ja sen ohjaus	32
3.2	Kalibrointi	33
3.2.1	Optiikan kalibrointi	33
3.2.2	Kalibrointi testihilan avulla	34
3.3	Näytteiden valmistus	35
3.4	Solukoon määrittäminen mikroskoopilla	35

3.5	Solukoon määrittäminen laserilla	36
4	Tulokset	38
5	Johtopäätökset	47
5.1	Menetelmän käyttökelpoisuus	47
5.2	Tulosten yhteensopivuus	48
5.3	Menetelmän kehittäminen	49

Luku 1

Johdanto

Puun soluista ja solurakenteesta saadun tiedon avulla voidaan mallintaa puun kasvua, saada tietoa puumateriaalin fysikaalisista ominaisuuksista ja tutkia ympäristötekijöiden vaikutusta puun kasvuun. Tällaisen tiedon avulla voidaan mm. ennustaa erilaisten metsänhoidollisten toimepiteiden, esim. lannoituksen tai puuston harvennuksen vaikutuksia metsän kasvuun ja puuaineksen laadullisiin tekijöihin. Ympäristötekijöiden vaikutusta puun rungon solujen muotoon, kokoon ja kasvuun solurakenteeseen ei ole kovin paljoa tutkittu, vaikka tällainen tieto olisi hyödyllistä paperi- ja selluteollisuudessa; mm. paperiteollisuudessa on keskitytty puuraaka-aineen käsittelyprosessien (esim. sellunkeitto) optimointiin. Puuaineksen kvalitatiiviseen ja kvantitatiiviseen lajitteluun sopivia menetelmiä olisikin tärkeää kehittää yhä tarkemmiksi ja monipuolisemmiksi: Selluloosaksi sopiva puu ei välttämättä käy huonekalujen raaka-aineeksi, ja huonekaluksi sopivaa puuta ei kannata tuhata paperin valmistukseen.

Määrittämällä puusolujen keskimääräinen koko ja soluseinän paksuus voidaan mm. tutkia kasvuolosuhteiden vaikutusta puuaineksen laatuun. Määrittäminen nykyään puun vuosilustoista otetuista mikroskooppikuista kuva-analyysin avulla. Menetelmä on kuitenkin hidas eikä sovellu rutii-

nikäyttöön.

Keväällä 2003 alettiin Metsäntutkimuslaitoksen Vantaan tutkimusyksikössä kehittää rutiinimenetelmäksi soveltuvaa optiseen diffraktioon perustuvaa mittalaitetta. Tässä työssä on kehitetty mittaussuunnitelmaa, laitteiston kalibrointia, mittaustekniikkaa, mittaussuunnitelmaa sekä tehty testimittauksia. Lisäksi on johdettu mittauksessa tarvittavat yhtälöt diffraktioteoriasta.

Tämä pro gradu -työ rakentuu seuraavasti: tässä luvussa käsitellään puun rakennetta ja sen tutkimusta yleisesti, luvussa 2 mittauksen fysikaalista taustaa ja luvussa 3 itse laitetta. Luvussa 4 esitellään mittauksen tulokset ja luvussa 5 tuloksista tehdyt johtopäätökset.

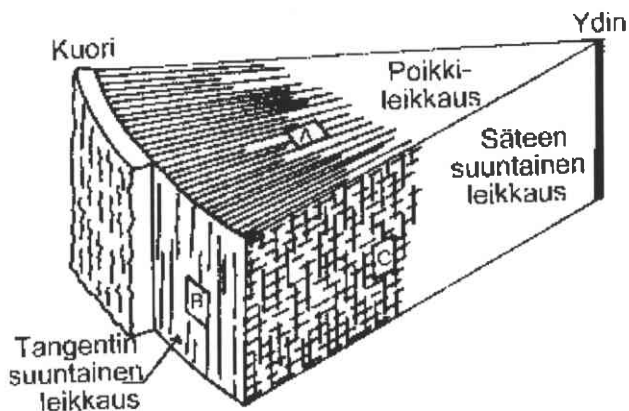
1.1 Puun rungon rakenne

Puun rakenteen kuvaus seuraa M. Kärkkäisen esitystä [1].

Puun runko on tavallisesti kartion muotoinen. Sen rakennetta kuvataan yleensä sylinterikoordinaatistossa. Koordinaatiston kaksi akselia ja kolmannen normaali määrittelevät leikkauspinnat, joita kutsutaan *säteiden suuntaiseksi leikkaukseksi*, *tangentin suuntaiseksi leikkaukseksi* ja *poikkileikkaukseksi* (kuva 1.1). Puun rungon poikkileikkauksesta näkyvät puun paksuuskasvun jaksot, vuosilustot. Vuosilustosta erottuu vaaleana vyöhykkeenä kevätpuu ja kapeana, tummana alueena kesäpuu. Uloimpana on kaarna.

1.1.1 Puun rungon solurakenne

Puu koostuu lähes yksinomaan soluista. Puusolut jaetaan kahteen ryhmään niiden muodon perusteella. Suippusolut eli prosenkyymit tai trakeidit ovat muodoltaan pitkiä ja päistään suippenevia, täysikasvuisina kuolleita, pintapuussa vettä johtavia ja puuta mekaanisesti tukevia soluja. Tylppysolut eli parenkyymit ovat tiiliskiven muotoisia tai pyöreähköjä pintapuussa elävinä



Kuva 1.1: Puun rungon poikkileikkaus [1].

säilyviä soluja. Niiden tehtävänä on varastoida ravinteita.

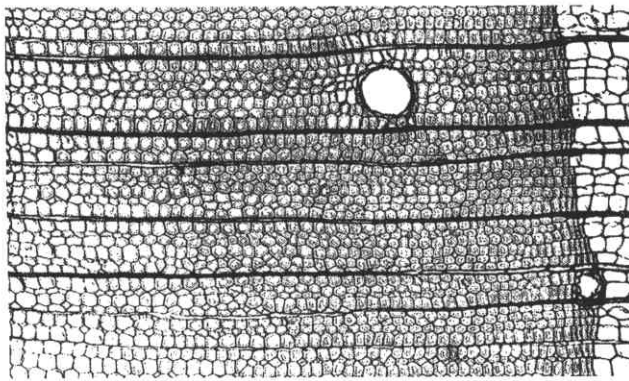
Puun pituuskasvun aiheuttaa sen varren kärjessä oleva kärkikasvusolukko. Lähes kaikki havupuut kasvavat kasvukautena varsijatkoisesti, ts. puun alkuperäinen pääranka kasvaa jatkuvasti pituutta.

Lähellä kärkeä alkavat solut erilaistua siten, että sisimmäksi muodostuu *ydin* ja sen ympärille *johtojännekehä*. Johtojänteisiin kuuluu *prokambium*, joka synnyttää sisäänpäin puuta (primaarinen ksyleemi) ja ulospäin nilaa (primaarinen floeemi). Myöhemmin nämä johtojänteet sulautuvat yhteen ja muodostavat uuden paksuuskasvua aiheuttavan kerroksen jota kutsutaan *jälleksi*. Myös jälsi kasvattaa puuta ja nilaa (sekundaarinen ksyleemi ja floeemi).

Ydin on parenkymisolukkoa, joka useilla havupuulajeilla on ruskeaa. Sen läpimitta puun poikkileikkauksessa on muutaman millimetrin luokkaa.

Kevät- ja kesäpuu

Suurin osa vanhempien puiden runkojen poikkileikkauksessa näkyvästä solukosta on sekundaarista puuta. Yhden kasvukauden aikana puuhun syntyy pääasiassa kahdenlaista solukkoa.



Kuva 1.2: Kuusen solukon poikkileikkaus. Oikealla reunassa näkyy kevät- ja kesäpuun raja. (Kuva: Pekka Saranpää)

Keväällä kasvukauden alkaessa, kun muutaman peräkkäisen päivän keskilämpötila on ylittänyt tietyn kynnyksarvon (kynnyksarvona pidetään yleensä $+5^{\circ}\text{C}$; kun keskilämpötila ylittää tämän arvon, sanotaan että *lämpösumma* on positiivinen) ja muut kasvuolosuhteet ovat suotuisat (mm. riittävä vedensaanti on turvattu) alkaa puu kasvattaa kookkaita ohutseinäisiä soluja, joita kutsutaan kevätpuusoluiksi. Mikäli kasvuolosuhteet eivät muutu kesken kasvukauden epäsuotuisiksi, jatkuu kevätpuukasvu Suomessa noin toukokuun puolivälistä heinäkuun puoliväliin. Kasvu on nopeimmillaan juhannuksen molemmin puolin.

Kasvukauden lähestyessä loppuaan alkaa puu kasvattaa pieniä ja paksuseinäisiä soluja, kesäpuusoluja. Kesäpuusolujen kasvuaika on normaalisti noin heinäkuun puolesta välistä elokuun alkuun. Kevät- ja kesäpuun raja on paljaallakin silmällä selvästi erotettavissa: Koska uusi solukerros syntyy aina jälleen ja viimeisen solukerroksen väliin, ts. puun runko kasvaa paksuutta säteen suuntaan (kerroksittain), näkyy raja selvänä renkaana puun poikkileikkauksessa. Kevät- ja kesäpuun raja on esitetty kuvassa 1.2.

Rajarengasta kutsutaan vuosirenkaaksi ja vuosikasvua vuosilustoksi.

Kevät- ja kesäpuusolujen kokoja männyssä ja kuusessa on vertailtu taulukossa 1.1.

Puulaji	Trakeidien läpimitta μm	
	Kevätpuu	Kesäpuu
Mänty (radiaalisuunnassa)	30,2	20,8
Mänty (tangentsuunnassa)	25,3	23,5
Kuusi (radiaalisuunnassa)	39,3	13,1
Kuusi (tangentsuunnassa)	32,7	32,1

Taulukko 1.1: Kevät- ja kesäpuusolujen koko männyssä ja kuusessa [3].

Kuusen kevätpuun tiheydeksi on mitattu $350 - 500 \text{ kg/m}^3$ ja kesäpuun $600 - 900 \text{ kg/m}^3$ Punkaharjulta ja Heinolasta kerätystä aineistosta [5]. Nämä arvot ovat varsin tyypillisiä kuuselle; tässä aineistossa oli kevät- ja kesäpuun raja määritelty siten, että lustosta määrittiin tiheydeltään pienimmän ja suurimman solun erotus, josta 70% lisättiin pienimmän tiheyteen, ja tätä kynnyksarvoa suuremmat solut olivat kevätpuuta ja muut kesäpuuta. Sen lisäksi, että kevät- ja kesäpuun raja asetetaan "sopivaan" kohtaan, voidaan käyttää myös ns. Morkin sääntöä [2]: Kesäpuusoluilla solun seinien yhteenlaskettu paksuus säteen suunnassa on yli puolet soluontelon säteen suuntaisesta paksuudesta. Sääntö on alunperin kehitetty kuuselle, mutta sitä voi (harkitusti) soveltaa myös muihin puulajeihin.

Tällainen vuodenajoittaista rytmää noudattava kasvu on herkkä olosuhteiden muutoksille: Pitkä kuiva tai kylmä kausi kasvukauden aikana tai neulasten tuhoutuminen saattaa saada puun kasvattamaan kesäpuusolukkoa, mikä näkyy vuosilustossa tummempana ohuena renkaana, ns. valelustoma. Valeluston muuttuessa takaisin kevätpuuksi raja ei kuitenkaan ole jyrkkä kuten tavallisessa vuosilustossa.

Ydinsäteet ja pihkatiehyet

Varsinaisen puusolukon lisäksi puissa on ns. ydinsäteitä, jotka ovat puun pituuskasvusuuntaan kohtisuorasti, ts. radiaalisuuntaan kasvavia solurivejä. Ydinsäteiden avulla puuleikkeestä voi erottaa radiaalisuunnan, vaikka siinä ei näkyisi kevät- ja kesäpuun rajaa. Lisäksi havupuilla on ns. pihkatiehyitä, jotka toimivat pihkaa välittävinä kanavina; niihin erittyy pihkaa niiden ympärillä olevista rauhassoluista eli epiteelitylppysoluista.

Lehtipuiden putkilot

Lehtipuilla on edellämainittujen soluryhmien lisäksi ns. putkiloita, jotka ovat kuolleista soluista muodostuneita solusulaumia. Niiden koko on tavallisimmilla lehtipuilla noin 60-80 μm [4]. Ne lisäävät lehtipuiden vedenkuljetuskapasiteettia, jota tarvitaan kompensoimaan lehdistä haihtuva vesi.

Ympäristötekijöiden vaikutus

Ympäristötekijöillä on keskeinen vaikutus puun kasvuun: epäsuotuisissa paikoissa kasvavien puiden solut ovat yleensä pienempiä kuin suotuisissa paikoissa kasvaneiden [6]; paljon vettä ja lämpöä saavat puut kasvattavat suurempia soluja [7]; kuivassa ja viileässä kasvaneiden puiden solut ovat pieniä ja niillä on paksut ja paljon ligniiniä sisältävät seinät [8].

1.1.2 Puusolun rakenne

Puusolut erottaa muista kasvisoluista lähinnä ligniini, joka aiheuttaa puusolun ns. puutumisen. Puusolu koostuu suurimmaksi osaksi selluloosasta (40-50%), eri hemiselluloosalajeista (20-35%) sekä ligniinistä (15-35%). Lisäksi solussa saattaa olla vähäisempiä määriä muita aineita.

Soluseinän rakenne

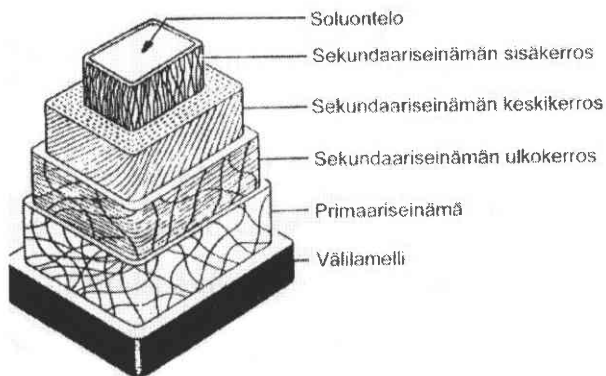
Selluloosamolekyylit ovat ketjun muotoisia ja ne kiertyvät reunamillaan olevien hydroksyyliyhmiensä (OH-) avulla nauhamaisiksi rakenteiksi. Selluloosamolekyyliketjut muodostavat sekä kiteisiä että amorfisia rakenteita. Pienintä samansuuntaisten selluloosamolekyyliin vaakatasoista poikkeileikkausta kutsutaan perusfibrilliksi. Tällaiset perusfibrillit ovat liittyneet suuremmiksi kimpuiksi, ns. mikrofibrilleiksi. Fibrillit ovat suuntautuneet yläviistoon nouseviksi nauhoiksi (kuva 1.3) soluseinämän sekundaariseinämän välikerroksessa (muissa kerroksissa niiden suuntautuminen on satunnaista); niiden nousukulmaa kutsutaan *mikrofibrillikulmaksi*, joka korreloi mm. puun kutistumis- ja paisumisominaisuuksiin sekä lujuuteen.

Soluseinämän toinen päärakennusaine, ligniini, on suuntautunut samalla tavalla kuin selluloosa, koska se kiinnittyy selluloosaan hemiselluloosan välityksellä.

Soluseinän kerrokset

Havupuiden trakeidit ja lehtipuiden kuidut ovat rakentuneet kerroksista (kuva 1.3). Puutuneen soluseinän ulointa kerrosta kutsutaan *välilamelliksi*. Se on muodostunut pektiinistä, ja sen paksuus on $0,2 - 1,0 \mu m$. Seuraava kerros, *primaariseinämä*, on muodostunut selluloosasta, hemiselluloosasta, ligniinistä ja pektiinistä.

Primaariseinämän sisällä on ns. *sekundaariseinämä*, joka on syntynyt solun laajenemisen päätyttyä. Sekundaariseinämän voidaan ajatella koostuvan kolmesta alikerroksesta, joita kutsutaan ulkokerrokseksi (S1-kerros), keskikerrokseksi (S2-kerros) ja sisäkerrokseksi (S3-kerros). Sekundaariseinämän ulkokerroksen paksuus on noin $0,1 - 0,3 \mu m$ ja sisäkerroksen $0,1 \mu m$ [10]. Keskikerroksen paksuus vaihtelee $1 - 5 \mu m$ välillä, mistä johtuu kevät- ja ke-



Kuva 1.3: Puusolun soluseinän kerroksia kuvaava malli [1].

säpuun trakeidien ero. Koska keskikerros käsittää suurimman osan puun soluseinästä, vaikuttavat sen ominaisuudet eniten koko seinämän ominaisuuksiin. Sekundaariseinämän ligniinipitoisuus on havupuilla yleensä noin puolet välilamellin ja primaariseinämän pitoisuudesta.

Näiden ns. klassisten kerrosten lisäksi on elektronimikroskopian avulla löydetty tietyissä solulajeissa (pääasiassa havupuiden trakeideissa) ns. kyhmykerros, joka koostuu kohoumista, jotka ovat kalvomaisen muodostuman peittämiä [11]. Nämä kohoumat ovat yleensä jakautuneet tasaisesti, mutta niiden tiheys vaihtelee suuresti: Joillakin soluilla kyhmyjä on vain satunnaisesti, toisilla ne muodostavat koko pinnan peittävän epätasaisuuden. Kyhmyt ovat sekä kemiallisesti että biologisesti varsin kestäviä; kyhmykerroksen rakenne ja syntymekanismi tunnetaan kuitenkin puutteellisesti.

Soluseinän paksuus vaikuttaa siitä valmistettavan selluloosan ominaisuuksiin ja määrää oleellisesti puun kuitujen kestävyden, joustavuuden ja vetolujuuden [13].

1.2 Puun solurakenteen tutkimus

1.2.1 Optinen mikroskopia

Puusolukon rakennetta voidaan tutkia mikroskoopilla. Puunäytteestä valmistetaan noin 10 – 20 μm paksu, valoa läpäisevä ohutleike, joka värjätään esimerkiksi jollakin ligniinispesifisellä aineella (mm. safraniini). Mikroskooppikuvat tallennetaan tietokoneelle, jolloin niitä voidaan käsitellä kuva-analyysillä. Tyypillisiä tutkimusaiheita ovat mm. solututkimus, vauriotutkimus sekä lahotutkimus. Optisella mikroskoopilla voidaan kuitenkin nähdä pienimmillään vain näkyvän valon aallonpituuden (noin 380–720 nm) suuruisia yksityiskohtia; diffraktio estää pienempien yksityiskohtien - esimerkiksi soluseinän rakenteen - havaitsemisen.

1.2.2 Elektronimikroskopia

Elektronimikroskoopilla havaitaan jopa yksittäisiä atomeja, joten se soveltuu erinomaisesti puusolujen sisäisten rakenteiden tutkimiseen. Elektronimikroskopia onkin mullistanut kasvi- ja eläinfysiologian: solujen toimintamekanismeja, kuten ionikuljetusta, energiataloutta ja metaboliaa voidaan tutkia molekyylitasolla.

1.2.3 NMR- ja IR-mittaukset

Myös NMR- ja IR-spektroskopiaa voidaan käyttää puututkimuksessa. NMR-spektroskopiassa mitataan ulkoisen magneettikentän vaikutusta atomin ydinspiniin - havaittujen siirtymien avulla voidaan esim. mitata puun lusterakennetta. IR-spektroskopiassa taas mitataan infrapunasäteilyn vaikutusta tutkittavan aineen molekyyliin - sellaiset molekyylit, joilla on muuttuva dipolimomentti, absorboivat infrapunasäteilyä. IR-spektroskopialla voidaan tutkia puun kemiallista rakennetta.

1.2.4 Röntgendiffraktio

Röntgendiffraktio on tehokas menetelmä solun sisärakenteiden tutkimiseen: Röntgensäteily tunkeutuu vaivatta puun rakenteiden sisään. Röntgendiffraktion avulla voidaan mitata mm. puusolun mikrofibrillikulmaa, soluseinän tiheyttä ja kiteytymistä tai selluloosamolekyylin kokoa. Selluloosakristallien poikkileikkauksen läpimitaksi on tällä menetelmällä mitattu noin 3 nm; sitkankuusen mikrofibrillikulmaksi on saatu ytimen lähellä 20° ja nuorpuualueen loppuessa alle 10°[14].

1.2.5 Optisen diffraktion käyttäminen solurakenteen tutkimuksessa

Puun ohutleikkeessä näkyvä solukko toimii diffraktiohilana valolle. Tässä työssä kehitetyllä menetelmällä tulkittiin diffraktiokuvista ohutleikkeen solukon koko ja muoto. Tavoitteena oli kehittää optiseen diffraktioon perustuvasta mittauksesta huomattavasti optista mikroskopiaa nopeampi ja helpompi tapa solukon keskimääräisten dimensioiden määrittämiseen. Tutkitaviksi valittiin havupuut, koska niiden solurakenne on lehtipuita yksinkertaisempi ja homogeenisempi: lehtipuilla solukon muotoa sotkevat putkilot. Näytteet tehtiin metsäkuusesta (*Picea Abies [L] Karst.*).

Luku 2

Teoriaa

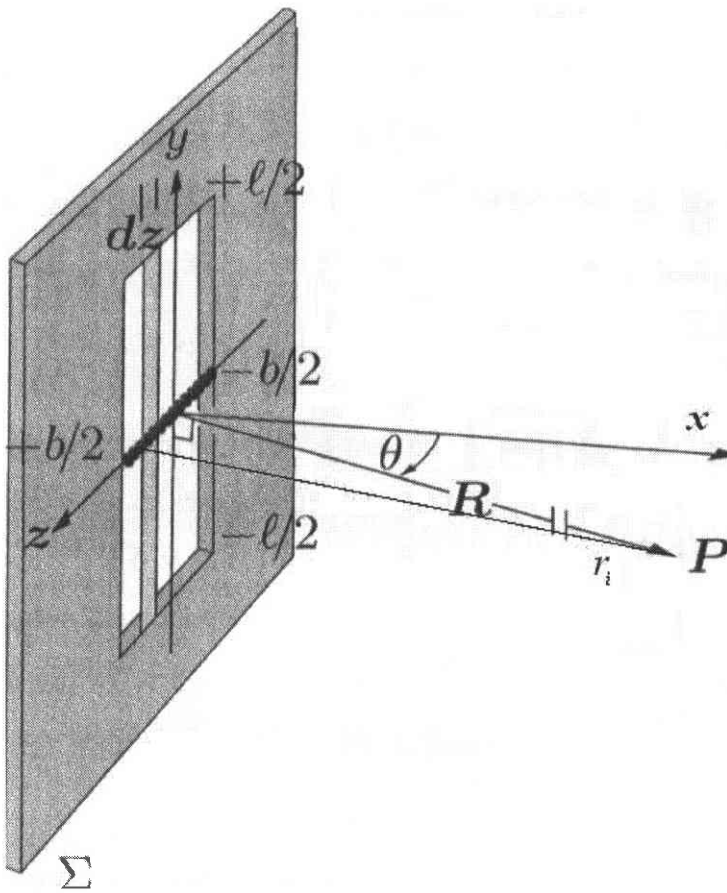
2.1 Valon diffraktio

Diffraktioilmiö syntyy, kun aaltoliikkeen eteneminen häiriintyy niin, että osa aaltorintamasta törmää esteeseen. Valon diffraktoituessa esim. raosta muodostavat sen läpäisseet aaltorintamat uusia primääriaaltolähteitä *Huygensin periaatteen* mukaan. Näistä uusista lähteistä emittoituneet aallot interferoivat konstruktiivisesti sellaisissa suunnissa, joissa niiden optinen matkaero on rakoon tulevan säteilyn aallonpituuden monikerta; interferenssikuviota varjostimella kutsutaan diffraktiokuvioksi. Diffraktioilmiössä informaatio valon kulkua häirinneen esteen rakenteesta jää aaltorintamaan.

2.2 Diffraktio viivan muotoisesta raosta

Analyysi seuraa pääosin E. Hechtin esitystä [15].

Valon osuessa varjostimeen, jossa on viivan muotoinen rako, tapahtuu diffraktio - rako toimii uusien palloaaltojen lähteenä. Jokainen raon piste (differen tiaalinen pintaelementti) emittoi palloaaltoa niin, että raossa syntyvien palloaaltojen sähkökentän amplitudien summa on raosta emittoituvan palloaallon sähkökentän amplitudi. Tarkastellaan kuvassa 2.1 esitettyä tilannetta:



Kuva 2.1: Raon geometria [15]. Tutkittavassa tapauksessa $b \ll l$.

Diffraktio tapahtuu raosta, joka on korkeuteensa nähden kapea ($b \ll l$), jolloin sähkökentän amplitudiksi saadaan

$$E = \epsilon_L \int_{-b/2}^{+b/2} \frac{\sin(\omega t - kr)}{r} dz, \quad (2.1)$$

missä b on raon leveys, ϵ_L on sähkökentän voimakkuus pituuselementtiä kohti, ω on valon kulmataajuus, t on aika, k on valon kulma-aaltoluku ja $r = r(z)$ palloaaltorintaman etäisyys tarkasteltavasta raon pisteestä.

Tarkastellaan tilannetta kaukana raosta, jolloin raon dimensiot ovat etäisyyteen verrattuna pienet, $R \gg b$. Tällöin r :n voidaan olettaa muuttuvan vain hitaasti integrointialueella, jolloin se voidaan olettaa vakioksi, ja

raosta emittoituvan palloaallon differentiaaliseksi sähkökentäksi saadaan

$$dE = \frac{\epsilon_L}{R} \sin(\omega t - kr) dz, \quad (2.2)$$

joka on koko sähkökentän saamiseksi integroitava raon dimensioiden yli.

Etäisyyden r arvioimiseksi kehitetään se kulman θ potenssisarjaksi

$$r = R - z \sin \theta + (z^2/2R) \cos^2 \theta - \dots, \quad (2.3)$$

jossa θ on x-akselin ja tarkasteltavat pisteen välinen kulma xz -tasossa. Sarjaa voidaan approksimoida sen kahdella ensimmäisellä termillä, jos kolmannen termin kerroin $z^2/2R$ on riittävän pieni kaikilla kulmilla θ . Tämä toteutuu, kun R on muihin dimensioiden verrattuna tarpeeksi suuri; ehto on nimeltään *Fraunhoferin diffraktioehto*. Sijoittamalla $r = R - z \sin \theta$ ja integroimalla raon yli z -suunnassa saadaan sähkökentäksi

$$E = \frac{\epsilon_L b}{R} \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right) \sin(\omega t - kR), \quad (2.4)$$

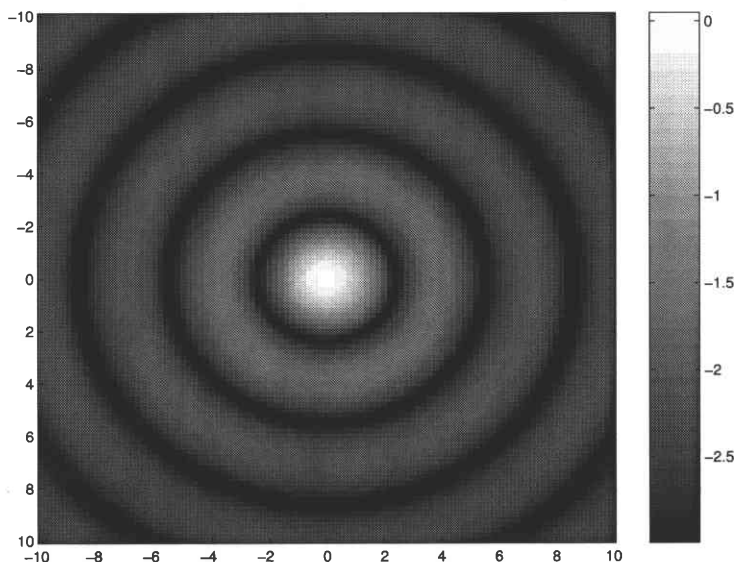
missä on otettu käyttöön apumuuttuja $\beta = (kb/2) \sin \theta$. Valaistusvoimakkuus on sähkökentän neliön aikakeskiarvo,

$$I(\theta) = \langle E^2 \rangle_T = \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_L b}{R} \right)^2 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2, \quad (2.5)$$

missä on sinin neliön aikakeskiarvolle käytetty kaavaa $\langle \sin^2(\omega t - kR) \rangle_T = 1/2$. Suoralle säteelle ($\theta = 0$) $\sin \beta/\beta = 1$; suoran säteen kirkkaudella $I(0)$ normitettu valaistusvoimakkuus on

$$I(\theta) = I(0) \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 = I(0) \text{sinc}^2 \beta, \quad (2.6)$$

missä on määritelty $\text{sinc } x = \sin x/x$.



Kuva 2.2: Airyn renkaat. Kuvan koordinaatiston akselien yksikkö on $1, 22 \frac{R\lambda}{4h}$.

2.3 Diffraktio ympyrän muotoisesta raosta

Jos diffraktio tapahtuu ympyrän muotoisesta raosta, saadaan diffraktiokuvaksi ns. *Airy-renkaat* [15] (kuva 2.2),

$$I(\theta) = I(0) \left(\frac{2J_1(kh \sin \theta)}{kh \sin \theta} \right)^2, \quad (2.7)$$

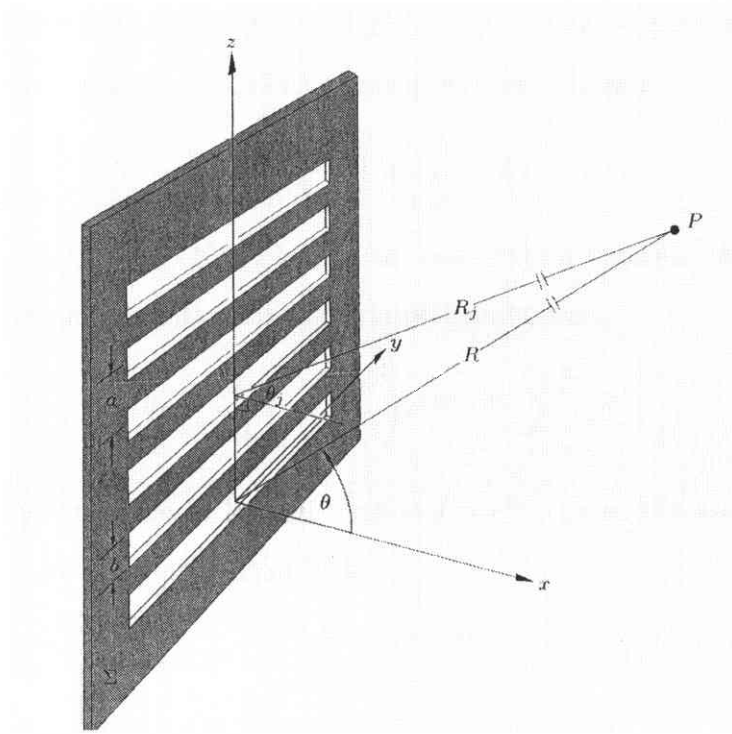
missä h on raon säde ja J_1 on ensimmäisen kertaluvun Besselin funktio; ensimmäisen tumman renkaan etäisyys kuvion keskipisteestä on noin

$$q_1 \approx 1, 22 \frac{R\lambda}{2h}, \quad (2.8)$$

missä R tarkasteltavan pisteen etäisyys raosta.

2.4 Diffraktio jaksollisesta rakohilasta

Jaksollisessa suorakulmaisten rakojen muodostamassa hilassa on N suorakulmion muotoista rakoja säännöllisin välein (kuva 2.3). Valon taipuessa tällai-



Kuva 2.3: Jaksollisen rakohilan geometria [15].

sesta hilasta voidaan diffraktoitua sähkökenttä laskea yksittäisistä raoista diffraktoituvien kenttien summana:

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\epsilon_L}{R} \int_{na-b/2}^{na+b/2} F(z) dz, \quad (2.9)$$

missä a on rakojen välimatka, b on niiden leveys, $F(z) = \sin[\omega t - k(R - z \sin \theta)]$ (tässä on approksimoitu $\theta_j \approx \theta$; approksimaatio pitää riittävällä tarkkuudella paikkansa vain, jos raot ovat valon aallonpituuden suuruusluokkaa ja siihen osuu tasoalto) ja rakojen numerointi alkaa nollasta. Tällöin j :nnen raon osuus sähkökenttään on

$$E_j = \frac{\epsilon_L}{kR \sin \theta} [\sin(\omega t - kR) \sin(kz \sin \theta) - \cos(\omega t - kR) \cos(kz \sin \theta)], \quad (2.10)$$

joka lasketaan raon rajoilla $E_j(z) = E_j(z = ja + b/2) - E_j(z = ja - b/2)$.

Tämä saadaan kosinin yhteenlaskukaavan avulla muotoon

$$E_j = \frac{b\epsilon_L}{R} \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right) \sin(\omega t - kR + 2\alpha j), \quad (2.11)$$

missä $\alpha = (ka/2) \sin \theta$. Koko kenttä on osakenttien summa; sen lauseketta voidaan sieventää kirjoittamalla se kompleksimuotoon

$$E = \text{Im} \left[\frac{b\epsilon_L}{R} \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right) e^{i(\omega t - kR)} \sum_{j=0}^{N-1} (e^{i2\alpha})^j \right], \quad (2.12)$$

missä on käytetty Eulerin kaavaa $\sin \theta = \text{Im}(e^{i\theta})$. Lausekkeessa olevan geometrisen sarjan summa voidaan laskea,

$$\sum_{j=0}^{N-1} (e^{i2\alpha})^j = \frac{e^{i2N\alpha} - 1}{e^{i2\alpha} - 1} = \frac{e^{iN\alpha}(e^{iN\alpha} - e^{-iN\alpha})}{e^{i\alpha}(e^{i\alpha} - e^{-i\alpha})} = e^{i(N-1)\alpha} \left(\frac{\sin N\alpha}{\sin \alpha} \right), \quad (2.13)$$

joten sähkökentäksi saadaan

$$E = \frac{b\epsilon_L}{R} \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right) \left(\frac{\sin N\alpha}{\sin \alpha} \right) \sin[\omega t - kR + (N-1)\alpha]. \quad (2.14)$$

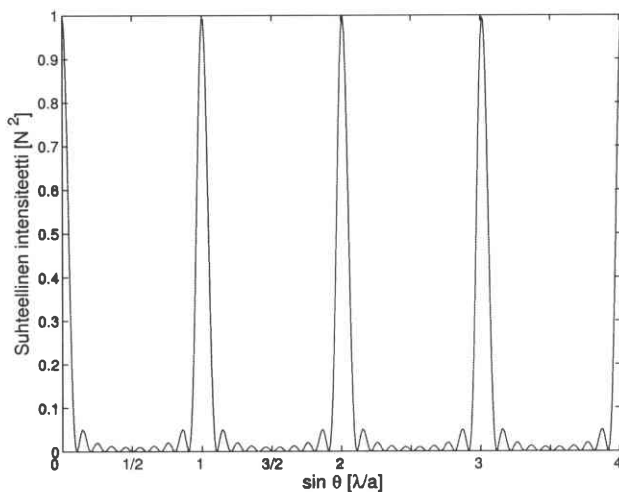
Valaistusvoimakkuus saadaan taas sähkökentän aikakeskiarvona; suhteellinen valaistusvoimakkuus on

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\sin N\alpha}{\sin \alpha} \right)^2. \quad (2.15)$$

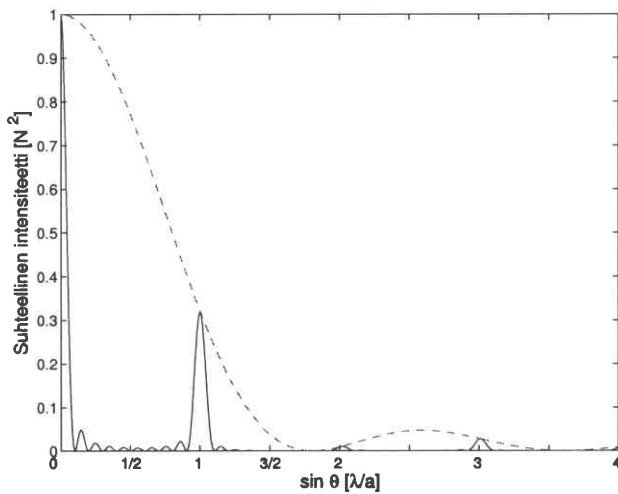
Tässä $I_0 = I(0)/N^2$ on valaistusvoimakkuus suoraan valon kulkusuuntaan (kulma $\theta = 0$). Tekijä $1/N^2$ tulee energian säilymisestä: Yhden raon diffraktiossa kaikki valaistusvoimakkuus osuu yhteen päämaksimiin - kun rako jaetaan N yhtäsuureen osaan, pienenee myös jokaisen osan sähkökenttä vastaavasti, joten päämaksimien valaistusvoimakkuudet vähenevät tekijällä N^2 .

Rakojen välimatka kuvautuu siis diffraktiokuviossa päämaksimien välimatkaksi (kuva 2.4), niiden määrä taas päämaksimien sisäiseksi rakenteeksi,

ns. sivumaksimeiksi. Rakojen leveys näkyy päämaksimien suhteellisena intensiteettinä (kuva 2.5). Lisäksi rakohilaan osuvan intensiteetin on jakauduttava useamman päämaksimin kesken: päämaksimien intensiteetit heikkenevät tekijällä N^2 verrattuna yhden raon diffraktioon energian säilymisen vuoksi.



Kuva 2.4: Modulaatiokäyrä $\sin(N\alpha)/\sin(\alpha)$. Käyrä on piirretty arvoilla $\lambda = 633 \text{ nm}$ ja $a = 62 \text{ }\mu\text{m}$.

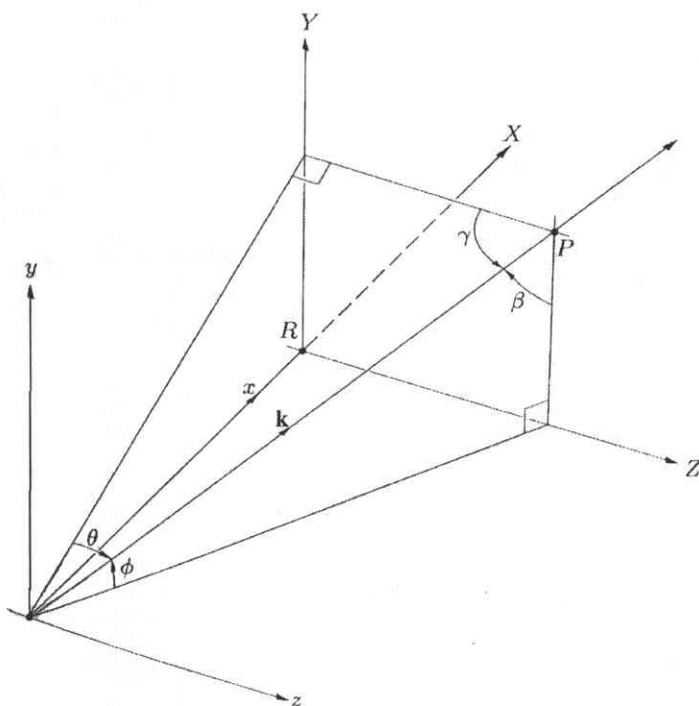


Kuva 2.5: Monen raon diffraktion intensiteettijakauma. Käyrä on piirretty arvoilla $\lambda = 633 \text{ nm}$, $a = 62 \text{ }\mu\text{m}$ ja $b = 36 \text{ }\mu\text{m}$. Verhokäyrä himmentää modulaatiokäyrän piikkejä.

Samaan tulokseen päästään myös *Fourier-optiikan* avulla. Valon eri komponentit diffraktoituvat raosta eri tavalla - varjostimelle kuvautuu raon *Fourier-muunnos*,

$$E(k_Y, k_Z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{A}_0(y, z) e^{i(k_Y y + k_Z z)/R} dy dz. \quad (2.16)$$

missä \mathcal{A}_0 on ns. rakofunktio, joka kuvaa sähkökentän amplitudijakaumaa raon sisällä; kulma-aaltoluvun y - ja z -akselin suuntaiset projektiot ovat (kuvan 2.6 mukaisesti)



Kuva 2.6: Kulma-aaltoluvun projektiot [15].

$$k_Y \equiv \frac{kY}{R} = k \sin \phi \quad \text{ja} \quad k_Z \equiv \frac{kZ}{R} = k \sin \theta.$$

Sähkökenttä integroidaan raon dimensioiden yli, mutta koska rakofunktio häviää muualla kuin raon sisällä, voi integroinnin rajat asettaa äärettömiksi. Tarkastellaan jälleen diffraktiota N :n raon hilasta. Valitaan koordinaatisto siten, että y -akselin suuntaiset (hyvin pitkiksi oletetut) raot ovat z -akselilla. Rakofunktio on $\mathcal{A}(z) = \mathcal{A}_0$ rakojen sisällä ($na - b/2 \leq z \leq na + b/2$) ja 0 muualla. Hilan Fourier-muunnos on

$$E(k_Z) = \sum_{n=0}^{N-1} \int_{na-b/2}^{na+b/2} e^{ik_Z z} dz = \sum_{n=0}^{N-1} b e^{ik_Z na} \text{sinc } k_Z b/2, \quad (2.17)$$

joka voidaan kirjoittaa geometrisena sarjana

$$\begin{aligned} E(k_Z) &= (\text{sinc } k_Z b/2) e^{ik_Z na} [1 + e^{ik_Z a} + e^{2ik_Z a} + \dots + e^{ik_Z (N-1)a}] \\ &= (\text{sinc } k_Z b/2) e^{ik_Z a(N-1)/2} \frac{\sin Nk_Z a/2}{\sin k_Z a/2}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Tämä on vakiota vaille valon sähkökentän amplitudi; normitetuksi valaistusvoimakkuudeksi saadaan

$$I(\theta) = I_0 \left(\text{sinc } k_Z b/2 \right)^2 \left(\frac{\sin Nk_Z a/2}{\sin k_Z a/2} \right)^2, \quad (2.19)$$

joka on sama kuin diffraktiointegraalista laskettu, kun sijoitetaan $k_Z = k \sin \theta$ ja $I_0 = I(0)/N^2$.

Tästä yhdenmukaisuudesta on hyötyä erityisesti simulaatioissa: laskemalla simuloitavan hilan Fourier-muunnos saadaan selville siitä muodostuva diffraktiokuvio. Näin voidaan tutkia mm. hilavirheiden vaikutusta diffraktiokuvioon.

2.4.1 Intensiteettijakauman muoto

Intensiteettijakauman päämaksimit saadaan ehdosta

$$a \sin \theta_m = m\lambda, \quad (2.20)$$

missä m on diffraktiomaksimin kertaluku; maksimin kirkkaus riippuu siitä, mihin kohtaan verhokäyrää $\text{sinc } \beta$ se osuu. Verhokäyrän maksimit ovat kohdissa, joissa $\tan \beta = \beta$, eli $b \sin \theta \approx (\pm 1, 4303)\lambda, (\pm 2, 4590)\lambda, (\pm 3, 4707)\lambda, \dots$, kun taas sen nollakohdat ovat kohdissa $\beta = m\pi$ eli $b \sin \theta = n\lambda$. Äärettömän ohutseinäisen raon rajalla $b \rightarrow a$ diffraktiokuvio häviää; mikäli verhokäyrän nollakohta ja modulaatiokäyrän maksimi osuvat lähekkäin, maksimi himmenee. Vertaamalla himmennetyin maksimin intensiteettiä päämaksimin intensiteettiin saadaan

b laskettua: Tutkitaan tilannetta m :nnen kertaluvun päämaksimin kohdalla $\theta \rightarrow \arcsin(m\lambda/a)$, jolloin

$$\sqrt{\frac{I_m}{I(0)}} \rightarrow (1/N) \left(\frac{\sin(\pi mb/a)}{\pi mb/a} \right) \left(\frac{\sin N m \pi}{\sin m \pi} \right). \quad (2.21)$$

Tässä jälkimmäisten sulkujen sisällä oleva lauseke on huonosti määritelty (muotoa $0/0$); se sievenee kuitenkin l'Hospitalin säännön avulla N :ksi (raja-arvo voidaan ottaa tulon tekijöistä erikseen), jolloin jäljelle jää raja-arvo

$$\sqrt{\frac{I_m}{I(0)}} \rightarrow \frac{\sin(\pi mb/a)}{\pi mb/a}, \quad (2.22)$$

josta saadaan transendenttiyhtälö b :lle:

$$\sqrt{\frac{I_m}{I(0)}} \frac{\pi mb}{a} - \sin \frac{\pi mb}{a} = 0. \quad (2.23)$$

Intensiteettien suhde voidaan määrittää myös korkeamman kertaluvun päämaksimeista, jolloin ehdoksi saadaan

$$\sqrt{\frac{I_n}{I_m}} \rightarrow \frac{m \sin(\pi nb/a)}{n \sin \pi mb/a}, \quad (2.24)$$

josta

$$\sqrt{\frac{I_n}{I_m}} \frac{n}{m} \sin(\pi mb/a) - \sin(\pi nb/a) = 0. \quad (2.25)$$

Tämä kaava pätee kuitenkin epäideaalisille hiloille kaavaa (2.23) huonommin, koska vääristyneessä hilassa vääristymien vaikutus kasautuu: hilassa säilyy ainoastaan lyhyen kantaman järjestys [17].

Termin b epätarkkuutta voidaan arvioida kehittämällä kaavan (2.23) sinitermi Taylorin sarjaksi (origon ympäristössä) ja ratkaisemalla kaavasta b sopivalla tarkkuudella: merkitään $\alpha = \sqrt{I_m/I(0)}$, jolloin (lyhyen laskun jälkeen) saadaan

$$b = \frac{\sqrt{6}a}{m\pi} \sqrt{1 - \alpha + (m\pi b/a)^4/5! - (m\pi b/a)^6/7! + (m\pi b/a)^8/9! - \dots} \quad (2.26)$$

Tässä sarjakehitelmä on katkaistu termin $(m\pi b/a)^{10}/11!$ kohdalla, jonka suuruus (ensimmäisen kertaluvun päämaksimista laskettuna) on kevätpuussa ($b/a \approx 0,9$) on noin 0,008; tämä arvo on paljon pienempi kuin esim. a :n epätarkkuus.

Vaikka kaava (2.26) ei ole analyttinen ratkaisu b :lle, voidaan sitä käyttää b :n virheen arvioimiseen, koska b voidaan määrittää transendenttiyhtälöstä (2.23) numeerisesti. Virheen kasautumislain mukaan

$$\Delta b(x_i) = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial b}{\partial x_i}\right)^2 (\Delta x_i)^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial b}{\partial a}\right)^2 (\Delta a)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial \alpha}\right)^2 (\Delta \alpha)^2}, \quad (2.27)$$

missä Δa ja $\Delta \alpha$ ovat arvioidut tarkkuudet rakojen välimatkan ja valaistusvoimakkuuksien suhteen määrittämiselle. Tarkkuuksiin vaikuttavat sekä itse ilmiöstä johtuvat tekijät (hilan vääristymisestä johtuva piikkien leveneminen) että mittaustekniikka (komponenttien asettelu onnistuminen, kuvausgeometria, kuvausvirheet, mittauselektroniikka ym.). Rakojen leveyden virheeksi saadaan (hieman pidemmän laskun jälkeen)

$$\Delta b(a, \alpha) = \sqrt{6}/(m\pi) \left\{ \left[\sqrt{} + \frac{a}{2\sqrt{}} \left(-\frac{4}{a \cdot 5!} (m\pi b/a)^4 + \frac{6}{a \cdot 7!} (m\pi b/a)^6 - \frac{8}{a \cdot 9!} (m\pi b/a)^8 + \frac{10}{a \cdot 11!} (m\pi b/a)^{10} - \dots \right) \right]^2 (\Delta a)^2 + \left(-\frac{a}{2\sqrt{}} \right)^2 (\Delta \alpha)^2 \right\}^{1/2} \quad (2.28)$$

missä on (lyhyden vuoksi) merkitty kaavan (2.26) neliöjuuritermiä tyhjällä neliöjuurella; sarjaa derivoitaessa muodostunut sarja on taas katkaistu "sopivasta" kohdasta.

Luku 3

Mittalaitteet ja mittaukset

3.1 Diffraktiokuvion mittaaminen

Kaavakuva mittauslaitteistosta on esitetty kuvassa 3.1.

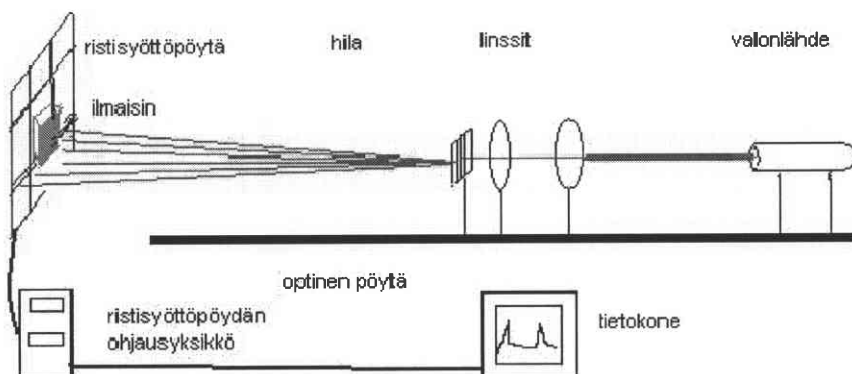
Optiset komponentit kiinnitettiin optiseen pöytään. Valonlähteenä käytettiin helium-neon -laseria, jonka säde ohjattiin pitkin optista akselia kahden linssin läpi. Läpäistyään linssit säde osui näytteeseen, josta se diffraktoitui. Diffraktiokuvio mitattiin ristisyöttöpöytään kiinnitetyllä valoherkällä puolijohdeilmaisimella. IO-kortti mittasi ilmaisimen havaitsemat jännitteet ristisyöttöpöydän paikan funktiona. Tulokset tallennettiin tietokoneeseen ja analysoitiin Matlab-ohjelmiston avulla.

3.1.1 Laser

Laser valonlähteenä

Laser on valonlähteenä "satakieli lintujen joukossa": sen valo on yhdensuuntaista ja koherenttia, ja se säteilee vain muutamaa lähekkäistä taajuutta (moodia).

Helium-neon -laser (He-Ne) edullinen ja paljon käytetty peruslaser. Siinä helium-neon -kaasuseokseen johdettu jännite ylläpitää kaasun energiatilojen käänteistä miehitystä laserontelossa, josta osa vahvistuneesta valosta johde-



Kuva 3.1: Kaavakuva mittauslaitteistosta.

taan ulos puoliläpäisevän peilin kautta. He-Ne -laserin tuottama punainen laservalo on varsin hyvälaatuista: se on lähes lineaaripolaroitua, yhdensuuntaista, lähes monokromaattista ja koherenttia (koherenssimatka tyypillisesti luokkaa 400 m).

Työssä käytettiin $632,8\text{ nm}$ Red Cylindrical Helium Neon Laser -tyyppistä 2 mW :n laseria. Koska turvallisen työskentelyn rajana pidetään 1 mW :n tehoa, vaimennettiin laseria polarisaattorilla aina, kun se oli tarkoituksenmukaista. Lisäksi lasersäteelle altistumista vältettiin.

Laserin ominaisuudet

Valmistaja oli ilmoittanut käytetylle He-Ne -laserille seuraavat tekniset tiedot [18]: aallonpituus $\lambda = 632,8\text{ nm}$, teho 2 mW , säteen koko (säteen $1/e^2$ -halkaisija) $0,49\text{ mm}^2$ ja säteen divergenssi $1,00\text{ mrad}$. Säteen valaisusvoimakkuus on noin 4000 W/m^2 . Laser tuottaa lähes (polarisaatioaste $>500:1$) lineaaripolaroitua valoa TEM_{00} -moodilla.

Laserin teholaähde [19] toimi $6,5\text{ mA}$:n virralla ja tuotti $(1,7 - 2,1)\text{ kV}$:n jatkuvan jännitteen.

3.1.2 Linssit

Lasersäde ohjattiin kahden linssin läpi, joiden tehtävänä oli ohentaa sädekimppua. Kahden linssin systeemin polttoväli on [15]

$$f_h = \frac{f_2(d - f_1)}{d - (f_1 + f_2)}, \quad (3.1)$$

missä f_h on systeemin polttoväli, f_1 ja f_2 ovat linssien polttovälit ja d niiden etäisyys. Valitsemalla linssien etäisyys yhtä suureksi kuin linssien polttovälien summa saadaan systeemin polttoväli äärettömäksi, ts. linssisysteemi tuottaa tasoallon.

Kahden linssin systeemin suurennus on [15]

$$M_T = M_1 M_2 = \frac{f_1 s_{i2}}{d(s_{o1} - f_1) - s_{o1} f_1}, \quad (3.2)$$

missä M_1 ja M_2 ovat linssien suurennukset, s_{o1} on esineen etäisyys ensimmäisestä linssistä ja s_{i2} kuvan etäisyys jälkimmäisestä linssistä.

Koska laser tuottaa tasoaltoa ja linssisysteemin polttoväli on ääretön, voidaan kaavaa tarkastella rajalla $s_{o1} \rightarrow \infty$ ja $s_{i2} \rightarrow \infty$, jolloin se yksinkertaistuu muotoon

$$M_T \rightarrow \frac{1}{d/f_1 - 1}, \quad (3.3)$$

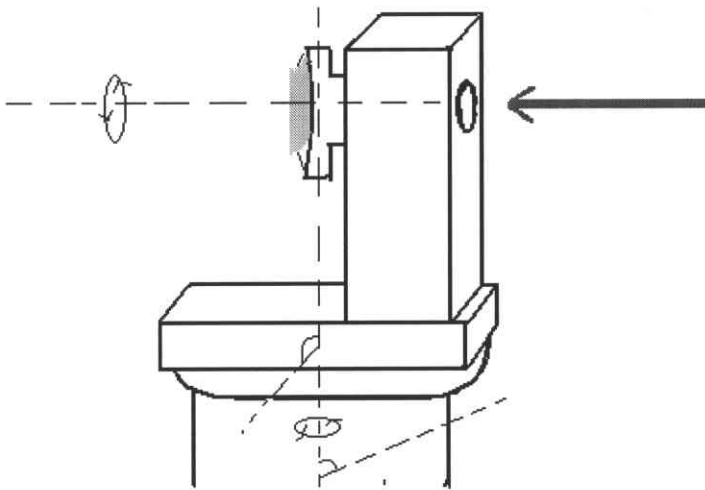
eli lasersäde kapenee, mikäli

$$|f_1| < |f_2| \quad \text{jos } f_1 > 0.$$

Tässä työssä käytettiin linsejä $f_1 = +40 \text{ mm}$ ja $f_2 = +100 \text{ mm}$, jolloin etäisyydeksi saadaan $d = 140 \text{ mm}$. Tällöin suurennus on $2/5$.

3.1.3 Näyteteline

Kaaviokuva näytetelineestä on esitetty kuvassa 3.2. Teline oli rakennettu siten, että sitä voitiin kiertää kaikkiin suuntiin; lisäksi siihen kiinnitettyä näytettä voitiin kiertää sädettä vastaan kohtisuorassa tasossa.

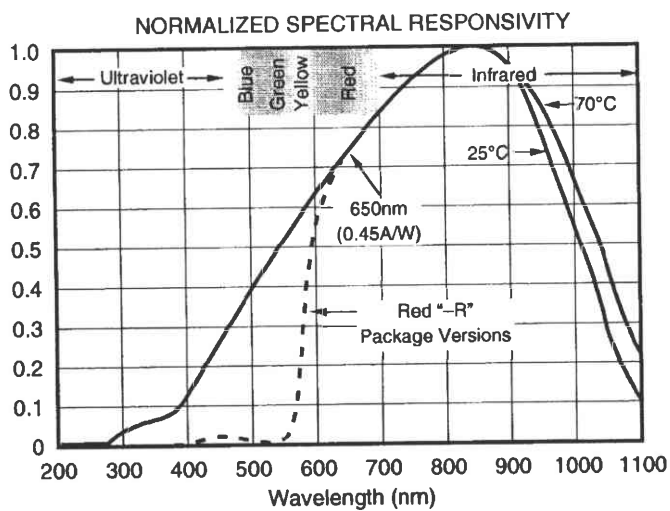


Kuva 3.2: Näyteteline. Lasersäde osuu telineessä olevaan näytteeseen (piirretty harmaalla) nuolen osoittamasta suunnasta. Telineen kiertosuunnat on merkitty katkoviivoin.

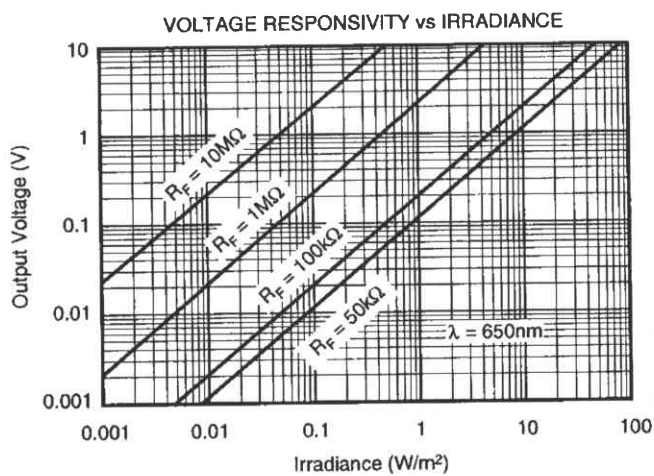
3.1.4 Ilmaisim

Signaali mitattiin puolijohdeilmaisimella OPT101 [21]. Ilmaisimeen osuva valo aiheutti puolijohdeessa elektronien virittymisen seurauksena valon intensiteettiin verrannollisen varausvirran, joka muutettiin ilmaisimeen sisäänrakennetulla operaatiovahvistimella jännitteeksi. Ilmaisim oli kiinnitetty koaksiaalikaapelilla IO-korttiin, josta mittaustiedot siirrettiin tietokoneelle. Ilmaisimen herkkyyssäyrät on esitetty kuvissa 3.3 ja 3.4.

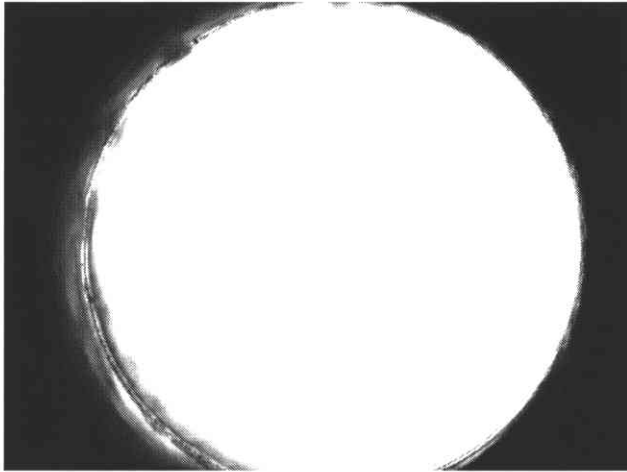
Ilmaisimen havaitsemaa säteilykeilaa yritettiin rajoittaa säädettävällä raolla [20], jolle suunniteltiin kiinnitys ilmaisimelaatikkoon tuen avulla. Raon käytöstä kuitenkin luovuttiin, koska keila saatiin paremmin rajoitettua kiinnittämällä ilmaisimen päälle hopeasta valmistettu pyöreä reikälevy, jonka reiän halkaisija oli $0,5 \text{ mm}$. Levyjä tehtiin 25 kappaletta; niistä valittiin mikroskooppikuvien avulla sellaiset, joiden reiät olivat mahdollisimman pyöreät. Hyvä- ja huonolaatuinen reikä on esitetty kuvissa 3.5 ja 3.6.



Kuva 3.3: Ilmaisimen herkkyyskäyrä [21].



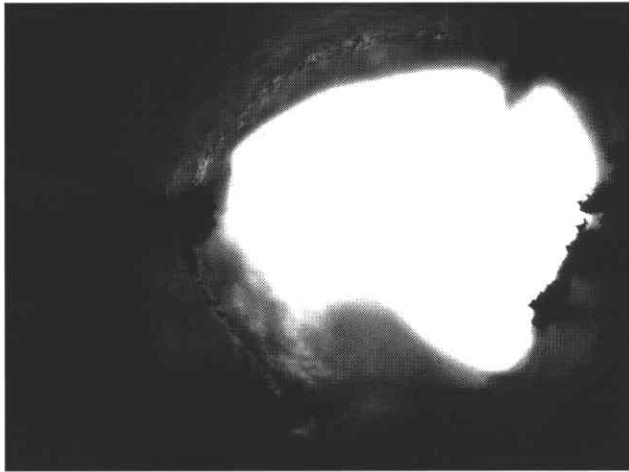
Kuva 3.4: Ilmaisimen herkkyyskäyrä [21].



Kuva 3.5: Hyvälaatuinen reikä (mikroskooppikuva).

Samoja levyjä käytettiin myös rajoittamaan tutkittavasta näytteestä alue, johon lasersäde osuu (kohta 2.4). Käytettäessä reikiä säteen rajoittamiseen oli kuitenkin varmistuttava siitä, ettei ylimääräinen reikä sekoita varsinaisen diffraktiokuvion muotoa - valon diffraktio pyöreästä reiästä tuottaa Airyn renkaista muodostuvan kuvion. Koska mittausta tehdään kuitenkin vaakasuoraan suuntaan, renkaiden merkitys on vähäinen. Hopealevyn riittävän vähäisestä vaikutuksesta tutkittavaan ilmiöön saatiin varmuus mittaamalla diffraktiokuvio sen kanssa ja ilman sitä.

Koska hopea johtaa hyvin lämpöä, levyssä olevan raon geometria saattaa lämpölaajenemisen seurauksena muuttua; lisäksi levyn itsensä lähettämän lämpösäteilyn ominaisuuksien muuttuminen saattaa vääristää mitattua spektriä. Tätä mahdollisuutta tutkittiin lämmittämällä levyä lasersäteellä useiden tuntien ajan. Muutosta spektrissä ei kuitenkaan havaittu.



Kuva 3.6: Huonolaatuinen reikä (mikroskooppikuva).

3.1.5 Ristisyöttöpöytä ja sen ohjaus

Ilmaisinta liikuteltiin teollisuusautomaatikassa yleisesti käytetyn *ristisyöttöpöydän* avulla. Askelmoottori liikuttaa ristisyöttöpöydän kelkkaan kiinnitettyä ilmaisinta diffraktiokuvion mittaamiseksi. Ristisyöttöpöydän kelkka liikkui kierretankoa pitkin x- ja y-suuntaan siten, että jokainen tangon 2,5 mm:n kierros oli jaettu 200 askeleeseen. Ristisyöttöpöydän ohjausyksikkö ohjasi kelkan moottoria sekä ohjauspulssin nousevalla että sen laskevalla reunalla. Lisäksi se huolehti siitä, ettei moottoria ohjattu liian suurella nopeudella tai kiihtyvyydellä, jolloin se ei olisi ehtinyt reagoida kaikkiin ohjauspulsseihin. Yksikköä ohjattiin sitä varten kirjoitetulla tietokoneohjelmalla.

3.2 Kalibrointi

3.2.1 Optiikan kalibrointi

Optiikka kalibroitiin seuraavasti:

1. Ensin arvioidaan seinän ja optisen pöytätason välinen kulma.
2. Pöydän kallistus säädetään niin, että pöytätason normaali ja seinätason normaali ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan.
3. Lasersäde suunnataan niin, että se on kohtisuorassa seinää vastaan: lasersäde ohjataan ristisyöttöpöytään kiinnitettyyn peiliin (peiliksi kelpaa mikä tahansa riittävästi heijastava materiaali, esim. lasilevy). Peiliä kiinnitettäessä on varmistettava, että peilitaso on todellakin taso, ts. kiinnitysmekanismi ei aiheuta lasilevyyn epätasaista jännitystä, joka aiheuttaisi sen taipumisen.
4. Laseria käännetään sen telineessä siten, että peilistä tuleva heijastus osuu laserin ikkunaan; laserin korkeutta voidaan myös tarvittaessa säätää.
5. Linssitelineet säädetään niin, että linssin optinen akseli kulkee samaan suuntaan kuin säde etenee; tämä tehdään erityisillä kohdistuskiekoilla. Kiekkoina käytettiin täsmälleen linssin levyisiä muovikiekoja, joiden keskellä oli 1 mm:n reikä. Tällöin linssitason normaali on kohtisuorassa pöytätason normaalia vastaan. Kohtisuoruus tarkistetaan kiinnittämällä linssitelineisiin peilit, joista heijastunutta sädettä seurataan.
6. Tarkastetaan säädöt tunnetulla kalibrointihilalla.
7. Hienosäädetään systeemiä, jos se on tarpeen.

8. Mikäli käytössä on CCD-kamera, voidaan säteen muotoa tarkkailla sen avulla. Jos kamera sijoitetaan laserin tulosuunnasta katsoen näytteen taakse, voidaan myös diffraktiokuvion muotoa tarkkailla: mikäli näytteeseen ei osukaan tasoaalto, havaitaan Fresnelin diffraktio.

3.2.2 Kalibrointi testihilan avulla

Testihilana käytettiin ensin elektronimikroskooppihilaa, jonka dimensiot mitattiin siten, että siitä otettiin mikroskooppikuva, jonka mittoja verrattiin tunnettuun asteikkoon. Hilan rakojen keskipisteiden välimatkaksi saatiin $a = (62, 3 \pm 0, 3) \mu\text{m}$ x-akselilla ja $a = (62, 3 \pm 0, 6) \mu\text{m}$ y-akselilla ja rakojen kooksi saatiin $b = (35, 7 \pm 2, 8) \mu\text{m}$ x-akselin suuntaan ja $b = (35, 7 \pm 2, 7) \mu\text{m}$ y-akselin suuntaan. Sen dimensioiden suhteelliset virheet (noin 10%) olivat kuitenkin liian suuret, joten sen käytöstä luovuttiin. Hilalla testattiin kuitenkin a :n ja b :n määrittäminen diffraktiokuvioista; vastaava tilanne on esitetty luvun 2 kuvassa 2.5, jonka kuvaajan käyrä on piirretty elektronimikroskooppihilaa vastaavilla a :n ja b :n arvoilla - dimensiot määritettiin vertaamalla piikkien paikkoja ja suhteellisia intensiteettejä.

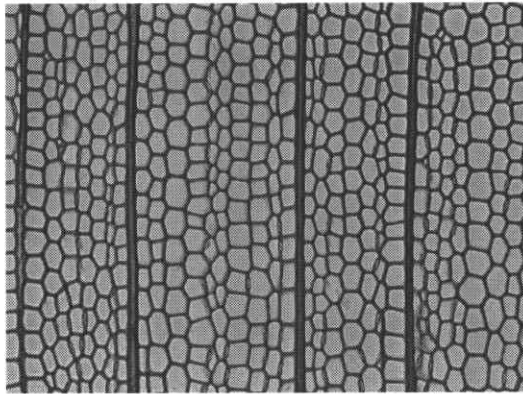
Elektronimikroskooppihilan tilalle hankittiin optisessa mikroskopiassa käytettävä objektimikrometri, jonka valmistaja toimitti kalibroituna. Hilassa oli paksut viivat $100 \mu\text{m}$:n välein ja ohuet $10 \mu\text{m}$:n välein. Kalibrointi oli tehty laserinterferometrillä ja sen tarkkuus oli $\pm 500 \text{ nm}$. Mikrometrin mitta-asteikko toimi hilana, jolloin sen etäisyys puolijohdeilmäpinnan pinnasta saatiin tarkasti määritettyä yhtälön (2.20) avulla. Etäisyys määritettiin mittaamalla suoran säteen lisäksi ensimmäisen kertaluvun päämaksimit diffraktiokuvion molemmilta puolilta, jolloin suoran säteen (nollannen kertaluvun päämaksimin) paikka saatiin tarkemmin määritettyä. Etäisyydeksi saatiin $d = (1203 \pm 1) \text{ mm}$.

3.3 Näytteiden valmistus

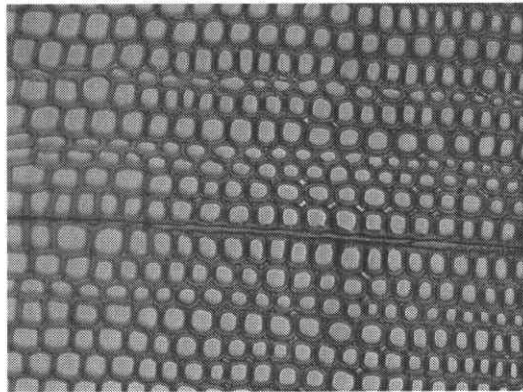
Tutkittavat näytteet oli valmistettu metsäkuusikiekosta, joka oli leikattu Ruotsinkylän tutkimusasemalta kaadetusta puusta rinnan korkeudelta [23]. Kiekosta oli kryomikrotomilla leikattu kolme ohutleikettä, joiden paksuus oli noin $16 \mu\text{m}$. Leikkeet olivat vuosilustoista 2, 34 ja 42. Leikkeet oli valmistettu kesäkuussa 2000 Metsäntutkimuslaitoksen Vantaan tutkimuskeskuksessa. Ne oli värjätty safraniinilla ja liimattu kanadabalsamilla (orgaaninen aine, jolla on lähes sama taitekerroin kuin peitinlasilla) mikroskooppilevyn ja suojaavan lasilevyn väliin. Tekniikka on yleisesti käytössä mikroskooppinäytteiden valmistuksessa.

3.4 Solukoon määrittäminen mikroskoopilla

Lasermittauksen tulosten järjestyksen varmentamiseksi kuvattiin mittaus- ta varten valitut kohdat näytteistä mikroskooppiin liitettyllä digitaalika- meralla 20-kertaisella suurennoksella (kuvat 3.7, 3.8 ja 3.9), minkä jäl- keen kuvista määritettiin solujen ja soluseinien dimensiot sekä radiaali- että tangentsuuntaan (kuva 1.1) kuvankäsittelyohjelman (*Image Pro Plus*, versio 4.1) avulla. Soluseinät näkyivät kuvissa tummempina kohti- na; ohjelma laski kirkkauden muutoskohtien etäisyydet annetuissa suun- nissa. Kuvien pituusyksikkö-pikseli -vastaavuus määritettiin kuvaamalla ob- jektimikrometrin asteikko samalla suurennoksella kuin tutkittavat näytteet. Vastaavuudeksi saatiin $2,69 \pm 0,01$ pikseliä/mm. Solujen kokojakautumista piirrettiin histogrammi ja laskettiin solujen keskimääräiset koot ja niiden keskihajonnat. Lisäksi määritettiin soluseinien kaksinkertaiset paksuudet (eli kahden viereisen solun yhteisen seinän paksuudet). Jotta mikroskooppi- ja



Kuva 3.7: Lustosta 2 mittausta varten rajattu alue (mikroskooppikuva).

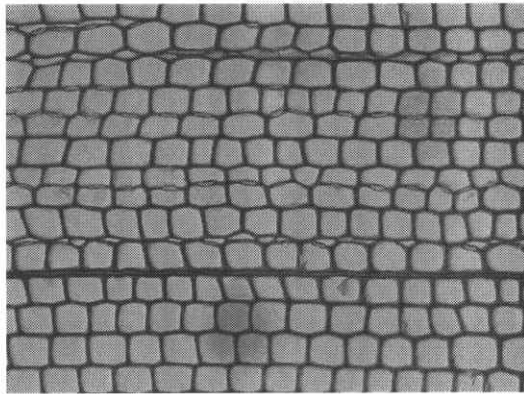


Kuva 3.8: Lustosta 34 mittausta varten rajattu alue (mikroskooppikuva).

lasermittauksen tuloksia voisi vertailla, oli varmistettava, että ne kuvaisivat saman kohdan lustosta. Tämän takia näytteen päälle kiinnitettiin hopealevy (kohta 2.1.4).

3.5 Solukoon määrittäminen laserilla

Tutkittava näyte käännettiin näytetelineeseen siten, että tutkittava suunta oli ristisyöttöpöydän kulkusuunnan kanssa yhdensuuntainen. Diffraktiokuvasta mitattiin sopiva alue, joka jaettiin askelmoottorin askeleen kokoiisiin



Kuva 3.9: Lustosta 42 mittausta varten rajattu alue (mikroskooppikuva).

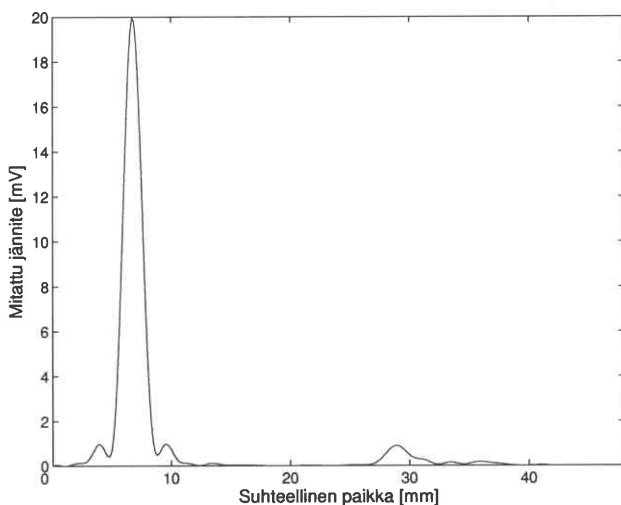
kaistoihin; askeleeksi valittiin $0,16\text{ mm}$, koska tätä pienemmillä askeleilla ei mitatun kuvion ollut havaittu tarkentuvan. Valaistusvoimakkuus summattiin yli jokaisen kaistan. Radiaali- ja tangenttisuunta mitattiin eri alueista.

Luku 4

Tulokset

Esimerkki mitatusta diffraktiokuvioista on esitetty kuvassa 4.1. Tulosten analysoimiseksi solujen suhteellinen määrä piirrettiin solukoon funktiona, ts. solukoon kaavassa $a = \frac{m\lambda}{\sin(\arctan(x/d))}$ approksimoitiin $\sin(\arctan(x/d)) \approx x/d$, mikä pitää hyvin paikkansa pienillä kulmilla (x/d). Mitatuissa jakautumissa havaittiin todellisen solurakenteen lisäksi myös varsinaisten diffraktiomaksimien puolikkaita monikertoja, jotka johtuivat hilan epäideaalisuudesta. Nämä piikit pyrittiin jättämään analyysissä huomiotta. Lisäksi mitatut jakaumat eivät olleet täysin gaussisia, koska (toisin kuin mikroskoopi) lasersäde "näkee" ohutleikkeessä paikallista rakennetta: periaatteessa jokainen havaittava solumuodon jakso aiheuttaa mitattuun diffraktiokuvioon intensiteettihiipun, jonka koko on verrannollinen siihen, montako solua edustaa kyseistä jaksoa.

Tämän takia sovitettiin mitattuun jakaumaan parvi Gaussin funktioita. Keskimääräisen solukoon määrittämiseksi laskettiin sovituskäyristä (taustan vähentämisen jälkeen) solukoon odotusarvo (painotettu keskiarvo). Tuloksia verrattiin mikroskooppimenetelmällä mitattuihin (kuvat 4.2-4.13). Mitauksen tulokset on esitetty taulukossa 4.1. Lisäksi tuloksista määritettiin kaksinkertainen soluseinän paksuus kaavan (2.23) avulla: Mitatusta

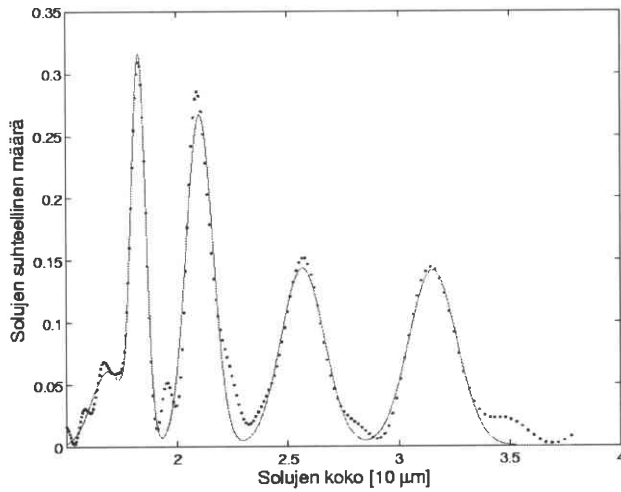


Kuva 4.1: Esimerkkinä mitatuista diffraktiokuvioista lusto 42:n radiaalisuuntaan mitattu kuvio. Päämaksimin molemmin puolin olevat pienet huiput johtuvat hopealevyn aiheuttamista Airy-renkaista.

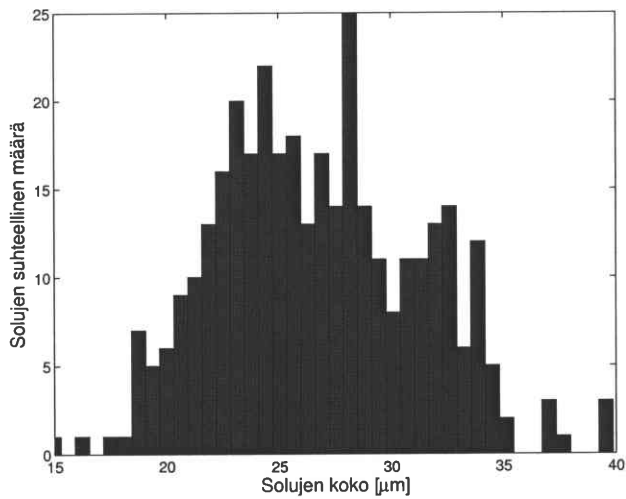
diffraktiokuvioista laskettiin suoran säteen ja ensimmäisen kertaluvun päämaksimien intensiteetit numeerisesti integroimalla. Piikin tarkan leveyden määrittäminen oli vaikeaa; suorasta säteestä pyrittiin jättämään Airyn renkaiden osuus huomiotta, ensimmäisen kertaluvun päämaksimi integroitiin havaittavien piikkien yli. Tulokset on esitetty taulukossa 4.2.

Näyte	mikroskooppi	laser	mikroskooppi	laser
	radiaalisuuntaan μm		tangenttisuuntaan μm	
2	$26,7 \pm 4,5$	$24,0 \pm 4,5$	$18,9 \pm 6,4$	$27,1 \pm 5,5$
34	$29,4 \pm 4,5$	$33,3 \pm 10,9$	$27,5 \pm 6,9$	$28,8 \pm 2,8$
42	$40,6 \pm 6,1$	$34,1 \pm 3,5$	$30,4 \pm 9,2$	$40,2 \pm 7,9$

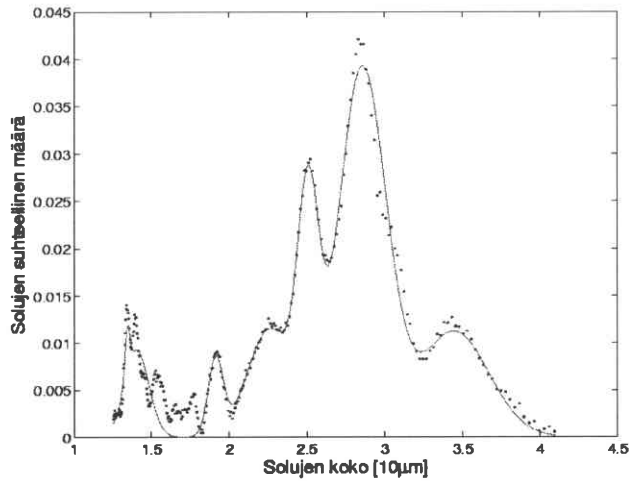
Taulukko 4.1: Mikroskoopilla ja laserilla mitatut solujen keskimääräiset välimatkat.



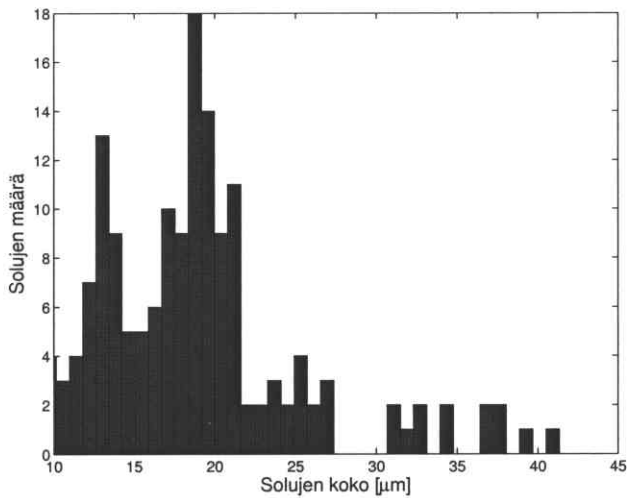
Kuva 4.2: Lusto 2:n radiaalisuuntaan mitattu diffraktiokuva ja siihen sovitettu suoraparvi. Diffraktiokuva on muutettu koordinaatistoon, jossa x-akselilla on solun läpimitta.



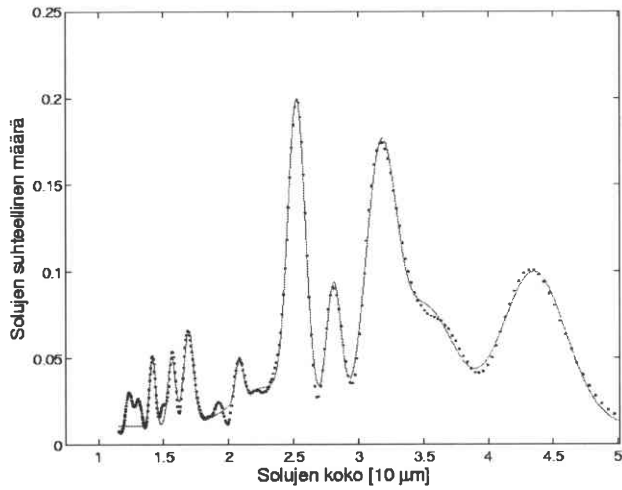
Kuva 4.3: Lusto 2:n radiaalisuuntaan mitatuista soluista piirretty histogrammi.



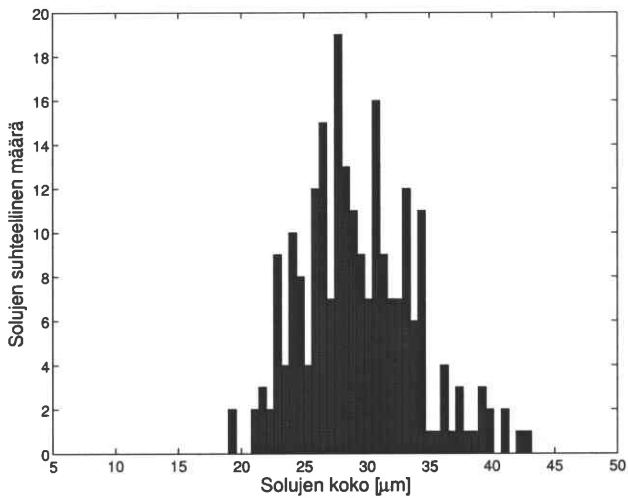
Kuva 4.4: Lusto 2:n tangenttisuuntaan mitattu diffraktiokuvio ja siihen sovitettu suoraparvi. Diffraktiokuvio on muutettu koordinaatistoon, jossa x-akselilla on solun läpimitta.



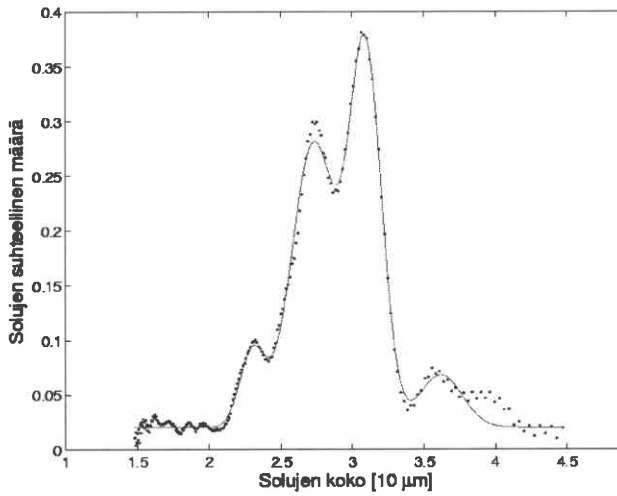
Kuva 4.5: Lusto 2:n tangenttisuuntaan mitatuista soluista piirretty histogrammi.



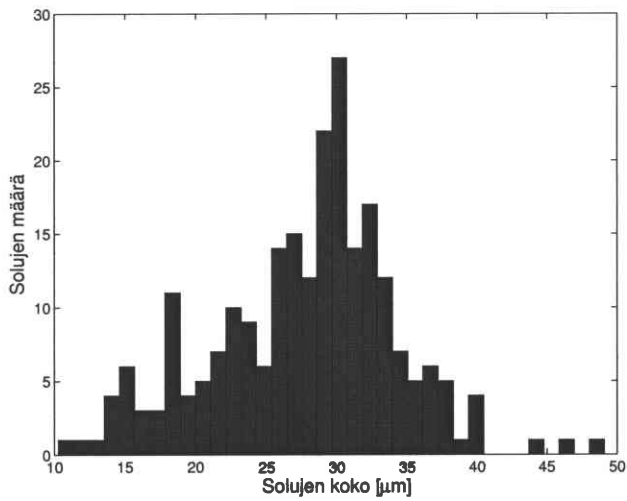
Kuva 4.6: Lusto 34:n radiaalisuuntaan mitattu diffraktiokuvio ja siihen sovitettu suoraparvi. Diffraktiokuvio on muutettu koordinaatistoon, jossa x-akselilla on solun läpimitta.



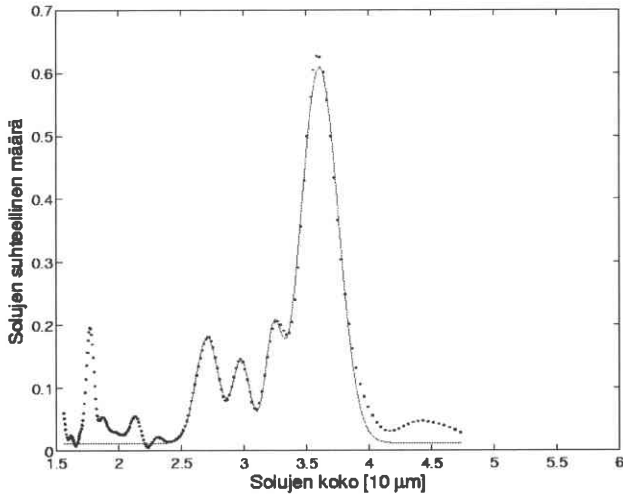
Kuva 4.7: Lusto 34:n radiaalisuuntaan mitatuista soluista piirretty histogrammi.



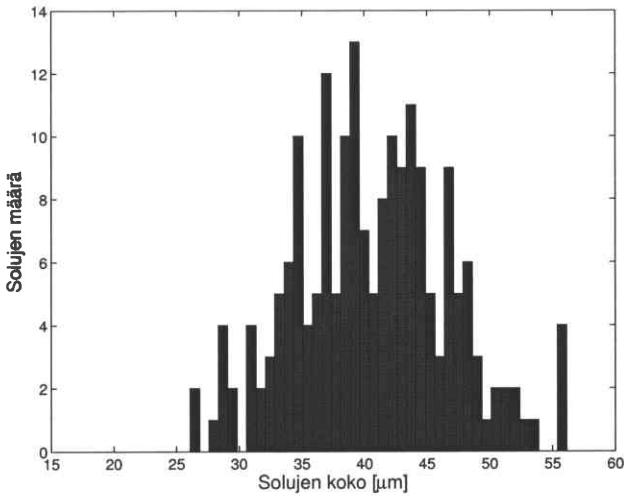
Kuva 4.8: Lusto 34:n tangenttisuuntaan mitattu diffraktiokuvio ja siihen sovitettu suoraparvi. Diffraktiokuvio on muutettu koordinaatistoon, jossa x-akselilla on solun läpimitta.



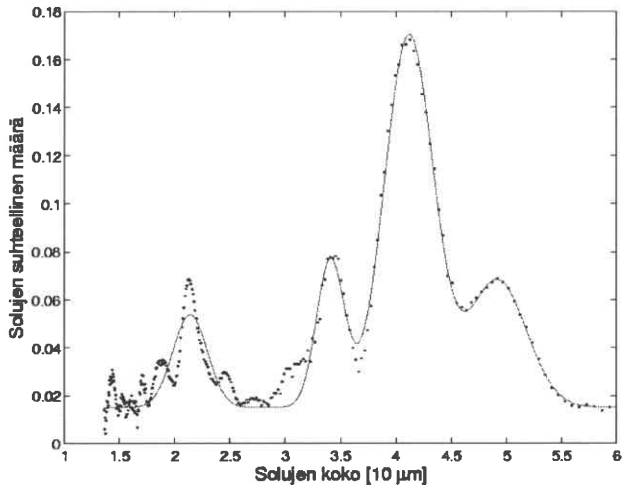
Kuva 4.9: Lusto 34:n tangenttisuuntaan mitatuista soluista piirretty histogrammi.



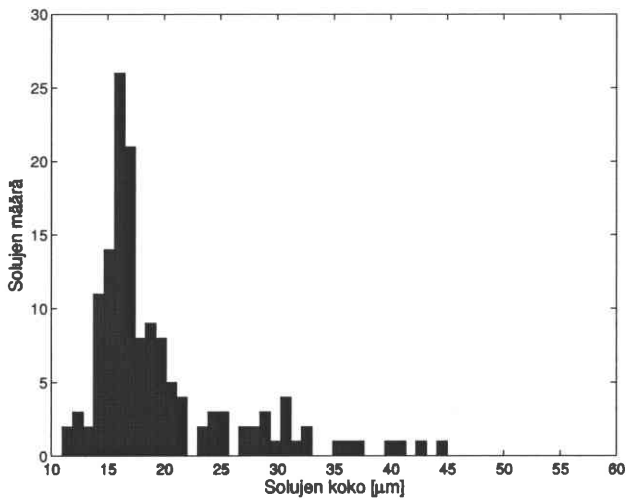
Kuva 4.10: Lusto 42:n radiaalisuuntaan mitattu diffraktiokuvio ja siihen sovitettu suoraparvi. Diffraktiokuvio on muutettu koordinaatistoon, jossa x-akselilla on solun läpimitta. Noin kohdassa $18\mu m$ havaittiin tyypillinen puolikkaasta jaksosta tuleva "valepiikki".



Kuva 4.11: Lusto 42:n radiaalisuuntaan mitatuista soluista piirretty histogrammi.



Kuva 4.12: Lusto 42:n tangenttisuuntaan mitattu diffraktiokuvio ja siihen sovitettu suoraparvi. Diffraktiokuvio on muutettu koordinaatistoon, jossa x-akselilla on solun läpimitta.



Kuva 4.13: Lusto 42:n tangenttisuuntaan mitatuista soluista piirretty histogrammi.

Näyte	mikroskooppi		laser	
	radiaalisuuntaan μm		tangenttisuuntaan μm	
2	$6,1 \pm 0,8$	$6,9 \pm 5,9$	$8,2 \pm 4,1$	$5,1 \pm 5,9$
34	$9,9 \pm 2,1$	$17,2 \pm 11,7$	$9,8 \pm 4,1$	$18,0 \pm 3,5$
42	$6,5 \pm 0,6$	$8,5 \pm 3,8$	$7,3 \pm 2,5$	$9,9 \pm 8,5$

Taulukko 4.2: Mikroskoopilla ja laserilla mitatut solujen kaksinkertaisten soluseinien keskimääräiset paksuudet.

Luku 5

Johtopäätökset

5.1 Menetelmän käyttökelpoisuus

Tutkittu menetelmä vaikuttaa erittäin käyttökelpoiselta havupuun solukon keskimääräisen solukoon ja soluseinän paksuuden määrittämiseen - vaikka tulokset joissakin kohdissa poikkesivatkin mikroskoopilla mitatuista, havaittiin varsinkin luston 34 muita suuremmat soluseinät erittäin selvästi. Tämä on erityisen tärkeää mitattaessa luston kesäpuusolujen osuutta.

Solukon heikko järjestäytyneisyys vaikeuttaa tietenkin tulosten analysoimista; vastaavaa menetelmää on viime aikoina käytetty mm. metallilangan paksuuden mittaamiseen [24], mikä on huomattavasti vaikeammampaa, samoin kuin tässä työssä tehty elektronimikroskooppihilan dimensioiden määrittäminen.

Havupuun solujen dimensioiden lisäksi menetelmä saattaisi sopia lehtipuiden putkiloiden koon mittaamiseen. Putkilot ovat halkaisijaltaan tyypillisesti paljon muuta solukkoa suurempia, joten niiden pitäisi näkyä selvästi diffraktiokuviossa.

5.2 Tulosten yhteensopivuus

Laser- ja mikroskooppimittausten tulosten vertailusta tehtiin seuraavat johtopäätökset: Lustojen 2 ja 34 radiaalisuunnissa ja luston 34 tangenttisuunnassa erot solujen keskimääräisessä välimatkassa mikroskooppi- ja lasermittauksen välillä olivat varsin pienet ja niiden voitiin tulkita olevan seurausta solujen luonnollisesta kokovaihtelusta. Yllättävää sen sijaan oli, että lustossa 42 - joka oli tutkituista näytteistä lähimpänä ideaalista hilaa - menetelmät antoivat aivan erilaisen tuloksen molempiin suuntiin. Radiaalisuunnassa ero oli noin 17% ja tangenttisuunnassa peräti 24%. Luston 2 tangenttisuunnassa ero oli noin 28%, mutta siinä solut eivät ole suorakulmioita vaan pikemminkin heksagonaalisia (ero korostuu tangenttisuunnassa, jossa solukko on heikomin järjestynyttä), jolloin laatikkohilamallin soveltaminen vääristää tulosta.

Kaksoissoluseinän paksuuden määrittäminen onnistui lustojen 2 ja 42 näytteille hyvin; lasermittauksella määritettyjen seinäpaksuuksien suurehko virherajat johtuvat siitä, että b :n määrittämiseen tarvitaan a :n arvoa, jolloin a :n virhe kasautuu myös b :hen. Sen sijaan lustosta 34 mitatut kaksoissoluseinän paksuudet olivat lähes kaksinkertaisia mikroskooppimittaukseen verrattuna. Luston 34 huonosti järjestyneen solukon mittaaminen tangenttisuuntaan mikroskooppimenetelmälläkään ei kuitenkaan välttämättä anna luotettavaa tulosta.

Analyysissä jätettiin huomiotta myös solujen väliset tilat - koska solut eivät ole tarkasti suorakulmaisia tai heksagonaalisia, jää niiden väliin aukkoja, jotka saattavat myös toimia hilana. Sen sijaan oletus, jonka mukaan soluseinä on täysin valoa läpäisemätön, lienee kohtalaisen hyvin perusteltu: Soluseinä läpäisee selvästi onteloa huonommin valoa ja lisäksi se oli värjätty safraniinilla punaiseksi, jolloin se heijastaa punaista laservaloa.

5.3 Menetelmän kehittäminen

Tässä työssä tutkitulla "autotalliversiolla" oli tarkoitus osoittaa menetelmän käyttökelpoisuus - rutiinimittauksia varten se on aivan liian hidas ja kömpelö: jokainen ohutleikkeen noin sadan solun alue on mitattava erikseen ristisyötöpöytään kiinnitetyllä ilmaisimella. Näistä heikkouksista päästäisiin eroon mittaamalla diffraktiokuvio CCD-kameralla, jolloin kuvio voitaisiin siirtää suoraan kamerasta tietokoneelle. Näytetelinettä voitaisiin liikutella askelmoottorilla, jolloin koko ohutleike saataisiin kuvattua varsin lyhyessä ajassa. Tällaisen laitteen testaus onkin tarkoitus aloittaa Metsäntutkimuslaitoksella. Mittauksen nopeuden hintana on kuitenkin erotuskyvyn huononeminen: CCD-kameran kennon näkemä avaruuskulma on yleensä varsin pieni, joten kameran olisi oltava lähellä näytettä - eikä kohtuuhintaisten CCD-kameroiden erotuskyky vastaa yksittäisen puolijohdeilmaisimen erotuskykyä.

Kiitokset

Haluan kiittää seuraavia tämän työn valmistumiseen myötävaikuttaneita henkilöitä.

Kiitokset ohjaajalleni Erkki Pesoselle asiantuntevasta ohjauksesta ja tämän työn väsymättömästä kommentoimisesta. Itse asiassa koko työ lähti Erkin ideasta liikkeelle.

Erityiskiitokset kuuluvat Matti Sarénille, joka käytännössä toimi toisena ohjaajanani - sen lisäksi, että Matti opasti minua monien tässä tutkimuksessa tarvittujen laitteiden käytössä, hän opetti minulle tieteellistä ajattelua, eli sitä, miten kokeellista tutkimusta oikeasti kuuluu tehdä. Ilman Mattia tämä työ tuskin näyttäisi siltä kuin se näyttää nyt. Lisäksi Matti ohjelmoi suurimman osan tässä työssä tarvituista tietokoneohjelmista.

Kiitokset Pekka Saranpäälle rahoituksen järjestämisestä ja koko Metlan puuanatomian ryhmälle jatkuvasta kannustuksesta.

Kiitos Tapio Järviselle laitteen rakennuksessa tarvittujen metalliosien tekemisestä. Tällaisia olivat mm. näyteteline.

Kiitokset myös Fysikaalisten tieteiden laitoksen lasergurulle Birger Ståhlbergille, joka tutustutti minut Erkki Pesoseen. Birger myös kommentoi työn teoriaosuutta tyyliä, mutta asiallisesti.

Kiitos Harri Waltarille teoriaosuuden kommentoimisesta ja monista minulle fysiikkaa monipuolisesti valaisseista keskusteluista. Kiitos myös pitkäaikaisille ystäväilleni Ari Harjunmaalle ja Anna Ruhalalle koko opiskeluaikani kestäneestä kannustuksesta.

Lopuksi kiitos vanhemmilleni.

Kirjallisuutta

- [1] M. Kärkkäinen *Puutieteen perusteet*, Karisto (2003)
- [2] E. Mork, *Qualität des Fichtenholzes unter besonderer Rücksichtnahme auf Schleif- und Papierholz*, *Der Papier-Fabrikant*, **26** (1928):741-747
- [3] D. Fengel, *The ultrastructure of wood. Part 1: Wood as basic material for the isolation of cellulose*. *Wood sci. Technol.* **3**(3) (1969):203-217.
- [4] H. Süss ja W. R. Müller-Stoll, *Änderungen der Zellgrößen und des Anteils der Holzelemente in zerstreutporigen Hölzern innerhalb einer Zuwachsperiode*, *Holz, Roh und Werkstoff* **28** (1970):309-317
- [5] T. Jaakkola, H. Mäkinen, M. Saren, P. Saranpää, julkaisematon
- [6] M. W. Bannan, *The length, tangential diameter and length/width ratio of conifer tracheids*, *Canadian journal of Botany* **43** (1965):967-985.
- [7] K. von Wilpert, *Intranatural variation of radial tracheid diameters as monitor of site specific water stress*, *Dendrochronologia* **9** (1991)
- [8] P.J. Kramer ja T.T. Kozlowski *Physiology of trees*, McGraw-Hill publication in botanical sciences (1960)
- [9] H. Brix, *Nitrogen fertilization and water effects on photosynthesis and earlywood-latewood production in Douglas-fir*, *Canadian journal of forest research* **2** (1972):467-478

- [10] T. E. Timell, *Recent progress in the chemistry of wood hemicelluloses*, Wood. Sci. Tprof. Juhani Keinonen ja prof. Jyrki Räisänenetchnol. 7 (1967):1-5
- [11] W. A. Côté Jr., *History of wood ultrastructure research*, Wood Sci Technol. 1: 178-180 (1967)
- [12] W. A. Côté Jr., *Cellular ultrastructure of woody plants*, Suracuse University Press, New York (1964)
- [13] L. Paavilainen , *Influence of fibre morphology and processing on the softwood sulphate pulp fibre and paper properties*, väitöskirja, Helsingin tekninen korkeakoulu (1993)
- [14] U. Vainio, S. Andersson, R. Serimaa, T. Paakkari, P. Saranpää, M. Treacy ja J. Evertsen, *Variation of microfibril angle between four provenances of Sitka Spruce (*Picea sitchensis*)*, Plant Biology 1 (2002):27-33
- [15] E. Hecht, *Optics*, 3rd Edition, Addison Wesley Longman (1998)
- [16] G. Arfken ja H. Weber, *Mathematical Methods for Physicists*, 4th Edition, Academic Press (1995)
- [17] J. Ziman, *Models of disorder*, Cambridge University Press (1979)
- [18] *Coherent* -tuotekatalogi, 1998/99, kataloginnumero 31-2025
- [19] *Coherent* -tuotekatalogi, 1998/99, kataloginnumero 31-2462
- [20] *Coherent* -tuotekatalogi, 1998/99, kataloginnumero 53-1137
- [21] *Burr-Brown OPT101 Monolithic photodiode and single-supply transimpedance amplifier*, www.qsl.net/wb9ajz/laser/data/opt101.pdf

- [22] *National instruments -tuotekatalogi*, 2002, malli NI 6035E
- [23] M.-P. Saren, R. Serimaa, S. Andersson, T. Paakkari, P. Saranpää, E. Pesonen, *Structural Variation of Tracheids in Norway Spruce*, *Journal of Structural Biology* **136**:101-109 (2001)
- [24] S. Khodier, *Measurement of wire diameter by optical diffraction*, *Optics and Laser Technology* **36**: 63-67 (2004)



Selvitys- ja tutkimustyö mikroaaltojen ja ultraäänen soveltuvuudesta puun laadun mittaukseen

Mittalaitelaboratorion raportti 05-02

HELMIKUU 2005

Raportin nimi:

Selvitys- ja tutkimustyö mikroaaltojen ja ultraäänen soveltuvuudesta puun laadun mittaukseen

Numero:

Tekijä(t):

Mikko Haapalainen, Ville Hyvärinen, Sari Nieminen, Matti-P.Sarén, Mika Sorjonen

Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa kartoitetaan Mittalaitelaboratoriossa (MILA) käytössä olevien mittausten menetelmien soveltuvuutta mekaanisen puunjalostusteollisuuden tarpeisiin. Tutkimuksen kohteena on ultraäänen soveltaminen kuoren paksuuden määrittämiseen ja tukin kosteuden sekä oksakkuuden arviointi mikroaaltomenetelmin.

Tutkimuksen selvitysosuudessa esitetään menetelmien tekniset erityispiirteet, esitetään katsaus eräisiin markkinoilla oleviin laitteisiin. Siinä myös esitetään MILAssa aiemmin suoritettuja tutkimuksia ja niiden loppupäätelmiä.

Tutkimusosuudessa kartoitetaan käytössä olevan tekniikan mahdollisuudet, esitetään mittauksia annetusta materiaalista. Niinikään esitetään lyhyesti mittaustulosten tulkinnan perusteet ja johtopäätökset, sekä niiden jatkokehitysnäkymiä.

Avainsanat:

Kuusi, Puun kosteuden määrittäminen, Puun kuoren paksuuden määrittäminen, Mikroaaltospektroskopia, Ultraääni

Luottamuksellisuus:

Julkinen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	4
1.1 Työpanokset.....	4
2 Selvitystyö	5
2.1 Ainetta rikkomattomat menetelmät puun rakennetutkimuksessa	5
2.2 Ultraääni	5
2.3 Mikroaallot	8
2.3.1 PUUMI ja MOKSA -hankkeet	10
2.3.2 Kosteuden määrittäminen mikroaaltomenetelmillä	11
3 Tutkimus	13
3.1 Saadaanko kuusen kuoren paksuus määritettyä ultraäänimittauksin?.....	13
3.1.1 Materiaali	13
3.1.2 Menetelmät	13
3.1.3 Tulokset	14
3.1.4 Johtopäätökset.....	15
3.2 Saadaanko mikroaaltomenetelmillä arvioitua rungon kosteustietoa rungon päädyistä?	16
3.2.1 Materiaali	16
3.2.2 Menetelmät	17
3.2.3 Tulokset	18
3.2.4 Johtopäätökset.....	23
3.3 Voidaanko rungon oksajakaumaa luotettavasti ennustaa mikroaaltomittauksella?.....	24
3.3.1 Materiaali	24
3.3.2 Menetelmä	24
3.3.3 Tulokset	26
3.3.4 Johtopäätökset.....	27
4 Yhteenveto	28
LIITTEET	29

1 JOHDANTO

Tässä tutkimuksessa arvioidaan Mittalaitelaboratoriossa (MILA:ssa) käytössä olevan ultraääni- ja mikroaaltomittalaitteiden soveltamista puun laadun mittaamiseen. Työ jakautuu kahteen osaan, selvitystyöhön ja tutkimukseen.

Selvitystyössä kootaan yhteenveto MILA:ssa aikaisemmin tehdyistä tutkimuksista ultraäänen ja mikroaaltojen käytöstä puun runkojen ja sahatavaran oksakkuuden, lahoisuuden ja kosteuden mittaukseen, sekä arvioidaan menetelmien soveltuvuutta ja tarkkuuksia.

Tutkimustyöhön sisältyy kolme tehtäväkokonaisuutta

- 1) Saadaanko kuusen kuoren paksuus määritettyä ultraäänimittauksin?
- 2) Saadaanko mikroaaltomenetelmillä arvioitua rungon kosteustietoa rungon päädyistä?
- 3) Voidaanko rungon oksajakaumaa luotettavasti ennustaa mikroaaltomittauksella, jos käytössä on vain kolmen rungon pituusakselia kohtisuoraan asetettua lähetin/vastaanotin paria ja voidaanko mikroaaltomittauksen tulosta parantaa suorittamalla mittaukset rungon vastakkaisilta puolin ja vähentämällä tulokset toisistaan?

Tehtäväkokonaisuuksien tarkemmat kuvaukset on esitetty tutkimussuunnitelmassa (Liite 1).

1.1 TYÖPANOKSET

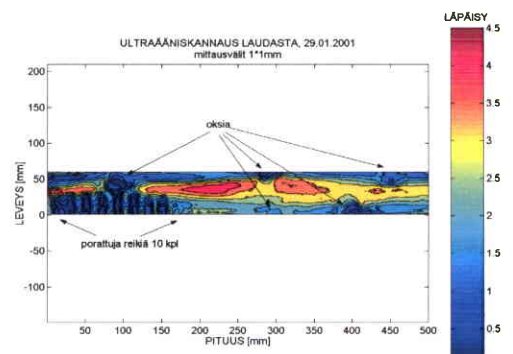
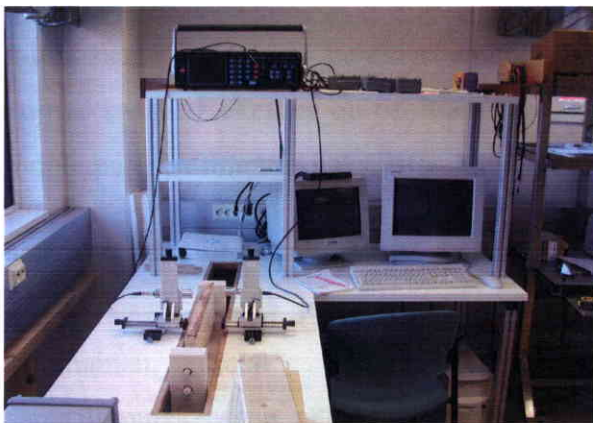
Tämän tutkimuksen työpanokset jakautuvat siten, että ultraääneen liittyvät selvitykset ja mittaukset on tehnyt FT Ville Hyvärinen. Mikroaaltomenetelmistä oksajakaumaan liittyvät mittaukset ovat tehneet FT Mika Sorjonen ja DI Mikko Haapalainen ja tukinpäämittaukset DI Sari Nieminen ja FM Matti-P.Sarén, joka on myös koonnut tämän raportin.

2 SELVITYSTYÖ

2.1 AINETTA RIKKOMATTOMAT MENETELMÄT PUUN RAKENNETUTKIMUKSESSA

2.2 ULTRAÄÄNI

MILAn puututkimuksessa käytetyn ultraäänilaitteiston muodostaa v. 2000 PUUMI-hankkeen yhteydessä hankittu Sonda 007 CX Airscan (Quality Materials Inspection, USA). Mittari toimii kosketuksettomasti, jolloin ääniaaltojen kytkeytyminen tutkittavaan kappaleeseen tapahtuu ilman välityksellä. Laitteisto voidaan yhdistää xy-siirtoyksikköön, mikä mahdollistaa näytteen tutkimisen skannaamalla, jolloin koko näytekappale saadaan tutkittua läpimittauksen avulla, ks. kuva 1.



Kuva 1. Ultraäänilaitteisto yhdistettynä xy-siirtoyksikköön, sekä esimerkki mittaustuloksista.

KAJAANIN YLIOPISTOKESKUS
 MITTALAITELABORATORIO

Skannauksen tuloksena mitattavasta kappaleesta muodostetaan paikkatietoon sidottu signaalin amplitudin voimakkuutta kuvaava värisävykartta, josta voidaan selkeästi erottaa laudassa olevia yksityiskohtia, mm. oksat, halkeamat, poratut reiät, ks. kuva 1.

Vuoden 2005 alussa MILAssa käytettävissä olevat taajuudet ovat 50 kHz, 120 kHz ja 400 kHz. Käytetty taajuus, f , määrää käytännössä mittauksen resoluution (\approx äänen aallonpituus) kaavan 1 mukaisesti:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1),$$

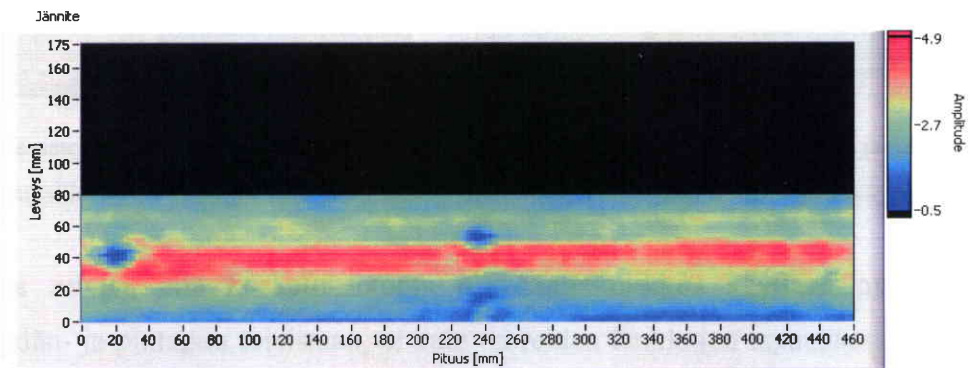
missä λ = aallonpituus ja v = äänen nopeus materiaalissa. Esimerkiksi puun syytä vasten poikittain etenevän ääniaallon nopeus on kirjallisuustietojen mukaan luokkaa 600 m/s, jolloin aallonpituus puussa olisi 5 mm, käytettäessä 120 kHz:n antureita. Tätä suuruusluokkaa on siis mittauksen teoreettinen resoluutio. Käytännön mittauksissa olemme kuitenkin pystyneet havaitsemaan optimaalisessa tilanteessa puuhun porattuja halkaisijaltaan 2 mm olevia reikiä. Optimaalisella tilanteella tarkoitetaan tässä höylättyä lautaa, jonka paksuus oli 2 cm. Korkeampaa taajuutta käyttämällä, esim. 400 kHz, mittauksen resoluutio paranisi mutta tällöin ääniaaltojen vaimeneminen kasvaa voimakkaasti. Kokemus on osoittanut, että 400 kHz:n anturit soveltuvat maksimissaan muutaman senttimetrin paksuisten puunäytteiden tutkimiseen.

MILAssa on ultraäänen osalta keskitytty toistaiseksi lähinnä lauta- ja sahatavaran tutkimukseen. Tämä johtuu siitä, että näytteen pinnan tulisi olla mahdollisimman tasomainen, sekä mielellään suorassa kulmassa anturin lähettämään ääniaaltopurskeeseen nähden, jotta äänen kytkeytyminen anturista näytteeseen, sekä päinvastoin, olisi yleensä mahdollista. Lisäksi suuri pinnankarheus vaikeuttaa ja jopa estää äänen kytkeytymisen näytteeseen. Sahatavaran lisäksi on tehty yksittäisiä kokeiluita sahatuilla hirsillä, sekä puun rungon pätkillä. Näillä testeillä on lähinnä haettu tietoa käytössä olevan laitteen kyvyistä ja rajoituksista. Sahatuista, 10-15 cm paksuista hirsistä pystytään esimerkiksi löytämään lahot kohdat, sekä sisäoksat ja -halkeamat.

KAJAANIN YLIOPISTOKESKUS
MITTALAITELABORATORIO

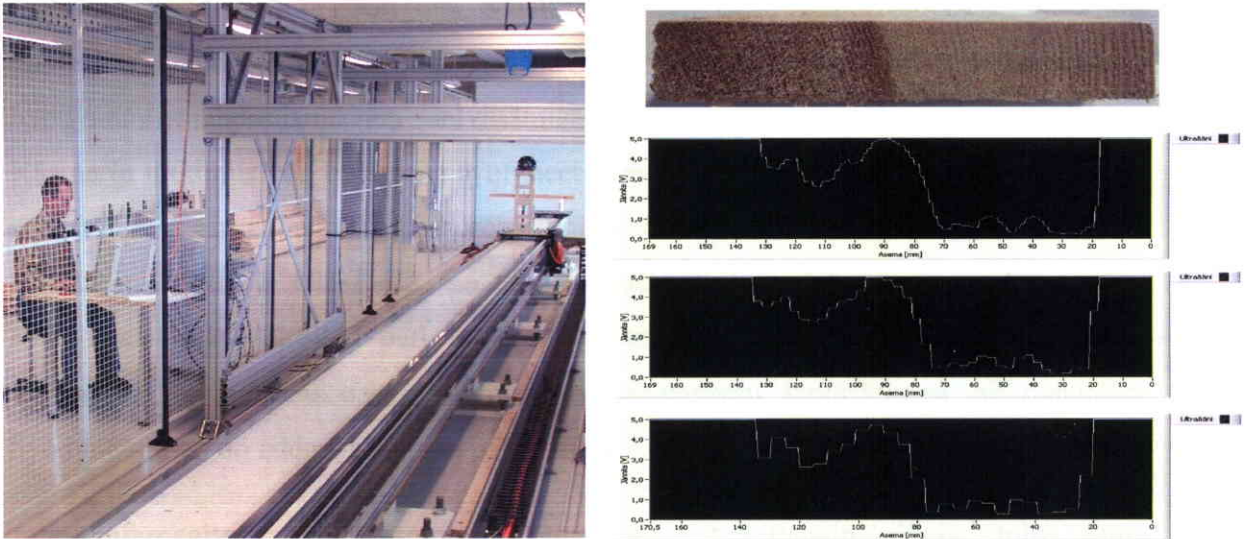
Kuorellisen, 20-25 cm paksun puun rungon läpi ei pystytty mittaamaan, mutta kuoritun rungon läpi signaali saatiin menemään, tosin vain joissakin tapauksissa.

Aiheeseen viimeisimpänä liittyen, toteutettiin MILAssa 1.4.2003-30.9.2004 Sydänpuuprojekti, jossa tutkittiin mm. kosketuksettoman ultraäänitekniikan käyttömahdollisuuksia sydänpuun määrittämiseen tuoreesta mäntysahatavarasta. Menetelmää testattiin ensin laboratorio-oloissa (xy-siirtoyksikkö), jonka jälkeen testejä jatkettiin teollisuusolosuhteita jäljittelevällä tukkiradalla. Projektin rahoituksessa olivat mukana Tekes/EAKR, UPM-Kymmene/Yhtyneet Sahat Oy, PRT-Wood Oy sekä Kuhmo Oy. Kuvassa 2. on esimerkki laboratorio-oloissa mitatusta laudasta.



Kuva 2. Leveyssuunnassa skannatusta laudasta luotu värisävykuva. Värit kuvaavat ultraäänen vaimenemista. Punainen ja vihreä edustavat sydänpuuta, sininen pintapuuta. Siniset täplät ovat oksan kohtia. Mittaus suoritettiin läpimittauksena.

Kuvassa 3. on puolestaan esimerkki tukkiradalla suoritetuista mittauksista. Mitattu lauta on 2,5 cm paksu ja 14 cm leveä. Mittaukset suoritettiin läpimittauksena poikittain etenevästä laudasta.



Kuva 3. Mittausasetelma tukkiradalla sekä laudan poikkileikkauskuva, jossa erottuvat sydän- ja pintapuu, sekä nopeuksilla 1-3 m/s suoritetuista mittauksista saadut ultraäänisignaalin vaimennuskäyrät.

Tutkimuksessa selvisi, että kosketuksetonta ultraäänitekniikkaa käyttäen pystytään erottamaan sydän- ja pintapuu toisistaan, ei vain tuoreiden lankkujen tapauksessa, vaan myös jäätyneiden lautojen ja lankkujen tapauksessa. Mittauksista voitiin myös karkeasti päätellä sydänpuun profiili mitattavasta lankusta. Lisäksi ultraäänitekniikan huomattiin toimivan hyvin suurissakin, jopa luokkaa 5 m/s, olevissa nopeuksissa.

Uusi hanke sydänpuumittauksen kehittämiseksi on vireillä.

2.3 MIKROAALLOT

Mikroaaltotekniikka on viime vuosina kehittynyt matkapuhelinteknologian vetämänä voimakkaasti. Tämä on myös aiheuttanut sen, että antennisuunnitteluun ja signaaliprosessointiin erikoistuneet tutkijat ovat keskittyneet rakennetutkimuksen asemasta informaatiotekniikkaan. Mikroaaltojen soveltaminen puututkimuksessa ei ole aivan uusi oivallus, jo 1970-luvulla oli ensimmäisiä jopa kaupalliseen toimintaa

KAJAANIN YLIOPISTOKESKUS
 MITTALAITELABORATORIO

tähtääviä tutkimus-, valmistus- ja markkinointiyhteisöjä, kuten Innotec Oy. Nykyisin, vaikka tekniset ja alentuneiden komponenttihintojen suomat mahdollisuudet ovat parantuneet, ei mikroaaltoja hyödynnetä, eikä niihin ja mekaanisen puun tutkimukseen liittyvää toimintaa juurikaan ole. Maailmalla, erityisesti mm. Ruotsissa, on viime vuosina panostettu huomattavasti tutkimukseen ja mikroaaltojen hyödyntämismahdollisuuksien selvittämiseen. Tästä on osoituksena mm. Anders Kästnerin tutkimustyön tuloksena syntyneet lisensiaatti- ja väitöskirjatyöt. Suoritettujen selvitysten perusteella mikroaaltotekniikoilla olisi kuitenkin edelleen uutuusarvoa puututkimuksessa ja niissä olisi potentiaalia laajempaan hyödyntämiseen. Kaupallisia sovelluksia mikroaaltoihin perustuvalla menetelmällä ei juurikaan ole olemassa, ei varsinkaan tukkimittauksissa. Lautojen ja sahatavaran tarkastelussa mikroaaltojen hyödyntäminen on edennyt hieman pidemmälle.

Jotta mikroaaltojen käyttäytyminen puuaineessa tulkittaisiin oikein, tulee puun dielektrisyysominaisuudet tuntea. Puumateriaalista näitä ominaisuuksia on mitattu jo yli 50 vuotta, mutta biologisena materiaalina puun epähomogeenisuus tuottaa edelleen ongelmia.

Skaar on esittänyt laajalti hyväksytyyn teoriaan puun sähkönjohtavuudesta. Sen mukaan varaus kulkee soluseinämissä olevien ionien ja selluloosan välittämänä. Teorian mukaan äärimmilleen yksinkertaistettuna selluloosa käyttäytyy kuten poolisita ioneista koostuva vastus. Sähkökentässä satunnaisesti orientoituneet dipolit suuntautuvat vastakkaisesti ulkoisen kentän kanssa, jolloin kentän energia varastoituu molekyyliin potentiaalienergiaksi. Ulkoisen kentän poistaminen vapauttaa dipolien potentiaalienergian muuntumisen kineettiseksi energiaksi. Jaksollinen kentän muutos saattaa polaariset molekyylit (mm. vesi) toistuvaan liikkeeseen. Tällöin kentän energia siirtyy molekyylien liike-energiaksi, lämmöksi. Vuorovaikutus kentän ja molekyylien välillä riippuu kentän taajuudesta ja molekyylien lämpötilasta.

2.3.1 PUUMI ja MOKSA -hankkeet

Mikroaaltojen soveltaminen mekaanisen puun tutkimuksessa alkoi Mittalaitelaboratoriossa (MILA) 1999 Puumi- projektin myötä. Tuolloin rakennettiin ensimmäinen tarkoitukseen soveltuva protolaite 15 GHz:n taajuudelle. Myöhemmin laitekantaa on täydennetty sekä kaupallisilla yleismittalaitteilla (vektoriipiirianalysaattori, spektrianalysaattori ja tehomittari) että spesifioituilla, itse rakennetuilla mittareilla. Viimeisin laitteisto, jota on tarkoitus hyödyntää myös tilaustutkimuksen tutkimustyö-osuudessa tukkipuurungon mittauksiin, on rakennettu MOKSA-hankkeessa (1/2002-8/2004). Kyseessä on kahdella eri polarisaatiolla vastaanotettujen signaalien välisiin vaihe- ja amplitudieroihin perustuva laite. Mittaukset suoritetaan läpäisymittauksena. Pienin muutoksin laitetta voidaan käyttää myös puun läpimenneen signaalin (vaihe ja amplitudi eli vaimentuminen) muutosten seurantaan rungon eri kohdissa.

Tähänastisista hankkeista saadun ja kirjallisuudesta hankitun tietämyksen perusteella mikroaaltojen soveltaminen puun ominaisuuksien tarkastelussa kulminoituu monesti puun kosteuspitoisuuteen. Vedellä on voimakkaasti mikroaaltoja absorboiva vaikutus ja ominaisuus on taajuusriippuvainen. Haluttaessa tutkia pieniä yksityiskohtia hyvällä erottelukyvyltä/resoluutiolla, on taajuuden vastaavasti oltava suurempi. Tällöin kuitenkin veden aiheuttama vaikutus korostuu ja läpäisymittauksissa tutkittavan kappaleen dimensiot jäävät pieniksi. Tukkimittauksissa parhaaksi todettu taajuus on luokkaa 1-3 GHz, aallonpituus puussa on silloin noin 2-5 cm (vrt. resoluutio) ja halkaisijaltaan tutkittava runko voi olla jopa 600 mm. Resoluutio (aallonpituus puussa) muuttuu puun sähköisten ominaisuuksien mukaan, eli puun suhteellinen permittiivisyys vaikuttaa siihen. Kostealla, tuoreella puulla resoluutio voi olla vielä hieman edellä mainittua parempi, mutta mikroaaltotaajuisen säteilyn vaimentuminenkin kasvaa merkittävästi. Eri polarisaatioilla vastaanotettujen signaalien välistä eroa mittaamalla pyritään edelleen parantamaan erottelukykyä.

Tekemissämme testeissä sahatavaran osalta löydettyjen oksien koko on ollut 10 mm ja yli. Tukeilla testejä on vielä tehty suhteellisen vähän ja kehitystyö on vielä osittain

KAJAANIN YLIOPISTOKESKUS
 MITTALAITELABORATORIO

kesken. Löytyneiden pintaoksien koko on ollut yli 15 mm. Sisäoksien osalta kokemuksia on vielä vähemmän ja jatkossa onkin tarkoitus mittausten avulla selvittää lisää sisäoksien havaitsemismahdollisuuksia. Lähtötilanne vaikuttaa lupaavalta. Lahoja tukkeja on ollut tarkasteltavana vain yksi kappale, mutta kyseisessä tapauksessa laho osa oli erotettavissa muusta puumateriaalista.

Kosteusmittaukset ovat olleet myös MILA:ssa mielenkiinnon kohteena ja onpa mittausergelmaa pyritty ratkaisemaan mikroaaltojenkin avulla. Menestys ei kuitenkaan ole ollut halutunlaista. Kosteuden määrittämistä varten on rakennettu laite, jolla on kuitenkin ollut tarkoituksena saada vain suuntaa-antavaa informaatiota puun kosteuspitoisuudesta, ei siis absoluuttista kosteusprosenttiarvoa. Laitteen kalibroinnissa ja toiminnassa on ollut suuria ongelmia ja niinpä sen hyödyntäminen on jäänyt erittäin vähäiseksi.

2.3.2 Kosteuden määrittäminen mikroaaltomenetelmillä

Puun kosteuden mittaamisessa mikroaaltotekniikoilla on vahvasti keskittynyt hakkeen ja vanerimateriaalin ja kuivatusprosessien kosteuden määrittämiseen. Kaupallisia laitteita, jotka olisi suunnattu kokonaisille tukeille ei selvityksessä löytynyt, joskin osa laitteista soveltunee myös tukkimittauksiin. Perustutkimuksellisia hankkeita kosteusmittauksista ovat kuitenkin tehneet useat tahot. Esimerkkinä voi mainita William Moschlerin, Tennessee Forest Products Centerissä toteuttaman hankkeen jossa käytettiin 4.5-6 GHz kaistaa. Hankkeen tavoitteena oli tuottaa kaupallinen mittalaite lautatavaran uunikuivatuksen seurantaan. Laitetta ei kuitenkaan ole vielä markkinoilla.

Hakkeen kosteuden määrittämisessä joudutaan edellisen lisäksi ottamaan huomioon vaihtelevat kappalekoot ja -muodot. Kaupallisessa valmistuksessa on mm. (A) Berthold LB 356, (B) GreCon On-line microwave moisture analyzer, (C) KDC Technology Corp. MDA-1000 Microwave Dielectric Analyzer System.

Laitteet (A), (C) kalibroidaan tunnetun kosteuden omaavilla näytteillä kemometrisesti. Lisäksi on suositeltavaa verrata säännöllisesti saatuja kosteuspitoisuuksia laboratoriossa

KAJAANIN YLIOPISTOKESKUS
MITTALAITELABORATORIO

määritettyihin. Laitteista (A) ja (B) on kalibroituissa absoluuttisen ja laite (C) vain suhteellisen kosteuden määrittämiseen. Laite (A) tarvitsee tukimittauksen hakkeen paksuudesta. Tämä määritetään käyttäen gamma-säteilyn massa-absorbiota.

Laite (B) mittausperiaate on vedelle ominaisen resonanssitaajuuden kappaleessa tapahtuvan vaimentumisen mittaaminen. Laitteen valmistajan mukaan laite ei tarvitse tukimittausta, sillä mittaus suoritetaan heijastuneesta signaalista. Laitteen mittaustarkkuus on kuitenkin oleellisesti heikompi kuin esim. laitteen (A).

3 TUTKIMUS

Työn tutkimusosio jakaantui ultraäänellä ja mikroaalloilla tehtyihin tapaustutkimuksiin. Ultraäänellä tutkittiin mahdollisuutta kuusen kuoren paksuuden mittaamiseen ja mikroaalloilla mahdollisuutta rungon kosteuden sekä oksajakauman mittaamiseen.

3.1 SAADAANKO KUUSEN KUOREN PAKSUUS MÄÄRITETTYÄ ULTRAÄÄNIMITTAUKSIN?

Tässä kappaleessa selostetaan ultraäänen avulla suoritettu tapaustutkimus, jossa selvitettiin onko MILAn nykyisellä ultraäänilaitteistolla mahdollista mitata kuusen kuoren paksuus. Tutkimus suoritettiin tammikuussa 2005 MILAn puulaboratorion tiloissa.

3.1.1 Materiaali

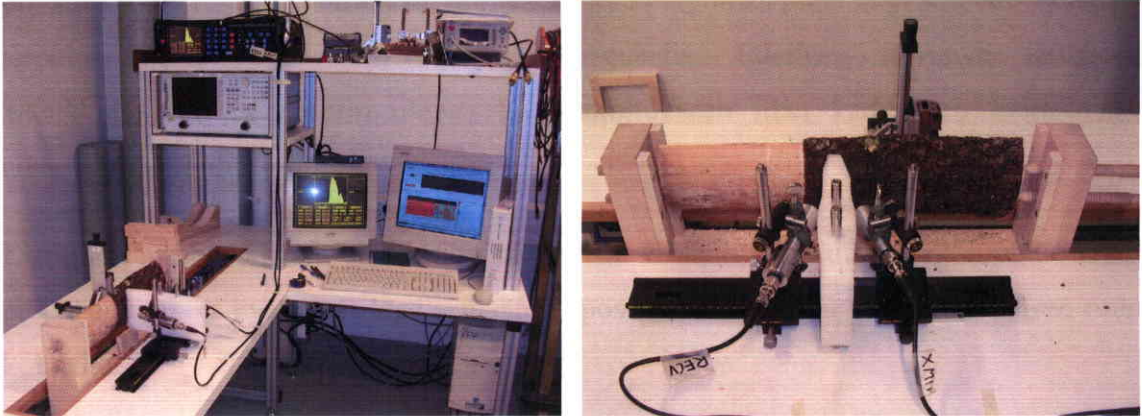
Koemateriaalin muodosti Metlan toimittamasta kuusitukista sahatut näytekappaleet, koko n. 50cm * 10cm * 2cm ja näytemäärä 10 kpl. Osa näytekappaleiden kuoresta poistettiin. Mittausalueen origo merkattiin tussilla kuhunkin koekappaleeseen, minkä jälkeen koekappaleista mitattiin n. 10 cm * 3 cm alue siten, että mittaukseen sisältyi sekä kuorellista, että kuoretonta puun kohtaa. Lopuksi näytekappaleista otettiin digikuvat dokumentointia varten.

3.1.2 Menetelmät

Tutkimuslaitteena käytettiin Sonda 007 CX Airscan'ia, joka hyödyntää ilman kautta yhdistyvää, kosketuksetonta mittaustapaa. Mittaukset suoritettiin heijastusmittauksina, jolloin lähetin- ja vastaanotinanturi sijoitettiin näytekappaleen samalle puolelle, ks.

KAJAANIN YLIOPISTOKESKUS
MITTALAITELABORATORIO

kuvat 1. a ja b. Antureiden väliin sijoitettiin vaahtomuovikappale, jonka tarkoituksena oli estää ääniaaltojen suora pääsy lähettimeltä vastaanottimelle.



Kuva 1 a ja b. Mittausasetelma.

Ultraäänilaitteen signaalin voimakkuus kalibroitiin puun kuorettoman kohdan mukaan. Vertikaali- ja horisontaalisuunnissa liikuteltavan näytteen liike ja mittalaitteen toiminta tahdistettiin siten, että mittausten paikkaresoluutio oli 1 mm. Haastetta mittausasetelman virityksessä tarjosi antureiden asemointi, eli antureiden välisen etäisyyden ja suuntakulmien asettaminen sopiviksi. Asemointiin saatiinkin tuhraantumaan koko lailla aikaa ja ajatustyötä.

3.1.3 Tulokset

Mittauksia suoritettiin kaikkiaan 11 kappaletta (näyte TT1 mitattiin kahdesti). Saadut tulokset osoittavat, että laitteisto kykenee erottamaan kohdan, jossa näytekappaleen kuoreton osa vaihtuu kuorelliseen osaan. Kuoren paksuutta ei kuitenkaan kyetty määrittämään laitteen avulla. Tämä johtunee pääasiassa pintaheijastuksen voimakkuudesta, joka peittää alleen syvemmillä puussa olevista rajapinnoista tapahtuvat heijastukset. Teorian mukaan jopa yli 99 % äänipurskeen energiasta heijastuu ensimmäisestä rajapinnasta, joka on tässä tapauksessa ilman ja kuoren

KAJAANIN YLIOPISTOKESKUS
 MITTALAITELABORATORIO

rajapinta, joten kuoren ja puuosan pinnasta heijastuva ääniaalto on hyvin heikko ensimmäiseen heijastukseen verrattuna. Käytännössä se hukkuu muun kohinan joukkoon. Lisäksi testikappaleiden pinnan kaarevuussäteen muuttuminen, sekä kuoren pinnan karkea rakenne häiritsevät ultraäänen kytkeytymistä puuhun ja aiheuttavat äänen sirontaa, mikä vielä vääristää mittaussignaalia. Edelleen käytetyn laiteiston aikaikkunoinnin huomattiin olevan ko. tarkoitukseen liian karkea eri heijastusten aikaerojen vertailua varten.

Kaarnan läpäisyn kanssa ei havaittu ongelmaa. Kokeilu läpimittauksen avulla osoitti, että äänipurskeet kykenivät läpäisemään helposti testikappaleen myös kuorellisen osan kohdalta.

Ultraäänitutkimuksesta saadut mittaustulokset, joihin on lisätty näytekappaleista otetut digikuvat, esitetään kootusti tämän raportin liitteenä 2.

3.1.4 Johtopäätökset

Sonda 007 CX Airscan ja 120 kHz anturit eivät sovellu kaarnan paksuuden mittaamiseen heijastuksen avulla. Vaihtoehto voisi olla toisentyyppisten ultraääniantureiden käyttäminen. Esimerkiksi amerikkalaisen Ultrason Groupin valmistamat GMP-anturit (Gas Matrix Piezoelectric) laitteistoiheen saattaisivat tulla kysymykseen. Valmistajan mukaan nämä GMP-anturit osaisivat erottaa pinta- ja rakenneheijastukset toisistaan. Varmuuden saaminen ko. antureiden toimivuudesta kaarnan paksuuden tutkimuksessa vaatisi kuitenkin syvällisempää perehtymistä asiaan.

3.2 SAADAANKO MIKROAALTOMENETELMILLÄ ARVIOITUA RUNGON KOSTEUSTIETOA RUNGON PÄÄDYSTÄ?

Tässä kappaleessa kartoitetaan mahdollisuutta arvioida tukin kosteutta sen päädyistä heijastuneen mikroaaltosignaalin avulla. Mittaukset suoritetaan noin 10 cm:n paksuisista kiekkoista, jotka mittauksien välillä kuivataan tiettyihin kosteuksiin. Tulokinnan apuna käytetään mittauksia kiekon läpäisseen mikroaaltokentän ominaisuuksista.

3.2.1 Materiaali

Paljakan koeasemalta talvella kaadetusta kuusitukista sahattiin kolme jäistä kiekkoa. Niiden paksuus puun korkeussuuntaan oli 10 cm. Kiekot sahattiin siten, että kiekko 1 ja 3 olivat oksattomasta kohdasta runkoa ja kiekkossa 2 on selvä oksa.

Kiekkoja sulatettiin ennen ensimmäistä mittausta 24 tuntia vedottomassa, tasaisessa +22°C lämpötilassa, suhteellisen ilman kosteuden ollessa 22%. Kiekkojen ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

	Kiekko 1	Kiekko 2	Kiekko 3
Paksuus	95 mm	95 mm	94 mm
Kiekon alapinnan korkeus rungon katkaisukohdasta	25 cm	85 cm	200 cm
Vuosilustojen arvioitu määrä	140	121	105

Taulukko 1. Näytteiden mekaaniset ominaisuudet.

KAJAANIN YLIOPISTOKESKUS
MITTALAITELABORATORIO

Ensimmäinen mittaus kiekkoista tehtiin kun ne olivat tuoreita ja sulaneita. Tästä tilanteesta käytetään myöhemmin termiä ”tuore”. Mittauksen jälkeen kiekkojen annettiin kuivua edelleen huoneilmassa 7 vuorokautta, jonka jälkeen ne mitattiin toisen kerran. Tilannetta kuvaa myöhemmin termi ”ilmakuiva”. Toisen mittauksen jälkeen kiekkoja kuivatettiin kuivausuunissa 60 °C lämpötilassa niin kauan, että niiden oletettiin olevan kuivia (massan muutos oli vähemmän kuin 0,1%/6h). Ennen viimeisiä mittauksia kiekkojen lämmön annettiin tasaantua huoneenlämpötilassa. Kuivien kiekkojen mittauksia kuvaa myöhemmin termi ”uunikuiva”. Lopuksi kiekot kuivatettiin uunissa (103 °C) kokonaiskosteuden määrittämiseksi, myöhemmin tätä kutsutaan termillä ”loppupaino”. Taulukossa 2 on kiekkojen keskimääräiset kosteudet eri mittausten aikana.

	Kiekko 1	Kiekko 2	Kiekko 3
Tuore	81,3 %	87,0 %	95,5 %
Ilma	16,2 %	20,4 %	21,3 %
Uuni	1,8 %	2,0 %	1,7 %

Taulukko 2. Näytteiden kosteusprosentit kuivapainoon verrattuna (tuorepaino-loppupaino)/loppupaino.

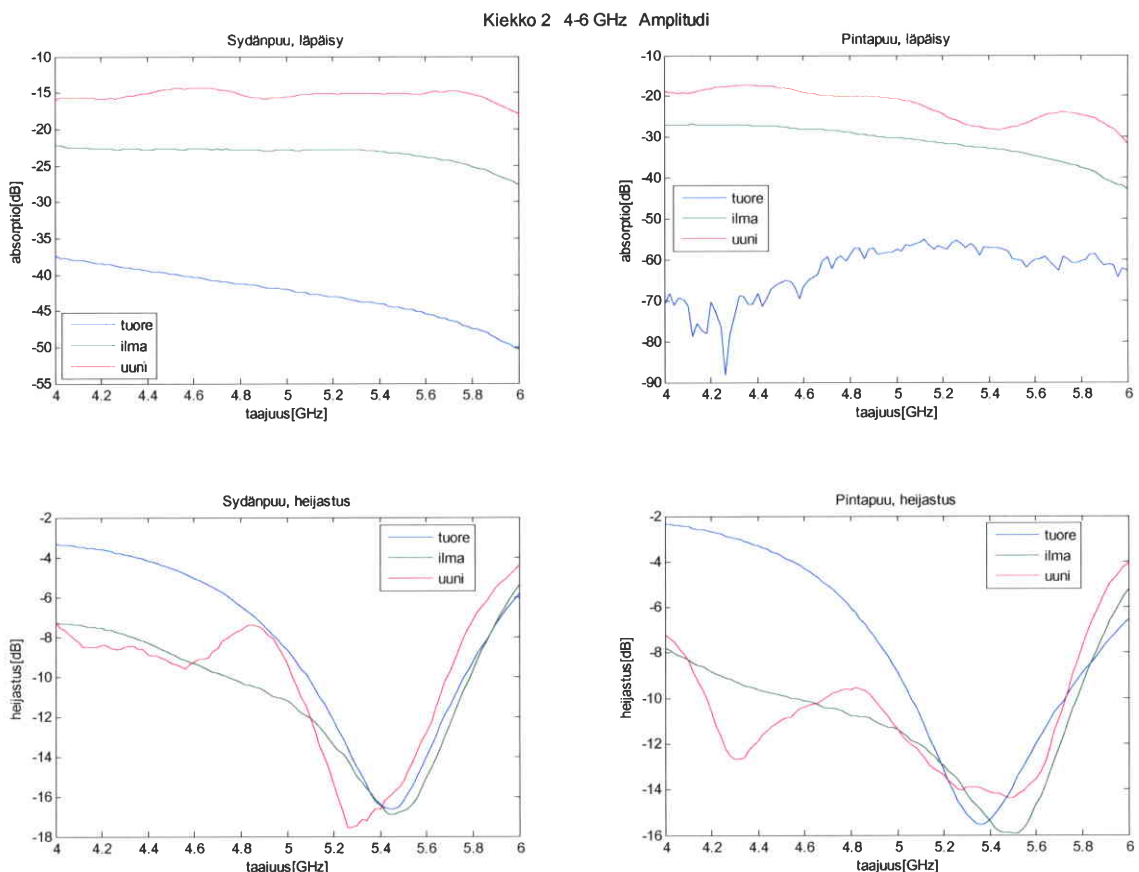
3.2.2 Menetelmät

Mittaustilanteessa kiekot asetettiin puisessa kehikossa tietokoneohjattuun ristisyöttöpöytään (kuva 1), jossa ne mitattiin Agilent Technologies 8722ET vektoripiirianalysaattorilla. Kiekkoista mitattiin paikan funktiona puun aiheuttama mikroaaltokentän vaimennus ja vaiheen muutos läpäisymittauksessa sekä kiekon pinnasta heijastuneen mikroaaltokentän voimakkuuden muutos ja vaihe. Mittauksissa käytettiin kahta taajuuskaistaa: 4-6 GHz ja 8-10 GHz. Antureina käytettiin aaltoputkiantenneja, joiden apertuuri 4-6 GHz:llä on 20*40 mm ja 8-10 GHz:llä 9*19

mm. Käytetyssä mittausmenetelmässä voidaan olettaa, että mitattava ilmiö esiintyy apertuurin rajaamalla tilavuudella näytteessä. Mittaustilanteessa anturit olivat noin 3 mm:n etäisyydellä kiekon pinnasta, jolloin mikroaaltokenttä näytössä oli ns. lähikenttä, jolloin tasoaaltoaprosimaatio ei ole voimassa.

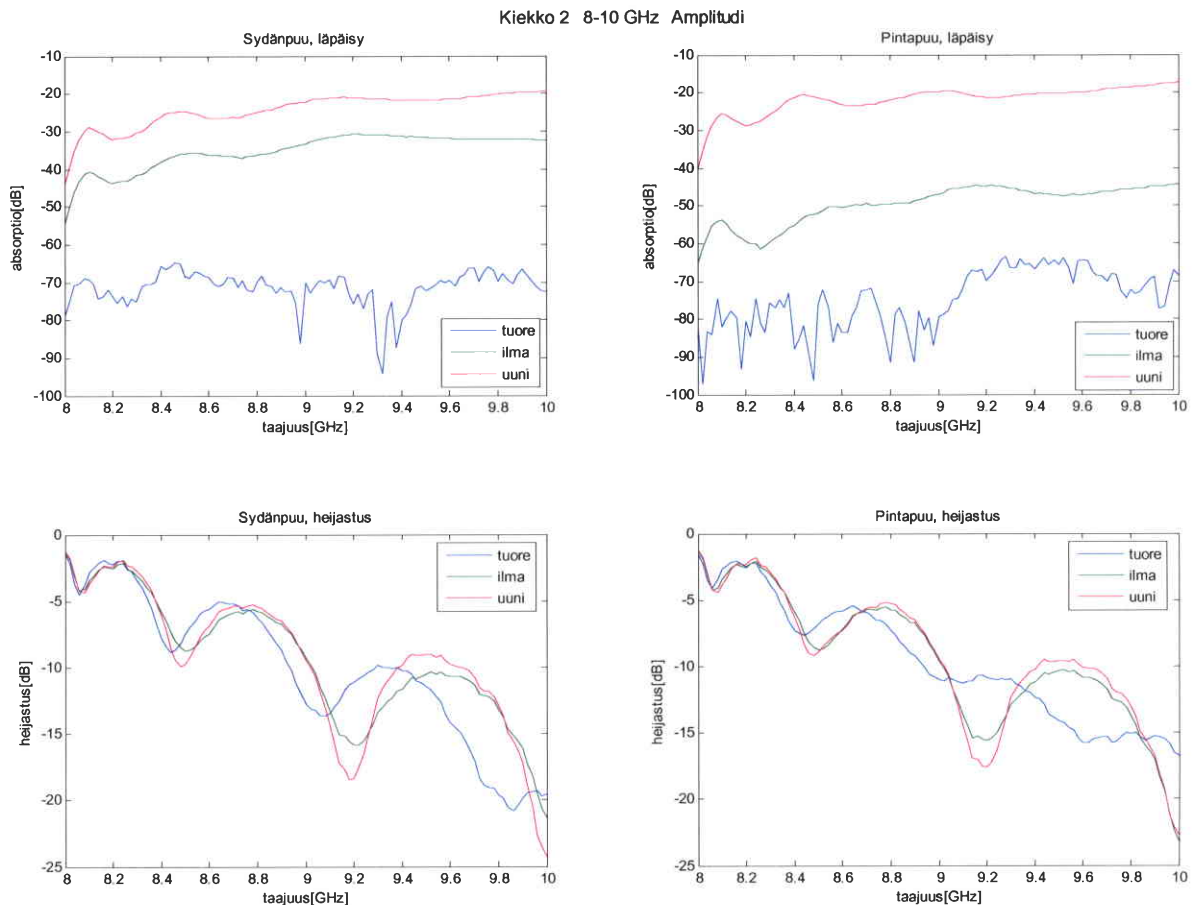
3.2.3 Tulokset

Kuvissa 2 ja 3 on esimerkkinä kiekon 2 heijastus- ja läpäisy-spektrit sekä pinta- että sydänpuulle molemmilla taajuusalueilla. Kuvissa olevat spektrit edustavat yhtä mittauspistettä kuvissa 4 ja 5. Kiekkojen 1 ja 3 mittaustulokset esitetään liitteessä 2.



Kuva 2. Kiekon 2 mittaustulokset 4-6 GHz:n taajuuskaistalla.

KAJAANIN YLIOPISTOKESKUS
MITTALAITELABORATORIO



Kuva 3. Kiekkon 2 mittaustulokset 8-10 GHz:n taajuuskaistalla.

Läpäisymittausspektreistä nähdään, että kiekkon kosteus vaikuttaa selvästi mikroaaltokentän vaimenemiseen puun läpi mitattaessa. Tuoreessa puussa kenttä saattaa vaimentua siten, että vektoripiirianalysoittorin dynamiikka ei riitä erottamaan signaalia elektronisesta taustakohinasta. Tällöin vaimennusarvo on noin 70-80 dB.

Mittauksessa ei havaittu puun kosteuden vaikuttavan heijastusspektrin kokonaisvaimenemiseen. Sen sijaan heijastusspektrin havaittiin olevan jaksollinen myös puulle. Taajuuskaistalla 8-10 GHz jakson pituuden havaittiin riippuvan puun kosteudesta. Näytteen pinnasta heijastuneen signaalin jaksonpituus on lyhempi kostealla

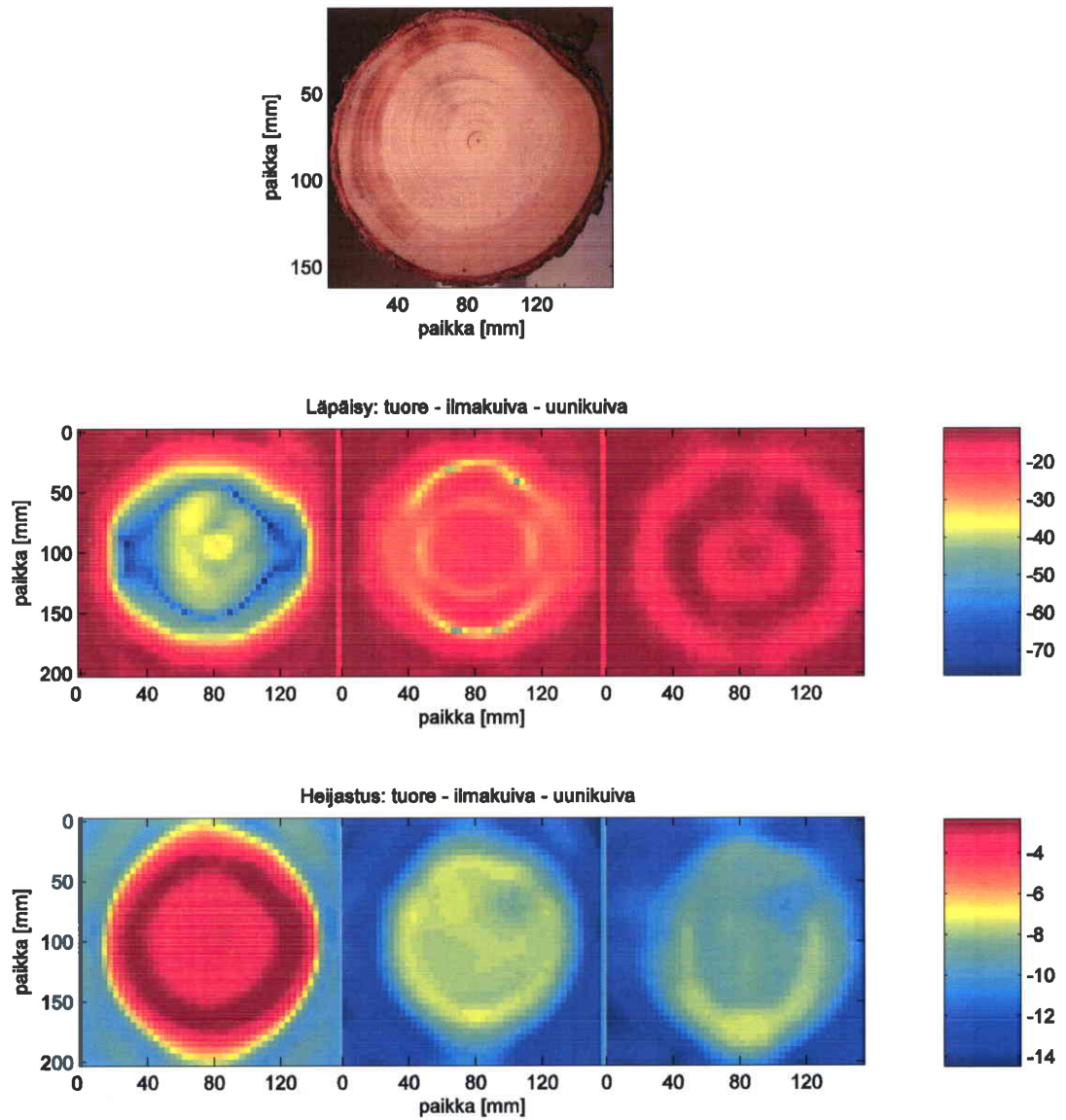
KAJAANIN YLIOPISTOKESKUS
 MITTALAITELABORATORIO

puulla, jolla on suurempi dielektrisyysvakio kuin kuivalla puulla. Sama ilmiö on havaittavissa sekä pinta- että sydänpuulle.

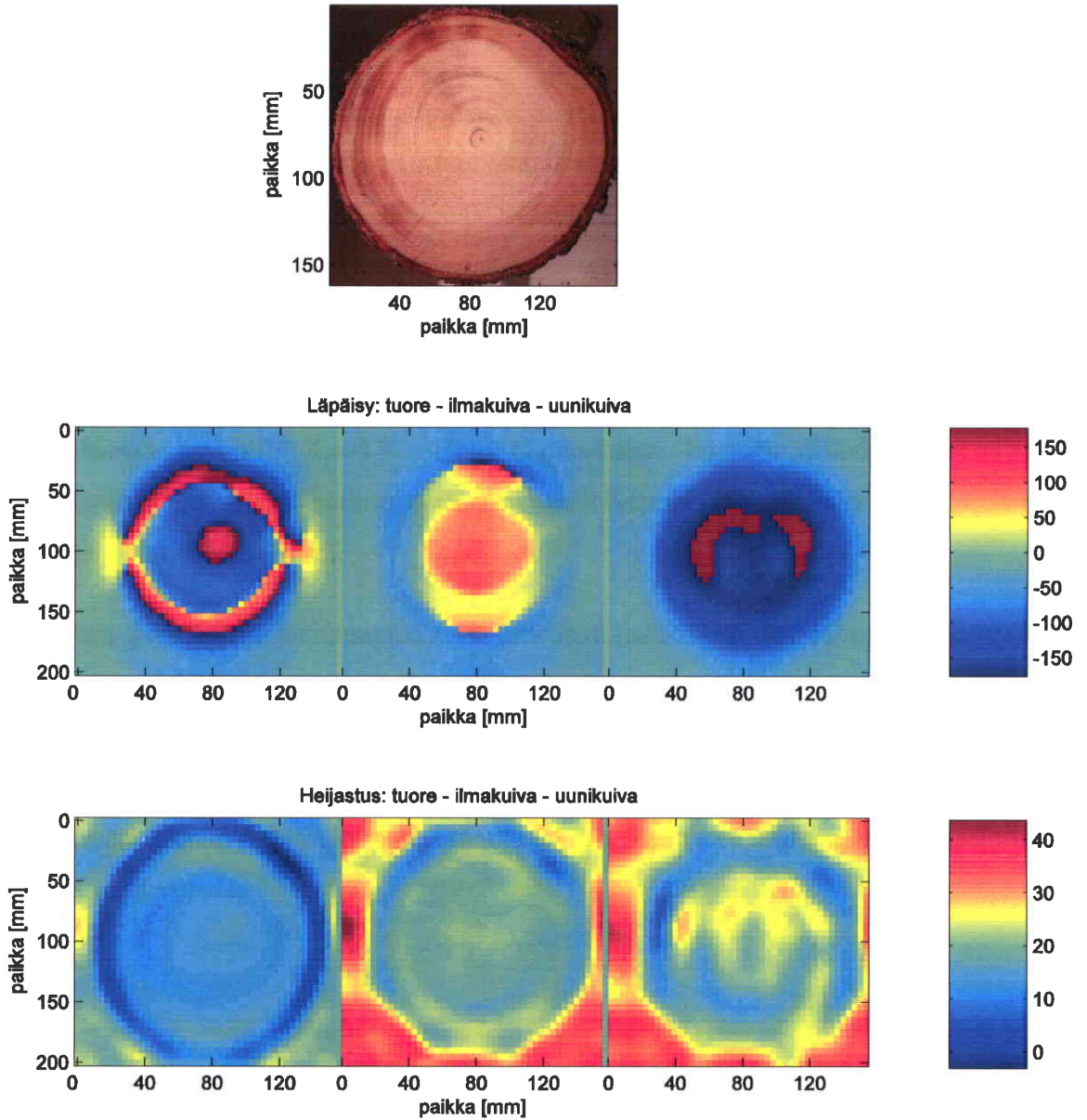
Tiedetään, että pinnan sähkönjohtokyvyn kasvaessa siitä heijastuneen mikroaaltokentän osuus kasvaa. Taajuusalueella 4-4,5 GHz mittaustulokset ovat edellisen kaltaisia: tuore puu heijastaa mikroaaltoja enemmän kuin kuiva, sähkönjohtokyvyltään huonompi puu. Puu orgaanisena materiaalina on rakenteeltaan niin monimutkainen, ettei näitä ilmiöitä voida täysin hallita.

Spektrikuvaajista valittiin mittaustulosten perusteella taajuuskaistoja, joiden avulla kosteuspitoisuutta voitaisiin määrittää. Lupaavimmaksi kaistaksi todettiin 4,1-4,3 GHz. Muita mahdollisia kaistoja olivat 4,0-5,0 GHz, 8,5-9,2 GHz ja 9,3-9,7 GHz, joskin korkeamman taajuuskaistan tulkintaa vaikeuttaa spektrin jaksollisuus. Lisäksi totesimme, että taajuuskaistoja 5,4-5,6 GHz ja 8,1-8,5 GHz ei voida luotettavasti käyttää kosteuden määrittämiseen.

Kuvissa 4 ja 5 on kiekon 2 absorptio- ja vaihekuvaajat koko kiekon alueelta mitattuna. Absorptiokuvassa on laskettu valitun taajuusalueen amplitudien keskiarvot. Vaihekuvaajiin on valittu yksi taajuus kyseiseltä alueelta.



Kuva 4. Kiekon 2 absorptiokuvaajat paikan funtiona taajuusalueella 4,1-4,3 GHz.



Kuva 5. Kiekon 2 vaihekuvaajat paikan funtiona taajuudella 4,22 GHz.

3.2.4 Johtopäätökset

Laboratoriokäytössä vektoripiirianalysointilaite soveltuu tämän tyyliin mittauksiin, mutta se on liian kallis ja monimutkainen teollisuuden tarpeisiin. Pelkkä heijastusmittaus on kuitenkin suhteellisen helppo toteuttaa sulautetulla elektroniikalla, jolloin laitteen valmistuskustannukset ovat edulliset.

Heijastusmenetelmä vaikuttaa käyttökelpoiselta sulan puun kosteuden määrittämisessä. Erot etenkin tuoreen ja ilmakehän näytteen mittaustuloksissa ovat huomattavia. Tässä tutkimuksessa havaittiin 4,1-4,3 GHz:n taajuuskaista lupaavimmaksi. Käytännössä ratkaistavaksi jää vielä heijastuneen mikroaaltokentän intensiteetin ja kappaleen kosteuden välinen kalibrointi.

Mittausten perusteella taajuusspektrissä ilmenevä jaksollisuuden ja puun kosteuden välinen yhteys 8-10 GHz:n kaistalla näyttää ainakin yhtä toimivalta menetelmältä kuin tasoeroihin perustuva arvio kosteudesta. Spektrin muotoon perustuvan mittauksen kalibrointi saattaa käytännössä olla suoraviivaisempaa kuin tasoeroihin perustuvan menetelmän. Tämän tutkimuksen perusteella on ilmeinen tarve molempien menetelmien jatkotutkimukselle.

3.3 VOIDAANKO RUNGON OKSAJAKAUMAA LUOTETTAVASTI ENNUSTAA MIKROAALTOMITTAUKSELLE?

Tässä kappaleessa kartoitetaan mahdollisuus mitata tukin oksajakaumaa käyttäen mikroaaltotekniikkaa. Mittaukset tehtiin Milassa rakennetulla, eri polarisaatioilla vastaanotettujen signaalien välisiin vaihe- ja amplitudieroihin perustuvalla mittalaitteella. Mittaustiedosta selvitettiin tarvittavien mittaussuuntien määrä ja vastakkaisten mittaussuuntien erotuksen mahdollisesti tuoma hyöty.

3.3.1 Materiaali

Tutkittavana oli kaksi n. 2.5 m pitkää kuusitukkia: tyvi ja latva, latvaläpimitat 24 ja 21 cm. Tukit oli kaadettu jäisinä ja ne olivat ensimmäiseen mittaukseen asti jäässä. Ennen mittauksia tukit sulatettiin huonelämpötilassa (n. 20 °C) ja mittaukset suoritettiin tukkien ollessa sulaneina. Mittauksen jälkeen tukit jäädytettiin uudelleen. Ilmenneiden mittausingelmien takia mittaukset jouduttiin uusimaan ja tällöin tukit olivat siis kertaalleen sulatetut ja uudelleenjäädetyt, mutta edelleen kosteita ja tuoreita. Mittausten aikaista runkojen kosteuspitoisuutta ei selvitetty.

3.3.2 Menetelmä

Milassa rakennetulla, eri polarisaatioilla vastaanotettujen signaalien välisiin vaihe- ja amplitudieroihin perustuvalla mittalaitteella on suoritettu Metlan toimittamille 2 kuusitukille tutkimusmittaukset. Käytössä oli kaksi mittaussympäristöä; puuntutkimuspenkki ja -linja. Ensin mainitussa mittalaitteet liikkuvat ja jälkimmäisessä tutkittava näyte liikkuu mittalaitteen ollessa paikoillaan. Penkin etuna on moottoroitu ja pc-ohjattu tukin pyöritysmahdollisuus jopa asteen osien välein. Linjalla pyöritys toimii käsin ja lukitus on 30 asteen välein. Mittausten edetessä puuntutkimuspenkki

KAJAANIN YLIOPISTOKESKUS
 MITTALAITELABORATORIO

osoittautui kuitenkin huonoksi mittaussympäristöksi penkin ympärillä olevan kehikon ja suoja-pleksien aiheuttamien heijastusten takia. Tutkimuksen aikana ei ollut mahdollisuutta korjata/kehittää penkkiä niin, että suunnitelman mukaiset mittaukset olisivat siinä onnistuneet. Niinpä laitteisto siirrettiin linjalle ja samaiset jo penkissä suoritettavat mittaukset toistettiin siinä. Jo aikaisempien kokemusten perusteella polarisaatiomenetelmän arvioitiin olevan erottelukyvyltään paremman kuin pelkän perinteisen läpäisymittauksen. Tästä syystä linjalla suoritetuissa mittauksissa keskityttiin ainoastaan polarisaatioon perustuvaan menetelmään.

Laitteistolla mitataan siis näytteen läpäissyt mikroaaltosäteily kahdella eri polarisaatiolla ja mittaustuloksena saadaan näiden kahden polarisaatiosuunnan väliset amplitudi- ja vaihe-erot. Laitteistolla voidaan tuottaa mikroaaltotaajuista säteilyä väliltä 1-2 GHz, mutta parhaiten toimivaksi on todettu 1,5 GHz. Yleisesti em. taajuusalue on sellainen, ettei teoreettisestikaan resoluutio ole riittävä pienimpien oksien löytämiseksi, mutta valitulla taajuudella on mahdollista mitata paksuhkoja ja tuoreita tukkeja. Maksimihalkaisija voi olla aikaisempien selvitysten perusteella jopa 60 cm, mutta tätä ei ole varmennettu laajemmalla näytesarjalla. Sahatavarasta havaitut pienimmät oksat ovat olleet n. 10 mm kokoisia. Tukkien kohdalla laitteisto näyttäisi toimivan parhaiten oksakiehkuroiden paikan mittaamiseen. Tämä mittatarkkuus voikin olla riittävä esimerkiksi jo metsässä, hakkuukoneen kourassa tapahtuvassa mittauksessa.

Mittaukset suoritettiin tukin pituussuuntaan viivamittauksena ja mittausten välillä tukkia käännettiin 30 astetta, jolloin mittaussuuntia runkoa kohden kertyi 12 kappaletta. Kerätty data on esitetty liitteissä 4 olevissa kuvissa. Tutkituista kuusirungoista on muodostettu myös videokuvausta hyödyntäen ns. nahka, eli puun kuori/pinta on kuvattu tukin pyöriessä ja saatu kuvaus on levitetty tasokuvaksi tukin pinnasta.

Kukin liite sisältää neljä kuvaa, joista ylin on tukin pintakuva, toinen mitattu data (vaaka-akselilla tukin pituus ja pystyakselilla tukin kiertokulma, mitattu data on värikartta paikan funktiona), kolmas kuva esittää vastakkaisten puolten erotusta ja alimmassa kuvassa on datasta poimittu kolme viivamittaussuuntaa tukin kehältä tasavälein. Liitteen sivulla 1 esitetään polarisaation vaihe-ero kuusen tyviosasta, sivulla

2 polarisaation amplitudiero kuusen tyviosasta, sivulla 3 polarisaation vaihe-ero kuusen latvaosasta ja sivulla 4 polarisaation amplitudiero kuusen latvaosasta

Lisäksi testeissä selvitettiin antureiden ja puun pinnan välisen etäisyyden vaikutusta mittauksen toimivuuteen. Sekä lähettävää, että vastaanottavaa anturia siirrettiin vuorotellen syvyys suunnassa. Toisen anturin etäisyyttä muutettaessa, toista pidettiin vakioetäisyydellä.

3.3.3 Tulokset

Liitteissä 1-4 esitettyjen mittausten perusteella voitiin selvittää menetelmän toimivuutta, erottelutarkkuutta ja mahdollisia epäkohtia. Tulkinnan ja johtopäätelmien tekoa varten mitatusta datasta on myös muodostettu kuvat vähentämällä vastakkaiset mittaussuunnat toisistaan ja poimimalla tukin kehältä kolme mittaussuuntaa kahdestatoista (eli 120 asteen välein). Kahdesta tutkitusta tukista tyviosa oli hieman vähäoksisempi kuin latvaosa ja latvaosan oksat olivat keskimäärin suurempia. Mitatussa datassa yksittäiset oksat eivät erotu kovinkaan hyvin, mutta oksakiehkuroiden paikka on nähtävissä. Parhaiten tarkastelu näyttäisi onnistuvan vaihe-erosta. Datan tulkinta ei ole helppoa, varsinkaan jos oksia on paljon. Harvakseltaan esiintyvät oksat ovat helpommin havaittavissa erottuen ympäristöstään. Datasta ja yksittäisestä viivamittauksesta oksakiehkura erottuu piikkeinä ja erityisesti piikin nouseva reuna näyttää kohdentuvan oksan kanssa. Lisäongelmia aiheuttaa tukin pinnan ja anturin välisen etäisyyden muuttuminen. Etäisyyden kasvaessa ohivuoto tukin ympäri ja heijastukset mittausympäristöstä lisääntyvät, vastaanottimelle saapuneen hajasäteilyn taso nousee ja tukin ja sen rakenteen aiheuttamien muutosten vaikutus pienenee tai katoaa kokonaan. Vastakkaisten mittaussuuntien vähentäminen toisistaan ei näyttäisi tuovan lisäarvoa mittaukseen. Mittaussuunniksi, jos tarkoituksena on tarkkailla vain oksakiehkuroiden paikkaa, voi hyvissä tapauksissa riittää jopa yksikin suunta. Tämän osoittaa liitteissä esitetty alin kuva. Kolme mittaussuuntaa johtaa jo erittäinkin hyvään löytymisvarmuuteen. Tällöin esimerkiksi kaksi suuntaa kolmesta paljastaa oksakiehkuran. Yksittäisten oksien havainnointi ei onnistu kovinkaan luotettavasti tällä

menetelmällä. Kuten jo teoreettinen erottelukykykin, joka on verrannollinen käytettyyn taajuuteen ja edelleen aallonpituuteen, antaa siihen viitteitä.

3.3.4 Johtopäätökset

Eri polarisaatioilla vastaanotetun mikroaltoaiteilyn amplitudi- ja vaihe-eroihin perustuva mittalaite toimii kohtuullisen hyvin oksakiehkuran paikan määrittämiseen jopa yhdestä mittaussuunnasta. Tutkitut näytteet ovat vielä varsin pieni sarja ja jatkossa testejä olisi syytä tehdä laajemmin. Samalla on kiinnitettävä entistä enemmän huomiota ympäristön aiheittamien heijastusten eliminointiin ja antureiden ja puun välisen etäisyyden vakioimiseen. Polarisaatiomenetelmällä voisi olla hyvätkin toimintaedellytykset puun suurempien rakenteellisten ominaisuuksien havainnointiin, kuten juuri oksakiehkurat, mutta myös lahoalueiden ja vastaavien paikantamiseen. Yksittäisten oksien erottaminen on ainakin vielä näin mitattuna vaikeaa. Tosin edellä esitetyt parannukset mittaukseen voivat parantaa myös pienempien yksityiskohtien löytymistä.

4 YHTEENVETO

Tämän selvitys- ja tutkimustyön tarkoituksena oli selvittää kolmen eri menetelmän sopivuutta mekaanisen puunjalostusteollisuuden tarpeisiin. Tutkimuksessa havaittiin mittalaitteiden soveltuvan pääosin mittauksiin, ultraäänilaitteistoa lukuun ottamatta. Tutkimus tuotti runsaasti aineistoa, jonka jatkokäsittelyyn ja tulkintaan tulee jatkossa panostaa entistä voimakkaammin.

Tutkimuksen avainhavainnot voidaan tiivistää ultraäänitekniikan osalta siten, että äänipurskeen kytkeytyminen näytteeseen ilman välityksellä on erittäin heikkoa kun käytetään mittaukset mahdollistaa symmetristä heijastusgeometriaa. Ultraäänisignaali kykenee läpäisemään kaarnan ja niin ollen mahdollistaa mittauksen. Menetelmän kehittäminen vaatii kuitenkin uuden projektin.

Mikroaaltotekniikan osalta havaittiin kosteusmäärityksien olevan mahdollista tukin poikkileikkeestä, joskin tutkimuksessa ei keskitytty menetelmän kalibrointiin tai tulosten saattamiseen absoluuttiselle asteikolle. Tulokset antavat viitteen mikroaaltospektroskooppisen tutkimuksen mahdollisuuksista puun mittaamisessa.

Tukkimittausten tuloksista voi tehdä sen päätelmän, että polarisaatiomittauksilla tukin oksakkuus on määritettävissä. Tämä menetelmä soveltuu teolliseen käyttöön, sillä vaikka lähetin/vastaanotin antennipareja olisi käytössä vain kolme kappaletta, mittauksen tulkinta tutkimusmateriaalilla oli varsin selvä.

Vaikka tutkimusmateriaalina oli kuusi, on oletettavaa, että menetelmät soveltuvat muiden puulajien tutkimukseen. Tämän tutkimuksen pohjalta on selvää, että edellä esitettyjen mittausmenetelmien kehittämistä tulisi jatkaa.

TUTKIMUSSUUNNITELMA

Tämä tutkimussuunnitelma määrittelee Metsän tutkimuslaitoksen, Vantaan tutkimuskeskuksen tilaaman ja Oulun yliopiston Mittalaitelaboratorion tekemän tutkimuksen ”Selvitys- ja tutkimustyö mikroaaltojen ja ultraäänen soveltuvuudesta puun laadun mittaukseen” sisällön.

Tutkimus jakautuu kahteen osaan

Selvitystyö

Selvitystyössä kootaan yhteenveto MILAssa aikaisemmin tehdyistä tutkimuksista ultraäänen ja mikroaaltojen käytöstä puun runkojen ja sahatavaran oksakkuuden, lahoisuuden ja kosteuden mittaukseen, ja arvioidaan menetelmien soveltuvuutta ja tarkkuuksia. Selvitystyöhön varataan jokaisen hankkeeseen osallistuvan tutkijan työaikaan yksi viikko.

Tutkimustyöhön sisältyy kolme tehtäväkokonaisuutta

1) Saadaanko kuusen kuoren paksuus määritettyä ultraäänimittauksin?

Tutkimuslaitteena käytetään Mittalaitelaboratorion Sonda 007 CX Airscan'ia, jossa hyödynnetään ilman kautta yhdistyvää, kosketuksetonta mittaustapaa. Mittausasetelmana käytetään heijastusmittausta, jolloin lähetin- ja vastaanotin sijoitetaan näytekappaleen samalle (kuoren) puolelle. Tällöin on käytettävä antureiden välissä esim. styrox-levyä, jolla estetään ääniaaltojen suora pääsy lähettimeltä vastaanottimelle. Koemateriaalina käytetään Metlan toimittamasta kuusitukista sahattavia näytekappaleita, koko n. 50cm * 10cm * 5cm ja näytemäärä 10 kpl. Osa näytekappaleiden kuoresta poistetaan, jonka jälkeen koekappaleet mitataan sekä kuorellisen, että kuorettoman kohdan alueelta. Mittauksia tulee täten kaikkiaan 20 kpl. Mittausasetelman virittämiseen ja mittausten suorittamiseen varataan aikaa kolme viikkoa ja raportointiin viikko. Työn suorittaa FT Ville Hyvärinen.

Riskit: Antureiden asemointi heijastusmittauksissa on erittäin sensitiivinen seikka koko mittaustapahtuman onnistumisen kannalta. Lisäksi signaalintulkinta ei ole täysin yksiselitteinen ongelma johtuen voimakkaista takaisinheijastuksista materiaalin sisältä.

2) Saadaanko mikroaaltomenetelmillä arvioitua rungon kosteustietoa rungon päädyistä?

Metla toimittaa MILA:lle tuoreen kuusitukin, jonka halkaisija noin 18 cm ja pituus noin 2 m. Milassa tukista sahataan 3 noin 10 cm:n paksuista kiekkoa, jotka punnitaan ennen ja jälkeen mittauksen. Mikroaaltomittaukset tehdään Agilent Technologies 8722ET vektoripiirianalysointilaitteella taajuusalueilla 4-6 GHz ja 8-10 GHz. Mitattavia parametreja ovat kiekon pinnasta heijastuneen signaalin amplitudi ja vaihe sekä puun läpäisseen signaalin amplitudi ja vaihe. Mittausten jälkeen kiekot kuivatetaan kuivausuunissa. Kuivat kiekot (massan muuttuminen alle 0,1% / 6h) punnitaan ja niiden alkuperäinen kosteus määritetään kuivapainoon verrattuna. Kuivat kiekot mitataan vektoripiirianalysointilaitteella kuten edellä. Tämän jälkeen tuoreiden ja kuivien kiekkojen mittaustuloksia verrataan toisiinsa ja tutkitaan, onko tuloksista mahdollista saada selville tuoreen rungon

kosteustietoa. Mittausasetelman virittämiseen ja mittausten suorittamiseen varataan aikaa kolme viikkoa ja raportointiin viikko. Työn suorittavat DI Sari Nieminen ja FM Matti-P.Sarén.

Riskit: Aikaisempien kokemusten perusteella pinnasta heijastuvan signaalin tulkinta on haastavaa.

3) Voidaanko rungon oksajakaumaa luotettavasti ennustaa mikroaaltomittauksella, jos käytössä on vain kolmen rungon pituusakselia kohtisuoraan asetettua lähetin/vastaanotin paria ja voidaanko mikroaaltomittauksen tulosta parantaa suorittamalla mittaukset rungon vastakkaisilta puolilta ja vähentämällä tulokset toisistaan?

Milassa rakennetulla, eri polarisaatioilla vastaanotettujen signaalien välisiin vaihe- ja amplitudieroihin perustuvalla mittalaitteella suoritetaan Metlan toimittamille 2-3 kuusitukille selvitysmittaukset. Polarisaatiomittauksen lisäksi tukit tutkitaan myös perinteisellä läpäisevällä mittausmenetelmällä, jossa parametreina ovat edelleen vaihe ja amplitudi. Käytettävä mikroaaltotaajuus on 1-2 GHz. Näytetukkien pituuden tulisi olla vähintään 260 cm ja paksuuden n. 25–30 cm. Tukit ja mittalaitteet yhdistetään tukkipenkkiin, jossa näytettä pystytään pyörittämään ja mittalaitteita liikuttamaan tukin pituussuunnassa. Mittaukset suoritetaan tukin kehällä ja pituussuunnassa vastaavin mittapistevälein. Datasta analysoimalla voidaan selvittää tarvittavien mittaussuuntien määrä ja vastakkaisten mittaussuuntien erotuksen mahdollisesti tuoma hyöty. Mittausten suorittamiseen varataan kaksi viikkoa ja data-analyysiin sekä raportointiin kaksi viikkoa. Työn suorittavat DI Mikko Haapalainen ja FM Mika Sorjonen.

Riskit: Kuusen oksat ovat monesti pienikokoisia ja niitä voi olla määrällisesti runsaasti. Käytettävällä taajuudella erottelukyky on alhainen ja pienet oksat eivät välttämättä erotu.

Tutkimusmateriaali

Metla toimittaa seuraavan tutkimusmateriaalin

1 tukki, läpimitta 16-18cm, pituus 2,60m, Ehyt kuori. Materiaali tehtäväkokonaisuuksiin 1 ja 2

3 tukkia, läpimitta 25-30cm, pituus 2,60m, Selvät oksakiehkurat, pintaoksien läpimitta yli 10mm. Materiaali tehtäväkokonaisuuteen 3

ULTRAÄÄNIMITTAUS**TIEDOT MITTAUKSESTA:**

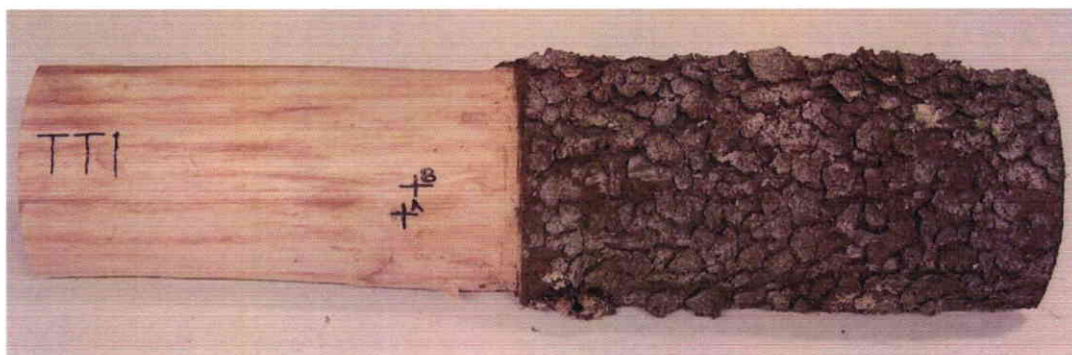
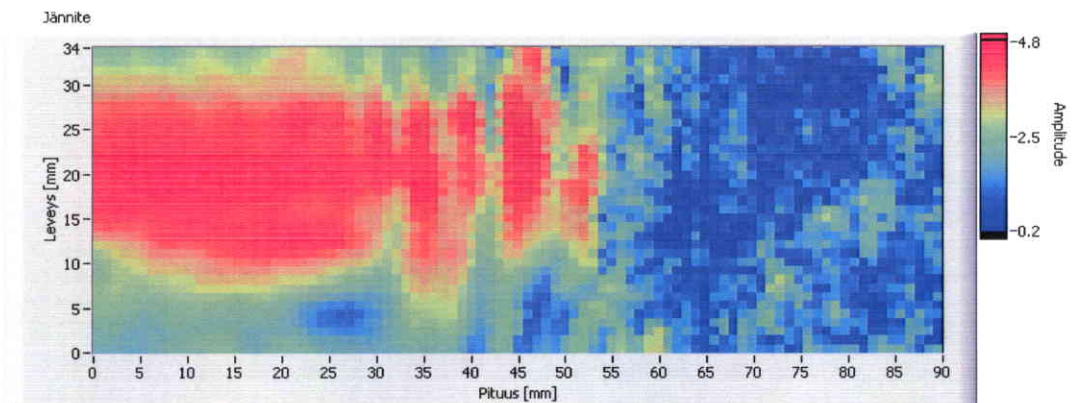
Mitattava kohde TT1_a
 Päivämäärä 13.01.2005
 12:45:11
 Tiedostot: TT1_a.dat,
 TT1_a.txt

ASETUKSET (mm):

- Mittauspituus 90.0
 - Mittausleveys 40.0
 - Mittausväli (P) 1.0
 - Mittausväli (L) 1.0
 - Nopeus (mm/s) 20.0

ULTRAÄÄNILAITTEEN ASETUKSET:

- Receiver Attn 60 dB
 - Receiver Tune 95
 - Receiver Gain 54.0 dB
 - Gate Delay 520 us
 - Gate Width 60 us
 - Display Width 800 us
 - Display Delay 150 us
 - Transmitter Cycle 1
 - Transmitter Tune 100
 - Transmitter Freq 120 kHz
 - Sampling Rate 10 MHz
 - Signal Shape FW Filled
 - PRF External
 - Frequency [Hz] 200



ULTRAÄÄNIMITTAUS**TIEDOT MITTAUKSESTA:**

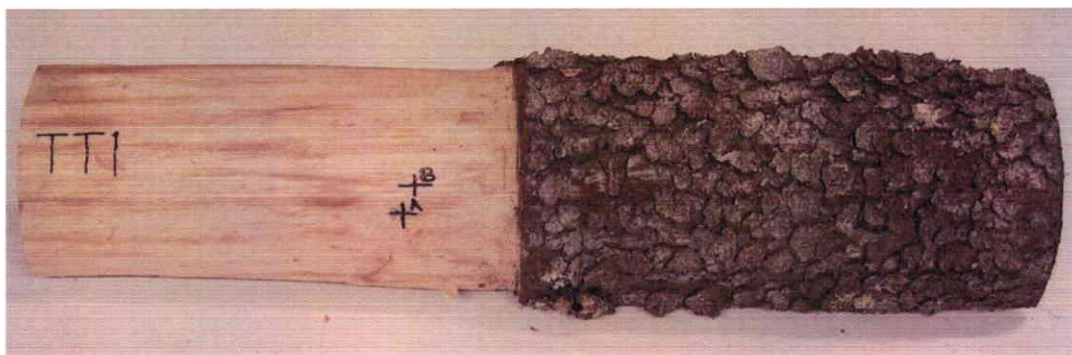
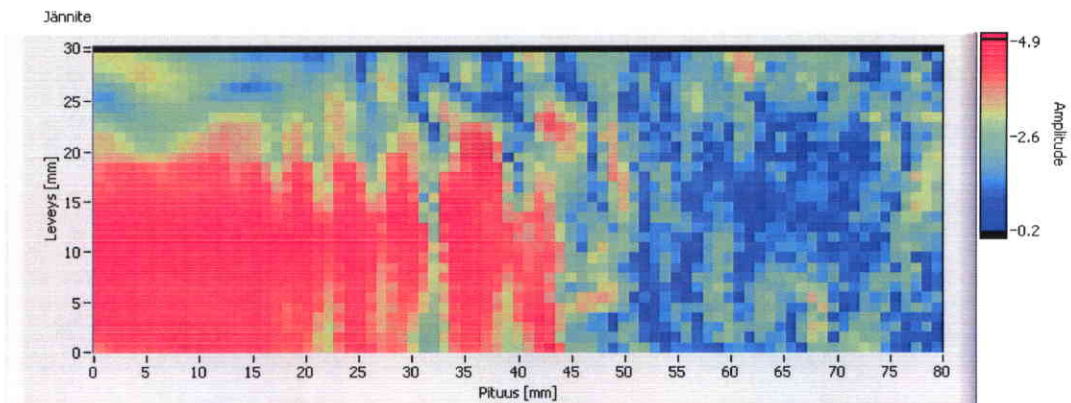
Mitattava kohde TT1_b
 Päivämäärä 13.01.2005
 13:02:50
 Tiedostot: TT1_b.dat,
 TT1_b.txt

ASETUKSET (mm):

- Mittauspituus 80.0
 - Mittausleveys 30.0
 - Mittausväli (P) 1.0
 - Mittausväli (L) 1.0
 - Nopeus (mm/s) 10.0

ULTRAÄÄNILAITTEEN ASETUKSET:

- Receiver Attn 60 dB
 - Receiver Tune 95
 - Receiver Gain 54.0 dB
 - Gate Delay 520 us
 - Gate Width 60 us
 - Display Width 800 us
 - Display Delay 150 us
 - Transmitter Cycle 1
 - Transmitter Tune 100
 - Transmitter Freq 120 kHz
 - Sampling Rate 10 MHz
 - Signal Shape FW Filled
 - PRF External
 - Frequency [Hz] 200



ULTRAÄÄNIMITTAUS**TIEDOT MITTAUKSESTA:**

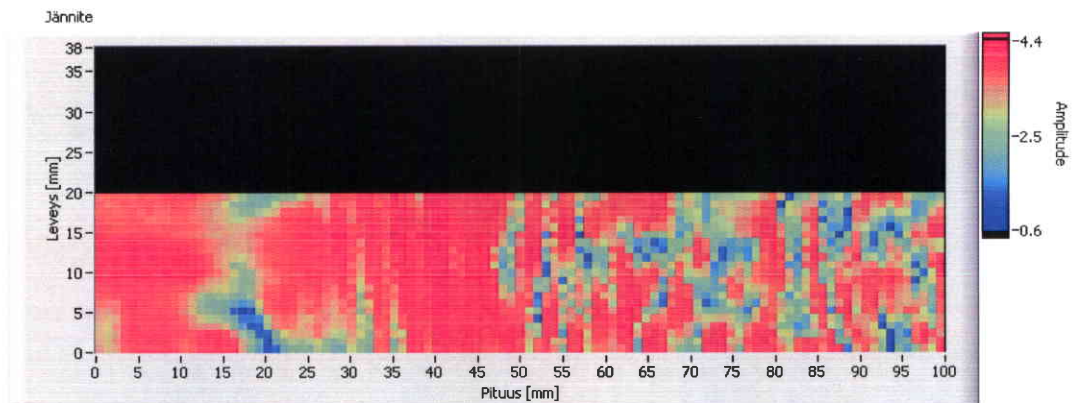
Mitattava kohde TT2
 Päivämäärä 14.01.2005
 10:40:02
 Tiedostot: TT2.dat,
 TT2.txt

ASETUKSET (mm):

- Mittauspituus 100.0
 - Mittausleveys 20.0
 - Mittausväli (P) 1.0
 - Mittausväli (L) 1.0
 - Nopeus (mm/s) 20.0

ULTRAÄÄNILAITTEEN ASETUKSET:

- Receiver Attn 60 dB
 - Receiver Tune 95
 - Receiver Gain 52.9 dB
 - Gate Delay 522 us
 - Gate Width 60 us
 - Display Width 800 us
 - Display Delay 150 us
 - Transmitter Cycle 1
 - Transmitter Tune 100
 - Transmitter Freq 120 kHz
 - Sampling Rate 10 MHz
 - Signal Shape FW Filled
 - PRF External
 - Frequency [Hz] 200



ULTRAÄÄNIMITTAUS**TIEDOT MITTAUKSESTA:**

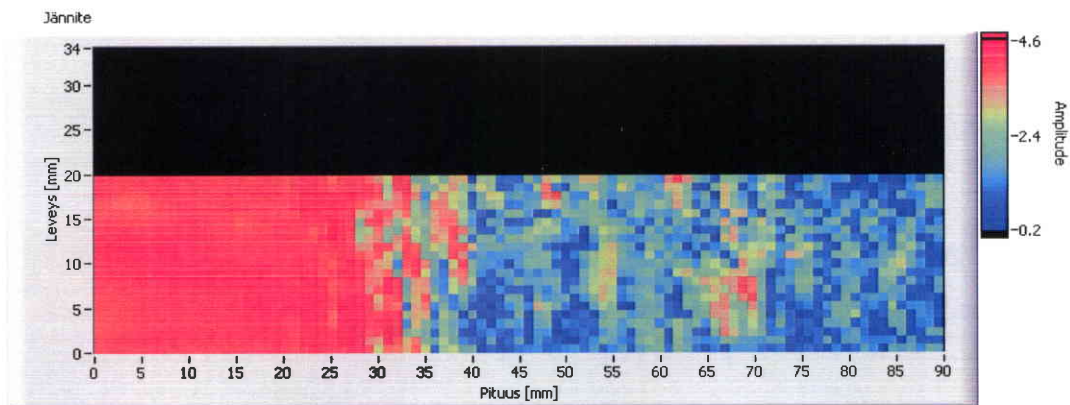
Mitattava kohde TT3
 Päivämäärä 14.01.2005
 13:04:52
 Tiedostot: TT3.dat,
 TT3.txt

ASETUKSET (mm):

- Mittauspituus 90.0
 - Mittausleveys 20.0
 - Mittausväli (P) 1.0
 - Mittausväli (L) 1.0
 - Nopeus (mm/s) 20.0

ULTRAÄÄNILAITTEEN ASETUKSET:

- Receiver Attn 60 dB
 - Receiver Tune 95
 - Receiver Gain 40.0 dB
 - Gate Delay 505 us
 - Gate Width 60 us
 - Display Width 800 us
 - Display Delay 150 us
 - Transmitter Cycle 1
 - Transmitter Tune 100
 - Transmitter Freq 120 kHz
 - Sampling Rate 10 MHz
 - Signal Shape FW Filled
 - PRF External
 - Frequency [Hz] 300



ULTRAÄÄNIMITTAUS**TIEDOT MITTAUKSESTA:**

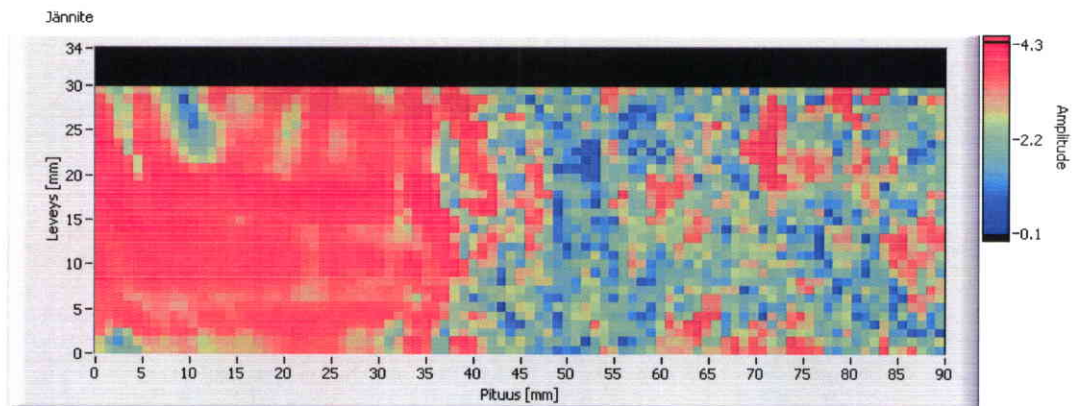
Mitattava kohde TT4
 Päivämäärä 14.01.2005
 13:27:24
 Tiedostot: TT4.dat,
 TT4.txt

ASETUKSET (mm):

- Mittauspituus 90.0
 - Mittausleveys 30.0
 - Mittausväli (P) 1.0
 - Mittausväli (L) 1.0
 - Nopeus (mm/s) 20.0

ULTRAÄÄNILAITTEEN ASETUKSET:

- Receiver Attn 60 dB
 - Receiver Tune 95
 - Receiver Gain 52.9 dB
 - Gate Delay 505 us
 - Gate Width 60 us
 - Display Width 800 us
 - Display Delay 150 us
 - Transmitter Cycle 1
 - Transmitter Tune 100
 - Transmitter Freq 120 kHz
 - Sampling Rate 10 MHz
 - Signal Shape FW Filled
 - PRF External
 - Frequency [Hz] 300



ULTRAÄÄNIMITTAUS**TIEDOT MITTAUKSESTA:**

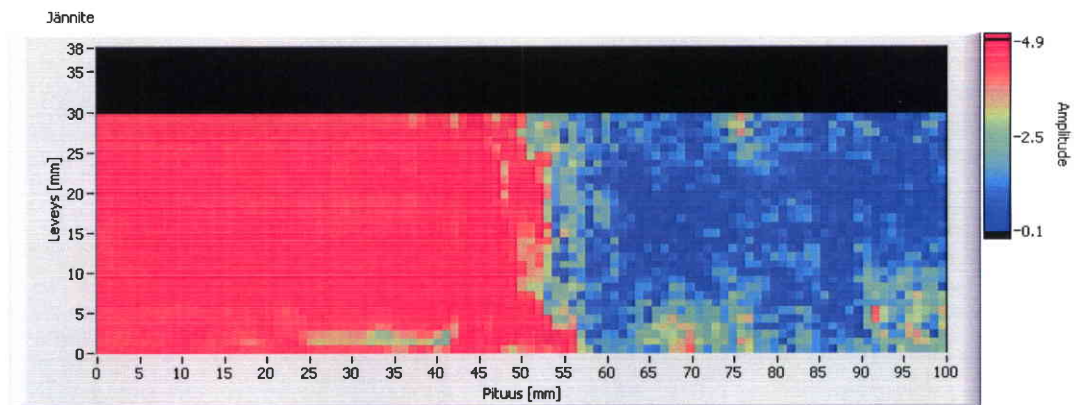
Mitattava kohde TT5
 Päivämäärä 17.01.2005
 10:33:44
 Tiedostot: TT5.dat,
 TT5.txt

ASETUKSET (mm):

- Mittauspituus 100.0
 - Mittausleveys 30.0
 - Mittausväli (P) 1.0
 - Mittausväli (L) 1.0
 - Nopeus (mm/s) 30.0

ULTRAÄÄNILAITTEEN ASETUKSET:

- Receiver Attn 60 dB
 - Receiver Tune 95
 - Receiver Gain 54.0 dB
 - Gate Delay 505 us
 - Gate Width 60 us
 - Display Width 800 us
 - Display Delay 150 us
 - Transmitter Cycle 1
 - Transmitter Tune 100
 - Transmitter Freq 120 kHz
 - Sampling Rate 10 MHz
 - Signal Shape FW Filled
 - PRF External
 - Frequency [Hz] 400



ULTRAÄÄNIMITTAUS**TIEDOT MITTAUKSESTA:**

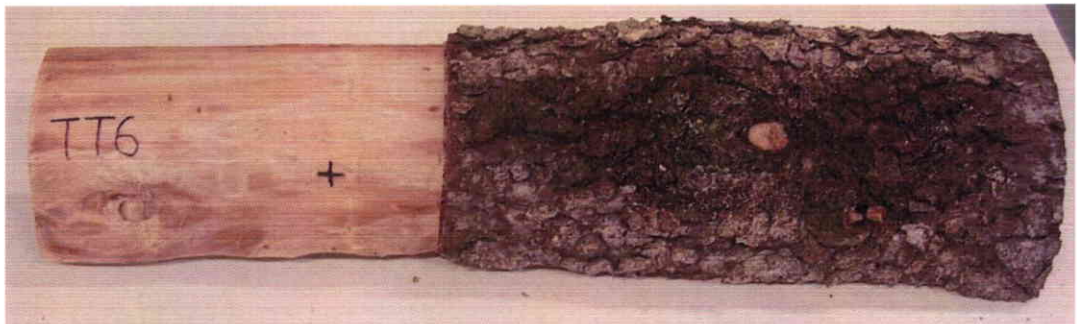
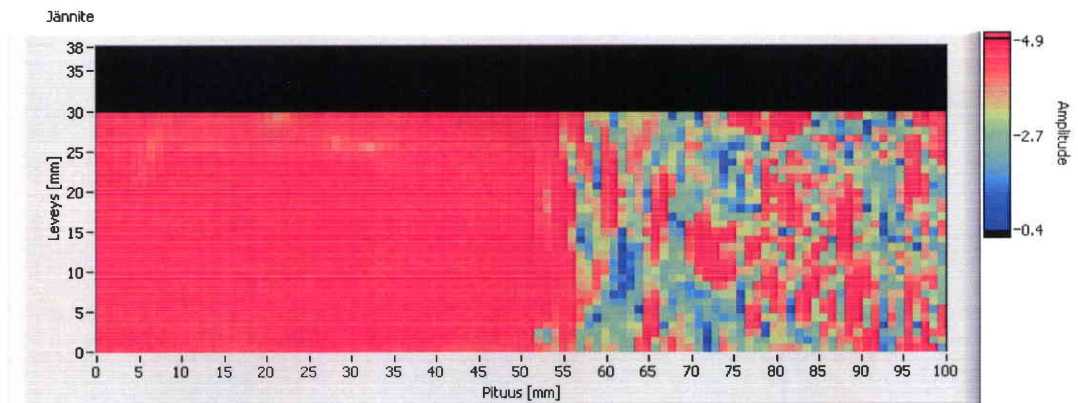
Mitattava kohde TT6
 Päivämäärä 17.01.2005
 11:45:23
 Tiedostot: TT6.dat,
 TT6.txt

ASETUKSET (mm):

- Mittauspituus 100.0
 - Mittausleveys 30.0
 - Mittausväli (P) 1.0
 - Mittausväli (L) 1.0
 - Nopeus (mm/s) 30.0

ULTRAÄÄNILAITTEEN ASETUKSET:

- Receiver Attn 60 dB
 - Receiver Tune 95
 - Receiver Gain 54.0 dB
 - Gate Delay 505 us
 - Gate Width 60 us
 - Display Width 800 us
 - Display Delay 150 us
 - Transmitter Cycle 1
 - Transmitter Tune 100
 - Transmitter Freq 120 kHz
 - Sampling Rate 10 MHz
 - Signal Shape FW Filled
 - PRF External
 - Frequency [Hz] 400



ULTRAÄÄNIMITTAUS**TIEDOT MITTAUKSESTA:**

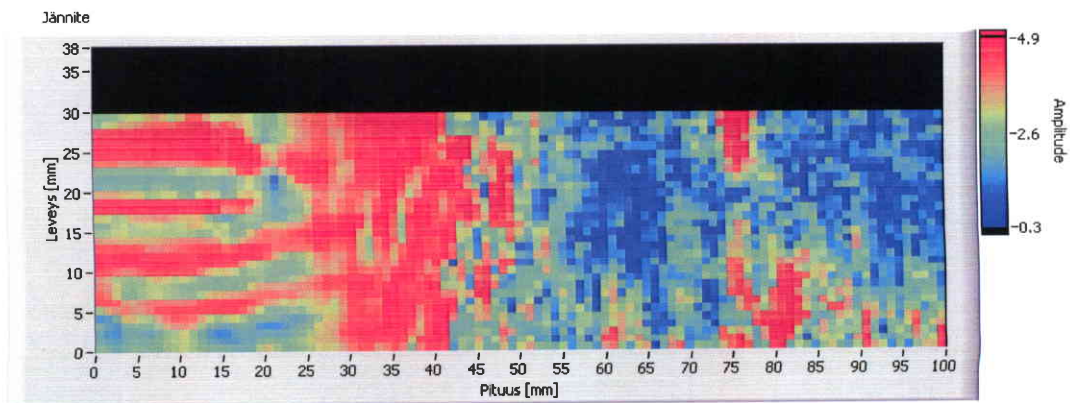
Mittattava kohde TT7
 Päivämäärä 17.01.2005
 11:56:04
 Tiedostot: TT7.dat,
 TT7.txt

ASETUKSET (mm):

- Mittauspituus 100.0
 - Mittausleveys 30.0
 - Mittausväli (P) 1.0
 - Mittausväli (L) 1.0
 - Nopeus (mm/s) 30.0

ULTRAÄÄNILAITTEEN ASETUKSET:

- Receiver Attn 60 dB
 - Receiver Tune 95
 - Receiver Gain 54.0 dB
 - Gate Delay 505 us
 - Gate Width 60 us
 - Display Width 800 us
 - Display Delay 150 us
 - Transmitter Cycle 1
 - Transmitter Tune 100
 - Transmitter Freq 120 kHz
 - Sampling Rate 10 MHz
 - Signal Shape FW Filled
 - PRF External
 - Frequency [Hz] 400



ULTRAÄÄNIMITTAUS**TIEDOT MITTAUKSESTA:**

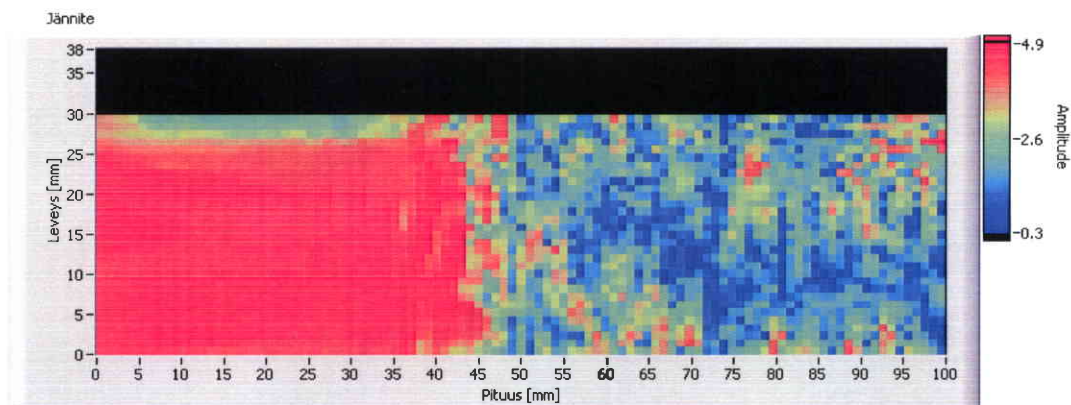
Mitattava kohde TT8
 Päivämäärä 17.01.2005
 12:05:10
 Tiedostot: TT8.dat,
 TT8.txt

ASETUKSET (mm):

- Mittauspituus 100.0
 - Mittausleveys 30.0
 - Mittausväli (P) 1.0
 - Mittausväli (L) 1.0
 - Nopeus (mm/s) 30.0

ULTRAÄÄNILAITTEEN ASETUKSET:

- Receiver Attn 60 dB
 - Receiver Tune 95
 - Receiver Gain 54.0 dB
 - Gate Delay 505 us
 - Gate Width 60 us
 - Display Width 800 us
 - Display Delay 150 us
 - Transmitter Cycle 1
 - Transmitter Tune 100
 - Transmitter Freq 120 kHz
 - Sampling Rate 10 MHz
 - Signal Shape FW Filled
 - PRF External
 - Frequency [Hz] 400



ULTRAÄÄNIMITTAUS**TIEDOT MITTAUKSESTA:**

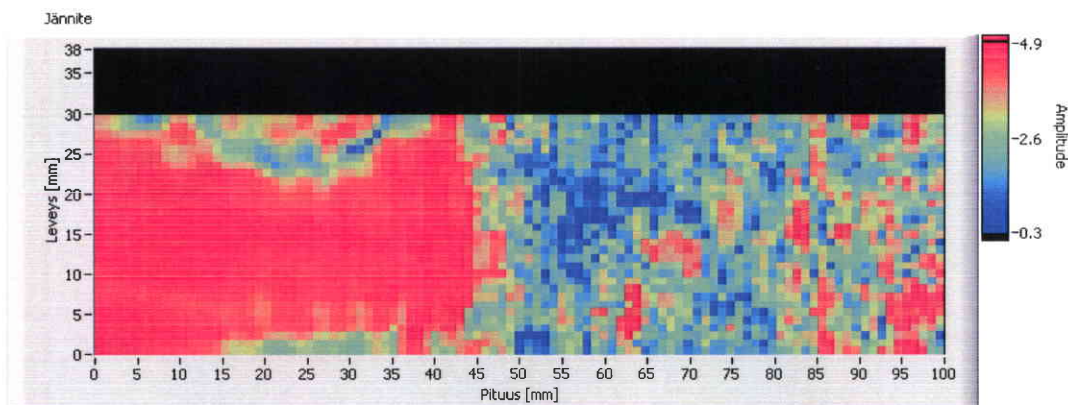
Mitattava kohde TT9
 Päivämäärä 17.01.2005
 12:11:00
 Tiedostot: TT9.dat,
 TT9.txt

ASETUKSET (mm):

- Mittauspituus 100.0
 - Mittausleveys 30.0
 - Mittausväli (P) 1.0
 - Mittausväli (L) 1.0
 - Nopeus (mm/s) 30.0

ULTRAÄÄNILAITTEEN ASETUKSET:

- Receiver Attn 60 dB
 - Receiver Tune 95
 - Receiver Gain 54.0 dB
 - Gate Delay 505 us
 - Gate Width 60 us
 - Display Width 800 us
 - Display Delay 150 us
 - Transmitter Cycle 1
 - Transmitter Tune 100
 - Transmitter Freq 120 kHz
 - Sampling Rate 10 MHz
 - Signal Shape FW Filled
 - PRF External
 - Frequency [Hz] 400



ULTRAÄÄNIMITTAUS**TIEDOT MITTAUKSESTA:**

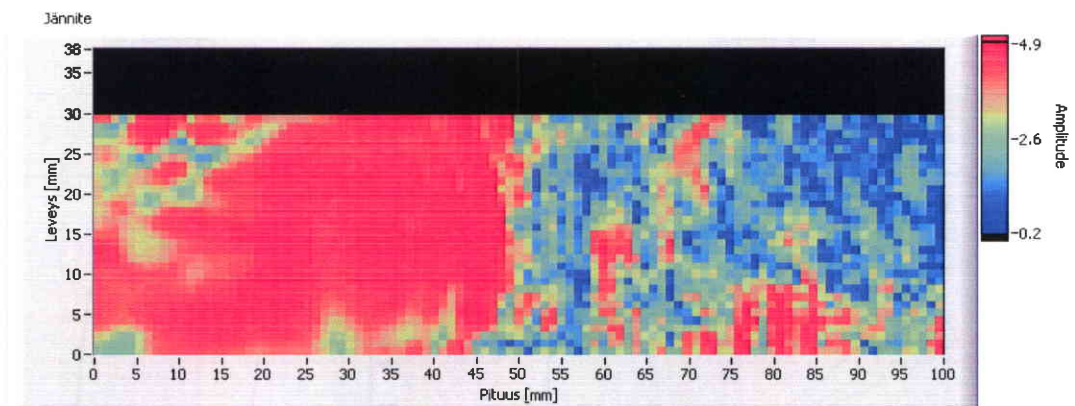
Mitattava kohde TT10
 Päivämäärä 17.01.2005
 12:20:12
 Tiedostot: TT10.dat,
 TT10.txt

ASETUKSET (mm):

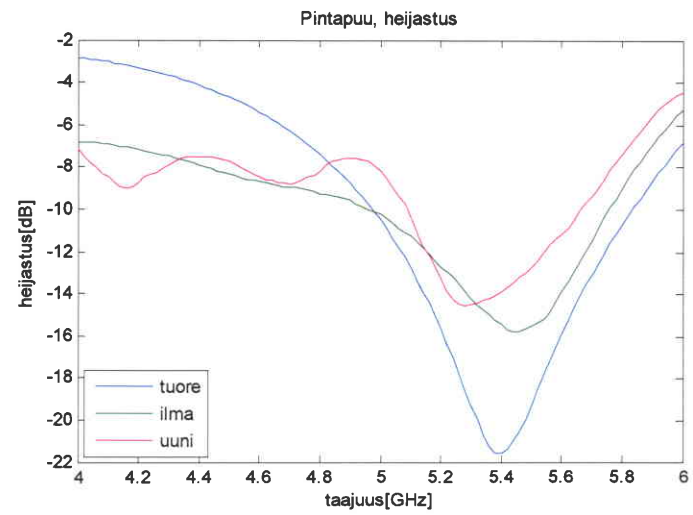
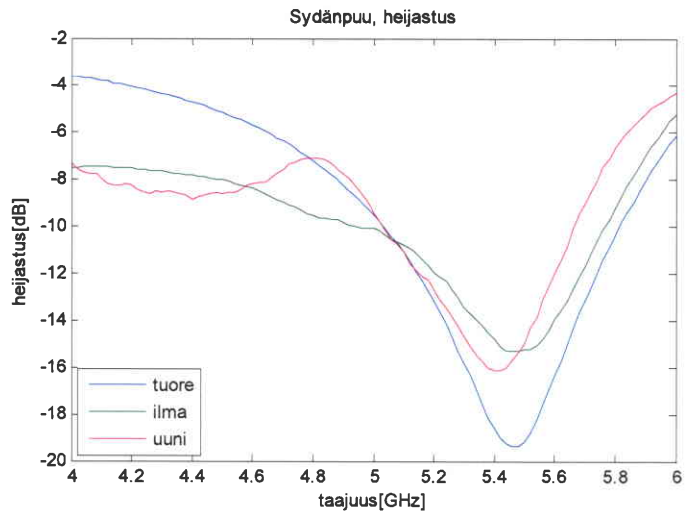
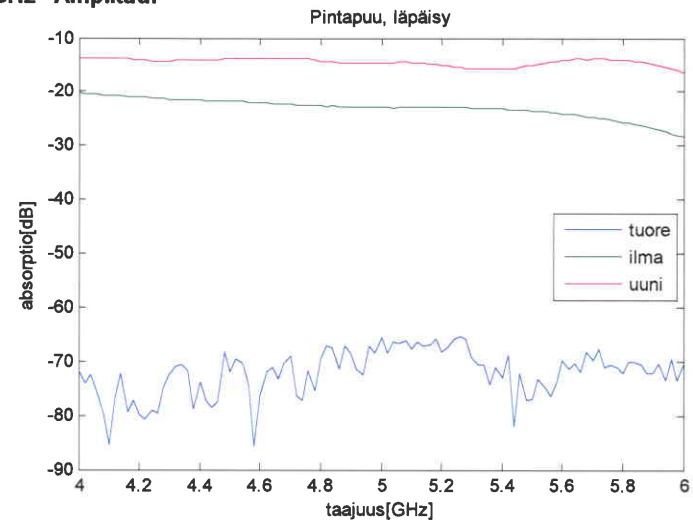
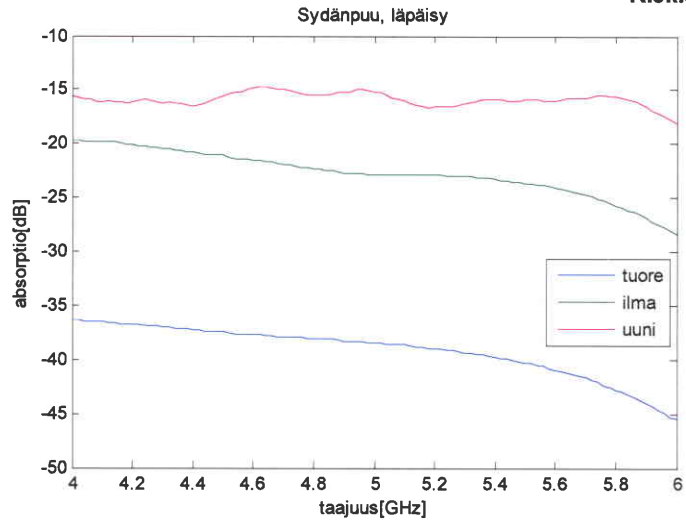
- Mittauspituus 100.0
 - Mittausleveys 30.0
 - Mittausväli (P) 1.0
 - Mittausväli (L) 1.0
 - Nopeus (mm/s) 30.0

ULTRAÄÄNILAITTEEN ASETUKSET:

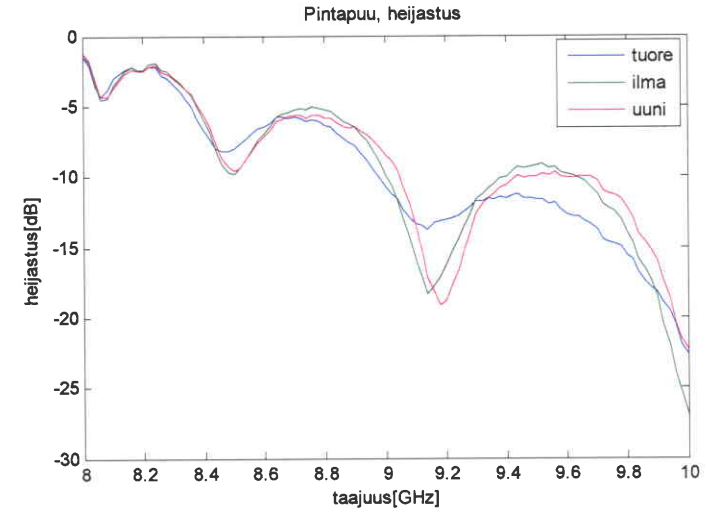
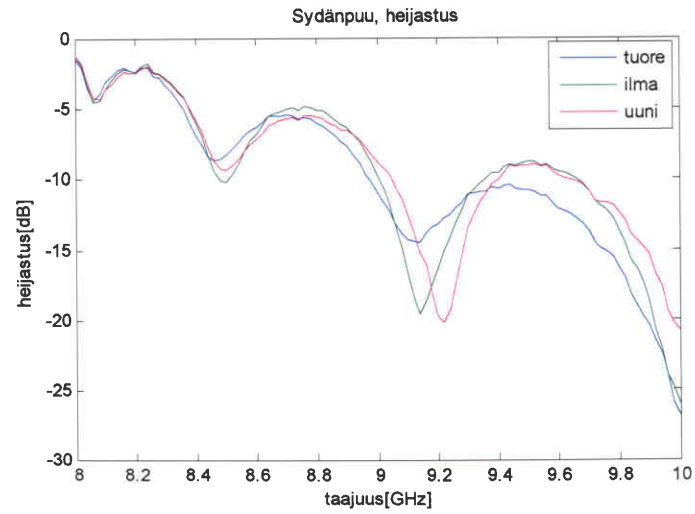
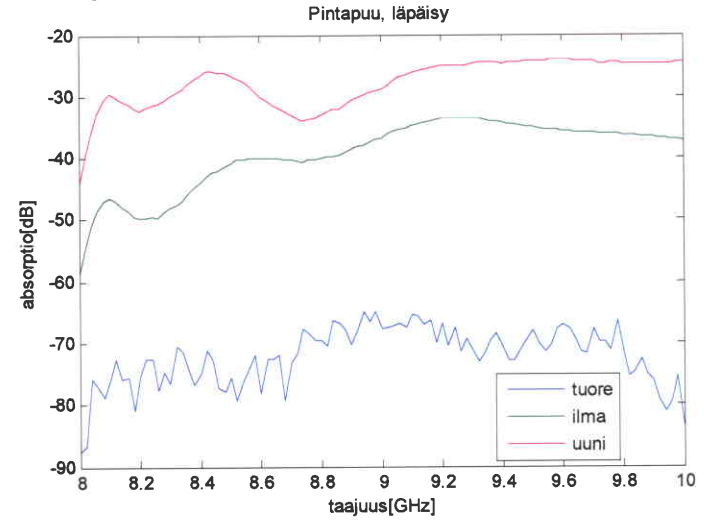
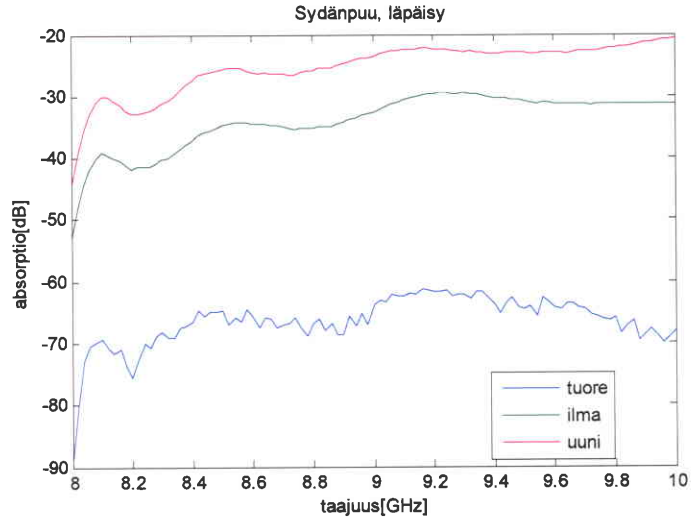
- Receiver Attn 60 dB
 - Receiver Tune 95
 - Receiver Gain 54.0 dB
 - Gate Delay 505 us
 - Gate Width 60 us
 - Display Width 800 us
 - Display Delay 150 us
 - Transmitter Cycle 1
 - Transmitter Tune 100
 - Transmitter Freq 120 kHz
 - Sampling Rate 10 MHz
 - Signal Shape FW Filled
 - PRF External
 - Frequency [Hz] 400



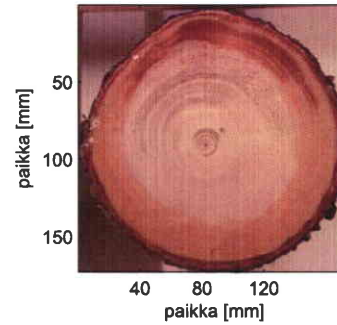
Kiekko 1 4-6 GHz Amplitudi



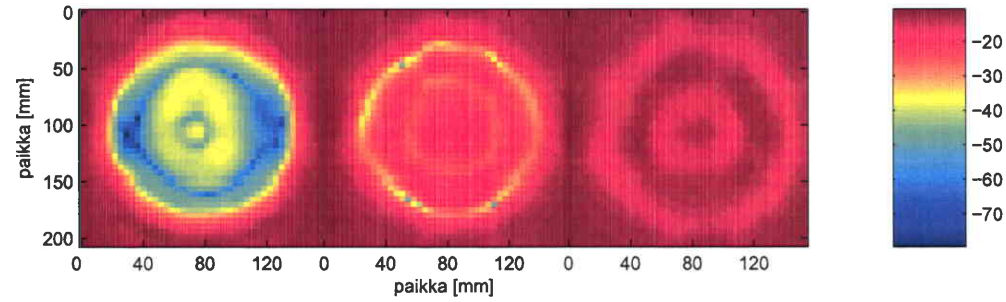
Kiekkok 1 8-10 GHz Amplitudi



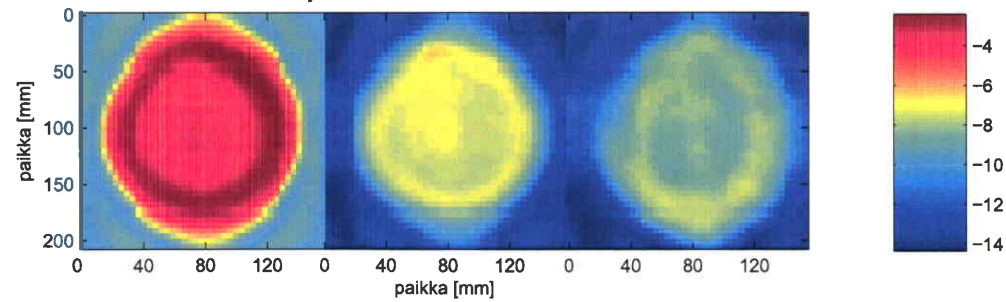
Kiekkö 1 4,1– 4,3 GHz Absorptio



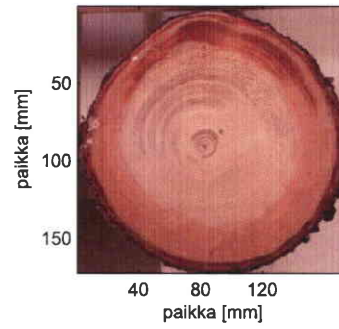
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



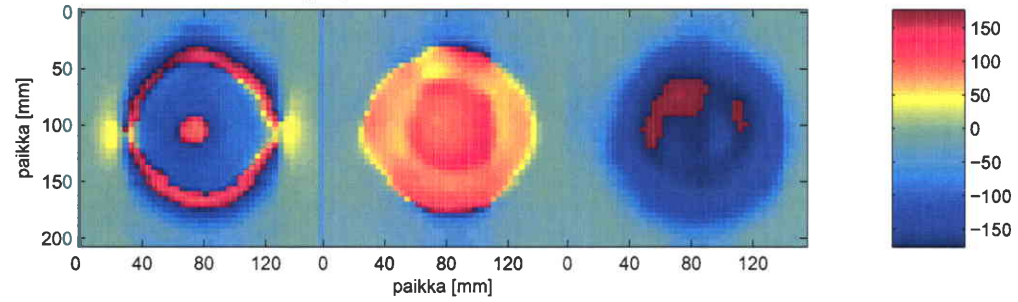
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



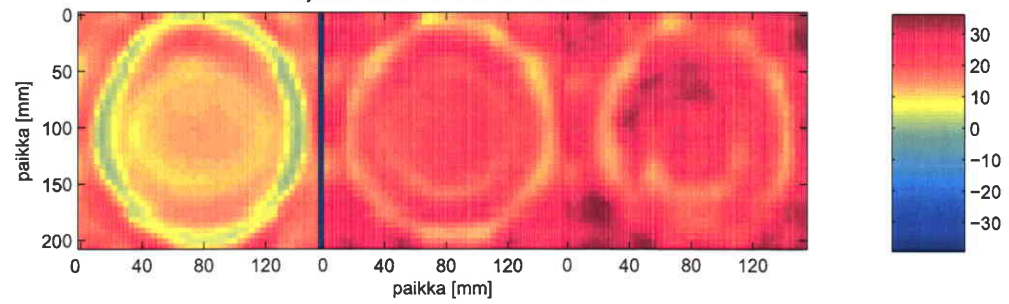
Kiekkö 1 4,22 GHz Vaihe



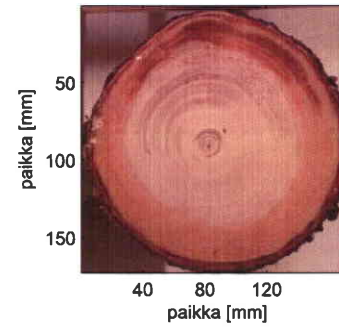
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



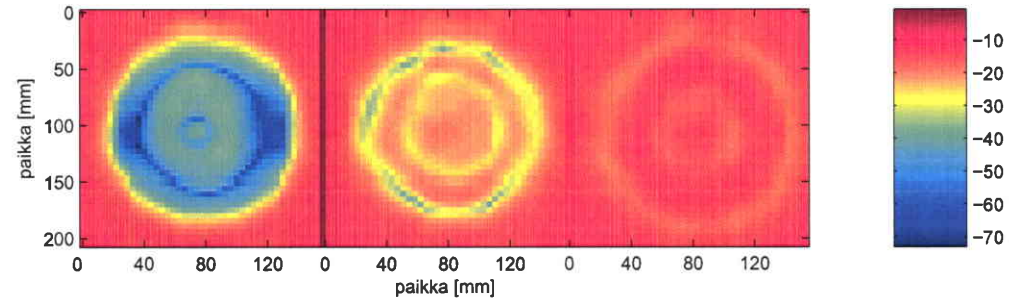
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



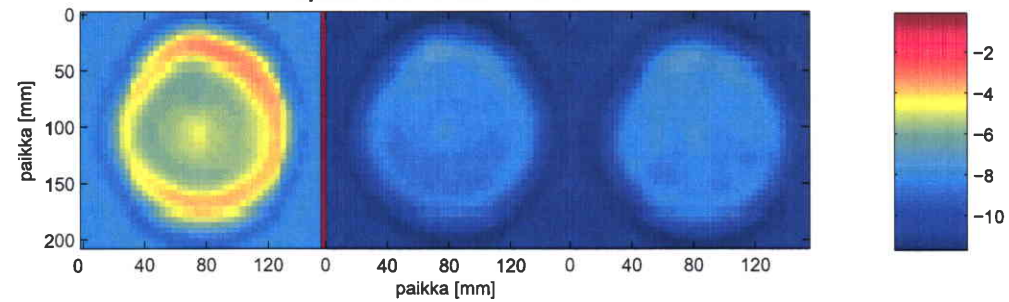
Kiekkok 1 4,0 – 5,0 GHz Absorptio



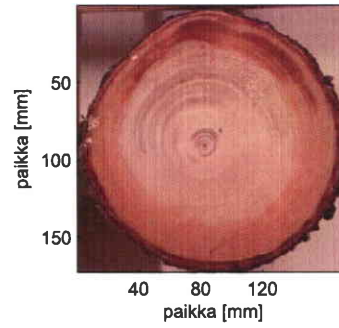
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



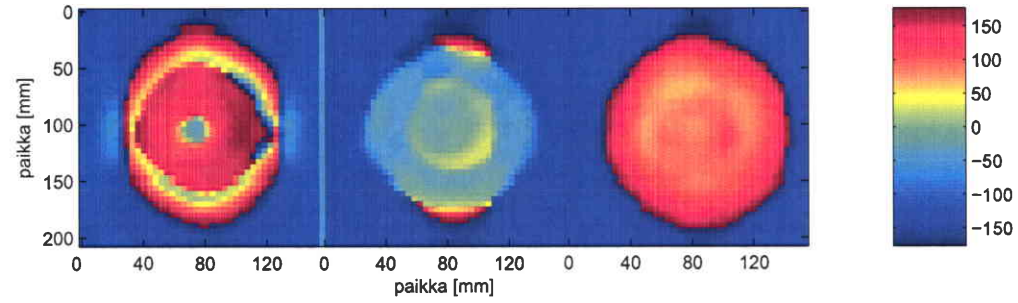
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



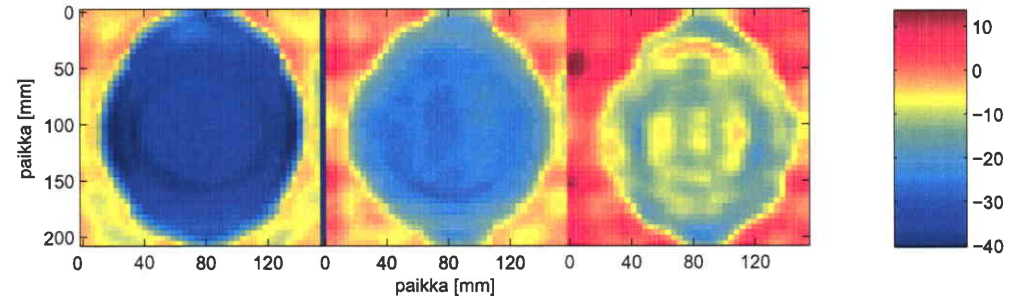
Kiekkö 1 4,5 GHz Vaihe



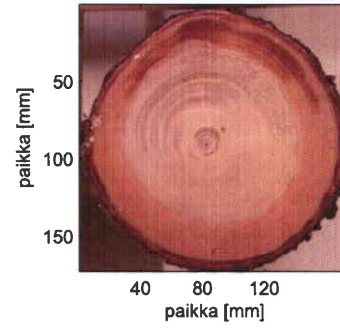
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



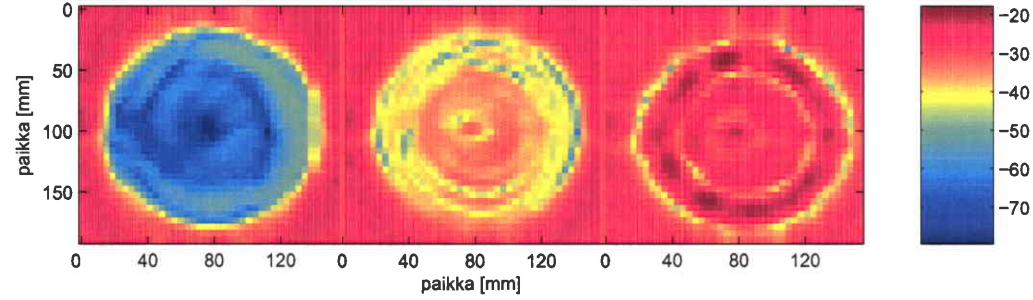
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



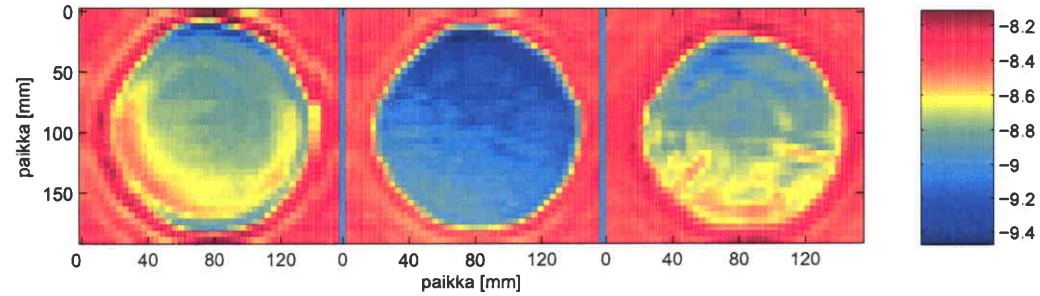
Kiekkö 1 8,5 - 9,2 GHz Absorptio



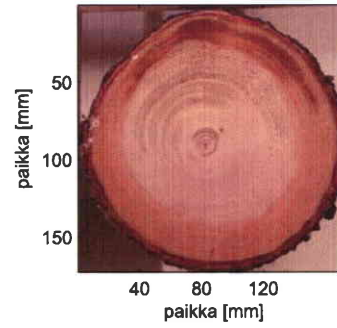
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



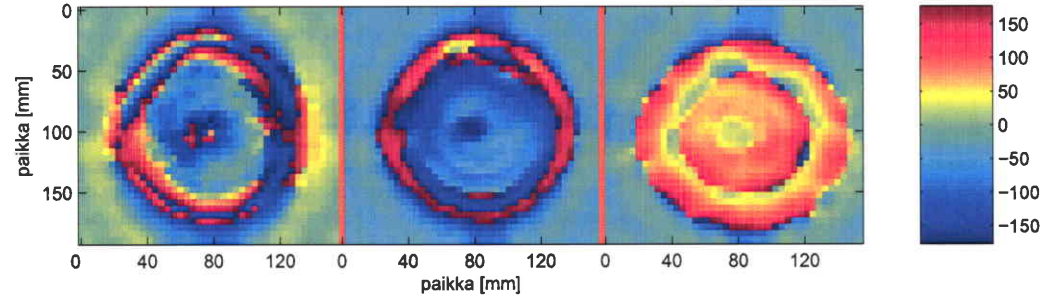
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



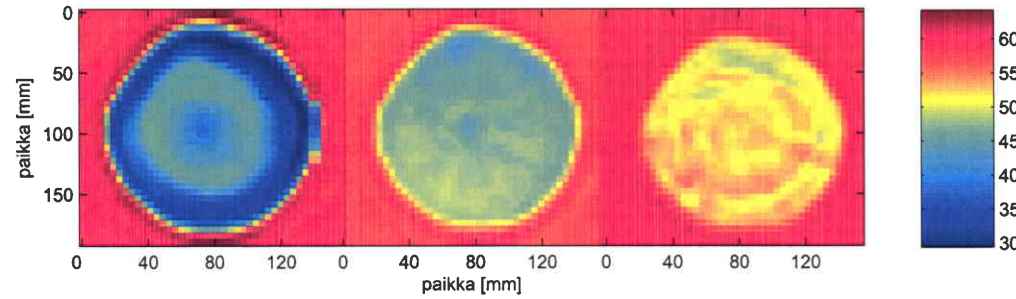
Kiekkö 1 8,8 GHz Vaihe



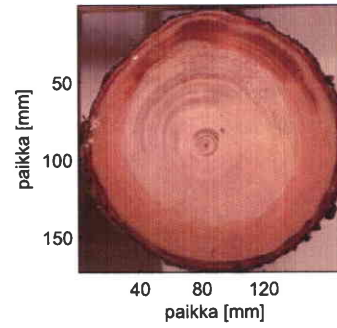
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



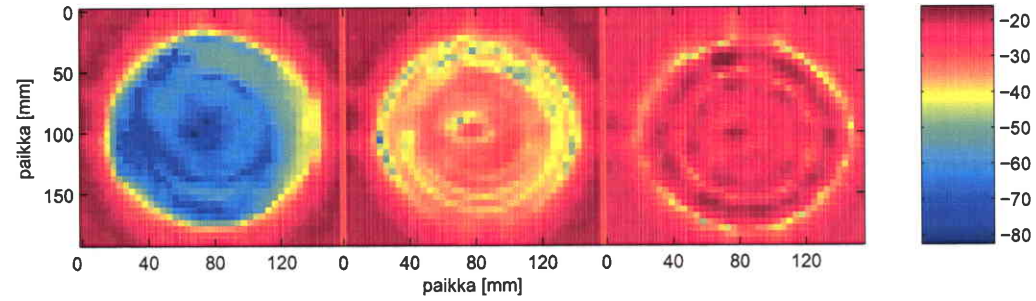
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



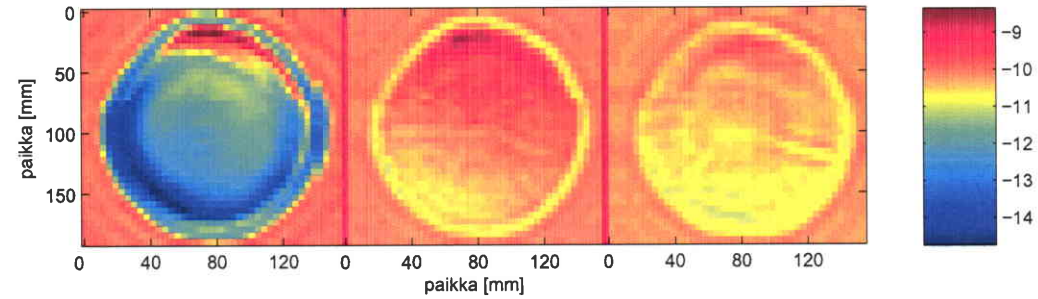
Kiekkok 1 9,3 – 9,7 GHz Absorptio



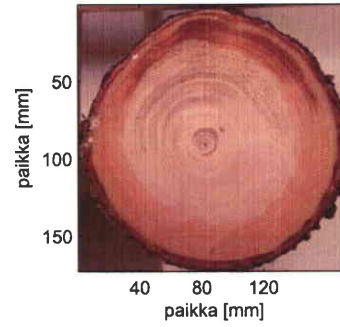
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



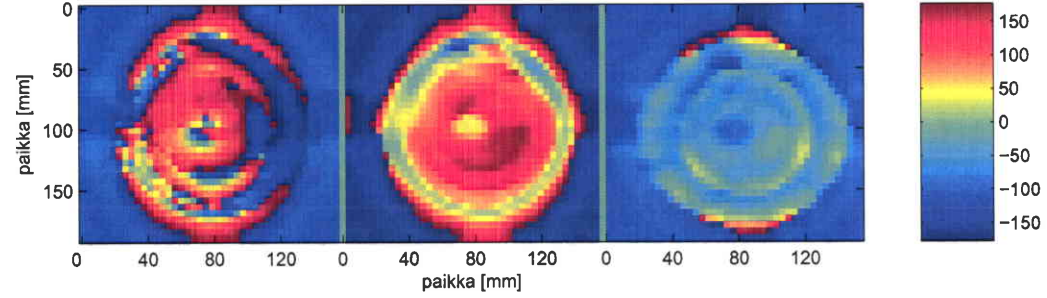
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



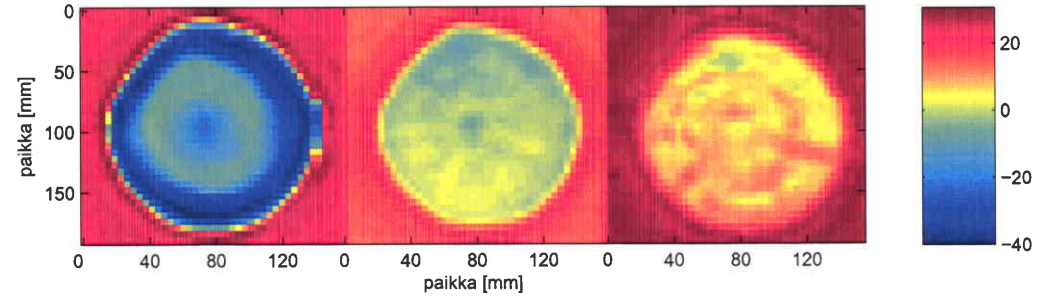
Kiekkok 1 9,5 GHz Vaihe



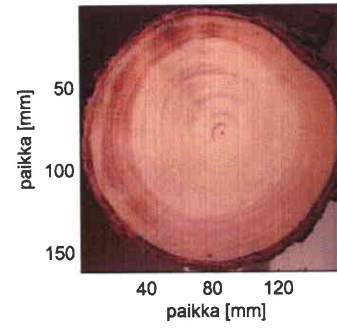
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



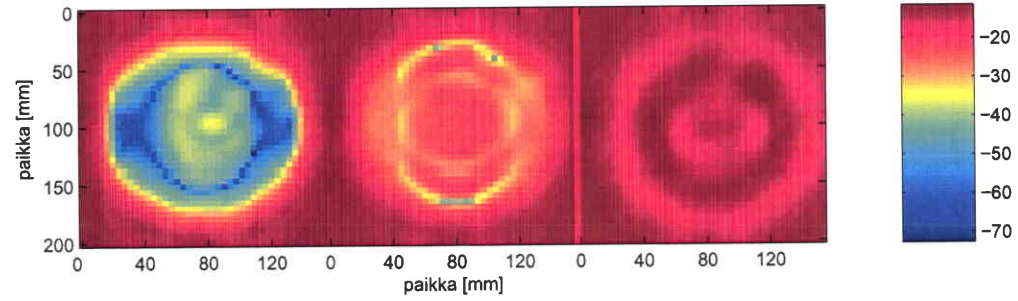
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



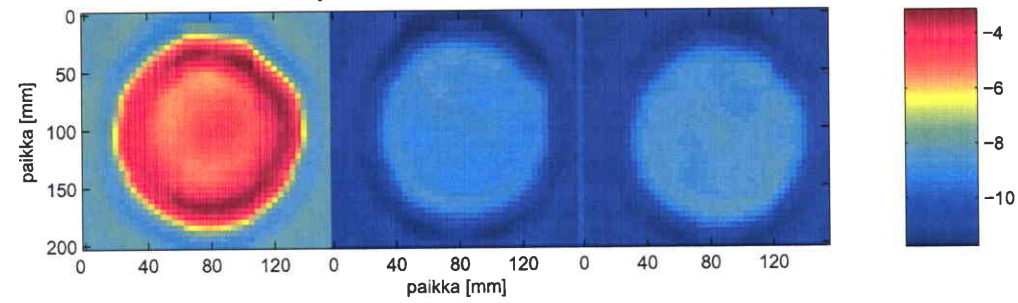
Kiekkö 2 4,0 – 5,0 GHz Absorptio



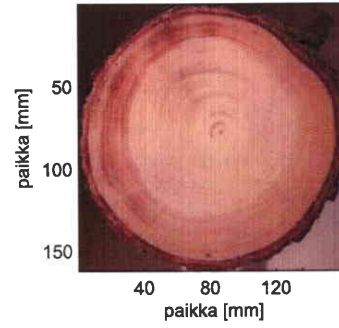
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



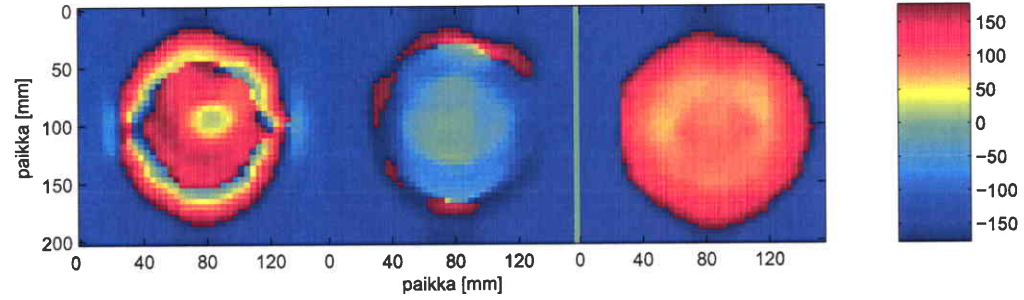
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



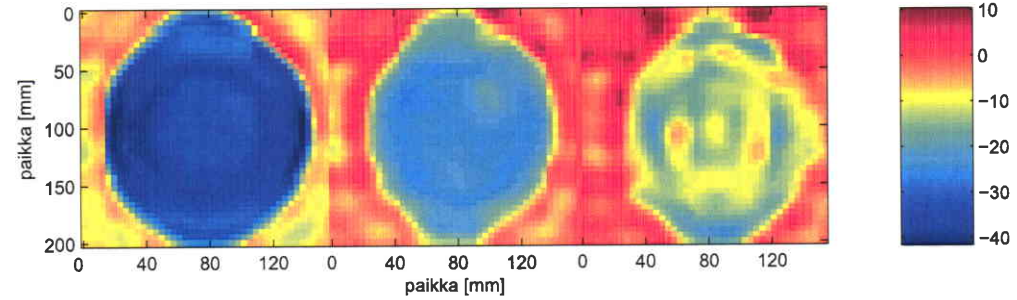
Kiekkö 2 4,5 GHz Vaihe



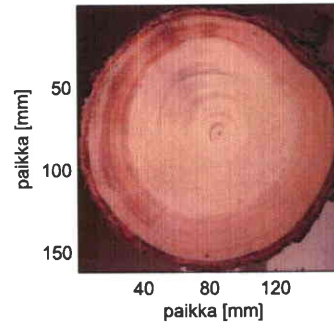
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



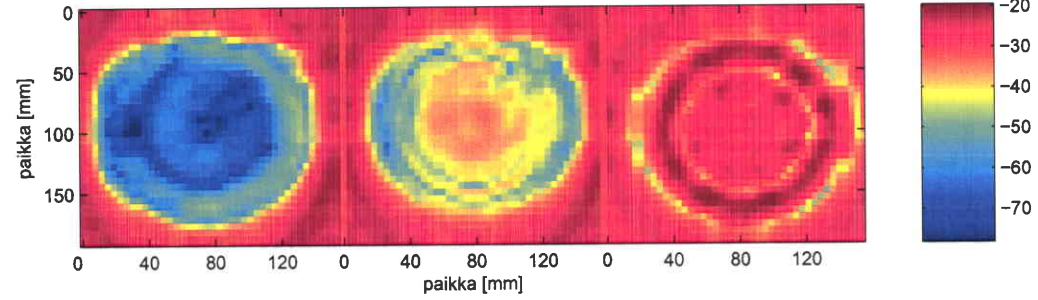
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



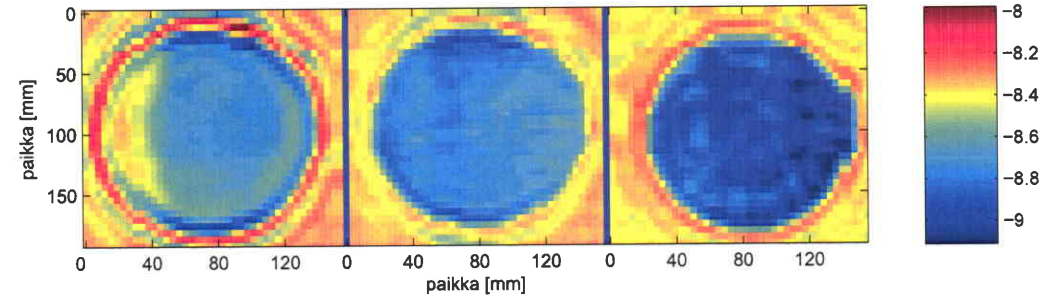
Kiekkö 2 8,5 – 9,2 GHz Absorptio



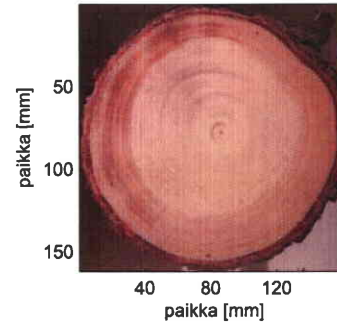
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



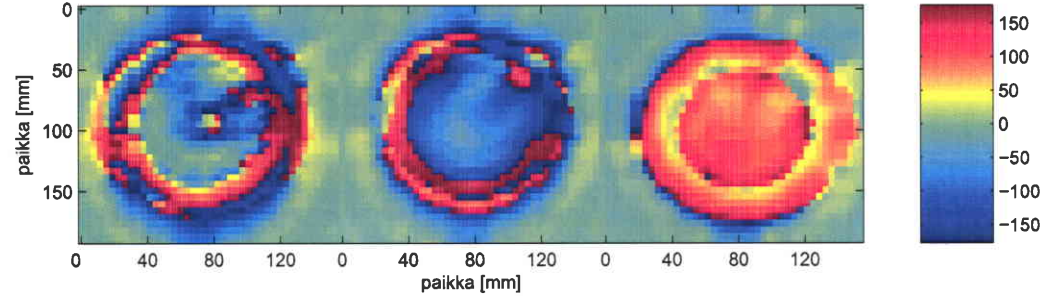
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



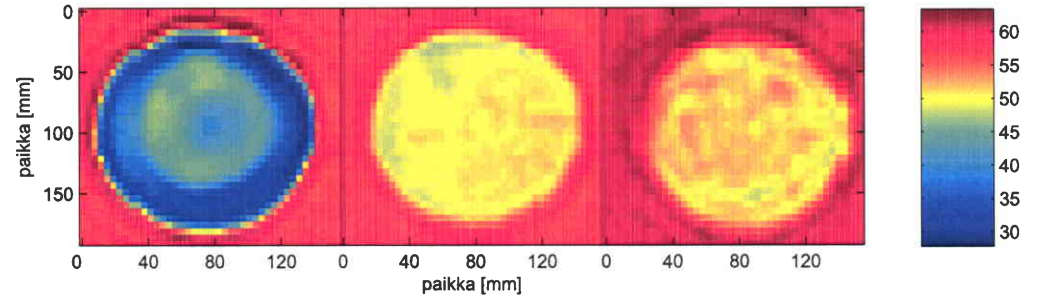
Kiekkö 2 8,8 GHz Vaihe



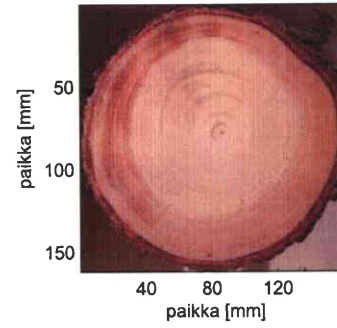
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



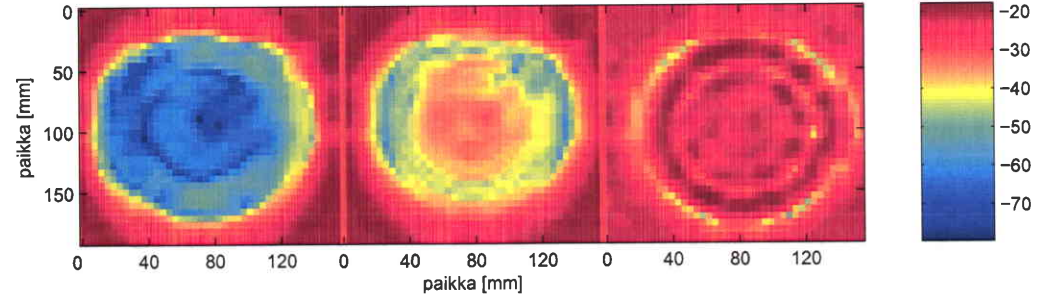
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



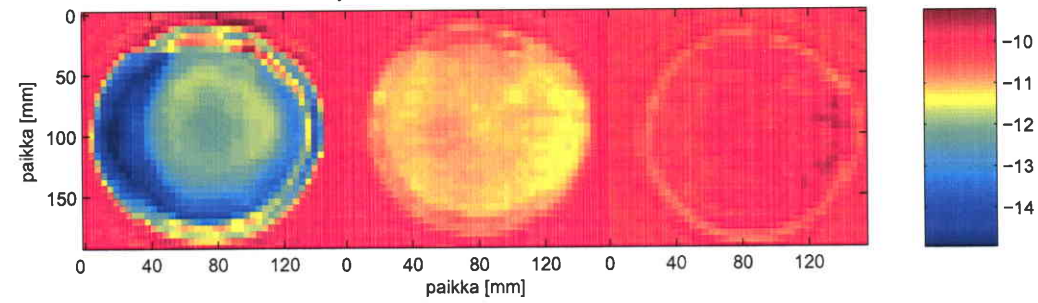
Kiekkö 2 9,3 – 9,7 GHz Absorptio



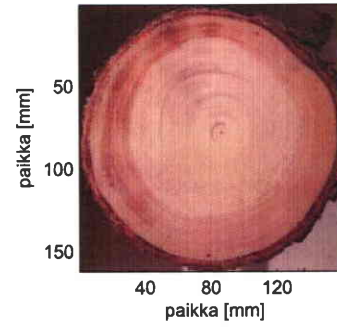
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



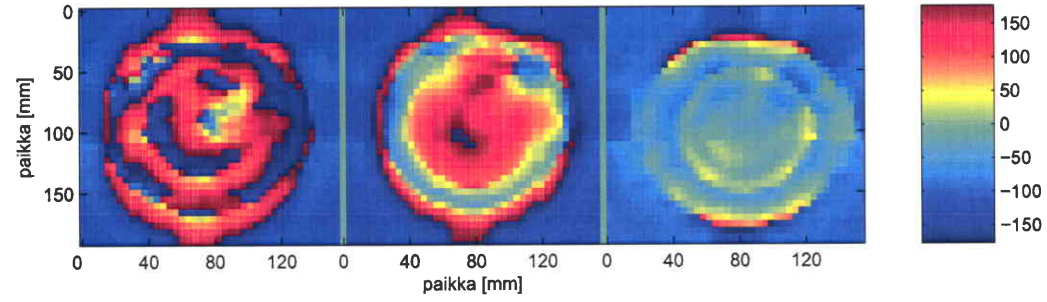
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



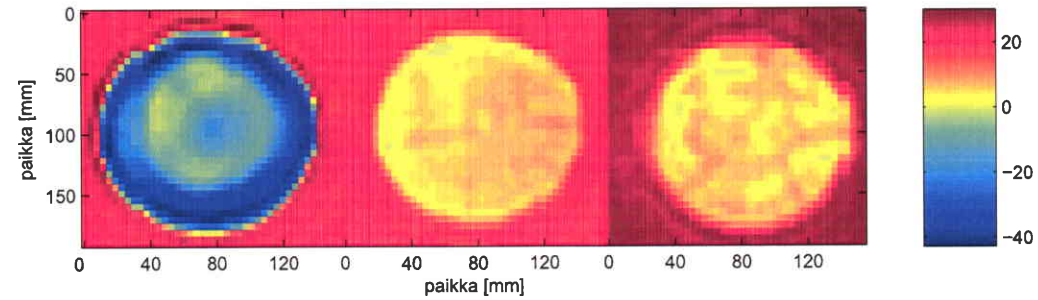
Kiekkok 2 9,5 GHz Vaihe



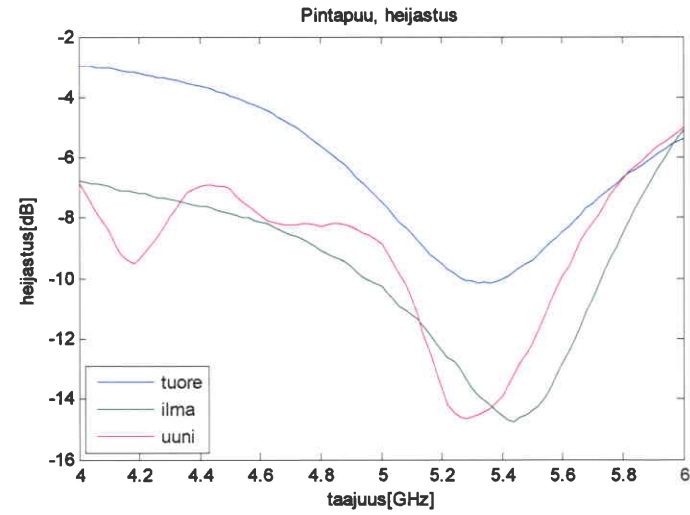
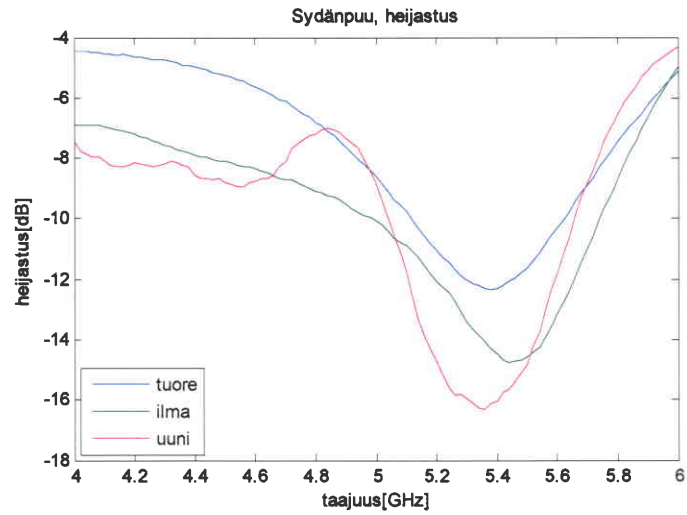
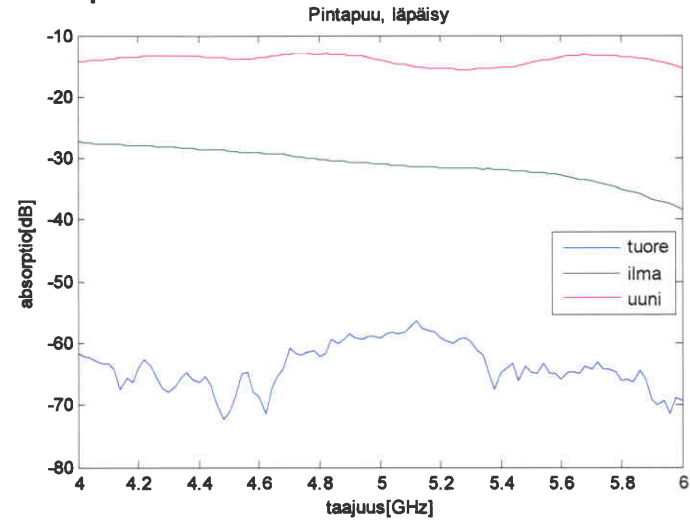
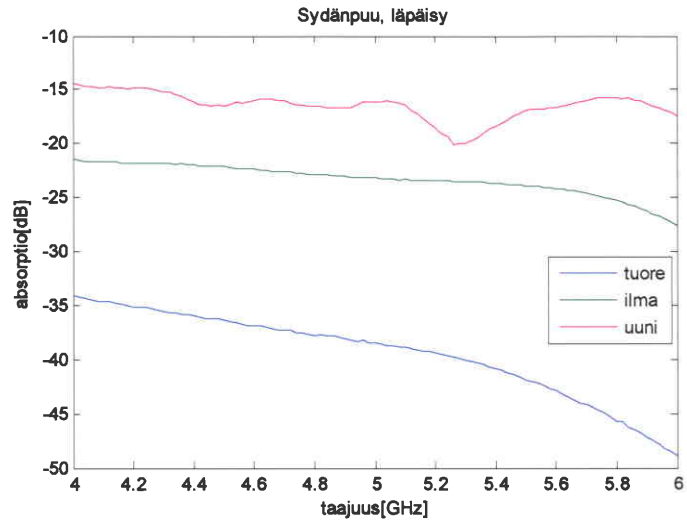
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



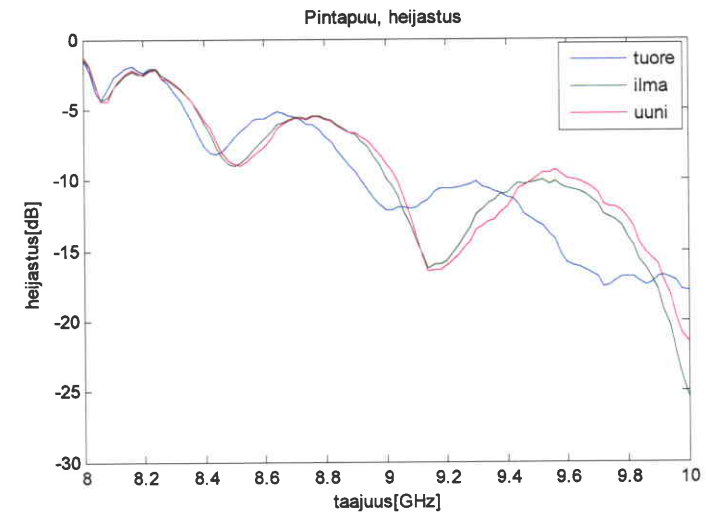
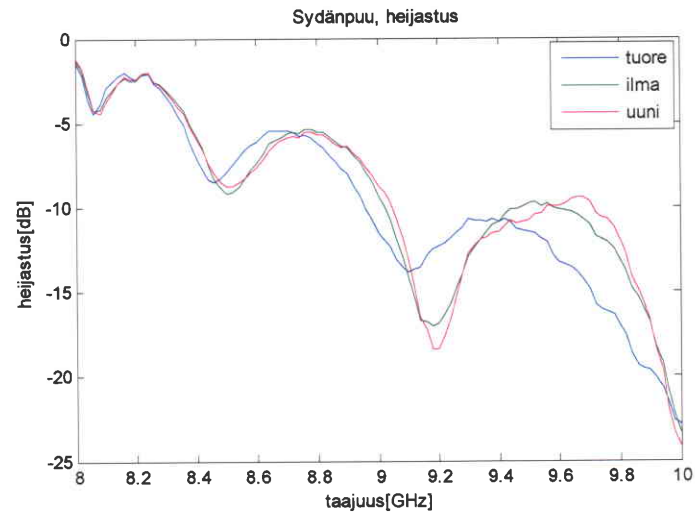
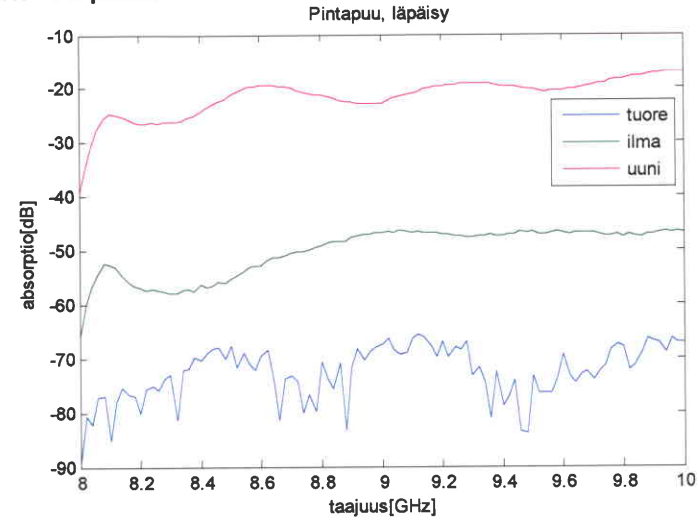
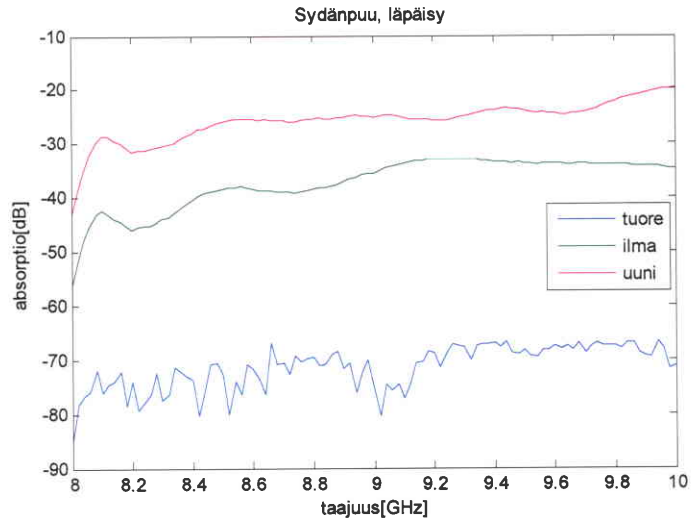
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



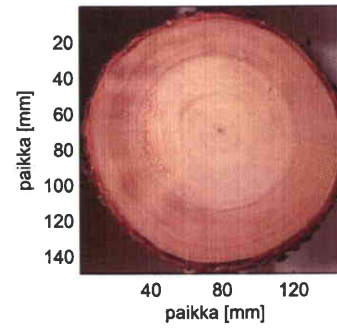
Kiekko 3 4-6 GHz Amplitudi



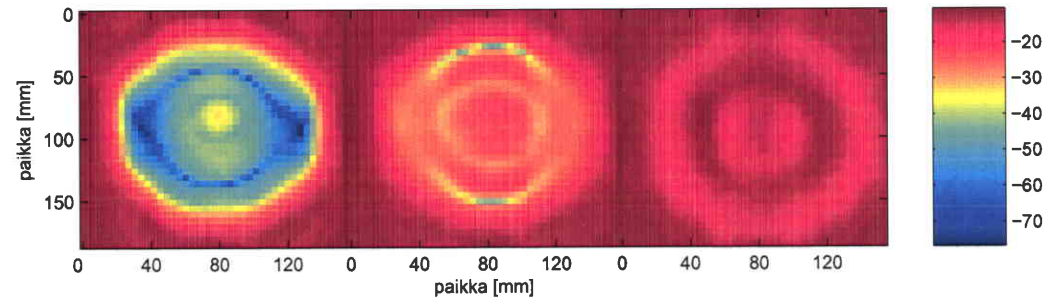
Kiekkö 3 8-10 GHz Amplitudi



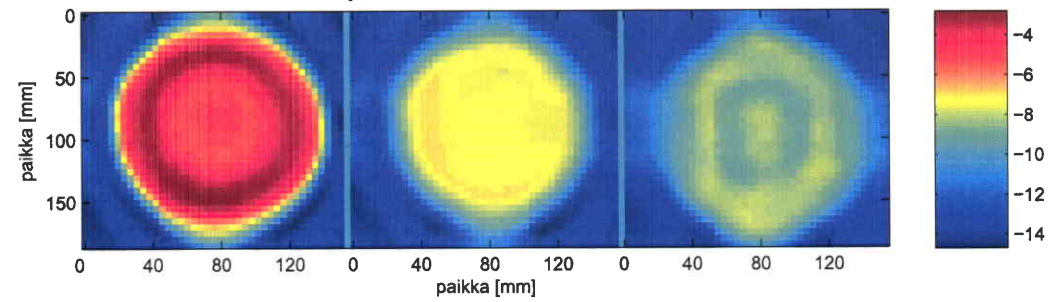
Kiekkö 3 4,1 – 4,3 GHz Absorptio



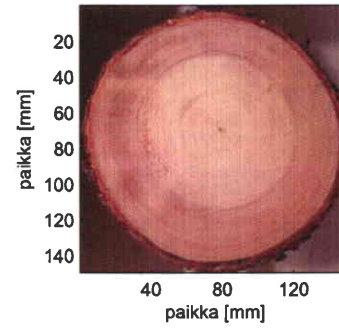
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



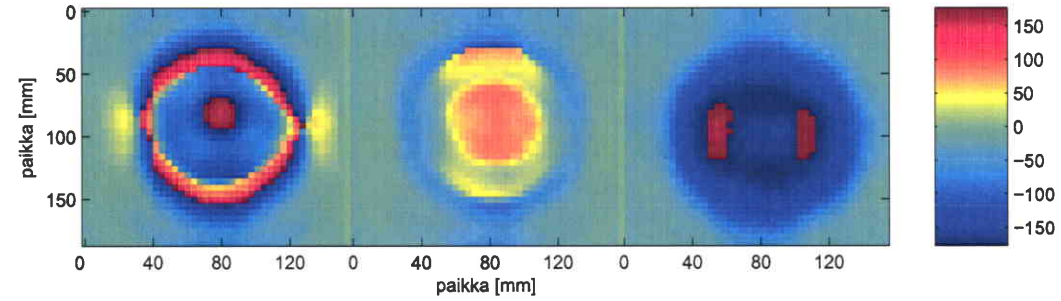
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



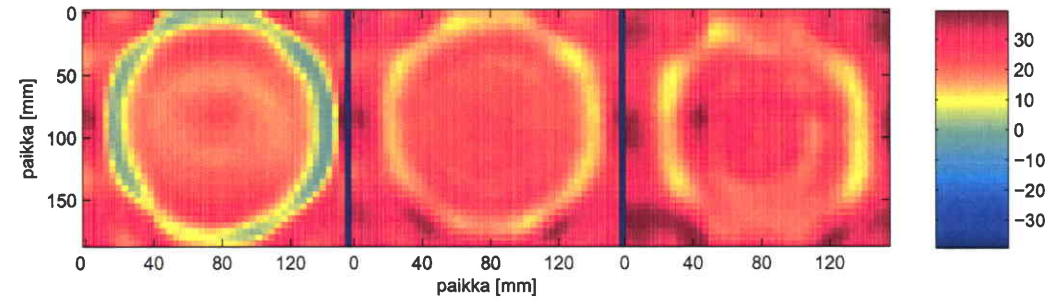
Kiekkö 3 4,22 GHz Vaihe



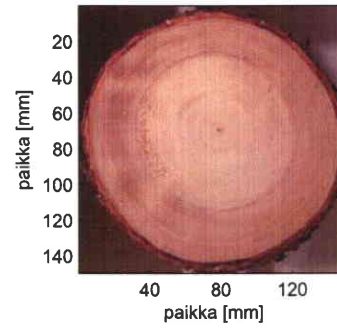
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



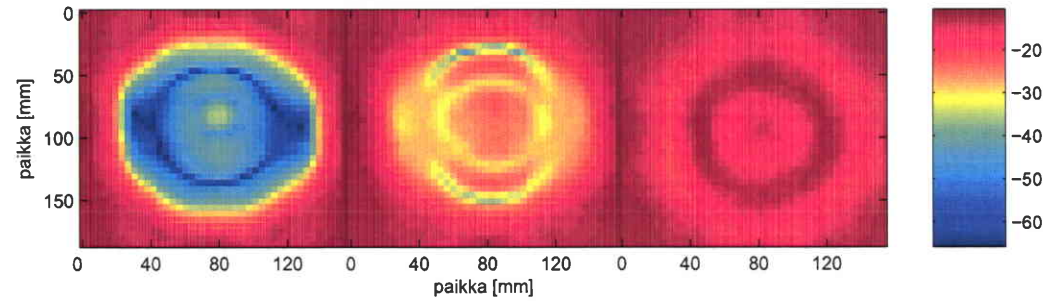
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



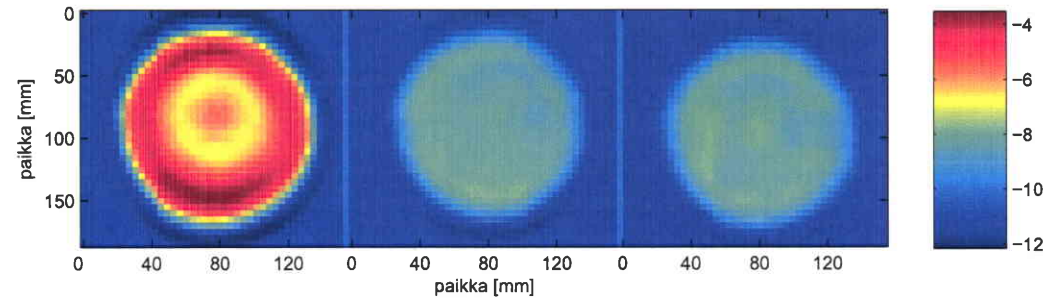
Kiekkö 3 4,0 – 5,0 GHz Absorptio



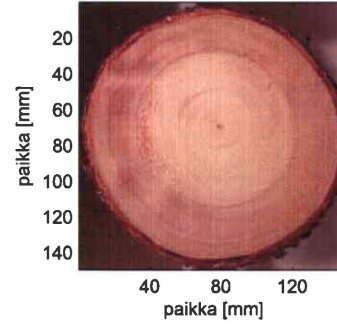
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



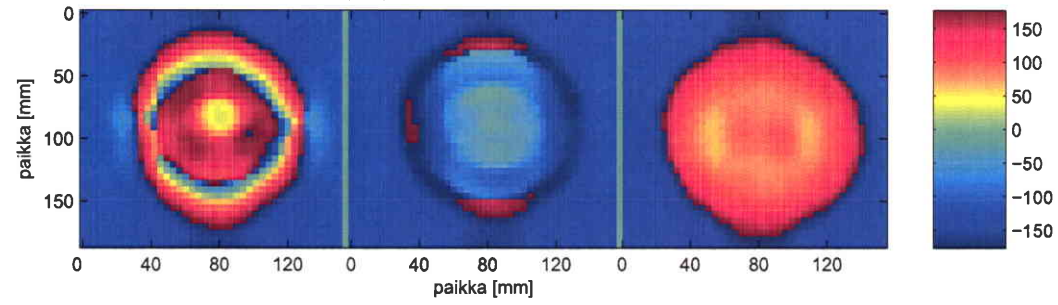
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



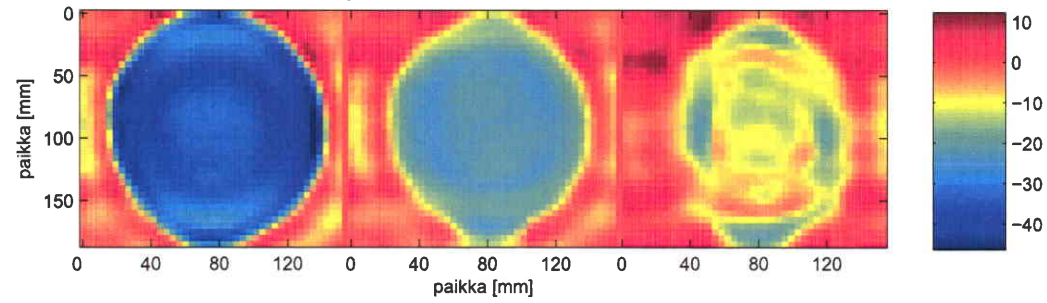
Kiekko 3 4,5 GHz Vaihe



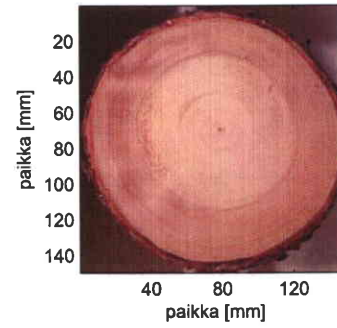
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



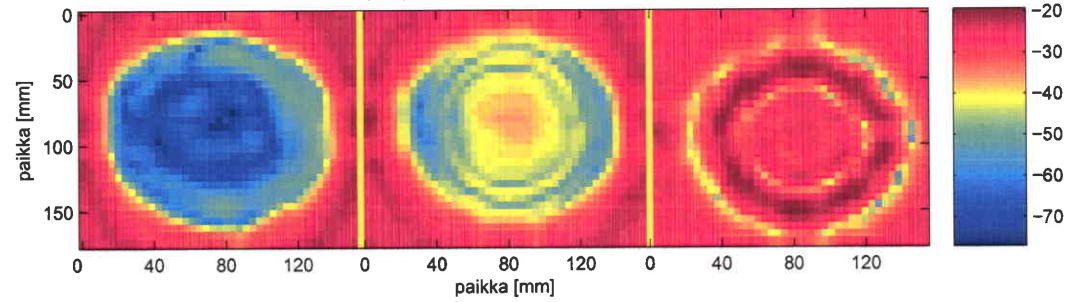
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



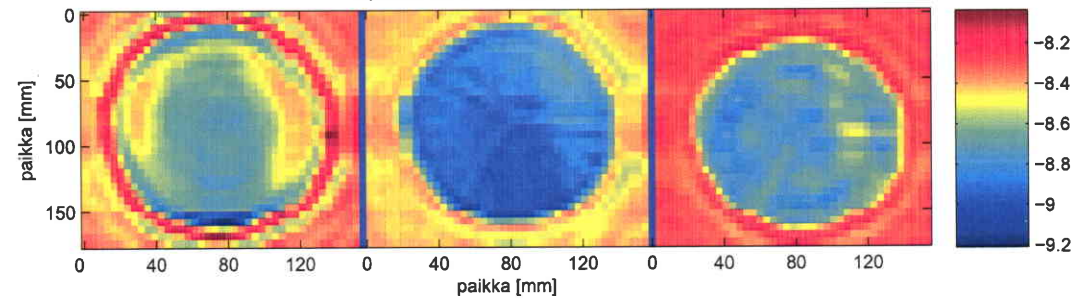
Kiekkö 3 8,5 – 9,2 GHz Absorptio



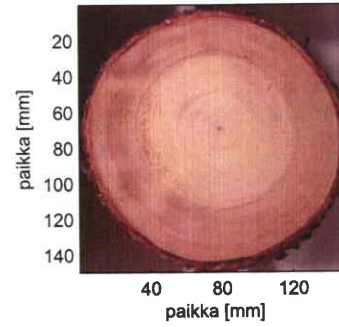
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



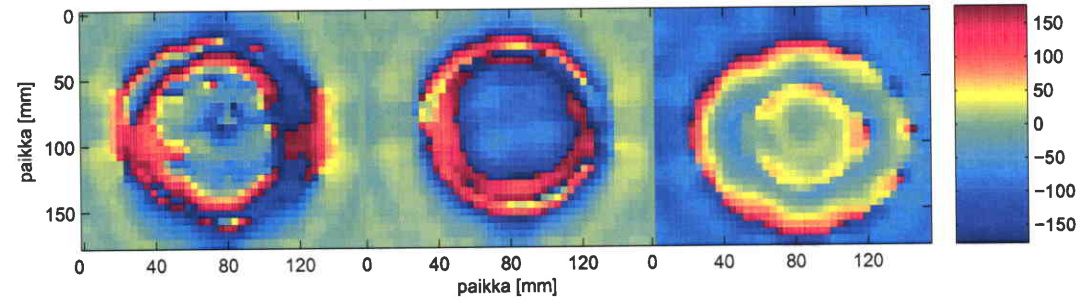
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



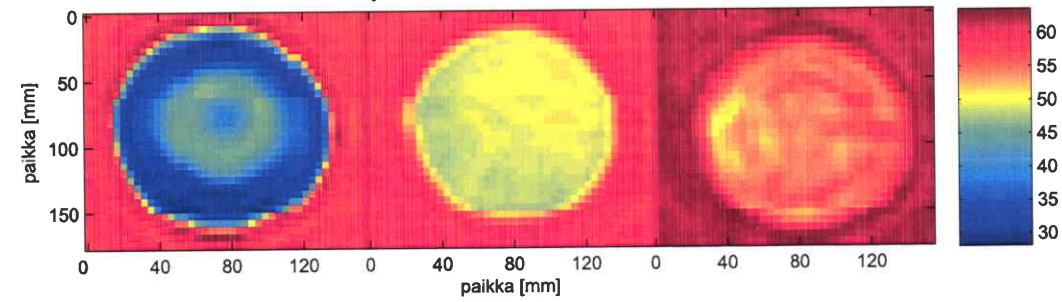
Kiekkok 3 8,8 GHz Vaihe



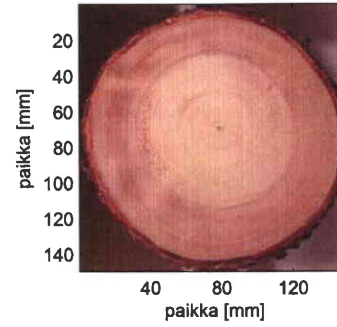
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



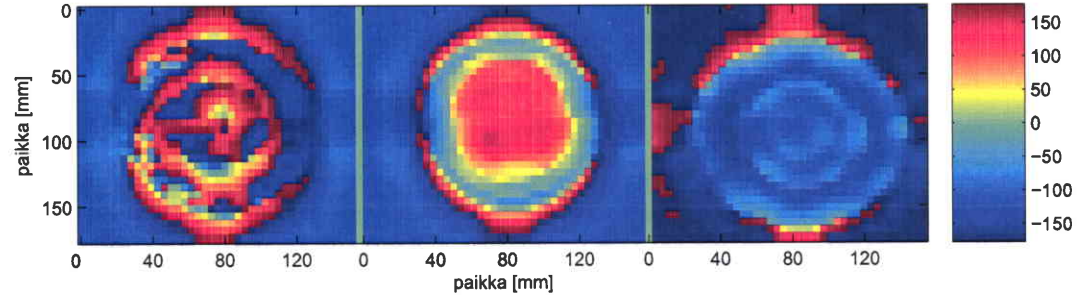
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



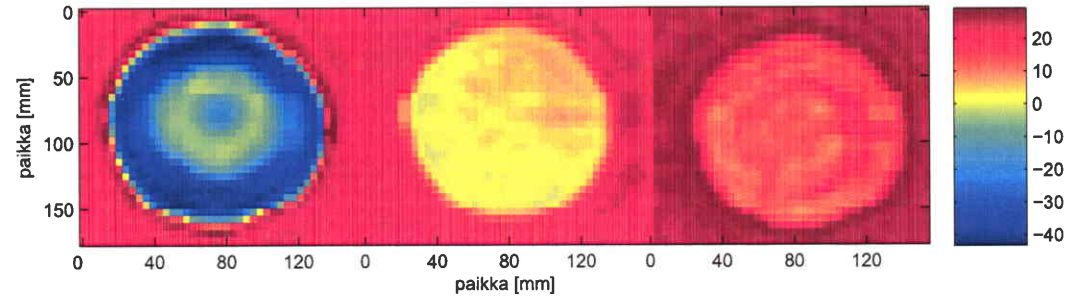
Kiekkö 3 9,5 GHz Vaihe



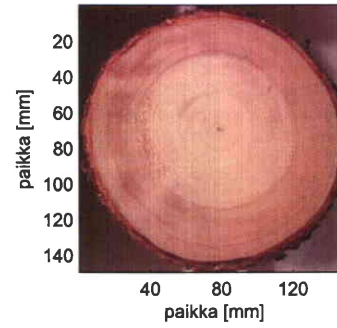
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



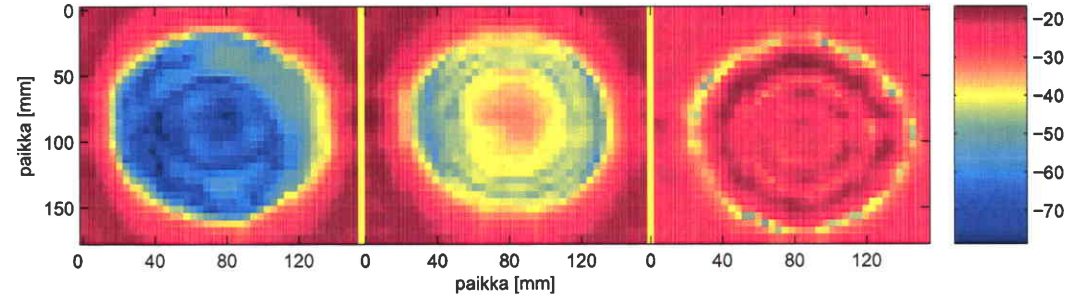
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



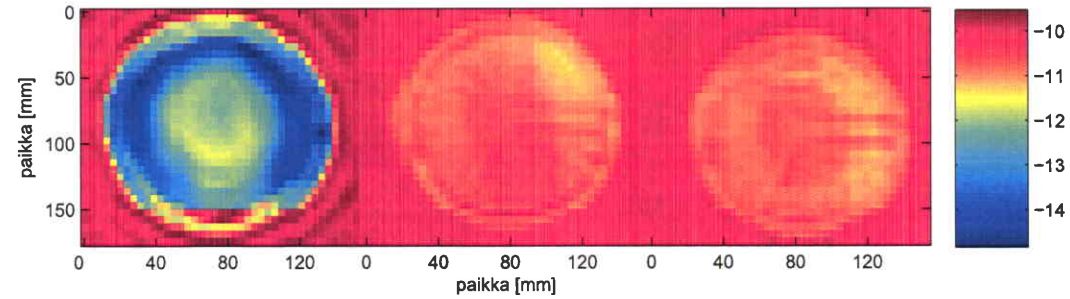
Kiekkö 3 9,3 – 9,7 GHz Absorptio



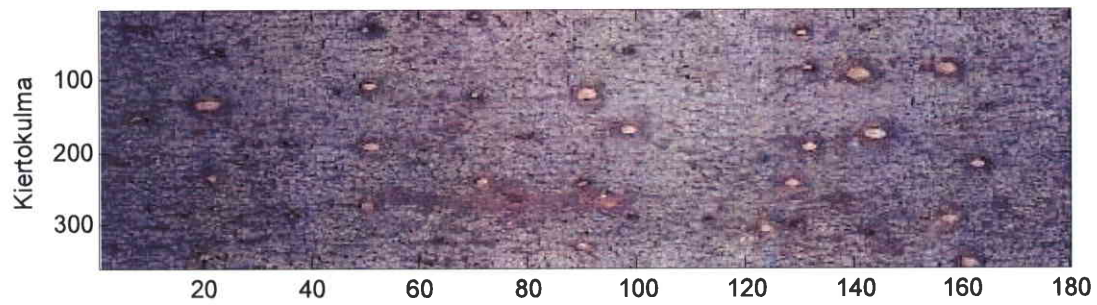
Läpäisy: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



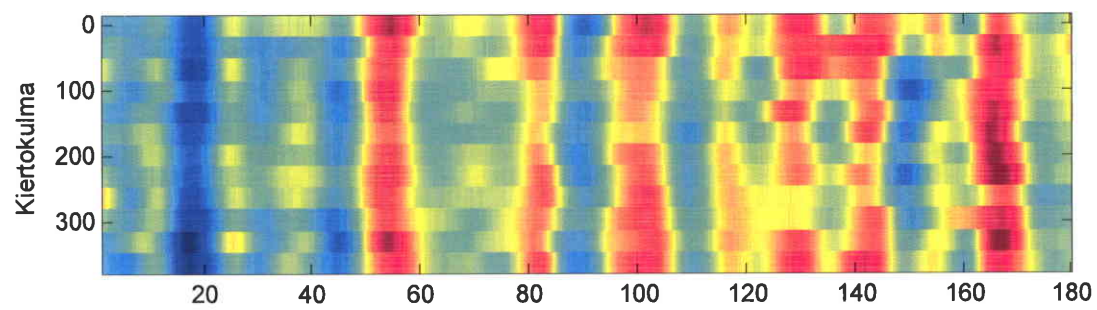
Heijastus: tuore - ilmakeiva - uunikuiva



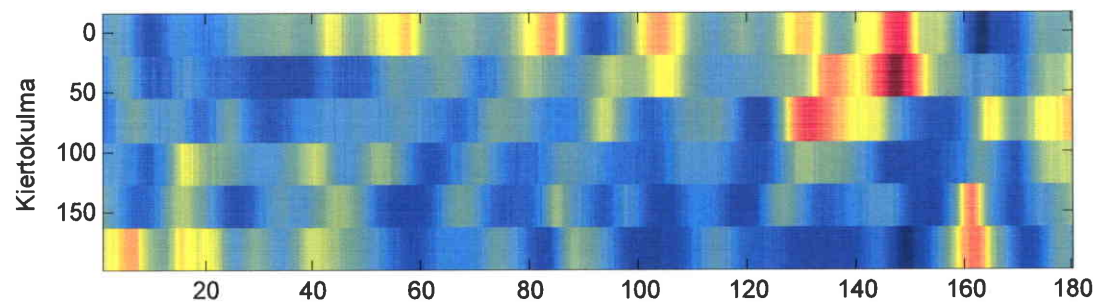
Polarisaation vaihe-ero Kuusen tyviosasta



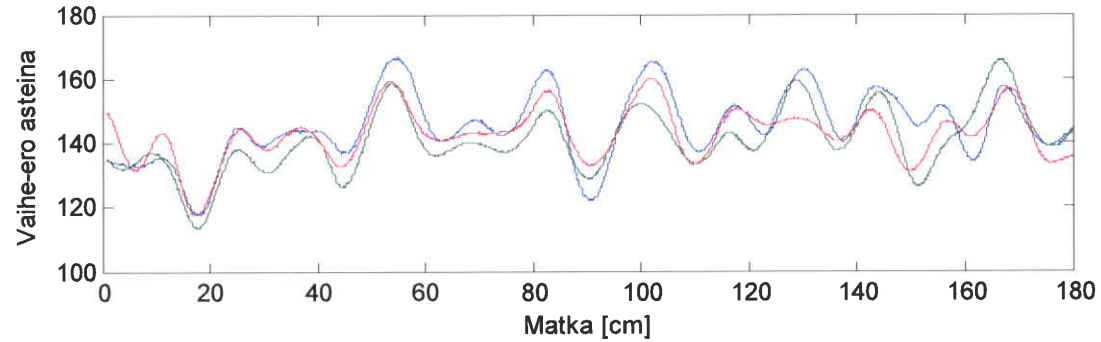
Mittaus



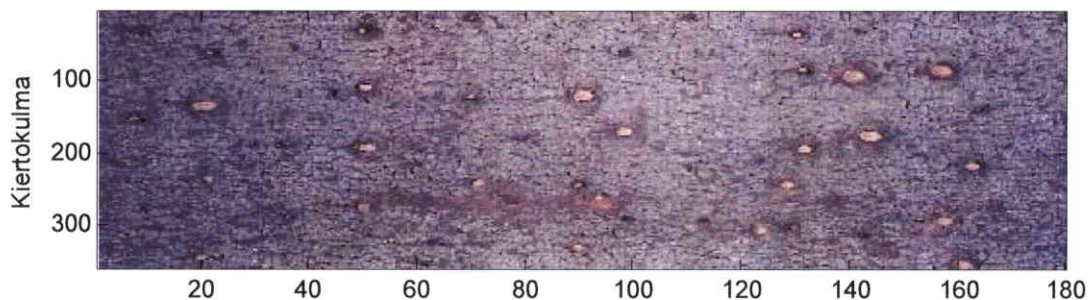
Vastakkaiset puolet vähennetty toisistaan



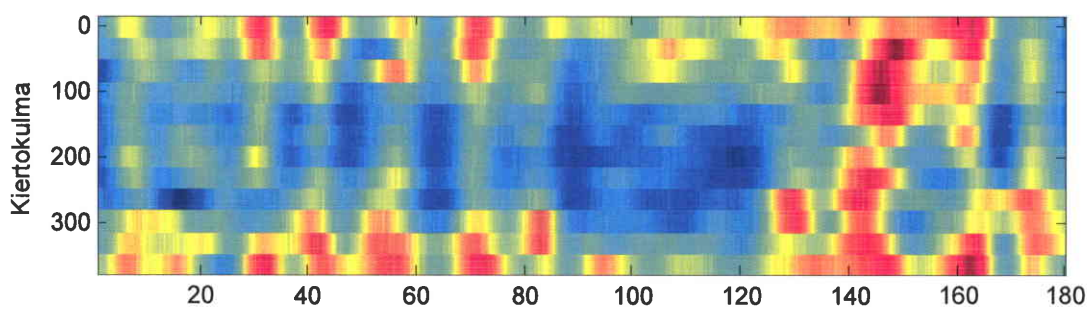
Kolme käyrää kehältä 120 asteen välein



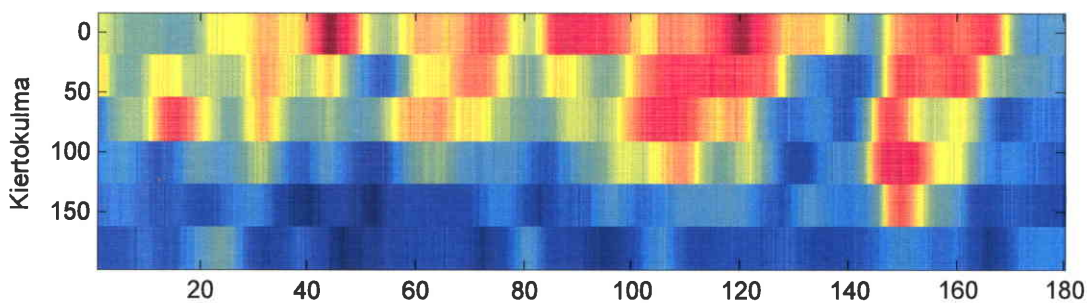
Polarisaation amplitudi ero Kuusen tyviosasta



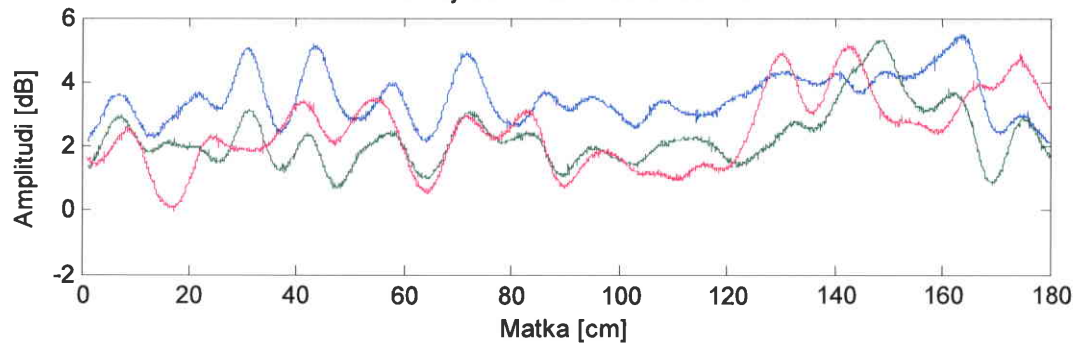
Mittaus



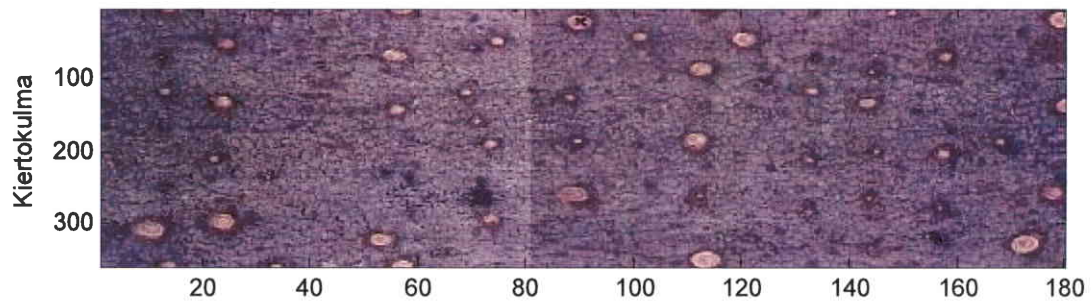
Vastakkaiset puolet vähennetty toisistaan



Kolme käyrää kehältä 120 asteen välein



Polarisaation vaihe-ero Kuusen latvaosasta

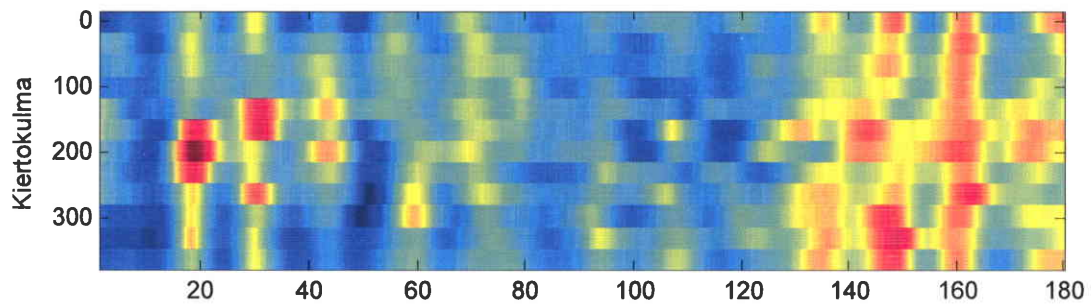


Kiertokulma

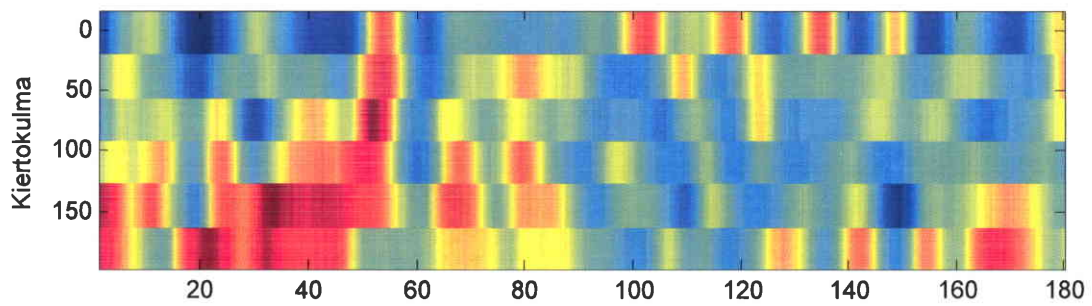
100
200
300

20 40 60 80 100 120 140 160 180

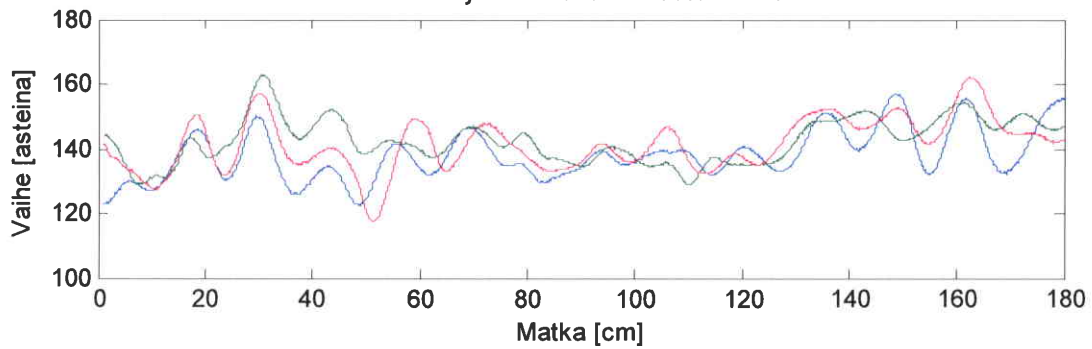
mittaus



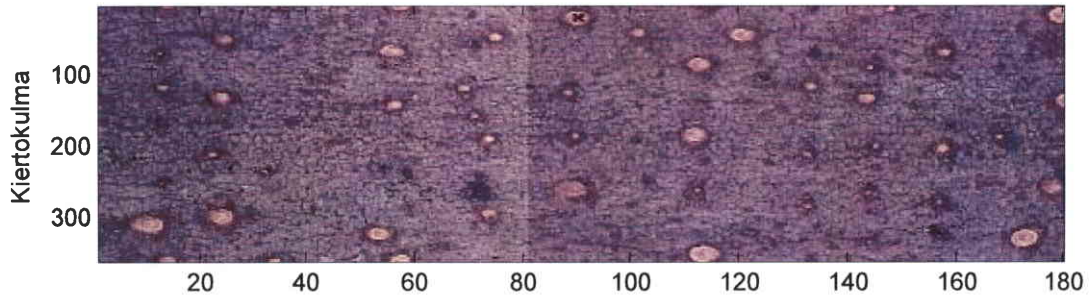
Vastakkaiset puolet vähennetty toisistaan



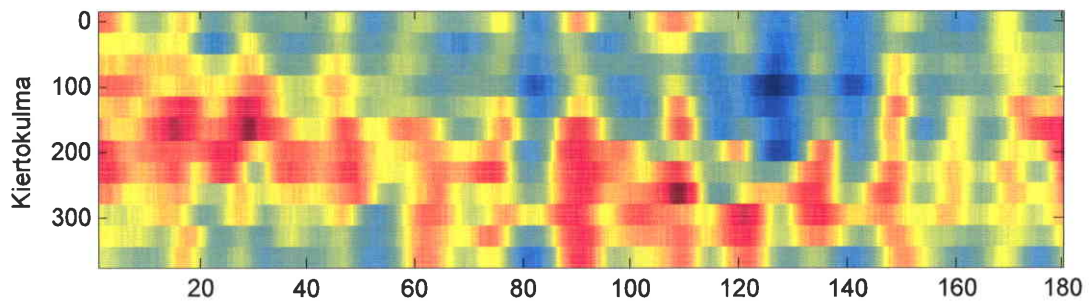
Kolme käyrää kehältä 120 asteen välein



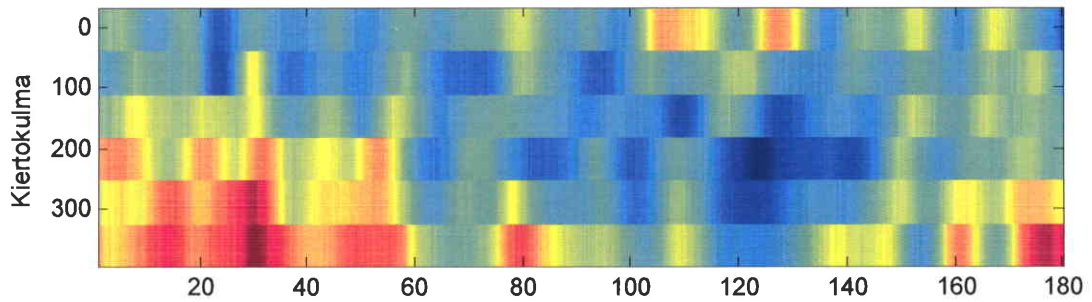
Polarisaation amplitudi ero Kuusen latvaosasta



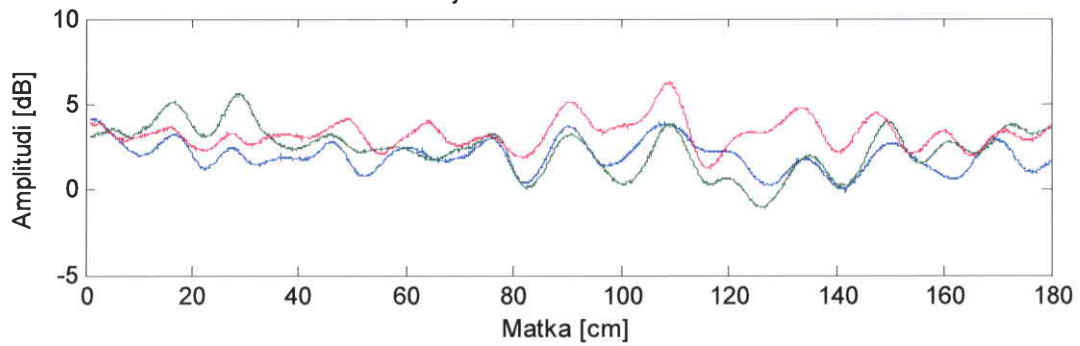
Mittaus



Vastakkaiset puolet vähennetty toisistaan



Kolme käyrää kehältä 120 asteen välein



TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Tietotekniikan osasto

Tietoliikenneohjelmistojen ja multimedian laboratorio

Tuukka Heikura

**Puiden lahovaurioiden analysointi
kolmiulotteisen rakennemallin ja
kuvamittauksen avulla**

Diplomityö

Espoo, 8. marraskuuta 2007

Valvoja: Professori Tapio Takala

Ohjaaja: Jari Perttunen, M.Sc. Computer Science

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Tietotekniikan osasto

DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä

Tuukka Heikura

Päiväys

8. marraskuuta 2007

Sivumäärä

69

Työn nimi

Puiden lahovaurioiden analysointi kolmiulotteisen rakennemallin ja kuvamittauksen avulla

Professuuri

Vuorovaikutteinen digitaalinen media

Koodi

2140

Työn valvoja

Professori Tapio Takala

Työn ohjaaja

Jari Perttunen, M.Sc. Computer Science

Diplomityön tavoitteena on suunnitella puiden lahotutkimukseen sopiva käyttöliittymä ja ohjelmisto, tutkijan työpenkki, jolla toteutetaan tutkimusaineiston hallinta ja aineiston perusteella muodostettavien kolmiulotteisten rakennemallien visualisointi. Lähtökohtaisena tutkimusaineistona käytetään valokuvia kaadetun puunrungon poikkileikkauksista, ja rakennemallin tietorakenteen pohjana hyödynnetään LIGNUM-kasvumallia. Keskeistä työssä on rakennemallin muodostuksessa käytettävän laatoitusalgoritmin toiminta tässä käyttötarkoituksessa. Ohjelmiston käyttäjä käsittelee kunkin kuvan yksitellen ja määrittelee terveen puun, lahon ja onton ääriviivat visualisointia varten. Valmista ohjelmistoa ja sen avulla luotuja kolmiulotteisia rakennemalleja tullaan myöhemmin käyttämään puisto- ja metsäpuiden lahotutkimuksessa.

Avainsanat: Lignum, laatoitusalgoritmi, lahovauriot, kuvamittaus

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ABSTRACT OF MASTER'S THESIS
Department of Computer Science and Engineering

Author Tuukka Heikura	Date November 8, 2007
	Pages 69

Title of thesis
Analysis of Tree Decay Using Photogrammetry and a Three Dimensional Structural Model

Professorship Interactive Digital Media	Professorship Code 2140
--	----------------------------

Supervisor
Professor Tapio Takala

Instructor
Jari Perttunen, M.Sc. Computer Science

The goal of this thesis is to design a user interface and an application suitable for use in research of tree decay. The application implements management of the research material and visualizes the three dimensional structural model built based on this material. A set of photographs taken from the cross sections of each felled tree works as the research material and as the starting for the structural model. The LIGNUM-model forms the basis for the data structure used within the application. The focus lies on the function of the tiling algorithm used in this context. The user will define the outlines of the cavity, healthy wood and decayed areas manually for each cross section for the visualization. The finished application and the three dimensional structural models will be used in the study of decay in park and forest trees.

Keywords: Lignum, tiling algorithm, tree decay, photogrammetry

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Tavoitteet	5
3	Materiaali ja työvälineet	7
3.1	Näyttemateriaali	7
3.2	LIGNUM-malli	9
4	Menetelmät	11
4.1	Käyttäjäkuvaus	11
4.2	Menetelmiä materiaalin keräämiseksi	12
4.3	Kolmiulotteisen mallin muodostaminen	14
4.4	Tehdyt valinnat	23
4.5	XML	24
5	Toteutus	26
5.1	Kehitysympäristö	26
5.2	Tietorakenteet	27
5.3	Monikulmion pinta-ala	29
5.4	Monikulmion massakeskipiste	30
5.5	XML-tiedosto	31

5.6	Kolmiulotteinen malli	34
5.6.1	Algoritmi	34
5.7	Käyttöliittymä	40
5.7.1	Toiminta	41
5.7.2	Uuden puun luominen	48
5.7.3	Puusegmentin syöttäminen	48
5.7.4	Reunaviivojen lisääminen	49
5.7.5	Haarautuminen	49
5.7.6	Vauriot	50
5.7.7	Runkosegmentin siirtymä	50
5.7.8	Puun valokuva	51
5.7.9	Tietojen avaaminen ja tallennus	51
5.7.10	Mallin visualisointi ja analyysi	52
6	Testi	53
6.1	Algoritmin testaus	54
6.2	Käyttäjätesti	58
7	Johtopäätökset	60
7.1	Laatoitusalgoritmi	61
7.2	Käyttöliittymä	62
7.3	Siirrettävyys	62
7.4	XML	62
7.5	Tavoitteissa onnistuminen	63
7.6	Kehitysnäkymät	64
	Kirjallisuutta	66
A	XML-tiedostomuoto	68

Luku 1

Johdanto

Puilla on kaupunkiympäristössä tärkeä tehtävä. Ne sitovat ilman epäpuhtauksia ja tuovat vehreyttä kaupungin keskustaan. Puiden avulla pyritään luomaan viihtyisät olosuhteet rakennetulle alueelle, mutta suurin merkitys vihreällä elinympäristöllä on kuitenkin ihmismieltä piristävänä ja hyvinvointia lisäävänä tekijänä.

Kaupunkiympäristössä puut joutuvat kovalle koetukselle. Rakennetuilla alueilla liian pieneen tilaan ahdetut puut kärsivät vaurioita, jotka johtuvat katujen päällysteistä, liikenteestä, maan tiivistymisestä ja ihmisten aiheuttamista kolhuista. Juuret katkeilevat maatöiden seurauksena ja ilmansaasteet sekä tiesuola heikentävät kasvuolosuhteita. Kuoren vaurioituessa puut ovat alttiita lahottajasiementen hyökkäyksille, ja vuosien saatossa laho etenee. Laho heikentää puun rakennetta ja voi tehdä puusta ympäristölleen vaarallisen kaatuessaan tai oksan katketessa. Lahoprosessi jatkuu useita vuosia, ja lahoavakin puu voi ilahduttaa ihmisten mieliä vielä pitkään. Suuri osa kaupunkien puistopuista on jossain määrin lahovikaisia, joten kaikkia lahon vaurioittamia puita ei kannata lähteä poistamaan, ennen kuin ne ovat vaarassa romahtaa luonnostaan ja aiheuttaa vahinkoa.

Kaupunkipuiden kaadon ajankohdan oikea määrittäminen muodostaa tutkimusongelman, jota käsitellään Metsäntutkimuslaitoksessa (Metla) “*Puiden terveydentila rakennetussa kaupunkiluonnossa*” -hankkeessa. Tutkimuksessa on kartoitettu Helsingin seudun puisto- ja katupuita sekä kerätty tutkimusmateriaalia vuosina 2001-2003 kaadetuista lehmuksista, koivuista ja vaahterista (Terho ja Hallaksela, 2005). Tutkimusmateriaalia hyödynnetään tässä työssä. Ulkomailla kaupunkipuiden terveydentilaa on tutkittu ja aiheesta löytyy paljon kirjallisuutta, mutta kotimaista aineistoa tarvitaan vielä, koska ilmasto ja kasvisto ovat Pohjois-Euroopassa erilaisia kuin Keski- ja Etelä-Euroopassa.

Metsätaloudellisesti tarkasteltuna lahosienet aiheuttavat puissa raaka-ainehävikkiä, koska laho puuainees joudutaan joko hylkäämään tai lajittelemaan käyttötarkoitukseen, johon kelpaa myös heikkolaatuisempi ja halvempi materiaali. Yleisin lahotyyppi metsien havupuilla on juurikäpäsien (*Heterobasidion annosum*) aiheuttama, joka etenee puun tyvestä kohti latvaa. Metsäkoneen kuljettaja tekee sahauskohdasta kokemuksen perusteella arvion lahon etenemisestä ja päättää, mistä puu katkaistaan. Mikäli laho on edennyt arvioutua pidemmälle, sahataan lisää runkoa pois. Jos lahon eteneminen yliarvioidaan, sahauskessa menetetään arvokasta puuraaka-ainetta. Kiivaassa työtahdissa aikaa kuluu useaan turhaan sahauskseen, vaikka optimaalisinta olisi yksi sahaus nykyistä tarkemman lahomallin perusteella tehtynä. Tarkka lahomalli parantaa työn tuottavuutta ja lisää puuraaka-aineen saantia.

“*Puun laadun mittaus ja lajittelu*” eli *PUULA* on projekti, jossa on osallisena useita suomalaisia organisaatioita: Metsäntutkimuslaitos, Metsäteho, Tampereen teknillinen yliopisto ja Teknillinen korkeakoulu. Projektissa keskitytään metsätaloudellisiin ja puuteollisuuden kilpailukyvyn parantamiseen. Siinä puuraaka-aineen laatuominaisuuksien mittaamiseen sovelletaan kuvantulkintaa, kuvankäsittelyä ja stereokuvausta. Mitattavia laatuominaisuuksia ovat puulaji, rungon muoto, kasvunopeus ja

rakenteelliset ominaisuudet sekä laho, sinistymä ja muut biologiset vauriot.

Tämän työn tavoitteena on luoda tutkijan työpenkki, ohjelmisto, jolla toteutetaan tutkimusaineiston hallinta ja muuttaminen kolmiulotteiseksi malliksi sekä mallin analysointi. Tutkimusaineistona on sarja valokuvia kaadetun puun rungon poikkileikkauksista. Analysointi sisältää lahopatsaan ja puun muiden vaurioiden tarkastelun, joka tehdään tässä työssä kehitetyllä ohjelmistolla muodostetun kolmiulotteisen mallin avulla. Yhtenä työn tavoitteena on kolmioverkon muodostaminen leikkausten välille.

Toteutetulla ohjelmistolla pyritään kaupunkipuiden suhteen lisäämään tietoa, jolla vanhat puistopuut saataisiin turvallisesti pidettyä ihmisten mieliä piristämässä mahdollisimman pitkään, mutta kuitenkin niin, ettei puista ehdi muodostua liian suurta riskiä ympäristölleen. Metsätalouden prosessien osalta tavoitteena on parantaa tehokkuutta tarkentamalla lahojen etenemismallia.

Käytettävä näyttemateriaali on sahattu rungosta tietyin välein tai tyveltä ja haaraantumiskohdista. Leikkauksen asento ja kuvan mittakaava on merkitty poikkileikkauksiin, ja niistä on otettu digitaalikameralla valokuvia työssä toteutetulla ohjelmistolla tehtäviä tutkimuksia varten.

Diplomityössä kolmiulotteisen mallin rakenteen kuvaamisessa sovelletaan *LIGNUM*-mallia (Perttunen *et al.*, 1998), joka kuvaa puun rakenteen ja toiminnan yksinkertaisten rakenteellisten yksiköiden avulla. Tässä keskitytään puun ulkopinnan ja sisäisen lahon rakenteen ja sen konkaavien muotojen kuvaamiseen todenmukaisen visuaalisen ulkoasun tai kasvumallin jäädessä vähemmälle huomiolle.

Luku 2 käsittelee työn lähtökohtia, joita ovat käytettävissä oleva tutkimusaineisto ja *LIGNUM*-malli. Luku 3 esittelee työn tavoitteita ja tuloksena olevalta ohjelmistol-

ta vaadittuja ominaisuuksia. Luku 4 jatkuu ohjelmiston käyttöliittymän suunnittelulla ja esittelee kolmiulotteisen mallin muodostamisessa sovellettavia menetelmiä. Luku 5 keskittyy toteutukseen ja esittelee valmiin ohjelmiston. Luku 6 käy läpi kaksi esimerkkitapausta ohjelmiston käyttämisestä, ja kuvaa miten ohjelmisto auttaa tutkijaa. Viimeisessä eli 7. luvussa tarkastellaan työn tuloksia ja esitetään jatkokehitysmahdollisuuksia. Liitteessä on kuvattu ohjelmistossa sovelletun *XML*-standardin mukaisen tiedoston tallennusmuoto.

Luku 2

Tavoitteet

Tavoitteena on luoda tutkijan työpenkki, jolla voidaan toteuttaa aineiston hallinta, analysointi ja kolmiulotteinen tarkastelu. Työpenkki on yksittäinen ohjelma, joka sisältää sekä mallin luomisen että sen kolmiulotteisen tarkastelun.

Koska luodussa mallissa tutkijaa kiinnostaa kohta, missä poikkileikkauspinnasta arvioiden tervettä puuta on vähiten jäljellä säteestä mitattuna, käyttöliittymässä tulisi olla esillä ainakin lahon alueen pinta-alan osuus näytetasoissa. Myös ulkoiset vauriot, kuten sienet, ovat osa tutkittavaa aineistoa.

Mattheck *et al.* (1992) ovat arvioineet puun kaatumisriskiä ja päätyneet tutkijoiden nykyisin suosimaan yksinkertaiseen matemaattiseen sääntöön, joka perustuu ontton sylinterin taipumiseen. Ravintoainesten kulku ei ontton tai lahon takia ole ongelma, koska puu tarvitsee vain pienen osan puuainesta ja kuorta kuljettaakseen vettä, mineeraleja ja sokereita. Puu kykenee kannattelemaan, painonsa mikäli terveen puun säteen osuus koko rungon säteestä on vähintään 0,30. Käyttäjä arvioi kaatumisriskiä itse rungon ulkoreunan perusteella piirretyn käyrän avulla.

PUULA-projektin kannalta kiinnostavinta on pystyä tarkentamaan puun rungon poikkileikkauksesta tehtyä arviota tyvilahon etenemisestä. Lahopatsaan korkeuteen vaikuttavat monet tekijät lahottajan tyyppistä puulajiin, mutta nykyisen tutkimuksen mukaan juurikääpäsienen aiheuttaman lahopatsaan korkeus kuudessa (*Picea abies*) on 19-25 kertainen suhteessa lahon alueen halkaisijaan tyvessä (Woodward *et al.*, 1998).

Lahon korkeuden laskennallisen mallin parantamiseen pyrittäessä kolmiulotteiselta mallilta vaaditaan tasainen kolmioverkkoesitys, kun lahopatsaan korkeuden ylärajaa arvioidaan saadusta esityksestä.

Ohjelmalla on kyettävä mallintamaan kuvamateriaalin määrittämien puiden rakenne riittäväällä tarkkuudella silloinkin, kun lahoja ja onttoja alueita on useita. Riittäväksi tarkkuudeksi voidaan sanoa, että useimmat puut on mahdollista rekonstruoida ja visualisoida. Pääpaino on mallin vuorovaikutteisessa rakennekuvauksessa.

Malli on tallennettavissa tiedostoon, ja siihen voidaan sisällyttää muutakin tutkijan keräämää tietoa kuten päivämäärä, sijainti, laji ja sarjanumerot, jotka eivät suoraan vaikuta kolmiulotteisen mallin luomiseen, mutta helpottavat puun tunnistamista. Mallin muokkaamista voidaan jatkaa tallennetusta tiedostosta. Puut eivät aina kasva viivasuoraan ylös, joten runkosegmenttien siirtymän hahmottelemisesta esimerkiksi valokuvasta on hyötyä. Luodun mallin ja laskettujen tietojen tulostus lukeutuvat myös tarvittaviin ominaisuuksiin.

Luku 3

Materiaali ja työvälineet

Lähtökohtana tässä työssä on aiemmin koottu tutkimusaineisto, johon kuuluu joukko rungon poikkileikkauksia otettuja valokuvia ja näihin merkityt kohdistustiedot. Seuraavassa esitellään sekä annettu materiaali että LIGNUM-malli, jonka rakenteellista kuvausta on hyödynnetty tässä työssä.

3.1 Näytemateriaali

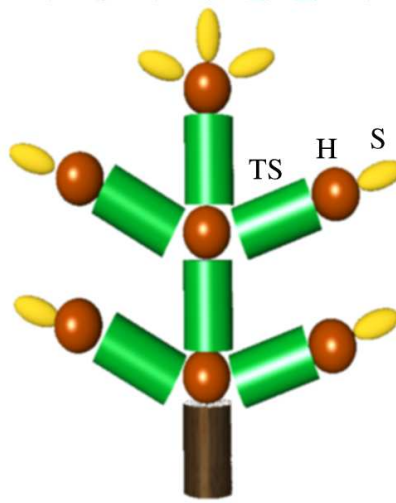
Kaadon yhteydessä puista on kerätty vauriotietoja ja rungon poikkileikkauksista otettu valokuvia. “*Puiden terveydentila rakennetussa kaupunkiluonnossa*” -hankkeessa tarkasteltavat puut ovat pääosin puistoissa ja katujen varsilla kasvavia lehtipuita, joiden lahoalueet voivat olla hyvin epäsäännöllisiä. Poikkileikkauksia on keskimäärin kymmenen puuta kohden JPEG-muodossa, ja niiden koko on luokkaa 1000 x 1000 pistettä. Valokuvattavat leikkaukset valitaan rungon ulkoisten merkkien perusteella tyveltä, haarautumiskohdasta ja vaurioiden lähetyviltä. *PUULA*-projektin puut ovat kuusia (*Picea abies*), joissa esiintyy tyypillisesti tyvilahoa. Materiaali on ke-



Kuva 3.1: Esimerkki kaupunkipuiden näyttemateriaalista - peräkkäiset näytteet koirusta korkeuksilta 200 ja 390 cm. (kuvat: Minna Terho, Puiden terveydentila rakennetussa kaupunkiluonnossa)

rätty tasaisesti metrin tai puolen metrin välein lahonneen puun osalta. Tavallisesti materiaalia on korkeintaan kymmeneen metriin asti.

Terveen puun ja lahon alue sekä onkalo ovat erotettavissa kuvasta ja niitä voi olla useampia samassa tasossa. Esimerkiksi kuvassa 3.1 kaksi eri korkeudelta otettua valokuvaa, jotka kuvaavat peräkkäisiä tasoleikkauksia näyttemateriaalissa. 390 cm:n korkeudella on rungon haarautumiskohta, jossa näkyy erillisiä onkaloita ja lahoja alueita. Kuvaan on merkitty punaisella tussilla suunta, ja mittatikun pituus on tässä tapauksessa 5 cm. Ohjelmistossa mittatikun pituus on säädettävissä. Suunta on merkitty suoralla viivalla puun runkoon. Tämä merkki ja kasvukeskipiste määrittävät poikkileikkauksen kiertokulman suhteessa muihin leikkauksiin olettaen, että kasvukeskipisteet ovat puussa likimain päällekkäin. Lahojen alueiden rajaamisessa voi olla tulkinnanvaraisuutta sahan jättämien jälkien, valaistuksen ja mahdollisten materiaalissa esiintyvien värivirheiden johdosta, mutta lahotutkija kykenee luokittelemaan lahon oikein. Automaattinen lahotunnistus samasta valokuvasta on sen sijaan vaikeaa ja virhealtista.



Kuva 3.2: *LIGNUM*-malli. TS = segmentti, H = haarautumispiste, S = silmu

Yhtenä ratkaistavana ongelmana tässä työssä on luoda edellä esitetystä kaksiulotteisesta aineistosta kolmiulotteinen kolmioverkko. Näyttemateriaalista voidaan tehdä mallinnusta ja kolmioverkon muodostamista helpottavia oletuksia. Ääriviivat eivät risteä itsensä kanssa, ja poikkileikkaukset ovat aina kaksiulotteisissa tasoissa kohtisuoraan kyseisen rungon tai haaran yleistä kasvusuuntaa vasten. Päärungon tai puunhaaran alueella kaikki leikkaukset ovat siis yhdensuuntaisia, mutta eivät koko puussa. Puun kolmiulotteinen malli voidaan rakentaa käsittelemällä kaksi tasoa kerrallaan, mutta haarautumiskohdat on tutkittava erikseen. Rungon vesat eivät luonnollisesti yhdisty, mutta laho alue ja onkalo voivat haarautua ja haarat yhdistyä puun sisällä. Ne voivat myös jatkua oksiin.

3.2 *LIGNUM*-malli

Perttunen *et al.* (1998) ovat kehittäneet ja visualisoineet *LIGNUM*-mallin, joka kuvaa puun rakenteen ja toiminnan yksinkertaisten rakenteellisten yksiköiden avulla (Kuva 3.2).

Malli käsittää puun usean yksinkertaisen rakenneyksikön joukkona ja kuvaa kasvua näiden yksiköiden välisenä vuorovaikutuksena vuosi kerrallaan. Puun rakenteellisia yksiköitä ovat puusegmentit (TS), haarautumispisteet (H), ja silmut (S). Puusegmentit koostuvat puusta, puunkuoresta ja lehvästöstä. Haarautumispisteet erottavat puusegmentit toisistaan ja silmut luovat uusia haarautumispisteitä, puusegmenttejä ja silmuja. Puun haarautumista ohjataan yksinkertaisilla säännöillä, jotka riippuvat mallinnettavasta puulajista. Mallissa rakenneyksiköt esitetään joukkona listarakenteita, joita käsitellään geneerisillä algoritmeilla. Tässä työssä *LIGNUM*-mallia sovelletaan puun rakenteellisena mallina lisäämällä siihen rungon lahoa aluetta ja onkaloa rajaavat reunaviivat segmenttikohtaisesti.

Luku 4

Menetelmät

Tässä kappaleessa luodaan pohjaa käyttöliittymän suunnittelulle ja kuvataan käytettävissä olevia menetelmiä sekä periaatteita työn toteuttamiseksi.

4.1 Käyttäjäkuvaus

Ohjelmiston pääasiallisia käyttäjiä ovat kaupunkipuiden hoidosta vastaavat ammattilaiset, esimerkiksi arboristit ja lahotutkijat. Tutkijoiden tietotekninen asiantuntemus voi vaihdella, mutta on riittävä teknisten ohjeiden seuraamiseen. Ohjelmistoa tullaan ensisijaisesti käyttämään “*Puiden terveydentila rakennetussa kaupunkiluonnossa*” -hankkeessa ja *PUULA*-projektissa.

4.2 Menetelmiä materiaalin keräämiseksi

Käyttäjä aloittaa työnsä kentällä vauriotietojen ja kuvamateriaalin keräyksellä. Puun kuntoa arvioidaan ensin ulkoisesti ja koko puusta otetaan valokuva arkistointia varten. Kuntoarvioinnissa tehdään huomioita puun ulkoisista vaurioista. Mahdollisesti voidaan käyttää myös lahoporaa lisäinformaation saamiseksi. Kaadon yhteydessä ulkorunkoon merkitään ilmansuunta, ja sahaukset tehdään vaurioiden läheltä ja rungon haaroittumiskohdista. Poikkileikkauksiin merkitään leikkauksen korkeus maasta, tunnistetiedot sekä viiden senttimetrin pituinen mittatikku mittakaavaa varten. Leikkauksista otetaan digitaalikameralla valokuvat ja kuvat rajataan mallinnusta varten. Näiden tietojen perusteella kuvat voidaan järjestää ja asemoida oikein, jotta puun kolmiulotteinen rekonstruointi olisi myöhemmin mahdollista.

Tutkijaa kiinnostaa koko puun lisäksi lahopatsaan sekä mahdollisen onkalon muodon hahmottaminen. Kolmiulotteinen malli rakennetaan edellä kerättyjen valokuvien perusteella, ja mallintaja on todennäköisesti materiaalin kerääjä itse, koska hän osaa tulkita kuviin tehdyt merkinnät ja luokitella lahon alueen parhaiten. Leikkauskuvista määritetään käsin pistejonoja, jotka kuvaavat rungon ulkoreunan, lahon ja terveen puun rajapinnan sekä onton alueen, jotka voivat olla huomattavan epäsäännöllisiä. Kun ääriviivat on määritelty järjestyksessä, aineistosta muodostetaan kolmiulotteinen malli, jota voidaan tarkastella eri suunnista. Mallin ja ohjelman avulla tutkija voi arvioida puun kaatumisriskiä sekä lahon korkeutta ja etenemistä suhteessa ulkoisiin vaurioihin.

Edellä on esitetty tässä työssä käytetty tapa materiaalin keräämiseksi. Puu täytyy kuitenkin kaataa, jotta poikkileikkaukset voidaan valokuvata. Kehityskeskustelussa on tullut esille myös muita mahdollisia tapoja tasoleikkeiden muodostamiseksi elävästä puusta.

Kolmiulotteista mallintamista varten puista voidaan kerätä näytemateriaalia eri tavoin (Dolwin *et al.*, 1999). Lahon määrän arvioiminen ennen kaatopäätöksen tekemistä on myös tärkeää. Perinteisesti elävän puun lahon määrää on arvioitu mekaanisesti vasaralla, sondilla tai poralla.

Perinteisiä menetelmiä tarkempi lahontunnistukseen tarkoitettu laite on esimerkiksi mikropora, joka mittaa poran vastusta puussa. Tuloksena saadaan käyrä, jota tulkitsemalla päätellään lahojen ja onttojen koko ja sijainti. Parhaimmillaan käyrästä voidaan erotella vuosilustot, mutta mallintamiseen käyrästä ei ole suoraa apua, koska poraus täytyisi tehdä useasta suunnasta ja lahon muoto laskea mittaustulosten perusteella. Vaikka poran aiheuttama reikä on hyvin pieni (2 mm), se puhkaisee lahoa ympäröivän puuaineksen, ja reiän kautta lahosieni voi levitä puussa. Yleensä poraa käytetään vain, jos ulkoiset merkit antavat siihen aiheutta.

Toinen lahontunnistusmenetelmä perustuu havaintoon, että pehmeä laho hidastaa ja vaimentaa puun sisällä eteneviä ääniaaltoja. Rungon ympärille sijoitellaan antureita, joita kopautetaan vasaralla yksitellen. Mittaustulosten perusteella on mahdollista muodostaa luonnos puun kovuudesta näytteenottotasossa ilman, että kuorta tarvitsisi rikkoa. Luonnos ei kuitenkaan välttämättä ole riittävän tarkka mallintamiseen.

Lisäksi lahoa voidaan tutkia lämpökuvauksella, mikroaalloilla, röntgentomografialaitteilla ja sähkövastuksen perusteella, joka on lahossa puuaineksessa alhaisempi kuin terveessä. Tomografialaitteet ja luotaimet eivät ole yhtä kenttätyökelpoisia kuin mikropora, mutta tuottavat kolmiulotteisessa mallintamisessa käyttökelpoisia informaatiota, jonka tarkkuus kuitenkin vaihtelee menetelmästä riippuen. Riittävän tarkalla aineistolla voitaisiin muodostaa vokselimalli, tilavuusmalli, mutta tässä työssä keskitytään kolmiomalliin.

4.3 Kolmiulotteisen mallin muodostaminen

Kolmiulotteisen mallin muodostamista kaksiulotteisista tasoleikkeistä tai reunaviivoista on tutkittu 1970-luvulta lähtien (Keppel, 1975). Avoimia ongelmia on vieläkin, koska kolmioverkon muodostamisessa on useita yhtä oikeita ja luonnollisia ratkaisuja eikä kaikissa tapauksissa täydellisen optimaalista ratkaisua ole välttämättä edes olemassa. Lopullisen mallin muoto riippuu lähestymistavasta ja algoritmin toteutuksen yhteydessä tehdyistä oletuksista, valinnoista sekä tavoitteista. Tavoitteena voi olla valitun kustannusmetriikan, kuten pinta-alan, tilavuuden tai viivan pituuden, minimointi tai maksimointi tapauksesta riippuen. Seuraavassa on esitetty tämän työn kannalta oleellisimpia tutkimustuloksia.

Yleiset lähestymistavat mallin muodostamisongelman ratkaisuun ovat perustuneet joko tilavuusvokselimallin tai kappaletta ympäröivän pinnan muodostukseen. Lääketieteellinen kuvantaminen, geologia ja tietokoneavusteinen suunnittelu, CAD, ovat mallinnustekniikoiden suurimpia soveltajia. Usein mallintaminen aloitetaan todellisesta kappaleesta, josta otetaan näytteitä visualisointia varten, mutta käytettävissä voi olla myös joukko pisteitä suunnittelu- tai mallinnussovelluksessa. Näyttemateriaali voi olla esimerkiksi lääketieteessä kohteesta tiheästi kerättyjä poikkileikkauksia, useasta kamerakulmasta otettuja valokuvia tai 3D-laserskannerilla hankittua etäisyysinformaatiota. Tässä työssä käsitellään kolmiulotteisen mallin kolmioverkon muodostamista puun poikkileikkauksista rungosta harvaan otettujen valokuvien perusteella.

Tietokoneiden näytönohjaimet käsittelevät parhaiten kolmiomuotoista aineistoa, joten on järkevää muuntaa tieto tähän muotoon. Lääketieteellisessä kuvantamisessa lähteeksi saadaan pistematriisi, joka on muodostettu hyvin tiheistä poikkileikkauksista, käytännössä tilavuusmalli. Marching Cubes -algoritmilla tilavuusmallia voi-

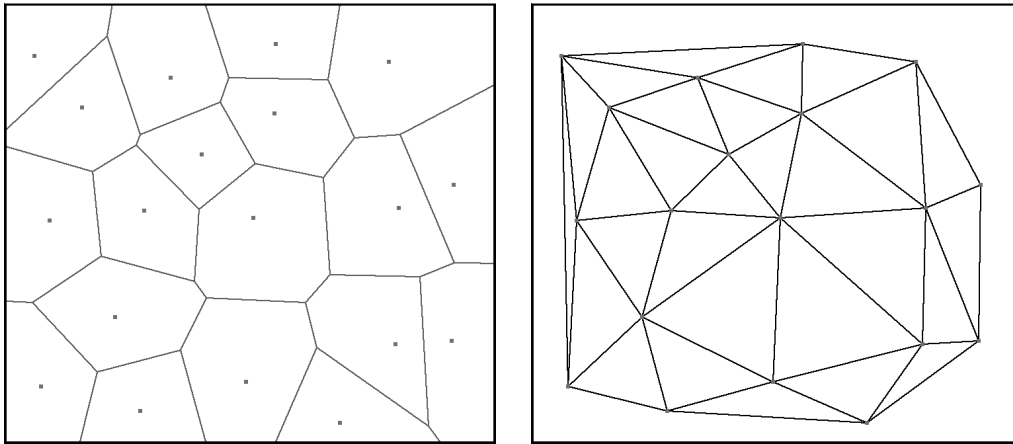
daan käsitellä jakamalla avaruus kuutioihin ja korvaamalla kuutiot malliin sopivalla joukolla kolmioita (Lorensen ja Cline, 1987).

Järjestämättömille pisteille voidaan soveltaa algoritmeja, jotka perustuvat yleiseen *Voronoi-kaavioon* (Aurenhammer ja Klein, 2000) ja tästä johdettavaan *Delaunay-kolmiointiin*. Voronoi-kaavioiden periaate juontaa juurensa 1600-luvulle. Filosofi René Descartesin teorian mukaan aurinkokunta koostuu pyörteistä. Kirjassaan *Principia Philosophiae* (1644) Descartes esittää kaaviokuvilla teoriasa, kuinka avaruus jakautuu konvekseihin alueisiin, joista jokainen kuvaa aineen kiertymistä kiintotähden ympärillä. Ajatus kehittyi ja osoittautui käyttökelpoiseksi monilla eri tieteen alueilla, mutta kuitenkin vasta matemaatikot Dirichlet (2- ja 3-ulotteinen tapaus, 1850) ja Voronoi (n ulottuvuutta, 1908) ensimmäisinä kuvasivat kyseisen periaatteen formaalisti.

Voronoi-kaavion ja Delaunay-kolmioinnin ratkaisut on esitetty algoritmisesti kirjassa de Berg *et al.* (2000). Olkoon $P = p_1, p_2, \dots, p_n$ joukko pisteitä tasossa. Nämä pisteet muodostavat Voronoi-kaavion solmut. Voronoi-kaavio $Vor(P)$ jakaa pistejoukon P n soluun siten, että jokaista pistettä vastaa yksi solu ja piste q sijaitsee solmua p_i vastaavassa solussa jos ja vain jos euklidinen etäisyys $distance(q, p_i) < distance(q, p_j)$ jokaiselle $p_j \in P$ siten, että $j \neq i$.

Olkoon $P = p_1, p_2, \dots, p_n$ joukko pisteitä tasossa kuten edellä ja olkoon määritelty Voronoi-kaavio $Vor(P)$ pistejoukolle P . Delaunay-kolmiointi saadaan yhdistämällä $Vor(P)$:n jokaisen solun $V(p_i)$ virittävä piste p_i kaikkien tämän naapurisolujen $V(p_j)$ solmuihin suorilla janoilla. Tämä tasograafi muodostaa Delaunay-kolmioinnin $DG(P)$ pistejoukolle P .

Delaunay-kolmiointi voidaan johtaa Voronoi-kaaviosta tai ratkaista ongelma inkrementaalilla menetelmällä. Kuvassa 4.1 on esitetty esimerkki sekä Voronoi-kaaviosta



Kuva 4.1: Voronoi-kaavio ja vastaava Delaunay-kolmiointi

että Delaunay-kolmioinnista samalle pistejoukolle. Nykyään nämä menetelmät ovat sovelluksineen hyvin laajassa käytössä.

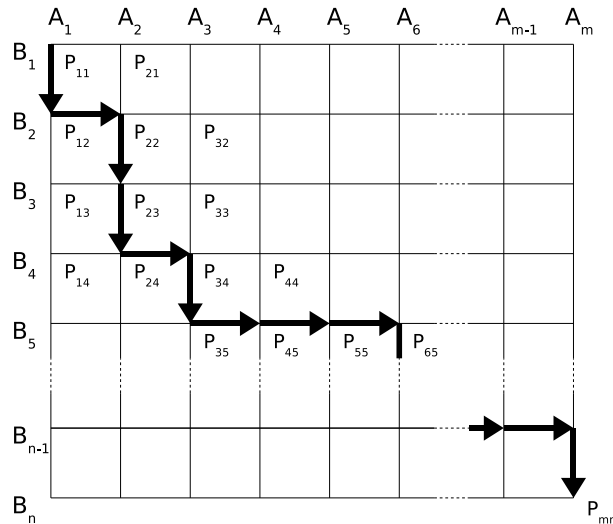
Meyers *et al.* (1992) esittävät, että harvojen poikkileikkausnäytteiden perusteella mallinnettaessa on olemassa neljä pääongelmaa: *yhteenkuuluvuus*, *laatoitus*, *haarautuminen* ja *pinnan sovittaminen*. Kun mallinnettavasta kohteesta on tiedossa vain pino tasokäyriä ilman riippuvuussuhteita ja kussakin tasossa voi olla useampia käyriä, yhteenkuuluvuustarkastelu merkitsee toisiinsa kuuluvien tasokäyrien päättelemistä kuten kuvassa 4.3. Laatoitus on kolmioverkon muodostamista ja haarautumisessa etsitään sopivaa laatoitusta tai kolmiointia haarojen välille. Ensimmäiset haarautumista ratkaisevat menetelmät vaativat kuitenkin käyttäjän vuorovaikutusta ainakin monimutkaisimmissa tapauksissa. Näiden edellä kuvattujen kolmen ongelman ratkaisuna saadaan mallia kuvaava kolmioverkko. Neljännessä vaiheessa, pinnan sovittamisessa, haetaan jatkuvaa sulavaa pintaa muodostetun verkon ympärille.

Ensimmäiset menetelmät keskittyivät ratkaisemaan ainoastaan laatoitusongelmaa. Ratkaisun kolmiulotteisen mallin muodostamiselle reunaviivoista esitti ensimmäisenä

Keppel (1975), jonka mukaan kahden ääriviivan välille

$$T(m, n) = \frac{[(m - 1) + (n + 1)]!}{(m - 1)!(n - 1)!}. \quad (4.1)$$

Kaava 4.1 kuvaa kaikkien mahdollisten kahden ääriviivan välille muodostettujen kolmiointien lukumäärää ääriviivojen sisältämien pisteiden lukumäärien m ja n funktiona. Täten mahdollisten kolmiointiratkaisujen lukumäärä lisääntyy ongelman kombinatorisen luonteen seurauksena eksponentiaalisesti pisteiden lukumäärän lisääntyes- sä. Haetun optimaalisen ratkaisun valinnassa käytetään valittavia ehtolauseita.



Kuva 4.2: Graafi $G = \{P_{ij}, N\}$, johon liittyvät ääriviivojen pistejoukot $S^a = A_i$ ja $S^b = B_j$. Graafin läpi kuljettu polku pisteestä P_{11} pisteeseen P_{mn} vastaa saatua laatoitusratkaisua.

Menetelmässä muodostetaan laatoitusratkaisu sellaiselle yksinkertaiselle tapaukselle, jossa jokaisessa leikkauksessa on vain yksi reunaviiva ja peräkkäiset reunaviivat ovat keskenään samankaltaisia. Menetelmässä pyritään muodostamaan kolmiointia graafiteoriasta tutuilla käsitteillä optimoimalla graafin kustannusfunktiota. Graafi $G = \{P_{ij}, N\}$ muodostuu pisteistä P ja kaarista N . P_{ij} vastaa segmenttiä $A_i B_j$. Täten esimerkiksi kaari $N = (P_{ij}, P_{ik})$ graafissa G yhdistää pisteet $(P_{ij}$ ja $P_{ik})$, mikä

vastaa kolmiota $A_i B_j B_k$. Graafi G on esitetty yleisesti kuvassa 4.2. Polku graafin läpi pisteestä P_{11} pisteeseen P_{mn} muodostaa laatoitusratkaisun esityksen.

Optimaalinen laatoitus saadaan kun maksimoidaan kahden ääriviivan välille muodostuvan monitahokkaan tilavuutta kustannusfunktiona. Tämä funktio saa kuitenkin positiivisen arvon vain, jos reunaviiva on konvekksi, joten konkaavit reunaviivat on jaettava konvekseihin osajoukkoihin ja mahdollisesti edelleen osajoukkoihin ääriviivan kaarevuuden etumerkin perusteella, iteroitava erikseen ja yhdistettävä lopuksi graafiin.

Fuchs *et al.* (1977) sovelsivat Keppelin menetelmää ratkaisemalla graafiongelman käyttäen hajojita ja hallitse -algoritmia, joka perustuu Eulerin kehään ja muodostettavan pinnan pinta-alan minimointiin ilman heuristiikkaa. Kolmiulotteinen kappale koostuu rajallisesta määrästä yhdensuuntaisia tasoleikkauksia, mutta kuvatus menetelmän voi laajentaa käsittelemään ääriviivoja, jotka eivät sijaitse keskenään yhdensuuntaisilla tasoilla. Ongelman ratkaisu pelkistyy toroidigraafiin G' , joka muodostuu $n+1$ sarakkeesta ja $2m+1$ rivistä, ja tälle viritetyn Eulerin polun kustannusfunktion minimointiin. Tämä polku alkaa pisteestä $v_{i,o}$ ja päättyy pisteeseen $v_{m+i,n}$, jossa $i = 0, 1, \dots, m - 1$.

Olkoot $P = p_1, p_2, \dots, p_n$ ja $Q = q_1, q_2, \dots, q_n$ pistejoukkoja, jotka määrittelevät käsiteltävät ääriviivat. Olkoon $G = \{V, A\}$ suunnattu graafi, jonka pisteet vastaavat kaikkia mahdollisia virityksiä P :n ja Q :n pisteiden välillä, ja jonka kaaret vastaavat kaikkia mahdollisia kuvioita, joilla alue peitetään. Tässä tapauksessa kuviot ovat kolmioita, esimerkiksi $P_i Q_j P_{i+1}$, joissa vasen viritys on sivu $P_i Q_j$ ja oikea $Q_j P_{i+1}$.

1. Kukin ääriviivan segmentti esiintyy vain yhdessä kuviossa alueen peittävässä kuviojoukossa.

2. Jos kaari virittää jonkin kuvion vasemman (oikean) sivun, kyseisen kaaren on esiinnyttävä myös vähintään yhden kuvion oikeana (vasempana) sivuna.

Kuviojoukkoa, joka täyttää ylläolevat kaksi ehtoa, kutsutaan *hyväksyttäväksi pinnaksi*.

Olkoon $\pi[i]$ pienimmän kokonaiskustannuksen omaava polku pisteiden $v_{i,0}$ ja $v_{m+i,n}$ välillä, jollekin $i \in 0, 1, \dots, m$ ja olkoon $j \in 0, 1, \dots, m - i$. Tällöin on olemassa pienimmän kustannuksen omaava polku pisteiden $v_{j,0}$ ja $v_{m+j,n}$ välillä, joka ei leikkaa $\pi[i]$:tä, mutta voi jakaa kaaria tai pisteitä tämän kanssa. Kaikki polut $\pi[0], \pi[1], \dots, \pi[m - 1], \pi[m]$ voidaan löytää seuraavalla algoritmilla.

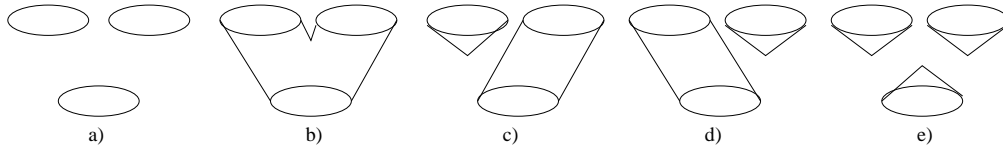
Algorithm KAIKKIPOLUT

```
POLKU(0, G');
POLKU(m, G');
POLUTVÄLILLÄ(0, m);
```

Procedure POLUTVÄLILLÄ(i, j)

```
k = [(i + j)/2]
if i < k then
begin
    POLKU(k, G'(i,j));
    POLUTVÄLILLÄ(i,k);
    POLUTVÄLILLÄ(k,j);
end
```

Aliohjelma POLKU(k, H') hakee polun $\pi[k]$ aligraafista H'. Tässä menetelmässä kuhunkin kaareen liittyvä kustannus on kyseiseen kaareen liittyvän kolmion pinta-



Kuva 4.3: a) poikkileikkaukset ja b-e) mahdolliset haarautumiseen liittyvät yhteenkuuluvuudet Bajaj *et al.* (1996) mukaan

ala. Kustannusfunktio on kaikkien kolmioiden yhteenlaskettu pinta-ala, jonka minimi vastaa haettua ratkaisua. Algoritmin aikakompleksisuus on luokkaa $O(n^2 \log n)$, jossa n on kahden kehäviivan kaikkien pisteiden yhteenlaskettu lukumäärä.

Yhteenkuuluvuutta voidaan päätellä päällekkäisten ääriviivojen leikkauksista, mutta aina tämäkään ei anna alkuperäistä tavoitetta vastaavaa tulosta. Bajaj *et al.* (1996) esittää kolme ehtoa, joista johdetaan tarkat säännöt yhteenkuuluvuuden ja laatoituksen ratkaisemiseksi.

1. Mallin pinta ja sen sisältämät kiinteät alueet muodostavat paloittaisia suljettuja monitahokkaiden pintoja.
2. Jokainen kahden leikkaustason välille vedetty ja tason kanssa kohtisuora viiva risteää muodostetun pinnan kanssa korkeintaan yhdessä pisteessä tai on reunan suuntainen.
3. Syntyneen mallin poikkileikkaukset palautuvat alkuperäisiin ääriviivoihin.

Ehto 1 estää itsensä kanssa risteävien pintojen ja ehto 2 epätodennäköisten topologioiden syntymisen. Haarautumistapauksen laatoitus toteutetaan massakeskipisteen suhteen tai keskiviivamuunnoksen, sovelletun Voronoi-kaavion, avulla. Kuva 4.3 esittää mahdolliset yhteenkuuluvuudet yksinkertaisessa haarautumisessa. Myös monimutkaiset tapaukset, joissa samassa leikkauksessa on useampia erillisiä ääriviivoja, ovat ratkaistavissa tällä menetelmällä. Nämä ääriviivat voivat myös olla sisäkkäisiä.

Käsittely aloitetaan helpoista tapauksista ja vaikeat tapaukset täydennetään viimeiseksi vasta sitten kun mahdollisimman paljon muusta käsiteltävästä rakenteesta on ratkaistu.

Menetelmässä verkon luonti pohjautuu etenevän rintaman -lähestymistapaan. Tässä (1) rintama alustetaan, (2) valitaan rintamasta yksi kolmio, (3) valitaan rintamasta yksi piste tai luodaan uusi piste, josta muodostetaan nelitahokas, (4) päivitetään rintama ja (5) jatketaan kohdasta 2, jos pisteitä on vielä jäljellä.

Prismatoidi on monitahokas, jonka kaikki pisteet sijaitsevat kahdella yhdensuuntaisella tasolla. Leikkauskolmio sijaitsee prismatoidin ylä- tai alapinnalla. Rajoittava kolmio on leikkauskolmio, joka koostuu kahdestä ääriviivan segmentistä. Eileikkauskolmiota kutsutaan sivukolmioksi. Nelitahokkaan metriikka perustuu sen tilavuuden ja pinta-alan suhdeluukuun. Seuraavassa esitetään prosessi prismatoidin jakamiseksi pienempiin osiin kutakin nelitahokasta kohti.

1. Laske metriikka jokaista rajoittavaa kolmiota kohden kummallakin ääriviivalla.
2. Valitse parhaan metriikan omaava kolmio ja muodosta yksi tai useampia nelitahokkaita.
3. Päivitä rintama ja palaa kohtaan 1.
4. Jos yksikään rajoittava kolmio ei läpäise kohtaa 2, vaihdetaan pohjan sivua, jolla muodostetaan uusi rajoittava kolmio ja jatketaan kohdasta 1.
5. Jos ratkaisuun ei päästä sivunvaihdon jälkeenkään, jälkikäsitellään tapaus esimerkiksi jakamalla alue konvekseihin osiin.

Boissonnat (1988) muodostaa Delaunay-kolmioinnin jokaiselle leikkaukselle erikseen, kuvaa nämä toistensa päälle ja päättyy joukkoon nelitahokkaita, joiden tilavuuksien

summaa pyritään maksimoimaan. Tarpeen mukaan lisätään leikkauspinta annettujen ääriviivojen väliin laatoituksen helpottamiseksi. Algoritmi ei kuitenkaan hallitse hyvin tapauksia, joissa nämä kaksi leikkausta ovat keskenään liian erilaisia tai toisessa niistä on aukko keskellä. Tämä oli silti merkittävä askel lähemmäksi useampien reunaviivojen tapauksen hallitsemista. Tulos täyttää kaksi ehtoa - (1) tulos on suljettu avaruuskappale ja (2) leikkaa poikkileikkauspinnat annettuja ääriviivoja pitkin.

Welzl ja Wolfers (1994) esittävät menetelmän kahden yksinkertaisen yhdensuuntaisen monikulmion yhdistämiseksi monitahokkaaksi kulmakriteerin perusteella. Optimaalinen ratkaisu täyttää kaksi ehtoa. Jos monikulmio P ja Q ovat konvekseja, optimaalinen pinta on konvekksi. Jos P voidaan johtaa Q :sta skaalaamalla keskipisteen c suhteen, optimaalinen pinta on sen kartion osa, jota rajoittavat P ja kartion huippu c näiden kahden tason h_P ja h_Q välillä. Monikulmiot P ja Q yhdistetään käymällä kulmapisteet läpi ja valitsemalla sivu P :stä tai Q :sta. Puolittamalla tämän muodostuneen monikulmion kaikki sivut saadaan tuloksena se monikulmio, joka muodostuisi P :n ja Q :n muodostaman monitahokkaan ja yhdensuuntaisesti tasojen h_P ja h_Q puoliväliin muodostetun pinnan leikkauksena. Tämän monikulmion kahta peräkkäistä pistettä vastaavien absoluuttisten kiertokulmien summat lasketaan yhteen. Optimaalinen pinta minimoi tämän summan.

Oliva *et al.* (1996) kykenevät menetelmällään käsittelemään topologiaaltaan ja morfologiaaltaan hyvin erilaisia reunaviivoja. Tämä on toteutettu rekursiivisella algoritmilla, joka lisää annettujen tasojen välille interpoloituja reunaviivoja, kunnes ongelma on rajoittunut tarpeeksi, maksimimäärä iteraatioita on saavutettu tai päädytään riittävän tyydyttävään ratkaisuun. Yhteenkuuluminen ratkaistaan monikulmioiden eroavien alueiden perusteella kunkin reunaviivan kohdalla. Nämä reunaviivojen eroavat alueet käsitellään Voronoi-kaavion avulla, jota käytetään sekä alkuperäisten reunaviivojen, että niiden välille johdettujen uusien reunaviivojen kohdalla. Menetel-

män tuloksena saadaan aukottomasti jatkuva kolmioverkko. Mallia muodostettaessa oletetaan, että toisiinsa yhdistettävät reunaviivat sijaitsevat osittain päällekkäin ja limittäin toisiinsa nähden. Menetelmä kykenee ratkaisemaan automaattisesti myös tapaukset, joissa toisessa tasoleikkauksessa on aukko ja mallissa useita haarautumiskohtia.

Felkel *et al.* (2002) paneutuu nimenomaan puiden haarautumiseen ja pinnan laatoitukseen. Menetelmässä mallinnettavaksi lähdeinformaatioksi annetaan puun rungon ja oksien keskipisteiden muodostama viiva sekä näiden säteet tasoittain. Kyseinen tarkastelu kuvaa rungon käytännössä pyöreinä sylintereinä, mutta yhdistettävien tasojen ei vaadita olevan yhdensuuntaisia.

4.4 Tehdyt valinnat

Tässä työssä sovelletaan mallinnustekniikoita puun rakenteen kuvaamiseen poikkeileikkausvalokuvista. Valokuvista erotellaan rungon ulkoreunan lisäksi ääriwiivat terveeseen puun, lahon ja onton välillä tasokäyriksi, jotka voivat olla ympyrämäisiä tai esittää hyvin monimutkaisia ei-konvekseja muotoja. Meyersin (1992) termejä käyttäen työssä keskitytään *laatoitusongelman* ratkaisemiseen, mutta myös yhteenkuuluvuutta ja haarautumista on käsitelty.

Laatoitus muodostetaan synkronoimalla tasokäyrät päällekkäin sekä käyttäjän antamien tietojen perusteella, että käyttäjän syöttämien pisteiden koordinaattien mallinuskoodinaatistoon muunnoksen perusteella. Koordinaattien lisäksi käyttäjä syöttää aina mittakaavan, ilmansuunnan ja korkeustason runkoa pitkin maan pintaan verrattuna jokaista leikkausta kohden. Laatoitus ratkaistaan käymällä kehät läpi suhteellisesti samaa tahtia lasketun kulmakoordinaatin perusteella ja valitsemalla

lyhin yhdistettävä segmentti valintatilanteessa. Algoritmi määrittää tarkemmin kappaleessa 5.6.

Yhteenkuuluvuusongelma ratkeaa tyypittämällä tasokäyrät niiden määrittämien rajapintojen mukaan. Ohjelman käyttäjä määrittää reunaviivojen tyypityksen. Jokaiselle tasokäyrälle määrittää kaksi tyyppiparametriä, joista toinen määrittää ulkopuolisen ja toinen sisäpuolisen rajauksen. Tasokäyrä voi olla terveen, lahon tai onton alueen ulkoreuna ja terveen, lahon tai "ei minkään" sisäreuna. Kolmiulotteista mallia kasattaessa käsittelyyn otetaan samantyyppiset tasokäyrät yksitellen, jolloin tuloksena saadaan erillisiä tasoitettuja pintoja (vrt. yhdistämättömiä sylinterin muotoisia segmenttejä). Jos samassa tasossa on useampia yhdistettäviä samantyyppisiä tasokäyriä, kolmiointi voi mennä ristiin mallin sisällä, mutta kappaleen ulkopinta näyttää silti luonnolliselta.

Haarautuminen toteutetaan yhdistämällä kaikki samantyyppiset tasokäyrät toisiinsa erikseen sekä terveen puun ulkorungossa että lahojen alueiden ja onkaloiden kohdalla. Rungon sisällä kaikki tasokäyrästä ovat yhdensuuntaisia poikki puun, mutta haarojen poikkileikkaukset eivät välttämättä ole yhdensuuntaisia päärungon kanssa. Käyttäjällä syötetään haarautumiskulmat. Meyersin (1992) kuvaama *pinnan sovittaminen* ei ole tässä työssä tarpeellista.

4.5 XML

Ohjelmassa käsiteltävä tieto tallennetaan muistiin LIGNUM-mallina visualisointia varten ja kirjoitetaan tiedostoon eXtensible Markup Language (XML) -standardin mukaisessa muodossa. Toteutus sisältää ehdotuksen kaupunkipuiden XML-kuvauksen tutkimusta varten. Tässä työssä tiedostoon tallennetaan mallinnukseen ja ar-

kistointiin liittyviä tietoja, mutta tiedostomuotoa on mahdollista laajentaa ja tietoihin liittää myös LIGNUM-kasvumalliin liittyviä muuttujia. Tällöin tiedostoa voisi hyödyntää myös erillisessä kasvumallin visualisointiohjelmassa, jota ei tosin käsitellä tässä työssä. Käytetty tiedostorakenne ja tallennettavat tiedot kuvataan Luvussa 5.

Luku 5

Toteutus

Tässä kappaleessa kuvataan käytetty kehitysympäristö, LIGNUM-mallin soveltaminen ja muut käytetyt tieto- ja tiedostorakenteet. Kuvataan myös työssä käytettyjä algoritmeja ja kolmiulotteisen mallin muodostaminen. Lopuksi esitetään käyttöliittymän rakenne ja toiminta.

5.1 Kehitysympäristö

Kehitysalustana oli käytettävissä Silicon Graphics:n (SGI) Octane2-työasema, johon oli asennettu IRIX-käyttöjärjestelmä. Ohjelma on toteutettu C++ -ohjelmointikielellä, ja tietorakenteissa hyödynnetään Standard Template Librarya (STL) ja geneeristä ohjelmointia. *LIGNUM*-malli (Perttunen *et al.*, 1998) käyttää hyväkseen tätä varten toteutetun yleiskäyttöisen C++ADT -kirjaston algoritmeja. Visualisointi on toteutettu OpenGL -kirjastolla ja käyttöliittymän suunnittelussa on käytetty avoimia versiota Trolltech Qt 3.0.3 -kirjastosta ja QtDesigner -ohjelmistosta. Qt:sta sovellettiin myös XML-toteutusta, joka ei tosin sisällä DTD (Document Type Definition) -vali-

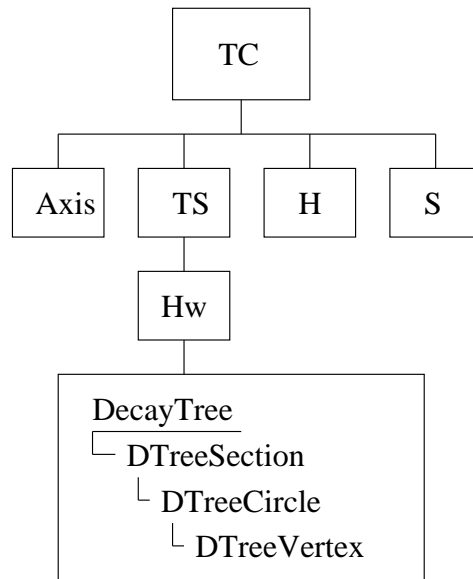
dointia, tiedoston eheystarkistusta suhteessa tyyppimäärittelyyn. QtXML:n DOM-rajapinta sopii kuitenkin hyvin yhteen valittujen kirjastojen kanssa. DTD-määrittely on esitetty Liitteessä A.

Työvälineiden valinnalla on ainakin teoriassa mahdollista pitää ohjelmisto riippumattomana käytetystä alustasta. Windows-yhteensopivaa Qt-kirjastoa ei ollut ohjelman kehityksen aikana käytössä maksullisen Qt3-version lisenssin vuoksi. Toisaalta Qt4-versiosta on sittemmin julkaistu vapaasti ladattavissa oleva GPL-lisenssin alainen versio. XML:ää päädyttiin hyödyntämään, koska kyseinen standardi on yleisesti määritelty, helposti laajennettavissa ja Qt-kirjasto sisältää siitä toimivan toteutuksen. Tiedostosta ladataan ohjelman tarvitsemat muuttujat ja loput jätetään huomiotta, mikäli niitä on määritelty.

5.2 Tietorakenteet

LIGNUM-mallia käsitellään geneerisillä algoritmeilla. Malli koostuu elementeistä (haara, puusegmentti, haarautumispiste ja silmu), joita käydään läpi algoritmeilla ForEach, Propagate tai Accumulate. ForEach käsittelee kaikki elementit yksitellen, Propagate-algoritmin avulla tietoa voidaan kuljettaa elementtien välillä ja Accumulate laskee edellisistä elementeistä tulleen tiedon yhteen. Näin on mahdollista toteuttaa muun muassa ravinteiden eteneminen puussa. Puurakenteen voi käydä läpi molempiin suuntiin sekä juuresta latvaan että päinvastoin.

Tässä työssä *LIGNUM*-mallin lehtipuusegmentistä on periytetty luokka (*DecayTree*) kuvan 5.1 mukaisesti. Tähän on lisätty *DTreeSection*, joka sisältää terveen ja lahon alueen sekä onkalon määrittävät tasokäyrät (*DTreeCircle*), jotka puolestaan sisältävät tasokäyrän kuvaavat pisteet (*DTreeVertex*). *DTreeSection*-luokka sisältää myös



Kuva 5.1: Ohjelmassa sovellettu LIGNUM-mallin luokkahierarkia. LIGNUM: TC = elementti, Axis = haara, TS = segmentti, H = haarautumispiste, S = silmu ja Hw = lehtipuusegmentti. Sovellettu: DecayTree = segmentti

leikkausvalokuvan, jonka perusteella tasokäyrät on luotu sekä muita asemointiin liittyviä muuttujia. Jotta tasokäyrät voisi asemoida oikein, on talletettava ainakin mitataaava, kiertosuunta ja kasvukeskipiste. Puunhaaroista on talletettava haaran suuntavektori, joka lasketaan käyttäjän arvioimasta kompassisuunnasta ja haaran poikkeamakulmasta.

Terveen, lahon ja onton puuaineksen rajapinnat voidaan määrittää silmämääräisesti kuvasta. On mahdollista, että rungon poikkileikkauksessa on useampia lahopesäkkeitä ja onkaloita. Jopa tervettä puuta voi olla lahon alueen sisällä. Kullekin reunaviivalle määritellään tyyppiparametrit *OuterOf* ja *InnerOf*. *OuterOf* kuvaa reunaviivan rajaaman aineksen ulkoreunan tyyppin ja saa arvoja “terve”, “laho” tai “ontto”. *InnerOf* kuvaa vastaavasti sisäreunan tyyppin ja voi saada arvon “terve”, “laho” tai “ei mitään”. Esimerkiksi rungon ulkoreuna saisi *OuterOf*-arvon “terve” ja *InnerOf*-arvon “ei mitään”, koska rungon uloimman reunan ei voida määrittää olevan minkään puuaineksen sisäpuolella. Samoin voidaan kuvata myös terveen puun ja onkalon väli-

nen rajapinta. Näin voidaan määritellä minkälaisia poikkileikkausrakenteita tahansa ja mahdolliset rajoitukset siirtyvät mallinnuksen toteutukseen. Tosin onton alueen sisällä ei määrittelyn mukaan voi olla tasokäyriä, koska tällainen rakenne on harvinaisen eikä kestäisi sahausta.

5.3 Monikulmion pinta-ala

Tasokäyrien rajaamien alueiden pinta-aloista voidaan päätellä puiden romahtamisriskiä. Kun tiedetään riskirajat, voidaan esimerkiksi lahoporan avulla tehdä sama arviointi vielä pystyssä oleville puille. Monikulmion pinta-alan laskemiseen on käytetty C++ADT-kirjaston PolygonArea -algoritmia. Algoritmi voidaan johtaa Greenin teoreemasta, joka yhdistää viivaintegraalin pintaintegraaliin aluetta R rajaavan käyrän C yli xy -tasossa

$$\oint_C F dr = \int \int_R \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) dA. \quad (5.1)$$

Valitaan $P = -y/2$ ja $Q = x/2$, jolloin yhtälön oikeasta puolesta tulee haettu pinta-ala. Ensin lasketaan viivaintegraali monikulmion pisteiden i ja $i+1$ välillä, kun $r(t) = (x_i, y_i) + t(x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i)$.

$$\int_0^1 F(r(t)) r'(t) dt = \frac{1}{2} (-x_{i+1}y_i + x_iy_{i+1}) \quad (5.2)$$

Kokonaispinta-ala on monikulmion särmien yli laskettujen integraalien summa

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_iy_{i+1} - x_{i+1}y_i), \quad (5.3)$$

jossa n on kulmien lukumäärä. Monikulmion määräävän pistejono perään lisätään ensimmäinen piste, mikäli kyseessä ei ole suljettu kehä. Menetelmä on yhtäpitävä puolisuunnikkaiden pinta-aloihin monikulmion särmien ja x -akselin välillä. Tuloksen

etumerkki riippuu kiertosuunnasta. Myötäpäivään määritellyn pistejonon kokonaispinta-alaksi tulee negatiivinen ja vastapäivään positiivinen luku, mikä täytyy ottaa huomioon. Monikulmio voi olla joko konvekksi tai konkaavi, mutta vaatimuksena on, ettei pistejono leikkaa itseään.

5.4 Monikulmion massakeskipiste

Monikulmion massakeskipisteen laskemiseksi on käytetty C++ADT -kirjaston algoritmia PolygonCentroid. Keskipiste saadaan yleisesti suljetun alueen R yli tehdyistä pintaintegraaleista

$$x = \frac{\int \int_R x \, dx \, dy}{A} \quad (5.4)$$

$$y = \frac{\int \int_R y \, dx \, dy}{A}, \quad (5.5)$$

joista voidaan johtaa seuraavat yhtälöt monikulmion keskipisteelle.

$$x = \frac{1}{6A} \sum_{i=1}^n (x_i + x_{i+1}) (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (5.6)$$

$$y = \frac{1}{6A} \sum_{i=1}^n (y_i + y_{i+1}) (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (5.7)$$

Yhtälöissä 5.6 ja 5.7 x ja y ovat keskipisteen koordinaatit tasossa ja A on yhtälössä 5.3 laskettu kokonaispinta-ala etumerkki huomioon ottaen. Myös tässä varmistetaan, että pistejono muodostaa suljetun kehän. Tässä laskettu keskipiste vastaa puolisuunnikkaiden keskipisteiden pinta-alalla painotettua keskiarvoa, kun pistejono käydään läpi samoin kuin yhtälössä 5.3. Monikulmion pinta-alan ja massakeskipisteen laskemista on käsitelty muun muassa kirjassa Graphics Gems IV (Heckbert, 1994).

5.5 XML-tiedosto

Mallintaminen:	Arkistointi:
<i>leikkausvalokuvat</i>	kaatopäivämäärä
<i>kuvan mittakaava</i>	sarjanumerot
<i>korkeus</i>	rekisterinumerot
<i>kasvukeskipiste</i>	kasvupaikka
kompassisuunta	puun valokuva ennen kaatoa
oksien haarautumiskulma ja -suunta	
runkosiirtymä	
vaurioiden sijainnit ja kuvaukset	

Taulukko 5.1: Tallennetut tiedot

Puista rekisteröityjä tietoja kartoitettiin haastattelemalla käyttäjiä ja niistä tärkeimmät mallintamiseen ja arkistointiin liittyvät muuttujat sisällytettiin ohjelmistoon. Mallintamista varten pakollisia tietoja ovat leikkausvalokuva, mittakaava, korkeus, suunta ja kasvukeskipiste. Määriteltävissä ovat myös siirtymä sekä oksien haarautumissuunnat. Vaurioista tallennetaan sijainti ja sanallinen kuvaus. Arkistointia varten tietoihin lisätään puun valokuva, sarja- ja rekisterinumerot sekä kaatopäivämäärä ja kasvupaikka (Taulukko 5.1).

Kuva 5.2 esittää käytetyn tiedostorakenteen tyypistetyssä perusmuodossaan. Kolme pistettä kuvaavat tiedoston jatkumista aiempaa vastaavalla tavalla ja toistoa. Esimerkiksi *Circle*- ja *Section*- ja *Branch*-osioita voi olla useampia. Liite A kuvaa kokonaisen tiedoston tyyppimäärittelyn (DTD). Tiedosto alkaa tiedostotyyppin määrittelyllä (*CityTree*). Puu kuvataan *Tree*-tunnisteiden sisään hierarkisena rakenteena. Tunnistetta *Branch* (haara) käytetään sekä päärungolle että haaroille. Ensimmäinen haara kuvaa aina päärungon, jonka *Name*-tunniste saa arvon "Main". Loput haarat nimetään "BranchA", "BranchB" ja niin edelleen. Rajoituksena on aakkosten lukumäärä. *Branch*-tunnisteen sisällä kuvataan leikkaukset *Section*-tunnisteilla, joiden

```

<!DOCTYPE CityTree>
<Tree>
  <Name>Koivu</Name>
  <CuttingDate>2004-07-15</CuttingDate>
  <Branch>
    <Name>Main</Name>
    <Section height="30">
      <Name>Segment1</Name>
      <Image>30cm.jpg</Image>
      <Origin>573 488</Origin>
      <ScaleVertex1>495 934</ScaleVertex1>
      <ScaleVertex2>576 941</ScaleVertex2>
      <ScaleRef>5</ScaleRef>
      <North>0</North>
      <Circle outer="0" inner="2" >
        <Name>Circle1</Name>
        <Point>492 1079</Point>
        ...
      </Circle>
      ...
    </Section>
    ...
  </Branch>
</Tree>

```

Kuva 5.2: XML-tiedoston perusrakenne

alla voidaan puolestaan määrittää sekä tasokäyriä *Circle* että haaroja *Branch*. Tasokäyrät määritellään jonolla pisteitä *Point*, jotka on listattu myötäpäivään ja sisältävät pisteiden x- ja y-koordinaatit. Kaikki aloitetut osiot täytyy päättää */Branch*, */Section*, */Circle*, */Point* ja vastaavilla komennoilla.

Puun hierarkiaa kuvaaville perustunnisteille *Tree*, *Branch*, *Section* ja *Circle* on jokaiselle annettu nimi, jota käytetään käyttöliittymässä nimikkeenä. Tree-tunnisteen alla voidaan kuvata puun yleiset muuttujat, joita ovat *Serial* (sarjanumero), *Registry* (rekisterinumero), *Location* (sijainti), *CuttingDate* (kaatopäivämäärä), *Image* (puun kuvatiedosto) ja *SearchPath* (hakupolut).

Leikkauksen korkeus “height”, määritellään *Section*-tunnisteen attribuuttina. Leikkauksen kentät ovat *Image* (leikkausvalokuva), *Origin* (kasvukeskipiste), *North* (kompassisuunta), *ScaleVertex1* ja *ScaleVertex2* (mittakaavavektori) sekä *ScaleRef* (vektoria vastaava pituus luonnossa senttimetreinä).

Tasokäyrien tyypit määritellään *Circle*-tunnisteen attribuutteina “outer” ja “inner”, jotka saavat arvoja 0, 1 tai 2. Terveen tai lahon alueen rajaavaa käyrää vastaavat tyyppien arvot ovat 0 ja 1. Kuten kappaleessa 5.2 on esitetty, ulkoreunan tapauksessa lukuarvo 2 vastaa onkalon rajaa ja sisäreunan tapauksessa “ei minkään sisäreunaa”. Esimerkiksi puunrungon ulkoreuna esitetään seuraavasti: outer=“0”, inner=“2”.

Lukuarvot tallennetaan tiedostoon kokonaislukuina millimetreissä. Pistekoordinaatit on tallennettu kuvatiedoston koordinaateissa suhteessa vasempaan yläkulmaan. Esimerkiksi mittakaava lasketaan vektorin pituuden ja annetun referenssipituuden suhteena. Valokuvaan viitataan tiedostonimillä ja tiedostoon tallennetaan kuvatiedostojen hakupolut XML-tiedoston siirrettävyyden helpottamiseksi.

Mahdollisia poikkileikkauskuvia tai muita tiedostoja ei sisällytetä XML-tiedostoon. Tämä vastaa esimerkiksi HTML-tyyppisen tiedoston tapaa toteuttaa sama asia ja helpottaa tiedoston muokkaamista käsin tekstieditorilla, jos tähän tulee tarvetta. Toisaalta tämä voi myös vaikeuttaa tiedoston siirtämistä. Tätä on kuitenkin pyritty helpottamaan tallentamalla kuvien (suhteellinen) hakemisto mukaan tiedostoon (*SearchPath*) mikäli tämä eroaa senhetkisestä tiedoston tallennushakemistosta.

XML-muodon etu on, että tiedostoon voidaan myöhemmin helposti lisätä LIGNUM-mallin muita esimerkiksi puun kasvattamisessa käytettyjä muuttujia, mutta tämän työn yhteydessä siitä hyödynnetään vain välittömästi visualisointiin liittyvät tiedot.

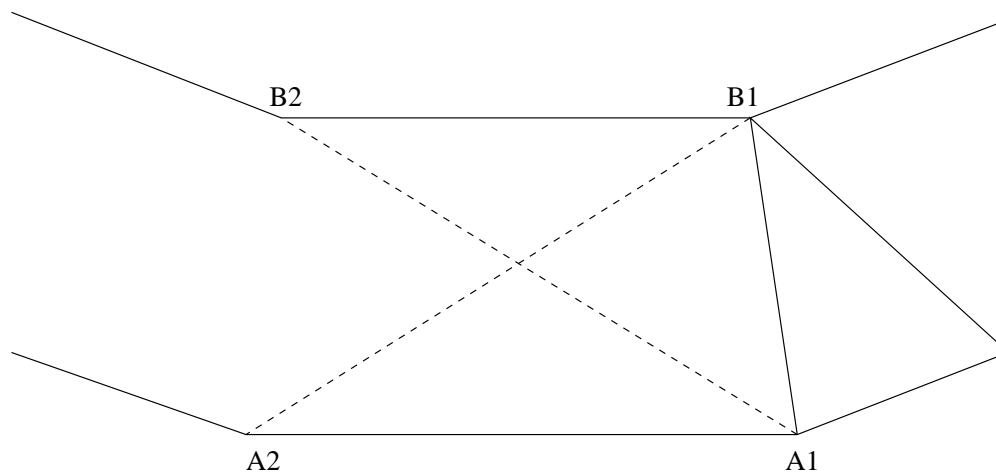
5.6 Kolmiulotteinen malli

Malli muodostetaan segmentti kerrallaan tarkastelemalla kahden leikkaustason väliin jäävä osaa. Tietorakenteesta haetaan rajapinnat puuaineksen tyyppin mukaan ja jokaisesta rajapinnasta muodostetaan erilliset toisistaan riippumattomat mallit, jotka asetetaan sisäkkäin visualisoinnin aikana. Kaikki tasokäyrät ovat samassa tasossa segmentin sisällä ja kuvaavat aina segmentin yläreunan, vaikka puun mallinnus alkaa maanpinnasta ylöspäin. Ensimmäisen segmentin ylä- ja alareuna ovat täten identtiset. Puun malli luodaan käymällä tietorakenne läpi juuresta latvaan. Visualisoinnin aikana edellisen segmentin tasokäyrät välitetään aina seuraavalle kierrokselle oikein asemoituna. Kun tasokäyrät on asetettu samaan koordinaatistoon, edellisen ja senhetkisen tasokäyrän välille muodostetaan kolmioverkko.

5.6.1 Algoritmi

Ensimmäisessä vaiheessa kolmiulotteinen malli muodostettiin piirtämällä päällekkäin segmenttejä, joiden reunaviivoja ei yhdistetty toisiinsa. Tällöin malli muodostui pinnosta monikulmiopohjaisia lieriöitä, särmiöitä. Toisessa vaiheessa tätä on jatkettu edelleen toteuttamalla poikkileikkaukset yhdistävä laatoitus kuten Kuvassa 5.3, jolloin malli tasoittuu rungon mukaisesti saumattomasti. Visualisoinnissa käytettävä mallinnustyyli (tasoituksen kanssa tai ilman tasoitusta) on valittavissa käyttöliittymässä.

Kaikki reunaviivat on määritelty kaksiulotteisessa tasossa, jolle annetaan lisäksi suuntavektori päärunгон tai oksanhaaran mukaan. Aivan kaikki tasot eivät siis ole annetussa kuvausmateriaalissa keskenään yhdensuuntaisia. Yleisesti lähdeoteoksissa ja tutkimuksessa on voitu olettaa, että kaikki tasot ovat yhdensuuntaisia mukaan

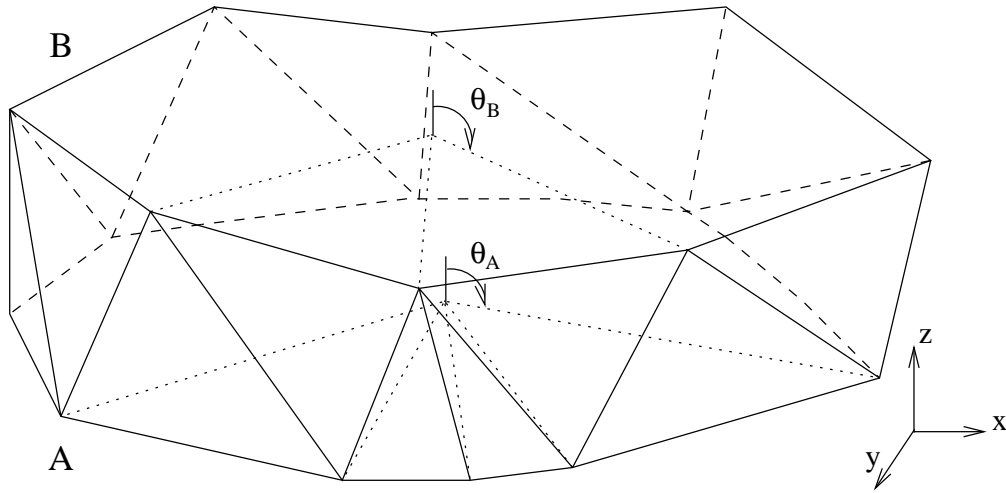


Kuva 5.3: Kolmiointi kahden ketjun välillä

lukien haarautumistapaukset.

Reunaviivat ja tasot käydään läpi segmentin rajoittavat ala- ja ylätasot kerrallaan alhaalta ylöspäin. Reunaviivan pisteet käydään läpi listajärjestyksessä olettaen, että nämä on määritelty vastapäivään eivätkä leikkaa itseään. Toisin sanoen esimerkiksi kahdeksikon muotoinen reunaviiva ei ole sallittu eikä edes mahdollinen luonnollisessa tapauksessa. Edellistä alemmaa reunaviivaa kutsutaan tässä A-ketjuksi ja ylempää B-ketjuksi, kuten kuvassa 5.3. Käsittelyyn valitaan kerrallaan kaksi peräkkäistä pistettä A- ja B-ketjusta. Käsittelyssä edelliset pisteet (A1 ja B1) tiedetään jo yhdistetyksi. Ongelmana on, yhdistetäänkö seuraava kolmio A- vai B-ketjun pisteeseen (A2,B2). Katkoviivat kuvaavat harkittua yhdistystä.

Ensimmäinen yritelmä kolmioverkon eli laatoituksen muodostamiseksi perustui pisteiden (A1,B2) ja (B1,A2) välisen etäisyyden vertailuun. Lyhyempi jana valittiin. Ongelmaksi kuitenkin muodostuivat terävät kulmat pisteketjun sisällä, jolloin kyseisen ketjun läpikäynti ei edennyt viimeiseen pisteeseen asti. Toinen yritelmä vertaili muodostettavien kolmioiden (A1-B1-A2) ja (A1-B1-B2) pinta-aloja, mutta tulos oli vastaava kuin ensimmäisessä yritelmässä. Algoritmi ei edennyt loppuun asti tapauk-



Kuva 5.4: Kolmiointiratkaisu polaarikoordinaatistomuunnoksen jälkeen

sisä, joissa pisteketjun peräkkäiset pisteet määrittivät niin terävän kulman, että tulos vaikutti kolmioiden pinta-alojen vertailun lopputulokseen.

Toimivaksi ratkaisuksi todettiin muunnos suorakulmaisista xy -koordinaateista polaarikoordinaatistoon. Tasokäyrille lasketaan keskipiste, jonka suhteen koordinaatistomuunnos tehdään. Polaarimuunnoksesta käytetään hyödyksi kulmaa $\theta = \tan^{-1}(y/x)$, joka kertoo mallintamisen etenemisestä tasokäyrän ympäri suhteessa nollakulmaan. Kuvassa 5.4 kulmat θ_A ja θ_B vastaavat laskettuja kulmia A- ja B-ketjuille xy -tasossa. Pisteviivat esittävät osaa lasketuista kulmista keskipisteen suhteen. Keskipisteen määrittäminen tasokäyrille on kuvattu aiemmin kaavoissa 5.6 ja 5.7.

Koska jokaiselle poikkileikkaukselle on asetettu korkeus maanpinnan suhteen, ja ensimmäinen leikkaus on pinnan yläpuolella, luodaan kopio tästä leikkauksesta nollatasolle ja tehdään ensimmäinen käsittely näiden välillä. Täten jokainen kolmiulotteisen mallinnuksen tulos alkaa maanpinnan tasosta ja ensimmäinen segmentti on symmetrinen. Kuvan 5.5 pseudokoodissa AChains ja BChains sisältävät aloitustilanteessa valitun tyyppiset ketjut. Tervettä puuta vastaava ketju yhdistetään sitä vastaan määritellyn terveen puun ketjuun ja sama tehdään lahon alueen ja onkalon

```
1 Tiling(ACHains, BChains)
2 begin
3   ForEach ketju AK in AChains
4     begin
5       ForEach ketju BK in BChains
6         begin
7           A1 <- B1:ä lähinnä oleva piste AK:ssa
8           A2 <- A1:ä seuraava piste ketjussa AK
9
10          ForEach piste B2 in BK
11            begin
12              do
13                B1 <- B2:a edeltävä piste
14                palauta B- ja A-pisteet xy-tasoon
15
16                thetaA <- atan2(A.y, A.x)
17                thetaB <- atan2(B.y, B.x)
18                if thetaB-thetaA <= -pi then
19                  thetaB += 2pi
20                else if thetaB-thetaA >= pi then
21                  thetaA += 2pi
22
23                if thetaA < thetaB then
24                  begin
25                    yhdistä kolmio B1-A2-A1
26                    A1 <- A2
27                    A2 <- AK.next()
28                  end
29                else
30                  yhdistä kolmio B1-B2-A1
31                  while thetaA < thetaB
32                end
33            end
34          end
35        end
36      end
37    end
38  end
39 end
```

Kuva 5.5: Kolmioinnin pseudokielen koodi

ketjuille vastaavasti. Ketjujen pisteet on kierretty annetun ilmansuunnan mukaan, jotta kulmavertailu asemoituu oikein maailman koordinaatistoon ennen kulmavertailua. Kaikki A-tason ketjut yhdistetään B-tason ketjuihin ja jokaiselle on laskettava massakeskipiste, jonka suhteen kulmavertailu toteutetaan.

Kulmavertailu aloitetaan rakenteen ensimmäisen B-ketjun ensimmäisestä pisteestä P_{B0} . A-ketjulta on laskettava aloituspiste P_{A0} , jonka kulma vastaa tätä B-ketjun aloituspistettä. Pisteelle P_{B0} lasketaan kiertokulma θ_B suhteessa kyseisen ketjun massakeskipisteeseen ja valitaan tämän jälkeen A-ketjulta se piste P_{A0} , jolle lasketun vastaavan kiertokulman θ_A arvo on lähinnä tätä arvoa θ_B maailman koordinaatistossa. Täten myös kaikista A-tason ketjun pisteistä P_{A0} :n etäisyys pisteeseen P_{B0} on lyhin tämän kiertokulman läheisyydessä.

Seuraavaksi pisteet käydään läpi molemmissa ketjuissa samaan tahtiin kulman mukaan varmistaen, että molemmat ketjut käydään läpi kokonaisuudessaan ja koko alue tulee kolmioitua. Ohjelmakoodissa käytetään C-kielen atan2-funktiota, joka ottaa huomioon argumenttien etumerkit ja palauttaa arvon välillä $[-\pi, \pi]$. Tässä vertaillaan kahta kulmaa, joten määrittelyalueen reunalla on otettava huomioon mahdollisuus, että toinen kulma on kiertynyt alueen ympäri. Käytännössä lasketaan kulmien erotus ja päätellään lukuarvosta mikä kulmien ero on, ja pienempään kulmaan lisätään 2π tarpeen mukaan, jotta ohjelmakoodissa rivillä 18 tehty kulmavertailu antaisi oikean tuloksen. Ilman vaihelisäystä algoritmi siirtyisi käsittelemään ketjun vastapuolisia pisteitä.

Mallinnus etenee B-ketjun läpi pistejärjestyksessä geneerisellä ForEach-algoritmilla. Käsitellyssä oleva senhetkinen piste yhdistetään A-ketjun pisteeseen kolmioilla, kunnes lopulta viimeksi yhdistetyn pisteen kulma on suurempi kuin B-ketjun pisteellä. Vastaavasti A-ketjun piste yhdistyy B-ketjun pisteisiin, kunnes kulma on jäl-

leen kasvanut B-ketjun pisteen lasketun kulman yli. Näin ollen ketjut voivat kiertyä myös kaksinkerroin ja muodostaa silmukoita. Samaa jatketaan kunnes kaikki A- ja B-ketjujen pisteet on käyty läpi. Menetelmä toimii, koska se hyödyntää tietoa pisteiden keskinäisestä järjestyksestä ja kyseessä on suljettu kehä. Lopullinen kolmiulotteinen malli muodostetaan yhdistämällä kaikki segmentit toisiinsa.

Vaikka yksittäisen haaran sisällä reunaviivat eli tasokäyrät ovat samansuuntaisia, ne eivät sitä välttämättä ole haarojen välillä, koska kaikki poikkileikkaukset on sahattu poikki oletettavasti kohtisuoraan kyseistä haaraa vasten. Haarautuminen toteutetaan yhdistämällä kaikki samantyyppiset tasokäyrät seuraavalla tasolla oleviin tasokäyriin käyttäen hyväksi leikkaukselle tallennettua suuntavektoria. Suuntavektorin perusteella saadaan laskettua oikea polaarikoordinaatiston kulma-arvo molemmille leikkauksille. Menetelmä toimii kunhan haarautumiskulma on alle 90 astetta. Haarautumiskulma lasketaan poikkeamana päähaarasta, jolloin nollakulma on päähaaran suuntainen ja 90 kohtisuoraan tätä vasten.

Algoritmi on suunniteltu enemmän laatoitusongelman kuin haaroitusongelman ratkaisuun, joten kolmiot menevät ristiin mallin sisällä rungon haarautumistapauksessa, mutta mallin ulkopinta näyttää luonnolliselta. Kukin laatoitus kahden tason välillä toimii odotetulla tavalla. Koko mallia voidaan tarkastella myös erikseen terveen ja lahon puun sekä onkaloiden osalta.

Valittu menetelmä vaatii keskipisteen laskemisen suljetuille ketjuille. Mikäli ohjelman laskema keskipiste ei ole ketjun sisällä, voidaan ajautua ongelmiin. Ketjun läpikäynti on rajattu ketjun pisteiden lukumäärään. Virhetapauksessa, esimerkiksi toisen käsiteltävistä ketjuista ollessa hevosenkengän muotoinen, mallin muodostaminen voi hieman vääristyä ja näyttää luonnottomalta. Käyttäjältä vaaditaan ketjujen määrittämistä myötöpäivään. Ongelmatapaukset on myös mahdollista kiertää tiettyyn ra-

jaan asti määrittelemällä ketju toisella tavalla niin, että epäluonnollista mallinnusta ei tapahdu. Algoritmin toimintaa on testattu Luvussa 6.

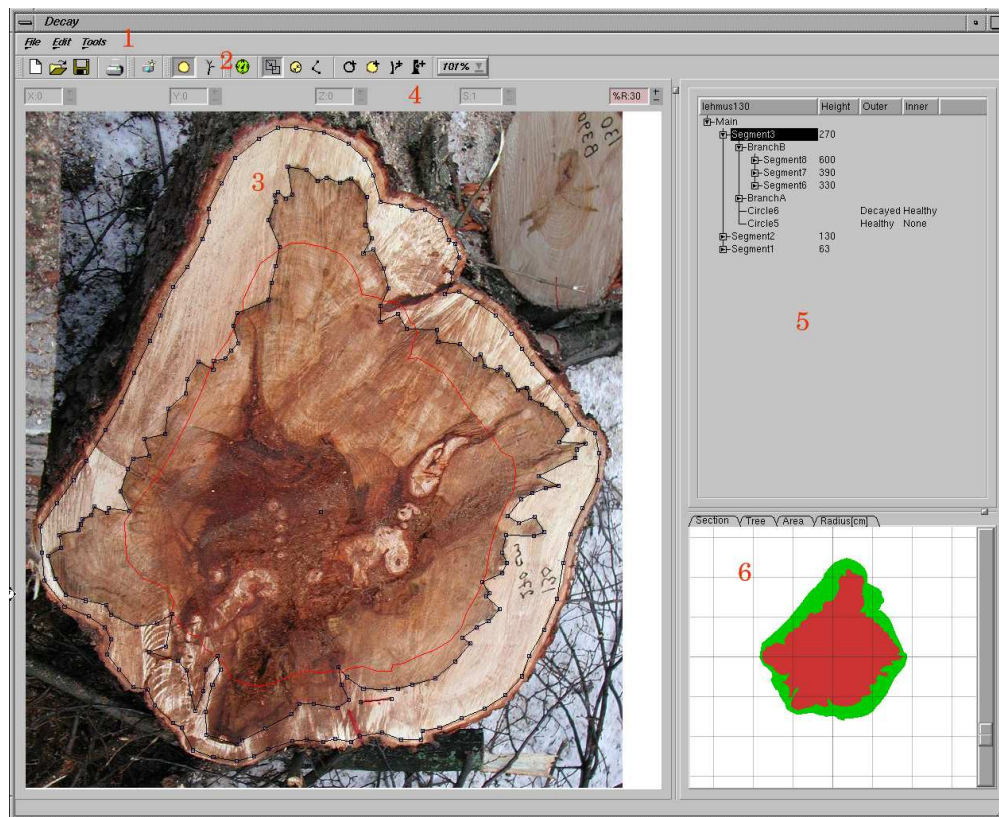
5.7 Käyttöliittymä

Tavoitteena on kehittää yksittäinen sovellus, jolla on mahdollista sekä muokata että visualisoida kolmiulotteista mallia rinnakkain, jolloin tehtyjen muutosten vaikutukset nähdään nopeasti. Visualisoitavana kohteena ovat puun terve alue, laho ja ontto. Näiden alueiden pinta-ala on myös laskettava poikkileikkauksittain, koska tästä tiedosta on hyötyä tutkimuksessa. Työn lähtökohtana oli joukko puun poikkileikkauksia ja lopputuloksena saadaan ohjelmalla luotu malli sekä mallin kuvaava tiedosto.

Päädytään luomaan sovellukselle kaksi päätilaa, joita ovat muokkaus ja visualisointi. Muokkaustilassa rakennetaan puun runko ja haarat leikkauksittain kannosta latvaan määrittämällä reunaviivoja poikkileikkauksien päällä, ja visualisoinnissa yhdistetään syötetyt poikkileikkaukset kolmiulotteiseksi malliksi.

Kuvaan 5.6 on numeroitu keskeisimmät komponentit. Yläreunan valikoihin (1) ja työkalupalkkiin (2) on sijoitettu toiminnot kuten tiedoston avaus, tallennus, tiedon syöttö ja visualisointi. Yhdellä silmäyksellä käyttöliittymästä on nähtävissä muokkaus- tai visualisointi-ikkuna (3) ohjelmiston tilasta riippuen, muokkauksen ja visualisoinnin säätöpainikkeet (4), puun hierarkinen rakenne (5) sekä välilehtielementti (6).

Ohjelmiston kulloinenkin tila ilmaistaan pohjaan painuvilla vaihtopainikkeilla. Hierarkinen lista ja välilehtielementti ovat aina näkyvissä tilasta riippumatta. Välilehtien alta löytyvät poikkileikkaus rungon halki pysty- ja vaakasuuntaan sekä lasketut pinta-alat ja säteet terveeseen puun, lahon alueen ja onkalon suhteen. Huomattavaa on,

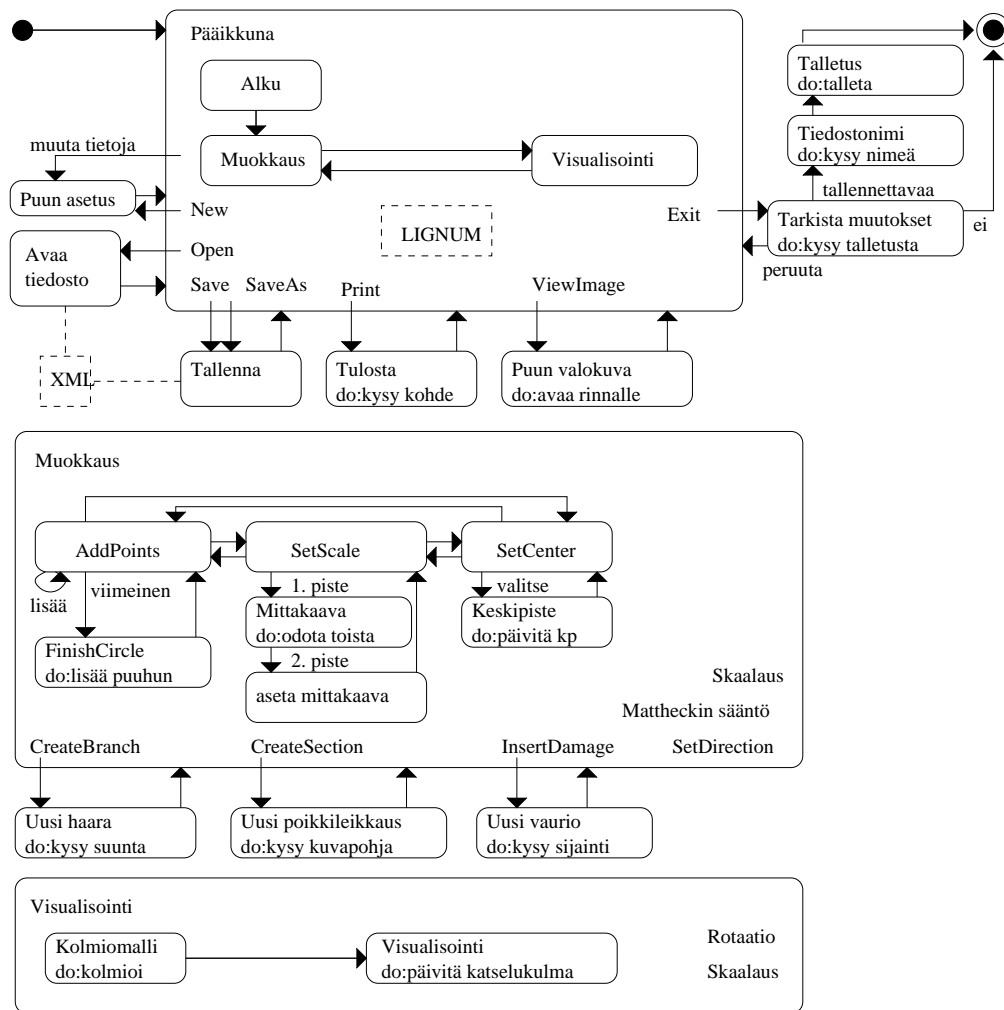


Kuva 5.6: Ohjelmiston käyttöliittymä - näkymä muokkaustilassa

että kuvassa 5.6 välilehtielementti (6) näyttää syötetyn poikkileikkauksen värikooodattuna, suuntavektorin mukaan pyöritettynä, origon mukaan keskitettynä ja mitatakaavaan sovitettuna. Muista välilehdistä rungon poikkileikkausvälilehti on esitetty kuvassa 5.11, leikkauksen pinta-alojen välilehti kuvassa 5.12.

5.7.1 Toiminta

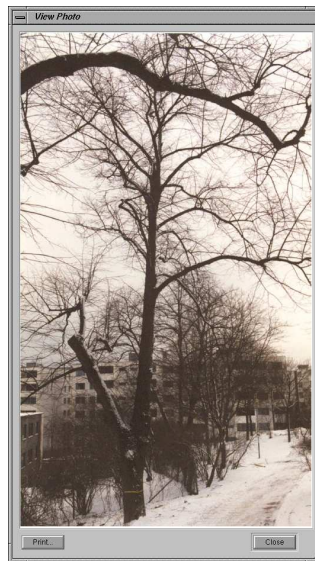
Kuvassa 5.7 on esitetty käyttöliittymän toiminnan logiikka Harelin tilakaaviona (Haikala ja Märijärvi, 1998). Ohjelman toiminta jakautuu pääosin muokkaus- ja visualisointitiloihin, joiden sisäistä toimintaa esitetään omissa tilakaavioissaan. Näiden kahden tilan välillä voi vaihtaa halutessaan kesken työn ennen kuin kaikkia poik-



Kuva 5.7: Käyttöliittymän toiminta tilakaaviona

kileikkauksia on vielä syötetty. Kaavioihin on lisäksi merkitty tietorakenteet XML ja Lignum katkoviivoilla. Käyttötilalle ominaiset muut toiminnot on esitetty ilman laatikoita tilan sisällä.

Muokkaustilalla on lisäksi alitilat AddPoints, SetScale ja SetCenter. CreateSection vaatii, että oksanhaara on valittu ja kysyy sitten uuteen poikkileikkaukseen liittyvää kuvaa ja lisää tämän rakenteisiin. Tämän jälkeen siihen voidaan lisätä ketjupisteitä, jotka määrittävät erityyppisten alueiden ääriviivat. Oletustila ja useimmin käytössä oleva tila on AddPoints, jossa pisteitä lisätään puskuriin. FinishCircle muodostaa



Kuva 5.8: Esimerkkikohde lehmus130 (View Photo -elementti)

ketjun puskurin pisteistä, kysyy ketjun tyyppityksen ja lisää nämä tietorakenteisiin. `CreateBranch` lisää uuden haarautuman ja `InsertDamage` vaurion. `SetDirection` asettaa pohjoisvektorin, `SetScale` mittakaavan ja `SetCenter` kasvukeskipisteen.

Visualisointitilassa kolmiulotteinen malli luodaan ja esitetään käyttäjälle. Mallia voi kääntää hiirellä tai painikkeilla ja sen kokoa muuttaa. Lisäksi puun hierarkinen näkymä ja välilehtielementti ovat näkyvissä, jolloin muuttujia kuten pinta-aloja ja rungon poikkileikkausta voidaan tarkastella mallin rinnalla. Ohjelmistossa pituuden yksikköinä käytetään aina senttimetrejä.

Perusnäkyvän yläreunassa ovat (1) *File*-, *Edit*- ja *Tools*-valikot. *File*-valikko sisältää *New*-, *Open*-, *Save*-, *SaveAs*- ja *Exit*-toiminnot. *Edit*-valikossa on *Setup Tree*-toiminto, jonka avulla voidaan asettaa puuhun liittyvät arkistointitiedot. Samat tiedot kysytään puun luomista aloitettaessa. *Tools*-valikon alta löytyvät puun rakenteen muokkaamisessa käytetyt komennot: *Create Branch*, *Create Section*, *Finish Circle* ja *Insert Damage* sekä *Set Direction*.

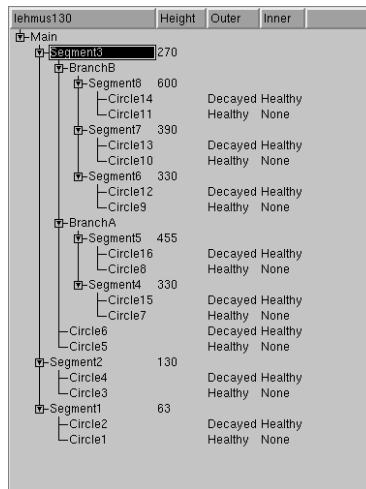


Kuva 5.9: Työkalupalkki

Muokaus- ja visualisointitilaa sekä muokkauksessa käytettävää syöttötilaa voidaan myös vaihtaa. Muokkauksen syöttötiloja ovat *Set Scale*, *Add Points* ja *Set Center*. *View Photo*, kuvassa 5.8, sisältää puun valokuvan asettamisen ja näytön erillisessä ikkunassa. *Zoom Level* vaihtaa poikkileikkausvalokuvan näytön suurennosta muokkauksessa vaikuttamatta kuitenkaan syötettäviin arvoihin, joten pisteet voidaan syöttää suurennoksesta riippumatta. Kun suurennosta muutetaan, syötetyt pisteet skaalautuvat vastaavasti.

Kuvan 5.9 Työkalupalkkiin (2) on sijoitettu ikoneina samat toiminnot kuin valikoihin. Järjestyksessä vasemmalta oikealle työkalupalkissa sijaitsevat *New*, *Open*, *Save*, *Print*, *View Photo*, *Editing* (muokkaustila), *Visualizing* (visualisointitila), *Set Direction*, *Set Scale*, *Set Center*, *Add Points*, *Finish Circle*, *Create Section*, *Create Branch*, *Insert Damage* ja *Zoom Level*. Näistä *Editing*, *Visualizing*, *Set Direction*, *Set Scale*, *Set Center* ja *Add Points* ovat ohjelman tilaa ilmaisevia painikkeita. Hiiren vasemman painikkeen napauttamisen aiheuttama toiminne muokausikkunan päällä riippuu ohjelmiston muokkaustilasta (*Set Scale*, *Set Center* tai *Add Points*). *New* tarkistaa onko tallentamattomia muutoksia, tyhjentää työalueen ja aloittaa uuden puun. Muiden painikkeiden toiminta on kuvattu tarkemmin alla.

Piirtoalueen jakavat muokaus- ja visualisointi-ikkuna (3) riippuen ohjelmiston tilasta. Muokaus-ikkuna sisältää poikkileikkausvalokuvan, jonka päällä sovelluksen käyttäjä syöttää terveen puun, lahon ja onton määrittävät reunaviivat mallintamista varten. Reunaviivat tallennetaan LIGNUM-tietorakenteen laajennettuina elementteinä, joka pidetään valmiina visualisointia varten kaikissa työn vaiheissa. Tällöin käyttäjä voi missä vaiheessa tahansa vaihtaa muokaus- ja visualisointitilan välillä.

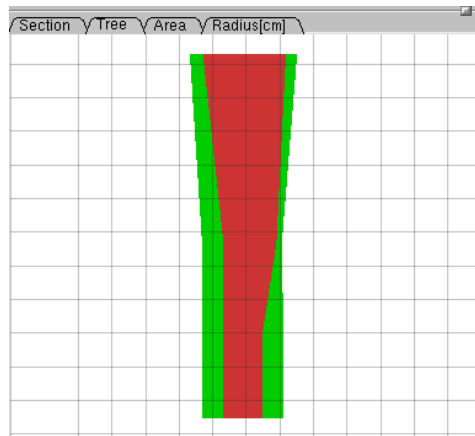


Kuva 5.10: Puun hierarkinen listakuvaus

Muokkaus- ja visualisointi-ikkunan yläpuolella olevat painikkeet (4) säätävät visualisointitilassa pyörityskulmaa akseleiden ympäri ja mallin suurennosta. Mallia on mahdollista pyörittää myös vetämällä hiirtä nappi alas painettuna visualisointi-ikkunan päällä, jolloin pyöritys vaikuttaa x- ja z-akselien ympäri. Viimeinen painike (%R) asettaa muokkaustilassa näkyvän apuviivan, jota käytetään kaatumisriskin arvioinnissa. Lukuarvo kuvaa terveen puun prosenttiosuutta rungon säteestä, ja oletusarvo 30 vastaa Mattheckin sääntöä (Mattheck *et al.*, 1992). Tämän määritelmän mukaan apuviiva voi tietyissä tapauksissa leikata rungon ulkoreunan kuvaavan viivan, jos ulkoreunan pisteestä asetettuun kasvukeskipisteeseen piirretty jana leikkaa kyseisen viivan.

Rungon haara, puusegmentti tai tasokäyrä valitaan hierarkisesta listasta (5) kuvassa 5.10. Jatkossa elementin valitseminen merkitsee elementin valitsemista kyseisestä listasta, jolloin elementti korostuu. Tasokäyrän valinta näkyy myös vahvistettuna muokkausikkunassa. Syötettyjä elementtejä voidaan muokata oikealla hiiren napilla myös syöttämisen jälkeen hierarkisen listan kautta.

Terveen puun ja lahon alueen sekä onkalon kuvaavat tasokäyrät kuvataan poikki-



Kuva 5.11: Puun päärungon pystypoikkileikkaus

leikkausnäyttöihin värikoodattuina (6). Tervettä puuta vastaa vihreä, lahoa aluetta punainen ja onkaloa musta väri. Poikkileikkauksnäytöstä voidaan myös tulkita syötettyjä arvoja. Mittakaava, kasvukeskipiste ja suunta päivittyvät näyttöön muokkaamisen aikana ja virhetapauksen, kuten esimerkiksi puuttuvan mittakaavan määrittämisen, huomaa helposti. Apuristikon viivat on piirretty kuvaan 25 cm välein. On myös mahdollista tarkastella pystypoikkileikkausta kasvukeskipisteen suhteen päärungon alueella kuten esimerkiksi kuvassa 5.11. Oksia tai haaroja ei esitetä tässä muodossa. Haluttua leikkauskulmaa voidaan säätää y-akselin kulman painikkeilla (4).

Section	Tree	Area	Radius[cm]	
	Healthy	Decay	Cavity	=[cm ²]
30	1878 (68.5)	864 (31.5)	0 (0.0)	2742
130	1336 (64.6)	731 (35.4)	0 (0.0)	2067

Kuva 5.12: Valitun poikkileikkauksen pinta-alat terveelle ja laholle alueelle sekä onkalolle

Section	Tree	Area	Radius[cm]
	Healthy	Decay	Cavity
30	29.5	16.6	0.0
130	25.7	15.3	0.0

Kuva 5.13: Valitun poikkileikkauksen keskimääräiset säteet terveelle ja laholle alueelle sekä onkalolle

Poikkileikkausten terveen ja lahon alueen sekä onkaloiden pinta-alat neliösenttimet-

reissä ja prosenttiosuuksina nähdään välilehtielementin Area-lehden alla kuten kuvassa 5.12 ja keskimääräiset säteet vastaavasti kuvassa 5.13. Keskimääräiset säteet lasketaan alueen pinta-alan perusteella, joka sovitetaan kaavaan säde $r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$, jossa A on kaavan 5.3 mukaan laskettu kokonaispinta-ala. Huomioitava on, että pinta-alana tässä on käytetty terveän puun, lahon alueen ja onkalon tasokäyrien rajaamien alueiden kokonaispinta-alaa, jos alueita on useita erillisiä poikkileikkauksen alueella. Lukuarvo vastaa leikkauksen kaikkien samantyyppisten tasokäyrien rajaaman alueen pinta-alaltaan yhtäsuuren ympyrän sädettä.

Ohjelman muokkaus- ja visualisointi-ikkunan sekä hierarkisen listan ja välilehtielementtien (3, 5 ja 6) kokoja voidaan tarvittaessa muuttaa, jolloin kyseiset elementit täyttävät vapaan tilan automaattisesti. Muokkausikkunan valokuva säilyttää sivujensa mittasuhteet ja työkalupalkista nähdään käytetty suurennos (Zoom Level). Suurennos voidaan asettaa arvoihin 2:1, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 tai "To Fit", jolloin kuva täyttää koko piirtoalueen. Ikkunan koon muuttuessa kuva sovitetaan aina käytettävissä olevaan tilaan.

Tietyt toiminnot ovat poissa käytöstä muokkaus- tai visualisointitilan valinnasta riippuen. Visualisointitilassa kolmiulotteiseen malliin ei voi suoraan lisätä uutta puusegmenttiä, vaan se täytyy tehdä muokkaustilassa, koska tasokäyriä lisättäessä käyttöliittymästä tarvitaan valokuvalla mahdollisimman paljon tilaa.

Kolmiulotteinen malli muodostetaan uudelleen tallennetusta tiedosta aina visualisointitilaan vaihdettaessa. Mallin uudelleenmuodostaminen ei saa kestää liian kauan, ettei yleinen käytettävyys heikkenisi. SGI Octane2 -ympäristössä malli muodostuu syötetystä tiedosta ripeästi alle viidessä sekunnissa pisteiden lukumäärästä riippuen, mikä on riittävän nopeaa.

Mallin visualisoinnissa on tarkoituksella jätetty puusegmenttien pohjat piirtämät-

tä, jolloin hahmon läpi voi katsoa pituussuunnassa. Tämä helpottaa mallin kolmiulotteista hahmotusta ja antaa käyttäjälle enemmän tietoa myös mallin sisäpuolen muodoista.

Varjostusmallina on käytetty tasaista varjostusta. Muita vaihtoehtoja olisivat voineet olla esimerkiksi Gouraud tai Phong. Gouraud'n varjostuksessa jokaiseen kolmion kärkipisteeseen asetetaan valoisuusarvo ja näiden välinen valoisuusarvo interpoloidaan kolmion alueen yli. Phongin varjostusmallissa kärkipisteisiin asetetaan normaalivektorit, joita interpoloidaan alueen yli pyyhkäisyviiva kerrallaan. Hearn ja Baker (1994) Kyseessä on kuitenkin kolmiulotteinen rakennemalli, jolle on tärkeämpää esittää syötetyt tiedot tarkasti visuaalisuuden sijasta, joten tasainen varjostus on tähän tarkoitukseen selkein varjostusmalli. Esimerkki sovelluksen tuottamasta mallista on esitetty Luvussa 6.

5.7.2 Uuden puun luominen

Uusi työ aloitetaan New-toiminnolla, jonka jälkeen ponnahdusikkunassa voidaan asettaa kohteen puulajin nimi, sijainti, kaatopäivämäärä, valokuva sekä sarja- ja rekisterinumero. Sarja- ja rekisterinumerot voivat sisältää myös merkkejä. Malliin on tämän jälkeen luotu päärungon alku, jota ei erikseen lisätä (ks. Haarautuminen). Puulaji ja sarjanumero muodostavat yhdessä hierarkisessa listassa käytetyn tunnisteen. Seuraavat kappaleet kuvaavat kohdittain kuinka puun rakenne luodaan.

5.7.3 Puusegmentin syöttäminen

Puusegmentti koostuu leikkauksesta, joka on määritelty segmentin yläreunan perusteella. Annetun valokuvamateriaalin perusteella ensimmäinen leikkaus on otettu tie-

tyllä korkeudella ja nollassa ei erikseen ole kuvaa, joten käytännössä sovellus piirtää ensimmäisen segmentin aina symmetrisenä särmiönä. Puusegmenttien syöttäminen perustuu kuvamateriaalin, joten Create Section -toiminto kysyy ensimmäiseksi kuvatiedoston nimeä ja tämän latauksen jälkeen leikkauksen korkeutta puun runkoa pitkin senttimetreissä. Ennen leikkauksen syöttämistä täytyy valittuna olla joko "Main"-runko tai "Branch"-haara. Sovellus tukee ainakin JPG- ja PNG-kuvamuotoja. Kaikkia käytettävissä olevan Qt-kirjastoversion tukemia kuvamuotoja voidaan periaatteessa käyttää.

Lisäksi on määritettävä leikkauksen mittakaava (Set Scale) ja kasvukeskipiste (Set Center). Asetettavissa on myös leikkauksen suunta (Set Direction), joka on oletusarvoisesti 0, jolloin syötettyjä tasokäyriä ei kierretä kasvukeskipisteen ympäri mallinusta varten.

5.7.4 Reunaviivojen lisääminen

Add Points -tilassa pisteitä voidaan syöttää napauttamalla hiirellä kuvan päällä. Pisteet syötetään myötäpäivään. Jos pisteiden syöttö halutaan jättää kesken, voidaan vaihtaa valittua segmenttiä tai visualisointitilaa, jolloin syötetyt pisteet tyhjenetään. Kun ketju on valmis, valitaan Finish Circle -toiminto, jolloin ponnahdusikkuna kysyy ketjun tyypitystä. Heti kun rungon uloin tasokäyrä on syötetty, piirretään kuvan päälle %R-painikkeen mukainen punainen apuviiva.

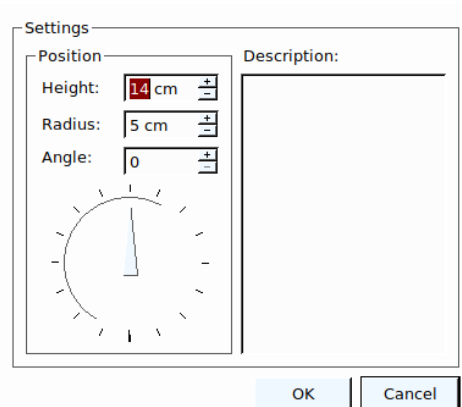
5.7.5 Haarautuminen

Päärungosta poikkeavat haarat aloitetaan Create Branch -toiminnolla (kuvan 5.9 työkalupalkin kolmanneksi viimeinen painike). Ennen haaran syöttämistä on oltava

valittuna puusegmentti, johon haara liittyy. Haaraa luotaessa asetetaan kyseisen haaran kompassisuunta ja kulma asteissa suhteessa runkoon, josta oksa haarautuu.

5.7.6 Vauriot

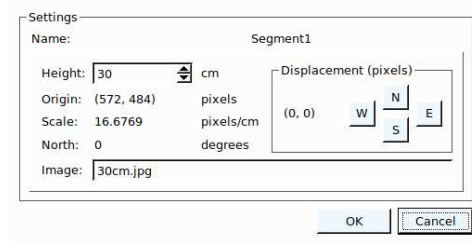
Vauriot liittyvät haaraan, joiden alle vauriot voidaan syöttää Insert Damage -toiminnolla (kuvan 5.9 työkalupalkin toiseksi viimeinen painike). Haara täytyy valita hierarkisesta listasta ennen määrittystä. Vaurioille määritetään sijainti ja lyhyt kuvaus kuten kuvassa 5.14.



Kuva 5.14: Vaurioiden asetusikkuna

5.7.7 Runkosegmentin siirtymä

Napauttamalla oikeaa hiiren nappia hierarkisessa listassa segmentin nimen päällä saadaan esiin ponnahdusikkuna, jonka kautta on mahdollista asettaa myös yksittäisten runkosegmenttien siirtymiä senttimetrin tarkkuudella kuten kuvassa 5.15. Tällä toiminnolla on mahdollista poikkeuttaa yksittäisiä segmenttejä normaalitapauksesta, jossa kasvukeskipisteet sijoittuvat samalle pysty akselille.



Kuva 5.15: Runkosegmentin asetuskikkuna

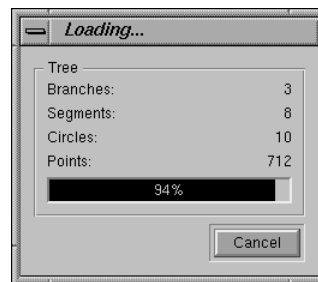
5.7.8 Puun valokuva

Puusta ennen kaatoa otetun valokuvan voi syöttää ohjelmaan tarkasteltavaksi. Valokuva asetetaan puuta luodessa tai Edit-valikon alta Setup Tree-komennolla ja sitä katsellaan erikseen avautuvassa ikkunassa (5.8). Syntynyttä mallia voi näin muokkauksen ja visualisoinnin aikana verrata mallinnettavaan kohteeseen.

5.7.9 Tietojen avaaminen ja tallennus

Muokattavan puun voi tallentaa tiedostoon, jotta työtä voi jatkaa myöhemmin. Tiedostoa avattaessa esitetään lukemisen edistymisen prosentteina ja luettujen haarojen, leikkausten, tasokäyrien ja pisteiden lukumääränä. Avaamisen voi myös keskeyttää ja ohjelmisto antaa virheilmoituksen, jos tiedoston avauksessa tapahtuu virhe. Lisäksi ohjelmistosta poistuttaessa varoitetaan, jos muokattua työtä ei ole talletettu tai kyseisellä nimellä on jo olemassa oleva tiedosto.

Tiedoston avausprosessin kesto riippuu kuvien koosta. Koekäytössä JPEG-muotoisilla kuvilla tyypillinen kymmenen puusegmentin valmiiksi tehty mallitiedosto avautuu noin 15 sekunnissa, jolloin avaamisen etenemistä kuvaava ikkuna (5.16) on tarpeen.



Kuva 5.16: Tiedoston avaamisen eteneminen

5.7.10 Mallin visualisointi ja analyysi

Mallinnuksen tulosta voidaan tarkastella missä työn vaiheessa tahansa. Kolmiulotteinen malli luodaan tallennetun tiedon pohjalta aina visualisointitilaan vaihdettaessa. Malli keskitetään ja sovitetaan automaattisesti ikkunan koon mukaan ja sen pyörittäminen onnistuu joko hiirellä vetämällä tai ikkunan yläreunan painikkeilla.

Visualisointitilassa puusegmenttien tasoittaminen (Tiling) voidaan asettaa oikealla hiiren napilla. Tiling-asetuksen ollessa merkitty tasokäyrät yhdistetään ja piirretään muuten toisistaan riippumattomina lieriöinä. Ponnahdusvalikosta voidaan asettaa myös tarkasteltava pinta terveen puun, lahon alueen ja onkalon välillä sekä näiden yhdistelmänä. Oletusarvoisesti visualisoidaan kaikki pinnat tasokäyrät yhdistäen.

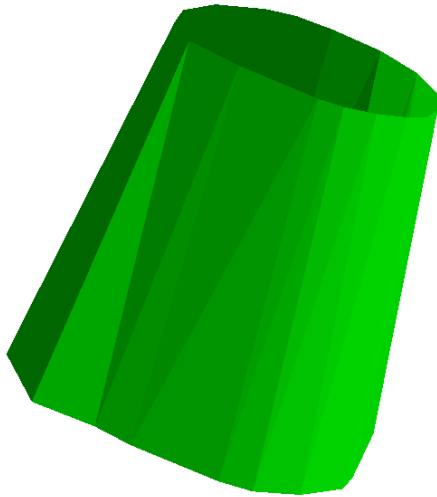
Puun poikkileikkausta voidaan tarkastella rungon halkaisijan tai pituuden suhteen. Pitkittäisleikkaus on myös tasoitettu ja vastaa kolmiulotteisesta mallista tehtyä poikkileikkausta y-akselin kulman suhteen. Y-akselin kulmaa säädetään visualisointi-ikkunan yläpuolisella painikkeella.

Luku 6

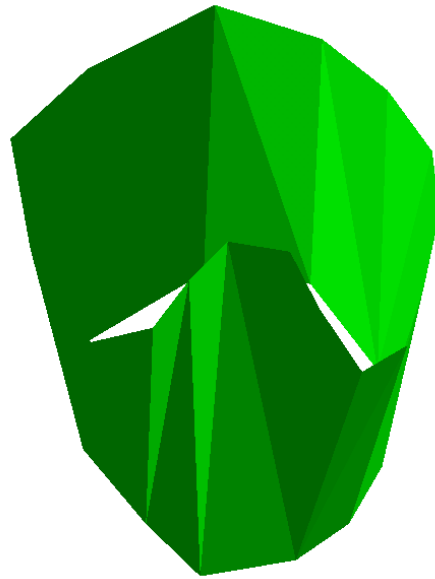
Testi

Algoritmin rajoja testattiin valituilla tapauksilla, jotka kuvaavat luonnossa esiintyviä sekä mahdottomia tapauksia. Luonnollisia tapauksia ovat mitkä tahansa ei-konveksit alueen rajaavat monikulmiot, jotka eivät kuitenkaan leikkaa itseään. Testin tuloksista riippuu mitä ohjelman käytössä tulee mahdollisesti ottaa huomioon hankalien tapausten yhteydessä. Osa testeistä on luonnonpuissa mahdottomia tapauksia.

Ohjelmistoa on testattu antamalla käyttäjän luoda valitsemastaan puusta malli ohjeiden avulla oman näytemateriaalinsa pohjalta. Käyttäjä on saanut testata ohjelmaa myös sen kehitysvaiheessa ja antamallaan palautteellaan vaikuttanut sen ulkomuotoon ja toimintaan. Tässä tapauksessa puuksi on valittu *lehmus130*, jonka esimerkkikuva on esiintynyt myös Luvussa 5. Seuraavassa esitetään käyttäjätestin tulokset.



Kuva 6.1: Konvekksi

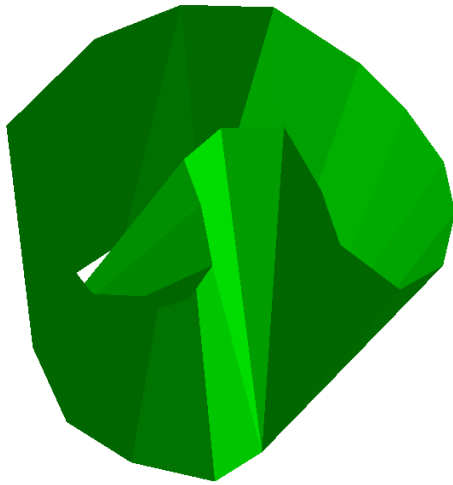


Kuva 6.2: Ei-konvekksi

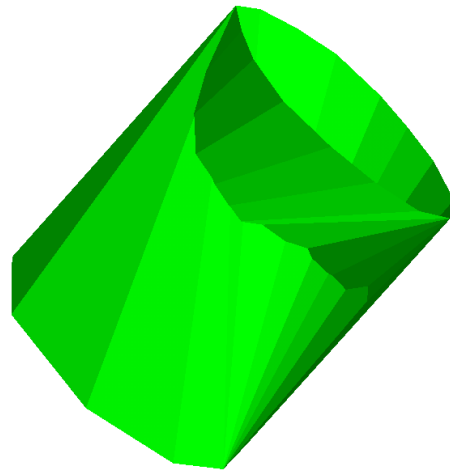
6.1 Algoritmin testaus

Kuvassa 6.1 on esitetty yleisin tapaus, joka ohjelmistoa käyttäessä kohdataan. Tässä puun runko muodostaa konveksin pinnan ja kaikki reunaviivat on määritetty myötävään. Myös ei-konvekksi tapaus, jossa keskipiste jää rajatun alueen sisäpuolelle, on yleinen ja tämä esitetään kuvassa 6.2. Kolmiulotteisen mallin kolmioinnissa ei havaita ongelmia kummassakaan tapauksessa.

Tapauksessa ”hevosenkenkä” kuvassa 6.3 ylempi reunaviiva kiertää määritellyn keskipisteen niin, että tämä keskipiste jää rajatun alueen ulkopuolelle. Kolmiointiratkaisu näyttää päällisin puolin hyvältä, mutta voisi olla luonnollisempi. Algoritmi kiertää alemmaa kehää eteenpäin tiettyyn pisteeseen asti ja yhdistää ylemmän kehän pisteiden kanssa kolmioita tähän pisteeseen kunnes kehäkulma kasvaa jälleen suuremmaksi, mitä alemman kehän pisteelle oli laskettu. Ratkaisu on riittävä, mutta tavallisessa ei-konveksissa tapauksessa yllä kuvassa 6.2 algoritmi tuottaa luonnollisen kolmiointi-



Kuva 6.3: "Hevosenkengä"

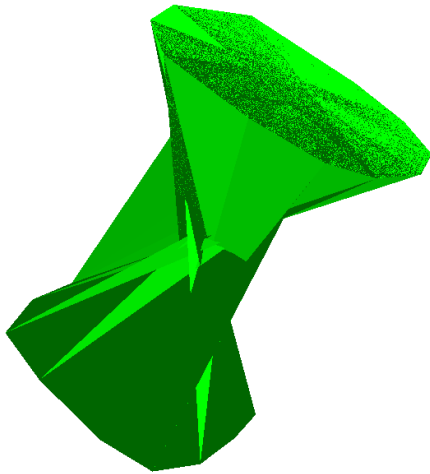


Kuva 6.4: Virhemäärittely: ylempi vastapäivään

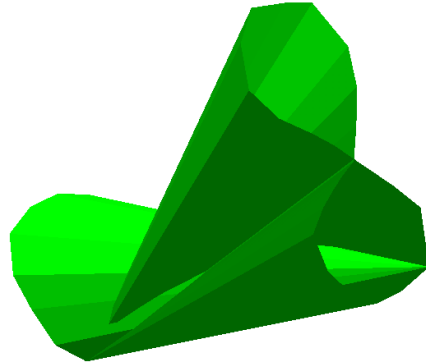
ratkaisun. "Hevosenkengästä" saadaan kuitenkin ei-konvekssi tapaus myös siirtämällä leikkauksen keskipiste rajatun alueen sisäpuolelle.

Kuvassa 6.4 on esitetty mitä tapahtuu, jos käyttäjä määrittelee alemman reunaviivan oikein myötäpäivään mutta ylemmän vastapäivään. Koska tapaus on käyttöohjeiden ja algoritmin ehtojen vastainen, lopputulosta ei voida taata. Molemmat reunaviivat olisi määriteltävä samaan suuntaan myötäpäivään, mutta aloituspisteellä sijainnilla ei ole vaikutusta kolmiointiin. Algoritmi lukitsee yhden pisteen kehältä ja kolmioi toisen kehän pisteitä tähän ja vasta kun kehä on käyty läpi, yhdistetään toisen kehän pisteet viimeiseen pisteeseen. Algoritmi ei toistaiseksi käännä toisen kehän pisteitä ympäri ja käsittele niitä lopusta alkuun. Ratkaisuna saadaan kuvan esittämä tulos.

Myös kuva 6.5 on virhemäärittelytapaus. Tässä molemmat reunaviivat on määritelty ohjeita rikkoen vastapäivään, mutta algoritmi yrittää silti tuottaa ratkaisun. Algoritmi olettaa kiertävänsä pisteitä myötäpäivään ja lopputulos on luonnoton. Tästä puuttuu tarkistus, ovatko pisteet määritelty myötä- vai vastapäivään.

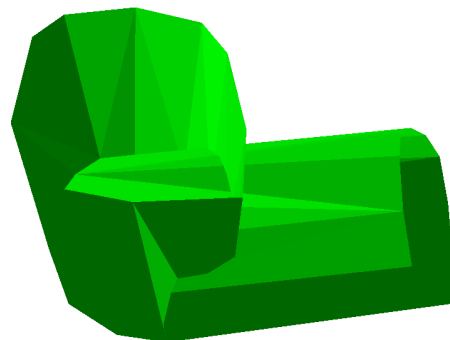


Kuva 6.5: Virhemääritys: Molemmat reunaviivat vastapäivään



Kuva 6.6: Virhemääritys: ”Kahdeksikko”

”Kahdeksikko” kuvassa 6.6 voitaisiin määritellä myös niin, että kehä ei risteä itsensä kanssa tai jakaa tapauksen kahteen eri haaraan. Tällaisenaan tapaus on kuitenkin virheellisesti määritelty ja tästä syystä luonnollista lopputulosta ei voida taata. Algoritmi käyttäytyy kuin toinen kehä olisi määritelty vasta- ja toinen myötäpäivään. Se lukkiutuu yhteen pisteeseen kehältä kun kulmavertailu antaa väärän tuloksen ja kiertää sitten toisen kehän läpi kolmioinnissa.



Kuva 6.7: Haaratuminen

Kuva 6.7 esittää kuinka algoritmi käsittelee tyypillisen rungon haaratumistapauksen. Vasemmalla kuvataan malli sivusta katsottuna, ja tämä näyttää luonnollisel-



Kuva 6.8: Työ aloitettiin kannosta korkeudelta 63 cm

ta. Oikealla kuitenkin nähdään, että kolmiointi risteää itsensä kanssa mallin sisällä. Ohjelmistoa käytetään rungon ja lahopatsaiden muodon tarkasteluun, sekä lahon pinta-alojen laskemiseen, joten tämä on hyväksyttävissä vaikkakin haarautumiseen liittyvää kolmiointia voisi kehittää luonnollisemman näköiseksi.

Mainittavaa on myös tapaus, jossa onkalon tai lahon alueen kehäviiva on määritelty vain toisella käsiteltävistä tasopinnoista. Tässä tapauksessa kolmiointia ei piirretä lainkaan. Jos kolmiointia yritettäisiin, pitäisi arvata kuin pitkälle onkalo tai laho alue ulottuu, koska leikkausten väli voi olla pitkä. Tarkkaa arviota tästä ei kuitenkaan ole olemassa.

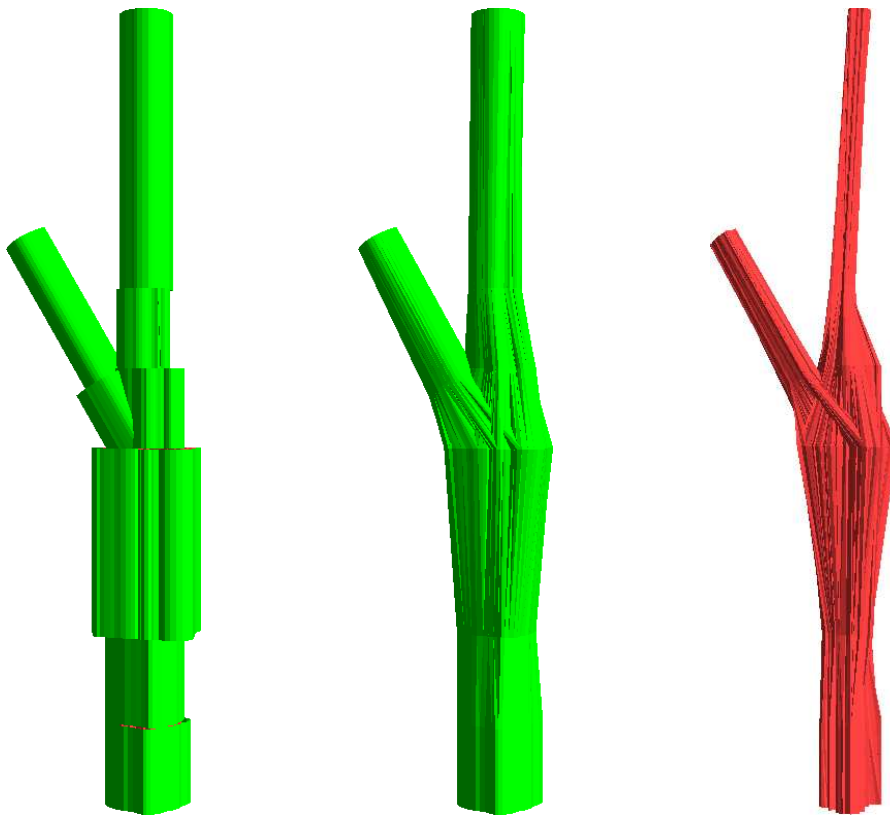
6.2 Käyttäjätesti

Käyttäjää on ohjeistettu paperille kirjoitetulla ohjeilla ja sanallisesti ennen testiä ohjelman käytöstä ja hän on jo kokeillut ohjelman aiempia versioitakin. Testin aikana sanallista ohjausta vältettiin, koska tarkoituksena oli löytää parannettavia seikkoja käyttöliittymässä. Testitulannetta ei nauhoitettu.

Käyttäjätestissä mallinnettavana kohteena oli haarautuva puu (lehmus130), jonka poikkileikkaukset sisälsivät lahoja alueita ja onkaloita. Ensimmäinen leikkaus on otettu 63 cm korkeudelta, josta erotellaan lahon alue (kuva 6.8). Puun haarautuminen voidaan mallintaa kahdella eri tavalla. Koska toinen haara jatkuu lähes ensimmäisen osan suuntaisena, voitaisiin ajatella, että päärunko jatkuu latvaan asti. Tässä tapauksessa on kuitenkin mallinnettu kaksi päärungosta erkanevaa haaraa, niin pitkälle kuin poikkileikkausnäytteitä on otettu. Tällöin molempien haarojen suuntaa voidaan hienosäätää tarvittaessa, mutta pystypoikkileikkaus rajoittuu silti päärunkoon.

Seuraavat leikkaukset päärungossa ovat korkeuksilta 130, 270 cm, jonka jälkeen malli haarautuu. Lyhyemmän haaran leikkaukset ovat 330 ja 455 cm ja pidemmän 330, 390 ja 600 cm korkeuksilta. Huomattavaa on, että ohjelmisto piirtää ensimmäisen runkosegmentin yläreunan ensimmäisen leikkausnäytteen tasolle ja aloittaa mallintamisen nollatasolta. Jokaisesta leikkauksista erotellaan terveen puun ja lahon alue hiirellä naputtelemalla ja määritellään mallin haarautuminen.

Käyttäjätesti oli onnistunut vaikka tutkimuskäytössä reunaviivojen määrittämissä on tavallisissa mallinnustapauksissa enemmän kuin tässä. Tässä testitulanteessa riitti kokeilla ohjelman toimintaa. Todetaan, että viime hetkillä ohjelmaan lisätystä Mattheekin apuviivaominaisuudesta poikkileikkauspinnan päällä on apua ja apuvii-



Kuva 6.9: Kolmiulotteinen malli ilman tasoitusta ja tasoituksen kanssa sekä mallin sisältämä lahopatsas

van suhteellisen koon määrittäminen on hyvä ominaisuus, koska puun romahtamiskynnystä voidaan näin arvioida. Ohjelmisto täytti tehtävänsä eikä käyttäjä löytänyt huomauttamista.

Kuva 6.9 esittää tuloksena syntyneen mallin ensin alkuperäisessä muodossaan ja tasoituksen kanssa. Lisäksi kolmannessa kuvassa on esitetty lahopatsas. Onkalo ei tässä puussa loppujen lopuksi ollut suuri.

Luku 7

Johtopäätökset

Ohjelmistosta on hyötyä laskettaessa lahopinta-aloja ja prosenttiosuuksia. Terveen puun, lahon ja onton alueen tasokäyrien määrittäminen voi muuttua jälkikäteen ja lasketut pinta-alat päivittyvät niiden mukaan. Haluttaessa kolmiulotteista mallia voidaan tarkastella osittain, esimerkiksi pelkästään lahoa tai ontoa osaa puusta, jolloin on mahdollista tehdä tarkempia lahoanalyyskejä. Mattheekin 30 prosentin säädettävä apuviiva auttaa kaatumisriskin analysoinnissa. Myös tutkimusaineiston hallinta helpottuu, koska mallinnettujen puiden tallennetut tiedot muodostavat digitaalisen tietokannan.

Kolmiulotteisen mallin avulla voidaan hahmottaa lahopatsaan muodostumista puun sisällä, jota verrataan puusta otettuun valokuvaan. Patsaan pystypoikkileikkaus auttaa edelleen hahmottamaan lahon alueen ja onkalon muotoa ja yhdessä pinta-alalaskelmien kanssa siitä voidaan päätellä lahon etenemistä suhteessa ulkoiseen vaurioon. Useita luotuja malleja vertaamalla voidaan tutkia mahdollisia yhteyksiä tiettyjen lahoajien ja lahopatsaan muodon välillä sekä kaksi- että kolmiulotteisessa tilassa. Vastaavaa ohjelmistoa puustopuiden tutkimuksessa ei ole aiemmin käytetty.

7.1 Laatoitusalgorithmi

Laatoitusalgorithmi, kuten se on ohjelmassa toteutettu, on lähellä Keppelin toteutusta (Keppel, 1975), koska laatoituskolmion muoto päätellään heuristisesti. Rajaviivat ja niiden sisältämät pisteet käydään läpi kiertokulman perusteella. Puun rungon haarautuessa haaran poikkileikkaukset eivät ole samassa tasossa päärunгон kanssa, jolloin päättely on toteutettava kiertokulman ja laskennallisen pisteiden välisen etäisyyden perusteella. Haarautumisen mallintaminen on täten mahdollista kun oksa on päärunkoon nähden nollan ja 90:n asteen välisessä kulmassa. Lisäksi vaurioiden sijoittaminen segmentin kylkeen on mahdollista. Vauriot kuvataan symbolisesti pallolla.

Kolmiulotteisen mallin muodostamista varten kehitetty algoritmi selviytyy mallinnettavista kohteista hyvin määritellyissä rajoissa. Leikkausten rajakäyrät voivat olla konvekseja tai ei-konvekseja, kunhan keskipiste rajautuu käyrän sisäpuolelle eikä käyrä leikkaa itseään. Itseään leikkaavat käyrät, kuten Luvussa 6 esitetyn testin mukainen ”kahdeksikko”, on mahdollista määrittellä myös ilman risteämistä. Määrittelymällä käyrät näin, malli on jälleen rajaehtojen mukainen.

Puun haarautuessa siitä luodun kolmiulotteisen mallin laatat voivat leikata toisensa, koska tasokäyrät yhdistetään suoraan toisiinsa. Tämä ei vaikuta mallinnuksesta saatavaan hyötyyn, koska tässä tarkastellaan ulkokehää. Tältä osin visualisoinnissa on kuitenkin vielä parannettavaa.

Kolmiulotteiseen malliin voisi liittää murtumisriskin arviointia puulajikohtaisten murtumislujuuslaskelmien perusteella. Lahon etenemistä voisi myös olla mahdollista ennustaa. Nämä tarvitsisivat kuitenkin vielä lisää tämän työn ulkopuolista tutkimusta.

7.2 Käyttöliittymä

Ohjelman käyttöliittymä on luotu käyttäjän ja työn ohjaajan toiveita kuuntelevalla. Lopuksi on järjestetty käyttäjätesti. Testin perusteella ohjelma on looginen ja helppokäyttöinen vaikka käyttöä helpottavia aputekstejä voisikin vielä lisätä.

7.3 Siirrettävyys

Periaatteessa ohjelma on käännettävissä ainakin MacOS X, Windows, Linux ja IRIX-alustoille käytettyjen ohjelmointikirjastojen määritysten mukaisesti. Käytännössä kehityksen aikana ilmeni ongelmia kirjastoversioiden ja kirjastojen versioiden välisten ominaisuuserojen vuoksi. Ominaisuuserot johtuivat Windows- ja muiden alustojen kirjastojen lisenssieroista. Qt-kirjaston versio 4 yhdistää lisenssierot ja nyt myös Windowsille on tästä saatavilla vapaa versio.

7.4 XML

XML-muotoiseen tiedostoon voidaan lisätä uusia tietoelementtejä. Jos tiedostoon lisättäisiin kaikki LIGNUM-mallin muuttujat, puuta voitaisiin kasvattaa erillisessä aiemmin käytetyssä ohjelmassa vuosi kerrallaan. Kasvumallia varten tiedostosta luettaisiin sille tarvittavat muuttujat. Tässä toteutettu ohjelmisto lukee omat muuttujansa ja jättää huomiotta ne joita ei ole määritelty. Liitteessä A kuvataan tiedostoon tallennettavat elementit. Käytetty QtXML-kirjasto ei tue DTD:tä (Document Type Definition), mutta esimerkiksi Xerces-kirjastoon siirtymällä olisi mahdollista validoida luettava tiedosto ennen käyttöä helpommin. Tässä työssä validointi on suoritettu ohjelmakoodissa.

7.5 Tavoitteissa onnistuminen

Ohjelma ja käyttöliittymä on kehitetty syklisesti käyttäjien ja ohjaajan toiveiden mukaisesti ja toimintoja on lisätty kehitystyön aikana. Lopuksi käyttäjä on pienellä alkuopastuksella soveltanut ohjelmaa omaan kuvamateriaaliinsa ja luonut alkuperäistä puuta vastaavan mallin. Kolmiulotteista mallia tarkastelemalla voidaan tulkitella lahon ja onton esiintymistä ja leviämistä puussa sekä arvioida puun kaatumisriskiä Mattheckin 30 prosentin sääntöön (Mattheck *et al.*, 1992). Ulkoisten vauroiden esiintymisen merkitseminen kolmiulotteiseen malliin auttaa tutkijoita muiden vastaavien luonnossa esiintyvien puiden kaatumisriskin ulkoisessa arvioinnissa ja kolmiulotteinen visualisointi ja puista tallennettujen tietojen muodostama tietokanta auttavat puiden kunnan arvioinnissa verrattuna pelkästään poikkileikkauksien ja mittaus-ten tarkasteluun.

Käyttäjättestissä Luvussa 6 lopullinen malli vastaa alkuperäisen puun muotoa ottaen huomioon käytettävissä olleen näytemäärän. Näytemäärää eli poikkileikkauksia ja ohjauspisteitä lisäämällä mallista saadaan luonnollisesti tarkempi ja tasaisempi, mutta puun mallintamistyöhön kuluisi vastaavasti enemmän aikaa.

PUULA-projektissa ohjelmaa voidaan soveltaa samaan tapaan kuin käyttäjättestissä vaikka materiaali ja tavoitteet ovat yleisesti hieman erilaisia. Tarkasteltavista puista on eroteltu lahon puun osuus, joka sisältää myös mahdollisen onton. Leikkausten väli on tässä tapauksessa säännöllisesti metrin luokkaa. Lahopatsaan korkeutta voidaan arvioida ohjelmassa, mutta patsasta ei ekstrapoloida leikkauksien perusteella. Täten tarkastelu rajoittuu leikkauksen tasoon ja leikkauskuvien tiheyteen. Tämä oli tietoinen valinta, koska vielä ei tarkalleen tiedetä miten lahopatsaan korkeus riippuu poikkileikkauksen muodosta tai läpimitasta. Tarkkuutta voidaan kuitenkin parantaa leikkausten tiheyttä lisäämällä ja mallin perusteella on mahdollista arvioida lahopat-

saan korkeuden ja halkaisijan suhdetta, joka on tärkeää arvioitaessa lahon osuutta tukkipuussa ja vaadittavaa sahauskohtaa. Lahopuuta ei haluta laatuluokan puuhun, mutta arviointivirheen takia sahauksia voidaan joutua tekemään useita, joka johtaa hukattuun materiaaliin ja työaikaan. Sahauskohdan arviointi on tavallisesti tehty silmämääräisesti.

7.6 Kehitysnäkymät

Automaattiset mittausmenetelmät ovat tulossa myös metsäntutkimukseen, jolloin tarvitaan osaamista esimekiksi laskennallisen geometrian alalla. Lahon luokittelu jää tässä ohjelman käyttäjän vastuulle, jos kuvassa on tulkinnanvaraisuutta. Lahon automaattiseen tulkintaan valokuvista ei tässä työssä ole lähdetty, koska tämä on todettu toistaiseksi epäluotettavaksi. Kuvan analysoinnilla olisi ollut mahdollista tulkita lahon aluetta, mutta kuvien valmistelulta olisi vaadittu enemmän. Puunäytteet olisi hiottava ja värjättävä lahoon reagoivilla väriaineilla ennen kuvausta, mutta tämä ei onnistu kenttätöolosuhteissa. Tässä työssä toteutetulla tavalla ohjelmassa voidaan käydään vapaasti erilaisia kuvia.

Tulevaisuudessa suunnitelmissa on ollut rakentaa esimerkiksi metsätyökoneen sahan laipan sisään anturiryhmä, joka tunnistaisi lahonneen puun esimerkiksi fluoresenssi-ilmion perusteella metsätöiden yhteydessä. Tutkimustyö on tältä osin vielä kesken. Nykyiselläänkin metsätyökoneissa on apuna tietokone, jolla kirjataan ylös muun muassa tukin pituus ja paksuus - ehkä tulevaisuudessa koneella voidaan arvioida tarkasti myös lahopuun korkeus ja säästää sahauksien määrässä.

Kolmiulotteisen mallin muodostamista voi kehittää soveltamalla tähän esimerkiksi laserkeilausta, mutta tällöin rajoitutaan rungon pinnanmuotoihin ja lehtiin. Run-

gon sisäisiä lahoja alueita tai onttoja ei havaita, mutta myös laajat kohteet kuten puut, rakennukset ja maaston muodot sopivat mallinnettaviksi kohteiksi. Mallin muodostuminen perustuu yleisimmin laserpulssin lentoajan tai jatkuvan moduloitun lasersäteen vaihe-eron mittaamiseen lähteen ja kohteen välillä (Curless, 2000). Malliksi muodostuu pistepilvi, jota voidaan edelleen käsitellä esimerkiksi Marching Cubes -algoritmillä (Lorenson ja Cline, 1987), tai joukko poikkileikkauksien ääri-viivoja. Näiden ääriviivojen pistekoordinaatit voisi edelleen muuntaa tässä työssä toteutetun ohjelman ymmärtämään XML-muotoon.

Metsäntutkimuksessa lasermittausta on käytetty ilmasta käsin metsän tyyppin tunnistamiseen ja puiden kasvun päättelyyn (Yu *et al.*, 2004). Myös yksittäisten puiden muodon uudelleen hahmottaminen ohjelmallisesti voisi olla mahdollista latvustosta kerätyn pistepilven perusteella. PUULA-projektissa lasermittaus voitaisiin suorittaa metsätyökoneesta käsin ainakin rungon lahon kannalta kiinnostavasta osasta. Rungon tai kannon poikkileikkauksesta voidaan mahdollisesti kuvamittauksella arvioida lahon pinta-alaa ja edelleen yhdistää tämä tieto lasermittauksella havaittuun rungon muotoon, jolloin voitaisiin päätellä lahon etenemistä puussa rungon suuntaisesti jo työn aikana.

Kirjallisuutta

- F. Aurenhammer ja R. Klein. Voronoi diagrams. Teoksessa J.R. Sack ja J. Urrutia, toimittajat, *Handbook of Computational Geometry*, luku V, sivut 201–290. Elsevier Science Publishing, 2000.
- Chandrajit L. Bajaj, E. J. Coyle ja K. Lin. Arbitrary topology shape reconstruction from planar cross sections. Teoksessa *Graphical Models and Image Processing*, osa 58, sivut 524–543. 1996.
- Mark de Berg, Marc van Kreveld, Mark Overmars ja Otfried Schwarzkopf. *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. Springer-Verlag, toinen painos, 2000.
- J.D. Boissonnat. Shape reconstruction from planar cross sections. Teoksessa *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, osa 44, sivut 1–29. 1988.
- Brian Curless. From range scans to 3d models. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, **33**, no. 4, 38–41, 2000.
- J.A. Dolwin, D. Lonsdale ja J. Barnett. Detection of decay in trees. *Arboric. J.*, **23**, 139–149, 1999.
- Petr Felkel, Armin Kanitsar, Anton L. Fuhrmann ja Rainer Wegenkittl. Surface models of tube trees. Tekninen raportti, VRVis Zentrum für Virtual Reality und Visualisierung Forschungs GmbH, 2002.
- H. Fuchs, Z. M. Kedem ja S. P. Uselton. Optimal surface reconstruction from planar contours. *Commun. ACM*, **20**, no. 10, 693–702, 1977.
- Ilkka Haikala ja Jukka Märijärvi. *Ohjelmistotuotanto*, luku 7, sivut 122–124. Suomen Atk-kustannus, 1998.
- Donald Hearn ja M. Pauline Baker. *Computer Graphics*. Prentice-Hall International, toinen painos, 1994.
- Paul S. Heckbert, toimittaja. *Graphics Gems IV*. AP Professional (Academic Press), Boston, 1994.

- E. Keppel. Approximating complex surfaces by triangulation of contour lines. *IBM Journal of Research and Development*, **19**, 2–11, 1975.
- William E. Lorensen ja Harvey E. Cline. Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm. Teoksessa *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, osa 21, sivut 163–169. ACM Press, 1987.
- C. Mattheck, K. Bethge ja D. Erb. Failure criteria for trees. *Allgemeine Forstund Jagdzeitung*, **164**, 9–12, 1992.
- David Meyers, Shelley Skinner ja Kenneth Sloan. Surfaces from contours. Teoksessa *ACM Transactions on Graphics*, osa 11, sivut 228–258. 1992.
- J.M. Oliva, M. Perrin ja S. Coquillart. 3d reconstruction of complex polyhedral shapes from contours using a simplified generalized Voronoi diagram. Teoksessa *Comp. Graph. Forum*, osa 15. 1996.
- Jari Perttunen, Risto Sievänen ja Eero Nikinmaa. LIGNUM: a model combining the structure and the functioning of trees. *Ecological Modelling*, **108**, 189–198, 1998.
- Minna Terho ja Anna-Maija Hallaksela. Potential hazard characteristics of Tilia, Betula and Acer trees removed in the Helsinki City Area during 2001-2003. *Urban Forestry & Urban Greening*, **3**, 113–120, 2005.
- Emo Welzl ja Barbara Wolfers. Surface reconstruction between simple polygons via angle criteria. *J. Symbolic Computation*, **17**, no. 4, 351–369, 1994.
- S. Woodward, J. Stenlid, R. Karjalainen ja A. Hüttermann, toimittajat. *Heterobasidion annosum: Biology, Ecology, Impact and Control*. CAB International, 1998.
- Xiaowei Yu, Juha Hyypä, Harri Kaartinen ja Matti Maltamo. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, **90**, 451–462, 2004.

Liite A

XML-tiedostomuoto

```
<?xml version="1.0"?>
<!DOCTYPE CityTree [
<!ELEMENT CityTree (Tree)>
<!ELEMENT Tree (Name, Serial?, Registry?, Location?,
                CuttingDate?, Image, SearchPath?, Branch*)>
<!ELEMENT Name      (#CDATA)>
<!ELEMENT Serial    (#CDATA)>
<!ELEMENT Registry  (#CDATA)>
<!ELEMENT Location  (#CDATA)>
<!ELEMENT CuttingDate (#CDATA)>
<!ELEMENT Image     (#CDATA)>
<!ELEMENT Branch (Damage*, Name, Direction?, Section*)>
<!ELEMENT Damage (Angle, Height, Radius, Description?)>
<!ELEMENT Angle    (#CDATA)>
<!ELEMENT Height   (#CDATA)>
<!ELEMENT Radius   (#CDATA)>
<!ELEMENT Description (#CDATA)>
<!ELEMENT Section (Name, Image, Origin, ScaleVertex1,
                  ScaleVertex2, ScaleRef, North?, Circle+)>
<!ELEMENT Image    (#CDATA)>
<!ELEMENT Origin   (#CDATA)>
<!ELEMENT ScaleVertex1 (#CDATA)>
<!ELEMENT ScaleVertex2 (#CDATA)>
<!ELEMENT ScaleRef  (#CDATA)>
<!ELEMENT North    (#CDATA)>
<!ELEMENT Circle (Name, Point+)>
<!ELEMENT Point    (#CDATA)>
```

```
<!ATTLIST Section height CDATA #REQUIRED>  
<!ATTLIST Circle outer ("0" | "1" | "2") "0">  
<!ATTLIST Circle inner ("0" | "1" | "2") "2">  
>
```

**SUMEAAN LOGIIKKAAN POHJAUTUVA PUUTAVARAN OHJAUS RAAKA-
AINEEN LAATUPARAMETRIEN AVULLA**

**Metsäteknologian pro gradu –tutkielma
maatalous- ja metsätieteiden maisterin tutkintoa varten
Helsingin yliopisto
Metsävarojenkäytön laitos
Lokakuu 2005
Sasu Hamina**

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Metsävarojen käytön laitos	
Tekijä — Författare — Author Sasu Hamina			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Sumeaan logiikkaan pohjautuva puutavaran ohjaus raaka-aineen latuparametrien avulla			
Oppiaine — Läroämne — Subject Metsäteknologia			
Työn laji — Arbetets art — Level Pro Gradu-tutkielma		Aika — Datum — Month and year 13.10.2005	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 38 s., liitteet 18 s.
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>Sähköisesti tuotetun laatutiedon esim. kuvamittauksen perusteella tapahtuva puutavaran ohjaus voidaan suorittaa tässä tutkimuksessa kehitetyllä sumeään logiikkaan perustuvalla laskentamallilla. Laskentamalli perustuu mm. kuva-mittauksella saatuihin laatuparametrien mittaustuloksiin, tuotantolaitosten laatutekijöille antamiin painokertoimiin ja rajoituksiin sekä sumeään logiikkaan.</p> <p>Pro gradu tutkimuksen laskentamalli on tehty osoitukseksi, että puun laadun perusteella pystytään tarkemmin ohjaamaan raaka-aine oikealle tuotanto-laitokselle. Tästä syystä laatutekijöiden painokertoimia ja rajoituksia laskenta-mallia varten on kerätty vain mäntyä käyttäviltä tuotantolaitoksilta (kaksi sahaa ja sellutehdas).</p> <p>Laskentamalli on laadittu Excel-taulukkoon, eikä sen käyttö ole tästä syystä kovinkaan helppoa. Myöskään sen muokkaaminen suuremmaksi ei ole mahdollista taulukko-ohjelman kapasiteettirajoituksen takia. Laskentamallia laajennettaessa tulisikin luoda ohjelmalle oma ohjelmisto. Mm. kuvamittauksen avulla laskentamalli onkin sumeään logiikan ansiosta muokattavissa kaikkiin hankintaketjun osiin puun kasvatuksesta tuotantolaitoksen loppu-tuotteen lajitteluun. Toimiakseen se ei tarvitse kahta laatuparametria enempää, mutta on sitä tarkempi, mitä enemmän laatuparametreja on käytettävissä.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Puutavaran laatu, puutavara logistiikka, sumea logiikka			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Viikin tiedekirjasto			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information			

Alkusanat

Tämä metsäteknologian pro gradu-tutkielma on tehty Helsingin yliopiston maatalous- ja metsätieteellisen tiedekunnan metsävarojen käytön laitokselle ja sen tarkastajana toimi professori Esko Mikkonen. Tutkimukseni on osa tutkimushanke Puulaa (Puun laadun mittaus ja lajittelu), jossa on ollut mukana Metsäntutkimuslaitos, teknillinen korkeakoulu, Tampereen teknillinen yliopisto sekä Metsäteho Oy. Tutkimus suoritettiin Metsäntutkimuslaitoksen tiloissa Vantaalla ja tutkimuksen ohjauksesta vastasi FL Erkki Pesonen.

Tahdon kiittää erinomaisesta ohjauksesta ja tieteellisestä tuesta ohjaajaani Erkki Pesosta sekä tuotantolaitosvierailuista ja kontakteista Lauri Hjelmiä. Tahdon myös kiittää henkilöitä, jotka ovat olleet osana aineiston keruuta tai antaneet neuvoja ja tukea tutkimukseeni: Erkki Verkasalo, Juha Piipponen, Petri Ojala, Antti Aronen, Petri Knuutinen, Keijo Porkka, Seppo Vähänen, Pekka Westergren, Matti Nordberg, Olof Thesslund, Jorma Puhakka, Tuomo Vuorenpää, Risto Ritala, Heimo Ihalainen, Vesa Niskanen ja Jani Heikkilä.

Kiitän sukulaisiani, ystäviäni ja työtovereitani antamastanne avusta ja tuesta tutkimukseni aikana.

Vantaalla 9. syyskuuta 2005



Sasu Hamina

SISÄLLYSLUETTELO

	SIVU
1. JOHDANTO	3
1.1. Yleistä	3
2. KIRJALLISUUS JA TEORIA	5
2.1. Yleistä	5
2.2. Käytössä olevat laatutekijöiden mittausmenetelmät	5
2.2.1. Ennen kaukokuljetusta tapahtuva laatutekijöiden mittaus ja arviointi	6
2.2.1.1. Pystymittaus	6
2.2.1.2. Metsurimittaus	6
2.2.1.3. Hakkuukonemittaus	7
2.2.1.4. Pinomittaus	7
2.2.2. Kaukokuljetuksen jälkeen tapahtuva laatutekijöiden mittaus ja arviointi	8
2.2.2.1. Silmämääräinen laatutekijöiden arviointi	8
2.2.2.2. Optinen laatuparametrien mittaus	8
2.2.2.3. Vastavalotekniikka	9
2.2.2.4. Lasertekniikka	9
2.3. Kehitteillä olevat laatuparametrien mittausmenetelmät	11
2.3.1. Tuotantolaitokset	11
2.3.2. Hakkuukone	11
2.4. Laatutekijöiden mittausmenetelmät meneillään olevassa kuvamittaustutkimuksessa	12
2.4.1. Kuvamittaus	12
2.4.2. Mikroaaltomittaus	13
2.4.3. Fotoluminesenssimittaus	14
2.4.4. Ultraäänimittaus	14
2.5. Sumea logiikka	15

	SIVU
3. TUTKIMUSTEHTÄVÄ	18
3.1. Tavoitteet	18
3.2. Hypoteesi	19
4. MENETELMÄT JA AINEISTO	19
4.1. Sumean logiikan menetelmä	19
4.2. Haastattelut	20
4.3. Priorisoinnit	21
5. TULOKSET	21
5.1. Laatutekijät	21
5.2. Priorisoinnit ja haastattelut	23
5.2.1. Puutavaran viat	23
5.2.2. Raaka-aine ongelmat	25
5.3. Sumean jaottelun perusteet	26
5.4. Laskentamalli	27
6. DISKUSSIO	29
6.1. Johtopäätökset	29
6.2. Laskentamallin muunneltavuus	30
6.3. Lajittelun lisääminen metsässä	31
7. JATKOTUTKIMUSTEN AIHEITA	31
7.1. Laatutekijöiden sisällyttäminen nykyjärjestelmään	31
8. KIRJALLISUUS	36

LIITTEET

1. JOHDANTO

1.1. Yleistä

Puutavaran ensimmäinen laadun arviointi suoritetaan puukaupan yhteydessä, jolloin metsäyhtiön tai tuotantolaitoksen osto-esimies arvioi mille tuotantolaitoksille leimikon puutavara voitaisiin kuljettaa. Metsikköä hakattaessa metsätyötä tekevä henkilö tekee viimein päätöksen, mille tuotantolaitoksille pölkyt ovat laadultaan ja mitoiltaan sopivia. Päätöksentekoon hän käyttää apunaan tuotantolaitosten antamia mitta- ja laatuvaatimuksia, saamaansa koulutusta ja kokemusta sekä mittalaitteiden antamia tuloksia. Jo välivarastoon siirrettäessä pääsääntöisesti tiedetään mille tuotantolaitokselle puutavara tullaan kuljettamaan.

Tähän mennessä pölkystä on mitattu pituus ja läpimitta. Niistä lasketun tilavuuden tarkkuus pitää olla ± 4 %. Laatu arvioidaan silmämääräisesti ja välillä jopa hyvinkin huonoissa olosuhteissa. Tuotantolaitoksille päätyy myös prosessiin soveltumatonta tai huonosti soveltuvaa puutavaraa, raakkia, joka kuitenkin käytetään tuotannossa hyväksi, muuttamalla tuotantoprosessia raaka-aineelle soveltuvaksi.

Tällä hetkellä tuotantolaitosten keskimääräinen puutavaran raakkiprosentti vaihtelee 1-5 %:n välillä. Vuonna 2003 puutavaraa käytettiin Suomen metsäteollisuudessa 73,5 miljoonaa kuutiometriä (Metsätilastollinen vuosikirja, 2004). Jos tuotantolaitosten raakkiprosentin oletetaan olevan 3, joka myös tämän tutkimuksen pohjalta on lähellä todellista, kuljetettiin tuotantolaitoksille Suomessa yhteensä yli 2,2 miljoonaa kuutiometriä sinne sopimatonta puutavaraa. Tämä lisää tuotantolaitosten välisiä kuljetuskustannuksia ja huonontaa lopputuotteen arvoa.

Tuotantolaitoksesta riippuen, hylätyn puutavaran käyttö prosessissa vaihtelee. Taulukossa 1. on esitelty eri tuotantolaitosten antamia raakkiprosentteja ja prosentteja, kuinka paljon tuotantolaitokset käyttävät raakiksi luokiteltua raaka-ainetta. Ulkomailta tuotava puutavara nostaa tuotantolaitosten raakki-

prosenttia selvästi, riippuen kotimaisen ja ulkomaisen puutavaran suhteesta. Taulukossa 1. ei ole otettu huomioon ulkomailta tuotavaa puutavaraa.

Taulukko 1. Tutkittujen tuotantolaitosten raakkiprocentit ja raakkien käyttöprosentit tuotannossa

	Mäntysaha (Heinola)	Koivuvaneri (Heinola)	Havusellu (Sunila/Kotka)	Mäntysaha (Korkeakoski)
Raakki %	4-5	4	1	3,7
Käyttö %	75-80	100	100	63

Metsäntutkimuslaitoksen, Tampereen teknillisen yliopiston ja Teknillisen korkeakoulun tutkimuksessa kehitetään puutavaran laadun kuvamittauspohjaisia ja automaattisia mittausmenetelmiä. Tulevaisuudessa niiden avulla olisi tarkoitus mitata puutavaranipun laatuparametrit jo ennen kaukokuljetusta ja tulosten perusteella suunnata puutavaranippu oikealle tuotantolaitokselle ja oikeaan tuotantoprosessiin. Tällöin tuotantolaitosten saama raaka-aine olisi tasalaatuisempaa ja näin helpompaa käsitellä. Erityisesti massateollisuudessa raaka-aineen tasalaatuisuus tuo taloudellista hyötyä ja nopeuttaa tuotantoprosessia. Kuvamittauksen ja puutavaran ohjauksen tarkoituksena onkin saada puuraaka-aineesta mahdollisimman suuri taloudellinen hyöty.

Puutavaran ohjausjärjestelmä on tässä tutkimuksessa luotu toimivaksi laskentamalliksi mäntyä käyttäville tuotantolaitoksille (Hamina, 2005). Tämä järjestelmä perustuu kuvamittauksella saatuihin laatuparametrien mittaus-tuloksiin, tuotantolaitosten laatutekijöille antamiin painokertoimiin ja rajoituksiin sekä sumeaan logiikkaan. Sumeaa logiikkaa ei tiettävästi ole aiemmin käytetty metsäteollisuudessa vastaavaan tehtävään eli päätöksen tekoon, vaan sitä on käytetty esimerkiksi leimikon puustojakauman arvioimisessa hakkuukoneessa (Kivinen ja Uusitalo, 2002).

Laskentamalli on hyvin joustava, mm. sumean logiikan ansiosta, ja sitä voidaankin käyttää moneen laadun kanssa tekemisissä olevaan toimintoon. Se soveltuukin hyvin puun kasvatuksesta tuotantolaitosten lopputuotteen laatulajitteluun.

2. KIRJALLISUUS JA TEORIA

2.1. Yleistä

Seuraavan kirjallisuusosion tarkoituksena on antaa lukijalle kuvaa siitä millaisia laadun mittaus- ja arviointimenetelmiä on tällä hetkellä käytössä hankintaketjussa (kappaleet 2.1., 2.2. ja 2.3.). Samalla pyritään antamaan kuvaa siitä, miksi tarkemman laadunmittauksen ja sen perusteella suoritettujen puutavaran ohjauksen tutkiminen on perusteltua.

2.2. Käytössä olevat laatutekijöiden mittausmenetelmät

Nykyään puutavaran laatu arvioidaan silmämääräisesti ennen sen kuljettamista tuotantolaitokselle. Eräitä tässäkin tutkimuksessa käytettyjä laatutekijöitä (esim. pituus ja läpimitta) voidaan mitata ja arvioida jo ennen puun kaatamista. Dimensiot (pituus ja läpimitta) mitataan melkein poikkeuksetta myös puuta hakattaessa. Muu laadunarvioiminen suoritetaan silmämääräisesti jokaisen hakkuukoneen kuljettajan tai metsurin toimesta. Tämän takia tuotantolaitokset ovat tehneet omat mitta- ja laatuvaatimukset, joiden perusteella henkilöiden on helpompi arvioida mille tuotantolaitokselle mikin puutavara ohjataan.

Tuotantolaitoksilla puutavaran mittaamista on automatisoitu mahdollisimman paljon, vaikka vielä nykyään löytyy tuotantolaitoksia joissa mittaaminen suoritetaan manuaalisin keinoin (mm. kehysmitta). Tuotantolaitokselle saapuva puutavara voidaan mitata joko yksittäisinä pölkkyinä tai kokonaisina puutavaranippuina. Seuraavassa on esitelty tehtaiden käyttämiä laadun ja tilavuuden arviointi- ja mittaustapoja, jotka perustuvat silmämääräisiin ja optisiin menetelmiin.

2.2.1. Ennen kaukokuljetusta tapahtuva laatutekijöiden mittaus ja arviointi

Nykyisin metsässä käytössä olevia mittaustapoja ei ole montaa. Koska ne on hyväksytty virallisiksi mittaustavoiksi ja ne ovat todettu toimiviksi käytännössä. Kuitenkaan käytössä olevissa menetelmissä ei ole laadunmittausta, vaan ne mittaavat pääasiassa dimensioita ja niiden perusteella tilavuutta. Laadun arviointi suoritetaan täysin silmämääräisesti. Seuraavassa on esitelty muutamia mittaustapoja ja niiden tarkkuuksia.

2.2.1.1. Pystymittaus

Ihalaisen (1995) tekemän tutkimuksen mukaan pystymittauksen tilavuus oli keskimäärin 2-4 % suurempi kuin vertailumenetelmänä käytetyn hakkuukone mittauksen tulos. Hakkuukoneen otantaeristä tehdyn tarkistusmittauksen perusteella taas hakkuukone antoi keskimäärin 0,6 % todellista tilavuutta suurempia tilavuuksia. Pystymittauksessa mittaustarkkuus vaihteli mittaustavan mukaan. Runkojen yläläpimitan mukaan ottaminen tilavuuden laskentaan, pituuden ja rinnankorkeusläpimitan kanssa, vaikutti runkotilavuuteen korottavasti.

2.2.1.2. Metsurimittaus

Räsäsen, Marjomaan ja Ihalaisen (1995) tekemän metsurimittaustutkimuksen perusteella Masser 25- ja 35 – mittalaitteilla suoritettussa mittauksessa tulee pääosin liian suuria tilavuuksia hakatulle puutavaralle. Keskimäärin Masser 25:llä tilavuus oli 2,9 % ja Masser 35:llä taas 3,8 % suurempi kuin todellisuudessa. Vaihteluväli molemmilla mittalaitteilla oli kohtalaisen suuri. Joillakin kohteilla tilavuus metsurimittauksella oli reilusti yli 10 % suurempi. Mittaustapaa muuttamalla saatiin kylläkin tilavuus eroa pienennettyä, Masser 25:llä 1,1 %:iin ja Masser 35:llä 0,9 %:iin.

2.2.1.3. Hakkuukonemittaus

Ala – Ilomäen (1993) tekemässä tutkimuksessa selvitettiin hakkuukoneen mittaustarkkuuden riippuvuutta rungon ominaisuuksiin. Pölkyittäisessä mittauksessa päästiin tilavuudessa 0,9 % todellista tilavuutta pienempiin tilavuuksiin. Eri puulajeilla tilavuserojakauma oli erilainen. Kuusella oli suurin ero, 4,2 % pienempi, seuraavaksi tuli koivulla tilavuus oli 3,4 % suurempi ja parhaimpaan tarkkuuteen päästiin männyllä, jolla oli vain 0,5 % todellista tilavuutta pienempi tilavuus.

Tutkimus on vanha ja mittalaitteisto on kehittynyt hyvinkin paljon. Tämän johdosta mittatarkkuus on parantunut. Mittatarkkuuteen voi kylläkin vaikuttaa laitteiston kalibrointi ja hakkuuolosuhteet.

2.2.1.4. Pinomittaus

Sairasen (1995) tekemässä tutkimuksessa vertailtiin eri pinomittaustapojen tilavuus eroja. Mittausneuvoston ohjeen mukaan tehtyjen mittausten mukaan tilavuudet olivat 2,7 – 11,0 % suurempia kuin todellisuudessa. Ainoastaan kuusella tilavuuden mittaus osui pinomittausohjeen edellyttämän ± 4 prosentin tarkkuuteen. Puulajikohtaisissa malleissa taas päästiin noin 1,5 % todellista pienempiin tilavuuksiin.

Kahden tekijän mallissa otetaan huomioon pinon läpimittaluokka ja ladontaluokka. Tätä mallia käyttämällä päästiin havupuilla miltei oikeaan tilavuuteen (kuusi – 0,9 % ja mänty +0,7 %), kun taas koivulla 2,0 % todellista suurempaan tilavuuteen. Nykyään on kuitenkin pyritty pääsemään pinomittauksesta eroon ja mittaamaan hankintapuu vasta tehtaalla.

2.2.2. Kaukokuljetuksen jälkeen tapahtuva laatutekijöiden mittaus ja arviointi

2.2.2.1. Silmämääräinen laatutekijöiden arviointi

Silmänvarainen laadunmääritys on vaikeaa, koska se joudutaan tekemään nipuista pintapuolisesti. Nipun sisällä olevan puutavaran laadun valvonta näyttää olevan käytännössä mahdotonta. Nipun sisällä olevista pölkyistä pyritään erottelemaan vain alamittaiset, lahot ja vierasta puulajia olevat; teknisiä vikoja ei yleensä voida havaita lainkaan. (Verkasalo etc., 1997)

Yksittäisten pölkköjen laadun arvioiminen on huomattavasti helpompaa, koska laadutuspöydällä kappale pyörii pituusakselinsa ympäri laadun arvioinnin aikana. Tällöin laadun tarkkailija pystyy näkemään kappaleen joka puolelta ja ulkoisten vikojen (runkovikojen) löytäminen on helpompaa. Kappaleen sisällä olevien vikojen (puuaineen vikojen) arvioiminen on huomattavasti hankalampaa ja tähän tarvitaan usein laadun tarkkailijan asiantuntemusta ja kokemusta. Pääosin kappaleen sisäiset viat löydetäänkin vasta tuotantoprosessissa tai lopputuotetta laadutettaessa.

2.2.2.2. Optinen laatuparametrien mittaus

Tällä hetkellä tuotantolaitosten automaattiset mittausasemat toimivat kahdella erilaisella tekniikalla: ns. vastavalo- ja lasertekniikalla. Molempia tekniikoita käytetään niin yksittäisten pölkköjen kuin kokonaisten puutavaranippujen mittaamiseen. Kaikkia vikoja ei pystytä vielä mittaamaan automaattisesti, vaan niihin tarvitaan ihmistä arvioimaan puutavaran laatua. Nykyisellä tekniikalla pystytään mittaamaan puutavaranipusta yksittäisten pituutta ja läpimittaa (tyvi sekä latva) sekä yksittäisestä pölkystä ulkoisten parametrien lisäksi myös lenkoutta, mutkia, isoja oksia (poikaoksat) ja kapenevuutta. Muiden laatutekijöiden arvioiminen joudutaan tekemään silmämääräisesti puutavarasta tai vasta lopputuotteesta.

2.2.2.3. Vastavalotekniikka

Yksi ns. vastavalotekniikkaan perustuva tukkimittari on Opmes 202. Siinä kahdessa toisiaan vastaan kohtisuorassa mittaussuunnassa on oma mittaus-elementti, jossa on paraabelipeilin ja halogeenivalon muodostama valolähetin yksikkö sekä valoa vastaanottava valotransistoripalkki. Tukin läpimitta laskeetaan erikseen kummassakin mittaussuunnassa valotransistoripalkille muodostuvan tukin "varjokuvan" perustella. (Suuriniemi, 1998)

Tekniikka on latvaläpimitan ja pituuden mittauksessa tarkka sekä lenkouden mittauksessa melko tarkka (mittatarkkuutena on 0,1 mm). Tekniikalla on suurin ongelma erottaa mutkaisuus ja lenkous toisistaan. (Suuriniemi, 1998)

2.2.2.4. Lasertekniikka

Laseriin perustuvia tekniikoita on useita, mutta kaikissa laitteistoissa on sama perusajatus. Laserilla lähetetään valoa kohti pölkkyä, tukkia tai autokuormaa, jonka jälkeen erilaisilla kameratekniikoilla (esim. videokamera, matriisikamera, viivakamera) kuvataan puutavaran pinnalta heijastunut säteily. Kuvainformaatio tallennetaan tietokoneelle, joka laskee tarvittavat parametrit tai muodostaa kolmiulotteisen mallin. Kolmiulotteinen malli voi olla hyvinkin tarkka, riippuen tukkimittarin valmistusvuodesta. Uusimmilla mittareilla mittaustietoa voidaan saada jopa 2 -3 senttimetrin välein. Kuvainformaation analysointiin käytetään erilaisia käyttöjärjestelmiä.

Vanhemmissa tukkimittareissa (esimerkkinä AVM 10) tekniikka on latvaläpimitan ja pituuden mittauksessa melko tarkka, mutta lenkouden mittauksessa eroa on vastavalotekniikkaa enemmän (mittatarkkuutena AVM 10 – tukkimittarilla on 1 mm). Myös lasertekniikalla mitattaessa oli ongelmana mutkaisuuden erottaminen lenkoudesta. Erityisesti AVM 10 – tukkimittarilla oli ongelmia tyvitukin lenkouden mittaamisessa tyvilaajentuman takia. (Suuriniemi, 1998)

Nykyisten tukkimittareiden valmistajien Internetistä löytyvien mainosten mukaan tilavuuden tarkkuudessa päästään +/- 1 % tarkkuuteen ja pituudessa

+/- 1 senttimetrin tarkkuuteen. Kun taas Suuriniemen 1990 – luvun lopulla tehdyn tutkimuksen mukaan tuolloin käytössä ollut tukkimittari AVM 10 pääsi tilavuudessa noin +/- 6 % tarkkuuteen ja pituudessa noin +/- 4 senttimetrin tarkkuuteen.

Simpeleen M-realin tehtaan mitta-aseamalla on käytössä Codator Oy:n kehittämä automaattinen kuitupuukuorman tilavuuden mittaava tehdasmittari. Se perustuu kolmeen viuhkalaseriin ja yhteen etäisyyslaseriin. Mittalaitteen etuina on hyvinkin tarkka pinon tiiveyden mittaaminen, ajoneuvon ei tarvitse pysähtyä tai ajaa tasaista nopeutta mittalaitteen läpi sekä automaattisena järjestelmänä se voi toimia lähes itsenäisesti. Ainoana ongelmana on havaittu talviaika, jolloin sanka lumisade voi häiritä mittausta tunkeutumalla kuorman ja lasersäteen väliin. Myös lumisista ja jäätyneistä sekä irtonaista kuorta sisältävistä kuormista on ollut haittaa, koska Modus 2000 ei pysty erottamaan kiinteää puutavaraa ja lunta, jätää tai kuorta toisistaan. Tämän takia järjestelmään joudutaankin syöttämään lumi- ja kuorivähennys tarpeen mukaan. (Puhakka ja Thesslund, 2005)



Kuva 1. Modus 2000 - tehdasmittari

2.3. Kehitteillä olevat laatuparametrien mittaussuomenetelmät

Teollisuudessa on pyritty tuotantolinjojen laadunmittausta automatisoimaan, joka ei ole kovinkaan uusi asia. Mutta ongelmaksi on aiheutunut, varsinkin mekaanisessa teollisuudessa, puutavaran kuoren alla olevan puuaineen ominaisuudet ja kuorettoman kolmiulotteisen mallin saaminen pölkystä. Samalla on myös pyritty kehittämään optisia laitteita jo metsässä tapahtuvaan puutavaran laadun mittaamiseen.

2.3.1. Tuotantolaitokset

Monissa tuotantolaitoksissa on pyritty kehittämään optisia tekniikoita tarkemmiksi, jotta pölkystä saataisiin mahdollisimman hyvä kolmiulotteinen malli. Tämä on erityisen tärkeää sahateollisuudessa, jossa pyritään mallin avulla saamaan tukeista mahdollisimman suuri saanto.

Heinolan sahalle on pyritty kehittämään röntgensäteilyyn perustuvaa laadunmittausjärjestelmää. Röntgensäteiden avulla olisi tarkoitus selvittää oksattoman tyvitukin sisäoksien paikat, jotta oksattoman sahatavaran määrä pystyttäisiin maksimoimaan. Mittaus on tällä hetkellä vasta kokeiluasteella, eikä se ole käytössä tuotannossa. (Porkka, 2005)

2.3.2. Hakkuukone

Oulun ammattikorkeakoulun ja VTT elektroniikan tekemän tutkimuksen mukaan pölkkyjen lenkoutta voitaisiin mitata optisesti suoraan hakkuukoneen hakkuupäässä. Menetelmä perustuu optiseen kolmiomittaukseen. Hakkuulaitteen kaatokourassa liikkuvan rungon muoto mitataan puun pituussuunnassa useasta peräkkäisestä kohdasta siten, että yhdellä mittauksella määritetään rungon taipuma esimerkiksi puolen metrin matkalta. Lomittamalla peräkkäiset mittaukset voidaan yksittäiset taipumaprofiilit yhdistää, jolloin saadaan tietoa lenkoudesta koko rungon pituudelta. Etuna tässä menetelmässä on se, että pienen mittausalueen vuoksi mittalaitteesta

saadaan kompakti ja se on mahdollista sijoittaa hakkuupäähän. (Laitinen ja Saviaro, 2001)

Laitisen ja Saviaron laboratorio-olosuhteissa tekemän tutkimuksen mukaan menetelmän suorituskyky on hyvä. Kokeissa mitattiin CCD kameran ja laserin avulla yksittäisiä, noin kahden metrin, pituisia pölkkyjä. Kahdesta suunnasta optisella menetelmällä mitattujen pölkkyjen tuloksia verrattiin mekaanisella mittauksella saatuihin tuloksiin, ja pölkkyjen yleinen muoto oli kummallakin menetelmällä mitattuna sama.

2.4. Laatutekijöiden mittaamenetelmät meneillään olevassa kuvamit-taustutkimuksessa

Kehitettävänä kuvamittausmenetelminä Metlan, Tampereen teknillisen yliopiston ja Teknillisen korkeakoulun tutkimuksessa on käytetty digitaali-kuvausta (valokuvaus), sähkömagneettista säteilyä (mikroaallot ja fotoluminesenssi) sekä akustisiin aaltoihin perustuvaa menetelmää (ultraääni). Liitteessä 1. on esitelty, mitä eri mittaamenetelmiä tutkimuksessa on kehitetty ja millä menetelmällä mitäkin laatutekijää voidaan mitata. Muutamien laatutekijöiden mittaamiseen tarvitaan useampaa kuin yhtä mittaamenetelmää (liite 1.). Tämä johtuu joidenkin mittaamenetelmien epätarkkuudesta ja mittaussvaikeudesta joissain olosuhteissa. Näin eri mittaamenetelmät tukevat toisiaan. Seuraavaksi on esitelty yleisesti edellä mainittuja mittaamenetelmiä.

2.4.1. Kuvamittaus

Jo 1990-luvun alussa käytettiin valokuvaus- ja tietotekniikkaa apuna laadun ja puutavaran mittaamisessa. Nykyään valokuvaustekniikka ja kuvien laatu on parantunut huomattavasti ja kuvien käsiteltävyys on helpottunut. Nykyään voidaan saada kuvista, digitaalivalokuvauksen ansiosta, niinkin tarkkoja, ettei kuvien jälkikäsitteilyä tarvitse välttämättä suorittaa kuvan laadun parantamiseksi. Nykyisissä digitaalikameroissa on jopa 16,7 megapikselin kuvatark-

kuus, joka merkitsee parempaa kuvatarkkuutta kuin filmikameroissa. Tulevaisuudessa digitaalikameroiden tarkkuus tulee edelleen paranemaan. Tämän ansiosta voidaankin kuvien ottamisen jälkeen siirtyä suoraan analysointiin, johon on kehitelty avuksi jo hyvin monia erilaisia tietokoneohjelmia.

Käytännössä ongelmaksi voi syntyä kuvien siirtäminen ja analysointi, jos käsittelyssä tarvitaan suurta nopeutta, koska yksittäisen kuvatiedoston koko on niin suuri. Ja kuvien muuntaminen toiseen tiedostomuotoon tai kuvakokoon ei ole kovinkaan järkevää, koska tuolloin kuvien analysoitavuus kärsii. On kuitenkin huomioitava, että myös tietotekniikka kehittyy kuvien tarkkuuden myötä, eikä tiedostojen koosta näin välttämättä synny ongelmaa.

Kuitenkaan kuvien ei tarvitse välttämättä olla teräviä, vaan nykyaikaiset tietokoneohjelmat osaavat muuntaa kuvan todelliseen muotoonsa. Tällöin kovassa tärinässä (esim. metsäkoneessa) otetut kuvatkin voidaan analysoida. (Ihalainen, 2005)

2.4.2. Mikroaaltomittaus

Holmströmin mukaan mikroaaltojen aallonpituus on vain muutamia senttimetrejä (1 – 10 cm), niiden värähtelytaajuus vastaavasti noin 3-30 GHz. Mikroaallot absorboituvat hyvin voimakasti veteen, jolloin vesi kuumenee. Kun mikroaalto läpäisee kappaleen, pienenee myös aallon intensiteetti energian absorptiosta ja sen sironnasta johtuen. Vaikuttavia tekijöitä ovat mm. kappaleen paksuus, sen tiheys ja kosteus. Kun käytetään lineaarisesti polarisoitua aaltoa, dielektrinen anisotropia aiheuttaa sen, että aalto depolarisoituu. Absorptio kertoo etupäässä kosteudesta, vaiheen muutokseen vaikuttavat sekä kosteus että tiheys ja depolarisaatio antaa tietoja rakeen suunnasta. Mikroaaltojen vastaanottajana toimii erikoisrakenteinen antenni.

Mikroaaltomenetelmiä on kolme: resonanssi-, heijastus-, vaihe-ero- sekä läpäisymenetelmä. Dielektrisyyssvakion määrittäminen ohuille aineille tapahtuu tavallisesti resonanssimenetelmällä. Heijastusmenetelmää käytetään tavallisesti paksujen kappaleiden kosteuden määrittämiseksi.

Läpäisy menetelmä on tarkoitettu vähän ohuemmille aineille. (Holmström, 1990)

Mikroaalloilla saadaan esille oksakohdat, reiät, kuitusuuntaus, tiheys ja kosteus pitoisuus. Järjestelmä voidaan automatisoida. Menetelmällä ei voida erottaa kaikkia virheitä toisistaan, eikä todeta pieniä haljenneita kohtia, pituus-suuntaisia halkeamia, pihkaonteloita tai puun ydinkohtaa. (Holmström, 1990)

2.4.3. Fotoluminesenssimittaus

Luminesenssilla tarkoitetaan muun kuin hehkuvan kuumen kappaleen lähettämää valoa. Luminesenssi jaetaan viritystilojen elinajan mukaan fluoresenssiin ja fosforenssiin. Fluoresenssissa eli fluoriloisteessa viritystila purkautuu hyvin nopeasti (< 10 ns). Jos viritystila purkautuu hitaammin (10^{-8} s...vuorokausi) puhutaan fosforenssista eli fosforiloisteesta. (Internet)

Luminesenssi on mikroaaltojen tapaan sähkömagneettinen menetelmä. Fluoresenssi on ilmiö, jossa säteilyä saanut aine (voidaan lähettää esim. puuhun laserin avulla) lähettää sähkömagneettista säteilyä, jonka taajuus on pienempi kuin sen säteilyn, jota aine on absorboinut. Kun säteilyn lähettäjä suljetaan, myös sähkömagneettinen säteily päättyy miltei välittömästi. (Internet)

Luminesenssimenetelmällä voidaan saada esille laho, kuoren määrä ja sinistymä.

2.4.4. Ultraäänimittaus

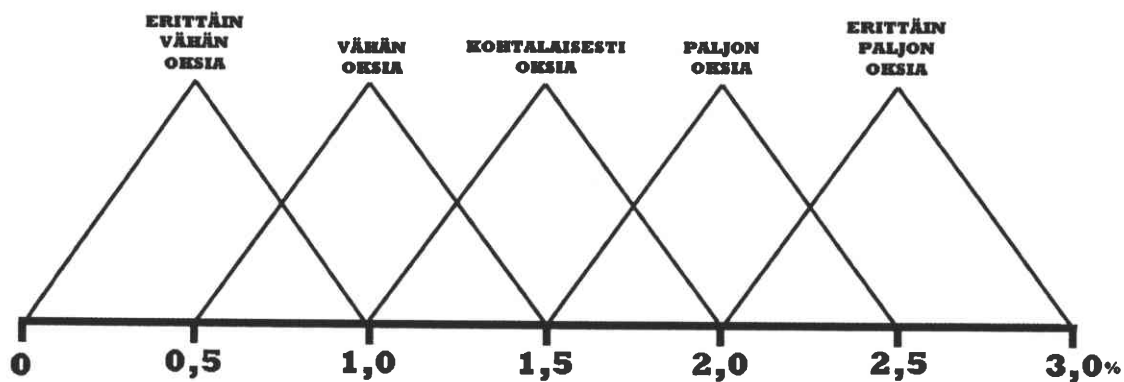
Ultraääni on akustista värähtelyä, jonka taajuus on ihmisen kuuloalueen yläpuolella (20 kHz – 1 GHz). Ultraääni noudattaa yleisiä aaltoliikkeen lainalaisuuksia, mutta poikkeaa sähkömagneettisesta säteilystä siinä, että se tarvitsee edetäkseen väliaineen. Ultraääni ei etene lainkaan tyhjiössä ja vaimenee kaasuissakin nopeasti – etenkin korkeilla taajuuksilla (> 1 MHz) – mutta etenee hyvin nesteissä ja useimmissa kiinteissä aineissa. (Internet)

Holmströmin mukaan akustinen mittaus (ultraäänimittaus) paljastaa herkästi monet virheet, jotka ovat puuteollisuudessa kiinnostavia. Herkkyys on erityisen hyvä oksakohtien ja kuitusuunnan suhteen. Eräässä amerikkalaisessa tutkimuksessa on todettu, että menetelmä on vielä epäherkkä alle 3 %:n painohäviön verran lahonneelle puutavaralle.

2.5. Sumea logiikka

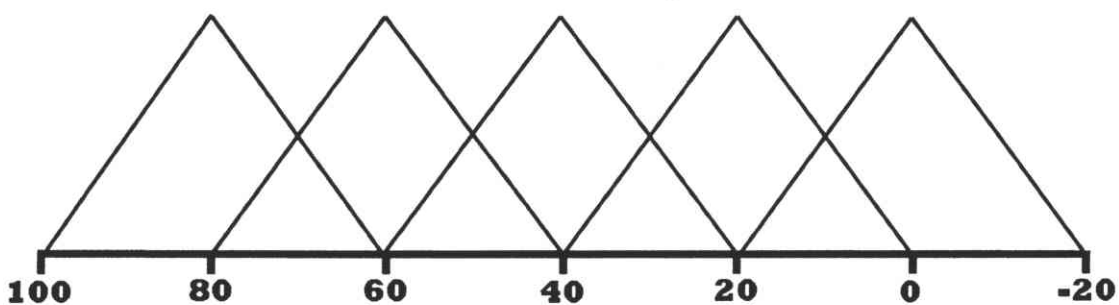
Sumea logiikka on pyrkinyt ihmismäiseen ajattelutapaan mallien rakennuksessa, ja tämä on käytännössä tarkoittanut lähinnä moniarvologiikkaan ja kielellisiin esitystapoihin perustuvien menetelmien käyttöä. Niinpä sumean logiikan ansiosta mallit ja sovellukset ovat selvästi yksinkertaisempia ja helppokäyttöisempiä kuin perinteisten menetelmien (mm. matematiikan ja kaksiarvologiikan) tapauksessa. (Niskanen, 2003)

Seuraavassa on pyritty yksinkertaistettuna graafisesti esittämään kuinka sumean logiikan avulla yksittäisen tuotantolaitoksen painokerroin määrittyy mittaustuloksena saadun laatuparametrin perusteella. Kuvassa 2. on määritty sumeat joukot eli jakaumat kyseiselle syötemuuttujalle. Syötemuuttuja on tässä esimerkissä oksatilavuus. Samalla on selvitetty syötemuuttujille relaatiot (ihmisen ajatusta simuloivaa jaottelua kuvaavat painotukset).



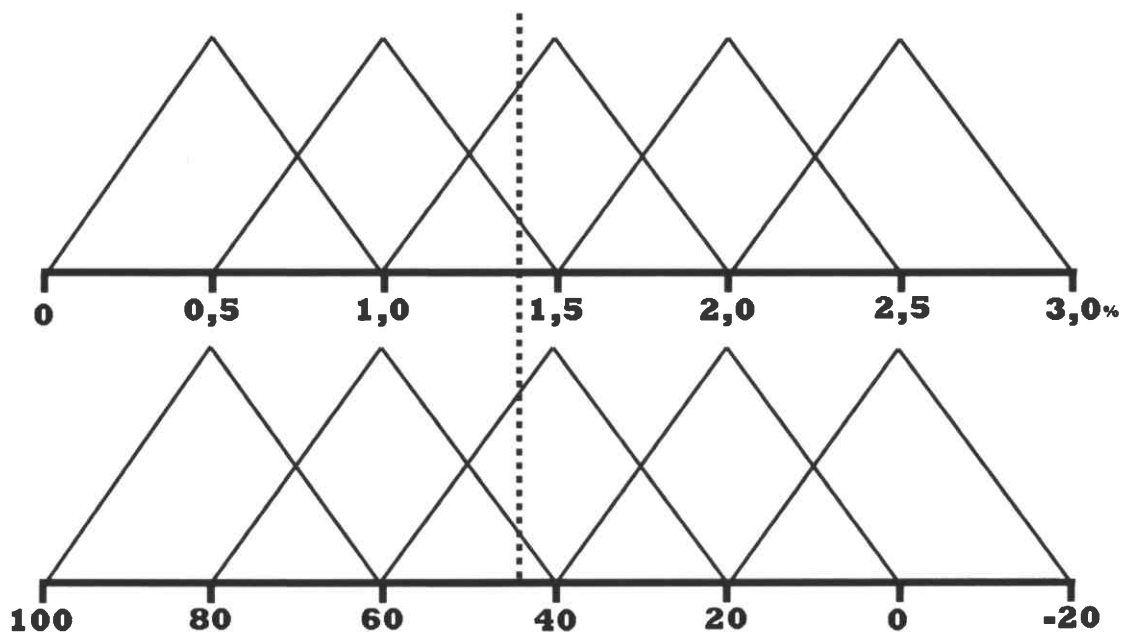
Kuva 2. Oksatilavuuden syötemuuttujat

Kuvassa 3. on selvitetty vastemuuttajat (syötemuuttujia vastaavat painokerroimet), jotka kertovat kuinka tärkeitä tälle kyseiselle tuotantolaitokselle kyseisen oksatilavuuden omaava pölkky on. 100 merkitsee, että puutavarassa olevan laatutekijän määrä on hyvinkin tärkeää ja nollaa lähestyttäessä laatutekijän hyväksyttävyyks vähenee. Negatiivisilla arvoilla taas puutavara tulee hylätyksi. Tässä esimerkissä jakauma on tasaisesti jakautunut, mutta todellisuudessa vastemuuttuja voisi olla vaikka 100 kaikilla syötemuuttujan arvoilla, jos tuotantolaitos näkee kaikilla oksatilavuuksilla pölkyn olevan heidän tuotantoprosessiinsa täysin sopiva.



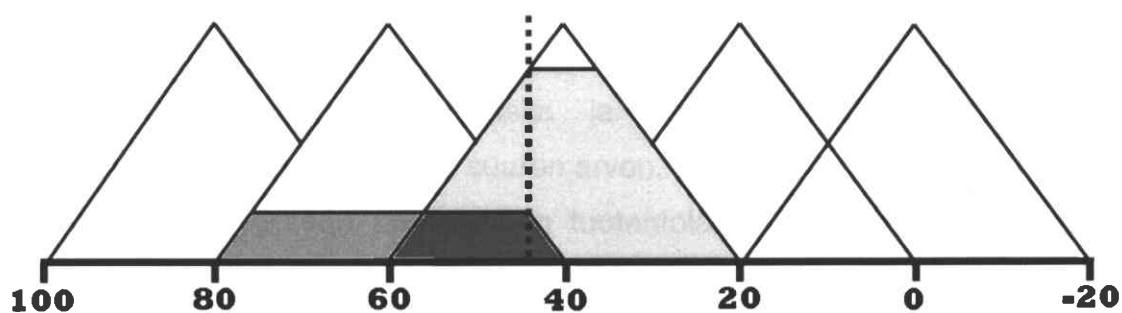
Kuva 3. Oksatilavuuden vastemuuttajat

Kun kuva 2. ja kuva 3. laitetaan päällekkäin, voidaan näiden perusteella selvittää jokaista oksatilavuutta vastaava painokerroin. Jos siis oletetaan oksatilavuuden olevan 1,4 %, voidaan graafisesti tarkastella millaisen painokertoimen oksatilavuus saa (kuva 4.). Oksatilavuutta vastaava painokerroin löydetään vetämällä suora viiva syötemuuttujajakaumasta vastemuuttujajakaumiin.



Kuva 4. Syöte- ja vastemuuttujien vertailu

Tässä vaiheessa pitää ottaa vielä huomioon mallin sumeus, joka antaa ristiin meneville vastemuuttujan jakaumille tietyn painotuksen, mikä näkyy kuvassa 5. Näiden painotusten (värjätyin alueen koon) perusteella voidaan laskea oikea painokerroin, joka on 44,75. Samalla periaatteella voidaan selvittää myös syötemuuttuja jakaumasta sanallinen selvitys oksatilavuudesta, joka on KOHTALAISESTI OKSIA.



Kuva 5. Painokertoimien painotus

Tämä graafinen esitys antaa hyvän kuvan siitä, miten sumea logiikka toimii käytännössä. Käytännössä ei tarvitse vastaavia graafisia esityksiä tehdä,

eikä se aina ole edes mahdollista, vaan laskentakaavojen perusteella tietokoneeseen tehty sumea laskentamalli antaa suoraan tarvittavan tuloksen. Sumeaa logiikkaa käytettäessä ei tarvita niin suurta laskentatehoa käytettävältä järjestelmältä, vaan laskenta suoritetaan yksinkertaisten matemaattisten kaavojen avulla. Tämä asettaa laskentamallille rajoitteita, jotka tulee selvittää ennen laskentamallin luomista. Tulee selvittää mm. millä välillä mallin parametrit tulevat liikkumaan (perusjoukko) ja kuinka tarkkoja tuloksia halutaan saada (perusjoukon tarkkuus). Tämän johdosta mitä suurempi vaihteluväli on ja mitä suurempaa tarkkuutta tuloksilta vaaditaan, sitä enemmän tarvitaan muistia.

3. TUTKIMUSTEHTÄVÄ

3.1. Tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena on laatia menetelmä, laskentamalli, jolla pystytään ohjaamaan puutavara siinä esiintyvien laatutekijöiden mukaan tuotantolaitokselle, jossa siitä saadaan paras mahdollinen tuotto. Laskentamallin perustaksi selvitetään haastattelemalla eri tuotantolaitosten tuotannossa tärkeiden puutavaran laatutekijöiden arvostus. Tuotantolaitokset antavat laatutekijöille painokertoimet ja priorisoivat ne prosessin ja lopputuotteen lähtökohdista. Tällöin saadaan selville laatutekijät, jotka sulkevat puutavaran pois tuotantolaitokselta ja ne laatutekijät, jotka antavat lopputuotteelle mahdollisimman suuren arvon.

Tutkimuksessa pyritään selvittämään tuotantolaitokselle saapuvan, raakiksi luokitellun puutavaran määrä ja raakkien käyttöprosentti tuotannossa. Samalla selvitetään myös laskentamallin sovellusmahdollisuuksia metsäteollisuudessa yleensä.

3.2. Hypoteesi

Sumean logiikan avulla voidaan luoda laskentamalli, jonka avulla pystytään nykyistä järjestelmää tehokkaammin ohjaamaan puutavaraa sen laatuparametrien perusteella. Laskentamallin avulla voidaan selvittää laatutekijöiden erilaisten kombinaatioiden ja painotusten vaikutusta puutavaran ohjaukseen.

4. MENETELMÄT JA AINEISTO

4.1. Sumean logiikan menetelmä

Käsiteltäessä ihmisten intuitiivista päättelyä voidaan puhua epätarkasta eli sumeasta, epävarmasta tai epätäydellisestä eli puutteellisesta tiedosta, jonka käsittelyssä päädytään erityyppisiin todennäköisyyslogiikoihin (mm. moniarvologiikka ja sumea logiikka) (Hyvönen, 1986). Laskentamalli on tehty sumean logiikan pohjalle, koska suurinta osaa laatutekijöistä ei pystytä määrittelemään tarkoilla luvuilla. Laatutekijöiden määrittämiseen onkin helpompi käyttää sanallisia selityksiä, joiden luokkaväliä ei pystytä tarkkaan määrittelemään (sumeat syötemuuttajat). Näin pystytään jäljittelemään ihmisen ajattelua.

Laskentamalli on luotu Mamdanin päättelyllä, koska malli perustuu asiantuntijoiden (tuotantolaitosten kehitys- ja tuotantopäälliköiden) tietämykseen heidän tuotantolaitostensa prosessin ja lopputuotteen rajoitteista sekä vaatimuksista. Mamdanin päättelyssä ei tarvita empiiristä tietoa, vaan sen rakentaminen suoritetaan järkeilemällä ja asiantuntemusta käyttäen. Mallin säätäminen ei tällöin välttämättä ole kovin helppoa ja haluttuihin tuloksiin pääsemiseen tarvitaan paljon työtä ja asiantuntemusta. Mamdanin päättelyä käytetäänkin nykyään esimerkiksi laitteiden säätömekanismeissa. (Internet) (Niskanen, 2003)

Takagin ja Suganon päättelyä voitaisiin taas käyttää, jos käytössä olisi empiiristä tietoa puutavaran laatuparametrien vaikutuksesta prosessiin ja

lopputuotteeseen. Sitä ei kuitenkaan vielä ole, mutta tulevaisuudessa laskentamallin pohjalta kerätyn laatutiedon perusteella menetelmän käyttö on mahdollista. (Internet) (Niskanen, 2003)

Takagin ja Sugenon päättelyssä malli luodaan jo olemassa olevan aineiston pohjalle ja sen syöte- (X) ja vastemuuttujien (Y) relaatio pystytään määrittelemään tästä syystä helposti mm. matemaattisilla kaavoilla (Esim. jos X on A, niin Y on $a \cdot x + b$). Takagin ja Sugenon päättelyssä mallia voidaan säätää esimerkiksi neuroverkoilla. (Internet) (Niskanen, 2003)

4.2. Haastattelut

Tutkimuksessa käytiin haastattelemassa viiden eri tuotantolaitoksen edustajaa. Kaksi edustajista oli valittu massa- (hieko sekä sellu) ja kolme mekaanisesta teollisuudesta (kaksi sahaa sekä vaneritehdas). Tällä pyrittiin saamaan laajahko kuva Suomen metsäteollisuudesta ja erityisesti männyn jalostuksesta. Edustajat valittiin hyvin tarkoin harkinnanvaraisella otannalla (purposive sampling), jotta heillä olisi mahdollisimman hyvä tietämys oman tuotantolaitoksensa laatuvaatimuksista nyt ja tulevaisuudessa. Haastateltavat olivat tuotantolaitosten korkeakoulututkinnon suorittaneita tuotanto- ja kehityspäälliköitä.

Ensimmäisellä haastattelukierroksella selvitettiin sähköisen kyselykaavakkeen (liite 2.) avulla tuotantolaitosten oma eri laatutekijöiden arvostus. Haastateltavat laitoivat annetut laatutekijät järjestykseen ja antoivat jokaiselle laatutekijälle painokertoimen. Painokertoimen asteikko on 0-100, missä 0 tarkoittaa merkityksetöntä ja 100 erittäin tärkeätä arvoa tuotantoprosessin sekä lopputuotteen kannalta. Kyselykaavakkeessa pyydettiin myös antamaan tuotantolaitosten hyväksymät enimmäismäärät kullekin vialle. Tämän avulla laskentamallissa voitiin sulkea pois puutavaraniput, jotka joutuisivat suoraan raakiksi tuotantolaitokselle päästyään.

Tästä syystä myös selvitettiin tuotantolaitosten raakkiprosentti, raakkien määrät ja se kuinka paljon tuotantolaitokset käyttävät niille sopimatonta raaka-

ainetta tuotannossa. Tämän perusteella voidaan arvioida kuinka paljon tuotantolaitokset hyötyisivät, jos he saisivat juuri heidän prosessiinsa sopivaa raaka-ainetta.

Koska osa laatutekijöistä oli vaikea määrittellä numeerisesti, toisen haastattelukierroksen perusteella pyrittiin saamaan tuotantolaitosten edustajat kuvailemaan heidän tuotantolaitoksensa haluaman puutavaran laatua. Tämän avulla pystyttiin laskentamalliin määrittelemään jokaisen laatutekijän vaihteluväli.

Liitteessä 2. olevan kyselykaavakkeen lisäksi tuotantolaitosten edustajilta kysyttiin molemmilla haastattelukierroksilla heidän odotuksiaan ja ajatuksiaan tulevaisuudesta. Tarkoitus oli selvittää heidän näkemyksiään tulevaisuuden logistiikasta, tuotannosta sekä lopputuotteista. Näiden avulla pyrittiin tuotantolaitosten edustajia kyseenalaistamaan nykyisin käytössä olevat menetelmät ja saada heidät kuvailemaan millaisia menetelmien tulisi olla.

4.3. Priorisoinnit

Liitteessä 3. on esitelty kaikki haastattelujen priorisoinnit. Tuotantolaitokset ovat pystyneet hyvin laittamaan laatutekijät järjestykseen ja antamaan niille painokertoimet. Ainoastaan laatutekijöiden alimman ja ylimmän sallitun arvon määrittäminen tuntui olevan vaikeaa numeerisesti. Nämä selvitetttiinkin sanallisesti toisella haastattelukerralla.

5. TULOKSET

5.1. Laatutekijät

Laatutekijät voidaan jakaa kahteen suurempaan ryhmään: vikoihin ja muihin tuotantoon vaikuttaviin ominaisuuksiin. Nämä kaksi ryhmää on esitelty taulukossa 2. Viat on jaoteltu taulukkoon samalla kahteen eri ryhmään: runko- ja puuaineen vioiksi sen perusteella, onko vika havaittavissa vain kokonais-

valtaisesti rungossa tai sen suurehkoissa osassa vai puuaineen sisällä (Kärkkäinen, 2003). Runkoviat merkitsevätkin paljon sekä sahoilla että vaneritehtailla mutta vähän kuiduttavassa teollisuudessa, kun taas puuaineen viat merkitsevät paljon kaikissa jalostusmuodoissa (Kärkkäinen, 2003). Tämän jaottelun tarkoituksena on osoittaa, etteivät kaikki laatutekijät ole pelkästään puuaineen vikoja, vaan lopputuotteen laatuun ja tuotantoprosessiin vaikuttaa myös muita tekijöitä. Nämä tekijät voivat kuvamittauksen johdosta tulla hyvinkin tärkeiksi tulevaisuudessa, koska osaa niistä ei ole aikaisemmin käytetty tuotannossa raaka-aineen laatua kuvaavina tekijöinä.

Liitteessä 4. on tarkemmin esitelty kaikki laatutekijät ja niiden määritelmät, syntymiseen vaikuttavat tekijät sekä mittasuureet.

Taulukko 2. Laatutekijöiden jaottelu.

<i>RUNKOVIAT</i>	<i>PUUAIINEEN VIAT</i>	<i>MUUT</i>
Koro	Kierteisyys	Ikä
Lenkous	Kuolleet oksat	Kaatopäivä
Mutkaisuus	Laho	Kasvunopeus
Pölkyn kapeneminen	Lahot oksat	Kosteus
Soikeus	Oksaindeksi	Kuidun pituus
Vierasesineet	Oksakiehkuroiden etäisyys	Kuituseinän paksuus
	Oksatilavuus	Kuiva-ainepitoisuus
	Oksien koko	Kuori
	Reaktiopuu	Kuorittavuus
	Sinistymä	Lajitunnistus
	Vierasesineet	Lumi ja jää
	Väri	Lustotiheys
	Ytimen paikka	Noki
		Pihkaisuus
		Pölkyn läpimitta
		Pölkyn pituus
		Sydänpuuosuus
		Tuoretiheys

5.2. Priorisoinnit ja haastattelut

5.2.1. Puutavaran viat

Tuotantolaitoksille saapuva puutavara on laadultaan hyvinkin erilaista, mutta silti tuotannosta puutavaran pois sulkevat viat ovat miltei aina samoja. Tämä johtuu tuotantolinjan aiheuttamista rajoitteista ja lopputuotteen vaatimuksista. Kaikilla tuotantolaitoksilla puulaji ja puun dimensiot (pituus ja läpimitta) olivat tärkeimmät tuotannosta puutavaran pois sulkevat laatutekijät. Tähän on puulajin kohdalla syynä, tuotantolaitoksen keskittyminen miltei aina yhteen puulajiin. Useampaan puulajiin keskittyneillä tuotantolaitoksilla pyritään puulajit pitämään toisistaan erossa prosessiteknisistä syistä. Dimensiot taas sulkevat puutavaran pois, koska ne voivat olla joko ylisuuria tai liian pieniä tuotantolinjalle.

Taulukosta 3. huomataan, että mekaanisen teollisuuden raakkisyyt ovat niin runko- kuin puuaineen vikoja, kun taas massateollisuudessa pääosin vain puuaineen vikoja. Samoihin päätelmiin päästään myös vertailemalla eri tuotantolaitosten antamia priorisointeja (liite 3.), joissa mekaanisessa teollisuudessa korostuvat molemmat vikatyypit ja massateollisuudella vain puuaineen viat. Yhtenä syynä tähän voidaan pitää tuotantolaitosten tapaa käyttää raaka-ainetta. Mekaaninen teollisuus käyttää puutavarasta isoja yhtenäisiä osia, kun taas massateollisuus pyrkii pilkkomaan puutavaran mahdollisimman pieniin osiin (kuiduiksi).

Taulukko 3. Tuotantolaitosten raakkisyyt

	Mäntysaha (Heinola)	Koivuvaneri (Heinola)	Havusellu (Sunila/Kotka)	Mäntysaha (Korkeakoski)
Raakki%	4,3	6,4	1,2	3,7
ERITTELY (%)				
Alamitta	10	14	-	0
Ylisuuret	-	-	20	32
Kuiva- ja laho- oksat	-	14	-	-
Poikaoksa	20	3	-	2
Mutka/lenko	50	9	-	48,5
Laho	10	25	40	0,5
Koro	5	8	-	8
Välivähennys	-	25	-	-
Muut	5	2	40	9



Kuva 6. Mekaanisen teollisuuden raakkisyytä



Kuva 7. Massateollisuuden raakkisyitä

5.2.2. Raaka-aine ongelmat

Tuotantolaitokset luokittelevat raakiksi 1-5 prosenttia kaikesta tuotantolaitokselle saapuvasta puutavarasta (taulukko 1.), mutta silti ne käyttävät miltei kaiken hyödyksi tuotannossa (taulukko 4.). Tämä johtuu siitä, että tuotantolaitokset muuttavat tuotantoprosessiaan välttyäkseen kalliilta jälleen kuljetuskustannuksilta toiselle tuotantolaitokselle. Seurauksena onkin usein lopputuotteen laadun laskeminen. Tästä syystä laadunmittaukseen ennen kaukokuljetusta olisi tarvetta.

Nykyään laaduntarkkailu suoritetaan tuotantolaitoksilla pääosin otannalla saapuvasta puutavaramäärästä (noin 5 %) ja se suoritetaan dimensioita lukuun ottamatta silmämääräisesti. Kuitenkin inhimillisistä syistä, jos vikoja on paljon yhdessä kuormassa, puutavaran vastaanottava henkilö ei usein uskalla laittaa todellisuutta vastaavaa raakkimäärää. Joskus syynä voi olla jopa osalla

tuotantolaitoksista käytössä oleva tulospalkkaus, joissa alhainen raakkiprosentti on yhtenä arviointikohtana.

Taulukko 4. Tuotantolaitosten raakiksi luokitellun puun käyttö tuotannossa

	Mäntysaha (Heinola)	Koivuvaneri (Heinola)	Havusellu (Sunila/Kotka)	Mäntysaha (Korkeakoski)
Raakien käyttö %	75–80	98	100	63
ERITTELY (%)				
Alamitta	100	100	-	0
Ylisuuret	-	-	100	0
Kuiva- ja laho- oksat	-	100	-	-
Poikaoksa	100	100	-	100
Mutka/lenko	90	100	-	100
Laho	0	50	100	0
Koro	100	100	-	100
Välivähennys	-	0	-	-
Muut	50	80	100	93

5.3. Sumean jaottelun perusteet

Sumean logiikan pohjana on sumea jaottelu, jossa pyritään ensin sanallisesti selvittämään jokin asia. Tässä laskentamallissa sumea jaottelu tehtiin eri laatuparametreille. Jokainen laatu parametri pyrittiin jakamaan kymmeneen luokkaan (esim. taulukko 5.). Tämä ei ollut mahdollista kaikille parametreille, kuten puulajille, joita kuvamittauksella pystytään erottamaan viiteen luokkaan (haapa, koivu, kuusi, mänty ja tuntematon). Ikä, joka pyrittiin jakamaan hakkuidensa mukaan kuuteen luokkaan (taimikko, ensimmäinen ja toinen harvennus, päätehakkuu, erittäin vanha sekä yli vanha), on toinen vastaava parametri.

Jokaiselle laatu parametrille pyrittiin myös löytämään numeeriset vastineet sanalliselle jaottelulle (esim. taulukko 5.). Numeerisen jaottelun tekeminen ei

ollut helppoa, koska useimmissa tuotantolaitoksissa ei pystytty selittämään laatua numeerisesti. Tämä johtui siitä, ettei laatua ole pystytty aikaisemmin mittaamaan tarkasti, vaan se on jouduttu tekemään pääosin silmämääräisesti. Laatutekijöistä löytyi myös neljä parametria (kasvunopeus, kuorittavuus, lajitunnistus sekä väri), joiden määrittäminen oli täysin mahdotonta numeerisesti, koska niiden määrittäminen kuvamittauksessakin suoritetaan visuaalisesti. Näiden käyttämiseen jouduttiin laskentamallissa keksimään jokin numeerinen vastine, jotta mallin tekeminen olisi yleensä ollut mahdollista.

Taulukko 5. Oksatilavuuden sumea jaottelu

JAOTTELU	MÄÄRÄ <i>(Oksien tilavuus % koko rungon tilavuus %:sta)</i>		
	Vasen raja	Huippu	Oikea raja
EI OKSIA	0.00	0.03	0.05
ERITTÄIN VÄHÄN OKSIA	0.03	0.11	0.20
VÄHÄN OKSIA	0.11	0.23	0.35
KOHTALAISEN VÄHÄN OKSIA	0.23	0.47	0.70
MELKO VÄHÄN OKSIA	0.47	0.73	1.00
KOHTALAISESTI OKSIA	0.73	1.02	1.30
MELKO PALJON OKSIA	1.02	1.31	1.60
KOHTALAISEN PALJON OKSIA	1.31	1.65	2.00
PALJON OKSIA	1.65	2.03	2.40
ERITTÄIN PALJON OKSIA	2.03	2.51	3.00

5.4. Laskentamalli

Sumean logiikan, painokertoimien ja puutavaran hinnan avulla on saatu aikaan laskentamalli, joka kertoo mille tuotantolaitokselle yksittäinen pölkky tai puutavaranippu kannattaa kuljettaa. Se kertoo sekä sanallisesti että osin myös numeerisesti millaista puutavara on. Laskentamallissa otetaan huomioon, kuinka paljon kussakin puutavaranipussa tai pölkkyssä voi olla tiettyä

laatutekijää. Jos puutavaraniipussa on jotakin laatutekijää yli tuotantolaitosten antamien mitta- ja laatuvaatimusten, puutavaraniippua ei voida toimittaa kyseiselle tuotantolaitokselle, vaikka nykyään näin tapahtuukin. On myös mahdollista, että vikaa on niin paljon, ettei puutavaraniippua tai pölkyä voida hyväksyä millekään tuotantolaitokselle. Tällöin se pyritään kuljettamaan sille tuotantolaitokselle, jolle se laskentamallin on mukaan lähimmäksi soveliaain. Näin kaikki raaka-aine saadaan sijoitettua jollekin tuotantolaitokselle. Nykyään tuotantolaitosten prosessit ovat hyvinkin mukautuvia raaka-aineen suhteen, eikä näin ollen mihinkään prosessiin täysin soveltumatonta puutavaraa oikeastaan ole olemassa.

Laskentamallissa (rakennekaavio liitteessä 5.) on pyritty saamaan eri tuotantolaitosten haluama raaka-aine vertailukelpoiseksi toistensa kanssa. Tämän johdosta laskentamallissa käytetään kahta erilaista kerrointa, ensimmäisen (laatupisteiden) avulla laskentamallille selvitetään millaista raaka-ainetta tuotantolaitos pystyy käyttämään hyväksi ja toisen (painokertoimen) avulla kuinka tärkeä laatutekijä raaka-aineessa on tuotantolaitokselle. Molemmilla pystytään säätämään mallia tarpeen mukaan, mutta jälkimmäisellä on suurempi vaikutus mallin toimintaan. Puutavaran hinnalla taas pyritään ohjaamaan määriä, jonka merkitys vuorovaikutteisessa puutavaran ohjauksessa on erittäin tärkeää. Hinta otettiin myös laskentamalliin siksi, että sen avulla pystyttiin takaamaan mekaanisen teollisuuden raaka-aine. Massateollisuudessa ei ole niin tarkat kriteerit laatuparametreille kuin mekaanisessa teollisuudessa, ja näin ollen kaikki raaka-aine olisi päätynyt massateollisuuteen.

Liitteessä 5. olevasta kaaviosta voidaan huomata, että vertailuun voidaan yhdeltä tuotantolaitokselta ottaa kaksi eri vertailulukua, riippuen siitä onko jokin laatupisteistä mahdollisesti negatiivinen. Tarkoituksena onkin suunnata puutavaraniippu tai pölky tuotantolaitokselle, jonka laskentakaavojen antama tulos on paras. Jos jonkin tuotantolaitoksen laatupisteistä jokin on negatiivinen, puutavaraniippua tai pölkyä ei kannata suunnata kyseiselle tuotantolaitokselle. On kuitenkin mahdollista, että laskentamalli sulkee puutavaraniipun tai pölkyn pois kaikilta tuotantolaitoksilta. Tällöin se pyritään

suuntaamaan tuotantolaitokselle, jonka laskentamallissa oleva laatupisteiden keskiarvo on suurin. Näin kaikki raaka-aine saadaan hyödynnettyä mahdollisimman hyvin.

Tuotantolaitokset pystyvät analysoimaan haluamansa raaka-aineen ominaisuuksia hyvin yksipuolisesti eli omalta kannaltaan. Tämän johdosta tuotantolaitoksilta selvitettiin laskentamalliin vain ne ominaisuudet, jotka ne itse pystyivät määrittämään. Minkäänlaista eri tuotantolaitosten välistä laatutekijöiden kertoimien normitusta ei kuitenkaan tarvita, koska laskentamallissa tarkasteltavana on sama pölkkö vain eri laatuparametrien kannalta tarkasteltuna.

6. DISKUSSIO

6.1. Johtopäätökset

Vastaavaa laskentamallia ei ole käytössä ja sillä onkin pyritty tässä työssä osoittamaan, että kyseisellä mallilla pystytään ohjailemaan saman puulajin pölkköjä eri tuotantolaitoksille. Pyrkimyksenä on ollut ottaa mukaan puutavaralaatuvaatimuksiltaan mahdollisimman lähellä toisiaan olevia mäntyä käyttäviä tuotantolaitoksia (kaksi sahaa ja sellutehdas), jotta mallin erottelukyky tulisi mahdollisimman hyvin esille. Tällöin korostuu puutavaran hinta, joka ohjaa puutavaran tuotantolaitokselle jossa siitä saa lopputuotteena mahdollisimman suuren tuoton.

Tämän laskentamallin tarkoituksena onkin ehdottaa paras mahdollinen tuotantolaitosvaihtoehto, eikä antaa selviä numeerisia tuloksia eri tuotantolaitosten välillä. Tämä johtuu siitä, ettei laskentamallilla pystytä vielä simuloimaan aineiston puuttumisen takia. Mallia ei näin ollen pystytä vielä kalibroimaan.

Tällä hetkellä laskentamalli on osoittautunut toimivaksi. Laskentamallin laajentamista varten tulisi kerätä priorisointeja useammilta tuotantolaitoksilta ja pyrkiä hiomaan kertoimia mahdollisimman sopiviksi kuvaamaan kaikkia

samaa lopputuotetta valmistavia tuotantolaitoksia. Eli kaiken tyyppisten tuotantolaitosten mukaan ottaminen on tärkeää, jotta mallista tulisi kattava ja sitä voitaisiin käyttää hyödyksi käytännössä.

Laskentamalli on tällä hetkellä laadittu Excel-taulukkoon, eikä sen käyttö ole tästä syystä kovinkaan helppoa. Myöskään sen muokkaaminen suuremmaksi ei ole mahdollista taulukko-ohjelman kapasiteettirajoituksen takia. Laskentamallia laajennettaessa tulisikin luoda ohjelmalle oma ohjelmisto, jonka laadinnassa tulisi ottaa huomioon keskeisesti sen käyttäjien (tuotantolaitosten) toiveet.

Kuvamittauksen ja laskentamallin käytöllä voitaisiinkin välttää inhimillinen tulosten muokkaus. Sumean logiikan tarkoituksena laskentamallissa on ihmismäistä ajattelua mukaillen selvittää painokertoimet laatuparametreille, eikä vaikuttaa millään tavalla mittaustuloksiin. Näin saataisiin realistisia mittaustuloksia puuaineen ominaisuuksista, eikä ihminen pääsisi vaikuttamaan päätösprosessiin muutoin kuin laskentamallin kertoimia ja hintaa muuttamalla.

6.2. Laskentamallin muunneltavuus

Laskentamallia voidaan muokata, sen mukaan miten mittausmahdollisuudet muuttuvat. Mallissa olevia laatutekijöitä voidaan lisätä tai niitä voidaan poistaa, sen mukaan millaisia mittaustuloksia käytössä olevalla tekniikalla voidaan saada. Laskentamalli toimii jopa pelkkien dimensioiden perusteella, mutta kuvamittauksen sovellusten avulla voidaan päästä eroon silmämääräisestä laadun mittaamisesta. Tällöin tuotantolaitokset saisivat juuri haluamiaan laatuja sisältävää raaka-ainetta.

Nykyäänhän tuotantolaitokset eivät olekaan täysin varmoja siitä, miten jotkut laatutekijät vaikuttavat prosessiin ja lopputuotteeseen. Kuvamittauksen avulla voitaisiinkin tuottaa tuotantolaitoksille tasalaatuisempaa raaka-ainetta, jolloin niiden olisi helpompi seurata miten eri laatutekijät vaikuttavat tuotantoprosessiin.

6.3. Lajittelun lisääminen metsässä

Kuvamittauksen ja laskentamallin käyttöönotto lisää puutavaralajeja, koska tällöin laadun mukaan lajittelu on mahdollista. Tämä tuo lisää työtä metsäkuljetukseen ja kaukokuljetukseen, mutta samalla se mahdollistaa lopputuotteen korkeamman arvon ja alhaisemmat tuotantokustannukset. Tuotantolaitoksille se tuo mahdollisuuden tuottaa tasalaatuisemmasta raaka-aineesta lopputuotetta, joka erityisesti massateollisuudessa tuo odotetusti korkealaatuisempia lopputuotteita ja prosessin ohjaaminen on helpompaa. Mekaanisessa puuteollisuudessa taas pystytään paremmin vastaamaan asiakkaiden toiveisiin, eikä enää synny niin paljoa ”ei haluttua” – sivutuotetta.

7. JATKOTUTKIMUSTEN AIHEITA

7.1. Laatutekijöiden sisällyttäminen nykyjärjestelmään

Laskentamallista voidaan tehdä jopa yksittäisen metsäyhtiön kattava ohjausjärjestelmä. Järjestelmä olisi oppiviin järjestelmiin perustuva logistinen ohjausjärjestelmä metsätalouden uusiin haasteisiin. Järjestelmässä jokaisella tuotantolaitoksella on omat laskentataulukonsa. Tämän avulla voitaisiin myös vertailla kaikkien tuotantolaitosten tehokkuutta, vertaamalla yksittäisten tuotantolaitosten saaman raaka-aineen laatua (laatuparametreja) tuotetun lopputuotteen hintaan. Yksittäisten tuotantolaitosten laskentamallista saadut laatu hinnat eivät ole suoraan vertailtavissa keskenään, koska interaktiivisina toimivissa laskentamalleissa luvut muuttuvat eri tavalla.

Liitteessä 6. on tarkemmin eritelty mitä tällaisella kattavalla ohjausjärjestelmällä voitaisiin ohjata ja vertailla. Suurin osa järjestelmistä on kuitenkin järkevä pitää suljettuina kilpailullisista syistä, kuten tuotantolaitosten laadun ohjaus. Tarkemman laadun mittauksen mukaan ottaminen metsäteollisuuteen vaatii suuria muutoksia koko puunhankinnan ketjussa.

Ohjausjärjestelmä voidaankin muokata kaikkiin ketjun osiin puunkasvatuksesta tuotantolaitoksen lopputuotteen lajitteluun.

Metsän suunnittelu ja toteutus: Käynnissä olevassa tutkimuksessa selvitetään pystyssä olevan puuston kuvamittausta. Mittauksen avulla pystytään selvittämään puiden dimensiot ja laatu. Kun mittaukseen liitetään kasvatusmallit ja metsänkäsittelyohjeet, voidaan tehdyn järjestelmän avulla simuloida puuston kasvua. Kun järjestelmään liitetään vielä harvennusmallit (pituusboniteetin perusteella), tarvittavien ajourien välit, maastokartat ja tämän tutkimuksen pohjalta tehtävä ohjausjärjestelmä, voidaan tämän järjestelmän avulla suorittaa metsänkäytön suunnittelua. Näin voidaan mitatun tiedon perusteella selvittää poistettavan puuston määrä ja ajourat maastonmuotojen perusteella.

Jo olemassa olevalla tekniikalla voidaan siis mitata puustoa ja maastonmuotoja, jonka avulla saadaan ennakkomittaukseen huomattavasti enemmän tietoa. Saadun tiedon perusteella voidaankin automaattisesti suorittaa metsänkäytön suunnittelu ja samalla suorittaa myös jälkiseuranta. Näin koulutuksessa ja mahdollisissa riitatilanteissa seuranta voidaan suorittaa mitatun tiedon perusteella, eikä nykyisin tapahtuvaa, usein virheellistä ja puolueellista, arviointia tarvitse enää suorittaa.

Hakkuukoneet: Kuvamittauksen suorittaminen hakkuukoneessa antaa mahdollisuuden puiden mittaamiseen pystyssä ja samalla kaadettavien puiden optimoinnin niiden laadun perusteella. Käynnissä olevassa tutkimuksessa selvitetään runkojen dimensioiden ja laadun mittausta pystyssä. Tämän tutkimuksen pohjalta tehtävän ohjausjärjestelmän avulla voidaan harvennuk- sissa optimoida poistettavat puut, jotta kasvamaan jäävän puuston arvo voitaisiin maksimoida tulevaisuudessa.

Katkonnassa kuvamittauksen käyttö taas vaatii uuden katkonnano- hjausjärjestelmän. Jos ohjausjärjestelmään liitetään kuljetuskustannukset, niin voidaan erittäinkin helposti optimoida hakkuukoneessa järjestelmän antamaa pölkyn suurinta mahdollista laatuhintaa. Tässä täytyy kuitenkin ottaa

huomioon myös erilaiset viat joita voi esiintyä rungossa, kuten tyvilaho. Tyvilahon tapauksessa tyveltä pyritään saamaan mahdollisimman optimaalisesti vika pois, jotta arvokasta tyvitukkaa saataisiin mahdollisimman paljon. Ohjausjärjestelmään perustuvassa katkonnanohjausjärjestelmässä olisikin tärkeää, ettei puutavaran ohjauksessa oteta huomioon kaikkia maan tuotantolaitoksia, vaan ainoastaan leimikon puuston kannalta oleellimmat. Tällöin ennen hakkuiden aloittamista hakkuukoneeseen ladattaisiin joko tietoverkkoa pitkin tai muulla keinolla lähimpien tuotantolaitosten laskentataulukot (kuten nykyisessä järjestelmässä hintamatriisi), joita koneen ohjausjärjestelmä hakkuutyön aikana käyttää. Hintaa ja kertoimia muuttamalla hakkuukone voi saada enemmän tai vähemmän määrättyä puutavaralajia. Määriin voi vaikuttaa joko ennen hakkuita asetetut puutavaralajimäärät, jotka tulisi täyttää, tai interaktiivisessa tietoverkossa tuotantolaitosten jatkuvasti muuttuvat tarpeet. Interaktiivisessa tietoverkossa toimittaessa huomioon voidaan ottaa mm. muiden korjuuketjujen korjuumäärät ja tuotantolaitoksen lopputuotteiden tuottamisessa tarvittavan raaka-aineen määrä.

Puutavaralogistiikka: Hakkuukoneessa olevan järjestelmän perusteella voidaan antaa lähikuljetukselle ohjeita siitä, missä puutavara sijaitsee palstalla ja mihin tuotantolaitokselle valmistettava puutavara tulisi kuljettaa. Saattomuistin käyttäminen yksittäisissä pölkyissä tai nipuissa pystyisi myös välittämään yksilöllistä ja tarkkaa mittaustietoa puutavaran laadusta.

Suunnittelussa ja toteutuksessa syntyneiden ajourien käyttömahdollisuudet ovat myös lähikuljetuksen käytössä, jossa järjestelmä ilmoittaa kuljettajalle kunkin ajouran kestävyuden ja kuinka monta kertaa vallitsevalla kelillä on kannattavaa ajaa samaa ajouraa, jotta kasvamaan jäävään puustoon tai maastoon ei syntyisi suuria vaurioita. Kyseisestä aiheesta onkin tehty jo perustutkimusta (Suvinen, Antti; Saarilahti, Martti & Tokola, Timo 2003).

Kaukokuljetusta varten välivarastoon lajiteltu puutavara kuljetetaan tuotantolaitokselle, josta siitä saadaan suurin mahdollinen tuotto. Logistiset kustannukset on otettu jo huomioon puutavaran katkonnassa, joten uutta reittioptimointia ei tarvitse suorittaa, jos keli ei ole suuresti muuttunut. Kauko-

kuljetuskustannukset kasvavat puutavaralajimäärien kasvaessa. Järjestelmän esimerkiksi ilmoittaisi että muutaman kuutiometrin puutavaranippu tulisi kuljettaa tuotantolaitokselle, koska se on lopputuotteen arvon mukaan laskettuna kannattavaa. Tämä lisäisi kaukokuljetuksessa pysähdyksiä ja lastausaikoja, koska puutavara-autot joutuvat jättämään osan kuormastaan toiselle autolle, joka on menossa tuotantolaitokselle, johon puutavara tulisi kuljettaa.

Tuotantolaitosten prosessit on jaettu kahteen luokkaan mekaaniseen ja massateollisuuteen. Mekaanisessa teollisuudessa ohjausjärjestelmästä on enemmän hyötyä, koska siinä raaka-aineen laatu vaikuttaa huomattavasti enemmän lopputuotteen laatuun.

Mekaanisessa teollisuudessa pölkkyjen lajittelu ennen tuotantoprosessia on erittäin tärkeää. Riippuen onko laatulajittelu automaattista vai suoritetaanko se silmämääräisesti, puutavara lajitellaan eri luokkiin. Automaattisessa laatulajittelussa pystytään mittaamaan puutavaran sisäistä laatua ja sen perusteella lajitteluluokkia syntyy huomattavasti enemmän ja usein lajittelutaskujen määrä onkin tällöin rajoittava tekijä. Ohjausjärjestelmällä pystyttäisiin automaattisessa laatulajittelussa luotettavammin lajittelemaan puutavara, eikä nykyään käytössä olevia, erillään toimivia, järjestelmiä tarvita. Myöskään uusien laatutekijöiden mittaaminen ei tuottaisi ongelmia, koska ohjausjärjestelmä on hyvinkin helposti muokattavissa.

Ohjausjärjestelmää voidaan myös käyttää prosessissa pölkkyjen prosessointitapojen vertailussa. Tällöin voidaan selvittää optimaalisin tapa käsitellä pölkky (esim. suunnitella optimaalisin sahaus pölkystä). Myös lopputuotteen arvotus ja laatulajittelu voidaan suorittaa ohjausjärjestelmällä, lopputuotteen laatuparametrien perusteella.

Massateollisuudessa pölkkyjä ei kannata lajitella tuotantolaitoksella kovin moneen laatuluokkaan, eikä se nykyisellä tekniikalla ole edes mahdollista, koska massateollisuudessa ei ole pölkkyjen lajittelulinjastoa. Lajittelu ei kannata, koska varastotila ei ole useinkaan kovin suuri ja massan valmistuk-

seen tarvitaan usein ominaisuuksiltaan erilaisia kuituja. Tästä syystä massateollisuudessa puutavara kannattaisikin jakaa aluksi kahteen puutavaraluokkaan: pitkä- ja lyhytkuituisiin. Tulevaisuudessa kun laatua pystytään todella mittaamaan ja laadultaan määrätynlaista puutavaraa ohjaamaan tuotantolaitoksille, luokkien määrä ja laatukriteerit voivat kylläkin muuttua.

Nykyään massateollisuuden prosessin hallinta on viety erittäinkin pitkälle, mutta silti hakkeen ja pölkkyjen laadun perusteella raaka-aineen lajitteluun tai prosessin hallintaan voisi ohjausjärjestelmällä vaikuttaa hyvin paljon. Tämä johtuu ohjausjärjestelmän sumeasta logiikasta, jota nykyään käytetään säätötekniikkana hyvinkin paljon.

Nykyään lopputuotteella on massateollisuudessa hyvinkin tarkat laatukriteerit ja lopputuotteen laatua tarkkaillaan nykyään hyvin erilaisilla tekniikoilla. Tässä tutkimuksessa kehitetyllä ohjausjärjestelmällä voidaan myös lajitella massateollisuuden lopputuotetta laadun perusteella.

8. KIRJALLISUUS

ALA-ILOMÄKI, JARI 1993. Yksioteharvesterin mittaustarkkuuden riippuvuus rungon ominaisuuksista. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 450. 44 s.

HAMINA, SASU 2005. Excel – taulukkolaskentaohjelmalla luotu laskentamalli.

HOLMSTRÖM, J-E 1990. Puun rikkomaton tarkastus ja mittaus. Konsulttitoimisto J-E Holmström Oy. 119 s.

HYVÖNEN, EERO 1986. Asiantuntijajärjestelmien tietämystekniikka. Knowledge engineering Ky. 161 s.

IHALAINEN, HEIMO 2005. Kuvaan perustuvan mittauksen ja anturitekniikan uusia mahdollisuuksia – seminaari 12.1.2005. Vantaa.

KIVINEN, VELI-PEKKA & UUSITALO, JORI 2002. Applying Fuzzy Logic to Tree Bucking Control. Forest Science 48 (4). s. 673-684.

KÄRKKÄINEN, MATTI 2003. Puutieteen perusteet. Metsälehti Kustannus. 451 s.

LAITINEN, JYRKI & SAVIARO, JANI 2001. A new method for determination of stem crookedness during logging. Paperi ja Puu – Paper and Timber Vol.83/No. 5/2001: 390-393

Metsätilastollinen vuosikirja 2004. Metla. 416 s.

NEVALAINEN, MIKA; SAIRANEN, PENTTI & VERKASALO, ERKKI 1997. Pitkän kuitupuun ajoneuvokuormien pinomittauksen kehittäminen. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 653. 44 s.

NISKANEN, VESA A. 2003. Sumea logiikka. Werner Söderström Osakeyhtiö. 242 s.

PORKKA, KEIJO 2005. Haastattelu 10.1.2005. Heinola.

PUHAKKA, JORMA & THESSLUND, OLOF 2005. Haastattelu 14.2.2005. Simpele.

RÄSÄNEN, TAPIO; MARJOMAA, JARI & IHALAINEN, ANTTI 1995. Metsurimittauksen tarkkuus. Metsätehon katsaus 7/1995. 10 s.

SUVINEN, ANTTI; SAARILAHTI, MARTTI & TOKOLA, TOMI 2003. Terrain Mobility Model and Determination of Optimal Off-road Route. ScanGIS'2003: Proceedings of the 9th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science, 4th – 6th June 2003, Espoo, Finland. Helsinki University of Technology. s. 251-259.

SUURINIEMI, SAKARI 1998. Lenkouden mittaus optisilla tukkimittareilla. Helsingin yliopiston Metsävarojen käytön laitoksen opinnäytetyö MMM-tutkintoa varten. 67 s.

VERKASALO, ERKKI (toim.); IHALAINEN, ANTTI; SAIRANEN, PENTTI 1995. Puutavaran mittauksen kehittämistutkimuksia 1989–93. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 558. 69 s.

Internet:

<http://domino.utu.fi/tiedotus/tiedotukset.nsf/0/a65df20079751342c2256c8600431a4e?OpenDocument>

<http://www.cs.tut.fi/~jkorpela/siv/>

<http://personal.inet.fi/yritys/creativesco/Alkuosa.htm>

<http://www.ac.tut.fi/aci/courses/7605100/materiaali.html>

Liite 1.

Laatutekijöiden mittausmahdollisuudet

LAATUPARAMETRI	MITTAUS- MAHDOLLISUUDET	MITTAUS- TAPA
Ikä	++	va
Kaatopäivä	?	ma
Kasvunopeus	+	va
Kierteisyys	?	va
Koro	?	va
Kosteus	?	ma,uä
Kuidun pituus	?	va,uä,ma
Kuituseinän paksuus	?	va,uä,ma
Kuiva-ainepitoisuus	?	uä,ma
Kuolleet oksat	?	?
Kuori	+	va,lu,uä,ma
Kuorittavuus	?	va,ma
Laho	+	va,lu,ma
Lahot oksat	?	?
Lajitunnistus	?	va
Lenkous	+	va
Lumi ja jää	?	uä,ma
Lustotiheys	+	va
Mutkaisuus	++	?
Noki	?	va,lu
Oksakiehkuroiden etäisyys	+	va,ma
Oksaindeksi	+	va,ma
Oksien koko	+	va,ma
Pihkaisuus	?	va,lu
Pölkyn kapeneminen	+	va
Pölkyn läpimitta	++	va
Pölkyn pituus	++	va
Reaktiopuu	?	va
Sinistymä	?	?
Soikeus	+	va
Sydänpuuosuus	?	va,lu,ma
Tuoretiheys	?	ma,uä
Vierasesine	++	va,lu,ma
Väri	+	va
Ytimen paikka	?	va

Selitykset

MITTAUS- TAPA

Koodi	Selitys
uä	Ultraäänimittaus
ma	Mikroaaltomenetelmä
va	Valokuvaus
lu	Lumiesenssimenetelmä
?	Ei vielä tietoa

MITTAUS- MAHDOLLISUUDET

Koodi	Selitys
?	Mahdollinen, ei ennakkotietoa
+	Mahdollinen, mutta epävarmuustekijöitä
++	Mahdollinen, on ennakkotietoa
-	Onnistuminen epävarma

Liite 2.

LAATUTEKIJÖIDEN ARVOSTUS

SAHAPUU

Mänty, kuusi & koivu

LAATUPARAMETRI	SIJOITUS	PAINOARVO (0-100)	VIAN MIN. MÄÄRÄ	VIAN MAX. MÄÄRÄ
Lajitunnistus				
Oksaindeksi				
Lahot oksat				
Kuolleet oksat				
Oksien koko				
Lenkous				
Mutkaisuus				
Lustotiheys				
Kasvunopeus				
Ikä				
Soikeus				
Koro				
Reaktiopuu				
Väri				
Sinistymä				
Laho				
Kuori				
Kierteisyys				
Pölkyn pituus				
Pölkyn läpimitta				
Vierasesineet				
Oksakiehkuroiden etäisyys				
Sydänpuuosuus				

SELLUPUU

Mänty, kuusi & koivu

<i>LAATUPARAMETRI</i>	<i>SIJOTUS</i>	<i>PAINOARVO (0-100)</i>	<i>VIAN MIN. MÄÄRÄ</i>	<i>VIAN MAX. MÄÄRÄ</i>
Lajitunnistus				
Kuituseinän paksuus				
Kuidun pituus				
Kuiva-ainepitoisuus				
Kuori				
Pölkyn läpimitta				
Pölkyn pituus				
Pihkaisuus				
Laho				
Kaatopäivä				
Väri				
Sinistymä				
Noki				
Oksaindeksi				
Lustotiheys				
Kasvunopeus				
Ikä				
Lustokenttä				
Soikeus				
Reaktiopuu				
Vierasesineet				
Varastolaho				
Sydänpuuosuus				
Tuoretiheys				

MEKAANINEN MASSA (HIERRE)

Kuusi

LAATUPARAMETRI	SIJOTUS	PAINOARVO (0-100)	VIAN MIN. MÄÄRÄ	VIAN MAX. MÄÄRÄ
Lajitunnistus				
Väri				
Sinistymä				
Kuituseinän paksuus				
Kuidun pituus				
Kaatopäivä				
Kuorittavuus				
Kosteus				
Lumi ja jää				
Laho				
Pölkyn läpimitta				
Pölkyn pituus				
Oksaindeksi				
Vierasesineet				
Soikeus				
Reaktiopuu				
Sydänpuuosuus				
Tuoreiheys				

MEKAANINEN MASSA (HIOKE)

Kuusi

LAATUPARAMETRI	SIJOITUS	PAINOARVO (0-100)	VIAN MIN. MÄÄRÄ	VIAN MAX. MÄÄRÄ
Lajitunnistus				
Väri				
Sinistymä				
Kuituseinän paksuus				
Kuidun pituus				
Kaatopäivä				
Laho				
Pölkyn läpimitta				
Pölkyn pituus				
Oksaindeksi				
Vierasesineet				
Soikeus				
Reaktiopuu				
Kuorittavuus				
Sydänpuuosuus				
Lumi ja jää				
Tuoretiheys				

KERTOPUU

LAATUPARAMETRI	SJOITUS	PAINOARVO (0-100)	VIAN MIN. MÄÄRÄ	VIAN MAX. MÄÄRÄ
Lajitunnistus				
Pölkyn läpimitta				
Pölkyn kapeneminen				
Soikeus				
Koro				
Reaktiopuu				
Pölkyn pituus				
Lenkous				
Mutkaisuus				
Oksaindeksi				
Oksien koko				
Lahot oksat				
Kuolleet oksat				
Laho				
Väri				
Sinistymä				
Lustotiheys				
Ytimen paikka				
Vierasesineet				
Oksakiehkuroiden etäisyys				

Liite 3.

Tuotantolaitosten priorisoinnit

SELLUPUU

(Sunila Oy)

LAATUPARAMETRI	SIJOITUS	PAINOARVO (0-100)	VIAN MIN. MÄÄRÄ	VIAN MAX. MÄÄRÄ
Lajitunnistus	2	100		
Kuituseinän paksuus	8	20		
Kuidun pituus	1	80		
Kuiva-ainepitoisuus	7	20		
Kuori	11	10		
Pölkyn läpimitta	5	70	6cm	60cm
Pölkyn pituus	6	50	2.7m	6m
Pihkaisuus	10	10		
Laho	4	70		kovalaho
Tuoreus	7	50		
Väri	9	30		
Sinistymä	9	30		
Noki	3	100		0
Oksaisuus		20		
Lustotiheys	8	30		
Kasvunopeus	8	0		
Ikä	8	0		
Lustokenttä	8	0		
Epäpyöreys		0		
Reaktiopuu		10		
Vierasesineet	3	100		0
Varastolaho	4	100		0

ei muuta
kuin
havupuuta!

MEKAANINEN MASSA (HIOKE)

(M-Real Simpele)

LAATUPARAMETRI	SIJOITUS	PAINOARVO (0-100)	VIAN MIN. MÄÄRÄ	VIAN MAX. MÄÄRÄ
Lajitunnistus	1	100		
Väri/vaaleus	7	75		
Sinistymä	11	65		
Kuituseinän paksuus	9	70		
Kuidun pituus				
Tuoreus	3	90		yli 730 kg/m3
Laho	2	99		20 mm
Pölkyn läpimitta	4	85	7 cm	40 cm
Pölkyn pituus	5	80	270 cm	570 cm
Oksaisuus	10	68		
Vierasesineet	6	78		
Epäpyöreys	8	73		
Reaktiopuu	13	25		
Kuorittavuus	12	60		
Kosteus=tuoreus				
Haavat/vauriot	14	20		
Kapeneminen	15	15		

oltava
kuusikuitupuuta

kuidun paksuus=
max kevätpuu
lpm 12-16 cm

norsunjalka eli
juurenniska

SAHAPUU (Mänty)

(UPM-Kymmene, Heinolan saha)

LAATUPARAMETRI	SIJOTUS	PAINOARVO (0-100)	VIAN MIN. MÄÄRÄ	VIAN MAX. MÄÄRÄ
Lajitunnistus	1	100		
Oksaisuus	12	90		
Lahot oksat	10	90		
Kuivat oksat	11	90		
Oksien koko	9	90		70 mm
Lenkous	8	90		1cm/m
Monivääryys	4	100		
Mutka	5	100		
Lustotiheys	19	10		
Kasvunopeus	20	10		
Ikä	21	0		
Lustokenttä	22	0		
Epäpyöreys	16	20		
Haava	15	20		
Reaktiopuu	14	30		
Väri	7	100		
Sinistymä	6	100		
Laho	2	100		
Kuori	17	10		
Kiertelysyys	13	30		
Tukin pituus	18	10	37	61
Tukin läpimitta	17	20	15	60
Vierasesineet	3	100		

SAHAPUU

(UPM-Kymmene, Korkeakosken saha)

LAATUPARAMETRI	SIJOTUS	PAINOARVO (0-100)	VIAN MIN. MÄÄRÄ	VIAN MAX. MÄÄRÄ
Lajitunnistus	1	100		
Oksaindeksi	5	100		
Lahot oksat	8	80		40 mm
Kuolleet oksat	-			
Oksien koko	-			
Lenkous	11	30		10mm/m
Mutkaisuus	7	80		10 mm/m
Lustotiheys	17	5		
Kasvunopeus	19	5		
Ikä	18	5		
Epäpyöreys	12	20		
Koro	14	30		
Reaktiopuu	15	30		
Väri	20	30		
Sinistymä	6	90		0
Laho	9	80		0
Kuori	16	5		
Kierteisyys	13	30		
Pölkyn pituus	3	90	310 cm	580 cm
Pölkyn läpimitta	2	90	150 mm	400 cm
Vierasesineet	4	100		1 kpl
Oksatiheys	-			
Sydänpuuosuus	10	20		

Liite 4.

RUNKOVIAT:

LAATUTEKIJÄ	SELITYS	SYY	MITTAUS	SUURE
KORO	Erilaiset kolhiutummat, kulon jäljet, hirven syömäkuviot jne.. Tähän samaan voidaan lukea myös pakkashalkeamat (K)	Aiheutuu jäljen paikallisesta poistumisesta, kuolemista tai toimintakyvyttömäksi joutumisesta (K)	Pienimmän läpimitan sisäpuolelle menevän koron syvyys	mm
LENKOUS	Rungon tai siitä leikatun käyttöosan tasainen käyryys (K)	Merkittävin aiheuttaja alhainen runkoluku taimikkovaiheessa, aiheuttaa myös mm. hyönteis- ja sienituhot sekä eläimet (K)	Käyryys yhden metrin matkalla	mm/m
MUTKAISUUS	Rungon tai siitä leikatun käyttöosan epätasaisia käyryksiä (K)	Kts. lenkous	Mutkien määrä	kpl
PÖLKYN KAPENEMINEN	Rungon tai siitä leikatun käyttöosan toinen pää on toista kapeampi	Runko kasvaa joka vuosi pituutta ja leveyttä. Tästä syystä kuluvan vuoden pituuskasvu on kapeampi, kuin edellisen vuoden. Koska edellisen vuoden pituuskasvu kasvaa leveyttä, kuluvana vuonna, edellisen kasvunsa lisäksi	Vastakkaisista päistä mitattujen läpimittojen %-ero	
SOIKEUS	Rungon tai muun puunosan poikkileikkauksen poikkeaminen ympyrän muodosta (K)	Aiheutuu usein haavoista, pahkoista ja oksista. Myös reaktiipuun muodostumiseen usein liittyy rungon epäkeskistä kasvua, joka näkyy epäpyöreynä (K)	Samasta kohdasta mitatun pienimmän ja suurimman läpimitan %-ero	
VIERASESINE	Rungossa tai siitä leikatussa osassa oleva, sinne kuulumaton, ulkopuolinen esine	Runkoon tai sen osaan, sen kasvaessa tai kaadon jälkeen, kiinnitetty tai kiinnittynyt vierasperäinen esine	Vierasesineiden määrä	kpl

PUUAINEN VIAT:

LAATUTEKIJA	SELITYS	SYY	MITTAUS	SUURE
KIERTEISYYS	Puun solukkojen pääasiallisen suunnan poikkeamista rungon tai muun osan pituussuunnasta (K)	Pohjoisella pallonpuoliskolla havupuilla on nuorena vasenkierteistä kasvua, joka muuttuu vanhetessa oikeakierteiseksi. Eteläisellä pallonpuoliskolla ilmiö on päin vastainen. Kierteisyyden paras selittävä tekijä on joko puun ikä tai poikkileikkauksen ytimestä laskettu kambiaalinen ikä, johon läheisesti liittyy läpimitan kasvaminen	Kuinka monta astetta kiertynyttä puu on	Astetta
KUOLLEET OKSAT	Oksia jotka ovat muusta puuaineesta täysin irrallaan fysiologisessa mielessä (K)	Puun kasvaessa ulko-oksat kuolevat tyvestä latvaan päin. Tällöin kuolleen oksan ytimen puoleinen osa on luonteeltaan elävä oksa eli on kiinni muussa puuaineessa, vaikka siinä ei olisi eläviä soluja (K)	Kuolleiden oksien tilavuus koko tilavuudesta prosentteina	
LAHO	Lahottajasienen kemiallisesti tai fysikaalisesti muuttama elävä tai kuollut puuaine (K)	Lahottajasieni voi infektoida elävän tai kuolleen puun juuriston tai kuoren poistumisen aiheuttaneen vaurion kautta itiöinä tai sienirihmastona. Lahottajasieni aiheuttaa puuaineessa painohäviötä, koska se käyttää ravinnokseen selluloosaa, hemiselluloosaa tai ligniiniä, riippuen lahottajasienestä ja näin samalla vaikuttaa puuaineen kuitu- ja lujuusominaisuuksiin heikentävästi (K)	Lahonnan puuaineen tilavuus koko tilavuudesta prosentteina	
LAHOT OKSAT	Rungossa tai siitä leikatussa osassa olevia lahovikaisia oksia, joka ei kuitenkaan leviä lahoamisen jälkeen syntyneisiin vuosilustoihin (K)	Kuivien että tuoreiden oksien karsiminen aiheuttaa helposti lahovian, joka ei kuitenkaan leviä karsimisen jälkeen syntyneisiin vuosilustoihin (K)	Lahonneiden oksien tilavuus koko tilavuudesta prosentteina	

PUUAINEN VIAT:

LAATUTEKIJÄ	SELITYS	SYY	MITTAUS	SUURE
Oksaindeksi				
Oksakiehkuroiden etäisyys	Rungossa tai siitä leikatussa osassa olevien oksakiehkuroiden välinen etäisyys toisiinsa	Syntyy useilla puulajeilla pituuskasvun osoittamin välimatkoin. Mitä parempi pituuskasvu on, sitä enemmän on oksatonta puuainetta oksakiehkuroiden välissä (K)	Oksakiehkuroiden etäisyys toisistaan	cm
Oksatilavuus	Rungon tai siitä leikatun osan sisällä esiintyvien terveiden oksien (sisäoksien) tilavuus (K)	Vaikuttaa kasvunopeus (kts. oksakiehkuroiden etäisyys), metsikön tiheys ja puun ikä (K)	Tuoreiden oksien tilavuus koko tilavuudesta prosentteina	
Oksien koko	Rungossa tai siitä leikatussa osassa olevien oksien keskimääräinen läpimitta rungon tai siitä leikatun osan pinnalla	Vaikuttaa millä korkaudella rungossa oksat sijaitsevat (K)	Oksien keskimääräinen läpimitta	mm
Reaktiopuu	Havupuulla (lyly) muuta puuainetta tummempaa, kiiltävämpää, painavampaa ja kovempaa puuta. Lehtipuulla (vetopuu) muuta puuainetta vaaleampaa, silkinkiiltoista, usein vaha- tai sarveismaista puuta (K)	Syntyyn vaikuttaa painovoima ja välilliset tekijät (mm. valo, tuuli ja lumi) (K)	Reaktiopuun tilavuus koko tilavuudesta prosentteina	
Sinistymä	Aiheuttaa puuaineeseen värimuutoksen (sininen tai harmaa) (K)	Leviää puihin itiöiden välityksellä, aikaisemmasta infektiokohdasta leviävän rihmaston avulla tai mahdollisesti hyönteisten kuljettamasta rihmastosta (K)	Sinistymän tilavuus koko tilavuudesta prosentteina	
Väri	Puuaineen keskimääräinen vaaleusaste	Tummuuteen vaikuttaa sydän- ja pintapuun sekä kevät- ja kesäpuun osuudet. Sydänpuu on pintapuuta ja kevätpuu kesäpuuta tummempaa.	Puuaineen vaaleusaste	Sanallinen

PUUAINEN VIAT:

LAATUTEKIJA	SELITYS	SYY	MITTAUS	SUURE
VIERASESINE	Rungossa tai siitä leikatussa osassa oleva, sinne kuulumaton, ulkopuolinen esine	Runkoon tai sen osaan, sen kasvaessa tai kaadon jälkeen, kiinnitetty tai kiinnittynyt vierasperäinen esine	Vierasesineiden määrä	kpl
YTIMEN PAIKKA	Biologisen keskipisteen sijainti puun poikkileikkauspinnalla	Kts. Epäpyöreys, koro, lenkous ja mutkaisuus	Biologisen keskipisteen etäisyys geometrisestä keskipisteestä	mm

MUUT LAATUTEKIJÄT:

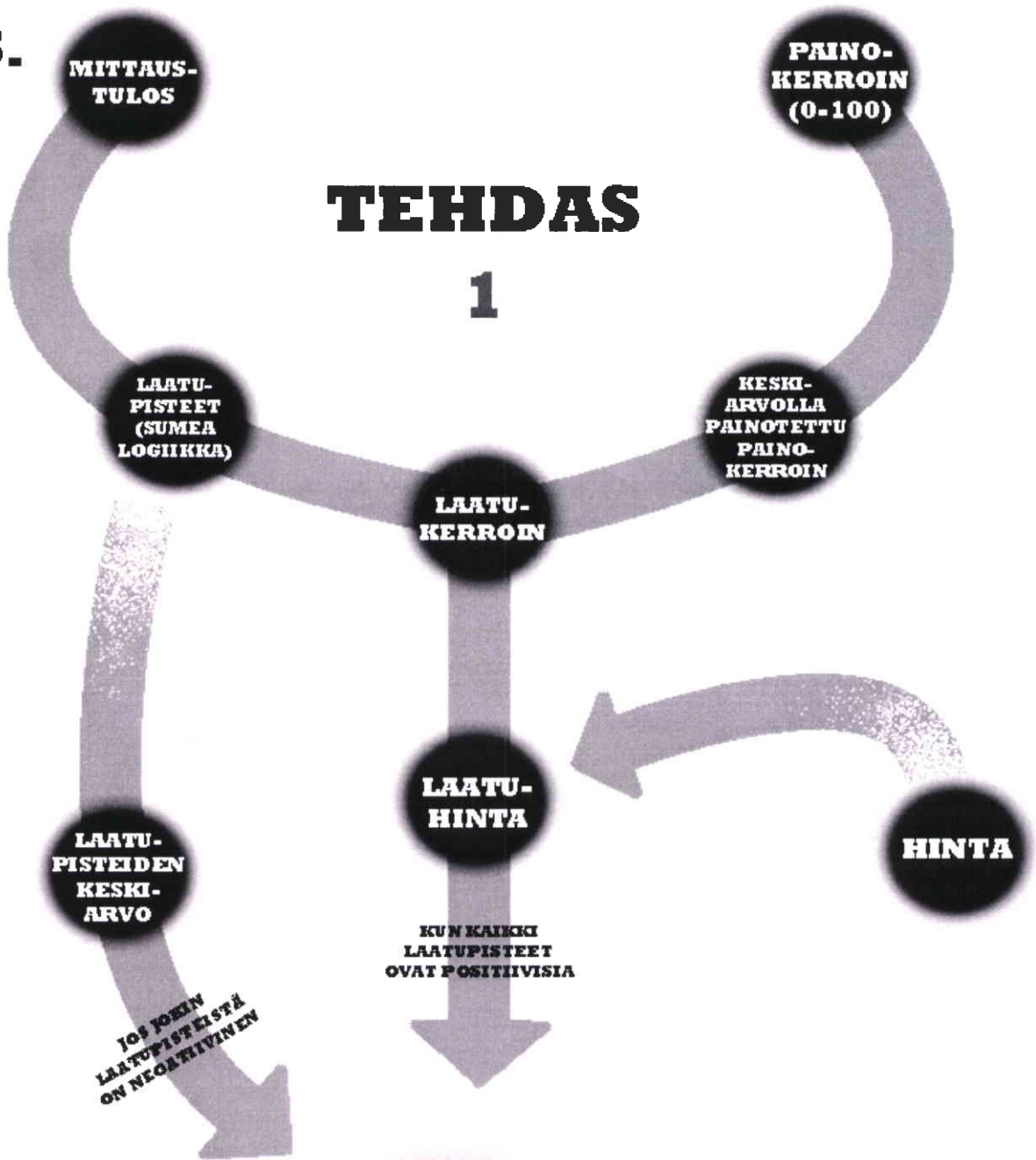
LAATUTEKIJÄ	SELITYS	SYY	MITTAUS	SUURE
IKÄ	Rungon tai siitä leikatun osan biologinen ikä	Puu kasvaa, kunnes se kuolee tai se kaadetaan	Biologinen ikä	Vuotta
KAATOPÄIVÄ	Rungon tai siitä leikatun osan irrottamisaika elävästä kasvualustastaan	Vuodenajasta ja olosuhteista riippuen puuaineeseen syntyy fysiologisia muutoksia (esim. kosteus)	Päiviä kaadosta	Päivä
KASVUNOPEUS	Rungon tai siitä leikatun osan leveys- ja pituuskasvu sen kasvuaikana. Vaikuttaa niin kuitujen ja rungonkin dimensioihin	Vaikuttaa perinnölliset tekijät, metsikön tiheys, kasvualusta ja ilmasto (K)		Sanallinen
KOSTEUS	Rungon tai siitä leikatun osan veden massan ja sen kokonaismassan suhde (K)	Vaikuttaa puun fysiologiset ominaisuudet (mm. sydänpuuosuus), vuodenaika ja tuoreus	Veden ja kokonaismassan suhde	Kosteusprosentti
KUIDUN PITUUS	Puukuidun pituus	Vaikuttaa mistä rungon osasta kuidut ovat peräisin. Pintapuussa tyvellä kuidut ovat pisimmillään	Puukuidun pituus	mm
KUITUSEINÄN PAKSUUS	Puukuidun kuituseinämän paksuus	Vaikuttaa mistä rungon osasta kuidut ovat peräisin	Kuituseinän paksuus	µm
KUIVA-AINEPITOISUUS	Rungon tai siitä leikatun osan kuivan massan ja kokonaismassan suhde (K)	Kts. kosteus	Kuivan massan ja kokonaismassan suhde prosentteina	

MUUT LAATUTEKIJÄT:

LAATUTEKIJÄ	SELITYS	SYY	MITTAUS	SUURE
KUORI	Kuoreen luetaan kaikki jäljen ulkopuoliset solukot (K)	Kuori jaetaan rakenteen ja fysiologiansen tilan perusteella sisäkuoreen eli nilaan ja ulkokuoreen. Primaarisessa nilassa on jakautumiskykyinen vyöhyke, jälsi, joka muodostaa puun ytimeen päin sekundaarista puuta ja ulospäin sekundaarista nilaa. Toinen jakautumiskykyinen solukko, korkkijälsi eli fellogeeni, joka muodostaa ulospäin korkkisolukkoa eli felleemiä (K)	Kuoren tilavuus koko tilavuudesta prosentteina	
KUORITTAUVUUS	Rungon tai siitä leikatun osan kuoren irtoamisen tai irrottamisen helppous	Vaikuttaa vuodenaika, erityisesti keväällä, kasvukauden alussa, kuori irtoaa helposti	Kuoren irtoamisen tai irrottamisen helppous	Sanallinen
LAJITUNNISTUS	Rungon tai siitä leikatun osan puulaji		Puulaji	Sanallinen
LUMI JA JÄÄ	Rungossa tai siitä leikatussa osassa mahdollisesti olevan lumen ja jään määrä	Talvella runkoon tai siitä leikattuun osaan voi tarttua lunta ja jäätä eri käsittelyn vaiheissa	Lumen ja jään tilavuus koko tilavuudesta prosentteina	
LUSTOTIHEYS	Puun poikkileikkauksessa näkyvien tummien ja vaaleiden renkaiden (vuosilustojen) etäisyys toisistaan	Kts. kasvunopeus	Keskimääräinen luston paksuus	mm
NOKI	Rungossa tai siitä leikatussa osassa mahdollisesti olevan noen tai hiilen määrä	Syntynyt tulen vaikutuksesta (esim. metsäpalo)	Noen ja hiilen tilavuus koko tilavuudesta prosentteina	

MUUT LAATUTEKIJÄT:

LAATUTEKIJÄ	SELITYS	SYY	MITTAUS	SUURE
PIHKaisuUS	Rungossa tai siitä leikatussa osassa mahdollisesti esiintyvän pihkan määrä	Pihkaa syntyy havupuiden pihkatiehyissä. Pihkatiehyiden määrä kasvaa selvästi vuosilustojen paksuuden kasvaessa. Pihkan eritykseen voi vaikuttaa mekaaniset vauriot ja sienitaudit (K)	Pihkan tilavuus koko tilavuudesta prosentteina	
PÖLKYN LÄPIMITTA	Rungosta leikatun osan läpimitta	Vaikuttaa miltä korkeudelta runkoa pölkky on otettu sekä rungon kasvunopeus	Latvaläpimitta	cm
PÖLKYN PITUUS	Rungosta leikatun osan pituus	Vaikuttaa kuinka pitkäksi pölkky on kannattanut apteerata, vikojen sekä mitta- ja laatuvaatimusten perusteella	Poikkileikkauspäiden etäisyys toisistaan	dm
SYDÄNPUUOSUUS	Sydänpuun puun poikkileikkauksessa vallitseva osuus (K)	Kasvaa latvasta tyvelle tultaessa, puun iän kasvaessa, kasvunopeuden laskiessa, latvuksen koon pienentyessä ja puun eteläisen kasvupaikan mukana (K)	Sydänpuun tilavuus koko tilavuudesta prosentteina	
TUORETIHEYS	Rungon tai siitä leikatun osan massa ja tilavuus tuoreena mitattuna (K)	kts. kaatopäivä ja kosteus	Massan ja tilavuuden suhde tuoreena	kg/m ³



VERTAILU TULOS

