

**Metsätieteiden laitos**

**Puuteknologia**

**Pro Gradu - tutkielma:**

**Eri-ikäiskasvatuksen vaikutus kuusen puuaineen laatuun**

**Jiri Pyörälä**



Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty		Laitos/Institution– Department	
Maatalous-metsätieteellinen tiede- kunta		Metsätieteiden laitos	
Tekijä/Författare – Author			
Jiri Pyörälä			
Työn nimi / Arbetets titel – Title			
Eri-ikäiskasvatuksen vaikutus kuusen puuaineen laatuun			
Oppiaine /Läroämne – Subject			
Puuteknologia			
Työn laji/Arbetets art – Level	Aika/Datum – Month and year	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages	
Maisterin tutkielma	Kevät 2013	66	
Tiivistelmä/Referat – Abstract			
<p>Tutkielma on osa Metsätutkimuslaitoksen hanketta Eri-ikäisrakenteisten ja monijaksoisten metsien käsittely (ERIKA). Tavoitteena oli tutkia eri-ikäisrakenteisissa metsiköissä kahdella eri paikkakunnalla Etelä-Suomessa kasvaneiden kuusien sisäistä kasvunopeutta ja -rytmiä sekä kuusien puuaineen sisäistä laatua kuitujen pituuden, puuaineen kuiva-ilmakuivatiheyden, akustisella menetelmällä määritetyn dynaamisen kimmokertoimen sekä visuaalisen laatulajittelun perusteella. Kuidunpituudet mitattiin 64 puusta, tiheysmittaukset ja akustinen mittaus sekä laatulajittelu tehtiin 40 puun saheille, yhteensä 355 kpl. Kuitujen pituuden vaihtelua suhteessa etäisyyteen ytimeistä ja lustojen leveyteen mallinnettiin sekamallilla. Tiheyden, kimmokertoimen ja visuaalisen laadun vaihtelua suhteessa sijaintiin rungossa analysoitiin kaksisuuntaisella varianssianalyysillä ja suhteessa kasvuun regressioanalyysillä. Tuloksien perusteella kuidunpituus, tiheys ja kimmokerroin eivät poikenneet kuuselle tavanomaisista arvoista ja suurin osa hajonnasta oli puidenvälistä. Sahatavaran visuaalisen laatulajittelun perusteella A-laataa oli melko hyvin (~ 20 %), mutta C-laataa oli enemmän (&gt; 33 %) kuin B-laataa (&lt; 25 %). Sahatavara oli oksaista varsinkin ytimen läheisyydessä ja pintalaudoissa oli paljon irto-oksia. Kierous oli suurta ytimen läheisyydessä, mutta ei poikennut tavanomaisesta. Aineistossa oli myös paljon lylyä ja lahoa. Hajonta oli puun sisällä yhtä suurta kuin puiden välillä (<math>\pm 1</math> lk.). Aineiston pienestä koosta johtuen tulokset eivät vielä ole yleistettävissä kaikkiin eri-ikäismetsiköihin. Tämä tutkimus antoi kuitenkin tietoa eri-ikäiskasvatetun puun ominaisuuksista ja lähtökohtia mahdollisesti kiinnostavien ja lisätutkimusta kaipaavien ominaisuuksien tutkimukselle.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
Eri-ikäiskasvatus, kuusi ( <i>Picea abies</i> (L.) Karst), kuidunpituus, kuiva-ilmakuivatiheys, kimmokerroin, sahatavaran laatulajittelu, oksaisuus, sahatavaran muodonmuutokset, lyly, laho			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			



Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty		Laitos/Institution– Department	
Faculty of Agriculture and Forestry		Department of Forest sciences	
Tekijä/Författare – Author			
Jiri Pyörälä			
Työn nimi / Arbetets titel – Title			
Wood quality of Norway Spruce in uneven-aged forests			
Oppiaine /Läroämne – Subject			
Wood technology			
Työn laji/Arbetets art – Level	Aika/Datum – Month and year	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages	
Master's Thesis	Spring 2013	66	
Tiivistelmä/Referat – Abstract			
<p>This study is a part of the research project of uneven-aged forest stands ERIKA by Finnish Institute for Forest Research. The aim of this study was to identify the growth and quality of Norway spruce wood and sawn wood products from uneven-aged forest stands in South Finland. The properties examined were fiber length, wood density, modulus of elasticity and visual grade according to Nordic standards of visual grading. 64 trees were measured for fiber length and sawn wood of 40 trees (355 pc.) was measured for density, modulus of elasticity and visual grading. The variation of fiber length was modeled in respect to distance from pith and ring width using a mixed model. The variation of density, modulus of elasticity and visual grade was analyzed in respect to the within-tree location with two-sided variance analysis. In respect to cambial age and ring width the properties were analyzed by means of regression modeling. According to the results fiber length, density and MOE did not differ significantly from those characteristic to spruce in even-aged stands: most variation was among-tree which gives a reason to think that the changes in within-tree growth rhythm do not affect these properties within an individual tree. Visual grading for sawn wood gave that there was a good amount of class A (~ 20 %) but class C (&gt; 33 %) was more common than class B (&gt; 25 %): Timber was knotty especially near pith and loose knots were dense on lumber boards. Twisting was high near pith in timber boards but did not differ from the usual. There was remarkable amount of compression wood and decay in the material. The within-tree variation of visual grade was equal to the among-tree variation. Due to the small sample size the results are not yet applicable to uneven-aged forests in general, but they give an impression that there might not be any major differences between the quality of even-aged and uneven-aged wood. First of all, the results give light to the characteristics of uneven-aged spruce wood properties that might be of interest for further research.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
Uneven-aged forest management, Norway spruce ( <i>Picea abies</i> (L.) Karst), fiber length, wood density, modulus of elasticity, visual grading, branches, sawn wood distortion, compression wood, decay			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

## **Alkusanat**

Haluan kiittää tämän Pro Gradu-työn tekemisessä apunani ja tukenani olleita henkilöitä: Ohjaajaani Riikka Piispasta antaumuksellisesta paneutumisesta työni ohjaamiseen sekä tutkijoita Pekka Saranpäästä ja Sauli Valkosta taustatuesta. Tapio Järviselle, Tapio Nevalaiselle ja Alvaro Sanchezille kiitokset suuresta avusta aineistonkeruussa ja mittaamisessa – Tapio Järviselle erityiskiitos mukavasta työseurasta sahatavarakappaleiden laatulajittelussa marras-joulukuussa 2012.

Vastuuprofessori Marketta Sipille ja puuteknologian yliopistonlehtori Juha Rikalalle haluan esittää kiitokset asiantuntevasta palautteesta ja opastuksesta työn eri vaiheissa ja tilastotieteen yliopistonlehtori Jarkko Isotalolle tilastotieteellisistä neuvoista, erityisesti avusta sekamallin kanssa.

Lopuksi haluan kiittää ystäviäni ja perhettäni, erityisesti Pauliina Paloviitaa ja äitiäni, tuesta ja kärsivällisyydestä tämän projektin eri vaiheissa.

## Käsitteet

- Kuiva-ilmakuivatiheys: Puun kuivamassan suhde ilmakeivaan tilavuuteen ( $\text{kg/m}^3$ ).
- Dynaaminen kimmokerroin: Puuainetta koskemattomista mittauksista laskennallisesti johdettu kimmokerroin MOE (engl. Modulus of Elasticity). Yksikkö tässä tutkimuksessa GPa.
  - Tässä tutkimuksessa johdettu akustisella menetelmällä eli puuaineessa mitatun ääniaallon nopeuden ja puuaineen tiheyden perusteella.
- Sahe: Tässä tutkimuksessa yleisnimi neljältä sivulta sahatulle sahatavarakappaleelle.
  - Soiro: Pohjoismainen sahatavara – lajitteluohjeet (1994) mukaisesti sahatavarakappale, jonka paksuus on 38–50 mm ja leveys 75–150 mm.
  - Lauta: Sahatavarakappale, jonka paksuus on yleensä 16–25 mm (tässä tutkimuksessa 28 mm) ja leveys yli 75 mm.

## Sisällysluettelo:

<b>1</b>	<b>Johdanto</b> .....	<b>1</b>
1.1	Tausta.....	1
1.2	Kirjallisuuskatsaus.....	2
1.2.1	<i>Eri-ikäiskasvatus</i> .....	2
1.2.2	<i>Kuusen kasvu</i> .....	4
1.2.3	<i>Kuusen kuidunpituus</i> .....	6
1.2.4	<i>Kuusen puuaineen tiheys</i> .....	7
1.2.5	<i>Kuusen puuaineen kimmokerroin</i> .....	9
1.2.6	<i>Kuusisahatavaran visuaalinen laatulajittelu</i> .....	10
1.2.7	<i>Oksaisuus</i> .....	12
1.2.8	<i>Sahatavaran muodonmuutokset</i> .....	13
1.2.9	<i>Lyly ja laho</i> .....	15
1.3	Tavoitteet.....	16
<b>2</b>	<b>Aineistot ja menetelmät</b> .....	<b>18</b>
2.1	Koealat ja valitut puut.....	18
2.2	Kuidunpituusaineiston otanta ja mittausmenetelmät.....	21
2.2.1	<i>Lustonmittausmenetelmä</i> .....	21
2.2.2	<i>Kuidunpituuden mittausmenetelmä</i> .....	21
2.3	Laatuaineiston otanta ja mittausmenetelmät.....	22
2.3.1	<i>Lustonmittausmenetelmä</i> .....	24
2.3.2	<i>Tiheyden ja kimmokertoimen mittausmenetelmät</i> .....	24
2.3.3	<i>Visuaalinen laatulajittelumenetelmä</i> .....	25
2.3.4	<i>Vertailuaineisto</i> .....	27
2.4	Tilastolliset menetelmät.....	28
2.4.1	<i>Kuituaineiston analysointi</i> .....	28
2.4.2	<i>Laatuaineiston analysointi</i> .....	29
<b>3</b>	<b>Tulokset</b> .....	<b>32</b>
3.1	Kuituaineisto.....	32
3.1.1	<i>Kasvu</i> .....	32
3.1.2	<i>Kuidunpituus</i> .....	33

<b>3.2</b>	<b>Laatuaineisto</b> .....	<b>36</b>
3.2.1	<i>Kasvu</i> .....	36
3.2.2	<i>Tiheys ja kimmokerroin</i> .....	37
3.2.3	<i>Sahatavaran visuaalinen laatulajittelu</i> .....	43
3.2.4	<i>Oksaisuus</i> .....	44
3.2.5	<i>Irto-oksat</i> .....	48
3.2.6	<i>Sahatavaran muodonmuutokset</i> .....	49
3.2.7	<i>Lyly ja laho</i> .....	52
<b>4</b>	<b>Tulosten tarkastelu</b> .....	<b>53</b>
4.1	<b>Kuituaineisto</b> .....	<b>53</b>
4.1.1	<i>Kasvu</i> .....	53
4.1.2	<i>Kuidunpituus</i> .....	53
4.2	<b>Laatuaineisto</b> .....	<b>54</b>
4.2.1	<i>Kasvu</i> .....	54
4.2.2	<i>Tiheys ja kimmokerroin</i> .....	55
4.2.3	<i>Sahatavaran visuaalinen laatulajittelu</i> .....	56
4.2.4	<i>Oksaisuus</i> .....	57
4.2.5	<i>Sahatavaran muodonmuutokset</i> .....	58
4.2.6	<i>Lyly ja laho</i> .....	59
<b>5</b>	<b>Yhteenveto ja johtopäätökset</b> .....	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>Lähteet</b> .....	<b>63</b>

# 1 Johdanto

## 1.1 Tausta

Tämä Pro Gradu - tutkielma on osa Metsäntutkimuslaitoksen hanketta Eri-ikäisrakenteisten ja monijaksoisten metsien käsittely (ERIKA), joka kuuluu Tulevaisuuden metsät ja metsänhoito 2012–2016 - tutkimusohjelmaan. Hankkeen tavoitteena on tuottaa perusteet ja toimintamallit eri-ikäisrakenteisen metsän kasvatukselle ja puunkorjuulle. Tietoa tarvitaan, sillä metsänomistajat ovat aiempaa monitavoitteisempia ja kiinnostus vaihtoehtoisia metsienkäsittelyvaihtoehtoja kuten eri-ikäisrakenteisen metsän kasvattamista kohtaan on lisääntynyt. Myös uudistuvassa metsälaissa halutaan entistä paremmin ottaa huomioon Suomen metsäluonnon monimuotoisuuden säilyttäminen ja lisätä metsänomistajien mahdollisuuksia päättää metsiensä uudistamisesta ja kasvattamisesta. Yksi lakiuudistuksista koskee kasvatushakkuissa jätettävää puustoa ja metsikön uudistamista koskevia säädöksiä. Tavoitteena on poistaa rajoitukset, jotka tällä hetkellä tekevät eri-ikäisrakenteisen metsän kasvattamisesta lain edellyttämällä tavalla käytännössä mahdotonta. Lain on tarkoitus astua voimaan vuoden 2014 alussa.

Metsänkasvatuksen kannattavuuteen ja haluttavuuteen niin teollisuuden kuin metsänomistajakunnankin näkökulmasta vaikuttaa mm. metsikön puuntuotos ja korjattavan puuaineen laatu. Viimeaikaiset tutkimustulokset ovat näyttäneet alustavasti, että eri-ikäiskasvatuksella voidaan päästä yhtä suureen tai jopa suurempaan puuntuotokseen kuin tasaikäiskasvatuksella kun tarkastellaan tasaikäisen metsän koko kiertoaikaa (Pukkala ym. 2009, Pukkala ym. 2010). Pukkala ym. 2009 simuloivat eri-ikäismetsikön kasvua MOTTI-ohjelmiston avulla ja arvioivat kestäväksi vuotuiseksi hakkuukertymäksi 6–7 m<sup>3</sup>/ha. Eri-ikäiskasvatetun puuaineen laatua sen sijaan ei Suomessa ole vielä kunnolla tutkittu.

Laatu on puuntuotokseen verrattuna suhteellinen ja subjektiivinen ja abstraktikin käsite, jonka määritelmä riippuu tarkasteltavasta ongelmasta. Bowyer ym. (2007) toteaa, että raaka-aineen laatu voidaan yleisesti määritellä lopputuotteen ominaisuuksiin vaikuttavien tunnuksien mittarina. Tässä tutkielmassa tarkastellaan kolmea eri laatutunnusta. Ensinnäkin tarkastellaan kuusen puuaineen trakeidien eli kuitujen pi-



tuutta, joka on erityisesti massa- ja paperiteollisuuden lopputuotteiden laadun kannalta tärkeä tunnus. Toiseksi tarkastellaan puuaineen mekaanista laatua tiheyden ja kimmokertoimen perusteella ja kolmanneksi puuaineen visuaalista laatua sahatavaranä Pohjoismainen sahatavara – lajitteluohjeet (1994) mukaisesti. Sahatavaran mekaaniset ominaisuudet ja visuaalinen laatuluokka ovat mittareita saha- ja puutuoteteollisuuden lopputuotteiltaan vaatimille ominaisuuksille.

## **1.2 Kirjallisuuskatsaus**

### ***1.2.1 Eri-ikäiskasvatus***

Eri-ikäiskasvatuksella tarkoitetaan metsän kasvattamista ja hoitamista siten, että metsiköissä on samanaikaisesti puita eri ikä- ja läpimittaluokissa. Puhutaan myös jatkuvasta metsänkasvatuksesta, koska eri-ikäisrakenteisessa metsänkasvatuksessa ei ole selkeitä jaksoja tai hakkuukiertoja vaan metsän peitteisyys on jatkuva. Eri-ikäisrakenteisen metsän tilajakauma on epätasainen, eikä perinteisiä metsikkökuvioita voida erottaa toisistaan puuston kehitysvaiheiden perusteella. (Osmaston 1968, Assmann 1970, Nyland 1996, Pukkala ym. 2010, Valkonen ym. 2010)

Eri-ikäisrakenteisessa metsässä runkolukujakauma muodostetaan usein ikäluokkien sijaan läpimittaluokkien mukaan. Eri-ikäisrakenteinen metsä uudistuu luontaisesti ja runkolukumäärän pienimmissä läpimittaluokissa on siksi oltava suuri metsän kestävän uusiutumisen turvaamiseksi. Runkolukujakauma läpimittaluokkien mukaan on klassisissa eri-ikäiskasvatusmalleissa käänteisen J-käyrän mallinen, eli runkojen lukumäärä on suurin pienimmissä läpimittaluokissa ja vähenee suurempiin läpimittaluokkiin kiinteän  $q$ -kertoimen mukaan siten, että jos  $q = 1,5$  niin seuraavan pienemmän läpimittaluokan runkoluku on aina 1,5-kertainen edellisen suuremman läpimittaluokan runkolukuun nähden. Metsikön katsotaan olevan luonnollisessa tasapainotilassa, kun kaikkien läpimittaluokkien tilavuuskasvu on yhtä suurta. (Osmaston 1968, Assmann 1970, Nyland 1997) Klassista käänteiseen J-käyrään perustuvaa mallia on myöhemmin pidetty liioitellun jyrkkänä. Mallista onkin nykyään olemassa muunnoksia, kuten esimerkiksi hieman loivempi sigmoidimalli, jossa pienemmän läpimittaluokan runkoluku ja suurimman läpimittaluokan keskiläpimitta ovat pienemmät ja keskimmäisten läpimittaluokkien runkoluvut suuremmat kuin perinteisessä mallissa. Edelleen käytännön metsänhoidossa lineaarisesti laskeva runkolukukäyrä voi toimia

yhtä hyvin kuin J-käyrä tai sigmoidi. (Nyland 1996, Courbaud ym. 2001, Pukkala ym. 2009, Pukkala ym. 2010, Valkonen ym. 2010).

Valitun mallin mukaisen eri-ikäisrakenteen aikaansaaminen ja ylläpitäminen toteutetaan poiminta- ja pienaukkohakkuilla. Mallin mukaisia hakkuita suunniteltaessa otetaan huomioon aika, jonka yksittäinen runko tarvitsee kasvaakseen läpimittaluokasta seuraavaan ja poistuma, joka tämän ajan kuluessa on korvattava seuraavassa läpimittaluokassa. Kustakin läpimittaluokasta hakataan puita vain sen verran, että jäljelle jäävä puusto ensinnäkin korvaa kasvaessaan seuraavasta läpimittaluokasta poistetun puuston ja että toisaalta edellisen läpimittaluokan jäljelle jäävä puusto pystyy korvaamaan kyseisestä läpimittaluokasta poistetun puuston. Poistettavat puut valitaan kuten tasaikäismetsäköissäkin. Suurimmista läpimittaluokista poistetaan puut, jotka ovat saavuttaneet tukkipuun koon ja joiden vuotuisen tilavuuskasvun arvioidaan hidastuneen niin, että vuoden lisäkasvatuksella saatava arvonlisäys on yhtä suuri kuin siitä aiheutuvat lisäkustannukset (vähenevän rajahyödyn periaate). Muista läpimittaluokista poistetaan vioittuneet tai muuten kasvultaan huonot rungot ja tehdään tilaa parempien runkojen kasvulle. (Osmaston 1968, Nyland 1996, Pukkala ym. 2010, Valkonen ym. 2010)

Eri-ikäisrakenteista metsää kasvatetaan harvempana kuin tasaikäistä. Harva puusto parantaa luontaisen uudistumisen edellytyksiä ja toisaalta parantaa mm. puuston paksuuskasvua ja tukkiosan kokoa korjattavissa puissa (Courbaud ym. 2001, Valkonen ym. 2010, Saksa & Valkonen 2011).

Eri-ikäiskasvatuksen haasteita metsänhoidon näkökulmasta ovat luontaisen uudistumisen epävarmuus, juurikäävälle (*Heterobasidion annosum* sp.) otolliset leviämisolosuhteet ja poiminta- ja pienaukkohakkuiden aiheuttamien korjuuvaurioiden ehkäiseminen. Eri-ikäiskasvatetun puun laadusta puuteknologian näkökulmasta on toistaiseksi vähemmän tietoa.

Eri-ikäiskasvatus soveltuu Pohjoismaissa parhaiten metsäkuuselle (engl. Norway Spruce) (*Picea abies* (L.) Karst.), joka on varjokasvi ja sopii siksi alikasvosuudistamiseen (Saksa & Valkonen 2011). Kuusella on pitkä elävä latvus, jonka ajatellaan edesauttavan sen mahdollisuuksia sopeutua muuttuviin kasvuolosuhteisiin.

### **1.2.2. Kuusen kasvu**

Puun kasvunopeutta voidaan tarkastella joko paksuuskasvun tai pituuskasvun osalta (Kuva 1). Puun pituuskasvu alkaa vuosittain latvan apikaalisen meristeemin eli kärkikasvusolukon alkaessa jakaantua, paksuuskasvun taas saa aikaan kambiumin eli jälleen jakaantuminen erilaistuviksi initiaalisoluiksi sekä perikliinisesti eli säteen suunnassa trakeideiksi että antikliinisesti eli tangentin suunnassa tylppysoluiksi. (Fujiwara & Yang 2000, Kärkkäinen 2003, Bowyer ym. 2007)

Puun kasvunopeus ja -rytmi ovat tunnetusti riippuvaisia puun kasvuolosuhteista kuten puuston tilajakaumasta ja tiheydestä, maaperän ominaisuuksista sekä vuotuisesta lämpösommasta ja sademäärästä. Puu pyrkii allokoimaan kasvuresurssinsa olosuhteisiin nähden optimaalisesti pituus- ja paksuuskasvun välillä. (Assmann 1970) Kirjallisuudessa (mm. Lindström 1997, Kärkkäinen 2003) viitataan usein Larsonin (1969) teokseen *Wood formation and the concept of wood quality*, jossa esitellään teoria puun kasvun hormonaalisesta säätelystä. Teorian mukaan allokoointia ohjaa puun hormonitoiminta, jota säätelee elävän latvuksen koko ja elinvoimaisuus eli yhteyttämiskyky. Pitkä elävä latvus johtaa runsaaseen paksuuskasvuun ja hitaampaan pituuskasvuun, supistuva latvus hidastuvaan paksuuskasvuun ja kiihtyvään pituuskasvuun. Tasaikäisessä metsikössä sulkeutunut latvuskerros lisää suurten puiden pituuskasvua ja hidastuvan paksuuskasvun myötä kesäpuun määrä kasvaa rungon alaosissa.

Puun säteensuuntaisen kasvunopeuden on kirjallisuudessa (Kärkkäinen 2003, Zubizarreta-Gerendiain ym. 2011) myös esitetty hidastuvan kasvuolosuhteista riippumatta jälleen vanhetessa, minkä oletetaan johtuvan ensinnäkin siitä, että puun kasvaessa yhä isompi osa käytettävissä olevista resursseista menisi olemassa olevan elävän solukon ylläpitämiseen ja toisaalta siitä, että puun kehän pituuden kasvaessa jälleen jakautumisenopeuden tangentin suunnassa olisi kasvettava säteensuuntaisen jakautumisen kustannuksella (Assmann 1970, Fujiwara & Yang 2000, Kärkkäinen 2003).

Joihinkin kasvuolosuhteisiin ja sitä kautta puun kasvun allokoitumiseen voidaan josain määrin vaikuttaa metsänhoidollisin toimenpitein. Useissa tutkimuksissa on saatu tuloksia, joiden mukaan voimakkailla harvennuksilla ja lannoittamisella voidaan esimerkiksi kuusella lisätä elävän latvuksen pituutta ja kiihdyttää puuston paksuuskasvua ja sitä kautta erityisesti tukkiosan tilavuuskasvua (Dutilleul ym. 1998, Herman ym. 1998, Mäkinen & Hein 2006, Kaakinen ym. 2009). Kiihtyvän säteensuun-

taisen kasvun katsotaan yleisesti aiheutuvan jälleen jakautumisnopeuden kasvamisesta, eli kevätpuun solujen määrä kasvaa luston sisällä solujen koon ja kesäpuun määrän pysyessä pääasiassa vakioina (Fujiwara & Yang 2000, Kärkkäinen 2003).

Säteensuuntaisen kasvunopeuden on näytetty kuusella olevan yhteydessä useisiin puuaineen ominaisuuksiin. Kirjallisuudessa on usein esitetty, että kasvunopeuden kiihtyminen korreloisi negatiivisesti kuitujen pituuden, puuaineen tiheyden ja kimmo kertoimen kanssa. (Lindström 1997, Dutilleul ym. 1998, Herman ym. 1998, Seeling 2001, Wilhelmsson ym. 2002, Mäkinen ym. 2007, Kaakinen ym. 2009). Korrelaatioihin saattaa kuitenkin aiheuttaa harhaa se, että kuusella kasvunopeus on tyveä lukuun ottamatta usein suurimmillaan nuorpuussa (Downes ym. 2002, Kärkkäinen 2003).

Nuorpuuksi eli juveniilipuuksi (engl. juvenile wood) kutsutaan heti ytimen läheisyydessä muodostuvaa solukkoa. Nuorpuun erottaminen myöhemmin muodostuvasta maturoituneesta puuaineesta on tärkeää, koska nuorpuulla on useita maturoituneesta puuaineesta poikkeavia ominaisuuksia kuten lyhyemmät ja kapeammat kuidut, suurempi kevätpuuosuus, alhaisempi tiheys, jyrkempi mikrofibrillikulma ja alhaisempi selluloosapitoisuus. (Alteyrac 2006, Bowyer ym. 2007) Nuorpuualueen on havaittu kuusella olevan 5–15 vuosirenkään levyinen alue ytimen ympärillä, jonka läpimitta pienenee kohti latvaa. Selkeä rajanveto nuorpuun ja kypsän mantopuun välille on kuitenkin ongelmallista. (Kučera 1994, Yang 1994, Alteyrac 2006)

Eri-ikäisrakenteisessa metsässä kasvaneen kuusen kasvun oletetaan poikkeavan taikaisessä metsässä kasvaneen kuusen kasvusta erityisesti kasvurytmin suuren vaihtelevuuden osalta niin puun sisällä kuin puiden välilläkin (Seeling 2001, MacDonald ym. 2009, Pukkala ym. 2009, Valkonen ym. 2010). Oletus perustuu tutkimuksiin luontaisesti uudistuneiden ja luonnollisesti kasvaneiden metsien kasvusta. Alikasvosuudistumisessa alikasvoksena kasvavilla taimilla sekä pituus- että paksuuskasvu on aluksi hidasta – puhutaan juromisesta. Pienaukkoihin syntyvien taimien kasvu sen sijaan on nopeampaa heti taimen alkuvaiheessa. Alikasvotaimien pituuskasvu kiihtyy voimakkaasti ensimmäisten poiminta- tai pienaukkohakkuiden jälkeen, kun kasvutilaa, valoa ja muita resursseja vapautuu käyttöön. Paksuuskasvu voimistuu pienellä viiveellä pituuskasvun myötä, kun taimien elävän latvuksen osuus kasvaa (Saksa & Valkonen 2011). Paksuuskasvun oletetaan hidastuvan metsikön sulkeutuessa ja latvuksien alaosan kuollessa. Seuraavan hakkuun yhteydessä puut saavat taas enem-

män resursseja käyttöönsä ja niiden tyviosan paksuuskasvu viimeisessä vaiheessa yleispuina kiihtyy, mutta on kuitenkin heikompaa kuin nuorilla rungoilla. (Nyland 1996, Courbaud ym. 2001, Valkonen ym. 2010)

Vaihtelevan kasvunopeuden voidaan olettaa vaikuttavan mm. nuorpuun muodostumisen ja puun maturoitumisen eriaikaisuuteen puiden välillä ja puun sisällä eri korkeuksilla ja vaikuttavan sitä kautta puuaineen kuidunpituuteen, tiheyteen, kimmokerrotimeen ja visuaalisten laatutunnusten kuten oksien ja muodonmuutosten vaihteluun verrattaessa tasaikäisessä metsikössä kasvaneisiin puihin. (Seeling 2001, MacDonald ym. 2009)



**Kuva 1.** *Hidaskasvuisen kuusentaimen latvakasvain eri-ikäisrakenteisessa metsikössä (Kuva: Metla/ Riikka Piispanen) ja eri-ikäisrakenteisessa metsikössä kasvaneen kuusen paksuuskasvua tyvitukin päissä.*

### **1.2.3 Kuusen kuidunpituus**

Kuidut eli trakeidit ovat puun pituussuunnan myötäisesti suuntautuvia pitkänmallisia, päästä suippenevia soluja, jotka kuljettavat vettä puun juuristosta sen latvukseen. Trakeidit rakentuvat jälsisolukon initiaaleista kun selluloosamolekyyliketjut kiteytyvät mikrofibrilleiksi ja muodostavat soluseinän eri kerrokset. Ligniini sitoo valmiit solut toisiinsa. (Kärkkäinen 2003, Bowyer ym. 2007)

Kuitujen pituuden on esitetty riippuvan kasvunopeudesta ja nuorpuun vaihtumisesta kypsäksi mantopuuksi. Tutkimuksissa (Dutilleul ym. 1997, Lindström 1997, Kaakinen ym. 2009) kuidunpituuden on havaittu muuttuvan logaritmisesti ytimestä pintaan, ts. olevan lyhyimmillään ytimen läheisyydessä nuorpuussa, kasvavan sitten nopeasti läpi nuorpuuvaiheen ja asettuvan lopulta melko vakaalle tasolle puun matu-

roitussa (Yang ym. 1994, Fujiwara & Yang 2000, Alteyrac 2006). Kuidunpituuden muuttumisen ytimestä pintaan oletetaan liittyvän jäljen initiaalisolujen kasvuun jäljen jakautumiskertojen lisääntyessä, mistä syystä kuidunpituuden vaihtelun tarkastelu ytimestä pintaan on yleensä perusteltua tehdä etäisyyden ytimestä mukaan vuosilustojen lukumäärän sijaan. Kuidunpituuden vaihtelun tarkastelu suhteessa lustojen lukumäärään aiheuttaa harhaa hidas- ja nopeakasvuisia puita verrattaessa, koska nopeakasvuisilla puilla jäljen jakautumiskerrat saman ikäisessä lustossa ovat moninkertaiset hidaskasvuisiin verrattuna. (Sirviö ja Kärenlampi 2001, Kärkkäinen 2003)

Lustonleveyden kasvun on tutkimuksissa todettu lyhentävän kuitujen pituutta (Dutilleul ym. 1997, Lindström ym. 1997, Herman ym. 1998). Regression voidaan olettaa johtuvan puun kasvuresurssien allokointia ja solujen kasvua ohjaavasta hormonitoiminnasta (Larson 1969 Lindströmin (1997) ja Kärkkäisen (2003) mukaan). Herman ym. (1998) ja Fujiwara & Yang (2000) ehdottivat lisäksi, että kuitujen lyhenemistä suhteessa paksuuskasvuun pitäisi tarkastella lustojen leveyden sijaan jäljen antiklinisten jakautumisten määrän eli kehän laajenemisen suuruuden mukaan, koska kaudeksi ytimestä enenevä osa puun luston kasvusta (jäljen jakautumisesta) pinta-alana mitattaessa on tangentinsuuntaista säteensuuntaisen kasvun kustannuksella.

Kevätpuun kuitujen on havaittu usein olevan kesäpuun kuituja lyhyempiä (Lindström 1997, Herman ym. 1998) ja luston leveyden kasvun johtuvan lähinnä kevätpuun lisäyksestä. Tästä syystä kuidunpituusmittauksissa yleensä erotetaan kevät- ja kesäpuu toisistaan ja tarkastellaan vain kevätpuun kuitujen pituutta suhteessa paksuuskasvun nopeuteen (esim. Kaakinen ym. 2009).

Kuusen kuitujen pituus vaikuttaa erityisesti massa- ja paperiteollisuuden lopputuotteiden laatuun. Kuidunpituuden kasvun on osoitettu parantavan paperin veto-, repäisy-, taitto- ja puhkaisulujuutta. Nuorpuu siis heikentää puuaineen käytettävyyttä massateollisuudessa mm. lyhyiden kuitujen vuoksi. (Herman ym. 1998, Bowyer ym. 2007, Alteyrac 2006).

#### ***1.2.4 Kuusen puuaineen tiheys***

Tiheys  $\rho$  on suure, jolla kuvataan massan ja tilavuuden suhdetta. Puuaineen tiheys ei ole yksiselitteisesti tai staattisesti määriteltävissä oleva asia, vaan tiheys vaihtelee mm. eri osissa runkoa ja puuaineen suhteellisen kosteuden sekä erilaisten solujen,

lylyn, lahon, nuorpuun ja sydänpuun suhteellisten osuuksien mukaan. (Kärkkäinen 2003, Edlund ym. 2006)

Puuaineen tiheyden arvioimiseksi ja esittämiseksi käytetään erilaisia menetelmiä, joissa puuaineen massaa ja tilavuutta tarkastellaan eri kosteuksissa. Mekaanista lujutta käsittelevässä kirjallisuudessa käytetään usein kuiva-ilmakuivatiheyttä, joka kuvaa puuaineen massaa kuivana ja tilavuutta ilmakeivana (suhteellinen kosteus 12 % tai 15 %). Kuiva-ilmakuivatiheys vaihtelee kirjallisuudessa kuusella (*Picea abies* L. Karst) välillä 380–430 kg/m<sup>3</sup>. (Saranpää ym. 2002, Kärkkäinen 2003, Knowles ym. 2004, Bucur 2006)

Tutkimuksien (Saranpää ym. 2002, Franceschini ym. 2010, Zubizarreta-Gerendiain 2011) mukaan kuusen tiheys näyttäisi käyttäytyvän suhteessa jälleen ikään niin, että tiheys on suurinta heti ytimen läheisyydessä, laskee aluksi muutaman vuosiluston ajan pintaa kohti ja alkaa jälleen kasvaa. Kaikilla havupuilla tiheys yleensä laskee latvaa kohti.

Puuaineen tiheyteen vaikuttavia biologisia tekijöitä ovat mm. kasvupaikka ja olosuhteet, jotka vaikuttavat tiheyteen ensisijaisesti puuaineen kasvunopeuden kautta. Tiheyden ja kasvunopeuden välillä on useissa tutkimuksissa havaittu negatiivinen korrelaatio, jonka oletetaan johtuvan siitä, että kasvunopeuden kiihtyessä ohutseinäisen kevätpuun osuus kasvaa lustomassa paksuseinäisen kesäpuuosuuden määrän pysyessä absoluuttisesti lähes samana. (Lindström 1997, Spångberg & Nylinder 1997, Dutilleul ym. 1998, Herman ym. 1998, Mäkinen ym. 2007, Kaakinen ym. 2009, Franceschini ym. 2010) Nuorpuun tiheyden on usein havaittu olevan olennaisesti alempi kuin kypsyneen mantopuun (Kučera 1994, Yang 1994, Alteyrac 2006).

Eri-ikäismetsässä kasvaneilla ja luontaisesti uudistetuilla kuusilla nuorpuun tiheyden on havaittu olevan korkeampi kuin tasaikäisillä viljellyillä kuusilla (Piispanen ym. käsikirjoitus 2013). Tämä johtui kyseisessä tutkimuksessa puuaineen tavallista hitaammasta kasvusta puun tyvellä ytimen läheisyydessä.

Puuaineen tiheys vaikuttaa massa- ja paperiteollisuudessa massan saantoon. Puutuote- ja rakennusteollisuudessa tiheys vaikuttaa puuaineen käytettävyyteen eri kohteissa, koska sen on todettu korreloivan positiivisesti puuaineen lujouden ja jäykkyyden kanssa.

### 1.2.5 Kuusen puuaineen kimmokerroin

Materiaalin jäykkyyttä eli aineen kykyä vastustaa siihen kohdistuvan vetojännityksen ( $\text{N/m}^2$ ) aiheuttamaa muodonmuutosta (venymää tai puristumaa) kuvataan kimmomoduulilla eli kimmokertoimella MOE (Modulus of Elasticity). Jokaisella materiaalilla on oma suhteellisrajansa, johon asti jännityksen ja muodonmuutoksen välinen riippuvuus on lineaarinen. Tätä suhdetta kuvaavan suoran yhtälö tunnetaan Hooken lakina (Kaava 1).

$$[1] \quad \Delta l = (F \times l) / (MOE \times A)$$

jossa  $l$  tarkoittaa kappaleen pituutta,  $F$  käytettävää voimaa ja  $A$  kappaleen poikkipinta-alaa. Kimmokerroin MOE on suoran kulmakerroin. Kimmomoduulia kuvataan kirjallisuudessa usein suhteellisuusrajan jännityksellä eli suurimmalla jännityksellä, jonka kappale kestää ilman pysyvää muodonmuutosta. Yksikkönä on pascal (Pa) tai  $\text{N/m}^2$ , kun  $\text{N} = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ . (Kärkkäinen 2003)

Puun staattinen kimmokerroin mitataan perinteisesti puutavarakappaletta taivuttamalla. Kimmokertoimeen vaikuttavat ensisijaisesti puuaineen tiheys, kuitujen pituus ja puusolujen soluseinien toisen sekundaariseinämän  $S_2$  mikrofibrillikulma. Kimmomoduuli voidaankin teoriassa johtaa laskennallisesti puuaineen tiheyden ja mikrofibrillikulman yhtälönä. Laskennallinen kimmokerroin tunnetaan myös nimellä dynaaminen kimmokerroin. (Kärkkäinen 2003, Knowles ym. 2004, Bowyer 2007)

Yksi puuainetta koskemattomista keinoista määrittää dynaaminen kimmokerroin on ääniaallon nopeuteen puuaineessa perustuva akustinen menetelmä. Pitkittäisen ääniaallon nopeuteen puuaineessa vaikuttavat pääasiassa puuaineen tiheys eli soluseinämien paksuus sekä solujen toisen sekundääriseinämän mikrofibrillikulma siten, että nopeus laskee niiden kasvaessa. Puun kasvunopeutta tarkasteltaessa tämä tarkoittaa sitä, että äänennopeus puun pituussuunnassa laskee lustonleveyden pienentyessä, koska suhteellisesti lisääntynyt kesäpuuosuus kasvattaa puuaineen tiheyttä ja mikrofibrillikulmaa. Lisäksi pitkittäisen ääniaallon nopeus kasvaa trakeidien pituuden kasvaessa. Kuusella pitkittäisen ääniaallon nopeus syysuuntaan on yli 5000 m/s. Vertailun vuoksi 20 °C ilmassa äänennopeus on n. 350 m/s. (Bucur 2006)

Knowles ym. (2004), Edlund ym. (2006), Shmulsky ym. (2006), Lachenbruch ym. (2010) ja Achim ym. (2011) käyttävät kaikki samaa yhtälöä (Kaava 2):



$$[2] \quad MOE = \rho * v^2$$

missä  $\rho$  = tiheys ( $\text{kg/m}^3$ ) ja  $v$  = ääniaallon nopeus (km/s) ja MOE = dynaaminen kimmokerroin (MPa,  $\text{N/mm}^2$ ).

Kirjallisuudessa kuusilajien (*Picea abies*, *Picea sitchensis*, *Picea glauca*, *Picea marinea*) puuaineen akustisella menetelmällä johdettu dynaaminen kimmokerroin vaihtelee välillä 8–20 Gpa (Kärkkäinen 2003, Edlund ym. 2006, Shmulsky 2006, Lachenbruch ym. 2010)

Puuaineen kimmokerroin kertoo olennaisesti sahatavaran käytettävyydestä erityisesti rakennusteollisuudessa, sillä kimmokerroin on yksi eurooppalaisessa EN-338 lujuuslajittelustandardissa arvioitavista kriteereistä. Lujuuslajittelu voidaan suorittaa visuaalisesti tai koneellisesti. Visuaalinen lujuuslajittelu muistuttaa hyvin paljon visuaalista laatulajittelua.

### **1.2.6 Kuusisahatavaran visuaalinen laatulajittelu**

Sahatavaran visuaalisen laatulajittelun ohjeena käytetään Suomessa yleensä Suomen sahateollisuusmiesten yhdistyksen yhteistyössä Ruotsin ja Norjan vastaavien yhdistysten kanssa laatimaa ohjetta Pohjoismainen sahatavara – lajitteluohjeet (1994). Ohje antaa perusteet kuusi- ja mäntysahatavaran kaupalliseen lajitteluun visuaalisesti neljältä sivulta ja se korvaa aiemman ohjeen, nk. Vihreän kirjan eli Vientisahatavaran lajitteluohjeet (3. painos) vuodelta 1960 (uusittu 1979). Uuden lajitteluohjeen sisältö vastaa edelleen eurooppalaista standardia SS-EN 1611-1 (2000).

Lajitteluohjeessa määritellään neljä eri laatuluokkaa, joita pohjoismainen metsäteollisuus pystyy kestävästi tuottamaan ja toimittamaan markkinoille. Päälaadut on nimetty parhaasta huonoimpaan A, B, C, D. Edelleen laatuluokka A on jaettu neljään alaluokkaan parhaasta huonoimpaan A1, A2, A3, A4. Laatujen keskinäinen osuus sahatavarasta vaihtelee maantieteellisesti alueittain ja sahaus- ja lajittelutavoista riippuen sahoittain. Kuitenkin laatu B on useimmiten oletusarvoisesti kuusen sahatavarassa yleisin laatuluokka. Esimerkiksi Verkasalo ym. (2012) työraportin perusteella tasaikäisten päätehakkuikäisten kuusitukkien sydäntavarasta Etelä- ja Itä-Suomessa 65 – 80 % olisi laatua B.

Lajittelu perustuu visuaalisesti arvioitavissa tai mitattavissa olevien laatuominaisuuksien arviointiin sahatavarakappaleen huonoimmalla metrillä, eli yksittäisen sahatava-

rakappaleen laatuluokka edustaa sen vähimmäislaatua. Ominaisuudet, jotka mitataan tai arvioidaan prosentteina tai tilavuuksina, lasketaan kappaleen koko pituudelta. Kappaleesta arvioidaan pintalape ja molemmat syrjät, kukin sivu erikseen. Ohjeessa on taulukoitu sallittujen ominaisuuksien raja-arvot vakiodimensioille 20 %:n kosteusasteessa.

Laatulajittelussa lasketaan laatuluokkakohtaisen läpimittaraja-arvon ylittävien oksien määrä ja suurimman oksan läpimitta. Kiinteät (tuoreet) oksat, kuivat oksat, kuorioksat, laho-oksat ja irto-oksat arvioidaan kaikki erillisinä ryhminä siten, että muita kuin kiinteitä oksia sallitaan vain tietty määrä oksien kokonaismäärästä. Samoin muiden kuin kiinteiden oksien läpimitan raja-arvo on pienempi. Ohjeessa esitetään myös soikeiden oksien, sarvioksin, lehtioksin ja särmäoksin läpimitan laskemiseen käytettävät kaavat. Oksamäärän ja -koon lisäksi arvioidaan oksien painumat ja kohoumat. Laaduissa A1 ja A2 ei sallita läpimeneviä oksia.

Sahatavaran muodonmuutokset kierous, lape- ja syrjäväyryys sekä kupertuminen kuivauksen aikana määritellään millimetreissä kahden metrin matkalla. Muotovikojen raja-arvot (mm) kullekin laatuluokalle on määritelty eri dimensioilla erikseen. Sahatavarakappaleen järeyden kasvaessa kaikkien laatuluokkien sallittu muotovika pienenee.

Lylyn, lahon, sinistymän ja värinmuutoksen määrät arvioidaan prosentteina tilavuudesta visuaalisin perustein.

Halkeamien yhteenlaskettu kokonaispituus mitataan pintalappeelta ja molemmilta syrjiltä. Sallittu raja-arvo ilmoitetaan prosentteina kappaleen pituudesta. Erikseen arvioidaan kuivumishalkeamat, rengas- ja sydänhalkeamat ja särmän ylittävät tai läpimenevät halkeamat.

Vajaasärmäisyys arvioidaan prosentteina koko kappaleen pituudesta, paksuudesta ja leveydestä, pintalappeelta ja syrjiltä erikseen.

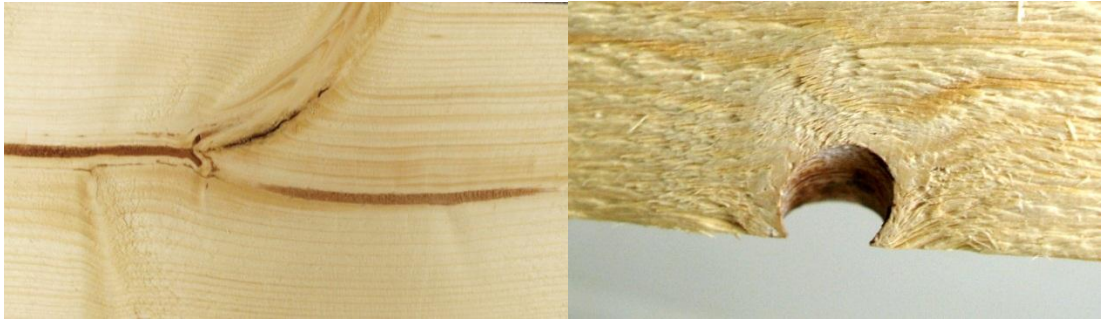
Muita mitattavia ominaisuuksia ovat pihkakolot, kaarnarosot, vinosyisyys, korot, sieni- ja hyönteisvauriot, latvamurtumat, vesisilo, pihkaisuus, epämittaisuus sekä käsittely- ja varastointivauriot.

### *1.2.7 Oksaisuus*

Oksat vaikuttavat huomattavasti sahatavaran laatuun niin ulkonäön, lujuuden kuin työstettävyydenkin kannalta, mm. koska oksan kasvu aikaansaa aina syysuunnan muutoksen suhteessa rungon pystysuoraan kasvuun ja koska kuolleet oksat usein irtoavat tai halkeavat vähentäen sahatavaran käytettävyyttä useissa kohteissa. (Mäkinen & Hein 2006, Bowyer ym. 2007)

Suurin osa oksista kasvaa ytimestä, sillä niiden kasvu alkaa kasvukauden alussa samasta apikaalisesta meristeemistä eli kärkikasvusolukosta, josta puun uusi latva aloittaa pituuskasvunsa. Oksat kasvattavat oman jäljen, joka kasvattaa niiden paksuutta rungon paksuuden kasvaessa. Rungon kasvu työntää oksan jältä eteenpäin rungon jäljen mukana, joten oksat eivät kasva paksuutta enää rungon sisällä ja oksien muoto levenee kartiomaisesti ytimestä pintaan. Sahatavarassa tämä näkyy säteen-suuntaisessa leikkauksessa oksan läpimitan kasvuna ytimestä pintaan (Kuva 2). Oksan kuoltua sen kasvu luonnollisestikin pysähtyy ja sen karsiutuessa runko kasvaa sen yli ja peittää oksan – kasvimorfologiassa puhutaan sisäoksasta. Koska kuollut sisäoksa ei kasva paksuutta muun rungon kasvaessa ja lisäksi kutistuu kuivuessaan, oksa löystyy ja voi irrota esimerkiksi sahauksessa – puuteknologiassa puhutaan irtoksasta (Kuva 2). (Bowyer ym. 2007)

Oksaisuuden ja sen kehittymisen mallintamiseksi ja ennustamiseksi yksittäisen rungon sisällä on kehitelty erilaisia malleja, jotka perustuvat metsikön tilajärjestykseen, metsikön tiheyteen ja kasvupaikan viljavuuteen (Mäkinen & Hein 2006, Mäkinen ym. 2003). Vastaavia malleja ei kuitenkaan vielä ole olemassa eri-ikäismetsien puille. Eri-ikäismetsikössä puiden tilajärjestys ja puuston tiheys vaihtelevat suuresti, mikä oletettavasti vaikuttaa oksaisuuden eroihin puiden välillä. Metsikkötasolta puutasolle siirryttäessä oksien kehittymistä puun sisällä voidaan mallintaa suhteessa puun kasvuun esimerkiksi jäljen iän, kasvunopeuden ja rungon sisäisen sijainnin perusteella. Luston leveyden vaihtelu jäljen iän mukaan eri korkeuksilla kertoo puun kasvuhistoriasta ja tarkastelemalla oksaisuutta suhteessa puun sisäiseen kasvuun voidaan tehdä päätelmiä metsikön kasvuolosuhteiden vaikutuksesta oksaisuuden kehittymiseen eri osissa runkoa.



**Kuva 2.** Sarvioksa ytimestä pintaan ja irto-oksa sahatavarakappaleen särmässä.

### ***1.2.8 Sahatavaran muodonmuutokset***

Sahatavaran muodonmuutoksien (Kuva 3) katsotaan yleisesti johtuvan puun sisäisistä kasvujännityksistä (Öhman & Nyström 2002, Johansson & Ormarsson 2009) ja solujen epätasaisesta kutistumisesta (Saranpää 2001, Kärkkäinen 2003).

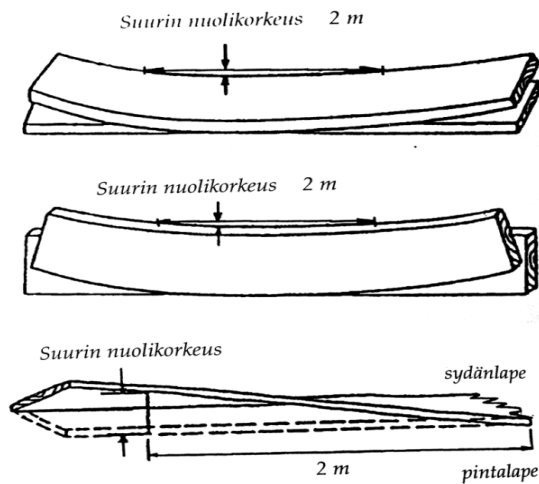
Puun sisäiset kasvujännitykset ovat seurausta yksittäisten solujen erilaisista jännityksistä. Tangentin suuntaisessa eli antiklinisessä jäljen jakautumisessa syntyy uuteen solukerrokseen yleensä enemmän uusia soluja kuin kehän laajenemisen kannalta olisi tarpeellista ja kypsyvät puusolut joutuvat siksi pituussuuntaiseen venytykseen ja tangentin suuntaiseen puristukseen kiinnittyessään vanhaan solukkoon. Vanhaan solukkoon taas kohdistuvat päinvastaiset voimat puun massan kasvaessa. Erilaiset puristavat ja venyttävät voimat vaikuttavat myös sahatavarassa. Kasvujännityksien katsotaan aiheuttavan sahatavarassa nimenomaan lape- ja syrjävääräyttä. (Yamamoto 1994, Öhman & Nyström 2002, Johansson & Ormarsson 2009)

Solujen epätasaiseen kutistumiseen kuivauksen aikana vaikuttavat mm. puuaineen oksaisuus, lustojen leveys, kesäpuuosuus, vinosyisyys ja lyly (Saranpää 2002). Oksat vaikuttavat kutistumiseen erityisesti syysuunnan muutoksen takia mutta myös oksan erilaisen solurakenteen takia, sillä kuusen oksissa on poikkeuksetta paljon voimakkaasti kutistuvaa lylyä ja ydinsäteitä. Kuolleet oksat eivät juuri kutistu kuivauksessa, joten niiden vaikutus puuaineen muodonmuutoksiin onkin yleensä pienempi kuin tuoreiden oksien. (Bowyer ym. 2007) Kasvunopeuden kiihtyminen vähentää yleensä muodonmuutoksia, erityisesti kieroutta, sillä kasvunopeuden lisäys syntyy lähinnä kevätpuun lisäyksestä. Kevätpuun soluseinämät ovat ohuita ja kutistuminen siksi

vähäistä. Toisaalta kasvunopeuden vaihtelu saheen sisällä kasvattaa muodonmuutoksia. (Saranpää 2002)

Vinosyysydellä tarkoitetaan pitkittäisten trakeidisolujen suuntautumista vinoon pituussuuntaan nähden. Solujen suuntautuminen määräytyy jällen tangentinsuuntaisessa jakautumisessa, sillä usein osa jällen soluista jakautuu nopeammin kuin toiset ja pakottaa syntyvät solut vinoon. Vinosyisyys vaikuttaa erityisesti sahatavaran kieroutumiseen, koska solujen kutistuminen on suurempaa tangentin suunnassa kuin pituussuunnassa ja vinosyisessä puuaineessa solut kutistuvat rungon pituussuuntaan nähden oman tangenttinsa suunnassa. (Hansen & Roulund 1998, Bowyer 2007)

Lyly vaikuttaa muodonmuutoksiin, koska sen kutistuminen on tavallista puuta suurempaa alhaisesta mikrofibrillikulmasta ja korkeasta tiheydestä johtuen (Saranpää 2002, Öhman & Nyström 2002). Öhman & Nyström (2002) osoittivat myös, että lylyn määrän lisäksi myös sen sijoittuminen rungon sisällä vaikuttaa muodonmuutoksien suuruuteen.



**Kuva 3.** Sahatavaran muodonmuutokset kuivauksessa: Järjestyksessä ylhäältä alas lapeväääryys, syrjäväääryys, kierous (Kuva: Pohjoismainen sahatavara – lajitteluohjeet 1994). Oikealla kiero sahatavarakappale tämän tutkimuksen aineistossa.

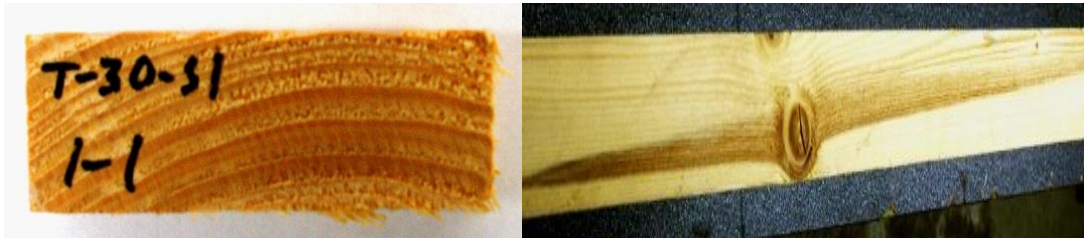
### 1.2.9 Lyly ja laho

Kuusen reaktiipuuta eli lylyä (engl. compression wood) syntyy rungon kallistumien ja vinoumien alapinnalle kasvun suoristamiseksi. Lylyä saattaa syntyä myös kasvun kiihtyessä tai metsikön tilajärjestyksen muuttuessa, jolloin sen on havaittu vaikuttavan rungon kasvuun kohti vapautunutta kasvutilaa ja valoa. Lyly on tavallista kovempaa ja tiheämpää puuainetta, ja lylyisen puusolun soluseinän toisen sekundäärisseinämän mikrofibrillikulma on tavallista jyrkempi. (Kärkkäinen 2003, Bowyer ym. 2007)

Lyly poikkeaa ulkonäöltään tavallisesta puuaineesta tummempana ja kiiltävämpänä, ikään kuin vuosilustossa olisi pelkkää kesäpuuta (Kuva 4). Helpoimmin lylyn havaitsee poikkileikkauksen tai säteen suunnassa verrattaessa terveisiin lustoihin. Sahatavarassa lylyä tarkastellaan vikana, sillä kovuutensa vuoksi se huonontaa sahatavaran työstettävyyttä ja poikkeavasta mikrofibrillikulmasta ja tiheydestä johtuen lylyisen puuaineen kutistuminen on suurempaa kuin tavallisen puuaineen, mikä yleensä johtaa sahatavaran kieroutumiseen. Jyrkästä mikrofibrillikulmasta johtuen lylyn kutistuminen pituussuunnassa on tavallista puuainetta suurempaa. Mikrofibrillikulman jyrkkyys vaikuttaa myös puuaineen jäykkyyteen heikentävästi. (Öhman & Nyström 2002, Kärkkäinen 2003, Bowyer ym. 2007)

Laho alentaa puuaineen tiheyttä ja lujuutta merkittävästi ja vähentää siksi sahatavaran käytettävyyttä olennaisesti. Kuusella yleisimmät lahottajat ovat ruskolahottajia, jotka hajottavat puuaineen selluloosaa. Jäljelle jäävän ligniinin takia lahon ulkomuoto on väriltään ruskea (Kuva 4). Ruskolaho on tyypillisesti kovaa ja puuaine säilyttää lujuutensa pitkään lahon edetessä, mutta loppuvaiheessa lahonnut puuaine kuitenkin hajoaa lohkeillen ja pölyten ja menettää lujuutensa. Yleisimmät kuusen lahottajat ovat tyypillisiä saprotrofeja eli mädänsyöjiä, kuten kantokääpä *Fomitopsis pinicola*, jotka iskevät vasta valmiiksi kuolleeseen puuaineeseen. Näitä harmillisempi laji on esimerkiksi kuusenjuurikääpä *Heterobasidion parvivorum*, joka on paitsi lahottaja, myös patogeeni eli taudinaiheuttaja. Juurikääpä infektoi puuaineen, mikä aikaansaa puuaineessa ohjelmoidun solukuoleman. Toisin kuin patogeenit yleensä, juurikääpä ei pysähdy kuolleisiin soluihin vaan käyttää ne ravinnokseen. Juurikääpä leviää juuriston välityksellä ja aiheuttaa kuusilla maannousemaa eli ydinlahoa puun tyvitukki-alueella ja pilaa näin puun kaupallisessa mielessä arvokkaimman osan. (Kasanen 2009)

Tällä hetkellä tunnetuista juurikäävän torjuntakeinoista tehokkaimmaksi on havaittu puulajikierto. Eri-ikäisrakenteisen metsän kasvatuksessa juurikäävän leviämisen oletetaan tehostuvan, koska maassa on kokoajan kuolleita juuria, joiden välityksellä juurikäpä pääsee leviämään koko metsään. (Hantula 2009)



**Kuva 4.** Lylyisiä vuosilustoja sahatavarakappaleen päässä (vasen) ja ruskolahoa sahatavarakappaleen syrjällä (oikea).

### 1.3 Tavoitteet

Aineistoa eri-ikäiskasvatetun puun puuaineen laadusta Suomessa ei juuri ole vielä olemassa, joten tutkimuksessa oli eksploraatiivisen tutkimuksen piirteitä. Tutkimuksen kysymyksenasettelua ohjasi silti kiinnostus yleisesti tunnettujen puuteknologisten ja puutieteellisten laatutunnuksien tai niitä indikoivien suureiden vaihtelua kohtaan.

Päätutkimusongelman mukainen hypoteesi oli, että eri-ikäismetsikössä kasvavan kuusen epätasainen kasvurytmi vaikuttaa puun puuaineen ominaisuuksiin. Tutkimuksen pääpaino oli puun sisäisen vaihtelun tarkastelemisessa, mutta myös puiden välisen kasvuerojen vaikutusta laatuun tarkasteltiin lyhyesti.

Päätutkimusongelmasta seuraavat tutkimuskysymykset:

- 1) Miten puuaineen kasvu vaihtelee aineistossa?
- 2) Miten kuidunpituus vaihtelee aineistossa?
- 3) Millaista aineiston sahatavara on tiheydeltään ja jäykkyydeltään?
- 4) Millaista aineiston sahatavara on visuaaliselta laadultaan?
  - a. Millaista sahatavara on oksaisuudeltaan?
  - b. Millaista sahatavara on muodonmuutoksiltaan?
  - c. Mitä muita sahatavaran laatuun vaikuttavia tekijöitä aineistossa esiintyy?
- 5) Onko puun sisäisellä kasvurytmillä vaikutusta kuidunpituuden, tiheyden, jäykkyyden tai visuaalisen laadun vaihteluun?
- 6) Vaihtelevatko laatuominaisuudet enemmän puun sisällä vai puiden välillä?

Kysymyksiin vastaamiseksi tarkasteltiin laatuominaisuuksien vaihtelua eri kohdissa puiden runkoa ja suhteessa puuaineen kasvunopeuteen ja jäljen ikään tai etäisyyteen ytimeistä. Luston numeroa käytettiin jäljen iän tunnuksena (engl. cambial age) ja luston leveyttä (mm) puuaineen vuotuisen kasvunopeuden tunnuksena.

Tuloksia testattiin tilastollisesti sekamallin, regressioanalyysin tai kaksisuuntaisen varianssianalyysin avulla tarkastelemalla selittävien tekijöiden vaikutusta laatutunnuksiin. Tuloksia verrattiin tasaikäiseen vertailuaineistoon ja kirjallisuudessa julkaistuihin tuloksiin kuusen puuaineen ominaisuuksista tasaikäismetsiköissä. Päätelmissä tulkittiin havaittuja eroja eri-ikäisaineiston sisällä ja eri-ikäis- ja tasaikäisaineistojen välillä biologisin perustein. Tavoitteena oli ottaa kantaa väittämään: Käytetyssä aineistossa eri-ikäismetsikön kasvurytmillä on vaikutusta puuaineen laatuun, ja perustella kannanotto puun kasvun ja kehittymisen biologiaan liittyvin johtopäätöksin.



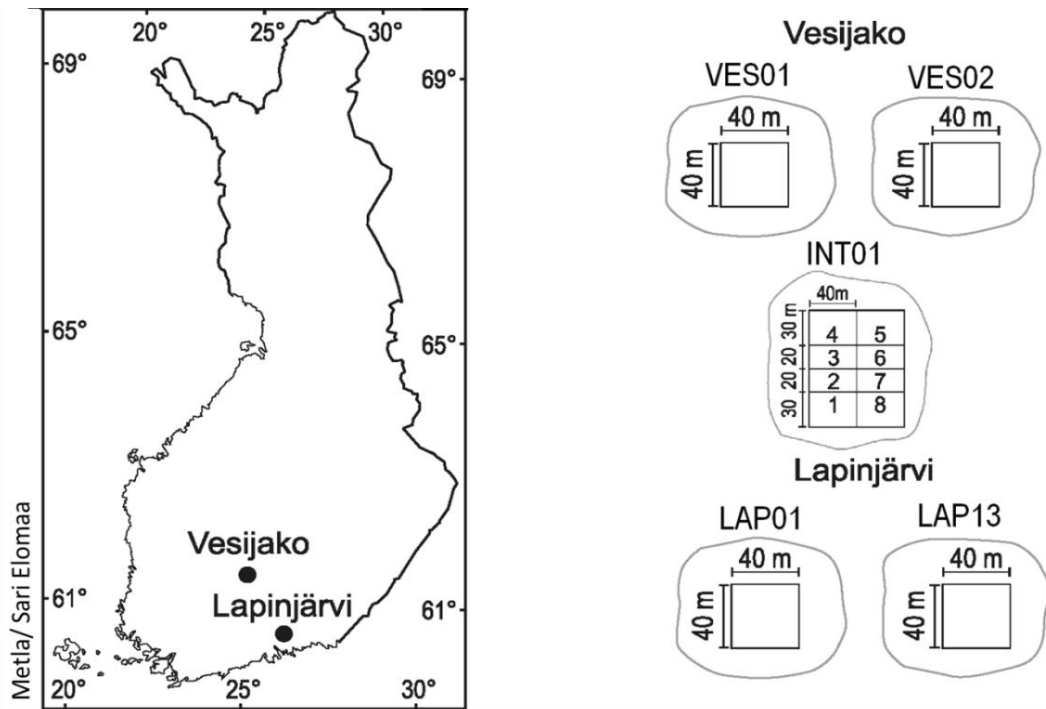
## 2 Aineisto ja menetelmät

### 2.1 Koealat ja valitut puut

Tutkimus kuuluu Metlan ERIKA-kokeeseen, joka sisältää 20 kestokoe- ja 5 intensiivikoeruutua Etelä-Suomessa (61° 00' - 62° 30'N, 25° 00' - 27° 30'E) (Saksa & Valkonen 2009). Tässä tutkimuksessa oli mukana viisi koealaa kahdelta paikkakunnalta: Lapinjärveltä koealat LAP01 ja LAP13, Vesijaolta VES01, VES02 ja INT01(1-8) (Kuva 5).

Koealat perustettiin 1990-luvun alussa metsiköihin, joiden rakenne soveltui erikäiskasvatukseen ja sen jatkamiseen ja joita oli hoidettu poimintahakkuin jo 1980-luvulta lähtien. Metsiköiden kasvupaikkatyypiksi oli MT tai OMT (LAP01), valtapuu-lajina kuusi (Kuva 6). Taulukossa 1 on esitetty koealojen puustotunnukset.

Metsiköiden harvennuksissa on kokeiden perustamisen jälkeen pyritty tukemaan läpimittajakauman painottumista pieniin läpimittaluokkiin. Ensimmäinen kokeen perustamisen (1991) jälkeinen harvennus suoritettiin poimintahakkuin vuosina 1991–1996. Kokeen ruutujen harvennukset perustuivat jokaisen metsikön omaan runkolukusarjaan sovitettuna käyrän mukaiseen malliin. (Saksa & Valkonen 2011, Valkonen ym. 2010) Kuvassa 7 on esimerkkinä ruudun VES01 runkolukusarja ennen ja jälkeen hakkuiden sekä mallin mukainen tavoitekäyrä vuosina 1996 ja 2011. Kuvassa huomataan mm. tavoitekäyrän loiventuminen klassisesta J-käyrästä vuonna 1996 sigmoidiksi vuonna 2011.



**Kuva 5.** Tutkimuksessa mukana olleet koealat (Kuva: Metla/ Sari Elomaa).

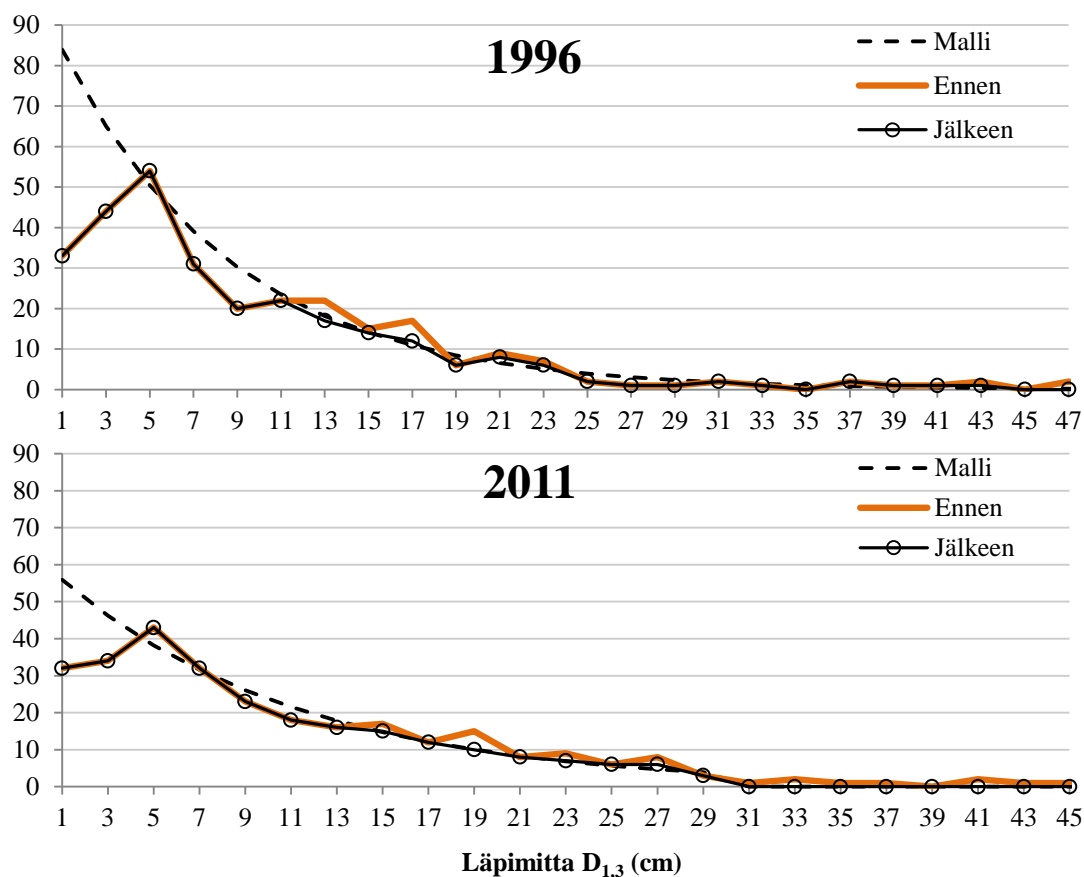


**Kuva 6.** Eri-ikäisrakenteista MT-kuusimetsää Vesijaon koealalla VES01 syksyllä 2012 ennen poimintahakkuita (Kuva: Metla/ Riikka Piispanen).

**Taulukko 1.** Koealojen tunnukset: paikkakunta, koealan tunnus, koepuiden määrä, puiden keskimääräinen ikä (*a*), pituus *h* (dm) ja keskimääräinen rinnankorkeusläpimitta  $d_{1,3m}$  (cm).

Paikkakunta	Koeala	Koepuut	Ikä ( <i>a</i> )	<i>h</i> (dm)	$d_{1,3m}$ (cm)
Lapinjärvi	LAP01	16 +10*	55,9 ± (28,8)	180,2 ± (72,8)	21,2 ± (11,3)
Lapinjärvi	LAP13	16 +10*	77,4 ± (14,7)	180,3 ± (95,1)	21,3 ± (10,5)
Vesijako	VES01	10	84,8 ± (16,1)	214,4 ± (35,2)	25,9 ± (7,7)
Vesijako	VES02	10	75,2 ± (16,1)	212,2 ± (40,5)	26,0 ± (8,7)
Vesijako	INT01(01)	6	67 ± (14,1)	181,3 ± (43,8)	9,8 ± (3,8)
Vesijako	INT01(02)	4	66,5 ± (21,0)	192,8 ± (87,4)	11,6 ± (7,5)
Vesijako	INT01(03)	4	61,5 ± (10,4)	195,5 ± (73,1)	11,2 ± (6,0)
Vesijako	INT01(04)	4	64,5 ± (2,5)	187,3 ± (80,6)	10,6 ± (5,9)
Vesijako	INT01(05)	4	57,8 ± (9,1)	190,3 ± (65,0)	11,7 ± (6,3)
Vesijako	INT01(06)	4	65,3 ± (20,3)	180,5 ± (88,0)	11,0 ± (7,0)
Vesijako	INT01(07)	3	66,7 ± (11,2)	213,3 ± (80,9)	13,5 ± (6,8)
Vesijako	INT01(08)	3	58,3 ± (16,3)	176,7 ± (128,6)	11,2 ± (8,8)

\*16 koepuuta kuituaineistoon + 10 laatuaineistoon



**Kuva 7.** Koealan VES01 runkolukusarjat vuoden 1996 ja 2011 hakkuissa ja niihin sovitetut hakkuumallit (Metla/ Sauli Valkonen).

## 2.2 Kuidunpituusaineiston otanta ja mittausmenetelmät

Kuituaineistoon valittiin yhteensä 64 puuta neljästä eri läpimittaluokasta, jotka olivat rinnankorkeusläpimitan mukaan pienimmästä isoimpaan 0–9,99 cm, 10–19,99 cm, 20–29,99 cm ja > 30 cm. Lapinjärvellä puut valittiin koealojen LAP01 ja LAP13 ulkoreunoilta, 4 per sivu. Vesijaolla puut olivat intensiivikoeruuduilta INT01(01–08), joilta oli tavoitteena valita 4 puuta per ruutu, mutta koska ruuduilta 7 ja 8 ei löydetty puita kokoluokasta 10–19,99 cm, puuttuvat puut valittiin ruudulta 1. Jokaisesta puusta sahattiin kiekko 0,6 m:n korkeudelta lusto- ja kuitumittauksia varten.

### 2.2.1 Lustonmittausmenetelmä

Kiekoista sahattiin näytekappaleet pinnasta ytimeen (leveys tangentin suunnassa 2 mm, pituus säteen suunnassa 7 mm). Näytekappaleiden lustot analysoitiin yhteistyössä Innventian (Tukholma) kanssa Innventian SilviScan - laitteistoilla (CSIRO, Australia).

SilviScan-analyysissä mitattiin mm. jokaisen luston leveys (mm), kesäpuun osuus (%) leveydestä ja luston etäisyys ytimestä (mm). Näytteitä mitattiin yhteensä 736 kappaletta (Lapinjärvi 344, Vesijako 399), lustoja yhteensä 3894.

Lustoanalyysin perusteella puille laskettiin myös niiden suhteellinen valtaläpimitta  $RELd_{dom}$  (Kaava 3).

$$[3] RELd_{Dom} = d_i/d_{Dom},$$

missä  $d_i$  on puun  $i$  rinnankorkeusläpimitta ja  $d_{Dom}$  on 100 isoimman puun rinnankorkeusläpimitan keskiarvo hehtaarilla. Puun suhteellinen valtaläpimitta on siis suhdeluku, joka kertoo puun kasvuasemasta metsikössä.

### 2.2.2 Kuidunpituuden mittausmenetelmä

Kuidunpituuksien mittausmenetelmä poikkesi tavallisesta mittausmenetelmästä (esim. Kaakinen ym. 2009), jossa tarkastellaan vain kunkin luston kevätpuun kuituja, koska tässä aineistossa oli hyvin kapeita lustoja, joilla kevät- ja kesäpuun erottaminen toisistaan ei olisi ollut mahdollista.

Näytteet maseroitiin jäätikkahapon ja 30 % vetyperoksidin liuoksessa. Maseroituminen kesti 3 vuorokautta 60 °C:ssa. Kuidut kuvattiin Olympus BH-2 mikroskooppia

(Olympus Optical, Japani) ja CCDC kameraa (COHU, USA) käyttäen ja mitattiin Image-Pro 3.0 ohjelmalla. 1 pikselin koko oli 1,08 µm. Kustakin näytteestä mitattiin 50 kpl satunnaisesti valittuja ehjiä kuituja. Kuidunpituuksien näytekohtainen keskiarvo yhdistettiin SilviScan-lustonmittausaineistoon siten, että näytekohtaiselle kuidunpituuden keskiarvolle kohdistettiin SilviScan-analyysissä mitattujen lustojen ominaisuuksien näytekohtainen keskiarvo. Luston leveys (mm) kuvasi näytteen lustojen leveyksien keskiarvoa ja jäljen ikä (a) näytteen viimeisen luston numeroa ytimestä pintaan ja etäisyys ytimestä (mm) näytteen viimeisen eli lähimpänä pintaa olevan luston etäisyyttä ytimestä.

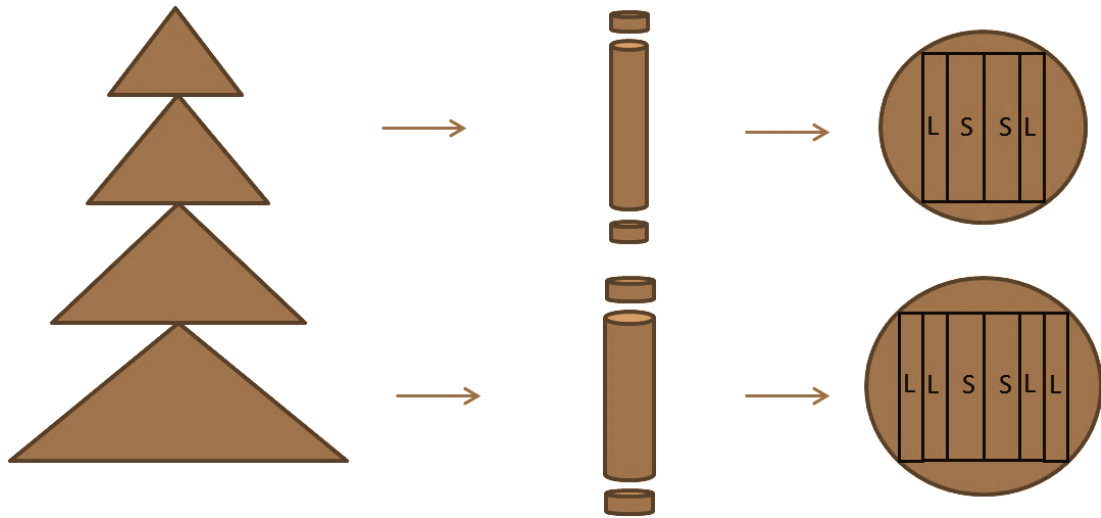
### **2.3 Laatuaineiston otanta ja mittausmenetelmät**

Laatuaineistoon mitattiin yhteensä 40 runkoa kahdesta eri läpimittaluokasta, jotka olivat rinnankorkeusläpimitan mukaan 30–39,99 cm ja > 40 cm. Vesijaolla puut valittiin ruuduilta VES 01 ja VES 02, Lapinjärvellä ruuduilta LAP 01 ja LAP 13. Puut kaadettiin Lapinjärvellä huhti- toukokuussa 2012, sahattiin ja kuivattiin kesäkuussa. Laatulajittelu tehtiin syyskuussa 2012. Vesijaon rungot kaadettiin, sahattiin ja kuivattiin syys- lokakuussa 2012 ja lajiteltiin marras- joulukuussa 2012.

Kustakin rungosta sahattiin tyveltä tyvitukki ja ylempää rungosta latvatukki. Molempien tukkien pituus oli 2,5 m. Latvatukki sahattiin Lapinjärvellä siten, että latvaläpimitaksi jäi 18 cm. Tukeista syntyi huomattavan paljon tutkimuksen kannalta käyttökelpotonta vajasärmäistä lautaa ja niinpä Vesijaolla latvatukin latvaläpimitaksi valittiin 20 cm. Latvatukkien latvapään korkeudet vaihtelivat välillä 6,45 - 21,1 m.

Jokaisesta tukista sahattiin kaksi 50 x 100 mm ydinsoiroa (S) ytimen ympäriltä etelä- ja pohjoispuolilta, sekä edelleen molemmilta puolilta kahdesta neljään 28 x 100 mm pintalautaa (L) tukin läpimitasta riippuen (Kuva 8, Kuva 9). Saheet kuivattiin heti sahausksen jälkeen. Sahatavaran tavoitekosteus oli kuivauksen jälkeen 12 % (ilma-kuiva). Lapinjärvellä käytettiin kuivauskaavaa 50 °C, 4 vuorokautta. Lapinjärven saheet olivat heti kuivauksen jälkeen lähes puusepänkuivia kosteuden ollessa hieman yli 8 %. Sahatavara oli tämän jälkeen taapelissa kesän yli ja mittausten alkaessa kosteuden keskiarvo oli 13,75 %. Aineistossa oli paljon halkeamia, joten Vesijaolla kuivauskaavaksi valittiin 30 °C, 9 vuorokautta. Vesijaon saheet tulivat mitattavaksi suoraan kuivauksesta, ja niiden keskikosteus mittausten alkaessa oli 12,3 %. Myös hal-

keamia oli vähemmän. Sahatavarakappaleita mitattiin 355: Lapinjärveltä 80 + 94 ja Vesijaolta 78 + 103.



**Kuva 8.** Laatuaineiston tukit ja sahausasete (40 puuta, 80 tukkia, 160 kiekkoa, 355 sahetta).



**Kuva 9.** Pelkan sahaus ja ydinsoirot (vasen alakulma) sekä pintalaudat (oikea alakulma) taapelissa valmiina kuivaukseen. Lapinjärven aineisto (Kuvat: Metla/ Riikka Piispanen).

### **2.3.1 Lustonmittausmenetelmä**

Laatuaineiston 40 tukkirungon tyvi- ja latvatukkien molemmista päistä sahattiin kiekot (Kuva 8), joiden pohjois- ja eteläpuolelta leikatuista sektoreista laskettiin lustojen lukumäärä ja mitattiin jokaisen luston leveys 0,001 mm tarkkuudella. Mittaamiseen käytettiin Heidenhein LS 303C - lustonmittauslaitetta yhdistettynä Olympus - stereomikroskooppiin. 160 kiekosta lustomittauksia tehtiin yhteensä 21068.

Kasvunopeuden vaihtelua tarkasteltiin laatuaineiston osalta tyveltä latvaan tukin sijainnin mukaan sekä ytimeistä pintaan saheen sijainnin mukaan. Tyvi- ja latvatukin osalta tarkasteltavina lustoina käytettiin suoraan koekiekoista mitattuja lustoja. Soiron ja lautojen lustotiedot estimoitiin kunkin tukin ylä- ja alapäästä sahattujen kiekkojen lustomittauksien perusteella. Lustot laskettiin tyvitukin latvakiekosta ja latvatukin tyvikiekosta. Kiekon lustodatasta arvioitiin saheiden halkaisukohdat laskemalla lustonleveyksien summa ytimeistä pintaan päin ensimmäisestä kokonaisesta lustosta eteenpäin kun summa ylitti 2,5 mm (sahanterän paksuus 5 mm). Ensimmäiseen soiron laskettiin kuuluvaksi kaikki kokonaiset lustot tästä pisteestä, kunnes summa ylitti 55 mm (soiron paksuus tuoreena 52,5 mm). Ensimmäiseen lautaan laskettiin kuuluvaksi lustot välillä 60 mm - 89,5 mm, toiseen 94,5 mm - 124 mm, kolmanteen 129 mm - 158,5 mm ja neljänteen 163,5 mm - 193 mm (laudan paksuus tuoreena 29,5 mm).

### **2.3.2 Tiheyden ja kimmokertoimen mittausmenetelmät**

Jokaisen saheen päästä sahattiin n. 20 mm koekappale, josta mitattiin dimensiot (3 x per suunta) 0,1 mm tarkkuudella ja laskettiin niiden perusteella tilavuus ilmakeivana (suhteellinen kosteus 12 %). Paino mitattiin 0,01 g:n tarkkuudella ilmakeivana. Tämän jälkeen kappaleet kuivattiin absoluuttisen kuiviksi ja suoritettiin samat mittaukset. Mittauksien perusteella koekappaleille määritettiin kuiva-ilmakeivatiheys ( $\text{kg/m}^3$ ) eli laskettiin kuivapainon suhde ilmakeivan kappaleen tilavuuteen.

Jokaiselle saheelle suoritettiin laatulajittelun yhteydessä akustinen mittaus Fibre-Gen:in Director HM200 - äänennopeuden mittauslaitteella. Laite mittaa ääniaaltojen pitkäikäisen kaiun paluuajan (s) puuaineessa ja jakaa sillä kappaleen pituuden (km). Laite rekisteröi eri taajuuksilla resonoivien ääniaaltojen harmonisen kaiun ja muodostaa sen nopeuden perusteella ääniaaltojen nopeudelle keskiarvon, koska eri taajuisilla äänillä on erilainen nopeus.

Referenssiartikkeleiden mittausjärjestelyjä ja laitteen käyttöohjeita noudattaen mittaus sisälsi seuraavat vaiheet:

- 1) mitattavan kappaleen pituuden syöttäminen mittauslaitteeseen 1cm:n tarkkuudella,
- 2) mittauslaitteen sensorin painaminen tiukasti sahatavarakappaleen päätä vasten,
- 3) saheen pään kopauttaminen mittauslaitteen vierestä vasaralla,
- 4) ääniaallon nopeuden (km/s) lukeminen laitteen näytöltä.

Referenssitutkimuksia Knowles ym. (2004), Shmulsky ym. (2006), Edlund ym. (2006), Lachenbruch ym. (2010) ja Achim ym. (2011) mukailten dynaaminen kimmoerot MOE (MPa, N/mm<sup>2</sup>) laskettiin tässä tutkielmassa kuiva-ilmakuivatiheyden  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) ja ilmakeivässä puuaineessa mitatun ääninopeuden (km/s) neliön  $v^2$  tulona (Kaava 2, s. 10).

Tulo jaettiin lopuksi 1000:lla, jolloin lopullinen yksikkö jäykkyydelle oli gigapascalia (GPa).

### **2.3.3 Visuaalinen laatulajittelumenetelmä**

Sahatavarakappaleille suoritettiin laatulajittelu Metsäntutkimuslaitoksen Vantaan toimipisteen Puimalassa. Sahatavara välivarastoitiin lajittelun aikana taapelissa kate-tussa ulkotilassa, jossa lämpötila vaihteli syyskuussa Lapinjärven aineiston lajittelun aikana välillä 5 - 15 °C ja suhteellinen ilmankosteus välillä 85 - 90 %, marras-joulukuussa Vesijaon aineiston lajittelun aikana välillä 0 - 5 °C ja 70 - 95 %. Marras-joulukuun lajittelun aikana varastopaikan lämpötila ja kosteus pidettiin olosuhteisiin nähden mahdollisimman tasaisena kuumailmapuhaltimen avulla.

Lajittelu perustui Pohjoismaisen sahatavaran laatulajitteluohjeeseen, jota sovellettiin oksien, muodonmuutosten, lyylyn, vikojen ja muiden selkeästi puuaineen laatua koskevien kriteerien osalta. Sahausvikoja, mittapoikkeamia, vajaasärmäisyyttä ja muita teknisiä ja siksi puuaineen laadusta suoranaisesti riippumattomia kriteerejä ei otettu tässä lajittelussa huomioon. Lapinjärven aineistossa myös halkeamat jätettiin pois lopullista laatuluokitusta annettaessa, sillä valittu kuivauskaava oli selkeästi liian voimakas. Vesijaon aineistossa kuivauslämpötila oli matalampi ja myös halkeamat otettiin huomioon luokituksessa.



Jokainen sahatavarakappale jaettiin kolmeen tarkasteluosuuteen (1 m, 1 m ja 0,5 m). Jokaiselta tarkasteluosuudelta mitattiin suurimman terveän ja kuivan oksan läpimitta (mm), laskettiin niiden terveiden ja kuivien oksien lukumäärät, joiden läpimitta ylittää 10 mm (laatuluokissa A1-A2 7 mm) sekä tätä pienempien oksien eli helmioksien lukumäärä. Sarvioksia, lehtioksia yms. ei eritelty, mutta niiden läpimitta laskettiin eri kaavalla lajitteluohjeen mukaisesti. Tuloksissa viitataan saheen oksaisimpaan tarkasteluosuuteen termillä huonoin metri, joka on siis tässä tutkimuksessa kiinteä tarkasteluosuus eikä liukuva metri kuten lajittelussa yleensä.

Koko kappaleen mitalta määritettiin lape- ja syrjävääritys sekä kierous (mm). Lape- ja syrjävääritys mitattiin molemmilta lappeilta ja syrjiltä suurimpana nuolikorkeutena 2 m suoraa metallikiskoa hyödyntäen. Kierouden mittaamiseksi saheen toinen pää ja vastakkaisen pään toinen kulma painettiin tasaisesti pöydän pintaan ja mitattiin toisen kulman nuolikorkeus pöydästä.

Lyly, laho, sinistymä ja värimuutos määritettiin silmämääräisesti prosentteina koko kappaleen tilavuudesta. Sahatavarakappaleen päistä laskettiin viallisten lustojen määrä poikkileikkauksen suunnassa ja arvioitiin syrjältä säteensuuntaisesta leikkauksesta, kuinka pitkällä matkalla vikaa on pituussuunnassa.

Pihkataskujen, kaarnarosojen ja korojen yhteenlaskettu pituus (mm) mitattiin huonimman metrin osalta.

Laatulajittelun määräävä tekijä, eli lopulliseen laatuluokkaan vaikuttanut laatuominaisuus eriteltiin jokaiselle saheelle. Määräävät ominaisuudet jaettiin 10 luokkaan; oksakoko, oksien määrä, irto-oksa, kierous, muu muodonmuutos, pihkataskut, lyly, laho, sinistymä, muu ominaisuus. Määräävän ominaisuuden poimiminen kullekin saheelle laatulajittelutaulukosta tehtiin luokkien lopusta alkuun siten, että ensin tarkasteltiin puuaineen vikoja (pihkataskut, lyly, laho, sinistymä, muu), sitten muodonmuutoksia (kierous tai muu muodonmuutos) ja lopuksi oksia (koko, määrä, irto-oksa). Mikäli siis vikoja tai muodonmuutoksia ei löytynyt, määrääväksi ominaisuudeksi jäivät oksat. Tämä tarkoittaa sitä, että jos määrääväksi ominaisuudeksi on merkitty laho, samassa sahatavarakappaleessa on voinut silti olla myös oksia samaan laatuluokkaan määräävästi. Otanta tehtiin näin, jotta saataisiin esille myös harvinaisimmat määräävät vikaominaisuudet, jotka kuitenkin ovat selkeästi puuaineen laatu

indikoivia ja kertovat oletettavasti jotakin eri-ikäismetsän kasvuolosuhteista ja toisaalta antavat mahdollisuuden tarkastella tulosten luotettavuutta johtopäätöksissä.

### **2.3.4 Vertailuaineisto**

Tuloksia oksaisuuden ja muodonmuutoksien suhteen vertailtiin vastaaviin laatumittauksiin tasaikäismetsästä. Saranpää ja Verkasalo (2002) mittasivat kahden itäsuomalaisen luontaisesti uudistuneen tasaikäisrakenteisen OMT ja VT+ -kuusikon kuusitukkien sahatavaran oksat ja muodonmuutokset kuivauksessa. Aineistossa oli yhteensä 26 runkoa, joista sahattiin 5 m tukkeja 16 cm:n latvaläpimittaan saakka. Tukit katkaistiin edelleen 2,5 m:n tukeiksi ja ne sahattiin kahdella eri asetteella. Ensimmäisessä asetteessa poistettiin ydin 38 mm ydinlaudan sahausella ja sahattiin sen jälkeen molemmin puolin 50 x 100 mm soirot sekä 22 x 100 mm pintalaudat (ydinvapaa sahaus). Toisessa asetteessa sahattiin ydinsoirot 50 x 100 mm ja pintalaudat 22 x 100 mm neljältä sivulta. Yhteensä saheita mitattiin 1057 kpl. Aineiston kuivauksessa käytettiin samaa kaavaa kuin tässä tutkimuksessa Lapinjärven saheille.

Vertailuaineistoksi tähän tutkielmaan valittiin jälkimmäisen asetteen mukaiset ydinsoirot ja molempien asetteiden pintalaudat ydinsoirojen halkaisusuunnassa. Kahden muun sivun laudat jätettiin pois, jotta otanta vastaisi tämän tutkimuksen pohjois-etelä-suuntaista sahausta. 5 m tyvitukeista valittiin 2,5 m tyviosat. Ylimmästä tukista poistettiin ylemmän osan mittaukset, koska minimilatvaläpimitta oli vertailututkimuksessa pienempi kuin tässä tutkimuksessa.

Suodatuksen jälkeen vertailuaineistoon jäi 357 saheen oksamittaukset. Oksamittaukset oli suoritettu samalla menetelmällä samaa ohjetta noudattaen kuin tässä tutkimuksessa.

Saranpää vertaili artikkelissaan Kuusen sahatavaran muodonmuutokset kuivauksessa (2002) aineiston kutistumista ja muodonmuutoksia kuivauksessa. Artikkelisiin oli valittu 229 sahatavarakappaletta edellä kuvatusta aineistosta. Kun näistä suodatettiin pois ydinvapaan sahausydinlaudat ja soirot sekä tyvitukin yläosa ja ylimmän tukin latvaosa, lopulliseen vertailuaineistoon jäi saheita 121 kpl. Muodonmuutoksien mittaamisessa oli noudatettu samoja ohjeita kuin tässä tutkimuksessa.

## 2.4 Tilastolliset menetelmät

Aineistojen tilastollinen analysointi suoritettiin SPSS Statistics - ohjelmistoversioita 18 PASW ja 20 AMOS (IBM, USA) käyttämällä.

### 2.4.1 Kuituaineiston analysointi

Kuituaineistossa käsiteltiin yksittäistä puuta otosyksikkönä ja näytekappaleita ytimeistä pintaan otosyksikön toistoina. Toiston tunnuksena käytettiin näytteen viimeisen eli lähimpänä pintaa olevan luston vuosinumeroa.

Kuidunpituuden vaihtelua tarkasteltiin näytekohtaisena keskiarvona suhteessa näytekohtaisen lustonleveyden keskiarvoon ja näytteen etäisyyteen puun ytimeistä näytteen viimeisen luston etäisyyden (mm) mukaan. Tilastollisessa testaamisessa kuituaineistosta poistettiin Lapinjärven koealalta LAP13 yksi puu, jolla kuidunpituudet kaikissa näytteissä kaikilla jäljen i'illä olivat poikkeuksellisen lyhyet ja aiheuttivat tarkastelussa virhettä. Kuidunpituusaineistoon jäi tämän jälkeen 711 näytettä.

Kuidunpituuden vaihtelua mallinnettiin lineaarisella sekamallilla (Kaava 4) (SPSS: "Mixed Models"; "Linear"), jossa tarkasteltiin kuidunpituuden kehittymistä puun sisäisenä aikasarjana ytimeistä pintaan. Puun sisäisten havaintojen oletettiin olevan toisistaan riippuvia autoregressiivisesti eli näytteen kuidunpituuden keskiarvon oletettiin olevan riippuvainen edellisen näytteen kuidunpituuden keskiarvosta. Oletuksen tueksi tarkasteltiin Durbin-Watsonin d-testisuuretta ja sen perusteella kuidunpituushavainnot näyttivät etäisyyden ytimeistä funktiona olevan positiivisesti autokorreloituneita ( $d = 0,88$ ).

Mallissa käytettiin kuidunpituudesta logaritmista muunnosta, joka pienentää muuttujan vaihteluväliä ja siten satunnaisvaihtelun aiheuttamaa kohinaa. Selittävinä kiinteinä muuttujina olivat jatkuvat muuttujat etäisyys ytimeistä ja lustojen leveys ja etäisyyden ytimeistä ja lustojen leveyden logaritmiset muunnokset ja puun suhteellinen valtaläpimitta. Mallin satunnaisrakenteessa olivat mukana luokkamuuttujat "ruutu", "puu" ja "näytteen vuosiluku" ja niiden varianssiparametrit (Kaava 4):

$$\begin{aligned} [4] \quad \ln(F_{ijk}) = & \beta_0 + \beta_1(D_k) + \beta_2(RW_k) + \beta_3 \ln(D_k) + \beta_4 \ln(RW_k) \\ & + \beta_5(RELd_{Dom_j}) + \gamma_i PLOT_i + \delta_j TREE_j + \tau_k YEAR \\ & + \varphi_{k(j)} Y_{T_{k(j)}} + \varepsilon_{ijk} \end{aligned}$$

Mallissa  $F$  oli kuidun pituus,  $\beta_0$  oli aineiston keskiarvo,  $\beta_{1|...|5|}$  olivat kiinteiden selittävien tekijöiden kertoimia eli parametreja,  $D_k$  näytteen  $k$  etäisyys ytimeistä,  $RW_k$  luston leveyden keskiarvo näytteessä  $k$ ,  $RELD_{domj}$  puun  $j$  suhteellinen valtaläpimitta. Satunnaismuuttujien  $PLOT_i$  ”koeruutu  $i$ ”,  $TREE_j$  ”puu  $j$ ”, ja  $YEAR_k$  ”näytteen vuosiluku  $k$ ” varianssikertoimet  $\gamma_i$ ,  $\delta_j$  ja  $\tau_k$  kuvasivat kuidunpituuksien varianssia koeruidun  $i$ , puun  $j$  ja näytteen  $k$  sisällä. Muuttujan  $YT_{k(j)}$  ”näytteen vuosiluku  $k$  puun  $j$  sisällä” kerroin  $\phi_{k(j)}$  kuvasi näytteen  $k$  kuidunpituuden riippuvuutta edellisen näytteen  $k-1$  kuidunpituudesta puun  $j$  sisällä. Virhetermi  $\varepsilon_{ijk}$  kuvasi jäljelle jäänyttä selittämättömyyttä vaihtelua ja sen oletettiin olevan riippumaton ja normaalisti jakautunut.

Parametrien  $\beta_{0|1|...|5|}$  tilastollista merkitsevyyttä tarkasteltiin  $F$ -testisuureen perusteella.

Logaritmimalli muunnettiin takaisin lineaariseksi kaavalla 5:

$$[5] \quad F_{ijk} = \exp[\ln(F_{ijk})]$$

Takaisinmuunnettuja sovitearvoja tarkasteltiin suhteessa havaittuihin arvoihin. Mallin sopivuutta arvioitiin selityksasteen  $R^2$  perusteella. Mallin jäännösvaihtelun eli residuaalien jakautumista tarkasteltiin suhteessa sekä selitettävään että selittäviin muuttujiin. Lisäksi tarkasteltiin residuaalien normaalijakautuneisuutta visuaalisesti frekvenssijakaumalla ja Kolmogorov-Smirnovin testillä.

#### 2.4.2 *Laatuaineiston analysointi*

Laatuaineistossa havaintoyksikkönä oli yksittäinen sahe.

Tarkasteltavia selitettäviä muuttujia olivat laatuominaisuudet:

- Tiheys saheessa  $i$ :  $Dens_i$
- Kimmokerroin saheessa  $i$ :  $MOE_i$
- Oksien määrä saheen  $i$  huonoimmalla metrillä:  $B_i$
- Tuoreiden oksien määrä saheen  $i$  huonoimmalla metrillä:  $Bg_i$
- Kuivien oksien määrä saheen  $i$  huonoimmalla metrillä:  $Bd_i$
- Saheen  $i$  paksuimman tuoreen oksan läpimitta (mm):  $BSg_i$
- Saheen  $i$  paksuimman kuivan oksan läpimitta (mm):  $BSd_i$
- Saheen  $i$  kierous (mm):  $Twist_i$
- Saheen  $i$  lapevääryys (mm):  $Bow_i$
- Saheen  $i$  syrjävääryys (mm):  $Spring_i$

Laatuominaisuuksien sahekohtaista vaihtelua koko aineistossa tarkasteltiin kaksisuuntaisen varianssianalyysin (SPSS: ”General Linear Model”; ”Univariate”) avulla (Kaava 6).

$$[6] \quad Y_{ijk} = \beta_0 + \beta_{1j} + \beta_{2k} + \varepsilon_{ijk}$$

missä  $Y_{ijk}$  oli tarkasteltava laatuominaisuus saheessa  $i$ , tukissa  $j = 1$  tai  $2$  (tyvi- tai latvatukki), sahetypissä  $k = 1$  tai  $2$  (soiro tai lauta), ja parametriestimaatit  $\beta_{1j}$  ja  $\beta_{2k}$  alaindeksien osoittaman luokan poikkeama kontrolliluokan estimaatista  $\beta_0$ . Virhetermin  $\varepsilon_{ijk}$  oletettiin olevan riippumaton ja normaalisti jakautunut.

Selittävien muuttujien varianssien yhtäsuuruus luokkien välillä laskettiin Levenen testillä ja muuttujat oletettiin normaalijakautuneiksi. Luokkamuuttujien tilastollisessa testaamisessa käytettiin F-testisuureta, jossa muuttujan selittämä vaihtelu MSR (Mean Square of Regression) jaettiin jäännösvaihtelulla MSE (Mean Square of Error). Jakojäännöstä verrattiin Fisherin F-jakauman mukaiseen taulukkoarvoon riskitasolla  $0,05$  vapausastein  $Df1 = k - 1$  ja  $Df2 = n - k$ , kun  $k =$  muuttujan luokkien lukumäärä ja  $n =$  havaintojen lukumäärä. Käytännössä F-testisuure kertoi, selittikö muuttuja tarkasteltavan ominaisuuden vaihtelua enemmän kuin jätti selittämättä.

Saheen  $i$  tiheyttä  $Dens_i$  ja kimmokerrointa  $MOE_i$  laatuoluokkien välillä tarkasteltiin parittaisten vertailujen (Post hoc) avulla. Käytetty vertailumetodi oli LSD (Least Significant Difference), jossa laskettiin  $95\%$  luottamusväli kahden luokan väliselle keskiarvojen erotukselle. Jos erotus tällä luottamusvälillä vaihteli aidosti nollan ylä- tai alapuolella, oli luokkien välillä  $5\%$  riskillä merkittävää eroa.

Laatuominaisuuksien vaihtelua saheiden välillä suhteessa jatkuviin selittäviin muuttujiin luston leveyteen ja jällen ikään tarkasteltiin regressioanalyysin avulla (SPSS: ”Regression”; ”Linear”) (Kaava 7).

$$[7] \quad Y_i = \beta_0 + \beta_1(CA_i) + \beta_2(RW_i) + \varepsilon_i$$

missä  $Y_i$  oli tarkasteltava laatuominaisuus saheessa  $i$ , parametri  $\beta_0$  oli vakio eli Y-akselin leikkauskohta ja parametriestimaatit  $\beta_{1|2}$  selittävien tekijöiden kertoimia,  $CA_i$  jällen ikä saheen  $i$  pintalappeella,  $RW_i$  luston leveyden keskiarvo saheessa  $i$  ja  $\varepsilon_i$  riippumaton ja normaalisti jakautunut virhetermi.

Regressioanalyysin tuloksissa parametrien suurimman uskottavuuden estimaatit sarakkeessa ”Estim.” kuvasivat selitettävän muuttujan odotusarvon muutosta suhteessa selittävän muuttujan muutoksiin. Yksittäisen parametriestimaatin merkitsevyyttä testattiin t-testisuureen avulla. Parametrin estimaatti jaettiin estimaatin keskihajonnalla  $t_{jk} = \beta_{jk} / \sqrt{\text{Var}(\beta_{jk})}$ . Havaittua t-testisuureen arvoa verrattiin Studentin t-jakauman kertymäfunktion mukaiseen arvoon riskitasolla 0,05 vapausastein  $Df = n - 2$ , kun  $n$  on saheiden lukumäärä (355). Käytännössä t-testillä varmistettiin, että parametri ei valitulla riskitasolla saanut arvoa 0, vaan sen arvo vaihteli aidosti joko nollan ala- tai yläpuolella.

Koko regressiomallin merkitsevyyttä tarkasteltiin F-testisuureen avulla. Mallin selittämää vaihtelua kuvaava parametrien neliösummien keskiarvo MSR (Mean Square of Regression) jaettiin jäännösvaihtelua kuvaavalla keskivirheiden neliösummien keskiarvolla MSE (Mean Square of Error). Havaittua F-testisuuretta verrattiin Fisherin F-jakauman kertymäfunktion vapausasteilla  $Df1 = k - 1$  ja  $Df2 = n - k$ , kun  $n$  on saheiden lukumäärä (355) ja  $k$  selittävien luokkien lukumäärä (4). Käytännössä F-testillä varmistettiin se, että käytetyillä muuttujilla selitetty vaihtelu oli merkittävästi suurempaa kuin selittämättä jäänyt vaihtelu, eli selittäville muuttujilla voitiin olettaa olevan vaikutusta selitettävään muuttujaan.

## 3 Tulokset

### 3.1 Kuituaineisto

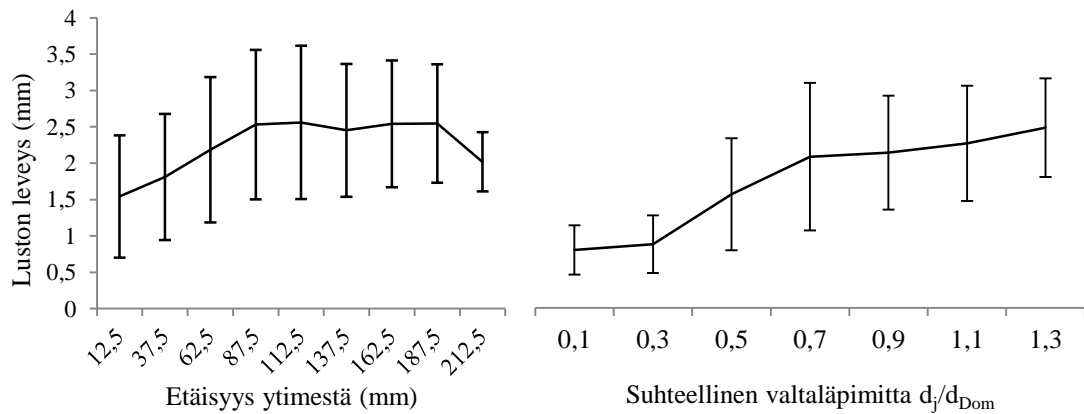
#### 3.1.1 Kasvu

Kuituaineistossa lustojen leveys oli keskimäärin 1,7 mm ja hajonta n. 1 mm. Jälleen ikä lustoilla oli n. 40 vuotta hajonnalla 22,8 vuotta. (Taulukko 2)

Lustojen leveys kasvoi kohti pintaa ja puun suhteellisen valtaläpimitan kasvaessa. Keskihajonta oli suurta ( $> 2$  mm) kaikilla etäisyyksillä ytimestä. Suhteellisen valtaläpimitan kasvaessa myös hajonta kasvoi. (Kuva 10)

**Taulukko 2.** Kuituaineiston lustojen keskimääräinen kasvunopeus ja jälleen ikä.

Kuituaineisto (N = 3885)	
Lustojen leveys (mm)	1,7 ( $\pm 1,01$ )
Jälleen ikä (lustonro)	39,9 ( $\pm 22,8$ )



**Kuva 10.** Lustonleveyden keskiarvo ja -hajonta koko kuituaineistossa ja suhteellisen valtaläpimitan mukaan ytimestä pintaan. Mittauskorkeus 0,6 m (N = 3885).

### 3.1.2 Kuidunpituus

Kuitujen pituus koko aineistossa oli keskimäärin 2,83 mm keskihajonnalla 0,64 mm. Kuidunpituuden keskihajonta yksittäisen puun sisällä oli keskimäärin 0,53 mm.

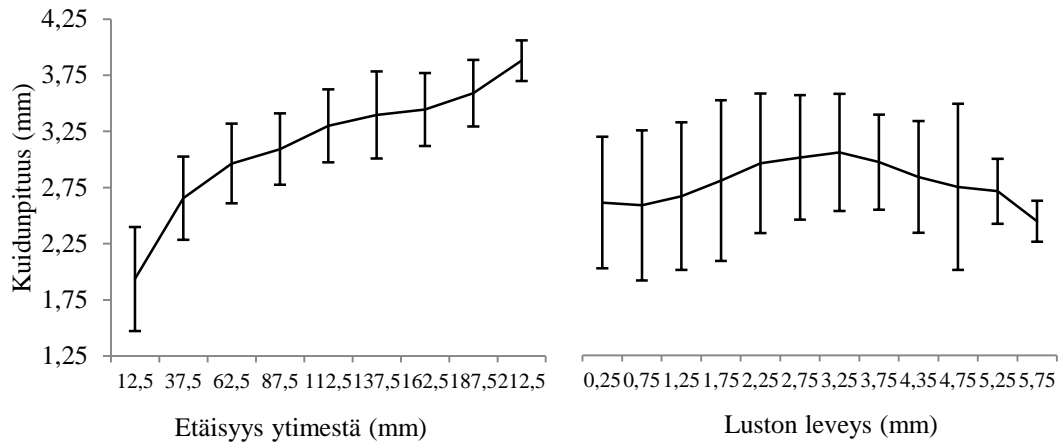
Kuidunpituuden keskiarvo kasvoi puun suhteellisen valtaläpimitan kasvaessa (Taulukko 3). Pituus kasvoi logaritmisesti kohti pintaa. Suhteessa lustojen leveyteen kuitujen pituus aluksi kasvoi luston leveyden kasvaessa, mutta pieneni taas yli 3 mm leveillä lustoilla. Hajonta oli suurta koko matkalla ja korrelaatiokerroin pieni. (Kuva 11)

Sekamalli (Kaava 4 s. 28, Taulukko 4) selitti 82 % kuidunpituuden vaihtelusta ja sen residuaalit olivat normaalisti jakautuneet (Kuva 12). Etäisyys ytimeistä selitti aineistossa kuidunpituuden vaihtelua paremmin kuin luston leveys. Suhteellisella valtaläpimitalla ei näyttänyt olevan tilastollista merkitsevyyttä. (Taulukko 4, Kuva 13)

**Taulukko 3.** Kuidunpituuksien näytekkeskiarvot ja -hajonnat koko kuituaineistossa, eri paikkakunnilla ja eri suhteellisilla valtaläpimitoilla.

<b>Kuidunpituus ka/näyte (mm)</b>		
	<i>Keskiarvo</i>	<i>N</i>
<b>Koko aineisto</b>	<b>2,83 (± 0,64)</b>	<b>711</b>
<i>Paikkakunta</i>		
Lapinjärvi	2,6 (± 0,66)	318
Vesijako	3,0 (± 0,56)	393
<i>Suhteellinen valtaläpimita</i>		
0,1	2,0 (±0,48)	10
0,3	2,5 (±0,52)	68
0,5	2,5 (±0,61)	111
0,7	2,8 (±0,59)	173
0,9	3,0 (±0,58)	128
1,1	3,1 (±0,61)	180
1,3	3,1 (±0,56)	41



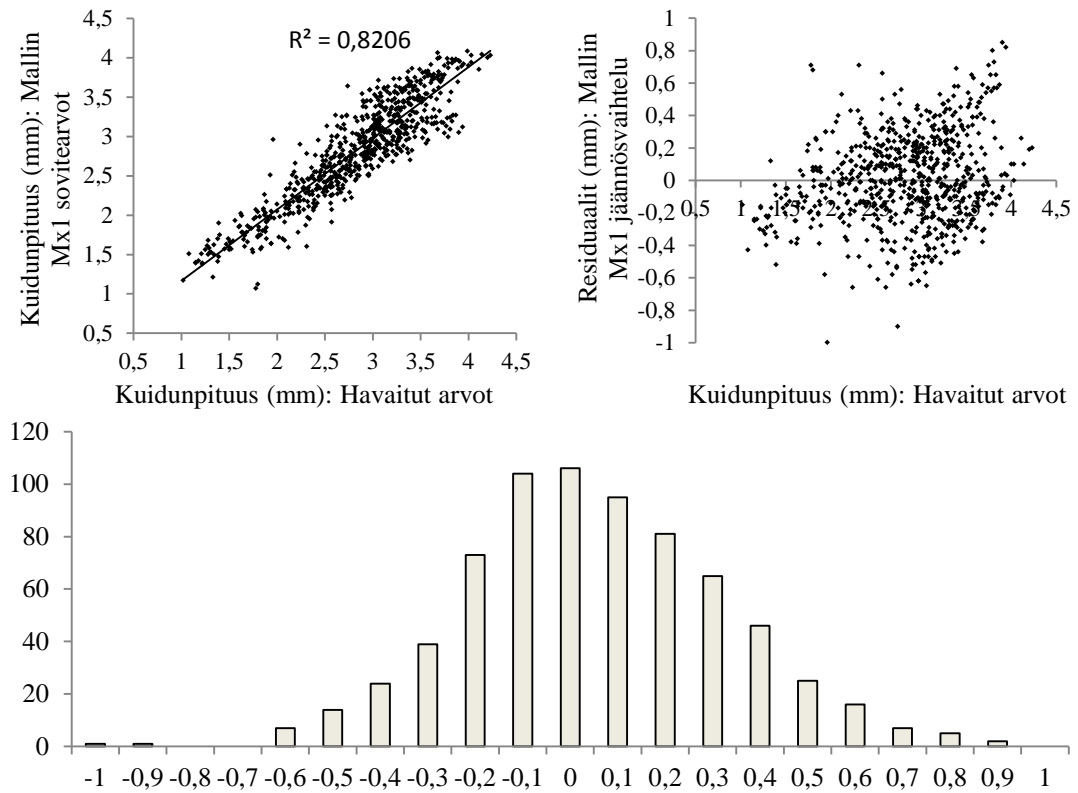


**Kuva 11.** Kuidunpituuden havaittujen näytekohtaisten keskiarvojen vaihtelu luokka-keskuksittain etäisyyden ytimestä ja luston leveyden mukaan.

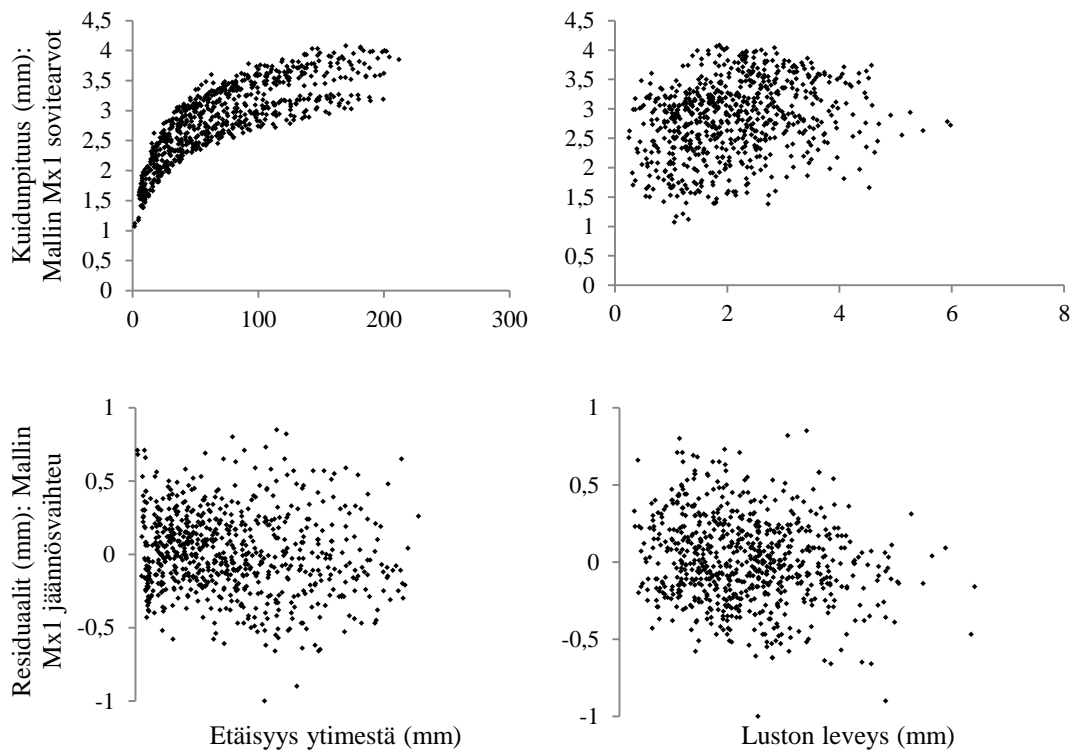
**Taulukko 4.** Sekamallin tulokset; selittävien kiinteiden muuttujien tilastollinen merkitsevyys sekamallissa  $F$ -testisuureen perusteella.

SEKAMALLI	Selitettävä muuttuja: Ln(Kuidunpituus)		
Selittävät kiinteät muuttujat	Df1	Df2	$F_{hav}$
Vakio	1	65,4	4,43**
Etäisyys ytimestä	1	128,2	17,95**
ln(Etäisyys ytimestä)	1	360,5	695,57**
Luston leveys	1	608,8	0,45
ln(Luston leveys)	1	688,5	3,98**
Suhteellinen valtaläpimitta	1	83,6	0,95

\*\*  $p < 0,05$ , \*  $p < 0,1$



**Kuva 12.** Sekamallin sovitearvot ja residuaalit suhteessa havaittuihin kuidunpituuksiin ja residuaalien frekvenssijakauma.



**Kuva 13.** Sekamallin sovitearvot ja residuaalit suhteessa näytteen etäisyyteen ytimestä ja lustojen leveyteen.

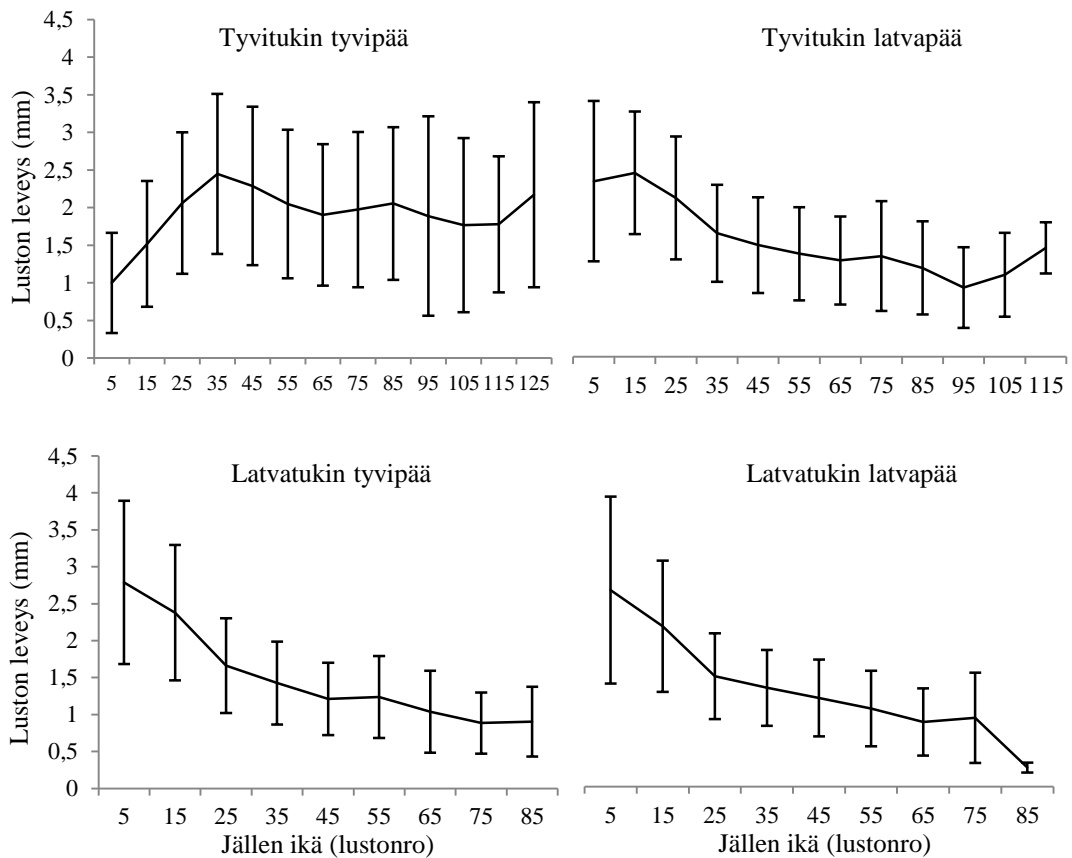
## 3.2 Laatuaineisto

### 3.2.1 Kasvu

Laatuaineistossa lustojen leveys oli keskimäärin 1,8 mm ja keskihajonta n. 1 mm (Taulukko 5). Puun tyvellä lustojen leveys kasvoi aluksi voimakkaasti kohti pintaa, mutta tasoittui myöhemmin. Tyvitukkialueen yläpäässä (n. 2,5 - 3 m) kasvunopeus hidastui aluksi etäisyyden ytimestä kasvaessa, mutta kiihtyi taas lähellä pintaa. Latvatukkialueen korkeuksilla lustot kapenivat tasaisesti kohti pintaa. (Kuva 14)

**Taulukko 5.** Laatuaineiston keskimääräinen kasvunopeus ja jällen ikä.

Laatuaineisto (N = 21968)	
Lustonleveys ka (mm)	1,8 ( $\pm 0,99$ )
Jällen ikä ka (lustonro)	39,1 ( $\pm 26,34$ )



**Kuva 14.** Lustonleveyden keskiarvo ja -hajonta kuituaineistossa ytimeistä pintaan tukkien päissä.

### 3.2.2 Tiheys ja kimmokerroin

Sahatavarakappaleiden kuiva-ilmakuivatiheys oli keskimäärin  $422,5 \text{ kg/m}^3$ . Koko aineistossa keskihajonta oli  $44,6 \text{ kg/m}^3$  (Taulukko 6).

Puun sisällä sahatavarakappaleiden tiheyden keskihajonta oli keskimäärin  $28,1 \text{ kg/m}^3$ . Tiheyden havaittiin kasvavan ydinsoirosta pintalautoihin (Taulukko 6, Kuva 15). Tyveltä latvaan tiheydessä ei ollut merkittävää eroa (Taulukko 6). Kaksisuuntaisen varianssianalyysin perusteella saheen tyyppi oli merkitsevä muuttuja, mutta tukin sijainti ei (Taulukko 7).

Tiheys oli korkein laatuluokassa A3-A4 keskiarvolla  $438,6 \text{ kg/m}^3$  (Kuva 16). Parittaisten vertailujen (LSD) perusteella luokan tiheys poikkesi merkittävästi muista luokista paitsi luokasta C (Taulukko 8).

Kimmokerroin oli aineistossa keskimäärin  $11,5 \text{ GPa}$  keskihajonnalla  $2,2 \text{ GPa}$  (Taulukko 6). Kimmokerroin ja sen hajonta kasvoi hieman tyvelle ja pintaan. (Taulukko 6, Kuva 15). Kaksisuuntaisen varianssianalyysin perusteella tukin sijainti oli 5 % riskitasolla merkitsevä muuttuja, saheen tyyppi 10 % riskitasolla (Taulukko 7).

Kimmokerroin oli korkein luokassa A3-A4 keskiarvolla  $12,8 \text{ GPa}$  (Kuva 16) ja poikkesi parittaisten vertailujen (LSD) perusteella merkittävästi muista luokista paitsi luokasta A1-A2 (Taulukko 8).

Tiheys selitti kimmokertoimen vaihtelusta 60 %, eli loput kimmokertoimen vaihtelusta selittyi äänennopeuteen vaikuttaneilla tekijöillä.

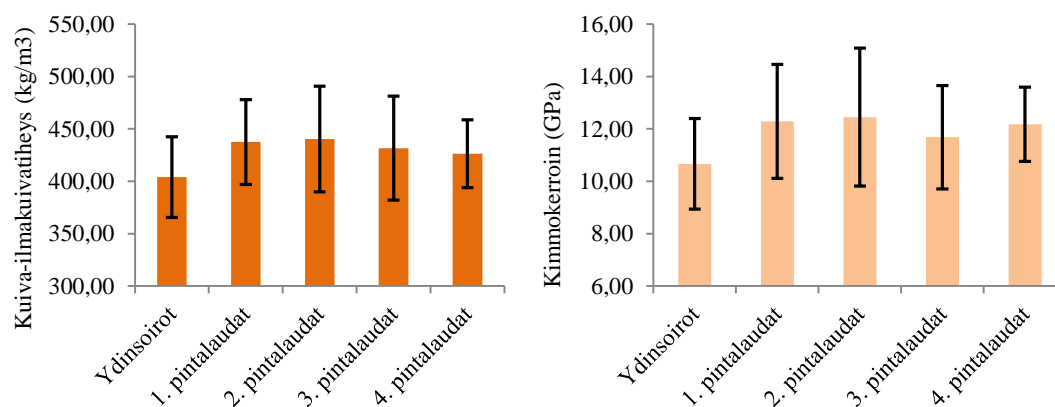
Tiheys näytti silmämääräisesti hieman kasvavan ja kimmokerroin hieman pienenevän lylyn määrän kasvaessa saheessa. Hajonnat olivat kuitenkin suuria eikä kummallakaan muuttujalla ollut tilastollista merkitsevää korrelaatiota lylyn kanssa. (Kuva 17)

Tiheys ja kimmokerroin kasvoivat logaritmisesti kohti pintaa jälleen iän mukaan ja laskivat lineaarisesti lustonleveyden kasvaessa (Kuva 18). Tiheyden ja lustonleveyden välillä korrelaatiokerroin  $r$  oli  $-0,65$ , kimmokertoimen ja lustonleveyden välillä  $r = -0,57$ . Regressioanalyysin perusteella molemmat muuttujat olivat merkitseviä ja niiden yhteisvaihtelu selitti 43 % tiheyden ja 34 % kimmokertoimen vaihtelusta. Residuaalit olivat molemmissa malleissa normaalisti jakautuneet, mutta niissä oli lineaarista rakennetta. (Taulukko 9, Kuvat 19 & 21)

Mallit noudattivat aineistosta havaittua vaihtelua suhteessa jällen ikään ja luston leveyteen hyvin (Kuvat 20 & 22).

**Taulukko 6.** Puuaineen kuiva-ilmakuivatiheys ja dynaaminen kimmokerroin laatu-aineiston saheilla.

Koko aineisto	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> ) ka/näyte		Kimmokerroin (GPa) ka/näyte
	<i>N</i>	<i>Keskiarvo</i>	<i>Keskiarvo</i>
	<b>350</b>	<b>422,5 (±44,6)</b>	<b>11,53 (±2,19)</b>
Lapinjärvi	169	432,2 (±51,1)	11,96 (±2,56)
Vesijako	181	413,4 (±35,3)	11,13 (±1,68)
Tyvi	226	424,2 (±47,6)	11,81 (±2,35)
Latva	124	419,4 (±38,4)	11,04 (±1,77)
Soiro	157	404,2 (±38,4)	10,67 (±1,74)
Lauta	193	437,4 (±43,7)	12,24 (±2,27)

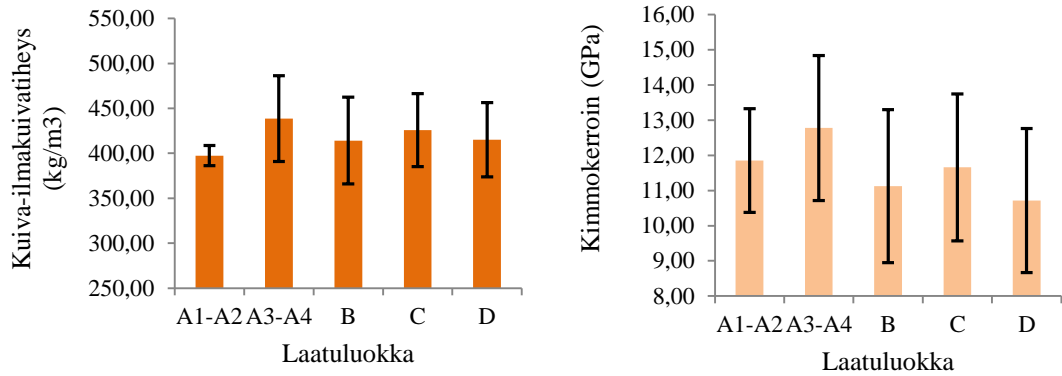


**Kuva 15.** Tiheys ja kimmokerroin ydinsoiroista pintalautoihin.

**Taulukko 7.** Kaksisuuntaisen varianssianalyysin tulokset tukin sijainnin ja saheen tyyppin vaikutuksesta tiheyteen ja kimmokertoimeen *F*-testisuureen perusteella.

Selittävät muuttujat	Df1	Df2	Kuiva-ilmakuivatiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Kimmokerroin(GPa)
			<i>F</i> <sub>hav</sub>	<i>F</i> <sub>hav</sub>
Vakio	3	351	30782**	9353,8**
Tukin sijainti	1	353	0,713	3,005*
Saheen tyyppi	1	353	47,01**	30,95**
Tukin sijainti x Sahetyyppi	3	351	1,391	7,65**

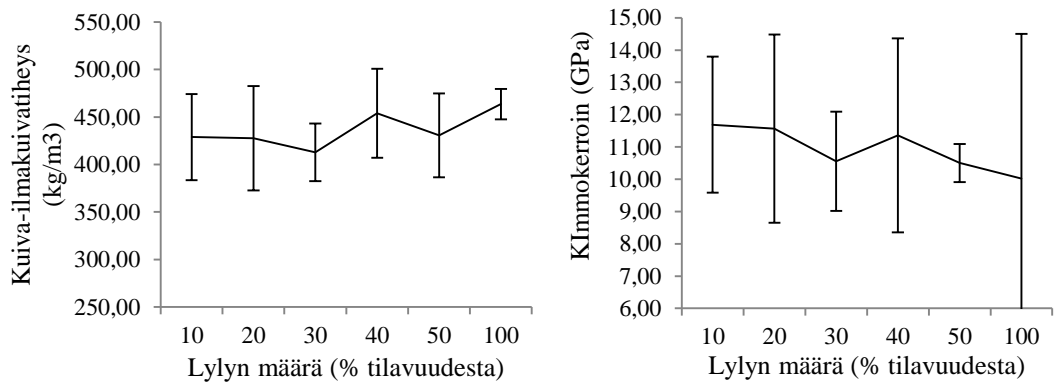
\*\* *p* < 0,05 \* *p* < 0,1



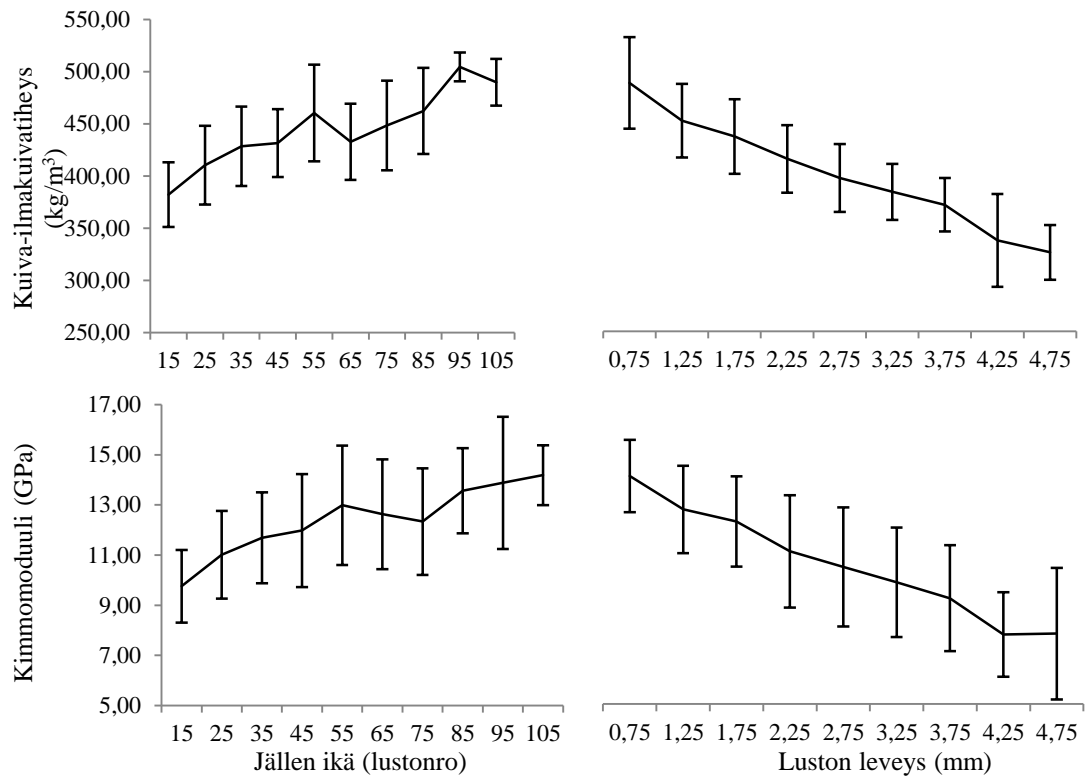
**Kuva 16.** Tiheys ja kimmokerroin eri laatuluokissa (visuaalisen laatulajittelun perusteella).

**Taulukko 8.** Parittaisten vertailujen (LSD) tulokset tiheyden ja kimmokertoimen vaihtelusta laatuluokkien välillä; kontrolliluokkana A3-A4, jossa arvot olivat suurimmat.

	Kuiva-ilmakuivatiheys (kg/m <sup>3</sup> )				Kimmokerroin (GPa)		
	Laatuluokka	Erotus	Keskivirhe	p	Erotus	Keskivirhe	p
<b>A3-A4</b>	A1-A2	41,18	18,73	0,029	0,92	0,89	0,302
	B	24,45	7,28	0,001	1,65	0,35	0,000
	C	12,85	6,83	0,060	1,12	0,33	0,001
	D	23,51	7,59	0,002	2,07	0,36	0,000



**Kuva 17.** Tiheyden ja kimmokertoimen vaihtelu suhteessa lylyn määrään saheessa.

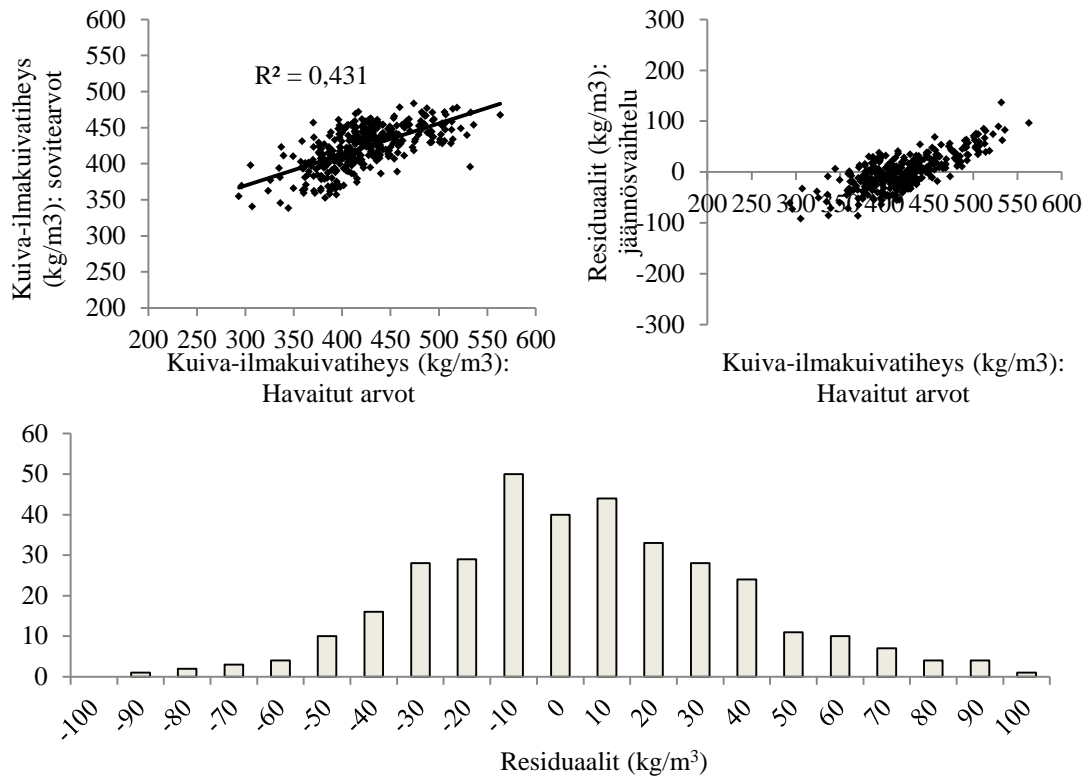


**Kuva 18.** Kuiva-ilmakuivatiheyden ( $\text{kg/m}^3$ ) ja kimmokertoimen (GPa) vaihtelu jällen iän ja luston leveyden mukaan.

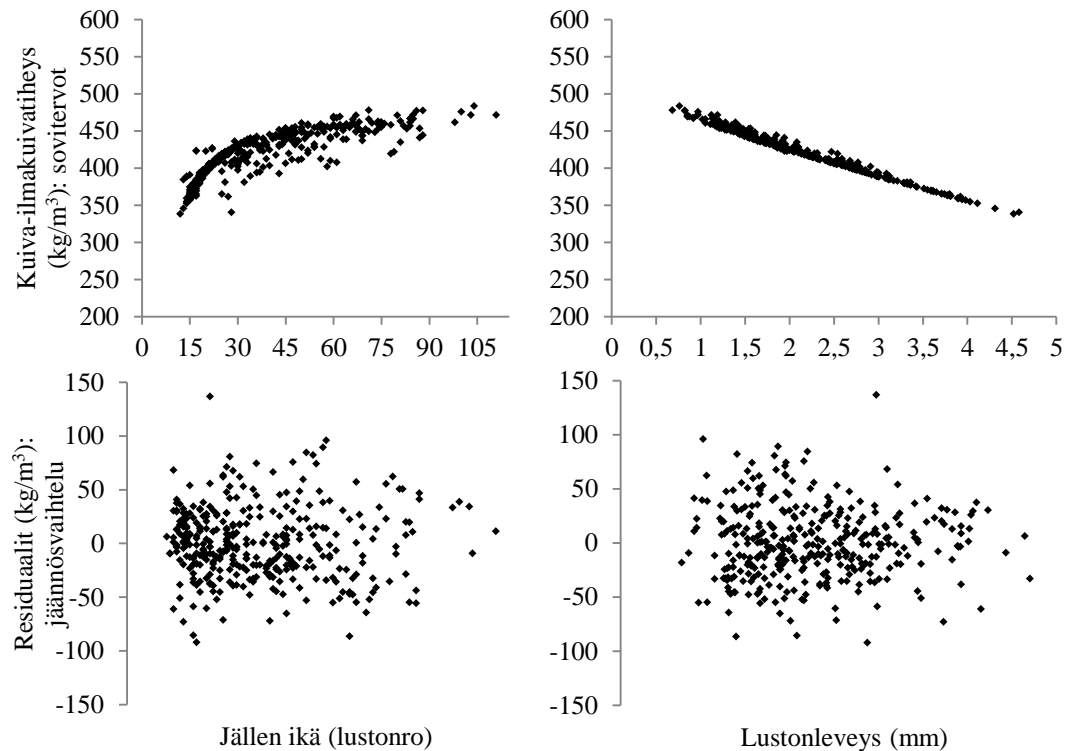
**Taulukko 9.** Regressiomallien  $\text{Dens}_i = \beta_0 + \beta_1(\text{CA}_i) + \beta_2(\text{RW}_i) + \varepsilon_i$  ja  $\text{MOE}_i = \beta_0 + \beta_1(\text{CA}_i) + \beta_2(\text{RW}_i) + \varepsilon_i$  tulokset jällen iän ja luston leveyden vaikutuksesta puuaineen tiheyteen ja kimmokertoimeen: muuttujien tilastollinen merkitsevyys  $t$ -testisuureen perusteella ja koko mallin merkitsevyys  $F$ -testisuureen perusteella.

	Kuiva-ilmakuivatiheys ( $\text{kg/m}^3$ )		Kimmokerroin (GPa)	
	Estim.	t	Estim.	t
Vakio	481,68	42,4**	13,72	22,80**
Jällen ikä	0,25	2,02**	0,02	2,32**
Luston leveys	-32,40	9,78**	-1,31	7,46**
<b>KOKO MALLI</b>				
		Df		$F_{\text{hav}}$
Selitetty vaihtelu (MSR)	149459,2	2	131,40**	
Jäännösvaihtelu (MSE)	1137,5	347		281,5
				2
				88,20**
				3,2
				347

\*\*  $p < 0,05$  \*  $p < 0,1$

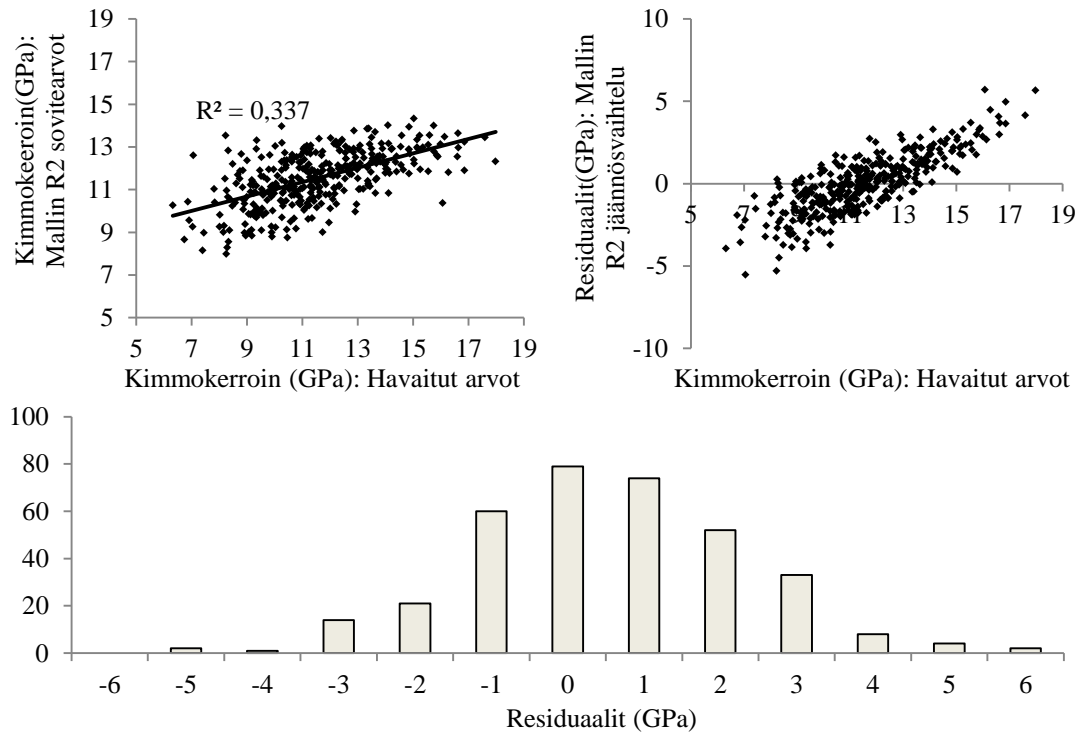


**Kuva 19.** Regressiomallin  $Dens_i = \beta_0 + \beta_1(CA_i) + \beta_2(RW_i) + \varepsilon_i$  sovittearvot ja residuaalit havaittujen arvojen mukaan, sekä residuaalien frekvenssijakauma.

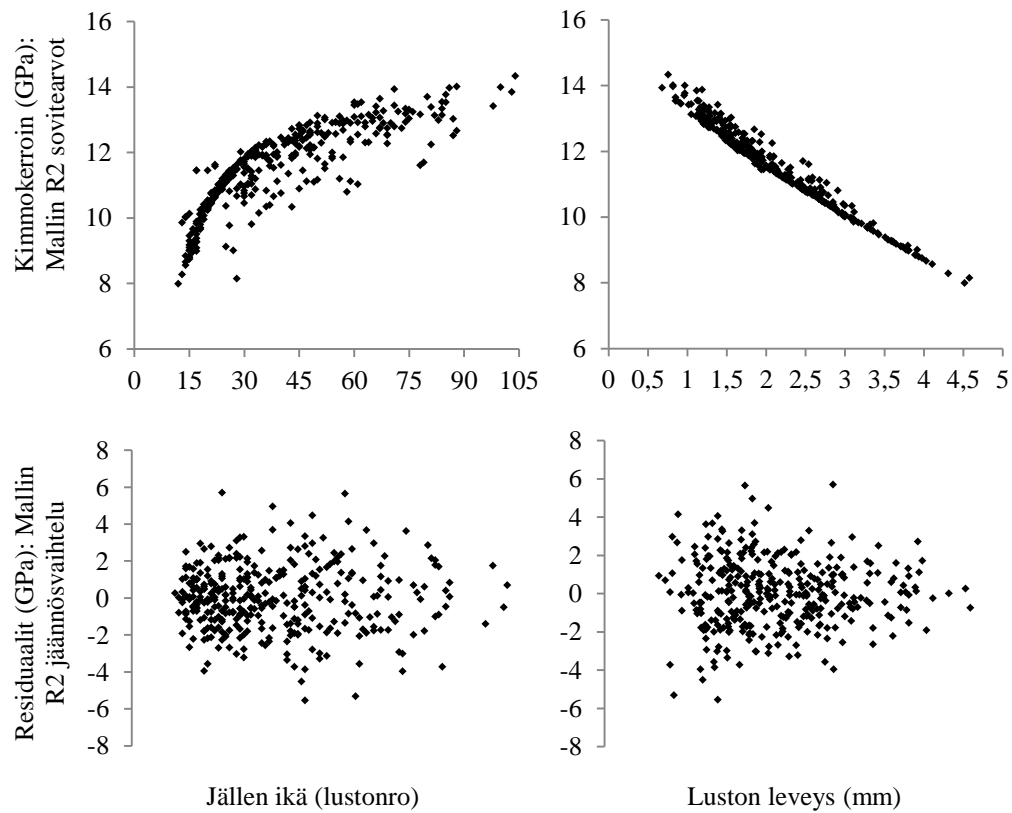


**Kuva 20.** Regressiomallin  $Dens_i = \beta_0 + \beta_1(CA_i) + \beta_2(RW_i) + \varepsilon_i$  sovittearvot ja residuaalit jällen iän ja luston leveyden mukaan.





**Kuva 21.** Regressiomallin  $MOE_i = \beta_0 + \beta_1(CA_i) + \beta_2(RW_i) + \varepsilon_i$  sovitearvot ja residuaalit havaittujen arvojen mukaan, sekä residuaalien frekvenssijakauma.



**Kuva 22.** Regressiomallin  $MOE_i = \beta_0 + \beta_1(CA_i) + \beta_2(RW_i) + \varepsilon_i$  sovitearvot ja residuaalit jällen iän ja luston leveyden mukaan.

### 3.2.3 Sahatavaran visuaalinen laatulajittelu

Taulukon 10 perusteella A-laatuja oli 19,4 % koko aineistosta, B-laatuja 24,8 %. Yleisin laatuluokka koko aineistossa ja kaikissa ositteissa oli C (35,5 %). Laatuluokkien jakaumat pysyivät melko samanlaisina koko aineistossa ytimeistä pintaan (Kuva 23). Hajonta oli keskimäärin  $\pm 1$  lk. niin puun sisällä kuin puiden ja koealojenkin välillä.

Yleisin määräävä tekijä oli oksaisuus eli oksakoko tai oksamäärä (33,3 %). Kierous ja muut muodonmuutokset olivat yleisiä varsinkin ydinsoiroilla. Lylyä oli paljon erityisesti Lapinjärven koealoilla. (Taulukko 10)

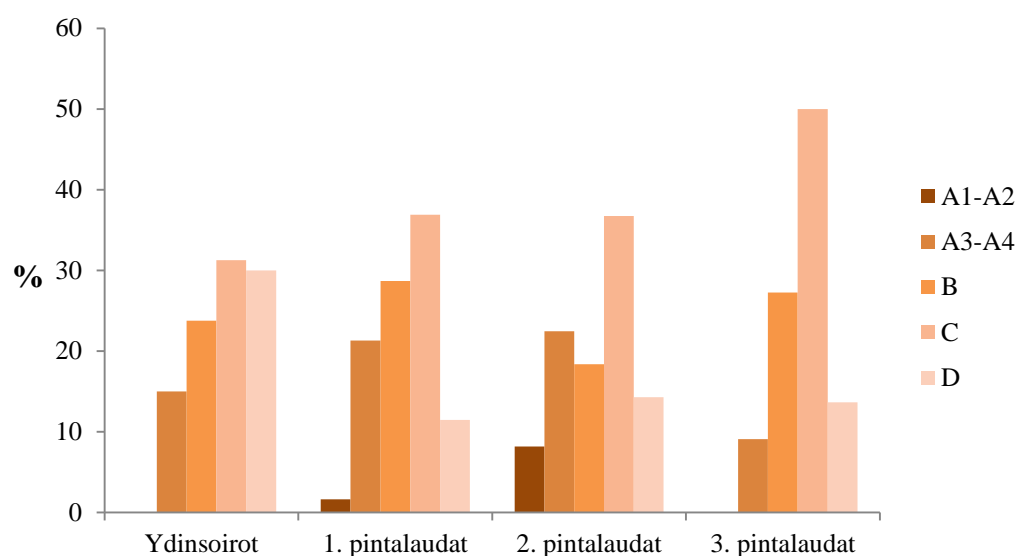
Taulukon 11 perusteella yleisimmässä luokassa C yleisin määräävä laatuksiteeri olivat irto-oksat. Lyly oli yleisintä luokissa A3-A4, laho luokassa D.

**Taulukko 10.** Laatuluokkien jakautuminen prosentteina (%) ja lopulliseen laatuluokkaan vaikuttaneiden tekijöiden jakaumat prosentteina (%).

<b>Laatuluokka</b>	<b>Koko aineisto</b>	Lapinjärvi	Vesijako	Tyvitukki	Latvatukki	Soirot	Laudat
A1-A2	<b>1,7</b>	1,2	2,2	2,6	-	-	3,0
A3-A4	<b>17,7</b>	21,3	14,4	21,0	11,9	15,2	19,8
B	<b>24,8</b>	23,0	26,5	19,7	34,1	23,4	25,9
C	<b>35,5</b>	30,5	40,3	37,1	32,5	31,6	38,6
D	<b>20,3</b>	24,1	16,6	19,7	21,4	29,7	12,7
<b>Määräävä laatuksiteeri</b>							
Oksakoko	<b>14,1</b>	12,6	15,5	12,2	17,5	3,2	22,8
Oksien määrä	<b>19,2</b>	13,2	24,9	12,7	31,0	31,0	9,6
Irto-oksa	<b>11,5</b>	5,7	17,1	15,7	4,0	0,6	20,3
Kierous	<b>10,7</b>	8,6	12,7	7,0	17,5	24,1	0
Muu muodonmuutos	<b>2,3</b>	1,1	3,3	3,5	-	4,4	0,5
Pihkataskut	<b>11,3</b>	4,0	18,2	9,6	14,3	7,6	14,2
Lyly	<b>17,2</b>	31	3,9	21,4	9,5	15,8	18,3
Laho	<b>9,3</b>	16,7	2,2	12,7	3,2	9,5	9,1
Sinistymä	<b>2,0</b>	4,0	-	2,2	1,6	2,5	1,5
Muu	<b>2,5</b>	2,9	2,2	3,1	1,6	1,3	3,6
<b>N</b>	<b>355</b>	<b>174</b>	<b>181</b>	<b>229</b>	<b>126</b>	<b>158</b>	<b>197</b>

**Taulukko 11.** Määrävien laatuominaisuuksien osuudet eri laatuluokissa (%).

Määrävä laatuksiteeri	Laatuluokka					N
	A1-A2	A3-A4	B	C	D	
Oksakoko	100,0	22,2	23,9	5,6	2,8	50
Oksamäärä	-	27,0	27,3	9,5	20,8	68
Irto-oksa	-	-	-	31,7	1,4	41
Kierous	-	3,2	1,1	15,9	20,8	38
Muu muodonmuutos	-	-	1,1	4,0	2,8	8
Pihkataskut	-	6,3	18,2	9,5	11,1	40
Lyly	-	39,7	17,0	11,9	8,3	61
Laho	-	-	5,7	7,9	25,0	33
Sinistymä	-	-	4,5	1,6	1,4	7
Muu	-	1,6	1,1	2,4	5,6	9
<b>N</b>	<b>6</b>	<b>63</b>	<b>88</b>	<b>126</b>	<b>72</b>	<b>355</b>



**Kuva 23.** Laatuluokkien jakaumat (%) ytimeistä pintaan saheiden mukaan.

### 3.2.4 Oksaisuus

Oksaisuus eli saheen suurimman oksan läpimitta (mm) tai oksamäärä huonoimmalla metrillä oli määrävä ominaisuus noin kolmanneksella (33 %) saheista. Soiroilla oksien määrä selitti 31 % laatuluokista. Laudoilla suurimman oksan läpimitta oli laatu-  
luokituksen määrävä tekijä 22,8 % saheista. (Taulukko 10) Luokissa A3-A4 ja B oksaisuus oli yleisin määrävä tekijä. (Taulukko 11). Paksuimpien oksien läpimittojen keskiarvo ylitti aineiston pintalautoilla laatuluokan A4 raja-arvon 20 mm ja kiu-  
vien oksien lukumäärän keskiarvo soiroilla laatuluokan C raja-arvon 5 kpl/m. (Tau-

lukko 12 ja Taulukko 13). Käytettyyn tasaikäisaineistoon verrattuna eri-ikäisaineistossa näytti olevan enemmän kuivia oksia ja tuoreet oksat olivat keskimäärin pienempiä (Kuva 24).

Eri-ikäisaineistossa oksien lukumäärä pieneni ydinsoiroista pintalautoihin ja jonkin verran tyvitukista latvatukkiin. Paksuimman tuoreen oksan läpimitta saheessa pieneni pintaan ja kasvoi latvaan. Paksuimman kuivan oksan läpimitta kasvoi pintaan ja pieneni latvaan. (Taulukko 13, Kuva 24) Kaksisuuntaisen varianssianalyysin perusteella tukin ja saheen sijainnilla oli tilastollisesti merkitsevä vaikutus. (Taulukot 14 & 15)

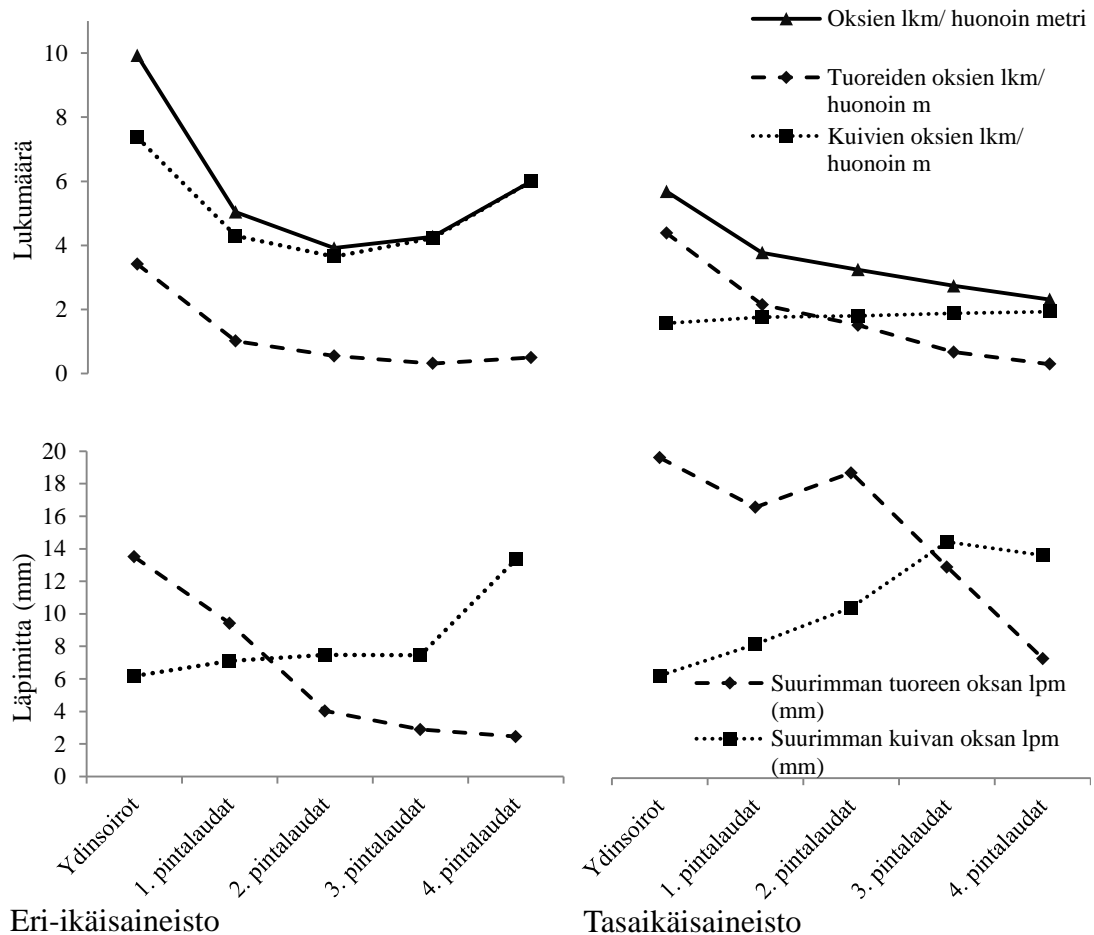
Oksien lukumäärä saheen huonoimmalla metrillä kasvoi luston leveyden kasvaessa ( $r = 0,42$ ) ja pieneni pintaa kohti jäljen vanhetessa ( $r = -0,65$ ). Paksuimman tuoreen oksan läpimitta saheessa kasvoi vain hieman luston leveyden kasvaessa ( $r = 0,20$ ) ja pieneni pintaa kohti jäljen vanhetessa ( $r = -0,41$ ). (Kuva 25) Regressioanalyysin perusteella jäljen ikä ja luston leveys selittivät oksien lukumäärän ja koon kokonaisvaihtelua huonosti. Muuttujat selittivät oksien kokonaislukumäärän vaihtelua huonoimmalla metrillä selityksasteella  $R^2 = 0,42$  (Taulukko 16). Tuoreiden ja kuivien oksien lukumääriä erikseen ja oksien kokoa muuttujat selittivät selityksasteella  $R^2 < 0,40$ .

**Taulukko 12.** Oksien lukumäärät saheen huonoimmalla metrillä eli tarkasteltavalla matkalla ( $2 \times 1 \text{ m} + 1 \times 0,5 \text{ m}$ ) ja saheen suurimpien oksien läpimitat millimetreinä. Havainnoista on suodatettu pois "0" - havainnot, eli saheet, joissa ei ollut lainkaan tarkasteltavia oksia.

	N	Min	Max	Keskiarvo
Paksuin tuore oksa lpm (mm)	215	3,5	52,6	22,8 ( $\pm 7,7$ )
Tuoreiden oksien lkm/ huonoin m	215	1,0	11,0	3,3 ( $\pm 1,9$ )
Paksuin kuiva oksa lpm (mm)	353	2,4	56,7	20,6 ( $\pm 9,5$ )
Kuivien oksien lkm/ huonoin m	353	1,0	21,0	5,6 ( $\pm 3,5$ )

**Taulukko 13.** Havainnot oksien lukumääristä huonoimmalla metrillä ja suurimpien oksien läpimitoista tyvitukkien ja latvatukkien soiroissa ja laudoissa.

	Soiro	Tyvi Lauta	Soiro	Latva Lauta
Oksien lkm/ huonoin metri	11,0 ( $\pm 3,8$ )	4,5 ( $\pm 2,7$ )	8,9 ( $\pm 2,1$ )	5,4 ( $\pm 1,8$ )
Tuoreiden oksien lkm/ huonoin m	2,5 ( $\pm 2,3$ )	0,3 ( $\pm 0,7$ )	4,4 ( $\pm 1,9$ )	2,3 ( $\pm 1,0$ )
Kuivien oksien lkm/ huonoin m	9,4 ( $\pm 4,0$ )	4,4 ( $\pm 2,7$ )	5,3 ( $\pm 2,0$ )	3,6 ( $\pm 1,7$ )
Suurin tuore oksa (mm) / sahe	11,9 ( $\pm 8,1$ )	4,4 ( $\pm 8,7$ )	23,2 ( $\pm 4,6$ )	31,0 ( $\pm 9,5$ )
Suurin kuiva oksa (mm) / sahe	22,1 ( $\pm 7,3$ )	22,8 ( $\pm 10,1$ )	14,9 ( $\pm 7,3$ )	19,9 ( $\pm 10,8$ )



**Kuva 24.** Oksien lukumäärän ja läpimitan vaihtelu ydinsoiroista pintalautoihin eri-ikäisaineistossa ja tasaikäisessä vertailuaineistossa.

**Taulukko 14.** Kaksisuuntaisen varianssianalyysin tulokset tukin sijainnin ja saheen tyyppin vaikutuksesta oksien lukumäärään huonoimmalla metrillä  $F$ -testisuureen perusteella.

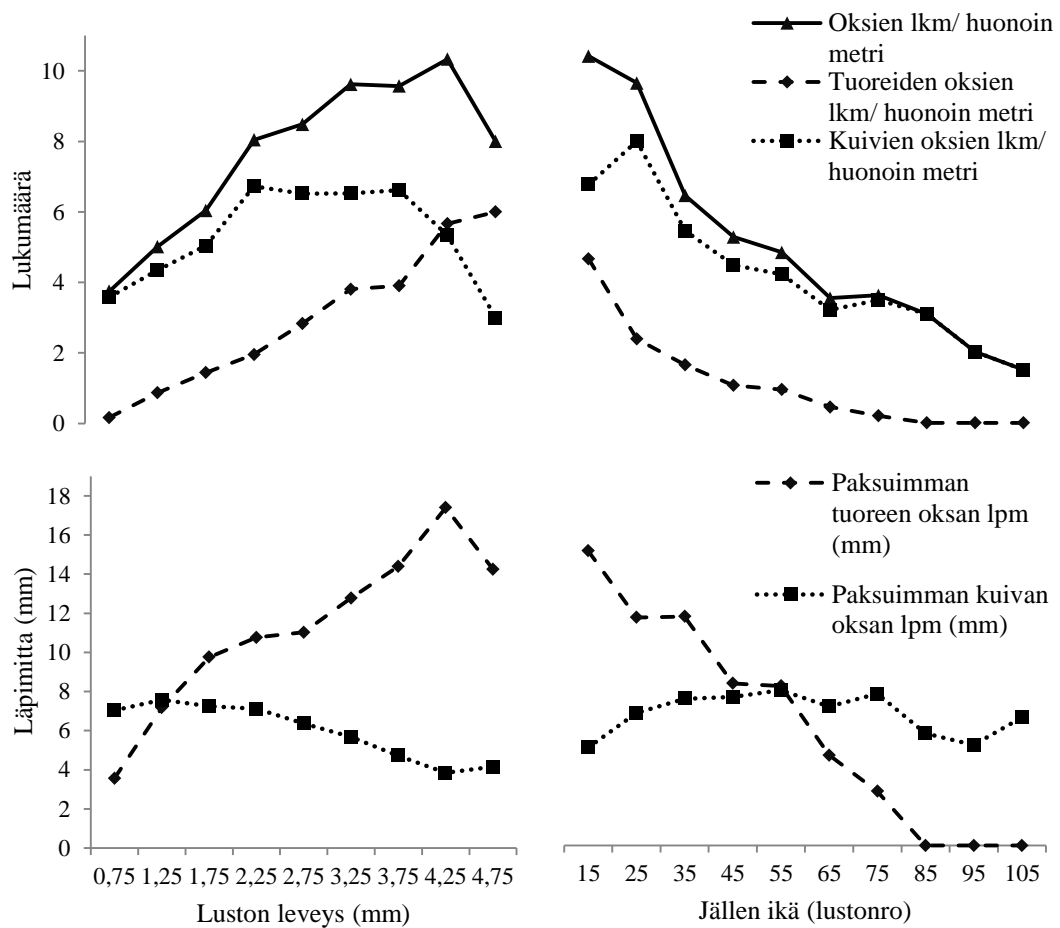
Selittävät muuttujat	Df1	Df2	Oksien lkm/ huonoin metri	Tuoreiden oksien lkm/ huonoin metri	Kuivien oksien lkm/ huonoin metri
			$F_{hav}$	$F_{hav}$	$F_{hav}$
Vakio	3	351	2178,13**	130,05**	1238,85**
Tukin sijainti	1	353	3,25*	128,96**	57,89**
Saheen tyyppi	1	353	242,65**	147,54**	109,49**
Tukin sijainti x Sahetyyppi	1	351	23,42**	0,007	27,61**

\*\*  $p < 0,05$  \*  $p < 0,1$

**Taulukko 15.** Kaksisuuntaisen varianssianalyysin tulokset tukin sijainnin ja saheen tyyppin vaikutuksesta suurimpien oksien läpimittoihin  $F$ -testisuureen perusteella.

Selittävät muuttujat	Df1	Df2	Suurimman tuoreen oksan lpm (mm)	Suurimman kuivan oksan lpm (mm)
			$F_{hav}$	$F_{hav}$
Vakio	3	351	1482,25**	1457,52**
Tukin sijainti	1	353	428,33**	23,6**
Saheen tyyppi	1	353	0,014	7,59**
Tukin sijainti x Sahtyyppi	3	351	70,10**	4,22**

\*\*  $p < 0,05$  \*  $p < 0,1$



**Kuva 25.** Oksien lukumäärän ja läpimitan vaihtelu suhteessa luston leveyteen ja jällen ikään eri-ikäisaineistossa.

**Taulukko 16.** Regressiomallin  $B_i = \beta_0 + \beta_1(CA_i) + \beta_2(RW_i) + \varepsilon_i$  tulokset jällen iän ja luston leveyden vaikutuksesta oksien lukumäärään saheen huonoimmalla metrillä: parametrien estimaatit ja estimaattien tilastollinen merkitsevyys t-testisuureen perusteella ja koko mallin merkitsevyys F-testisuureen perusteella.

Oksien lkm/ huonoin metri			
		Estim.	t
Vakio		13,49	13,7**
Jällen ikä		-0,14	12,5**
Luston leveys		-0,49	1,7 *
<b>KOKO MALLI</b>		<b>Df</b>	<b>F<sub>hav</sub></b>
Selitetty vaihtelu (MSR)	1132,3	2	131,3**
Jäännösvaihtelu (MSE)	8,63	352	

\*\* p < 0,05 \* p < 0,1

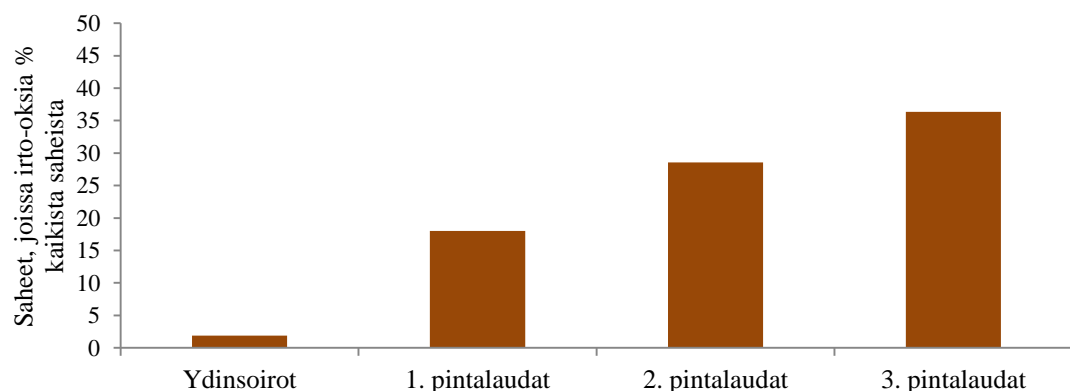
### 3.2.5 Irto-oksat

Irto-oksat olivat määräävänä laatutekijänä 20 % laudoista (Taulukko 10), ja laadun C yleisin määräävä tekijä (31,7 %) (Taulukko 11).

Irto-oksia oli useimmin tyvitukkien laudoissa (Taulukko 17) ja niiden osuus kasvoi tasaisesti kohti pintaa. (Kuva 26)

**Taulukko 17.** Havainnot tyvi- ja latvatukkien soiroista ja laudoista (kpl), joissa oli irto-oksia.

	Tyvi Soiro	Lauta	Latva Soiro	Lauta
Saheet, joissa irto-oksia (kpl)	1	41	0	6



**Kuva 26.** Ytimestä pintaan irto-oksia sisältävien saheiden osuus (%) ko. saheista.

### 3.2.6 Sahatavaran muodonmuutokset

Muodonmuutokset (kieroutuminen, lape- ja syrjävääritys) vaikuttivat lopulliseen laatuluokitukseen n. 13 % aineiston saheista ja johtivat useimmissa tapauksissa C-laatuun. Kierouden keskimääräinen suuruus ylitti luokan B raja-arvon 6 mm (Taulukko 18) soiroilla, joilla selitys luokkaan C oli lähes puolessa tapauksia kierous (Taulukko 11).

Ensimmäisten pintalautojen kieroutuminen oli eri-ikäisaineistossa pienempää kuin tasaikäisessä vertailuaineistossa (Kuva 27). Lisäksi ydinsoirojen kieroutuminen muuttui eri-ikäisaineistossa tyveltä latvaan vähemmän kuin tasaikäisaineistossa, jossa keskimääräinen kieroutuminen tyvellä oli 5,7 ( $\pm 4,4$ ) mm ja latvassa 7,8 ( $\pm 5,5$ ) mm (vrt. Taulukko 18).

Kierous pieneni huomattavasti ydinsoirosta pintalautoihin (Kuva 27, Taulukko 18). Kaksisuuntaisen varianssianalyysin perusteella saheen tyyppi oli merkitsevä muuttuja, mutta tukin sijainti ei. (Taulukko 19)

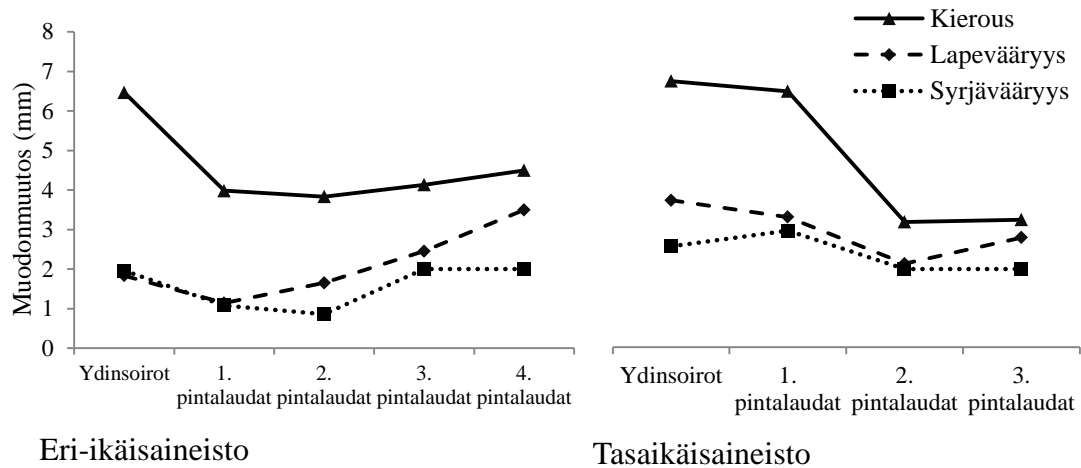
Lape- ja syrjävääritys ja niiden vaihtelu oli molemmissa aineistoissa hyvin pientä (Taulukko 17). Kaksisuuntaisen varianssianalyysin perusteella kummallakin muuttujalla saheen tyyppillä tai tukin sijainnilla oli tilastollista merkitsevyyttä lape- tai syrjäväärityksen kannalta. (Taulukko 18)

Kierouden vaihtelu suhteessa oksien lukumäärään saheen huonoimmalla metrillä ja saheen paksuimman tuoreen tai kuivan oksan läpimittaan oli jokseenkin satunnaista (Kuva 28) Eniten vaikutusta näytti olevan tuoreilla oksilla. Korrelaatiokerroin  $r$  kierouden ja tuoreiden oksien lukumäärän välillä oli 0,37.

Vinosyisyyden kanssa kierous korreloi ydinsoiroissa korrelaatiokertoimella 0,40. Kierous ei korreloinut aineistossa lylyn kanssa.

Kierous pieneni jäljen vanhetessa ( $r = -0,35$ ) ja kasvoi jonkin verran saheen keskimääräisen lustonleveyden kasvaessa ( $r = 0,27$ ), ja myös saheen lustonleveyden keskihajonnan kasvaessa ( $r = 0,26$ ). (Kuva 29)





**Kuva 27.** Muodonmuutokset (mm) ydinsoiroista pintalautoihin eri-ikäisaineistossa ja tasaikäisessä vertailuaineistossa (Saranpää 2002).

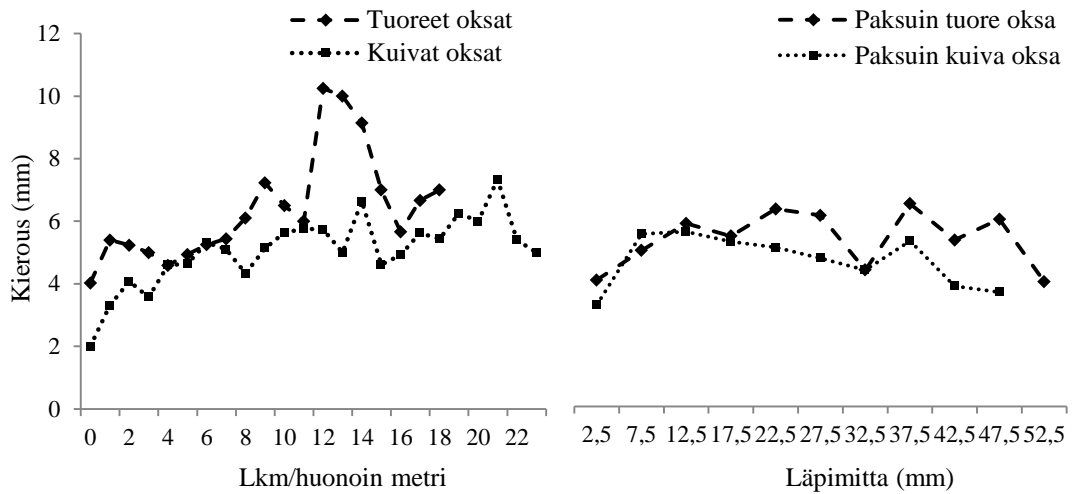
**Taulukko 18.** Havainnot muodonmuutoksista tyvitukkien ja latvatukkien soiroissa ja laudoissa eri-ikäisaineistossa, keskiarvo  $\pm$  keskihajonta.

	Tyvi		Latva	
	Soiro	Lauta	Soiro	Lauta
Kierous (mm)	6,2 ( $\pm$ 3,4)	3,9 ( $\pm$ 1,8)	6,7 ( $\pm$ 3,0)	4,1 ( $\pm$ 1,7)
Lapeväääryys (mm)	2,2 ( $\pm$ 1,8)	1,3 ( $\pm$ 1,9)	1,7 ( $\pm$ 1,1)	1,0 ( $\pm$ 1,0)
Syrjäväääryys (mm)	2,5 ( $\pm$ 2,4)	1,6 ( $\pm$ 1,5)	1,1 ( $\pm$ 0,9)	1,0 ( $\pm$ 0,6)

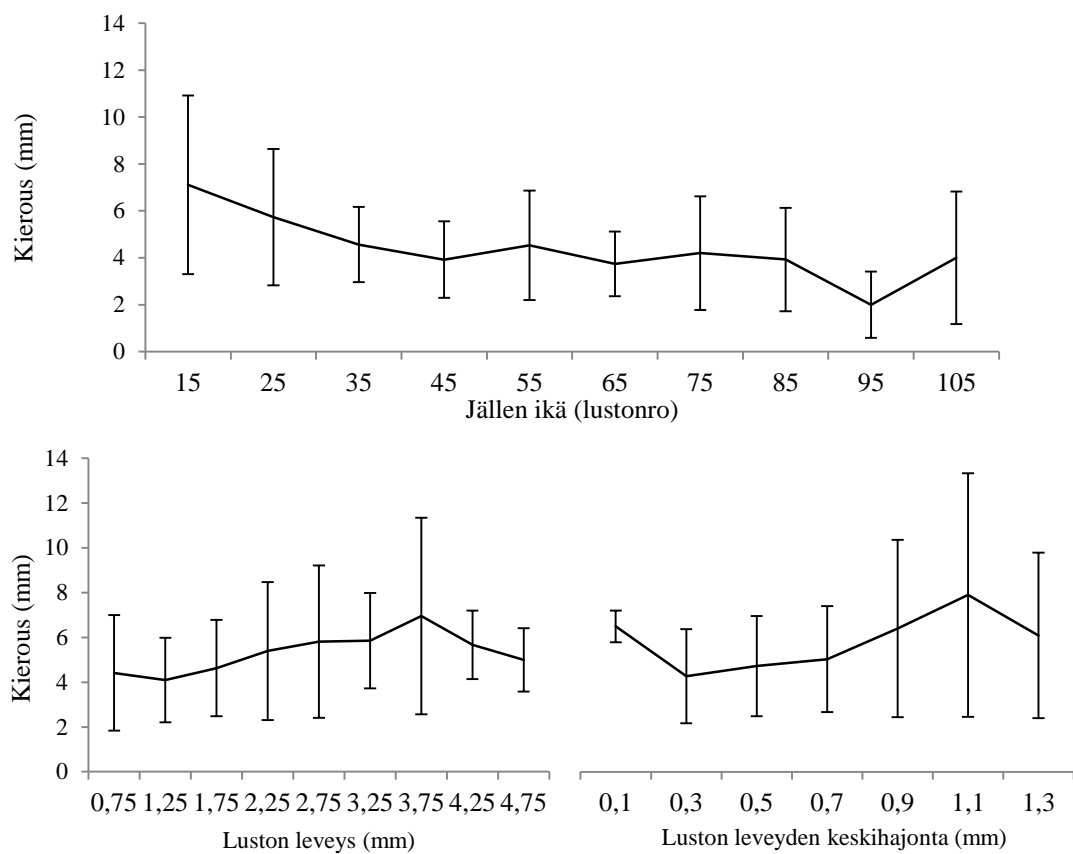
**Taulukko 19.** Kaksisuuntaisen varianssianalyysin tulokset tukin sijainnin ja sahetyyppin vaikutuksesta muodonmuutoksiin: muuttujien tilastollinen merkitsevyys  $F$ -testisuureen perusteella.

Selittävät muuttujat	Df1	Df2	Kierous (mm)		Lapeväääryys (mm)		Syrjäväääryys (mm)	
			$F_{hav}$	$F_{hav}$	$F_{hav}$	$F_{hav}$		
Vakio	3	351	1306,14**		258,47**		300,73**	
Tukin sijainti	1	353	1,275		4,76**		30,19**	
Saheen tyyppi	1	353	71,69**		20,02**		8,97**	
Tukin sijainti x Sahetyyppi	1	351	0,43		1,08		5,20**	

\*\*  $p < 0,05$ , \*  $p < 0,1$



**Kuva 28.** Kierouden vaihtelu saheen huonoimman metrin oksalukumäärän ja paksuimman oksan läpimitan mukaan.



**Kuva 29.** Kierous suhteessa saheen keskimääräiseen lustonleveyteen ja lustonleveyden keskihajontaan.

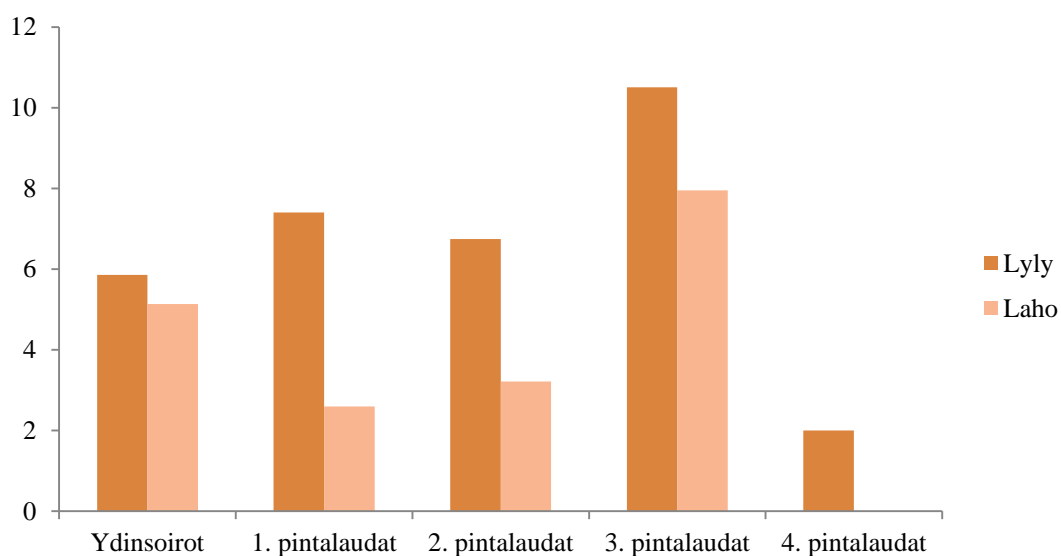
### 3.2.7 Lyly ja laho

Lyly oli määräävä laatukriteeri 17,2 % saheista. Lapinjärvellä lyly oli yleisin laatu-  
luokkaan vaikuttava tekijä ja 31 % Lapinjärven saheista lajiteltiin luokkaan B, C tai  
D lylyn takia (Taulukko 10). Lapinjärvellä esiintyi myös oletettavasti kuusenjuuri-  
käävän (*Heterobasidion parvivorum*) aiheuttamaa maannousemaa eli tyviosan rusko-  
lahoa. Laho oli määräävä laatukriteeri 16,7 % Lapinjärven saheista (Taulukko 10) ja  
luokassa D määräävä tekijä oli laho 25 %:lla saheista (Taulukko 11).

Lylyä ja lahoa oli molempia keskimäärin enemmän tyvellä, latvassa vain vähän  
(Taulukko 20). Ytimeistä pintaan vaihtelu oli satunnaisempaa (Kuva 30).

**Taulukko 20.** Lylyn ja lahon esiintyminen tyvitukkien ja latvatukkien soiroissa ja laudoissa.

	Tyvi		Latva	
	Soiro	Lauta	Soiro	Lauta
Lyly (% tilavuudesta)	7,7 ( $\pm 11,4$ )	8,9 ( $\pm 17,0$ )	4,1 ( $\pm 7,8$ )	3,1 ( $\pm 6,6$ )
Laho (% tilavuudesta)	14,3 ( $\pm 30,3$ )	6,8 ( $\pm 18,2$ )	1,1 ( $\pm 5,0$ )	0,1 ( $\pm 0,4$ )



**Kuva 30.** Lylyn ja lahon määrä (%) keskimäärin saheessa ydinsoiroista pintalautoihin.

## 4 Tulosten tarkastelu

### 4.1 Kuituaineisto

#### 4.1.1 Kasvu

Kuituaineistossa lustot olivat keskimäärin hyvin kapeita, alle 2 mm, mutta lustoprofiilin perusteella kasvurytmi oli varsin tyypillinen kuusen tyvelle. Lustot olivat kapeita lähellä ydintä ja kasvoivat sitten kohti pintaa. Lustonleveyksien keskihajonta oli kuitenkin hyvin suurta, mikä viittaa siihen, että aineistossa oli kasvunopeudeltaan erilaisia puita.

Lustonleveyden keskiarvo kasvoi suhteellisen valtaläpimitan kasvaessa, minkä perusteella paksuuskasvu kiihtyi suuremmilla puilla niiden saavutettua valtapuun asema ylimmässä latvuserroksessa.

#### 4.1.2 Kuidunpituus

Kuitujen keskimääräinen pituus 2,8 mm oli ominainen kuuselle (Lindström 1997, Kaakinen ym. 2009). Kuidunpituuden vaihtelusta lähes yhtä iso osa näytti olevan peräisin puun sisäisistä ominaisuuksista kuin puiden välisistä eroista.

Kuidunpituus noudatti aineistossa kirjallisuudesta (Dutilleul ym. 1997, Lindström 1997, Kaakinen ym. 2009) tuttua kuuselle tyypillistä logaritmista kasvua etäisyyden ytimestä kasvaessa. Kuidunpituuden näytekohtainen keskiarvo puun sisällä myös kasvoi suhteellisen valtaläpimitan kasvaessa, mikä johtui lähinnä edellä mainitusta kuidunpituuden kasvusta kohti pintaa.

Kuidunpituuden ja luston leveyden välillä ei tässä aineistossa näyttänyt olevan sen paremmin negatiivista kuin positiivistakaan tilastollisesti merkittävää riippuvuutta. Syynä olivat aineiston poikkeuksellisen lyhyet kuidut ytimen läheisyydessä. Kuvan 11 (s. 34) perusteella kuitujen pituus aluksi kasvoi lustojen levetessä. Leveämmillä lustoilla kuidunpituus näytti kirjallisuudesta tuttuun tapaan lyhenevän säteensuuntaisen kasvun kiihtyessä. Kuidunpituuksien hajonta oli suurta kaikilla lustonleveyksillä, mistä johtuen riippuvuus ei näyttänyt tilastollisesti merkittävältä, vaikka se visuaalisesti olikin havaittavissa.

Mahdollinen hajonnan ja harhan lähde kuidunpituusmittauksissa saattoi olla näytteiden poikkeuksellinen otanta, jossa mukana olivat myös kesäpuun kuidut. Kesäpuun kuitujen arvellaan yleensä olevan pidempiä ja niiden pituuden vaihtelevan vähemmän kuin kevätpuun kuitujen ja paksuutensa vuoksi niiden oletetaan jäävän kevätpuun kuituja helpommin ehjiksi. On mahdollista, että otokseen oli valikoitunut enemmän kesäpuun kuin kevätpuun kuituja, mistä syystä lustonleveyden kasvun vaikutus kuitujen pituuteen ei näkynyt tuloksissa. Lisäksi tulee vielä huomata, että laskennassa käytettiin näytekohtaisia keskiarvoja niin luston leveydestä kuin kuidunpituudestakin ja muuttujien keskiarvoistaminen oletettavasti aiheutti osaltaan harhaa tuloksiin.

Esitetty sekamalli mallinsi kuidunpituuden vaihtelua verrattain hyvin ( $R^2 = 0,82$ ). Mallia voisi vielä parantaa siten, että luston leveyden sijaan puun kasvua kuvattaisiin mallissa puun kehän eli ympärysmitan lisäyksellä, kuten Herman ym. (1998) ja Fujiwara & Yang (2000) ehdottivat. Lisäksi voitaisiin käyttää eri malleja kuvaamaan kuidunpituuden kasvua nuorpuualueella ja maturoituneessa puuaineessa, jos oletetaan, että kuidunpituuden käyttäytyminen suhteessa paksuuskasvuun on erilaista näiden välillä.

Tuloksien perusteella näytti siis siltä, että eri-ikäiskasvatukselle tyypillinen kasvunopeuden vaihtelu puun sisällä tai eri kasvuasemissa olevilla puilla ei tässä aineistossa merkittävästi vaikuttanut kuidunpituuden kehittymiseen yksittäisen puun sisällä tai niiden välillä.

## **4.2 Laatuaineisto**

### **4.2.1 Kasvu**

Myös laatuaineistossa lustoprofiilit eri korkeuksilla olivat varsin tyypillisiä kuuselle. Kasvunopeus oli puun tyvellä hyvin pientä ja kasvoi ensimmäisinä vuosina voimakkaasti pintaan päin ja hidastui taas myöhemmällä iällä. Ylempänä rungossa kasvunopeus oli suurta ytimen läheisyydessä ja hidastui kohti pintaa. Leveimmät lustot löytyivät läheltä latvaa. Huomattavaa oli kuitenkin lustonleveyksien suuri hajonta tyvellä, mikä viittaa myös tässä osassa aineistoa siihen, että puiden välillä oli eroja kasvu-

nopeudessa. Tyviosan paksuuskasvu riippuu latvusosan koosta ja elinvoimaisuudesta, joten suuri hajonta tyvellä viittaa eroihin puiden kasvuasemissa.

Tutkimuksien mukaan (Kučera 1994, Yang 1994, Alteyrac 2006) suuri kasvunopeus ytimen läheisyydessä tarkoittaa yleensä myös leveää nuorpuualueutta, minkä perusteella voidaan olettaa, että nuorpuualue olisi ylempänä rungossa suhteellisesti isompi kuin tyvellä.

#### **4.2.2 Tiheys ja kimmokerroin**

Keskimäärin tiheyden ja kimmokertoimen havaittiin aineistossa olevan kuuselle tavanomainen. Kuiva-ilmakuivatiheyden keskiarvo oli  $422,5 \text{ kg/m}^3$  ja dynaamisen kimmokertoimen  $11,5 \text{ GPa}$ . Vertailuarvot kirjallisuudessa olivat  $380\text{--}430 \text{ kg/m}^3$  ja  $8\text{--}20 \text{ GPa}$  (Kärkkäinen 2003, Bucur 2006, Edlund ym. 2006, Lachenbruch ym 2010).

Molempien muuttujien hajonta oli yksittäisen puun sisällä selvästi pienempää kuin koko aineistossa. Tämä viittaa siihen, että yksittäisen puun sisällä muutoksia tiheyden ja kimmokertoimen vaihtelussa tapahtuu varsin vähän puun kasvaessa. Merkittävimmät erot löytyvät puiden väliltä kun tarkastellaan puun sisäistä vaihtelua koko aineistossa.

Puun visuaalinen laatuluokka näytti ennustavan puuaineen tiheyttä ja kimmokerrointa melko hyvin. Molemmat ominaisuudet olivat korkeimmat luokan A3-A4 saheilla ja pienivät huonompiin luokkiin. Tämä on luonnollista, koska tiheyteen ja ääniaallon nopeuteen puussa ja niiden indikoimaan kimmokertoimeen vaikuttavien oksien ja lyllyn ja muiden sallittujen vikojen määrä vähenee parempiin laatuihin laatukriteerien mukaisesti.

Tiheys näytti aineistossa kasvavan logaritmisesti kohti pintaa. Kirjallisuudessa on esitetty, että kuusella tiheys on korkeimmillaan heti ytimen läheisyydessä, laskee aluksi ja lähtee sitten kasvamaan kohti pintaa (Saranpää ym. 2002, Kärkkäinen 2003). Tätä ei pystytty havaitsemaan tässä aineistossa, koska tarkasteltava tiheys oli sahatarakappaleen tiheys eli sahatarakappaleeseen kuuluvien lustojen tiheyden keskiarvo. Logaritmisen kasvun suhteen tiheys ei näyttänyt poikkeavan kohti pintaa kirjallisuudesta tutuista malleista.

Tiheys pieneni lineaarisesti luston leveyden kasvaessa, kuten kirjallisuudessa on usein esitetty (Lindström 1997, Dutilleul ym. 1998, Herman ym. 1998, Mäkinen ym. 2007, Kaakinen ym. 2009).

Havainnot tiheyden kehittymisestä suhteessa jällen ikään ja kasvunopeuteen tukivat toisiaan tässä aineistossa, sillä lustojen leveys keskimäärin pieneni kohti pintaa tyveä lukuun ottamatta.

Kimmokerroin käyttäytyi aineistossa hyvin samansuuntaisesti kuin tiheys, mutta sen selittäminen kasvunopeuden ja jällen iän perusteella toi hieman alhaisemman selitystasteen kuin tiheydellä. Tämä ei ollut yllättävää, sillä kimmokertoimen laskemiseksi mitattuun äänennopeuteen sahatavarakappaleessa vaikuttavat tiheyden ja mikrofibrillikulman lisäksi muut satunnaiset sahatavarakappaleen pituudella esiintyvät ominaisuudet, kuten oksat, lyly ja laho, jotka eivät näy sahatavarakappaleen päistä sahattuissa tiheyskappaleissa.

Regressiomallien residuaaleissa oli selkeä positiivinen lineaarinen rakenne suhteessa havaittuihin arvoihin, minkä perusteella mallit yliarvioivat pienempiä arvoja ja aliarvioivat suurempia. Malleissa ei ole mukana toisto-ominaisuutta ytimestä pintaan. Ilman toisto-ominaisuutta harhaa mallissa aiheuttanee mm. nuorpuun ominaisuudet ydinsoiroissa. Nuorpuussa tiheys käyttäytyy hieman eri tavoin suhteessa luston leveyteen ja saattaa tulla mallissa liian pieneksi ytimen läheisyydessä, jossa lustot (tyveä lukuun ottamatta) ovat leveimmillään.

#### ***4.2.3 Sahatavaran visuaalinen laatulajittelu***

Visuaalisen laatulajittelun perusteella aineiston sahatavarassa A-laatujuen osuus oli suurehko, mutta laadun B osuus pienempi kuin laadun C. Laatuluokkien hajonta oli keskimäärin yhtä suurta ( $\pm 1$  lk.) puun sisällä ja puiden ja koealojen välillä, minkä perusteella näyttää siltä, että niin puun sisäinen kuin puiden välinenkin vaihtelu vaikuttaa lopullisen laadun kehittymiseen yhtä paljon ja melko satunnaisesti. Tämä on luonnollista, koska laatulajittelussa tarkastellaan monia eri muuttujia.

Määräävien ominaisuuksien poiminnan perusteella aineiston sahatavara oli oksaista. Oksia oli paljon erityisesti ytimen läheisyydessä. Irto-oksat olivat yleisiä ja laadun C yleisin määräävä kriteeri, mikä saattaa selittää luokkajakauman painottumisen luokkaan C luokan B sijaan. Lisäksi kieroutuminen oli suurta ytimen läheisyydessä.

40 puun otos on vielä varsin pieni, eikä pitkälle meneviä johtopäätöksiä eri-ikäiskasvatetun puuston sahatavaran visuaalisesta laadusta voida tehdä. Tuloksissa harhaa aiheutti ainakin lylyn ja lahon suuret määrät, joiden tuskin voidaan olettaa olevan eri-ikäismetsiköissä aina yhtä isoja kuin tässä aineistossa.

#### **4.2.4 Oksaisuus**

Aineiston yleisimmät määräävät kriteerit, oksien lukumäärä ja läpimitta, näyttivät tässä aineistossa käyttäytyvän suhteessa selittäjiinsä varsin samansuuntaisesti kuin missä tahansa tasaikäisessä metsikössä (Mäkinen ym. 2002, Mäkinen & Hein 2006).

Tulosten perusteella tuoreiden oksien lukumäärä pieneni ytimestä pintaan ja kasvoi tyveltä latvaan. Kuivien oksien lukumäärä pieneni ytimestä pintaan ja tyveltä latvaan. Yhteensä oksien lukumäärä kasvoi ytimen läheisyydessä tyveltä latvaan. Vaihtelu ytimestä pintaan oli suurempaa kuin vaihtelu tyveltä latvaan ja vaihtelu ytimestä pintaan pysyi suunnilleen samana tyvestä latvaan.

Suurimman tuoreen oksan koko kasvoi huomattavasti tyveltä latvaan. Tyvellä suurimman tuoreen oksan koko pieneni ytimestä pintaan, latvassa päinvastoin. Suurimman kuivan oksan koko pieneni tyveltä latvaan ja kasvoi latvassa ytimestä pintaan. Oksien läpimitan vaihtelu ytimestä pintaan oli pienempää kuin vaihtelu tyveltä latvaan ja vaihtelu tyveltä latvaan pysyi suunnilleen samana ytimestä pintaan.

Kasvunopeus korreloi positiivisesti oksien lukumäärän ja oksien koon kanssa. Lustonleveyden keskiarvo oli tässä aineistossa suurin ytimen läheisyydessä latvatukin korkeudella, missä myös oksien määrä huonoimmalla metrillä oli suurimmillaan. Tämä on loogista, jos oletetaan, että puun paksuuskasvun kiihtyessä sen pituuskasvu hidastuu ja metrin matkalle syntyy useampia oksakiehkuroita.

Puun kasvaessa tyvitukkialueen oksat karsiutuvat ja kyljestyvät, joten oksien lukumäärä pienenee ja pintalaudat ovat hyvin vähäoksaisia. Aineistossa kasvunopeus hidastui ytimestä pintaan, joten myös jäljelle jäävien oksien läpimitta pieneni. Yksittäisen oksan koko kasvaa ytimestä pintaa, mutta kasvunopeus vaikuttaa siihen, kuinka isoksi ja kuinka nopeasti oksa kasvaa.

Suhteessa vertailuaineistoon eri-ikäisaineistossa oli enemmän kuivia oksia erityisesti ytimen läheisyydessä ja tuoreet oksat olivat keskimäärin pienempiä. Tämä viittaisi siihen, että käytetyssä eri-ikäisaineistossa oksien karsiutuminen oli tasaikäisaineistoa



suurempaa. Oksien koon perusteella kasvunopeus olisi ollut pienempi kuin käytetyssä tasaikäisaineistossa.

Aineistossa oli huomattavan paljon irto-oksia, mikä viittaisi myös oksien voimakkaaseen karsiutumiseen. Suurin osa irto-oksista oli tyvitukin pintalaudoissa ja karsiutuminen näytti kasvavan kohti pintaa, sillä irto-oksia sisältävien saheiden osuus kasvoi kohti pintaa. Oletettavasti latvuksen sulkeutuminen puiden kasvaessa kiihdyttää oksien karsiutumista. Irto-oxsa pudottaa saheen automaattisesti laatuluokkaan C ja irto-oksat olivatkin aineistossa suurin yksittäinen syy poikkeavaan jakaumaan eli suureen C-laatujuen ja pieneen B-laatujuen määrään.

#### ***4.2.5 Sahatavaran muodonmuutokset***

Lapevääritys ja syrjävääritys olivat hyvin pientä eivätkä poikenneet tasaikäisaineistosta. Jos lape- ja syrjäväärityksen katsotaan vaikuttavan eniten puun sisäiset kasvujännitykset (Johansson & Ormarsson 2009), voidaan olettaa ainakin, että eri-ikäisaineistossa puun sisäiset kasvujännitykset eivät poikkeata tasaikäiskasvatetuista puista.

Myöskään kierouden suhteen tulokset eivät poikenneet merkittävästi tasaikäisaineistosta. Kieroutuminen oli odotetusti voimakkainta ytimen läheisyydessä ja ydinsoirot kieroutuivat keskimäärin 2,5 mm enemmän kuin pintalaudat. Erotus soirosta lautaan pysyi suunnilleen samana tyveltä latvaan. Suurin ero aineistojen kieroutumisessa oli ensimmäisissä pintalaudoissa, joiden kieroutuminen tasaikäisaineistossa oli vielä lähes yhtä suurta kuin ytimen sisältävissä soiroissa, ja laski vasta sitten kohti pintaa. Eri-ikäisaineistossa kieroutuminen laski heti ydinsoirosta pintalautoihin. Yksi selitys ensimmäisten pintalautojen erilaiselle kieroutumiselle, joka aineistoja vertailemalla voidaan havaita, voisi olla oksien voimakkaampi karsiutuminen eri-ikäisaineistossa. Tasaikäisessä aineistossa tuoreet oksat ensimmäisissä pintalaudoissa olivat myös suurempia kuin eri-ikäisaineistossa. Vertailuaineiston kasvusta ei ollut havaintoja, joten vertailua sen suhteen ei voitu suoraan tehdä, mutta oksien koosta päätellen kasvunopeus olisi saattanut olla käytetyssä tasaikäisaineistossa suurempaa kuin eri-ikäisaineistossa.

Korrelaatiokertoimien perusteella kierous kasvoi oksien – niin tuoreiden kuin kiuviinkin – lukumäärän kasvaessa. Kieroutuminen kasvoi myös paksuimman tuoreen

oksan läpimitan kasvaessa. Tuoreet oksat vaikuttivat kierouteen erityisesti latvassa ytimen lähellä.

Lylyn vaikutus näytti varsin pieneltä. Tarkastelussa olisi luultavasti otettava huomioon lylyn sijoittuminen saheen sisällä pelkän määrän sijaan.

Vinosyisyyden vaikutus kierouteen oli suurinta ytimen läheisyydessä vaikka vinosyisyys näytti samalta niin soiroilla kuin laudoillakin. Tästä on vielä vaikea vetää mitään johtopäätöksiä, sillä kieroutuminen ytimessä on suurta myös muista syistä johtuen ja yksittäisen asian vaikutuksen eristäminen on hankalaa.

Luston leveyden kasvaessa kierous kasvoi jonkin verran. Kierous kasvoi hieman myös saheen lustojen leveyden hajonnan kasvaessa. Tässä on huomattava sama kuin vinosyisyydessä, sillä aineistossa luston leveyden keskiarvo ja myös leveyden hajonta olivat suurimmillaan ytimen läheisyydessä, jossa kieroutuminen on aina suurta myös muista syistä johtuen.

Hyvin suuri osa kieroutumisesta jäi selittämättä. Vaikuttaa siltä, että kierouteen vaikuttavat niin monet toisistaan riippumattomat seikat, että yksittäisen selityksen eristäminen on vaikeaa ja kierouden ennustaminen yksittäisten muuttujien avulla on mahdotonta.

#### ***4.2.6 Lyly ja laho***

Lapinjärvellä esiintyi huomattavan paljon lylyä ja lahoa. Syy lylyn ja lahon runsauteen ja sen painottumiseen nimenomaan Lapinjärven koealoille jää tässä tutkimuksessa tuntemattomaksi, eikä näin pienen otoksen perusteella voi vielä tehdä oletuksia lylyn tai lahon yleisyydestä eri-ikäismetsissä yleensä. Juurikäävän riski on aina olemassa kuusikoissa ja lylyä esiintyy kuusella yleisesti kasvuolosuhteiden seurauksena. On arveltu, että eri-ikäisrakenteinen metsä saattaa tarjota juurikäävälle otollisen leviämisympäristön, koska maaperään jää poistettujen puiden kuolleita juuria ja kantoja (Hantula 2009). Voidaan myös olettaa, että eri-ikäismetsän aukkoisuus saattaa vaikuttaa lylyn muodostumiseen, koska lylyn on todettu liittyvän paitsi vinoutumien ja kallistumien suoristamiseen, myös latvuksen suuntautumiseen kohti valoa ja kasvutilaa. Myös puun latvuksen kehittyminen toispuoleiseksi aukon reunalla saattaa vaikuttaa lylyn muodostumiseen rungossa.

Kuidunpituuden todettiin olevan keskimäärin 0,4 mm lyhyempi Lapinjärvellä kuin Vesijaolla ja eräs mahdollinen selitys on lylyn ja lahon määrä Lapinjärven aineistossa.

Toisaalta saheaineistossa tiheyden kasvu ja kimmokertoimen pieneneminen lylyn määrän kasvaessa oli pientä ja hajonta havaintojen välillä suurta. Sekä tiheys että kimmomoduuli olivat Lapinjärvellä korkeammat kuin Vesijaolla, samoin tiheys ja kimmokerroin olivat hieman korkeammat tyvitukin saheissa, vaikka lylyä ja lahoa esiintyi eniten tyvellä. Tämän perusteella näyttäisi siltä, ettei lyly tai laho vaikuttanut näihin mittauksiin saheaineistossa.

Lylyä esiintyi eniten tyvellä lähellä pintaa ja se oli yleisin määräävä tekijä luokassa A3-A4. Tämä tarkoittaa sitä, että laatulajittelussa moni vähäoktainen A1-A2 luokkien pintalauta putosi alempiin A-luokkiin tai sitä alempiin luokkiin lylyn vuoksi. Tämän perusteella lyly vähensi ainakin jonkin verran A-laatuisten määrää ja painotti niiden keskinäistä jakaumaa A3-A4 laatuihin tässä aineistossa.

## 5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Vastaukset päätutkimusongelmasta seuranneisiin tutkimuskysymyksiin olivat tämän aineiston perusteella seuraavat:

- Kasvu oli aineistossa hidasta. Lustonleveys oli keskimäärin alle 2 mm.
  - Yksittäisen puun sisäinen kasvurytmi ei keskimäärin näyttänyt poikkeavan kuuselle tyypillisestä kasvusta, mutta puiden välisen kasvun vaihtelu näytti suurelta erityisesti puiden taimivaiheessa.
- Kuidunpituus ja sen kehittyminen puun sisällä ytimestä pintaan ei näyttänyt merkittävästi poikkeavan tasaikäisistä kuusista.
  - Kuidunpituus kasvoi kapeimmilla lustoilla kasvun kiihtyessä, pieneni leveämmillä lustoilla kasvun kiihtyessä.
- Tiheyden ja kimmokertoimen ja niiden kehittyminen puun sisällä ei näyttänyt merkittävästi poikkeavan tasaikäisistä puista. Hajonta puiden välillä oli suurempaa kuin puun sisällä.
- Visuaalisen laatulajittelun perusteella aineiston sahatavaran laatuluokkien jakauma oli hieman poikkeuksellinen:
  - Hajonta oli keskimäärin  $\pm 1$  lk. niin puun sisällä kuin puiden välilläkin.
  - A-laatujen osuus oli hyvä, mutta laatua B oli vähemmän kuin laatua C.
  - Oksia oli paljon erityisesti ydinsoiroissa.
  - Irto-oksia oli huomattavan paljon erityisesti pintalaudoissa.
  - Kieroutuminen ydinsoiroissa ei juuri poikennut tavanomaisesta ja näytti pintalaudoissa jopa pienemmältä kuin tasaikäismetsässä.
  - Aineistossa oli paljon lylyä ja lahoa.

Tämän tutkimuksen perusteella puun sisäisen kasvurytmin vaihtelu eri-ikäiskasvatuksessa vaikutti kuidunpituuden, tiheyden ja kimmokertoimen vaihteluun vähemmän kuin puiden ja koealojen välisen kasvun vaihtelu. Puiden ja koealojen välinen vaihtelu kaipaa siis jatkossa lisätarkasteluja tutkittaessa eri-ikäiskasvatuksen vaikutusta em. laatuominaisuuksiin. Visuaaliseen laatuun vaikuttavat tunnuksat selittyivät puun sisäisellä kasvulla yhtä hyvin kuin puiden ja koealojen välisillä eroilla. Visuaalisessa laatulajittelussa kierous ja kuivien oksien suuri määrä ytimen läheisyydessä kasvattivat C-laatujuen osuutta. Ydinvapaa sahaus on tasaikäisillä kuusilla todettu kannattamattomaksi, mutta tämän aineiston tulosten perusteella ydinosan poistaminen voisi eri-ikäiskuusilla ehkä pienentää C-laatujuen osuutta ja parantaa saatavan sahatavaran laatujukaumaa.

Teollisuuden näkökulmasta näin pienen aineiston perusteella tehtyjen johtopäätösten paino on kuitenkin vielä vähäinen. Laatujuokka määräytyy monen muuttujan yhteisvaikutuksesta ja suurin osa mitatuista laatuominaisuuksista on monien asioiden yhteistuloksia ja tilastollisessakin mielessä siinä määrin stokastisia, ettei luotettavia malleja tai ennusteita voida tuottaa näin pienellä otoskooilla. Eri-ikäiskasvatettua sahatavaraa tulisi ehkä lajitella koneellisesti teollisella sahall kaupallisessa mittakaavassa, jotta esimerkiksi nähtäisiin, onko tässä aineistossa havaittu visuaalisen laadun painottuminen A ja C laatujuihin yhtä merkittävää otoskoon kasvaessa vai vain satunnainen ilmiö näillä koealoilla. Myös visuaalisen tai mekaanisen lujuuslajittelun tekeminen samassa mittakaavassa antaisi paremman kuvan sahatavaran mekaanisista ominaisuuksista ja sen käytettävyydestä rakennesahatavarana.

Metsänomistajan näkökulmasta metsänkasvatustavasta päättäminen on tasapainoilua erilaisten arvojen välillä, sillä metsä on toisaalta taloudellinen pääoma, toisaalta arvokas elinympäristö sellaisenaan. Metsänkasvatuksen kannattavuuteen liittyy myös tasaikäisen metsän tapauksessa epävarmuutta ja riskejä. Eri-ikäiskasvatetun kuusen puuaineen laatu ei tämän tutkimuksen perusteella näyttänyt poikkeavan tasaikäiskasvatetun kuusen puuaineen laadusta niin merkittävästi, että se vaikuttaisi eri-ikäiskasvatuksen taloudelliseen kannattavuuteen.

Tämän tutkimuksen suurin anti on tässä vaiheessa, että se kuvasi eri-ikäiskasvatetun puun sisäisen laadun kehittymistä ja antoi alustavaa tietoa kiinnostavista ja lisätutkimusta kaipaavista laatuominaisuuksista ja niiden vaihtelun lähteistä eri-ikäisrakenteisissa metsissä.

## 6 Lähteet

Achim, A. Paradis, N. Peter, C. Hernández, R. 2011. Using acoustic sensors to improve the efficiency of the forest value chain in Canada: a case study with laminated veneer lumber. *Sensors* 2011, *11*: 5716-5728.

Alteyrac J. Cloutier, A. Zhang, S. 2006. Characterization of juvenile wood to mature wood transition age in Black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P) at different stand densities and sampling heights. *Wood Science and Technology* 40: 124-138.

Assmann, E. 1970. The principles of forest yield study: 39-55, 446-486. Pergamon Press.

Bowyer, J. Shmulsky, R. Haygreen, J. 2007. Forest products & wood science: an introduction, fifth edition: 3-66, 109-144, 201-254, 281-320. Blackwell Publishing.

Bucur, V. 2006. Acoustics of Wood, 2<sup>nd</sup> edition: 37-141, 171-217. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Courbaud, B. Goreaud, F. Dreyfus, Ph. Bonnet, F. 2001. Evaluating thinning strategies using a tree distance dependent growth model: some examples based on the CAPSIS software “uneven-aged spruce forests” module. *Forest Ecology and Management* 145 (2001): 15-28.

Downes, M. Wimmer, R. Evans, R. 2002. Understanding wood formation: gains to commercial forestry through tree-ring research. *Dendrochronologia* 20/1-2 (2002): 37-51. Urban & Fischer Verlag.

Dutilleul, P. Herman, M. Avella-Shaw, T. Growth rate effects on correlations among ring width, wood density and mean tracheid length in Norway spruce. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 56-68.

Edlund, J. Lindström, H. Nilsson, F. Reale. M. 2006. Modulus of elasticity of Norway spruce saw logs vs. structural lumber grade. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64: 273-279.

- Franceschini, T. Bontemps, J-D. Gelhaye, P. Rittie, D.Herve, J-C. Gegout, J-C. Leban, J-M. 2010. Decreasing trend and fluctuations in the mean ring density of Norway spruce through the twentieth century. *Annual Forest Science* 67 (2010): 816.
- Fujiwara S. Yang. K. 2000. The relationship between cell length and ring width and circumferential growth rate in five Canadian species. *IAWA Journal* Vol. 21 (3): 335-345.
- Hansen, J. Roulund, H. 1998. Spiral grain in a clonal trial with Sitka spruce. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 911-919.
- Hantula, J. 2009. Tutkimuksesta innovaatioksi – metsäpatologinen näkökulma. *Tutkas 6/2009 Metsien kestävä käyttö 2030*: 12-20.
- Herman, M. Dutilleul, P. Avella-Shaw, T. 1998. Growth rate effects on temporal trajectories of ring width, wood density and mean tracheid length in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Wood and Fiber Science* 30(1): 6-17.
- Johansson, M. Ormarsson, S. 2009. Influence of growth stresses and material properties on distortion of sawn timber – numerical investigation. *Annual Forest Science* 66: 604.
- Kaakinen, S. Piispanen, R. Lehto, S. Metsometsä, J. Nilsson, U. Saranpää, P. Linder, S. Vapaavuori, E. 2009. Growth, wood chemistry and fiber length of Norway spruce in a long-term nutrient optimization experiment. *Canadian Journal of Forest Science* 39(2009): 410-419.
- Kasanen, R. Metsäpuiden sienitaudit. Metsäkustannus oy. 2009.
- Knowles, R.L. Hansen, L. Wedding, A. Downes, G. 2004. Evaluation of non-destructive methods for assessing stiffness of Douglas fir trees. *New Zealand Journal of Forestry Science* 34(1): 87-101.
- Kučera, B. 1994. A Hypothesis relating current annual height increment to juvenile wood formation in Norway spruce. *Wood and Fiber Science* 26(1): 152-167.
- Kärkkäinen, M. 2003. Puutieteen perusteet: 15-69; 109-124; 133-155; 208-232; 247-329. Metsälehti Kustannus.

- Lachenbruch, B. Johnson, G. Downes, G. Evans, R. 2010. Relationships of density, microfibril angle, and sound velocity with stiffness and strength in mature wood of Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research* 40: 55-64.
- Lindström, H. 1997. Fiber length, tracheid diameter and latewood percentage in Norway spruce: development from pith outwards. *Wood and Fiber Science* 29(1): 21-34.
- MacDonald, E. Gardiner, B. Mason, W. 2009. The effects of transformation of even-aged stands to continuous cover forestry on conifer log quality and wood properties in the UK. *Forestry*, Vol. 83 No. 1: 1-16.
- Mäkinen, H. Hein, S. 2006. Effect of wide spacing on increment and branch properties of young Norway spruce. *European Journal of Forest Research* 125: 239-248.
- Mäkinen, H. Jaakkola, T. Piispanen, R. Saranpää, P. 2007. Predicting wood and tracheid properties of Norway spruce. *Forest Ecology and Management* 241 (2007): 175-188.
- Mäkinen, H. Sairanen, P. Yli-Kojola, H. 2002. Kuusen oksikkuus ja sen ennustaminen. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 841 – Kuusen laatu ja arvo: 19-26.
- Nyland, R. 1996. *Silviculture – concepts and applications*: 198-261. Boston: McGraw-Hill.
- Osmaston, F. 1968. *Management of forests*: 101-108. George Allen and Unwin Ltd.
- Piispanen, R. Heinonen, J. Valkonen, S. Mäkinen, H. Lundqvist, S. Saranpää, P. 2013. Käsikirjoitus: Wood density of Norway spruce in uneven-aged stands. Tarjottu: *Canadian Journal of Forest Research*.
- Pohjoismainen sahatavara – lajitteluohjeet. 1994. Suomen Sahateollisuusmiesten Yhdistys, Föreningen Svenska Sågverksmän, Treindustriens Tekniska Forening. Gummerus Kirjapaino oy.
- Pukkala, T. Lähde, E. Laiho, O. 2009. Growth and yield models for uneven-sized forest stands in Finland. *Forest and Ecology Management* 258 (2009): 207-216.
- Pukkala, T. Lähde, E. Laiho, O. 2010. Optimizing the structure and management of uneven-sized stands in Finland. *Forestry*, Vol. 83 No. 2: 129-142.



- Saksa, T. Valkonen, S. 2011. Dynamics of seedling establishment and survival in uneven-aged boreal forests. *Forest Ecology and Management* 261 (2011): 1409-1414.
- Saranpää, P. 2002. Kuusisahatavaran muodonmuutokset kuivauksessa. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 841 – Kuusen laatu ja arvo: 27-38.
- Saranpää, P. Repola, J. Ojansuu, R. 2002. Kuusen puuaineen ominaisuudet ja niiden vaihtelu. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 841 – Kuusen laatu ja arvo: 7-18.
- Seeling, U. 2001. Transformation of plantation forests – expected wood properties of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) within the period of stand stabilization. *Forest Ecology and Management* 151 (2001): 195-210.
- Shmulsky, R. Seale, R. Snow, R. 2006. Analysis of acoustic velocity as a predictor of stiffness and strength in 5-inch-diameter pine dowels. *Forest Products Journal* 56(9): 53-55.
- Sirviö, J. Kärenlampi, P. 2001. The effects of maturity and growth rate on the properties of spruce wood tracheids. *Wood Science and Technology* 35: 541-554.
- Spångberg, K. Nylinder, M. 1997. Development of a method for sorting *Picea abies* pulp wood with respect to basic density. *Scandinavian Journal of Forest Research* 12(1): 65-69.
- Valkonen, S. Sirén, M. Piri, T. 2010. Poiminta- ja pienaukkohakkuut – vaihtoehtoja avohakkuulle. Metla. Metsäkustannus oy.
- Verkasalo, E. Grekin, M. Nevalainen, S. Lindström, H. Wall, T. Fröblom, J. Stöd, R. Lukkarinen, A. Kilpeläinen, H. 2012. Havupuun ominaisuudet, käyttömahdollisuudet ja laatukilpailukyky puutuotealalla. *Metlan työraportteja* 251: Puunkäytön mahdollisuudet ja puutuotteiden menekki: 22-76.
- Wilhelmsson, L. Arlinger, J. Spångberg, K. Lundqvist, S-O. Grahn, T. Hedenberg, Ö. Olsson, L. 2002. Models for predicting wood properties in stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden. *Scandinavien Journal of Forest Research* 17:4: 330-350.

Yamamoto, H. 1996. Generation mechanism of growth stresses in wood cells: Roles of lignin deposition and cellulose microfibril during cell wall maturation. *Wood Science and Technology* 32: 171-182.

Yang, K-C. 1994. Impact of spacing on width and basal area of juvenile and mature wood in *Picea maraina* and *Picea glauca*. *Wood and Fiber Science* 26(4): 479-488.

Zubizarreta-Gerendiain, A. Gort-Oromi, J. Mehtätalo, L. Peltola, H. Venäläinen, A. 2011. Effects of cambial age, clone and climatic factors on ring width and ring density in Norway spruce (*Picea abies*) in southeastern Finland. *Forest Ecology and Management* 263 (2012): 9-16.

Öhman, M. Nyström, J. 2002. Measurement of green plank shape for prediction and elimination of compression wood. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17: 377-384.