



Luonnonvara- ja
biotalouden
tutkimus 25/2020

Mänty- ja kuusikuitupuun ominaisuudet Etelä-Suomessa

Laadun vaihtelu ja hallinta

Pentti Hakkila, Jaakko Repola, Jari Lindblad, Hannu Kalaja ja Erkki
Verkasalo

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 25/2020

Mänty- ja kuusikuitupuun ominaisuudet Etelä-Suomessa

Laadun vaihtelu ja hallinta

Pentti Hakkila, Jaakko Repola, Jari Lindblad, Hannu Kalaja ja Erkki Verkasalo

Viittausohje:

Hakkila, P., Repola, J., Lindblad, J., Kalaja, H. & Verkasalo, E. 2020. Mänty- ja kuusikuitupuun ominaisuudet Etelä-Suomessa – laadun vaihtelu ja hallinta. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 25/2020. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 94 s.



ISBN 978-952-326-948-4 (Painettu)

ISBN 978-952-326-949-1 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-949-1>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Hakkila Pentti, Repola Jaakko, Lindblad Jari, Kalaja Hannu ja Verkasalo Erkki

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke). Helsinki 2020

Julkaisuvuosi: 2020

Kannen kuva: Erkki Oksanen

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta Oy. <http://luke.juvenesprint.fi>

Tiivistelmä

Pentti Hakki, Jaakko Repola, Jari Lindblad, Hannu Kalaja ja Erkki Verkasalo

Luonnonvarakeskus (Luke), Ounasjoentie 6, 96200 Rovaniemi, jaakko.repola@luke.fi

Luonnonvarakeskus (Luke), Yliopistokatu 6 B, 80100 Joensuu, jari.lindblad@lukefi

Luonnonvarakeskus (Luke), Yliopistokatu 6 B, 80100 Joensuu, erkki.verkasalo@lukefi

Puumassateollisuus on suurin puuraaka-aineen käyttäjä ja jalostaja Suomessa. Raaka-aineen kokonaiskäyttö on kasvanut systemaattisesti selluteollisuuden kasvun myötä vuodesta 2009, vaikka mekaanisten massojen valmistus on vähentynyt ja paino- ja kirjoituspapereita valmistava teollisuus on supistunut. Selluteollisuuden raaka-aineen käytön odotetaan edelleen kasvavan tehtaiden uus-, laajennus- ja korvausinvestointien todennäköisesti edetessä 2020-luvulla.

Puumassateollisuudessa käytettävän kuitupuun ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa ja niiden vaihtelua voidaan hallita puutavaralogistiikassa ja puunjalostuksessa vain rajallisesti, koska laatu muodostuu paljolti puun kasvu- ja tuotantovaiheessa. Lähtökohta kuitupuun ominaisuuksiin perustuvalla puutavaran ohjaukselle on laatua kuvaavien ominaisuuksien tuntemus.

Kuitupuun kyseessä ollessa mahdollisuudet puutavaran laadun mittaamiseen tai laatulajitteluun puunjalostusprosessin ohjauksessa ovat rajalliset. Laadun arvioimiseksi voidaan mitata puutavaran teknisiä ominaisuuksia, tai käyttää laadun selittäjinä puutavaraerään sidottuja taustatekijöitä, kuten leimikon metsän kasvupaikkatyyppi, kehitysluokka tai hakkuutapa. Näiden laatuindikaattoreiden perusteella on edellytyksiä arvioida puutavaran soveltuvuutta erilaisiin käyttökohteisiin, raaka-aineen, kemikaalien ja energian kulutusta ja raaka-aineen käyttäytymistä tuotannossa.

Tässä tutkimusraportissa tarkastellaan laajan empiirisen tutkimuksen perusteella kuitupuun makrotason laatua kuvaavia suureita, niiden vaihtelua rungon sisällä ja runkojen välillä sekä metsiköiden sisällä ja metsiköiden välillä. Lisäksi esitetään suureiden keskinäisiä yhteyksiä sekä taustatekijöiden selitysvoimaa suureiden arvojen vaihtelussa. Tutkimuksen havainnollistamiseksi kuvataan aluksi puutavaran laadun keskeistä käsitteistöä ja merkitystä sekä puuaineen lustonmuodostusta ja kemiallista rakennetta ja niiden hyödyntämistä kuitupuun laadun hallinnan peruselementteinä. Laadun selittäjien tarkastelussa keskitytään tekijöihin, jotka ainakin teoriassa ovat otettavissa huomioon kuitupuun laatuun perustuvassa ohjauksessa osana hankinta- ja toimitusketjua. Tällaisia ovat muun muassa pölkyn läpimitta, pölkyn sijainti rungossa sekä runkojen ja metsiköiden välinen vaihtelu.

Tutkimuksessa tarkastellut mänty- ja kuusikuitupuun ominaisuuksia kuvaavat suureet ovat muun muassa vuosiluston leveys, nuorpuun ja oksapuun määrä, sydänpuuosuus, kuoren paksuus ja tilavuus- ja kuivamassaosuus, kaatotuoreen puun kosteus sekä puuaineen ja kuoren kuiva-tuoretiheys. Tarkastelu perustuu 600 mäntykoepuuta ja 585 kuusikoepuuta kattavaan tutkimusaineistoon.

Lähes kaikkien edellä mainittujen suureiden arvot muuttuvat rungon säteen, pituuden, tai näiden molempien, suunnassa. Tämän seurauksena pölkkyjen sijainti rungossa tai pölkyn läpimitta ovat teoriassa laatusuureiden tehokkaita selittäjiä, ja siten mahdollisia kuitupuun laatuohjauksen perusteita käytännön puutavaralogistiikassa. Asian tekee monimutkaisemmaksi se, että myös jällen ikä ja luston leveys ovat yhteydessä laatusuureisiin, mikä heikentää esimerkiksi läpimitan hyödyntämismahdollisuutta laadun selittäjänä. Lisäksi metsikön kehitysluokka ja hakkuutapa vaikuttavat oleellisesti siihen, mihin rungonosiin kuitupuun katkenta kohdistuu.

Mitä pienempiin käsittely-yksiköihin laadun ohjaus kohdistuu, sitä tehokkaammin voidaan vaikuttaa kuitupuun laatuun. Kääntöpuolena on käsiteltävien erien pienentyminen, kustannusten nousu ja haasteet sovittaa laadun ohjauksessa tarvittavia menettelyitä puunkorjuuseen tai puutavaralogistiikkaan. Käytännölliseltä kannalta kysymykseen tulevia kuitupuun laadun ohjauksen keinoja voisivat olla 1) leimikoittainen ohjaus, jossa otetaan huomioon paitsi hakkuutapa, myös puuston ikä, kasvunopeus ja käsittelyhistoria, 2) pölkittäinen lajittelu, joka toteutettaisiin korjuun yhteydessä ottamalla huomioon esimerkiksi pölkyn läpimitta tai sijainti rungossa ja 3) kuormittainen lajittelu tehdasvastaanotossa, jonka tuoma lisäarvo ja toisaalta toteutusedellytykset nykyisin vallalla olevilla tehdasmittausmenetelmillä ovat kuitenkin rajalliset.

Asiasanat: mänty, kuusi, kuitupuu, puuaineen ominaisuudet, kuitupuun laatu, kuiva-tuoretiheys, tuoretiheys, kosteus, kosteussuhde, nuorpuu, sydänpuu, kuori

Sisällys

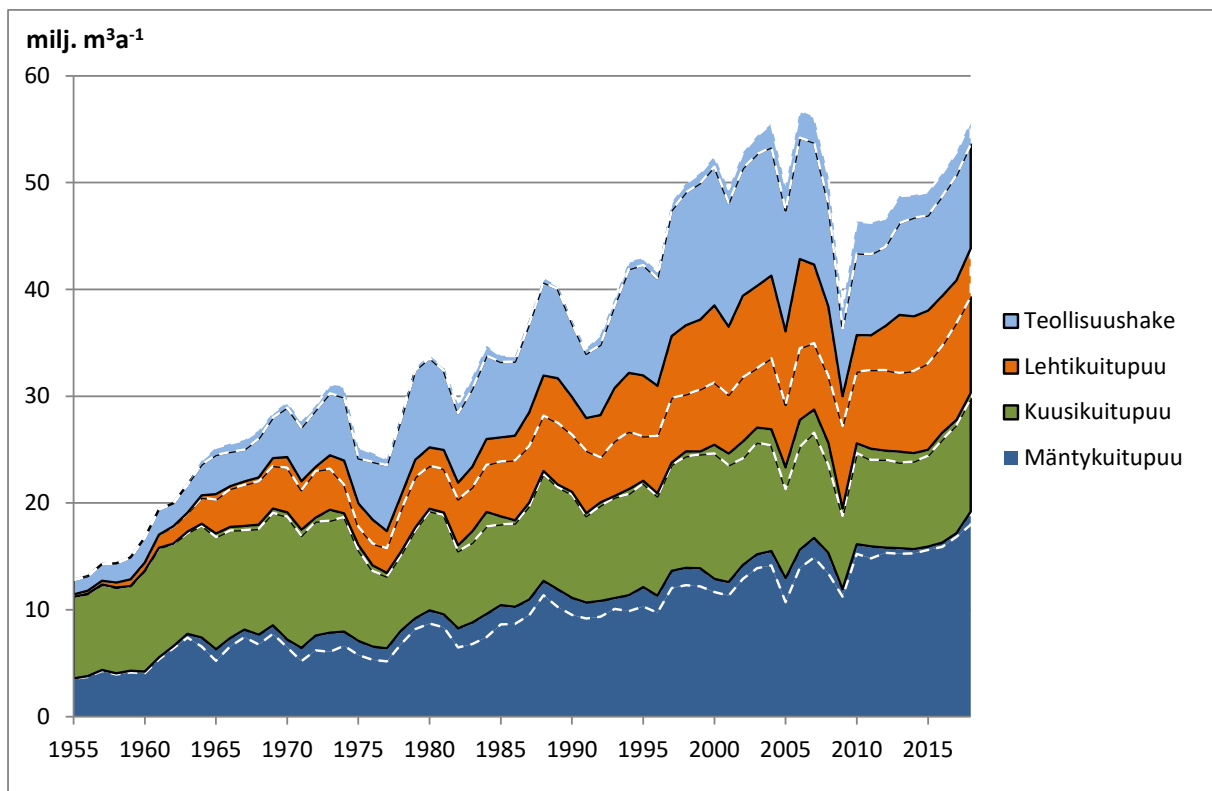
1. Kuitupuun käyttö Suomessa	7
2. Kuitupuun laatu.....	12
2.1. Puutavaran laadun käsite ja merkitys.....	12
2.2. Puuaineen muodostuminen ja kemia	14
2.2.1. Solukoiden synty ja puuaineen kemiallinen rakenne.....	14
2.2.2. Luston muodostuminen	17
3. Tutkimuksen tavoitteet	20
4. Tutkimuksen aineistot	21
4.1. Pystypuuaineisto.....	21
4.2. Hukkarunkopuun inventointi korjuutyömaalla.....	24
5. Tulokset	25
5.1. Kuitupuun järeys	25
5.1.1. Läpimittajakauma.....	25
5.1.2. Hukkarunkopuu käytännön korjuutyömailla.....	26
5.2. Kuori.....	28
5.2.1. Kuoren rakenne ja merkitys	28
5.2.2. Kuoren paksuus.....	30
5.2.3. Kuoren kuiva-tuoretiheys.....	33
5.2.4. Kuoren tilavuus- ja kuivamassaosuus.....	35
5.3. Luston leveys.....	42
5.4. Nuorpuu	44
5.5. Sydänpuu	48
5.5.1. Sydänpuun rakenne ja merkitys.....	48
5.5.2. Sydänpuun vaihtelu rungon sisällä.....	49
5.5.3. Sydänpuun vaihtelu leimikoiden välillä.....	52
5.6. Oksapuun	54
5.6.1. Oksapuun rakenne ja merkitys.....	54
5.6.2. Oksapuun osuus ja ominaisuudet	56
5.7. Puuaineen kuiva-tuoretiheys.....	59
5.7.1. Kuiva-tuoretiheyden merkitys.....	59
5.7.2. Kuiva-tuoretiheyden vaihtelu rungon sisällä	60
5.7.3. Kuiva-tuoretiheyden vaihtelu leimikoiden välillä.....	64
5.7.4. Kuorellisen puun puuainesisältö	67
5.8. Kaatotuoreen puun kosteus.....	70
5.8.1. Kosteuden suureet ja merkitys	70
5.8.2. Kosteussuhde	71

5.9. Tuoretiheys	75
5.10. Koostetaulukot kuitupuun ominaisuuksista	80
5.10.1. Kuitupuun ominaisuudet pölkyttäin.....	80
5.10.2. Kuitupuun ominaisuudet leimikoittain	82
6. Johtopäätökset.....	86
6.1. Laadunohjauksen tavoitteenasettelu	86
6.2. Laadunohjauksen keinot.....	87
6.3. Laatutiedon käyttömahdollisuudet laadunohjauksessa	88
6.3.1. Pölkyttäinen laadunohjaus.....	88
6.3.2. Leimikkolähtöinen laadunohjaus	89
6.4. Tutkimus- ja kehittämistarpeita.....	89

1. Kuitupuun käyttö Suomessa

Puumassateollisuus on suurin puuraaka-aineen jalostaja Suomessa. Vuonna 2018 metsäteollisuus käytti raakapuuta yhteensä 74 milj. m³ (Luonnonvarakeskus, Tilastopalvelut). Tästä puumassateollisuudessa käytettiin 43 milj. m³ (58 %) jakautuen selluteollisuuden 35 milj. m³ ja mekaanisen massateollisuuden 8 milj. m³ käyttöön. Kun otetaan huomioon sahateollisuuden sivutuotteet hake ja puru, oli puumassateollisuuden puuraaka-aineen käyttö yhteensä vajaa 52 milj. m³.

Puumassateollisuuden puunkäyttö on moninkertaistunut 1950-luvun puolivälistä lähtien (kuva 1). Samalla raaka-ainepohja on laajentunut. Puumassateollisuutemme syntyvaiheessa vajaat 100 vuotta sitten raaka-ainepohja rajoittui puulajina kuuseen ja aluksi pelkästään sahakkeeseen (Verkasalo 2015). Vähitellen kuitupuu ohitti sahakkeen ja puulajien käyttö laajeni aluksi mäntyyn ja myöhemmin koivuun. Nyt tärkein raaka-ainelähde on mäntykuitupuu ja kolmea muuta kuituraaka-ainelajia, kuusikuitupuu, koivukuitupuu ja sahateollisuuden teollisuushaketta, käytetään likimäärin samansuuruiset osuudet. Lisäksi käytetään pieniä määriä muuta lehtikuitupuu, sahanpurua ja vaneri-, viilupuun- ja viiluteollisuuden tuottamaa teollisuushaketta.



Kuva 1. Puumassateollisuuden raaka-aineen käyttö vuosina 1955–2018 (raakapuu kuorellisena, teollisuushake kuorettomana). Teollisuushake sisältää tässä sahateollisuuden hakkeen ja myös sahanpurun ja vaneri-, viilupuun- ja viiluteollisuuden sivutuotteista tehdyn hakkeen. Kunkin puutavaralajin kohdalla katkoviivan yläpuolinen osuus edustaa tuontipuuta. Lähde: Luonnonvarakeskus, Tilastopalvelut.

Vuonna 2018 puumassateollisuuden raaka-aineesta kuidutettiin 85 % kemiallisesti ja 15 % mekaanisesti. Tuotteista kemiallisen massan eli sellun osuus oli 70 % ja mekaanisten massojen 30 % (Luonnonvarakeskus, Tilastopalvelut). Puutavaralajeittain puumassateollisuuden puunkäyttö vuonna 2018 oli seuraava (kuva 2):

- Mäntykuitupuu käytettiin 17,0 milj. m³, kaikki kemiallisessa massateollisuudessa (sulfaattisella, liukosella). Ensiharvennuskäyttöä on kokeiltu painehiokkeen ja kuumahierteen valmis-

tuksessa 2000-luvun alkupuolella, mutta sittemmin siitä on luovuttu (Saranpää 2002, Karjalainen 2008). Mäntykuitupuuksi luokitellaan myös lahovikainen kuusipuu, joka ei sovellu mekaaniseen kuidutukseen mutta on kelvollista sulfaattikeittoon. Mäntykuitupuusta oli tuontipuuta 1,2 milj. m³.

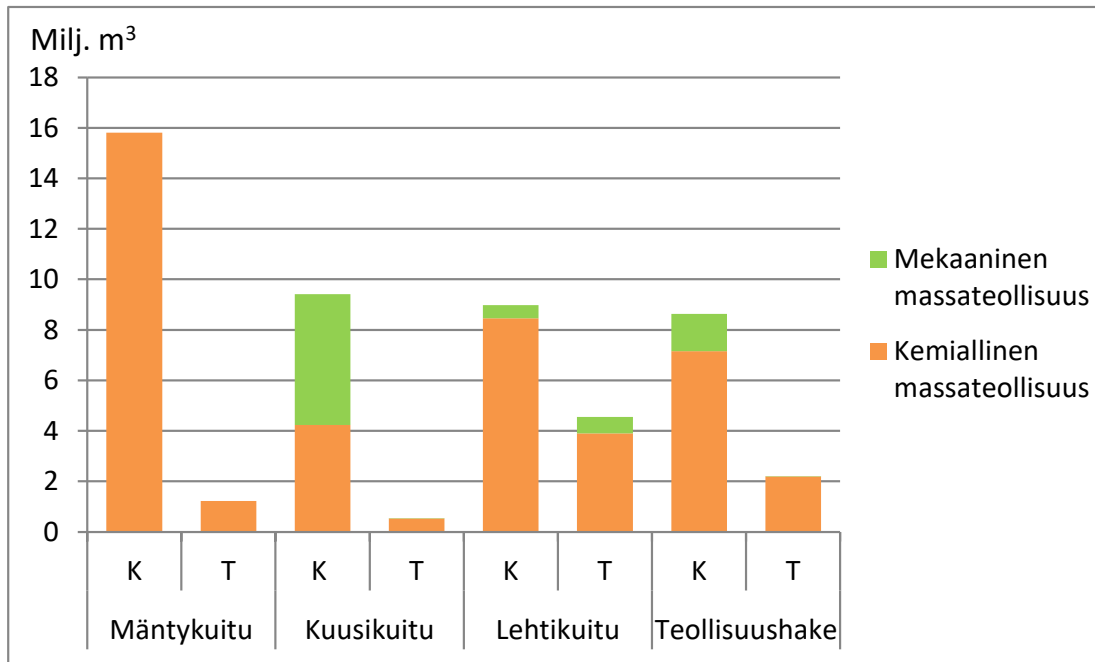
- *Kuusikuitupuuta* käytettiin 10,0 milj. m³, josta 52 % ohjautui mekaaniseen massateollisuuteen (kuumahierre ja hierre, painehioke, sisältää myös kemihierteen) ja 48 % kemialliseen massateollisuuteen (sulfaattisellu, erityisesti armeerausmassa). Tuontipuuta tästä oli vain runsas puoli miljoonaa kuutiometriä, joka käytettiin lähes kokonaan sellun ja kemihierteen valmistukseen mutta tuoreusvaatimuksen vuoksi ei juurikaan mekaanisen massan valmistukseen.
- *Lehtikuitupuuta* käytettiin 13,5 milj. m³. Noin 82 % siitä kuidutettiin kemiallisesti (sulfaattisellu, liukosellu), 9 % kemimekaanisesti (puolisellut) ja 9 % mekaanisesti (kemihierre). Kysymyksessä on lähinnä koivu, josta opittiin valmistamaan kemiallista massaa vasta 1950-luvun lopulla, jolloin pienikokoisen koivupuutavaran käytön painopiste alkoi siirtyä polttopuusta kuituttavaan teollisuuteen (Verkasalo 2008).

Koivukuitupuun ohella sulfaattisellun valmistuksessa käytetään jonkun verran haapaa, yleensä pienellä maksimiosuudella sen joukossa ja joskus omana tavaralajinaan (Ranua 1999). Haapapuusta tehdään myös erikoispapereissa käytettävää puumassaa mekaanisin ja kemimekaanisin menetelmin. Vuosituhannen vaihteessa haavasta tehtiin painehioketta yhden suuren haapapaperikoneen tarpeisiin ja käynnistettiin hybrihaavan viljelyohjelma, mutta paperikoneen tuotanto vaihdettiin muutaman vuoden jälkeen kuitenkin kuuselle haavan saatavuusongelmien vuoksi (Verkasalo 2015).

Kun koivukuitupuun tarve vähitellen ylitti kotimaiset hakkuumahdollisuudet, alettiin sitä tuoda aluksi Venäjältä ja myöhemmin Baltian maista. Nykyisin noin kolmannes koivukuitupuun käytöstä on tuontipuuta, vuonna 2018 noin 4,5 milj. m³, mutta 2000-luvun ensimmäisellä vuosikymmenellä tuontikoivun osuus oli merkittävästi suurempi. Tuontikoivun mukana tulee myös haapaa ja hienopaperiteollisuuden tarpeisiin tuodaan eukalyptusta eteläisiltä lyhytkiertoviljelmiltä (ks. myös Verkasalo 2008).

- Saha- ja vaneriteollisuuden *sivutuotteena valmistettua teollisuushaketta ja purua* käytettiin yhteensä 10,9 milj. m³, josta 2,2 milj. m³ oli tuontihaketta. Teollisuushaketta ja purua ei eritellä tilastoissa puulajeittain, mutta saha- ja vaneriteollisuuden raakapuun käytön perusteella voidaan arvioida männyn osuudeksi noin 40 %, kuusen 55 % ja koivun 5 %. Teollisuushake ja puru käytettiin ensisijaisesti kemiallisen puumassan raaka-aineeksi. Mekaanisen massan osuus oli 14 %, jolloin kysymyksessä oli kuusi. Puumassateollisuuden muusta raaka-aineesta poiketen teollisuushakkeen käyttömäärät ilmoitetaan kuorettomana tilavuutena.
- *Tukiksi luokiteltua puutavaraa* ilmoitettiin käytetyn 0,3 milj. m³. Määrä voi olla käytännössä suurempi.

Kuluvalla vuosituohannella puukuitupohjaisten raaka-aineiden kokonaiskäyttö on kasvanut systemaattisesti selluteollisuuden kasvun myötä vuodesta 2009, vaikka mekaanisten massojen valmistus on vähentynyt ja paino- ja kirjoituspapereita valmistava teollisuus on supistunut (Luonnonvarakeskus, Tilastopalvelut). Selluteollisuuden raaka-aineen käytön odotetaan edelleen kasvavan tehtaiden uus-, laajennus- ja korvausinvestointien todennäköisesti edetessä 2020-luvulla (Kniivilä 2019). Tämä koskee sekä perinteistä sulfaattiselluteollisuutta että uutta liukoselluteollisuutta paperi-, kartonki- ja pakkausteollisuuden ja tekstiiliteollisuuden tarpeisiin, kuten myös pienemmässä määrin kemihierteen ja puolisellujen valmistusta pakkaus- ja pehmopaperiteollisuuden tarpeisiin (Alén 2015, Verkasalo 2015). Tuotepaletissa voivat olla mukana myös mikro- ja nanosellut ja niiden muunnellut monenlaisiin uusiin käyttötarkoituksiin korvaamaan fossiiliperäisiin raaka-aineisiin perustuvia tuotteita joko sellaisenaan tai hybridi- tai komposiittimateriaaleina, esimerkiksi nykyisiä rakennusmateriaaleja, muoveja ja teollisuuskemikaaleja (Viikari & Alén 2011, Abdul Khalil et al. 2014, Kangas 2014).



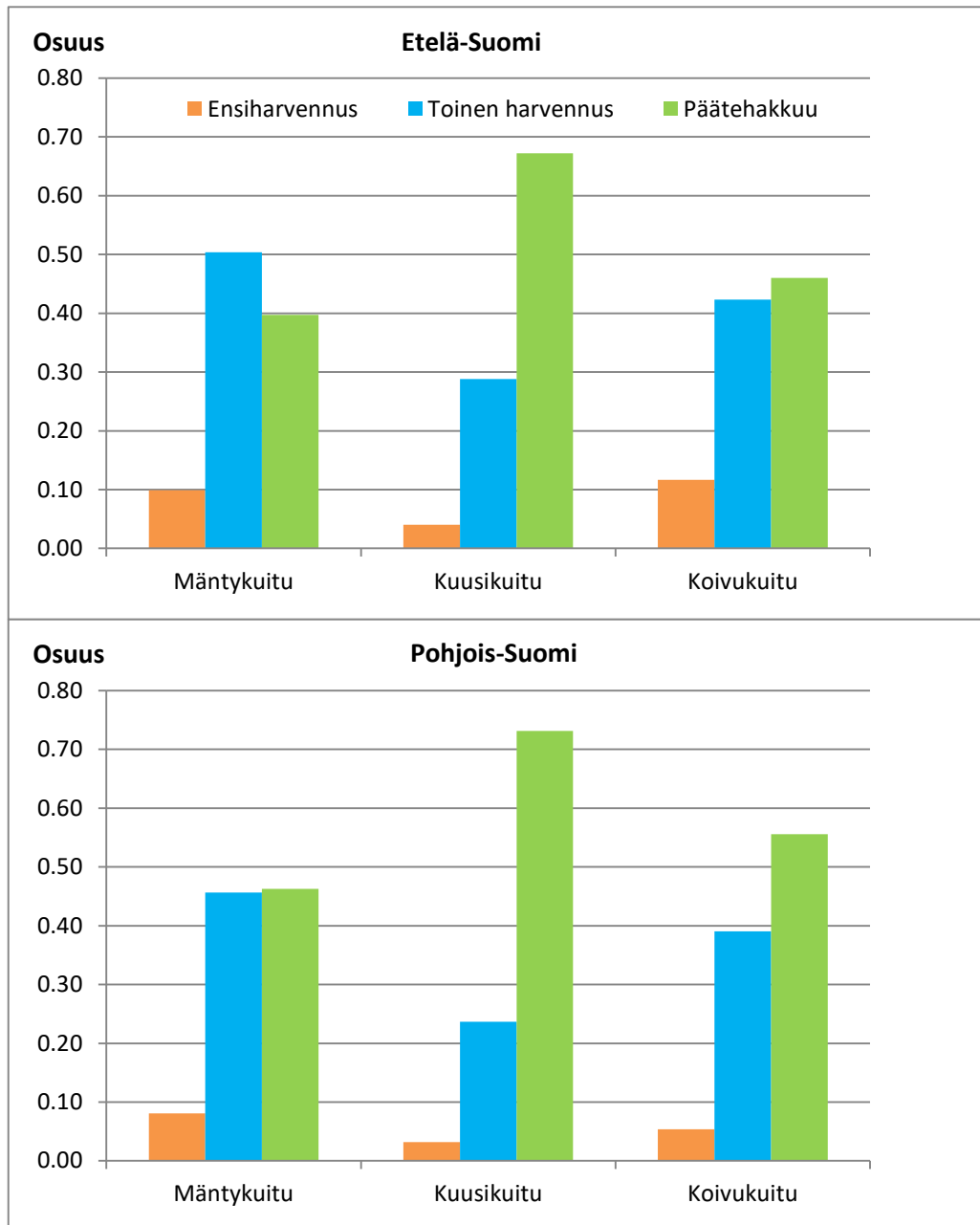
Kuva 2. Puumassateollisuuden raaka-aine (kuitupuu kuorineen, teollisuushake kuoretta) vuonna 2018. K=kotimainen puu, T=tuontipuu. Teollisuushake sisältää tässä sahateollisuuden hakkeen ja myös sahanpurun ja vaneri-, viilupuu- ja viiluteollisuuden sivutuotteista tehdyn hakkeen. Lähde: Luonnonvarakeskus, Tilastopalvelut.

Kuitupuun ominaisuudet vaihtelevat hakkuutavan eli leimikkotyypin mukaan. Luonnonvarakeskuksen metsätilastot osoittavat hakkuiden jakautumisen leimikkotyyppisiin pinta-alan mutta eivät puumäärien mukaan. Runsaat puolet hakkuualasta on harvennuksia ja vajaa puolet uudistushakkuita, mutta niiden suhteet vaihtelevat vuosittain muun muassa puumarkkinoiden ja teollisuuden puuntarpeiden mukaan (Taulukko 1).

Taulukko 1. Hakkuualan jakaantuminen leimikkotyyppisiin vuonna 2017. Lähde: Luonnonvarakeskus, Tilastopalvelut.

Leimikkotyyppi	Hakkuupinta-ala	
	ha	%
Ensiharvennukset	143 800	21
Muut harvennukset	324 700	47
Harvennushakkuut yhteensä	468 500	68
Luontaisen uudistamisen hakkuu	31 700	5
Ylispuiden poisto	33 300	5
Avohakkuut	144 500	21
Muu uudistus	300	0
Uudistushakkuut yhteensä	209 800	31
Muut hakkuut	10 100	1
Kaikki hakkuut yhteensä	688 400	100

Laadunhallinnan kannalta on oleellisempaa tuntea puutavaralajien kertymän kuin hakkuupinta-alan jakautuminen leimikkotyyppeihin. Pinta-alasuhteet eivät osoita määräsuhteita, sillä hehtaarikohtainen kokonaiskertymä tasaikäisrakenteisten metsien uudistushakkuissa on moninkertainen verrattuna harvennushakkuisiin, mutta toisaalta taas kuitupuun osuus kertymästä on uudistushakkuissa pienempi kuin harvennushakkuissa.



Kuva 3. Kuitupuun leimikkoalkuperä Etelä- ja Pohjois-Suomen yksityismetsien pystykaupoissa vuosina 2016–2018. Aineisto: Luonnonvarakeskus, Tilastopalvelut.

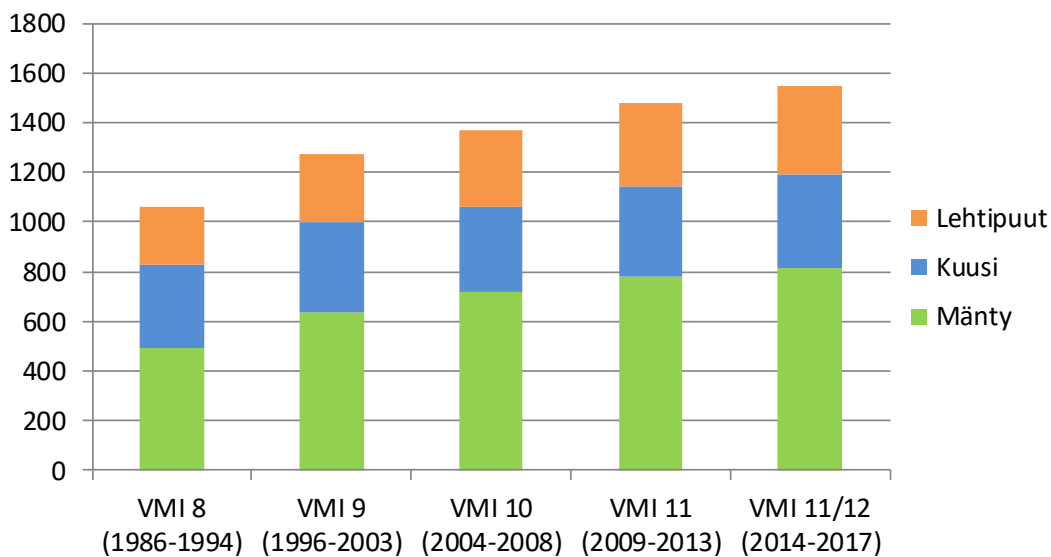
Kuvasta 3 nähdään vuosien 2016–2018 yksityismetsien pystykauppojen kuitupuun leimikkolähteet Etelä- ja Pohjois-Suomessa Luonnonvarakeskuksen puukauppatilastojen mukaan. Näiden ulkopuolelle jäävät siis yksityismetsien hankintakaupat, Metsähallituksen ja eräiden muiden metsänomistajien toimituskaupat ja metsäteollisuuden omista metsistä tapahtuvat toimitukset. Verrattuna tarkastelujakson kotimaan kaikkien kuitupuun hakkuiden määrään oli yksityismetsien pystykauppojen osuus

Etelä-Suomessa keskimäärin 53 % ja Pohjois-Suomessa 38 %. Maan eri osien välinen ero oli mänty- ja kuusikuitupuulla noin 20 prosenttiyksikköä, lehtikuitupuulla ei eroa ilmennyt. Suhdelukujen tasoero kertoo Metsähallituksen ja yhteismetsien hakkuiden selvästi suuremmasta merkityksestä Pohjois-Suomessa. Runsaan kuitupuun tarpeen voidaan arvioida johtaneen myös tavallista suurempiin hakkuisiin metsäteollisuuden ja institutionaalisten sijoittajien omistamissa metsissä.

Kuitupuun laadunhallinnan kannalta ongelmana on, että kuitupuun alkuperä leimikkotyypeittäin ja myös kotimaan ja tuontipuun välillä vaihtelee tarkastelujakson mukaan:

- *Kausivaihtelua* aiheutuu siitä, että harvennushakkuista keskitetään puusto- ja maaperävaurioiden välttämiseksi talvikaudelle ja nykyisin myös kuivalle syyskaudelle ja päätehakkuista vastaavasti kevät- ja kesäkaudelle ja märeille syyskaudelle. *Vuosivaihtelu* on ollut perinteisesti seurausta ennen kaikkea sahatavarakaupan, mutta nyttemmin myös kuitupuukaupan suhdannevaihtelusta. Kun sahauskapasiteetti on täydessä käytössä, uudistushakkuista sahatukien ohella saatavan kuitupuun ja sahaus sivutuotteena syntyvän hakkeen osuudet käyttömäärästä kasvavat. Sahateollisuuden matalasuhdanteessa puolestaan harvennuspuun osuus kuitupuun kokonaismäärästä kasvaa.
- *Metsikkörakenteen muuttuminen*, joka on seurausta metsien käsittelyn pitkän aikajakson kehitystrendeistä, heijastuu myös hakkuitten leimikkorakenteessa. Jo 1960-luvulla käynnistynyt hakkuukypsien metsien uudistamisaltoa ja pitkään jatkunut männyn suosiminen on johtanut mäntyvaltaisten metsien osuuden lisääntymiseen ja mäntykuitupuun määrän kasvuun (kuva 4). Myös lehtikuitupuun määrä on kasvanut pääasiassa viimeisinä vuosikymmeninä lisääntyneiden taimikonhoidon ja nuorten metsien harvennusten rästien ja osaltaan myös 1960–1980-lukujen koivunviljelyn ansiosta. Kuusen määrä on pysynyt kokonaisuutena vakioitasolla, mutta eräissä osissa maata on ollut havaittavissa keski-ikäisten kuusikoiden vähenemistä. Hirvivahinkojen välttämiseksi johtuva männyn ja koivun viljelyn korvaaminen kuusella viimeiset 10–20 vuotta on puolestaan johtamassa kuusikuitupuun määrän kasvuun, aluksi ensiharvennuksissa.

Tilavuus, milj. m³



Kuva 4. Kuitupuun tilavuuden kehitys puulajeittain 1986–2017 (koko maa). Lähde: Luonnonvarakeskus, Tilastopalvelut.

2. Kuitupuun laatu

2.1. Puutavaran laadun käsite ja merkitys

Laatu kuvastaa puutavaran soveltuvuutta tiettyyn käyttötarkoitukseen, jolloin lähtökohtana on määriteltyn tarkoitukseen paras mahdollinen mutta kuitenkin luonnossa mahdollinen normaali- eli ideaalipuu (Kärkkäinen 1984). Erilaiset viat heikentävät puutavaran laatua, joten toteutuva laatu on useimmiten heikompi kuin ideaalilaatu.

Puutavaran ominaisuus, joka on yhdessä prosessissa tai tuotteessa haitaksi, voi olla toisessa eduksi. Huonolaatuinen tukkipuu voi olla hyvälaatuista kuitupuuta ja huonolaatuinen kuitupuun hyvälaatuista energiapuuta (esim. Alén 2015). Pihkainen mäntykuitupuun tai lahovikainen kuusikuitupuun ovat kelvontonta mekaanisen massan mutta kelpollista kemiallisen massan raaka-aineeksi (esim. Tyrväinen 1995, Varhimo & Tuovinen 1999). Laatu on siis käyttötarkoitukseen sidottu käsite, joten puutavaran laatua on vaikeaa määritellä yleisellä tasolla. Siten ei ole myöskään yksittäistä mitattavaa ominaisuutta, suuretta, joka kattavasti kuvaisi puutavaran laatua. Laatu muodostuu pikemminkin useiden suureiden tai luokitteluiden eli laatutekijöiden yhteisvaikutuksena.

Laatutekijöiden painoarvo laadun määrittämisessä voi riippua muun muassa siitä, millaista valmistusprosessia tuotannossa käytetään, mihin tuotteisiin raaka-aine lopulta käytetään ja millainen on laadun asiakasarvostus ja tulkinta (esim. Alén 2015). Vaihtoehtojen kirjo on laaja ja muuttuu jatkuvasti. Koska eri laatutekijöiden yleistä arvoasteikkoa tai laadun määrittäytapaa ei ole, tarvittaisiin pikemminkin puutavaran laatutekijöitä kuvaava tietokanta, jonka pohjalta puunkäyttäjä voi arvottaa ja ohjata raaka-ainevirtaa omista lähtökohdistaan.

Laatutekijöiden vaihtelun tunteminen on avain sekä raaka-aineresurssien että valmistusprosessien hallintaan. Laatuvaihtelun tuntemusta tarvitaan puumassateollisuuden raaka-ainevirran arvoketjua kehitettäessä. Sen kautta on mahdollista saavuttaa samantyyppisiä etuja, joihin perinteisesti pyritään prosessiteknikkaa kehittämällä. Kuitupuun laatuun tuntemusta voidaan hyödyntää seuraaviin tarpeisiin:

- Metsänviljelyaineiston kehittäminen eli *metsänjalostus* kuitupuun laatu huomioon ottaen
- Kuitupuun laatutekijöiden huomioon ottaminen *metsänuudistamisessa ja metsänkasvatuksessa*
- Kuitupuun *lähteiden valinta* laatu huomioon ottaen
- Kuitupuun *arvosuhteiden* arvioiminen, jotka riippuvat yhtäältä kuitupuun ominaisuuksista ja toisaalta lopputuotteista
- *Arvopotentialin optimaalinen hyödyntäminen* laadunohjauksen avulla. Tavoitteena on ohjata kuitupuun ominaisuuksiensa perusteella edullisimpaan käyttökohteeseensa sekä tuotteen laatuvaihtelun tasaaminen ympäri vuotuisesti.

Laadun arvioimiseksi voidaan mitata tai ennustaa puutavaran teknisiä ominaisuuksia, jotka antavat viitteitä puutavaran arvosuhteista ja soveltuvuudesta erilaisiin käyttökohteisiin (Kärkkäinen 1984). Kuvassa 5 on esitetty tärkeimmät laatutekijät, joista kuitupuun laatu määräytyy. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan kaikkia kuvassa esille tuotuja ominaisuuksia lukuun ottamatta runkojen, pölkkyjen ja puuaineen vikoja, joita kuitupuussa aiheuttavat muun muassa lenkous, mutkaisuus, monihaaraisuus, reaktiivisuus, sinistymä, laho sekä puutavaraa korjattaessa, kuljetettaessa ja varastoitaessa syntyneet käsittelyviat.

Laatutekijöiden perusteella voidaan tehdä päätelmiä raaka-aineen käyttäytymisestä jalostusprosessissa, raaka-aineen kulutuksesta eli pää- ja sivutuotteitten saannosta sekä lopputuotteitten ominaisuuksista ja tasalaatuisuudesta (Varhimo & Tuovinen 1999, Alén 2015). Kuitupuun laatutekijät ovat

yhteydessä eri tavoitteiden kannalta määritettävään laatuun esimerkiksi seuraavasti (Kärkkäinen 1984, Hakkila & Verkasalo 2009):

- *Raaka-aineen kulutukseen* vaikuttavat puutavaran järeys, kuoren osuus, oksien osuus, kuiva-tuoretiheys sekä puun kemiallinen koostumus.
- *Raaka-aineen prosessikäyttäytymiseen* vaikuttavat esimerkiksi puutavaran järeys, kosteus, sydänpuupitoisuus, oksien osuus, kuiva-tuoretiheys ja kemiallinen koostumus.
- *Puumassan ominaisuuksiin* vaikuttavia raaka-ainetekijöitä ovat ennen kaikkea kuidun anatomiset ominaisuudet: pituus, läpimitta, massa, pituus-massasuhde, seinämän paksuus ja seinämän fibrillikulma. Erityisesti mekaanisessa puumassateollisuudessa puun tuoreus on tärkeä laatutekijä. Vaikka kuituja voidaan puumassaa tehtäessä muokata, kuidun alkuperäiset ominaisuudet asettavat kuitenkin rajat, joiden puitteisiin puumassan laatu asettuu.

Raaka-aineen laadun seuranta ja ohjaus puunhankinnassa ja tehdasvastaanotossa rajoittuvat perinteisesti saha- ja vaneriteollisuuteen, jossa uudenaikainen mittaustekniikka mahdollistaa puutavaran laatua kuvaavien suureiden mittauksen ja pölkyttäisen lajittelun haluttuihin laatuihin. Puumassateollisuudessa raaka-aine on totuttu mieltämään puutavaralajeittaiseksi massa-artikkeliksi, jonka ominaisuuksien vaihteluun voidaan tuotantovaiheessa vaikuttaa vain hyvin rajallisesti. Tavoitteena on kuitenkin ollut prosessierien tasalaatuisuus, tai pikemminkin tarpeettoman epätasaisen laadun välttäminen.

Puutavaran laadun tuntemus ja hallinta palvelevat sekä prosessilähtöisen että markkinalähtöisen tuotekehittelyn tarpeita. Laadun hallinta luo puumassateollisuuden raaka-aineelle lisäarvoa ja on avain raaka-aineen optimaaliseen käyttöön.



Kuva 5. Kuitupuun laatutekijät (Saranpää 2002).

2.2. Puuaineen muodostuminen ja kemia

Luvuissa 2.2.1 ja 2.2.2 esitettävät kuvaukset puuaineen ja vuosilustojen yleisestä syntyprosessista perustuvat oppikirjatietoon, mm. Kollmann ja Cote 1968, Alén 2000, Kärkkäinen 2007, Hakkila ja Verkasalo 2009.

2.2.1. Solukoiden synty ja puuaineen kemiallinen rakenne

Kasvit rakentuvat *soluista*. Puumassateollisuudessa niitä kutsutaan *kuiduiksi*. Solujen mittasuhteista ja muista ominaisuuksista riippuu, millaista massaa ja paperia puusta voidaan tehdä. Yksi gramma sellua sisältää havupuillamme noin 1,4–4,7 miljoonaa, koivulla noin 9–11 miljoonaa ja haavalla noin 20 miljoonaa kuitua (Ranua 1999).

Solut muodostavat *solukoita, joilla on erilaisia tehtäviä*. Puuvartisten kasvien tunnusomainen piirre on *johtosolukko*, joka on erikoistunut kuljettamaan vettä ja siihen liuenneita ravinteita, suurissa puissa jopa kymmenien metrien etäisyydeltä hienojuurista latvukseen.

Puun biomassassa syntyy solujen jakaantumisen kautta. Rakennusmateriaalina ovat vihreissä lehdistä yhteyttämisprosessissa hiilidioksidista ja vedestä syntyvät yksinkertaiset sokerit, joihin *auringon energia sitoutuu kemialliseksi energiaksi*.

Kasvu etenee samanaikaisesti kahdella tasolla, pituuskasvuna ja paksuuskasvuna. *Pituuskasvu* saa alkunsa rungossa, oksissa ja juurissa olevien *silmujen kärkikasvupisteistä*, joiden ohutseinäiset, runsaasti alkulimaa sisältävät solut kykenevät jakautumaan rajattomasti, kunnes erikoistuvat muihin tehtäviin. Tämä primaarikasvu vaikuttaa ratkaisevasti rungon pituuteen ja muotoilee puun arkkitehtuurin, mutta sen aikaansaama osuus rungon tilavuudesta tai massasta on vain promilleluokkaa. Siksi primaarikasvulla ei ole välitöntä merkitystä kuitupuun teknisille ominaisuuksille. Sen näkyvin seuraus on rungon keskiakselin pehmytkudoksinen, läpimitaltaan noin 3–5 mm:n paksuinen *ydin*.

Kärkikasvupisteissä syntyneet solut erikoistuvat ja menettävät silloin jakautumiskykynsä. Rungon, oksien ja juurien vaippapinnan verhoksi jää kuitenkin jakautumiskykyinen, yhden solun paksuinen kerros. Tämä äärimmäisen ohut vaippa, nimeltään *kambium eli jälsi*, ulottuu 0,01–0,03 mm:n paksuisena rungon kärjestä oksien ja juurien kärkeen. Jällessä solut säilyttävät jakautumiskykynsä ja aikaansaavat rungon, oksien ja juurien *paksuuskasvun*. Kuidun anatominen rakenne ja eräät muutkin kuitupuun ominaisuudet määräytyvät jälleen toiminnan tuloksena. *Jälsisolussa tapahtuu puun ikääntymisen myötä muutoksia*, jotka heijastuvat puun eri ikäkausina syntyvien solujen ominaisuuksissa.

Jälsi koostuu kahdentyyppisistä jakautumiskykyisistä soluista. Sukkulamaiset eli *pitkät jälsisolut* ovat rungon, oksien ja juurien pituussuuntaisesti asettuvien solujen emosoluja. *Lyhyet jälsisolut* puolestaan ovat rungon, oksien ja juurien säteensuuntaisesti asettuvien ydinsäteiden emosoluja. Mänty- ja kuusipuussa lyhytsoluisten ydinsäteiden osuus on pieni.

Jälleen pitkät solut kykenevät jakaantumaan kahtia rajattomasti. Jakaantuminen tapahtuu joko tangentin suuntaisesti rungon läpimittaa kasvattaen tai harvemmin säteen suunnassa jälleen omaa kehää rungon paksuuskasvun myötä tarpeen mukaan laajentaen. Kehä laajenee myös sitä kautta, että *puun varttuessa jälleen pystysuuntaiset solut kartuttavat pituuttaan*, kunnes ne muutaman kymmenen luston etäisyydellä ytimestä saavuttavat lopullisen mittansa. Erot kuidun pituudessa rungon eri osien ja puutavaralajien välillä ovat paljon seurausta juuri tästä ilmiöstä. Ytimen ympäristössä puuaineen kuidut ovat lyhyitä, koska ne ovat syntyneet pituudeltaan vaillinaisten jälsisolujen jakautumisen kautta. Rungon pintaosassa kuidut taas ovat pitempiä, koska ne ovat syntyneet pitemmistä jälsisolusta. Ensiharvennusleimikon nuorissa rungoissa kuidut ovat siis keskimäärin lyhyempiä kuin päätehakkuiden vanhemmissa rungoissa.

Kun jälleen pystysolu jakaantuu kahdeksi identtiseksi soluksi, toinen jää jatkamaan toimintaansa jälsisoluna ja säilyttää rajattoman jakaantumiskykynsä. Toisesta taas muodostuu emosolu, jolla on enää rajallinen jakaantumiskyky. Emosolu jakaantuu tyypillisesti edelleen kahdeksi tytärsoluksi, jotka nekin vielä jakaantuvat. Yhden solukerroksen paksuinen jälsi ja sen sisä- ja ulkopuolella olevat erilaistumatomat jakaantumiskykyiset emo- ja tytärsolut muodostavat rungon vaipalle *jälsivyyöhyykkeen*, joka männyssä ja kuusessa on paksuudeltaan enintään 0,3 mm. Ravinnerikkaat ja ohutseinäiset jälsivyyöhyykkeen solut ovat puutavarassa kesäaikana erityisen alttiita home- ja sinistäjäsiementen hyökkäyksille, jos kuori rikkoutuu. Tästä syystä vieniin tarkoitettu kuusikuitupuu oli aikoinaan kuorittava täyspuhtaaksi, millä tarkoitettiin sitä, että kuoren lisäksi puun pinnalta veistettiin pois jälsikerros ja usein lisäksi sinistymiselle herkkä viimeinen vuosilusto.

Jos tangentinsuuntaisessa jakaantumisessa syntyvä emosolu jää jälleen sisäpuolelle, siitä kehittyy puusolu. Jos uusi solu jää jälleen ulkopuolelle, siitä tulee *sisäkuoren eli nilan* solu. Jälsisolun jakaantuu pääsääntöisesti sisäpuolelle, ja emosolujenkin jakaantumiskyky on nilasolukossa vähäisempi kuin puusolukossa, joten nilaa syntyy oleellisesti vähemmän kuin puuta.

Jakaantumiskykynsä menetettyään puun ja kuoren tytärsolut erikoistuvat tiettyyn tehtävään. Vesi ja maasta peräisin olevat ravinteet kulkeutuvat ylöspäin puuaineessa, kun taas vihreitten lehtien yhteyttämistuotteet kulkeutuvat alaspäin sisäkuoressa. Jos runko kaulataan eli sen ympäriltä poistetaan kapea kuorivyöhyke koko kehän laajuudelta, nestevirtaus latvuksesta juuristoon katkeaa. Se johtaa vähitellen juuriston ja koko puun kuolemaan.

Puusolun rakennusaineita ovat selluloosa, hemiselluloosat ja ligniini, jotka koostuvat yksinkertaisista sokereista kuten glukoosista. *Selluloosan* makromolekyylit muodostuu 8 000–10 000 yksinkertaisesta glukoosimolekyylistä. Nämä makromolekyylit järjestäytyvät *solun seinämää kiertäviksi mikrofibrilleiksi*. Kun kuiva puutavara kostuu, vettä tunkeutuu mikrofibrillien väleihin, ja kun kostea puutavara kuivataan, vettä poistuu mikrofibrillien välistä. Puun tilavuus paisuu ja kutistuu vastaavasti. Kun puun kosteussuhde on yli 30 %, on saavutettu *puunsyiden kyllästymispiste*, jonka yläpuolella kosteuden muutokset kohdistuvat lähinnä soluonteloihin, eikä puun tilavuudessa tapahdu enää muutoksia. Puutavara kutistuu ja paisuu kosteuden muuttuessa vain silloin, kun kosteussuhde on puunsyiden kyllästymispisteen alapuolella. Mikrofibrillien nousukulma solun pituusakseliin nähden ratkaisee, miten kosteuden muutokset heijastuvat muodonmuutoksina puukappaleen eri suunnissa.

Hemiselluloosien makromolekyylit koostuvat vain 150–200 sokerimolekyylistä, joiden joukossa on glukoosin ohella myös muita yksinkertaisia sokereita. Ne ryhmitellään galaktoglukomannaaneihin ja ksyylaaneihin. Edelliset ovat yleisempiä havupuun ja jälkimmäiset lehtipuun hemiselluloosissa.

Ligniinin molekyylirakenne ei ole selluloosan ja hemiselluloosan tapaan säännöllisesti järjestäytynyt, eikä sitä edes täysin tunneta (ks. myös Sarkanen & Ludwig 1971). Havupuun ja lehtipuun ligniinit ovat kemialliselta rakenteeltaan erilaisia, samoin puuaineen ja kuoren ligniinit. Ligniinin läsnäolo on tyypillistä puuvartisille kasveille, joissa se täyttää selluloosan ja hemiselluloosan tyhjiä tiloja ja mikrofibrillien välejä antaen puulle sen tarvitseman jäykkyyden. Alhaisen hygroskooppisuutensa ansiosta se samalla vähentää muodonmuutoksia puun kuivuessa ja kostuessa.

Kun jälsisolun jakaantuu kahtia, aluksi vain pektiini- ja ligniinipitoinen *välilamelli eli keskilevy* (M) erottaa uudet solut toisistaan. Sitten keskilevyn molemmille puolille kehittyy ohut *primaariseinä* (P), joka vielä sallii solun laajenemisen. Kun solu on saavuttanut lopullisen läpimittansa, primaariseinän sisäpuolelle kasvaa jäykkä *sekundaariseinä* (S), joka koostuu kolmesta kerroksesta: S_1 , S_2 ja S_3 . Kaikista kerroksista paksuimman on sekundaariseinämän 1–5 μm :n paksuinen keskikerros S_2 , josta puumassan ominaisuudet ensisijassa riippuvat. Seinämän sisäpuolta verhoaa ohut amorfinen kyhmykerros. Sisälle jää *soluontelo*. Ensialkuun seinämän rakennusaineina ovat solun sisällä olevista sokereista syntyvät selluloosa ja hemiselluloosat, mutta ennen seinämän paksuuskasvun päättymistä alkaa muodostua

myös ligniiniä. Solun nurkista lähtien se iskostaa seinämän selluloosarungon ja hemiselluloosasta koostuvat väliaineet jäykäksi rakenteeksi.

Solut siis erikoistuvat. Havupuilla solutyyppejä on vähemmän kuin lehtipuilla, muun muassa lehtipuille tyypilliset laajaonteloiset putkilot puuttuvat. Sekä puun rakenteen että puumassateollisuuden kuituraaka-aineen kannalta havupuun ylivoimaisesti tärkein solutyyppi on puun *pituusakselin suuntainen trakeidi eli putkisolu*. Putkisolut ovat muodoltaan pitkiä, päistään kapenevia ja suippokärkisiä. Männyllä ja kuusella niiden pituus vaihtelee alle yhdestä useaan millimetriin. Lämpimillä vaihtelee niin ikään, ollen tyypillisesti 20–40 µm. Pituus on läpimittaan verrattuna satakertainen. Puumassateollisuuden tuottamat kuidut ja niistä tehty paperi muodostuvat pääosaksi putkisoluista.

Muu osa männyin ja kuusen puuaineesta koostuu lähinnä varastosolukkona toimivien *ydinsäteiden ja niitten pihkatiehyiden tylppysoluista*. Muodoltaan lyhyinä ja tylppinä sekä runsaasti uuteaineita sisältävinä ne ovat vähemmän haluttuja puumassateollisuudessa, ja suuri osa niistä joutuu pienen kokonsa vuoksi kuidutuksessa hukkaan ja jätelietteen kautta lopulta polttoaineeksi.

Kuitujen pituus ja paksuus, seinämien paksuus sekä mittasuhteet kuten pituusmassa vaikuttavat ratkaisevasti puumassan ominaisuuksiin paperin raaka-aineena. Riippuu paperituotteesta, millaisia kuidumensioita toivotaan.

Puumassateollisuudessa puun solut irrotetaan toisistaan kemiallisin tai mekaanisin keinoin. Kemiallisen massan valmistettaessa pääosa ligniinistä poistetaan liuottamalla se keitossa ja osaksi valkaisuun, ja samalla liukenee myös osa hemiselluloosista ja selluloosaakin. Havupuussa selluloosan ja hemiselluloosien osuus on pienempi mutta ligniinin osuus suurempi kuin lehtipuussa. Siksi havupuusta saadaan kemiallisessa kuidutuksessa pienempi kuitusaanto kuin lehtipuusta. Sulfaattikeitossa saanto on männyllä ja kuusella alle 50 % mutta koivulla yli 50 %. Kun kuidutus tapahtuu mekaanisin keinoin, lähes kaikki ainesosat jäävät puumassaan, ja saanto on jopa 95 % raaka-aineen kuivamassasta. Lopullinen puumassan saanto riippuu paljon myös siitä, kuinka pitkälle keittoprosessi (kemiallinen kuidutus) ja valkaisu viedään. Seuraavassa asetelmassa on lueteltu suomalaisen puumassateollisuuden keskimääräisiä puunkulutuskertoimia massalajeittain vuonna 2018 (raaka-aineen kulutus kuorellisena tilavuutena per yksi tonni valmista massatuotetta [m³/t] muokattu eräältä konsulttiyritykseltä saaduista tiedoista):

Mekaaninen, havu	2,50
Puoli-kemiallinen, lehti	2,65
Valkaistu sulfaatti, lehti	4,10
Valkaisematon sulfaatti, havu	4,90
Valkaistu sulfaatti, havu	5,30
Liukosellu, lehti	5,50
Liukosellu havu	6,60

Puumassojen käyttökohteet ovat laajenemassa paperi- ja kartonkiteollisuudesta ja sellun jatkojalostuksesta erityisesti tekstiiliteollisuuteen ja uudenlaisiin pakkausratkaisuihin (Alén 2015). Nämä edellyttävät säännöllisesti korkeaa kemiallista puhtausastetta ja vaaleutta, mikä lisää puunkulutusta verrattuna paperi- ja kartonkisellujen valmistukseen. Tämä näkyy ylläolevassa asetelmassa liukosellujen selvästi suurempana puunkulutuksena verrattuna vastaaviin valkaistuihin selluihin.

Vaikka ligniini on selluloosan saannon kannalta hyödytöntä kemiallisessa ja osin kemi-mekaanisessa kuidutuksessa, se voidaan kuitenkin käyttää hyväksi polttoaineena (Alén 2000) ja jatkossa monenlaisissa materiaaliratkaisuissa (Alén 2015). Sulfaattitehtäissä tähteeksi jäävän mustalipeän sisältämät ligniinit ja hemiselluloosat muodostavat Suomen tärkeimmän puuperäisen polttoaineen, jonka ansiosta sellutehtaat kykenevät tuottamaan energiaa yli oman tarpeen. Metsäteollisuuden jäteliemiin perustuva energian tuotanto vuonna 2018 oli 47,3 TWh, mikä vastaa energiasisällöltään 4,0 miljonnaa öljytonnia eli 12,2 % kaikesta Suomessa käytetystä energiasta (Luonnonvarakeskus, Tilastopalvelut).

Muokatusta ligniinistä eli Kraft-ligniinistä on alettu valmistaa viime vuosina pelletöityjä bioenergia-tuotteita käytettäväksi teollisuuden voimaloissa ja suurissa energialaitoksissa sekä hartseja ja liima-aineita mm. vaneriteollisuudelle (Alén 2015, Verkasalo 2015). Kehitteillä on muun muassa hiilikuitua korvaavia materiaaleja keveisiin kuitukomposiittituotteisiin, erilaisia muoveja korvaavia materiaaleja, teollisuuskemikaaleja ja nestemäisiä biopolttoaineita. Lignosulfonaateilla on puolestaan kaupallista käyttöä esimerkiksi sementtiteollisuudessa ja teiden rakennuksessa sideaineina, vedenkäsittelyssä ja tekstiiliteollisuudessa.

2.2.2. Luston muodostuminen

Jälsisolujen tangentialisesta jakautumisesta seuraa, että solut järjestäytyvät riveihin, jotka etenevät säteittäin ytimeistä jätettä kohti. Solut laajenevat hieman vielä jakautumisen päätyttyä, mutta havupuilla rivimäinen järjestys säilyy, koska laajeneminen tapahtuu rungon säteen suunnassa. Lehtipuilla sen sijaan solujen järjestys häiriintyy, kun laajeneminen kohdentuu paljolta suuriin putkiloihin, jotka sijaitsevat hajallaan siellä täällä erityisesti hajaputkilaisissa lehtipuulajeissa kuten koivut, lepät ja haapa (Hakkila & Verkasalo 2009).

Paitsi solun läpimitta myös sen pituus kasvaa vielä jakaantumisvaiheen jälkeen. Havupuun soluissa jakaantumisen jälkeinen välitön pituuskasvu on 10–15 %, lehtipuilla suhteellisesti paljon enemmän. Myöhemmin solujen mittasuhteet eivät enää muutu.

Tehtävästä riippuu, millaisen koon, muodon ja seinämän paksuuden solu lopulta saa ja miten paljon solun seinämiin syntyy huokosia. Erikoistuvan solun tärkeimmäksi tehtäväksi tulee joko osallistua veden kuljetukseen, tukea puun rakennetta tai toimia varastosolukkona. Männyllä 93 % ja kuusella 94 % puun tilavuudesta muodostuu pitkistä putkisoluista, jotka hoitavat vedenjohto- ja tukitehtäviä ja joista myös puumassateollisuuden tuotteet ensisijassa koostuvat. Loput 6–7 % tilavuudesta muodostuu ydinsäteitten ja pihkatiehyitten lyhyistä soluista, jotka palvelevat varastointitehtävissä (Kärkäinen 2007).

Kasvukauden alkuvaiheessa syntyvää puuainetta kutsutaan kevät- eli varhaispuuksi. Sen putkisolut toimivat pääasiassa vedenjohtosolukkona. Tehtävänsä mukaisesti kevätpuusolujen tunnusomaisia piirteitä ovat ohuet seinämät, laaja ontelo sekä solujen välisinä kulkuaukkoina toimivien rengashuokosten runsaus. Kasvukauden edetessä puu ryhtyy vedenjohtosolukon sijasta muodostamaan tukisolukkoa, jossa solun seinämä on paksumpi, ontelo ahtaampi ja huokosten määrä pienempi. Tällaista vahvarakenteista tiheää puuainesta, jota syntyy kasvukauden jälkipuolella, kutsutaan kesä- eli myöhäispuuksi. Näistä kahdesta vyöhykkeestä saadaan anatomisilta ominaisuuksiltaan ja käyttäytymiseltään varsin erilaisia kuituja. Ero aiheutuu myös siitä, että paksuseinäisissä kesäpuusoluissa ligniinin osuus on hieman alempi kuin ohutseinäisissä kevätpuusoluissa. Kesäpuun soluissa sekundääriseinä-
män S2-kerros on näet erityisen paksu, ja S2-kerroksessa taas ligniinin osuus on pienempi kuin seinämän muissa kerroksissa.

Suomen ilmasto-oloissa lustojen kehittymisen kannalta olennainen rungon paksuuskasvu alkaa ja päättyy kasvukauden aikana myöhemmin kuin pituuskasvu. Paksuuskasvu alkaa rungon yläosista ja sen painopiste siirtyy vähitellen kohti tyveä. Paksuuskasvu keskittyy lyhyeen ajanjaksoon, joka ajoittuu yleensä kesä-elokuuhun. Vaikka rungon läpimitassa ei sen jälkeen enää tapahdu muutoksia, kesäpuusolujen seinämän paksuuntuminen sisäänpäin ja puutumisen jatkuvat vielä elo-syyskuussakin. Puun massa kasvaa siis hieman pitempään kuin tilavuus.

Kevät- ja kesäpuun välisen siirtymän jyrkkyys on puulajikohtainen ominaisuus. Männyllä siirtymä on jyrkempi kuin kuusella, ja erityisen jyrkkä se on lehtikuusella. Hidas siirtymä merkitsee tasarakenteisuutta eli hienosyisyyttä ja on eduksi puun työstöominaisuuksille esimerkiksi vaneri- ja puusepänteollisuudessa. Kuituteollisuudessa siirtymän jyrkkyyden merkitys on pienempi mutta ainakin mekaanisessa kuidutuksessa kuitenkin merkityksellinen.

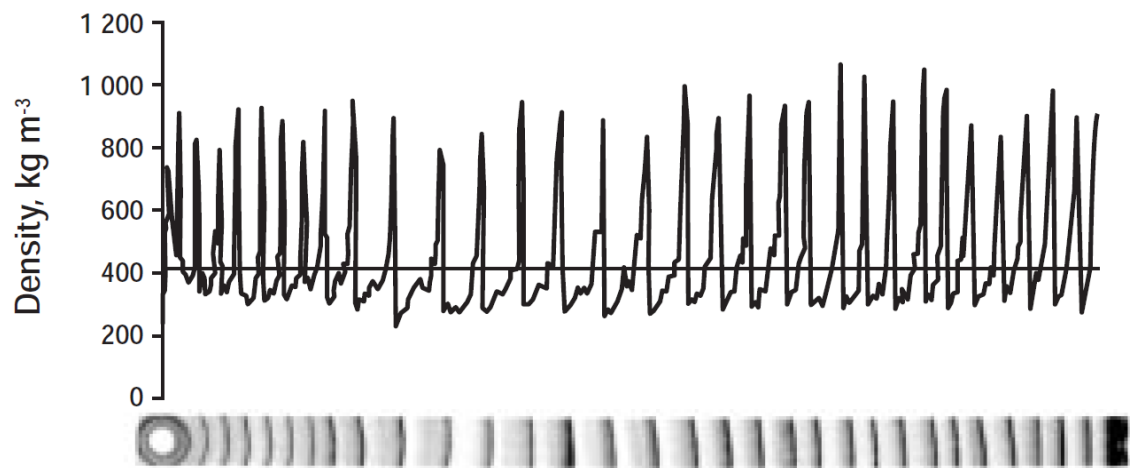
Määritelmän mukaan havupuiden kesäpuulla tarkoitetaan solukkoa, jossa kahden solun välinen tangentiaalinen seinämä on yhteiseltä paksuudeltaan vähintään puolet soluontelon säteittäisestä läpimitasta (Mork 1928). Kesäpuun osuus tilavuudesta eli kesäpuuprosentti kuvastaa paksuseinäisten solujen runsautta ja sitä tietä myös puun mekaanista lujuutta ja kuituteknisiä ominaisuuksia. Männyllä kesäpuun osuus on ytimen läheisyydessä alhainen saavuttaen lähes lopullisen tasonsa ehkä noin 30. vuosiluston etäisyydellä ytimestä. Kuusella muutos on hitaampi.

Mäntypuussa on enemmän kesäpuuta kuin kuusipuussa. Esimerkiksi 30–60 vuoden etäisyydellä rungon ytimestä sen osuus on männyllä noin 29 % ja kuusella 23 % tilavuudesta (Hakkila 1966). Nopeakasvuissa puussa kesäpuuosuus pyrkii jäämään keskimääräistä pienemmäksi. Esimerkkinä on reheville peltomaille istutettujen mänty- ja kuusiviljelmien höttö puuaines. Matala kesäpuuosuus on tyyppilistä myös pohjoisimman Lapin ohutlustoiselle mäntypuulle, mutta sen osalta syynä lienee kasvukauden lyhyys.

Kevät- ja kesäpuusta koostuu vuosilusto, jossa ohutseinäinen kevätpuu näkyy rungon poikkileikkauksessa vaaleampana ja paksuseinäinen kesäpuu tummempana renkaana. Luston leveys osoittaa puun kasvunopeuden. Suomalaisessa luontaisesti syntyneessä mänty- ja kuusipuussa luston leveys on Etelä-Suomessa tyyppillisesti 1–3 mm, mutta puun ikääntyessä, karuilla kasvupaikoilla ja erityisesti Pohjois-Suomessa lusto jää ohuemmaksi. Aikaisemmin luston leveys ylitti hyötykasvuisellakaan havupuulla meidän oloissamme harvoin 4 mm. Viime vuosikymmenten Intensiivisesti hoidetuissa ja erityisesti viljellyissä metsissä luston leveys voi erityisesti kuusella olla 6–10 mm, jos käytetään harvaa kasvatustiheyttä. Vertailun vuoksi mainittakoon, että eteläisen pallonpuoliskon nopeakasvuilla mäntylviljelmillä ja Keski-Euroopan douglaskuusiviljelmillä lustot voivat saavuttaa ääritapauksissa jopa 15–20 mm:n leveyden.

Kesäpuu on kevätpuuhun verrattuna erittäin tiheää. Tästä johtuu, että kesäpuusolujen osuus kuivamassasta on yli kaksinkertainen tilavuusosuuteen verrattuna. Kuva 6 antaa esimerkin puuaineen kuiva-tuoretiheyden vaihtelusta luston sisällä ja lustojen välillä.

Kuiva-tuoretiheys ja eräät muut kuitupuun tekniset ominaisuudet riippuvat puun kasvunopeudesta, koska leveisiin lustoihin liittyy suuri kevätpuuosuus. Luston leveyttä voidaan siis käyttää puuaineen tiheyden indikaattorina. Niin muodoin sillä on sovellusarvoa kuitupuun laatua arvioitaessa ja ohjailtaessa (Spångberg 1998, 1999, Rissanen & Sirviö 2000 a, b, Wilhelmsson et al. 2000, Rieppo & Korpi-lahti 2001).



Kuva 6. Puuaineen kuiva-tuoretiheyden vaihtelu luston sisällä ja lustojen välillä 32-vuotiaan kuusen poikkileikkauksessa. Kuva: Kari Sauvala, Metsäntutkimuslaitos.

3. Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena on Etelä-Suomen mänty- ja kuusikuitupuun ominaisuuksien tason ja tason vaihtelun määrittäminen. Tutkimuksen havainnoistamiseksi kuvataan aluksi puutavaran laadun keskeistä käsitteistöä ja merkitystä sekä puuaineen lustonmuodostusta, kemiallista rakennetta ja niiden hyödyntämistä kuitupuun laadun hallinnan peruselementteinä (luku 2). Tutkimuksessa tarkastellaan laajan empiirisen aineiston perusteella kuitupuun makrotason laatua kuvaavia suureita. Laadun selittäjien tarkastelussa keskitytään tekijöihin, jotka ainakin teoriassa ovat otettavissa huomioon kuitupuun laatuun perustuvassa ohjauksessa. Tämän pohjaksi kartoitetaan ominaisuuksien yhteydet ja syy-seuraussuhteet käytännön sovellusten kannalta oleellisissa kysymyksissä alla esitetyn jaottelun ja hypoteesien mukaisesti:

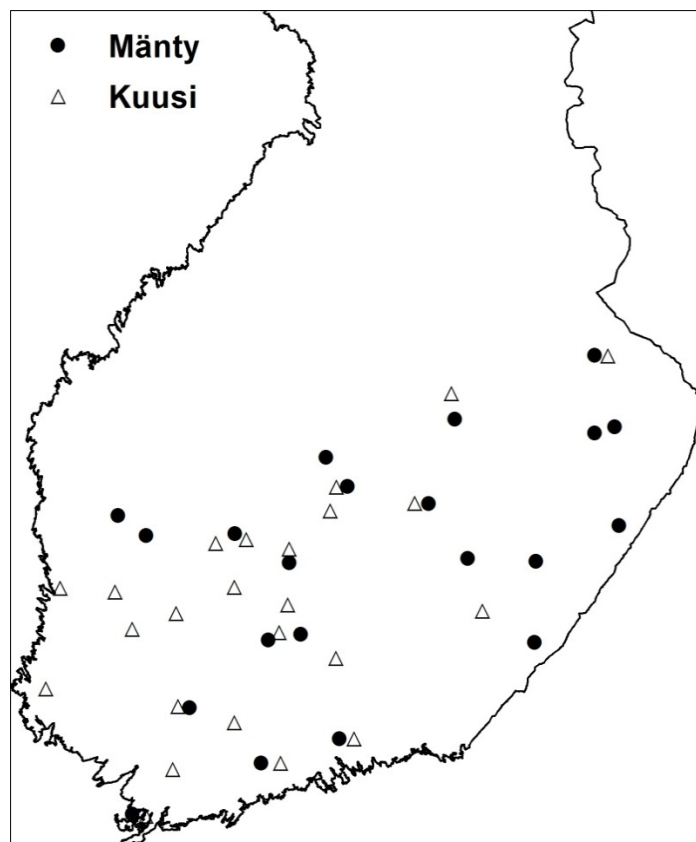
- *Rungon säteensuuntainen eli ytimeä pinta kohti tapahtuva vaihtelu*, jonka taustavaikutteina ovat puun ikääntymisen myötä tapahtuvat muutokset jälsisolukossa sekä sydänpuun muodostuminen. Useitten ominaisuuksien osalta säteensuuntainen vaihtelu on suurempaa kuin vaihtelun muut ositteet. Sitä aiheuttavat kevät- ja kesäpuukuitujen väliset erot kunkin luston sisällä sekä trendinomainen muutos lusto lustolta ytimeä rungon vaippapintaa kohti.
- *Rungon pituussuuntainen eli tyvestä latvaa kohti tapahtuva vaihtelu* on paljolti seurausta säteensuuntaisesta vaihtelusta taustanaan toisaalta vuosilustojen määrän väheneminen eli puun nuortuminen latvaa kohti sekä tuulen, lumen ja latvusmassan kohdistamat vaatimukset rungon rakenteelle, jäykkyydelle ja lujuudelle eri korkeuksilla. Rungon pituussuuntainen vaihtelu saa aikaan eroja puutavaralajien välille, sillä järeillä puilla rungon tyvestä tehdään järeää tukkipuuta, keskiosasta normaalitukkia, pikkutukkia ja kuitupuuta ja latvasta kuitupuuta ja mahdollisesti energiapuuta. Keskikokoisilla puilla tehdään vastaavista rungonosista ensin tukkipuuta, toiseksi pikkutukkia ja kuitupuuta ja kolmanneksi kuitupuuta ja energiapuuta. Pienillä puilla tehdään kuitupuuta ja mahdollisesti pikkutukkia sekä energiapuuta.
- *Runkojen välinen vaihtelu metsikön sisällä* aiheutuu sekä perinnöllisistä tekijöistä että ikä- ja kasvunopeuseroista. Vaihtelua esiintyy esimerkiksi eri kokoluokkien tai eri latvuserroksia edustavien runkojen välillä. Erot ovat useimmiten kuitenkin pienempiä runkojen välillä kuin runkojen sisällä.
- *Metsiköiden / leimikoiden välinen vaihtelu* on seurausta perintötekijöistä sekä ikä-, kasvunopeus- ja käsittelyeroista. Tässä tutkimuksessa seurataan erityisesti leimikkotyyppien välisiä eroja jakamalla aineisto ensiharvennusemetsistä, toisen harvennuksen metsistä sekä päätehakkuista hakattavaan puustoon. Leimikkotyyppien välisten erojen syynä ovat lähinnä metsiköiden ikäerot. Nuorissa metsissä hakkuut toteutetaan alaharvennuksina, ja ne kohdistuvat pääsääntöisesti vallittujen latvuserrosten puustoon. Uudistuskypsissä metsissä taas korjuun kohteena on edeltäneissä harvennuksissa kasvamaan jätetty elinvoimaisin vallitsevan latvuserroksen puusto.
- *Maantieteellinen vaihtelu* aiheutuu ensisijaisesti alueellisista eroista leimikkorakenteen, kasvupaikkatyyppien, kasvunopeuden, iän ja käsittelyhistorian suhteen. Puuntuotannon ääriarjoilla pohjoisimmassa Suomessa eteläisen Suomen lainalaisuudet eivät välttämättä enää päde.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin kuitupuun ominaisuuksien vaihtelua erityisesti rungon pituussuunnassa eli pölkkyjen välillä sekä toisaalta metsikkö- ja leimikkotasolla. Laatu vaihtelun komponenteista metsikkö- / leimikkotasoa on parhaiten otettavissa huomioon kuitupuun laatua ohjattaessa. Pölkyn läpimitta on merkityksellinen laadun ohjauksen kriteeri, joten siihen kiinnitettiin paljon huomiota.

4. Tutkimuksen aineistot

4.1. Pystypuuaineisto

Tutkimusaineisto kerättiin puunhankintaorganisaatioiden normaaleista hakkuuseen tulevista leimikoista vuosina 1993–2001. Leimikot sijaitsivat eri puolilla Etelä-Suomea noin Pori-Jyväskylä-Lieksa -linjan eteläpuolella (kuva 7). Leimikot edustivat metsiköitä, joita oli hoidettu yleisten metsänhoitosuosittelusten mukaisesti. Toisen harvennuksen leimikoissa oli toteutettu aikaisemmin ensiharvennus ja päätehakuuleimikoissa lisäksi yksi tai kaksi harvennushakkuuta. Leimikoiden lukumäärä oli männyllä 40 ja kuusella 39.



Kuva 7. Koeleimikoiden sijainti puulajeittain. Yksi piste voi sisältää useamman leimikon.

Kustakin leimikosta kaadettiin arvontapisteestä ympäriltä 15 koepuuta, joiden tuli täyttää asianomaisen puulajin kuitupuurungon vähimmäismittavaatimukset. Koepuiden kokonaismäärä oli männyllä 600 kpl ja kuusella 585 kpl. Kaikki koepuut edustivat hakkuussa poistettavaa puustoa. Harvennusleimikoiden osalta tulokset eivät niin ollen edusta metsikön kaikkea puustoa, vaan hakkuussa metsänhoidollisista syistä tai ajouran avaamiseksi poistettavaa puustoa. Aineistoon ei kelpuutettu ulkoisesti tarkastellen vikaisia puita, mikä näkyi päätehakuuleimikoiden korkeana tukkiosuutena. Koepuiden keskimääräiset ominaisuudet nähdään leimikkotyypeittäin taulukosta 2.

Koepuista sahattiin 2-3 cm:n paksuiset kiekot tyvileikkauksesta lähtien aina 2 cm:n läpimittaan saakka latvassa. Aivan rungon latvassa, kun läpimitta oli pieni, näytteen paksuutta lisättiin suurimmillaan tasolle 5 cm.

Taulukko 2. Tutkimusleimikoiden ja koepuiden keskimääräiset ominaisuudet leimikkotyypeittäin.

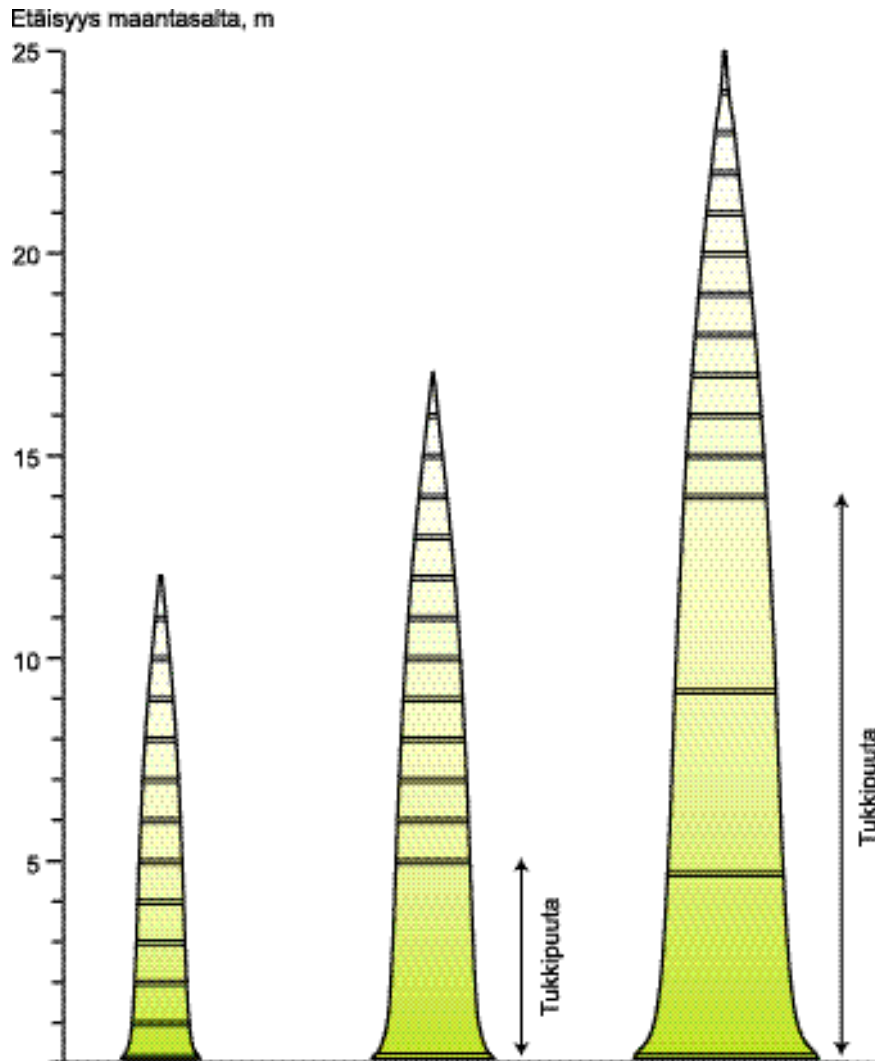
	Ensiharvennus		Toinen harvennus		Uudistushakkuu	
	Mänty	Kuusi	Mänty	Kuusi	Mänty	Kuusi
Leimikoita, kpl	16	16	16	15	8	8
Koepuita, kpl	240	240	240	225	120	120
Ikä, vuotta	33	39	60	61	113	99
D_{1.3}, cm	11,3	11,6	17,5	19,4	27,0	26,2
Pituus, m	11,3	12,0	17,7	20,3	22,9	23,6
Latvussuhde, %	47	64	39	61	39	68
Syntytyyppi:						
Luontainen, %	44	50	75	73	88	100
Viljely, %	56	50	25	27	12	-

Rungon kuitupuuosasta otettiin näytekiekkoja yhden metrin välein, mutta tukkiosasta pääsääntöisesti vain tukkien päistä. Koska pelkästään päistä otetut näytteet antavat harhaisen kuvan useimmista sahatukin ominaisuuksista, osasta tukkiaineistoakin otettiin korjauksen tekemiseksi näytteet metrin välein. Tämä oli tarpeen lähinnä männyn tyvitukeilla, joissa erityisesti kuoren paksuuden ja puuaineen tiheyden muutos latvaa kohti on aivan rungon tyvellä jyrkkä ja ei-lineaarinen mutta tasaantuu sen jälkeen nopeasti.

Tavoitteena oli määrittää kuitupuun ominaisuudet puun kaatohetkellä. Vuodenajasta, hakkuuteknikasta ja puuvirran kulkunopeudesta riippuen puutavarasta häviää sekä kuorta että vettä puunhankinnan aikana. Tulokset eivät siis kaikilta osiltaan välttämättä edusta kuitupuun ominaisuuksia siinä vaiheessa, kun puutavara saapuu tehtaalle.

Kuva 8 osoittaa esimerkinomaisesti tavoitekohdat, joista näytekiekot pyrittiin sahaamaan. Jos kohdalle sattui oksa, näytteenottoa paikkaa siirrettiin rungossa ylös- tai alaspäin niin, että oksa jäi kiekon ulkopuolelle. Näin ainakin pääosaksi eliminoitiin oksankynnäksen ja laajeneman vaikutus kiekon läpimittaan, oksapuun vaikutus puuaineen tiheyteen sekä oksan karsimisen vaikutus kuoren määrään (Kärkkäinen 2007, Hakkila & Verkasalo 2009). Tulokset edustavat siis virheetöntä puuainesta. Näytteenottomenetelmästä johtuu, että kuoren osuus muodostuu hieman todellista suuremmaksi, kun sen oletetaan peittävän rungon vaipan myös oksan kohdalla (luku 5.2). Puuaineen kuiva-tuoretiheydessä taas jää huomioon ottamatta, että rungon sisäinen oksapuu on tiheämpää ja kiu-vempaa kuin oksaton runkopuu (luku 5.7).

Koska perusaineisto edustaa oksatonta puuainetta, kerättiin erillinen lisäaineisto, jonka kohteena oli rungon sisäinen oksapuu. Tätä varten kaadetuista ylimääräisistä koepuista sahattiin näytekiekkoja 100 cm:n välein riippumatta siitä, sattuiko näyte oksan kohdalle vai ei. Kiekkojen tyvipuolelta määritettiin ristiin mitaten poikkileikkauspinta-ala sekä planimetrillä oksapuun pinta-ala. Mittaustulosten perusteella laskettiin oksapuun tilavuusosuus. Näitä koepuita kertyi männyn ensiharvennusleimikoista 150 kpl sekä männyn toisen harvennuksen leimikoista, männyn päätehakuuleimikoista ja kuusen päätehakuuleimikoista kustakin 60 kpl. Harvennuskuusikot jätettiin lisäselvityksen ulkopuolelle.



Kuva 8. Näytekiekkojen tavoitteelliset leikkuukohtat rungon tukki-, kuitu- ja energiapuuosista.

Näytekiekkoja kertyi kaikkiaan noin 13 000 kpl. Kustakin kiekosta määritettiin läpimitta kuorineen ja kuoretta ristiin mitaten sekä laskettiin vuosilustojen lukumäärä. Ensiharvennusleimikoita lukuun ottamatta mitattiin vastaavasti myös sydänpuun läpimitta sekä 15 sisimmän vuosiluston muodostaman vyöhykkeen eli oletetun nuorpuun läpimitta. Näytekiekot punnittiin tuoreina kuorineen ilmassa ja kuorineen ja kuoretta veteen upotettuina. Lämpökaappikuivauksen jälkeen määritettiin erikseen kiekon puuaineen ja kuoren painot absoluuttisen kuivana. Näitten mittaustietojen avulla laskettiin kullekin näytekiekolle seuraavien suureiden arvot:

- Nuorpuun paksuus eli 15 sisimmän luston yhteinen leveys, mm
- Kuoren paksuus, mm
- Kuoren osuus kuorellisen puun tilavuudesta, %
- Kuoren osuus kuorellisen puun kuivamassasta, %
- Sydänpuun osuus kuorettoman puun tilavuudesta, %
- Kuorellisen puun tuoretiheys kaatohetkellä, kg/m^3
- Kuorellisen puun kuiva-tuoretiheys, kg/m^3
- Kuorettoman puun kuiva-tuoretiheys, kg/m^3
- Kuoren kuiva-tuoretiheys, kg/m^3
- Kuorettoman puun kosteussuhde, %

Näytekiekkokohtaisten tietojen perusteella laskettiin kustakin suureesta tilavuudella painotetut runkokohtaiset keskiarvot. Niiden avulla laskettiin edelleen leimikkokohtaiset keskiarvot rungoille sekä puutavaralajeille, joita olivat tukkipuu, kuitupuu ja energiapuu. Tukkipuun vähimmäisläpimittana käytettiin männyllä 15 cm ja kuusella 16 cm, ja kuitupuun vähimmäisläpimittana molemmilla puulajeilla 8 cm. Tätä läpimittaa ohuimmat rungonosat ovat energiapuuta.

Kuitu- ja energiapuun keskimääräiset ominaisuudet laskettiin leimikkotasolla myös 2 cm:n läpimittaluokittain seuraavasti: läpimitaltaan alle 4 cm:n rungonosa, 4–6 cm:n rungonosa, 6–8 cm:n rungonosa, 8–10 cm:n rungonosa ja niin edespäin. Järein kuitupuuluokka muodostui sellaisesta läpimitaltaan 16 cm ylittävästä puusta, josta ei tehty sahatukkia.

4.2. Hukkarunkopuun inventointi korjuutyömaalla

Kuitupuun tutkimusaineistosta voidaan laskea leimikkotyypeittäin, kuinka paljon ainespuurunkojen latvoissa on sellaista ohutta puuta, joka ei täytä tiettyä vähimmäisläpimittaa. Käytännön puunkorjuussa hukkarunkopuuta jää tähteksi kuitenkin enemmän kuin läpimittaraja suoranaisesti osoittaa.

Hukkarunkopuun todellinen tilavuus selvitettiin vuonna 1997 yhteensä 63 korjuutyömaalla, joista jokaisella mitattiin kymmenen pinta-alaltaan 200 m²:n ympyräkoelaa. Kuitupuun vähimmäisläpimittavaatimus oli tuolloin männyllä 7 cm ja kuusella 8 cm.

Mittauksen kohteena olivat, kukin erikseen: ainespuurunkojen latvakappaleet, pystyyn jääneet ja hakkuun yhteydessä maahan kaatuneet kasvatuskelvottomat alamittaiset rungot, tyveykset ja leikot, ylipitkät kannot sekä hakkuualalle mahdollisesti jäänyt valmis puutavara. Ainespuurunkojen latvakappaleet jaettiin läpimitan perusteella vielä seuraaviin ositteisiin: alle 5 cm, 5–6 cm, 6–7 cm, 7–8 cm ja yli 8 cm paksu osa latvakappaleesta. Inventoitujen korjuutyömaiden lukumäärät ja puutavarakeritymät nähdään taulukosta 3.

Taulukko 3. Hukkarunkopuun inventointikohteet.

	Leimikoiden lukumäärä, kpl		Ainespuukertymä, m ³ /ha	
	Männiköt	Kuusikot	Männiköt	Kuusikot
Ensiharvennus	11	10	49	57
Toinen harvennus	10	17	50	80
Päätihakkuu	7	8	157	234

5. Tulokset

5.1. Kuitupuun järeys

5.1.1. Läpimittajakauma

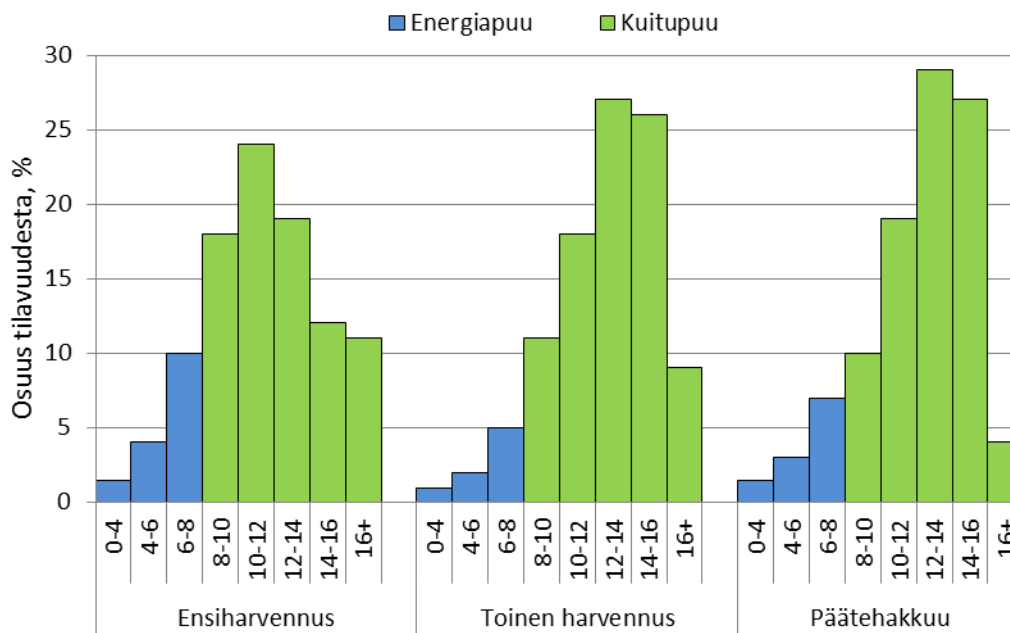
Tietyt kuitupuun tekniset ominaisuudet ja kuorintakäyttäytyminen muuttuvat pölkyn läpimitan mukaan. Kuitupuun järeys ja erityisesti pölkkyjen väliset läpimittaerot vaikuttavat kuorinnan puuhävikiin, sillä ohuet pölkkyt pyrkivät murskaantumaan paksumpien seassa. Kuitupuun vähimmäisläpimitat onkin asetettu osaksi juuri puuhävikin rajoittamista silmällä pitäen.

Leimikkotyyppien väliset erot kuitupuun järeydessä eivät ole kovin suuria, koska järeä osa rungosta tehdään tukiksi. Tässä tutkimuksessa sahatukin vähimmäisläpimittana käytettiin männyllä 15 cm ja kuusella 16 cm. Taulukko 4 osoittaa poistuman runkojen keskimääräisen rinnankorkeusläpimitan ja kuitupuun keskimääräisen, tilavuudella painotetun läpimitan leimikkotyypeittäin. Kuitupuulla kysymyksessä ei ole pölkyn latvaläpimitta vaan koko pölkyn keskimääräinen läpimitta.

Taulukko 4. Poistettujen runkojen keskimääräinen rinnankorkeusläpimitta ja kuitupuun keskimääräinen läpimitta leimikkotyypeittäin.

Leimikkotyyppi	Poistuman keskimääräinen rinnankorkeusläpimitta, cm		Kuitupuun keskiläpimitta, cm	
	Mänty	Kuusi	Mänty	Kuusi
Ensiharvennus	11,3	11,6	12,1	12,8
Toinen harvennus	17,5	19,4	12,7	13,5
Päätehakkuu	27,0	26,2	12,6	13,2

Kuva 9 osoittaa kuitu- ja energiapuuositteiden jakaantumisen läpimittaluokkiin eri leimikkotyypeissä. Kuvassa mänty ja kuusi on yhdistetty, mutta todellisuudessa kuusikuitupuuta on mäntykuitupuuta hieman järeämpää, sillä kuusi on nopeakasvuisempi ja sille asetetut tukin ja kuitupuun järeysvaatimukset ovat ankarammat. Ensiharvennuspuussa on runsaasti ohutta puuta, koska nuoren puun latva kapenee hitaasti. Ensiharvennuspuussa saattaa olla suhteellisen paljon myös läpimitaltaan yli 16 cm:n puuta, koska runkojen järeys ei vielä mahdollista tukkipuun korjuuta. Sen sijaan 12–16 cm:n puuta on ensiharvennusleimikoiden kuitupuussa niukemmin kuin muissa leimikoissa.



Kuva 9. Kuitu- ja energiapuun läpimittajakauma eri leimikkotyypeissä. Mänty ja kuusi on yhdistetty.

Kuitupuun keskimääräiseen läpimittaan vaikuttavat paitsi kuitupuun läpimittavaatimukset, myös muiden puutaralajien, kuten tukin ja energiapuun läpimittavaatimukset. Kuitupuun keskimääräinen läpimitta oli 1960-luvulla tehdyssä tutkimuksessa männyllä 11,5 cm ja kuusella 11,8 cm (Hakkila 1968). Tässä tutkimuksessa kuitupuun läpimitan keskiarvo oli männyllä 12,6 cm ja kuusella 13,3 cm. Huomattakoon, että tutkimusaineistoon ei hyväksytty sellaista puuta, jota erityisesti varttuneissa metsissä siirtyy laho- ja muiden vikojen vuoksi tukkipuusta kuitupuuksi keskiläpimittaa samalla nohtaen. Huomautettakoon että käytännön puuhankinnassa tehtaalle toimitettavien kuitupuuerien läpimitta tunnetaan tällä hetkellä puutteellisesti. Tämä johtuu kuitupuun tehdasmittauksessa valtamenetelmäksi tulleesta paino-otantamittauksesta, joka upotusmittauksella toteutettuna ei tuota läpimittatietoa (Melkas 2019). Aikaisemmin tätä tietoa saatiin otantaerien pölkyttäisellä mittauksella mittasaksilla ja joissakin tapauksissa mittausasemien automatisoiduilla kamera- ja lasermittauslaitteilla (Asikainen ym. 2009).

5.1.2. Hukkarunkopuu käytännön korjuutyömailla

Hukkarunkopuuta jää korjuutyömaille lähinnä siksi, ettei se täytä korjattavien puutaralajien mitta- ja/tai laatuvaatimuksia. Tyveyksinä ja leikkoina jää hakkuualalle myös viallista puuta, mutta toistuvasti harvennetuissa metsissä hylkäämiseen johtava vikaisuus on ainakin Suomen eteläpuoliskossa yleensä vähäistä, poikkeuksena lähinnä juurikäävän vioittamat kuusikot. Korjuutyömaiden inventoinneista voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset (taulukko 5):

- Hukkarunkopuun osuus oli suurin ensiharvennushakkuissa, 20–30 % poistumasta, koska rungot ovat niissä kooltaan pieniä. Osuus oli toisessa harvennuksessa 10–15 % ja päätehakkuussa 4–5 %.
- Hukkarunkopuuta jäi kuusikoihin enemmän kuin männiköihin, sillä pieniä alikasvosrunkoja ja lahovikaisuutta on kuusikoissa tyypillisesti enemmän samalla kun kuitupuun läpimittavaatimus on 1–2 cm suurempi.
- Noin puolet hukkarunkopuusta koostui ainespuurunkojen latvoista. Eniten latvapuuta jää nuoriin solakkamuotoisiin kuusikoihin, erityisesti jos kuitupuu tehdään hiomojen tarpeita silmällä pitäen tasapituiseksi.

- Toinen merkittävä hukkarunkopuun osite koostui pienistä kasvatuskelvottomista puista, joiden määrä riippuu metsikön käsittelystä taimikkovaiheessa.
- Tyveysten ja leikkojen määrä on normaalioloissa vähäinen. Kuusikoissa se oli kuitenkin selvästi suurempi kuin männikoissä.
- Ylipitkiin kantoihin jäävän ainespuun määrä oli yleensä selvästi alle 1 % poistumasta.
- Valmista puutavaraa jäi metsään vain vähän, ensiharvennusleimikoissa alle 0,5 % ja päätehakuuleimikoissa tuskin nimeksi.

Taulukko 5. Hukkarunkopuun määrä, koostumus ja osuus poistumasta eri leimikkotyypeissä.

	Männiköt			Kuusikot		
	Ensiharvennus	Toinenharvennus	Päätehakuu	Ensiharvennus	Toinenharvennus	Päätehakuu
	Tilavuus, m ³ /ha					
Maahan kaatuneet*	3,7	0,8	1,4	8,0	4,3	1,6
Pystyyn jääneet*	1,9	0,7	0,7	2,5	2,5	1,2
Ainespuun latvat	7,5	5,4	3,9	9,7	7,2	5,9
Tyveykset ja leikot	0,2	0,1	0,1	0,6	1,0	2,2
Valmis puutavara	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1
Ylipitkät kannot	0,7	0,4	1,0	0,4	0,7	0,7
Yhteensä	14,2	7,6	7,3	21,4	16,0	11,7
	Osuus poistumasta, %					
Yhteensä	22,9	13,5	4,3	27,0	16,0	4,8

*Alamittaiset rungot

Taulukko 6. Ainespuurungoista jääneiden latvakappaleiden keskimääräinen tyviläpimitta kuoren päällä käytännön korjuutyömailla.

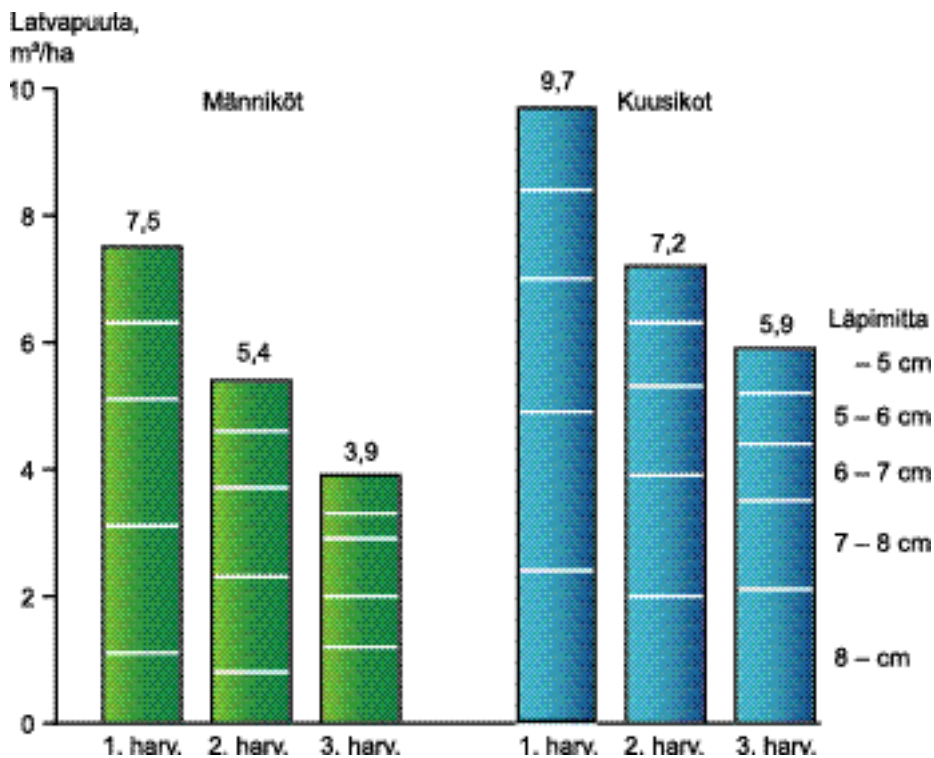
	Läpimitta, cm	
	Mänty	Kuusi
Kuitupuun läpimittavaatimus	7,0	8,0
Latvan todellinen katkaisuläpimitta		
Ensiharvennus	7,9	8,6
Toinenharvennus	7,8	8,6
Päätehakuu	8,6	9,1

Hukkarunkopuu on potentiaalista energiapuuta. Ainespuurunkojen latvojen järein osa on myös potentiaalista kuitupuuta. Ensiharvennuskuusikoihin jäi hukkapuuinventoinnin leimikkoaineistossa tärkeeksi hehtaaria kohti 7 m³ sellaista latvapuuta, jonka läpimitta ylitti 6 cm. Lisäksi myös alamittaisissa rungoissa oli käytetyn vähimmäisläpimitan ja -pituuden täyttävää kuitupuuta.

Latvan katkaisukohta oli tässä tutkimuksessa keskimäärin noin 1 cm paksumpi kuin kuitupuun vähimmäisläpimitan vaatimus (taulukko 6). Latvassa nopeasti kapenevissa järeissä rungoissa se on pak-

sumpi kuin solakoissa ensiharvennusrungoissa. Tulosta ei voida suoraan yleistää koskemaan nykyistä hakkuutapaa, jossa käytetään vapaapituista kuitupuuta, niin sanottua rankaa. Tässä tutkimuksessa läpimitaltaan alle 8 cm:n rungonosa luokiteltiin energiapuuksi leimikkotyypistä riippumatta.

Kuva 10 osoittaa latvakappaleiden kuorellisen puuaineen jakaantumisen eri läpimittaluokkien runkopuun kesken. Esimerkiksi ensiharvennushakkuissa jää paksuudeltaan yli 7 cm:n latvapuuta männiköihin noin 3 m³/ha ja kuusikoihin 5 m³/ha. Päätehakkuleimikoissa, joissa poistettavien runkojen lukumäärä on pieni ja rungot kapenevat latvassa nopeasti, vastaavat luvut ovat 2 m³/ha ja 3 m³/ha.



Kuva 10. Ainespuurunkojen latvakappaleiden tilavuus ja kertymän läpimittarakenne erilaisissa leimikkokohteissa Etelä-Suomessa. Kuitupuun läpimittavaatimus männyllä 7 cm ja kuusella 8 cm.

5.2. Kuori

5.2.1. Kuoren rakenne ja merkitys

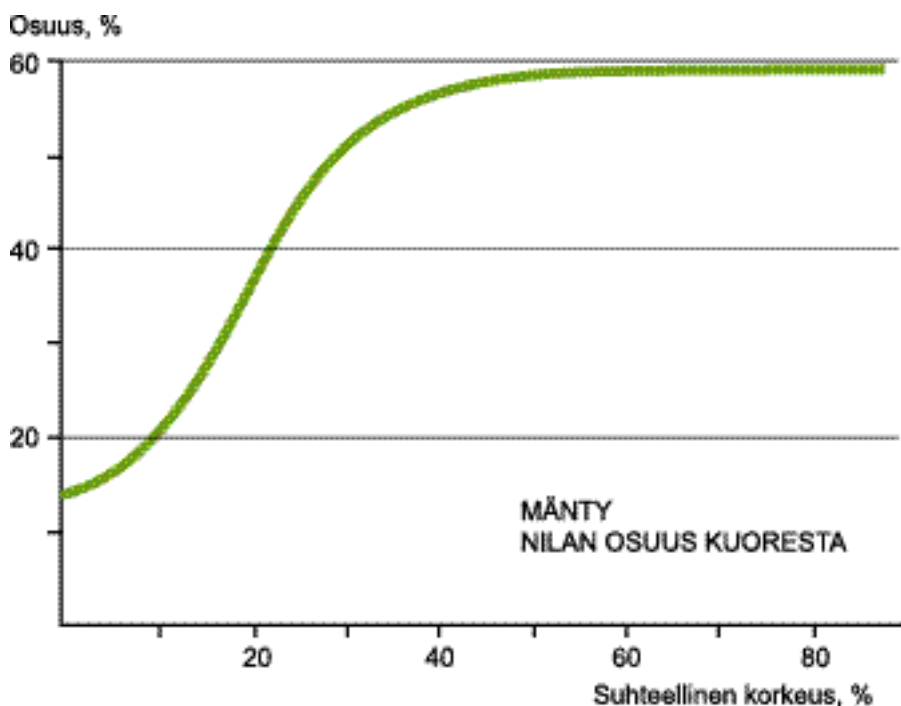
Kuori koostuu runko-, oksa- ja juuripuuta verhoavan jällen ulkopuolella olevista solukoista. Se jakaantuu *sisäkuoreen eli nilaan ja ulkokuoreen*.

Sisäkuori toimii johtosolukkona, jota pitkin yhteyttämistuotteet kulkeutuvat lehdistä puun muihin osiin. Se toimii myös varastosolukkona. Sisäkuori koostuu nesteiden ja yhteyttämistuotteiden kulku-teinä toimivista *siiviläsoluista*, varastosolukkona toimivista vaaka- ja pystysuuntaisista *tylppysoluista* sekä tukisolukkona toimivista *niinisoluista* ja *kivisoluista* eli sklereideistä.

Ulkokuoren tehtävänä on suojata sisäpuolellaan olevia solukoita kuivumiselta, lämpötilan vaihtelulta, tulelta, biottisilta tuhoilta ja mekaanisilta vaurioilta. Ulkokuoren solut syntyvät, kun kuorivaipassa oleva *korkkijälsi* jakaantuu ja tuottaa ulkopuolelleen *korkkisoluja*, jotka kuolevat pian syntymänsä

jälkeen. Koska korkkisolukko ei pysty laajenemaan puun kasvaessa paksuutta, se halkeilee ja muuttuu rosoiseksi kaarnaksi.

Sisä- ja ulkokuoren keskinäisellä suhteella on merkitystä kuoren käytön kannalta, sillä nämä kaksi kuorivyöhykettä eroavat koostumukseltaan ja ominaisuuksiltaan. Koska ulkokuori ohentuu ja sisäkuoren paksuus pysyy miltei ennallaan tyvestä latvaan, sisäkuoren suhteellinen osuus kasvaa vastavasti. Tästä on esimerkkinä kuva 11, joka osoittaa sisäkuoren osuuden mäntyrungon eri korkeuksilla. Osuus on rungon paksukaarnaisessa tyvässä vain 15 % mutta ohutkuorisessa latvassa 60 % kuoren kuivamassasta.



Kuva 11. Nilan osuus mäntyn kuoren kuivamassasta rungon eri korkeuksilla (Hakkila 1967).

Kuoressa on runsaasti ligniiniä ja uuteaineita. Vesi- ja eetteriliukoisten uuteaineiden osuus mäntyn ja kuusen kuoren kuivamassasta on noin 25 % (Norin ja Fremer 1977). Sjöströmin (1993) tutkimuksessa kuoren uuteaineiden osuudeksi havaittiin 20–40 %. Mineraaliaineiden määrä on runkopuuhun verrattuna moninkertainen. Kun tuhkapitoisuus on puuaineessa vain 0,4–0,5 %, se on kuoressa vastavasti 2–4 %, pienillä puilla korkeampi kuin suurilla (Hakkila ja Kalaja 1983). Useimmat kuoren solut ovat lyhyitä, ja lähinnä vain siiviläsolut ovat kuituominaisuuksiltaan kutakuinkin kelvollista puumas-
san raaka-ainetta. Siksi sellun saanto kuoresta on heikko. Kuori alentaa keittokattilan kapasiteettia, lisää kemikaalien kulutusta, alentaa massan puhtautta ja laatua ja aiheuttaa paperia valmistettaessa pihkaongelmia. Kuori alentaa huomattavasti massan vaaleutta. Jo 0,5–1,5 % kuorta prosessissa aiheuttaa 5–10 % laskun vaaleudessa (Suuronen 2017).

Kuitupuuta on siis kuorittava. Kuoren irrottaminen on helpointa kasvukauden alkupuolella tai kun puutavaraa on säilytetty vesivarastossa. Puutavaran kuivuessa tai jäätyessä puun ja kuoren välinen sidoslujuus kasvaa ja kuoriminen vaikeutuu (Hakkila ja Verkasalo 2009).

Hakkeeseen jääneen kuoren määrä vaikuttaa raaka-aineen kulutukseen ja arvoon. Kemiallisen massan raaka-aineessa sallitaan yleensä enintään 1 % kuorta – joskin nykyaikaisissa rumpukuorimoissa päästään paljon parempaan tulokseen – ja mekaanisen massan raaka-aineessa kuorta sallitaan

yleensä enintään 0,5 % (Hakkila ja Verkasalo 2009). Vaatimukset kiristyivät 1990-luvulla, kun puumassan valkaisuun luovuttiin kloorin käytöstä.

Kuori hyödynnetään sellutehtailla energian tuotannossa. Polttoainekäyttöä vaikeuttaa kuoren korkea kosteus. Vuonna 2018 Suomessa käytettiin kaikkiaan 7,7 milj. m³ tukki- ja kuitupuun kuorta energian tuotantoon (Luonnonvarakeskus, tilastopalvelut).

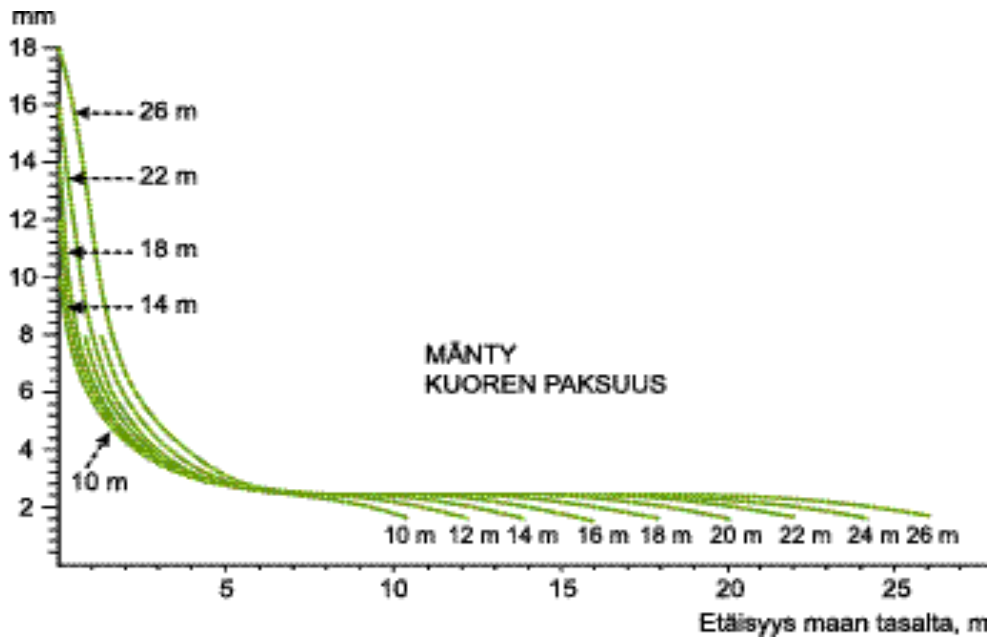
5.2.2. Kuoren paksuus

Kuori on paksuinta rungon tyvellä. Näin on erityisesti varttuneilla männyillä, jotka paksun eristävän tyvikaarnansa ansiosta pystyvät suojautumaan myös metsäpaloja vastaan.

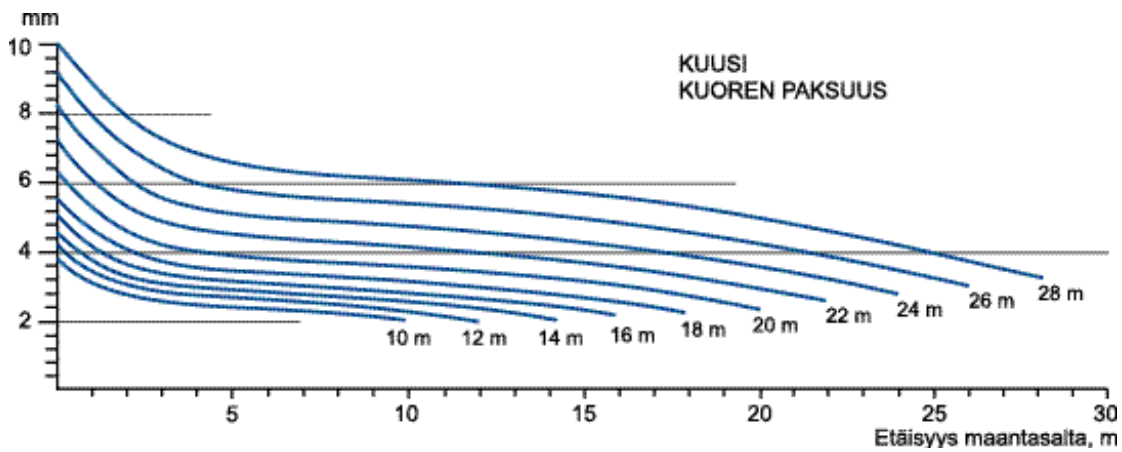
Männyn kuoren paksuus oli tässä tutkimuksessa kannon korkeudella ensiharvennusleimikoissa noin 10 mm ja päätehakkuuleimikoissa 15–20 mm. Suurissakin männyissä kaarna muuttui hilsekuoreksi viimeistään tyvitukin latvassa, mihin mennessä se ohentui yleensä alle 3 mm:n. Rungon latvassa kuoren paksuus putosi männyllä alle 2 mm:n (kuva 12).

Kuuselta puuttuu paksu tyvikaarna. Kuusen kuoren paksuus oli ensiharvennusleimikoissa kannon korkeudella noin 4 mm ja järeissä päätehakkuuleimikoissakin vain vajaat 10 mm eli saman verran kuin männyn ensiharvennusleimikoissa. Kuusen kuoren paksuus alenee latvaa kohti hiljalleen koko rungon matkan mutta ei putoa latvassa aivan yhtä ohueksi kuin männyllä. Rungon koon vaikutus kuoren paksuuteen on selvä myös ylimmässä latvassa, eivätkä eripituisten puiden kuoren paksuus-käyrät yhdy kuusella samalla tavoin kuin männyllä (kuva 13).

Kuori on ohuinta ensiharvennusleimikoissa ja paksuinta päätehakkuuleimikoissa. Kun runko jaetaan puutavaralajeiksi, järeiden puiden paksukuorinen osa jää tukkipuuhun. Koska ensiharvennusleimikosta ei saada juurikaan tukkipuuta, suurin osa tyvistä jää kuitupuuksi. Sen seurauksena mäntykuitupuun kuori onkin paksuinta ensiharvennusleimikoissa ja ohuinta päätehakkuuleimikoissa, joissa tyvipölkkyjä jää kuitupuuhun vain vähän. Mäntytukkien kuori taas on paksuinta toisen harvennuksen leimikoissa, koska tukkikertymä koostuu pääasiassa tyvipölkkyistä. Kuusella rungon koko vaikuttaa kuoren paksuuteen niin voimakkaasti, että kuitupuun kuori päinvastoin kuin männyllä on ohuinta ensiharvennusleimikoissa ja paksuinta päätehakkuuleimikoissa. Erot leimikkotyyppien välillä olivat tässä tutkimuksessa kuusella kuitenkin pieniä (taulukko 7).



Kuva 12. Männyän kuoren paksuus rungon pituussuunnassa puun pituuden suhteen.

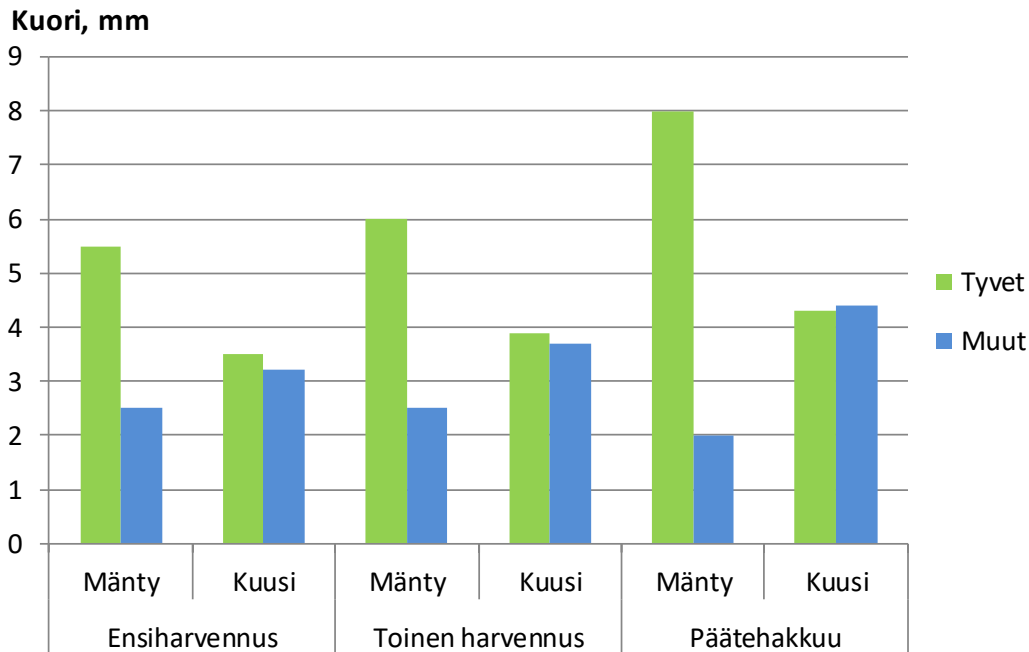


Kuva 13. Kuusen kuoren paksuus rungon pituussuunnassa puun pituuden suhteen.

Taulukko 7. Männyän ja kuusen puutavaralajien kuoren paksuus leimikkotyypeittäin.

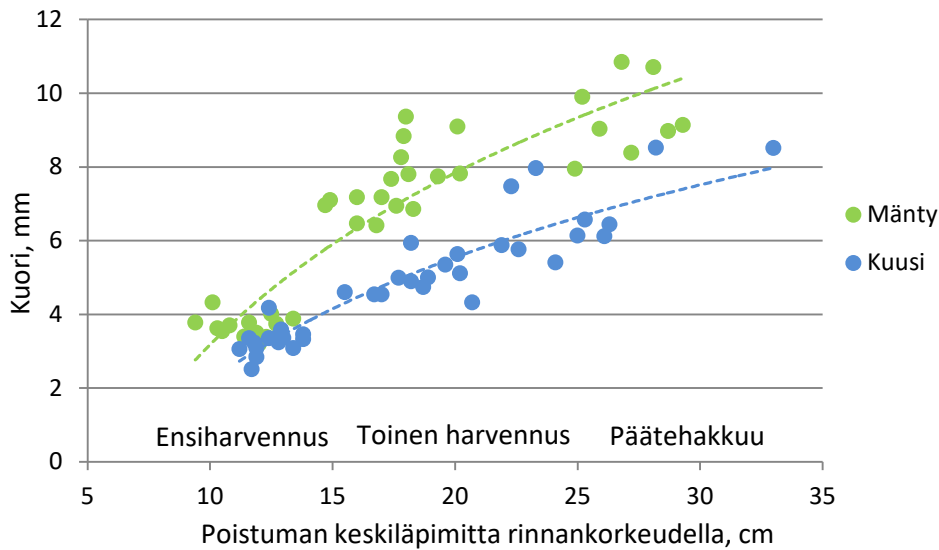
Puulaji	Leimikkotyyppi	Kuoren paksuus, mm			
		Tukkipuu	Kuitupuu	Energiapuu	Koko runko
Mänty	Ensiharvennus		5,0	2,3	4,6
	Toinen harvennus	7,0	3,6	2,1	5,1
	Päätehakkuu	5,8	2,4	2,1	5,4
	Keskiarvo		3,0		
Kuusi	Ensiharvennus		3,4	2,4	3,3
	Toinen harvennus	4,7	3,8	2,8	4,3
	Päätehakkuu	6,3	4,4	3,4	6,1
	Keskiarvo		4,2		

Jos leimikon kuitupuuosite jaetaan tyvipölkkyihin ja muihin pölkkyihin, männyllä tapahtuu kuoren paksuuden suhteen tehokas lajittelu. Kuusella ositteiden erot kuoren paksuudessa ovat sen sijaan merkityksettömiä (kuva 14). Tosin ositteiden välillä on eroja kuoren kuiva-tuoretiheydessä, joka ehkä vaikuttaa puun kuoriutuvuuteen (luku 5.2.3). Siksi tyvipölkkyjen erillinen rumpukuorinta helpottaisi kuorinnan optimointia ja ajoarvojen täsmäämistä puun kuoriutuvuuden mukaan ja saattaisi parantaa kuorintatulosta puhtauden ja kuorintahävikin suhteen.

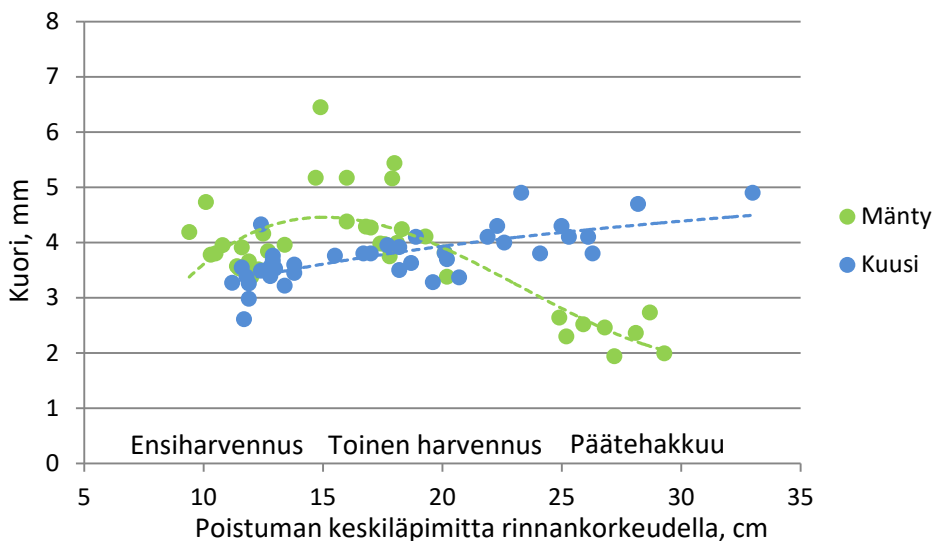


Kuva 14. Mänty- ja kuusikuitupuun kuoren paksuus tyvipölkkyissä ja muissa pölkkyissä leimikkotyypeittäin.

Leimikoiden väliset erot koko rungon kuoren keskimääräisessä paksuudessa aiheutuvat ensisijassa järeyseroista, mutta järeyस्कään ei selitä kaikkea vaihtelua. Pelkän kuitupuositteen osalta leimikoiden välinen vaihtelu on pienempi. Mäntykuitupuun kuori on paksuinta sellaisissa toisen harvennuksen leimikoissa, joissa suuri osa tyvipölkkyistä jää kuitupuuhun. Kuusella taas kuitupuun kuori on tukkipuuosuuden vaikuttamatta sitä paksumpaa, mitä järeämmästä leimikosta kuitupuu on peräisin (kuvat 15 ja 16).



Kuva 15. Mänty- ja kuusirungon kuoren keskimääräinen paksuus leimikoittain rinnankorkeusläpimitan keskiarvon suhteen.



Kuva 16. Mänty- ja kuusikuitupuun kuoren keskimääräinen paksuus leimikoittain rinnankorkeusläpimitan keskiarvon suhteen.

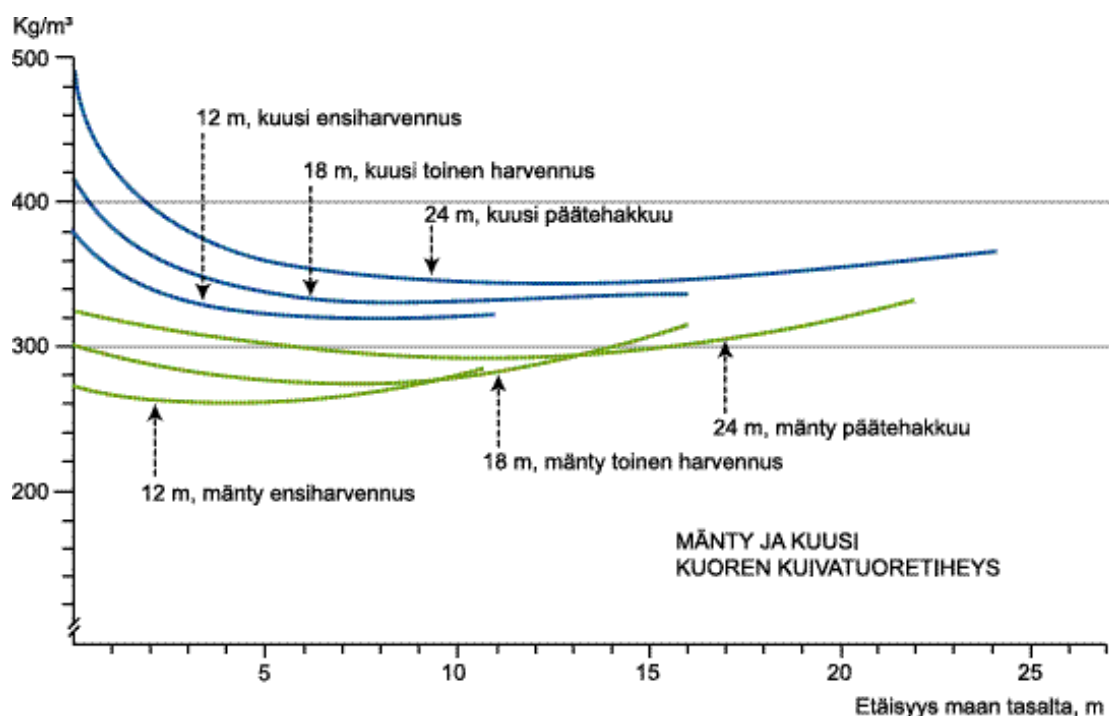
5.2.3. Kuoren kuiva-tuoretiheys

Kuoren kuiva-tuoretiheys osoittaa kuoren kuivamassan tuoreessa tilassa mitattua kiintotilavuutta kohti. Koska teollisuuspuu käytetään kuorettomana ja kuoren kiintotilavuuden määrittäminen on menetelmällisesti varsin hankalaa, kuoren kuiva-tuoretiheyden vaihtelua on tutkittu varsin vähän (esim. Hakkila 1967, Kärkkäinen 1976, ks. myös Hakkila ja Verkasalo 2009). Kärkkäinen (1976) on määrittänyt kuiva-tuoretiheydeksi mäntytuokeilla kaarnakuoressa 309 kg/m^3 ja muussa kuoressa 301 kg/m^3 ja kuusituokeilla vastaavasti 409 kg/m^3 ja 365 kg/m^3 .

Kuoren kuiva-tuoretiheyden tunteminen on tarpeellista muun muassa seuraavissa yhteyksissä:

- Jos kuorellisen kuitupuun määrää tarkastellaan tilavuuden sijasta kuivamassana, kuoren osuus muuttuu, koska kuoren ja puuaineen kuiva-tuoretiheydet poikkeavat toisistaan.
- Kun kuitupuun kuori käytetään energian tuotantoon, sen lämpöarvo tulee tuntea. Tilavuutta kohti laskettu tehollinen lämpöarvo (energiatiheys) muuttuu kuiva-tuoretiheyden mukaan.

Tässä tutkimuksessa kuoren kuiva-tuoretiheys laski ensin rungon tyvestä latvaa kohti. Erityisesti kuusella muutos oli selvä. Ylempänä rungossa kuiva-tuoretiheys kääntyi loivaan nousuun. Järeeissä rungoissa kuori oli tiheämpää kuin ohuissa (kuva 17). Kuusen kuoren kuiva-tuoretiheys oli noin 30 % korkeampi kuin männyn, mikä on otettava huomioon laskettaessa kuoren energiasisältöä.



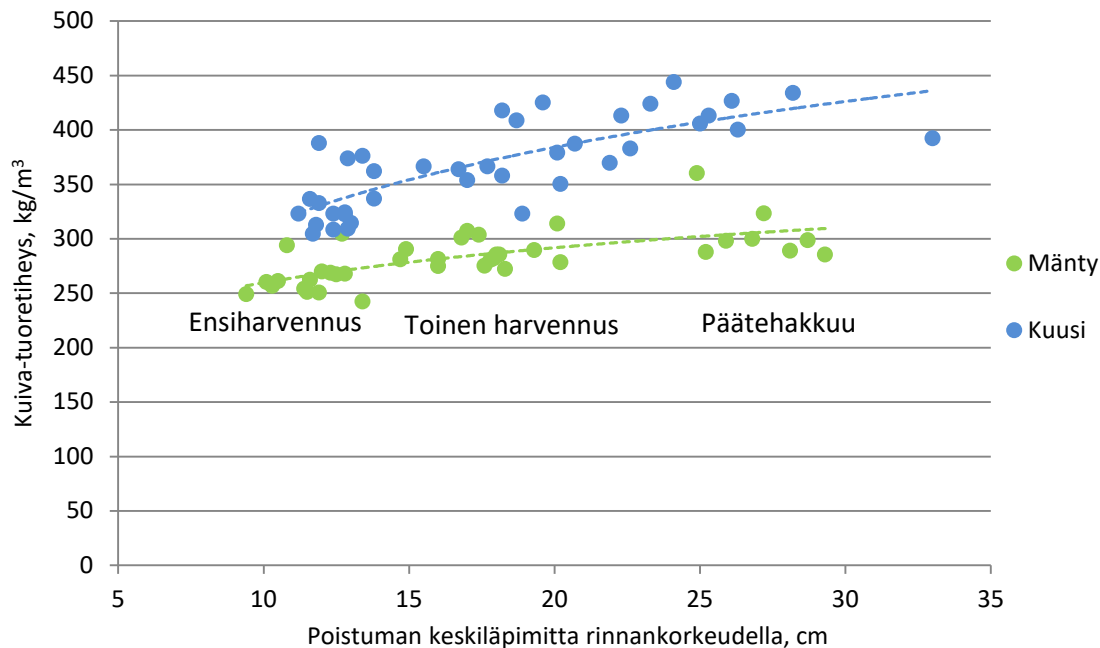
Kuva 17. Männyn ja kuusen kuoren kuiva-tuoretiheys eri pituisilla puilla (12, 18 tai 24 m) korkeuden suhteen.

Taulukko 8. Männyn ja kuusen kuoren kuiva-tuoretiheys puutavaralajin ja leimikkotyypin mukaan.

Puulaji	Leimikkotyyppi	Kuoren kuivatuoretiheys, kg/m ³			
		Tukkipuu	Kuitupu	Energiapuu	Koko runko
Mänty	Ensiharvennus		260	275	263
	Toinen harvennus	285	280	294	283
	Päätihakkuu	299	293	317	299
	Keskimäärin		286		
Kuusi	Ensiharvennus		339	318	336
	Toinen harvennus	379	340	336	364
	Päätihakkuu	386	348	348	381
	Keskimäärin		346		

Koska kuoren kuiva-tuoretiheys on suurin rungon tyvellä ja järeissä rungoissa, se oli tukkipuussa suurempi kuin kuitupuussa (taulukko 8). Kummallakin puulajilla kuiva-tuoretiheys on kuorella pienempi kuin puuaineessa, poikkeuksena vain kuusen tyvipölkät (vrt. taulukko 15).

Kuoren kuiva-tuoretiheys vaihtelee leimikoittain. Kun leimikko järeytyy, kuoren kuiva-tuoretiheys kasvaa. Selittämättä jäänyt vaihtelu leimikoiden välillä oli tässä tutkimuksessa kuusella suurempi kuin männyllä (kuva 18).

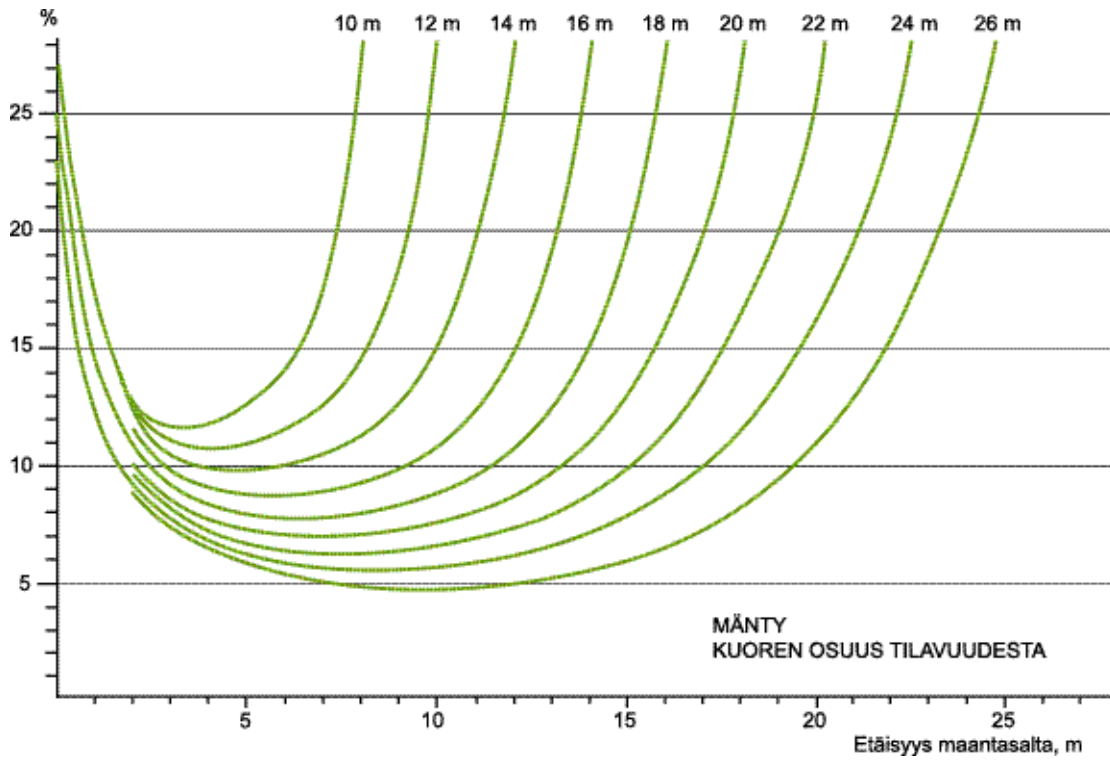


Kuva 18. Mänty- ja kuusirunkojen kuoren kuiva-tuoretiheys leimikoittain rinnankorkeusläpimitan keskiarvon suhteen.

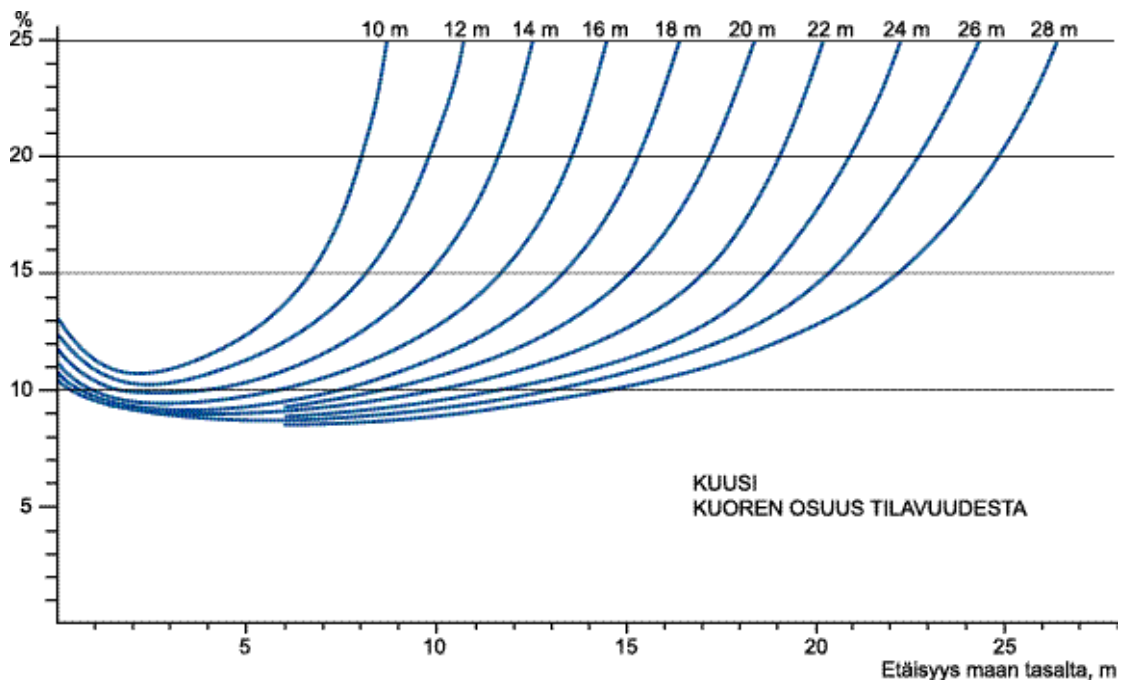
5.2.4. Kuoren tilavuus- ja kuivamassaosuus

Kuoren osuus ilmoitetaan puun *kuorelliseen tilavuuteen tai massaan suhteutettuna*. Osuus laskee rungon tyveltä latvaa kohti. Muutos on männyllä jyrkempi kuin kuusella, ja se jatkuu sitä ylemmäksi mitä järeämpi puu on kysymyksessä. Kaikissa rungoissa lasku kuitenkin ennen pitkää tasaantuu ja kääntyy nousuksi, kun kuori ei enää juurikaan ohennu vaikka runko edelleen kapenee. Tilavuusosuus oli pienimmillään järeiden mäntyrunkojen keskiosassa vain 5 % (kuvat 19 ja 20).

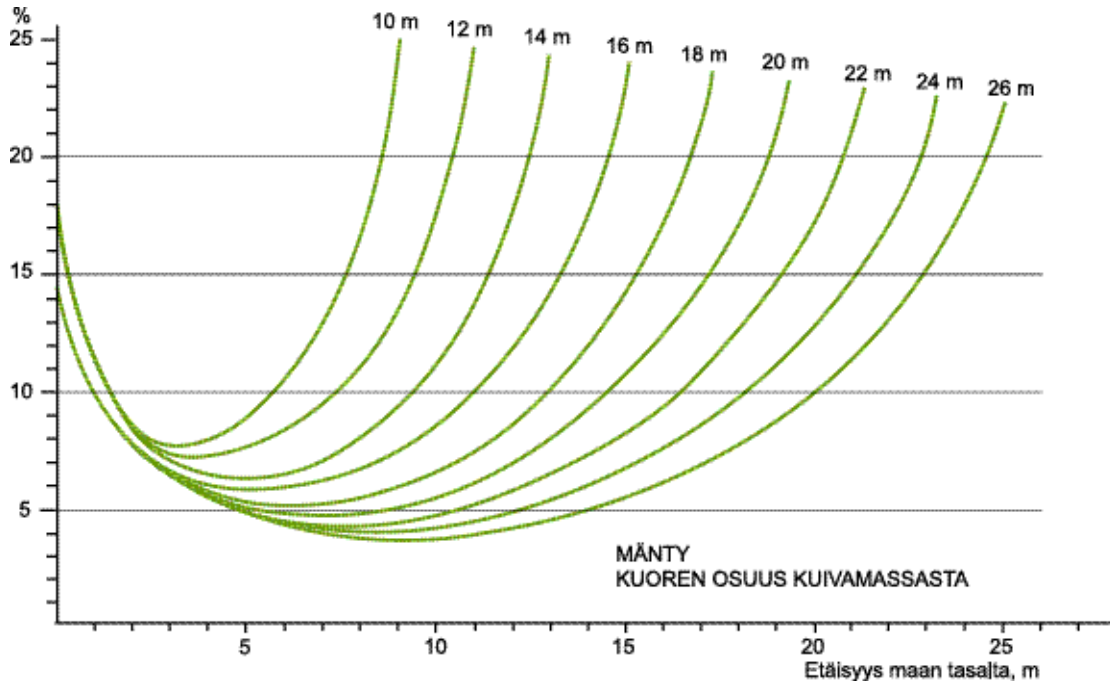
Koska kuoren kuiva-tuoretiheys on alempi kuin puuaineen, kuoren kuivamassaosuus on tilavuusosuutta pienempi. Männyllä ero on merkittävä rungon kaikissa osissa. Järeiden mäntyrunkojen keskiosassa kuoren kuivamassaosuus oli vain 4 % (kuva 21).



Kuva 19. Kuoren tilavuusosuuden vaihtelu mäntyrungon pituussuunnassa puun pituuden suhteen.

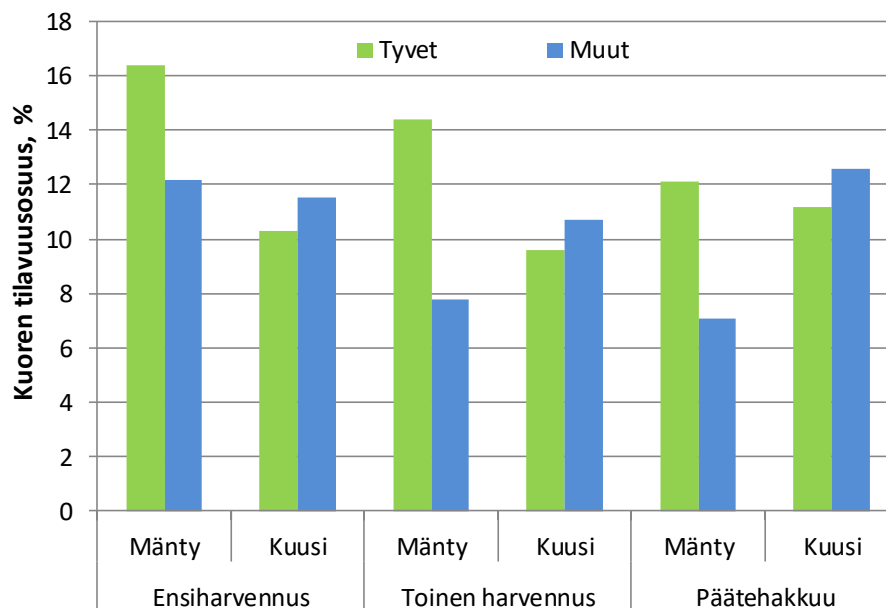


Kuva 20. Kuoren tilavuusosuuden vaihtelu kuusirungon pituussuunnassa puun pituuden suhteen.

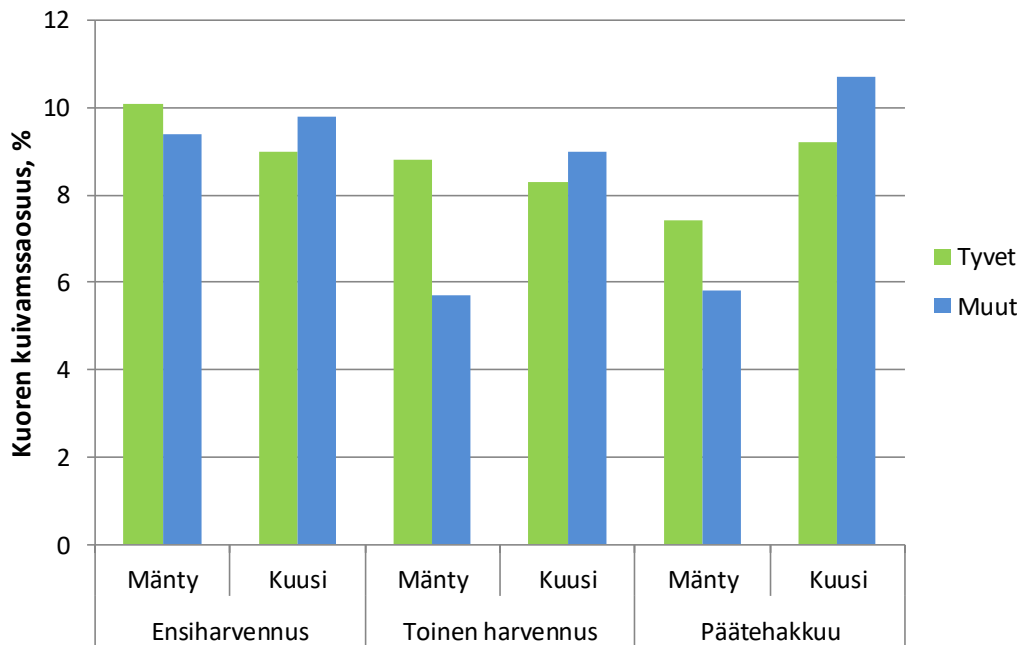


Kuva 21. Kuoren kuivamassaosuuden vaihtelu mäntyrungon pituussuunnassa puun pituuden suhteen.

Jos kuitupuu jaetaan tyvipölkkyihin ja muihin pölkkyihin, männyllä saadaan aikaan ositteiden välille suuria eroja kuoren tilavuusosuudessa (kuva 22). Kuivamassaosuuden suhteen erot jäävät pienemmiksi, mikä aiheutuu pikemminkin puuaineen kuin kuoren tiheyden eroista puun eri korkeuksilla (kuva 23). Kuusella ositteiden erot ovat pieniä ja suunnaltaan päinvastaisia kuin männyllä.



Kuva 22. Kuoren tilavuusosuus kuitupuun tyvipölkkyissä ja muissa pölkkyissä.



Kuva 23. Kuoren kuivamassaosuus kuitupuun tyvipölkkyissä ja muissa pölkkyissä.

Koko rungossa kuoren keskimääräinen tilavuusosuus oli leimikkotyyppin mukaan männyllä 8–15 % ja kuusella 9–11 %. Männyllä kuivamassaosuudet olivat kolmanneksen pienempiä kuin tilavuusosuudet. Puutavaralajeista kuorta oli eniten latvojen energiapuussa, ensiharvennusmänniköiden kuitupuussa sekä toisen harvennuksen mäntytuokeissa, joista pääosa oli tyvipölkkyjä (taulukko 9). Päätehakkuiden mäntykuitupuun taulukkoarvot edustavat sellaista kuitupuuta, johon ei ole sekoittunut vikaisuusien vuoksi hylättyä tukkipuuta.

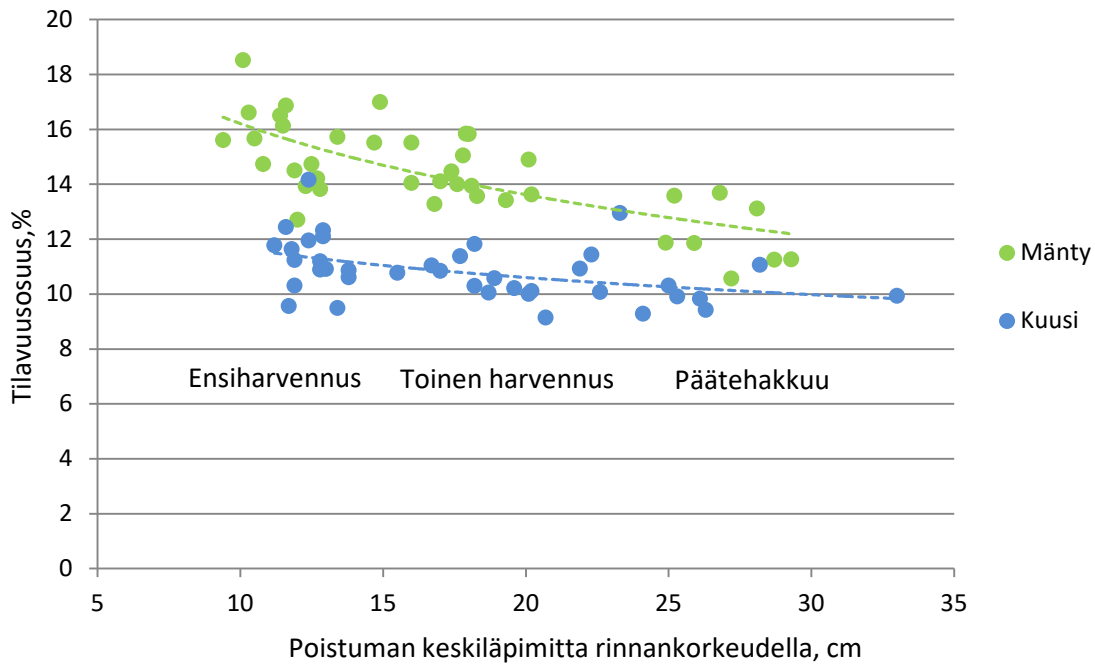
Koko rungon osalta kuoren tilavuusosuus oli männiköissä suurempi, mutta kuivamassaosuus pienempi kuin kuusikoissa (kuvat 24 ja 25). Kun leimikoittainen tarkastelu rajoitettiin pelkkään kuitupuuhun, asetelma hieman muuttui. Kuoren tilavuus- ja kuivamassaosuudet olivat silloin ensiharvennusleimikoissa suurempia männyllä mutta päätehakkuuleimikoissa kuusella (kuvat 26 ja 27).

Tämän tutkimuksen aineistossa kuitupuun kuoren tilavuusosuus oli Etelä-Suomessa männyllä 8,9 % ja kuusella 11,8 %. Saikun ja Rikkosen (1976) laajassa käytännön hakkuukohteilta kerätystä aineistossa kuitupuun kuoren osuus oli männyllä ja kuusella vastaavasti 11,9 % ja 11,8 %. Kuusella tulokset olivat siis yhteneväiset, mutta männyllä ero oli suuri. Männyllä eroon saattoivat vaikuttaa puustojen nuorempi ikä ja harvennusten suurempi osuus tässä tutkimuksessa ja mahdollisesti tukin ja kuitupuun erilainen rajakohta rungossa apterauksen erilaisuuden vuoksi. Osasyynä saattoi olla raakittukien puuttuminen tämän tutkimuksen kuitupuunaineistosta, tosin toiseen suuntaan saattoi vaikuttaa pieniläpimittaisen energiapuun käsittely erillään kuitupuusta.

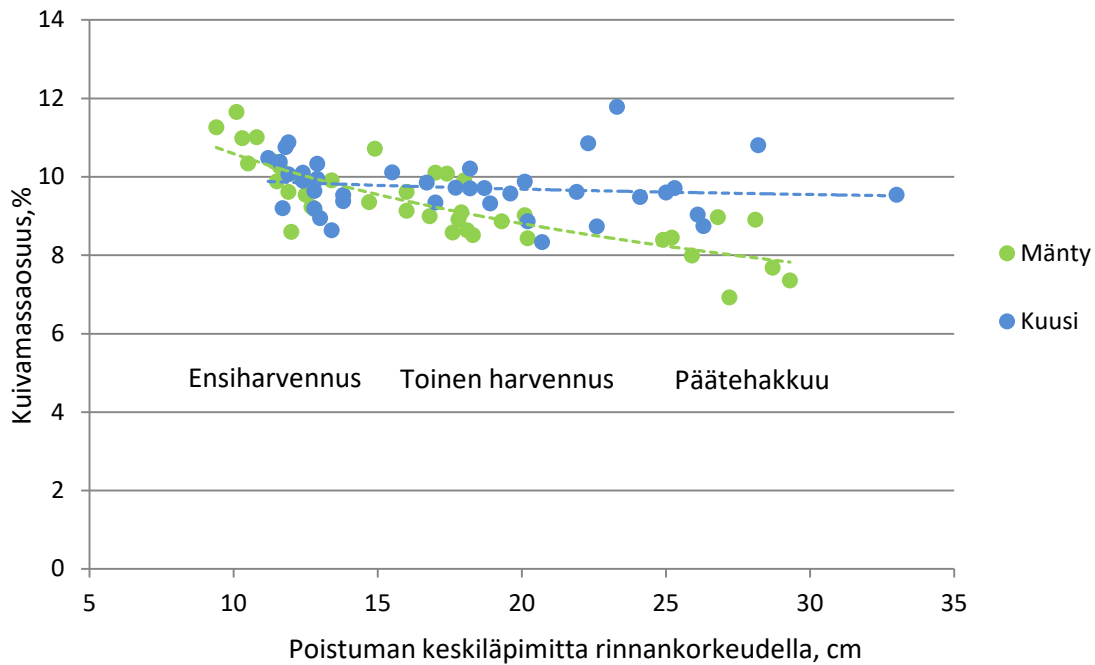
Leimikoiden väliset erot selittyvät ainakin männyllä pitkälti puuston järeydellä ja leimikkotyypillä. Varsinkin kuusella kuoren määrään vaikuttavat myös maantieteellinen sijainti sekä kasvupaikka siten, että kuoriosuus on suurin pohjoisessa ja karuilla kasvupaikoilla (Heiskanen ja Rikonen 1976, Saikku ja Rikonen 1976).

Taulukko 9. Männyn ja kuusen puutavaralajien kuoriosuus tilavuuden ja kuivamassan suhteen leimikkotyypeittäin.

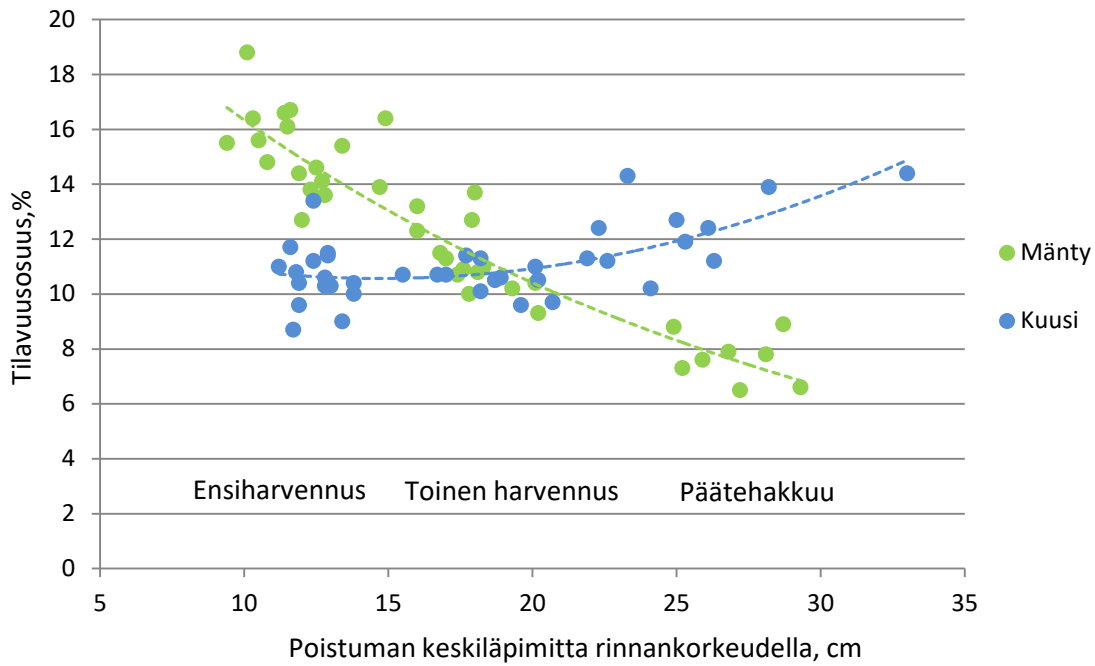
Puulaji	Leimikkotyyppi	Kuoren tilavuusosuus, %			
		Tukkipuu	Kuitupuu	Energiapuu	Koko runko
Mänty	Ensiharvennus		15,1	14,7	15,1
	Toinen harvennus	11,9	10,1	11,9	11,1
	Päätehakkuu	8,6	7,1	11,3	8,5
	Keskiarvo		8,9		
Kuusi	Ensiharvennus		10,6	15,7	11,3
	Toinen harvennus	8,6	10,4	15,9	9,5
	Päätehakkuu	8,8	12,5	18,2	9,6
	Keskiarvo		11,8		
		Kuoren kuivamassaosuus, %			
		Tukkipuu	Kuitupuu	Energiapuu	Koko runko
Mänty	Ensiharvennus		9,6	10,8	9,9
	Toinen harvennus	6,9	6,8	10,1	7,0
	Päätehakkuu	5,5	5,8	10,2	5,6
	Keskiarvo		6,5		
Kuusi	Ensiharvennus		9,2	13,4	9,8
	Toinen harvennus	7,9	8,8	14,0	8,4
	Päätehakkuu	8,5	10,6	15,9	8,7
	Keskiarvo		9,9		



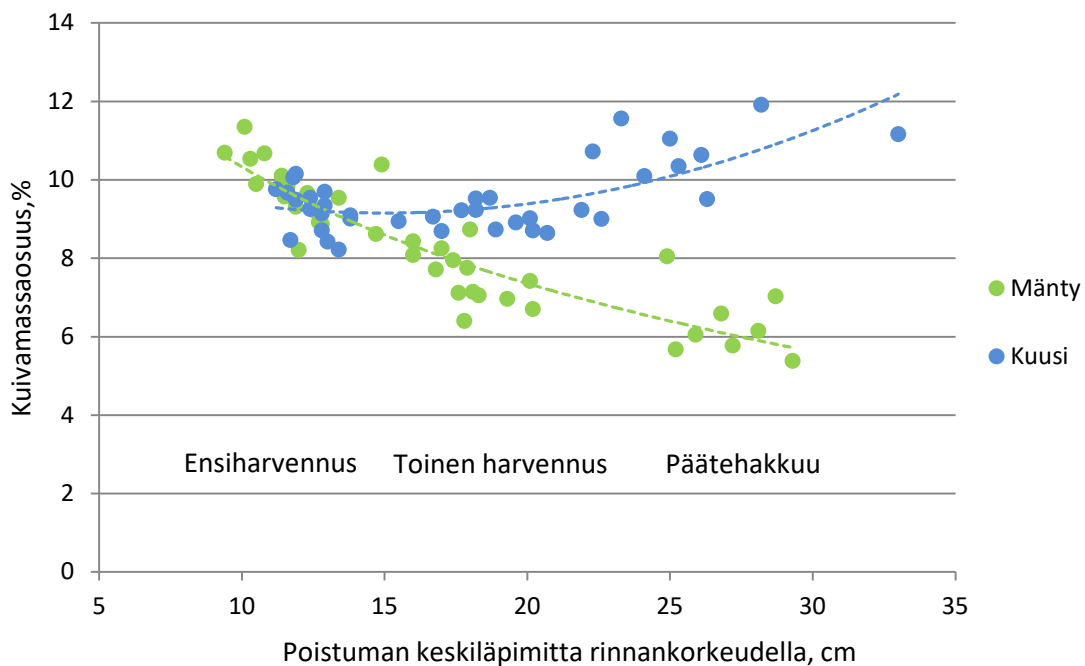
Kuva 24. Mänty- ja kuusirungon kuoren tilavuusosuus leimikoittain rinnankorkeusläpimitan keskiarvon suhteen.



Kuva 25. Mänty- ja kuusirungon kuoren kuivamassaosuus leimikoittain rinnankorkeusläpimitan keskiarvon suhteen.



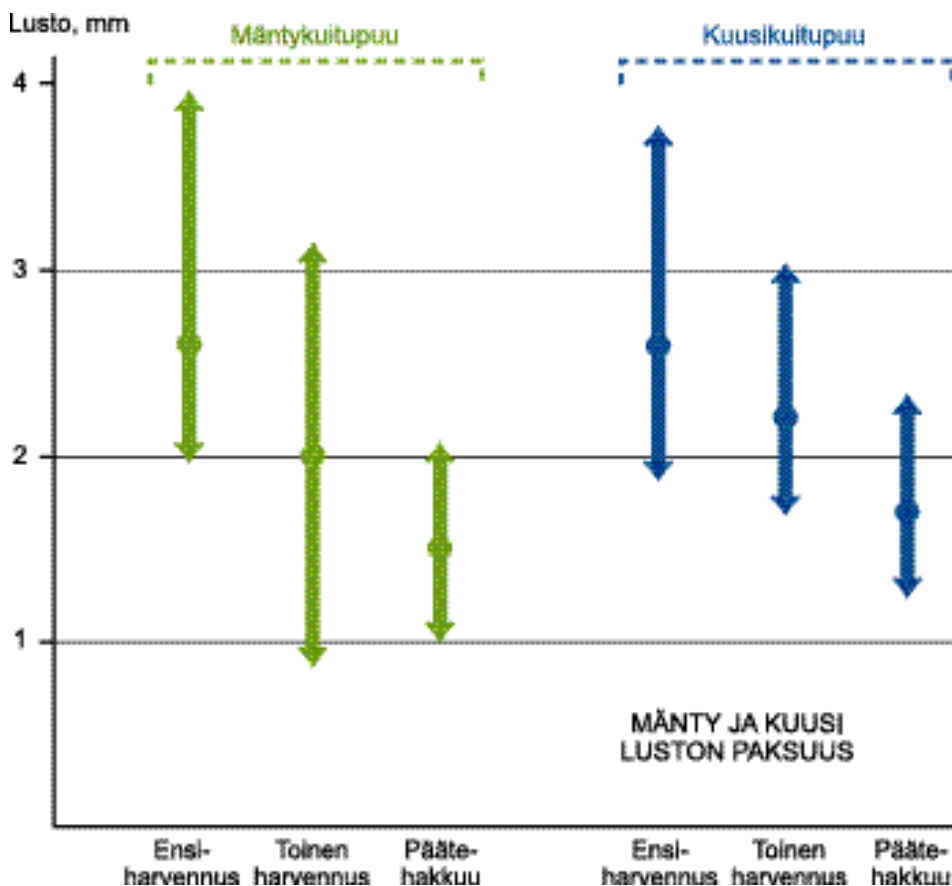
Kuva 26. Mänty- ja kuusikuitupuun kuoren tilavuusosuus leimikoittain rinnankorkeusläpimitan keskiarvon suhteen.



Kuva 27. Mänty- ja kuusikuitupuun kuoren kuivamassaosuus leimikoittain rinnankorkeusläpimitan keskiarvon suhteen.

5.3. Luston leveys

Useat puuaineen tekniset ominaisuudet muuttuvat luston leveyden suhteen, jota niin ollen voidaan käyttää puun laatutekijänä (esim. Kärkkäinen 1984). Nopeakasvuinen havupuuna on heikkoa useimmilta mekaanisilta ominaisuuksiltaan ja mitta- ja muotopysyvyydeltään, ja monissa maissa luston leveys otetaan huomioon sahatavaran laatuluokituksessa (esim. Kärkkäinen 2007). Riippuvuus on havupuilla selvempi kuin lehtipuilla. Puuston kasvun nopeutuminen johtaa metsikkötaloudessa myös kiertoajan lyhenemiseen ja hakkuiden aikaistumiseen, eli leveälustoinen kuitupuuna on usein myös nuorta (ks. luku 5.4).



Kuva 28. Mänty- ja kuusikuitupuun luston leveyden keskiarvot leimikkotyypeittäin ja leimikoittaiset vaihteluvälit.

Luston leveys vaihtelee kasvupaikan viljavuuden, ilmasto-olojen, puuston iän ja metsikön käsittelyhistorian mukaan (Hakkila ja Verkasalo 2009). Luston leveyden sovellusarvoa puun laadun mittarina vähentää läpimitan kasvunopeuden vaihtelu puun elinaikana niin, että samassa pölkkyssä on usein sekä leveä- että kapealustoista puuta.

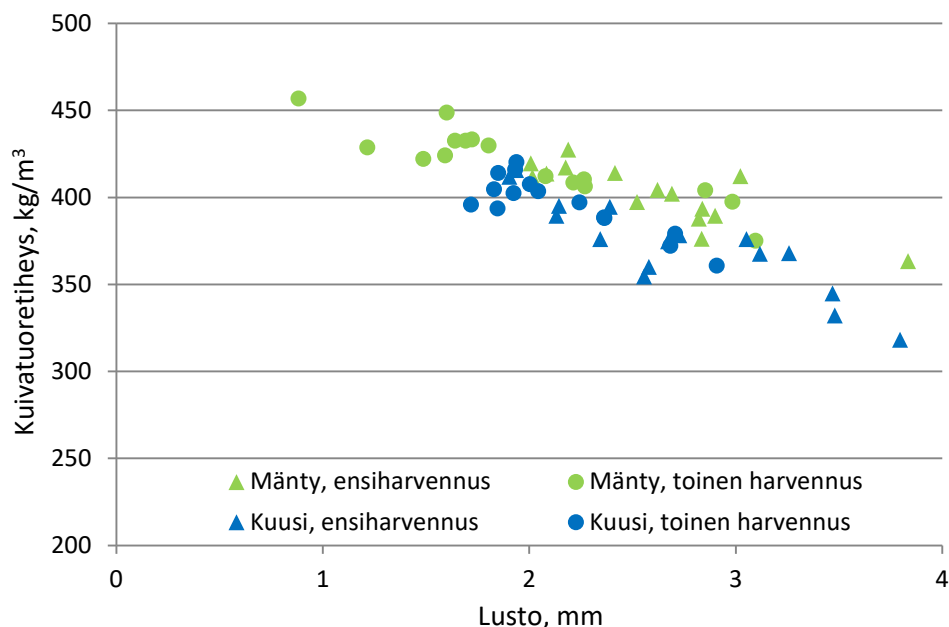
Puun ikääntyessä ja läpimitan kasvaessa uudet lustot jäävät kapeammiksi, mikä on havaittavissa tämän tutkimuksen kuvasta 28. Lusto oli levein lähellä ydintä ja ohuin viimeksi muodostuneessa pintapuussa (taulukko 10). Koska puuaines nuortuu tyvestä latvaa kohti, luston keskimääräinen leveys vastaavasti kasvaa.

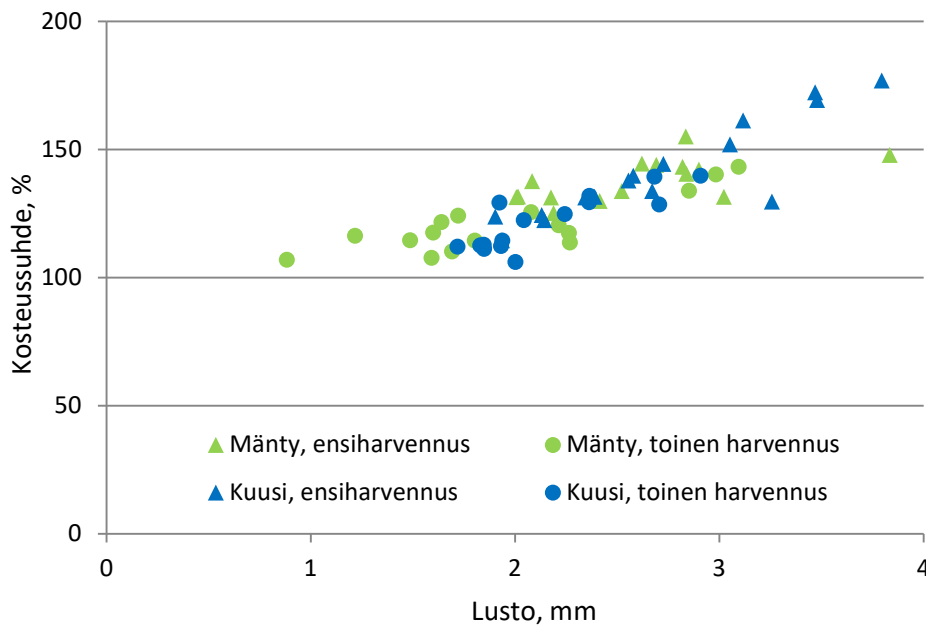
Taulukko 10. Luston leveys mänty- ja kuusikuitupuussa keskimäärin ja 10 viimeisen luston vyöhykkeessä, mm.

Leimikkotyyppi	Mäntykuitu		Kuusikuitu	
	Kaikki lustot	Viimeiset lustot	Kaikki lustot	Viimeiset lustot
Ensiharvennus	2,6	2,2	2,6	2,2
Toinen harvennus	2,0	1,3	2,2	1,3
Päättehakkuu	1,5	1,0	1,7	1,0
Keskimäärin	1,7	1,2	1,9	1,1

Tässä tutkimuksessa luston keskimääräinen leveys laskettiin jakamalla rungon näytekiekon säde lustojen lukumäärällä. Näin menetellen sisimmät lustot saivat tilavuusosuuttaan suuremman painoarvon tuloksissa. Mittausmenetelmän karkeudesta huolimatta luston keskimääräisen leveyden vaihtelu heijasti kohtalaisen hyvin kuitupuun kuiva-tuoretiheyden vaihtelua. Luston leveyden rinnalla ei ollut paljonkaan lisämerkitystä sillä, millaiselta kasvupaikalta tai millaisesta leimikkotyypistä kuitupuu oli peräisin. Mäntykuitupuun kuiva-tuoretiheys putosi alle 400 kg/m³, kun luston leveys ylitti 2,5 mm. Kuusikuitupuulla, jolla luston leveys vaikuttaa voimakkaammin, vastaava raja oli noin 2,0 mm (kuva 29).

Tässä tutkimuksessa kuitupuun kosteussuhde kaatohtokellä muuttui keskimääräisen luston leveyden suhteen (kuva 30). Mitä nopeammin puu on kasvanut, sitä enemmän sen soluissa on ontelotilaa ja onteloissa vettä, ja sitä vähemmän siinä on kuivaa sydänpuuta ja sitä suurempi on kosteussuhde.

**Kuva 29.** Mänty- ja kuusikuitupuun puuaineen leimikoittainen kuiva-tuoretiheys luston keskimääräisen leveyden suhteen.



Kuva 30. Mänty- ja kuusikuitupuun puuaineen leimikoittainen kosteussuhde luston keskimääräisen leveyden suhteen.

Tässä tutkimuksessa luston leveys oli Etelä-Suomen oloissa mäntykuitupuulla 1,7 mm ja kuusikuitupuulla 1,9 mm (taulukko 10). Runsas kolme vuosikymmentä aikaisemmin vastaavat arvot olivat tutkimusalueella vastaavalla 64. leveysasteen eteläpuoleisella alueella mäntykuitupuulla 1,4 mm ja kuusikuitupuulla 1,7 mm sekä sen pohjoispuoleisella alueella kummallakin puutavaralajilla 0,9 mm (Hakkila 1968). Metsänhoidon tehostuminen johti viime vuosisadalla rakennemuutokseen Suomen metsissä. Korjuun painopiste siirtyi iäkkäistä hoitamattomista metsistä nuorempiin harvennuksiin käsiteltyihin metsiin, joissa puilla on ollut alusta lähtien enemmän kasvutilaa. Muutoksen seurauksena luston keskimääräinen leveys on kasvanut.

Kuitupuu on nykyisin paitsi nopeammin kasvanutta myös nuorempaa kuin ennen harvennuksiin perustuvan metsänhoitokäytännön yleistymistä. Lyhytkuituisen nuorpuun osuus on noussut ja kesäpuun ja sydänpuun osuudet ovat supistuneet (luvut 5.4 ja 5.5). Nämä muutokset ovat omalta osaltaan alentaneet puuaineen kuiva-tuoretiheyttä ja lisänneet puuaineen kosteutta (Kärkkäinen 2007, Hakkila ja Verkasalo 2009).

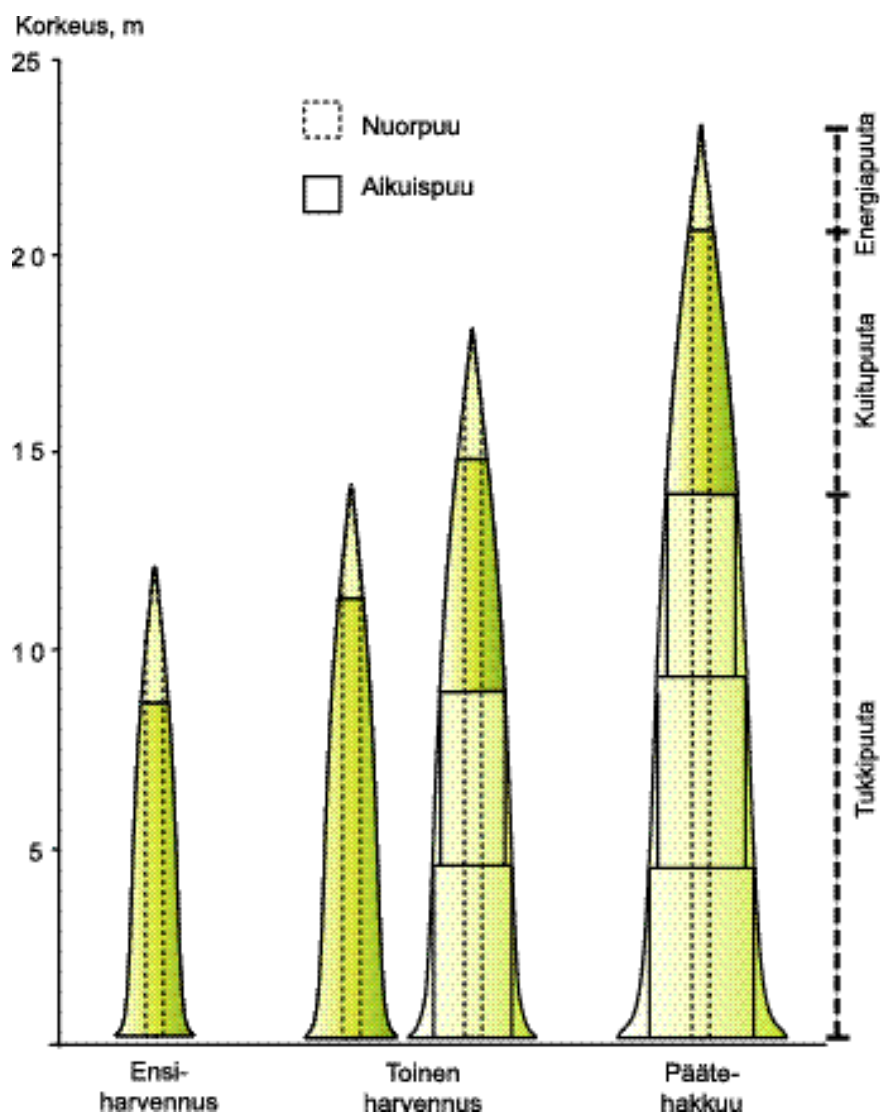
Luston leveyteen voidaan vaikuttaa metsänhoidon keinoin. Se ei riipu pelkästään ilmastosta ja kasvupaikan viljavuudesta, vaan siihen vaikuttavat edellä kuvatun mukaisesti myös puuston kasvatustiheys ja ikä. Kun metsää kasvatetaan harvassa asennossa, syntyy leveälustoista puuta, vaikka puun tuotos hehtaaria kohti saattaakin jäädä vaatimattomaksi. Tai päinvastoin, metsän sulkeuduttua vuosilustot ohenevat viljavallakin maalla, jos ylitieä kasvatusasento tukahduttaa kasvua. Kuituraaka-aineen teknisten ominaisuuksien kannalta oleellista on puuyksilön kasvunopeus, ei niinkään puun kokonaistuotos hehtaaria kohti mitattuna.

5.4. Nuorpuu

Puun solujen ominaisuudet riippuvat osin siitä, minkä ikäisestä jälsisolusta ne ovat lähtöisin. Männyllä ja kuusella jälsisolussa tapahtuu verraten nopeata kehitystä aina 10–20 vuoden ikään saakka. Kun jälsi sitten aikuistuu, sen synnyttämien solujen ja puuaineksen ominaisuudet alkavat vähitellen vakiintua. Jos puu saa kasvaa todella vanhaksi, jälsisolussa saattaa yli-ikäisyyden myötä tapahtua taantumista, mikä jälleen vaikuttaa syntyvän puuaineen ominaisuuksiin. Puun kehityskaarissa voidaan

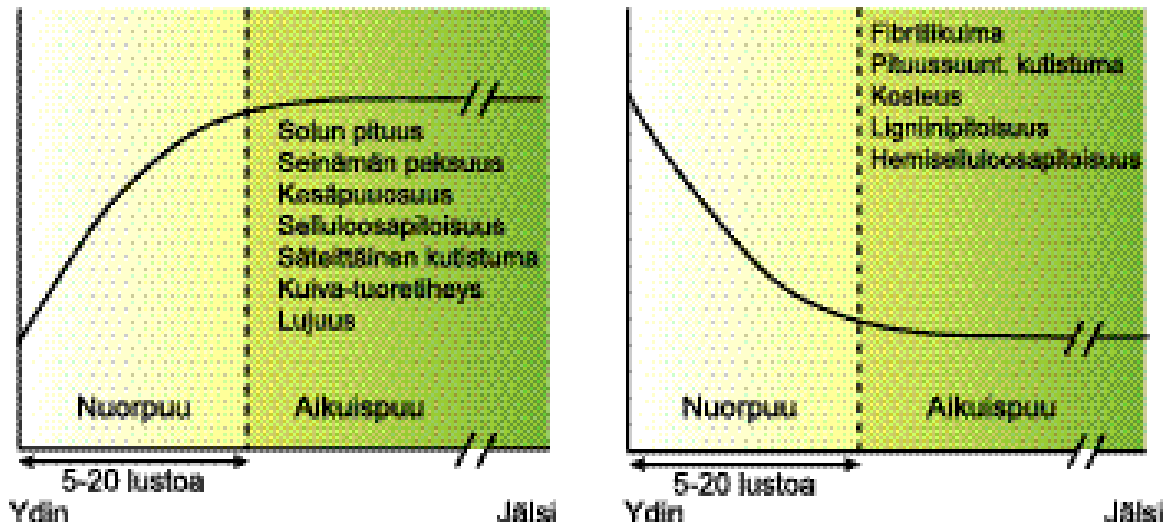
näin erottaa nuoruusvaihe, jolloin uuden puuaineksen ominaisuudet muuttuvat nopeasti, aikuisvaihe, jolloin ominaisuuksien muutokset ovat hitaampia ja lopulta vakiintuvat, sekä vanhuusvaihe, jolloin syntyvän puuaineen eräät ominaisuudet saattavat alkaa muuttua kohti myöhäisen nuoruuden tilaa (Hakkila ja Verkasalo 2009).

Puun nuoruusvaiheessa syntyneitä ominaisuuksiltaan normaalista aikuispuusta poikkeavaa puuainesta kutsutaan nuorpuuksi (Zobel ja Sprague 1998). Nuorpuu muodostaa rungon keskelle tasapaksun lieriön, joka kapenee vasta ylimmässä latvassa (kuva 31). Lieriön läpimitta riippuu nuoruusvaiheen kasvunopeudesta. Nuorpuuvyöhykkeen sisällä puuaineen ominaisuudet muuttuvat ytimestä pintaa kohti, mutta muutos ei etene kaikkien ominaisuuksien osalta samaa tahtia. Ominaisuudet eivät määräydy suoranaisesti puuyksilön biologisen iän mukaan, vaan niihin vaikuttaa pikemminkin jälleen ikä kyseisellä rungonkorkeudella eli jälleen etäisyys ytimestä vuosilustojen lukumäärällä mitattuna. Varttunut puu tuottaa siten samanaikaisesti tyviosassaan aikuispuuta ja latvaosassaan nuorpuuta, mistä puolestaan aiheutuu rungon pituussuuntaisia eroja puuaineen ominaisuuksissa. Nuorpuuta syntyy rungossa lähinnä latvusrajan yläpuolella. Nuorpuuvyöhyke sisältää eri puulajeilla 5–20 lustoa, pitkäikäisillä enemmän kuin lyhytikäisillä, mutta nuorpuun ja aikuispuun välille ei voida vetää selkeää rajaa, vaan muutos on vähittäinen (Zobel ja Sprague 1998).



Kuva 31. Puutaveralajien ja nuorpuun sijainti keskimääräisissä havupuurungoissa piteuden mukaan ja leimikkotyypeittäin. Kuitupuusa merkitty tummenettuna ja nuorpuuvyöhyke rungon keskellä katkoviivalla.

Kuvassa 32 on esitetty eräiden puuaineen anatomisten ja kemiallisten ominaisuuksien kehitysmalli puun aikuistuessa. Solutason muutokset heijastuvat edelleen muutoksina puuaineen fysikaalisissa, mekaanisissa ja käyttöteknisissä ominaisuuksissa. Kaikki puulajit eivät kuitenkaan täysin noudata tätä yleistä mallia.



Kuva 32. Eräiden puuaineen ominaisuuksien muuttuminen rungon ytimestä pintaa kohti. Muokattu julkaisusta Bendtsen (1978).

Puumassateollisuudessa nuorpuuta ei pidetä yleensä toivottavana, sillä se soveltuu useimpiin käyttötarkoituksiin aikuispuuta huomattavasti huonommin sellaisenaan. Ongelmia aiheuttaa myös siitä, että ominaisuuksiltaan erilaista nuor- ja aikuispuuta esiintyy rinnakkain samoissa puutavaraerissä ja pölkkyissä. Kun viime vuosikymmeninä harjoitettu metsätalous on nopeuttanut nuorten puustojen kasvua ja lyhentänyt kiertoaikaa, nuorpuun vaikutukset metsäteollisuuden raaka-aineessa ovat kasvaneet.

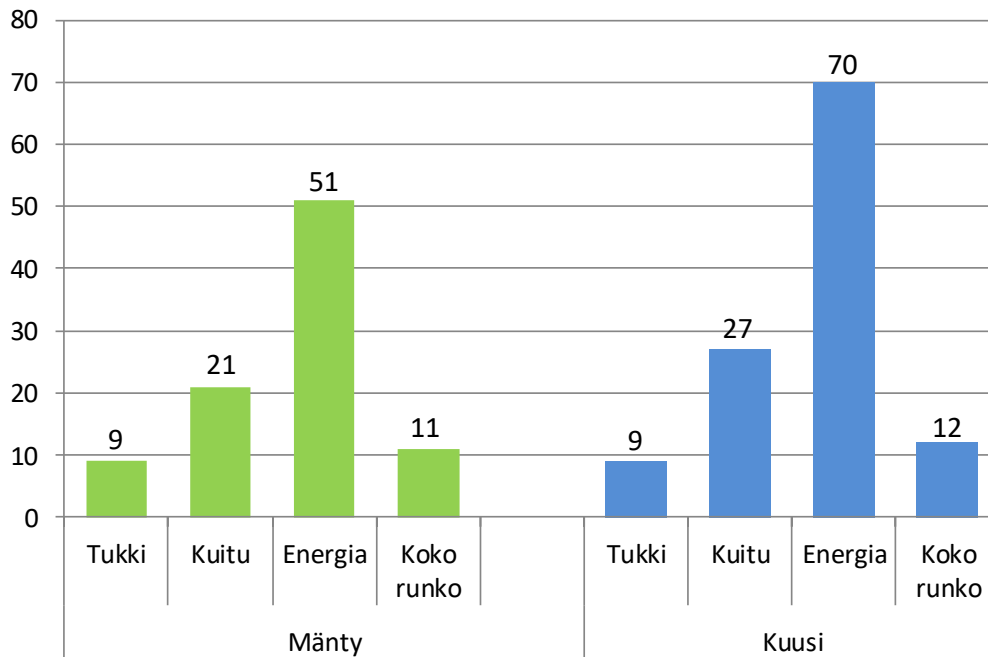
Massa- ja paperiteollisuuden raaka-aineena nuorpuulle ominaisia piirteitä aikuispuuhun verrattuna ovat esimerkiksi pohjoisamerikkalaisella keltamännnyllä (Zobel ja Sprague 1998):

- Suurempi tilavuusyksikköinä mitattu raaka-aineen kulutus (+5–15 %). Syynä ovat alhainen kuiva-tuoretiheys ja alhainen selluloosapitoisuus.
- Suurempi reaktiopuun ja oksapuun määrä, mikä alentaa omalta osaltaan sellun saantoa ja heikentää kuidun paperitekniisiä ominaisuuksia.
- Suurempi kemikaalien kulutus ja vaikeampi valkaistavuus johtuen korkeammasta ligniinipitoisuudesta.
- Parempi soveltuvuus mekaaniseen kuidutukseen, jos raaka-aineena käytetään nuorta mäntypuuta, johtuen ohutseinäisten kuitujen runsaudesta. Kun puu ikääntyy ja rungon sisäosan mantopuu muuttuu sydänpuuksi, nuorpuun soveltuvuus mekaaniseen kuidutukseen kuitenkin kärsii.
- Paperin alhaisempi repeämislujuus johtuen lyhyemmistä, heikommista ja taipuisammista kuituista.
- Paperin korkeampi veto-, puhkaisu- ja taittolujuus johtuen ohutseinäisten kuitujen paremmasta arkinmuodostuksesta.

Huomattakoon, että nuorpuu vaikuttaa olennaisesti myös puutuoteteollisuuden tuotteiden ominaisuuksiin. Sahatavarassa nuorpuun lujuus on noin 50–70 % aikuispuun lujuudesta ja mitta- ja muotopysyvyys on heikompi (Zobel ja Sprague 1998). Liima- ja viilupuuotteissa nuorpuun vaikutus lujuuteen ei ole näin merkittävä, mutta se lisää valmistuskustannuksia (Kretschmann ym. 1993).

Päättehakkuleimikoissa nuorpuun osuus koko rungon tilavuudesta oli pieni, mutta sen kuitupuuosassa kuitenkin merkittävä. Kuvasta 33 nähdään 15 sisimmän vuosiluston vyöhykkeen osuus männyn ja kuusen päättehakkupuun kuorettomasta tilavuudesta tämän tutkimuksen aineistossa. Näin rajattu ydinvyöhyke ei tosin ole tarkalleen yhteneväinen todellisen nuorpuuvyöhykkeen kanssa, vaan lienee ainakin kuusella jonkin verran laajempi.

Tilavuusosuus, %



Kuva 33. Ydinlustojen (15 sisintä lustoa ytimen ympärillä) tilavuusosuus päättehakkualoilta saatavan puutavaran kuorettomasta tilavuudesta.

Tämän tutkimuksen perusteella ovat seuraavat suuntaukset ilmeisiä (kuva 32, ks. myös Saranpää 2002, Hakkila ja Verkasalo 2009).

- Nuorpuun osuus on havupuista erityisen suuri nopeakasvuilla ja lyhytkiertoisilla tropiikin mäntyviljelmillä, joissa sen poikkeavat ominaisuudet ovat paljon vaikeampi ongelma kuin pohjoisilla havupuilla.
- Suomen oloissa nuorpuulierio on paksuin nuorena nopeasti kasvaneilla puilla, vaikka hidaskasvuisten puiden nuorpuuvyöhyke saattaa sisältää useampia vuosilustoja.
- Kuitupuun nuorpuuosuus on suuri kunkin rungon ylimmässä latvapölkkyssä ja nopeakasvuisesa ensiharvennuspuussa.
- Nuorpuun vaikutukset ovat suurempia viljelypuustoissa kuin luontaisesti syntyneissä puustoissa.

5.5. Sydänpuu

5.5.1. Sydänpuun rakenne ja merkitys

Edellä on kuvattu, miten puun runkolieriö jakaantuu kahteen sisäkkäiseen osaan, nuorpuuhun ja aikuispuuhun (luku 5.4.). Varttuneen puun rungossa voidaan erottaa kaksi sisäkkäistä lieriötä myös toisella perusteella: sydänpuun muodostama sisäosa ja pinta- eli mantopuun muodostama ulko-osa.

Sydänpuulla tarkoitetaan rungon sisälieriötä, jonka alueella kaikki solut ovat kuolleet ja elintoiminnot päättyneet. Sydänpuuta ympäröivässä *mantopuussa* on vielä jäljellä eläviä tylppysoluja. Rungon nestevirtaukset tapahtuvat mantopuun ulommassa johtosolukovyöhykkeessä. Sisemmässä varastosolukovyöhykkeessä nestevirtaukset ovat jo päättyneet, mutta elävät tylppysolut toimivat edelleen yhteyttämistuotteiden ja niiden johdannaisten varastopaikkoina. Sydän- ja mantopuun välillä on 1–2 luston levyinen *vaihtumisvyöhyke*, jossa muutos mantopuusta sydänpuuksi tapahtuu (Kärkkäinen 2007).

Sydänpuun muodostuessa puuaineessa tapahtuu anatomisia, kemiallisia ja fysiologisia muutoksia, jotka parantavat rungon sisäosien luontaista kestävyyttä mikro-organismeja vastaan. Muutos etenee seuraavasti (Hillis 1987, Bergström 2000):

- Uuteaineet rikastuvat sydänpuuhun ja solujen rengashuokokset sulkeutuvat niihin kerääntyvien uuteaineiden vaikutuksesta. Asetoniin liukenevien uuteaineiden pitoisuus on Suomen eteläpuoliskossa mäntykuitupuun mantopuussa 3,0 % mutta sydänpuussa 5,1 %. Kuusikuitupuussa pitoisuus on sekä manto- että sydänpuussa noin 1,6 %. Pohjoisessa pitoisuudet ovat hieman korkeampia (Hakkila 1968).
- Veden kulku puussa vaikeutuu. Soluonteloiden vapaa vesi ja myös pieni osa solujen seinämien vedestä poistuu niin, että kosteus laskee puunsyiden kyllästymispisteen tuntumaan. Esimerkiksi männyllä kosteussuhde on sydänpuussa noin 30 % (Vintila 1939, Jalava 1952). Pintapuussa se on 4- tai 5-kertainen.
- Elävien tylppysolujen sisältämät sokerit hajoavat ja tilalle tulee polyfenoleja ja muita puuta suojaavia, mikro-organismeille myrkyllisiä uuteaineita. Puun sisältämien uuteaineiden määrä kasvaa ja koostumus muuttuu. Männyn sydänpuu värjäytyy pinosylviinin vaikutuksesta tummaksi, mutta kuusen sydänpuussa väri ei muutu.
- Tylppysolut puutuvat ja kuolevat. Puun fysiologiset toiminnot päättyvät.

Kun mantopuu muuttuu sydänpuuksi, puun raaka-aineominaisuudetkin muuttuvat. Vaikutus puutavarankäytössä riippuu puulajista ja käyttökohteesta (Hillis 1987):

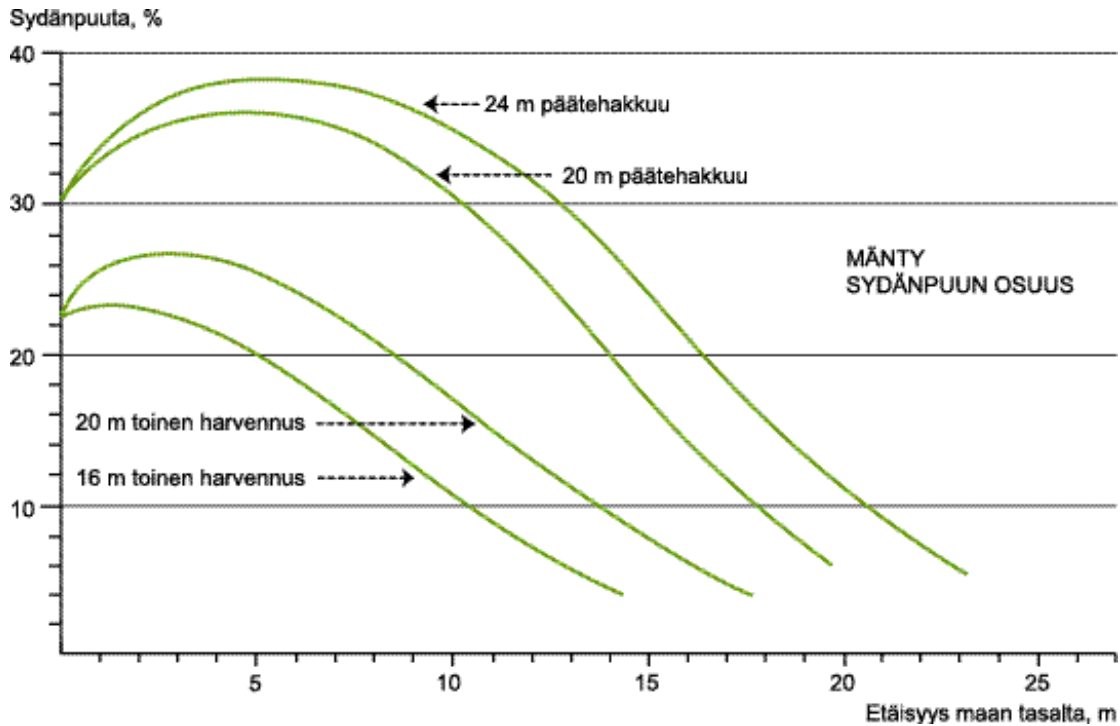
- Sellunkeitossa keittonesteiden tunkeutuminen hakkeeseen hidastuu, sellun keittämiseen tarvittava aika pitenee ja sellun tasalaatuisuus voi kärsiä.
- Uuteaineiden runsastuminen edellyttää puumassan valkaisukäsittelyn voimistamista pyrittäessä korkeaan vaaleusasteeseen.
- Sivutuotteitten saanto kasvaa sellunkeitossa. Kuitupuun kuiva-tuoretiheyden pohjalta lasketun massan saanto jää vastaavasti pienemmäksi. Tiheys sinänsä kasvaa hieman.
- Uuteaineiden ansiosta lahonkestävyys paranee, veden kulun vaikeutumisen vuoksi kutistuminen ja paisuminen pienentyvät sahatavarassa ja kosteuden sieto ja säänkestävyys paranevat erityisesti puun ulkokäytössä. Samoista syistä puutavaran kyllästäminen vaikeutuu. Uuteaineista johtuva tiheyden kasvaminen parantaa hieman ja kosteuden aleneminen huomattavasti puun mekaanisia ominaisuuksia.

Manto- ja sydänpuun erot ovat merkittäviä sekä puumassateollisuuden että puutuoteteollisuuden kannalta. Eroavuutta vielä kärjistää se, että suuri osa sydänpuusta koostuu nuorpuusta. Manto- ja sydänpuu saattavat erota kuidutusteknisiltä ominaisuuksiltaan toisistaan kuin kaksi eri puulajia. Vaikka keittokattila täytetään yleensä vain yhdestä puulajista peräisin olevalla hakkeella, manto- ja sydänpuun käyttö yhdessä johtaa kuitenkin tavallaan sekakeittoon. Etuja voisi olla saavutettavissa, jos manto- ja sydänpuu voitaisiin kuiduttaa toisistaan erillään. Teollisuuden mittakaavassa sovellettavia menetelmiä ei ole kuitenkaan kehitetty. Laboratoriotasolla on osoitettu mahdollisuuksia havupuiden sydän- ja pintapuusta tehdyn hakkeen erottelemiseksi flotaatiomenetelmällä (Womeldorf 1965) ja männyn ja lehtikuusen sydänpuun tunnistamiseksi kairanlastuina ja hienorakeisena puruna lähi-infrapunaspektroskopia-menetelmällä stillbeenipitoisuuden perusteella (Pulka ym. 2016).

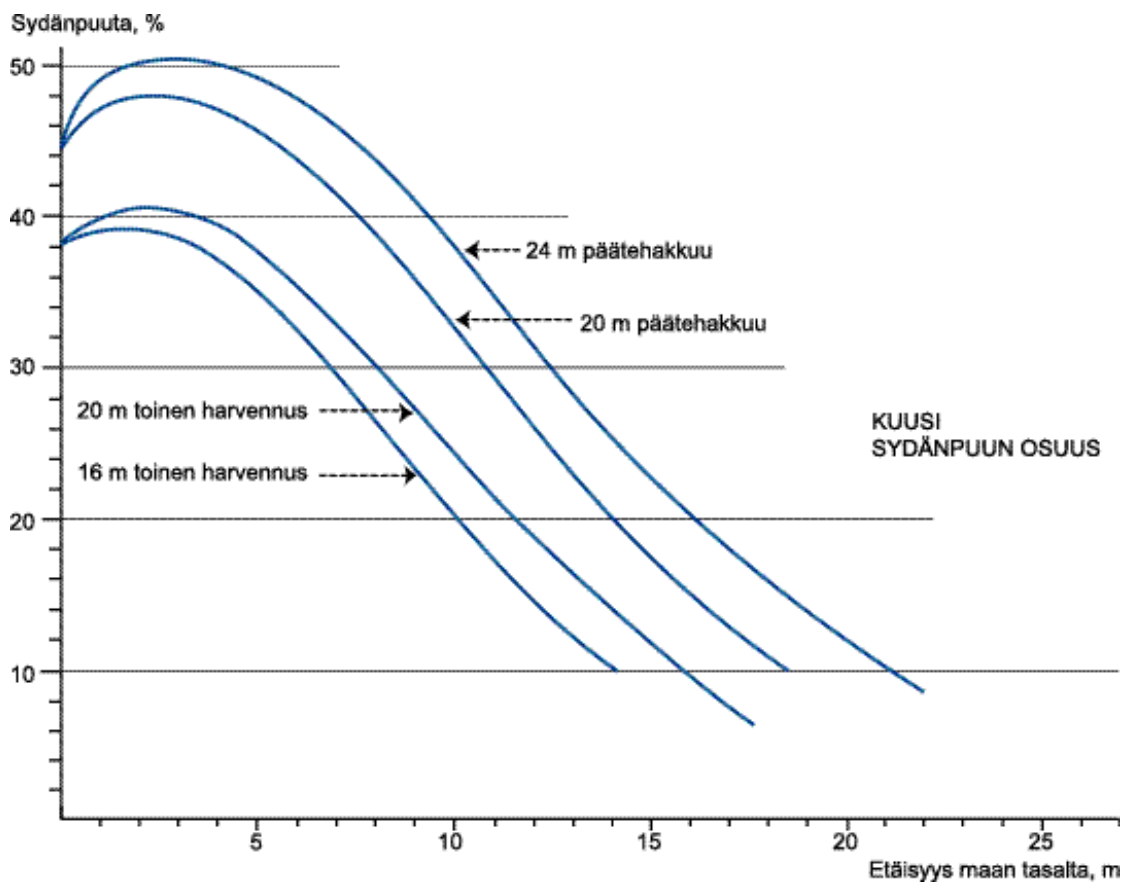
5.5.2. Sydänpuun vaihtelu rungon sisällä

Sydänpuun muodostus kytkeytyy puun jälleen ikään. Sydänpuu alkaa puun tyveltä tai hieman sen yläpuolelta ja etenee kohti latvaa puun ikääntyessä. Björklundin (1999) mukaan sydänpuun muodostus alkaa männyssä jo 15 vuoden iällä, aluksi hitaampana mutta ajan myötä kiihtyen: etenemisnopeus on 45. luston tuntumassa 0,5 lustoa vuodessa, 90. luston tuntumassa 0,7 lustoa vuodessa ja 115. luston tuntumassa 0,8 lustoa vuodessa. Uusitalon (2004) havaintojen mukaan sydänpuun muodostus alkaa männyssä rungon tietyllä korkeudella, kun lustoja on noin 20, ja etenee sitten 2/3 luston vuosivauhdilla. Sydänpuuta on siis jo ensiharvennusleimikoista korjattavassa puutavarassa, etenkin jos harvennusajankohta on viivästynyt puuston hitaan kasvun tai muun syyn takia.

Tämän tutkimuksen varttuneessa puustossa sydänpuun osuus oli suurimmillaan muutaman metrin korkeudella maan tasalta (kuvat 34 ja 35). Sydänpuun läpimitta ei tosin ole rinnankorkeudella välttämättä sen paksumpi kuin tyvileikkauksessaan, mutta koska mantopuuvyöhyke on paksuimmillaan rungon tyvilaajeneman tasalla, sydänpuun suhteellinen osuus aluksi kasvaa tyveltä latvaa kohti. Männyn sydänpuuosuus oli myöhäisissä harvennuksissa suurimmillaan 2–4 metrin ja päätehakuissa 4–7 metrin korkeudella. Kuusella sydänpuuosuus oli suurimmillaan vastaavasti 1–3 metrin ja 2–4 metrin korkeudella ja kääntyi sitten jyrkkään laskuun. Kuusella oli kaikilla korkeuksilla sydänpuuta enemmän kuin samanikäisellä männyllä (kuvat 34 ja 35).



Kuva 34. Sydänpuuosuus mäntyrungon pituussuunnassa eri pituisilla puilla.



Kuva 35. Sydänpuuosuus kuusirungon pituussuunnassa eri pituisilla puilla.

Koska sydänpuuta on runsaimmin iäkkäissä puissa ja rungon tyvipäässä, sen osuus on suurin tukkipuussa. Ero tukki- ja kuitupuun välillä kasvaa leimikon iän myötä. Tässä tutkimuksessa kuitupuussa oli sydänpuuta männyllä keskimäärin vajaa 20 % ja kuusella runsas 30 % riippumatta kovinkaan paljon

siitä, onko puutavara peräisin toisesta harvennuksesta vai päätehakuusta (taulukko 11). Tässä tutkimuksessa sydänpuun osuutta ei mitattu ensiharvennusleimikoissa, mutta eräiden muiden tutkimusten mukaan se näyttää olevan noin puolet edellä mainituista osuuksista eli ensiharvennushännillä noin 10 % (Uusvaara 1974, Liukkonen 1993) ja ensiharvennuskuusella noin 15 % (Tyrväinen 1995).

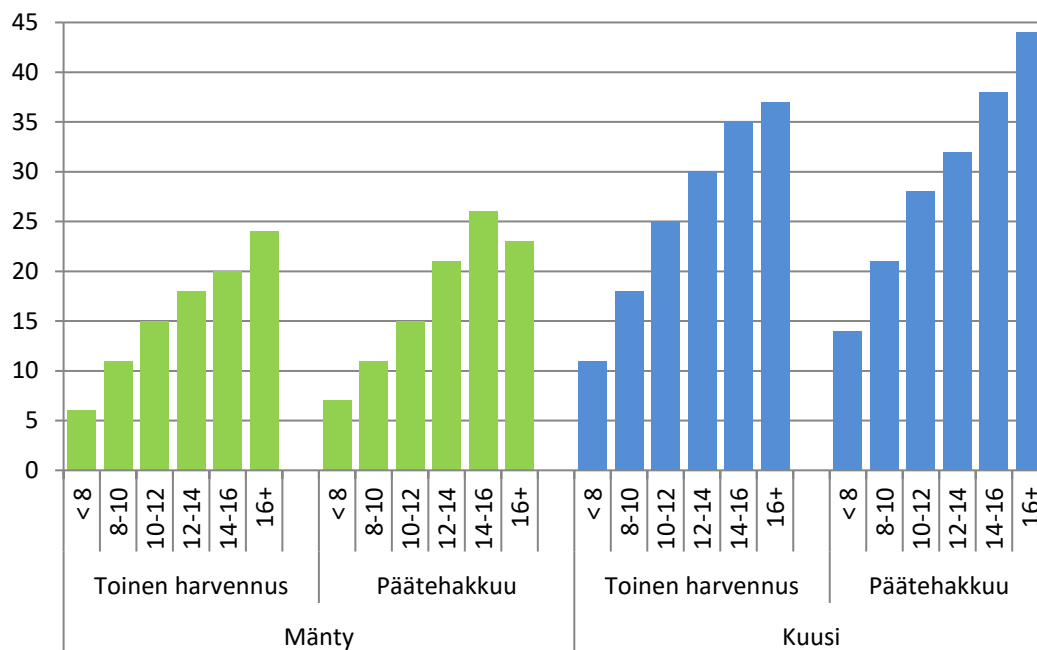
Taulukko 11. Männy ja kuusen sydänpuun osuus eri puutavaralajeissa leimikkotyypeittäin.

Puulaji	Leimikkotyyppi	Sydänpuuta, %			
		Tukki	Kuitu	Energia	Koko runko
Mänty	2. Harvennus	22,5	17,1	5,9	19,0
	Päätehakkuu	35,9	19,4	6,5	34,0
Kuusi	2. Harvennus	39,6	30,5	10,7	35,4
	Päätehakkuu	46,8	32,8	13,5	44,9

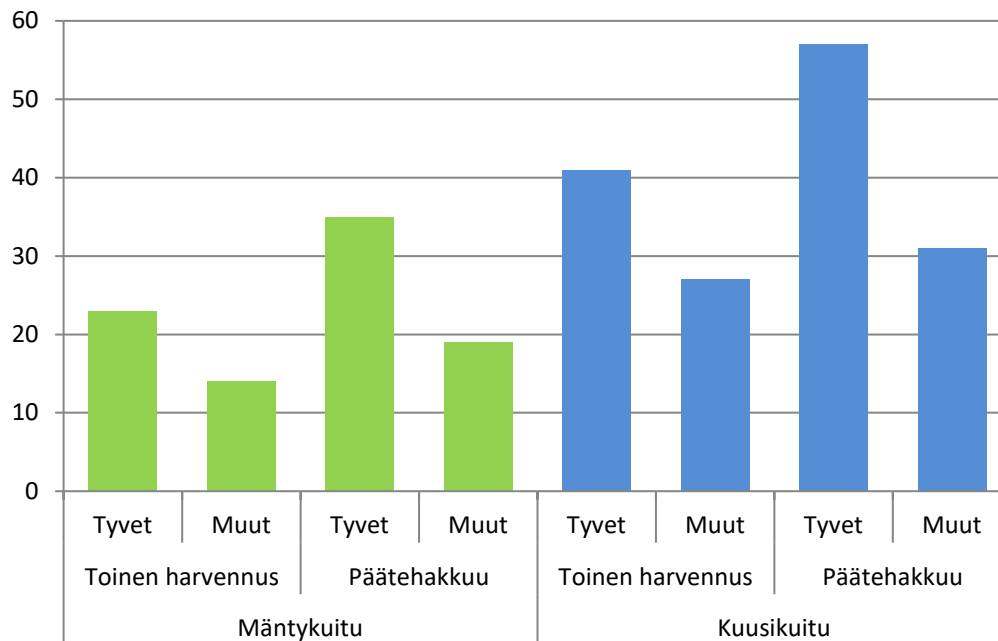
Pölkkykohtaisesti sydänpuuosuus kasvaa läpimitan myötä. Paksuissa kuitupuupölkkyissä se on kaksinkertainen ohuisiin verrattuna (kuva 36). Puutavaralajien läpimittavaatimukset vaikuttavat siis kuitupuun sydänpuosuuteen.

Jos kuitupuuta halutaan luokitella sydänpuuosuuden mukaan, luokitteluperusteena voidaan siis käyttää pölkyn läpimittaa. Ero toisesta harvennuksesta ja päätehakuusta korjatun kuitupuun välillä on tässäkin suhteessa pieni. Toinen vaihtoehto on kuitupuun jakaminen tyvi- ja muihin pölkkyihin, jolloin myös leimikkotyypin huomioon ottaminen on tarkoituksenmukaista (kuva 37).

Sydänpuuta, %



Kuva 36. Mänty- ja kuusikuitupuun sydänpuuosuus leimikkotyypeittäin läpimitan suhteen.

Sydänpuuta, %

Kuva 37. Mänty- ja kuusikuitupuun sydänpuuosuus tyvi- ja muissa pölkyissä leimikkotyypeittäin.

5.5.3. Sydänpuun vaihtelu leimikoiden välillä

Sydänpuuosuuden vaihtelu metsiköiden välillä on suuri. Vaihtelua selittävät erityisesti seuraavat, osittain päällekkäiset muuttujat:

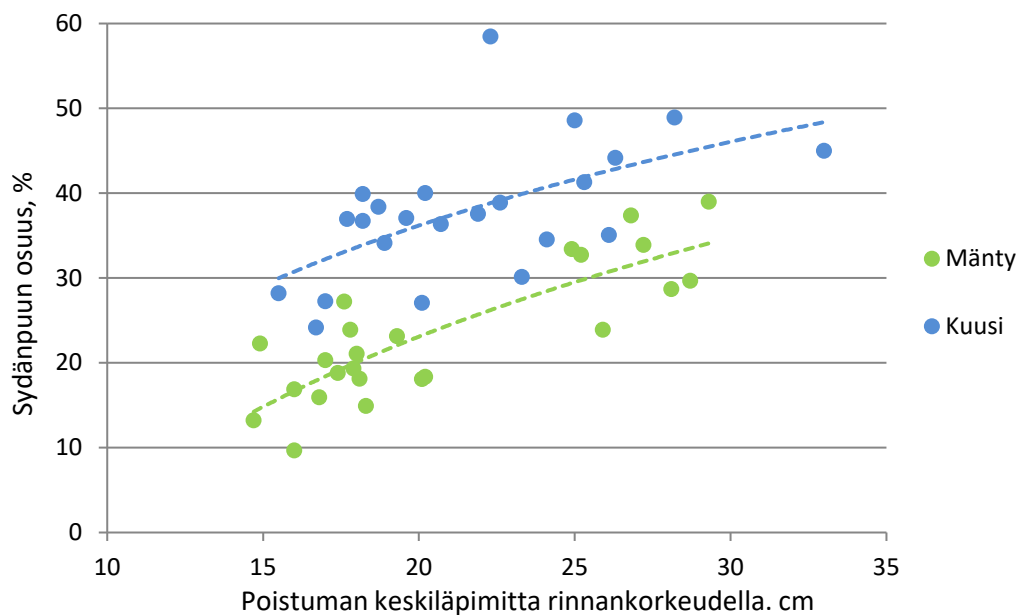
- *Ikä.* Sydänpuuosuus kasvaa iän myötä. Uusvaaran (1974) tutkimuksessa ikä selitti 37 % mäntyrunkojen välisestä sydänpuuosuuden vaihtelusta aineistossa, jossa puiden ikä oli 20–80 vuotta. Björklundin ja Walfridssonin (1993) tutkimuksessa, jossa puiden ikä oli 42–192 vuotta, selitysaste oli vastaavasti 40 %.
- *Kasvunopeus.* Hyvään kasvuun liittyy yleensä paksu mantopuuvyöhyke, joten nopeakasvuilla puilla on pienempi sydänpuuosuus kuin hidaskasvuilla. Elinvoimaisilla tuuhealatuksilla puilla sydänpuuosuus on pienempi kuin korkealle karsiutuneilla lyhytlatuksilla puilla. Tiheässä asennossa kasvaneiden solakoiden puiden sydänpuuosuus on keskimääräistä suurempi ja vallitsevien latvuserosten puilla sydänpuuosuus on pienempi kuin vallittujen latvuserosten puilla (Ojansuu ja Maltamo 1995).
- *Perintötekijät.* Sydänpuuosuuden vaihteluun vaikuttavat merkittävästi myös perintötekijät (Fries ja Ericsson 1998). Tätä osaa vaihtelusta ei ole voitu selittää ulkoisilla runko- tai metsikkötunnuksilla.

Kuitupuun sydänpuuosuudessa on maantieteellisiä eroja, jotka ovat seurausta puuston alueellisista kasvunopeus- ja ikärakenne-eroista. Vaikka sydänpuun muodostus käynnistyy pohjoisessa myöhemmällä iällä kuin etelässä, kasvun hidastuminen ja kiertoian pidentyminen pohjoista kohti heijastuvat kuitupuun sydänpuuosuuden kasvuna (taulukko 12) (Hakkila 1968).

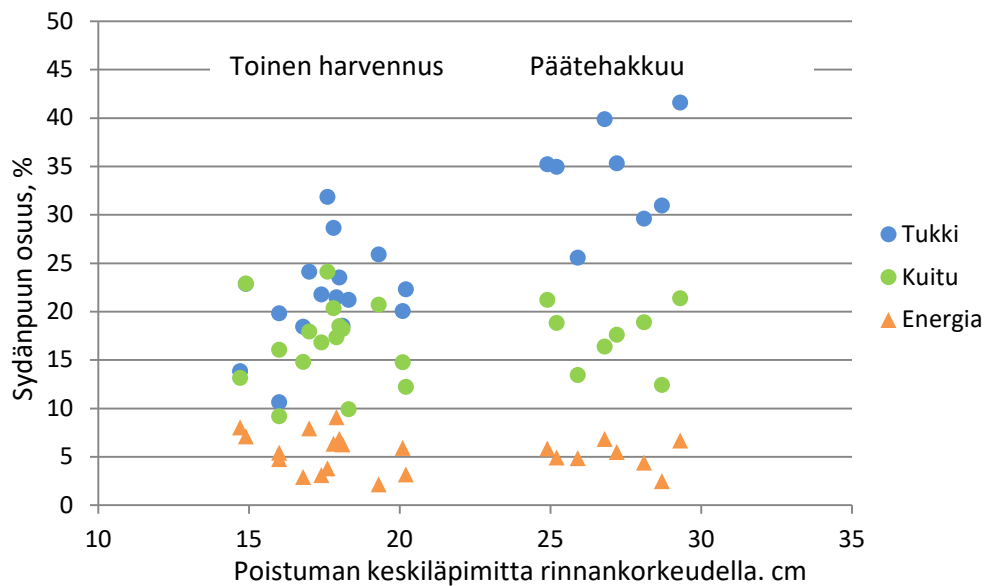
Taulukko 12. Mäntykuitupuun sydänpuuosuus maantieteellisen sijainnin suhteen (Hakkila 1968).

Alueen leveysaste	Mäntykuitupuun sydänpuuosuus, %
60 - 62	16,4
62 - 64	21,2
64 - 66	27,2
66 - 68	35,5

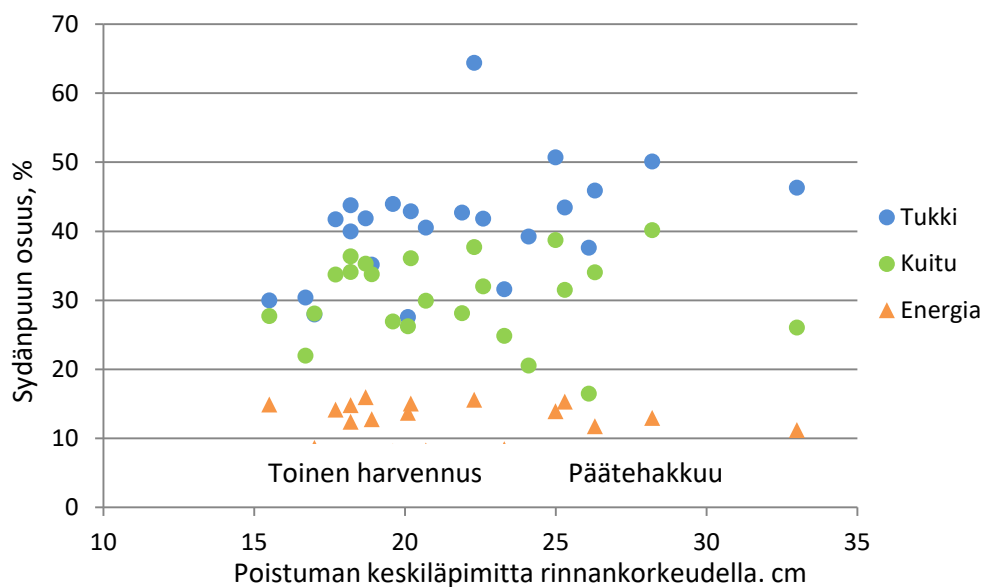
Leimikon puuston sydänpuosuutta voidaan ennustaa puiden koon perusteella. Tässä tutkimuksessa keskiläpimitan noustessa tasolta 15 cm tasolle 30 cm, sydänpuuosuus kasvoi noin 20 prosenttiyksikköä, männyllä 35 prosentin ja kuusella 45 prosentin tasolle (kuva 38). Leimikkokohtaisesti voi kuitenkin esiintyä suuriakin poikkeamia näistä vaihtelurajoista. Harvennusikäisessä istutusmännikössä sydänpuuta on havaittu vain puolet verrattuna samankokoiseen, mutta hitaammin kasvaneeseen luontaisesti syntyneeseen männikköön (Uusvaara 1974).

**Kuva 38.** Mänty- ja kuusirungon sydänpuuosuus leimikoittain rinnankorkeusläpimitan suhteen.

Tilanne muuttuu, kun runko jaetaan puutavaralajeiksi. Tukkipuulla edellä kuvattu riippuvuus säilyy, joskin heikompana kuin kokonaisilla rungoilla, mutta kuitupuulla tällaista riippuvuutta ei enää ole. Leimikkokohtaisesti kuitupuun sydänpuuosuus vaihteli tässä tutkimuksessa männyllä 10–25 % ja kuusella 15–40 %, kun ensiharvennukset oli jätetty tarkastelun ulkopuolelle (kuvat 39 ja 40). Vaihtelu ei ole selitettävissä poistettavan puuston läpimitalla. Kuitupuun sydänpuuosuus ei riipu niinkään rungon biologisesta iästä vaan pikemminkin pölkkyjen lustoina mitattavasta iästä, siis jälleen iästä.



Kuva 39. Männyn puutavaralajien sydänpuuosuus leimikoittain rinnankorkeusläpimitan suhteen eri leimikotyypeissä.



Kuva 40. Kuusen puutavaralajien sydänpuuosuus leimikoittain rinnankorkeusläpimitan suhteen eri leimikotyypeissä.

5.6. Oksapuu

5.6.1. Oksapuun rakenne ja merkitys

Yhtenäinen kuori- ja jälsivaippa verhoaa rungon ja sen ulkopuoliset oksat niin, että oksapuun solukot yhdistyvät kiinteästi ympäröivään runkoon (Shigo 1985). Kun runko kasvaa paksuutta, sisäpuolelle jäävä oksan tyvi ei voi enää laajentua, ja rungon sisään jäävä oksanosa muotoutuu ulospäin avautuvaksi kartioksi. Metsikön varttuessa alimmat oksat jäävät varjoon eivätkä enää osallistu yhteyttämi-

seen. Oksa käy tarpeettomaksi, alkaa pihkoittua tyvipäästään ja kuolee, ja samalla sitä ympäröivän jäljen toiminta päättyy.

Kuollut oksa ei kasva runkopuuhun kiinni vaan jää rungon sisään irrallisena. Rungon ulkopuolinen osa kuolleesta oksasta lahoaa ja karsiutuu vähitellen pois. Oksan tynkä saattaa kuitenkin jäädä töröttämään runkoon vielä vuosiksi tai jopa vuosikymmeniksi riippuen puulajista, oksan paksuudesta sekä ilmastotekijöistä. Kuusen oksa lahoaa hitaammin kuin männyn. Kun oksan tynkä on kokonaan irronnut tai jäänyt järetyvän rungon sisään, sen päälle alkaa kasvaa runkopuuta ja sen arpi umpeutuu.

Pituuskasvun hidastumisen seurauksena puun latvassa oksakiehkurat ovat tiheässä ja oksan elinikä pitkä. Siksi oksat kasvavat paksuimmiksi latvuksen yläosissa, ja oksapuun suhteellinen osuus lisääntyy rungon tyveltä latvaa kohti.

Männyn ja kuusen oksien alapuoliskossa on *reaktiopuuta eli lylyä*, jonka tehtävänä on tukea oksaa sen omaa ja lumen painoa vastaan. Reaktiopuu poikkeaa ominaisuuksiltaan virheettömästä runkopuusta jyrkimmin oksan tyvellä eli oksan siinä osassa, johon kohdistuvat suurimmat lujusvaatimukset ja joka puun kasvaessa jää rungon sisään. Havupuun reaktiopuulle on tyypillistä, että (Hakkila ja Verkasalo 2009):

- Kuidut ovat lyhyitä ja poikkileikkauspinnaltaan pyöreitä. Ne saattavat ulkoisilta mitoiltaan muistuttaa jossain määrin lehtipuun runkopuun kuituja, mutta puumassan ja paperin valmistuksen kannalta ne ovat aivan eri raaka-aineita.
- Kuidun seinämä on erityisen paksu ja sen fibrillikulma jyrkkä.
- Kuidun seinämän S1-kerros on tavanomaista paksumpi, kun taas S3-kerros puuttuu kokonaan. Tästä seuraa, että ligniinipitoisuus on korkea ja selluloosapitoisuus puolestaan jopa 10 prosenttiyksikköä alempi kuin runkopuussa. Hemiselluloosissa on tavanomaista enemmän galaktania ja vähemmän galaktoglukomannaania.
- Oksapuussa on paljon mutta keskimääräistä pienempiä pihkatiehyitä. Siinä on runsaasti uuteaineita sekä kationeja.
- Paksuista seinämistä, ahtaista soluonteloista ja runsaasta uuteainepitoisuudesta johtuu, että oksapuu on tiheätä ja kovaa. Sen kuiva-tuoretiheys on erittäin korkea, oksan tyvellä usein kaksinkertainen runkopuuhun verrattuna.
- Korkean tiheyden ja uuteainepitoisuuden seurauksena kosteus on runkopuuhun verrattuna alhainen.

Puumassaa valmistettaessa oksat aiheuttavat prosessitekniisiä ongelmia, alentavat kuitusaantoa ja vaikuttavat kielteisesti massan ja paperin laatuun. Vaikutus lopputuotteeseen on selvin mekaanisessa kuidutuksessa, jossa kuidun ominaisuudet muokkaantuvat vähemmän kuin kemiallisessa. Oksaa välittömästi ympäröivä puuaineli oksanympäryspuu ei sekään ole kuituominaisuuksiltaan muun runkopuun veroista. Oksapuu aiheuttaa esimerkiksi seuraavia haittoja (Hakkila ja Verkasalo 2009):

- Puusyyn poikkeavasta suunnasta, puun kovuudesta ja matalasta kosteudesta johtuen hakepala muodostuu oksan kohdalta usein repeämällä pikemminkin kuin leikkaantumalla. Syntyy ylipaksuja hakepaloja.
- Koska oksapuun selluloosapitoisuus on alhainen, myös sellun saanto on alhainen. Mänty- ja kuusirungon ulkopuolisista oksista suhteellinen sellun saanto on vain 76 % runkopuun vastavasta saannosta puun kuivamassaa kohti laskettuna. Samasta syystä kemikaalien kulutus on 130 % runkopuun vastaavasta arvosta (Projekt... 1977). Runsaasti pihkaa sisältävillä sisäisillä oksilla sellun saanto on vieläkin pienempi ja kemikaalien kulutus korkeampi.
- Keittonesteet tunkeutuvat tiheään, kuivaan, uuteaineiden kyllästämään oksapuuhun hitaasti, minkä vuoksi oksat keittyvät vaillinaisesti. Vaikutusta vahvistaa hakepalojen liiallinen paksuus. Keittymätön oksapuu joudutaan hylkäämään tai palauttamaan uuteen keittoon.

- Oksapuun kovuus aiheuttaa mekaanisessa kuidutuksessa normaalikuitujen murskaantumista ja katkeilua ja lisää energian kulutusta. Koska oksien kuidut ovat rungon kuituihin verrattuna poikkeuksellisia, niistä syntyy hiottaessa pölymäistä kuituainesta.
- Oksapuu vaikuttaa kielteisesti kemiallisten ja mekaanisten massojen lujuteen, vaaleuteen ja pintaominaisuuksiin. Heikko laatu on seurausta kuidun epäedullisista morfologisista ominaisuuksista, poikkeuksellisesta kemiallisesta koostumuksesta, puun tummasta väristä, kemikaalien hitaasta tunkeutumisesta sekä oksapuun ja oksattoman puun vuorovaikutuksista hierrätyksessä. Oksapuusta tehdyn sulfaattimassan lujuus on vain 70 % normaalimassan lujuudesta (Projekt... 1977). Vähäinenkin määrä oksapuuta vaikuttaa kielteisesti TMP-massan laatuun (Sahlberg 1998).

Vaikka oksapuun osuus on pieni, se kuitenkin rasittaa puumassatehtaiden kuidutuskapasiteettia, lisää kustannuksia ja alentaa tuotteen laatua. Hitaan keittymisen ongelmaa on yritetty lievittää murskaamalla seulonnassa erotettu oksapuupitoinen ylipaksu hakejake ennen keittoa, mutta tämäkään menettely ei tuo ratkaisua kuitujen epäedullisiin paperitekniisiin ominaisuuksiin. Toinen vaihtoehto on oksapuun poistaminen raaka-aineesta ennen kuidutusta. Puuhioketeollisuuden syntyvaiheessa oksia poistettiin pölkkyistä jopa kairaamalla.

Tiheytensä, pihkaisuutensa, korkean ligniinipitoisuutensa ja alhaisen kosteutensa ansiosta kuitupuusta erotettu oksapuu on erinomaista polttoainetta. Kuusen oksapuun uuteaineista on eristetty lignaaneja ja muiden kemiallisia yhdisteitä ja niiden käyttöä on tutkittu muun muassa terveystuotteiden ja lääkkeiden raaka-aineena: lignaaneilla on kasvaimia, tulehduksia ja viruksia hillitseviä ja antioksidanttisia vaikutuksia (esim. Willför ym. 2011, ks. myös Verkasalo 2015 ja Routa ym. 2017).

Jos oksapuun erottaminen ja erityiskäyttö osoittautuvat tarkoituksenmukaisiksi, lähtökohdaksi voitaisiin asettaa puumassan valmistuksessa ylipaksuna pidettävä eli yli 8 mm:n rakoseulontajake. Eräässä ruotsalaisessa tutkimuksessa kuusikuitupuusta tehdyn hakkeen ylipaksun seulontajakeen palasista 60 % sisälsi oksapuuta, ja 90 % oksapuusta oli ylipaksun jakeen joukossa (Axegård suull.). Kaukopään ensiharvennuskäsittelyasemalla 55 % ylipaksuista hakepalasista sisälsi oksa- tai oksanympäryspuuta (Hakkila ym. 1998).

5.6.2. Oksapuun osuus ja ominaisuudet

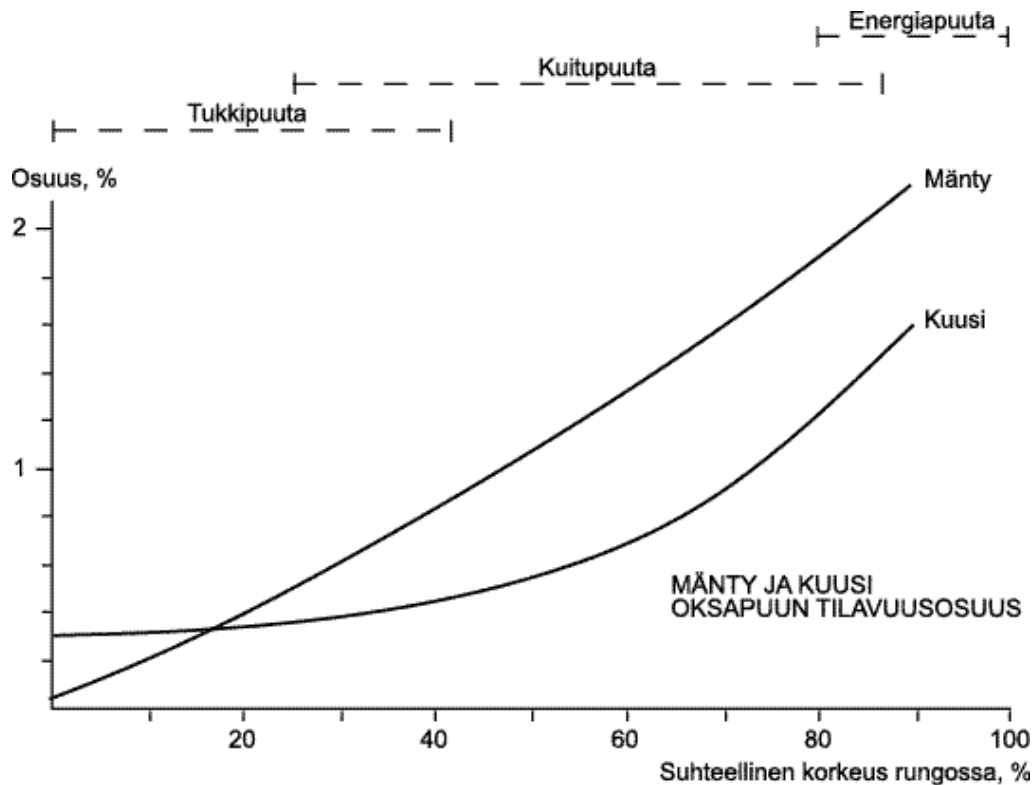
Oksapuuta on eniten väljässä tilassa nopeasti kasvaneissa ja nopeasti kapenevissa rungoissa (Hakkila ja Verkasalo 2009). Oksapuun osuus puutavaran tilavuudesta riippuu oksien lukumäärästä, koosta, oksakulmasta sekä oksien eliniästä eli puun luontaisesta karsiutumisesta.

Ruotsissa Nylinder (1959) on mitannut oksapuun tilavuusosuudeksi 45–50 vuoden ikäisessä 2x2 metrin välein istutetussa männikössä rungon tyvellä 0,3 % ja 90 prosentin korkeudella 1,8 % sekä kuusikossa vastaavasti 0,5 % ja 2,2 %. Suomalaisilla 40-vuotiailla kontortamännyn viljelmillä osuudet olivat 0,4 % ja 2,4 % (Hakkila ja Panhelainen 1970).

Oksapuun kuivamassaosuus on tilavuusosuutta korkeampi, sillä paksuseinäisten reaktiopusolujensa ja korkean uuteainepitoisuutensa vuoksi oksapuu on runkopuuta paljon tiheämpää. Pihkapitoisuus saattaa nousta jopa 30 prosenttiin (Lehtonen 1978, Salo 2002).

Vaikka kuusella on lukumääräisesti enemmän oksia, männyllä niiden tilavuusosuus näyttää kuitenkin olevan oksien paksuuden ja terävemmän oksakulman ansiosta suurempi. Päätehakuuleimikoissa oksapuun tilavuusosuus oli tämän tutkimuksen suppeahkossa aineistossa rungon tyvellä vain 0,1–0,3 % mutta käyttöosan latvassa jo 1,4–2,0 %, männyllä hieman enemmän kuin kuusella (kuva 41).

Kuitupuussa oksapuun tilavuusosuus oli tämän tutkimuksen mukaan männyllä ensiharvennus- ja päätehakkuuleimikoissa noin 1,5 % mutta toisen harvennuksen leimikoissa vain 1 %. Tulos on sopu-soinnussa Kärkkäisen (2007) suomalaisista ja ruotsalaisista tutkimuksista tekemän yhteenvedon kanssa. Kuusen päätehakkuuleimikoissa oksapuun tilavuusosuus oli vastaavasti kuitupuussa noin 1 % (taulukko 13). Lehtonen (1978) on mitannut kuivahkolla kankaalla ensiharvennusvaiheen metsikössä oksapuun keskimääräiseksi tilavuusosuudeksi männyllä 2,0 % ja kuusella 1,2 %.



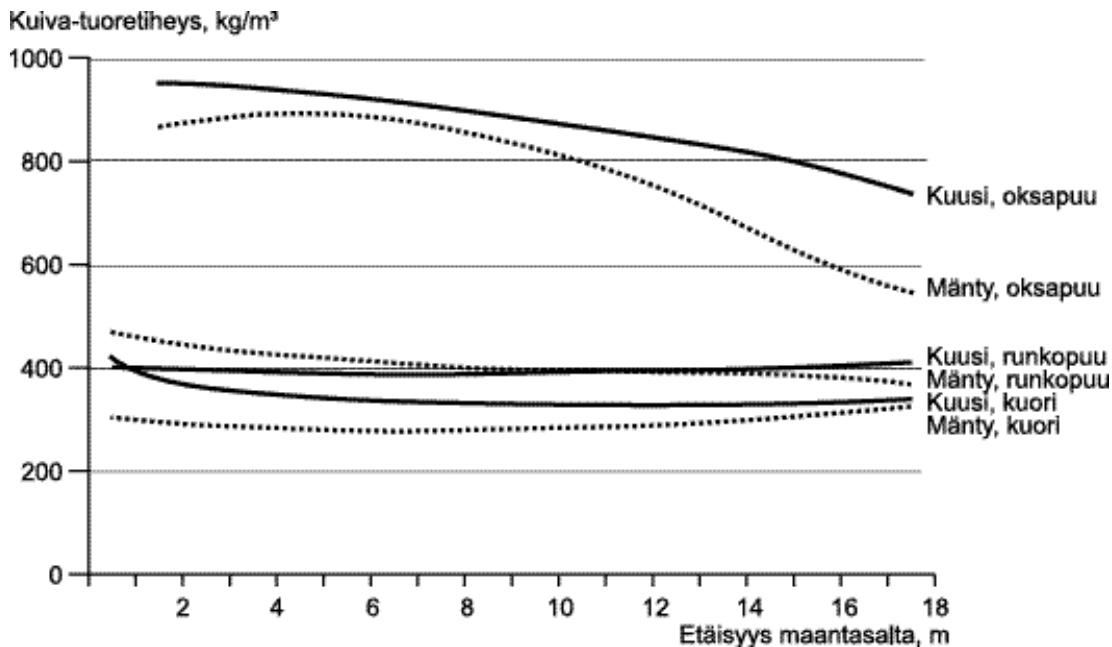
Kuva 41. Männen ja kuusen oksapuun tilavuusosuus rungon eri korkeuksilla päätehakkuuleimikoissa.

Taulukko 13. Männen ja kuusen oksapuun osuus tukki- ja kuitupuussa leimikkotyypeittäin.

Puulaji	Leimikkotyyppi	Oksapuun tilavuusosuus, %		
		Tukki	Kuitu	Koko runko
Mänty	Ensiharvennus		1,5	1,9
	Toinen harvennus	0,9	1,0	1,0
	Päätehakkuu	0,6	1,6	0,7
Kuusi	Päätehakkuu	0,4	0,9	0,5
		Oksapuun kuivamassaosuus, %		
		Tukki	Kuitu	Koko runko
Mänty	Ensiharvennus		2,7	2,8
	Toinen harvennus	1,8	2,0	1,9
	Päätehakkuu	1,2	2,8	1,4
Kuusi	Päätehakkuu	0,9	2,0	1,1

Kuvassa 42 oksapuun kuiva-tuoretiheyden vaihtelumallia verrataan runkopuuhun ja rungon kuoreen. Männyllä oksapuun kuiva-tuoretiheys laski rungon tyvestä latvaan arvosta 900 kg/m³ arvoon 600

kg/m³ ja kuusella vastaavasti arvosta 950 kg/m³arvoon 700 kg/m³. Nämä arvot olivat männyllä lähes ja kuusella yli kaksinkertaisia runkopuun kuiva-tuoretiheyteen verrattuina.



Kuva 42. Oksapuun, runkopuun ja kuoren kuiva-tuoretiheys korkeuden suhteen männyllä ja kuusella. Puun pituus 20 m.

Kummallakin puulajilla oksapuun tuoretiheys oli kaikilla korkeuksilla selvästi yli 1000 kg/m³. Ero kuiva-tuore- ja tuoretiheyden välillä oli pieni, sillä suuren kuiva-tuoretiheyden vuoksi oksapuu sisältää vettä niukalti. Latvusrajan alapuolella, missä oksien uloimmat osat ovat vahvasti pihkoittuneet, oksapuun kosteussuhde oli vain 20–30 %, eikä se noussut latvassakaan yli 60–80 prosenttiin.

Taulukossa 14 on suuntaa-antavia lukuja oksapuun keskimääräisistä tiheyksistä koko rungossa. Erityisesti kuiva-tuoretiheydet ovat merkittävästi korkeampia kuin runkopuussa vastaavasti.

Taulukko 14. Männyn ja kuusen oksapuun tuore- ja kuiva-tuoretiheys koko rungossa keskimäärin eri leimikkotyypeissä. Suhdeluku osoittaa oksapuun tiheyden suhteessa runkopuun tiheyteen.

Puulaji	Leimikkotyyppi	Kuivatuoretiheys		Tuoretiheys		Kosteussuhde, %
		kg/m ³	Suhde	kg/m ³	Suhde	
Mänty	Ensiharvennus	697	1,8	1072	1,2	54
	Toinen harvennus	806	2,0	1085	1,3	35
	Päätehakkuu	797	2,1	1146	1,3	44
Kuusi	Päätehakkuu	870	2,2	1153	1,4	33

Oksapuun korkeasta kuiva-tuoretiheydestä seuraa, että oksapuu nostaa kuitupuun keskimääräistä kuiva-tuoretiheyttä lähes tilavuusosuuttaan vastaavassa suhteessa. Kun kuiva-tuoretiheys määritetään tämän tutkimuksen tavoin pelkästään oksattomista näytteistä, tapahtuu vastaava aliarvio. Menettely on kuitenkin perusteltavissa sillä, että oksapuusta ei saada massaosuuttaan vastaavasti pape-riteknisesti kelvollisia kuituja.

5.7. Puuaineen kuiva-tuoretiheys

5.7.1. Kuiva-tuoretiheyden merkitys

Kuiva-tuoretiheys osoittaa tilavuusyksikön kuivamassan, kun puun tilavuus määritetään kosteudeltaan puunsiiden kyllästymispisteen yläpuolella tuoreessa tilassa. Sen mittayksikkönä on kg/m^3 . Puutieteellisten tutkimusten kohteena on yleensä kuoreton ja oksaton puu, mutta operatiivisen toiminnan kannalta esimerkiksi energiapuulla voi olla tarkoituksenmukaista tarkastella kuorellisen puun kuivatuuoretiheyttä. Kuiva-tuoretiheyden määräävät seuraavat tekijät:

- Solun seinämän rakennusaineiden aineitiheys, joka on selluloosalla $1560 \text{ kg}/\text{m}^3$, hemiselloosilla $1350 \text{ kg}/\text{m}^3$, ja ligniinillä $1300\text{--}1350 \text{ kg}/\text{m}^3$. Keskimäärin solun seinämän aineitiheys on $1480\text{--}1500 \text{ kg}/\text{m}^3$, lehtipuilla suuremman selluloosapitoisuuden ansiosta hieman enemmän kuin havupuilla (Stamm & Sanders 1966, Stamm 1969).
- Solun seinämien tilavuus suhteessa tyhjiin tiloihin soluonteloissa, solujen seinämissä ja solujen välissä. Kun kuiva-tuoretiheys on esimerkiksi $375 \text{ kg}/\text{m}^3$, seinämien osuus on neljännes ja tyhjien tilojen kolme neljänneestä puun tilavuudesta. Paksuseinäisissä kesäpuusoluissa seinämien tilavuusosuus ja niin muodoiin myös kuiva-tuoretiheys ovat yli kaksinkertaisia verrattuna ohutseinäisiin kevätpuusoluihin.
- Soluonteloihin ja solujen välisiin tyhjiin tiloihin kerääntyvät uute- ja mineraaliaineet. Sydänpuun muodostumisen yhteydessä uuteainepitoisuus kasvaa lisäten puun kuiva-tuoretiheyttä. Tämä hieman hämärtää kuiva-tuoretiheyden ja puumassateollisuuden raaka-aineen kulutuksen välistä riippuvuutta, koska uuteaineet eivät lisää puumassan saantoa.
- Oksapuu. Puutavaran keskimääräiseen kuiva-tuoretiheyteen vaikuttaa myös rungon sisäinen oksapuu, sillä oksapuun tiheys on runkopuuhun verrattuna kaksinkertainen (luku 5.6.2.). Tässä luvussa tarkastellaan oksattoman puun tiheyttä.

Kuiva-tuoretiheys on ehkä yleisimmin käytetty terveen puun laadun indikaattori. Sen sovellusalue on laaja, sillä se antaa kuvan esimerkiksi sahatavaran lujuudesta ja energiapuun energiasisällöstä tilavuusyksikköä kohti laskettuna. Puumassaa valmistettaessa se antaa osviittaa raaka-aineen kulutuksesta, raaka-aineen prosessikäyttäytymisestä sekä kuitujen ominaisuuksista.

Koska männyn ja kuusen kuiva-tuoretiheys heijastaa solun seinämän ja soluontelon tilavuussuhdetta, sen perusteella voidaan arvioida kuitujen ominaisuuksia. Korkea kuiva-tuoretiheys kertoo paksuseinäisistä ja jäykistä kesäpuusoluista, jotka säilyttävät paperia tehtäessä ryhtinsä. Ne antavat paperille korkean repeämislujisuuden, mikä on tärkeätä ajettaessa paperikoneita suurilla nopeuksilla, mutta paperin pinnan sileys kärsii. Paperiarkin valmistuksessa pyritään tiettyyn neliöpainoon [g/m^2], joten paksuseinäisiä kuituja käytettäessä arkki muodostuu pienemmästä kuitumäärästä. Paperiin syntyy tuolloin niukalti kuitujen välisiä sidospintoja, jolloin veto-, puhkaisu- ja taittolujuudet jäävät heikoiksi. Ohutseinäiset ja taipuisat kevätpuukuidut sen sijaan lysähtävät kokoon ja saavat nauhamaisen muodon, ja niistä tehdyssä paperissa on runsaasti sidospintoja. Repeämislujuus on heikko mutta veto-, puhkaisu- ja taittolujuudet ovat korkeita, ja paperista tulee tiheätä, läpikuultamatonta ja sileäpintaista.

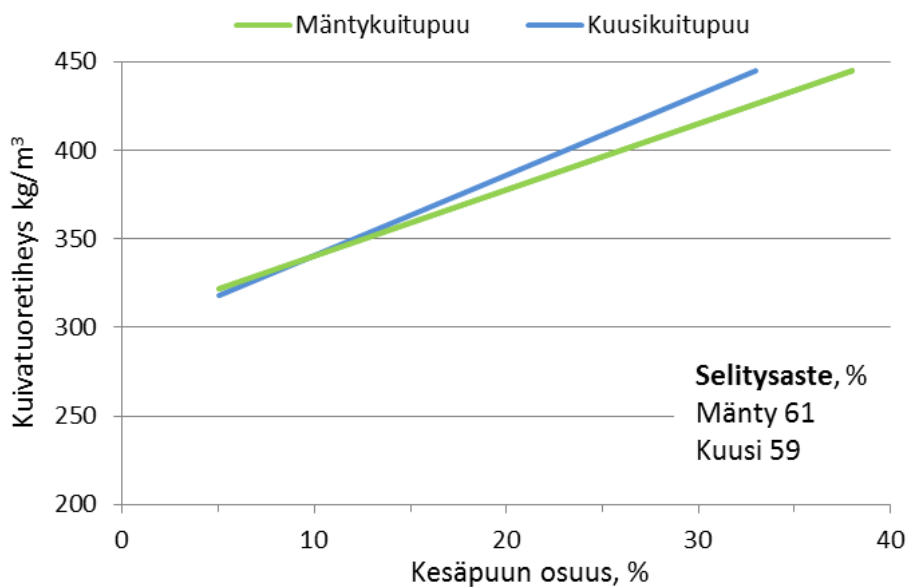
Keittokemikaalit imeytyvät puuhun nopeasti, kun raaka-aine koostuu ohutseinäisistä soluista. Optimaalinen keittoaika siis lyhenee. Kun hakepalojen välillä on suuria tiheyseroja, osa raaka-aineesta joko yli- tai alikeittyy. Seurauksena on saantotappioita ja puun kulutuksen kasvu. Paksuseinäisten kuitujen runsaus pidentää myös massan jauhatusaikaa ja vaikeuttaa arkinmuodostusta, ja tumman värinsä vuoksi paksuseinäiset kesäpuusolut vaativat perusteellisemmän valkaisukäsittelyn. Mekaanisessa kuidutuksessa tiheä puu vaatii enemmän energiaa. Samantasaisen mekaanisen paperimassan

valmistaminen kesäpuusta vaatii kevätpuuhun verrattuna jopa nelinkertaisen määrän energiaa. Ero on niin suuri, että hiomopuuta pelkästään leimikoittain lajittelemalla voi syntyä suuruudeltaan 1 MWh/t ero energian kulutuksessa (Kettunen 2002).

Kuiva-tuoretiheyden vaihtelun tunteminen mahdollistaisi kuitupuun ohjaamisen käyttökohteisiinsa paremmin soveltuvalla tavalla. Esimerkiksi mekaaniselle massalle on eduksi tiheydeltään kevyehkö puu, mutta puupitoisissa papereissa mekaaniseen massaan sekoitettavalle kemialliselle lujite- eli armeerausmassalle taas tiheä puu. Raaka-aineen kulutuksen kannalta tiheä puuaineksi on luonnollisesti aina eduksi.

5.7.2. Kuiva-tuoretiheyden vaihtelu rungon sisällä

Sekä kesäpuun osuus että kesäpuun tiheys kasvavat tietyllä rungon korkeudella ytimestä jältä kohti. Männyllä kesäpuuosuus on viiden ensimmäisen luston alueella noin 15 % mutta kaksinkertaistuu 15.–20. luston tienoilla jo lähes 30 %:iin tilavuudesta, minkä jälkeen muutos tasaantuu. Kuusella muutos on loivempi mutta jatkuu toisaalta pitempään nousten 60 vuoden iällä noin 23 %:iin (Hakkila 1966). Hakkilan (1968) tutkimuksessa kesäpuuosuus selitti noin 60 % kuitupuuerien välisestä kuiva-tuoretiheyden vaihtelusta (kuva 43).



Kuva 43. Kesäpuuosuus kuiva-tuoretiheyden leimikoittaisen vaihtelun selittäjänä mänty- ja kuusikuitupuulla (Hakkila 1968).

Säteensuuntaiset muutokset kesäpuuosuudessa heijastuvat puuaineen tiheyteen, joskin sydänpuuhun kerääntyvät uuteaineet hämärtävät vaihtelumallia. Männyllä kuiva-tuoretiheys kasvaa jyrkimmin nuorpuuvyöhykkeen alueella. Keskimääräinen tiheys tietyllä korkeudella rungossa nousee suurimmilleen, kun lustoja on noin 80–100, ja kääntyy sitten laskuun. Kuusella sen sijaan kuiva-tuoretiheys laskee ensimmäisten lustojen alueella ja kääntyy vasta sitten männyn tavoin nousuun rungon ytimestä pintaa kohti. Lustojen lukumääränä ilmaistu etäisyys ytimestä vaikuttaa kuiva-tuoretiheyteen männyllä voimakkaammin kuin kuusella. (Hakkila 1966)

Taulukossa 15 on esitetty lukusarjat, jotka kuvaavat puuaineen kuiva-tuoretiheyden eroja rungon sisäosan, keskiosan ja pintaosan välillä rungon neljäsosakorkeudella aineistossa, jossa puiden ikä oli 40–80 vuotta. Kukin osa edustaa kolmannesta rungon säteestä, mutta runkopuun tilavuuden suhteen osien painoarvot ovat 1:3:5 (Hakkila 1966).

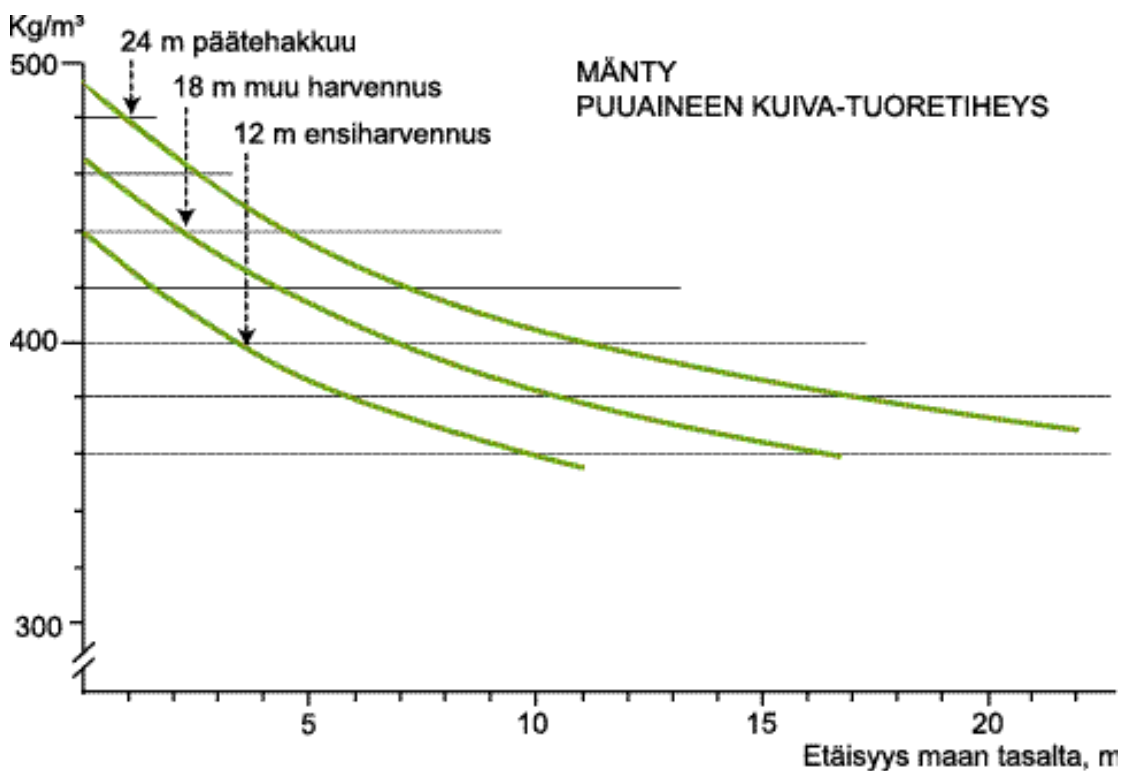
Taulukko 15. Männy ja kuusen kuiva-tuoretiheys rungon sisä-, keski- ja pintaosassa (Hakkila 1966).

	Kuiva-tuoretiheys, kg/m ³			
	Sisäosa	Keskiosa	Pintaosa	Keskiarvo
Mänty	357	388	430	409
Kuusi	355	362	381	372

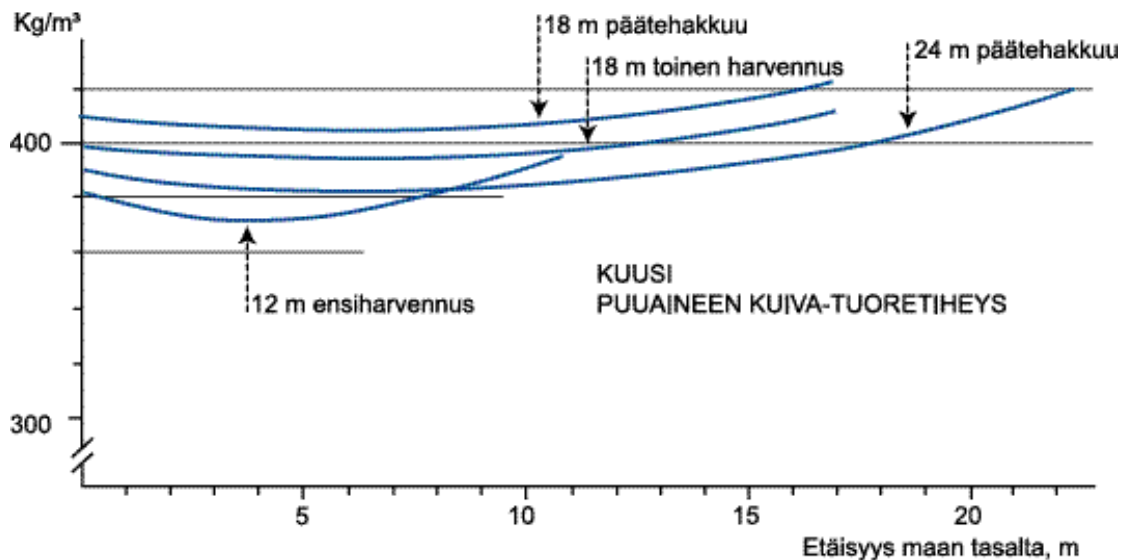
Tämä säteensuuntainen muutos aiheuttaa eroja kuiva-tuoretiheydessä runkojen, metsiköiden ja puutaveralajien välillä. Ilmiöstä näet seuraa, että:

- Kuiva-tuoretiheys on varttuneissa puissa suurempi kuin nuorissa.
- Sahatukkien pinnoista tehdyn hakkeen kuiva-tuoretiheys on korkeampi kuin varsinaisesta kuitupuusta tehdyn hakkeen.
- Kuiva-tuoretiheys muuttuu rungon pituussuunnassa tyvestä latvaa kohti, mikä puolestaan aiheuttaa eroja rungon eri korkeuksilta tehtyjen puutaveralajien välille.
- Muutokset ovat männyllä jyrkempiä kuin kuusella.

Tässä tutkimuksessa männy rungon kuiva-tuoretiheys laski rungon tyvestä latvaan yli 100 kg/m³. Muutos on samansuuntainen kaikissa leimikkotyypeissä, mutta kuiva-tuoretiheyskäyrät kulkevat sitä korkeammalla, mitä vanhempi puusto on kysymyksessä (kuva 44).

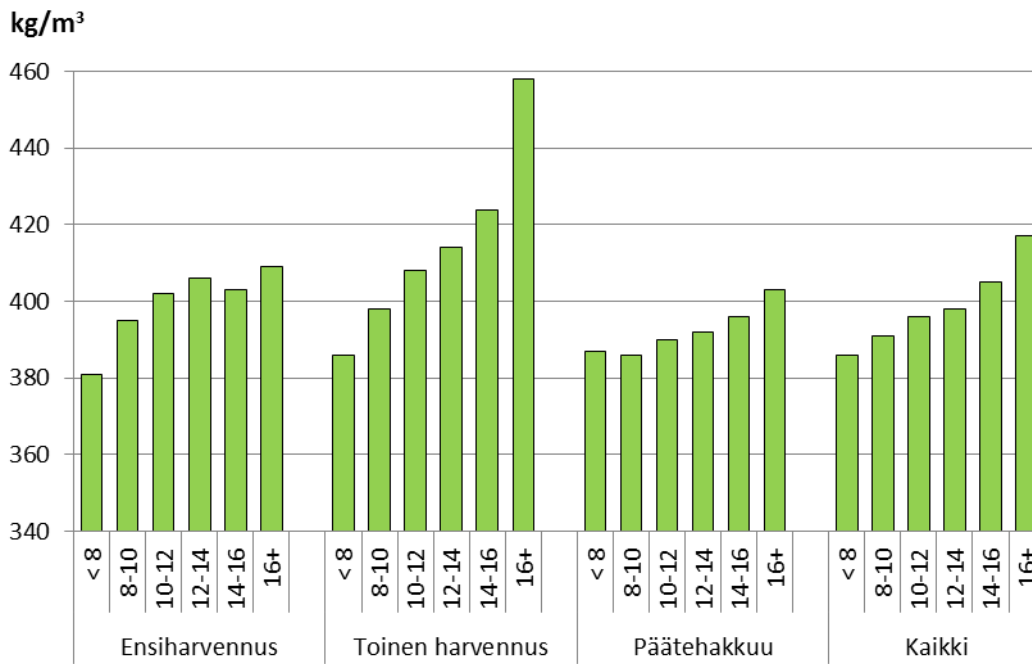
**Kuva 44.** Männy puuaineen kuiva-tuoretiheyden vaihtelu rungon pituussuunnassa. Rungon pituudet 12, 18 ja 24 m.

Tässä tutkimuksessa kuusen kuiva-tuoretiheyden pituussuuntainen muutos on pienempi kuin männyllä. Kuiva-tuoretiheys ensin laski vähän mutta kääntyi nousuun jo muutaman metrin etäisyydellä kannonkorkeudesta. Kuusirungon latvassa kuiva-tuoretiheys oli 15–20 kg/m³ korkeampi kuin kannonkorkeudelle (kuva 45).

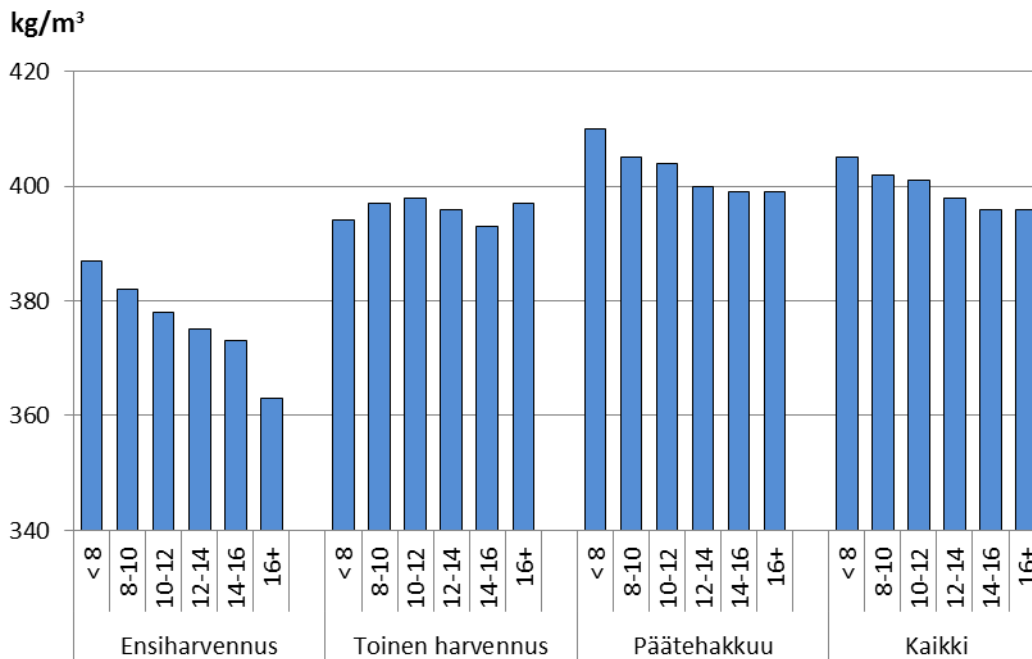


Kuva 45. Kuusen puuaineen kuiva-tuoretiheyden vaihtelu rungon pituussuunnassa. Rungon pituudet 12, 18 ja 24 m.

Tässä tutkimuksessa kuiva-tuoretiheyttä tarkasteltiin pölkyn läpimitan suhteen luokiteltuna (kuvat 46 ja 47). Männyn harvennusleimikoissa kuiva-tuoretiheys kasvoi pölkyn läpimitan myötä. Erityisen selvästi tämä oli nähtävissä toisen harvennuksen leimikoissa (kuva 46). Nuorissa metsissä järeimmät kuitupuupölkkyt ovat peräisin rungon tyveltä, jolloin erot olivat selvät. Kuusella suuntaus on ensiharvennusleimikoissa päinvastainen, koska järeät pölkkyt ovat peräisin nopeakasvuisista puista. Kuusikon toisessa harvennuksessa nopeimmin kasvaneista rungoista tehdään tukkipuuta, eikä kuitupuuositteessa ole enää selkeitä eroja läpimittaluokkien välillä (kuva 47).



Kuva 46. Mäntykuitupuun puuaineen kuiva-tuoretiheys läpimitan suhteen.



Kuva 47. Kuusikuitupuun puuaineen kuiva-tuoretiheys läpimitan suhteen.

Pölkyn läpimitta on periaatteessa tehokas kuiva-tuoretiheyden lajitteluperuste männyllä. Käytännössä läpimittalajittelun tehokkuus heikentyy oleellisesti, jos nuorten runkojen tyviosasta korjataan tukkipuuta. Lisäksi läpimittalajittelun mahdollisuuksia heikentää männylläkin se, että pitkässä 5-metrissä kuitupuupölkkyssä on usean läpimittaluokan puuta. Kuvat 46 ja 47 antavat joka tapauksessa viitteitä ainakin siitä, millainen vaikutus tukki- tai kuitupuun läpimittavaatimusten muuttamisella on kuitupuuvirran kuiva-tuoretiheyteen. Jos tavanomaisesta kuitupuuositteesta erotetaan sahausta

varten pikkutukkeja, supistuvan kuitupuuositteen keskimääräinen kuiva-tuoretiheys alenee männyllä mutta pikemminkin kasvaa kuusella.

Männyllä saatiin aikaan tehokkaampi lajittelu erottelemalla tyvipölkkyt muista pölkkyistä. Mäntykuitupuussa tyvipölkkyjen kuiva-tuoretiheys oli 10 % korkeampi kuin muiden pölkkyjen. Taulukossa 16 sulkumerkkeihin asetettu päätehakuuleimikoiden tyvipölkkyjen kuiva-tuoretiheys ei aineiston vähäisyyden vuoksi perustu suoranaisesti kuitupuumittauksiin, vaan se viittaa samojen päätehakuuleimikoiden tyvitukkeihin. Koska mäntypuun kuiva-tuoretiheys riippuu enemmän puun iästä kuin kasvunopeudesta, ero tyvitukkien ja kuitupuun tyvipölkkyjen välillä on leimikon sisällä vähäinen. Pölkyn asemaan perustuva lajittelu ei johda vastaavaan tulokseen kuusikuitupuulla.

Taulukko 16 osoittaa myös kuorettoman ja kuorellisen kuitupuun kuiva-tuoretiheyden eron. Männyllä, jolla kuoren kuiva-tuoretiheys oli puuaineeseen verrattuna jopa kolmanneksen alempi (luku 5.2.3.), kuorellisuus alensi keskimääräistä kuiva-tuoretiheyttä tyvipölkkyillä 20–25 kg/m³ ja muilla pölkkyillä 10 kg/m³. Kuusella erotus oli vain 5 kg/m³.

Taulukko 16. Viisimetristen tyvi- ja muiden pölkkyjen kuiva-tuoretiheys kuorettomassa (pelkkä puuaine) ja kuorellisessa (puuaineen ja kuoren painotettu keskiarvo) kuitupuussa.

Puulaji	Leimikkotyyppi	Kuivatuooretiheys, kg/m ³					
		Kuoreton kuitupuun		Kuorellinen kuitupuun		Kuori	
		Tyvet	Muut	Tyvet	Muut	Tyvet	Muut
Mänty	1. harvennus	409	373	386	361	261	267
	2. harvennus	447	399	425	389	290	275
	Päätehakkuu	(465)	393	(442)	385	(315)	293
Kuusi	1. harvennus	375	374	371	369	342	325
	2. harvennus	403	393	399	387	358	334
	Päätehakkuu	409	400	405	393	370	346

5.7.3. Kuiva-tuoretiheyden vaihtelu leimikoiden välillä

Rungon keskimääräinen kuiva-tuoretiheys riippuu ennen kaikkea puun iästä ja kasvunopeudesta sekä perintötekijöistä. Kuiva-tuoretiheyden keskihajonta runkojen välillä on noin 8 % eli 30 kg/m³ (Hakkila 1966 ja 1979). Päätehakuuleimikoissa puuston korkea ikä nostaa tiheyttä. Toisaalta, koska hitaimmin kasvaneet puut on poistettu jo harvennushakkuissa, päätehakuupuusto on metsikön nuoruusvaiheessa kasvanut keskimääräistä nopeammin, mikä vaikuttaa tiheyttä alentavasti. Männyllä iän vaikutus on voimakkaampi, kuusella taas kasvunopeuden.

Lindblad ja Verkasalo (1999, 2001) kartoittivat puumassateollisuuden käyttämän puutavaran keskimääräisen kuiva-tuoretiheyden laajasta aineistosta, jossa näytteet kerättiin valmiista hakkeesta. Etelä-Suomessa kuitupuuhakkeen keskimääräinen kuiva-tuoretiheys oli männyllä 409 kg/m³ ja kuusella 393 kg/m³. Arvot ovat noin 2 % korkeampia kuin tässä tutkimuksessa. Merkittävä osa erosta aiheutuu siitä, että käsillä olevassa tutkimuksessa kuiva-tuoretiheys on mitattu oksattomasta puuaineesta. Eräissä ruotsalaisessa tutkimuksessa oksat lisäsivät keskimääräistä kuiva-tuoretiheyttä mäntykuitupuulla 1,5 % ja kuusikuitupuulla 0,8 % (Björklund 1984). Eroa syntyy myös siitä, että tämän tutkimuksen kuitupuunaineistossa ei ole mukana sellaisia järeitä tyvipölkkyjä, jotka täyttävät tukkipuun mitat mutta siirtyvät lahon, lenkouden tai muiden vikaisuuksien vuoksi kuitupuuhun.

Lindblad ja Verkasalo (2001) osoittivat myös kuitupuuhakkeen ja sahojen teollisuushakkeen väliset erot kuiva-tuoretiheydessä (taulukko 17). Teollisuushake oli Etelä-Suomen oloissa kuitupuuhakkeen verrattuna männyllä 6 % ja kuusella 3 % tiheämpää.

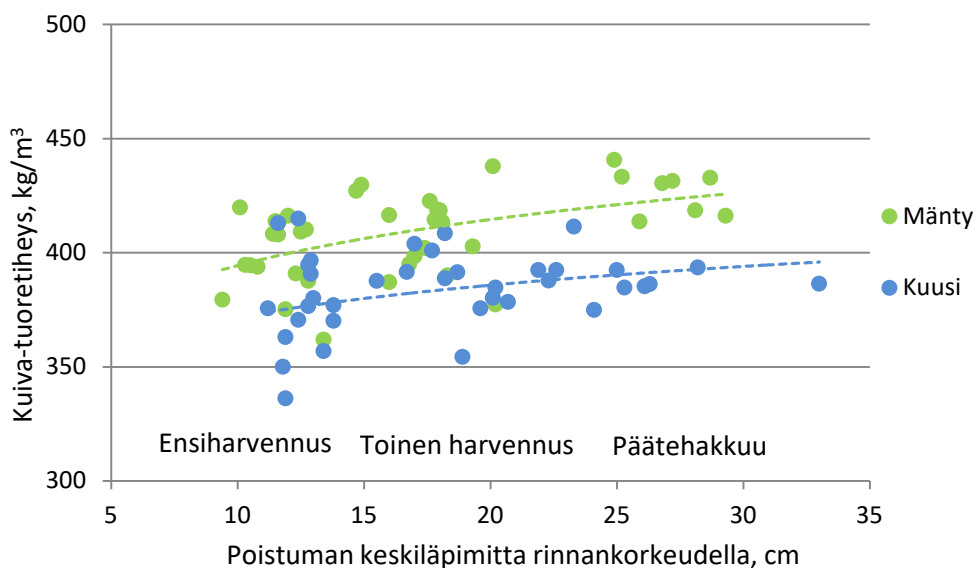
Erään aikaisemman tutkimuksen mukaan kuusipuun keskimääräinen kuiva-tuoretiheys on istutusmetsiköissä 25 vuoden iällä 6 % ja 70 vuoden iällä 4 % alhaisempi kuin luontaisesti syntyneissä, joiden kasvu on ainakin nuorella iällä hitaampi. Kun hakkuut toteutetaan nopeakasvuissa metsissä varhaisemmalla iällä, erot puutavaran kuiva-tuoretiheydessä muodostuvat käytännössä vielä suuremmiksi (Hakkila ja Uusvaara 1968).

Koska runko jaetaan eri puutavaralajeihin, runkokohtainen lajittelu ei ole sovellettavissa meillä käytössä olevaan puunkorjuuseen ja logistiikkaan. Tässä tutkimuksessa tarkastelu kohdistuu runkojen sijasta leimikoittaisiin keskiarvoihin.

Taulukko 17. Männen ja kuusen kuitupuu- ja teollisuushakkeen keskimääräiset kuivatuooretiheydet (Lindblad ja Verkasalo 2001).

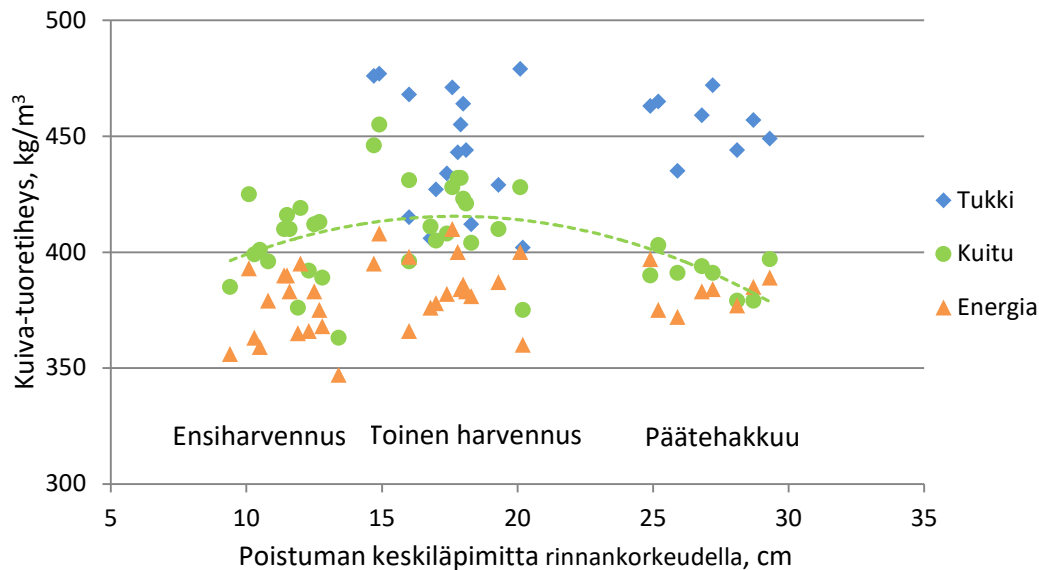
	Kuiva-tuoretiheys, kg/m ³		
	Kuitupuuhake	Teollisuushake	Ero, %
Mänty, Etelä-Suomi	409	435	6
Mänty, Pohjois-Suomi	395	407	3
Kuusi, Etelä-Suomi	393	404	3

Koko rungon keskimääräinen kuiva-tuoretiheys kasvoi ensiharvennuksista päätehakkuihin (kuva 48). Ensiharvennuskuusella vaihtelu leimikoiden välillä oli kasvunopeuden ja siitä riippuvan harvennuksen erojen vuoksi laava. Ero hidas- ja nopeakasvuisten ensiharvennuskuusikon välillä voi olla leimikkotasolla jopa 100 kg/m³.



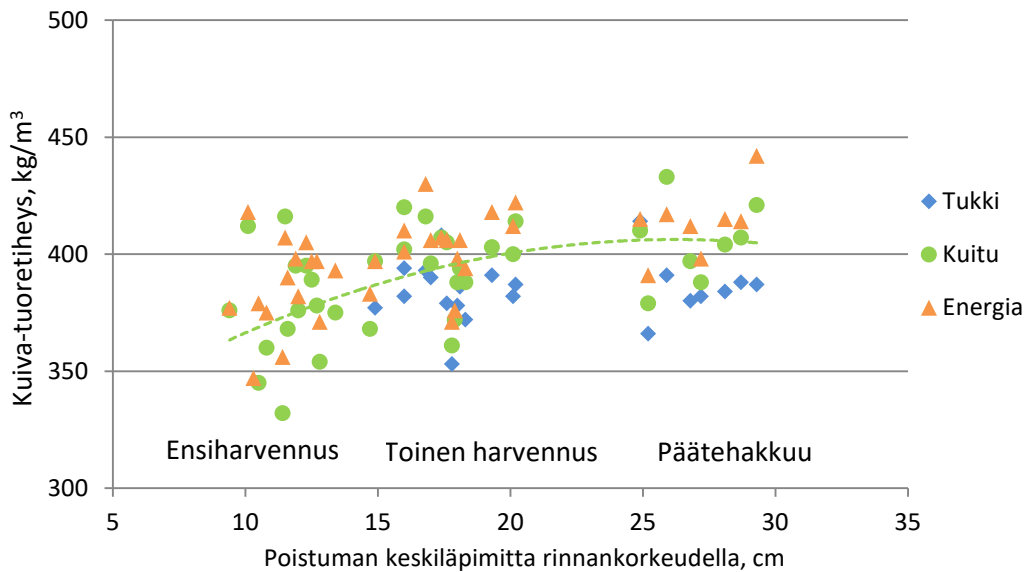
Kuva 48. Koko rungon puuaineen kuiva-tuoretiheys leimikoittain rinnanr korkeusläpimitan keskiarvon suhteen.

Asetelma muuttui, kun runko jaettiin puutavaralajeiksi ja tarkastelu kohdistettiin erikseen tukki-, kuitu- ja energiapuuhun. Erot leimikoiden välillä jäivät puutavaralajien puitteissa paljon pienemmiksi kuin kokonaisten runkojen puitteissa, kun tyvipölkkyt siirtyvät kuitupuusta tukkipuuhun metsikön varttuessa. Kuitupuusite sisältää ensiharvennusvaiheessa kaikki tyvipölkkyt ja toisessa harvennuksessa vielä merkittävän osan tyvipölkkyistä. Hoidetun männikön päätehakuussa kuitupuuhun joutui tuskin lainkaan terveitä tyvipölkkyjä, mikäli luston keskimääräinen paksuus oli vähintään 1,2 mm ja puu laatunsa puolesta sahapuuksi kelpollista. Mäntykuitupuun keskimääräinen kuiva-tuoretiheys oli edellä mainitusta syystä korkein toisen harvennuksen leimikoissa (kuva 49).



Kuva 49. Mäntytukin, -kuitupuun ja -energiapuun puuaineen kuiva-tuoretiheys leimikoittain runkojen rinnankorkeusläpimitan keskiarvon suhteen.

Tukkipuun erottaminen raaka-ainevirrasta vaikuttaa mäntykuitupuuhun kuiva-tuoretiheyttä alentaen, koska mäntypuu on tiheintä rungon tyvellä. Kuusella vaikutus on päinvastainen, kun sen puuaineen tiheys vaihtelee rungon pituussuunnassa vain vähän. Enemmän vaikuttaa jälleen se, että tukkipuurungot ovat kasvaneet nopeammin kuin kuitupuurungot, ja siksi kuusella tukkipuun kuiva-tuoretiheys on alhaisempi kuin kuitupuun (kuva 50).



Kuva 50. Kuusitukin, -kuitupuun ja -energiapuun puuaineen kuiva-tuoreiheys leimikoittain runkojen rinnankorkeusläpimitan keskiarvon suhteen.

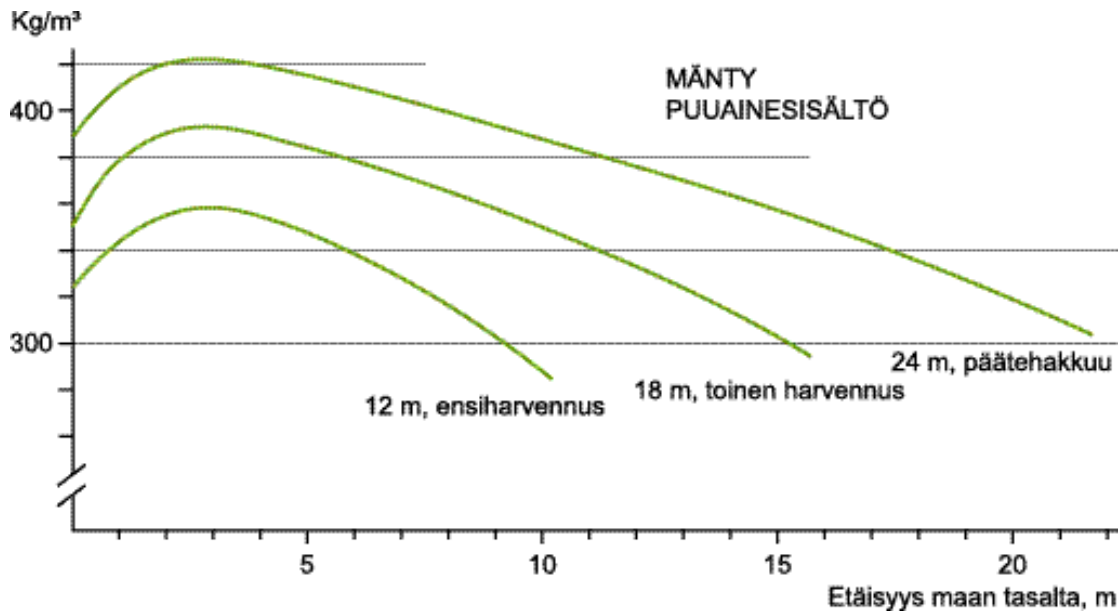
Leimikkotyypin sisällä leimikoiden välinen vaihtelu kuiva-tuoreiheydessä johtuu paljolti kasvunopeuseroista. Hidaskasvuinen metsikkö saavuttaa tietyn hakkuuvaiheen vanhempana kuin nopeakasvuinen. Siksi kuiva-tuoreiheyden ennustaminen tarkentuu, kun leimikkotyypin rinnalla otetaan huomioon myös puuston ikä tai luston paksuus.

5.7.4. Kuorellisen puun puuainesisältö

Raaka-aineen kulutus ilmoitetaan puumassateollisuudessa kuorellisina kuutiometreinä puumassatonna kohti. Kulutus riippuu toisaalta prosessitekniikasta ja tuotteesta sekä toisaalta puun ominaisuuksista, joista kulutuksen kannalta tärkeimmät ovat kuoren tilavuusosuus ja puun kuiva-tuoreiheys. Kulutukseen vaikuttavat lisäksi esimerkiksi puun uuteainepitoisuus, oksapuun määrä ja kuorintahävikki.

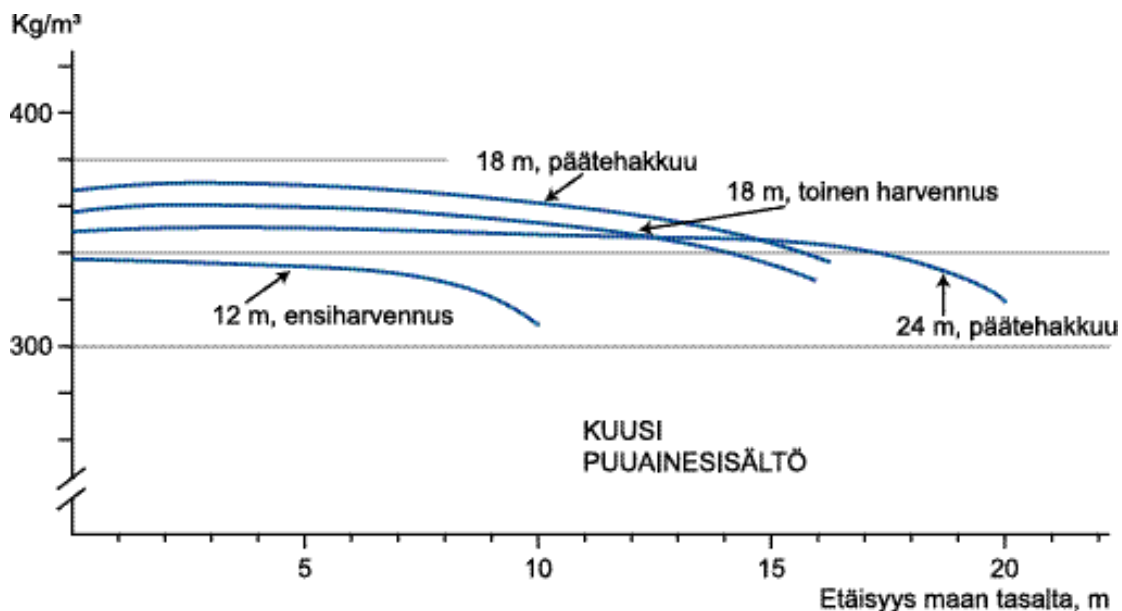
Kuorellisen kuitupuun puuainesisältö, yksikkönä kg/m^3 , on kuoren tilavuusosuuden ja puun kuiva-tuoreiheyden yhteisvaikutuksen tulos. Kuoren tilavuusosuus viittaa tässä yhteydessä pystypuustossa vallitsevaan ehjäkuoriseen tilaan. Kuorta kuitenkin irtoilee puutavaraa käsiteltäessä, ja sen osuus pienenee korjuun ja kuljetuksen aikana. Osuus on siis pienempi kuitupuun saapussa tehtaalle.

Männyllä puun kuiva-tuoreiheys aleni kannonkorkeudelta käyttöosan latvaan noin 20 %, suurilla puilla hieman enemmän kuin pienillä (kuva 44). Kuoren tilavuusosuus aleni rungon tyvellä aluksi jyrkästi, mutta kaarnakuoren korvaannuttua hilsekuorella muutos hidastui ja kääntyi rungon käyttöosan puolivälissä kasvuun (kuva 19). Kuorellisen mäntypuun puuainesisällön kannalta kuiva-tuoreiheyden ja kuoren tilavuusosuuden muutokset vaikuttavat siis rungon tyvellä vastakkaiseen mutta rungon latvapäässä samaan suuntaan. Seurauksena oli, että puuainesisältö nousi tyvestä latvaa kohti noin kolmen metrin matkan mutta kääntyi sen jälkeen laskuun. Muutos oli nopein pienissä, mutta määrällisesti suurin järeissä puissa (kuva 51).



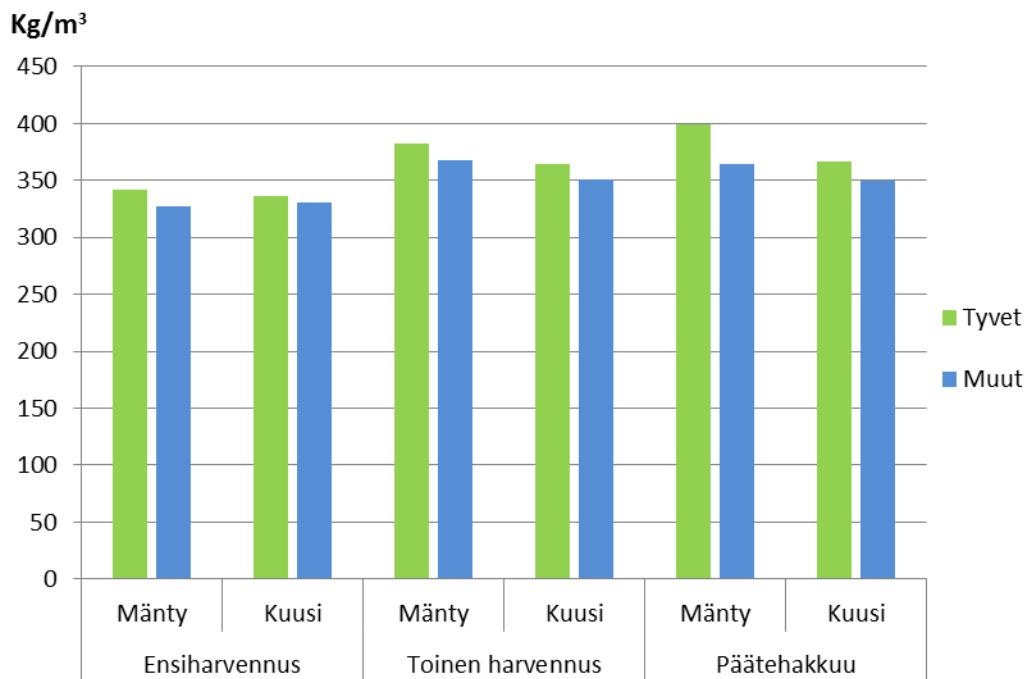
Kuva 51. Männyksen kuorellisen tilavuuden puuainesisältö eri korkeuksilla 12, 18 ja 24 m:n pituisissa rungoissa.

Kuusella kuiva-tuoretiheys aleni tyvestä latvaan rungon ensimmäisen kolmanneksen matkan, mutta muutos oli loiva. Sen jälkeen tiheys kääntyi latvaa kohti nousuun (kuva 45). Kuoren tilavuusosuuden vaihtelumalli oli samantyyppinen kuin männyllä, mutta kuoriosuuden aleneminen oli rungon tyvellä hitaampaa ja kääntyi nousuun aikaisemmassa vaiheessa (kuva 20). Niiden yhteisvaikutuksena rungon pituussuuntaiset muutokset kuorellisen kuusikuitupuun puuainesisällössä jäivät verraten vähäisiksi. Vasta rungon ylimmän kolmanneksen alueella puuainesisältö kääntyi nopeampaan laskuun (kuva 52).



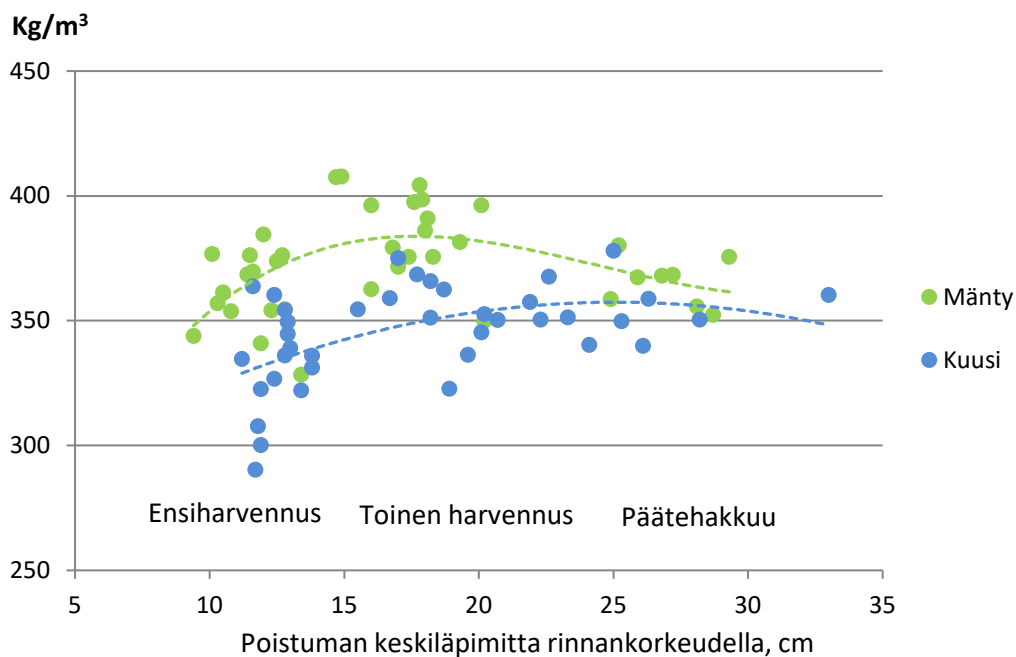
Kuva 52. Kuusen kuorellisen tilavuuden puuainesisältö eri korkeuksilla 12, 18 ja 24 m:n pituisissa rungoissa.

Ero kuitupuun viisimetristen tyvipölkkyjen ja muiden pölkkyjen välillä oli eri leimikkotyypeissä männyllä 4–9 % ja kuusella 2–5 % (kuva 53). Jos tarkastelu ulotetaan myös latvakappaleen energiapuositteeseen, ero muodostuu huomattavasti suuremmaksi. Siltä osin kuin latvakappale käytetään energiapuuksi, puuainesisällöllä ei ole kuitenkaan merkitystä.



Kuva 53. Kuorellisen kuitupuun puuainesisältö tyvi- ja muissa pölkyissä.

Leimikoiden välillä voi olla merkittäviä eroja puuainesisällössä (kuva 54). Kummallakin puulajilla kuitupuun puuainesisältö oli korkein myöhäisissä harvennuksissa ja alin ensiharvennuksissa. Leimikoittainen keskiarvo oli tutkimusaineistossa männyllä ensiharvennuksessa 338 kg, toisessa harvennuksessa 373 kg ja päätehakkuussa 365 kg kuoretonta puuta kuorellisessa kuutiometrissä. Kuusella vastaavat arvot olivat 334 kg, 355 kg ja 350 kg. Puuainesisältö oli ensiharvennuksissa muihin leimikoihin verrattuna männyllä noin 8 % ja kuusella noin 5 % alempi.



Kuva 54. Kuorellisen puun puuainesisältö leimikoittain rinnankorkeusläpimitan suhteen.

5.8. Kaatotuoreen puun kosteus

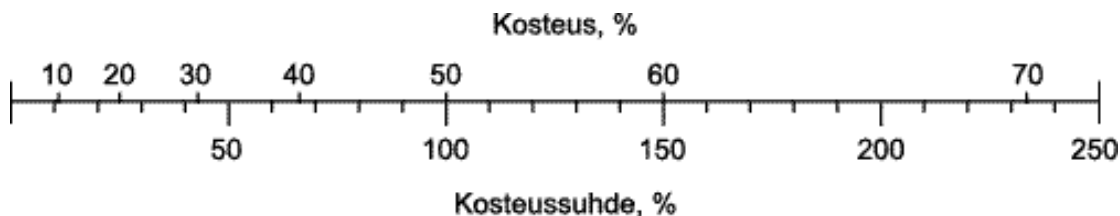
5.8.1. Kosteuden suuret ja merkitys

Veden osuus määritetään joko kokonaismassaan suhteuttaen *kosteutena* tai kuivamassaan suhteuttaen *kosteussuhteena*:

$$\text{Puun kosteus [\%]} = \frac{100 \times \text{veden massa}}{\text{veden massa} + \text{puuaineen massa}}$$

$$\text{Puun kosteussuhde [\%]} = \frac{100 \times \text{veden massa}}{\text{puuaineen massa}}$$

Tässä tutkimuksessa veden osuus ilmoitetaan kosteussuhteena, joka usein on laskennan ja tulkinnan kannalta kosteutta yksiselitteisempi suure. Suureita voidaan muuntaa keskenään laskennallisesti tai kuvan 55 avulla.



Kuva 55. Kosteuden ja kosteussuhteen muuntoviivain.

Puun yhteyttämistoiminta ja ylös- ja alaspäin tapahtuvat nestevirtaukset vaativat suuren määrän vettä. Sen osuus on yli puolet mänty- ja kuusirungon tuoremassasta. Vesi on puussa joko *solun seinämiin sidottuna tai soluonteloissa vapaana*. Seinämissä vesi on mikrofibrillien väleissä lisäten seinämien tilavuutta. Enimmillään seinämiin sidotun veden määrä on noin 30 % kuivamassaan verrattuna, jolloin saavutetaan *puunsyiden kyllästymispiste*. Kaikki muu puussa oleva vesi on vapaana soluonteloissa ja solujen välisissä tyhjissä tiloissa.

Kasvavassa rungossa kosteus ei laske sydänpuussakaan puunsyiden kyllästymispisteen alapuolelle, mutta puutuotteiden kuivuesssa näin tapahtuu. Silloin kappale kutistuu ja sen lujuusarvot kasvavat. Jos mänty- tai kuusipuusta poistuu kaikki vesi, sen tilavuus kutistuu noin 12 % (Jalava 1952).

Raaka-aineen kosteudella on merkitystä myös puumassateollisuudessa. Kuitupuun laatu on parhaimmillaan kaatotuoreena. Kuivuminen on eduksi kuljetuskustannusten kannalta, mutta muutoin sen vaikutus on kielteinen:

- Pölkyn kuivuesssa kuoren ja jällen välinen sidos lujittuu, mikä vaikeuttaa kuoriutumista. Haitta on hankalin mekaanista massaa valmistettaessa, koska jäljelle jäänyttä kuorta ei voida poistaa enää kuidutusvaiheessa kemikaaleilla liuottamalla.
- Kuivuminen johtaa hienojakeen osuuden kasvuun haketuksessa.
- Kuivuminen hidastaa kemikaalien tunkeutumista hakkeeseen aiheuttaen keitossa epätasaisuutta. Se hidastaa puun kuituuntumista myös mekaanisessa prosessissa, mikä johtaa tuottavuuden alenemiseen ja energian kulutuksen kasvuun. Hiontaprosessissa kosteus on kriittinen laatutekijä erityisesti puunsyiden kyllästymispisteen alapuolella (Kärenlampi 1992, 1995).
- Kuivuminen alentaa massan vaaleutta muun muassa varastoinnin aikana kuoresta puuhun siirtyvien uuteaineiden vuoksi

Laatutekijänä puun tuoreus on mekaanisessa kuidutuksessa suorastaan kriittinen (Kärenlampi 1992). Hiomopölkkyjen kosteussuhde ei saisi olla alle 40 %. Haketta hierrettäessä kosteuden vaikutus ei ole yhtä suuri, mutta myös kuumahierreprosessissa kuivalla hakkeella on taipumus tuottaa jauhemaista massaa. Puumassalle on silloin ominaista katkenneiden kuitujen ja hienojakeen runsaus ja lujuuden heikentyminen (Tyrväinen 1995).

Tuoreuden merkitys kasvoi voimakkaasti 1990-luvulla, kun massan ja paperin laatuvaatimukset kiristyivät ja siirryttiin lisäksi suljetumpiin prosessimenetelmiin ja kloorivapaaseen valkaisuun. Siksi puun kulkua nopeutettiin niin, että mekaanisesti kuidutettava kuusipuu saapuu käyttöpaikalle kesäaikana yleensä 1–3 viikon kuluessa kaatohetkestä. Talvella sallitaan pitempien varastointi, koska kuivumista ei juuri tapahdu. Kemialliseen kuidutusprosessiin tarkoitettu puu viipyy matkalla kannolta tehtaalle pitempään, mutta senkin kulku on nopeutunut.

Kuivumisen ongelmat on saatu hallintaan hankintaketjua nopeuttamalla. Kuusikuitupuu on tehtaalle tullessaan lähes yhtä tuoretta kuin kaatohetkellä. Siksi sekä puutavaran kuljettajaa että vastaanottajaa kiinnostaa pystyvuoston kosteuden ja tuoretiheyden vaihtelu.

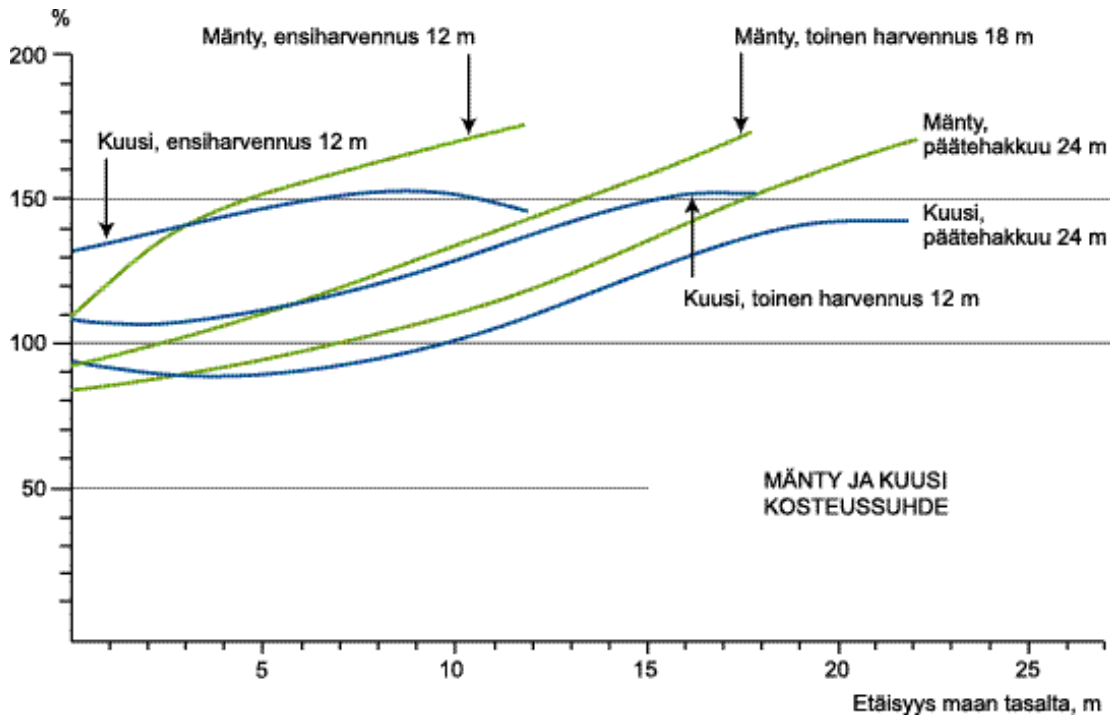
5.8.2. Kosteussuhde

Sydänpuun kosteussuhde on männyllä 30–35 % ja kuusella 35–40 % (Jalava 1952, Nylinder 1961 a, b). Mantopuun kosteussuhde vaihtelee enemmän ollen pintaosissa hieman korkeampi kuin sisäosissa. Se on kasvukaudella alempi kuin kasvukauden ulkopuolella, jolloin puun elintoiminnot ja haihdutus ovat miltei pysähdyksissä.

Tuoreen puutavaran kosteussuhde riippuu siis ratkaisevasti sydänpuun osuudesta. Toisaalta kuiva-tuoretiheys vaikuttaa oleellisesti kosteussuhteeseen; sama vesimäärä merkitsee kevyemmässä puu-aineessa korkeampaa kosteussuhdetta.

Tässä tutkimuksessa puun keskimääräisen kosteussuhteen ja sydänpuun kosteussuhteen pohjalta voitiin laskea, että mantopuun kosteussuhde oli männyllä 135–155 % ja kuusella 150–160 %. Puussa on kummallakin puulajilla silloin noin 80 % siitä vesimäärästä, mitä siinä enimmillään voi teoreettisesti olla (Kärkkäinen 2007).

Koska sydänpuun tilavuusosuus pienentyi rungossa latvaa kohti, kosteussuhde samalla kasvoi. Sydänpuun ohella rungon pituussuuntaisiin eroihin vaikutti erityisesti männyllä puuaineen kuiva-tuoretiheyden pienentyminen latvaa kohti (kuva 44). Myös kuivan ulkokuoren osuuden pienentyminen latvaa kohti vaikuttaa samaan suuntaan, jos tarkastelun kohteena on kuorellinen puutavara.



Kuva 56. Kaatotuoreiden kuorellisten mänty- ja kuusirunkojen kosteussuhde rungon pituusunnassa.

Kuva 56 osoittaa kuorellisen rungon kosteussuhteen muuttumisen tyvestä latvaan eri leimikkotyypeissä. Tulokset ovat sopusoinnissa Tammisen (1962 ja 1964) Ruotsissa julkaisemien tulosten kanssa. Voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset:

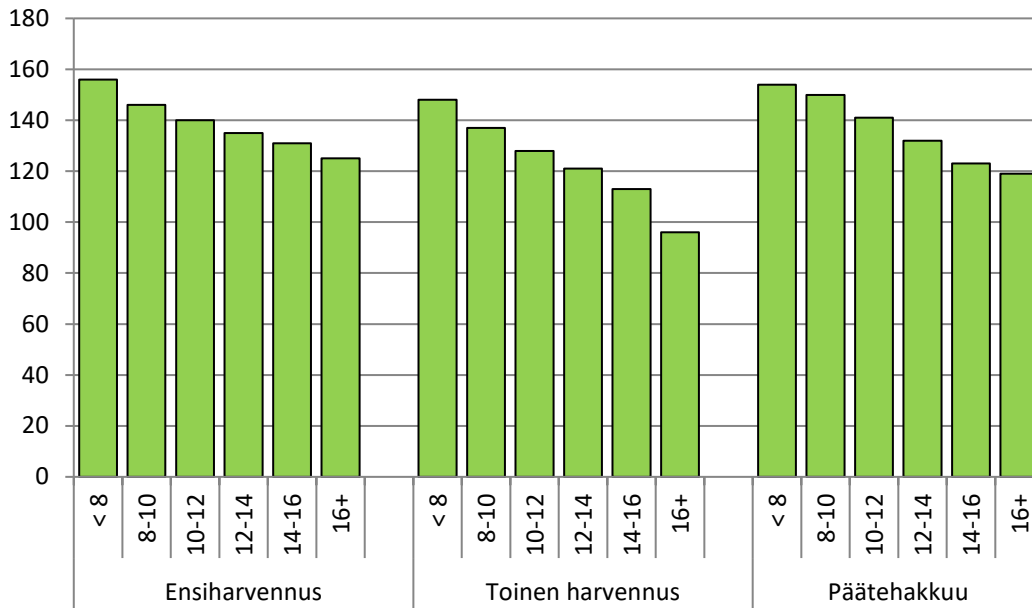
- Kosteussuhde kasvaa kummallakin puulajilla latvaa kohti. Ensiharvennuspuuta lukuun ottamatta se on rungon tyvellä yleensä 90–110 % ja latvassa 140–180 %.
- Männyllä kosteussuhde on rungon tyvellä hieman alhaisempi mutta ylempänä rungossa korkeampi kuin kuusella.
- Kosteussuhde on korkein ensiharvennuspuussa ja alhaisin päätehakkuupuussa.
- Kun runko jaetaan puutavaralajeiksi, kosteussuhde on tukkipuussa aina alhaisempi kuin kuitupuussa. Korkeimmillaan se on rungon ylimmästä latvaosasta saatavassa energiapuussa (taulukko 18).

Taulukko 18. Kaatotuoreen kuorellisen puutavaran kosteussuhde leimikkotyypeittäin.

Puulaji	Leimikkotyyppi	Kosteussuhde, %			
		Tukki	Kuitu	Energia	Koko runko
Mänty	Ensiharvennus		138	156	141
	Toinen harvennus	105	122	148	115
	Päätehakkuu	95	134	154	99
Kuusi	Ensiharvennus		138	150	140
	Toinen harvennus	106	121	143	113
	Päätehakkuu	97	114	138	99

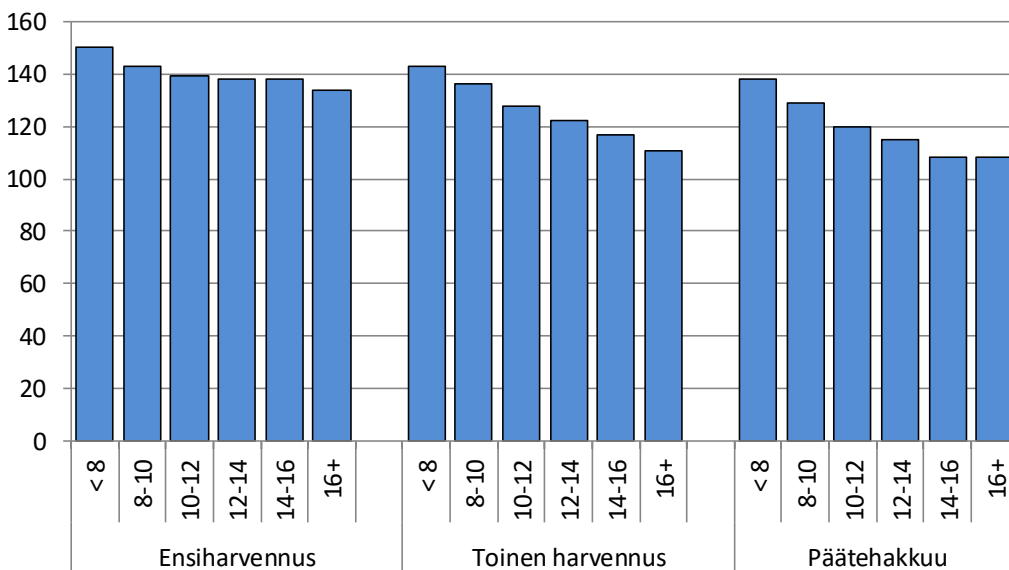
Tuoreen kuitupuun kosteussuhteen vaihtelu ei ole laatutekijänä kyllin tärkeä antaakseen aiheita pölkkyttävään lajitteluun. Kuitenkin jos muista syistä päädytään pölkkyjen lajitteluun, voi samalla tapahtua jonkinasteista kosteuslajittelua. Tässä tutkimuksessa kosteussuhde oli ohuissa kuitupuupölkkyissä korkeampi kuin järeissä. Erot olivat männyllä jyrkemmät kuin kuusella. Suurimmillaan ne olivat männyn toisessa harvennuksessa, jolloin pääosa järeistä pölkkyistä koostui runsaasti sydänpuuta sisältäviä tyvikappaleista (kuvat 57 ja 58). Myös tyvipölkkyjen erottaminen muista pölkkyistä sai aikaan kosteuslajittelua. Tässäkin tapauksessa erot olivat männyllä jyrkemmät kuin kuusella. Suurimmillaan ne olivat päätehakuissa (kuva 59).

Kosteussuhde, %

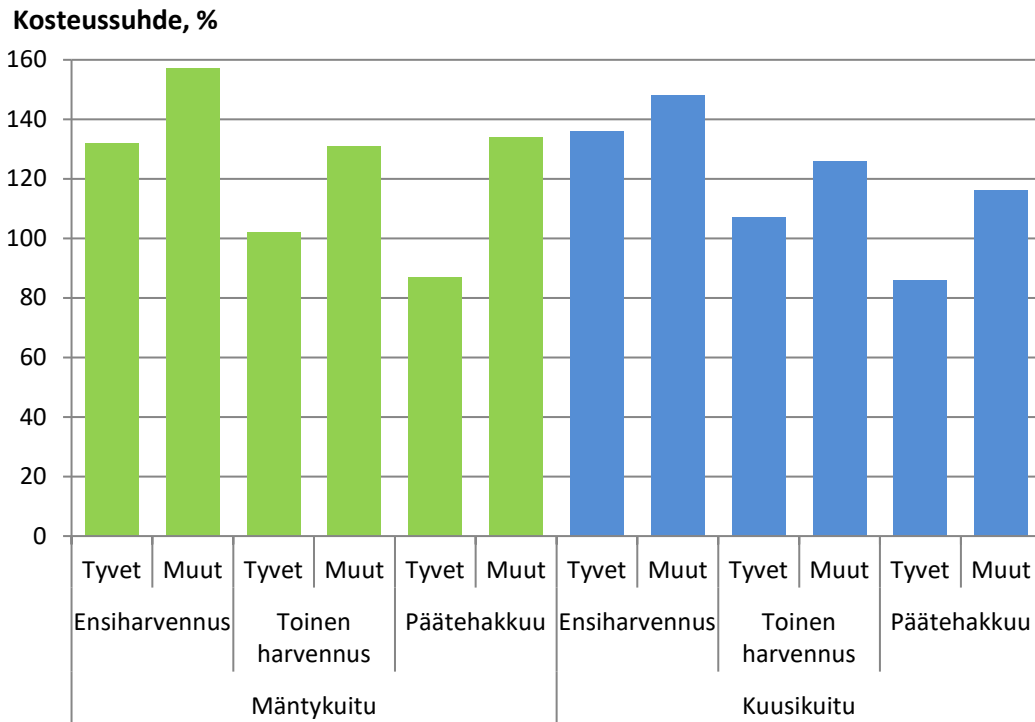


Kuva 57. Kaatotuoreen kuorellisen mäntykuitupuun kosteussuhde leimikkotyypin ja läpimitan suhteen.

Kosteussuhde, %

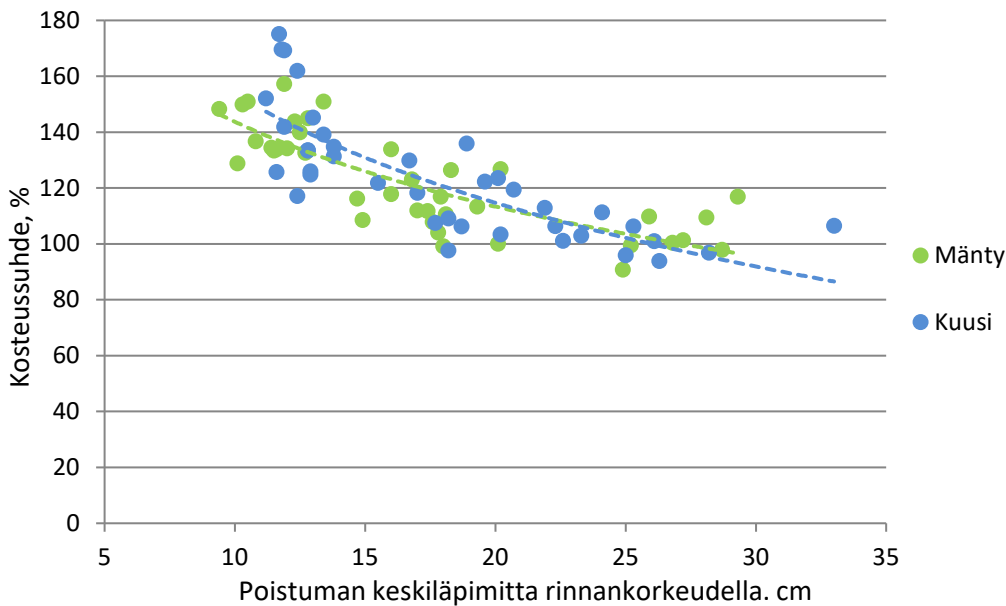


Kuva 58. Kaatotuoreen kuorellisen kuusikuitupuun kosteussuhde leimikkotyypin ja läpimitan suhteen.



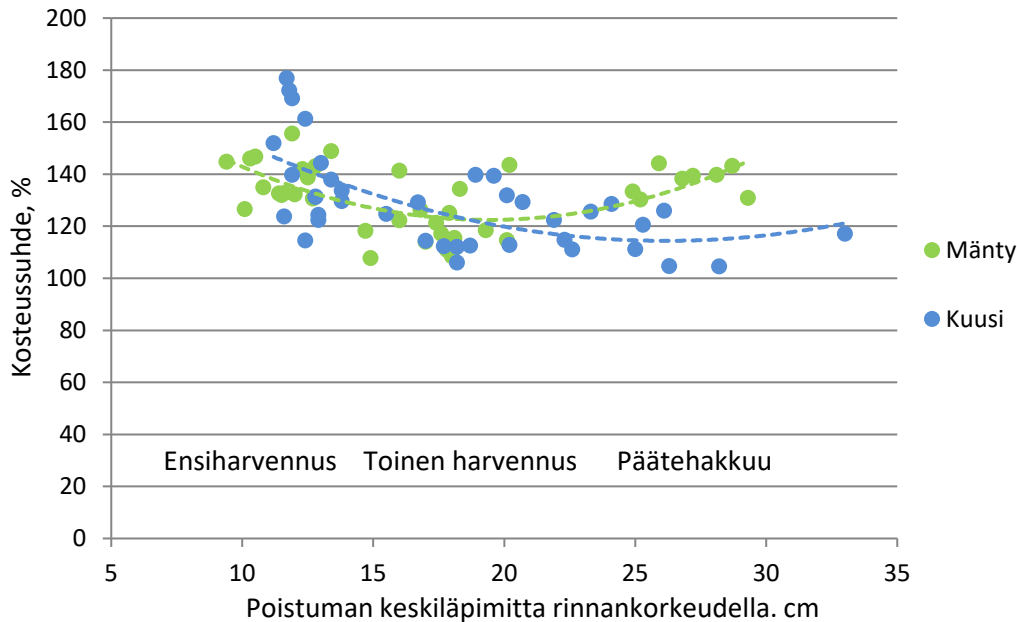
Kuva 59. Kaatotuoreen kuorellisen mänty- ja kuusikuitupuun kosteussuhde tyvi- ja muissa pölkkyissä.

Leimikkotasolla kosteussuhde muuttui ennen kaikkea metsikön iän mukaan. Ensiharvennusleimikoissa koko rungon keskimääräinen kosteussuhde vaihtelee välillä 120–170 %. Ero männyn ja kuusen välillä on vähäinen (kuva 59). Vastaavanlaisessa tutkimuksessa Iso-Britanniassa kosteussuhde oli 20–40 vuoden ikäisissä männiköissä 149 % mutta erittäin nopeakasvuisissa sitkankuusikoissa peräti 171 % (Steven ym. 1961).



Kuva 60. Kaatotuoreen kuorellisen puun (koko runko) kosteussuhde leimikoittain rinnankorkeusläpimitan suhteen.

Varttuneemmissa metsiköissä kosteussuhde oli alempi ja sen vaihtelu pienempi. Päätehakuuleimi-koissa kosteussuhde vaihtelee 90–120 %:iin (kuva 60). Kun tarkastelu rajoitetaan kokonaisen rungon sijasta kuitupuuositteeseen, leimikkotyyppejen väliset erot supistuvat. Mäntykuitupuun kosteussuhde oli alin myöhäisissä harvennuksissa ja kuusikuitupuun päätehakuissa (kuva 61).



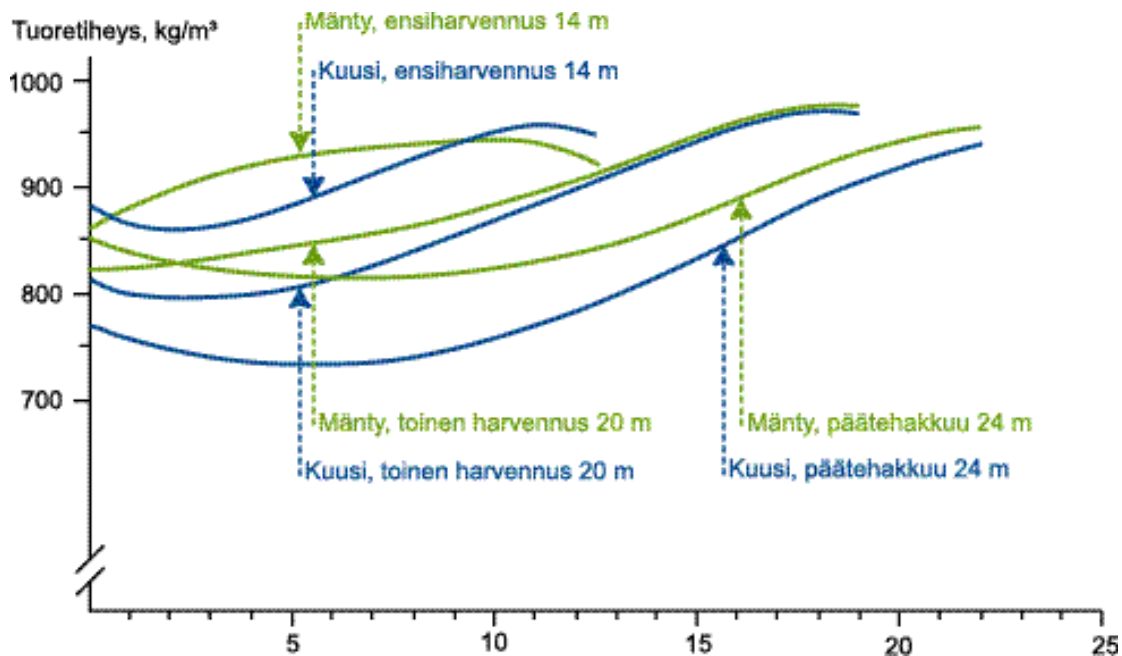
Kuva 61. Kaatotuoreen kuorellisen mänty- ja kuusikuitupuun kosteussuhde leimikoittain rinnankorkeusläpimitan suhteen.

5.9. Tuoretiheys

Puutavaran tuoretiheyteen vaikuttavat kuorellisen puun kuiva-tuoretiheys ja kosteus, joka muuttuu erityisesti sydänpuuosuuden mukaan. Koska kasvavan puun kosteus vaihtelee sään ja vuodenajan mukaan, myös puun tuoretiheydessä tapahtuu muutoksia. Tämän tutkimuksen aineisto kerättiin usean vuoden aikana lähinnä huhti-marraskuussa. Näytteitä ei otettu talvella, jolloin havupuiden kosteus on korkeimmillaan. Kaatotuoreet mänty- ja kuusitukit ovat talvella keskimäärin noin 50 kg/m³ raskaampia kuin kesällä (Kärkkäinen 2003). Lindbladin ja Repolan (2019) tutkimuksessa tuoreen mäntykuitupuun tuoretiheys oli talvella noin 50 kg/m³ korkeampi kuin kesällä. Alle kuukauden varastoidulla mäntykuitupuulla vuodenaikojen ero tuoretiheydessä oli keskimäärin noin 70 kg/m³. Talvipuiden puuttumisesta aiheutunut harha tämän tutkimuksen vuosikeskiarvoissa lienee 10–15 kg/m³ eli 1–2 %.

Kuitupuun kauppahinnan perusteena käytetään vakiintuneesti kuorellista kiintotilavuutta. Yksityisten metsänomistajien pystykaupoissa kuitupuun kiintotilavuus mitataan valtaosin hakkuukonemittauksella. Sen sijaan yksityisten metsänomistajien hankintakaupoissa ja ennen kaikkea yhtiöiden välisissä toimituskaupoissa painon mittaukseen perustuva mittaus on hyvin yleistä. Tällöin kuitupuun paino mitataan autokuljetuksen tai tehdasvastaanoton yhteydessä ja punnitustulos muunnetaan kiintotilavuudeksi tuoretiheyskertomella. Tuoretiheyden vaihtelu rungon pituussuunnassa, puutavaralajien välillä ja leimikoiden välillä ovat oleellisia lähtötietoja tehtäessä tuoretiheyskertomien tarkennuksia tai arvioitaessa niihin liittyvää epävarmuutta. Kun siirrytään rungon tyveltä kohti latvaa, kuorellisen puun kuiva-tuoretiheys laskee mäännellä jatkuvasti ja kuusellakin rungon keskivaiheille kääntyen sitten hitaaseen nousuun. Mantopuun kosteus kasvaa kummallakin puulajilla koko matkan. Sydänpuun kosteus muuttuu vain vähän, mutta sen sijaan sydänpuun osuus ensin kasvaa mutta kääntyy sitten jo

muutaman metrin korkeudella nopeaan laskuun. Kuva 62, joka osoittaa tuoretiheyden muuttumisen rungon pituussuunnassa eri leimikkotyypeissä, muotoutuu näiden tekijäin tuloksena. Ero tyven ja latvan välillä on kummallakin puulajilla ensiharvennusleimikoissa noin 80 kg/m^3 ja muissa leimikoissa 150 kg/m^3 .



Kuva 62. Tuoretiheyden vaihtelu kaatotuoreen kuorellisen mänty- ja kuusirungon pituussuunnassa.

Puutavaralajeista raskainta on leimikkotyypistä riippumatta läpimitaltaan alle 8 cm:n latvakappaleesta saatava energiapuu, jossa sydänpuun osuus on pieni. Kevyintä puolestaan on tukkipuu, erityisesti runsaasti sydänpuuta sisältävä ja kuiva-tuoretiheydeltään kevyt kuusen tukkipuu (taulukko 19).

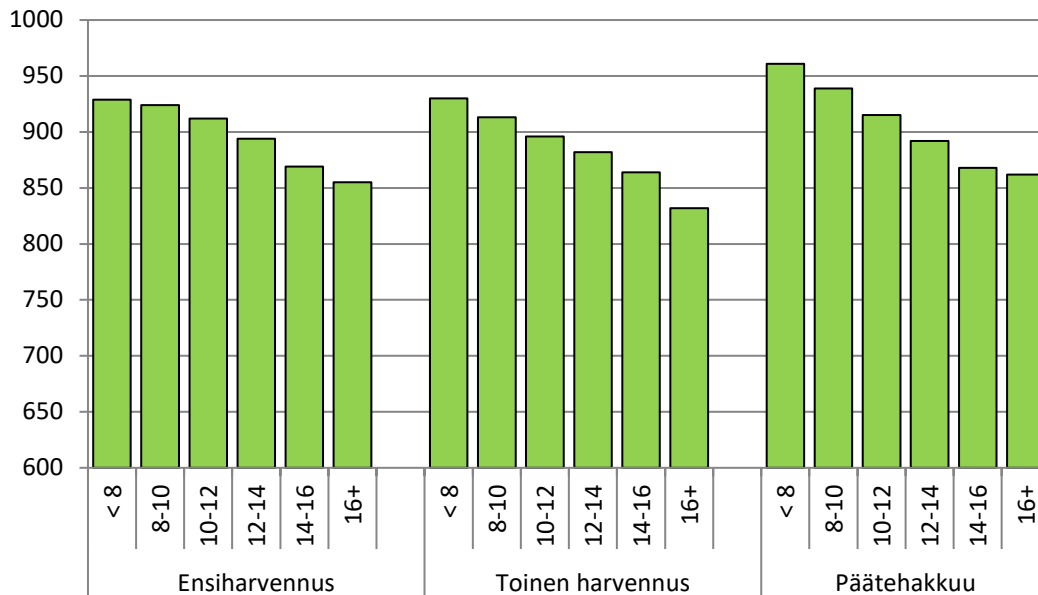
Kuitupuun tuoretiheys on tässä tutkimusaineistossa männyllä $880\text{--}900 \text{ kg/m}^3$ ja kuusella $840\text{--}890 \text{ kg/m}^3$. Lindbladin ja Repolan tutkimuksessa (2019), jossa tutkimusaineistoina käytettiin mäntykuitupuun tehdasvastaanotoissa mitattuja tuoretiheyksiä, tuoreen mäntykuitupuun tuoretiheys vaihteli vuodenajan mukaan $860\text{--}910 \text{ kg/m}^3$. Vastaava vaihteluväli alle kuukauden varastoiduilla mäntykuitupuulla oli $850\text{--}920 \text{ kg/m}^3$. Toisin kuin käsillä olevassa tutkimuksessa, aitojen kuitupuuerien mittaukseen perustuvassa tutkimuksessa puutavarassa oli tapahtunut kuivumista, mutta toisaalta talviaikaan lumi ja jää saattoivat nostaa mäntykuitupuun tuoretiheyttä ääritapauksessa jopa 100 kg/m^3 .

Taulukko 19. Kaatotuoreen kuorellisen puutavaran tuoretiheys leimikkotyypeittäin.

Puulaji	Leimikkotyyppi	Tuoretiheys, kg/m^3			
		Tukki	Kuitu	Energia	Koko runko
Mänty	Ensiharvennus		900	929	905
	Toinen harvennus	845	883	930	867
	Päätehakkuu	831	897	961	838
Kuusi	Ensiharvennus		878	935	886
	Toinen harvennus	787	856	936	817
	Päätehakkuu	761	841	942	772

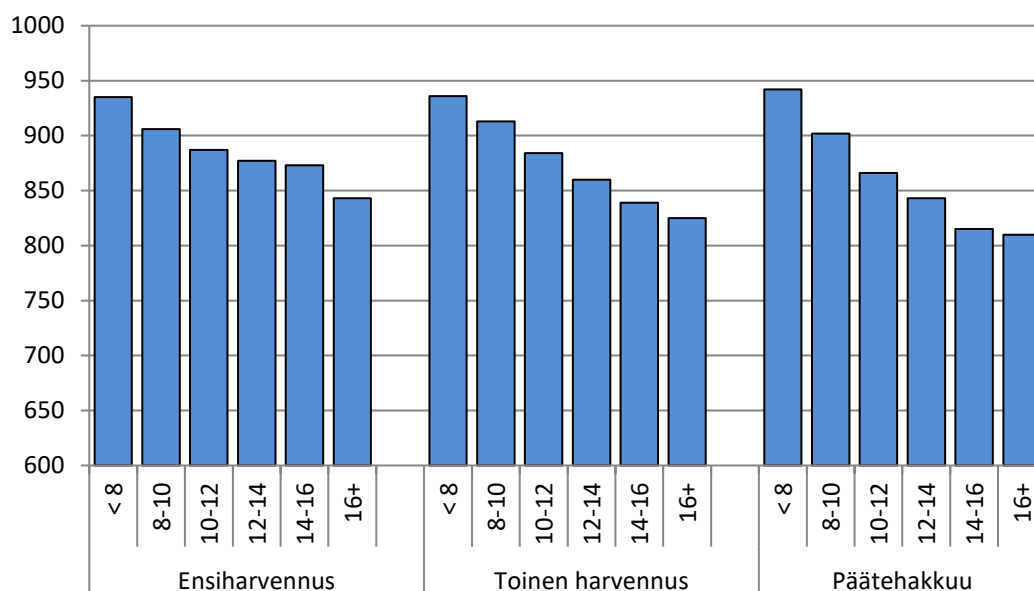
Jos kuitupuu lajitellaan läpimitan mukaan, luokkien välille syntyy tuoretiheydessä selkeä porrastus. Läpimitaltaan alle 8 cm:n energiapuun tuoretiheys oli noin 100 kg suurempi kuin läpimitaltaan yli 16 cm:n kuitupuun. Vaihteluväli oli ensiharvennusleimikoissa hieman pienempi kuin muissa leimikoissa, ja männyllä pienempi kuin kuusella (kuvat 63 ja 64). Jos kuitupuusta erotetaan pikkutukkeja, jäljelle jäävän osion tuoretiheys kasvaa.

Tuoretiheys, kg/m³



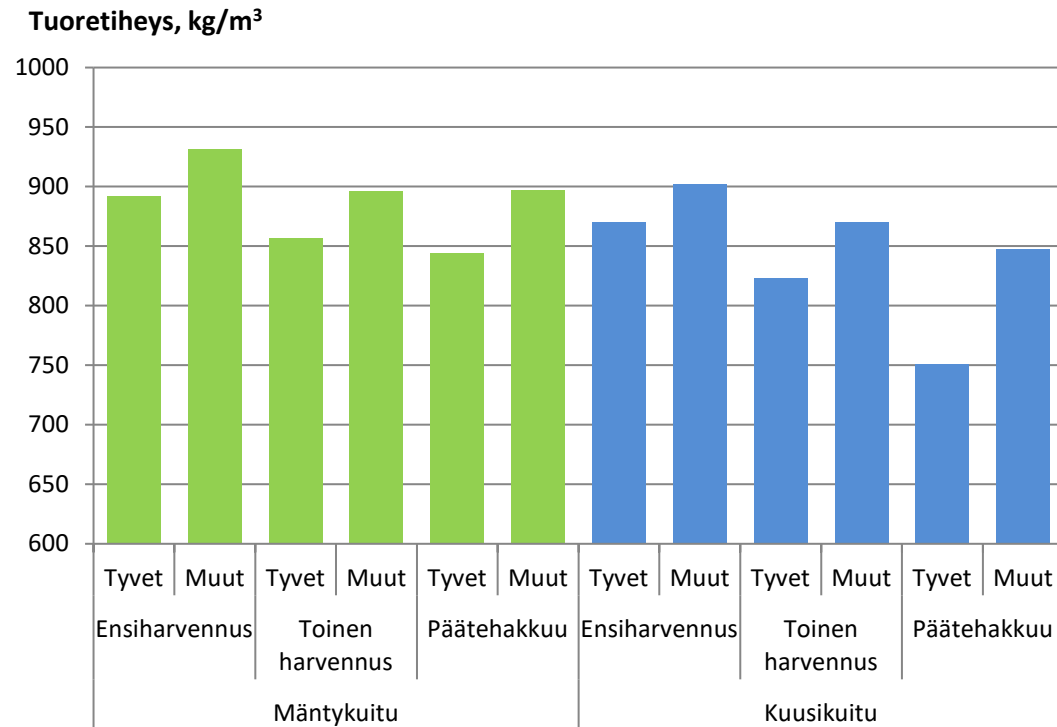
Kuva 63. Kaatotuoreen kuorellisen mäntykuitupuun tuoretiheys leimikkotyypin ja läpimitan suhteen.

Tuoretiheys, kg/m³



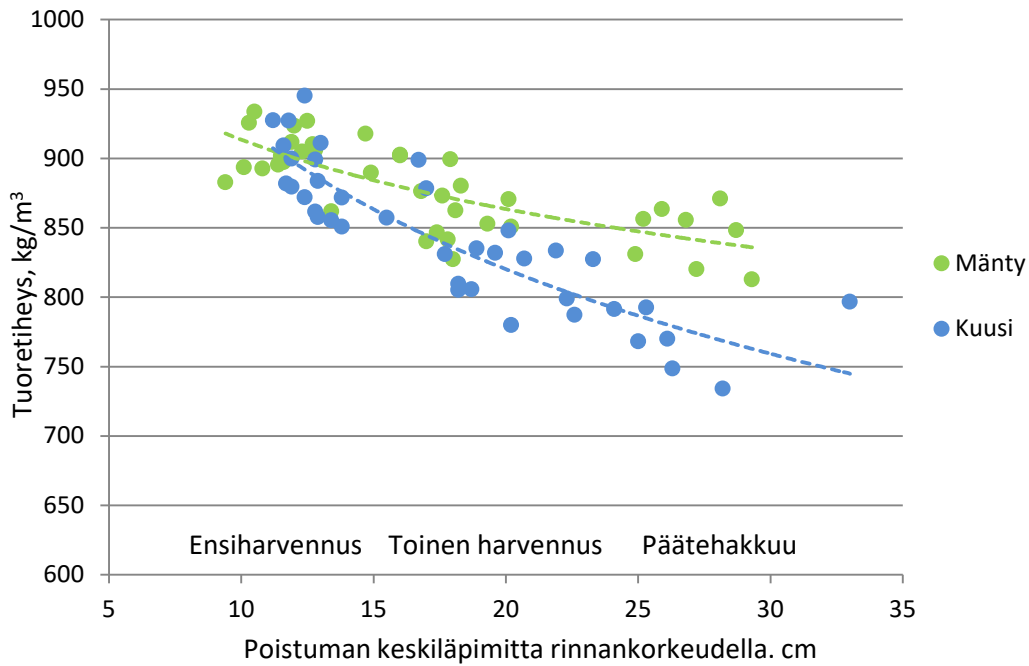
Kuva 64. Kaatotuoreen kuorellisen kuusikuitupuun tuoretiheys leimikkotyypin ja läpimitan suhteen.

Kuitupuun tuoretiheys oli tyvipölkyissä aina pienempi kuin muissa pölkyissä. Ero oli noin 50 kg/m^3 lukuun ottamatta päätehakkuista saatavaa kuusen kuitupuuta, jolla tyvitukit olivat lähes 100 kg/m^3 kevyempiä (kuva 65).

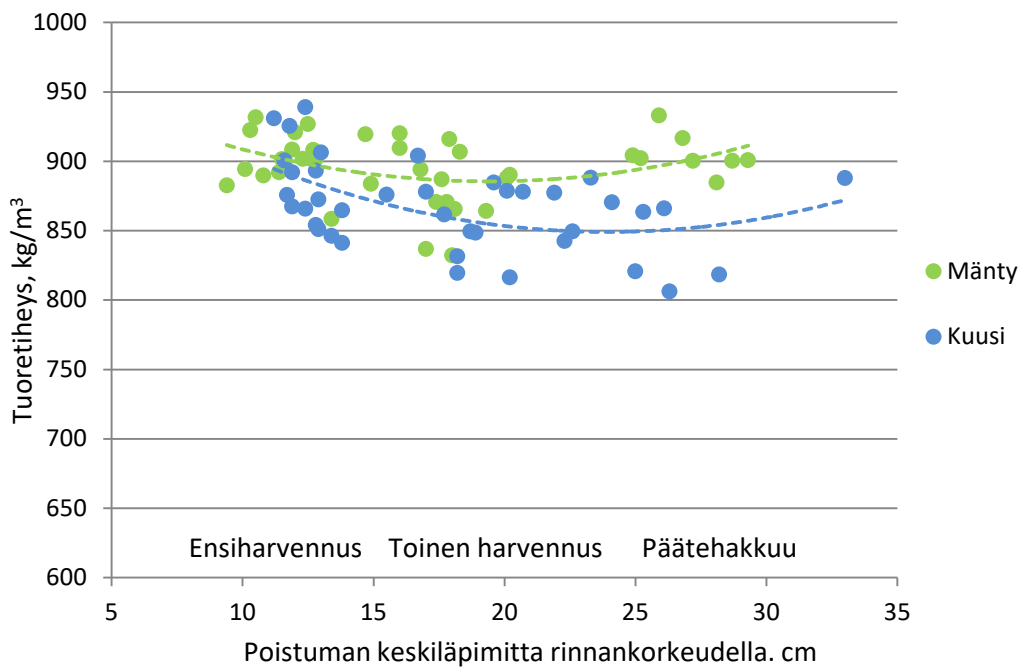


Kuva 65. Kaatotuoreen kuorellisen mänty- ja kuusikuitupuun 5-metrinen tyvi- ja muiden pölkyjen tuoretiheys.

Koko rungon keskiarvoja tarkasteltaessa tuoretiheyden erot leimikoiden välillä olivat selväpiirteiset. Tuoretiheys aleni puuston ikääntymisen ja järeytymisen myötä. Ero pienikokoisen ensiharvennuspuuston ja järeän päätehakkuupuuston välillä oli männyllä lähes 100 kg/m^3 ja kuusella lähes 200 kg/m^3 . Läpimitaltaan samankokoisessa puustossa mäntyrunko oli kuusirunkoa raskaampi erityisesti varttuneissa leimikoissa (kuva 66). Pelkän kuitupuuosion suhteen leimikkoerot olivat pienempiä (kuva 67).



Kuva 66. Kuorellisen männyn ja kuusen (koko runko) tuoretiheys leimikoittain rinnankorkeusläpimitan suhteen.



Kuva 67. Kuorellisen mänty- ja kuusikuitupuun tuoretiheys leimikoittain rinnankorkeusläpimitan suhteen.

5.10. Koostetaulukot kuitupuun ominaisuuksista

5.10.1. Kuitupuun ominaisuudet pölkyittäin

Taulukossa 20 on esitetty tässä tutkimuksessa määritettyjä mänty- ja kuusikuitupuun puuteknisten ominaisuuksien keskiarvoja tyvipölkyillä ja muilla pölkyillä leimikkotyypeittäin. Taulukossa 21 on esitetty vastaavasti ominaisuuksien keskiarvoja pölkyn läpimitan mukaan jaoteltuna. Taulukot antavat käsityksen läpimittarajojen vaikutuksista kuitupuun keskimääräisiin ominaisuuksiin, kun kuitu- tai tukkipuun mittavaatimukset muuttuvat. Merkittävin muutos tapahtuu silloin, kun varsinaisen tukkipuun lisäksi tehdään myös pikkutukkeja, joiden minimiläpimitta on yleensä 12–14 cm, joskus jopa 9 cm. Muutoksia tapahtuu myös tehtäessä energiapuuta runkojen pienimmistä läpimittaluokista.

Taulukko 20. Mänty- ja kuusikuitupuun tyvipölkkyjen ja muiden pölkkyjen ominaisuuksien keskiarvoja eri leimikkotyypeissä. Pölkyn pituus 5 m.

Ominaisuus	Leimikkotyyppi	Mäntykuitupuu		Kuusikuitupuu	
		Tyvet	Muut	Tyvet	Muut
Kuoren paksuus, mm	Ensiharvennus	5,5	2,5	3,5	3,2
	Toinen harvennus	6,0	2,5	3,9	3,7
	Päätehakkuu	8,0	2,0	4,3	4,4
Kuoren tilavuusosuus, %	Ensiharvennus	16,4	12,2	10,3	11,5
	Toinen harvennus	14,4	7,8	9,6	10,7
	Päätehakkuu	14,2	7,1	11,2	12,6
Kuoren kuivamassaosuus, %	Ensiharvennus	10,1	9,4	9,0	9,8
	Toinen harvennus	8,8	5,7	8,3	9,0
	Päätehakkuu	7,4	5,8	9,2	10,7
Puun kuiva-tuoretiheys kuoretta, kg/m ³	Ensiharvennus	409	373	375	379
	Toinen harvennus	447	399	403	393
	Päätehakkuu	477	393	409	400
Puun kuiva-tuoretiheys kuorineen, kg/m ³	Ensiharvennus	342	327	336	331
	Toinen harvennus	383	368	364	351
	Päätehakkuu	409	365	367	350
Sydänpuuosuus, %	Toinen harvennus	23	14	41	27
	Päätehakkuu	35	19	57	31

Taulukko 21. Mänty- ja kuusikuitupuun ominaisuuksien keskiarvoja pölkyn läpimittaluokittain eri leimikkotyypeissä. Pölkyn pituus 5 m.

Ominaisuus	Leimikkotyyppi	Läpimittaluokka, cm							
		< 4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	>16
Mäntykuitupuu									
Läpimittaluokan osuus, %	Ensiharvennus	1	4	12	21	24	19	11	8
	Toinen harvennus	1	2	6	12	21	30	23	5
	Päätehakkuu	1	4	7	11	21	31	23	2

Kuoren tilavuusosuus, %	Ensiharvennus	24	16	13	12	14	16	18	21
	Toinen harvennus	17	13	11	9	9	9	11	19
	Päätehakkuu	15	12	10	9	8	7	6	6
Kuoren kuivamasaosuus, %	Ensiharvennus	21	13	10	9	9	10	11	12
	Toinen harvennus	15	11	9	7	6	6	7	11
	Päätehakkuu	14	11	9	8	6	6	5	4
Puun kuiva-tuoretiheys kuoretta, kg/m³	Ensiharvennus	367	375	384	395	402	406	403	409
	Toinen harvennus	383	386	392	398	408	414	424	458
	Päätehakkuu	381	384	384	388	390	392	398	403
Kuorellisen puun puuainesisältö, kg/m³	Ensiharvennus	280	314	335	346	346	341	329	328
	Toinen harvennus	320	335	351	361	372	376	378	370
	Päätehakkuu	324	338	346	354	360	365	373	378
Kosteus-suhde, %	Ensiharvennus	168	160	153	146	140	135	131	125
	Toinen harvennus	162	153	145	137	128	121	113	96
	Päätehakkuu	161	157	151	150	141	132	123	119
Kuusikuitupuu									
Läpimitta-luokan osuus, %	Ensiharvennus	1	4	9	16	23	20	13	14
	Toinen harvennus	1	2	5	9	16	24	30	13
	Päätehakkuu	1	3	6	10	17	25	32	6
Kuoren tilavuusosuus, %	Ensiharvennus	26	17	14	12	11	10	10	9
	Toinen harvennus	21	17	14	13	11	10	10	10
	Päätehakkuu	24	19	17	15	14	13	12	11
Kuoren kuivamasaosuus, %	Ensiharvennus	23	15	12	10	9	9	9	9
	Toinen harvennus	19	15	13	11	10	9	8	8
	Päätehakkuu	21	17	15	13	12	11	10	9
Puun kuiva-tuoretiheys kuoretta, kg/m³	Ensiharvennus	400	388	385	382	378	375	373	363
	Toinen harvennus	398	396	398	397	398	396	393	397
	Päätehakkuu	419	413	408	405	404	400	399	399
Kuorellisen puun puuainesisältö, kg/m³	Ensiharvennus	296	322	331	336	336	337	335	329
	Toinen harvennus	313	328	341	348	353	355	355	359
	Päätehakkuu	321	333	339	346	349	350	353	354
Kosteus-suhde, %	Ensiharvennus	153	155	148	143	139	138	138	134
	Toinen harvennus	148	146	143	136	128	122	117	111
	Päätehakkuu	142	141	135	129	120	115	108	108

5.10.2. Kuitupuun ominaisuudet leimikoittain

Taulukoissa 22 ja 23 on esitetty regressioyhtälöt, jotka selittävät eräiden puuteknisten ominaisuuksien vaihtelua leimikoiden välillä koko rungossa sekä sen kuitupuuositteessa. Jälkimmäisestä siis puuttuvat tukkipuu sekä läpimitaltaan alle 8 cm:n latvapuu. Selittävinä muuttujina ovat leimikotyyppi, metsikön ikä ja rinnankorkeusläpimitta.

Yhtälöt selittävät kuoriosuuden, kuiva-tuoretiheyden, kuorellisen puutavaran puuainesisällön sekä kosteussuhteen vaihtelua leimikoiden välillä verraten hyvin. Yhtälöiden avulla voidaan siis ennustaa kohtalaisella luotettavuudella koko rungon ja sen kuitupuuositteen keskimääräisiä ominaisuuksia leimikkotasolla, kun tunnetaan puuston rinnankorkeusläpimitta ja ikä. Selityksasteet ovat männyllä korkeampia kuin kuusella ja toisaalta koko rungolla korkeampia kuin kuitupuuositteella. Esimerkiksi kuorellisen kuutiometrin puuainesisällön leimikoittaisesta vaihtelusta selittyy taulukoiden yhtälöillä männyn kokorunkoaineistossa 88 % ja kuitupuuositteessa 71 % sekä kuusen kokorunkoaineistossa 67 % ja kuitupuuositteessa 61 %. Selittämätön hajonta leimikoiden välillä on vastaavasti 9, 10, 10 ja 12 kg/m³.

Taulukko 22. Leimikon keskimääräisiä puuteknisiä ominaisuuksia selittäviä regressioyhtälöitä männyn koko rungolle ja sen kuitupuuositteelle. Selittäjinä ovat leimikon puuston ikä (vuotta) ja keskimääräinen rinnankorkeusläpimitta (D, mm).

Ominaisuus	Vakio	D	log(D)	D/ikä	ikä	Jäännös- virhe	Selityksaste, %
MÄNTY, koko runko							
Kuori:							
Paksuus, mm	1,9	0,028		-0,317		0,8	82
Tilavuusosuus, %	40,6		-5,3			1,1	72
Kuivamassaosuus, %	32,8		-4,8		0,011	0,6	82
Kuivatuoretiheys, kg/m³:							
Kuoreton puu	-41,3	-0,51	119,8	-19,86		11,2	80
Kuorellinen puu	-117,2	-0,55	130,2	-17,09		9,1	85
Kuori	254,0	0,27		-5,37		17,5	50
Tuoretiheys, kg/m³	975,2	-0,53				21,2	67
Kuorellisen puun puuainesisältö, kg/m³	-168,1	-0,46	129,4	-16,06		9,3	88
Sydänpuuosuus, %	8,3	0,12		-3,37		3,5	80
Kosteussuhde, %	608,3	0,44	-116,0	9,22		7,2	86
MÄNTY, Kuitupuun							
Kuori:							
Paksuus, mm	*Vakio	-0,02				0,5	74
Tilavuusosuus, %	57,8		-8,9			1,2	86
Kuivamassaosuus, %	30,1		-4,2			0,7	81
Kuivatuoretiheys, kg/m³:							
Kuoreton puu	-348,4	-1,31	202,7	-16,98		11,7	67
Kuorellinen puu	-403,2	-1,22	205,8	-14,53		10,3	67
Kuori	237,9	0,24				22,3	28

Tuoretiheys, kg/m³	**Vakio					21,9	12
Kuorellisen puun puuainesisältö, kg/m³	-484,8	-1,12	211,2	-13,12		10,2	71
Sydänpuuosuus, %	25,2			-2,89		3,1	37
Kosteussuhde, %	748,6	0,91	-156,9	8,15		7,7	61

* Vakion arvo ensiharvennusleimikossa 6,3 ja muissa leimikoissa 8,2. ** Vakion arvo ensiharvennusleimikossa 902,5, toisen harvennuksen leimikossa 884,7 sekä päätehakuuleimikossa 905.

Taulukko 23. Leimikon keskimääräisiä puuteknisiä ominaisuuksia selittäviä regressioyhtälöitä kuusen koko rungolle ja sen kuitupuuositteelle. Selittäjinä ovat leimikon puuston ikä (vuotta) ja keskimääräinen rinnankorkeusläpimitta (D, mm).

Ominaisuus	Vakio	D	log(D)	D/ikä	ikä	log(ikä)	Jäännös- virhe	Selitysaste, %
KUUSI, koko runko								
Kuori:								
Paksuus, mm	2,2	0,02		-0,44			0,5	86
Tilavuusosuus, %	15,9	-0,02		-0,76			0,9	57
Kuivamassaosuus, %	11,9	-0,01		-0,31			0,8	29
Kuivatuoretiheys, kg/m³:								
Kuoreton puu	201,0			-16,09	-1,13	74,8	12,0	61
Kuorellinen puu	117,0			-10,77	-1,30	93,4	11,0	65
Kuori	286,7	0,39					27,0	43
Tuoretiheys, kg/m³	953,7	-0,86,		-12,20			29,1	78
Puuainesisältö kuorellisessa tilavuudessa, kg/m³	82,51			-7,20	-1,15	87,4	9,6	67
Sydänpuuosuus, %	31,4	0,09		-3,61			6,3	34
Kosteussuhde, %	124,0	-0,27		14,68			10,9	79
KUUSI, kuitupu								
Kuori:								
Paksuus, mm	3,6	0,01		-0,27			0,1	93
Tilavuusosuus, %	58,5	0,07	-11,0	-0,97			0,8	70
Kuivamassaosuus, %	46,1	0,06	-8,8	-0,36			0,6	63
Kuivatuoretiheys, kg/m³:								
Kuoreton puu	284,9		34,4	-23,09			14,0	69
Kuorellinen puu	292,0		29,1	-18,66			13,4	62
Kuori	341,9						25,1	0
Tuoretiheys, kg/m³	997,7		32,9	12,72			27,9	20
Kuorellisen puun puuainesisältö, kg/m³	-33,5	-0,40	98,0	-16,75			12,2	61

Sydänpuuosuus, %	45,4			-4,95			5,4	21
Kosteussuhde, %	561,8	0,43	-108,6	14,99			9,4	73

Taulukoissa 24 ja 25 on esitetty esimerkinomaisesti regressioyhtälöillä laskettuja ennusteita kasvunopeudeltaan erilaisten leimikoiden puutavaran ominaisuuksista, kun poistettavan puuston keskimääräinen rinnankorkeusläpimitta on ensiharvennusleimikossa 13 cm, toisen harvennuksen leimikossa 18 cm ja päätehakuuleimikossa 25 cm.

Taulukko 24. Kasvunopeuden vaikutus männyn hakkuupoistuman keskimääräisiin ominaisuuksiin eri leimikko-tyypeissä. Tulokset ovat laskettu taulukossa 22 esitetyillä malleilla.

Ominaisuus	Ensiharvennus D = 13 cm			Toinen harvennus D = 18 cm			Päätehakuu D = 25 cm		
	Luston leveys, mm			Luston leveys, mm			Luston leveys, mm		
	1,5	2	3	1	2	2,5	1	2	2,5
MÄNTY, koko runko									
Kuori:									
Paksuus, mm	5	4	4	6	6	5	8	8	7
Tilavuusosuus, %	15	15	15	13	13	13	11	11	11
Kuivamassaosuus, %	10	10	9	9	8	8	7	7	7
Kuivatuoretiheys, kg/m³:									
Kuoreton puu	416	396	356	449	410	390	453	413	393
Kuorellinen puu	394	377	343	426	392	375	431	396	379
Kuori	272	267	256	291	280	275	310	299	293
Tuoretiheys, kg/m³	906	906	906	880	880	880	843	843	843
Kuorellisen puun puu- ainesisältö, kg/m³	354	338	306	390	357	341	400	368	352
Sydänpuuosuus, %	14	10	4	23	16	13	32	25	21
Kosteussuhde, %	128	138	156	103	122	131	96	115	124
MÄNTY, kuitupuu									
Kuori:									
Paksuus, mm	4	4	4	4	4	4	3	3	3
Tilavuusosuus, %	14	14	14	11	11	11	8	8	8
Kuivamassaosuus, %	9	9	9	8	8	8	6	6	6
Kuivatuoretiheys, kg/m³:									
Kuoreton puu	418	401	367	435	401	384	410	376	359
Kuorellinen puu	397	383	355	418	389	375	400	372	357
Kuori	269	269	269	281	281	281	298	298	298
Tuoretiheys, kg/m³	902	902	902	885	885	885	885	885	885
Kuorellisen puun puu- ainesisältö, kg/m³	358	345	318	383	357	344	374	348	335

Sydänpuuosuus, %	17	14	8	19	14	11	19	14	11
Kosteussuhde, %	127	136	152	114	130	138	126	142	150

Taulukko 25. Kasvunopeuden vaikutus kuusen hakkuupoistuman keskimääräisiin ominaisuuksiin eri leimikkotyypeissä. Tulokset ovat laskettu taulukossa 23 esitetyillä malleilla.

Ominaisuus	Ensiharvennus D = 13 cm			Toinen harvennus D = 18 cm			Päätehakkuu D = 25 cm		
	Luston leveys, mm			Luston leveys, mm			Luston leveys, mm		
	1,5	2	3	1	2	2,5	1	2	2,5
KUUSI, koko runko									
Kuori:									
Paksuus, mm	3	3	2	5	4	4	6	5	5
Tilavuusosuus, %	12	11	9	11	10	9	10	9	8
Kuivamassaosuus, %	10	9	9	10	9	9	9	8	8
Kuivatuoretiheys, kg/m³:									
Kuoreton puu	386	360	310	404	371	348	388	375	357
Kuorellinen puu	381	357	312	399	371	351	384	379	364
Kuori	337	337	337	357	357	357	384	384	384
Tuoretiheys, kg/m³	878	890	915	823	847	859	762	786	799
Kuorellisen puun puuainesisältö, kg/m³	341	321	284	359	335	319	347	344	331
Sydänpuuosuus, %	32	28	21	40	33	29	46	39	35
Kosteussuhde, %	133	147	177	104	134	148	85	115	129
KUUSI, kuitupu									
Kuori:									
Paksuus, mm	4	3	3	4	4	3	5	4	4
Tilavuusosuus, %	11	10	8	12	10	9	13	11	10
Kuivamassaosuus, %	9	9	8	10	9	8	11	10	9
Kuivatuoretiheys, kg/m³:									
Kuoreton puu	383	360	314	418	372	349	429	383	360
Kuorellinen puu	378	359	322	406	368	350	415	378	359
Kuori	342	342	342	342	342	342	342	342	342
Tuoretiheys, kg/m³	876	888	914	852	878	890	841	867	880
Kuorellisen puun puuainesisältö, kg/m³	341	325	291	370	336	320	374	341	324
Sydänpuuosuus, %	31	26	16	35	26	21	35	26	21
Kosteussuhde, %	134	149	179	106	136	151	100	130	145

6. Johtopäätökset

6.1. Laadunohjauksen tavoitteenasettelu

Metsäteollisuus on linjannut puuhuollon kehittämisen isoiksi tavoitteiksi kustannustehokkuuden, täsmäohjautuvuuden sekä lisäarvon tuottamisen arvoketjuun (Metsäteho 2018). Kustannustehokkuus liittyy osaltaan puutavaralogistiikan kehittämiseen ja on kytköksissä raaka-aineen ohjaukseen. Viime vuosikymmeninä kuitupuun laadun hallintaa on kyetty kehittämään siten, että kuitupuu saapuu tehtaalle entistä tuoreempaan. Kuitupuun kuorimoiden ja hakkeen lajittelu- ja seulontayksiköiden optimoinnissa on myös edistytty merkittävästi. Muutoin raaka-aineen ominaisuuksien vaihtelun tasoittamiseen ei ole löydetty merkittäviä uusia keinoja. Ominaisuuksien tasaisuus on kuitupuun laatutekijöistä kuitenkin ehkä kaikkein tärkein. Hallitsemattomana puun ominaisuuksien vaihtelu aiheuttaa prosessitekniisiä ja tuotteen laatuun liittyviä ongelmia ja lisää tuotantokustannuksia. Kun vaihtelu tunnetaan, kuitupuuvirran laatua on näiltä osin edellykset tasoittaa ja vakiinnuttaa.

Kuitupuun laadun ohjaukselle voidaan asettaa monia vaatimuksia:

- Kuitupuun laadun ympärivuotinen vakiinnuttaminen ja toimitusvarmuuden käsitteen ulottaminen myös laadun tasaisuuteen.
- Kuituraaka-aineen jakaminen kustannus- ja laatutekijöiden pohjalta erilaisia tuotantostrategioita noudattavien tehtaiden kesken.
- Kuituraaka-aineen ohjaaminen ominaisuuksiensa perusteella saman tehtaan eri kuorinta- tai kuitulinjoille. Kysymyksessä voivat olla joko rinnakkaiset tuotantolinjat tai erillisajot samalla linjalla, jolloin ominaisuuksiltaan erilaisia kuitupuu-eräitä käsitellään ainakin jossain prosessivaiheessa toisistaan erillään tavoitteena raaka-aineen säästö ja/tai erikoismassojen tuotanto asiakkaan tarpeisiin.
- Puutavaralajien mittavaatimusten ajoittainen tarkistaminen eri tuotteiden ja puutavaralajien markkinatilanteen, energian hinnan ja muiden tekijöiden mukaan.

Kemiallisen puunjalostuksen globaali kilpailu kiristyneenä edelleen, jolloin raaka-aineen välittömät ja välilliset kustannukset vaikuttavat entistä enemmän yksittäisten tehtaiden ja tuotantolinjojen asemaan yritysten kehitysstrategioissa. Prosessitekniikan kehittäminen ja optimointi ovat jo johtaneet tehtaiden kustannustehokkuuden kasvuun ja kilpailukykyyn parantumiseen, mutta prosessit edellyttävät samalla hyvää raaka-aineen hallintaa.

Paperin ja kartongin rakenteen kevenemisen ja paperi- ja kartonkikoneiden nopeuden kasvu ovat johtaneet siihen, että moniin paperi- ja kartonkituotteisiin on mahdollista käyttää yksinomaan korkea- ja tasalaatuista sellua. Useimmissa paperi- ja kartonkituotteissa käytetään erilaisten puukuittupohjaisten ja muiden raaka-aineiden yhdistelmiä, jolloin lopputuotteiden laatu edellyttää tasalaatuisuutta niissä käytettäviltä puumassoilta. Sellujen käytön laajentaminen uusiin käyttökohteisiin mm. tekstiili- ja vaatetusalaan ja rakennus-, eriste- ja pinnoiteteollisuudessa asettaa uusia laatuvaatimuksia kuitumateriaaleille ja lisää edelleen raaka-aineen täsmähallinnan tarpeita. Uudet liukosellut ja mikro- ja nanosellut ovat hyviä esimerkkejä sellulajien muutos- ja kehitysprosessista viime vuosikymmenellä.

Haluttuihin kuituominaisuuksiin perustuva raaka-aineketjun hallinta on tulevaisuudessa välttämättömyys kaikessa puumassateollisuudessa. Lajittelu tulisi tehdä ketjun alkupäässä, mieluiten jo pystyleimikossa. Tehokkaan laadunhallinnan edellytyksiä ovat:

- *Vaihtelun suuruus ja lainalaisuudet tulee tuntea*, jotta voidaan ennakoida puutavaran ominaisuudet ja toimia tarpeen mukaan joko laadun tasaamiseksi tai päinvastoin puutavaran erotteliseksi laatuluokkiin tähtäimessä räätälöidyt erikoistuotteet.
- Tarkoituksenmukainen luokittelu edellyttää, että *luokkien välille syntyy riittävän suuria laatueroja*, luokkien sisäinen laatu vaihtelu tasoittuu ja kuhunkin luokkaan kertyy vaadittu vähimmäismäärä puuta.
- Laadun ohjaus tulee *kytkeä puutavaran hankinnan logistiseen järjestelmään*, joka tulee nähdä paitsi kuljetusten järjestelyn myös raaka-ainevirran laadunohjauksen välineenä. Informaatiotekniikan ja logistiikan ripeä kehittyminen avaa tietä laatu-potentiaalin hyödyntämiselle.

Kuitupuun laadun ohjaus on osaksi kuljetusten ohjausta. Jos siihen liittyy pölkyittäinen lajittelu ja puutavaralajien määrän kasvu, aiheutuu lisäkustannuksia hakkuussa, metsäkuljetuksessa, tienvarsi-varastossa, kaukokuljetuksessa ja tehdasvarastolla. Lisätyt puutavaralajit alentavat korjuutyön tuotavuutta enemmän metsäkuljetuksessa kuin hakkuussa.

Laadunohjauksella saavutettavien hyötyjen tulee ylittää kustannukset. Siksi siihen ei voida kytkeä kalliita lisämittauksia tai erottelujärjestelmiä, eikä se saa hidastaa puuvirran kulkua kannolta tehtaalle. Arvoketjussa saavutettavien hyötyjen tulee kattaa kustannukset puuraaka-aineen säästämisen, puumassan tuotantokustannusten alentumisen ja/tai lopputuotteen laadun, arvon ja kilpailukyvyyn kohoamisen kautta. Laadunohjausjärjestelmän tulee olla yksinkertainen ja joustava, ja sen tulee tarvittaessa mukautua myös puutavarakaupan ja korjuun suhdanne- ja kausivaihteluun. Myös eri puulajien, kuten männyn ja kuusen yhdistäminen samaan luokkaan saattaa olla joissakin tapauksissa tarkoituksenmukaista, jolloin tuotelähtöinen näkökulma ohittaa tavanomaisen metsätaloudellisen luokitteluperustan. Joissakin tapauksissa voi tulla kysymykseen kuitupuu- ja teollisuushakkeen yhdistäminen, mutta silloin on kysymys hakkeiden käsittelystä.

6.2. Laadunohjauksen keinot

Mitä pienempiin käsittely-yksiköihin laadunohjaus kohdistuu ja mitä varhaisemmassa puun hankintaketjun vaiheessa se käynnistyy, sitä tehokkaammin voidaan vaikuttaa kuitupuun laatuun, mutta sitä suuremmiksi nousevat myös kustannukset. Laadunohjauksen perusratkaisu tapahtuu silloin, kun tehdään leimikkokohtainen päätös kuitupuun osoittamisesta tietylle tehtaalle. Raaka-ainetta voidaan myös lajitella korjuun, kuljetuksen tai tehdasvastaanoton yhteydessä. Laadunohjaus tapahtuu seuraavilla tasoilla, jotka voivat olla paitsi vaihtoehtoisia myös toisiaan täydentäen peräkkäisiä. Nämä laadunohjauksen keinot ovat raaka-ainelähtöisiä ja perustuvat kuitupuun ominaisuuksien vaihteluun. Keinojen käytännön toteutettavuus myös vaihtelee.

- *Leimikoittainen ohjaus*, joka perustuu lähinnä puuston ikään, kasvunopeuteen ja käsittelyhistoriaan. Sovellettavissa oleva menettely perustuu leimikoiden jakoon ensiharvennuksiin, muihin harvennuksiin ja uudistushakkuihin. Puuston iän ohella tulevat silloin huomioon otetuiksi jollain tasolla myös puuston latvuserrosten erot sekä puuston tukkipuuosuuden vaikutukset kuitupuun ominaisuuksiin, kun runkojen tyviosat hakkuukierron edetessä järetyvät ja siirtyvät kuitupuusta tukkipuuksi. Mahdollisesti voidaan ottaa huomioon myös käytettävät puutavaralajien mitta- ja laatuvaatimukset ja apterauksen soveltaminen yksittäisissä leimikoissa, kun puuston koko ja laatu vaihtelevat leimikoiden välillä.
- *Rungoittainen lajittelu*, joka ottaa huomioon esimerkiksi rungon koon ja runkolajin (tukkipuu/kuitupuu) vaihtelun leimikon sisällä. Tämä vaihtoehto ei ole kuitenkaan sovitettavissa puunkorjuun tavaralajimenetelmään. Koko- ja osarunkokorjuuta käytetään hyvin vähän Suomessa.
- *Pölkyittäinen lajittelu*, joka olisi toteutettavissa lähinnä puunkorjuun yhteydessä. Hakkuukonehakuussa kuitupuupölkyt voidaan erotella ositteisiin annettujen kriteereiden (esim. pöl-

kyn läpimitta, asema rungossa) mukaisesti hyödyntämällä pölkkyjen merkintää väreillä tai RFID-koodilla. Lajittelulla saatavien hyötyjen pitäisi kuitenkin olla merkittäviä, sillä puutavara-lajien määrän lisääminen vaikeuttaa huomattavasti paitsi lähi- ja kaukukuljetusta, myös tehdasvastaanottoa ja -varastointia. Kuitupuun pölkkyittäiselle lajittelulle ei ole käytännön mahdollisuuksia hankintaketjussa metsäkuljetuksen jälkeen.

- *Kuormittainen lajittelu* tehdasvastaanotossa ja -varastolla. Tämän lajittelun perusteena voisivat olla lähinnä mittauseriin liittyvät alkuperä-, hakkuutapa- tai varastointiaikatiedot, silmävarainen arviointi ja/tai kamera- tai lasermittaustiedot. Nykyisin käytettävät kuitupuun mitausmenetelmät tehdasvastaanotossa tuottavat niukasti lajittelussa hyödynnettävää mitaus-tietoa. Kokonaisen kuorman sijasta lajittelu voi tapahtua myös kuormassa olevien nippujen pohjalta, mutta nippulajittelun tuoma lisäteho on todettu mitättömäksi (Spångberg 1998).

Esimerkkinä pölkkyittäisen lajittelun lisäkustannuksista on Ruotsissa tehty tutkimus kuusikon pääte-hakkuuleimikossa, jossa kuitupuun osuus oli 20 % kokonaiskertymästä. Kun rungon ylin tai kaksi ylin-tä kuitupuupölkkyä erotettiin omaksi tavaralajikseen, kuitupuun hakkuun ja metsäkuljetuksen kus-tannus kasvoi noin 0,5–0,7 euroa kuorellista kuutiometriä kohti. Lisäkustannuksista neljännes kohdis-tui hakkuutyöhön ja kolme neljänestä lähikuljetukseen (Wilhelmsson ym. 2000). Olssonin (1998) mukaan uudelle tavaralajille koko tuotantoketjun puitteissa syntyvä lisäkustannus on 1,5–2 €/m³ eli noin 4 % kuitupuun arvosta. Lisäkustannukset ovat korkeimmillaan uutta järjestelmää käyttöön otet-taessa. Suomalaisten kokemusten mukaan pelkästään ylimääräisen tavaralajin erilliskäsittelystä teh-dasvarastolla syntyy lisäkustannuksia 0,7–1,5 €/m³ (Lukkarinen suull.). Nurmisen ja Heinosen tutki-muksessa (2007) useammasta tienvarsivarastosta koottujen kuormien kuljetuksen kokonaisajanme-nekki oli keskimäärin neljänneksen suurempi kuin yhdestä varastopaikasta kuormattujen kuormien.

6.3. Laatutiedon käyttömahdollisuudet laadunohjauksessa

6.3.1. Pölkkyittäinen laadunohjaus

Mitä pienempiin kokonaisuuksiin laadun ohjaus kohdistuu, sitä suurempi on sen teoreettinen poten-tiaali. Pölkkylajittelun potentiaali on suurempi kuin leimikkolajittelun. Eräs vaihtoehto on jako tyvi-pölkkyihin ja muihin pölkkyihin, mikä teknisesti voi tapahtua sekä hakkuun että metsäkuljetuksen yhteydessä. Ratkaisu ei kuitenkaan sovellu sellaisiin leimikoihin, joissa erilleen lajiteltavan ositteen kertymä jää pieneksi. Esimerkiksi päätehakkuissa kuitupuu sisältää tyvipölkkyjä yleensä vain vähän (Hokka ja Vuorenmaa 2001). Tyvipölkkyille on ominaista paksu kuori, suuri kuoriosuus, korkea puuai-neen kuiva-tuoreiheys, korkea sydänpuuosuus ja alhainen kosteus. Sydänpuuosuutta lukuun otta-matta ositteiden väliset erot ovat männyllä suuremmat kuin kuusella. Kuorellisen kuitupuun puuai-nesisältö on leimikkotyypistä mukaan tyvipölkkyissä mäntykuitupuulla 4–9 % ja kuusikuitupuulla 2–5 % suurempi kuin muiden pölkkyjen ositteessa.

Teknisesti toteutettavissa olisi myös pölkkyjen läpimittaan perustuva lajittelu mutta ellei sen rinnalla oteta huomioon luston leveyttä tai lukumäärää, vaikuttavuus jää heikoksi, varsinkin kun pitkän kuitu-puun tyvi- ja latvaläpimitan ero on usein enemmän kuin 5 cm. Pölkkyittäisen lajittelun vaikuttavuus kärsii, kun pölkyn pituus kasvaa. Läpimittalajittelun tehoa pienentävät myös muusta kuitupuusta ominaisuuksiltaan poikkeavat raakkitukit sekä se, että kertymältään pieniä läpimittaluokkia ei voida kustannussyistä sallia. Luokkien lukumäärä voi käytännössä olla enintään kolme, ja luokkien on oltava puumäärältään samaa suuruusluokkaa.

Ruotsalaisten tutkimusten mukaan tehokas pölkkyittäinen lajittelu edellyttää sekä luston leveyden että lustojen lukumäärän samanaikaista huomioonottamista. Tämä ei ole kuitenkaan käytössä nykyi-sissä hakkuukoneissa, koska tarvittavien kameroiden tai muiden mittauslaitteiden sijoittelu hakkuu-

päähän edellyttäisi niiltä suurta kestävyyttä, eikä saatavalle lisäinformaatiolle olisi todennäköisesti kustannusvastaavuutta käytännön puunhankinnassa, ainakaan toistaiseksi (Sorsa ym. 2006, Pesonen ym. 2009). Myös logistiset ongelmat ja kustannukset ovat olleet toistaiseksi suuria. Kuvaan perustuvalla mittauksella luston leveys ja ytimen sijainti sekä männyllä sydän- ja pintapuun rajat ja kuusella lahoalueet on voitu määrittää laboratoriokeissa ja osittain myös metsässä kohtalaisella tarkkuudella yksittäisten pölkkyjen päistä (Niskanen ym. 2001, Österberg ja Ihalainen 2006, Österberg 2009, Schraml & Uhl 2015). Toistaiseksi menetelmää ei ole kyetty soveltamaan suurten puuerien käsitteilyyn (esim. Raatevaara 2019).

Ruotsissa on todettu kuusikuitupuulla päästävän lähes yhtä hyviin tuloksiin tehdasmittauksen yhteydessä tapahtuvalla lajittelulla, jossa autokuormat jaetaan silmävaraisen arvion perusteella nopeakasuviin (lusto yli 3 mm), normaalikasvuviin (lusto 1,5–3 mm) ja hidaskasvuviin (lusto alle 1,5 mm), kuin pölkkyttäisellä lajittelulla. Lajittelun kriteereinä ovat olleet tuolloin kuiva-tuoretiheys, kosteus ja nuorpuuosuus (Spångberg ja Nylinder 1997, Spångberg 1998 ja 1999).

6.3.2. Leimikkolähtöinen laadunohjaus

Kun laadunohjauksen käsittely-yksiköksi valitaan pölkyn sijasta kokonainen leimikko, erottelun tarkkuus luonnollisesti heikentyy ja potentiaali supistuu. Leimikkolähtöisen laadunohjauksen ylivertainen etu on kuitenkin sen parempi operatiivinen toteutettavuus. Leimikkolähtöinen ohjaus on mahdollista ottaa huomioon jo puutavaraa hinnoiteltaessa ja hankintaa suunniteltaessa. Se ei edellytä varsinaisesti lisäinvestointeja eikä häiritse puunkorjuutoimintaa. Lisäkustannuksia syntyy lähinnä vain siitä, että kuitupuun osittainen uudelleen ohjaus tehdaslaitosten kesken saattaa johtaa kuljetusetäisyyksien pidentymiseen.

Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu puuteknisten ominaisuuksien vaihtelua jakamalla leimikot ensiharvennuksiin, muihin harvennuksiin ja päätehakkuihin. Tämä leimikkotieto puutavaran ostajalla on aina käytettävissä. Sen lisäksi leimikot on jaettu nopeakasuviin, normaalikasvuviin ja hidaskasvuviin. Kasvunopeus voidaan arvioida pystypuustosta silmävaraisesti tai valmiista puutavarasta luston leveyden perusteella. Kasvunopeusluokkien rajat on syytä asettaa alue- ja tehdaskohtaisesti käyttäjän tarpeista lähtien.

Tarkastelu antaa osviittaa leimikkolähtöisen laadunohjauksen vaikuttavuudesta. Leimikoiden välillä on merkittäviä eroja erityisesti kuoriosuudessa, kuiva-tuoretiheydessä, tilavuusyksikön puuainesisällössä ja kosteudessa. Esimerkiksi kun nopeakasvuviesta (luston leveys 3 mm) ensiharvennusleimikosta tehdyn kuorellisen kuitupuukuutiometrin puuainesisältö oli männyllä 318 kg ja kuusella 291 kg, olivat vastaavat arvot hidaskasvuviesta (luston leveys 1 mm) toisen harvennuksen leimikosta männyllä 383 kg ja kuusella 370 kg. Näiden ääritapauksia edustavien leimikoiden välinen ero oli siis männyllä 17 % ja kuusella 21 %, mikä merkitsee lähes samansuuruista eroa raaka-aineen kulutuksessa puumassaa valmistettaessa sekä merkittäviä eroja kuitujen ominaisuuksissa.

6.4. Tutkimus- ja kehittämistarpeita

Tämän tutkimus antaa vankan tietopohjan Etelä-Suomen mänty- ja kuusikuitupuun ominaisuuksista, lajittelun perusteista ja nykyisten puunhankintakäytäntöjen ja -organisaatioiden mukaisista toteutusmahdollisuuksista. Tulosten pohjalta annetut suositukset perustuvat nykyisiin puunhankintakäytäntöihin ja puuraaka-aineen ohjaukseen eri käyttötarkoituksiin (ml. puutavaralajit). Puunhankintaorganisaatioiden ja tavaralajimenetelmään perustuvan hankinnan mahdolliset muutokset voivat tuoda sekä uusia mahdollisuuksia että haasteita lajittelulle ja raaka-aineen ohjaukselle ja täten uusia tutkimus- ja kehittämistarpeita.

Raaka-aineen ohjaus, käytön suunnittelu ja lajittelu on tähän asti tapahtunut jakona puulajeihin ja pääpuutavaralajeihin eli tukkiin, kuitupuuhun ja energiapuuhun ottaen huomioon tehtaiden erityisvaatimuksia, mutta laadun huomioon ottaminen on tarkoittanut lähes pelkästään tukkipuuta. Jatkossa on perusteltua selvittää uusia teknologioita ja digitaalisia ratkaisuja kuitupuun ja kuituraaka-aineen ominaisuuksien ja laadun toteamisessa. Niitä voitaisiin soveltaa raaka-aineen ohjaukseen, lajitteluun ja jopa käyttöpotentiaalinn tunnistamiseen ainakin tuoteryhmän tasolla.

Kamerakuvausta ja laserskannausta puunhankinnan suunnitteluun maasta tai ilmasta toteutettuna on tutkittu varsin paljon, mutta käytännön sovellukset runkojen teknisen laadun ja raaka-ainetason ominaisuuksien havainnointiin puuttuvat. Hakkuukoneisiin liitettävät, rungon katkaisukohtien pintojen sähkömagneettisiin mittauksiin ja kuvantamiseen perustuvat ratkaisut ovat olleet kehitystyön kohteena viimeiset 15 vuotta, tavoitteena rungon katkonnan hallinta havutukkipuuta optimoiden. Suurilla hakkuukoneiden valmistajilla on tietoa ja valmiuksia ottaa käyttöön näitä menetelmiä, mutta kustannus-hyötysuhde ei ole toistaiseksi johtanut kaupallisiin ratkaisuihin. Huomion kohdistaminen myös kuitupuuhun saattaa edellyttää muutoksia tukin ja kuitupuun hintasuhteissa, puun laadun huomioon ottamista hinnoittelussa ja todellisten käyttöarvoerojen peilautumista raaka-aineositteiden hintoihin. Tietokanta- ja mallinnusratkaisut ja pilvipalvelut ovat yksi mahdollisuus puunhankinnan ja käytön ennakkosuunnitteluun ja raaka-aineen ohjauksen tehostamiseen. Raaka-ainetietokantoihin ja tuoteominaisuuksien mallinnukseen perustuvalla tuotekehitykselle olisi vastavasti käyttöä tulevaisuuden kuituraaka-aineeseen perustuvan tuotepaletin suunnittelussa ja tehtaiden roolin hahmottamisessa.

Tämän tutkimuksen aineisto kattaa Etelä-, Lounais-, Keski- ja Itä-Suomen. Pohjois-Suomi ja Pohjanmaan alueet eivät ole mukana aineistossa, joten tältä osin tutkimuksen täydentäminen on perusteltua. Tätä tarvetta korostavat kuitupuun käyttämättä olevien hakkuumahdollisuuksien ja myös puuston kasvun lisääntymisen kohdentuminen erityisesti Pohjois-Suomeen, Länsi-Suomeen ja Itä-Suomen pohjoisosiin. Nämä ovat samalla alueita, joille uudet suunnitelmat biojalostamoiden rakentamiseksi ja laajentamiseksi ovat keskittyneet viime vuosina. Investointisuunnitelmia ja tuotestrategioita voidaan tukea ajantasaisella tiedolla raaka-aineen saatavuudesta, kohdentamisesta ja kustannuksista sekä ominaisuuksista, jalostusarvosta ja kilpailukyvyistä. Uudet tuotelajit, kuten liukosellut, nanosellut ja mikrokiteiset sellut uusiin loppukäyttöihin biomateriaaleina asettavat lisäksi omia vaatimuksiaan raaka-aineelle ja sen prosessoinnille. Täten tuotekehitystyön eteneminen ja sen tulosten realisoiminen edellyttävät käytettävissä olevan kuitupuun ja muun potentiaalisen puuraaka-aineen hyvää tuntemusta.

Tämän Suomen eteläosiin kohdistuvan tutkimuksen aineisto oli kerätty 1990-luvulla. Muualla Suomessa edelliset laajat tutkimukset kuitupuusta ja sen ominaisuuksista on tehty 1960–70 -luvuilla, jolloin hakkuiden piirissä oli lähes pelkästään luontaisesti syntyneitä ja osin säännöllisen metsänhoidon ulkopuolella kasvaneita metsiä, pääosin kangasmailta. Nyt kuitupuusta tulee suuri osa – ja entistä enemmän tulevaisuudessa – tehokkaasti hoidetuista metsistä, joissa kasvunopeus on huomattavasti korkeampi ja puuaineen ominaisuudet erilaisia kuin 50–60 vuotta sitten. Täten tutkimuksen laajentaminen edellä mainituille maantieteellisille alueille ja metsällisiin oloihin on tarpeen, sekä kuitupuun määrän, laadun että puuteknisten ominaisuuksien suhteen.

Suomalaisen kuituraaka-aineen ja tuotteiden kilpailutilanne eri tuoteryhmissä on strateginen kysymys täkäläiselle kemialliselle puunjalostukselle ja biojalostamoihin perustuvalla liiketoiminnalla. Tutkimuksen tehtävä on selvittää muutostrendit sekä tulevaisuuden raaka-aineen että tuotenäkymien suhteen ja analysoida teollisuuden mahdollisuudet sopeutua ja vaikuttaa globaalissa liiketoiminta- ja markkinaympäristössä.

Viitteet

- Abdul Khalil, H.P.S., Davoudpour, Y., Nazrul Islam, Md., Mustapha, A., Sudesh, L., Dungani, R. & Jawaid, M. 2014. Production and modification of nanofibrillated cellulose using various mechanical processes: A review. *Carbohydrate Polymers* 99, 649-665.
- Alén, R. 2000. Structure and chemical composition of wood. Julkaisussa: Stenius, P. (ed.). *Forest Products Chemistry*. Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI / FAPET Oy. Ss. 12-54.
- Alén, R. 2015. Pulp mills and wood-based biorefineries. Julkaisussa: *Industrial Biorefineries & White Biotechnology*, ss. 91-126. Elsevier, Amsterdam.
- Asikainen, A., Lindblad, J. & Verkasalo, E. 2009. Timber measurement. Julkaisussa: Kellomäki, S. (ed.). *Forest Resources and Sustainable Management. Papermaking Science and Technology. Volume 2. Second Edition – Totally Updated*. Paper Engineers' Association / Paperi ja Puu Oy. Ss. 452-479. Gummerus Oy, Jyväskylä, Finland.
- Bendtsen, B.A. 1978. Properties of wood from improved and intensively managed trees. *Forest Products Journal* 28(10): 61-72.
- Bergström, B. 2000. Aspects on heartwood formation in Scots pine. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Silvestria* 129. 27 s.
- Björklund, L. 1984. Massavedens torr-rådensitet och dess beroende av olika faktorer. Sveriges Lantbruksuniversitetet, institutionen för virkeslära. Rapport 155. 29 s.
- Björklund, L. 1999. Identifying heartwood-rich stands or stems of *Pinus sylvestris* by using inventory data. *Silva Fennica* 33(2):119-129.
- Björklund, L. & Walfridsson, E. 1993. Properties of Scots pine wood in Sweden. Basic density, heartwood, moisture and bark content. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products. Report 234.
- Fries, A. & Ericsson, T. 1998. Genetic parameters in dialled-crossed Scots pine favor heartwood formation breeding objectives. *Canadian Journal of Forest Research* 28:1-5.
- Hakkila, P. 1966. Investigations on the basic density of Finnish pine, spruce and birch wood. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 61.5. 98 s.
- Hakkila, P. 1967. Vaihtelumalleja kuoren painosta ja painoprosentista. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 62.5. 37 s.
- Hakkila, P. 1968. Geographical variation of some properties of pine and spruce pulpwood in Finland. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 66.8. 60.
- Hakkila, P. 1979. Wood density survey and dry weight tables for pine, spruce and birch stems in Finland. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 96.3. 59 s.
- Hakkila, P. & Kalaja, H. 1983. Puu- ja kuoriturhan palauttamisen tekniikka. *Folia Forestalia* 552. 37 s.
- Hakkila, P. & Panhelainen, A. 1970. On the wood properties of *Pinus contorta* in Finland. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 73.1. 43 s.
- Hakkila, P. & Uusvaara, O. 1968. On the basic density of plantation-grown Norway spruce. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 66.8. 23 s.
- Hakkila, P. & Verkasalo, E. 2009. Structure and properties of wood and woody biomass. Julkaisussa: Kellomäki, S. (ed.). *Forest Resources and Sustainable Management. Paper Engineers' Association / Paperi ja Puu Oy*, pp. 133-215.
- Heiskanen, V. & Rikkinen, P. 1976. Havutukkien kuoren määrä ja siihen vaikuttavat tekijät. *Folia Forestalia* 250.
- Hillis, W.E. 1987. *Heartwood and tree exudates*. Springer-Verlag, Berlin. doi:10.1007/978-3-642-72534-0
- Hokka, T. & Vuorenmaa, T. 2001. Kuitupuun tehdasmittauksen kehittäminen. *Metsätehon raportti* 103. 57 s. <http://www.metsateho.fi/kuitupuun-tehdasmittauksen-kehittaminen/>
- Jalava, M. 1952. Puun rakenne ja ominaisuudet. Porvoo. 352 s.
- Kangas, H. 2014. Opas selluloosa-nanomateriaaleihin. VTT Technology 199. 89 s. + liitteet 3 s.

- Karjalainen, S. 2008. Mekaaninen massa SC-paperissa: tutkiminen ja analysointi. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. 20 s.
- Kettunen, J. 2002. Kuuseen kurkottajat. Teknologian kehitys Metsäliiton piirissä 1950-luvulta vuosituhannen vaihteeseen. Toinen painos. Dmp Oy. 143 s.
- Kniivilä, M. 2019. Massa- ja paperiteollisuuden tuotanto ja vienti. Julkaisussa: Viitanen, J., Mutanen, A. & Karvinen, S. (toim.). Metsäsektorin suhdannekatsaus 2019-2020. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 71/2019, ss. 31-36. Luonnonarakeskus. Helsinki.
- Kollmann, F.F.P. & Cote, W.A. Jr. 1968. Principles of wood science and technology. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, New York. 554 s.
- Kretschmann, D.E., Moody, R.C., Pellerin, R.F., Bendtsen, B.A., Cahill, J.M., McAlister, R.H. & Sharp, D.W. 1993. Effect of various proportions of juvenile wood on laminated veneer lumber. Res. Pap. FLP-RP-521. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 31 s.
- Kärenlampi, P. 1992. Wood moisture content in grinding. Paperi ja Puu 74(4): 328-336.
- Kärenlampi, P. 1995. Mekaanisen massan puuraaka-aineen vaikutus puupitoisten painopaperien ominaisuuksiin. Paperi ja Puu 77(8): 472-478.
- Kärkkäinen, M. 1976. Havutukkien kuoren tiheys ja kosteus. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 87.5. 23 s.
- Kärkkäinen, M. 1984. Puutavaran mittauksen perusteet. Helsingin yliopiston monistuspalvelu, painatusjaos. Helsinki. 252 s.
- Kärkkäinen, M. 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. Metsäkustannus Oy. 468 s.
- Lehtonen, I. 1978. Knots in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and their effect on the basic density of stemwood. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 95.1. 34 s.
- Lindblad, J. & Repola, J. 2019. Mänty- ja koivukuitupuun tuoretiheys paino-otantamittauksessa ja tuoretiheyden mallinnus varastointiajan perusteella. Metsätieteen aikakauskirja 2019-10101. Tutkimusartikkeli 26 s.
- Lindblad, J. & Verkasalo E. 1999. Teollisuushakkeen kuiva-tuoretiheys ja painomittauksen muuntokertoimet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 747. 48 s.
- Lindblad, J. & Verkasalo, E. 2001. Teollisuus- ja kuitupuuhakkeen kuiva-tuoretiheys ja painomittauksen muuntokertoimet. Metsätieteen aikakauskirja 3: 411-431.
- Liukkonen, A. 1993. Kemisk och mekanisk massa ur olika stamdelar av tall (*Pinus sylvestris*). Åbo Akademi, institutionen för kemisk träförädlingsteknik.
- Luonnonvarakeskus. Tilastopalvelut. <https://www.luke.fi/avoin-tieto/tilastopalvelu/>
- Melkas, T. 2019. Puutavaran mittausmenetelmien osuudet 2018. Metsätehon tulosalvosarja 9/2019. 13 s. Metsäteho Oy. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja_2019_9_Puutavaran_mittausmenetelmien_osuudet_2018.pdf
- Mork, E. 1928. Om tennar. 33 s. Oslo.
- Niskanen, M., Kauppinen, H. & Silvén, O. 2001. Color and texture based wood inspection with non-supervised clustering. Proceedings of 12th Scandinavian Conference on Image Analysis, June 11-14, 2001, Bergen, Norway. Ss. 336-342.
- Norin, T. & Fremer, K-E. 1977. Kuoren rakenne ja kemiallinen koostumus. Teoksessa: Jensen, W. (toim.) Puukemia I: 83-96.
- Nurminen, T. & Heinonen, J. 2007. Characteristics and Time Consumption of Timber Trucking in Finland. Silva Fennica 41(3): 471-487.
- Nylinder, P. 1959. Synpunkter på produktionens kvalitet. Kungl. Skogshögskolan, institutionen för virkeslära. Nr U2. 19 s.
- Nylinder, P. 1961 a. Influence of three features and wood properties on basic density and buoyancy. I. Scots pine. Rapp. Instn. Virkeslära Skogshögsk. Nr R 35.
- Nylinder, P. 1961 b. Influence of three features and wood properties on basic density and buoyancy. I. Norway spruce. Rapp. Instn. Virkeslära Skogshögsk. Nr R 36.

- Ojansuu, R. & Maltamo, M. 1995. Sapwood and heartwood taper in Scots pine stems. *Canadian Journal of Forest Research* 25(12): 1928-1943.
- Olsson, M. 1998. Kundorderstyrd råvaruförsörjning. Julkaisussa: Rensserikonferens: Råvaruförsörjning och vedförädling - en process under utveckling. STFI-rapport 13: 7-16. Stockholm.
- Pesonen, E., Mäkinen, H. & Verkasalo, E. 2009. Puuta koskemattoman mittauksen mahdollisuudet ja menetelmiä raakapuun laadun määrittämiseen. *Metlan työraportteja/Working Papers of the Finnish Forest Research Institute* 173. 42 s. + liitteet 4 kpl.
- Pulkka, S., Segura, V., Harju, A., Tapanila, T., Tanner, J., Paques, L.E. & Charpentier, J.-P. 2016. Prediction of stilbene content from heartwood increment cores of Scots pine using near infrared spectroscopy methodology. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 24(6): 517-528.
- Projekt helträdsutnyttjande. 1977. Helträdsutnyttjande inom massaindustrin. Slutrapport från projektgrupp massa. Stockholm. 64 s.
- Raatevaara, A. 2019. Tukin laatukatkonta. Valtakunnalliset mittauspäivät. Vuokatti, 14.15.03.2019. Kalvosarja, 20 s.
- Ranua, J. 1999. Haavan käyttö paperin raaka-aineena. *Metla/Vantaan tutkimuskeskuksen tutkimuspäivä Tammisaarella. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 725, ss. 101-106.
- Rieppo, K. & Korpilahti, A. 2001. Kuitupuun tehdaskäsittely ja sen kehittäminen. *Metsätehon raportti* 114. 41 s. <http://www.metsateho.fi/kuitupuun-tehdaskasittely-ja-sen-kehittaminen/>
- Rissanen, A. & Sirviö, J. 2000a. Männy (Pinus sylvestris) ja kuusen (Picea abies) puuaineen ja -kuitujen ominaisuuksien vaihtelu. *Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisu* 23. 77 s.
- Rissanen, A. & Sirviö, J. 2000b. Havukuitupuun lajittelun vaikutuksista. *Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisu* 24. 71 s.
- Routa, J., Brännström, H., Anttila, P., Mäkinen, M., Jänis, J. & Asikainen, A. 2017. Wood extractives of Finnish pine, spruce and birch – availability and optimal sources of compounds: A literature review. *Natural resources and bioeconomy studies* 73/2017. Natural Resources Institute Finland, Helsinki. 55 s.
- Sahlberg, V. 1998. Variations of wood and fibre properties and their influence on the properties of the mechanical pulp. *Royal Insitutute of Technology. TRITA-PMT Report* 1998: 13. 431 s.
- Saikka, O. & Rikkonen, P. 1976. Kuitupuun kuoren määrä ja siihen vaikuttavat tekijät. *Folia Forestalia* 262. 22 s.
- Salo, E. 2002. Sisäoksat ensiharvennuskäynnin runkokuun osana Etelä-Suomessa. Kosteus-, tiheys- ja tilavuustarkastelu. *Mikkelin Ammattikorkeakoulu. Käsikirjoitus*. 52 s. + 2 liitettä.
- Saranpää, P. 2002. Ensiharvennuskäynti ja -kuusi kuituraaka-aineena. Julkaisussa: Nurmi, J., Verkasalo, E. & Kokko, A. (toim.). *Pohjanmaan puunlaatu ja -käyttö. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 861, ss. 15-23.
- Sarkanen, K.V. & Ludwig, C.H. 1971. Lignins: occurrence, formation, structure and reactions. *Wiley & Sons, New York*. 916 s.
- Schraml, R. & Uhl, A. 2015. Tree Log Identification Based on Digital Cross-Section Images of Log Ends. Julkaisussa: Azzopardi, E. & Petkov, N. (Eds.). 2015. *Computer Analysis of Images and Patterns. 16th International Conference, CAIP 2015. Valletta, Malta, September 2-4, 2015. Proceedings, Part I*, ss. 750-765.
- Shigo, A. L. 1985. How tree branches are attached to trunks? *Canadian Journal of Botany* 63(8): 1391-1401.
- Sjöström, E. 1993. *Wood Chemistry, fundamentals and applications*. Academic press, California. 295 s.
- Sorsa, J.-A., Imponen, V., Hujo, S., Korpilahti, A., Poikela, A. & Räsänen, T. 2006. Kuvaan perustuva mittaus apterauksessa ja puutavaran lajittelussa, *Metsätehon Raportti* 194, 21.9.2006. 23 s. + liitteet. <http://www.metsateho.fi/kuvaan-perustuva-mittaus-apterauksessa-ja-puutavaran-lajittelussa/>
- Spångberg, K. 1998. Sorting Norway spruce pulpwood. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Silvestria* 82. 48 s.

- Spångberg, K. 1999. Classification of *Picea abies* pulpwood according to wood and stand properties. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14(3): 176-281
- 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: 65-69.
- Stamm, A.J. 1969. Correlation of structural variations of lignins with their specific gravity. *Tappi* 52: 1498-1502.
- Stamm, A.J. & Sanders, H.T. 1966. Specific gravity of the wood substance of loblolly pine as effected by chemical composition. *Tappi* 49: 397-400.
- Steven, W.C., Johnson, D.D. & Baud, M.J. 1961. The specific gravity and moisture content of freshly-felled conifers. Forest Products Research Laboratory, Prinus Risborough. 20 s.
- Suuronen, S. 2017. Kemitermomekaanisen massan valkaisu. Pro gradu -tutkielma. Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos, Soveltavan kemian osasto.
- Tamminen, Z. 1962. Fuktighet, volymvikt m.m. hos ved och bark. I. Tall. Skogshögskolan, institutionen för virkeslära. Rapporter 41.
- Tamminen, Z. 1964. Fuktighet, volymvikt m.m. hos ved och bark. II. Gran. Skogshögskolan, institutionen för virkeslära. Rapporter 47.
- Tehokas puuhuolto 2025. Päivitys 2018. 20 s. Metsäteho Oy. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tehokas_puuhuolto_2025_p2018.pdf
- Tyrväinen, J. 1995. Wood and fiber properties of Norway spruce and its suitability for thermomechanical pulping. *Acta Forestalia Fennica* 249.
- Uusitalo, J. 2004. Heartwood and extractive content of Scots pine in southern Finland: models to apply at harvest. *Wood and Fiber Science* 36(1): 3-8.
- Uusvaara, O. 1974. Wood quality in plantation grown Scots pine. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 80.2. 105 s.
- Varhimo, A. & Tuovinen, O. 1999. Raw materials. Julkaisussa: Sundholm, J. (ed.). *Mechanical Pulping. Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI / FAPET Oy*, ss. 67-104.
- Verkasalo, E. 2008. Kuiduttava teollisuus. Kirjassa: Niemistö, P., Viherä-Aarnio, A., Velling, P., Heräjärvi, H. & Verkasalo, E. (toim.). *Koivun kasvatusta ja käyttöä*. Metla & Metsäkustannus Oy, ss. 218-222.
- Verkasalo, E. 2015. Laadukas ja monimuotoinen puuraaka-aine puunjalostuksen pohjana. Kirjassa: Salo, K. (toim.). *Metsä – Monikäyttö ja ekosysteempipalvelut*. Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki. Ss. 91-98.
- Viikari, L. & Alén, R. 2011. Biochemical and chemical conversion of forest biomass. Julkaisussa: Alén, R. (ed.). *Biorefining of Forest Resources*, ss. 225-261. Paper Engineers' Association, Helsinki, Finland.
- Vintila, E. 1939. Untersuchungen über Raumgewicht und Schwindmass von Früh- und Spätholz bei Nadelhölzern. *Holz als Roh- und Werkstoff* 2: 345-357.
- Wilhelmsson, L., Arlinger, J., Brunberg, T., Rehnberg, O. Jönsson, A., Miller, J., Nylinder, M., Duchesne, I. & Spångberg, K. 2000. Vedsortering för bättre pappers- och kartongprodukter. *Skogforsk. Redogörelse* 4. 105 s.
- Willför, S., Hemming, J., Reunanen, M., Eckerman, C. & Holmbom, B. 2011. Lignans and Lipophilic Extractives in Norway Spruce Knots and Extractives. *Holzforschung* 57 (2003): 27-36.
- Womeldorf, F.M. 1965. Separation of heartwood from sapwood pulp chips by flotation methods. *Forest Products Journal* 15(9): 407-408
- Zobel, B.J. & Sprague, J.R. 1998. *Juvenile wood in forest trees*. Springer Series in Wood Science. 300 s.
- Österberg, P. 2009. *Wood Quality and Geometry Measurements Based on Cross Section Images*. Tampere University of Technology, Publication 807. 192 s.
- Österberg, P. & Ihalainen, H. 2006. Puun laatutiedon mittaaminen kuvasta. *Metsätehon Raportti* 197, 2.11.2006. 21 s.

Suulliset lähteet

- Axegård, Peter. RISE – Sweden's Research Institute, Stockholm. 2011.
- Lukkarinen, Antti. Stora Enso Oyj, Kouvola. 2019.



luke.fi

Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000