METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 943, 2005

HARVENNUSMÄNNYN HANKINNAN JA SAHAUKSEN KEHITTÄMINEN

Wood Wisdom -tutkimusohjelman
hankekonsortion julkinen loppuraportti



Tapio Wall, Jorma Fröblom, Harri Kilpeläinen,
Jari Lindblad, Antti Heikkilä,
Tiecheng Song, Reeta Stöd, Erkki Verkasalo

JOENSUUN TOIMINTAYKSIKKÖ

Puunkäytön mahdollisuudet ja puutuotteiden menekki -tutkimusohjelma

METLA

METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 943, 2005

METSÄNTUTKIMUSLAITOS
Jalostusosasto

HARVENNUSMÄNNYN HANKINNAN JA SAHAUKSEN KEHITTÄMINEN

WOOD WISDOM -tutkimusohjelman hankekonsortion loppuraportti

Tapio Wall
Jorma Fröblom
Harri Kilpeläinen
Jari Lindblad
Antti Heikkilä
Tiecheng Song
Reeta Stöd
Erkki Verkasalo

JOENSUUN TOIMINTAYKSIKKÖ
2005
Puunkäytön mahdollisuudet ja puutuotteiden menekki –tutkimusohjelma

Wall, T., Fröblom, J., Kilpeläinen, H., Lindblad, J., Heikkilä, A., Song, T., Stöd, R. & Verkasalo, E. 2005. Harvennusmännyn hankinnan ja sahauksen kehittäminen. WOOD WISDOM -tutkimusohjelman hankekonsortion loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 943. 129 s. + liitteet 13 s.
ISBN 951-40-1977-6, ISSN 0358-4283.

Avainsanat: mänty, *Scots pine*, harvennuspuu, pienpuu, pikkutukki, lyhyttukki, puun laatu, hakkuukertymä, puunhankinta, korjuukustannus, mekaaninen puunjalostus, puutuoteteollisuus, sahateollisuus, sahaus, aihiotuotanto, tuottavuus, kustannukset, tuotot

Julkaisija: Metsäntutkimuslaitos, Joensuun toimintayksikkö; Puunkäytön mahdollisuudet ja puutuotteiden menekki -tutkimusohjelma (PKM)

Hyväksynyt: Tutkimusjohtaja Kari Mielikäinen

Kansikuvat: Tapio Wall

Painopaikka- ja –vuosi: Joensuun yliopistopaino. Joensuu, 2005.

Hinta: 20 €

Julkaisun myynti:
Metsäntutkimuslaitos, kirjasto
puh. 010 211 2200, faksi 010 211 2201
kirjasto@metla.fi

Metsäntutkimuslaitos, Joensuun toimintayksikkö, puh. 010 2111,
faksi 010 211 3113

Tekijöiden yhteystiedot:
Wall Tapio, Kilpeläinen Harri, Lindblad Jari, Stöd Reeta, Verkasalo Erkki
Metsäntutkimuslaitos, Joensuun toimintayksikkö, PL 68, 80101 Joensuu
Puh. 010 2111, faksi 010 211 3113
Sähköposti: etunimi.sukunimi@metla.fi

Fröblom Jorma, Heikkilä Antti, Song Tiecheng
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Puutuotteet, PL 1806, 02044 VTT
Puh. 020 722 111, faksi 020 722 7027
Sähköposti: etunimi.sukunimi@vtt.fi

Alkusanat

Käsillä on julkinen loppuraportti päätuloksista tutkimus- ja kehittämishankekonsortiosta "Harvennusmännyn hankinnan ja sahauksen kehittäminen", joka kuului Metsäalan tutkimusohjelmaan WOOD WISDOM (1998-2001). Tutkimusohjelma oli Tekesin, Suomen Akatemian, maa- ja metsätalousministeriön ja kauppa- ja teollisuusministeriön ja metsäsektorin yritysten rahoituksella toteutettu monitieteellinen tutkimus- ja teknologiaohjelmakokonaisuus. Ohjelman tavoitteena oli edistää metsätalouden ja –teollisuuden kilpailukykyä muuttuvassa toimintaympäristössä yhdistämällä koko puunjalostuksen tuotantoketjun voimavarat asiakkaan lopputuotteelle asettamien vaatimusten täyttämiseen. Tutkimusohjelman hankkeet kattoivat sekä mekaanisen että kemiallisen puunjalostuksen ketjut metsästä lopputuotteisiin. Ohjelmaan sisältyvien tutkimusten keskeinen lähtökohta oli suomalaisen puuraaka-aineen hyödyntäminen markkinalähtöisesti sille parhaiten soveltuvissa puu- ja paperituotteissa. (Paavilainen & Marttila 2002).

Tämä Metsäntutkimuslaitoksen (Metla) ja VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan (VTT) hankekonsortio käynnistettiin keväällä 2000 maa- ja metsätalousministeriön, Tekesin ja viiden sahayrityksen sekä Metlan ja VTT:n rahoituksella. Konsortio koostui kahdesta toisiaan täydentävästä osahankkeesta: 1) Harvennusmännyn tukkikertymä, korjuun tuottavuus ja lyhyttukkitekniikka (Metla, päärahoittaja maa- ja metsätalousministeriö), 2) Harvennusmännyn sahaus, tuotteet, kannattavuus ja lyhyttukkitekniikka (VTT, päärahoittaja Tekes). Konsortion koordinoinnista vastasi Metla.

Sahayritykset (Isojoen Saha Oy, Junnikkala Oy, Kaivospuu Oy, PRT-Wood Oy ja Pölkky Oy) avustivat konsortion tutkimusten vaatimien pysty- ja kaatokoepuumetsiköiden hankinnassa ja koetukkien sahauksen toteutuksessa. Korjuututkimuksen toteuttamiseen myötävaikuttivat Metsähallitus tarjoamalla tutkimustarkoituksiin koeleimikoita ja puunkorjuukalustoa sekä Ponsse Oyj tarjoamalla asiantuntemusta tutkimuksen suunnittelussa ja toteutuksessa. Konsortion tutkimustoimintaa ohjasi edellisten organisaatioiden edustajien lisäksi rahoittajista, sahakone- ja laitevalmistajista sekä asiantuntijajäsenistä koostuva johtoryhmä, puheenjohtajana metsänhoitaja Sami Oinas (Pölkky Metsä Oy). Konsortion johtoryhmä on esitetty liitteessä 1.

Metlassa metsikköinventoinnit ja kaatokoepuiden kaadot ja sahaukset tekivät MMM:t Teemu Pulkkanen, Heikki Ovaskainen, Olli-Pekka Jalonen ja mti Niina Rinne ryhmänjohtajinaan tutkijat Reeta Stöd ja Jari Lindblad. Soveltuvien tutkimusmetsiköiden etsimiseen osallistui lisäksi lukuisa joukko toimihenkilöitä useista metsänhoitoyhdistyksistä, metsäteollisuusyrityksistä, Metlasta ja Metsähallituksesta. Sahakohtaisesti raportoitujen tukkikertymien laskentaan osallistuivat Pulkkanen, Lindblad ja MMM Jani Lehtimäki. Kaatokoepuiden sisäisen oksikkuuden laskelmia teki MMM Anne Seppänen. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa virtuaalisen runkopankin muodostamiseen liittyviin mittauksiin osallistuivat erikoistutkija Pertti Söyrilä, tutkija Antti Lankinen, teknikko Eero Halonen ja työteknikko Heikki Murto.

Julkaisun kirjoitustyöstä vastasivat Metlan tutkijat lukujen 1 – 3, 4.1 – 4.2 ja 5.1 – 5.3 osalta ja VTT:n tutkijat lukujen 4.3 ja 5.3 osalta. Luku 6 on kirjoitettu Metlan ja VTT:n tutkijoiden yhteistyönä. Taitosta vastasivat Seija Partanen ja Leena Karvinen Metlasta.

Esitän parhaat kiitokseni tutkimuskonsortion toteutukseen ja ohjaukseen osallistuneille organisaatioille ja henkilöille aktiivisesta ja asiantuntevasta panoksesta tutkimusten eri vaiheiden toteutuksessa. Erityiskiitokset kuuluvat MMT Hannu Borenille, joka vastasi konsortion muodostumiseen johtaneesta valmistelutyöstä toimiessaan vs. vanhempana tutkijana Metsäntutkimuslaitoksessa vuosina 1998-2000.

Joensuu, elokuu 2005
Erkki Verkasalo
Hankekonsortion koordinaattori

Yhteenveto

Tutkimus- ja kehittämishankekonsortion tavoitteena oli määrittää ominaisuudet, soveltuvuus ja valintakriteerit sellaisille harvennusmäntyleimikoille ja niistä saatavalle puutavaralle, joita sahateollisuus voi hyödyntää kannattavasti sahatavaran ja jatkojalostuksen täsmämateriaalien valmistuksessa (mm. liimalevyt ja muut jatkojalosteiden aihiot). Erityisesti määritettiin lyhyiden tukkipituuksien ja pienten latvaläpimittojen käytön vaikutukset verrattuna nykyisin yleisessä käytössä oleviin pituuksiin ja minimiläpimittoihin harvennusmännyn hankinnassa (hakkuukertymä, tukkikertymä ja -jakauma ja herkkyysanalyysit ja korjuun ja kaukokuljetuksen tuottavuus ja kustannukset, puutavaralajien tehdashinta) ja sahauksessa (saanto, arvosaanto, laatujakauma, kannattavuus, herkkyysanalyysit). Edellä mainitut asiat tutkittiin viiden sahan puunhankinta-alueilla pystypuuston metsikköinventoinnein ja hakkuukertymän simuloinnein, empiirisin korjuututkimuksin sekä kaatokoepuiden runkopankkianalyysein ja sahauksen simuloinnein Metlan, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan ja mukana olleiden yritysten yhteistyönä.

Tutkimusaineistot painottuivat Etelä- ja Pohjois-Pohjanmaan, Lapin, Pohjois-Karjalan ja Etelä-Savon metsäkeskusten alueille. Näin voitiin tehdä harvennusmännyn hankinnan kannalta tärkeimmät alueet kattava ja johdonmukainen analyysi käyttökelpoisuudesta puutuoteteollisuudessa aina metsästä sahausprosessiin ja lopputuoteaihioihin saakka. Metsikköinventointien aineisto käsitti yhteensä 203 selvästi mäntyvaltaista metsikköä sekä kivennäismailta (156 kpl) että turvemailta (147 kpl), joissa ensiharvennus (124 kpl) tai myöhempi harvennus (79 kpl) oli metsänhoidollisesti ajankohtainen lähivuosina ja leimikoista voitiin saada silmävaraisesti arvioiden ainakin pientä sahapuuta. Tutkitut metsiköt olivat metsänhoidolliselta tasoltaan keskimääräistä parempia. Pystykoepuina mitattiin yhteensä 8508 mäntyä.

Pystyinventoinneissa määritettiin männyn sahauskelpoisiksi puutavaralajeiksi normaalikokoinen tukki (latvaläpimitta 150+ mm, pituus 3,7 - 6,1 m), tyvitukki (latvaläpimitta 200+ mm, pituus 3,1 - 4,0 m), pikkutukki (latvaläpimitta 120 - 149 mm, pituus 3,1 - 4,6 m) ja lyhyttukki (latvaläpimitta 100 - 179 mm, pituus 2,5 - 3,4 m). Runkojen simuloidussa apteerauksessa otettiin huomioon sahauskelpoisuutta rajoittavat viat, jotka määritettiin verraten ankarin mutta eri leimikoissa systemaattisesti samoin kriteerein. Sahauskelpoisen puutavaran määrä oli pieni tutkituissa metsiköissä. Kivennäismailla sahapuun hakkuukertymä oli ensiharvennuksissa keskimäärin 4 - 8 m^3/ha (7 - 12 % hakkukertymästä) ja myöhemmissä harvennuksissa 8 - 12 m^3/ha (19 - 29 % hakkukertymästä). Turvemailla sahapuun hakkukertymä oli ensiharvennuksissa 2 - 5 m^3/ha (6 - 9 % hakkukertymästä) ja myöhemmissä harvennuksissa 0 - 7 m^3/ha (0 - 11 % hakkukertymästä). Sahapuun hakkuukertymä oli alle 5 m^3/ha kivennäismailla 58 prosentissa ja turvemailla 72 prosentissa tutkituista metsiköistä. Sahapuuta harvennuksessa yli 20 m^3/ha tuottaneita metsiköitä oli kivennäismailla 8 % ja turvemailla 4 %.

Harvennusmänniköiden korjuukokeisiin valittiin neljä leimikkoa Metsähallituksen hallinnoimilta mailta Lieksasta (kaksi ensiharvennusta, kaksi myöhempää harvennusta). Hakkuu oli lyhyitä tukkipituuksia käyttäen (2,5 ja 3,1 m) 10 %, lähikuljetus 20 % ja kaukokuljetus 9 % kalliimpaa kuin tavanomaisia puutavaralajeja käyttäen. Harvennusmännyn tehdashinta oli keskimäärin 6 % alempi lyhyttukkilohkoilla kuin tavanomaisin puutavaralajein hakatuilla lohkoilla. Alempi tehdashinta johtui pääasiassa puutavaran keskimäärin alemmasta kantohinnasta. Lyhyiden puutavaralajien korjuu ja kaukokuljetus oli sinänsä keskimäärin 14 % kalliimpaa kuin tavanomaisia puutavaralajeja hankittaessa.

Pystypuuinventointien harvennusmänniköistä valittiin 40 kpl kaatokoepuumetsiköiksi, joista kustakin otettiin viisi kaatokoepuuta, yhteensä 200 kpl. Näiden pohjalta tehtiin laskelmat kaatokoepuista simuloimalla saatujen sahatuotteiden valmistuksen kannattavuudesta

erikseen lauta- ja sydäntavara-asetteille. Sahaus lauta-asetteilla olisi käytetyillä lähtöarvoilla kannattavaa 120 mm:n kuorettomasta latvaläpimittaluokasta ylöspäin moduulipituista ja 140 mm:n kuorettomasta latvaläpimittaluokasta ylöspäin tukin pituista sahatavaraa valmistettaessa. Vastaavasti sydäntavara-asetteilla sahaus olisi kannattavaa 150 mm:n kuorettomasta latvaläpimittaluokasta ylöspäin moduulipituista sahatavaraa valmistettaessa. Tukin pituista sahatavaraa valmistettaessa suhteellinen tulos olisi aina negatiivinen. Tukin latvaläpimitta vaikutti sahattaessa lauta-asetteilla hieman enemmän sahauksen tulokseen kuin sydäntavara-asetteilla sahattaessa.

Peruslaskelmien lähtöarvot valittiin varovaisuusperiaatteella pyrkien välttämään tuotteiden hintatason yliarviointia tai tehdashintatason aliarviointia. Sahattaessa tukit sahatavaran moduulipituuksiin lauta-asetteilla sahauskustannusten lasku 10 prosentilla, tukin tehdashinnan lasku 20 prosentilla ja tuotteiden keskihinnan nousu 10 prosentilla perustasosta vaikuttivat kukin siten, että tukin positiivisen sahaustuloksen tuottava kuoreton minimilatvaläpimitta pieneni 140 mm:stä 130 mm:iin. Sydäntavara-asetteilla sahattaessa latvaläpimittaraja laski vastaavasti 150 mm:stä 120 - 130 mm:iin. Kustannusten tai hintojen muuttuessa päinvastaisiin suuntiin nollatulosta ei ollut mahdollista saavuttaa.

Sahattaessa kaikista kaatokoepuista vain lyhyitä tukkeja (2,2 m) sahatavaran saanto oli keskimäärin 4 prosenttiyksikköä korkeampi kuin sahattaessa vain pitkiä (4,6 m) tukkeja. Terveoksaisen sahatavaran osuus tuotannosta oli lyhyillä tukeilla 85 % ja pitkillä tukeilla 41 %. Kuitenkin lyhyillä tukeilla sahauksen suhteellinen arvosaanto tukin tilavuutta kohti oli heikompi kuin pitkillä tukeilla, esim. kuorettomassa latvaläpimittaluokassa 140 mm ero oli 18 prosenttiyksikköä.

Kaatokoepuuaineistosta mitatun rungon suurimman ulkoisen elävän ja kuolleen oksan sijainnin ja kuorellisen läpimitan sekä rungon tuore- ja kuivaoksarajojen perustella tehtiin rungon sisäoksien läpimittaa ja oksan sijaintikorkeutta kuvaavat regressiomallit. Samoin tutkittiin sahauksen arvosaannon riippuvuutta rungon ja tukin dimensioista ja ulkoisesta oksikkuudesta. Tukin pituuden vaikutus arvosaantoon oli huomattava. Tässä tarkastelussa, joka perustui rungon optimaaliseen apteeraukseen puutavaralajien kokonaisarvon pohjalta, sydäntavara-asetteilla sahattaessa arvosaanto oli 2,2 m:n tukeilla 16,8 €/tukki-m^3 korkeampi kuin 4,6 m:n tukeilla. Vastaava ero oli lauta-asetteilla sahattaessa noin 14,3 €/tukki-m^3.

Sovellettujen apteerausvaihtoehtojen välillä oli suuria eroja sahauksen suhteellisessa arvosaannossa sekä keskimäärin että rinnankorkeusläpimittaluokittain. Harvennusmänniköiden tyypillisissä rinnankorkeusläpimittaluokissa (13 - 23 cm) kaatokoepuuaineiston sahauksen suhteellinen arvosaanto oli paras, kun sovellettiin kaikki tutkitut puutavaralajit sisältänyttä apteerausvaihtoehtoa (pl. 23 cm:n läpimittaluokka). Tulos oli samansuuntainen sekä lauta- että sydäntavara-asetteilla, mutta ero muihin apteerausvaihtoehtoihin pieneni rungon läpimitan kasvaessa. Arvosaanto oli suhteellisesti korkein läpimittaluokissa 17 - 19 cm ja 23 cm. Normaalitukin lisäksi pelkän pikku- tai lyhyttukin sisältäneissä vaihtoehdoissa parhaat arvosaannot tuottaneet läpimittaluokat olivat pääosin samat, mutta niiden suhteelliset erot olivat suuremmat. Simuloitaessa moduulipituista sahatavaraa tuotti lauta-asete korkeamman suhteellisen keskimääräisen arvosaannon kuin sydäntavara-asete. Asetesarjojen ero oli varsin pieni normaali- ja lyhyttukin sisältäneissä vaihtoehdoissa (3 - 5 yksikköä) mutta suurempi kaikki puutavaralajit sisältäneessä vaihtoehdossa (13 yksikköä). Poikkeuksena oli normaali- ja pikkutukkivaihtoehto, jossa sydäntavara-asete tuotti 5 yksikköä korkeamman arvosaannon. Simuloitaessa tukin pituisia tuotteita tuotti lauta-asete kaikilla apteerausvaihtoehdoilla keskimäärin vajaan 10 yksikköä korkeamman arvosaannon kuin sydäntavara-asete. Kummallakin asetesarjalla pikkutukin sahaaminen tuotti keskimäärin lähes saman arvosaannon kuin kaikkien puutavaralajien sahaaminen. Pikku- ja lyhyttukkivaihtoehtojen ero oli varsinkin lauta-asetteilla tukin pituisia tuotteita sahattaessa suurempi kuin moduulipituisia tuotteita sahattaessa.

Mäntyharvennusleimikoissa pikku- tai lyhyttukkien hankinta lisää sahattavan puun kertymiä suhteellisesti paljon, mutta hehtaarikohtaiset kertymät ovat silti varsin pieniä. Jo yhdellä tai kahdella lyhyellä tukkipituudella ja yhdellä pieniläpimittaisella normaalitukin ohella hankittavalla puutavaralajilla saavutetaan noin 95 % sahapuun suurimmasta mahdollisesta kertymästä. Pikkutukin hankinta lisää kertymiä eniten rinnankorkeusläpimittaluokissa 15-19 cm ja lyhyttukin hankinta rinnankorkeusläpimittaluokissa 13-15 cm. Normaalitukin osuus on suurin 19 cm:n läpimittaluokasta ylöspäin, joten erityisesti myöhemmissä harvennuksissa normaalitukki on syytä pitää mukana korjattavien sahapuutavaralajien joukossa.

Sahojen mäntyharvennuspuun hankinta kannattaa kohdistaa vain hyvää metsänhoidollista tasoa oleviin runsaspuustoisiin harvennuskohteisiin. Erityisesti ensiharvennuksissa puuston järeys rajoittaa runkojen teknisten vikojen ohella merkittävästi sahapuun saatavuutta. Käytännössä kertymät ovat ensiharvennuksissa yleensä liian pieniä kannattavaan hankintaan, ja vasta toisista harvennuksista alkaen saadaan kohtuullisia määriä sahapuuta. Lisäksi kertymät ovat kivennäismailla säännöllisesti selvästi suurempia kuin ojitetuilla turvemailla, joilla sahapuuta saadaan yleensä hyvin niukasti. Sahapuun kertymiä voidaan kasvattaa yli kaksinkertaisiksi, mikäli sahaus- ja jatkojalostusteknologia mahdollistaa lenkojen pikku- tai lyhyttukkien sahauksen. Kääntöpuoli sahauskelpoisen puun rajallisesta kertymästä on suuri kuitu- ja/tai energiapuun kertymä. Pienpuun sahausta harjoittava sahayritys, jolla ei ole omaa käyttöä kuitupuulle, ei voi käytännössä toimia ainakaan kokonaan oman pystypuun hankinnan varassa, vaan toimituspuun saatavuus on välttämättömyys.

Harvennusmännyn sahauksen kannattavuuden marginaalit ovat pienet, mikä korostaa tarvetta tarkkaan kustannusseurantaan ja toiminnan tehokkuuden jatkuvaan seurantaan. Lopullinen kannattavuus lienee pitkälti sahakohtaista. Lyhyet tukkipituudet parantavat sahauksen kannattavuutta olennaisesti, mikäli lyhyelle sahatavaralle on todelliset markkinat. Samoin pyrkimys sahan tuotteiden loppukäytön mukaiseen apteeraukseen ja aihiomittojen mukaiseen sahaukseen parantaa kannattavuutta. Tulokset pienikokoisesta männystä saatavan sahatavaran saannosta ja laadusta olivat tässä tutkimuksessa joka tapauksessa varsin hyviä aiempiin käsityksiin verrattuna.

Männyn pikku- ja lyhyttukkien sahauksen kannattavuutta voidaan parantaa valmistuskustannuksia alentamalla tai tuloja kasvattamalla. Valmistuskustannusten alentamiseksi: 1) yksikkökustannusten alentaminen on ensisijaisen tärkeää, 2) raaka-aineen hinnan on oltava kohtuullisessa suhteessa tuotteen hintaan, 3) sahaus on automatisoitava mahdollisimman pitkälle, 4) suurtuotannon edut on otettava huomioon, 5) valmistusprosessin on oltava logistisesti ja teknisesti yksinkertainen, 6) sahan suunnittelu on tehtävä pientukkien ehdoilla. Tulojen kasvattamiseksi: 1) tukkien käyttösuhdetta on pienennettävä (tukkimittaus ja optimointi, sahausrako, mittojen valvonta, käyräsahausmahdollisuus), 2) laatu- ja arvosaantoa on kasvatettava, 3) saheista ja sivutuotteista on saatava parempi hinta, 4) tuotantolinjat on suunniteltava tuotteiden mukaan, 5) tuotantoon on otettava mukaan jatkojalostustuotteita. Pienten ja lyhyiden tukkien sahaus on sekä logistiikan että kustannusten suhteen kannattavinta omilla, erityisesti niitä varten suunnitelluilla tuotantolinjoilla. Ilmeisesti tällainen linja on mielekkäin normaalitukkien sahaukseen käytettävän linjan ohessa.

Termit ja suureet

Termi tai suure	Mittayksikkö	Selite
Aihio		Läpisahattu asiakaskohtainen puolivalmiste, josta saadaan eri käyttötarkoituksiin soveltuvia valmiita sahekomponentteja (esim. ikkunoihin, oviin, katto-, seinä- ja lattiarakenteisiin, huonekaluihin)
Alaharvennus		Harvennustapa, jossa poistettavien puiden valinta kohdennetaan harvennuksessa metsikön vallitun latvuskerroksen puustoon
Apteeraus		Rungon katkaisukohtien määrittäminen ottaen huomioon puutavaralajien mitta- ja laatuvaatimukset
Hakkuukertymä	m^3/ha	Hakkuussa talteen otetun käyttöpuun kuorellinen kokonaistilavuus
Hakkuupoistuma	m^3/ha	Hakkuun kautta metsän elävästä puustosta poistuneen puuston kuorellinen tilavuus
Hukkapuu	m^3/ha	Hakkuussa metsään tähteiksi jäävien rungon osien, esim. latvakappaleiden, tyvi- ja välileikkojen ja sovellettuja vähimmäismittavaatimuksia pienempien puiden kuorellinen tilavuus
Kasvupaikkaluokka		Kasvupaikan maaperän mukainen luokittelu kivennäis- ja turvemaihin
Kasvupaikkatyyppi		Maaperän viljavuuden ja puuntuottokyvyn perusteella määräytyvä yhtenäinen luokka; kivennäismailla metsätyyppi ja turvemailla suotyyppi
Kehitysluokka		Metsikön puuston järeyden ja puutavaralajirakenteen mukaista kehitysastetta kuvaava muuttuja. Tässä tutkimuksessa ensiharvennusmetsiköt ovat kehitysluokaltaan nuoria kasvatusmetsiköitä ja myöhemmät harvennusmetsiköt varttuneita kasvatusmetsiköitä
Kuiva oksa	mm	Oksa, joka voi olla puun sisällä kokonaan tai osittain kiinnittynyt ympäröivään puuaineeseen tai on irti siitä, eikä ole lahon vioittama. Kuivan oksan elintoiminta on lakannut kasvavassa puussa.
Kuivaoksaraja	m	Alimman kuorineen yli 1,0 cm:n läpimittaisen ulkoisen kuivan tai lahon oksan korkeus kannonkorkeudelta mitattuna
Kuiva-tuoretiheys	kg/m^3	Puuaineen kuiva massa suhteessa tuoretilavuuteen
Kuollut oksa		Elintoimintansa lopettanut oksa
Käyttöaika	h	Metsätyön aika, joka kuluu välittömästi tai välillisesti työn suorittamiseen työmaalla; sisältää tehoajan lisäksi alle 15 minuutin työn keskeytykset
Käyttötuntituottavuus	m^3/h	Työn tuotoksen suhde käyttöaikaan
Laatuharvennus		Harvennustapa, jossa poistettavien puiden valinta kohdistuu pääasiassa metsikön pienimpiin puihin, mutta myös kaiken kokoisiin heikkolaatuisiin puihin. Kasvatettaviksi valitaan metsikön laadultaan parhaat puut
Laho oksa	mm	Oksa, joka on kokonaan tai osittain lahon vioittama
Latvussuhde	%	Elävän latvuksen pituuden osuus rungon koko pituudesta
Läpisahaus keskihalkaisulla (ns. tuppeen sahaus)		Sahaustapa, jossa tukki jaetaan saheiksi samansuuntaisilla leikkauksilla, joista yksi halkaisee ytimen
Metsätyyppi		Metsikön kasvupaikan hyvyyttä puuntuotoksen kannalta kuvaava yhtenäinen luokka kivennäismailla, joka määräytyy maaperän viljavuuden ja puuntuottokyvyn perusteella
Musta oksa		Oksa, joka on tummanvärinen rungon sisällä
Nelisahaus		Sahaustapa, jossa tukki jaetaan saheiksi halkaisemalla se ensin vastakkaisilta puolilta kahdella samansuuntaisella leikkauksella pelkaksi, jossa määräytyy sydänsahatavaran leveys (pelkkasahaus), ja jakamalla pelkka tämän jälkeen yhdellä tai useammalla, pelkkasahaussuuntaan 90 asteen kulmassa olevalla samansuuntaisella leikkauksella saheiksi (jakosahaus)
NT-laatulajittelu	A (A1-A4), B, C, D	Yhteispohjoismainen sahatavaran laatulajittelusuositus Pohjoismainen sahatavara –laatulajitteluoppaan mukaan

Oksaisuus		Kuvaa rungon sisään jääneiden oksien määrää, laatua tai kokoa (ts. sisäoksa)
Oksikkuus		Kuvaa rungon vaippapinnan ulkopuolella olevia oksia (ts. ulko-oksa)
Pelkka		Kahdelta vastakkaiselta puolelta sahattu tukki
Pelkkasahaus		Sahaustapa, jossa tukki sahataan kahdelta vastakkaiselta puolelta samansuuntaisilla leikkauksilla
Puunhankinta		Toimenpiteiden ketju, jolla puuraaka-aine ostetaan, hakataan, lähikuljetetaan metsävarastoon, kaukokuljetetaan käyttöpaikalle ja mitataan
Puunkorjuu		Toimenpiteiden ketju, jolla puuraaka-aine hakataan ja lähikuljetetaan metsävarastoon
Puutavaralajin ajouranvarsitiheys	m^3/100 m ajouraa	Lähikuljetettavan puutavaralajin keskimääräinen kuorellinen tilavuus ajouran varrella 100 m:n matkalla
Rinnankorkeusläpimitta	cm	Puun kuorellinen läpimitta 1,3 metrin korkeudella ylimmästä kaatoa haittaavasta juurenniskasta. Mittaussuunta kohti koealan keskipistettä
Rinnankorkeusläpimittaluokka	cm	Puun rinnankorkeusläpimitan perusteella määräytyvä luokka 2 cm:n parittomin tasaavin luokin
Rungon käyttöosan tilavuus	dm^3	Yksittäisen rungon kaikkien puutavaralajien kuorellisten tilavuuksien summa. Ei sisällä hukkapuuta
Rungon tilavuus	dm^3	Puun rungon kaatoleikkauksen yläpuolinen kuorellinen tilavuus
Sahapuun osuus, sahapuuprosentti	%	Sahattavien puutavaralajien osuus rungon käyttöosan kuorellisesta tilavuudesta
Sahauksen arvosaanto	€/sahatavara-m^3 €/tukki-m^3	Sahattujen tuotteiden arvo vähennettynä kaikilla tuotantokustannuksilla suhteessa sahatavaran tilavuuteen tai tukin kuorelliseen tai kuorettomaan tilavuuteen
Sahauksen käyttösuhde	t-m^3/s-m^3	Sahauksessa tarvittavien tukkien kuorellinen tai kuoreton tilavuus suhteessa tuotettuun sahatavaran tilavuuteen
Sahauksen saanto, sahauksen tilavuussaanto	%	Sahauksessa tuotetun sahatavaran tilavuus suhteessa käytettyjen tukkien kuorelliseen tai kuorettomaan tilavuuteen
Sisäinen oksa, sisäoksa (kts. oksaisuus)	mm	Rungon kuorettoman vaippapinnan sisäpuolella olevan oksan osa (tuore, kuiva, musta tai laho)
Suotyyppi		Metsikön kasvupaikan hyvyyttä puuntuotoksen kannalta kuvaava yhtenäinen luokka turvemailla, joka määräytyy maaperän viljavuuden ja puuntuottokyvyn perusteella
Tehoaika	h	Metsätyön aika, joka kuluu suoranaisesti työn suorittamiseen työmaalla; ei sisällä työn keskeytyksiä
Tehotuntituottavuus	m^3/h	Työn tuotoksen suhde tehoaikaan
Terveoksainen sahatavara		Sahatavaran erikoislaatuluokka, jossa terveiden oksien määrää ja kokoa ei ole rajoitettu
Tiheys	kg/m^3	Kappaleen tai materiaalin massa tilavuusyksikköä kohti
Tuore oksa (terve oksa, elävä oksa)	mm	Oksa, jonka varsinaisen pinnan piiristä vähintään ¾ on kasvanut rungon sisällä kiinni ympäröivään puuaineeseen, eikä ole lahon vioittama
Tuoreoksaraja (latvusraja)	m	Yhtäjaksoisen elävän oksiston alkamiskorkeus, elävän latvuksen alaraja
Tuotantoaika	h	Metsätyön aika, joka kuluu työtehtävän suorittamiseen yksittäisellä työmaalla; sisältää tehoajan lisäksi alle 15 minuutin työn keskeytykset
Tuotos	m^3	Metsätyössä tai sen määritellyssä vaiheessa tuotetun puutavaran tilavuus
Tuottavuus	m^3/h	Metsätyössä tai sen määritellyssä vaiheessa tuotetun puutavaran tilavuus eli tuotos suhteessa sen aikaansaamiseksi käytettyjen ajallisten panosten määriin
Ulkoinen oksa, ulko-oksa (kts. oksikkuus)	mm	Rungon vaippapinnan ulkopuolinen oksa (kuiva, tuore, laho)

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO 13

2 HARVENNUSMÄNNIKÖT 15

2.1 HARVENNUSMÄNNIKÖT SAHATEOLLISUUDEN RAAKA-AINERESURSSINA 15
2.2 HARVENNUSPUUN LAATU JA SIIHEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT 17
2.2.1 Rungon ulkoiset oksat 17
2.2.2 Rungon sisäiset oksat 18
2.2.3 Nuorpuu 20
2.2.4 Kuiva-tuoretiheys 22
2.2.5 Kasvupaikan ravinteikkuuden, metsikön syntytavan ja kasvatustiheyden merkitys 23
2.3 HARVENNUSMÄNTY SAHAUKSESSA 25

3 TUTKIMUSTEN TAVOITTEET 30

4 TUTKIMUSTEN AINEISTOT JA MENETELMÄT 31

4.1 HARVENNUSMÄNNYN SAHAPUUKERTYMÄTUTKIMUS 31
4.1.1 Metsiköiden jakaumat ja otanta 31
4.1.2 Koealat ja niiden sijoittelu inventoitavaan metsikköön 32
4.1.3 Metsiköiden harvennuksen ja koepuiden apteerauksen simulointi 33
4.2 HARVENNUSMÄNNYN HANKINTATUTKIMUS 34
4.2.1 Sisältö ja menetelmät 34
4.2.2 Koeleimikoiden puustotiedot 37
4.2.2.1 Leimikoiden yleispiirteitä 37
4.2.2.2 Hakkuun puutavaralajijakaumat 39
4.2.2.3 Viimeisen pölkyn latvaläpimitta sekä rungon käyttöosan pituus ja tilavuus 40
4.3 HARVENNUSMÄNNYN SAHAUSTUTKIMUKSET 41
4.3.1 Kaatokoepuiden tukkien ja rungon konstruointi saheviipaleista 41
4.3.2 Sahatavaran tai aihion arvosaannon määrittäminen 42

5 TULOKSET 44

5.1 HARVENNUSMÄNNYN PUUTAVARALAJIKERTYMÄT JA -JAKAUMAT 44
5.1.1 Metsiköiden puustotunnukset 44
5.1.2 Apteeraus lyhyillä tukkipituuksilla ja pienillä läpimitoilla 45
5.1.2.1 Koko puuston puutavaralajirakenne 45
5.1.2.2 Hakkuukertymän puutavaralajirakenne 47
5.1.3 Apteeraus yleisillä puutavaralajeilla 49
5.1.4 Pikku- ja lyhyttukin hakkuun vaikutus sahapuun kertymään ja arvoon 50
5.1.4.1 Yhden tai useamman pituusvaihtoehdon lisäys 50
5.1.4.2 Yhden pituusvaihtoehdon lisäys 52
5.1.4.3 Puutavaralajien lisäyksen vaikutus rungon arvoon 53

5.1.5 Runkojen tekniset viat mäntykoepuissa 54
5.1.5.1 Vikojen esiintyminen 54
5.1.5.2 Vikojen vaikutus sahapuun kertymään 55
5.1.6 Kokonaispuuston ja hakkuukertymän sahapuun määrän ennustettavuus puustotunnuksista 57
5.1.6.1 Sahapuun määrän ja puustotunnusten riippuvuussuhteet koko puustossa 57
5.1.6.2 Regressiomallit sahapuun määrälle koko puustossa 58
5.1.6.3 Regressiomallit yksittäisten sahattavien puutavaralajien määrille koko puustossa 60
5.1.6.4 Harvennuskertymän sahapuun määrään vaikuttavat tekijät ja sahapuukertymän ennustettavuus 61
5.1.7 Metsikkö- ja puustovaatimukset kannattavalle sahapuun hankinnalle 63
5.2 HARVENNUSMÄNNYN HANKINNAN TUOTTAVUUS JA KUSTANNUKSET 64
5.2.1 Hakkuun tuottavuus 64
5.2.1.1 Ajanmenekki 64
5.2.1.2 Käyttötuntituottavuus perusaineistossa 65
5.2.1.3 Käyttötuntituottavuus tasoitetuilla puustotiedoilla 68
5.2.2 Metsäkuljetuksen ajanmenekki ja käyttötuntituottavuus 69
5.2.3 Korjuukustannukset 71
5.2.3.1 Hakkuu 71
5.2.3.1.1 Perusaineisto 71
5.2.3.1.2 Tasoitetut puustotiedot 73
5.2.3.2 Metsäkuljetus 73
5.2.4 Autokuljetuksen tuottavuus ja kustannukset 74
5.2.5 Harvennusmännyn tehdashinta 76
5.3 HARVENNUSMÄNNYN SAHAUS JA TUOTOT 77
5.3.1 Laskelmien lähtökohta 77
5.3.2 Simulointitulokset Metlan apteeraussimulaattorin tuottamien tukkien perusteella 77
5.3.2.1 Simulointi tukin pituuden mukaisiin sahatavaran pituuksiin 77
5.3.2.2 Simulointi sahatavaran moduulipituuksiin 80
5.3.2.3 Tuottojen ja kustannusten peruslaskelmat 83
5.3.2.4 Sahauskustannusten, tukin tehdashinnan ja tuotteiden keskihinnan muutosten vaikutukset sahaustulokseen 84
5.3.2.5 Sahauksen suhteellinen arvosaanto eri apteerausvaihtoehdoilla 85
5.3.2.6 Tukin tehdashinnan jäännösarvon peruslaskelmat 87
5.3.2.7 Sahauskustannusten ja tuotteiden hinnan muutosten vaikutukset tukin tehdashinnan jäännösarvoon 88
5.3.2.8 Rungon ulkoisen oksikkuuden vaikutus sahauksen arvosaantoon 90
5.3.3 Simulointitulokset runkopankkiaineistosta apteerattujen tukkien perusteella – lyhyttukkitekniikka 92

5.3.3.1 Sahatavaran laatuluokkajakauma 92
5.3.3.2 Sahatavaran saanto ja arvosaanto 94
5.3.3.3 Sahauksen tulos tuotteiden, tukin hintojen ja sahauskustannusten perusarvoilla sekä herkkyystarkastelu 95
5.3.3.4 Tukin tehdashinnan jäännösarvo tuotteiden hintojen ja sahauskustannusten perusteella sekä herkkyystarkastelu 97
5.3.3.5 Rungon ulkoisen oksikkuuden ja tukin pituuden vaikutukset sahauksen arvosaantoon 98

6 TULOSTEN TARKASTELU JA PÄÄTELMÄT 101

6.1 TULOSTEN YLEISTETTÄVYYS JA LUOTETTAVUUS 101
6.1.1 Metsikkö- ja koepuuaineistojen edustavuus 101
6.1.2 Pysty- ja kaatokoepuumittausten ja arviointien tarkkuus 102
6.1.3 Hankintatutkimuksen aineistot ja mittausmenetelmät 103
6.1.4 Apteerauksen simulointien ja hakkuukertymälaskelmien luotettavuus 103
6.1.5 Sahauksen simulointien ja kannattavuuslaskelmien luotettavuus 104
6.2 TULOSTEN ARVIOINTI JA PÄÄTELMÄT 105
6.2.1 Harvennusmänniköiden tekninen laatu ja sahapuun saatavuus 105
6.2.2 Lyhyttukkitekniikka harvennusmännyn hankinnassa 111
6.2.3 Harvennusmännyn sahauksen kannattavuus 115
6.2.4 Harvennusmänty osana puutuoteteollisuuden raaka-aine- ja tuotepohjaa 119

KIRJALLISUUS

LIITTEET

1 JOHDANTO

Metsäntutkimuslaitoksen (Metla) Joensuun toimintayksikön ja Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan yhteishankkeena v. 1999 toteutetussa esiselvityksessä "Pienpuualan tutkimus- ja tuotekehitysverkosto" todettiin sahayritysten laaja mielenkiinto harvennuspuun käytön lisäämiseen (Boren 2000). Pienpuun sahaus ei ollut kuitenkaan yleensä kannattavaa nykyisellä sahauskalustolla ja -tekniikalla, vaan pikkutukkia sahattiin pääasiassa normaalitukin vajauksen täyttämiseksi samalla varautuen ennakolta tulevaisuuden järeän tukin pulaan. Mielenkiintoiseksi ja varteenotettavaksi ratkaisukeinoksi ilmeni monissa yrityksissä pieniläpimittaisen tukin sahaus lyhyitä tukkipituuksia käyttäen. Tämän toimintatavan arveltiin useimmissa tapauksissa olevan mielekästä sahojen erityisillä pienpuulinjoilla toteutettuna.

Normaalitukkia pienemmän havupuun sahaus ja sen ohella sorvaus parruiksi on aloitettu Suomessa jo 1970-luvulla. Aluksi käytetyt puutavaramäärät olivat muutamia kymmeniä tuhansia kuutiometrejä vuodessa. Pienpuun käytön kasvu alkoi 1990-luvun alun lamavuosien jälkeen, mutta varsinainen kasvun lisäys tapahtui vasta vuosikymmenen lopulla. Yleisesti sahataankin jo pieniläpimittaista, 12 - 15 cm:n havupuuta; eräillä sahoilla on menty jopa 8 cm:n minimilatvaläpimittaan. Valtaosa puutuoteteollisuuden pienpuusta on ollut päätehakkuiden ja osaksi myöhempien harvennusten latvapikkutukkia ja järeiden kuitupuurunkojen puutavaraa. Harvennuksilta peräisin olevan puutavaran käyttö puutuoteteollisuuden raaka-aineena on kasvanut varsinaisesti vasta aivan viime vuosina.

Sahojen varsinainen motiivi harvennuspuun käyttöön on huoli tulevaisuuden raaka-aineensa saatavuudesta. Sahat tarvitsevat tietoa siitä, voidaanko uhkaava normaalitukin tarjonnan pieneneminen jatkossa korvata ja missä määrin erityisesti harvennusmänniköistä saatavissa olevalla raaka-aineella sahauskapasiteetin säilyttämiseksi ja miten harvennusmänniköitä voidaan hyödyntää tehokkaasti ja kannattavasti sahaukseen sekä siihen liittyvään jatkojalostukseen. Sopivat jatkojalostuskohteet ovat myös monelta osin epäselvät. Eri sahayritykset ovat myös hyvin erilaisella kehitysasteella harvennuspuun hankinnassa, sahauksessa ja jatkojalostuksessa.

Kotimaisella jatkojalostusteollisuudella on ollut ajoittain vaikeuksia sopivan sahatavaran riittävässä saannissa. Jos sahatavaran jatkojalostus lisääntyy lähellekään esitettyjen kaavailujen mukaisesti, mahdollisuudet pienpuusta saatavien sahatuotteiden toimituksiin tälle sektorille lienevät varsin hyvät. Useilla sahoilla on tehty tutkimusluonteisia koesahauksia käytettävissä olevalla sahauskalustolla ja markkinaselvityksiä tuotteiden asemoinnista ja sijoittamisesta eri tuoteryhmiin ja markkina-alueille. Useat yritykset ovatkin kehittäneet erilaisia tuotteita puusepän- ja rakennuspuusepänteollisuuteen, joissa hyödynnetään pieniläpimittaista ja lyhyttä puutavaraa.

Tulevaisuudessa harvennuspuun ja muun pienpuun käyttöä on lisättävä teollisuudessa mm. lisääntyneistä metsien käyttörajoituksista, kehitysluokkarakenteen muutoksista ja mahdollisesti myös kattavaan puunmyyntituloverotukseen siirtymisestä todennäköisesti seuraavan järeän päätehakkuupuun tarjonnan vähenemisen vuoksi. Järeän tukin hakkuumahdollisuuksien väheneminen koskee Metlan MELA-

laskelmien mukaan lähinnä kautta 2006 - 2025 (Metla Metinfo 2005a, 14.3.2005). Metsäverotuksen muutosvaiheen vaikutuksista on esitetty toisistaan poikkeavia käsityksiä julkisessa keskustelussa. Nuutisen ym. (2005) mukaan metsäverotuksen siirtymäkaudella vuosina 1993-2005 hakkuut ovat painottuneet pinta-alaverotettuihin metsiin, mikä on kasvattanut myyntiverotuksen jo siirtymäkaudella valinneiden metsänomistajien puustoja. Pinta-alaverotuksessa olleiden metsien hakkuiden väheneminen siirtymäkauden jälkeen on korvattavissa lisäämällä muiden yksityismetsänomistajaryhmien hakkuita. Mahdollisen tarjonnan vähenemisen oletetaan joka tapauksessa olevan tilapäistä ja ajoittuvan muutamiin vuosiin alkaen vuodesta 2006. Jotta järeän tukin saatavuuden todennäköiseen heikkenemiseen voidaan varautua, harvennusmetsien ja pienpuun ominaisuuksia sekä mahdollisia puunjalostusmenetelmiä on joka tapauksessa syytä tutkia markkina- ja tuotelähtöisten käyttömahdollisuuksien selvittämiseksi puutuoteteollisuudessa.

Pienpuun käytön lisääminen puutuoteteollisuuden raaka-aineena ei kuitenkaan ole ongelmatonta. Yleinen tietoisuus pienpuun ongelmallisuudesta ja toisaalta tiedon puute ongelmien ratkaisukeinoista johtavat käytön vastustukseen toiminnan kaikilla tasoilla. Edelleen on todettava, että pienpuun käyttö sahatavaraan tai jatkojalosteisiin ei ole ollut läheskään aina tietoisesti tuote- tai markkinalähtöistä.

2 HARVENNUSMÄNNIKÖT

2.1 HARVENNUSMÄNNIKÖT SAHATEOLLISUUDEN RAAKA-AINERESURSSINA

Suomen metsiä on harvennettu liian vähän ottaen huomioon niiden kestävä puuntuotantokyky ja terveys sekä tulevaisuuden hakkuukertymätavoitteet, erityisesti 1980-luvulta lähtien. Erityisesti ensiharvennusrästien määrä kasvaa jatkuvasti verrattuna metsänhoidollisten suositusten mukaisiin tavoitteisiin. Kansallinen Metsäohjelma 2010:n ensiharvennustavoite on 250 000 ha/v, mutta vuotuinen toteutuma on ollut 1990-luvulla vain noin 100 000 ha (Kansallinen metsäohjelma 1999). Ensiharvennusten määrä on kylläkin lisääntynyt lupaavasti 2000-luvulla (esim. 183 000 ha v. 2004), mutta tavoite on edelleen jäänyt täyttymättä. Syinä liian vähäisiin harvennuksiin ovat olleet muun muassa päätehakkuu- ja tuontipuun riittävän hyvä saatavuus, harvennushakkuiden korkeat korjuukustannukset sekä harvennuspuuraaka-aineen huonompi laatu verrattuna päätehakkuista saatavaan puuraaka-aineeseen. Ensiharvennuspuun huonommasta laadusta johtuen tuotteiden saanto, laatu ja arvo sekä sahauksen ja jatkojalostuksen kannattavuus ovat myös alhaisemmat kuin järeämmällä päätehakkuupuulla. Ensiharvennustarvetta ovat lisänneet 1950-luvulla alkanut voimakas metsien uudistaminen ja soiden ojittaminen (Ensiharvennustyöryhmän muistio 1988).

Männylle on valoa vaativana puulajina tyypillistä metsiköiden tasaikäisyys. Nuoruusvaiheessa olevat taimikot perataan ja harvennetaan ennen varsinaisia markkinapuuta tuottavia harvennushakkuita. Ensimmäistä kaupallista harvennusta on pidetty vain kuitu- ja energiapuun lähteenä ja vasta myöhemmistä harvennuksista oletetaan saatavan tukkipuuta. Männyn ensiharvennus tehdään tavallisesti 25 - 45 vuoden iällä. Myöhästyneen ensiharvennuksen seurauksia ovat elävän latvuksen typistyminen, puuston solakoituminen ja riukuuntuminen sekä edelleen altistuminen lumituhoille (Hakkila ym. 1995, Hynynen 1998).

Vaikka ensiharvennusten laiminlyöminen pienentää tulevaisuudessa tukkipuun kertymää ja puuston keskikokoa sekä teknistä laatua, harvennuspinta-alat ovat olleet jatkuvasti tavoitteita pienemmät (Kansallinen metsäohjelma 1999). Metsänomistajalle ensiharvennus on ennen kaikkea metsänhoidollinen toimenpide eikä niinkään tulonlähde. Ensiharvennuksen tuotot ovat pienet, eivätkä ne välttämättä vastaa puunhankintakustannuksia. Ensiharvennuksen metsänhoidollinen merkitys on kuitenkin niin suuri, että metsänomistajan kannalta harvennusta ei kannata jättää tekemättä; jatkossa saatavia lisääntyviä tuottoja ajatellen ensiharvennus on välttämätön (esim. Vuokila 1981). Pitkällä aikavälillä metsien harventamatta jättäminen tulee aina kalliimmaksi kuin niiden harventaminen (Hynynen 1998).

Oikein toteutettuna ensiharvennus on kuitenkin myös tulonlähde metsänomistajalle. Ensiharvennusten vaikutus taloudellisesti kannattavasti korjattavan käyttöpuun määrään, järeän puun tuotokseen, metsikön puulajisuhteisiin ja myöhempien harvennusten toteuttamismahdollisuuksiin on suuri. Harventamattoman eteläsuomalaisen VT-männikön kiertoajan nettotuotto oli esim. Hynysen (1998) tutkimuksessa vain 26 % harvennetun metsikön tuotosta, kun tulojen ja kustannusten diskonttauksessa käytettiin 3 prosentin korkokantaa. Koneellisen puunkorjuun myötä ensiharvennusten toteutumisajankohdat ovat hakkuukertymän kasvattamiseksi ja

korjuukustannusten alentamiseksi siirtyneet totuttua myöhäisemmiksi. Taloudellisesti järkevän koneellisen puunkorjuun edellytyksinä ovat riittävän suuri hakkuukertymä ja poistettavien runkojen tilavuus. Tämän suuntainen kehitys vaatii varttuneiden taimikoiden voimakasta perkausta ja leimikoiden ennakkoraivausta ennen hakkuuta (esim. Hakkila ym. 1995).

Harvennushakkuut kohdennetaan kasvukyvyltään ja laadultaan metsikön huonoimpaan puuston osaan (esim. Vuokila 1981). Pääsääntöisesti harvennukset tehdään alaharvennuksina, jolloin poistetaan kilpailussa muuta puustoa huonompaan asemaan jääneitä puuyksilöitä, mutta usein myös laatuharvennuksena, jolloin poistetaan myös järeitä ja huonolaatuisia ns. susipuita. Harvennusten tavoitteina ovat puuston elinvoimaisuuden säilyttäminen, puulajisuhteiden sääteleminen, puuston järeyskehityksen turvaaminen ja teknisen laadun parantaminen. Harvennushakkuut ovat myös latvusten hoitoa, niiden mittasuhteiden säilyttämistä ja puiden yhteyttämiskyvyn ylläpitämistä. Metsikön määrällistä kokonaistuotosta harvennushakkuut eivät yleensä lisää, mutta ne ovat välttämättömiä laadukkaan, terveen ja käyttökelpoisen puuraaka-aineen tuottamiseksi. On huomattava, että harvennushakkuut ja harvennuspuun hyödyntäminen eivät maailmalla ole itsestäänselvyyksiä; tämän kaltainen metsänkäsittely on tyypillistä lähinnä Pohjoismaissa (Hakkila ym. 1995).

Harvennustavalla voidaan vaikuttaa paitsi harvennuksessa saatavaan hakkuukertymään, myös metsikön tulevaan tilavuuskasvuun ja laatukehitykseen (Niemistö 1994, Lilleberg 1995. Laatuharvennuksessa poistetaan kaikenkokoisia puita. Leimauksen painopiste on metsikön pienimmissä puissa, mutta harvennuksessa poistetaan myös suurempia heikkolaatuisia puuyksilöitä. Systemaattiseen alaharvennukseen nähden laatuharvennuksesta saatava hakkuukertymä on yleensä suurempi ja korjuukustannukset alemmat. Jäävä puusto on alaharvennuksen jälkeen tavallisesti järeämpää kuin laatuharvennuksen jälkeen. Laatuharvennuksista saatava tukkipuun kertymä on suurempi kuin alaharvennuksista, joskin ensiharvennuksista saatava tukkipuu on joka tapauksessa pientä ja usein heikkolaatuista.

Harvennuksissa pitäisi varmistaa, että metsikön puuntuotanto ei heikkene pitkällä aikavälillä (Vuokila 1981). Harvennusten tärkein tavoite on jäljelle jäävän puuston järeyskehityksen turvaaminen. Tosin liian voimakkaalla harvennuksella voidaan paitsi aiheuttaa tarpeettoman suuria kasvutappioita, myös vaikuttaa kielteisesti puuston tekniseen laatuun ja altistaa puusto luonnontuhoille, esimerkiksi myrskytuhoille (Vuokila 1981, Lilleberg 1995).

Harvennustavan yhtenä osatekijänä on myös ajoura, jonka myötä poistuu varsin suuri osa tulevaisuuden hyvälaatuisesta tukkipuustosta (Stöd ym. 2003). Ajouran avaaminen pienentää erityisesti ensiharvennuksessa tukkiaihiollisten puiden lukumäärää verrattuna tilanteeseen, jossa puustoa voitaisiin poistaa tasaisesti koko leimikon pinta-alalta. Ojitetuilla turvemailla ajouran sijoittamisella suhteessa ojastoon on suuri vaikutus jäävän puuston laatuun. Ojan penkalle sijoitettavan ajouran vuoksi poistetaan metsikön laadullisesti huonoimpia mutta suurikokoisimpia puita, joiden kasvua ojitus on parantanut eniten. Ajouran sijoittaminen ojitussaran keskelle vaikuttaa päinvastaisesti. Vaihtoehtoisesti ajourat voidaan tehdä myös kohtisuoraan ojastoa vastaan, jolloin puita voidaan poistaa tasaisimmin sekä koon että laadun kannalta. Siten turvemailla ajouralla ja erityisesti sen sijoittamisella suhteessa ojas-

toon on merkittävä vaikutus jäävän puuston teknisen laadun potentiaaliin tulevissa päätehakkuissa (Stöd ym. 2003).

2.2 HARVENNUSPUUN LAATU JA SIIHEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

2.2.1 Rungon ulkoiset oksat

Männyllä oksat syntyvät latvasilmun ympäriltä sivusilmuista, jolloin kaikki rungon pinnalla näkyvät oksat ulottuvat rungon ytimeen saakka. Harvennusten yhteydessä oksien valonsaanti paranee, minkä vuoksi vakioetäisyydellä ytimestä oksat ovat rungon tyviosassa ohuempia kuin latvaosassa. Puun paksuimmat oksat sijaitsevatkin elävän latvuksen alaosissa, jonka jälkeen oksien läpimitta pienenee tyveä ja latvaa kohti. Nuorissa männyissä on puuston tiheydestä riippumatta keskimäärin 10 - 15 elävien oksien kiehkuraa, mutta puuston tihentymisen on havaittu vähentävän oksien lukumäärää ja pienentävän paksuimman oksan läpimittaa ylimmissä oksakiehkuroissa (Uusitalo 1994). Kussakin oksakiehkurassa on keskimäärin neljästä viiteen oksaa, joskin lukumäärän on todettu vaihtelevan satunnaisesti oksakiehkurasta toiseen ilmeisesti vuotuisten säävaihteluiden takia (esim. Kellomäki ym. 1992, Mäkelä ym. 2000).

Männyn ylimmissä oksakiehkuroissa oksakulma on keskimäärin 40° - 50° riippumatta puiden tai metsiköiden ominaisuuksista, mutta oksakulma suurenee nopeasti siirryttäessä latvasta tyveä kohti. Oksakulman suureneminen hidastuu elävän latvuksen alaosissa ja latvuksen alapuolella siten, että alimmissa oksakiehkuroissa oksakulma on 80° - 90°. Lähinnä vain puun koko vaikuttaa oksakulman suuruuteen siten, että suurten puiden oksakulmat ovat terävämpiä kuin pienten (esim. Uusvaara 1991, Kellomäki ym. 1992, Mäkelä ym. 2000).

Männyn oksien kuoleminen johtuu pääasiassa riittämättömästä valon määrästä. Kuolleet oksat kuitenkin karsiutuvat melko pitkällä viiveellä mekaanisten syiden, kuten lumen ja tuulen, tai biologisten syiden takia, mutta Mäkelä ym. (2000) ovat havainneet, että oksien kuoleminen on nopeaa runkomuodoltaan solakoilla puilla. Samoin kiehkuran paksuimpien oksien todennäköisyys säilyä pidempään elävänä oli suurempi kuin ohuempien oksien, etenkin latvuksen yläosissa. Uusvaara (1981b) toteaa paksujen ja pitkään rungossa kiinni olevien kuolleiden oksien ilmeisen todennäköisyyden altistua lahovioille. Kuolleiden oksien karsiutuminen alkaa noin kymmenennestä oksakiehkurasta latvusrajan alapuolelta. Karsiutuminen on nopeinta suurilla ja pitkälatvuksisilla puilla. Vaikka oksien karsiutuminen alimmista kiehkuroista on suhteellisen nopeaa myös nuorilla puilla, oksattoman rungonosan pituus lisääntyy merkittävästi vasta yli 60-vuotiailla puilla (Uusvaara 1981b). Oksien karsiutuminen ja oksakulma ovat voimakkaasti periytyviä ominaisuuksia, sen sijaan oksien paksuus, pituus ja lukumäärä periytyvät heikommin (Mäkelä ym. 2000).

Oksien läpimitta suurenee nopeasti siirryttäessä latvan yläosista kohti puun tyveä. Oksan iän lisäksi sen läpimitta on selvimmin yhteydessä rungon läpimittaan (esim. Mäkelä ym. 2000). Oksien läpimitta kasvaa myös latvuksen suhteellisen pituuden kasvaessa ja oksakulman pienentyessä. Mäntyrungoissa paksuimmat oksat

sijaitsevat tavallisesti hieman rungon puolivälin yläpuolella. Uusvaaran (1981b) mukaan viljelymänniköissä rungon paksuin oksa oli yli 50-vuotiailla puilla 60 prosentin, mutta alle 30-vuotiailla puilla 40 prosentin suhteellisella korkeudella. Rungon paksuin oksa sijaitsee sitä korkeammalla, mitä vanhempi puu on, kunnes noin 60 vuoden iässä oksien paksuuskasvu taantuu. Luontaisesti syntyneiden mäntyjen oksat ovat ainakin rungon alaosissa ohuempia viljelymäntyjen oksiin verrattuna. Rungon yläosissa metsikön perustamistavan vaikutus oksien läpimittaan osittain häviää (Uusvaara 1981b).

Oksat ovat yleensä paksumpia rungon eteläpuolella kuin pohjoispuolella (Kellomäki ym. 1992). Järeydeltään samankokoisissa puissa oksat ovat sitä paksumpia, mitä voimakkaampaa rungon kapeneminen on. Luonnollisesti sekä elävien että kuolleiden oksien alarajat ovat sitä korkeammalla rungossa, mitä suurempi on rungon läpimitta (Hakkila ym. 1972).

Mäkelän ym. (2000) mukaan männyn oksien sädekasvu riippuu ensisijaisesti puun kokonaiskasvusta (rungon sädekasvu) ja oksan iästä. Oksien sädekasvu päättyy keskimäärin 22 vuoden kuluttua oksan syntymästä. Oksan kasvun päättymisestä sen kuolemaan kulunut aika vaihtelee välillä 2 - 17 vuotta ilman selvää yhteyttä puuta tai metsikköä kuvaaviin tunnuksiin. Keskimäärin oksat elävät seitsemän vuotta oksan sädekasvun päättymisen jälkeen. Oksan kuolemasta sen kylestymiseen kuluva aika on keskimäärin 42 vuotta. Paksujen oksien on havaittu kylestyvän ohuita hitaammin, mutta toisaalta paksujen puiden oksat kylestyvät nopeasti.

2.2.2 Rungon sisäiset oksat

Puun oksat jäävät rungon läpimitan kasvaessa sen sisälle. Tällaisten sisäoksien merkitys on sinänsä vähäinen pelkästään niiden tilavuuden ja tilavuusosuuden perustella arvioituna, mutta oksapuun korkean tiheyden vuoksi huomattavasti suurempi massan ja massaosuuden perustella arvioituna (esim. Lehtonen 1978. Hakkila ym. 2002, ks. myös Kärkkäinen 2003).

Sisäoksien tilavuusosuus on tukkipuurungon alaosissa huomattavasti pienempi kuin latvaosissa, suurimmillaan se on 80 - 90 prosentin suhteellisella rungon korkeudella (Lehtonen 1978, ks. myös Kärkkäinen 2003). Hakkilan ym. (2002) Etelä-Suomessa tekemässä tutkimuksessa oksapuun tilavuusosuus kasvoi mäntyrungoissa lähes suoraviivaisesti kannonkorkeuden 0,05 prosentista 20 prosentin suhteellisen korkeuden 0,4 prosenttiin ja rungon tukkipuuosuuden ylärajana pidetyn 40 prosentin suhteellisen korkeuden 0,8 prosenttiin. Yli 40 prosentin suhteellisella korkeudella oksapuun osuus kasvoi edelleen tasolle 2 %. Puutavaralajeittain tarkastellen harvennus- ja päätehakkuumännyn ero ei ole kuitenkaan yhtä selvä, koska tukki- ja kuitupuupölkkyjen sijainti rungon korkeussuunnassa on erilainen. Hakkilan ym. (2002) tutkimuksessa mäntykuitupuun oksien tilavuusosuus oli ensiharvennusmänniköissä 1,5 %, toisen harvennuksen männiköissä 1,0 % ja päätehakkuumänniköissä 1,6 %.

Edellä esitetystä seuraa, että oksaisimmat rungonosat jäävät yleensä perinteisen tukkipuuosuuden ulkopuolelle, mutta latvapikkutukki- ja kuitupuuosassa on keskimääräistä runsaammin sisäoksia. Samoja puita tarkasteltaessa oksien suhteellinen

osuus koko rungon tilavuudesta alenee rungon tilavuuden kasvaessa. Sisäoksaisuus myös vähenee iän kasvaessa ja metsikön tiheyden kasvaessa.

Runkoja kokonaisuutena tarkastellen sisäoksien osuus on harvennusmännyllä edellä esitetyistä seikoista johtuen korkeampi kuin järeillä, vanhoilla männyillä. Tilavuusosuus on järeillä havutukkipuilla tyypillisesti alle yhden prosentin (Kärkkäinen 2003). Salon (2002) kymmeneen eteläsuomalaiseen ensiharvennusmännikköön perustuneessa tutkimuksessa sisäoksien tilavuusosuus oli keskimäärin 1,6 %. Lehtosen (1978) pienessä aineistossa sisäoksien tilavuusosuus oli kuivahkon kankaan harvennusmännyllä keskimäärin 2,0 % ja runkojen vaihteluväli 0,8 - 4,3 %.

Puun oksien karsiutuessa alhaalta ylöspäin muodostuu monilla puulajeilla rungon sisälle ytimestä pintaan päin kolme oksaisuuslaadultaan erilaista vyöhykettä (Kärkkäinen 1986). Sisinnä ytimen ympärillä on tuoreita oksia sisältävä vyöhyke, sen jälkeen kuolleita oksia sisältävä kerros ja uloimpana oksattoman puuaineen vyöhyke. Tuoreoksaisen vyöhykkeen osuus puun poikkileikkauksessa kasvaa ylöspäin, kuollutoksaisen vyöhykkeen osuus on suurimmillaan rungon puolivälissä ja oksaton osa keskittyy rungon tyviosaan pienentyen lähestyttäessä latvusrajaa. Oksien karsiutumisen vuoksi rungon pintaosissa on myös vähemmän oksapuuta kuin sisäosissa (esim. Lehtonen 1978, Hakkila ym. 2002).

Oksan kuoleminen aiheuttaa muutoksen puun sisäisessä oksaisuudessa. Elävät oksat ovat täysin kiinni ympäröivässä puuaineessa, kun taas kuolleet oksat ovat muusta puuaineesta fysiologisesti täysin irrallaan. Eläviä oksia sanotaan usein terveiksi oksiksi ja kuolleita oksia kuiviksi oksiksi. Jokaisen kuolleen oksan rungon ytimen puoleinen osa on luonteeltaan elävä oksa eli se on kiinni ympäröivässä puuaineessa, vaikka siinä ei olisi eläviä soluja tai sen elintoiminnot ovat lakanneet. (Kärkkäinen 2003)

Jouhiaho ja Uusitalo (2001) totesivat ensiharvennusmännyn soveltuvan hyvin oksaisuuslaadultaan huonekaluteollisuuden raaka-aineeksi. Se on sisäoksien laadun perusteella lähes järeän mäntytukkirungon latvaosista saatavan pieniläpimittaisen puun veroista. Tuoreita oksia oli ensiharvennusrungoissa keskimäärin selvästi vähemmän, mutta kuivia oksia jonkin verran enemmän kuin päätehakkuurunkojen latvaosissa. Ensiharvennusmetsiköiden välillä ei ollut mainittavia eroja tarkasteltaessa yli 8 mm:n oksien lukumäärää, mutta turvemailla esiintyi selvästi muita metsikkötyyppejä enemmän tätä pienempiä kuivia oksia. Tuoreiden oksien koko kasvoi hieman kasvupaikan viljavuuden kohotessa. Päätehakkuurungoissa terveet oksat olivat jonkin verran isompia ja vastaavasti kuivat oksat jonkin verran pienempiä kuin ensiharvennusrungoissa.

Harvennusmännystä saadun sahatavaran oksaisuuslaatu on vaihdellut käytännössä suuresti, mutta paras laatu on yleensä saatu hyväkasvuisista männiköistä. Borenin (2001), Stödin (2000, 2002a, 2002b) ja Stödin ym. (2003) tulokset antoivat myös viitteitä siitä, että rungon sisäinen terveoksaisuus olisi suurinta hyväkasvuisilla harvennusmännyillä. Toisaalta useissa tutkimuksissa on todettu ohuiden vuosilustojen ytimen ympärillä indikoivan hyvää sahatavaran oksaisuuslaatua päätehakkuuikäisissä männyissä; tällöin oksat ovat pieniä ja niitä on todennäköisesti myös vähän (Kärkkäinen 2003).

Koska sisäoksien esiintymistä pidetään puutuoteteollisuudessa pääsääntöisesti vikana, voidaan rungon tyviosista poistaa ulko-oksia pystykarsinnalla ja näin kei-

nollisesti muodostaa täysin oksattoman puuaineen vyöhyke tyvitukin pituiselle alueelle. Ainakin männyllä varhaisessa kehitysvaiheessa tehty pystykarsinta parantaa olennaisesti sahatavaran laatua ja arvoa tyvitukin osalta. Pystykarsitun oksan kylestyminen tapahtuu tangentin suunnassa ympäröivän jällen muodostaessa kuoripäällisen reunuksen, joka liukuu hitaasti karsitun oksan päälle. Kylestymisen lopputuloksena on oksan päälle muodostunut pihkasta ja kuoresta useita senttejä pitkä tappi, joka eräissä tapauksissa on puutuoteteollisuuden kannalta pahempi vika kuin alkuperäinen karsittu oksa. Männyllä pihkatapin läpimitta voi olla puolitoistakertainen karsitun oksan läpimittaan verrattuna (esim. uusvaara 1993, 1995, ks. myös Kärkkäinen 2003).

Metsänhoidollisilla toimenpiteillä voidaan vaikuttaa jonkin verran mäntyjen sisäoksien määrään, laatuun ja kokoon (Kärkkäinen 2003). Metsän kasvatustiheydellä voidaan vaikuttaa oksaisuuteen pääasiassa vaikuttamalla rungon läpimittaan. Koska elävät oksat myös paksunevat rungon järeytyessä, pienemmissä rungoissa on metsän suuremman tiheyden vuoksi myös hennommat oksat kuin järeämmissä rungoissa. Päätelmää puoltaa puun yhteyttämisteoria; mitä enemmän puussa on neulasia tai lehtiä, sitä enemmän ne tarvitsevat oksan johtosolukoita veden saamiseksi ja sitä paksummiksi oksat muodostuvat. Kun suuri vihreä yhteyttävä pinta-ala merkitsee myös nopeaa kasvua, oksien paksuudella ja rungon läpimitan kasvulla on selvä yhteys. Lämsän ym. (1990) mukaan mäntytaimikon tiheyden vaihtelu välillä 1500 - 3000 kpl/ha vaikuttaa suurimman elävän oksan paksuuteen 3 mm, kun puun rinnankorkeusläpimitta on vakioitu tasolle 10 cm.

Mäntyrunkojen sisäistä oksaisuuslaatua voidaan ennustaa useiden puutunnusten perusteella. Yleinen tutkimuksiin perustuva käsitys on, että tukkien laatu huononee rungon tai sen osan kapenemisen lisääntyessä. Etäisyys maasta alimpaan kuivaan oksaan on myös osoittautunut hyvin korreloivaksi tukkien tai sahatavaran laadun kanssa. Mitä ylempänä on alin kuiva oksa, sitä pidempi aika on kulunut siitä, kun tätä alempana olleet oksat ovat kylestyneet lopullisesti. Tästä seuraa, että oksien päälle on ennättänyt kasvaa paksumpi kerros oksatonta puuta (Kärkkäinen 2003).

2.2.3 Nuorpuu

Nuorpuulla tarkoitetaan epätäsmällisesti puun ytimen lähellä olevaa puuainetta, jonka solujen rakenne poikkeaa ytimestä kauempana olevan aikuispuun solujen rakenteesta (esim. Haygreen & Bowyer 1989). Nuorpuuta pidetään vikana monilla havu- ja myös lehtipuulajeilla, etenkin pien- ja harvennuspuun käytön ongelmista merkittävä osa johtuu nuorpuusta. Nuorpuu poikkeaa ympäröivän aikuispuun ominaisuuksista suuremman vuosirengasvälin, alemman tiheyden, lujuuden ja jäykkyyden, lyhyempien kuitujen, ohuempien soluseinämien, korkeamman ligniinipitoisuuden ja alemman selluloosapitoisuuden sekä soluseinämän jyrkemmän mikrofibrillikulman suhteen (esim. Kärkkäinen 2003).

Nuorpuuta esiintyy kaikenikäisillä puilla ja koko rungon pituuden matkalla ydinkeskeisenä lieriönä tyvestä latvaan. Haygreenin ja Bowyerin (1989) kokoamien tietojen mukaan nuorpuuta on puulajista ja puuyksilöstä riippuen yleensä 5 - 25 ensimmäistä vuosirengasta ytimestä laskien. Sauterin ym. (1999) tutkimuksessa

männyllä havaittiin nuorpuuta keskimäärin 22 ensimmäisessä vuosirenkaassa. Eräiden havaintojen (esim. Senft ym. 1986) mukaan nuorpuuta on vuosilustojen lukumääränä mitaten yhtä paljon hidas- ja nopeakasvuisissa puuyksilöissä. Vuosilustojen ohuuden vuoksi nuorpuuta on tällöin hidaskasvuisissa puuyksilöissä läpimittana mitaten vähemmän kuin nopeakasvuisissa. Suhteellisesti nuorpuuta on runsaimmin harvennushakkuiden puutavarassa ja päätehakkuupuiden latvapölkyissä. Tällaisesta raaka-aineesta sahatuilla pienidimensioisilla sahatavarakappaleilla nuorpuun osuus tilavuudesta on siis suurempi kuin järeästä puusta sahatuilla. Aikuispuun osuus tilavuudesta on sitä suurempi, mitä lähempänä puun tyveä ollaan.

Nuorpuun ja sitä ympäröivän puuaineen eli aikuispuun välille ei kuitenkaan voida määritellä selvää rajaa puun rungossa, sillä nuorpuulle tyypilliset ominaisuudet katoavat tai muuntuvat vähitellen siirryttäessä puun ytimestä pintaa kohti. Esimerkiksi puusolujen eli trakeidien pituus kasvaa hidastuvalla nopeudella ytimestä pintaan päin. Vanhemmiten männyllä ja kuusella muodostuu sydänpuuta ytimen läheisyyteen, jossa siis on myös nuorpuuainesta. Sydänpuun muodostumisella voi olla nuorpuulle ominaisia kuivausmuodonmuutoksia hillitsevä vaikutus, koska mm. sydänpuun tasapainokosteus on alhaisempi kuin pintapuun (esim. Kärkkäinen 2003).

Nuorpuun soluseinämien mikrofibrillikulma on suurempi kuin aikuispuulla, minkä vuoksi nuorpuu kutistuu pituussuunnassa jopa 10 kertaa enemmän kuin aikuispuu (Senft ym. 1986). McAlisterin ja Clarkin (1992) mukaan loblollymännyn (*Pinus taeda*) nuorpuu kutistui syysuunnassa kuivattaessa tuoreesta puusta absoluuttisen kuivaksi jopa 2,35-kertaisesti aikuispuuhun verrattuna, kun taas säteen- ja tangentinsuuntaiset ja tilavuuden kutistumasuhteet olivat päinvastaisesti 67, 62 ja 85 %. Boren (2001) havaitsi ydinkeskeisten mänty- ja kuusiaihioiden kieroutumisen olevan voimakkainta, keskimäärin jopa kaksi kertaa suurempaa alle 20-vuotiasta puuta sisältävillä ydinkeskeisillä aihioilla kuin tätä vanhempaa puuta sisältävillä aihioilla. Tavanomaisesta poikkeava kutistuminen eri suunnissa lisää nuorpuuta sisältävissä puutavarakappaleissa sen kosteusvaihteluista johtuvia kuivausmuodonmuutoksia ja elämistä sekä halkeilua ytimen ympärillä.

Puutavarassa, jota käytetään mekaanista lujuutta ja jäykkyyttä vaativiin kohteisiin, nuorpuuta voidaan pitää pelkästään vikana. Nuorpuun kimmokerroin, murtolujuus ja jäykkyys ovat pienemmät kuin aikuispuun vastaavat ominaisuudet. Bendtsenin (1978) mukaan nuorpuun lujuus voi olla alhaisemman tiheyden vuoksi jopa 50 % heikompi kuin aikuispuun tiheys. Shepard ja Shottafer (1992) ovat tutkineet istutus- ja luonnonmetsien punamännyn (*Pinus resinosa*) nuorpuun määrää ja sen vaikutusta puun lujuusominaisuuksiin. Keskimäärin nuorpuun taivutuslujuus oli 60 %, kimmokerroin 53 % ja tiheys 82 % aikuispuun vastaavista arvoista. Borenin ja Barnardin (2000) sorvattujen mänty- ja kuusiaihioiden taivutus- ja puristuskokeissa puuaineen iän kasvulla oli positiivinen vaikutus murtolujuuteen ja kimmokertoimeen. Männyn ja kuusen taivutuslujuudet vastasivat kuitenkin normaalin suomalaisen sahatavaran arvoja. Alle 20-vuotiailla männyillä ja kuusilla havaittiin myös mekaanisten ominaisuuksien, etenkin kimmokertoimen, normaalia voimakkaampi riippuvuus kosteudesta eli pieniläpimittaisen puun mekaaniset ominaisuudet heikkenivät kosteuden kasvaessa tavallista voimakkaammin. Koska kimmokertoimen arvo riippui voimakkaasti puun iästä ja kosteudesta, parhaiden lujuusluokkien saan-

to on todennäköisesti pieni kimmokertoimen määritykseen perustuvassa koneellisessa lujuuslajittelussa lajiteltaessa pieniläpimittaisesta puusta sahattua pienidimensioista puutavaraa. Tällainen puutavara on sahattu ytimen läheltä, joten se sisältää paljon nuorpuuta.

Nuorpuu on todettu aikuispuuta heikommaksi myös mekaanisten liitosten kestävyyden kannalta (Ranta-Maunus 1999). Esimerkiksi männyllä naulan tartuntalujuus on nuorpuussa syyn poikittaissuunnassa 30 % ja pitkittäissuunnassa 10 % pienempi kuin aikuispuussa, kun puuaineen tiheys on vakioitu (Helinska-Raczkowska 1993).

2.2.4 Kuiva-tuoretiheys

Puuaineen kuiva-tuoretiheys vaihtelee rungossa sekä pituuden että poikkileikkauksen suunnassa. Tiheyteen ja sen vaihteluun vaikuttavat paitsi puulaji, myös puun ikä, koko ja kasvunopeus, kasvupaikan laatu ja geneettiset tekijät (esim. Hakkila 1966, Kärkkäinen 2003). Puun säteensuuntaiset tiheyden vaihtelut johtuvat lähinnä kasvunopeuden ja kesäpuuprosentin eroista sekä soluseinämien paksuuden vaihtelusta. Männyllä puuaineen tiheys kasvaa jatkuvasti ytimestä pintaan päin (Hakkila 1966, Kärkkäinen 2003). Mikäli puuaineen tiheys kasvaa ytimestä pintaan päin, se tavallisesti alenee tyvestä latvaan päin. Männyllä tiheys alenee erityisen voimakkaasti rungon kannonkorkeudelta 10 - 20 prosentin suhteelliselle korkeudelle (Hakkila 1966).

Paksuuskasvunopeus (vuosiluston leveys) vaikuttaa puuaineen tiheyteen, sillä vuosiluston leventyessä puuaineen tiheys yleensä alenee. Tämä johtuu Suomen oloissa likimain vakiosta kesäpuuvyöhykkeen leveydestä, jolloin vuosiluston leventyessä kesäpuuta kevyemmän kevätpuun osuus kasvaa ja keskimääräinen tiheys alenee (Kärkkäinen 2003). Havupuilla rungon keskimääräinen tiheys alenee kasvupaikan viljavuuden parantuessa.

Suomessa männyn puuaine on tiheintä Keski-Suomen, Pohjanmaan ja Kainuun leveysasteiden tasalla, josta tiheys alenee sekä etelään että pohjoiseen päin; tiheys on alhaisimmillaan pohjoisessa pienen kesäpuun osuuden vuoksi (Hakkila 1968). Kesäpuuprosentti selittää männyllä suurimman osan tiheyden alueellisesta vaihtelusta. Hakkilan (1968) mukaan mäntykuitupuun keskimääräiset kuiva-tuoretiheydet olivat etelästä pohjoiseen eri leveysasteilla seuraavat: 60.00 - 62.00 398 kg/m^3, 62.01 - 64.00 401 kg/m^3, 64.01 - 66.00 407 kg/m^3 ja leveysasteen 66.00 pohjoispuolella 379 kg/m^3.

Puuaineen kuiva-tuoretiheys on ensiharvennuspuulla alhaisempi kuin myöhemmistä hakkuista saatavalla puulla, mutta ero ei ole tehtailla toimitettavalla puulla nykytietojen mukaan niin suuri kuin on aiemmin arveltu. Hakkilan (1966) mukaan eteläsuomalaisten mäntykuitupuurunkojen keskimääräinen kuiva-tuoretiheys oli 417 kg/m^3 ja järeiden mäntyjen latvakuitupuun tiheys 386 kg/m^3. Hakkilan ym. (1995) metsikkötutkimuksessa tiheys oli koko maassa ensiharvennusmännyllä 395 kg/m^3 ja mäntykuitupuulla keskimäärin 407 kg/m^3. Hakkilan ym. (2002) uusissa tehdastutkimuksissa kuiva-tuoretiheys oli Etelä-Suomessa mäntykuitupuulla ensiharvennuksissa 402 kg/m^3 ja muissa harvennuksissa 416 kg/m^3.

Lindbladin ja Verkasalon (2001) hakeanalyysitutkimuksessa Etelä-Suomen männyn kuiva-tuoretiheys oli ensiharvennuskuitupuulla 404 kg/m^3 ja lajittelemattomalla kuitupuulla 411 kg/m^3.

2.2.5 Kasvupaikan ravinteikkuuden, metsikön syntytavan ja kasvatustiheyden merkitys

Kasvupaikan viljavuutta (ravinteikkuutta) ja puuntuotoskykyä kuvataan metsä- tai suotyypeillä. Useiden tutkimusten mukaan kasvupaikan ravinteikkuudella ei kuitenkaan ole selvää yhteyttä puun laatuun. Esimerkiksi kivennäismailla metsätyyppi ei ole männyllä minkään puuaineen laatuun vaikuttavan tekijän suhteen kovinkaan luotettava selittäjä (Kärkkäinen & Uusvaara 1982). Erityisesti oksaisuusero tuoreiden ja kuivahkojen kankaiden välillä on varsin pieni, mutta metsätyyppien ravinteikkuuden ääripäiden välillä puuaineen laadulliset erot on todettu varsin suuriksi (esim. Kellomäki ym. 1992).

Kivennäis- ja turvemaiden välillä on arveltu olevan suuriakin puuston laatueroja. Turvemaiden puustojen laatua teollisen jalostamisen kannalta on tutkittu vain vähän. Viimeisimpien tulosten mukaan puustojen laadullinen tila ei olisi niin heikko kuin on pelätty ja oikein hoidettuina ne tuottaisivat korkealaatuistakin raakaainetta. Vastaaviin kivennäismaiden puustoihin verrattuna tulokset ovat olleet kuusella varsin hyviäkin (Stöd 2002b, Stöd ym. 2002, Verkasalo & Maltamo 2002, Rikala 2003), mutta männyllä vastaavasti heikompia (Stöd 2002b, Verkasalo 2002, Rikala 2003).

Sekä sisäinen että ulkoinen laatu vaihtelevat turvemailla poikkeuksellisen paljon ja varsin arvaamattomasti. Erityisesti puilla, jotka ovat syntyneet ennen ojitusta, rungon ydinosa on syntynyt hitaan kasvun aikana. Ojitus on aiheuttanut kasvun moninkertaistumisen, joka näkyy vuosiluston leveyden kasvuna, puuaineen tiheyden alenemisena ja tähän kytköksissä olevien fysikaalisten, mekaanisten ja puunjalostusteknisten ominaisuuksien muutoksina (Stöd ym. 2002, Rikala 2003, Varhimo ym. 2003).

Turvemaiden mäntyrungot ovat pienehköjä ja yleisimpiä ja vaikeimpia teknisiä vikoja ovat huono runkomuoto (tyvekkyys, tyvimutkat, mutkat, lenkous, epäpyöreys) ja oksikkuus (kuivat oksat, pystyoksat) (Verkasalo 2002, Rikala 2003, Stöd ym. 2003). Tuoreoksaisen osan osuus mäntyrungon koko pituudesta on poikkeuksellisen pieni ja tuoreoksaisessa osassakin on paljon kuivia ja lahoja oksia. Myönteistä on suuri sydänpuun osuus ja kielteistä yleinen ja usein laajalle levinnyt reaktiopuu.

Kasvupaikan ravinteikkuus vaikuttaa selvästi mäntyjen ulkoiseen oksikkuuteen. Metsätyyppi ei sinänsä selitä männikön laatua, sillä ravinteikkuuden vaihtelu metsätyyppien sisällä on suurta (esim. Kellomäki ym. 1992, Uusitalo 1994, Mäkelä ym. 2002). Useissa lähteissä onkin todettu puun kasvun olevan pelkkää metsätyyppiä parempi puun laadun selittäjä (mm. Kärkkäinen & Uusvaara 1992). Uusvaaran (1981b) mukaan kasvupaikan ravinteikkuuden vaikutus rungon ulkoiseen oksikkuuteen on kaksijakoinen: viljavilla kasvupaikoilla oksat kasvavat paksummiksi, mutta kuolleiden ja karsiutuneiden oksien kylestyminen on nopeampaa kuin niukkaravinteisilla kasvupaikoilla. Paksut kuolleet oksat pysyvät kuitenkin kiinni run-

gossa pidempään ja ovat siten alttiimpia sienten aiheuttamalle sahatavaran arvoa alentaville sisäisten oksien lahoamiselle ja tummumiselle kuin hennot oksat.

Yhtenä syynä metsä- tai suotyypin vähäiseen merkitykseen männyn laadun indikaattorina on kasvupaikan ravinteikkuutta ja puuntuotoskykyä kuvaavan metsä- tai suotyypin määritys, sillä samalla kasvupaikalla voi olla usean tyypin tunnusomaisia piirteitä. Lisäksi metsä- ja suotyyppien vähäinen määrä ja puuntuotoskyvyn voimakas vaihtelu luokkien sisällä heikentävät metsä- tai suotyypin luotettavuutta puun laadun ennustajana (Kärkkäinen & Uusvaara 1982). Metsä- ja suotyypit onkin tunnustettava kvalitatiivisiksi eli laadullisiksi muuttujiksi, joiden määrittämisessä ammattitaito ja huolellisuus ovat tärkeitä tulosten reliabiliteetin mittareita (Jouhiaho & Uusitalo 2001).

Metsikön syntytapa ei ole keskeinen puun laatuun vaikuttava tekijä, vaan selityksenä viljelymänniköiden monissa tutkimuksissa todetulle huonolle laadulle lienee männyn viljely liian ravinteikkaille kasvupaikoille (esim. Kellomäki ym. 1992). Täten kasvupaikan ravinteikkuus ja etenkin puuston tiheys muodostuvat tärkeimmiksi puun laatuun vaikuttaviksi tekijöiksi. Poikkeuksena yleistyksestä ovat lenkous ja tyvimutkat, joita esiintyy viljelymänniköissä selvästi enemmän kuin luonnonmänniköissä (Uusvaara 1981a, Uusvaara 1981b, Stöd 2000, Stöd 2002a, Stöd ym. 2003). Laadun kannalta on tärkeää, kuinka nopeasti taimikon latvusto sulkeutuu. Riittävä puuyksilöiden välinen kilpailu hidastaa oksien paksuuskasvua ja siten aikaistaa oksien kuolemista sekä karsiutumista. Puuston tiheydellä on päinvastainen vaikutus karsiutumiseen, sillä harvassa metsikössä tuulen ja lumen kuolleiden oksien karsiutumista edistävä vaikutus on voimakkaampi kuin tiheässä (Kellomäki ym. 1992).

Syntytapaa merkittävämpi tekijä männikön laatukehityksessä on puuston perustamis- ja kasvatustiheys. Kasvatustiheydellä voidaan vaikuttaa oksikkuuteen ja oksien paksuuteen sekä oksattoman rungonosan runkomuotoon. Nuoruusvaiheessaan tiheässä kasvatetussa metsikössä edelliset ominaisuudet kehittyvät siten, että metsiköstä on mahdollista saada korkealaatuisia oksattomia tukkeja. Mäkelä ym. (2000) ovat havainneet metsikön tiheyden selittävän huomattavan osan oksien ominaisuuksien vaihtelusta. Metsikön tiheys vaikuttaa myös rungon läpimitan kasvuun ja latvuksen pituuteen. On kuitenkin huomattava, että tiheys näyttäisi vaikuttavan oksien ominaisuuksiin lähinnä puun kokonaiskasvun kautta. Metsikön tiheys ei näin muuta rungon ja oksien ominaisuuksien välistä suhdetta. Mahdollisesti nykyiset nuoret männiköt, erityisesti istutetut, ovat olleet taimikkovaiheessa väljempiä kuin aiemmat, yksinomaan luontaisesti syntyneet, joten terveoksaista osaa voi nykyisissä tai tulevissa ensiharvennusmännyissä olla rungon sisällä aiemmin havaittua enemmän.

Kärkkäisen (2003) mukaan hyvään oksaisuuslaatuun pyrittäessä on männyllä ja koivulla kasvatustiheyden oltava taimikkovaiheessa suuri aina siihen saakka, kunnes rungon oksat ovat kuolleet tyvitukin pituudelta. Tämän jälkeen rungon elävä latvus pidetään elinvoimaisena toistuvin ja voimakkain harvennushakkuin. Menetelmän tuloksena runkojen tyvitukin alue on päätehakkuuiässä ulkoisesti oksaton ja sisäoksiltaan se on hento-oksainen. Lisäksi sisäoksien kuollut osa on lyhyt nopean luontaisen karsiutumisen seurauksena. Rungon muissa osissa oksat ovat enimmäkseen tuoreita.

2.3 HARVENNUSMÄNTY SAHAUKSESSA

Metlan puunkäyttötilastojen (Metla Metinfo 2005b, 31.8.2005) mukaan sahateollisuudessa on käytetty kotimaista kuitupuuksi luokiteltua puutavaraa 2,2 - 2,6 milj. m^3/v kuluvan vuosituhannen alkuvuosina (Peltola 2001, 2002, 2003, 2004). Männyn osuus on ollut tästä selvästi suurin (66 %) nousten 1,24 milj. m^3:stä vuonna 2000 1,75 milj. m^3:iin vuonna 2003, mutta laskien männyn sahauksen yleisen vähenemisen seurauksena. Sahateollisuuden kotimaisen mäntyraakapuun käytöstä oli 12 % oli kuitupuuta vuonna 2004. Lisäksi on sahattu tuontikuitupuuta, enimmillään 226 000 m^3 vuonna 2001, mutta tämän jälkeen vähenevässä määrin. Vuonna 2004 tuontikuitupuuta sahattiin 74 000 m^3, josta mäntyä oli vain 24 000 m^3.

Harvennuspuulle on löydettävissä käyttökohteita mekaanisessa jalostuksessa. Yrttiahon (1999) sahaajille ja jatkojalostajille suunnatun kyselytutkimuksen mukaan pienpuusta sahatun sahatavaran otollisimpia käyttö- ja jatkojalostuskohteita olisivat liimalevyt, liimapuupalkit ja -pilarit, listat, ikkunat, ovet ja niiden karmit, pakkaus- ja kuormalavat, väliseinäpuut ja lattialaudat. Puutuoteteollisuudessa harvennuspuuta käytetäänkin jo varsin monipuolisesti erilaisiin lopputuotteisiin (Fröblom 2000, Fröblom 2001, Verkasalo 2001, Wall 2002). Terveoksaisena männyn ja kuusen harvennuspuu soveltuu hyvin sahateollisuudelle käytettäväksi edelleen mm. huonekaluteollisuudessa, massiivipuutuotteiden lisäksi ennen kaikkea erilaisina liimalevyrakenteina. Terveoksainen mänty sopii ja sitä myös käytetään jossain määrin eräissä rakennuspuusepänteollisuuden tuoteryhmissä (ml. näkyviin jäävät liimapuurakenteet) ja asuntojen sisustusmateriaaleissa (seinä- ja kattopaneelit, lattiamateriaalit, huonekalujen osat). Oksattomia tuotteita saadaan harvennusmännystä vähän lukuun ottamatta sormijatkettuja ja liimattuja tuotteita. Käyttökohteet ovat tällöin listoissa, lattiamateriaaleissa sekä ovissa, ikkunoissa, portaissa ym. rakennuspuusepän tuotteissa. Harvennusmännyn oksaisuuslaadultaan vaatimattomammat tuotteet soveltuvat esimerkiksi liimapuu- ja liimahirsiteollisuudessa ainakin piiloon jääviin rakenteisiin, useimpiin rakennustuotteisiin (ml. määrämittaiset tuoteosat), tavanomaiseksi rakennussahatavaraksi ja pakkausjärjestelmiin. Harvennusmännyn potentiaalisesti kasvavia käyttökohteita on korjausrakentamisessa ja piha- ja ympäristörakentamisessa sekä lämpökäsitellyissä tuotteissa ja varsinkin erilaisissa teese-itse –tuotteissa.

Varsinaiset tutkimustulokset harvennusmännyn käyttökelpoisuudesta puutuoteteollisuudessa ovat peräisin ennen kaikkea EU-hankkeesta "Pienen pyöreän puun käyttö rakentamisessa" (Ranta-Maunus 1999, Stöd 2000, Stöd 2002a). Siinä tutkittiin mm. pyöreän rakennuspuun (minimipituus 2,4 m) hakkuukertymiä, runkojen vikoja ja ulkoisesti terveoksaisen rungonosan osuutta erilaisissa ensiharvennusmänniköissä ja -kuusikoissa. Pyöreälle rakennuspuulle käytettiin samoja laatuvaatimuksia kuin käytännössä sahattavalle pienpuulle. Ensiharvennusmänniköistä kertyi mekaaniseen puunjalostukseen soveltuvaa rakennuspuuta keskimäärin vain 5 - 15 m^3 hehtaarilta eli noin 10 - 20 % kokonaiskertymästä. Minimilatvaläpimitalla 5 cm rakennuspuun osuus kertymästä oli männyllä 17 %. Läpimittavaatimuksella 7 cm rakennuspuun osuus laski 14 prosenttiin ja läpimittavaatimuksella 9 cm - joka voisi vastata myös pienintä sahattavaa läpimittaluokkaa - 10 prosenttiin. Kannattavan ensiharvennuksen hakkuukertymän alarajana pidetään yleensä noin 30 m^3/ha

(Vuokila 1976, Hakkila ym. 1995). Stödin (2000, 2002b) tutkimuksen metsiköistä 76 - 80 % täytti käytetystä minimiläpimitasta riippuen kyseisen kertymävaatimuksen.

Stöd (2000) tutki myös erilaisten vikojen esiintymistä ja runkojen ulkoista tuoreoksaosuutta ensiharvennusmänniköissä ja -kuusikoissa. Rungon tuoreoksaosuus määriteltiin tuoreoksarajasta 9 cm:n läpimittaan asti. Männyillä poistettavilla rungoilla esiintyi eniten vikoja viljavilla mailla, mutta ulkoinen tuoreoksaosuus oli vastaavasti niillä suurin. Viljavien maiden ensiharvennusmänniköissä rakennuspuun kertymä oli pienin, joten tutkimuksen tulosten perusteella ei voitu sanoa, millaisista ensiharvennusmänniköistä on teknis-taloudellisesti saatavilla eniten mekaaniseen puunjalostukseen soveltuvaa tuoreoksaista mäntyä. Puista ulkoisesti määritetyn tuoreoksarajan on todettu sijaitsevan rungon sisäistä tuoreoksaosuuden alkamiskorkeutta korkeammalla. Tästä syystä runkojen sisäistä tuoreoksaista osaa jää jalostukseen menevistä rungoista aina hyödyntämättä, mikäli rungot apteerataan kirjaimellisesti ulkoisen tuoreoksikkuuden mukaan.

Karstulanseudun Kehitysyhtiö Oy teki pienen paikallisen selvityksen liimalevyn valmistukseen soveltuvan männyn kertymistä harvennushakkuissa vuonna 1995 (Vesterinen 1996). Ennakolta hyvälaatuisiksi arvioiduista männiköstä saatiin liimalevyn valmistukseen sopivaa raaka-ainetta 66 - 73 % hakkuukertymästä, kun tukin minimilatvaläpimitta oli 10 cm ja minimipituus 3 metriä.

Mekaaniseen puunjalostukseen soveltuvia runkoja tai rungon osia on siis vain osa harvennusten hakkuukertymästä. Lisäksi hakattavien runkojen koko on pienempi kuin päätehakkuissa, jonka vuoksi käsiteltäviä runkoja tilavuusyksikköä kohti on harvennuksissa enemmän. Turvemailla runkojen pieni koko ja vaatimaton hakkuukertymä korostuvat entisestään.

Harvennuspuun korjuu ja kuljetus tehtaille on päätehakkuiden puutavaraa kalliimpaa, sillä harvennushakkuissa kokonaiskertymä on vain 10 - 50 % päätehakkuiden kertymistä. Toisaalta puutavaralajeja on harvennusleimikoissa vähemmän, lajittelun tarve on pienempi ja puuaineksen laatu on tasaisempi kuin päätehakkuuleimikoissa. Pienen hakkuukertymän lisäksi korjuukustannuksia kasvattaa harvennuksissa mm. jäävän puuston huomioon ottaminen korjuun aikana ja pieni rungon koko. Metsäteollisuuden ja Metsähallituksen puunhankinnassa vuonna 2001 harvennusleimikoiden koneellisen hakkuun kustannukset olivat keskimäärin 7,57 €/m^3 (päätehakkuut 3,87 €/m^3) ja metsäkuljetuksen kustannukset 3,87 €/m^3 (päätehakkuut 3,03 €/m^3) sekä kaikkien leimikoiden kaukokuljetuskustannukset tehtaalle 5,38 €/m^3 (Örn 2002). Hakkilan ym. (1995) mukaan koneyrittäjälle maksettu kokonaiskorvaus hakkuusta ja metsäkuljetuksesta oli männyn ensiharvennuksessa 12,6 - 15,1 €/m^3 ja päätehakkuussa 4,9 - 5,9 €/m^3. Yleisesti korjuukustannukset kasvavat miltei eksponentiaalisesti rungon koon pienentyessä. Tästä syystä puutavaran tehdashinta on harvennuspuulla lähellä päätehakkuupuuta, vaikka tukin osuus hakkuukertymästä on selvästi pienempi. Salon ja Uusitalon (2001) tutkimuksissa ensiharvennusmännyn kaikkien puutavaralajien keskimääräinen tehdashinta oli 49,28 €/m^3, kun se oli päätehakkuumännyllä 54,16 €/m^3.

Sahattavan puun läpimitta ja pituus vaikuttavat olennaisesti sahatavaran saantoon. Hakalan (1992) mukaan latvaläpimitaltaan 15 cm:n mäntyä tarvitaan kehäsahauksessa 2,5 m^3 yhteen sahatavarakuutiometriin eli n. 0,5 m^3 enemmän kuin

yli 20 cm:n mäntyä. Käytännön kokemukset ovat osoittaneet käyttösuhteen nousevan sahaustekniikasta riippuen tasolle 2,8 - 3,2, joissakin tapauksissa jopa tasolle 4,1, kun tukin latvaläpimittaa alennetaan tasolle 10 cm. Tähän nähden eräissä pienpuun sahaustutkimuksissa on saatu verraten hyviäkin tuloksia. Edellä mainitussa Karstulanseudun Kehitysyhtiö Oy:n selvityksessä harvennusten mäntytukkien sahauksen käyttösuhde oli keskimäärin 2,3, mutta liimalevyn raaka-aineeksi soveltuvalle sahatavaralle kuitenkin 3,4 (Vesterinen 1996). Fröblomin (2000) ensiharvennusmännyn käyttöä liimapuuna koskeneessa tutkimuksessa, johon valittiin ao. käyttötarkoituksessa laadun ja muodon puolesta hyvin kysymykseen tulevia runkoja, kuuden leimikon tukkien käyttösuhde oli 1,8 m:n tukkipituudella 1,99 (1,93 - 2,26), 2,5 m:n tukkipituudella 2,12 (1,99 - 2,53) ja 3,0 m:n tukkipituudella 2,23 (2,11 - 2,62).

Jouhiahon ja Uusitalon (2001) Pohjois-Karjalan ensiharvennusleimikoiden mäntyä koskeneessa tutkimuksessa sydänsahatavarasta oli Pohjoismainen sahatavara -laatulajitteluoppaan mukaista A-laatua lähes yhtä paljon kuin päätehakkuuleimikoiden mäntyjen latvaosista saadusta eli n. 55 %. Ensiharvennusten sydäntavarassa oli kuitenkin selvästi vähemmän B-laadun ja vastaavasti enemmän C-laadun saheita kuin päätehakkuiden latvatukkien sydäntavarassa. Pienpuun A-laadun saheet olivat lähes kaikki A4 -alalaatua, ja parhaita eli A1 - A3 -alalaatuja ei ollut juuri lainkaan. Ensiharvennuksissa kasvupaikkatyypillä ei ollut vaikutusta sahatavaran laatuluokkajakaumaan. Pienpuusta saatujen liimalevylamellien laatuluokitus osoitti, että ensiharvennusmänty soveltuu oksikkuuslaadultaan hyvin liimalevyjen raaka-aineeksi. Ensiharvennusten sahatavarasta saaduissa liimalevylamelleissa esiintyi kuitenkin selvästi enemmän vajaasärmäisyyttä kuin päätehakkuiden latvatukkien sahatavarasta saaduissa, mikä viittasi omalta osaltaan tavallista pienempään läpimittaan ja yleisempään lenkouteen ja mutkaisuuteen ensiharvennusten tukeissa.

Pieni pölkyn koko ja alhainen sahaussaanto heikentävät yhdessä pienpuun sahauksen tuottavuutta ja nostavat valmistuskustannuksia verrattuna järeän puun sahaukseen. Hakalan (1992) mukaan sahatavaran saanto kasvoi 6 prosenttiyksikköä ja tukkien sahausteho noin 15 m^3/h mäntytukin kehäsahauksessa, kun tukin läpimitta kasvoi luokasta 15 cm luokkaan 21 cm. Tuotantokustannusten rakenne on myös erilainen sahattaessa pienpuuta järeän puun sijasta. Edellä mainitussa Fröblomin (2000) tutkimuksessa ensiharvennusmännyn sahauksen kustannusrakenne oli seuraava: raaka-ainekäyttö 16 %, sivutuotteet 28 %, palkkauskustannukset 17 %, käyttökustannukset 17 % ja pääomakustannukset 22 %. Useniuksen ym. (1987) 1980-luvun sahausmenetelmiin perustuneessa tutkimuksessa mäntysahatavaran valmistuskustannukset laskivat 5,0 - 6,7 €/tukki-m^3 tukin läpimittaluokasta 13 cm luokkaan 30 cm ja 8,4 - 10,1 €/tukki-m^3 tukin pituuden kasvaessa 3,1 metristä 6,1 metriin.

Euroopan markkinoilla sahateollisuuden tuotteet myydään edelleen pääasiassa sahatavarana ja vain pieni osa tuotteista myydään puusepän- ja huonekaluteollisuuden aihioina. Aihioiden markkinat ovat kuitenkin kasvaneet ja niiden odotetaan jatkavan kasvua. Laadukkaiden aihioiden tuottaminen voi tuoda sahoillemme huomattavan jalostusarvon lisän perinteiseen sahatavaran tuotantoon verrattuna. Tämä

koskee myös pienpuusta saatavia tuotteita, joista suuri osa on tavallisena sahatavarana pienidimensioisia, markkinoilla vähän kysyttyjä laatuja.

Aihiot valmistetaan toistaiseksi suurelta osin vielä puusepän- ja huonekalutehtaiden prosessien alkupäässä, josta tehtaat eivät ole voineet luopua aihioiden pienen tarjonnan ja aihiomarkkinoiden kehittymättömyyden takia. Tehtaat haluaisivat kuitenkin lisätä aihioiden käyttöä saavutettavissa olevien kustannussäästöjen vuoksi. Markkinoiden, valmistustekniikan, koulutuksen ja erilaisten yhteistoimintaketjujen kehittämisessä onkin tässä suhteessa paljon tehtävissä.

Kokonaisuutena pienpuun sahaus on vielä nykyisinkin pääsääntöisesti kannattamatonta liiketoimintaa useimmille sahoille. Monet sahat kuitenkin käyttävät pienpuuta, sillä sen sahaus tuottaa vähemmän tappioita kuin sahaamatta jättäminen (Boren 2000). Hakalan (1992) mukaan pienimmän sahaukseen hyväksytyn tukin latvaläpimitan nostaminen kohottaa merkittävästi sahauksen vuositulosta ainoastaan silloin, kun tuotantoaika säilyy ennallaan eli muiden läpimittaluokkien tukkeja sahataan vastaavasti enemmän. Tämä ei kuitenkaan ole mahdollista nykyisessä puumarkkinatilanteessa eikä myöskään lähitulevaisuudessa, ainakaan suuremmilla sahoilla, el-leivät sahat siirry sahaamaan enenevästi myös järeää tuontipuuta.
Borenin (2000) mukaan nykyistä lyhyempien tukkipituuksien käyttöön liittyvät seuraavat oletukset ja ongelmat, joihin tutkimuksen ja tuotekehityksen tulee perustua ja jotka tulee myös pyrkiä ratkaisemaan:

- sahauskelpoisen tukin hakkuukertymä harvennuksissa kasvaa, koska moniväärät, mutkaiset ja muuten vikaiset rungot voidaan katkoa nykykäytäntöä tarkemmin
- hyväkasvuisten mäntyjen terveoksaisen sisäosan hyödyntäminen tehostuu lyhyitä tukkeja sahattaessa
- jos tukin minimipituus on esimerkiksi 2,4 m, siirtyminen lyhyisiin tukkipituuksiin ei vaikuta olennaisesti hakkuun ja kuljetuksen kustannuksiin
- tukkien ja saheiden lajittelu on tilavuusyksikköä kohden hidasta nykyisiä sahaustekniikoita käytettäessä, koska käsiteltävien kappaleiden lukumäärä on suuri
- tukkien suuren kappalemäärän vuoksi tukkivälejä on sahalinjalla nykyistä enemmän, jolloin sahauksen tuottavuus alenee
- sahaus vakioasetteella (sisältäen tehokkaan tukkilajittelun) ilman suuria tukkivälejä on tehokkaampaa kuin muuttuva-asetteinen sahaus ilman lajittelua
- kapenemisen, lenkouden, mutkien ja monivääryyden aiheuttama sahauksen saannon pieneneminen ei ole niin voimakasta kuin nykyisillä tukkipituuksilla
- nykyisten sahauslinjojen perässä olevien lajittelu- ja tasauslinjojen kapasiteetti ei ole riittävä, joten sahalle on kehitettävä lyhyille sahatavarakappaleille soveltuva jälkipää
- perinteisten kuivaamojen kapasiteetin käyttöaste saattaa joissakin tapauksissa alentua tukin lyhentyessä, joten tarvitaan uusia kuivauspakettiratkaisuja
- ”pienpuulinjalla” sahataan vain pikkutukkeja, joista otetaan vain kaksi samankokoista sahatavarakappaletta, koska sivulautojen talteen ottaminen yleensä monimutkaistaa toimintoja ja lisää kustannuksia; tämä menettely mahdollistaa kapasiteetiltaan suuremman sahalaitoksen jälkipään. Sivulautojen kannattavan sahauksen rajalatvaläpimitaksi on saatu 1980-luvun tutkimuksissa 15 - 19 cm tukin laadusta riippuen (esim. Hägg 1986).

Suomessa ei ole julkaistu vertailevia tutkimuksia pienpuun eri käyttötarkoitusten kannattavuudesta, joissa vaihtoehdoissa olisi ollut mukana puutuoteteollisuus. Kuitu- ja energiapuukäytön rajanvedosta on kuitenkin muutamia julkaisuja (esim. Pihlajamäki & Asikainen 2002). Erään konsulttityönä tehdyn selvityksen mukaan männyn sahaus olisi pikkutukkisahalla määritetyn tuotannon jäännösarvon perusteella kannattavampaa kuin käyttö kuitupuuna keskimäärin, jos pölkkyjen läpimitta on vähintään 11 cm (Pohjois-Pohjanmaan liitto 2004). Rajaläpimitta riippuu olennaisesti kuitupuun käyttötarkoituksesta: päällystämättömällä hienopaperilla ja aaltopahvin pintakerroskartongilla se olisi vain 9-10 cm, mutta päällystetyllä hienopaperilla 13-14 cm.

USA:ssa on tehty jonkin verran pienpuun käyttöä koskevia kannattavuusvertailuja sahatavaran, markkinasellun, kerto- eli viilupuun (LVL, *Laminated Veneer Lumber*) ja OSB-levyn tuotannon välillä (Spelter ym. 1996). Tuotantolaitosten vuotuiset tuotantokapasiteetit olivat vertailussa sahoilla 240 000 m^3, kertopuutehtailla 160 000 m^3 ja OSB-levytehtailla 85 000 m^3. Tuotannon nettotulojen suhde käytettyyn puumäärän oli paras kertopuulla, jota seurasivat varsin lähellä markkinasellu ja selvästi kauempana OSB-levy. Sahausvaihtoehdoista oli kannattavin lujuuslajitellun sahatavaran tuotanto. Korkeilla tuotehinnoilla sahatavaran tuotannon kannattavuus jäi selvästi enemmän jälkeen vaihtoehtoisista käyttömuodoista kuin alhaisilla tuotehinnoilla. Eniten puuraaka-ainetta suunnittelukapasiteettia kohden vaati vuodessa OSB-levyn tuotanto (475 000 m^3). Puuraaka-aineen vuotuinen tarve oli eri sahausvaihtoehdoissa n. 390 000 m^3, kertopuun tuotannossa 330 000 m^3 ja markkinasellun tuotannossa 130 000 m^3.

Investointiriskinä esitettiin investoinnit nettotuloja kohti. Mitä alhaisempi suhde oli, sitä nopeampi oli investoinnin takaisinmaksuaika. Tämä vaihtoehto suosi sahatavaran tuotannon vaihtoehtoja selvästi suuremmat investointikustannukset vaativien OSB-levyn, markkinasellun ja kertopuun tuotantovaihtoehtojen kustannuksella.

Tutkimuksessa esitettiin myös nettotulojen suhde käytettyyn puumäärän pölkyn latvaläpimitan mukaan. Kertopuun tuotanto oli tällä tavoin laskettuna selvästi muita vaihtoehtoja kannattavampaa. Kertopuun tuotannon tulot suhteessa käytettyyn puumäärään kasvoivat dollareina puukuutiometriä kohti tasolta 0,0425 tasolle 0,863, kun tukin latvaläpimitta kasvoi 100 mm:stä 300 millimetriin. Samalla tukin latvaläpimittavälillä nettotulot kasvoivat vain lievästi OSB-levyn tuotannossa, lujuuslajitellun sahatavaran tuotannossa, yleissahatavaran tuotannossa ja rakennussahatavaran tuotantovaihtoehdossa. OSB-levyn tuotannossa taso oli 0,034 – 0,036 ja muissa tuotantovaihtoehdoissa 0,030 – 0,032. Tukin minimilatvaläpimitan nostaminen 100 mm:stä 150 mm:iin paransi tuloksia 3,8 % rakennussahatavaran tuotantovaihtoehdossa, 4,7 % yleissahatavaran tuotantovaihtoehdossa, 0,9 % lujuuslajitellun sahatavaran tuotantovaihtoehdossa, 3,3 % OSB-levyn tuotantovaihtoehdossa ja peräti 56,6 % kertopuun tuotantovaihtoehdossa.

3 TUTKIMUSTEN TAVOITTEET

Tutkimuskonsortion tavoitteena oli selvittää mahdollisimman monipuolisesti harvennusmännyn käyttömahdollisuuksia puutuoteteollisuuden raaka-aineena. Päätavoitteena oli määrittää erilaisten harvennusmäntymetsiköiden ja niistä saatavan puutavaran ominaisuudet, soveltuvuus ja valintakriteerit sahateollisuuden raaka-aineeksi. Edelleen määritettiin harvennusmäntymetsiköiden ominaisuudet täsmämateriaalien valmistamiseksi jatkojalostettuihin puutuotteisiin (mm. liimalevy, ikkunat, ovet). Erityisesti selvitettiin lyhyiden tukkipituuksien käytön eli ns. lyhyttukkitekniikan vaikutukset sahapuuksi soveltuvuuteen ja puunhankinnan kustannuksiin:

a) tukkikertymään ja potentiaalisten tyvi-, väli- ja latvatukkien määrään
b) koneellisen puunkorjuun kustannuksiin ja raaka-aineen tehdashintaan tyypillisissä harvennusmäntyleimikoissa
c) sahatavaran saantoon ja laatujakaumaan erilaisissa harvennusmäntyleimikoissa; samalla määritettiin runkojen ulkoisen oksikkuuden ja sisäisen oksaisuuden yhteys harvennusmetsiköissä, jotta harvennusmännyn katkontaohjeita voidaan tarvittaessa tarkistaa
d) sahauksen tuottavuuteen, arvosaantoon ja kannattavuuteen.

Harvennusmäntyraaka-ainetta koskeneiden tutkimusten erityisenä tavoitteena oli määrittää sahattavien tukkien erilaisten pituus-, läpimitta- ja laatuyhdistelmien vaikutukset sahapuun hakkuukertymään ja laatujakaumaan erityyppisissä harvennusmäntymetsiköissä, kun niissä tehdään laatuharvennustyyppinen alaharvennus. Lisäksi tutkittiin yleisimpien vikojen ja vaihtoehtoisten tukkidimensioiden vaikutusta hakkuukertymiin. Laskelmien pohjana käytettiin hankekonsortioon osallistuneiden sahojen omilta hankinta-alueiltaan tutkittaviksi ehdottamia tyypillisiä harvennusmäntymetsiköitä.

Harvennusmännyn sahausta koskevien tutkimusten tavoitteena oli määrittää optimaaliset, puuraaka-aineeseen mahdollisimman hyvin sopivat tuotteet ja laatia ohjeita tuotelähtöiselle puunhankinnalle ja sahaukselle. Työt käsittivät tyypillisen puuraaka-aineen valinnan ja mittaukset, tuotespesifikaatioiden ja prosessiarvojen määrittelyn analyysejä varten ja simulointi- ja kannattavuuslaskelmat.

Konsortion viimeisenä tavoitteena oli laatia synteesi, jossa määritetään ominaisuudet (kasvupaikka, runkoluku, järeys, jne.) ja valintakriteerit sellaisille harvennusmäntymetsiköille, joita sahateollisuus voi kannattavasti hyödyntää joko nykyistä lyhyemmillä tai käytössä olevilla tukkipituuksilla, arviota sahauksen tuotoista, kustannuksista ja kannattavuudesta, tehdä tarvittavat herkkyysanalyysit ja antaa suosituksia mahdollisista lopputuotteista.

4 TUTKIMUSTEN AINEISTOT JA MENETELMÄT

4.1 HARVENNUSMÄNNYN SAHAPUUKERTYMÄTUTKIMUS

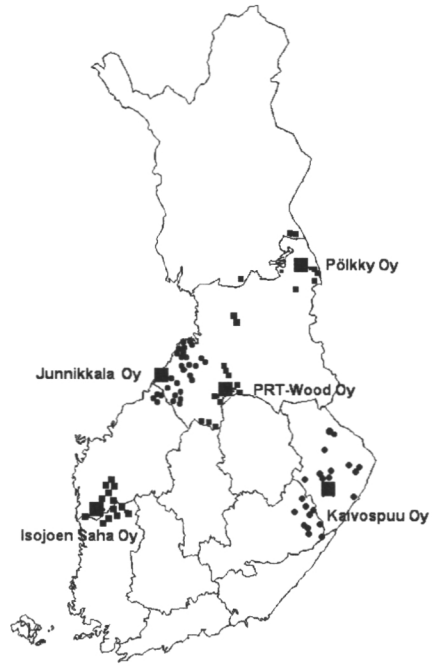
4.1.1 Metsiköiden jakaumat ja otanta

Harvennusmännyn sahapuukertymäaineistoon inventointiin viiden sahan hankinta-alueilta yhteensä 203 harvennusmäntymetsikköä, kunkin sahan hankinta-alueelta noin 40 kpl (kuva 1). Inventoidut metsiköt edustivat niitä kasvupaikkatyyppejä ja kehitysluokkia, joilta kunkin sahan hankkima puuraaka-aine on tavallisimmin peräisin tai joille ao. saha harkitsee tulevaisuudessa kohdistavansa puunhankintaansa. Metsiköiden ja niistä tutkittujen runkojen jakaumat kivennäis- ja turvemaiden kasvupaikkaluokittain ja puuston kehitysluokittain ovat taulukossa 1.

Turvemaiden suotyypit rinnastettiin vastaamaan kivennäismaiden metsätyyppejä Laineen ja Vasanderin (1990) esittämällä tavalla. Lisäksi Pohjanmaa-Kainuun ja Lapin metsätyypit rinnastettiin samalla tavalla vastaamaan Etelä-Suomen metsätyyppejä. Tutkimusaineistoon otettiin mukaan vain sellaisia mäntyvaltaisia metsiköitä, joiden kasvatuksessa oli tähdätty taimikosta lähtien laadukkaan sahapuun tuottamiseen. Inventoidut metsiköt edustivat selvästi keskimääräistä parempaa metsänhoidollista tasoa, joten tulokset eivät ole läpileikkaus koko maan harvennusmänniköistä.

Taulukko 1. Inventoidut harvennusmäntymetsiköt ja rungot kasvupaikkaluokittain ja -tyypeittäin ja puuston kehitysluokittain sekä osuudet rungoista.

Kehitysluokka	Kasvupaikkatyyppi				
	Lehtomainen kangas tai vast.	Tuore kangas tai vast.	Kuivahko kangas tai vast.	Kuiva kangas tai vast.	Yhteensä
			Metsiköitä / runkoja (kpl)		
			Kivennäismaat		
Ensiharvennus		15 / 573	59 / 2248	22 / 885	96 / 3706 (44 %)
Myöhempi harvennus		7 / 334	43 / 1983	10 / 465	60 / 2782 (33 %)
Yhteensä		22 / 907	102 / 4231	32 / 1350	156 / 6488 (77 %)
			Turvemaat		
Ensiharvennus		7 / 251	17 / 724	4 / 164	28 / 1139 (13 %)
Myöhempi harvennus	1 / 45	1 / 44	16 / 752	1 / 40	19 / 881 (10 %)
Yhteensä	1 / 45	8 / 295	33 / 1476	5 / 204	47 / 2020 (23 %)
Kaikki yhteensä	1 / 45 (1 %)	30 / 1202 (14 %)	135 / 5707 (67 %)	37 / 1554 (18 %)	203 / 8508 (100 %)



Kuva 1. Inventoitujen harvennusmäntymetsiköiden ja hankkeeseen osallistuneiden sahayritysten maantieteellinen sijainti.

4.1.2 Koealat ja niiden sijoittelu inventoitavaan metsikköön

Kivennäismaametsiköissä puuston mittaukset tehtiin ympyräkoealoilta, joiden koko oli ensiharvennuksissa 50 m^2 ja myöhemmissä harvennuksissa 200 m^2. Koealat, 2 - 5 kpl / metsikkö, sijoitettiin metsikköön sen pisimmän sivun suuntaiselle lävistäjälle tasaisin välein. Ojitetuilla turvemailla mittaukset tehtiin suorakaiteen muotoisilta koealoilta, joiden pitempi sivu ulottui ojan keskeltä saran puoliväliin. Suorakaiteen ojansuuntaisen sivun pituus määritettiin siten, että koealan pinta-alaksi muodostui vähintään 80 m^2. Reunavaikutuksen välttämiseksi koealat sijoitettiin vähintään puuston valtapituuden mukaiselle etäisyydelle kuvion reunasta. Koepuiksi valittiin kaikki koealoilla sijainneet puut, joiden rinnankorkeusläpimitta oli vähintään 7 cm. Mäntykoepuista mitattiin tai arvioitiin seuraavat tunnukset:

- rinnankorkeusläpimitta
- pituus
- alimman kuolleen oksan korkeus
- tuoreoksaraja (latvusraja / elävän latvuksen alaraja)
- paksuimman elävän oksan läpimitta
- paksuimman kuolleen oksan läpimitta
- sahauskelpoisen osan alkamis- ja loppumiskorkeudet
- rungon sahapuuosuutta rajoittavat viat sekä niiden alkamis- ja loppumiskorkeudet.

Rungon sahapuuosuutta määritettäessä mitattiin seuraavien vikojen alkamis- ja päättymiskorkeudet tai esiintymiskorkeus:

- monivääryys
- tyvimutka
- muu mutka
- tyvilenkous
- lenkous muussa rungon osassa
- ranganvaihdot
- poikaoksat
- yli 30 mm paksut oksat ja niiden laatu
- alle 15 cm:n välein sijainneet oksakiehkurat
- latvassa esiintyvät viat (katkeamat, monilatvaisuus)
- korot
- laho.

Suometsiköissä mitattiin turvekerroksen paksuus ja kunkin koepuun etäisyys sarkaojan keskeltä. Koealoilta ja koepuista mitatut ja arvioidut muuttujat on kuvattu yksityiskohtaisesti liitteessä 2.

4.1.3 Metsiköiden harvennuksen ja koepuiden apteerauksen simulointi

Tutkittujen metsiköiden puustot harvennettiin laskennallisesti tutkimusta varten tehdyllä tietokoneohjelmalla. Harvennusten pohjana käytettiin Niemistön (1992) puuston runkolukuun ja pohjapinta-alalla painotettuun keskiläpimittaan perustuvia harvennusmalleja, jotka on muunnettu pohjapinta-alaan ja valtapituuteen pohjautuvista harvennusmalleista (Luonnonläheinen... 1994).

Metsiköt harvennettiin laatuharvennuksen periaatteella pohjana alaharvennus (Luonnonläheinen... 1994). Poistettaviksi puiksi valittiin aluksi maastossa ehdottomasti poistettaviksi merkityt puut ja tämän jälkeen puustotietojen perusteella tarvittava määrä laadultaan heikoimpia puita tavoiterunkolukuun asti. Poistettavien puiden valintaan vaikuttivat alaharvennusperiaatteen soveltamisen nojalla myös rinnankorkeusläpimitta ja pituus. Kun puusto oli suhteellisen tasapituista ja -paksuista, harvennus toteutettiin ensisijaisesti koepuiden teknisen laadun perusteella. Harvennuksessa poistettiin myös vallitsevan latvuskerroksen puita, jos ne olivat huonolaatuisia

Metsikköinventointiaineistojen koepuut apteerattiin puutavaralajeiksi ns. perusapteeraus-vaihtoehdolla taulukon 2 mukaisten puutavaralajien pituus- ja läpimittayhdistelmien perusteella. Vertailulaskelmia varten harvennuksessa poistettava puusto apteerattiin ns. yleisellä puutavaralajien apteerausvaihtoehdolla (taulukko 3), jossa männyn puutavaralajeina olivat ainoastaan normaalitukki ja kuitupuu. Pikku- ja lyhyttukin apteerauksen vaikutusta hakkuukertymiin tutkittiin lisäämällä apteerausvaihtoehtoihin yksi kerrallaan näiden puutavaralajien pituusvaihtoehtoja.

Taulukko 2. Perusapteerauksessa käytettyjen puutavaralajien mittayhdistelmät (perusapteeraus - vaihtoehto).

Puutavaralaji	Lyhenne	Pituus (dm)	Latvaläpimitta (mm)
Mäntytukki	MäT	37 - 61	150+
Mäntytukki, tyvi	MäT tyvi	31 - 40	200+
Mäntypikkutukki	MäPT	31 - 46	120-149
Mäntylyhyttukki	MäLT	25 - 28	100-189
		31 - 34	100-149
Mäntykuitupuu	MäK	25, 31 - 55	70+
Kuusikuitupuu	KuK	25 - 55	80+
Koivukuitupuu	KoK	25 - 55	60+

Taulukko 3. Yleisten puutavaralajien apteerauksessa käytetyt puutavaralajien mittayhdistelmät (yleiset puutavaralajit -vaihtoehto).

	Pituus (dm)	Latvaläpimitta (mm)
Mäntytukki	37 - 61	150+
Mäntykuitupuu	25, 31 - 55	70+
Kuusikuitupuu	25 - 55	80+
Koivukuitupuu	25 - 55	60+

Runkovikojen vaikutuksia sahapuun hakkuukertymiin arvioitiin apteeraamalla aineisto siten, että vikojen vaikutusta ei otettu lainkaan huomioon ja katkonta tehtiin pelkästään puun pituudesta ja rinnankorkeusläpimitasta lasketun runkokäyrän perusteella. Tällöin sahapuuta saatiin laskennallisesti suurin mahdollinen määrä. Yksittäisten vikojen vaikutusta sahapuun hakkuukertymiin tutkittiin tämän jälkeen apteeraamalla aineisto siten, että kulloinkin tarkasteltavaa vikaa ei otettu apteerauksessa huomioon.

Apteeraustulosten laskennassa käytettiin arvoapteerausta, jossa puutavaralajeittaisille ja pölkyttäisille pituus-läpimittayhdistelmille asetettiin pölkyn arvoa tai haluttavuutta kuvaavat arvot. Puuston tavaralajirakenne laskettiin harventamattomien metsiköiden koko puustolle ja puutavaralajien hakkuukertymä harvennuksessa poistettaviksi tulleille rungoille. Laskelmissa käytetyt arvomatriisit (pistematriisit) on esitetty liitteessä 3.

4.2 HARVENNUSMÄNNYN HANKINTATUTKIMUS

4.2.1 Sisältö ja menetelmät

Harvennusmännyn hankintatutkimukset koostuivat korjuu-, kuljetus- ja tehdashintatutkimuksista. Korjuututkimus tehtiin empiirisen aineiston perusteella, kaukokuljetustutkimus teoreettisella laskelmalla ja tehdashintatutkimus yhdistämällä tulokset korjuu- ja kaukokuljetustutkimuksista. Tärkeimpänä tavoitteena oli selvittää lyhyttukin korjuun aiheuttamat tuottavuus- ja kustannusvaikutukset hakkuussa ja metsäkuljetuksessa.

Korjuututkimukseen valittiin neljä harvennusmäntyleimikkoa Metsähallituksen hallinnoimilta mailta Lieksasta. Leimikoista tuli saada tutkimuksen tavoitteiden

saavuttamiseksi kohtuullisen paljon mäntysahapuuta, joten aineisto edusti keskimääräistä parempaa harvennusmäntyleimikoiden metsänhoidollista ja teknistä laatua. Kukin leimikko jaettiin kahteen korjuulohkoon, joiden puustojen dimensiot ja tekninen laatu olivat mahdollisimman samanlaiset. Lohkoista toinen korjattiin käyttäen pelkästään niitä tukki- ja kuitupuun pituuksia, joilla Metsähallitus toimitti puuta Stora Enso Oyj:n Uimaharjun tehtaille, ja toinen käyttäen lisäksi lyhyitä tukkipituuksia pienissä latvaläpimittaluokissa (taulukko 4). Lohkot mitattiin ennen ja jälkeen hakkuun puustotietojen selvittämiseksi.

Kaikki lohkot korjattiin samalla hakkuukoneella ja kuormatraktorilla kuljettajien pysyessä tutkimuksen ajan samoina. Koneiden kuljettajat olivat verraten nuoria, mutta etenkin hakkuukoneen kuljettajan nopeaa oppimista uudelle puutavaralajille edesauttoi hänen aikaisempi työkokemus vastaavan laatuisen mäntyparrun hakkuusta.

Hakkuukoneen kuljettaja valitsi itse harvennuksessa poistettavat puut. Lyhyttukkilohkoilla kuljettaja päätti, täyttääkö runko lyhyttukin laatuvaatimukset. Näin ollessa rungosta tehtiin ensisijaisesti tätä puutavaralajia ja lopusta osasta normaalia tukkia ja kuitupuuta.

Rungot apteerattiin annettujen laatu- ja mittavaatimusten mukaisesti tukeiksi ja kuitupuuksi, jos lyhyen tukin mitta- ja laatuvaatimukset eivät täyttyneet. Käytetyt lyhyttukkipituudet olivat 2,6 ja 3,1 m ja latvaläpimitat 10 - 20 cm. Tukeissa ei sallittu monivääryyttä, mutkia, lenkoutta yli 1 cm/m, poikaoksia, lahoa, yli 30 mm:n kuivia oksia tai tervasrosoa.

Hakkuun työvaiheista mitattiin ajanmenekit jokaisesta korjuulohkosta tehdyn n. 1½ tunnin video-otoksen perusteella. Metsäkuljetuksen työvaiheiden ajanmenekit mitattiin koko työskentelyajalta. Hakkuuseen käytetty aika mitattiin työvaiheittain ja rungoittain. Runkokohtaiset tiedot (pituus, tilavuus, läpimitat ja puutavaralajit) kerättiin hakkuukoneen mittalaitteelta ja yhdistettiin ajanmenekkitietoihin. Hakkuun työaika jaettiin seuraaviin työvaiheisiin:

- alikasvoksen raivaus
- kaatosahaus
- rungon karsinta ja katkonta
- siirtyminen
- järjestelyt, häiriöt ja keskeytykset (aika poistettu tehoajasta)
- muut keskeytykset (aika poistettu tehoajasta).

Taulukko 4. Harvennusmänniköiden korjuukokeissa käytetyt puutavaralajit ja niiden mitat.

Korjuulohko	Latvaläpimitta (cm)	Pölkyn pituus (dm)
Lyhyttukkilohkot		
Mäntytukki	18+	40 – 55
Mäntylyhyttukki	10 - 20	26, 31
Mäntykuitupuu	7+	20, 27, 30 – 45
Normaalien puutavaralajien lohkot		
Mäntytukki	15+	40 – 55
Mäntykuitupuu	7+	20, 27, 30 – 45

Kuormatraktorin kuljettaja kuormasi ja kuljetti hakatut pölkyt tehokkaimmaksi katsomallaan tavalla. Ajourien pituus ja keskimääräinen kuljetusmatka mitattiin lankamittalaitteella. Varastolla kuorma purettiin pinoihin puutavaralajeittain. Kuljetettu puutavara mitattiin puutavaralajeittain hakkuukoneen mittalaitteen tuloksen perusteella. Metsäkuljetuksen työaika jaettiin seuraaviin työvaiheisiin:

- ajo tyhjänä
- kuormaus ja kuormausajo (siirtyminen kuormauksen aikana)
- ajo kuormattuna varastolle (ei sisällä kuormausta)
- purku (sisältää myös järjestelyjä pinolla)
- järjestelyt, häiriöt, keskeytykset, yms. (aika poistettu tehoajasta).

Hakkuukoneelta kerättiin Ponsse Oyj:n avustuksella runkokohtaiset stm-tiedot jokaisesta hakatusta rungosta ja näiden lisäksi mittaustulosteet leimikkokohtaisista puutavaralajikertymistä ja -jakaumista. Metsäkuljetuksen tutkimuksissa käytettiin lähtötietoina samoja puutavaralajeja ja hakkuukertymiä kuin hakkuusta oli hakkuukonemittauksen mukaan saatu.

Tutkimustuloksina saatiin hakkuun ja metsäkuljetuksen ajanmenekit suhteutettuna rungon kokoon työvaiheittain käytetyillä korjuutekniikoilla. Mittausten perusteella tehtiin vertailuja korjuun tuottavuudesta suhteessa leimikon puutavaralajeihin, kertymiin ja puuston ominaisuuksiin sekä edelleen laskettiin korjuukustannukset puutavaralajeittain yksioteharvesterin ja metsätraktorin keskimääräisillä arvioiduilla tuntikustannuksilla.

Puutavaran hakkuukustannukset jaettiin aiheuttamisperiaatteen mukaisesti kullekin puutavaralajille. Puutavaralajeittaiset kustannukset määräytyivät hakkuun vaatiman rungon rinnankorkeusläpimittaluokittaisen ajanmenekin ja hakatun puutavaralajin määrän perusteella korjuulohkoittain. Yksikkökustannusten laskennassa tarvittavat puutavaralajikertymät laskettiin rinnankorkeusläpimittaluokittain tukki-, lyhyttukki- ja kuitupuuosan tilavuuksien perusteella korjuulohkoittain. Mitattu tehoaika muunnettiin käyttöajaksi lisäämällä siihen alle 15 minuutin keskeytysten osuus kertoimella 1,197 ja käyttöajanmenekki muunnettiin vastaamaan pitkäaikaisen seurannan ajanmenekkiä kertoimella 1,276 (Kuitto ym. 1994).

Eri puutavaralajien hakkuun ajanmenekit laskettiin rungon rinnankorkeusläpimittaluokittain 2 cm:n luokkavälein. Näin voitiin tarkentaa laskelmia ottamalla huomioon koelohkojen puustojen erilaiset läpimittaluokkajakaumat. Menettely mahdollisti tulosten käytön kustannusten simulointiin muillakin kuin tutkituilla leimikoilla, joiden poistettavien puiden rinnankorkeusläpimittajakauma tunnetaan tai arvioidaan. Tätä käytettiin hakkuun tuottavuuksien ja kustannusten laskentaan tasoitetuilla puustotiedoilla.

Tutkimuksessa ei kerätty empiiristä aineistoa puutavaran kaukokuljetuksesta, vaan lyhyttukkimenetelmän vaikutuksia kaukokuljetuksen tuottavuuteen ja kustannuksiin selvitettiin aikaisempien tutkimusten pohjalta. Kaukokuljetuksen tuottavuuden ja kustannusten pohjana käytettiin Joensuun yliopistossa kehitettyä puunhankintakustannusten laskentamallia, johon on sisällytetty puutavaran autokuljetuksen laskentamalli (Salo & Uusitalo 2001). Puunhankintakustannusten laskentamallissa puutavara-auton keskimääräisen kuormakoon laskennan taustalla oli koh-

deleimikon hakkuupoistuman läpimittajakauma, jonka perusteella lasketaan läpimittaluokittainen, kokonaistilavuusosuuksilla painotettu kuormakoko.

Harvennusmännyn hankinnan kustannukset laskettiin hakkuu-, metsä- ja kaukokuljetuskustannusten sekä puutavaralajeittaisten kantohintojen summana. Vertailut tehtiin tutkittujen korjuumenetelmien ja harvennusmäntyleimikkotyyppien välillä ilman puunhankinnan työnjohtokustannuksia tai organisaatiosta aiheutuvia kustannuksia.

4.2.2 Koeleimikoiden puustotiedot

4.2.2.1 Leimikoiden yleispiirteitä

Ensiharvennusten korjuukohteina oli kaksi puustoltaan lievästi erilaista leimikkoa. Kummatkin kohteet edustivat metsänhoidollisesti hyvää tasoa, joissa tarvittavat taimikonhoitotoimenpiteet oli tehty ajallaan, mutta ensiharvennusta ei oltu vielä tehty. Taulukkoon 5 on koottu leimikko- ja runkotiedot keskiarvoina korjuulohkoittain. Ensiharvennuskohteiden lyhyttukkilohkoilla puusto oli järeämpää ja runkoluvultaan harvempaa kuin normaalien puutavaralajien lohkoilla.

Normaaleilla puutavaralajeilla korjattujen lohkojen keskimääräistä pienempi poistuma johtui toisen lohkon pienestä poistumasta, joka puolestaan johtui harvasta ja pienestä puustosta. Lyhyttukkilohkoilla mäntykuitupuuta oli hakkuukertymän tilavuudesta 49 % ja pölkkyjen yhteispituudesta 65 %. Lyhyttukkia oli vastaavasti hakkuukertymän tilavuudesta 44 % ja pölkkyjen yhteispituudesta 33 %.

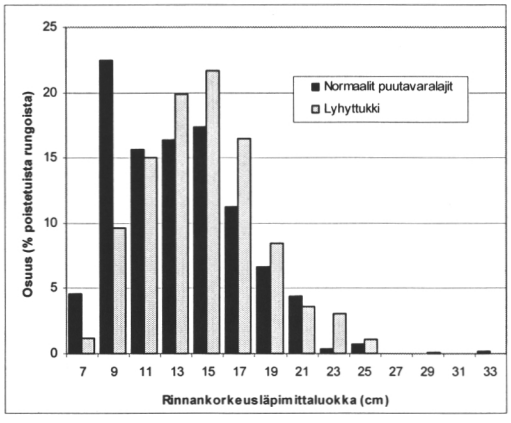
Kuvassa 2 on esitetty ensiharvennusleimikoilta hakattujen mäntyjen rinnankorkeusläpimittajakaumat. Jakauma painottui lyhyttukkilohkoilla hieman järeämpiin luokkiin (mediaaniluokka 15 cm) kuin normaaleilla puutavaralajeilla hakatuilla lohkoilla (mediaaniluokka 13 cm). Lisäksi normaalien puutavaralajien lohkojen läpimittajakaumassa oli huomattava keskittymä läpimittaluokassa 9 cm.

Myöhempien harvennusten (kuva 3) korjuukohteina oli kaksi puustoltaan erilaista leimikkoa, joissa harvennukset oli tehty metsänhoitosuositusten mukaisesti. Kummatkin leimikot edustivat erittäin hyvää tasoa metsänhoidollisen tilan ja puun laadun suhteen. Normaalien puutavaralajien lohkoilla puusto oli selvästi järeämpää ja runkoluvultaan harvempaa kuin lyhyttukkitekniikkalohkoilla. Normaaleilla puutavaralajeilla hakatuilla lohkoilla poistetun puuston läpimittajakauma painottui suurempiin läpimittaluokkiin kuin lyhyttukkilohkoilla, ja poistettujen runkojen käyttöosan tilavuudet olivat näillä keskimäärin 215 ja 165 dm^3/runko.

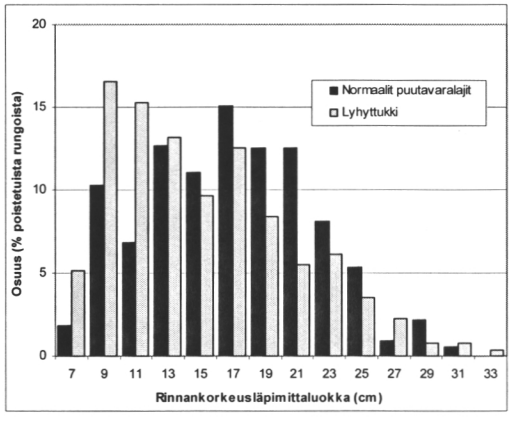
Myöhemmissä harvennuksissa poistettujen runkojen läpimittajakaumat painottuivat lyhyttukkilohkoilla selvästi pienempiin luokkiin kuin normaaleilla puutavaralajeilla hakatuilla lohkoilla, sillä läpimittaluokkien mediaani oli lyhyttukkilohkoissa luokassa 17 cm ja normaaleilla puutavaralajeilla hakatuilla lohkoilla luokassa 21 cm. Pienimmissä läpimittaluokissa (7 - 13 cm) poistettavia puita oli lyhyttukkilohkoilla enemmän kuin normaaleilla puutavaralajeilla hakatuilla lohkoilla.

Taulukko 5. Korjuukokeiden leimikkotunnuksia korjuulohkojen keskiarvoina ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa.

	Ensiharvennukset		Myöhemmät harvennukset	
	Lyhyttukki	Normaali	Lyhyttukki	Normaali
Pinta-ala (ha)	1,550	1,421	2,000	2,089
Runkoluku (kpl/ha)	1467	1650	1175	613
Tilavuus (m^3/ha)	225	180	217	211
Pohjapinta-ala (m^2/ha)	30	27	28	25
Rinnankorkeusläpimitta (cm)	15,0	13,2	16,6	21,7
Pituus (m)	14,3	13,4	16,1	18,2
Käyttöosan tilavuus (dm^3/runko)	121	102	165	215
Käyttöosan pituus (m)	9,3	8,4	10,3	12,2
Tuoreoksaraja (m)	7,6	7,0	8,6	10,2
Kuivaoksaraja (m)	0,9	0,6	3,1	4,0
Poistetut rungot (kpl/ha)	484	382	310	272
Hakkuukertymä (m^3/ha)	59	39	51	58
- mäntytukki (m^3/ha)	3	3	12	27
- mäntylyhyttukki (m^3/ha)	26	-	24	-
- mäntykuitupuu (m^3/ha)	29	36	15	31



Kuva 2. Ensiharvennusleimikoissa poistettujen mäntyjen rinnankorkeusläpimittaluokkajakaumat korjuulohkoittain.

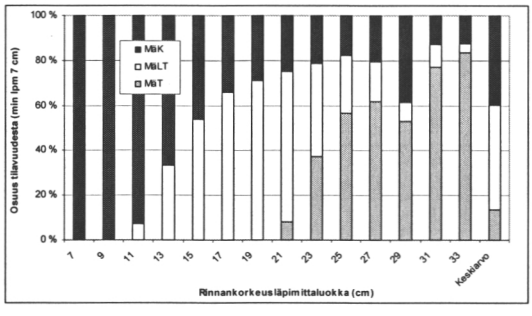


Kuva 3. Myöhemmissä harvennuksissa poistettujen mäntyjen rinnankorkeusläpimittaluokkajakaumat korjuulohkoittain.

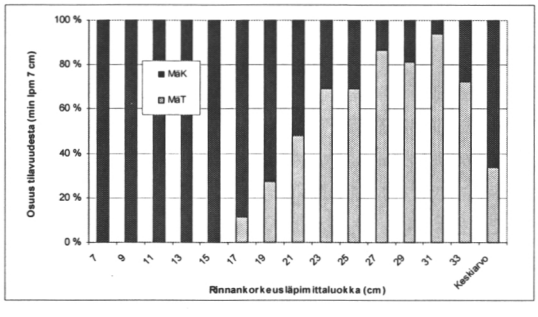
4.2.2.2 *Hakkuun puutavaralajijakaumat*

Kuvista 4 ja 5 ilmenevät puutavaralajien osuudet rinnankorkeusläpimittaluokittain lyhyttukkitekniikalla ja normaaleilla puutavaralajeilla hakatuilla lohkoilla. Tulokset olivat todellisia hakkuun kertymiä, joten niissä ilmenevät myös rungon teknisten vikojen vaikutukset rungon käyttöosassa. Hakkuun kokonaiskertymään ja rungon käyttöosan tilavuuteen vioilla ei ollut juurikaan vaikutusta. Saadut tulokset olivat ominaisia puustoltaan tavanomaista paremmille harvennusmäntyleimikoille ja käytetyille puutavaralajeille sekä niiden priorisoinneille toisiinsa nähden, eikä niitä voida siten yleistää käytännön keskimääräisiin harvennusmäntyleimikoihin.

Normaalien puutavaralajien lohkoilla ensisijaisena tarkoituksena oli hakata mäntytukkia ja toissijaisesti mäntykuitupuuta. Lyhyttukkilohkoilla hakattiin ensin läpimitan ja laadun rajoissa männyn lyhyttukkia, sitten tukkia ja viimeisenä kuitupuuta. Tällä priorisoinnilla pyrittiin saamaan aineistoon mahdollisimman paljon lyhyttukkia korjuututkimuksen tuottavuus- ja kustannusanalyysejä varten, sen sijaan että olisi maksimoitu hakatun puuston arvoa. Hakattujen runkojen käyttöosan tilavuus rinnankorkeusläpimittaluokittain hakkuukonemittauksen mukaan on esitetty liitteessä 4.



Kuva 4. Puutavaralajien osuudet mäntyrungon käyttöosan tilavuudesta rinnankorkeusläpimittaluokittain korjuukokeiden lyhyttukkilohkoilla hakkuukonemittauksen mukaan. MäT = mäntytukki, MäLT = mäntylyhyttukki, MäK = mäntykuitupuu. Käyttöosan minimiläpimitta 7 cm.



Kuva 5. Puutavaralajien osuudet mäntyrungon käyttöosan tilavuudesta rinnankorkeusläpimittaluokittain korjuukokeiden normaaleilla puutavaralajeilla hakatuilla lohkoilla hakkuukonemittauksen mukaan. MäT = mäntytukki, MäK = mäntykuitupuu. Käyttöosan minimiläpimitta 7 cm.

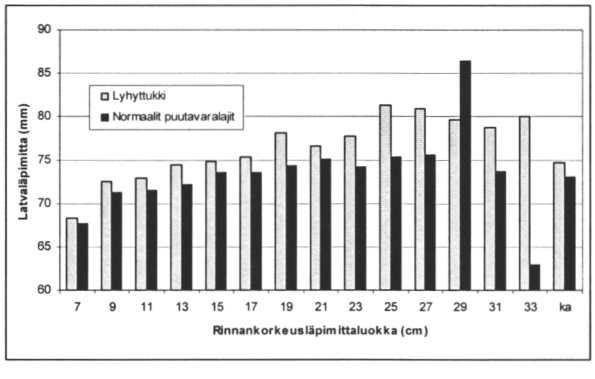
4.2.2.3 *Viimeisen pölkyn latvaläpimitta sekä rungon käyttöosan pituus ja tilavuus*

Hakkuussa käytetty puutavaralajivalikoima vaikutti olennaisesti runkojen rinnankorkeusläpimittaluokittaiseen käyttöosan pituuteen ja tilavuuteen sekä viimeisen pölkyn latvaläpimittaan. Koska hakkuun tuottavuuden laskenta perustui hakkuukoneen runkotiedoista saatuun rungon käyttöosan pituuteen ja sen jakautumiseen puutavaralajeittaisiin pituus- ja tilavuusositteisiin, näillä seikoilla oli vaikutusta myös hakkuun tuottavuuteen ja kustannuksiin.

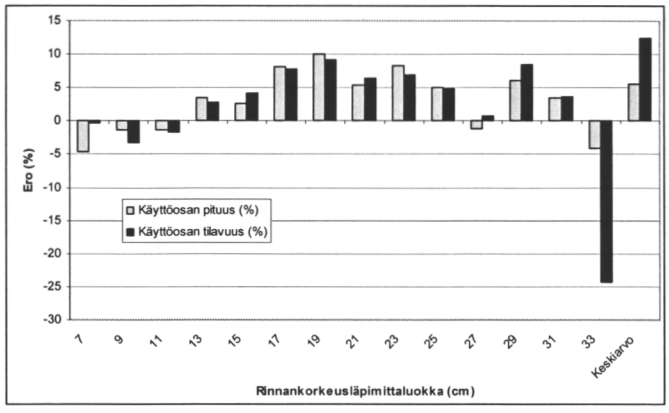
Viimeisen pölkyn keskimääräinen latvaläpimitta oli lähes jokaisessa läpimittaluokassa lyhyttukkilohkoilla 1 - 4 mm suurempi kuin normaaleilla puutavaralajeilla hakatuilla lohkoilla (kuva 6). Tästä seurasi, että normaaleilla puutavaralajeilla hakatuilla lohkoilla rungon käyttöosan läpimittaluokittainen tilavuus oli keskimäärin 17,5 dm^3 ja pituus 0,54 m suurempi kuin lyhyttukkilohkoilla (ks. myös liite 4). Tällä oli normaaleilla puutavaralajeilla hakatuilla lohkoilla negatiivinen vaikutus tuloksiin hakkuun tuottavuudessa, sillä rungon latvaosasta saadun kuitupuuosan tilavuus oli pieni pituusyksikköä ja sen hakkuuseen käytettyä aikayksikköä kohti.

Kuvassa 7 on esitetty on rinnankorkeusläpimittaluokittain korjuulohkojen väliset suhteelliset erot runkojen käyttöosan pituudessa ja tilavuudessa. Suhteellinen ero rungon käyttöosan tilavuudessa ja pituudessa normaaleilla puutavaralajeilla hakattujen lohkojen hyväksi oli suurimmillaan läpimittaluokissa 17 - 19 cm (8 - 10 %). Normaaleilla puutavaralajeilla hakatuilla lohkoilla rungon käyttöosan pituus oli keskimäärin 5,6 % ja käyttöosan tilavuus 12,4 % suurempi kuin lyhyttukkilohkoilla.

Rungon käyttöosan tilavuus- ja pituusero hakkuumenetelmien välillä johtui pääasiassa siitä, että hakattaessa lyhyttukkia 10 cm:n minimilatvaläpimittaan saakka hakkuukoneen rungon muotoa ennustavan apteerausautomatiikan mukaan ei joissakin tapauksissa enää saada tämän läpimitan alapuolelta täysimittaista kuitupuupölkkyä. Siksi rungon käyttöosat jäivät lyhyttukkilohkoilla lyhemmiksi, tilavuudet pienemmiksi ja latvaläpimitat suuremmiksi kuin normaaleilla puutavaralajeilla hakatuilla lohkoilla.



Kuva 6. Hakattujen runkojen viimeisen pölkyn keskimääräinen latvaläpimitta korjuukokeiden lyhyttukkilohkoilla ja normaaleilla puutavaralajeilla hakatuilla lohkoilla rinnankorkeusläpimittaluokittain hakkuukonemittauksen mukaan.



Kuva 7. Korjuukokeiden lyhyttukkilohkoilla ja normaaleilla puutavaralajeilla hakatuilla lohkoilla poistettujen runkojen käyttöosan pituuden ja tilavuuden suhteelliset erot rinnankorkeusläpimittaluokittain hakkuukonemittauksen mukaan.

4.3 HARVENNUSMÄNNYN SAHAUSTUTKIMUKSET

4.3.1 Kaatokoepuiden tukkien ja rungon konstruointi saheviipaleista

Inventoiduista harvennusmäntymetsiköistä valittiin 40 kpl VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikalle toimitettujen kaatokoepuiden hankintaa varten. Aineisto sisälsi kahdeksan metsikköä kunkin sahan hankinta-alueelta siten, että kaksi metsikköä edusti kutakin ao. sahan tutkimuksissa priorisoimaa leimikkotyyppiä (ensiharvennus / muu harvennus, kasvupaikkaluokka ja -tyyppi). Kaatokoepuita otettiin kunkin hankinta-alueen kustakin metsikkötyypistä 10 kpl eli yhteensä 200 kpl (5 kaatokoepuuta / metsikkö). Rungoista apteerattiin ja katkottiin yhteensä 420 pölkkyä. Kaatokoepuumetsiköiden perustiedot ja keskimääräiset puustotunnukset on esitetty liitteessä 5.

Kaatokoepuut valittiin kuviolla inventointitiedoista lasketun metsikön puuston läpimittaluokkajakauman perusteella. Kaatokoepuuksi valittavan rungon minimirinnankorkeusläpimitta oli 12 cm ja jokaisesta valitusta rungosta tuli saada vähintään yksi 2,4 metriä pitkä, kuorelliselta latvaläpimitaltaan vähintään 8 cm:n paksuinen ja sahapuun minimilaatuvaatimukset täyttävä pölkky. Ennen kaatoa koepuista tehtiin samat mittaukset ja arvioinnit kuin metsikköinventoinneissa. Lisäksi kaadon jälkeen mitattiin seuraavat tunnukset:

- läpimitta 6 metrin korkeudelta (d_{60})
- rungon 8 cm:n läpimittaa vastaava korkeus
- paksuimman elävän oksan läpimitta ja sijaintikorkeus
- paksuimman kuolleen oksan läpimitta ja sijaintikorkeus
- ikä kannosta.

Kaatokoepuiden tukeista sahatut saheet kuvattiin molemmilta lapepinnoilta tukin ja rungon tarkan geometrian ja sisäisen oksaisuuslaadun määritystä varten VTT:n konenäköjärjestelmällä (esim. Fröblom 2001). Tukkien ja runkojen konstruointi saheista koostui seuraavista vaiheista:

1) tukit sahattiin pituussuunnassa keskihalkaisulla 23 mm paksuiksi saheiksi
2) saheiden lapepinnoilta mitattiin geometrinen muoto, oksatiedot ja muut viat, jotta saheen numeerinen esittäminen oli mahdollista
3) numeerisesti kuvatuista saheista koottiin uudelleen alkuperäinen "virtuaalinen tukki" tukin konstruointimallilla
4) "virtuaalisista tukeista" koottiin uudelleen alkuperäinen "virtuaalinen runko".

Metlassa laskettiin konstruoidusta kaatokoepuuaineistosta runkojen sisäoksien ominaisuuksia oksalaaduittain, rinnankorkeusläpimittaluokittain, kasvupaikkatyypeittäin ja -luokittain. Kaikki rungon sisäiset ja rungon pinnalta mitatut oksien läpimitat on ilmoitettu kuorettomina ja ulko-oksien läpimitat kuorellisina. Lisäksi mitattiin oksien suuntautuneisuus eri ilmansuuntiin ja oksakiehkuroiden välinen etäisyys.

4.3.2 Sahatavaran tai aihion arvosaannon määrittäminen

Saheiden ja aihioiden arvosaannon määrittämisessä käytettiin VTT:n WoodCim® – simulointimallia (esim. Fröblom 2001). Tässä määritetään aluksi puulaji ja saheiden ja aihioiden dimensiot eli paksuus, leveys ja pituus. Aihioiden laatumääritteinä voivat olla vajaasärmät, poikki- ja vinosyisyys sekä oksaisuusrajoitukset (oksan koko, laatu ja kappalemäärä). Oksarajoitukset (oksan koko oksalaaduittain, mustien, kuolleiden ja terveiden oksien sallittu lukumäärä sekä erilaatuisten helmioksien sallitut lukumäärät) voidaan asettaa molemmille lappeille ja syrjille ja kullekin syrjälle erikseen. Esimerkiksi kappaleen yksi tai kaksi sivua voivat olla oksattomia ja muille sivuille ei aseteta lainkaan vaatimuksia. Perinteisen sahatavaran dimensiot ja laadut ovat hyvin määriteltyjä, mutta malliin tarvitaan lisäksi:

- sahatavaran lajitteluohjeet, oksat, sallitut vajaasärmät ja dimensiot
- sahatavaran ja sivutuotteiden hinnat
- tukkiluokittaiset asetetiedot sekä tiedot viipaleiden sahauksesta aihioiksi, sahatavaraksi tai molemmiksi
- sahausprosessin tiedot, sahausrako, märkämitat ja nimellismitat.

Sahatavaran laatu määritettiin sahatuottoisena ja täyssärmäisenä. Sahatavaralaatuina käytettiin Pohjoismainen sahatavara –laatulajitteluohjeen (1994) mukaisia laatuluokkia A (alalaadut A1 – A4), B, C ja D sekä terveoksaista laatua. Tehdyissä simulointilaskennoissa WoodCim® -mallin lähtöarvotietoina käytettiin taulukossa 6 ja liitteissä 6 ja 7 esitettyjä parametreja.

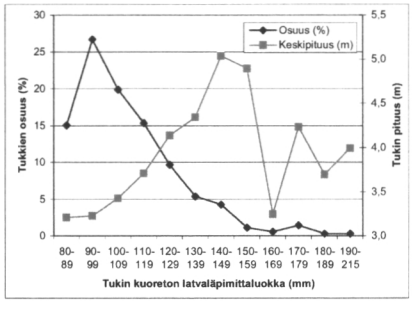
Simuloinnit tehtiin asettamatta tavoitteita tai rajoituksia tuotteiden määrille. Sahaussimuloinneissa käytettiin sahojen hankinta-alueilta kaadettuja kaatokoepuita,

jotka oli katkottu simuloiden Metlan apteeraussimulaattorilla samoilla puutavaralajeilla ja arvomatriiseilla kuin harvennusmännyn puutavaralajikertymiä laskettaessa (taulukko 2, liite 3). Näissä simuloinneissa käytettyjen tukkien tukkiluokittaiset keskipituudet ja osuudet on esitetty kuvassa 8.

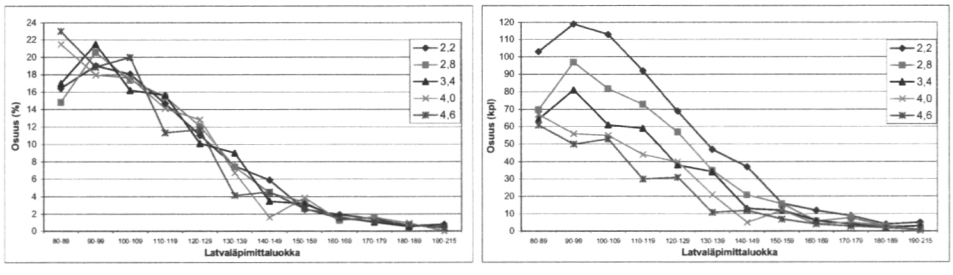
Tukin pituuden vaikutusta sahatavaran ja aihioiden saantoon, laatuluokkajakaumaan ja sahauksen taloudelliseen tulokseen simuloitiin kaatokoepuista muodostetusta runkopankkiaineistosta VTT:n WoodCim® -simulaattorilla apteeratuilla tukeilla. Runkopankkiaineiston sahaussimuloinnit perustuivat kaatokoepuihin, mutta tukkipituuden vaikutuksia koskeneissa laskelmissa runkopankkiaineiston mäntyrungot apteerattiin vuoron perään 2,2, 2,8, 3,4, 4,0 ja 4,6 m:n tukkipituuksiin. Sahaus simuloitiin tämän jälkeen tukkijoukon mukaisille tukeille, muuten käytettiin aiemmin esitettyjä lähtöarvoja. Tukkijoukon jakautuminen latvaläpimittaluokkiin kunkin tukkipituuden tarkastelussa on esitetty kuvassa 9.

Taulukko 6. Sahaussimuloinneissa käytetyt perusparametrit.

Muuttuja	
Sahatavaran hinnat (€/m³)	118, 151, 185, 219 (tuotannon keskihinnat)
Tukin hinta sahalla, sis. tukkien käsittelykustannukset (€/m³)	25, 34, 42 (perushinta), 50
Sahausrako (mm)	3,6 ja 4,0 (särmäys)
Sahauskustannukset	Kuvan 62 mukaiset tukin pituudesta ja läpimitasta riippuvat kustannukset
Elementtitukit	Tukkipituudet 22, 28, 34, 40 ja 46 dm simuloitiin erikseen
Sydäntavara- ja lauta-asetteet, laadut, hinnat	Lähtöarvot esitelty liitteessä 7
Hake, puru, kuori (€/m³)	34, 9, 3



Kuva 8. Kaatokoepuista Metlan apteeraussimulaattorilla muodostettujen tukkien osuudet ja keskipituudet kuorettoman latvaläpimittaluokan mukaan. Tukkeja yhteensä 420 kpl.



Kuva 9. Runkopankkiaineistosta apteerattujen tukkien suhteelliset ja absoluuttiset frekvenssijakaumat kuorettoman latvaläpimittaluokan (mm) mukaan eri tukkipituuksia (m) koskeneissa simuloinneissa.

5 TULOKSET

5.1 HARVENNUSMÄNNYN PUUTAVARALAJIKERTYMÄT JA -JAKAUMAT

5.1.1 Metsiköiden puustotunnukset

Tutkimuksen aluksi laskettiin metsiköiden keskimääräiset puustotiedot harventamattomasta inventointiaineistosta erikseen kivennäismaille (taulukko 7) ja turvemaille (taulukko 8), jotta saatiin kuva tutkimusaineiston antamista mahdollisuuksista ja rajoitteista sekä voitiin muodostaa kokonaiskäsitys harvennusmänniköiden puunhankinnan toimintaympäristöstä. Metsiköiden kaikkien koepuiden läpimittajakaumat on esitetty erikseen liitteessä 8.

Turvemailla rungot olivat pääsääntöisesti pieniläpimittaisempia ja lyhyempiä ja rungon keskitilavuus pienempi kuin kivennäismailla. Myöhemmät harvennuskohteet olivat turvemailla runkoluvultaan huomattavasti tiheämpiä kuin vastaavan ravinteikkuustason kivennäismailla. Sitä vastoin ensiharvennuskohteilla runkoluku oli turvemailla pienempi kuin vastaavilla kivennäismailla. Kuivaoksaraja oli kaikilla kohteilla alhaalla ja oksaton tyviosa lyhyt. Tuoreoksaraja (latvusraja) sijaitsi kivennäis- ja turvemailla samalla korkeudella. Turvemailla rungon suurin elävä oksa ja myös suurin kuiva oksa olivat keskimäärin paksumpia kuin vastaavilla kiven-

Taulukko 7. Metsiköiden keskimääräiset puustotiedot kivennäismaiden metsikköinventoinneissa metsätyypeittäin.

	Tuore kangas		Kuivahko kangas		Kuiva kangas	
	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.
Pohjapinta-ala (m^2/ha)	27	24	23	24	21	22
Runkoluku (kpl/ha)	2030	931	1988	1040	2103	989
Rinnankorkeusläpimitta (cm)	13,2	16,5	13,1	16,5	12,5	16,4
Pituus (m)	12,6	13,6	12,2	14,4	11,5	13,3
Rungon tilavuus (dm^3)	100	170	98	182	83	163
Kuivaoksaraja (m)	0,5	1,8	1,3	2,1	1,1	2,8
Tuoreoksaraja (m)	7,0	7,6	6,6	8,4	5,7	7,0
Latvussuhde (%)	43	46	46	43	49	45
Paksuin elävä oksa (mm)	22	30	23	26	21	25
Paksuin kuiva oksa (mm)	19	22	19	20	17	22

Taulukko 8. Metsiköiden keskimääräiset puustotiedot turvemaiden metsikköinventoinneissa suotyypeittäin.

	Ruohoturvekangas	Mustikka-turvekangas		Puolukka-turvekangas		Varpu-turvekangas	
	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.
Pohjapinta-ala (m^2/ha)	32	23	26	25	27	21	30
Runkoluku (kpl/ha)	1786	2048	1781	1824	1307	1856	1905
Rinnankorkeusläpimitta(cm)	15,7	13,0	12,7	12,7	15,8	12,1	14,9
Pituus (m)	15,0	12,5	10,9	11,3	13,7	10,7	13,4
Rungon tilavuus (dm^3)	169	98	83	89	155	75	132
Kuivaoksaraja (m)	1,5	1,1	1,8	1,7	2,6	1,2	0,9
Tuoreoksaraja (m)	8,8	7,1	5,2	5,9	8,2	6,2	7,9
Latvussuhde (%)	43	43	51	47	42	46	36
Paksuin elävä oksa (mm)	31	24	24	26	27	25	21
Paksuin kuiva oksa (mm)	22	20	19	19	21	19	18

näismailla. Taulukoihin 9 ja 10 on koottu poistettujen puiden keskeisiä dimensioja puutavaralajirakennetunnuksia. Poistetun puuston läpimittajakaumat on kuvattu erikseen liitteessä 8. Turvemailla poistettu puusto oli pääsääntöisesti läpimitaltaan pienempää ja lyhyempää ja rungon keskikoko oli pienempi kuin kivennäismailla. Myös runkojen sahapuuprosentti oli turvemailla 4 - 16 prosenttiyksikköä alhaisempi kuin kivennäismailla.

Harvennusten voimakkuutta voidaan arvioida vertaamalla hakkuukertymiä ja harventamattomien metsiköiden kokonaispuumääriä kasvupaikka- ja kehitysluokittain. Tutkimusaineiston simuloidussa harvennuksessa poistettiin harvennusvaiheesta ja kasvupaikkatyypistä riippuen 16 - 44 % puuston kokonaistilavuudesta kohdentaen poistuman painopistettä pieniläpimittaisimpiin ja vikoja eniten sisältäneisiin runkoihin.

Taulukko 9. Harvennuksessa poistetun puuston keskimääräisiä tunnuslukuja kivennäismailla metsätyypeittäin.

	Tuore kangas		Kuivahko kangas		Kuiva kangas	
	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.
Rinnankorkeusläpimitta (cm)	11,3	13,9	11,3	13,6	11,1	13,0
Pituus (m)	11,8	12,1	11,5	13,0	11,0	11,8
Rungon tilavuus (dm^3/r)	68	117	70	117	62	95
Poistettuja runkoja (kpl/ha)	1052	458	1029	405	1300	357
Sahapuuprosentti (%)	6	16	10	14	10	19

Taulukko 10. Harvennuksessa poistetun puuston keskimääräisiä tunnuslukuja turvemailla suotyypeittäin.

	Ruoho-turvekangas	Mustikka-turvekangas		Puolukka-turvekangas		Varpu-turvekangas	
	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.
Rinnankorkeusläpimitta (cm)	12,6	10,9	9,8	10,1	12,8	10,7	11,7
Pituus (m)	13,7	11,6	9,6	10,2	12,2	10,2	12,1
Rungon tilavuus (dm^3/r)	95	67	44	50	95	56	75
Poistettuja runkoja (kpl/ha)	1071	1019	850	856	603	1114	714
Sahapuuprosentti (%)	8	10	0	3	8	6	10

5.1.2 Apteeraus lyhyillä tukkipituuksilla ja pienillä läpimitoilla

5.1.2.1 Koko puuston puutavaralajirakenne

Metsikköinventointien koepuiden ns. perusapteerausvaihtoehdossa käytettiin liitteessä 3 esitettyjen puutavaralajien arvomatriisien pituus- ja läpimittayhdistelmiä sekä näiden yksikköarvoja. Arvomatriisien arvot ovat viitteellisiä, ja ne eivät siten vastaa suoranaisesti puutavaralajien todellisia kantohintoja, tehdashintoja tai haluttavuutta. Puutavaralajien läpimitta- ja pituusluokkien välisillä sisäisillä arvoeroilla ohjataan kertymän jakaumaa simuloinneissa haluttuun, tässä tapauksessa kuvitteelliseen suuntaan. Puutavaralajien välisillä hintaeroilla ohjataan rungon katkontaa siten, että rungon arvo maksimoituu apteerauksen simuloinneissa annetuilla arvoilla.

Taulukoissa 11 ja 12 on esitetty metsikköinventointien harventamattomien puustojen keskimääräiset puutavaralajirakenteet kasvupaikkatyypeittäin ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa erikseen kivennäis- ja turvemaille perusapteerausvaihtoehdon mukaisilla puutavaralajeilla simuloituna. Kivennäismaiden ensiharvennuskohteilla puustot olivat tyypillisiä ko. kehitysluokan metsiköille, mutta myöhemmillä harvennuskohteilla puuston hehtaarikohtainen tilavuus oli tavanomaista pienempi. Ensiharvennuskohteet olivat suhteellisen runsaspuustoisia, joista oli mahdollista saada pieniläpimittaista sahapuuta. Kaikki myöhempien harvennusten kohteet eivät puolestaan olleet metsänhoidollisesti kiireellisiksi luokiteltavia harvennuskohteita, varsinkaan turvemailla.

Harvennusmetsien kokonaispuuston käyttöosan tilavuudesta oli sahauskelpoista puuta keskimäärin 27 %, ensiharvennuksissa 23 % ja myöhemmissä harvennuksissa 34 %. Kivennäismailla sahauskelpoisen puun osuus oli ensiharvennuskohteilla keskimäärin noin 25 % kasvupaikkatyypistä riippumatta ja myöhempien harvennusten kohteilla keskimäärin 37 % (metsikkötyyppien vaihteluväli 29 - 45 %). Sahapuun osuus kasvoi erityisesti myöhemmissä harvennuksissa, kun kasvupaikka muuttui karummaksi, mikä johtui runkojen paremmasta teknisestä laadusta

Taulukko 11. Harventamattoman puuston keskimääräinen puutavaralajirakenne ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa kivennäismailla metsätyypeittäin. Perusapteeraus.

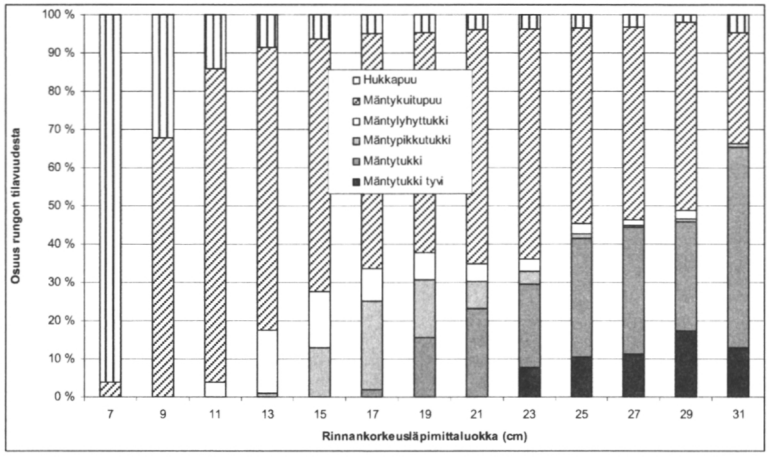
Puutavaralaji	Tuore kangas		Kuivahko kangas		Kuiva kangas	
	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.
	Tilavuus, m³/ha (%)					
Mäntytukki	9 (5)	17 (11)	8 (5)	27 (16)	4 (3)	29 (20)
Mäntytukki, tyvi	0 (0)	5 (3)	0 (0)	6 (3)	0 (0)	6 (4)
Mäntypikkutukki	16 (9)	13 (8)	15 (9)	19 (11)	15 (10)	17 (12)
Mäntylyhyttukki	19 (10)	11 (7)	18 (11)	13 (8)	21 (13)	14 (9)
Sahapuuta	*44 (24)*	*46 (29)*	*41 (26)*	*65 (38)*	*40 (26)*	*66 (45)*
Mäntykuitupuu	136 (76)	105 (67)	118 (74)	102 (60)	114 (74)	80 (54)
Kuusikuitupuu	0 (0)	4 (3)	1 (1)	1 (1)	0 (0)	0 (0)
Koivukuitupuu	0 (0)	2 (1)	0 (0)	2 (1)	0 (0)	1 (1)
Yhteensä	180	157	160	170	154	147

Taulukko 12. Harventamattoman puuston keskimääräinen puutavaralajirakenne ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa turvemailla suotyypeittäin. Perusapteeraus.

Puutavaralaji	Ruohoturvekangas	Mustikkaturvekangas		Puolukkaturvekangas		Varputurvekangas	
	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.
	Tilavuus, m³/ha (%)						
Mäntytukki	46 (16)	5 (3)	0 (0)	5 (4)	18 (10)	4 (3)	24 (10)
Mäntytukki, tyvi	0 (0)	3 (2)	0 (0)	1 (1)	3 (2)	3 (2)	0 (0)
Mäntypikkutukki	29 (10)	15 (8)	10 (7)	8 (6)	17 (9)	6 (5)	27 (11)
Mäntylyhyttukki	12 (4)	10 (5)	12 (9)	10 (7)	12 (6)	13 (11)	8 (4)
Sahapuuta	*87 (30)*	*33 (18)*	*22 (16)*	*24 (18)*	*50 (27)*	*26 (21)*	*59 (25)*
Mäntykuitupuu	181 (63)	136 (76)	106 (79)	107 (78)	122 (66)	94 (74)	179 (75)
Kuusikuitupuu	0 (0)	5 (3)	0 (0)	1 (1)	0 (0)	3 (2)	0 (0)
Koivukuitupuu	18 (7)	6 (3)	6 (5)	4 (3)	12 (7)	4 (3)	0 (0)
Yhteensä	286	180	134	136	184	127	238

(luku 5.1.5.1). Turvemailla sahauskelpoista puuta oli ensiharvennuksissa keskimäärin 17 % eli 8 prosenttiyksikköä vähemmän kuin kivennäismailla ja myöhemmissä harvennuksissa keskimäärin 26 % eli 11 prosenttiyksikköä vähemmän kuin kivennäismailla (metsikkötyyppien vaihteluväli 16-30 %).

Kuvassa 10 on esitetty aineiston mäntypuuston kokonaistilavuuden jakaumat rinnankorkeusläpimittaluokittain ns. perusapteerausvaihtoehdon mukaisiin puutavaralajeihin, kun runkojen viat otettiin huomioon apteerauksessa. Sahauskelpoisen rungonosan tilavuusosuuden raja kulkee mäntykuitupuun ja mäntylyhyttukin välistä rajapintaa pitkin. Rungon sahauskelpoinen tilavuusosuus kasvoi läpimittaluokan 11 cm kolmesta prosentista tasaisesti läpimittaluokan 19 cm 36 prosenttiin. Samalla hukkapuun osuus pieneni tasolta 15 % tasolle 5 %. Apteerauksessa saatiin suhteellisesti eniten lyhyttukkia läpimittaluokissa 13 - 15 cm, pikkutukkia läpimittaluokissa 15 - 19 ja normaalikokoista tukkia läpimittaluokasta 19 cm ylöspäin. Tyvitukkia oli saatavissa vasta läpimittaluokasta 23 cm ylöspäin.



Kuva 10. Puutavaralajien tilavuusosuudet harvennusmäntyrunkojen kokonaistilavuudesta koko aineistossa rinnankorkeusläpimittaluokittain, kun rungon viat on otettu huomioon apteerauksessa. Perusapteeraus.

5.1.2.2 Hakkuukertymän puutavaralajirakenne

Hakkuukertymät olivat kivennäismailla kokonaispuuston tavoin suurempia kuin turvemailla. Kivennäismailla sahauskelpoisen puutavaran kertymä oli ensiharvennuksissa 4 - 8 m^3/ha ja myöhemmissä harvennuksissa 8 - 12 m^3/ha (taulukko 13). Poistetun puuston sahapuuosuus oli rungon käyttöosan tilavuudesta laskettuna ensiharvennuksissa 7 - 12 % ja myöhemmissä harvennuksissa 19 - 29 %. Sahauskelpoisen puun suhteellinen määrä kohosi kasvupaikan muuttuessa niukkaravinteisemmaksi sekä ensiharvennuksissa että myöhemmissä harvennuksissa.

Taulukko 13. Hakkuukertymän keskimääräinen puutavaralajirakenne ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa kivennäismailla metsätyypeittäin. Perusapteeraus.

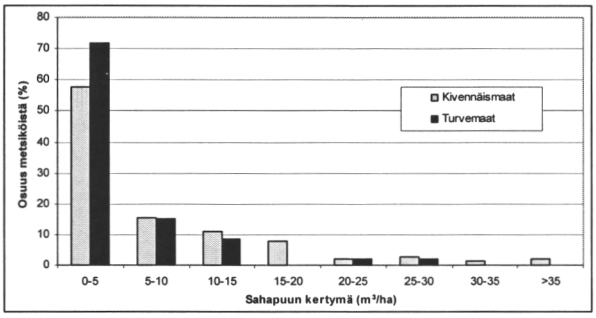
Puutavaralaji	Tuore kangas		Kuivahko kangas		Kuiva kangas	
	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.
	Tilavuus, m³/ha (%)					
Mäntytukki	0 (0)	2 (4)	0 (0)	1 (2)	0 (0)	3 (9)
Mäntytukki, tyvi	0 (0)	1 (2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (3)
Mäntypikkutukki	1 (2)	5 (10)	2 (4)	4 (9)	2 (3)	2 (6)
Mäntylyhyttukki	3 (5)	4 (7)	5 (9)	3 (7)	6 (9)	3 (10)
Sahapuuta yhteensä	*4 (7)*	*12 (23)*	*7 (13)*	*8 (18)*	*8 (12)*	*9 (28)*
Mäntykuitupuu	55 (93)	37 (71)	49 (87)	32 (75)	61 (88)	22 (69)
Kuusikuitupuu	0 (0)	2 (4)	0 (0)	1 (2)	0 (0)	0 (0)
Koivukuitupuu	0 (0)	1 (2)	0 (0)	2 (5)	0 (0)	1 (3)
Yhteensä	59	52	56	43	69	32

Taulukko 14. Hakkuukertymän keskimääräinen puutavaralajirakenne ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa turvemailla suotyypeittäin. Perusapteeraus.

Puutavaralaji	Ruohoturvekangas	Mustikka-turvekangas		Puolukka-turvekangas		Varpu-turvekangas	
	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.
	Tilavuus, m³/ha (%)						
Mäntytukki	0 (0)	1 (2)	0 (0)	0 (0)	1 (2)	0 (0)	0 (0)
Mäntytukki, tyvi	0 (0)	3 (5)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Mäntypikkutukki	4 (4)	0 (0)	0 (0)	1 (3)	1 (2)	1 (2)	4 (9)
Mäntylyhyttukki	3 (3)	1 (2)	0 (0)	1 (3)	3 (6)	4 (7)	1 (2)
Sahapuuta yhteensä	*7 (7)*	*5 (9)*	*0 (0)*	*2 (6)*	*5 (10)*	*5 (9)*	*5 (11)*
Mäntykuitupuu	68 (73)	45 (85)	28 (97)	27 (85)	39 (75)	46 (84)	42 (91)
Kuusikuitupuu	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (5)	0 (0)
Koivukuitupuu	18 (20)	3 (6)	1 (3)	3 (9)	8 (15)	1 (2)	0 (0)
Yhteensä	93	53	29	32	52	55	47

Turvemailla sahauskelpoisen puutavaran kertymät olivat vaatimattomia, ensiharvennuksissa 2 - 5 m³/ha ja myöhemmissä harvennuksissa 0 - 7 m³/ha (taulukko 14). Poistetun puuston sahapuuosuus oli rungon käyttöosan tilavuudesta laskettuna ensiharvennuksissa 6 - 9 % ja myöhemmissä harvennuksissa 0 - 11 %.

Kuvassa 11 on esitetty kaikkien harvennusmänniköiden jakaumat kertymäluokittain erikseen kivennäis- ja turvemailla. Yli 70 prosentissa turvemaiden ja vajaassa 60 prosentissa kivennäismaiden inventoiduista metsiköistä harvennusmännyn sahauskelpoinen kertymä oli alle 5 m³/ha. Kummassakin kasvupaikkaluokassa kertymä oli 5 - 10 m³/ha noin 15 prosentissa ja 10 - 15 m³/ha 10 prosentissa metsiköistä. Sahapuun hankinnan kannalta hyviä, yli 20 m³/ha sahapuuta tuottaneita metsiköitä oli kivennäismailla 8 % ja turvemailla vain 4 %. Vastaavasti huonoja, alle 5 m³/ha sahapuuta tuottaneita metsiköitä oli kivennäismailla 58 % ja turvemailla 72 %.



Kuva 11. Kivennäis- ja turvemaiden metsiköiden jakaumat sahapuun hakkuukertymän mukaisten luokkien mukaan. Perusapteeraus.

Taulukko 15. Ensiharvennusten ja myöhempien harvennusten hakkuukertymän keskimääräiset pölkkyjen lukumäärät puutavaralajeittain kivennäis- ja turvemailla kasvupaikkaluokittain. Perusapteeraus.

Puutavaralaji	Lehtomainen kangas tai vast.	Tuore kangas tai vast.	Kuivahko kangas tai vast.	Kuiva kangas tai vast.
		Pölkkyjä, kpl/ha Ensiharvennus / myöhempi harvennus		
Mäntytukki	- / 0	2 / 17	3 / 9	2 / 20
Mäntytukki, tyvi	- / 0	7 / 8	0 / 1	0 / 2
Mäntypikkutukki	- / 79	9 / 68	31 / 43	28 / 42
Mäntylyhyttukki	- / 79	71 / 72	105 / 84	160 / 85
Mäntykuitupuu	- / 1825	1735 / 848	1495 / 839	1997 / 703
Kuusikuitupuu	- / 0	11 / 47	8 / 12	14 / 2
Koivukuitupuu	- / 556	53 / 42	40 / 98	4 / 23
Yhteensä	- / 2539	1888 / 1102	1682 / 1086	2205 / 877

Taulukossa 15 on esitetty harvennuksissa kertyneet eri puutavaralajien pölkkyjen hehtaarikohtaiset lukumäärät ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa. Pölkkymäärä oli turvemailla huomattavasti pienempi kuin vastaavan metsätyypin kivennäismailla johtuen pienemmästä hakkuukertymästä.

5.1.3 Apteeraus yleisillä puutavaralajeilla

Jotta voitiin todeta pikku- ja lyhyttukin hakkuun vaikutukset sahapuun kertymiin, harvennuksessa poistetut rungot apteerattiin referenssiksi ns. yleisten puutavaralajien pituus- ja läpimittayhdistelmillä. Tässä apteerausvaihtoehdossa olivat puutavaralajeina vain tavallisten mitta- ja laatuvaatimusten mukainen mäntytukki ja -kuitupuu sekä kuusi- ja koivukuitupuu. Tulokset on esitetty kivennäis- ja turvemaiden kasvupaikkaluokittain taulukossa 16.

Kokonaiskertymässä ei ollut apteerauksessa yleisiksi puutavaralajeiksi suuria eroja perusapteeraukseen verrattuna (ks. taulukot 13 ja 14). Erojen pienuus johtui siitä, että simuloinnissa käytetty apteerausohjelma pyrkii hyödyntämään rungon käyttöosan täysimääräisesti pienimpään sallittuun latvaläpimittaan saakka ja kummassakin apteerausvaihtoehdossa rungon käyttöosan päättymisen määräsi kuitupuun minimilatvaläpimitta. Puutavaralajijakaumat olivat sen sijaan hyvin erilaiset.

Taulukko 16. Hakkuukertymän keskimääräinen puutavaralajirakenne ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa. Apteeraus yleisillä puutavaralajeilla.

Puutavaralaji	Ruohoturvekangas	Tuore kangas tai vast.		Kuivahko kangas tai vast.		Kuiva kangas tai vast.	
	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.
				Tilavuus, m^3/ha			
				Kivennäismaa / turvemaa			
Mäntytukki	0	0 / 2	3 / 0	0,4 / 0	1 / 0,5	0,2 / 0	3 / 0
Mäntykuitupuu	76	59 / 51	46 / 29	57 / 30	39 / 44	67 / 53	28 / 47
Kuusikuitupuu	0	0 / 0	2 / 0	0 / 0	1 / 0	0 / 2	0 / 0
Koivukuitupuu	17	0 / 2	1 / 1	0 / 2	2 / 8	0 / 1	1 / 0
Yhteensä	93	59 / 55	52 / 30	58 / 32	43 / 52	67 / 56	32 / 47

Erityisesti sahauskelpoisen puutavaran määrä oli erittäin pieni ns. yleisillä puutavaralajeilla apteerattaessa. Varsinkin turvemailla sahapuukertymät olivat olemattoman pieniä. Vähäinen sahapuun kertymä apteerauksessa yleisiksi puutavaralajeiksi johtui pääasiassa runkojen pienestä koosta, sillä sahapuun hakkuu edellyttää puulta tällöin vähintään 17 cm:n rinnankorkeusläpimittaa.

5.1.4 Pikku- ja lyhyttukin hakkuun vaikutus sahapuun kertymään ja arvoon

5.1.4.1 Yhden tai useamman pituusvaihtoehdon lisäys

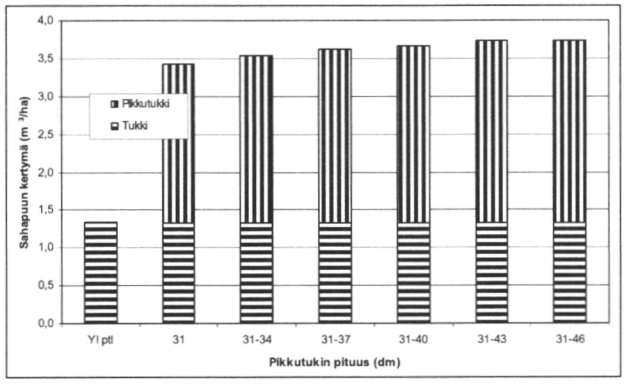
Kuvassa 12 on esitetty yhden tai useamman pikkutukkipituuden lisäyksen vaikutukset sahapuun hakkuukertymään harvennusmänniköissä. Kertymän vertailutasona on apteeraus ns. yleisillä puutavaralajeilla, jossa sahauskelpoisena puutavaralajina oli vain mäntytukki ja sen kertymä keskimäärin 1,3 m^3/ha (2,9 % hakkuukertymästä). Aluksi apteerausvaihtoehtoihin lisättiin yksi pikkutukkipituus 31 dm, jolloin sahapuun kertymä kohosi lähes kolminkertaiseksi eli tasolle 3,4 m^3/ha (7,4 % hakkuukertymästä). Tämän jälkeen apteeraukseen lisättiin aina yksi pikkutukkipituus lisää, kunnes lopulta apteerausvaihtoehtoina olivat mäntytukin ja -kuitupuun lisäksi kaikki pikkutukkipituudet (31, 34, 37, 40, 43 ja 46 dm).

Pikkutukkipituuksien lisäys yhdestä kuuteen kohotti sahapuun kertymää vain 0,3 m^3/ha ja sahapuun osuutta hakkuukertymästä vain 0,6 prosenttiyksikköä. Tästä johtuen jo muutamalla pikkutukkipituudella päästiin lähes maksimaaliseen pikkutukin hakkuukertymään. Pikkutukkipituudella 31 dm saavutettiin 92 % ja jo kahdella lyhyimmällä pikkutukkipituudella (31 ja 34 dm) 95 % siitä sahapuun kertymästä, joka olisi saatu käyttämällä kaikkia mahdollisia pikkutukkipituuksia. Eri pikkutukkipituuksien kertymää lisäävä vaikutus oli sitä pienempi, mitä pidempiä pituuksia lisättiin vaihtoehtoihin. Kertymä kasvoi hyvin vähän apteeraamalla 31 - 43 dm:n pikkutukkien lisäksi myös 46 dm:n pikkutukkeja.

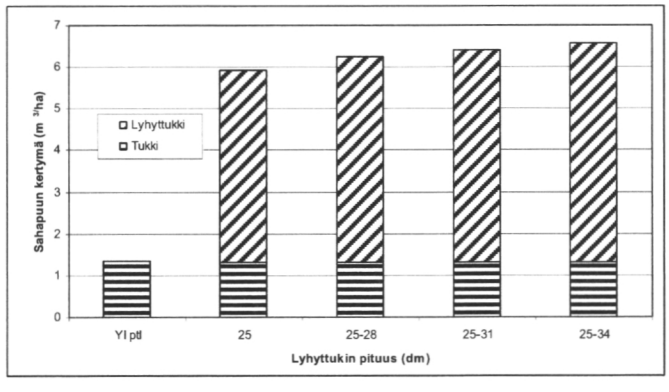
Pituusvaihtoehtojen lisäysten vaikutusta tutkittiin lyhyttukilla samalla tavalla kuin pikkutukilla (kuva 13). Lyhimmän tutkitun tukkipituusvaihtoehdon (25 dm) lisäys kohotti sahapuun kertymän tasolle 5,9 m^3/ha (12,7 % hakkuukertymästä) eli

yli nelinkertaiseksi verrattuna pelkän normaalitukin hakkuuseen (2,9 % hakkuukertymästä). Lyhimmällä lyhyttukkipituudella voitiin siis lisätä sahapuun kertymä kaksinkertaiseksi (lisäys 74 %) verrattuna yhden pikkutukkipituuden käyttöön. Käyttämällä pelkästään lyhyttukkipituutta 25 dm saavutettiin 90 % ja kahdella lyhyttukkipituudella (25 ja 28 dm) 95 % sahapuun maksimikertymästä. Myös lyhyttukkia tehtäessä pituusvaihtoehtojen lisäys yhdestä neljään (25, 28, 31 ja 34 dm) kohotti enää vain vähän sahapuun kertymää. Lisäys oli kuitenkin suurempi kuin pikkutukkipituuksilla eli 0,7 m^3/ha (lisäys 1,4 prosenttiyksikköä). Tässäkin eri tukkipituuksien kertymää lisäävä vaikutus oli sitä pienempi, mitä pidempiä lyhyttukkipituuksia lisättiin apteerausvaihtoehtoihin.

Lyhyttukin hakkuu kohotti sahapuun kertymää siis enemmän kuin perinteisen pikkutukin hakkuu. Käyttämällä normaalin tukin lisäksi lyhyttukkipituuksia 25 - 34 dm voitiin saavuttaa keskimäärin 14 prosentin sahapuuosuus hakkuukertymästä. Järeän normaalitukin osuus kertymästä oli kummassakin apteerausvaihtoehdossa lähes sama, sillä pikku- tai lyhyttukin hakkuu pienensi nimenomaan kuitupuuksi päätyvän puutavaran määrää lähes näitä puutavaralajeja vastaavalla määrällä.



Kuva 12. Pikkutukkipituuksien lisäyksen vaikutus sahapuun kertymään harvennusmänniköissä.



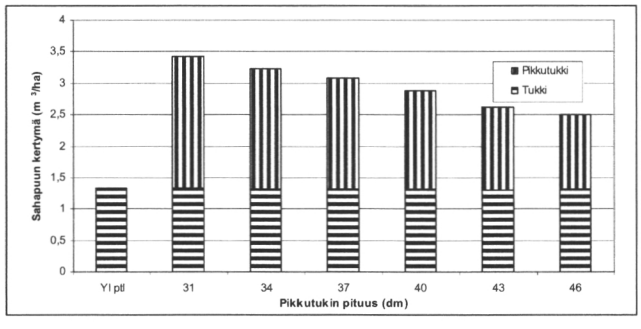
Kuva 13. Lyhyttukkipituuksien lisäyksen vaikutukset sahapuun kertymään harvennusmänniköissä.

5.1.4.2 *Yhden pituusvaihtoehdon lisäys*

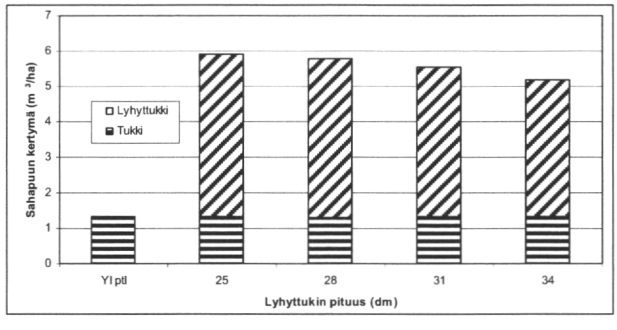
Yksittäisen pikku- tai lyhyttukkipituuden käytön vaikutusta sahauskelpoiseen puutavaran hakkuukertymään tutkittiin lisäämällä apteerausvaihtoehtoihin yleisten puutavaralajien lisäksi kussakin tapauksessa vain yksi pituusvaihtoehto kerrallaan. Näin voitiin määrittää, onko jokin yksittäinen tukkipituus toista merkityksellisempi harvennusmäntyrunkojen apteerauksen tehostamisessa puunhankinnan kannalta.

Kuvassa 14 on esitetty yksittäisten pikkutukkipituuksien lisäyksen vaikutukset sahauskelpoisen puutavaran kertymään. Pikkutukin pituuden 31 dm käyttö kohotti sahapuun kertymän tasolle 3,4 m^3/ha (7,4 % hakkuukertymästä). Mitä pitempi pikkutukkipituus lisättiin, sitä alempi oli sahapuun kertymä. Pikkutukin pituuden 46 dm käyttö nosti sahapuun kertymän tasolle 2,5 m^3/ha (5,4 % hakkuukertymästä). Ero sahapuun kertymässä lyhimmän ja pisimmän pikkutukkipituuden lisäyksen välillä oli siis 0,9 m^3/ha.

Kuvassa 15 on menetelty lyhyttukin pituusvaihtoehtojen tarkastelussa samalla tavalla kuin edellä pikkutukin kohdalla. Käyttämällä lyhyttukkipituuksia 25 tai 28 dm oli sahapuun kertymä tasolla 5,9 m^3/ha (12,7 % hakkuukertymästä). Lyhyttukkipituuksien 31 ja 34 dm käyttö lisäsi sahapuun kertymiä tasoille 5,5 ja 5,1 m^3/ha (n. 11 % hakkuukertymästä). Ero sahapuun kertymässä lyhimmän ja pisimmän lyhyttukkipituuden välillä oli siis 0,8 m^3/ha. Tukkipituuden lyhentäminen lisäsi luonnollisesti kertymää, mutta alle 28 dm:n pölkkyjen kertymää lisäävä vaikutus oli vähäinen.



Kuva 14. Yhden pikkutukkipituuden lisäyksen vaikutus sahapuun kertymään harvennusmänniköissä.



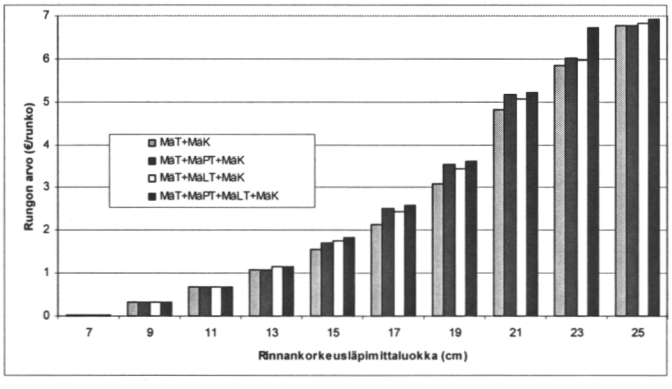
Kuva 15. Yhden lyhyttukkipituuden lisäyksen vaikutus sahapuun kertymään harvennusmänniköissä.

5.1.4.3 *Puutavaralajien lisäyksen vaikutus rungon arvoon*

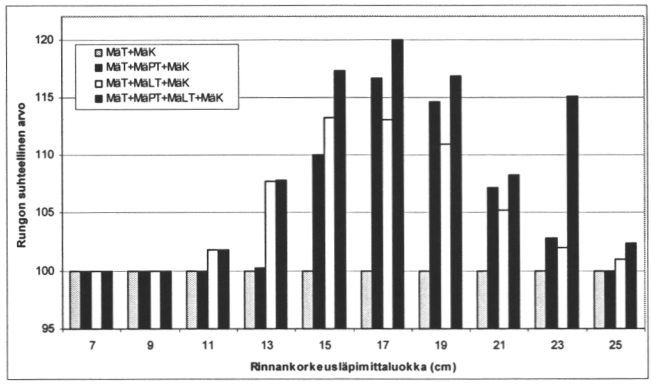
Kuvassa 16 on esitetty mäntyrunkojen laskennalliset arvoerot rinnankorkeusläpimittaluokittain tutkittujen apteerausvaihtoehtojen välillä koko harvennusmäntyaineistossa. Rungon arvo laskettiin summa-arvona puutavaralajien tilavuuden ja arvomatriisin pölkyn pituuden ja läpimitan mukaisten yksikköhintojen perusteella. Kuten edellä on todettu, arvomatriisien yksikköhinnat olivat viitteellisiä.

Pikku- ja/tai lyhyttukin sisältäneiden apteerausvaihtoehtojen vertailukohtana oli runkojen apteeraus yleisillä puutavaralajeilla (MäT + MäK), jota esittää kuvan 16 rinnankorkeusläpimittaluokissa vasemmanpuoleisin pylväs. Kuvassa rinnankorkeusläpimittaluokissa toinen pylväs vasemmalta esittää rungon arvoa, kun yleisten puutavaralajien lisäksi apteerauksessa tehdään pikkutukkia (MäT + MäPT + MäK). Tästä kolmas pylväs vasemmalta esittää rungon arvoa, kun yleisten puutavaralajien lisäksi lyhyttukki on yhtenä apteerattavana puutavaralajina (MäT + MäLT + MäK). Oikean puoleisin pylväs esittää rungon arvoa, kun apteerauksessa ovat mukana kaikki puutavaralajivaihtoehdot (ns. perusapteerausvaihtoehto).

Kuvassa 17 on esitetty vastaavasti runkojen suhteelliset arvot eri apteerausvaihtoehdoissa rinnankorkeusläpimittaluokittain, kun vertailukohtana oli rungon arvo apteerattaessa yleisillä puutavaralajeilla. Vertailut tehtiin kunkin läpimittaluokan sisällä eli tulokset eivät edusta läpimittaluokkien välisiä arvoeroja. Perusapteeraus tuotti kaikissa läpimittaluokissa vähintään yhtä korkean suhteellisen arvon kuin muut apteerausvaihtoehdot. Perusapteerauksella saatu rungon arvon lisäys oli suurimmillaan rinnankorkeusläpimittaluokassa 17 cm (suhteellinen arvo 120) verrattuna apteeraukseen yleisillä puutavaralajeilla. Pikku- tai lyhyttukin lisäyksen sisältäneiden apteerausvaihtoehtojen vaikutuksessa oli vaihtelevuutta läpimittaluokkien välillä. Lyhyttukin lisäys tuotti läpimittaluokissa 11 - 15 cm ja 25 - 27 cm korkeamman suhteellisen arvon rungolle kuin pikkutukin lisäys, mutta tulos oli päinvastainen läpimittaluokissa 17 - 23 cm. Läpimittaluokissa 7 - 9 cm saatiin luonnollisesti vain kuitupuuta, jolloin myös rungon absoluuttinen ja suhteellinen arvo oli sama kaikissa apteerausvaihtoehdoissa.



Kuva 16. Rungon arvo tutkituissa apteerausvaihtoehdoissa rinnankorkeusläpimittaluokittain. Arvoina käytetty arvomatriisin puutavaralajien ja niiden pölkkyjen pituuden ja latvaläpimitan mukaan muuttuvia arvoja.



Kuva 17. Rungon suhteellinen arvo tutkituissa apteerausvaihtoehdoissa, kun apteerausvaihtoehdolla MäT + MäK (ns. yleiset puutavaralajit) rungon arvo on apteerauksessa indeksoitu arvoon 100. Tarkastelu läpimittaluokkien sisällä.

Pikkutukkien apteeraus lisäsi rungon arvoa suhteellisesti eniten rinnankorkeusläpimittaluokassa 17 cm, jolloin arvon lisäys oli 17 prosenttiyksikköä verrattuna apteeraukseen yleisillä puutavaralajeilla. Lyhyttukkien apteeraus lisäsi rungon arvoa eniten läpimittaluokissa 15 cm ja 17 cm, jolloin arvon lisäys oli 13 prosenttiyksikköä verrattuna apteeraukseen yleisillä puutavaralajeilla. Läpimittaluokasta 19 cm ylöspäin pikku- ja lyhyttukin apteerauksen tuottama rungon suhteellisen arvon kohoaminen alkoi kaventua verrattuna yleisillä puutavaralajeilla tapahtuneeseen apteeraukseen.

5.1.5 Runkojen tekniset viat mäntykoepuissa

5.1.5.1 Vikojen esiintyminen

Harvennusmänniköiden metsikköinventointien yhteydessä koepuista määritettiin sahapuun osuutta rajoittaneet ulkoiset viat, joita esiintyi kaikkiaan 25 erilaista tyyppiä (liite 2). Taulukkoon 17 on koottu keskeisimpien runkovikojen esiintyminen inventoiduissa metsiköissä kivennäis- ja turvemailla kasvupaikkatyypeittäin erikseen ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa. Männyissä esiintyneistä vioista yleisimpiä olivat tyvilenkous (56 % mäntykoepuista, metsiköiden vaihteluväli 44 - 62 %), ranganvaihdot (29 %), monivääryys (19 %), lenkous (18 %), mutkat (14 %) ja yli 30 mm:n oksien esiintyminen (14 %). Muiden runkovikojen osuus oli hyvin pieni edellä mainittuihin verrattuna. Tuloksia tarkasteltaessa on huomattava, että samassa rungossa saattoi esiintyä useita eri runkovikoja. Kokonaan virheettömiä runkoja oli koko aineistossa 11 %, kivennäismailla 10 % ja turvemailla 12 %.

Runkovikojen esiintyminen oli samansuuntaista kuin niiden vaikutus sahapuun kertymiin. Poikkeuksena olivat ranganvaihdot, joita esiintyi runsaasti koepuissa, mutta ne eivät pääasiassa rungon latvaosissa esiintyneinä juurikaan rajoittaneet sahapuun kertymää. Rungon latvaosissa läpimitta oli rajoittavin tekijä sahapuuta

Taulukko 17. Erilaisia vikoja sisältäneiden mäntykoepuiden osuudet harvennusmänniköiden kokonaispuuston runkoluvusta kivennäismailla ja turvemailla metsä- ja suotyypeittäin ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa.

	Ruoho-turvekangas	Tuore kangas tai vast.		Kuivahko kangas tai vast.		Kuiva kangas tai vast.		Kaikki
Runkovika	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.	Ensiharv.	Myöh. harv.	
				Vian sisältäneiden mäntykoepuiden osuus (%)				
				Kivennäismaa / turvemaa				
Tyvilenko	- / 63	50 / 44	57 / 60	58 / 54	53 / 59	57 / 59	53 / 66	56 / 55
Ranganvaihto	- / 23	27 / 24	34 / 33	35 / 31	27 / 23	26 / 29	20 / 22	29 / 27
Moniväärä	- / 13	33 / 31	20 / 17	18 / 27	15 / 21	11 / 24	19 / 28	18 / 25
Lenko	- / 50	18 / 22	21 / 7	16 / 20	23 / 19	8 / 12	14 / 41	17 / 20
Mutka	- / 3	5 / 7	10 / 5	13 / 10	14 / 9	22 / 10	38 / 10	16 / 9
Ei vikoja	- / 8	11 / 11	8 / 2	11 / 10	12 / 15	9 / 11	6 / 3	10 / 12

apteerattaessa. Rungon alaosissa esiintyneet mutkat ja lenkous olivat todennäköisesti puuston taimikkovaiheessa tapahtuneita ranganvaihtoja.

Ensiharvennusmänniköissä rungoissa oli useimpia vikoja enemmän kuin myöhempien harvennusten männiköissä. Tämä olikin oletusten mukaista, sillä myöhempään harvennukseen mennessä metsiköistä on poistettu vikaisia runkoja aiemmissa harvennushakkuissa. Erityisesti teknisiltä vaikutuksiltaan pahimmat runkoviat, kuten moniväärryys ja ranganvaihdot sekä kivennäismailla lisäksi tyvilenkous olivat ensiharvennuksissa yleisempiä kuin myöhemmissä harvennuksissa. Vastaavasti lenkous, yli 30 mm:n oksat ja mutkat sekä turvemailla lisäksi tyvilenkous olivat yleisempiä myöhemmissä harvennuksissa kuin ensiharvennuksissa. Turvemailla mutkien ja ranganvaihtojen osuus oli vähäisempi kuin kivennäismailla, mutta moniväärryyden, yli 30 mm:n oksien (21 %) ja lenkojen puiden osuus oli suurempi kuin kivennäismailla. Kokonaan virheettömiä runkoja oli ensiharvennuksissa 10 % ja myöhemmissä harvennuksissa 11 %.

5.1.5.2 Vikojen vaikutus sahapuun kertymään

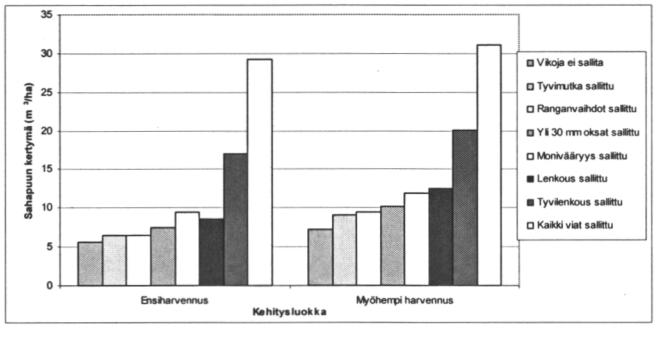
Runkovikojen vaikutusta sahattavien puutavaralajien kertymiin tutkittiin kehitysluokittain ja kasvupaikkaluokittain ja -tyypeittäin tekemällä perusapteeraus jättäen kaikki viat tai yksittäisiä vikoja ottamatta huomioon apteerauksessa (kuva 18). Sahapuun ns. maksimikertymätilanteessa, kun mitään runkovikoja ei otettu huomioon apteerausta rajoittavina tekijöinä, sahattavien puutavaralajien keskimääräinen kertymä oli ensiharvennuksissa 29,2 m^3/ha ja myöhemmissä harvennuksissa 31,1 m^3/ha. Ero oli suuri verrattuna kaikki runkoviat huomioon ottaneen apteerauksen tulokseen, jossa sahattavien puutavaralajien kertymä oli keskimäärin ensiharvennuksissa 5,7 m^3/ha ja myöhemmissä harvennuksissa 7,3 m^3/ha. Kaikkien runkovikojen salliminen kohotti sahapuun osuutta kokonaiskertymästä ensiharvennuksissa 9 prosentista 49 prosenttiin ja myöhemmissä harvennuksissa 13 prosentista 65 prosenttiin. Runkovioilla oli siis myöhemmissä harvennuksissa suhteellisesti enemmän vaikutusta sahapuun hakkuukertymään kuin ensiharvennuksissa.

Tyvilenkouden salliminen lisäsi sahapuun kertymää selvimmin. Sahapuun kertymä kasvoi tällöin ensiharvennuksissa 11,3 m^3/ha ja myöhemmissä harvennuksissa 12,8 m^3/ha ja sahapuun suhteellinen osuus kertymästä vastaavasti tasoille 28 % ja 43 %. Myös muissa rungonosissa esiintyneen lenkouden ja monivääryyden vaikutukset sahapuun kertymään olivat selvät. Sahapuun kertymä kohosi tällöin ensiharvennuksissa 2,9 m^3/ha sallittaessa lenkoutta ja 3,7 m^3/ha sallittaessa monivääryyttä. Myöhemmissä harvennuksissa lenkouden salliminen kohotti sahapuun kertymää 5,2 m^3/ha ja monivääryyden salliminen 4,6 m^3/ha. Yli 30 mm:n oksien salliminen kohotti sahapuun kertymää ensiharvennuksissa 1,7 m^3/ha ja myöhemmissä harvennuksissa 2,8 m^3/ha. Ranganvaihtojen ja tyvimutkien sallimisella oli vain vähäinen vaikutus sahattavien puutavaralajien kertymiin.

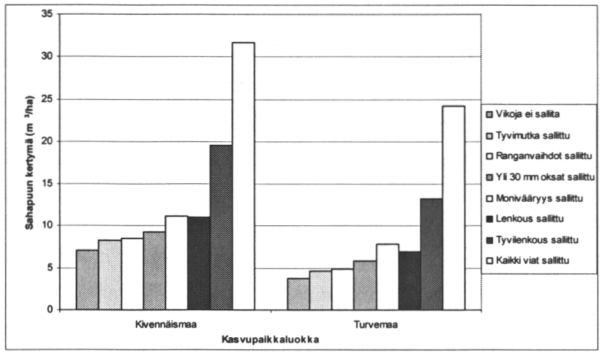
Runkovikojen vaikutukset sahapuun kertymään olivat osin selitettävissä aineiston ominaisuuksilla. Harvennusmänniköissä järeys mahdollistaa sahapuun saannon lähinnä runkojen tyviosista, joten tyvilenkouden suuri vaikutus kertymään oli odotettavaa. Sen sijaan ranganvaihdot ja paksut oksat sijaitsevat tavallisesti rungon latvaosissa, joissa lähinnä rungon läpimitta on sahapuun apteerausta rajoittava tekijä.

Kivennäis- ja turvemaiden harvennusmänniköitä erikseen tarkasteltaessa vikojen vaikutukset sahapuun kertymään olivat kuvan 19 mukaiset. Turvemailla sahapuun kertymä oli huomattavasti pienempi kuin kivennäismailla, vaikka eräitä runkovikoja olisi apteerauksessa sallittu. Turvemaiden männiköissä puiden runkomuoto ja puuston tilajakauma poikkesivat myös huomattavasti kivennäismaiden männiköistä. Turvemailla kaikkien runkovikojen salliminen nosti sahapuun osuuden 49 prosenttiin hakkuukertymästä, kun taas kaikki viat huomioon ottaen sahapuun osuus oli vain 6 %. Kivennäismailla vastaavat sahapuun osuudet olivat 57 % ja 12 %. Yksittäisistä runkovioista monivääryyden salliminen kohotti sahapuun kertymää suhteellisesti enemmän turvemailla kuin kivennäismailla.

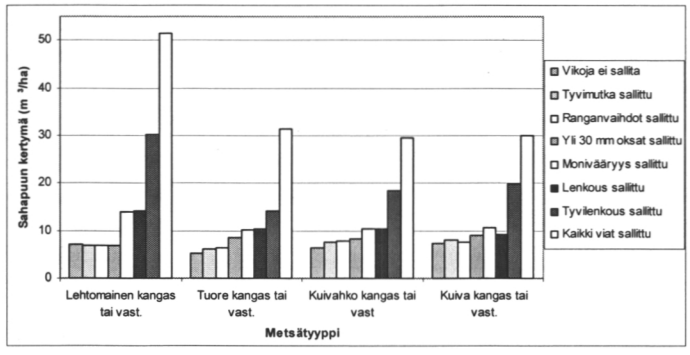
Runkovikojen vaikutusta sahapuun kertymään on tarkasteltu kasvupaikkatyypeittäin kuvassa 20. Pylväikkö on saman tyyppinen kuin edellisissä tarkasteluissa. Runkovikojen salliminen kohotti hakkuukertymää erityisesti lehtomaisilla kankailla tai vastaavilla kasvupaikoilla, mutta myös tuoreilla ja kuivahkoilla kankailla tai vastaavilla kasvupaikoilla. Vähiten runkovikojen salliminen vaikutti kuivilla kankailla tai vastaavilla kasvupaikoilla.



Kuva 18. Sahattavien puutavaralajien hehtaarikohtaiset kertymät ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa, kun yksittäisiä runkovikoja jätetään ottamatta huomioon sahapuuosuutta rajoittavina tekijöinä. Perusapteeraus.



Kuva 19. Sahattavien puutavaralajien hehtaarikohtaiset kertymät kivennäis- ja turvemailla, kun yksittäisiä runkovikoja jätetään ottamatta huomioon sahapuuosuutta rajoittavina tekijöinä. Perusapteeraus.



Kuva 20. Sahattavien puutavaralajien hehtaarikohtaiset kertymät kasvupaikkatyypeittäin kivennäis- ja turvemailla, kun yksittäisiä runkovikoja jätetään ottamatta huomioon sahapuuosuutta rajoittavina tekijöinä. Perusapteeraus.

5.1.6 Kokonaispuuston ja hakkuukertymän sahapuun määrän ennustettavuus puustotunnuksista

5.1.6.1 Sahapuun määrän ja puustotunnusten riippuvuussuhteet koko puustossa

Sahauskelpoisen puutavaran määrän vaihteluun vaikuttavia metsikkö- ja puustotason tekijöitä tutkittiin koko puustosta korrelaatioanalyysillä ja eteenpäin askeltavalla lineaarisella regressioanalyysillä. Selitettävinä muuttujina olivat yksittäisen rungon tai metsikön hehtaarikohtainen sahapuun tilavuus (dm^3/runko ja m^3/ha) ennen harvennusta ja selittävinä muuttujina maastossa mitatut ja arvioidut puustotunnukset ja niistä johdetut muuttujat. Sahapuun tilavuuden vaihtelun suuruuteen vaikuttavat puustotunnukset antavat kuvan siitä, miten puustotunnukset vaikuttavat puutavaralajirakenteeseen ilman, että vaikuttavana tekijänä olisi simuloidusta harvennuksesta mahdollisesti seuraava poistettavien puiden subjektiivinen valinta.

Taulukossa 18 on esitetty yksittäisen rungon ja metsikön sahapuun hehtaarikohtaisen kokonaistilavuuden korrelaatiot suhteessa tutkittuihin runko- ja metsikkötason muuttujiin. Runkotasolla sahapuun kokonaistilavuus korreloi positiivisesti runkotason muuttujista erityisesti rungon tilavuuden ja rinnankorkeusläpimittaluokan sekä rinnankorkeusläpimitan, pituuden ja tuoreoksarajan kanssa, ja positiivisesti mutta edellä mainittuja muuttujia heikommin rungon paksuimman elävän ja kuolleen oksan läpimittojen ja kuivaoksarajan kanssa. Metsikkötason muuttujista rungon sahapuun korrelaatio oli positiivinen puuston kehitysluokan kanssa ja negatiivinen kasvupaikkaluokan kanssa: rungon sahapuun tilavuus oli suurempi myöhemmissä harvennuksissa kuin ensiharvennuksissa ja kivennäismailla verrattuna turvemaihin. Korrelaatiota ei ollut lainkaan suhteessa latvussuhteeseen eikä turvemailla rungon sijaintiin suhteessa sarkaojaan.

Sahapuun hehtaarikohtainen kokonaistilavuus korreloi metsikkötasolla lähes samalla tavalla eri muuttujien kanssa kuin runkotasolla. Voimakkaimmin metsikön sahapuun kokonaistilavuus korreloi positiivisesti puuston keskipituuden, keskitilavuuden, kokonaistilavuuden, keskiläpimitan ja tuoreoksarajan kanssa, ja edellä mainittuja muuttujia jossain määrin heikommin puuston kehitysluokan, teknisesti virheettömien puiden osuuden, puuston kuivaoksarajan, yli 30 mm:n oksia sisältäneiden puiden osuuden ja keskimääräisen paksuimman kuolleen ja terveen oksan läpimitan kanssa. Lievää positiivista korrelaatiota oli myös suhteessa puuston pohjapinta-alaan ja keski-ikään. Korrelaatio oli vastaavasti negatiivinen suhteessa turvekerroksen paksuuteen (turvemailla), puuston runkolukuun, keskimääräiseen latvussuhteeseen ja lisäksi kasvupaikkaluokkaan (ks. runkotaso). Korrelaatiota ei ollut lainkaan suhteessa runkojen sijaintiin suhteessa sarkaojaan (turvemailla), kasvupaikkatyyppiin tai metsikön maantieteelliseen sijaintiin.

Korrelaatioissa oli jonkin verran eroja kivennäis- ja turvemaiden välillä. Turvemailla metsikön sahapuun kokonaistilavuuden korrelaatiot puuston tuoreoksarajan ($r = 0,68$), kuivaoksarajan ($r = 0,37$), latvussuhteen ($r = -0,41$), yli 30 mm:n oksia sisältäneiden puiden osuuden ($r = 0,44$), puuston kokonaistilavuuden ($r = 0,76$) ja myös metsikön maantieteellisen sijainnin ($r = 0,36$) kanssa olivat voimakkaampia kuin kivennäismailla. Korrelaatio oli turvemailla vastaavasti heikompi kuin kivennäismailla suhteessa puuston keskiläpimittaan ($r = 0,51$), runkolukuun ($r = 0,06$) ja paksuimman elävän oksan keskimääräiseen läpimittaan ($r = 0,17$).

5.1.6.2 Regressiomallit sahapuun määrälle koko puustossa

Regressioanalyyseissä tutkittiin puustotunnusten osuutta sahapuun hehtaarikohtaisen kokonaistilavuuden metsikkökohtaisessa vaihtelussa ja sahapuun määrän ennustettavuutta koko puustossa. Yhden selittävän puustotunnuksen malleissa puuston keskipituudella voitiin selittää 46 %, rungon keskitilavuudella 43 %, metsikön kokonaistilavuudella 42 % ja keskiläpimitalla 40 % metsikön sahapuun kokonaistilavuuden vaihtelusta. Lisättäessä malliin keskipituuden lisäksi muita muuttujia selitysaste nousi 46 prosentista yli 70 prosenttiin. Näihin selittäviin muuttujiin perustuneiden ennustemallien keskivirhe oli selittävistä muuttujista riippuen 22 - 24 m^3/ha.

Taulukko 18. Yksittäisen rungon ja metsikön sahauskelpoisen puutavaran kokonaistilavuuden riippuvuus tutkituista runko- ja metsikkötason tunnuksista korrelaatioanalyysin mukaan.

Muuttujat	Korrelaatio-kerroin (r)	Merkitsevyys-taso (p_{hav})
Rungon sahapuun tilavuus (dm³/runko)		
Rungon tilavuus	0,7112	0,0000
Rungon rinnankorkeusläpimittaluokka	0,6326	0,0000
Rungon rinnankorkeusläpimitta	0,4937	0,0000
Rungon pituus	0,4372	0,0000
Rungon tuoreoksaraja	0,3956	0,0000
Rungon paksuin elävä oksa	0,2826	0,0000
Puuston kehitysluokka	0,2718	0,0000
Rungon paksuin kuollut oksa	0,2654	0,0000
Rungon kuivaoksaraja	0,2139	0,0000
Kasvupaikkaluokka	-0,1019	0,0000
Kasvupaikkatyyppi (metsä- tai suotyyppi)	0,0241	0,0264
Rungon latvussuhde	0,0109	0,3272
Rungon etäisyys ojan keskeltä (turvemailla)	0,0068	0,5837
Metsikön sahapuun kokonaistilavuus (m³/ha)		
Runkojen keskipituus	0,6804	0,0000
Runkojen keskitilavuus	0,6575	0,0000
Metsikön kokonaistilavuus	0,6457	0,0000
Runkojen keskiläpimitta	0,6318	0,0000
Runkojen keskimääräinen tuoreoksaraja	0,5652	0,0000
Puuston kehitysluokka	0,3569	0,0000
Teknisesti virheettömien runkojen osuus runkoluvusta	0,3093	0,0000
Turvekerroksen paksuus (turvemailla)	-0,2989	0,0209
Runkojen keskimääräinen kuivaoksaraja	0,2826	0,0000
Puuston runkoluku	-0,2740	0,0000
Yli 30 mm:n oksia sisältäneiden runkojen osuus runkoluvusta	0,2573	0,0002
Runkojen keskimääräinen paksuimman elävän oksan läpimitta	0,2260	0,0012
Runkojen keskimääräinen paksuimman kuolleen oksan läpimitta	0,1896	0,0067
Runkojen keskimääräinen latvussuhde	-0,1862	0,0078
Kasvupaikkaluokka	-0,1843	0,0085
Puuston pohjapinta-ala	0,1515	0,0326
Puuston keski-ikä	0,1499	0,0346
Metsikön maantieteellinen sijainti	0,0326	0,6438
Kasvupaikkatyyppi (metsä- tai suotyyppi)	0,0194	0,7835
Runkojen keskimääräinen etäisyys ojan keskeltä (turvemailla)	-0,0191	0,8952

Monen selittävän tunnuksen malleissa monet muuttujista korreloivat vahvasti keskenään, joten osa niistä oli poistettava mallista regressioanalyysin periaatteiden mukaisesti mallin luotettavuuden ja yleistettävyyden vuoksi. Samalla mallista tuli yksinkertaisempi. Siten metsikön sahapuun kokonaistilavuutta ennustavaan malliin valittiin muuttujiksi kasvupaikkaluokka, metsikön kokonaistilavuus, puuston keskipituus ja rungon keskitilavuus (kaava 1). Muiden muuttujien lisääminen malliin olisi parantanut selitysastetta ja pienentänyt keskivirhettä vain vähän.

$$y = -40{,}407 - 10{,}505\, x_1 + 0{,}279\, x_2 + 0{,}171\, x_3 + 1{,}789\, x_4, \quad (1)$$

missä,

y = metsikön sahapuun kokonaistilavuus (m^3/ha)

x_1 = metsikön kasvupaikkaluokka (0=kivennäismaa, 1=turvemaa)

x_2 = metsikön puuston kokonaistilavuus (m^3/ha)

x_3 = puuston keskitilavuus (dm^3/runko)

x_4 = puuston keskipituus (m)

Kivennäismailla mallin lauseketta "-10,505x_1" ei tarvitse käytännössä ottaa huomioon. Mallin selitysaste oli 58,5 % ja keskiarvon keskivirhe 19,7 m^3/ha. Harvennusmännikön sahapuun keskimääräinen kokonaistilavuus oli mallin mukaan 46,6 ±19,7 m^3/ha.

5.1.6.3 Regressiomallit yksittäisten sahattavien puutavaralajien määrille koko puustossa

Taulukossa 19 on esitetty metsikön keskeisten yksittäisten sahattavien puutavaralajien tilavuutta (m^3/ha) ennustavat regressiomallit selittävine muuttujineen ja luotettavuutta kuvaavine tunnuslukuineen. Männyn normaalitukin (ilman tyvitukkia) tilavuuden ennustettavuus oli paras, sillä esitetyllä mallilla voitiin selittää normaalitukin tilavuuden metsikkökohtaisesta vaihtelusta 70 % (keskivirhe 10,5 m^3/ha). Männyn tyvitukilla, pikkutukilla ja lyhyttukilla parhaiden mallien selitysasteet olivat 41 - 50 % (keskivirhe 3,5 - 8,8 m^3/ha).

Eri sahapuutavaralajien määrää ennustavissa malleissa oli jonkin verran vaihtelua selittävien, puustoa ja kasvupaikkaa kuvaavien muuttujien kertoimissa. Malleissa olivat mukana dummy-muuttujina kasvupaikkaluokka ja -tyyppi. Kun malleilla ennustetaan puutavaralajien kokonaismäärää kivennäismaiden kuivahkoilla kankailla, malleissa ei ole perusteltua käyttää dummy-muuttujia.

Taulukko 19. Metsikön yksittäisten sahattavien puutavaralajien kokonaistilavuutta (m^3/ha) ennustavat lineaariset regressiomallit ja niiden luotettavuutta kuvaavat tunnusluvut. (MäT = mäntytukki, MäT tyvi = mäntytyvitukki, MäPT = mäntypikkutukki, MäLT = mäntylyhyttukki).

Muuttuja	MäT	MäT tyvi	MäPT	MäLT
Vakio	38,641	11,564	-81,628	-32,878
Rungon keskitilavuuden kerroin (dm^3/r)	0,433	0,0997	-0,264	-0,177
Puuston keskipituuden kerroin (m)	-3,926	-1,637	4,896	3,302
Metsikön kokonaistilavuuden kerroin (m^3/ha)	0,0788	0,1794	0,0904	0,0991
Keskiläpimitan kerroin (cm)	-2,875	-0,262	3,765	0,883
Dummy-muuttujat:				
Turvemaa = 1, kivennäismaa = 0	-2,020	-0,0181	-2,391	-5,166
Lehtomainen kangas tai vast.= 1, muut = 0	18,208	-4,856	-0,770	-11,788
Tuore kangas tai vast. = 1, muut = 0	-2,055	0,213	-2,905	-2,273
Kuiva kangas tai vast. = 1, muut = 0	1,573	0,243	1,368	3,5
Korrelaatiokerroin (r)	0,836	0,703	0,637	0,655
Selitysaste (r^2)	0,699	0,495	0,406	0,429
Keskivirhe (SE)	10,5	3,5	8,8	7,3

5.1.6.4 *Harvennuskertymän sahapuun määrään vaikuttavat tekijät ja sahapuukertymän ennustettavuus*

Harvennushakkuukertymän yksittäisten runkojen sahapuun kokonaistilavuuden korrelaatiot suhteessa tutkittuihin runko- ja metsikkötason muuttujiin olivat samansuuntaiset kuin harventamattomassa puustossa (taulukko 20, vrt. taulukko 18).

Rungon sahapuun kokonaistilavuus korreloi positiivisesti runkotason muuttujista erityisesti kokonaistilavuuden ja käyttöosan tilavuuden, rinnankorkeusläpimitan ja läpimittaluokan ja pituuden kanssa, ja positiivisesti mutta edellä mainittuja muuttujia jossain määrin heikommin paksuimman elävän ja kuolleen oksan läpimittojen sekä tuoreoksarajan kanssa. Metsikkötason muuttujista korrelaatio oli positiivinen mutta ei kuitenkaan voimakas puuston kehitysluokan kanssa ja negatiivinen kasvupaikkaluokan ja metsikön maantieteellisen sijainnin kanssa. Korrelaatiota ei ollut lainkaan suhteessa kasvupaikkatyyppiin eikä turvemailla myöskään turvekerroksen paksuuteen tai runkojen sijaintiin suhteessa sarkaojaan.

Taulukko 20. Harvennushakkuukertymän yksittäisen rungon ja metsikön sahauskelpoisen puutavaran kokonaistilavuuden riippuvuus tutkituista runko- ja metsikkötason tunnuksista korrelaatioanalyysin mukaan.

Muuttujat	Korrelaatio-kerroin (r)	Merkitsevyystaso (p_{hav})
Harvennuksessa poistetun rungon sahapuun tilavuus (dm³/runko)		
Rungon tilavuus	0,5834	0,0000
Rungon käyttöosan tilavuus	0,5640	0,0000
Rungon rinnankorkeusläpimitta	0,5207	0,0000
Rungon rinnankorkeusläpimittaluokka	0,5143	0,0000
Rungon pituus	0,4643	0,0000
Paksuimman elävän oksan läpimitta	0,3917	0,0000
Rungon tuoreoksaraja	0,3523	0,0000
Rungon paksuimman kuivan oksan läpimitta	0,3260	0,0000
Puuston kehitysluokka	0,1883	0,0000
Kasvupaikkaluokka	-0,0880	0,0000
Metsikön maantieteellinen sijainti	-0,0709	0,0000
Turvekerroksen paksuus (turvemailla)	-0,0321	0,3965
Kasvupaikkatyyppi (metsä- tai suotyyppi)	0,0192	0,2391
Rungon etäisyys ojan keskeltä (turvemailla)	0,0083	0,8074
Metsikön harvennuskertymän sahapuun tilavuus (m³/ha)		
Harvennushakkuun kokonaiskertymä	0,5981	0,0000
Runkojen keskipituus	0,4338	0,0000
Metsikön kokonaistilavuus	0,4170	0,0000
Runkojen keskitilavuus	0,3842	0,0000
Runkojen keskimääräinen tuoreoksaraja	0,3744	0,0000
Runkojen keskiläpimitta	0,3647	0,0000
Turvekerroksen paksuus (turvemailla)	-0,2769	0,0595
Moniväärien runkojen osuus runkoluvusta	0,2562	0,0003
Runkojen keskimääräinen kuivaoksaraja	0,1985	0,0048
Teknisesti virheettömien runkojen osuus runkoluvusta	0,1856	0,0085
Runkojen keskimääräinen paksuimman elävän oksan läpimitta	0,1831	0,0094
Kasvupaikkaluokka	-0,1670	0,0181
Yli 30 mm:n oksia sisältäneiden runkojen osuus runkoluvusta	0,1659	0,0189
Runkojen keskimääräinen latvussuhde	-0,1662	0,0187
Runkojen keskimääräinen paksuimman kuolleen oksan läpimitta	0,1591	0,0000
Puuston runkoluku	-0,1245	0,0789
Puuston pohjapinta-ala	0,1204	0,0929
Metsikön maantieteellinen sijainti	-0,1198	0,0912
Poistettujen runkojen runkoluku	0,0912	0,1988
Puuston kehitysluokka	0,0829	0,2434
Kasvupaikkatyyppi (metsä- tai suotyyppi)	0,0698	0,3257
Runkojen keskimääräinen etäisyys ojan keskeltä (turvemailla)	0,0242	0,8677

Metsikön harvennushakkuukertymän sahauskelpoiseen puutavaran kokonaistilavuuteen vaikuttivat positiivisesti pääasiassa kaikkien puutavaralajien hakkuukertymän kokonaistilavuus sekä harventamattoman puuston keskipituus, kokonaistilavuus, keskiläpimitta ja tuoreoksaraja ja rungon keskitilavuus (taulukko 20). Positiivinen korrelaatio ilmeni myös suhteessa harventamattoman puuston kuivaoksarajaan, suurimman elävän ja kuolleen oksan keskiläpimittaan, moniväärien ja teknisesti virheettömien runkojen osuuteen ja yli 30 mm:n oksia sisältäneiden runkojen osuuteen. Heikko negatiivinen korrelaatio ilmeni suhteessa latvussuhteeseen ja kasvupaikkaluokkaan.

Yhden selittävän puustotunnuksen malleissa harvennushakkuun kokonaiskertymällä voitiin selittää 36 %, puuston keskipituudella 19 %, metsikön kokonaistilavuudella 17 %, runkojen keskitilavuudella 15 %, runkojen keskimääräisellä tuoreoksarajalla 14 % ja runkojen keskiläpimitalla 13 % kertymän sahapuun kokonaistilavuuden vaihtelusta. Kivennäis- ja turvemaiden välillä oli lieviä eroja sahapuun kertymään vaikuttavissa puustotunnuksissa. Turvemailla yli 30 mm paksuja oksia sisältäneiden runkojen osuus ja tuoreoksaraja saivat selittävinä tekijöinä suuremman painoarvon kuin kivennäismailla.

Kivennäis- ja turvemaiden metsiköille laadittiin omat hakkuukertymän sahapuun kokonaistilavuuden ja yksittäisten sahapuutavaralajien tilavuuden ennustemallit (taulukot 21 ja 22). Kivennäismailla sahapuun kokonaistilavuutta ennustavan mallin selitysaste oli 51 % ja mallin keskivirhe 6,8 m^3/ha. Pikkutukin ja lyhyttukin hakkuukertymän ennusteet olivat tässä tarkimmat. Malleissa olivat mukana dummy-muuttujina tuore kangas ja kuiva kangas. Turvemailla sahapuun kokonaistilavuutta ennustavan mallin selitysaste oli 41 % ja mallin keskivirhe 5,1 m^3/ha. Yksittäisistä sahauskelpoisista puutavaralajeista olivat tässä pikku- ja lyhyttukin kertymien ennusteet tarkimmat. Tyvitykin kertymän ennusteet oli selvästi epätarkemmat kuin muiden sahapuutavaralajien ennusteet. Turvemaiden malliin ei liitetty suotyyppiä kuvaavia muuttujia, sillä niillä ei ollut selvää vaikutusta sahapuun kokonaiskertymään tai yksittäisten sahauskelpoisten puutavaralajien kertymiin.

Taulukko 21. Kivennäismaiden metsiköiden harvennushakkuukertymän sahattavien puutavaralajien tilavuutta (m^3/ha) ennustavat regressiomallit. (MäT = mäntytukki, MäT tyvi = mäntytyvitukki, MäPT = mäntypikkutukki, MäLT = mäntylyhyttukki).

Muuttuja	Sahapuu-kertymä	MäT	MäT tyvi	MäPT	MäLT
Vakio	-29,940	-20,093	-2,0851	0,2410	-8,0032
Harventamattoman puuston runkoluku (kpl/ha)	-0,0123	0,0034	0,0003	-0,0105	-0,0056
Poistettavan puuston runkoluku (kpl/ha)	0,0235	-0,0014	-0,0002	0,0138	0,0113
Virheettömien puiden osuus runkoluvusta (%)	0,274	0,0245	-0,0001	0,0943	0,1553
Harventamattoman puuston keskiläpimitta (cm)	0,788	1,137	0,150	-0,1752	-0,3246
Harventamattoman puuston keskipituus (m)	1,855	-0,0218	-0,0270	0,7561	1,1478
Dummy-muuttujat:					
Tuore kangas = 1, muut = 0	-2,1957	-0,3662	0,2331	-0,8187	-1,4744
Kuiva kangas =1, muut = 0	-0,7929	0,8617	0,14866	-1,2075	0,5146
Korrelaatiokerroin (r)	0,714	0,612	0,348	0,680	0,653
Selitysaste (r^2)	0,509	0,375	0,121	0,462	0,427
Keskivirhe (SE)	6,783	2,472	0,733	3,407	3,609

Taulukko 22. Turvemaiden metsiköiden harvennushakkuukertymän sahattavien puutavaralajien tilavuutta (m3/ha) ennustavat regressiomallit. (MäT = mäntytukki, MäT tyvi = mäntytyvitukki, MäPT = mäntypikkutukki, MäLT = mäntylyhyttukki).

Muuttuja	Sahapuu-kertymä	MäT	MäT tyvi	MäPT	MäLT
Vakio	-2,9445	-0,7467	-2,8480	0,6492	0,0011
Rungon keskitilavuus (dm^3/r)	-0,0507	-0,0220	0,0264	-0,0131	-0,0421
Puuston tilavuus (m^3/ha)	-0,0040	-0,0034	-0,0023	-0,0017	0,0034
Turvekerroksen paksuus (cm)	-0,0313	-0,0033	0,0136	-0,0179	-0,0237
Tuoreoksaraja (m)	2,2109	0,7996	-0,5939	0,7116	1,2937
Moniväärien runkojen osuus runkoluvusta (%)	-0,1098	-0,0271	0,0808	-0,0883	-0,0752
Yli 30 mm:n oksia sisältäneiden runkojen osuus runkoluvusta (%)	0,1636	0,0232	-0,0142	0,0946	0,0600
Virheettömien puiden osuus runkoluvusta (%)	-0,0685	-0,0170	0,0637	-0,0943	-0,0208
Poistettavia puita (kpl/ha)	-0,00013	-0,0011	0,0019	-0,0003	-0,0007
Korrelaatiokerroin (r)	0,639	0,508	0,402	0,720	0,692
Selitysaste (r^2)	0,408	0,258	0,161	0,519	0,479
Keskivirhe (SE)	5,072	1,371	2,498	2,202	2,227

5.1.7 Metsikkö- ja puustovaatimukset kannattavalle sahapuun hankinnalle

Taulukkoon 23 on koottu tämän tutkimuksen perusteella laskettuja, metsiköiden puustotunnusten keskiarvoja, joilla voidaan saavuttaa tiettyjä sahapuun kertymätavoitteita (m^3/ha). Sahattavina puutavaralajeina olivat perusapteerauksessa käytetyt männyn puutavaralajit eli tyvitukki, normaalitukki, pikkutukki ja lyhyttukki.

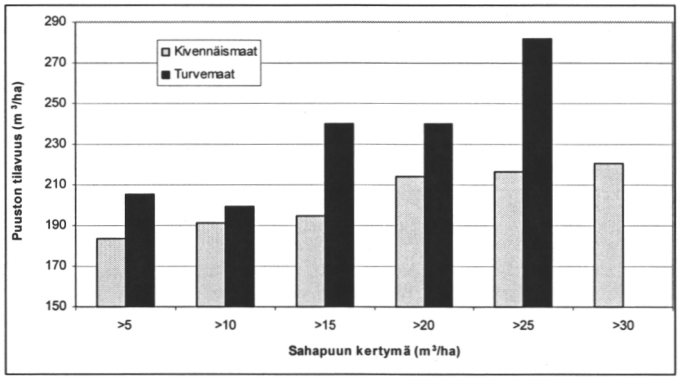
Puuston vähäinenkin keskimääräisen rinnankorkeusläpimitan ja keskipituuden kasvu kohottaa sahapuun kertymää selvästi. Sahapuun vielä varsin lievä kertymävaatimus 5 m^3/ha edellyttää puustolta sekä kivennäis- että turvemailla vähintään 15 cm:n keskiläpimittaa ja yli 13 m:n keskipituutta. Sahapuun korkea kertymävaatimus 20 m^3/ha edellyttää kivennäismailla jo 18 cm:n keskiläpimittaa ja vähintään 16 m:n keskipituutta, mutta turvemailla kuitenkin vain 16 cm:n keskiläpimitta ja 15 m:n keskipituutta.

Turvemailla tuoreoksarajan ja alimman kuolleen oksan (läpimitta yli 1,0 cm) sijaintikorkeuden kohoaminen sekä teknisesti virheettömien runkojen osuuden nousu kohottavat sahapuun hakkuukertymää huomattavasti enemmän kuin kivennäismailla. Sekä elävät että kuolleet oksat voivat olla turvemailla paksumpia kuin kivennäismailla samalla sahapuun hakkuukertymän tavoitetasolla.

Turvemailla tulee puuston kokonaistilavuuden olla suurempi kuin kivennäismailla, jotta saavutetaan sama sahapuun kertymä (kuva 21). Metsikön kokonaistilavuuden kasvu merkitsee suhteellisesti suurempaa sahapuun kertymän kasvua turvemailla kuin kivennäismailla. Sahapuun kertymä ei ylittänyt yhdessäkään tämän tutkimuksen turvemaiden metsikössä tasoa 30 m^3/ha.

Taulukko 23. Sahapuun vaihtoehtoisten vähimmäiskertymätavoitteiden (m^3/ha) perusteella määritettyjä vähimmäisvaatimuksia puustolle kivennäis- ja turvemaiden harvennusmänniköissä.

Sahapuun kertymätavoite (m^3/ha)	Keskiläpimitta (cm)	Keskipituus (m)	Runkoluku (kpl/ha)	Tuore-oksaraja (m)	Kuiva-oksaraja (m)	Paksuimman oksan läpimitta (mm) Elävä	Kuollut	Virheettömien runkojen osuus (%)
				Kivennäismaat				
≥ 5	15,1	13,5	1600	7,6	1,7	24	19	13
≥ 10	15,3	13,7	1650	7,7	1,7	24	20	14
≥ 15	16,0	14,3	1500	8,2	1,9	25	20	16
≥ 20	18,3	15,9	1150	9,3	2,4	27	21	15
≥ 25	18,0	16,1	1200	9,8	2,3	28	22	13
≥ 30	18,0	16,5	1200	10,3	2,2	28	22	13
				Turvemaat				
≥ 5	14,6	13,4	1750	8,1	2,2	27	21	13
≥ 10	14,7	13,5	1700	8,2	2,3	28	22	12
≥ 15	15,9	14,7	1500	9,3	3,1	33	25	16
≥ 20	15,9	14,7	1500	9,3	3,1	33	25	16
25-30	17,4	17,1	1300	12,4	4,6	33	26	23



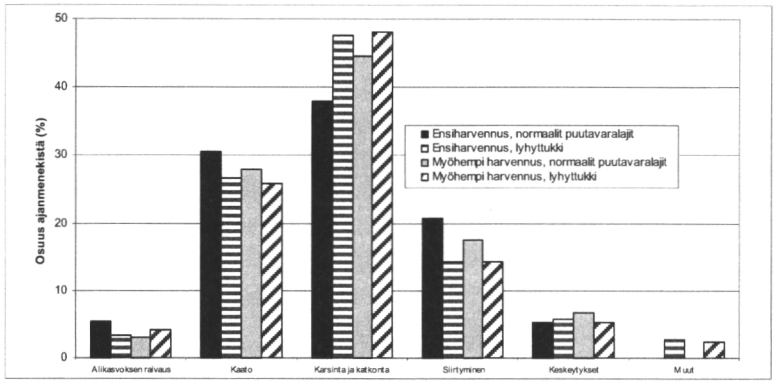
Kuva 21. Sahapuun vaihtoehtoisten hakkuukertymätavoitteiden edellyttämät harventamattoman puuston kokonaistilavuudet kivennäis- ja turvemaiden harvennusmänniköissä.

5.2 HARVENNUSMÄNNYN HANKINNAN TUOTTAVUUS JA KUSTANNUKSET

5.2.1 Hakkuun tuottavuus

5.2.1.1 Ajanmenekki

Harvennusmännyn korjuukokeissa hakkuun ajankäyttö koostui ensiharvennuksilla eri työvaiheista korjuulohkoittain kuvan 22 mukaisesti. Runkokohtaiset työskentelyajat olivat sekä lyhyttukkilohkoilla että normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla keskimäärin noin 23 sekuntia. Karsinnan ja katkonnan osuus ajanmenekistä oli lyhyttukkilohkoilla keskimäärin 9,7 prosenttiyksikköä suurempi kuin



Kuva 22. Koneellisen hakkuun ajankäytön jakautuminen eri työvaiheisiin lyhyttukkitekniikalla ja normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla.

normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla. Runkokohtaisesti tämä ero tarkoitti noin 3 sekuntia. Rungon käsittelyn (kaato, karsinta ja katkonta) osuus kokonaisajankäytöstä oli normaaleilla puutavaralajeilla hakatuilla lohkoilla 65,5 % (16 s/runko) ja lyhyttukkilohkoilla 74,5 % (19 s/runko).

Myöhemmissä harvennuksissa runkokohtaiset keskimääräiset työskentelyajat olivat sekä lyhyttukkilohkoilla että normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla noin 29 sekuntia. Karsinnan ja katkonnan osuus ajanmenekistä oli lyhyttukkilohkoilla keskimäärin 3,4 prosenttiyksikköä suurempi kuin normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla (kuva 22). Runkokohtaisena keskimääräisenä aikana tämä tarkoitti noin 2 sekuntia. Kaadon, karsinnan ja katkonnan osuus kokonaisajankäytöstä oli normaaleilla puutavaralajeilla hakatuilla lohkoilla 72,5 % (21 s/runko) ja lyhyttukkilohkoilla 73,9 % (20 s/runko).

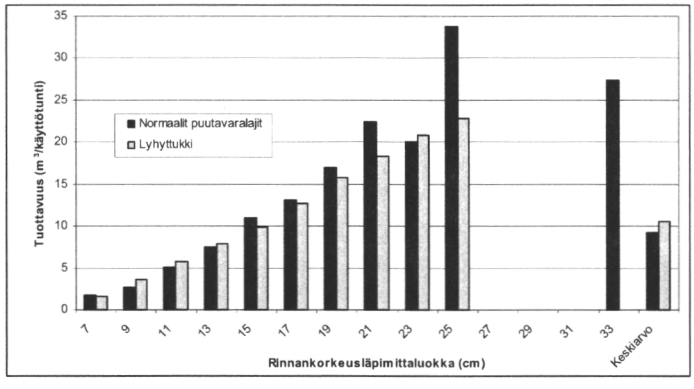
5.2.1.2 Käyttötuntituottavuus perusaineistossa

Hakkuun käyttötuntituottavuus ensiharvennuksissa lyhyttukkitekniikalla ja normaalein puutavaralajein hakattaessa on esitetty rinnankorkeusläpimittaluokittain ja keskimäärin kuvassa 23. Tuottavuus oli lyhyttukkitekniikalla hakatuilla lohkoilla keskimäärin 1,4 m^3/h korkeampi kuin normaalein puutavaralajein hakatuilla. Mäntypölkyn keskitilavuus oli ensiharvennuksissa kuitupuulla 37 dm^3, lyhyttukilla 51 dm^3 ja normaalilla tukilla 179 dm^3. Hakkuun tuottavuudet laskettiin kussakin rinnankorkeusläpimittaluokassa erikseen ja korjuulohkoille keskiarvot. Tästä seuraa, että läpimittaluokittaisten tuottavuuksien keskiarvot eivät ole samat kuin korjuulohkoittaiset keskiarvot.

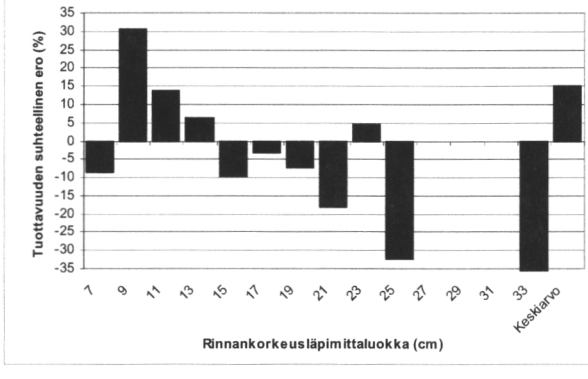
Ensiharvennusten koneellisen hakkuun tuottavuuden suhteelliset erot korjuumenetelmien välillä on esitetty kuvassa 24. Rinnankorkeusläpimittaluokka vaikutti olennaisesti korjuumenetelmien tuottavuuden suhteisiin. Läpimittaluokissa 15 - 25 cm tuottavuus oli normaalein puutavaralajein hakattaessa 5 - 45 % korkeampi, mutta luokissa 9 - 13 cm 5 - 20 % alempi kuin lyhyttukkitekniikassa. Rungon järeytyessä normaalein puutavaralajein hakkuun tuottavuus kohosi säännönmukaisesti

suhteessa lyhyttukkitekniikkaan. Keskimäärin lyhyttukkitekniikalla hakkuu oli kuitenkin noin 15 % tuottavampaa kuin normaalein puutavaralajein hakattaessa, koska puuston rinnankorkeusläpimittajakauma painottui alle 15 cm:n luokkiin.

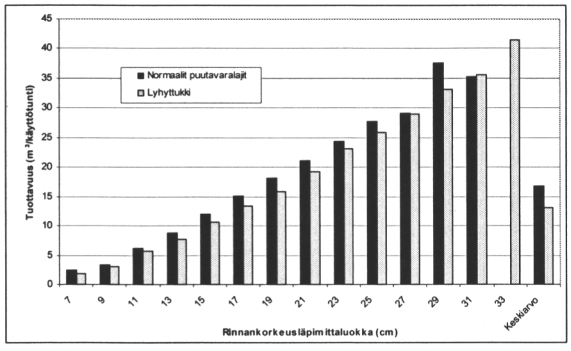
Hakkuun käyttötuntituottavuus myöhemmissä harvennuksissa lyhyttukkitekniikalla ja normaalein puutavaralajein hakattaessa on esitetty rinnankorkeusläpimittaluokittain ja keskimäärin kuvassa 25. Tuottavuus oli lyhyttukkitekniikalla hakatuilla lohkoilla keskimäärin 3,8 m^3/h alhaisempi kuin normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla. Korjuumenetelmien välinen tuottavuusero vaihteli rungon läpimittaluokittain välillä 1 - 4 m^3/h. Mäntypölkyn keskitilavuus oli myöhemmissä harvennuksissa kuitupuulla 34 dm^3, lyhyttukilla 55 dm^3 ja normaalilla tukilla 189 dm^3. Läpimittaluokittaisten tuottavuuksien keskiarvot eivät ole tässäkään samat kuin korjuulohkoittaiset keskiarvot.



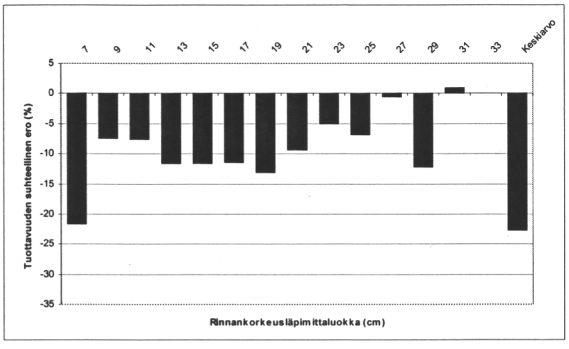
Kuva 23. Koneellisen hakkuun tuottavuus käyttötunnissa rungon rinnankorkeusläpimittaluokittain ja keskiarvoina lyhyttukkitekniikalla ja normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla ensiharvennuksissa.



Kuva 24. Ensiharvennusten koneellisen hakkuun tuottavuuden suhteelliset erot korjuumenetelmien välillä rinnankorkeusläpimittaluokittain ja keskiarvoina. Lyhyttukkitekniikalla hakattuja lohkoja verrataan tässä normaalein puutavaralajein hakattuihin lohkoihin.



Kuva 25. Koneellisen hakkuun tuottavuus käyttötunnissa rungon rinnankorkeusläpimittaluokittain ja keskiarvona lyhyttukkitekniikalla ja normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla myöhemmissä harvennuksissa.

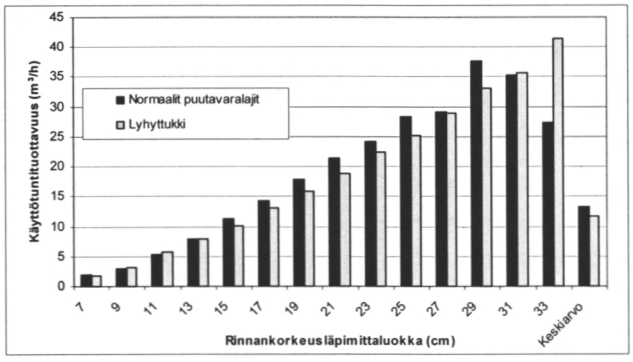


Kuva 26. Myöhempien harvennusten koneellisen hakkuun tuottavuuden suhteelliset erot korjuumenetelmien välillä rinnankorkeusläpimittaluokittain ja keskimäärin. Lyhyttukkitekniikalla hakattuja lohkoja verrataan tässä normaalein puutavaralajein hakattuihin lohkoihin.

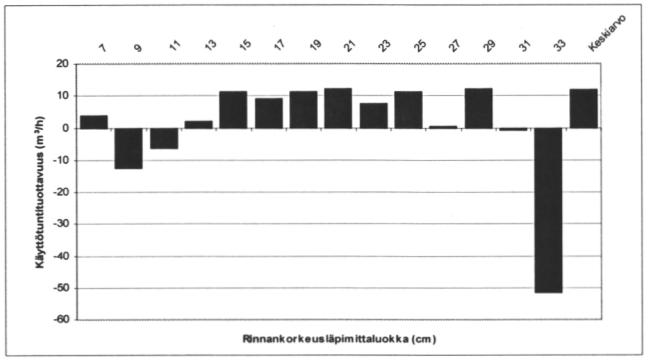
Suhteellisilla eroilla mitattuna tuottavuus oli myöhemmissä harvennuksissa lyhyttukkitekniikalla hakattaessa keskimäärin 23 % alhaisempi kuin normaalein puutavaralajein hakattaessa (kuva 26). Korjuumenetelmien tuottavuusero oli tämänsuuntainen läpimittaluokasta riippumatta.

Koneellisen hakkuun käyttötuntituottavuudet lyhyttukkitekniikalla ja normaalein puutavaralajein hakattaessa on esitetty rinnankorkeusläpimittaluokittain ja keskiarvoina ensiharvennuksille ja myöhemmille harvennuksille yhteisesti kuvassa 27. Normaalein puutavaralajein hakkuu oli keskimäärin 1,6 m^3/h tuottavampaa kuin lyhyttukkitekniikalla hakkuu. Pienissä rinnankorkeusläpimittaluokissa (9 - 11 cm) lyhyttukkitekniikalla hakkuu oli hieman tuottavampaa kuin normaaleilla puutavaralajeilla hakkuu, mutta näitä järeämmissä luokissa ero oli selvästi päinvastainen ja kasvoi läpimittaluokan suurentuessa.

Suhteellisilla eroilla mitattuna normaalein puutavaralajein hakkuu oli kaikissa harvennuksissa keskimäärin 12 % tuottavampaa kuin lyhyttukkitekniikalla hakkuu (kuva 28). Pienissä läpimittaluokissa (9 - 11 cm) lyhyttukkitekniikalla hakkuu oli tosin 6 - 13 % tuottavampaa kuin normaaleilla puutavaralajeilla hakkuu.



Kuva 27. Koneellisen hakkuun tuottavuus käyttötunnissa rungon rinnankorkeusläpimittaluokittain ja keskiarvoina normaalein puutavaralajein ja lyhyttukkitekniikalla hakatuilla lohkoilla. Tulokset laskettu yhteisinä ensiharvennuksille ja myöhemmille harvennuksille.



Kuva 28. Koneellisen hakkuun tuottavuuden suhteelliset erot korjuumenetelmien välillä rinnankorkeusläpimittaluokittain ja keskiarvoina. Lyhyttukkitekniikalla hakattuja lohkoja verrataan normaalein puutavaralajein hakattuihin lohkoihin. Tulokset laskettu yhteisinä ensiharvennuksille ja myöhemmille harvennuksille.

5.2.1.3 Käyttötuntituottavuus tasoitetuilla puustotiedoilla

Koska koeleimikoiden korjuulohkot erosivat toisistaan puuston määrän ja läpimittajakauman suhteen ja lisäksi eri suuntiin ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa, hakkuun käyttötuntituottavuudet laskettiin kummallekin hakkuutekniikalle normaaleilla puutavaralajeilla hakattujen lohkojen keskimääräisillä puustotiedoilla painottaen läpimittaluokittaisia puutavaralajien kertymiä. Tällä menettelyllä poistettiin hakattujen puustojen erilaisten läpimittajakaumien vaikutukset vertailtaessa eri lohkojen korjuutekniikoiden keskimääräistä tuottavuutta ja korjuutek niikoiden väliset tuottavuuserot saatiin esille oikeissa suhteissa. Laskelmien perusteella hakattaessa mäntytukin ja -kuitupuun ohella lyhyttukkia käyttötuntituottavuus oli 1,3 - 1,8 m^3/h eli 9 - 10 % alhaisempi kuin hakattaessa pelkästään tukkia ja kuitupuuta (taulukko 24).

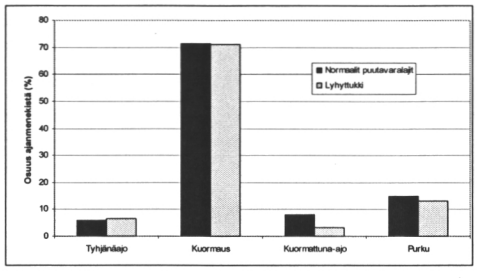
Taulukko 24. Koneellisen hakkuun käyttötuntituottavuus rungon rinnankorkeusläpimittaluokittain tasoitetuilla ja rinnankorkeusläpimitalla painotetuilla puustotiedoilla ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa normaalein puutavaralajein ja lyhyttukkitekniikalla hakattaessa. (MäT = mäntytukki, MäK = mäntykuitupuu, MäLT = mäntylyhyttukki).

	Normaalit puutavaralajit			Lyhyttukkitekniikka				Ero
	MäT	MäK	Keskimäärin	MäT	MäK	MäLT	Keskimäärin	Keskimäärin
				Käyttötuntituottavuus, m³/h				%
Ensiharvennus	37,0	12,1	13,3	33,6	8,2	16,5	12,0	-10,1
Myöhempi harvennus	33,9	13,5	20,8	39,0	10,8	19,1	19,0	-8,7
Harvennukset keskimäärin	38,2	12,7	18,3	38,8	9,7	18,3	16,7	-9,1

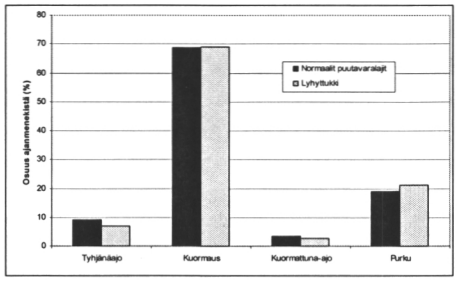
5.2.2 Metsäkuljetuksen ajanmenekki ja käyttötuntituottavuus

Metsäkuljetuksen ajankäyttö jakautui eri työvaiheisiin ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa korjuulohkoittain kuvissa 29 ja 30 esitetyllä tavalla. Työvaihejakauman laskennan perustana oli kuormatraktorin koko työskentelyaika.

Metsäkuljetuksen ajankäytön jakaumissa oli vain pieniä eroja ensiharvennusten ja myöhempien harvennusten välillä. Myöhemmissä harvennuksissa tyhjänäajon ja etenkin kuorman purkamisen osuudet ajankäytöstä olivat hieman suurempia kuin ensiharvennuksissa. Kuormauksen ja kuormattuna-ajon osuudet ajankäytöstä olivat myöhemmissä harvennuksissa sen sijaan hieman pienemmät kuin ensiharvennuksissa.



Kuva 29. Metsäkuljetuksen ajankäytön jakautuminen eri työvaiheisiin normaalein puutavaralajein ja lyhyttukkitekniikalla hakatuilla lohkoilla ensiharvennuksissa.



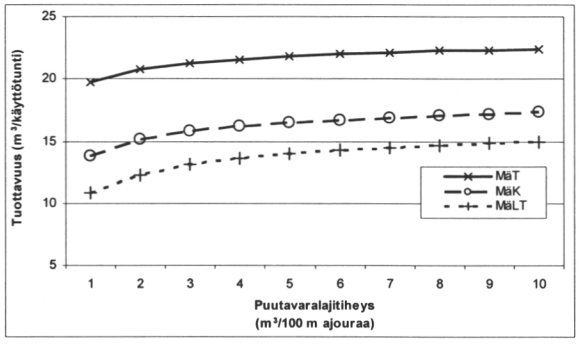
Kuva 30. Metsäkuljetuksen ajankäytön jakautuminen eri työvaiheisiin normaalein puutavaralajein ja lyhyttukkitekniikalla hakatuilla lohkoilla myöhemmissä harvennuksissa.

Metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuuteen vaikuttavat pääasiassa puutavaralajitiheys ajouran varressa, keskimääräinen kuljetusmatka, kuorman koko ja maastoluokka (Kuitto ym. 1994). Tässä tutkimuksessa käytettiin tuottavuutta laskettaessa metsätraktorin kuormakokona tukilla 14 m^3, kuitupuulla 11,2 m^3 ja lyhyttukilla 8,1 m^3 sekä keskimääräisenä kuljetusmatkana 100 m. Kaikki puutavaralajit ajettiin yhden nipun kuormissa.

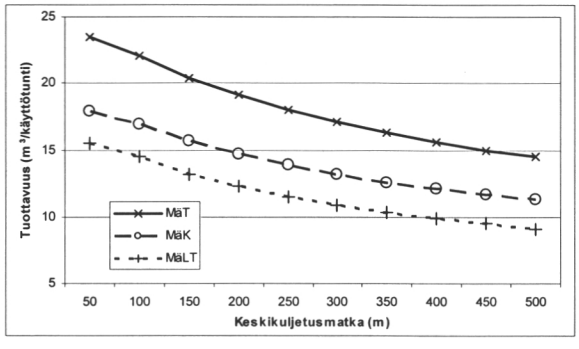
Puutavaralajin tiheys ajouran varressa vaikutti metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuuteen kuvan 31 mukaisesti. Tuottavuus kasvoi tukilla 14 %, kuitupuulla 25 % ja lyhyttukilla 39 %, kun puutavaralajin tiheys (m^3/100 m ajouraa) ajouran varressa kasvoi yhdestä kymmeneen kuutiometriin.

Puutavaralajin keskimääräinen metsäkuljetusmatka vaikutti metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuuteen kuvan 32 mukaisesti. Tuottavuus laski tukilla 38 %, kuitupuulla 37 % ja lyhyttukilla 41 %, kun keskikuljetusmatka kasvoi 50 metristä 500 metriin.

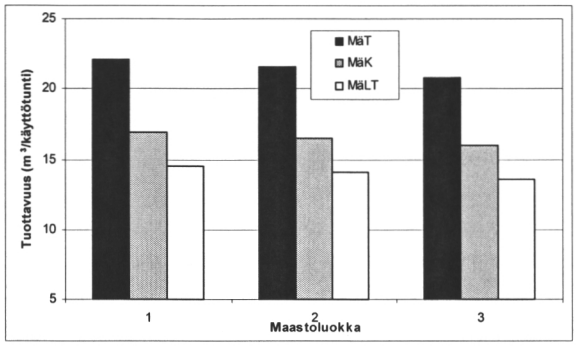
Maaston vaikeutuminen vaikutti metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuuteen varsin lievästi. Tuottavuuden lasku oli kaikilla puutavaralajeilla 5 - 6 %, kun maastoluokka vaikeutui luokasta 1 luokkaan 3 (kuva 33).



Kuva 31. Metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuus ajouran tavaralajitiheyden mukaan puutavaralajeittain.



Kuva 32. Metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuus keskimääräisen metsäkuljetusmatkan mukaan puutavaralajeittain.



Kuva 33. Maastoluokan vaikutus metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuuteen puutavaralajeittain.

Tämän tutkimuksen ensiharvennuskohteiden lyhyttukkilohkoilla metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuus oli tukilla 17,5 m^3/h, kuitupuulla 15,6 m^3/h ja lyhyttukilla 13,0 m^3/h ja puutavaralajien tilavuudella painotettu keskiarvo 14,5 m^3/h. Normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla tuottavuus oli vastaavasti tukilla 17,5 m^3/h ja kuitupuulla 15,8 m^3/h ja puutavaralajien tilavuudella painotettu keskiarvo 15,9 m^3/h. Tuottavuus oli normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla siis 1,4 m^3/h (10 %) korkeampi kuin lyhyttukkilohkoilla.

Myöhempien harvennusten lyhyttukkilohkoilla metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuus oli tukilla 19,2 m^3/h, kuitupuulla 14,8 m^3/h ja lyhyttukilla 12,9 m^3/h ja puutavaralajien tilavuudella painotettu keskiarvo 14,9 m^3/h. Normaalein puutavaralajien hakatuilla lohkoilla tuottavuus oli tukilla 20,8 m^3/h ja kuitupuulla 16,8 m^3/h ja puutavaralajien tilavuudella painotettu keskiarvo 18,6 m^3/h. Tuottavuus oli normaalein puutavaralajein hakatulla lohkoilla 3,7 m^3/h (25 %) korkeampi kuin lyhyttukkilohkoilla.

Liitteessä 10 on esitetty yksityiskohtaisesti metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuudet puutavaralajin ajouratiheyden, metsäkuljetusmatkan ja maastoluokan mukaan.

5.2.3 Korjuukustannukset

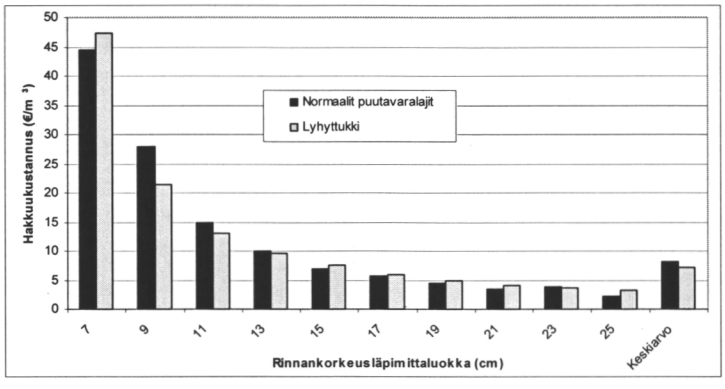
5.2.3.1 Hakkuu

5.2.3.1.1 Perusaineisto

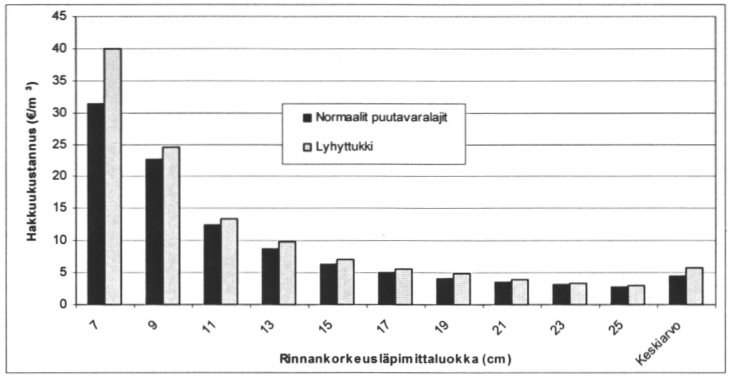
Kuvissa 34 ja 35 on esitetty koneellisen hakkuun yksikkökustannukset ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa rinnankorkeusläpimittaluokittain lyhyttukkitekniikalla ja normaalein puutavaralajein hakattaessa. Ensiharvennusten lyhytukkilohkoilla hakkuukustannus oli keskimäärin 7,23 €/m^3 ja normaalien puutavaralajien lohkoilla 8,24 €/m^3. Ensiharvennuksissa normaalien puutavaralajien hakkuu oli siis keskimäärin 1,01 €/m^3 (13 %) kalliimpaa kuin hakattaessa mäntytukin ja -kuitupuun ohella myös lyhyttukkia. Myöhempien harvennusten lyhyttukki-

lohkoilla hakkuukustannus oli keskimäärin 5,89 €/m^3 ja normaalien puutavaralajien lohkoilla 4,54 €/m^3. Hakkuu lyhyttukkitekniikalla oli siis keskimäärin 1,3 €/m^3 (29 %) kalliimpaa kuin hakkuu normaalein puutavaralajein.

Hakkuutekniikoiden kustannuserot korostuivat vertailtaessa ensiharvennuksia ja myöhempiä harvennuksia toisiinsa. Lyhyttukin hakkuu mäntytukin ja -kuitupuun ohella oli ensiharvennuksissa 1,38 €/m^3 (ero käyttötuntituottavuudessa 2,5 m^3/h) kalliimpaa kuin myöhemmissä harvennuksissa. Normaalein puutavaralajein hakkuu oli puolestaan ensiharvennuksissa 3,74 €/m^3 (ero käyttötuntituottavuudessa 7,7 m^3/h) kalliimpaa kuin myöhemmissä harvennuksissa.



Kuva 34. Koneellisen hakkuun yksikkökustannukset rinnankorkeusläpimittaluokittain lyhyttukkitekniikalla ja normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla ensiharvennuksissa. Hakkuukoneen tuntikustannus oli 75,7 €.



Kuva 35. Koneellisen hakkuun yksikkökustannukset rinnankorkeusläpimittaluokittain lyhyttukkitekniikalla ja normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla myöhemmissä harvennuksissa. Hakkuukoneen tuntikustannus oli 75,7 €.

5.2.3.1.2 Tasoitetut puustotiedot

Koneellisen hakkuun yksikkökustannukset laskettiin kummallekin hakkuutekniikalle myös normaalein puutavaralajein hakattujen lohkojen keskimääräisillä puustotiedoilla ja läpimittaluokittaisilla puutavaralajien kertymillä painotettujen tuottavuuksien perusteella. Lyhyttukin hakkuu mäntytukin ja -kuitupuun ohella oli tällöin 0,34 - 0,67 €/m^3 (10 - 11 %) kalliimpaa kuin normaalein puutavaralajein hakkuu (taulukko 25).

Taulukko 25. Koneellisen harvennushakkuun yksikkökustannukset normaalein puutavaralajein hakattujen lohkojen tasoitetuilla puustotiedoilla laskettuna ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa sekä harvennuksissa keskimäärin hakattaessa normaalein puutavaralajein ja lyhyttukkitekniikalla. Hakkuukoneen tuntikustannus oli 75,7 €. (MäT = mäntytukki, MäK = mäntykuitupuu, MäLT = mäntylyhyttukki).

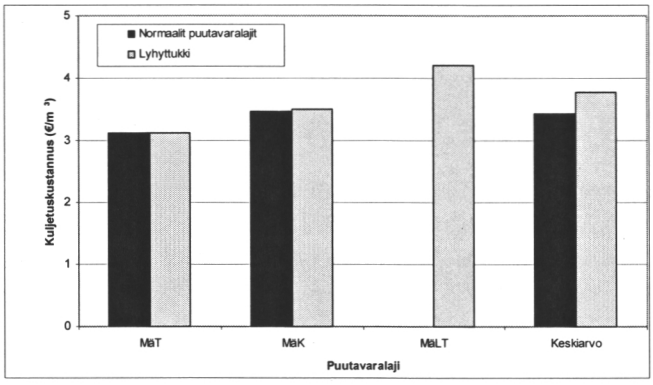
	Normaalit puutavaralajit			Lyhyttukkitekniikka				Ero
	MäT	MäK	Keski-määrin	MäT	MäK	MäLT	Keski-määrin	Keski-määrin
	Yksikkökustannus, €/m^3							%
Ensiharvennus	2,05	6,29	5,70	2,25	9,20	4,57	6,34	+ 11,2
Myöhempi harvennus	2,24	5,60	3,65	1,93	7,01	3,97	3,99	+ 9,5
Harvennukset keskimäärin	1,98	5,95	4,14	1,95	7,77	4,44	4,54	+ 10,1

5.2.3.2 Metsäkuljetus

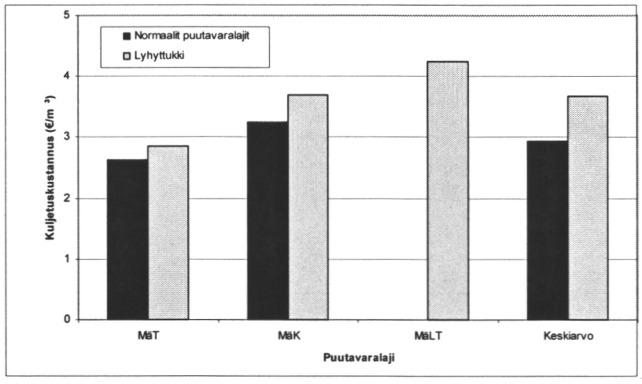
Kuvissa 36 ja 37 on esitetty metsäkuljetuksen yksikkökustannukset puutavaralajeittain ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa lyhyttukkitekniikalla ja normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla. Ensiharvennuksissa keskimääräisissä yksikkökustannuksissa ei ollut suurta eroa lyhyttukkilohkojen ja normaalein puutavaralajein hakattujen lohkojen välillä, koska ero käyttötuntituottavuudessa oli pieni (1,4 m^3/h). Metsäkuljetuksen kustannukset olivat normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla 3,43 €/m^3 ja lyhyttukkilohkoilla 3,77 €/m^3. Metsäkuljetus oli siis lyhyttukkilohkoilla keskimäärin 0,34 €/m^3 (10 %) kalliimpaa kuin normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla.

Myöhemmissä harvennuksissa metsäkuljetuskustannukset olivat normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla 2,94 €/m^3 ja lyhyttukkilohkoilla 3,67 €/m^3. Metsäkuljetus oli siis lyhyttukkilohkoilla keskimäärin 0,72 €/m^3 (25 %) kalliimpaa kuin normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla. Ero käyttötuntituottavuudessa oli korjuulohkojen välillä vastaavasti 3,7 m^3/h.

Metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuus oli ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa keskimäärin normaalein puutavaralajien hakatuilla lohkoilla 2,6 m^3/h (15 %) korkeampi kuin lyhyttukkilohkoilla. Metsäkuljetuskustannukset olivat lyhyttukkilohkoilla 0,54 €/m^3 (17 %) korkeammat kuin normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla. Kuljetettujen puutavaralajien tilavuudella painotettu ero oli keskimäärin 20 %.



Kuva 36. Metsäkuljetuksen yksikkökustannukset normaalein puutavaralajein ja lyhyttukkitekniikalla hakatuilla lohkoilla ensiharvennuksissa. Kuormatraktorin tuntikustannus oli 54,7 €.



Kuva 37. Metsäkuljetuksen yksikkökustannukset normaalein puutavaralajein ja lyhyttukkitekniikalla hakatuilla lohkoilla myöhemmissä harvennuksissa. Kuormatraktorin tuntikustannus oli 54,7 €.

5.2.4 Autokuljetuksen tuottavuus ja kustannukset

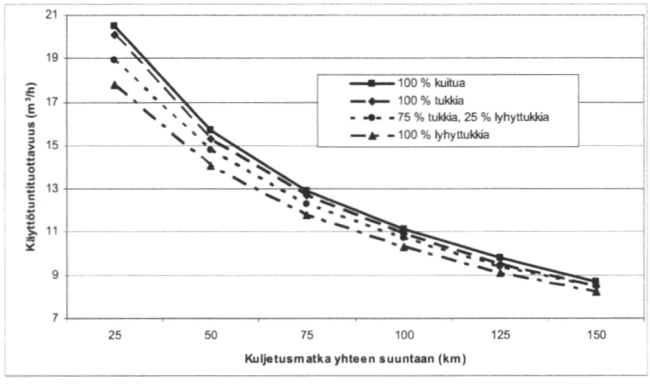
Korjuulohkoilta lyhyttukkitekniikalla ja normaalein puutavaralajein hakatun puutavaran autokuljetuksen tuottavuuksia ja kustannuksia vertailtiin eri puutavaralajien ja puutavaralajiyhdistelmien välillä Salon ja Uusitalon (2001) laskentamallilla. Vertailutasona olivat normaalein puutavaralajein hakattujen lohkojen autokuormat, joissa puutavara-auto oli oletettu kuormattavaksi kokonaan mäntytukilla tai -kuitupuulla. Näihin verrattiin kuormia, jotka olivat kuormattu kokonaan lyhyttukilla tai vetoauto lyhyttukilla ja perävaunu normaalitukilla. Ajoneuvoyhdistelmän kuormakooksi asetettiin noin 53 m^3.

Autokuljetuksen käyttötuntituottavuus ja yksikkökustannukset riippuivat puutavaralajin keskipituudesta, puutavaranippujen lukumäärästä ja kuormaamiseen käytetystä ajasta. Lyhyttukilla lisättiin kuormaamisen ja kuormauspaikalla viipymisen vakioaikaa arvionvaraisesti 25 - 57 % johtuen ko. puutavaralajin tavallista lyhy-

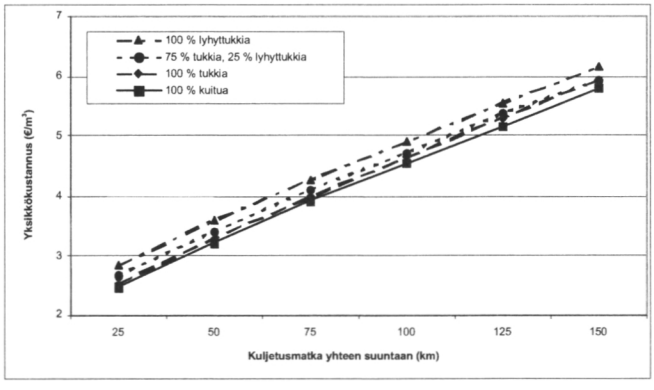
emmästä pituudesta ja nippujen sitomiseen kuormauspaikalla tarvittavasta lisäajasta.

Kuvassa 38 on esitetty autokuljetuksen käyttötuntituottavuudet erilaisilla puutavaralajiyhdistelmillä kuljetusmatkan mukaan. Puutavara-auton käyttötuntituottavuus oli männyn lyhyttukkia kuljetettaessa esimerkiksi 50 km:n yhdensuuntaisella kuljetusmatkalla 14,1 m^3/h eli 1,2 m^3/h (8 %) alhaisempi kuin männyn normaalitukkia kuljetettaessa. Tuottavuuserot eri puutavaralajeista koostuneiden kuormien välillä tasoittuivat kuljetusmatkan pidentyessä.

Autokuljetuksen yksikkökustannukset laskettiin käyttötuntituottavuuden ja auton tuntikustannusten perusteella, joksi asetettiin 50,5 euroa. Esimerkiksi 50 kilometrin kuljetusmatkalla männyn lyhyttukin kuljetuskustannus oli 3,58 €/m^3, kun se oli normaalilla mäntytukilla 3,30 €/m^3 (kuva 39).



Kuva 38. Autokuljetuksen käyttötuntituottavuus ajoneuvoyhdistelmän eri puutavaralajiyhdistelmillä yhdensuuntaisen kuljetusmatkan mukaan.



Kuva 39. Autokuljetuksen yksikkökustannukset ajoneuvoyhdistelmän eri puutavaralajivaihtoehdoilla yhdensuuntaisen kuljetusmatkan mukaan. Ajoneuvoyhdistelmän tuntikustannus oli 50,5 €.

5.2.5 Harvennusmännyn tehdashinta

Eri puutavaralajien tehdashinnat saadaan laskemalla yhteen kantohinta, hakkuu-, metsäkuljetus- ja kaukokuljetuskustannukset sekä puunhankinnan yleiskustannukset. Tässä hankintakustannuksiin ei lisätty yleiskustannuksia eli työnjohto- ja organisaatiokuluja ja puutavaralajin kantohinta oli arvio myyjälle maksettavasta hinnasta (taulukko 26).

Keskimääräinen kantohinta laskettiin korjuulohkojen puutavaralajien kertymillä painottaen. Hakkuukustannusten perusteena käytettiin lyhyttukkitekniikalla ja normaalein puutavaralajein hakattujen lohkojen tasoitettuja ja rinnankorkeusläpimittajakaumilla painotettuja lähtötietoja. Metsäkuljetuksen kustannukset laskettiin korjuulohkojen keskimääräisillä kuljetusmatkoilla (60 - 120 m) ja ajouranvarren puutavaralajitiheyksillä (2,3 - 8,0 m^3/100 m ajouraa) maastoluokassa 1. Kaukokuljetuskustannukset laskettiin 50 km:n yhdensuuntaiselle autokuljetusmatkalle kummallekin hakkuutekniikalle erikseen. Normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla käytettiin laskentaan kuormia, joissa oli pelkästään tukkia tai kuitupuuta. Lyhyttukkitekniikalla hakattujen lohkojen osalta käytettiin kuormia, joissa oli pelkästään lyhyttukkia.

Taulukossa 26 esitettyjen tulosten perusteella puutavaran tehdashinta oli ensiharvennuksissa lyhyttukkilohkoilla 1,51 €/m^3 (5 %) korkeampi kuin normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla. Myöhemmissä harvennuksissa lyhyttukkilohkojen puutavara oli tehtaalla 3,03 €/m^3 (8 %) halvempaa kuin normaalein puutavaralajein hakattujen lohkojen puutavara. Lyhyttukkilohkojen puutavara oli tehtaalla ensiharvennusten ja myöhempien harvennusten keskiarvona 1,85 €/m^3 (6 %) halvempaa kuin normaalein puutavaralajein hakattujen lohkojen puutavara.

Merkittävin ero lyhyttukkitekniikan ja normaalein puutavaralajein hakkuun välillä oli keskimääräisissä kantohinnoissa (4,54 €/m^3). Puutavaran kantohinta muodosti lyhyttukkilohkoilla 64 % ja normaalein puutavaralajien hakatuilla lohkoilla

Taulukko 26. Harvennusmännyn tehdashinnan muodostuminen korjuukokeiden leimikoiden puutavara-aineistolla. (MäT = mäntytukki, MäLT = mäntylyhyttukki, MäK = mäntykuitupuu).

	Ensiharvennus				Myöhempi harvennus				Harvennukset keskimäärin
	MäT	MäLT	MäK	Keski-määrin	MäT	MäLT	MäK	Keski-määrin	
				Kustannus (€/m^3)					
				Normaalit puutavaralajit					
Kantohinta	42,0		13,5	15,6	45,4		14,3	28,6	24,1
Hakkuu	2,0		6,2	5,7	2,2		5,6	3,7	4,2
Metsäkuljetus	3,2		3,5	3,4	2,7		3,2	2,9	3,0
Kaukokuljetus			3,2				3,2		3,2
Tehdashinta	50,5		26,4	27,9	53,5		26,2	38,3	34,3
				Lyhyttukkitekniikka					
Kantohinta	42,0	16,8	13,5	15,8	45,4	20,2	14,3	24,1	20,7
Hakkuu	2,2	4,5	9,3	6,4	2,0	4,0	7,1	4,0	4,5
Metsäkuljetus	3,2	4,4	3,5	3,7	2,9	4,2	3,7	3,7	3,7
Kaukokuljetus			3,5				3,5		3,5
Tehdashinta	51,0	29,3	29,8	29,4	53,8	32,0	28,6	35,2	32,5

70 % tukin tehdashinnasta. Erityisesti tässä on otettava huomioon, että tehdashinnan laskennassa ei otettu huomioon puunhankinnan yleiskustannuksia. Pelkät korjuu- ja kaukokuljetuskustannukset olivat lyhyttukkilohkoilla ensiharvennuksissa 1,31 €/m^3 (11 %), myöhemmissä harvennuksissa 1,51 €/m^3 (16 %) ja harvennuksissa keskimäärin 1,43 €/m^3 (14 %) korkeammat kuin normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla.

Myöhemmissä harvennuksissa ja koko aineistossa keskimääräinen kantohinta oli lyhyttukkitekniikalla hakatuilla lohkoilla alhaisempi kuin normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla, koska lyhyttukin riittävä kertymä asetettiin tutkimustavoitteiden mukaisesti etusijalle runkojen apteerauksessa. Tällä menettelytavalla hakattiin lyhyttukkia normaalitukin kustannuksella rinnankorkeusläpimittaluokassa 19 cm ja sitä järeämmissä läpimittaluokissa. Tästä johtuva vähennys normaalitukin osuudessa oli rungon rinnankorkeusläpimitasta riippuen 12 - 40 prosenttiyksikköä; vähennys oli suurin läpimittaluokassa 21 cm.

5.3 HARVENNUSMÄNNYN SAHAUS JA TUOTOT

5.3.1 Laskelmien lähtökohta

Sahaussimulointien empiirisessä tarkastelussa kaatokoepuiden pölkyistä koottiin luvun 4.3.1 *Kaatokoepuiden tukkien ja rungon konstruointi saheviipaleista* mukaisesti uudelleen alkuperäinen "virtuaalinen runko". Luvussa 5.3.2 *Simulointitulokset Metlan apteeraussimulaattorin tuottamien tukkien perusteella* laskennassa käytettiin aikaisemmin kuvatulla Metlan apteeraussimulaattorilla tuotettujen tukkien pituuksia ja läpimittoja. Arvoapteerauksessa käytetyt puutavaralajit ja niiden mitat olivat taulukon 2 ja liitteen 3 mukaiset.

Luvussa 5.3.3 *Simulointitulokset runkopankkiaineistosta apteerattujen tukkien perusteella – lyhyttukkitekniikka* käytettiin VTT:n menetelmällä apteerattuja tukkeja. Kaatokoepuut apteerattiin tässä menetelmässä koko pituudeltaan sahattaviksi tukeiksi ja soveltaen kunkin vaihtoehtoisen tukkipituuden vaikutuksen kuvauksessa aina vain yhtä tukkipituutta kaikille koepuille. Metlan apteeraussimulaattorilla ja VTT:n runkopankkianalyysin perusteella tuotettujen tukkien sahaussimulointitulokset eivät siis ole täysin vertailukelpoisia keskenään.

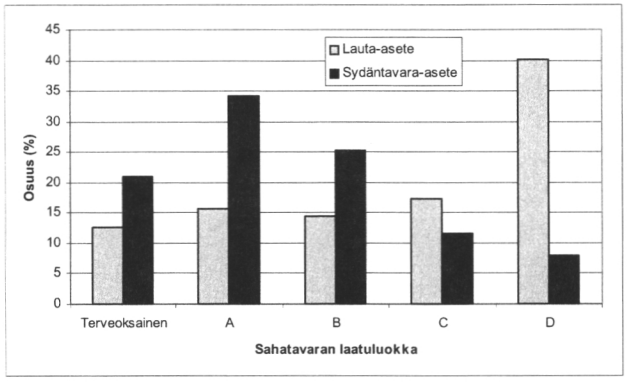
5.3.2 Simulointitulokset Metlan apteeraussimulaattorin tuottamien tukkien perusteella

5.3.2.1 Simulointi tukin pituuden mukaisiin sahatavaran pituuksiin

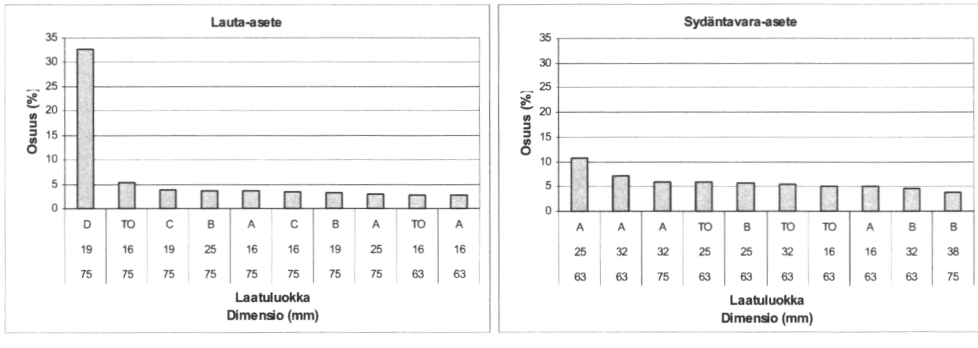
Simulointitulokset laskettiin kahdelle perusvaihtoehdolle, joissa tukit sahattiin liitteen 6 taulukoiden 6.1 ja 6.2 mukaisilla lauta- ja sydäntavara-asetesarjoilla. Kaikki sydäntavara-asetteiden dimensiot valittiin siten, että niistä oli mahdollista valmistaa liimalevylamelleja (lautaliimalevylamelleja, kapeita ja normaalin levyisiä lamelle-

ja). Muut lähtöarvot on esitetty liitteen 6 taulukoissa 6.3 ja 6.4. Tukkien jakaumat pituus- ja latvaläpimittaluokittain on esitetty aiemmin sivulla 43 kuvassa 8.

Sahatavarasta oli erikseen määriteltyä terveoksaista laatua lauta-asetesarjalla 13 % ja sydäntavara-asetesarjalla 21 % (kuva 40). NT-lajittelun mukaisen sahatavaran A-laadun osuus oli lauta-asetesarjalla 16 % ja sydäntavara-asetesarjalla 34 %; tämä oli yksinomaan ao. laatuluokan ala-laatua A4. Terveoksaisen laadun ja laatuluokkien A ja B yhteisosuus oli lauta-asetteilla 43 % ja sydäntavara-asetteilla 80 %. Sahat myyvät yleensä laatuluokkia A ja B yhdessä terveoksaisena laatuna, josta on myyjän ja ostajan välisin sopimuksin lajiteltu erilleen osa mustaoksaisesta laadusta. Näin määritellyn terveoksaisen laadun osuus oli lauta-asetteilla 36 % ja sydäntavara-asetteilla 55 %. Vähemmän arvokkaita C- ja D-laatuja saatiin lauta-asetteilla yhteensä 57 %, josta valtaosa oli kaiken lisäksi D-laatua, mutta sydäntavara-asetteilla vain 20 %, josta C-laatua oli hieman enemmän kuin D-laatua.



Kuva 40. Kaatokoepuuaineistosta simuloidun sahatavaran laatuluokkajakauma lauta- ja sydäntavara-asetteilla. Simulointi Metlan apteeraussimulaattorilla saatujen tukkien pituuksiin.



Kuva 41. Kaatokoepuuaineistosta simuloidun sahatavaran kymmenen yleisimmän tuotteen (laatu ja dimensio) tilavuusosuudet lauta- ja sydäntavara-asetteilla. Simulointi Metlan apteeraussimulaattorilla saatujen tukkien pituuksiin.

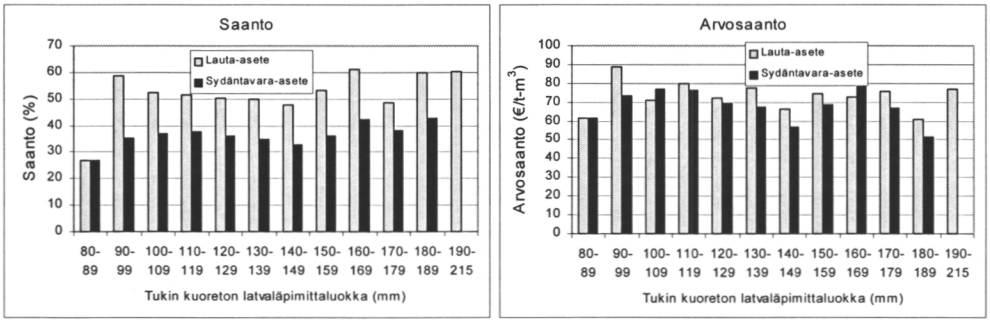
Simuloinneissa saatiin lauta-asetteilla 57 ja sydäntavara-asetteilla 51 sahatavaran laatu / dimensio -yhdistelmää. Kymmenen yleisintä laatu / dimensio -yhdistelmää muodostivat lauta-asetesarjalla 67 % ja sydäntavara-asetesarjalla 59 % sahatavaran kokonaistilavuudesta (kuva 41). Kun otettiin huomioon kymmenen yleisintä laatu / dimensio -yhdistelmää, saatiin lauta-asetteilla terveoksaista laatua 14 % ja NT-laatulajittelun mukaista A-laatua 6 %. D-laatu koostui yksinomaan dimensiosta 19*75 mm, jota saatiin kaikkiaan 33 %. Sydäntavara-asetteilla enin osa tuotteista oli terveoksaista laatua (16 %) ja A-laatua (29 %).

Sahatavaran saanto oli koko aineistossa lauta-asetesarjalla 50 % ja sydäntavara-asetesarjalla 35 % kuoretonta tukkitilavuutta kohti (taulukko 27). Arvosaanto oli lauta-asetesarjalla 76,2 €/tukki-m^3 ja sydäntavara-asetesarjalla 71,1 €/tukki-m^3. Sahatavaran keskihinta oli lauta-asetteilla alhainen (128,7 €/m^3), mutta sydäntavara-asetteilla selvästi korkeampi (155,7 €/m^3). Yksittäisten tukkien välinen vaihtelu oli hyvin suuri, lauta-asetteilla yli 136 €/m^3 ja sydäntavara-asetteilla noin 128 €/m^3.

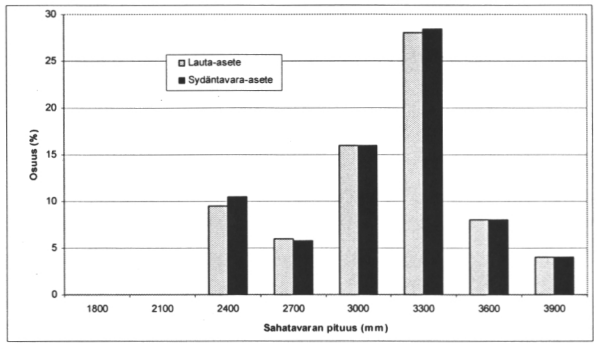
Kuvassa 42 on esitetty sahatavaran saannot ja arvosaannot kuoretonta tukkitilavuutta kohden tukin latvaläpimittaluokan funktiona. Saannot ja arvosaannot riippuivat luonnollisesti ratkaisevasti kussakin tukin latvaläpimittaluokassa käytetystä asetteesta. Lauta-asetteilla sahatavaran saanto oli keskimäärin 15 prosenttiyksikköä ja arvosaanto keskimäärin 7,9 €/tukki-m^3 korkeampi kuin sydäntavara-asetteilla.

Taulukko 27. Tukista saatavan sahatavaran saannon, arvosaannon ja keskihinnan keskimääräiset ja minimi- ja maksimiarvot sahauksen simuloinnissa Metlan apteeraussimulaattorilla saatujen tukkien pituuksiin.

	Keskiarvo		Minimi		Maksimi	
	Lauta-asete	Sydäntavara-asete	Lauta-asete	Sydäntavara-asete	Lauta-asete	Sydäntavara-asete
Sahatavaran saanto kuorettomasta tukista (%)	49,6	34,7	21,3	21,3	71,6	47,5
Sahatavaran arvosaanto/kuoreton tukkitilavuus (€/m^3)	76,2	71,1	39,7	39,7	147,8	109,3
Sahatavaran keskihinta (€/m^3)	128,7	155,7	83,4	73,9	220	201,8



Kuva 42. Sahatavaran saanto ja arvosaanto tukin latvaläpimittaluokittain kuoretonta tukkitilavuutta kohti. Simulointi Metlan apteeraussimulaattorilla saatujen tukkien pituuksiin.



Kuva 43. Sahatavaran pituusjakauma lauta- ja sydäntavara-asetteilla. Simulointi Metlan apteeraussimulaattorilla saatujen tukkien pituuksiin.

Sahatavaran pituusjakauma noudatti luonnollisesti apteerauksessa saatujen tukkien pituusjakaumaa. Pituusluokan 3,3 m saheita oli noin 28 %, 3-metrisiä 16 %, 2,4-metrisiä 11 % ja 2,7-metrisiä 6 % (kuva 43). Pituusjakauma oli lähes sama lauta- ja sydäntavara-asetteilla.

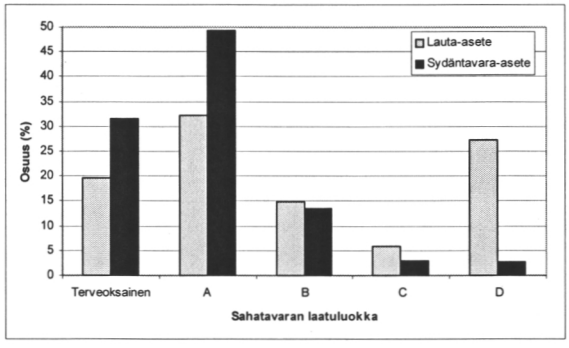
5.3.2.2 Simulointi sahatavaran moduulipituuksiin

Tukkien sahauksen simuloinneissa sahatavaran moduulipituuksiin käytettiin samoja lauta- ja sydäntavara-asetteita kuin simuloinneissa tukin pituuden mukaisin sahatavaran pituuksiin. Näissä simuloinneissa käytettiin kaikkia moduulipituuksia välillä 1800 - 4800 mm 300 mm:n välein eli katkaisu normaaleihin sahatavarapituuksiin oli mahdollista.

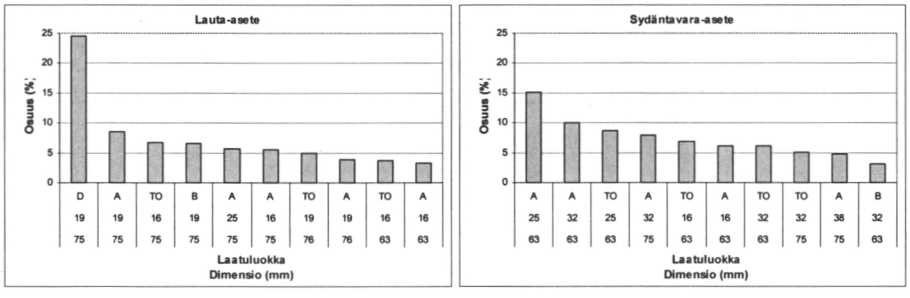
Sahatavaran laatuluokkajakauma oli selvästi parempi simuloitaessa tukkien sahausta sahatavaran moduulipituuksiin kuin simuloitaessa tukkien pituuden mukaisiksi saheiksi (kuva 44). Koko aineistossa saatiin erikseen määriteltyä terveoksaista laatua lauta-asetesarjalla noin 20 % ja sydäntavara-asetesarjalla 31 %. NT-laatulajittelun mukaisen A-laatuisen sahatavaran osuus oli lauta-asetteilla 32 % ja sydäntavara-asetteilla 49 %; A-laatu oli tässäkin yksinomaan alaluokkaa A4. Terveoksaisen laadun ja laatuluokkien A ja B yhteisosuus oli lauta-asetteilla 67 % ja sydäntavara-asetteilla 94 %. Myyjän ja ostajan välisin sopimuksin yleensä erilleen lajiteltavan terveoksaisen laadun osuus oli lauta-asetteilla 52 % ja sydäntavara-asetteilla 81 %. Vähemmän arvokkaita C- ja D-laatuja saatiin lauta-asetteilla yhteensä noin 33 %, mutta sydäntavara-asetteilla vain 6 %. Valtaosa näistä oli C-laatua.

Lauta-asetteilla simuloitaessa saatiin kaikkiaan 65 laatu / dimensio -yhdistelmää, joista kymmenen yleisintä muodostivat 73 % sahatavaran kokonaistilavuudesta (kuva 45). Tästä oli terveoksaista laatua yhteensä 15 % ja A-laatua 27 %. D-laatu koostui melkein yksinomaan dimensiosta 19*75 mm, jota saatiin kaikkiaan 25 %. Sydäntavara-asetteilla simuloitaessa saatiin kaikkiaan 48 laatu / dimensio -yhdistelmää, joista kymmenen yleisintä muodostivat 74 % sahatavaran kokonaistilavuudesta. Tästä oli terveoksaista laatua 27 % ja A-laatua 44 %.

Sahatavaran saanto oli moduulipituuksiin simuloitaessa hieman heikompi kuin tukkien pituuksiin simuloitaessa (taulukko 28, vrt. taulukko 27) . Saannon keskiarvot kuoretonta tukkitilavuutta kohti olivat koko aineistossa lauta-asetesarjalla 46 % ja sydäntavara-asetesarjalla 33 %. Arvosaanto oli lauta-asetesarjalla keskimäärin 82 €/tukki-m^3 ja sydäntavara-asetesarjalla 74,3 €/tukki-m^3. Sahatavaran keskihinta oli tässä simuloinnissa lauta-asetteilla 23,6 €/m^3 ja sydäntavara-asetteilla 17,8 €/m^3 korkeampi kuin simuloitaessa tukkien pituuksiin. Yksittäisten tukkien välinen vaihtelu oli myös hieman suurempi. Sahatavaran keskihinta oli lauta-asetteilla 152,2 €/m^3 ja sydäntavara-asetteilla 174,9 €/m^3.



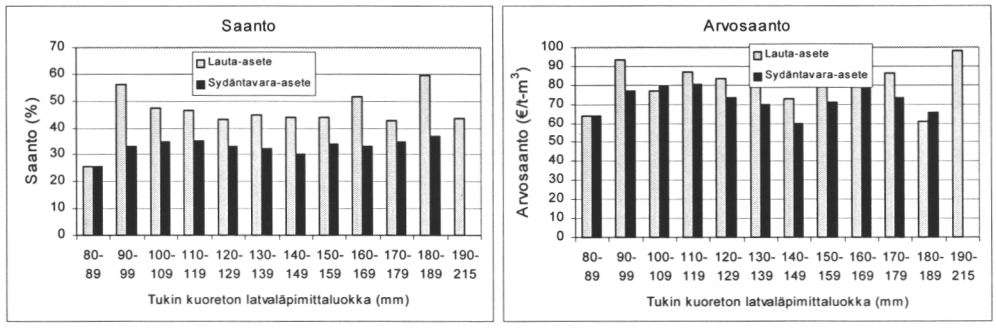
Kuva 44. Kaatokoepuuaineistosta simuloidun sahatavaran laatuluokkajakauma lauta- ja sydäntavara-asetteilla. Simulointi sahatavaran moduulipituuksiin.



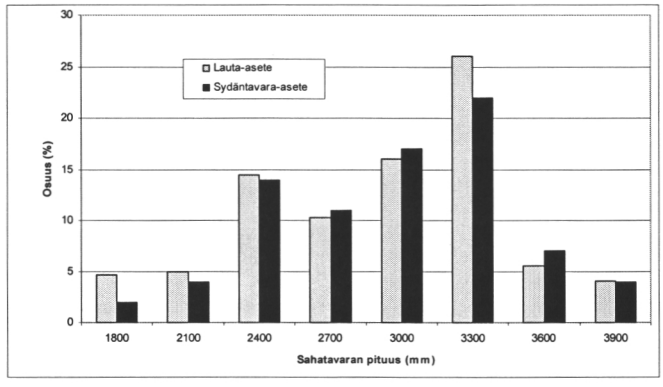
Kuva 45. Kaatokoepuuaineistosta simuloidun sahatavaran kymmenen yleisimmän tuotteen (laatu ja dimensio) tilavuusosuudet lauta- ja sydäntavara-asetteilla. Simulointi sahatavaran moduulipituuksiin.

Taulukko 28. Tukista saatavan sahatavaran saannon, arvosaannon ja keskihinnan keskimääräiset ja minimi- ja maksimiarvot sahauksen simuloinnissa sahatavaran moduulipituuksiin.

	Keskiarvo		Minimi		Maksimi	
	Lauta-asete	Sydäntavara-asete	Lauta-asete	Sydäntavara-asete	Lauta-asete	Sydäntavara-asete
Sahatavaran saanto kuorettomasta tukista (%)	45,6	32,6	14,7	14,7	70,0	47,5
Sahatavaran arvosaanto/ kuoreton tukkitilavuus (€/tukki-m^3)	82,0	74,3	45,9	44,6	147,9	109,3
Sahatavaran keskihinta (€/m^3)	152,2	174,9	83,4	88,0	235,3	201,8



Kuva 46. Sahatavaran saanto ja arvosaanto tukin kuorettomin latvaläpimittaluokin. Simulointi sahatavaran moduulipituuksiin.



Kuva 47. Sahatavaran pituusjakauma lauta- ja sydäntavara-asetteilla. Simulointi sahatavaran moduulipituuksiin.

Kuvassa 46 on esitetty sahatavaran saannot ja arvosaannot kuoretonta tukkitilavuutta kohden tukin latvaläpimittaluokan funktiona. Tässäkin tarkastelussa saanto ja arvosaanto riippuivat ratkaisevasti kussakin tukkiluokassa käytetystä asetteesta. Saannot olivat lauta-asetteilla keskimäärin 13 prosenttiyksikköä korkeampia kuin sydäntavara-asetteilla. Arvosaanto tukkitilavuutta kohden oli lauta-asetteilla keskimäärin 9,3 €/m^3 korkeampi.

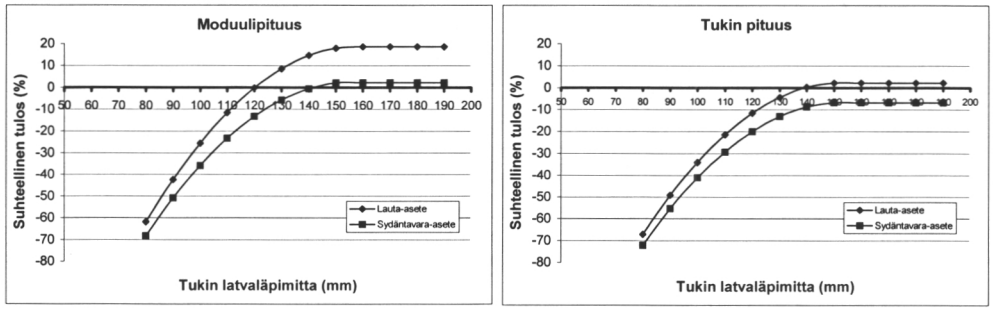
Sahatavaran pituusjakauma painottui tässä luonnollisesti enemmän lyhyisiin pituuksiin kuin sahattaessa tukin pituisia tuotteita (kuva 47). Lauta-asetteilla kolmemetrisiä tuotteita oli 16 % ja 3,3-metrisiä 26 %. Sydäntavara-asetteilla tuotteet olivat keskimäärin hieman pidempiä kuin lauta-asetteilla, kolmemetrisiä oli 17 % ja 3,3-metrisiä oli 22 %. Tuotteista kolmemetrisiä tai lyhyempiä oli lauta-asetteilla 50 % ja sydäntavara-asetteilla 48 %.

5.3.2.3 *Tuottojen ja kustannusten peruslaskelmat*

Suuntaa-antavat tulokset kaatokoepuuaineistosta apteeratuista tukeista simuloimalla saatujen sahatuotteiden valmistuksen kannattavuudesta on esitetty kuvassa 48. Laskelmat on tehty erikseen lauta- ja sydäntavara-asetteille. Tukin pituutta ei vaihdeltu näissä laskelmissa, vaan käytettiin Metlan apteeraussimulaattorin tuottamia tukki-, pikkutukki- ja lyhyttukkipituuksia. Tuottojen laskennan lähtöarvoina käytettiin VTT:n arvioimia suomalaisen sahateollisuuden tukin, hakkeen, purun ja kuoren keskimääräisiä yksikköhintoja vuonna 2000. Laskelmien muut lähtöarvot on esitetty liitteen 6 taulukoissa 6.1 - 6.4.

Vastaavasti sahauskustannukset muodostuivat keskimääräisistä sahaus- ja pääomakustannuksista. Sahauskustannuksiin vaikuttavat oleellisesti tukin järeys ja pituus. Sahauskustannuksissa otettiin huomioon pienempien tukkien sahausnopeuden kasvu latvaläpimitan pienentyessä ja sahatavaran kuivauskustannusten nousu pituuden lyhentyessä. Suhteelliset sahauskustannukset tukin ja sahatavaran tilavuusyksikköä kohti vaihtelivat laskennassa tukin latvaläpimitan mukaan. Sahauskustannukset määräytyivät kaatokoepuuaineistosta apteerattujen tukkien keskimääräisen pituuden mukaan tukkien kussakin kuorettomassa latvaläpimittaluokassa. Käytännön sahateollisuuden nykykäsityksen mukaan tyypillisillä pikkutukeilla, joiden latvaläpimitta on 120 - 130 mm, sahauskustannukset ovat lähes kaksinkertaiset 200 mm:n tukkeihin verrattuna.

Kuvasta 48 ilmenee, että sahaus olisi käytetyillä lähtöarvoilla lauta-asetteilla kannattavaa 120 mm:n kuorettomasta latvaläpimittaluokasta ylöspäin moduulipituista ja 140 mm:n latvaläpimittaluokasta ylöspäin tukin pituista sahatavaraa valmistettaessa. Vastaavasti sydäntavara-asetteilla sahaus olisi kannattavaa 140 mm:n latvaläpimittaluokasta ylöspäin moduulipituista sahatavaraa valmistettaessa, mutta tukinpituista sahatavaraa valmistettaessa sahaus ei olisi kannattavaa missään latvaläpimittaluokassa. Tukin latvaläpimitta vaikutti lauta-asetteilla sahattaessa hieman enemmän sahauksen tulokseen kuin sydäntavara-asetteilla sahattaessa.



Kuva 48. Sahauksen suhteellinen tulos tukin kuorettomin latvaläpimittaluokin tukin kuoretonta tilavuusyksikköä kohti valmistettaessa moduulipituisia ja tukin pituisia tuotteita lauta- tai sydäntavara-asetteilla.

5.3.2.4 *Sahauskustannusten, tukin tehdashinnan ja tuotteiden keskihinnan muutosten vaikutukset sahaustulokseen*

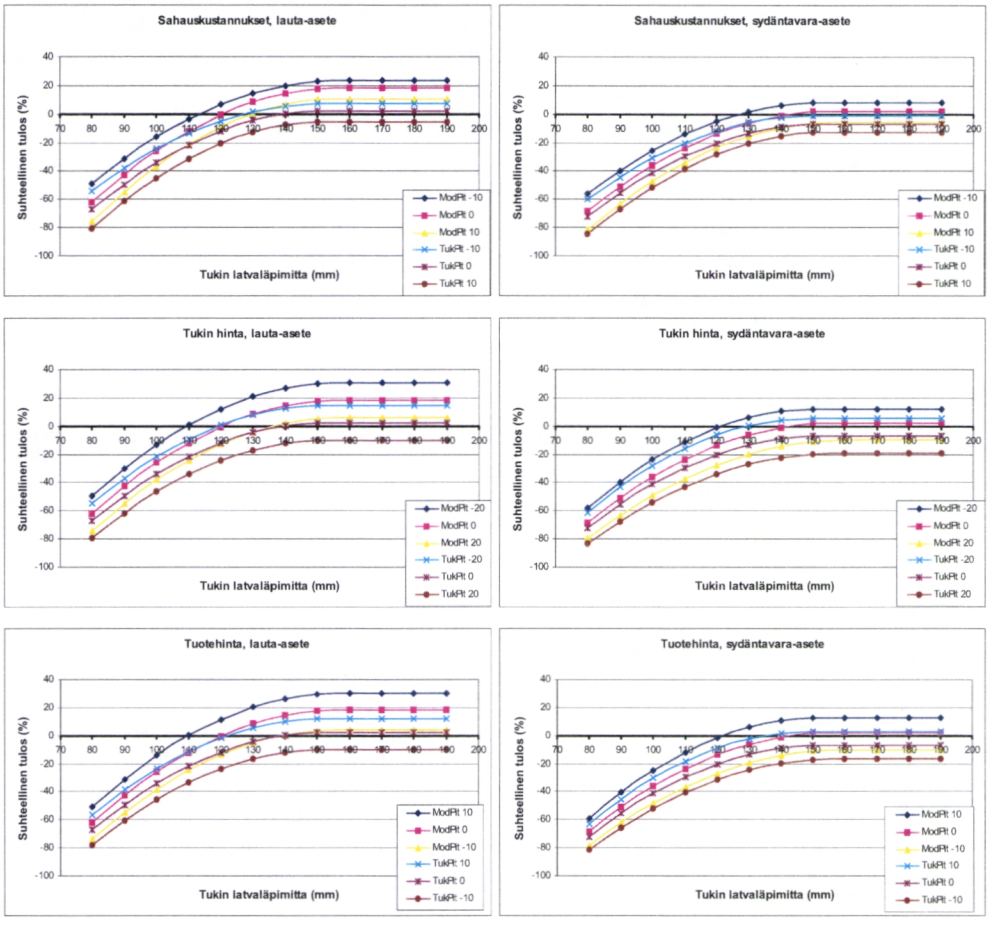
Sahaustulokseen vaikuttavien tekijöiden herkkyystarkastelut tehtiin sahauskustannusten ja tukin ja tuotteiden hintojen suhteen. Sahauksen perusvaihtoehdon lähtöarvot on esitetty luvussa 4.3.2. Vertaillut vaihtoehdot olivat sahauskustannuksilla perustaso sekä -10 % ja +10 %, tukin tehdashinnalla perustaso sekä -20 % ja +20 % ja tuotteiden keskihinnalla perustaso sekä -10 % ja +10 %.

Taulukossa 29 ja kuvassa 49 on esitetty edellä mainittujen tekijöiden muutosten vaikutukset sahauksen suhteelliseen tulokseen valmistettaessa sahatavaraa moduulipituuksiin ja tukin pituuksiin. Moduulipituuksina sallittiin tässäkin 1800 - 4800 mm 300 mm:n välein, mikä vastaa katkaisua normaaleihin sahatavarapituuksiin. Lauta-asetteilla moduulipituuksiin sahattaessa sahauskustannusten lasku 10 %:lla, tukin tehdashinnan lasku 20 %:lla ja tuotteiden keskihinnan nousu 10 %:lla perustasosta johtivat siihen, että positiivisen sahaustuloksen tuottavan tukin pienin kuoreton latvaläpimitta laski noin 130 mm:stä 110 - 120 mm:iin. Sydäntavara-asetteilla moduulipituuksiin sahattaessa vastaavat muutokset johtivat, että positiivisen sahaustuloksen tuottavan tukin pienimmän läpimitan laskuun noin 150 mm:stä 130 mm:iin.

Sahattaessa tukin pituisia tuotteita lauta-asetteilla sahauskustannusten lasku 10 %:lla, tukin tehdashinnan lasku 20 %:lla ja tuotteiden keskihinnan nousu 10 %:lla perustasosta johtivat siihen, että positiivisen sahaustuloksen tuottavan tukin pienin kuoreton latvaläpimitta laski 140 mm:stä 120 - 130 mm:iin. Muutoksen ollessa päinvastaisiin suuntiin positiivista sahaustulosta ei ollut mahdollista saavuttaa missään tarkastellussa sahausvaihtoehdossa.

Taulukko 29. Sahauskustannusten, tukin tehdashinnan ja tuotteen hinnan muutosten vaikutukset positiivisen sahaustuloksen tuottavan tukin kuorettomaan rajalatvaläpimittaan.

	Positiivisen sahaustuloksen tuottava tukin pienin kuoreton latvaläpimitta (mm)			
	Lauta-asete		Sydäntavara-asete	
	Tukin pituus	Moduulipituus	Tukin pituus	Moduulipituus
Sahauskustannukset				
Perustaso -10 %	130	120	-	130
Perustaso	140	130	-	150
Perustaso +10 %	-	130	-	-
Tukin tehdashinta				
Perustaso -20 %	120	110	130	130
Perustaso	140	130	-	150
Perustaso +20 %	-	140	-	-
Tuotteen hinta				
Perustaso +10 %	130	110	140	130
Perustaso	140	130	-	150
Perustaso -10 %	-	140	-	-



Kuva 49. Sahauksen suhteellinen tulos tukin kuoretonta tilavuusyksikköä kohti tukin kuorettoman latvaläpimitan mukaan. Sahauskustannusten, tukin hinnan ja tuotteen hinnan vaikutusten herkkyystarkastelut valmistettaessa tukin pituisia ja sahatavaran moduulipituisia tuotteita lauta- ja sydäntavara-asetteilla. TukPit = tukin pituinen tuote, ModPit = moduulipituinen tuote.

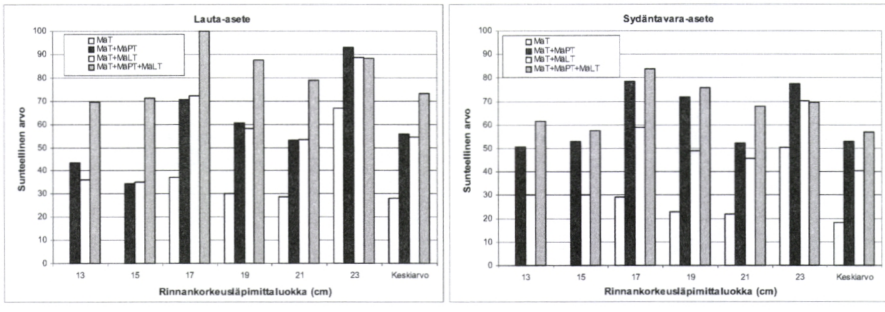
5.3.2.5 Sahauksen suhteellinen arvosaanto eri apteerausvaihtoehdoilla

Kuvissa 50 ja 51 on esitetty kaatokoepuista simuloidun pölkkyjoukon suhteelliset arvosaannot kuoretonta tukkikuutiometriä kohti eri apteerausvaihtoehdoilla harvennusmännyille tyypillisissä rinnankorkeusläpimittaluokissa. Laskelmissa arvosaannot suhteutettiin suurimpaan arvoon, joka saatiin lauta-asetteilla tuotettaessa moduulipituista sahatavaraa rinnankorkeusläpimittaluokassa 17 cm kaikilla puutavaralajivaihtoehdoilla (MäT + MäPT + MäLT) apteeratuista tukeista. Arvosaannon suhteelliset aritmeettiset keskiarvot eri apteerausvaihoehdoille laskettiin ilman rinnankorkeusläpimittaluokittaista painotusta niiden puumäärien perusteella. Käytetyt apteerausvaihtoehdot ja -periaatteet olivat samat, joita käytettiin aiemmin luvussa 5.1. Näin voitiin liittää yhteen tulokset potentiaalisista hakkuukertymistä ja sahauk-

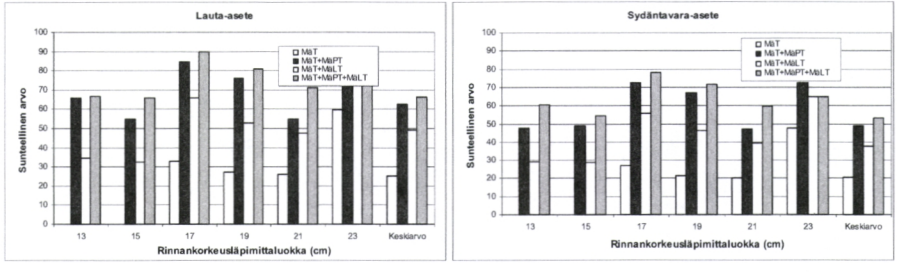
sen kannattavuudesta. Kiintoisinta on tässä tarkastella niitä puuston rinnankorkeusläpimittaluokkia, joissa sahapuun hakkuukertymä on eri apteerausvaihtoehdoissa korkein ja jotka ovat tyypillisiä harvennusmänniköissä.

Simuloitaessa moduulipituista sahatavaraa tuotti lauta-asete korkeamman suhteellisen keskimääräisen arvosaannon verrattuna sydäntavara-asetteisiin. Asetesarjojen ero oli varsin pieni normaalitukki- ja lyhyttukkiapteerausvaihtoehdoissa (3 - 5 yksikköä), mutta suuri kaikkien puutavaralajien vaihtoehdossa (13 yksikköä). Poikkeuksena oli pikkutukkivaihtoehto (MäT + MäPT), jossa sydäntavara-asete tuotti 5 yksikköä korkeamman arvosaannon.

Alhaisin suhteellinen arvosaanto saatiin apteerausvaihtoehdossa, jossa simuloitiin vain mäntytukkia ja käytettiin sydäntavara-asetteita. Sydäntavara-asetteilla simuloitaessa pikkutukkivaihtoehto tuotti kaikissa läpimittaluokissa kuitenkin korkeamman arvosaannon kuin lyhyttukkivaihtoehto. Vastaavasti lauta-asetteilla pikku- ja lyhyttukkiapteerausvaihtoehdot tuottivat lähes saman arvosaannon.



Kuva 50. Suhteellinen arvosaanto tukin kuoretonta tilavuusyksikköä kohti lauta- ja sydäntavara-asetteilla eri apteerausvaihtoehdoilla rinnankorkeusläpimitoittain. Simulointi sahatavaran moduulipituuksiin. Arvosaannot suhteutettu apteerausvaihtoehdon MäT + MäPT + MäLT läpimittaluokassa 17 cm tuottamaan arvosaantoon.



Kuva 51. Suhteellinen arvosaanto tukin kuoretonta tilavuusyksikköä kohti lauta- ja sydäntavara-asetteilla eri apteerausvaihtoehdoilla rinnankorkeusläpimitoittain. Simulointi tukin pituisiin tuotteisiin. Arvosaannot suhteutettu moduulipituista sahatavaraa tuotettaessa apteerausvaihtoehdon MäT + MäPT + MäLT läpimittaluokassa 17 cm tuottamaan arvosaantoon (kuva 50).

Kaikki puutavaralajit käsittänyt apteerausvaihtoehto tuotti selvästi korkeimman arvosaannon sekä keskimäärin että aina 21 cm:n rinnankorkeusläpimittaluokkaan saakka. Tulos oli samansuuntainen sekä lauta- että sydäntavara-asetteilla, mutta ero muihin apteerausvaihtoehtoihin pieneni rungon läpimitan kasvaessa. Arvosaanto oli suhteellisesti korkein rungon läpimittaluokissa 17 - 19 cm ja 23 cm. Pelkän pikku- tai lyhyttukin sisältäneissä vaihtoehdoissa parhaiden arvosaantojen läpimittaluokat olivat pääosin samat, mutta läpimittaluokkien suhteelliset erot suuremmat.

Simuloitaessa tukin pituisia tuotteita tuotti lauta-asete kaikilla apteerausvaihtoehdoilla keskimäärin vajaan 10 yksikköä korkeamman suhteellisen arvosaannon kuin sydäntavara-asete. Kummallakin asetesarjalla pikkutukin sahaaminen normaalikokoisen tukin lisäksi tuotti keskimäärin lähes saman arvosaannon kuin kaikkien puutavaralajien sahaaminen. Pikku- ja lyhyttukkivaihtoehtojen ero oli varsinkin lauta-asetteilla tukin pituisia tuotteita sahattaessa suurempi kuin moduulipituisia tuotteita sahattaessa.

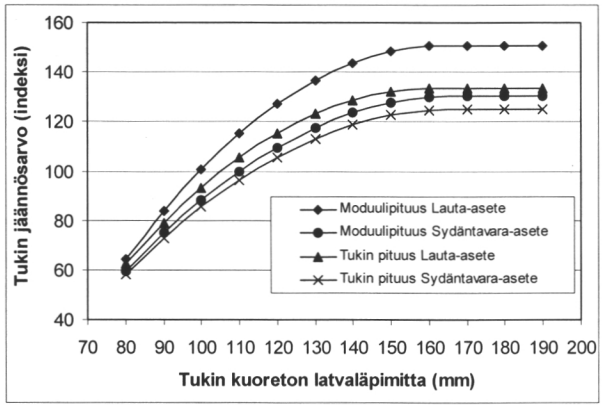
Rinnankorkeusläpimittaluokan vaikutus suhteelliseen arvosaantoon oli tukin pituisia tuotteita sahattaessa hyvin samanlainen kuin moduulipituisia tuotteita sahattaessa. Arvosaanto oli tässäkin suhteellisesti korkein rungon läpimittaluokissa 17 - 19 cm ja 23 cm.

5.3.2.6 Tukin tehdashinnan jäännösarvon peruslaskelmat

Tukin tehdashinnan jäännösarvon laskelmissa vähennettiin sahauksen tuotoista tukin kuoretonta tilavuusyksikköä kohti tukin latvaläpimittaluokittaiset sahauskustannukset sekä lisättiin hake-, puru- ja kuorihyvitykset. Lauta-asetesarjalle ja sydäntavara-asetesarjalle lasketut tulokset tasoitettiin regressioyhtälöillä. Kuvassa 52 on esitetty perusarvoilla laskettuja regressioyhtälöitä vastaavat käyrät valmistettaessa sahatavaraa moduulipituuksien ja tukin pituuksien mukaista sahatavaraa lauta- ja sydänasetteilla.

Tukin kuorettomassa latvaläpimittaluokassa 140 mm tukin jäännösarvon indeksi oli sahatavaran moduulipituisia tuotteita valmistettaessa lauta-asetteilla 21 yksikköä ja sydäntavara-asetteilla 4 yksikköä sekä tukin pituisia tuotteita valmistettaessa lauta-asetteilla 8 yksikköä korkeampi verrattuna tukin pituisten tuotteiden valmistukseen sydäntavara-asetteilla. Läpimittaluokasta 140 mm ylöspäin jäännösarvon indeksi kasvoi vielä 3 - 6 yksikköä 160 mm:n luokkaan saakka, minkä jälkeen indeksi samoin kuin vaihtoehtoisten asetesarjojen ja sahatavaran pituuden simulointiperiaatteiden indeksierot olivat vakiotasolla.

Tukin kuorettomasta latvaläpimittaluokasta 140 mm alaspäin tukin jäännösarvon indeksi laski kiihtyvällä nopeudella aina 100 mm:n läpimittaluokkaan saakka, minkä jälkeen indeksin alenemisen nopeus oli vakiotasolla. Samalla vaihtoehtoisten asetesarjojen ja sahatavaran pituuden simulointiperiaatteiden indeksierot pienenivät olennaisesti. Verrattuna 140 mm:n läpimittaluokkaan jäännösarvon indeksi oli 120 mm:n luokassa 10 - 15 yksikköä, 100 mm:n luokassa 30 - 45 yksikköä ja 80 mm:n luokassa 60 - 80 yksikköä alhaisempi. Eniten tukin läpimitan pieneneminen alensi suhteellista jäännösarvoa sahattaessa lauta-asetteilla sahatavaran moduulipituuksiin ja vähiten sahattaessa sydäntavara-asetteilla tukin pituuksiin.



Kuva 52. Tukin tehdashinnan suhteellinen jäännösarvo kuoretonta tilavuusyksikköä kohti kuorettomin latvaläpimittaluokin lauta- ja sydäntavara-asetteilla. Simulointi sahatavaran moduulipituuksiin ja Metlan apteeraussimulaattorilla saatujen tukkien pituuksiin.

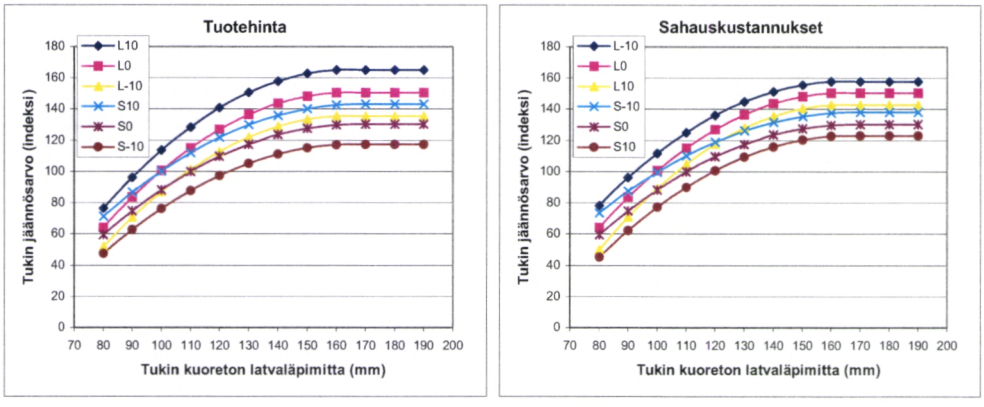
5.3.2.7 Sahauskustannusten ja tuotteiden hinnan muutosten vaikutukset tukin tehdashinnan jäännösarvoon

Tukin jäännösarvon herkkyystarkastelujen tulokset on esitetty kuvissa 53 ja 54. Kuvissa on esitetty tuotteiden hinnan ja sahauskustannusten muutosten (±10 %) vaikutukset jäännösarvoon sahattaessa sahatavaran moduulipituuksille ja tukin pituuksille.

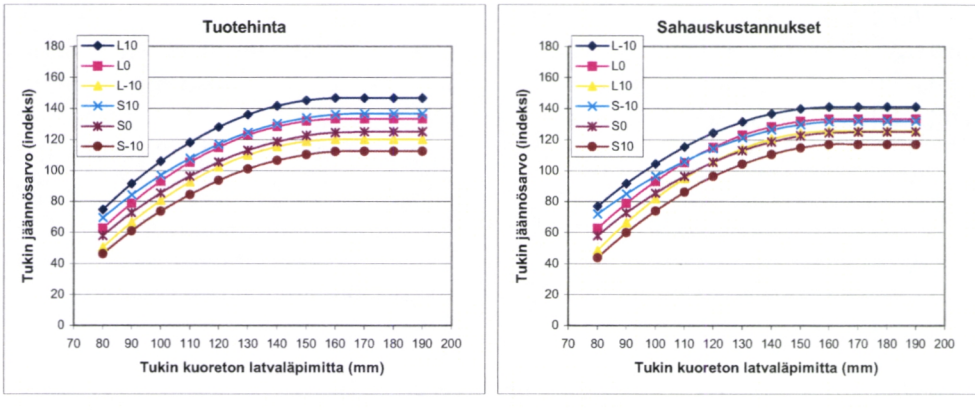
Moduulipituisia tuotteita sahattaessa tuotehinnan 10 prosentin nousu nosti tukin kuorettomassa latvaläpimittaluokassa 140 mm tukin jäännösarvon indeksiä noin 10 yksikköä sekä lauta- että sydäntavara-asetteilla verrattuna peruslaskelmaan (kuva 53, vasemman puoleiset käyrät L0 ja S0). Vastaavasti tuotehinnan 10 prosentin lasku molemmilla asetesarjoilla johti noin 11 yksikköä pienempään jäännösarvon indeksiin. Sahauskustannusten ±10 prosentin muutosten aiheuttamat muutokset tukin jäännösarvon indeksissä olivat vain noin puolet tuotehintojen muutoksiin verrattuna. Sahauskustannusten 10 prosentin nousu laski tukin jäännösarvon indeksiä latvaläpimittaluokassa 140 mm lauta-asetteilla vajaan kuusi yksikköä ja sydäntavara-asetteilla vastaavasti 7 yksikköä (kuva 53, oikean puoleiset käyrät L0 ja S0). Sahauskustannusten 10 prosentin lasku johti vastaavasti lauta-asetteilla 5 yksikköä ja sydäntavara-asetteilla 7 yksikköä korkeampaan jäännösarvon indeksiin.

Tukin pituisia tuotteita sahattaessa tuotehinnan 10 prosentin nousu nosti kuorettomassa latvaläpimittaluokassa 140 mm tukin jäännösarvon indeksiä lauta-asetteilla 10 yksikköä ja sydäntavara-asetteilla vastaavasti 10 yksikköä verrattuna peruslaskelmaan (kuva 54, vasemman puoleiset käyrät L0 ja S0). Tuotehinnan 10 prosentin lasku johti vastaavasti lauta-asetteilla 10 yksikköä ja sydäntavara-asetteilla 11 yksikköä korkeampaan jäännösarvon indeksiin. Sahauskustannusten ±10 prosentin muutosten aiheuttamat muutokset tukin jäännösarvon indeksiin olivat tässäkin vain noin puolet tuotehintojen muutoksiin verrattuna. Sahauskustan-

nusten 10 prosentin nousu laski tukin jäännösarvon indeksiä latvaläpimittaluokassa 140 mm lauta-asetteilla 7 yksikköä ja sydäntavara-asetteilla 7 yksikköä (kuva 54, oikean puoleiset käyrät L0 ja S0). Sahauskustannusten 10 prosentin lasku johti vastaavasti molemmilla asetesarjoilla noin 6 yksikköä korkeampaan jäännösarvon indeksiin.



Kuva 53. Tukin tehdashinnan suhteellinen jäännösarvo kuoretonta tilavuusyksikköä kohti kuorettomin latvaläpimittaluokin tuotehintojen tai sahauskustannusten muuttuessa ±10 % moduulipituisia tuotteita lauta- ja sydäntavara-asetteilla valmistettaessa verrattuna peruslaskelmaan. L = lauta-asete, S = sydäntavara-asete.



Kuva 54. Tukin tehdashinnan suhteellinen jäännösarvo kuoretonta tilavuusyksikköä kohti kuorettomin latvaläpimittaluokin tuotehintojen tai sahauskustannusten muuttuessa ±10 % tukin pituisia tuotteita lauta- ja sydäntavara-asetteilla valmistettaessa verrattuna peruslaskelmaan. L = lauta-asete, S = sydäntavara-asete.

5.3.2.8 *Rungon ulkoisen oksikkuuden vaikutus sahauksen arvosaantoon*

Sahauksen arvosaannon ja metsikön ennakkomittaustietojen (mm. rungon dimensiot, tuoreoksaraja ja kuolleen oksan koko) välisiin riippuvuussuhteisiin perustuvien regressiomallien avulla voitiin arvioida suuntaa-antavasti harvennusmäntyleimikoiden runkojen arvoa sahan tuotannon kannalta. Arvosaannot laskettiin aluksi tukkikohtaisesti eri asetesarjoille kuoretonta tukkitilavuutta kohti. Tämän jälkeen tukkikohtaiset tulokset yhdistettiin runkokohtaisiksi. Regressiotarkasteluilla pyrittiin määrittämään rungon arvosaannon ja rungon metsässä mitattujen tunnusten riippuvuudet.

Kokeilluista regressiomalleista valittiin rungon arvosaantoa eli tukkiaineiston ja siitä sahatun tuotannon arvoa tukkitilavuutta kohti kuvaamaan malli (kaava 2), jossa selittävinä muuttujina olivat rungon kuivaoksarajan korkeus ja suurin ulkoisen kuolleen oksan läpimitta:

$$ATKK = A + B*KOR + C*SKO, \quad (2)$$

missä ATKK = sahan tuotteiden arvo tukin kuoretonta tilavuusyksikköä kohti, €/m^3

KOR = rungon kuivaoksarajan korkeus, m

SKO = rungon suurimman kuolleen oksan läpimitta, mm

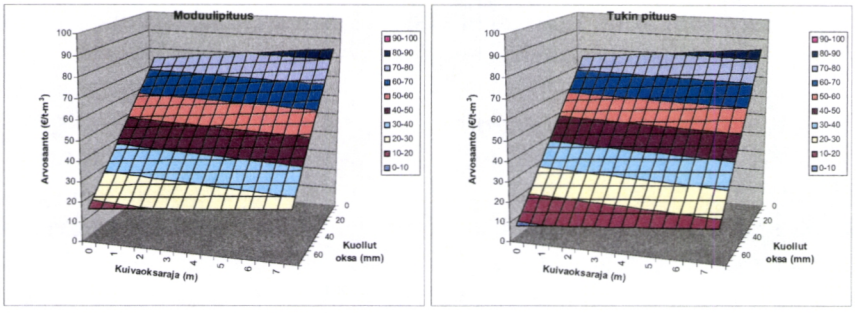
Taulukossa 30 on esitetty muodostettujen regressiomallien parametrien arvot, korrelaatiokertoimet ja selitysasteet simuloitaessa sahausta tukin pituuden tai sahatavaran moduulipituuden mukaiseksi sahatavaraksi sydäntavara- tai lauta-asetteilla.

Rungon kuivaoksarajan yhden metrin muutoksen vaikutus oli sydäntavara-asetteilla huomattavasti pienempi kuin lauta-asetteilla. Kuolleen oksan läpimitan muutos vaikutti hieman enemmän tukin pituisten kuin sahatavaran moduulipituisten tuotteiden arvosaantoon.

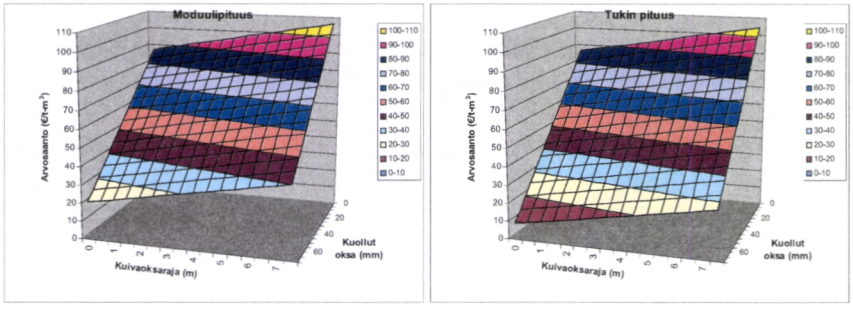
Kuvissa 55 ja 56 on esitetty em. regressiomalleilla saatuja tuloksia kuvaavat pinnat sydäntavara- ja lauta-asetteilla. Sahauksen arvosaannot ilmenevät tässä rungon kuivaoksarajan korkeuden (vaihteluväli 0 - 7 m) ja kuolleen oksan läpimitan (vaihteluväli 0 - 70 mm) funktiona. Mallia kuvaavalta pinnalta voidaan nähdä arvosaannot kuivaoksarajan korkeuden ja kuolleen oksan läpimitan mukaan.

Taulukko 30. Rungon arvosaannon ja valittujen oksikkuustunnusten väliset regressiomallit, niiden parametrit ja tilastollinen merkitsevyys sahattaessa tukin pituuden tai sahatavaran moduulipituuden mukaista sahatavaraa sydäntavara- tai lauta-asetteilla.

	Moduulipituus		Tukin pituus	
	Sydäntavara-asete	Lauta-asete	Sydäntavara-asete	Lauta-asete
Vakio (A)	75,152	87,112	75,896	86,326
Kuivaoksarajan kerroin (B)	1,219	2,544	1,110	2,399
Kuolleen oksan läpimitan kerroin (C)	-0,831	-0,944	-0,962	-1,103
Korrelaatiokerroin (r)	0,518	0,438	0,525	0,472
Selitysaste (r^2)	0,268	0,192	0,276	0,223



Kuva 55. Rungoille simuloidun arvosaannon, kuivaoksarajan ja paksuimman kuolleen oksan läpimitan riippuvuudet valmistettaessa sahatavaran moduulipituista tai tukin pituuden mukaista sahatavaraa. Sydäntavara-asete.



Kuva 56. Rungoille simuloidun arvosaannon, kuivaoksarajan ja paksuimman kuolleen oksan läpimitan riippuvuudet valmistettaessa sahatavaran moduulipituuden tai tukin pituuden mukaista sahatavaraa. Lauta-asete.

Kuvista voidaan päätellä, että asetesarjojen välillä on suuria eroja arvosaannossa. Lauta-asetteilla arvosaanto oli malleilla laskettujen tulosten mukaan keskimäärin 11 €/tukki-m^3 korkeampi kuin sydäntavara-asetteilla.

Kuvan 55 mukaan rungon kuivaoksarajan kohoaminen yhdellä metrillä nosti arvosaantoa 1,2 €/tukki-m^3 sekä sahatavaran moduulipituisia että tukin pituisia tuotteita sydäntavara-asetteilla sahattaessa. Paksuimman ulkoisen kuolleen oksan läpimitan kasvu 10 mm:llä laski vastaavasti arvosaantoa sahatavaran moduulipituisia tuotteita tehtäessä 8,2 €/tukki-m^3 ja tukin pituisia tuotteita tehtäessä 9,6 €/tukki-m^3.

Kuvan 56 mukaan kuivaoksarajan kohoaminen yhdellä metrillä nosti arvosaantoa noin 2,5 €/tukki-m^3 sekä sahatavaran moduulipituisia että tukin pituisia tuotteita lauta-asetteilla sahattaessa. Paksuimman ulkoisen kuolleen oksan läpimitan kasvu 10 mm:llä laski vastaavasti arvosaantoa sahatavaran moduulipituisia tuotteita tehtäessä 9,4 €/tukki-m^3 ja tukin pituisia tuotteita tehtäessä 11,1 €/tukki-m^3.

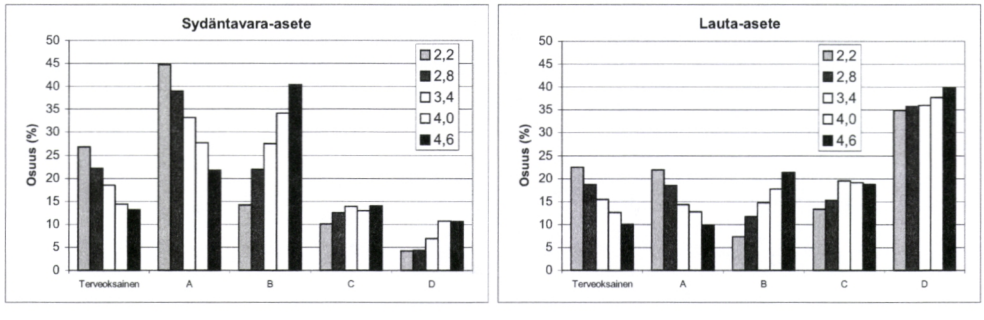
5.3.3 Simulointitulokset runkopankkiaineistosta apteerattujen tukkien perusteella – lyhyttukkitekniikka

5.3.3.1 Sahatavaran laatuluokkajakauma

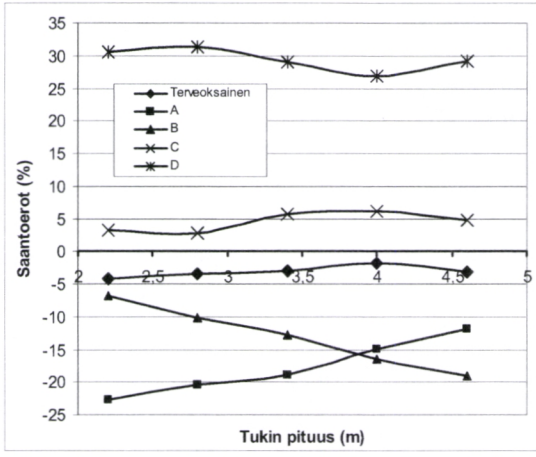
Tukin pituuden vaikutus runkopankkiaineistosta simuloidun sahatavaran laatuluokkajakaumaan oli sekä sydäntavara- että lauta-asetteilla huomattavan suuri terveoksaisen laadun mutta myös laatuluokkien A, B ja D osalta (kuva 57). Terveoksaisen laadun osuus pieneni molemmilla asetesarjoilla noin 13 prosenttiyksikköä, kun tukin pituus kasvoi 2,2 m:stä 4,6 m:iin. Myös A-laadun osuus pieneni, sydäntavara-asetteilla 23 prosenttiyksikköä ja lauta-asetteilla 12 prosenttiyksikköä; A-laatu oli tässäkin yksinomaan luokkaa A4. Huonoimpien laatuluokkien osuudet vastaavasti kasvoivat tukin pituuden kasvaessa, sydäntavara-asetteilla D-laadun osuus noin 6 prosenttiyksikköä ja lauta-asetteilla C-laadun osuus noin 5 prosenttiyksikköä.

Terveoksaisen laadun ja laatuluokkien A ja B yhteisosuus oli lauta-asetteilla 48 % ja sydäntavara-asetteilla 85 %, kun tukkipituus oli 2,2 m, ja vastaavasti 41 ja 75 %, kun tukin pituus oli 4,6 m. Myyjän ja ostajan välisin sopimuksin yleensä laatuluokista A ja B erilleen lajiteltavan terveoksaisen laadun osuus oli lauta-asetteilla 42 % ja sydäntavara-asetteilla 74 %, kun tukin pituus oli 2,2 m, ja vastaavasti 21 % ja 41 %, kun tukin pituus oli 4,6 m.

Kuvassa 58 on esitetty erot sahatavaran laatuluokkajakaumissa lauta- ja sydäntavara-asetteiden välillä tukin pituuden mukaan. Asetesarja vaikutti suuruusjärjestyksessä eniten D-, B- ja A-laatujen osuuksiin. Sydäntavara-asetteilla saatiin A- ja B-laatuja ja jossain määrin myös terveoksaista laatua enemmän kuin lauta-asetteilla. Tukin pituuden kasvaessa 2,2 m:stä 4,6 m:iin asetteiden välinen ero A-laadun osuudessa pieneni suoraviivaisesti 11 prosenttiyksikköä. Ero B-laadun osuudessa vastaavasti kasvoi lähes yhtä suoraviivaisesti 12 prosenttiyksikköä, kun taas ero terveoksaisen laadun osuudessa oli tukin pituudesta riippumatta vakio, noin 3 prosenttiyksikköä. Lauta-asetteilla saatiin tukin pituudesta riippumatta D-laatua noin 30 prosenttiyksikköä ja terveoksaista laatua noin 5 prosenttiyksikköä enemmän kuin sydäntavara-asetteilla.



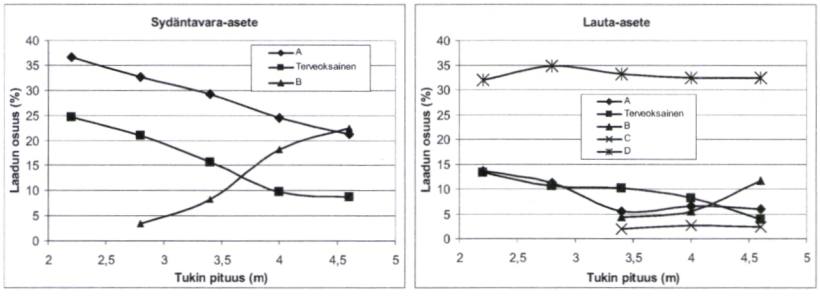
Kuva 57. Sahatavaran laatuluokkajakauma sydäntavara- ja lauta-asetteilla tukin pituuksilla 2,2 - 4,6 m.



Kuva 58. Lauta- ja sydäntavara-asetteiden erot sahatavaran laatuluokkajakaumassa tukin pituuden mukaan. Saantoero = laatuluokan osuus lauta-asetteilla vähennettynä laatuluokan osuudella sydäntavara-asetteilla.

Sahatavaran kymmenen yleisintä laatu / dimensio -yhdistelmää muodostivat keskimäärin 55 % tuotannon kokonaistilavuudesta. Tarkasteltaessa näitä tuoteryhmiä sydäntavara-asetteilla sahattuna A-laadun ja terveoksaisen laadun osuudet pienenivät noin puoleen, kun tukin pituus kasvoi 2,2 m:stä 4,6 m:iin (kuva 59). B-laadun osuus vastaavasti kasvoi yli viisinkertaiseksi, kun tukin pituus kasvoi 2,8 m:stä 4,6 m:iin. Tässä tarkastelussa B-laatua ei syntynyt lainkaan alle 2,8 m:n tukeista.

Lauta-asetteilla sahattaessa tukin pituus vaikutti sahatavaran kymmenen yleisimmän laatu / dimensio -yhdistelmän laatujakaumaan vähemmän kuin sydäntavara-asetteilla sahattaessa. D-laadun osuus oli tässä vallitseva (noin 33 %) ja C-laadun (3 %) tavoin lähes vakio tukin pituudesta riippumatta. A-laadun osuus pieneni 13 prosentista noin 5 prosenttiin, tukin pituuden kasvaessa 2,2 m:stä 3,4 m:iin, jolla tasolla se oli myös tukkipituuksilla 4,0 ja 4,6 m. Terveoksaisen laadun osuus pieneni säännönmukaisesti tukin pituuden kasvaessa 2,2 m:stä 4,6 m:iin ja B-laadun osuus kasvoi vastaavasti tukin pituuden kasvaessa 3,4 m:stä 4,6 m:iin.

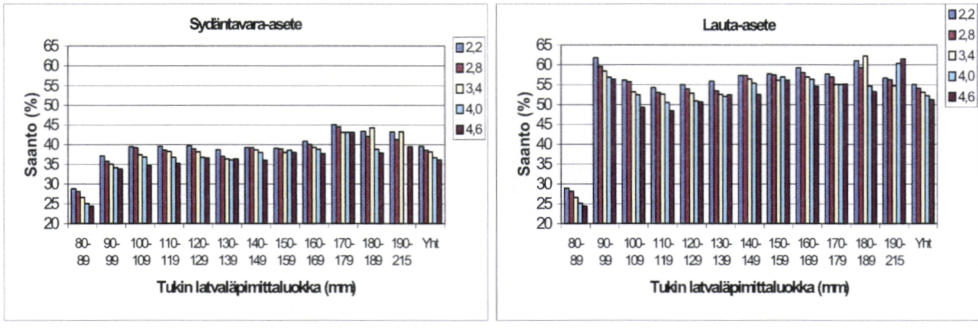


Kuva 59. Runkopankkiaineistosta simuloidun sahatavaran kymmenen yleisimmän tuotteen (laatu ja dimensio) laatuluokkajakauma tukin pituuden mukaan sydäntavara- ja lauta-asetteilla.

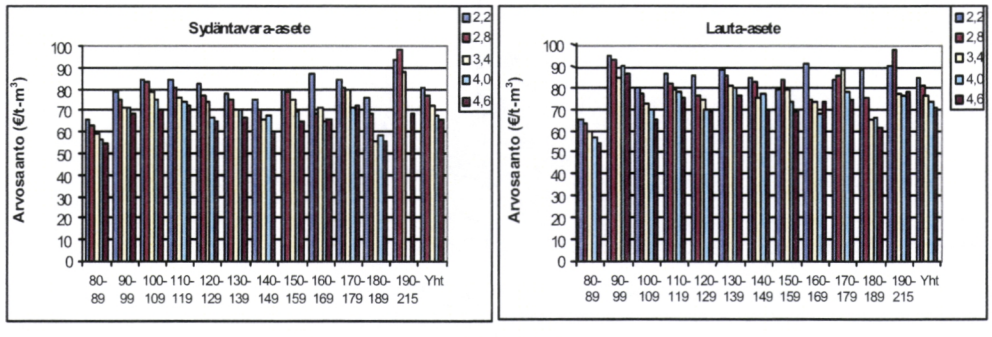
5.3.3.2 *Sahatavaran saanto ja arvosaanto*

Runkopankkiaineistosta simuloidun sahatavaran saanto tukin kuorettomasta tilavuudesta oli tukin latvaläpimittaluokittain ja pituuksittain sydäntavara-asetteilla noin 15 prosenttiyksikköä pienempi kuin lauta-asetteilla (kuva 60). Saanto vaihteli sydäntavara-asetteilla välillä 35 - 40 % ja lauta-asetteilla välillä 50 - 55 %, kun tukin pituus vaihteli välillä 2,2 - 4,6 m. Saanto aleni tukin pituuden kasvaessa molemmilla asetesarjoilla tukin läpimittaluokasta riippuen 3,4 - 3,9 prosenttiyksikköä.

Sahauksen arvosaanto tukin kuoretonta tilavuutta kohti vaihteli latvaläpimittaluokkien välillä sydäntavara-asetteilla 65 - 80 €/m^3 ja lauta-asetteilla 70 - 86 €/m^3 (kuva 61). Kunkin latvaläpimittaluokan arvosaanto riippui ratkaisevasti ao. läpimittaluokan sahauksessa käytetystä asetteesta. Keskimäärin arvosaanto oli lauta-asetteilla 4 - 6 €/m^3 korkeampi kuin sydäntavara-asetteilla. Tukin pituus vaikutti kummallakin aseteryhmällä arvosaantoon siten, että se oli 4,6 m:n tukeilla 14 - 15 €/m^3 pienempi kuin 2,2 m:n tukeilla.



Kuva 60. Sahatavaran saanto sydäntavara- ja lauta-asetteilla tukin latvaläpimittaluokittain tukin pituuksilla 2,2 - 4,6 m kuoretonta tukkitilavuutta kohti.

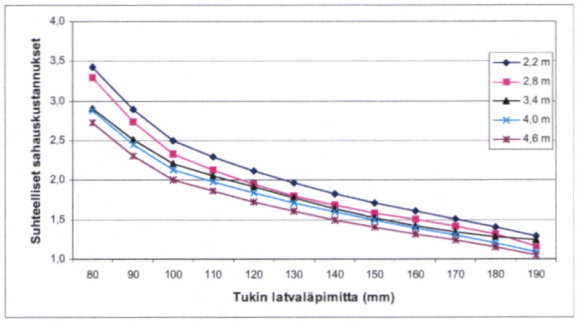


Kuva 61. Sahauksen arvosaanto sydäntavara- ja lauta-asetteilla tukin latvaläpimittaluokittain tukin pituuksilla 2,2 - 4,6 m kuoretonta tukkitilavuutta kohti.

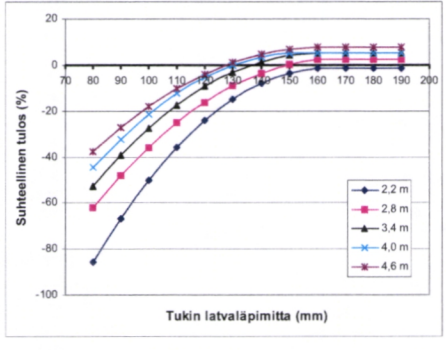
5.3.3.3 *Sahauksen tulos tuotteiden, tukin hintojen ja sahauskustannusten perusarvoilla sekä herkkyystarkastelu*

Sahauksen suhteelliseen tulokseen huomattavasti vaikuttavat sahauskustannukset vaihtelivat tukin pituuden ja latvaläpimitan mukaan kuvan 62 mukaisesti. Tukin latvaläpimitta vaikutti huomattavasti enemmän sahauskustannuksiin kuin tukin pituus. Pienimmässä eli 80 mm:n latvaläpimittaluokassa sahauskustannukset olivat 2,6-kertaiset verrattuna 190 mm:n latvaläpimittaluokkaan. Tukkipituuden vaikutus oli sitä suurempi, mitä pieniläpimittaisempia tukit olivat. Läpimittaluokkien erot tulivat merkittävässä määrin esille kuitenkin vasta alle 140 mm:n tukeilla eli varsinaisilla pikkutukeilla.

Sahauksen tulos vaihteli ratkaisevasti tukin kuorettoman latvaläpimittaluokan mukaan ja vaikutus oli lauta- ja sydäntavara-asetesarjoilla samansuuntainen. Kuvassa 63 on esitetty sahatavaran tuotannolle tukin kuoretonta tilavuutta kohti tuotteiden perushinnan pohjalta lasketun suhteellisen tuloksen riippuvuus tukin pituudesta ja latvaläpimittaluokasta siten, että tulokset on tasoitettu regressiomalleilla.



Kuva 62. Suhteelliset sahauskustannukset tukin kuorettoman latvaläpimittaluokan mukaan tukin pituuksilla 2,2 - 4,6 m kuoretonta tukkitilavuutta kohti.

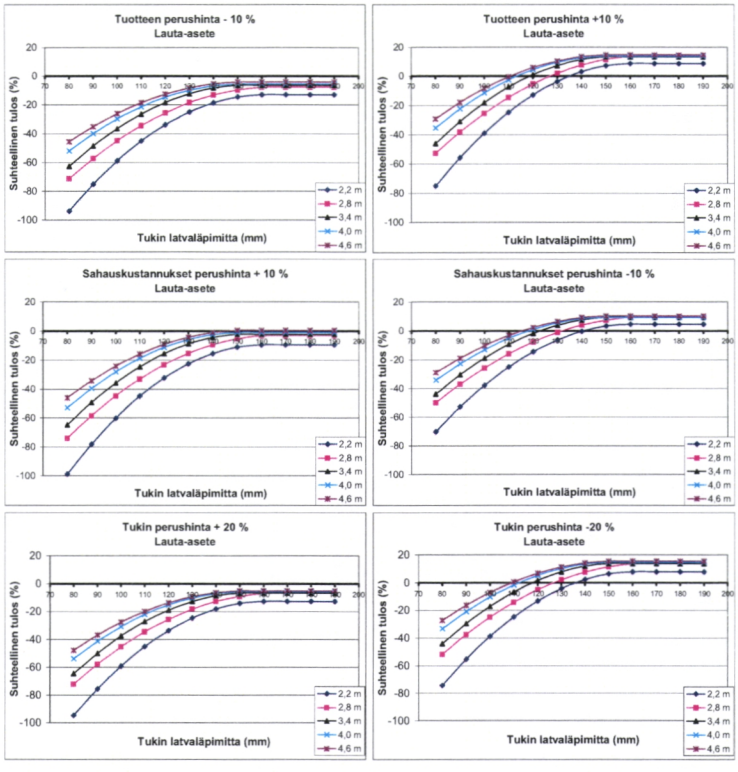


Kuva 63. Sahatavaran tuotannon suhteellinen tulos sydäntavara- ja lauta-asetteilla tukin latvaläpimittaluokan mukaan tukin pituuksilla 2,2 - 4,6 m tuotteiden, sahauskustannusten ja tukin perushinnan pohjalta laskettuna kuoretonta tukkitilavuutta kohti.

Näissä laskelmissa otettiin huomioon sahauksen kokonaiskustannukset (muuttuvat kustannukset, pääomakustannukset), tuotteiden hinnat ja sivutuotehyvitykset. Lähtöarvoilla oli oleellinen vaikutus laskentatuloksiin. Pisimmillä tukeilla sahauksen positiivisen tuloksen raja saavutettiin latvaläpimittaluokkien 130 mm ja 140 mm välillä. Tukkipituudella 2,8 m positiivinen tulos saavutettiin latvaläpimittaluokasta 150 mm lähtien, mutta lyhyimmällä eli 2,2 m:n tukkipituudella tulos oli aina negatiivinen.

Lyhyillä tukeilla (2,2 m) suhteellinen tulos oli 13 yksikköä heikompi kuin pitkillä tukeilla (4,6 m) kuorettomassa latvaläpimittaluokassa 140 mm. Lyhyiden ja pitkien tukkien suhteellisen tuloksen ero oli 30 yksikköä sahauskelpoisena pidettävän lyhyttukin latvaläpimitan alarajalla (100 mm) ja 20 yksikköä tyypillisessä pikkutukin läpimittaluokassa (120 mm). Latvaläpimitan kasvaessa tukkipituuksien välinen suhteellisen tuloksen ero pieneni vakiintuen tasolle yhdeksän yksikköä läpimittaluokasta 160 mm ylöspäin.

Sahauksen tuloksen herkkyys tuotteen hinnan, sahauskustannusten ja tukin hinnan muutoksille lauta-asetteilla ilmenee kuvasta 64. Koska sydäntavara- ja lauta-asetteilla tulokset olivat samansuuntaisia, esitetään tässä vain lauta-asetteita koskevat tulokset. Tarkastelussa muutettiin tuotteiden perushintaa ja sahauskustannuksia ±10 % ja tukin perushintaa ± 20 %.



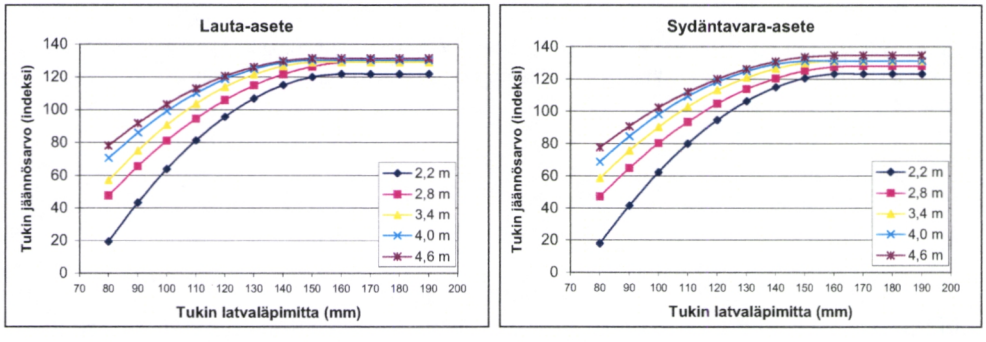
Kuva 64. Sahatavaratuotannon tulos lauta-asetteilla tukin latvaläpimittaluokan mukaan tukin pituuksilla 2,2 - 4,6 m kuoretonta tukkitilavuutta kohti. Tuotteiden perushinta ja sahauskustannukset ±10 % sekä tukin hinta ±20 %.

Tuotteen perushinnan 10 prosentin lasku, sahauskustannusten 10 prosentin nousu ja tukin hinnan 20 prosentin nousu aiheuttivat sahaustulokseen suunnilleen yhtä suuren heikennyksen. Tulos ei ollut tällöin positiivinen missään tukin latvaläpimittaluokassa. Päinvastaiset muutokset hinnoissa ja kustannuksissa johtivat samansuuruiseen mutta käänteiseen vaikutukseen sahaustuloksessa. Positiivisen tuloksen tuottava tukin rajalatvaläpimitta laski tällöin 20 mm eli tulos oli positiivinen 110 - 140 mm:n ja sitä suuremmissa latvaläpimittaluokissa tukkipituudesta riippuen. Latvaläpimitan kasvaessa tukkipituuksien välinen ero suhteellisessa tuloksessa pieneni vakiintuen tasolle 10 yksikköä tukin kuorettomasta latvaläpimitasta 160 mm ylöspäin.

5.3.3.4 *Tukin tehdashinnan jäännösarvo tuotteiden hintojen ja sahauskustannusten perusteella sekä herkkyystarkastelu*

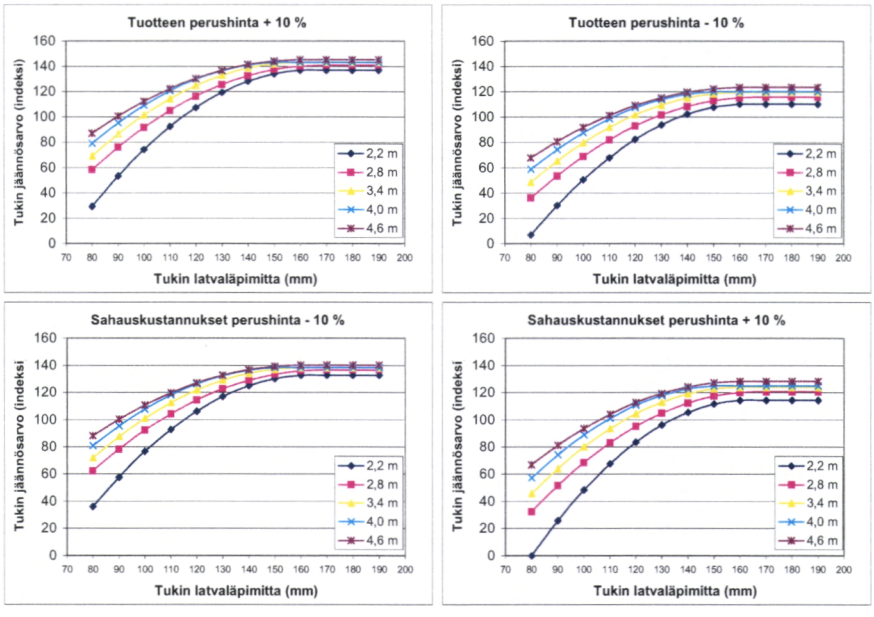
Tukin tehdashinnan jäännösarvon laskelmissa tuotteiden arvosaannosta vähennettiin tukin latvaläpimittaluokittain ja tukkipituuksittain sahauskustannukset sekä lisättiin hake-, puru- ja kuorihyvitykset. Kuvassa 65 on esitetty tukin kuoretonta tilavuusyksikköä kohti tuotteiden perushinnan pohjalta lasketun suhteellisen jäännösarvon riippuvuus tukin pituudesta ja latvaläpimittaluokasta regressiomalleilla tasoitettuna.

Tukin perushinnan jäännösarvon indeksi kuorettomassa latvaläpimittaluokassa 140 mm oli lauta-asetteilla tuotepituudella 2,2 m 12,9 yksikköä, tuotepituudella 2,8 m 6,4 yksikköä, tuotepituudella 3,4 m 2,4 yksikköä ja tuotepituudella 4,0 m 0,8 yksikköä pienempi kuin 4,6 m pitkiä tuotteita valmistettaessa. Sydäntavara-asetteilla jäännösarvon indeksi oli vastaavasti tuotepituudella 2,2 m 13,9 yksikköä, tuotepituudella 2,8 m 8,5 yksikköä, tuotepituudella 3,4 m 3,3 yksikköä ja tuotepituudella 4,0 m 1,3 yksikköä pienempi kuin 4,6 m pitkiä tuotteita valmistettaessa.



Kuva 65. Tukin tehdashinnan suhteellinen jäännösarvo kuoretonta tilavuusyksikköä kohti sydäntavara- ja lauta-asetteilla tukin kuorettoman latvaläpimittaluokan mukaan tukin pituuksilla 2,2 - 4,6 m tuotteiden perushintojen ja sahauksen peruskustannusten pohjalta lasketettuna.

Sahauskustannusten 10 prosentin lasku tai tuotteen hinnan 10 prosentin nousu aiheuttivat tukin tehdashinnan jäännösarvon indeksiin samantasoiset muutokset niin lauta-asetteilla kuin sydäntavara-asetteilla sahattaessa. Indeksin muutos oli tällöin kuorettomassa latvaläpimittaluokassa 140 mm tuotepituudella 2,2 m 10 yksikköä, tuotepituudella 2,8 m 5,7 yksikköä, tuotepituudella 3,4 m 1,9 yksikköä ja tuotepituudella 4,0 m 0,6 yksikköä pienempi kuin 4,6 m pitkiä tuotteita valmistettaessa (kuva 66, vasemman puoleiset käyrät). Päinvastaiset muutokset sahauskustannuksissa tai tuotteen hinnassa aiheuttivat indeksiin muutoksia siten, että indeksi oli tuotepituudella 2,2 m 17,1 yksikköä, tuotepituudella 2,8 m 9,7 yksikköä, tuotepituudella 3,4 m 3,9 yksikköä ja tuotepituudella 4,0 m 1,5 yksikköä pienempi kuin 4,6 m pitkiä tuotteita valmistettaessa (kuva 66, oikean puoleiset käyrät).



Kuva 66. Tukin tehdashinnan suhteellinen jäännösarvo kuoretonta tilavuusyksikköä kohti sydäntavara- ja lauta-asetteilla tukin latvaläpimittaluokan mukaan tukin pituuksilla 2,2 - 4,6 m, kun tuotteen perushinta ja sahauskustannukset muuttuvat ± 10 %.

5.3.3.5 *Rungon ulkoisen oksikkuuden ja tukin pituuden vaikutukset sahauksen arvosaantoon*

Eri tukkipituuksilla saatavia sahauksen arvosaantoja vertailtiin laskemalla ne aluksi tukkikohtaisesti eri asetesarjoilla kuoretonta tukkitilavuutta kohti ja yhdistämällä tämän jälkeen tukkikohtaiset tulokset runkokohtaisiksi tuloksiksi. Vertailuun otettiin viisi tukin moduulipituutta väliltä 2,2 - 4,6 m. Tämän jälkeen määritettiin regressiomalleilla kullekin tukin pituusluokalle riippuvuudet rungon arvosaannon ja rungon ulkoisen oksikkuuden välillä.

Rungon arvosaantoa eli tukkiaineiston ja siitä sahatun tuotannon arvoa tukin tilavuusyksikköä kohti kuvaavaksi regressiomalliksi valittiin malli (kaava 3), jossa selittävinä muuttujina olivat rungon kuivaoksarajan korkeus ja suurimman ulkoisen kuolleen oksan läpimitta:

$$ATKK = A + B*KOR + C*SKO, \quad (3)$$

missä ATKK = sahan tuotteiden arvo tukin kuoretonta tilavuusyksikköä kohti, €/m^3

KOR = rungon kuivaoksarajan korkeus, m

SKO = suurin ulkoisen kuolleen oksan läpimitta, mm

Taulukossa 31 on esitetty muodostettujen regressiomallin parametrien arvot, korrelaatiokertoimet ja selitysasteet simuloitaessa sahausta kyseisen tukin moduulipituuden mukaiseksi sahatavaraksi sydäntavara- tai lauta-asetteilla.

Arvosaannon perustaso oli säännönmukaisesti sitä korkeampi, mitä lyhempää tukkipituutta käytettiin. Kuivaoksarajan kohoamisen myötä arvosaanto sitä vastoin kasvoi sitä enemmän mitä pitempää tukkipituutta käytettiin, poikkeuksena 4,6 m:n tukkipituus. Kuivaoksarajan kohoaminen yhdellä metrillä aiheutti arvosaannon kasvun tukin pituudesta riippuen sydäntavara-asetteilla 1,2 - 1,8 €/tukki-m^3 ja lauta-asetteilla 1,5 - 2,4 €/tukki-m^3.

Rungon paksuimman ulkoisen kuolleen oksan läpimitan kasvu 10 mm:llä pienensi arvosaantoa tukin pituudesta riippuen sydäntavara-asetteilla 4,5 - 6,2 €/tukki-m^3 ja lauta-asetteilla 5,5 - 8,4 €/tukki-m^3. Oksan läpimitan suurenemisesta seurannut arvosaannon lievä pieneneminen oli sitä suurempi, mitä pitempää tukkipituutta käytettiin. Poikkeuksena tässäkin oli 4,6 m:n tukkipituus.

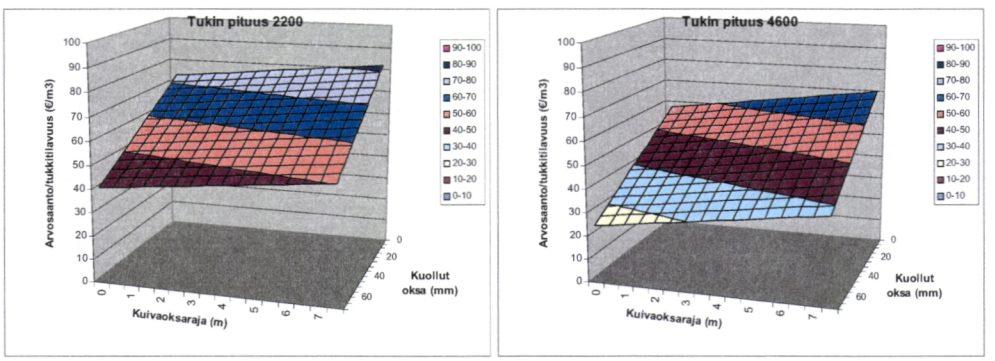
Taulukko 31. Rungon arvosaannon ja valittujen oksikkuustunnusten väliset regressiomallit, niiden parametrit ja tilastollinen merkitsevyys tukin moduulipituuden mukaan sahattaessa tämän pituuden mukaista sahatavaraa sydäntavara- tai lauta-asetteilla.

	Tukin pituus (m)				
	2,2	2,8	3,4	4,0	4,6
			Sydäntavara-asete		
Vakio (A)	72,579	71,564	67,019	64,154	57,022
Kuivaoksarajan kerroin (B)	1,244	1,292	1,544	1,927	1,715
Kuolleen oksan läpimitan kerroin (C)	-0,452	-0,534	-0,552	-0,623	-0,461
Korrelaatiokerroin (r)	0,424	0,421	0,407	0,420	0,341
Selitysaste (r^2)	0,180	0,177	0,166	0,176	0,116
			Lauta-asete		
Vakio (A)	83,132	83,182	81,074	77,738	67,863
Kuivaoksarajan kerroin B)	2,009	2,317	2,235	2,348	1,496
Kuolleen oksan läpimitan kerroin (C)	-0,562	-0,668	-0,812	-0,833	-0,556
Korrelaatiokerroin (r)	0,424	0,350	0,406	0,353	0,245
Selitysaste (r^2)	0,180	0,123	0,165	0,124	0,060

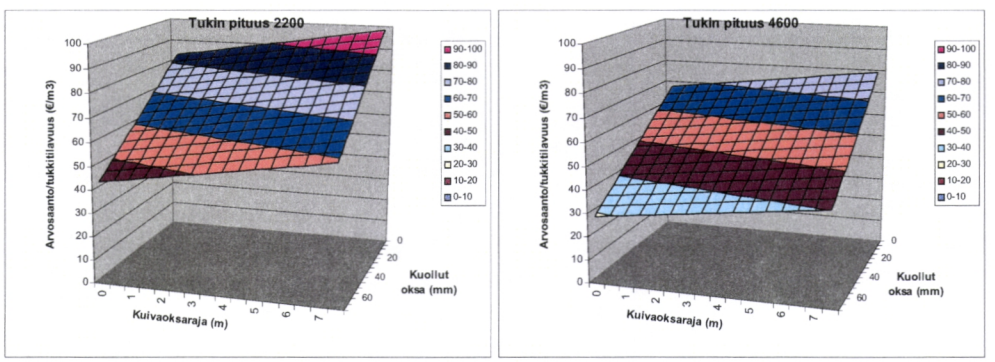
Kuvissa 67 ja 68 on esitetty edellä mainituilla regressiomalleilla saatuja tuloksia kuvaavat pinnat samalla periaatteella kuin kuvissa 55 ja 56. Kuvasta 67 ilmenee, että kuivaoksarajan nousu yhdellä metrillä kohotti arvosaantoa sydäntavara-asetteilla keskimäärin 1,5 €/tukki-m^3. Vastaavasti ulkoisen kuolleen oksan läpimitan kasvu 10 mm:llä laski arvosaantoa keskimäärin 5,2 €/tukki-m^3.

Kuvan 68 mukaisesti kuivaoksarajan kohoaminen yhdellä metrillä kohotti arvosaantoa lauta-asetteilla keskimäärin 2 €/tukki-m^3 ja kuolleen oksan läpimitan suureneminen 10 mm:llä laski arvosaantoa keskimäärin 6,9 €/tukki-m^3.

Kuvien 67 ja 68 perusteella tukin pituuden vaikutus arvosaantoon on huomattava. Tukkipituudella 2,2 m arvosaanto oli sydäntavara-asetteilla lähes 17 €/tukki-m^3 ja lauta-asetteilla noin 14 €/tukki-m^3 korkeampi kuin tukkipituudella 4,6 m. Lauta-asetteita käytettäessä arvosaanto oli tukkipituudesta riippuen keskimäärin 8,4 - 10 €/tukki-m^3 korkeampi kuin sydäntavara-asetteita käytettäessä.



Kuva 67. Rungoille simuloidun arvosaannon riippuvuudet kuivaoksarajasta ja paksuimman kuolleen oksan läpimitasta tukin pituuksilla 2,2 m ja 4,6 m sahattaessa näiden tukkipituuksien mukaista sahatavaraa. Sydäntavara-asete.



Kuva 68. Rungoille simuloidun arvosaannon riippuvuudet kuivaoksarajasta ja paksuimman kuolleen oksan läpimitasta tukin pituuksilla 2,2 m ja 4,6 m sahattaessa näiden tukkipituuksien mukaista sahatavaraa. Lauta-asete.

6 TULOSTEN TARKASTELU JA PÄÄTELMÄT

6.1 TULOSTEN YLEISTETTÄVYYS JA LUOTETTAVUUS

6.1.1 Metsikkö- ja koepuuaineistojen edustavuus

Tutkimushankkeessa mukana olleiden viiden sahan puunhankinta-alueilta tutkittiin pystypuuston ja kaadettujen koepuiden mittauksin ja arvioinnein puuston sahausteknisiä ominaisuuksia sekä ensiharvennusvaiheessa että myöhemmässä harvennusvaiheessa olevista männiköistä kivennäis- ja turvemailta. Kunkin sahan hankinta-alueelta valittiin tutkittaviksi tärkeimmät harvennusmänniköiden metsikkötyypit, joihin ao. saha otaksui tulevaisuudessa kohdistavansa puunhankintaansa. Sahojen hankinta-alueet ja näin määritellyt metsikkötyypit muodostivat metsikköotannan ositteet, joiden puitteissa metsiköt valittiin satunnaisesti. Metsikköaineistoon hyväksyttiin vain hyvää metsänhoidollista tasoa edustaneita harvennusmänniköitä. Puulajisuhteiltaan kohteet olivat puhtaita tai lähes puhtaita männiköitä. Ainoastaan eräissä turvemaiden männiköissä esiintyä merkittävissä määrin koivua sekapuuna.

Otannasta johtuen tutkimuksen aineisto ei ole määrällisesti tai laadullisesti läpileikkaus Suomen harvennusmänniköistä, vaan valittu otos hyvälaatuisista harvennusmänniköistä, joita voidaan olettaa hyödynnettävän osana sahateollisuuden ja jatkojalostuksen raaka-ainepohjaa. Aineisto ei myöskään sisältänyt harvennusmänniköiden ulkoisten tai sisäisten laadullisten ominaisuuksien ääriarvoja tietoisesti valittuina.

Tutkimusaineistot käsittivät kaikkiaan 203 harvennusmäntymetsikköä, 8508 pystykoepuuta ja 200 kaatokoepuuta. Metsikkö- ja pystykoepuuaineisto oli aineistona Metlan tutkimuksille puustojen ominaisuuksista, laadusta ja hakkuukertymistä ja otantapohjana valittaessa kaatokoepuita VTT:n runkopankkianalyyseihin runkojen sisäisen oksaisuuslaadun ja sahaustuloksen tutkimuksia varten.

Metsikköaineisto sijoittui Etelä- ja Pohjois-Pohjanmaan, Itä-Lapin, Koillismaan ja Pohjois-Karjalan ja Etelä-Savon alueille. Kyseiset alueet kuuluvat Suomen tärkeimpiin metsätalous- ja sahateollisuusalueisiin (esim. Peltola 2004) ja harvennusmännyn tärkeimpiin potentiaalisiin lähteisiin metsäteollisuuden lähivuosikymmenien puunhankinnassa (esim. Ensiharvennustyöryhmän muistio 1988, Hakkila 1995).

Tutkimusaineisto oli suuri sekä metsiköiden että pysty- ja kaatokoepuiden kokonaismäärän suhteen, varsinkin verrattuna saman aihepiirin aiempiin tutkimuksiin. Aineistoa voidaan pitää yleistettävänä metsiköiden lukumäärän ja jakauman suhteen sahateollisuudelle potentiaalista harvennusmäntyä koskevia johtopäätöksiä varten, erityisesti tutkituilla alueilla. Sama pätee pystykoepuiden lukumäärään yhdessä metsikössä, kun otetaan huomioon mielenkiinto nimenomaan sahapuukokoisiin läpimittaluokkiin pikku- ja lyhyttukin käyttöä ajatellen. Kaatokoepuiden lukumäärä yhdessä metsikössä oli käytännön syistä kuitenkin varsin pieni, koska runkopankkianalyyseihin varattujen resurssien puitteissa haluttiin kattaa ensisijaisesti metsiköiden välinen vaihtelu ennen niiden sisäistä vaihtelua.

Aineisto oli kattava metsiköiden kasvupaikkaluokkien ja -tyyppien ja puuston kehitysluokkien suhteen. Turvemailta kertyi kuitenkin niukasti (9 % metsiköistä)

myöhempiä harvennuskohteita. Turvemaiden aineisto painottui lisäksi puolukkaturvekankaille, ja ruoho- ja varputurvekankaiden aineisto jäi vastaavasti niukaksi. Viljelymänniköitä aineistossa oli vain muutama; niiden osuus kasvaa selvästi lähivuosikymmenten harvennushakkuissa. Männyn pellonmetsityskohteet jätettiin aineiston ulkopuolelle niiden yleisesti huonon laadun seurauksena (esim. Hynönen ja Hytönen 1998, Nurmi 2002, vrt. Jouhiaho ja Uusitalo 2001).

Koealat sijoitettiin metsiköihin ja puustojen pystymittaukset ja -arvioinnit tehtiin ihmistyönä, jolloin arvioijan subjektiiviset näkemykset ja valinnat vaikuttivat lopputulokseen. Tätä haittaa lievensi olennaisesti näiden töiden toteutus kahdella hankkeen tutkijoiden johtamalla ja yhtenäisesti koulutetulla maastoryhmällä.

Koealat olivat kivennäismailla kiinteäsäteisiä ympyräkoealoja, joiden säde ja pinta-ala olivat myöhemmissä harvennuksissa puuston pienemmän hehtaarikohtaisen runkoluvun vuoksi suurempia (200 m^2) kuin ensiharvennuksissa (50 m^2), ja turvemailla suorakaidekoealoja (vähintään 80 m^2). Koealat sijoitettiin kullekin metsikkökuviolle pisimmän sivun suuntaiselle lävistäjälle tasaisin välein, kuitenkin metsikköä hyvin edustaviin kohtiin. Puustotunnuksiin saattoi tällöin syntyä koealojen sijoittelusta aiheutuvaa satunnaisvirhettä ja mahdollisesti myös systemaattista virhettä, jos koealat perustettiin metsikön keskimääräistä puustoisempiin kohtiin.

Ympyräkoealoja käytettäessä kaikilla koealan puilla oli sama todennäköisyys tulla otokseen. Koska harvennusmetsiköiden runkolukusarjat painottuvat tyypillisesti ohuisiin läpimittaluokkiin, otokseen tuli mahdollisesti suuria puita niiden tilavuusosuutta vähemmän kuin pieniä puita. Tästä seurasi, että suurien puiden runkoluvun ja tilavuuden estimaatti oli suhteellisesti epätarkempi kuin pienien puiden. Haittaa korostaa se seikka, että suuret puut ovat taloudellisesti metsikön tärkeimpiä. Toisaalta tutkimuksessa käytetyillä verraten pienillä koealoilla, erityisesti ensiharvennusleimikoissa ja turvemaiden leimikoissa, yksittäiset suuret puut saattavat vaikuttaa enemmän puuston tilavuuden ja myös sahattavan puun osuuden estimaattiin kuin niiden tosiasiallinen merkitys on koko metsikön tasolla.

6.1.2 Pysty- ja kaatokoepuumittausten ja arviointien tarkkuus

Pystypuuston mittaukset tehtiin vakiintunein menetelmin hyväkuntoisilla mittausvälineillä. Subjektiivisuudesta johtuvaa virhettä saattoi syntyä lähinnä runkojen teknisten vikojen ja rungonosien sahapuukelpoisuuden arvioinnissa. Periaatteena oli ottaa huomioon kaikki mahdolliset sahauskelpoisuutta rajoittaneet viat. Todennäköisesti menettely johti tarkempaan ja kriittisempään sahapuun apteeraukseen kuin mitä sovelletaan käytännön puunhankinnassa. Tästä johtuen sahapuun määrät ja osuudet olivat ilmeisesti varovaisia arvioita sahattavan puun määristä tutkituissa metsikkötyypeissä.

Runkomuotovikojen objektiivinen määrittäminen pystypuustosta on sahattavuuden kannalta vaikea tehtävä. Esimerkiksi lenkouden tai mutkaisuuden dimensioita ei voida mitata tarkasti maastossa. Aineiston keruun yhdenmukaisuuden vuoksi rungot tai rungon osat määritettiin maastossa kuitenkin aina lengoiksi tai mutkaisiksi, jos ao. vika oli silmin havaittavissa. Menettely oli perusteltua myös siitä syystä, että tukin suoruusvaatimukset korostuvat pieniläpimittaista puuta sahattaes-

sa. Poikkeuksena on tasainen käyryys (lenkous), jos se esiintyy koko sahattavan pölkyn pituudella.

Maastoinventointien mittausten luotettavuutta koskien apteeraustulokseen vaikuttaneiden runkovikojen havainnointia tarkasteltiin vertailemalla kaatokoepuille tehtyä pystypuuarviointia ja puun kaadon jälkeen maassa tehtyä tarkempaa tarkistusmittausta. Samalla inventointiryhmillä oli mahdollisuus tarkentaa silmämääräistä arviointia. Vertailujen mukaan mittausvirhettä ei ollut rinnankorkeusläpimitan, puun pituuden ja tuoreoksarajan mittauksissa. Sitä vastoin pystypuista silmämääräisesti viiden millimetrin tarkkuudella tehdyissä suurimman elävän ja kuolleen oksan paksuuden arvioinneissa ilmeni tilastollisesti merkitsevä aliarvio tarkistusmittaukseen nähden, ollen keskimäärin kuitenkin vain 2 - 3 mm.

6.1.3 Hankintatutkimuksen aineistot ja mittausmenetelmät

Harvennusmännyn korjuututkimuksessa keskityttiin lyhyttukkitekniikalla ja normaaleilla puutavaralajeilla hakkuun välisten tuotavuus- ja kustannuserojen selvittämiseen neljällä leimikolla tapaustutkimuksena. Aineiston määrä ja laatu eivät saavuttaneet kriittisimpiä korjuututkimuksille asetettavia tieteellisiä vaatimuksia mm. kokeen keston, harvennuskohteiden ja korjuuolosuhteiden vaihtelevuuden ja tulosten yleistettävyyden suhteen. Aineisto katsottiin kuitenkin riittävän kattavaksi tämän tutkimuksen kaltaisen tarkasti rajatun tutkimusongelman ratkaisemiseen. Puutavaran kaukokuljetusten ajanmenekin, tuottavuuden ja kustannusten määrityksessä turvauduttiin valmiiseen kustannuslaskentamalliin, jonka vuoksi eroihin lyhyttukkilohkojen ja normaalien puutavaralajien lohkojen tulosten välillä on suhtauduttava varovaisesti empiirisen näytteen puuttuessa.

Korjuututkimuksen koeleimikot olivat Metsähallituksen metsistä, joissa metsänhoito on usein säännöllisempää kuin yksityismetsissä. Leimikot olivatkin runsaspuustoisia, hakkuukertymiltään ja sahapuun osuuksiltaan keskimääräistä parempia hakkuukohteita. Leimikoiden lyhyttukkilohkot hakattiin lyhyttukkien saantoa suosien, jotta voitiin varmistaa riittävä aineisto korjuumenetelmien vertailuun. Tästäkään syystä leimikoiden sahapuun kertymät eivät olleet tavanomaisia.

6.1.4 Apteerauksen simulointien ja hakkuukertymälaskelmien luotettavuus

Metsiköiden kokonaispuusto ja simuloidussa harvennuksessa poistetut puut apteerattiin käyttäen männyn puutavaralajeina kulloinkin tarkastellusta apteerausperiaatteesta riippuen ainakin normaalitukkia ja kuitupuuta ja lisäksi järeää tyvitukkia ja joko pikkutukkia tai lyhyttukkia tai niitä molempia. Tulosten laskennassa pyrittiin kattamaan sellaisten sahattavien puutavaralajien valikoima, joita käytännön sahateollisuudessa käytetään nykyisin tai oletetaan voitavan käyttää lähitulevaisuudessa. Puutavaralajien pituus-, läpimitta- ja laatuvaatimukset vaihtelevat tietenkin yrityksittäin ja markkinatilanteittain, etenkin normaalitukin dimensioiden alittavien sahattavien puutavaralajien osalta. Metsiköiden tilavuuksia ja puutavaralajijakaumia

laskettaessa lopullisiin laskelmiin vaikuttivat myös käytetyt mallit (mm. runkokäyrät) ja niihin sisältyvät yleistykset ja lähtöarvot.

Subjektiivisuus metsikön kasvupaikkatyypin (metsä- tai suotyypin) ja kehitysluokan määrityksessä vaikeutti puuston tilavuuden sekä sahapuun kertymän ja osuuden määritystä näiden muuttujien mukaisille ositteille. Etenkin kehitysluokkien määrittäminen, jonka pitäisi kuvata puuston järeyttä ja runkolukua tietyllä tarkkuudella, osoittautui ongelmalliseksi, koska harvennusvaiheessa olevien metsiköiden eri kehitysluokkien välistä rajaa oli usein vaikea erottaa. Metsätaloussuunnitelmissa toimenpide-ehdotuksella "ensiharvennus" määritellyn puuston rakenne voi vaihdella huomattavasti ainespuun minimimitat juuri ja juuri täyttävästä järeää tukkipuuta tuottavaan metsikköön. Tässä tutkimuksessa ensiharvennusten ja myöhempien harvennusten erottamisen vaikeudesta aiheutuvaa ongelmaa pyrittiin lieventämään laskemalla täydentäviä tuloksia koko aineistolle rinnankorkeusläpimittaluokittain.

Tukkien pituus- ja/tai läpimittajakauman tavoitteet vaikuttavat olennaisesti toteutuneeseen sahapuun kertymään ja sen jakaumaan käytännön puunhankinnassa. Tätä seikkaa ei otettu huomioon tämän tutkimuksen apteerauksen simuloinneissa. Käytännön kokemusten mukaan jakauma-apteeraus ja sen erilaiset yhdistelmät arvoapteerauksen kanssa yleensä pienentävät jossain määrin sahapuun kertymää verrattuna apteeraukseen minimiläpimittojen ja määräpituuksien perusteella.

Laatuharvennuksen periaatteeseen pohjautuva alaharvennus johti tässä tutkimuksessa siihen, että poistettava puusto määräytyi ensisijaisesti koepuiden teknisen laadun perusteella. Yleisimmin laatuharvennukseen vaikuttivat lenkous ja ranganvaihdot, näiden jälkeen mutkat, korot ja haarat sekä ylipaksut oksat. Harvennuksessa poistettiin myös vallitsevan latvuskerroksen puita niiden huonon laadun vuoksi. Harvennuspoistuma oli ensiharvennuksissa kasvupaikkaluokasta ja -tyypistä riippuen keskimäärin 29 - 45 % puuston tilavuudesta, ja poistuman osuus oli sitä suurempi mitä karumpi oli kasvupaikka. Myöhemmissä harvennuksissa poistettiin kuitenkin vain keskimäärin 20 - 33 % puuston tilavuudesta, ja poistuman osuus oli sitä suurempi mitä viljavampi oli kasvupaikka. Erityisesti turvemailla oli vaikeuksia löytää aineistoon metsiköitä, joissa myöhempi harvennus oli ehdottomasti ajankohtainen metsänhoidollisen tilan perusteella. Tämä ilmeisesti aiheutti verraten pienen poistuman. Mikäli hyvän metsänhoidon mukaisen poistuman ylärajana pidetään 35 - 40 prosenttia puuston tilavuudesta, eri kasvupaikkatyyppien metsiköistä poistettiin normaali osuus puustosta harvennuksessa. Kuivien kankaiden ja varputurvekankaiden ensiharvennuksissa poistettiin kuitenkin keskimäärin tavallista suurempi osuus puustosta.

6.1.5 Sahauksen simulointien ja kannattavuuslaskelmien luotettavuus

Harvennusmännyn sahauksen simulointeja ja runkojen sisäisen laadun tutkimuksia varten kaatokoepuista läpisahatut saheet kuvattiin VTT:n konenäköjärjestelmällä. Kuvatuilta sahepinnoilta mitattiin ja laadutettiin erittäin suuri määrä oksan osia, joista koottiin yhteensä 28 350 ehjää oksaa runkojen konstruoinnin yhteydessä. Saheista tehtyä oksien mittausta ja laadutusta vaikeutti se, että tukit läpisahattiin noin

23 mm:n saheviipaleiksi perinteisen nelisahauksen sijaan. Tällöin osa oksista saattoi jäädä kokonaan piiloon saheen sisään tai oksasta näkyi vain osa. Oksan matemaattinen konstruointi ehyeksi oksaksi eri saheviipaleissa sijaitsevista epämääräisistä oksan osista oli eräissä tapauksissa vaikeaa. Edellä mainituista syistä oksan suuntautuneisuus, oksakulma, oksan syntykorkeus, oksan läpimitta ja laatu ovat vaikeasti mitattavissa ja mallinnettavissa.

Laskelmat kaatokoepuista simuloimalla saatujen sahatuotteiden valmistuksen kannattavuudesta ja herkkyysanalyysit lopputuotteen ja tukin hinnan ja sahauskustannusten suhteen tehtiin kattavasti. Tuottojen laskennan lähtöarvoina käytettiin VTT:n arvioimia suomalaisen sahateollisuuden mäntysahatavaratuotteiden, hakkeen, purun ja kuoren sekä mäntytukin ja -pikkutukin keskimääräisiä yksikköhintoja vuonna 2000. Sahauskustannukset muodostuivat kyseisen vuoden keskimääräisistä muuttuvista ja kiinteistä kustannuksista. Muuttuviin sahauskustannuksiin vaikuttivat oleellisesti tukin järeys ja pituus. Muuttuvissa kustannuksissa otettiin huomioon tukkien sahausnopeuden kasvu latvaläpimitan pienentyessä ja sahatavaran kuivauskustannusten nousu pituuden lyhentyessä.

Simuloidut rungot ja tukit eivät täysin vastaa todellisia, koska simulointi yksinkertaistaa jossain määrin niiden muotoa. Simuloinneissa saantoihin ja laatusaantoihin eivät myöskään vaikuta normaalissa sahaympäristössä tapahtuvat saannon heikkenemiset (mm. rikkoutumiset käsittelyssä ja kuljettimilla) tai laadun alentumiset (mm. kuivaushalkeamat ja -muodonmuutokset). Sahatavaran tilavuus- ja laatusaannot vaikuttivat sahauksen kannattavuuteen ja kannattavan sahauksen edellyttämiin tukin kuorettomiin minimiläpimittoihin. Simuloinnin antamat kannattavan sahauksen rajalatvaläpimitat ovat todennäköisesti optimistisia arvioita. Toisaalta simuloinnissa pyrittiin tietoisesti käyttämään varovaisuutta sahatavaran ja tukin hintojen ja sahauskustannusten perustasojen valinnassa, joten tältä kannalta tulokset eivät ainakaan yliarvioisi harvennusmännyn sahauksen kannattavuutta.

Käytetyssä simulointiohjelmassa oli mahdollista soveltaa tukin käyräsahausta optimaalisesti. Mikäli käyräsahaus ei ole tarkasteltavassa käytännön tapauksessa mahdollista, sahatavaran tilavuus- ja laatusaanto jäävät lenkoja tukkeja sahattaessa huomattavasti heikommiksi kuin tässä tutkimuksessa.

6.2 Tulosten arviointi ja päätelmät

6.2.1 Harvennusmänniköiden tekninen laatu ja sahapuun saatavuus

Ottaen huomioon pikkutukkien hankinnan yli 20-vuotinen historia sahatavaran, egyptinparrun ja rakennuspyöröpuun valmistukseen tukkipuun hakkukertymistä ja hakkuukelpoisista metsikkötyypeistä ja varsinkin harvennusrunkojen teknisestä laadusta näihin käyttötarkoituksiin on julkaistu varsin vähän tuloksia. Suurin osa tutkimuksista on tehty 1990-luvun puolivälin jälkeen.

Harvennusmäntyrunkojen tekninen laatu oli tässä tutkimuksessa varsin heikko teknisesti täysin virheettömien runkojen osuuden perusteella arvioituna. Tällaisia runkoja oli kivennäismailla vain 10 % ja turvemailla 8 %, ensiharvennuksissa 8 - 14 % ja myöhemmissä harvennuksissa 2 - 11 % kasvupaikkaluokasta ja -tyypistä

riippuen. Tämä osuus oli Stödin (2000) ensiharvennusmäntyjä koskeneessa tutkimuksessa osapuilleen samoilla laatukriteereillä mutta lievemmillä metsänhoidollisen tilan vaatimuksilla kuitenkin vielä pienempi (7 %). Puustojen laatueroja tutkimuksissa korostaa se, että mekaanisessa puunjalostuksessa jossain määrin hallittavissa oleva tyviosan lenkous oli tässä tutkimuksessa selvästi yleisin vika, kun taas Stödin (2000) tutkimuksessa sahausteknisesti haitallisin vika eli monivääryys oli yleisin. Stödin ym. (2003) ensiharvennusmänniköiden tutkimus poikkesi edellä mainituista sikäli, että teknisesti virheettömien koepuiden osuus oli 53 %, mikä johtui hieman lievemmistä runkojen laatuvaatimuksista (normaali tekninen laatu). Poikkeuksellista oli myös ulkoisen oksikkuuden ja poikaoksikkuuden arvioiminen yleisimmiksi vioiksi eriasteisen mutkaisuuden ohella.

Tässä tutkimuksessa virheettömiä runkoja oli sitä enemmän, mitä viljavampi oli kasvupaikka. Yksittäisistä vioista mutkia, tyvilenkoutta ja ranganvaihtoja esiintyi sitä runsaammin, mitä niukkaravinteisempi kasvupaikka oli. Vastaavasti lenkoutta, monivääryyttä ja yli 30 mm:n oksia sisältäneiden runkojen osuus väheni kasvupaikan viljavuuden vähentyessä. Yksittäisiä vikoja esiintyi ensiharvennuksissa sitä vähemmän, mitä niukkaravinteisempi oli kasvupaikka lukuun ottamatta mutkaisuutta ja tyvilenkoutta, joiden esiintymiseen viljavuus vaikutti käänteisesti. Myöhemmissä harvennuksissa moniväärien ja mutkaisten puiden osuus lisääntyi kasvupaikan ravinteisuuden parantuessa ja vastaavasti tyvilenkouden, lenkouden, ranganvaihtojen ja yli 30 mm:n oksia sisältäneiden runkojen osuus väheni kasvupaikan muuttuessa niukkaravinteisemmaksi. Stödin (2000) tutkimuksessa runkojen vikaisuus oli jostain syystä lähes kaikissa suhteissa sitä yleisempää, mitä viljavampi oli kasvupaikka. Syynä oli todennäköisesti viljelymänniköiden yleisyys viljavimmilla kasvupaikoilla.

Rungon kuivaoksaraja oli tässä tutkimuksessa kohtuullisen korkealla harvennusmänniköiden yleiskuvaan verrattuna, ensiharvennuksissa 0,5 - 1,7 m ja myöhemmissä harvennuksissa 1,1 - 2,1 m kasvupaikkaluokasta ja -tyypistä riippuen. Vastaava raja oli Jouhiahon ja Uusitalon (2001) tutkimuksessa ensiharvennuksissa 0,3 - 0,8 m kasvupaikasta riippuen, vaikka puuston rinnankorkeusläpimitta oli 3 - 5 cm ja keskipituus 0,5 m suurempi kuin tässä tutkimuksessa. Tuoreoksaraja oli tässä tutkimuksessa korkealla ja samalla tasolla ensiharvennuksissa, 5,7 - 7,1 m, ja myöhemmissä harvennuksissa, 5,2 - 8,8 m. Stödin ym. (2003) tutkimuksessa tätä suuntaa antavasti vastaava latvusraja oli ensiharvennuksissa jopa korkeammalla, keskimäärin 7,1 m. Myös latvussuhde oli tässä tutkimuksessa kasvupaikkaluokittain lähes sama ensiharvennuksissa (43 - 49 %) ja myöhemmissä harvennuksissa (42 - 51 %). Alle 50 prosentin latvussuhde ensiharvennuksessa viittaa metsänhoidollisten kriteerien perusteella ainakin lievään myöhästymiseen harvennuksessa (esim. Vuokila 1976, Vuokila 1981).

Rungon suurimpien oksien paksuudet olivat tässä tutkimuksessa tavallisella tasolla. Paksuin kuiva oksa oli ensiharvennuksissa 17 - 21 mm ja myöhemmissä harvennuksissa 18 - 22 mm ja paksuin tuore oksa vastaavasti 22 - 26 mm ja 21 - 31 mm, kasvupaikkaluokasta ja -tyypistä riippuen. Jouhiahon ja Uusitalon (2001) tutkimuksessa rungon kahden metrin tyviosan suurin kuiva oksa oli ensiharvennuksissa 14 - 21 mm. Stödin ym. (2003) tutkimuksessa rungon 4,5 m:n tyviosan paksuin

oksa oli ensiharvennuksissa kuivia ja tuoreita oksia erottelematta keskimäärin 19 mm.

Hakkilan ym. (1972) valtakunnan metsien viidennen inventoinnin koealaaineistoon perustuneessa tutkimuksessa kuivaoksarajaa vastaava kuolleiden oksien alaraja oli 1,7 m, tuoreoksarajaa lähes vastaava elävien oksien alaraja oli 4,7 m, latvussuhde 54 % ja paksuin oksa oli 23 mm 70 prosentin suhteellisella rungonkorkeudella, kun tarkastellaan tätä tutkimusta vastaavaa runkojen keskiläpimittaluokkaa Etelä-Suomessa.

Tässä tutkimuksessa saadut tulokset sahauskelpoisen harvennusmännyn hakkuukertymästä olivat pääosin heikompia tai korkeintaan samalla tasolla kuin niissä harvoissa tutkimuksissa, joita on tehty aiemmin. Merkille pantavaa on, että sahauskelpoinen kertymä oli tässä tutkimuksessa huono, alle 5 m^3/ha, yli 70 prosentissa turvemaiden ja vajaassa 60 prosentissa kivennäismaiden metsiköistä ja hyvä, yli 20 m^3/ha, kahdeksassa prosentissa kivennäismaiden ja vain neljässä prosentissa turvemaiden metsiköistä.

Tässäkin yhteydessä on korostettava, että esitettyjä sahapuun hakkuukertymiä voidaan pitää vähimmäistasoina aiemmin esitetyin perustein. Eri vikojen vaikutuksia sahatukin kertymään voidaan tarvittaessa lieventää sahakohtaisesti, jolloin harvennusmännyn sahauskelpoisiin kertymälaskelmiin voidaan tehdä tarvittava korjaus kuvissa 18 - 20 esitettyjen tulosten perusteella.

Aiemmat tutkimukset ovat olleet tiettyjen seutukuntien metsällisiin oloihin kohdistuneita, tapaustutkimusten luonteisia selvityksiä, joiden yleistettävyys on kyseenalainen jopa maakunnallisella tasolla. Pohjoisessa Keski-Suomessa tehdyssä selvityksessä liimalevyn valmistukseen soveltuneen männyn osuus toisen harvennuksen leimikon hakkuukertymästä oli peräti 66 - 73 %, kun runkojen rinnankorkeusläpimitta oli vähintään 12 cm ja pikkutukin minimiläpimitta oli 10 cm ja minimipituus 3 m; leimikot olivat tarkkaan valittuja ja ilmeisen hyvälaatuisia (Vesterinen 1996). Stödin (2000) tutkimuksessa sahattavaa pikkutukkia laatuvaatimuksiltaan lähes vastaavan pyöreän rakennuspuun kertymä oli männikön ensiharvennuksissa Uudellamaalla ja Etelä-Hämeessä 11,2 m^3/ha, Pohjois-Karjalassa 8,8 m^3/ha ja Keski-Pohjanmaalla 4,1 m^3/ha, kun rakennuspuupölkyn minimiläpimitta oli 9 cm. Pohjois-Karjalassa koepuista 75 % sisälsi vähintään yhden laatunsa puolesta sahauskelpoisen rungonosan (Stöd 2002b). Sahauskelpoisen puun kertymä oli Pohjois-Karjalan aineistossa pienempi kuin pyöreän rakennuspuun kertymä, metsätyypistä riippuen vain 2,0 - 8,5 m^3/ha, kun rungoista apteerattiin normaalitukkia ja pikkutukkia tämän tutkimuksen perusapteerauksen mitoilla. Leimikoiden metsänhoidollisen tilan vaatimukset olivat Stödin tutkimuksissa ehkä lievemmät kuin tässä tutkimuksessa.

Rungon teknisten vikojen vaikutus sahapuun hakkuukertymään korostuu harvennusleimikoissa, joissa rungot ovat lyhyitä ja pieniläpimittaisia. Kaikki runkoviat huomioon ottava tarkka apteeraus johti harvennusmänniköissä tulokseen, jossa sahattavien puutavaralajien kertymä oli keskimäärin pieni, ensiharvennuksissa noin 6 m^3/ha ja myöhemmissä harvennuksissa noin 7 m^3/ha. Jos runkovikoja ei otettaisi lainkaan huomioon apteerausta rajoittavina tekijöinä, sahattavien puutavaralajien keskimääräinen kertymä olisi ollut varsin suuri, ensiharvennuksissa 29 m^3/ha ja myöhemmissä harvennuksissa 31 m^3/ha. Yksittäistä vioista tyvilenkouden sallimi-

nen lähes kaksinkertaisti sahapuun kertymän. Myös muissa rungonosissa esiintyneen lenkouden ja monivääryyden vaikutukset sahapuun kertymään olivat selvät lisäyksen ollessa 3 - 5 m^3/ha. Stödin (2002b) aineistossa Pohjois-Karjalan ensiharvennusmänniköissä sahapuun maksimaalinen kertymä olisi ollut 9 - 28 m^3/ha ja tyvitukin lenkoutta sallittaessa 4 - 20 m^3/ha. Harvennusmänniköiden sahapuun hakkuukertymän maksimoinnin kannalta tulisi lenkojen tukkien hyödyntämisen tekniikkaa kehittää edelleen.

Käytännön puunhankinnassa on männiköiden ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa saatu sahattavaa mäntytukkia ja -pikkutukkia tämän konsortion ohjausryhmän jäseniltä saatujen tietojen mukaan 10 - 45 % hakkuukertymästä. Tyypillinen sahauskelpoisen männyn osuus on ollut järeyden ja laadun perusteella valikoiduissa ensiharvennuksissa 10 - 15 % ja myöhemmissä harvennuksissa 20 - 30 %. Nämä sahapuun hakkuutulokset ovat olleet samalla tasolla tai hieman korkeampia kuin tässä tutkimuksessa. Todennäköisesti runkojen tarkka vikojen kirjaus pystymittauksessa johti tässä tarkempaan ja kriittisempään sahapuun apteeraukseen kuin käytännön puunhankinnassa. Täten sahapuun määrät ja osuudet olivat ilmeisesti varovaisia arvioita sahattavan puun todellisista määristä tutkituissa metsikkötyypeissä. Käytännön sahapuun osuudet lienevät kaikki runkoviat huomioon ottaneen ja kokonaan sivuuttaneen apteerauksen välillä, mutta lähempänä ensin mainittua apteerausvaihtoehtoa.

Sahapuuosuus riippuu käytännössä yleensäkin paljon apteerauksen soveltamisesta. Tämä riippuu usein halutun mittaisen ja laatuisen puun saatavuudesta suhteessa kyseisen ajankohdan puun tarpeeseen ja sahatavaramarkkinoihin. Siksi apteerauksen soveltaminen on sidoksissa myös tuotemarkkinoiden ja eri puutavaralajien hakkuun ja käytön kannattavuuden suhdanne- ja kausivaihteluun. Tästä ristiriidasta voidaan puukaupassa ja puunhankinnassa ainakin periaatteessa päästä eroon runko- tai tukkiosahinnoittelulla, jossa puunostaja voi katkoa rungot haluamallaan tavalla kauppasopimuksen puitteissa.

Kaatokoepuuaineistosta mitattiin metsässä rungon suurimman ulkoisen elävän ja kuolleen oksan sijainti ja kuorellinen läpimitta sekä tuore- ja kuivaoksarajat. Kaatokoepuiden runkopankkiaineistosta määritettiin terveiden, kuivien ja mustien oksien keskimääräiset ja suurimmat kuorettomat läpimitat rungon pinnalla eri korkeuksilla kannolta metsikkötyypeittäin. Mittaustulosten pohjalta tehtiin sisä- ja ulko-oksien välille oksien läpimittoja ja sijaintikorkeuksia kuvaavat regressiomallit. Keskimääräisen ja suurimman oksan läpimittatietoja rungon pinnalla voidaan käyttää hyväksi metsikkötyyppikohtaisesti runkojen apteerauksen ja sitä kautta sahauksen arvosaannon ja rungon ulkoisten ominaisuuksien korrelaatioiden selvittämiseen.

Pikku- ja/tai lyhyttukkien osuudet harvennusleimikon sahapuukertymästä vaikuttavat puunhankinnan logistisen ketjun järjestelyihin sekä sahan toimintoihin. Apteeraussimulaattorilla ns. perusapteerausvaihtoehdossa tuotetun sahapuun tilavuudesta oli kasvupaikkatyypeittäin ensiharvennuksissa pikkutukkia noin 20 - 50 %, lyhyttukkia 20 - 80 %, mutta järeää tukkia (tyvitukki, muu normaalitukki) ei juuri lainkaan ja myöhemmissä harvennuksissa pikkutukkia 20 - 50 %, lyhyttukkia 20 - 60 % ja järeää tukkia enintään 30 %. Lyhyttukkien osuus oli selvästi suurin kivennäismaiden ensiharvennuksissa (60 - 70 %). Pikkutukkien osuus oli puolestaan

suurin sekä kivennäis- että turvemaiden myöhemmissä harvennuksissa. Järeää tukkia saatiin mainittavin määrin vain kivennäismaiden myöhemmissä harvennuksissa, joissa sen osuus sahapuusta oli oletusten vastaisesti sitä suurempi, mitä karumpi oli kasvupaikka.

Sahapuupölkkyjen lukumääräosuuksien perusteella erityisesti lyhyttukkien merkitys on harvennusleimikoissa suurempi kuin tilavuusosuuksien perusteella. Merkitys on suurin ensiharvennuksissa, joissa pikkutukkeja oli 5 - 20 %, lyhyttukkeja 45 - 85 % ja järeitä tukkeja hyvin vähän. Myöhemmissä harvennuksissa pikkutukkeja oli 20 - 50 %, lyhyttukkeja 35 - 50 % ja järeitä tukkeja 5 - 50 %.

Useat sahapuutavaralajit ovat ongelma korjuussa ja kuljetuksessa. Myöskään sahapuutavaralajien ja niiden koko- ja pituusluokkien lajittelu ei ole välttämättä järkevää ennen sahalle toimittamista, jos yksittäisen tavaralajin kertymä on joka tapauksessa pieni. Perusteltua on korjata ja kuljettaa kaikki samalle sahalle menevät tukit yhtenä puutavaralajina ja tehdä vasta sahan tukkilajittelussa puutavaralajien ja pölkkyjen lajittelu.

Sahapuun kertymän kannalta on järkevää keskittyä yhteen pienpuutavaralajiin normaalimittaisen mäntytukin ohella. Käyttämällä apteerauksessa pikkutukkia normaalien puutavaralajien ohella voitiin sahapuun hakkuukertymä kohottaa kahdeksaan prosenttiin (4 m^3/ha) hakkuukertymästä, kun se ilman pikkutukkia oli vain kolme prosenttia. Käyttämällä apteerauksessa lyhyttukkia normaalien puutavaralajien ohella voitiin sahapuun hakkuukertymä kohottaa 14 prosenttiin (6 m^3/ha) kokonaishakkuukertymästä. Luonnollisesti, mitä lyhyempiä tukkipituuksia käytettiin, sitä korkeampia olivat sahapuun kertymät. Alle 2,8 m:n tukkipituuden hakkuukertymää lisäävä vaikutus oli kuitenkin enää vähäinen.

Useiden pikku- tai lyhyttukkipituuksien käyttäminen männikön harvennuksessa on sahapuun kertymän lisäämisen kannalta turhaa, sillä jo yhdellä tai kahdella lyhyellä ja pieniläpimittaisella puutavaralajilla saavutetaan lähes suurin mahdollinen kertymä. Kahdella pikku- tai lyhyttukkipituudella saavutettiin n. 95 % siitä sahapuukertymästä, joka olisi ollut mahdollista saavuttaa käyttämällä kaikkia pikku- tai lyhyttukkipituuksia.

Harvennusmäntyleimikoiden runkojen tilavuudesta on lyhyttukkia eniten rinnankorkeusläpimittaluokissa 13 - 15 cm, pikkutukkia luokissa 15 - 19 cm ja normaalikokoista tukkia luokasta 19 cm ylöspäin. Ns. järeää tyvitukkia on vasta luokasta 23 cm ylöspäin. Tämä korostaa erityisesti myöhemmissä harvennuksissa tarvetta pitää normaalitukki leimikosta korjattavien sahapuutavaralajien mukana.

Sahojen mäntyharvennuspuun hankinta kannattaa kohdistaa vain hyvää metsänhoidollista tasoa oleviin runsaspuustoisiin harvennuskohteisiin, joissa hakkuupoistuma ja samalla myös sahapuun kertymät ovat korkeat. Pienimmän sahattavan tukin latvaläpimitta asettaa vaatimukset poistettavien puiden keskiläpimitalle (ja läpimittajakaumalle). Harvennusleimikoissa päästään parhaaseen mäntysahapuun kertymään kivennäismaiden myöhemmissä harvennuksissa, joissa hehtaarikohtainen kertymä on kuutiometreinä keskimäärin 1,5 - 2-kertainen ensiharvennuksiin verrattuna. Suhteellinen ero on yleensä tätä pienempi.

Turvemaiden harvennusmänniköiden puuston heikompi tekninen laatu, pieni järeys ja pienet hakkuukertymät asettavat ojitettujen turvemaiden kasvavan puuraaka-ainepotentiaalin varaan perustavan sahateollisuuden puunhankintastrategian ky-

seenalaiseksi. Toisaalta turvemaiden puiden oksikkuuslaatu ei näytä poikkeavan olennaisesti kivennäismaiden puista. Sahapuun osuus kertymästä on sekä kivennäis- että turvemailla yleensä sitä suurempi mutta tilavuus kuitenkin sitä pienempi, mitä karumpi on kasvupaikka.

Sahauskelpoisen puun lähes aina vähemmistöön jäävä osuus harvennusleimikoiden hakkuukertymästä merkitsee vastaavasti suurta kuitu- ja/tai energiapuun osuutta. Näiden puutavaralajien alhaisen hinnan ja ajoittaisten menekkivaikeuksien vuoksi niiden kertymän kasvusta tulee helposti rasite pystykauppahankintaa harjoittavalle sahayritykselle. Sahatukin saatavuus toimituspuuna lienee käytännössä välttämätöntä erityisesti pienpuun sahaukseen keskittyvälle sahayritykselle.

Erityisesti ensiharvennuksissa puuston järeys on rungon teknisten vikojen ohella sahapuun saatavuutta rajoittava tekijä. Ensiharvennuskohteissa koko puuston keskimääräinen rinnankorkeusläpimitta oli 13 cm ja myöhemmissä harvennuskohteissa 16 cm, kun lyhyttukkien apteeraus edellyttää vähintään 11 cm:n, pikkutukkien apteeraus 15 cm:n ja normaalitukkien apteeraus 19 cm:n rinnankorkeusläpimittaa.

Tässä tutkimuksessa harvennusmänniköille kehiteltyjen sahauskelpoisen puutavaran kertymän ennustemallien perusteella laskettiin metsiköiden puustotunnusten raja-arvoja, joilla voidaan saavuttaa tiettyjä sahapuun kertymätavoitteita (m^3/ha) (taulukko 23). Sahattavina puutavaralajeina olivat tässä tyvitukki, normaalitukki, pikkutukki ja lyhyttukki. Puuston vähäinenkin keskimääräisen rinnankorkeusläpimitan ja valtapituuden kasvu kohottavat sahapuun kertymää selvästi. Sahapuun vielä varsin lievä kertymävaatimus 5 m^3/ha edellyttää puustolta sekä kivennäis- että turvemailla vähintään 15 cm:n keskiläpimittaa ja 13 m:n keskipituutta. Sahapuun korkea kertymävaatimus 20 m^3/ha edellyttää kivennäismailla jo 18 cm:n keskiläpimittaa ja noin 16 m:n keskipituutta ja turvemailla 16 cm:n keskiläpimittaa ja 15 m:n keskipituutta. Turvemailla tuoreoksarajan ja alimman kuolleen oksan (läpimitta yli 1,0 cm) sijaintikorkeuden kohoaminen sekä teknisesti virheettömien runkojen osuuden nousu kohottavat sahapuun hakkuukertymää huomattavasti enemmän kuin kivennäismailla. Myös metsikön kokonaistilavuuden kasvu merkitsee suhteellisesti suurempaa sahapuun kertymän kasvua turvemailla. Sekä elävät että kuolleet oksat voivat olla turvemailla paksumpia kuin kivennäismailla samalla sahapuun hakkuukertymän tavoitetasolla. Turvemailla tulee puuston kokonaistilavuuden olla suurempi kuin kivennäismailla, jotta saavutetaan sama sahapuun kertymä. Sahapuun hakkuukertymän arviointi on kivennäismailla jonkin verran luotettavampaa kuin turvemailla. Turvemailla puustotunnukset, kuten dimensiot, runkomuoto ja vikojen esiintyminen vaihtelevat kuitenkin enemmän kuin kivennäismailla.

Termit *ensiharvennus* ja *ensimmäinen harvennus* on pidettävä erillään sahapuun hankinnassa. Tästä johtuen esim. metsätaloussuunnitelmat toimenpideehdotuksineen ovat puunostajalle epävarmoja tietolähteitä leimikon puuston laadusta ja odotettavissa olevasta hakkuukertymän puutavaralajirakenteesta. Sahattavien puutavaralajien, etenkin erikoispuutavaralajien kuten pikkutukin tai parrun, kertymää arvioitaessa on suositeltavaa tehdä hakkuukohteella koealamittauksiin perustuva puuston arvio ja mahdollisesti pystypuuston apteeraussimulointi ennen leimikon hakkuuta.

6.2.2 Lyhyttukkitekniikka harvennusmännyn hankinnassa

Harvennusmännyn korjuututkimuksen tarkoituksena oli määrittää hakkuun, lähikuljetuksen ja kaukokuljetuksen tuottavuuden ja kustannusten erot normaaleilla puutavaralajeilla ja ns. lyhyttukkitekniikalla korjuun välillä harvennusmänniköiden todellisissa korjuuolosuhteissa. Samalla saatiin arvokasta tietoa todellisista sahapuun kertymistä ja hakkuutekniikasta, kun puutavaralajina oli normaalia tukkia lyhyempi ja osittain myös läpimitaltaan pienempi puutavaralaji. Korjuukokeet keskitettiin metsänhoidollisesti hyvälaatuisille, kivennäismailla sijaitseville kohteille. Täten monet normaalia korjuutyötä haittaavat tekijät, kuten turvemailla maapohjan heikko kantavuus ja ojaverkosto voitiin poistaa aiheuttamasta hallitsematonta vaihtelua tuloksiin. Maasto oli myös suhteellisen tasaista ja vapaata korjuuta haittavasta alikasvoksesta sekä metsäkuljetusmatkat olivat lyhyitä. Vertailtaessa korjuutekniikoiden tuottavuutta ja kustannuksia kannattaa huomio kiinnittää ennen kaikkea tekniikoiden välisiin suhteellisiin eroihin, jotka ovat likimain samat, vaikka laskelmien lähtöarvot ja/tai koeleimikoiden puustojen rakenne muuttuisivat. Absoluuttiset tuottavuudet ja kustannukset riippuvat erittäin paljon näistä tekijöistä. Kustannusten laskennassa käytetyt koneiden tuntikustannukset perustuivat arvioon ja olivat jonkin verran pienempiä kuin valtakunnallisissa tilastoissa olevat keskimääräiset harvennuspuun korjuun ja kaukokuljetuksen kustannukset.

Lyhyttukin ja normaalitukin läpimittarajat asetettiin koejärjestelyiden takia käytännön hakkuutilanteesta poikkeavalla tavalla, sillä korjuukokeen tarkoituksena oli saada riittävä lyhyttukin kertymä korjuumenetelmien tuottavuus- ja kustannuserojen määrittämiseksi. Normaalissa tilanteessa järeä mäntytukki on sekä puun myyjälle että käyttäjälle arvokkaampaa kuin yleistä tukkipituutta lyhyempi ns. lyhyttukki, mutta tutkimustarkoituksessa runkoja apteerattaessa priorisoitiin lyhyttukki pölkyn latvaläpimittaluokissa 10 - 20 cm. Todellista hakkuutilannetta olisi vastannut paremmin tilanne, jossa lyhyttukin latvaläpimitta-alue olisi asetettu järeän tukin läpimittarajan alapuolelle. Tällöin lyhyttukin vaikutus hakkuukertymään olisi ollut enemmän kuitupuun kuin järeän ja arvokkaan tukin kertymää vähentävä.

Todellisissa hakkuuolosuhteissa lyhyttukin kertymät olivatkin suuremmat kuin pystypuuston inventointitutkimusten perusteella olisi voitu olettaa. Syynä tähän olivat edellä mainittu tukin latvaläpimitan asettelu normaalista poikkeavalla tavalla, mutta myös korjuukohteiden hyvä metsänhoidollinen ja tekninen laatu.

Koneellisen korjuun aikatutkimuksessa pyrittiin löytämään mahdolliset erot ajanmenekissä ja tuottavuudessa normaalein puutavaralajein ja lyhyttukkitekniikalla tehdyn korjuun välillä. Koneellisessa hakkuussa erot runkokohtaisissa ajanmenekeissä olivat pieniä. Myöhemmissä harvennuksissa ajanmenekki oli lähes sama rungon kaadossa, karsinnassa ja katkonnassa, mutta ensiharvennuksissa lyhyttukkitekniikalla hakkuu oli lähes 10 % hitaampaa kuin hakkuu normaalein puutavaralajein. Hakkuun tuottavuuserot johtuivat pääasiassa rungon erilaisista katkaisukohtien lukumääristä, puutavaralajien erilaisista tilavuusosuuksista ja erikokoisista rungoista, sillä hakkuukone valmistaa puutavaraa samassa ajassa enemmän järeästä rungonosasta kuin ohuesta. Tästä johtuivat osittain lyhyttukkitekniikalla hakkuun korkeammat tuottavuudet pienimmissä läpimittaluokissa, joissa vaihtoehtoisena puutavaralajina oli kuitupuu.

Korjuumenetelmien tuottavuusero johtui hakkuussa osittain siitä, että kuljettaja joutui lyhyttukkilohkoilla tarkastelemaan poistettavan rungon laatua tarkemmin kuin normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla. Jotta tukin ehdoton suoruus varmistui, kuljettajan oli katsottava kaadettua runkoa hakkuukoneen kourassa mieluummin etuviistosta tyvestä kohti latvaa sen sijaan, että olisi tarkastellut runkoa tavalliseen tapaan sivulta. Lisäksi useiden puutavaralajien kasaaminen hakkuun yhteydessä omiin muodostelmiinsa ajouran varteen lisäsi ajanmenekkiä. Puutavaran lähikuljetuksessa eri puutavaralajien erotteluvaikeudet olivat pikemminkin lyhyttukin ja kuitupuun kuin lyhyt- ja normaalitukin välillä. Ongelmaa voidaan lieventää, jos hakkuukoneessa on käytettävissä värimerkkaus tai jos lyhyttukkien erottelu voidaan siirtää sahan tukkilajittelun yhteyteen. Vaikeat maasto-olosuhteet, esimerkiksi jyrkkä rinne tai paksu lumipeite, huonontavat edelleen usean puutavaralajien erillään pitämistä. Ruotsalaisen tutkimuksen mukaan yhden puutavaralajin lisäyksestä aiheutunut lajittelun tarve alentaa tuottavuutta hakkuussa yhden prosentin ja lähikuljetuksessa 3 - 4 prosenttia (Brunberg & Arlinger 2001).

Tuottavuuseroon korjuumenetelmien välillä vaikutti ilmeisesti myös se, että ensiharvennuksissa poistettavien runkojen käyttöosat olivat lyhyttukkilohkoilla hakkuukonemittauksen mukaan keskimäärin n. 20 dm^3/runko järeämpiä kuin normaalein puutavaralajein hakatuilla lohkoilla. Myöhemmissä harvennuksissa tilanne oli päinvastainen, sillä normaalien puutavaralajien lohkoilla rungon keskimääräinen käyttöosa oli n. 50 dm^3/runko suurempi kuin lyhyttukkilohkoilla.

Korjuumenetelmien tuottavuuseroista saadaankin edellä esitettyä luotettavampi käsitys tarkastelemalla tasoitetuilla puustotiedoilla laskettuja tuloksia tai ensiharvennuksia ja myöhempiä harvennuksia yhdessä. Tässä hakkuun tuottavuudet ja kustannukset laskettiin myös tasoitetuilla puustotiedoilla painottamalla niitä hakatulla puumäärällä rinnankorkeusläpimitan mukaan normaalein puutavaralajein hakattujen lohkojen perusteella.

Korjuulohkojen välisiin eroihin runkojen käyttöosan tilavuuksissa ja käyttöosan pituuksissa vaikutti osittain se, että lyhyttukkilohkoilla joidenkin runkojen viimeinen pölkky oli usein kuitupuun sijasta lyhyttukki, jonka latvaläpimitta oli tutkimuksessa vähintään 10 cm. Hakkuukoneen rungon muotoa ennustava automatiikka ei olettanut, että rungon latvaosasta saadaan lyhyttukkipölkyn jälkeen enää vähimmäismitat täyttävää kuitupuupölkkyä. Tämän mukaisesti lyhyttukkilohkojen viimeisen pölkyn latvaläpimitta oli keskimäärin 1 - 4 mm suurempi kuin normaaleilla puutavaralajeilla hakattujen lohkojen. Tulos oli samansuuntainen simuloitaessa runkojen katkontaa apteeraussimulaattorilla. Toisaalta rungon maksimaalisesta käyttöosan tilavuudesta tinkiminen johti kuitenkin rungon kokonaisarvon maksimointiin.

Rungon läpimitalla on oleellinen vaikutus hakkuun tuottavuuteen etenkin puulajeittaisessa tarkastelussa. Yksittäistä runkoa tarkasteltaessa esimerkiksi rinnankorkeusläpimitaltaan 15 cm:n männyn hakkuun suhteellinen tuottavuus oli rungon tyviosassa (0 - 2 m) 127 - 162, kun vertailutasona oli rungonosa 3 - 4 m:n korkeudella. Sahauskelpoisen lyhyttukin minimilatvaläpimitan kohdalla hakkuun suhteellinen tuottavuus oli noin 60 ja rungon latvaosissa (9 - 12 m) kuitupuun minimilatvaläpimitan (7 cm) kohdalla enää 30 - 51.

Erot korjuumenetelmien tuottavuudessa johtuvat metsäkuljetuksessa paljolti metsätraktorin kuormatilan kapasiteetin käyttöasteesta. Tässä kokeessa kuormatraktorilla ajettiin pelkästään yhden nipun kuormia, jolloin kuljetuskapasiteetista jäi huomattava osa käyttämättä kuitupuuta ja etenkin lyhyttukkia kuljetettaessa. Kuormatraktorin kuormatilaan liitettävällä jatkoperällä olisi mahdollista kuljettaa kahta lyhyttukkinippua kerralla. Tässä kokeessa tähän ratkaisuun ei kuljettajan suosituksesta kuitenkaan päädytty. Kasvaneesta kuljetuskapasiteetista olisi ollut merkittävää hyötyä ainoastaan pitkillä metsäkuljetusmatkoilla, sillä kahden nipun kuormaus olisi ollut huomattavasti vaikeampaa ja hitaampaa kuin yhden nipun kuormaus. Lisäksi kahden nipun kuljetus vaikeassa maastossa on hidasta ja erityistä varovaisuutta vaativaa. Lyhyttukkia korjattaessa kuormatraktorin kuormatilan pankkojen jako on sovitettava erikseen lyhyille pölkyn pituuksille. Harvennusmetsissä lyhyen puutavaran kuormaus oli sen sijaan huomattavasti helpompaa kuin esimerkiksi pitkän tukkipuun kuormaus. Samalla jäävään puustoon kohdistuvien korjuuvaurioiden riski pieneni pölkkyjä kuormattaessa.

Kaukokuljetuksen tuottavuus- ja kustannustutkimus tehtiin laskennallisesti valmiilla ohjelmistolla resurssipulan vuoksi. Kuljetusmuotona käytettiin yksinomaan autokuljetusta, sillä puutavara-autoilla ajetaan suoraan käyttöpaikalle 79 % puumäärästä. Korjuumenetelmien tuottavuuserot aiheutuivat autokuljetuksessa pidemmästä kuormausajasta ja ajoneuvon kuljetuskapasiteetin vajaakäytöstä lyhyitä puutavaralajeja kuljetettaessa. Puutavaralajin pituus vaikutti lähes lineaarisesti kuormauksen tuottavuuteen. Puutavara-auton kuljetuskapasiteetin täysimääräinen hyödyntäminen riippui kuljetettavien puutavaranippujen pituudesta ja niiden sopivuudesta kuormatilaan. Kustannuksia laskettaessa kuorman koko pyrittiin vakioimaan kaikilla kuljetettavien puutavaralajien yhdistelmillä. Jos puutavaralajien kuormien koot poikkesivat merkittävästi toisistaan, vaikutus kustannuksiin oli sitä suurempi, mitä pitempi oli kuljetusmatka. Kun tässä tutkimuksessa kuormakoko pidettiin eri puutavaralajeilla lähes vakiona, kuljetusmatkan vaikutus kustannusten eroihin oli varsin vähäinen.

Harvennusmännyn hankintakustannuksia laskettaessa ei otettu huomioon ns. ylimääräisten puutavaralajien hankinnasta aiheutuvia työnjohtokustannuksia tai muita epäsuoria kustannuksia. Salon ja Uusitalon (2001) tutkimuksessa työnjohtokustannusten osuus oli 12 % ensiharvennusten mäntypuutavaran ja 2 % päätehakkuiden mäntypuutavaran tehdashinnasta. Muita epäsuoria kustannuksia kaukokuljetuksessa voi aiheutua ylimääräisten puutavaralajien lajittelusta ja niiden aiheuttamista muutoksista puutavara-autojen ajoreiteissä ja kuormausasteissa. Ylimääräisten puutavaralajien hankinnasta aiheutuvien lisäkustannusten kohdistaminen eri puutavaralajeille voi olla käytännössä ongelmallista: rasittavatko lisäkustannukset vain ao. ylimääräistä puutavaralajia vai tasataanko kustannuksia eri puutavaralajien kesken.

Eri puutavaralajien tehdashinnat laskettiin korjututkimuksessa empiirisesti määritettyjen hakkuu- ja metsäkuljetuskustannusten ja simuloitujen kaukokuljetuskustannusten sekä puutavaralajien keskimääräisten kantohintojen perusteella. Tuloksia on pidettävä tutkimuksen kaikkien edellä esitettyjen rajoitusten vuoksi lähinnä suuntaa antavina. Puutavaran tehdashinta oli ensiharvennuksissa lyhyttukkilohkoilla 1,51 €/m^3 (5 %) korkeampi kuin normaalein puutavaralajein hakatuilla

lohkoilla. Myöhemmissä harvennuksissa lyhyttukkilohkojen puutavara oli tehtaalla 3,03 €/m^3 (8 %) halvempaa kuin normaalein puutavaralajein hakattujen lohkojen puutavara, mikä johtui keskimäärin 4,54 €/m^3 pienemmästä kantohinnasta lyhyttukkitekniikalla hakatuilla lohkoilla. Tästä syystä lyhyttukkilohkojen puutavara oli tehtaalla myös ensiharvennusten ja myöhempien harvennusten keskiarvona 1,85 €/m^3 (6 %) halvempaa kuin normaalein puutavaralajein hakattujen lohkojen puutavara.

Tässä tutkimuksessa lasketut harvennusmännyn tehdashinnat olivat verraten alhaisia. Ero oli varsin huomattava Salon ja Uusitalon (2001) pohjoiskarjalaisen ensiharvennusmännyn kustannusrakennetta koskeneeseen tutkimukseen verrattuna, jossa ensiharvennusmännyn keskimääräiseksi tehdashinnaksi saatiin kuivahkon kankaan männiköissä 43,90 - 48,60 €/m^3. Tehdashinnasta oli kantohinnan osuus 51 %, työnjohdon osuus 11 %, hakkuun osuus 17 %, metsäkuljetuksen osuus 9 % ja kaukokuljetuksen osuus 14 %. Päätehakkuumännyn keskimääräiseksi tehdashinnaksi saatiin vastaavasti 52,81 - 55,17 €/m^3. Tutkimuksessa käytetyt puutavaralajit olivat mäntytukki ja mäntykuitupuu normaaleilla mitoilla.

Käytännössä sahapuun tehdashinta vaihtelee huomattavasti sahayritysten välillä mm. kantohinnoista (myös pikkutukki), maantieteellisestä alueesta, hankintatavasta, vuodesta ja vuodenajasta riippuen. Eri tietolähteiden mukaan mäntypikkutukin tehdashinta olisi ollut hankinnan yleiskustannukset mukaan lukien tyypillisesti 42 - 50 €/m^3 loppuvuonna 2003. Eräässä Metlan julkaisemattomassa tutkimuksessa pk-sahayritysten mäntypikkutukin tehdashinta vaihteli ilman hankinnan yleiskuluja yrityksestä riippuen välillä 32,0 - 43,7 €/m^3 vuonna 2000. Tämän tutkimuksen tulokset olivat lähellä tämän vaihteluvälin alarajaa.

Valideja vertailuja aikaisempiin tuottavuus- tai kustannustutkimuksiin voidaan tehdä vain normaalien puutavaralajien osalta. Lyhyiden puutavaralajien korjuun tutkimuksia on tehty viimeksi 1980-luvulla, kun kuitupuulla sallittiin kahden ja kolmen metrin määräpituudet. Uusimpia tutkimuksia edustaa Ryynäsen ja Rönkön (2001) harvennusharvesteritutkimus. Harvennusharvestereiden käyttötuntituottavuudeksi mitattiin tässä ensiharvennuksissa 5,6 - 10,3 m^3/h (rungon koko 50 - 100 dm^3) ja toisessa harvennuksessa 9,1 - 12,7 m^3/h (rungon koko 100 - 150 dm^3). Tutkimuksessa käytettiin hakkuun tuottavuuksien laskennassa Metsäteho Oy:n päivittämää kerrointa tehoajan muuntamiseksi käyttöajaksi (uusi kerroin 1,393, tässä tutkimuksessa 1,527). Päivitetyn kertoimen käyttö nostaa hakkuun käyttötuntituottavuutta noin 1 m^3/h. Ryynäsen ja Rönkön (2001) tutkimuksessa havaittiin jopa 40 prosentin tuottavuuseroja saman koneen eri kuljettajien välillä. Järeiden harvennusharvestereiden kustannukset olivat ensiharvennuksessa 12,11 - 6,39 €/m^3 ja toisessa harvennuksessa 7,23 - 5,04 €/m^3. Rungon käyttöosan tilavuudet 50 - 100 dm^3 ja 100 - 150 dm^3 vastasivat rinnankorkeusläpimittaluokkia 11 - 15 cm ja 15 - 17 cm.

Koneyrittäjien liitto ry:n jäsenille vuosina 2001 - 2002 tehdyn kyselyn mukaan korjuun (hakkuu ja lähikuljetus 150 m:n kuljetusmatkalla) kustannustaso oli harvennuksissa 70 dm^3:n rungon koolla 14,43 €/m^3, 100 dm^3:n rungon koolla 11,74 €/m^3 ja 200 dm^3:n rungon koolla 8,85 €/m^3. Hintatasoissa oli alueellista vaihtelua (Jaakkola 2002).

6.2.3 Harvennusmännyn sahauksen kannattavuus

Harvennusmännyn sahauksen tilavuus-, laatu- ja arvosaantojen simulointitutkimukset tehtiin tätä tutkimusta varten kerätystä 200 kaatokoepuun runkopankkiaineistosta. Simuloinnit tehtiin tukkien sahatavarasaannon kannalta kattavilla sahatavara- ja aihioasetteilla, joilla tuotetaan mm. liimalevyn, ikkunoiden ja ovien raaka-ainetta. Tutkimuksessa kaatokoepuista simuloitiin Pohjoismainen sahatavara -laatulajitteluoppaan mukaisia laatusaantoja ja terveoksaista erikoislaatua sekä sydäntavara- että lauta-asetesarjoilla. Harvennuspuista luodusta runkopankkiaineistosta ei ole aikaisemmin julkaistu simuloituja laatu- tai arvosaantotuloksia eikä käytännön sahauksessa saatuja laatusaantoja. Simuloinnin tulokset ovat luonnollisesti suuntaa-antavia, sillä samankaan leimikkotyypin rungot eivät ole yksittäisissä leimikoissa samanlaisia. Simulointien laatusaantojen oikeellisuus voitaneen osoittaa vasta tutkimuksessa saatujen laatusaantojen ja tuotantoon käytettyjen leimikoiden laatukuvan perusteella.

Tukkien sahauksen simuloinnissa sahatavaran ja aihioiden tilavuus-, laatu- ja arvosaanto ovat säännöllisesti korkeammat kuin todellisista rungoista sahattaessa. Tässä tutkimuksessa käytetyllä simulointiohjelmalla oli mahdollista käyräsahata tukit optimaalisesti. Mikäli käyräsahaus ei ole käytännön tilanteessa mahdollista käytettävissä olevilla sahakoneilla, sahatavaran saanto on pienempi ja laatusaanto myös erilainen. Käyräsahauksella on mahdollista kohottaa saantoa havupuun sahauksessa huomattavasti verrattuna pölkyn pituusakselin suuntaiseen sahaukseen (esim. Curve sawing ... 1998, Boren 2000, Fröblom 2001). Käyräsahauksella on joka tapauksessa haitallisia vaikutuksia saheen pysymiseen suorana kuivauksessa, joka on käytännön kokemusten mukaan muutenkin ongelma nuoren harvennuspuun mekaanisessa jalostuksessa. Sahalaitteet, käytettävät tukin pituudet ja valmistettavat tuotteet ja siten myös runkomuotovikojen aiheuttamat haitat vaihtelevat myös sahakohtaisesti.

Sahauskustannusten, tukin ja tuotteiden hintojen lähtöarvot vaikuttavat olennaisesti simulointituloksiin, mm. kannattavan sahauksen edellyttämiin tukin latvaläpimittoihin ja pituuksiin. Tätä ongelmaa lähestyttiin tutkimuksessa vertailemalla lähtöarvojen muutosten vaikutuksia sahaustulokseen herkkyysanalyyttisesti vaihtoehtoisilla hinta- ja kustannustasoilla. Vertaillut vaihtoehdot olivat sahauskustannuksilla perustaso sekä -10 % ja +10 % perustasosta, tukin tehdashinnalla perustaso sekä -20 % ja +20 % perustasosta ja tuotteiden keskihinnalla perustaso ja -10 % ja +10 % perustasosta.

Sahauksen arvosaanto oli Metlan apteeraussimulaattorilla katkotuilla tukeilla ja lyhytukkitekniikan analysoimiseksi tehdyissä laskelmissa keskimäärin samalla tasolla. Ensin mainitut laskelmat osoittavat parhaiten sahauksen kannattavuuden tason kussakin tarkastellussa puutavaralajistrategiassa ja sahatavara-/aihiotuotantomallissa. Vastaavasti lyhyttukkitekniikan mahdollisuuksia koskeneet vaihtoehtotarkastelut osoittavat luotettavasti vain suhteellisia eroja tarkasteltujen tukkipituuksien ja minimiläpimittojen välillä, laskennassa käytettyjen lähtöarvojen puitteissa. VTT:n simulaattorilla katkottujen tukkien arvosaanto oli saman suuruinen kuin Metlan simulaattorilla katkottujen tukkien arvosaanto tukin pituisia tuotteita sahattaessa 3,4 metrin ja moduulipituisia tuotteita sahattaessa 2,8 metrin tuk-

kipituuksilla. Näitä lyhyemmillä tukeilla VTT:n simuloimien tukkien arvosaanto oli huomattavasti korkeampi kuin Metlan apteeraussimulaattorilla tuotettujen tukkien tuottama arvosaanto. Tulokset osoittivat, että teknisen laadun huomioon ottaminen on tärkeää myös harvennusmäntyrunkojen apteerauksessa, järeiden mäntyrunkojen tavoin. Voidaan myös yleistää, että sivutuotteiden, lähinnä hakkeen hyvityshinnan kasvaessa kannattavan sahauksen edellyttämä rajalatvaläpimitta alenee. Teoreettisesti tarkasteltuna tukin, hakkeen ja tuotteiden hinnan muutosten vaikutukset sahauksen tulokseen ovat lähinnä seuraavat:

- mitä korkeampi on tukeista saatavien tuotteiden keskihinta ja mitä matalampi on tukin tehdashinta, sitä pienempien tukkien sahaus on kannattavaa
- positiivisen sahaustuloksen tuottava rajalatvaläpimitta on sitä pienempi, mitä pitempiä saman latvaläpimittaluokan tukkeja sahataan
- verraten korkealla tuotteiden keskihinnalla (185 €/m^3) kannattavan sahatavaratuotannon sallima tukin tehdashinnan maksimi on 2,2 m:n tukeilla 25 €/m^3, 2,8, 3,4 ja 4,0 m:n tukeilla 33 €/m^3 ja 4,6 m:n tukeilla 42 €/m^3, kun tukin minimilatvaläpimitta on 140 mm, hakkeen hinta on 33 €/m^3; tuotteiden keskihinnalla 151 €/m^3 tehdashinnan maksimi on 4,6 m:n tukeilla sama kuin edellä, mutta muilla tukkipituuksilla ja valittavissa olevilla tukin tehdashinnoilla ei ole mahdollista päästä kannattavaan tuotantoon tällä tukin minimiläpimitalla
- tukkien tehdashinnan maksimit ovat aihiotuotannossa samat kuin sahatavaratuotannossa.

Metlan apteeraussimulaattorilla tuotettuihin tukkeihin perustuneissa empiirisissä tarkasteluissa tukin käyttösuhde oli lauta-asetteilla hyvin pieni, tukin pituisia saheita valmistettaessa keskimäärin 2,0 ja moduulipituisia saheita valmistettaessa 2,2, mutta sydäntavara-asetteilla vastaavasti suuri, 2,9 ja 3,0. Keskimääräiset sahatavaran saannot eri tukkiluokissa olivat moduulipituuksia tuotteita valmistettaessa lauta-asetteilla 6 prosenttiyksikköä ja sydäntavara-asetteilla 3 prosenttiyksikköä pienempiä kuin tukin pituisia tuotteita valmistettaessa. Sahatavaran pituus ja laatuluokka huomioon ottaen aiheutti tasaus luonnollisesti saannon alenemisen moduulipituista tavaraa valmistettaessa. Lauta-asetteilla saanto oli luonnollisista syistä noin 15 prosenttiyksikköä korkeampi kuin sydäntavara-asetteilla.

Hyvien laatuluokkien eli terveoksaisen, A-luokan ja B-luokan yhteisosuus oli lauta-asetteilla moduulipituuksia valmistettaessa 67 % ja tukin pituuksia valmistettaessa 43 %, sydäntavara-asetteilla vastaavasti 94 % ja 80 %. Tavoitellun terveoksaisen laatuluokan osuus aineiston saheista oli kohtuullisen suuri. Sekin oli säännöllisesti sydäntavara-asetteilla suurempi kuin lauta-asetteilla, ja moduulipituisia saheita tehtäessä suurempi kuin tukin pituisia saheita tehtäessä. Sahat myyvät yleensä terveoksaisena laatuluokkia A ja B, joista on myyjän ja ostajan välisin sopimuksin lajiteltu erilleen osa mustaoksaisesta laadusta. Näin määritellyn terveoksaisen laatuluokan osuus oli lauta-asetteilla moduulipituuksia valmistettaessa 52 % ja tukin pituuksia valmistettaessa 36 %, sydäntavara-asetteilla vastaavasti 81 % ja 55 %.

Tässä tutkimuksessa saatiin A-laatuluokan osuuden perusteella pääteltynä heikompaa sahatavaraa kuin Jouhiahon ja Uusitalon (2001) harvennusmännyn sahaus-

tutkimuksessa. Tässä sahaustapa vastasi tämän tutkimuksen sahausta tukin pituuksiin sydäntavara-asetteilla. A-laatuluokan osuus oli noin 55 %, kun vastaava osuus oli tässä tutkimuksessa 34 %. Kun tähän lasketaan terveoksaisen laadun osuus (20 %) päädytään osapuilleen samaan saantoon.

Harvennusmännyn sahaus osoittautui perushinnoilla ja -kustannuksilla lauta-asetteilla kannattavaksi 120 mm:n kuorettomasta latvaläpimittaluokasta ylöspäin moduulipituista ja 140 mm:n latvaläpimittaluokasta ylöspäin tukinpituista sahatavaraa valmistettaessa. Vastaavasti sydäntavara-asetteilla sahaus osoittautui kannattavaksi vasta 140 mm:n latvaläpimittaluokasta ylöspäin moduulipituista sahatavaraa valmistettaessa, mutta tukinpituista sahatavaraa valmistettaessa sahaus ei olisi kannattavaa missään läpimittaluokassa. Tukin latvaläpimitta vaikutti lauta-asetteilla hieman enemmän sahauksen tulokseen kuin sydäntavara-asetteilla.

Moduulipituista sahatavaraa valmistettaessa sahauskustannusten lasku 10 prosentilla, tukin tehdashinnan lasku 20 prosentilla ja tuotteiden keskihinnan nousu 10 prosentilla perustasosta vaikuttivat siten, että positiivisen sahaustuloksen tuottavan tukin kuoreton latvaläpimittaraja laski lauta-asetteilla 10 mm ja sydäntavara-asetteilla 20 mm. Tukin pituisia tuotteita tehtäessä vaikutus oli lauta-asetteilla yhtä suuri kuin moduulipituisia tuotteita tehtäessä, mutta sydäntavara-asetteilla ei edelleenkään päästy positiiviseen tulokseen millään tukin latvaläpimitoilla. Muutosten ollessa päinvastaisiin suuntiin nollatulosta ei ollut mahdollista saavuttaa.

Tukin pituuden vaikutus harvennusmäntysahatavaran laatuluokkajakaumaan on sekä sydäntavara- että lauta-asetteilla huomattavan suuri terveoksaisen laadun mutta myös laatuluokkien A, B ja D osalta. Runkopankkiaineiston tarkastelussa terveoksaisen laadun osuus pieneni molemmilla asetesarjoilla noin 13 prosenttiyksikköä, kun tukkipituus kasvoi 2,2 m:stä 4,6 m:iin. Myös A-laadun osuus pieneni, sydäntavara-asetteilla 23 prosenttiyksikköä ja lauta-asetteilla 12 prosenttiyksikköä. Huonoimpien laatuluokkien osuudet vastaavasti kasvoivat. Myyjän ja ostajan välisin sopimuksin yleensä laatuluokista A ja B erilleen lajiteltavan terveoksaisen laadun osuus oli lauta-asetteilla 42 % ja sydäntavara-asetteilla 74 %, kun tukin pituus oli 2,2 m, ja vastaavasti 21 % ja 41 %, kun tukin pituus oli 4,6 m. Sahatavaran saanto oli 2,2 m:n tukeilla keskimäärin 4 % korkeampi kuin 4,6 m:n tukeilla.

Tukin latvaläpimitta vaikuttaa huomattavasti enemmän sahauskustannuksiin kuin tukin pituus. Pienimmässä tutkitussa eli 80 mm:n latvaläpimittaluokassa sahauskustannukset olivat noin 2,6-kertaiset verrattuna 190 mm:n latvaläpimittaluokkaan. Tukin pituuden vaikutus oli sitä suurempi, mitä pieniläpimittaisempia tukit olivat. Erot tulivat merkittävässä määrin esille vasta alle 140 mm:n läpimittaluokassa eli varsinaisilla pikkutukeilla.

Tukin pituuden vaikutus arvosaantoon on huomattava. Arvosaanto oli 2,2 m:n tukkipituuksilla sydäntavara-asetteilla lähes 17 €/tukki-m^3 ja lauta-asetteilla noin 14 €/tukki-m^3 korkeampi kuin 4,6 m:n tukkipituuksilla. Lauta-asetteita käytettäessä arvosaanto oli eri tukkipituuksilla keskimäärin 8-10 €/tukki-m^3 korkeampi kuin sydäntavara-asetteita käytettäessä. Lyhyillä tukeilla (2,2 m) suhteellinen tulos oli 18 % heikompi kuin pitkillä tukeilla (4,6 m) latvaläpimittaluokassa 140 mm. Tuotteen perushinnan nousu 10 prosentilla, sahauskustannusten lasku 10 prosentilla ja tukin halpeneminen 20 prosentilla merkitsivät, että positiivisen tuloksen tuottava rajalatväläpimitta laski 20 mm perusarvojen tasoon verrattuna.

Taulukko 32. Lyhyiden tukkien perushinnan suhteellinen jäännösarvo verrattuna 4,6 m:n tukkipituuteen kuorettomassa latvaläpimittaluokassa 140 mm lauta- ja sydäntavara-asetteilla.

Tukin pituus (m)	Jäännösarvon indeksi	
	Lauta-asete	Sydäntavara-asete
2,2	87,1	86,1
2,8	93,6	91,5
3,4	97,6	96,7
4,0	99,2	98,7
4,6	100	100

Taulukossa 32 tukkipituudella 2,2 m tukkikuutiometrin jäännösarvon indeksi oli noin 13 prosenttiyksikköä pienempi kuin tukkipituudella 4,6 m. Olettaen tukin tehdashinnan perustasoksi 4,6 m:n tukeilla 42 €/m^3, merkitsisi tämä noin 5,6 €/m^3 alempaa hintaa lyhyille tukeille. Vastaavasti 100 mm:n latvaläpimittaluokassa tehdashinnan tulisi olla lyhyimmällä tukkipituudella 27 €/m^3 alempi kuin pisimmällä tukkipituudella.

Tukin pituudella on huomattava vaikutus sahauksen tulokseen etenkin pienillä tukin latvaläpimitoilla. Harvennusmetsien rungot ovat suhteellisen lyhyitä ja siten yhdestä rungosta saadaan usein vain yksi kappale 4,0 m:n tai pidempiä tukkeja. Tämän tutkimuksen kaatokoepuista ainoastaan 27 prosentista saatiin apteerauksessa kaksi kappaletta 4,6 m:n tukkeja. Myös pitkien tukkien latvaläpimitat olivat keskimäärin pieniä ja suurimpiin latvaläpimittaluokkiin kertyi tukkeja suhteellisen vähän. Tästä syystä pitkien tukkien sahauksen suhteellinen tulos voi olla käytännössä jopa esitettyä heikompi.

Metsikön puustomittauksen (esim. tuoreoksaraja ja ulkoisen kuolleen oksan suurin koko) ja arvosaannon pohjalta muodostettujen regressiomallien avulla voidaan arvioida suuntaa-antavasti harvennusmäntyleimikoiden arvoa sahan tuotannon kannalta. Arvosaannot laskettiin tukkikohtaisesti eri asetesarjoille kuoretonta tukkitilavuutta kohti. Tämän jälkeen tukkikohtaiset tulokset yhdistettiin runkokohtaisiksi tuloksiksi. Regressiotarkastelussa määritettiin rungon arvosaannon ja metsässä mitattujen ominaisuuksien riippuvuudet. Kokeilluista regressiomalleista valittiin kuvaamaan tukkiaineiston ja siitä sahatun tuotannon arvoa tukkitilavuutta kohti mallit, joissa selittävinä muuttujina olivat rungon kuivaoksaraja ja suurin kuollut oksa. Merkille pantavaa on, että rungon järeystunnukset eivät valikoituneet merkittäviksi selittäjiksi oksikkuustunnuksiin verrattuna tässä harvennusmäntyaineistossa. Päätehakkuumetsiköissä tulokset olisivat olleet päinvastaisia (mm. Kärkkäinen 1980, Uusitalo 1994, 1997).

Metlan apteeraussimulaattorilla katkotuilla tukeilla kuivaoksarajan kohoaminen yhdellä metrillä lisäsi arvosaantoa sydäntavara-asetteilla moduulipituisia ja tukin pituisia tuotteita tehtäessä 1,2 €/tukki-m^3. Vastaavasti ulkoisesti kuolleen oksan läpimitan kasvu 10 mm:llä pienensi arvosaantoa moduulipituisia tuotteita tehtäessä 8,2 €/tukki-m^3 ja tukin pituisia tuotteita tehtäessä 9,6 €/tukki-m^3. Lauta-asetteilla kuivaoksarajan kohoaminen yhdellä metrillä lisäsi arvosaantoa moduulipituisia ja tukin pituisia tuotteita tehtäessä 2,5 €/tukki-m^3. Vastaavasti ulkoisen kuolleen oksan läpimitan kasvu 10 mm:llä pienensi arvosaantoa moduulipituisia tuotteita tehtäessä 9,4 €/tukki-m^3 ja tukinpituisia tuotteita tehtäessä 11,1 €/tukki-m^3.

VTT:n sahaussimulaattorilla kussakin tarkasteltavassa tapauksessa systemaattisesti yhteen määräpituuteen katkottujen tukkien sahauksen arvosaannon perustaso on säännönmukaisesti sitä korkeampi, mitä lyhempää tukkipituutta käytetään. Rungon kuivaoksarajan kohoaminen yhdellä metrillä aiheutti arvosaannon kasvun tukin pituudesta riippuen sydäntavara-asetteilla 1,2 - 1,8 €/tukki-m^3 ja lauta-asetteilla 1,5 - 2,4 €/tukki-m^3. Kuivaoksarajan kohoamisen myötä arvosaanto kasvaa sitä enemmän, mitä pitempää tukkipituutta käytetään (4,3 m:n pituuteen saakka). Rungon suurimman kuolleen oksan läpimitan kasvu 10 mm:llä pienensi arvosaantoa tukin pituudesta riippuen sydäntavara-asetteilla 4,5-6,2 €/tukki-m^3 ja lauta-asetteilla 5,6 - 8,4 €/tukki-m^3. Oksan läpimitan suurenemisesta seurannut arvosaannon lievä pieneneminen oli sitä suurempi, mitä pitempää tukkipituutta käytettiin (4,3 m:n pituuteen saakka).

Tulokset sahatavaran saannosta ja laadusta olivat tässä tutkimuksessa varsin hyviä aiempiin käsityksiin verrattuna, kun simuloitiin runkojen dimensioiden ja ulkoisen laadun perusteella Metlan apteeraussimulaattorilla tuotettuja tukkeja. Saanto ja laatu olivat jopa paremmat kuin Karstulanseudun Kehitysyhtiö Oy:n toisten harvennusten mäntytukkeja (Vesterinen 1996) ja lähes samalla tasolla kuin Fröblomin (2000) ensiharvennusten mäntytukkeja koskeneissa suppeahkoissa tutkimuksissa vertailtaessa osapuilleen samoja tukin pituus- ja läpimittaluokkia.

Tukin vertailukelpoisissa latvaläpimittaluokissa sahauksen arvosaanto oli aihioiden mitta- ja laatuvaatimusten mukaan sahattaessa hieman parempi kuin pelkän sahatavaran vaatimusten mukaan sahattaessa, ja ero kasvoi tuotteen hintatason kohotessa. Tämän mukaisesti myös kannattavan sahauksen rajaläpimitat olivat aihioiden mukaan sahattaessa hieman alhaisemmat. Sekä elementtitukkeihin että rungon ulkoiset laaturajoitteet huomioon ottaneella apteerauksella tuotettuihin tukkeihin perustuneet rajalatvaläpimitat olivat kaikissa tapauksissa korkeammat kuin Fröblomin (2000) aiemmassa tutkimuksessa.

6.2.4 Harvennusmänty osana puutuoteteollisuuden raaka-aine- ja tuotepohjaa

Harvennusmännyn käytölle sahauksessa on vahvat perusteet niissä maakunnissa, joissa järeästä tukista on kova kilpailu tai tukkipuuston hakkuumahdollisuudet esim. metsien käyttörajoitteista tai suojelupäätöksistä johtuen eivät riitä tyydyttämään sahojen järeän tukin tarvetta. Toisaalta harvennusmänniköt tarjoavat runsaan mahdollisuuden laajentaa raaka-ainepohjaa jo nyt ja etenkin keskipitkällä aikavälillä nimenomaan pieniläpimittaiseen puustoon. Samanaikaisesti sahojen teknologia on kehittynyt voimakkaasti ja tarjoaa tekniset mahdollisuudet riittävän nopealle ja kustannustehokkaalle pienpuun sahaukselle ja asiakaslähtöiselle keinokuivaukselle sekä sahatavaran jatkojalostukselle.

Harvennusmännyn sahauksen kannattavuus on sitä parempi, mitä tarkemmin ao. sahatavaran loppukäyttö, varsinkin jatkojalostus tunnetaan ja näiden vaatimukset voidaan ottaa huomioon sahausasetteiden valinnassa. Tällöin asetteiden ja sahatavaradimensioiden lukumäärä luonnollisesti kasvaa. Tällä voi olla haitallisia vaikutuksia kustannuseriin, joita ei tässä tutkimuksessa voitu ottaa huomioon. Joka tapa-

uksessa harvennusmännystä saatavan sahatavaran jatkojalostuspotentiaali, uudet tuotteet ja niiden työstö, liimaus ja pintakäsittely ovat välttämättömiä kehityskohteita harvennusmännyn käytön kannattavuuden parantamiseksi itse sahauksessa.

Pienpuun ja erityisesti lyhyiden tukkipituuksien sahauksella normaalitukkien ja tavallisten tukkipituuksien ohella on monia, luvussa 2.3 mainittuja vaikutuksia sahan kustannuksiin. Nämä johtuvat pääasiassa siitä, että sahan tuotantolinjat on tässä tapauksessa suunniteltu ja mitoitettu normaalitukin läpimittojen ja pituuksien perusteella. Ohuiden ja erityisesti lyhyiden tukkien lisääminen johtaa käytännössä saatujen kokemusten mukaan varsinkin poikittaiskuljettimien kapasiteetin vajaakäyttöön ja tavallista suurempiin tukkiväleihin, eri valmiusasteen tukkien ja saheiden ylimääräiseen puskurivarastointiin ja materiaalivirran niveltämisongelmiin tuotantolinjan osastojen välillä sekä tavallista runsaampiin häiriöihin ja katkoksiin tuotannossa. Yleensä ongelmat kasaantuvat tuotantolinjan loppupäähän.

Yleisesti ottaen pikku- ja lyhyttukkien sahauksen kannattavuutta voidaan parantaa valmistuskustannuksia alentamalla tai tuloja kasvattamalla.

Valmistuskustannusten alentamiseksi

- yksikkökustannusten alentaminen on ensiarvoisen tärkeää
- raaka-aineen hinnan on oltava kohtuullinen suhteessa tuotteen hintaan
- sahaus on automatisoitava mahdollisimman pitkälle
- suurtuotannon edut on otettava huomioon
- valmistusprosessin on oltava logistisesti ja teknisesti yksinkertainen
- sahan suunnittelu on tehtävä pientukkien ehdoilla.

Tulojen kasvattamiseksi

- tukkien käyttösuhdetta on pienennettävä nykyisestä
  - tukkimittaus ja optimointi
  - sahausrako
  - mittojen valvonta
  - käyräsahausmahdollisuus
- laatu- ja arvosaantoa on kasvatettava nykyisestä
- saheista ja sivutuotteista on saatava nykyistä parempi hinta
- tuotantolinjat on suunniteltava tuotteiden mukaan
- tuotantoon on otettava mukaan jatkojalostustuotteita.

Edellä esitetystä voidaan päätellä, että pienten ja lyhyiden tukkien sahaus on sekä logistiikan että kustannusten suhteen kannattavinta omilla, erityisesti niitä varten suunnitelluilla tuotantolinjoillaan. Ilmeisesti tällainen linja on mielekkäin normaalitukkien sahaukseen käytettävän linjan ohessa. Eräissä yhteyksissä on esitetty erityisiä pienpuun katkonta- ja lajitteluasemia, joissa kokorungoista, tukkiosista tai mahdollisesti rangoista katkottaisiin eri jalostustarkoituksiin ohjattavia puutavaralajeja. Julkisia kannattavuustarkasteluja ei ole esitetty. Pesonen ja Kajanus (2001) selvittivät kuitenkin SWOT-analyyseillä pienpuuaseman perustamisen mahdollisuuksia verrattuna tukkisahaan lisättynä kuitupuun sahauksella. Jälkimmäinen vaihtoehto osoittautui tässä paremmin perusteltavaksi.

Tarjoavatko harvennusmänniköt todellisen sahateollisuuden raaka-ainelähteen, tulee jokaisen puunjalostajan analysoida yksilöllisesti omien sahatavaramarkkinoiden, lopputuotteen ominaisuuksien, keskipitkän tai pitkän aikavälin liiketoimintastrategioiden sekä tuotekehitys- ja investointihalukkuutensa ja mahdollisuuksiensa pohjalta. Vaikka pienpuun sahaus on ollut tähän asti sahoille yleensä joko huonosti kannattavaa tai kannattamatonta, käytännön esimerkit osoittavat myös suuria eroja yksittäisten sahayritysten välillä. Suomessa on menestyneitä, normaalikokoisen tukin ohella pienpuuta säännöllisesti sahaavia yrityksiä. Tämä viittaa oppimisprosessin, osaamisen ja kokemuksen suureen merkitykseen sekä puunhankinnan järjestelyissä ja tuotantoteknologiassa että erityisesti tuotteiden asemoinnissa, segmentoinnissa ja differoinnissa sekä markkinointi- ja jakelukanavien valinnassa. Olennaisia kysymyksiä ovat puukaupan, puunhankinnan ja sahapuun tehdastoimitusten organisointi ja vastuut, kuitupuun ja sahauksen sivutuotteiden menekki ja hinta, uusien tuotantotekniikoiden ja automaation käyttöönottaminen, pienidimensioisten ja lyhyiden sahatuotteiden markkinat ja hinta ja jatkojalosteiden kytkeminen omaan tuotantoon ja/tai asiakastoimituksiin.

Pienpuun mekaanisessa hyödyntämisessä on paljon muitakin vaihtoehtoja kuin poikkileikkaukseltaan suorakaiteisten sahatavarakappaleiden valmistus ja niiden jatkokäyttö. Erityisesti pienpuulle on esitetty ja patentoitu monenlaisia uusia sahaus-, sorvaus- ja työstömenetelmiä. Niissä on yhteistä lupaus sahatavaran ja/tai aihioiden määrä- ja arvosaannon huomattavasta kohoamisesta raaka-aineen jalostuksessa. Yksi tunnetuimmista käytännön esimerkistä uusista ratkaisuista pienpuun mekaanisessa jalostuksessa on 1990-luvun loppuvuosina aloitettu erikoisliimapuun valmistaminen ns. LOCKWOOD-menetelmällä, joka on muunnos noin kymmenen vuotta aikaisemmin esitellystä WISA-täyspuulevyn valmistusmenetelmästä (Boren 2000, Ylipuranen 2001). Muita tuotantoasteelle edenneitä esimerkkejä ovat liimahirsiaihioiden (Boren 2000, Ravila 2001) ja puulattiamateriaalien tuotanto (Pajala 2001), teollinen pyöreiden, kartiokkaiden ja päistään tarvittaessa työstettyjen koristepylväiden tuotanto (Boren 2000, Riikilä 2003) sekä teollinen aitatolppien ja puutarha- ja viinitarhakeppien valmistus (Boren 2000, Jaakkola 2003).

Yksi mahdollisuus on sahata liimalevyaihioita ja sorvata aitatolppia samanaikaisesti ja samalla laitteistolla. Erilaisten sektoriaihiomuotojen ja kehäsormiliitosten hyödyntämistä ja tarvittavien koneiden luonnoksia on esitetty kolmioaihioisten ja nelikulmioaihioisten levyjen valmistukseen. Kartiosahaus, jossa ajatuksena on hyödyntää puun poikkileikkauksen ympyrämuotoa, tukin kartiokuutta ja vajaasärmäistä sahatavaraa sahauksessa ja tuotteissa, on myös esitelty pilarituotteiden ja kolmikerroslevyjen valmistukseen. Raaka-aine on kaikissa edellä mainituissa luonnostelmissa 8 - 12 cm:n pienpuu.

Oma mahdollisuutensa pienpuun hyödyntämiseksi puutuotteissa ovat ns. tikkupuuteknologia ja rakenne- eli insinööripuutuotteet (*Engineered Wood Products*, esim. Poutanen 2000, Heräjärvi ym. 2003). Näillä tuotteilla tarkoitetaan puutuotteita, jotka on valmistettu liimaamalla yhteen puulastuja, säleitä, viiluja tai muita pilkottuja puupartikkeleita siten, että tuotteesta on saatu kimmoisuus-, lujuus- ja osin myös kosteuselämisominaisuuksiltaan massiivipuuta tasalaatuisempi. Tunnetuista rakennepuutuotteista voidaan pienpuusta valmistaa ainakin OSB-levyä (*Oriented Strand Board*), LSL-palkkia (*Laminated Strand Lumber*) ja OSL- eli CSL-palkkia

(*Oriented Strand Lumber, Construction Strand Lumber*). Mitään näistä tuotteista ei valmisteta Pohjoismaissa.

Rakennepuutuotteita käytetään tyypillisesti talonrakentamisessa ja ne ovat alunperin pohjoisamerikkalaisia keksintöjä. Valtaosa tuotannosta on edelleenkin USA:ssa ja Kanadassa, mutta tuotanto on levinnyt myös esim. Chileen, Etelä-Afrikkaan, Australiaan ja Uuteen Seelantiin. Länsi-, Keski- ja Itä-Euroopassa valmistetaan vain OSB-levyä, jonka tuotantokapasiteetti on edelleenkin voimakkaassa kasvussa. OSB-levyn valmistusmahdollisuuksia Pohjoismaissa rajoittaa ratkaisevasti massatuoteluonne ja tämän mukaisesti suuri tuotantokapasiteettivaatimus ja verraten pitkät kuljetusmatkat tuotteiden päämarkkinoille. LSL- ja OSL-palkkien ja niiden jatkojalosteiden tuotantomahdollisuudet pienpuusta kuten muustakin pyöreästä puuraaka-aineesta ovat selvästi OSB-levyä otollisemmat. Tähän aihepiiriin on paneuduttu monipuolisesti erityisesti Pohjois-Amerikassa ja aivan viime vuosina myös Suomessa ja Saksassa (ks. Heräjärvi ym. 2003).

Pienpuusta on valmistettu 1950-luvulta lähtien erilaisia lastu- ja kuitulevyjä ja 1980-luvulta lähtien uutena tuotteena MDF-levyä (*Medium Density Fibreboard*) (Heräjärvi ym. 2003). Näiden pääraaka-aineina ovat 1980-luvulta lähtien olleet sahojen ja vaneritehtaiden puujätteet. Voidaan olettaa, että pohjoismaisissa puun saatavuus- ja hintaoloissa näissä tuotteissa ryhdyttäisiin käyttämään uudestaan pienpuuta vain siinä tapauksessa, että puujätteiden saatavuus heikkenisi ja/tai hinta nousisi olennaisesti nykyisestä.

Männiköiden ensiharvennusten osalta ei ole syytä unohtaa myöskään kasvavaa energiapuun käyttöä (esim. Hakkila ym. 1995, Hakkila 1996, Vesisenaho 2003). Tällöin voisi ainakin periaatteessa olla mahdollista yhdistää saha- ja energiapuun hankinta siten, että sahapuukertymän kannalta kiinnostavimpien läpimittaluokkien runkojen normaali-, pikku- ja/tai lyhyttukin mitta- ja laatuvaatimukset täyttävä puu ohjataan sahaukseen ja muiden läpimittaluokkien rungot ja sahattavien puutavaralajien laatuvaatimukset alittavat rungonosat energiantuotantoon. Tämänsuuntaisia kokeiluja on tehtykin 2000-luvulla.

KIRJALLISUUS

Bendtsen, B. A. 1978. Properties of wood from improved and intensively managed trees. Forest Products Journal 28(10): 61 - 72.

Boren, H. 2000. Pienpuun käytön lisääminen mekaanisessa puunjalostusteollisuudessa. Esiselvityksen loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 761. 58 s.

—. 2001. Factors affecting the knottiness, twisting and mechanical properties of pith enclosed round and sawn timber of Scots pine (*Pinus sylvestris*) and Norway spruce (*Picea abies*) from thinnings in Southern Finland. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 807. 164 s.

— & Barnard, G. 2000. Analysis of the strength and stiffness properties for small diameter round Scots pine timber tested in bending and compression parallel to the grain. Tiivistelmä: Analyysi pieniläpimittaisen pyöreän männyn taivutus- ja puristuslujuudesta sekä kimmoisuudesta. Paperi ja Puu – Paper and Timber 82(1): 48 - 56.

Brunberg, T. & Arlinger, J. 2001. Vad kostar det att sortera virket i skogen? Skogforsk Resultat 3. 4 s.

Curve sawing could increase output of Canadian mills.1998. Canadian Forest Industries, November: W1-W2.

Ensiharvennustyöryhmän muistio. 1988. Maa- ja metsätalousministeriö. Työryhmämuistio MMM 1988:27. 57 s.

Fröblom, J. 2000. Pieniläpimittaisen puun hyödyntäminen liimapuuna. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka – Puutuotteiden valmistus – Tutkimus. Internet-sivut http:/www.vtt.fi/rte/mwp/projektit/liimapuu.html.

—. 2001. Pienpuun käyttö jalostuksessa. Julkaisussa: Riekkinen, M., Kärki, T. & Verkasalo, E. (toim.). Pienpuun käytön uudet haasteet. Seminaaripäivän esitelmät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 823. s. 17 - 23.

Hakala, H. 1992. Mäntytukkien sahauksen järeyden mukainen taloudellinen tulos ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Acta Forestalia Fennica 226. 74 s.

Hakkila, P. 1966. Investigations on the basic density of Finnish pine, spruce and birch wood. Lyhennelmä: Tutkimuksia männyn, kuusen ja koivun puuaineen tiheydestä. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 61(5):1 - 98.

—. 1968. Geographical variation of some properties of pine and spruce pulpwood in Finland. Lyhennelmä: Eräitten mänty- ja kuusipaperipuun ominaisuuksien maantieteellinen vaihtelu. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 66(6): 1 - 60.

—. 1996. Ensiharvennuspuun hyödyntäminen. Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja 4/1996. s. 428 - 433.

—, Kalaja, H. & Saranpää, P. 1995. Etelä-Suomen harvennusmänniköt kuitu- ja energialähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 582. 93 s. + liitteet 6 s.

—, Laasasenaho, J. & Oittinen, K. 1972. Korjuuteknisiä oksatietoja. Folia Forestalia 147. 15 s.

—, Saranpää, P., Kalaja, H. & Repola, J. 2002. Suomalainen havukuitupuu. Laadun vaihtelu ja hallinta. Käsikirjoitus. 92 s. Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus.

Haygreen, J. G. & Bowyer, J. L. 1989. Forest Products and Wood Science. Second Edition. Iowa State University. 500 s.

Helinska-Raczkowska, L. 1993. Withdraval resistance of nails from juvenile wood of Scots pine. Sylwan. 137(9): 31 - 36. Referaatti.

Heräjärvi, H., Jouhiaho, A., Tammiruusu, V., Nuutinen, T., Väärä, T. & Verkasalo, E. 2003. Mänty- ja koivupienpuun käyttömahdollisuudet rakennepuutuotteissa (EWP). Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 890. 58 s.

Hynynen, J. 1998. Nuorten metsien harventamattomuuden seuraukset. Julkaisussa: Hänninen, H. (toim.). Puuvarojen käyttömahdollisuudet. Metsäntutkimuslaitos ja Metsälehti kustannus. S. 79 - 85.

Hynönen, T. & Hytönen, J. 1998. Pellosta metsäksi. Pihlaja sarja 1. Metsälehti Kustannus. 152 s.

Hägg, A. 1986. Sågverkens, cellulosa- och pappersindustrins betalningsförmåga för vedförbrukningen. Summary: The capacity of the sawmills and the pulp and paper industry to pay for their raw timber. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för virkeslära. Raport 184:1 - 41.

Jaakkola, H. 2003. Pienpuuta rakennuskäyttöön. Puumies 48(10): 8 - 9.

Jaakkola, S. 2002. Metsäurakoinnin hintataso laskee yhä. Koneyrittäjä 6/2002. s. 33.

Jouhiaho, A. & Uusitalo, J. 2001. Ensiharvennusmännyn oksikkuuslaatu Pohjois-Karjalan alueella. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja 130. 39 s.

Kansallinen metsäohjelma 2010. 1999. Maa- ja metsätalousministeriö. 38 s.

Kellomäki, S., Lämsä, P., Oker-Blom, P. & Uusvaara, O. 1992. Männyn laatukasvatus. Silva Carelica 23. 133 s.

Kuitto, P.-J., Keskinen, S., Lindroos, J., Oijala, T., Rajamäki, J., Räsänen, T. & Terävä, J. 1994. Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. Metsätehon tiedotus 410. 38 s.

Kärkkäinen, M. 1980. Mäntytukkirunkojen laatuluokitus. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 96(5):1-152.

—. 1986. Malli männyn, kuusen ja koivun puuaineen oksaisuudesta. Silva Fennica 20(2) : 107 - 116.

—. 2003. Puutieteen perusteet. Kustannusosakeyhtiö Metsälehti. 451 s.

— & Uusvaara O. 1982. Nuorten mäntyjen laatuun vaikuttavia tekijöitä. Folia Forestalia 515. s. 1 - 28.

Laine, J. & Vasander, H. 1990. Suotyypit. Kirjayhtymä Oy. 80 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. Seloste: Männyn (*Pinus sylvestris L.*) ja kuusen (*Picea abies (L.) Karst.*) sisäoksat ja niiden vaikutus puuaineen tiheyteen. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 95(1): 1 - 34.

Lilleberg, R. 1995. Harvennustapa männikön ensiharvennuksessa. Metsätehon katsaus 3. 7 s.

Lindblad, J. & Verkasalo, E. 2001. Teollisuus- ja kuitupuuhakkeen kuiva-tuoretiheys ja painomittauksen muuntokertoimet. Metsätieteen aikakauskirja – Folia Forestalia 3/2001. s. 411 - 431.

Luonnonläheinen metsänhoito, metsänhoitosuositukset. 1994. Metsäkeskus Tapion julkaisu 6/1994. 72 s.

Lämsä, P., Kellomäki, S. & Väisänen, H. 1990. Nuorten mäntyjen oksikkuuden riippuvuus puuston rakenteesta ja kasvupaikan viljavuudesta. Folia Forestalia 746. 22 s.

McAlister, R. H. & Clark, A. 1992. Shrinkage of juvenile and mature wood of loblolly pine from three locations. Forest Products Journal 42(7/8): 25 - 28.

Metla Metinfo. 2005a. Metsäntutkimuslaitos / MELA-ryhmä, Hakkuumahdollisuudet, 31.10.2000. http://www.metla.fi/metinfo/mela/index.htm.

Metla Metinfo. 2005b. Metsäntutkimuslaitos / Tilastopalvelu, Puun käyttö Suomessa, 31.8.2005. http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/index.htm.

Mäkelä, A., Mäkinen, H., Vanninen, P., Hynynen, J., Kantola, A. & Mielikäinen, K. 2000. Männiköiden tuotoksen ja laadun ennustaminen. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 794. 89 s.

Niemistö, P. 1992. Runkolukuun perustuvat harvennusmallit. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 432. 18 s.

Nurmi, J. 2002. Istutettujen pellonmetsitysmänniköiden ulkoinen laatu Savossa ja Pohjanmaalla. Julkaisussa: Nurmi, J., Verkasalo, E. & Kokko, A. (toim.). Pohjanmaan puunlaatu ja –käyttö. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 861. s. 61 - 67.

Nuutinen, T., Salminen, O. & Hirvelä, H. 2004. Etelä-Suomen yksityismetsien hakkuumahdollisuudet veromuodoittain 2002-2031. Metsätieteen aikakauskirja 4/2004: 461-478.

Paavilainen, L. & Marttila, S. (eds.). 2002. Finnish Forest Cluster Research Programme WOOD WISDOM (1998 - 2001), final report. Report 3. Tekes. 441 s.

Pajala, J. 2001. Pienpuun tuotemahdollisuudet – pienpuusta luonnollista puulattiaa. Julkaisussa: Riekkinen, M., Kärki, T. & Verkasalo, E. (toim.). Pienpuun käytön uudet haasteet. Seminaaripäivän esitelmät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 823. 47 s.

Peltola, A. (toim.). 2001. Metsätilastollinen vuosikirja 2001. SVT Maa-, metsä- ja kalatalous 2001: 52. Metsäntutkimuslaitos. 374 s.

—. 2002. Metsätilastollinen vuosikirja 2002. SVT Maa-, metsä- ja kalatalous 2002: 45. Metsäntutkimuslaitos. 378 s.

—. 2003. Metsätilastollinen vuosikirja 2003. SVT Maa-, metsä- ja kalatalous 2003: 45. Metsäntutkimuslaitos. 388 s.

—. 2004. Metsätilastollinen vuosikirja 2004. SVT Maa-, metsä- ja kalatalous 2004: 45. Metsäntutkimuslaitos. 416 s.

Pesonen, M. & Kajanus, M. 2001. Pienpuun mekaanisen käytön lisääminen Ylä-Savossa – ARVOPUU. Pohjois-Savon ammattikorkeakoulun julkaisuja D3/2001. 33 s.

Pihlajamäki, P. & Asikainen, A. 2002. Distinction between energy wood and industrial wood. Tiivistelmä: Rajanveto aines- ja energiapuun välillä. Julkaisussa: Paavilainen, L. & Marttila, S. (eds.). 2002. Finnish Forest Cluster Research Programme WOOD WISDOM (1998-2001), final report. Report 3. Tekes. s. 384 - 389.

Pohjoismainen sahatavara. Mänty- ja kuusisahatavaran lajitteluohjeet. 1994. Suomen Sahateollisuusmiesten Yhdistys. Gummerus Kirjapaino Oy. 64 s.

Pohjois-Pohjanmaan liitto. 2004. Pohjoisen metsäteollisuuden kehityshaasteet. 228 s.

Poutanen, T. 2000. Puurakentamisen mahdollisuudet. Julkaisussa: Seppälä, R. (toim.). Suomen metsäklusteri tienhaarassa. Tekesin julkaisuja. 138 s.

Ranta-Maunus, A. 1999. Round small diameter timber for constructions. Final report of the project FAIR CT 95-0091. VTT Publications 383. VTT Building Technology. 91 s.

Ravila, R. 2001. Liimahirsiaihioiden valmistus. Julkaisussa: Riekkinen, M., Kärki, T. & Verkasalo, E. (toim.). Pienpuun käytön uudet haasteet. Seminaaripäivän esitelmät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 823. s. 45 - 46.

Riikilä, M. 2003. Uusi saha keventää mäntykuitusumaa – Lounais-Suomen pikkutukit koristepylväiksi Euroopan pihoille. Metsälehti nro 4: 12.

Rikala, J. 2003. Spruce and pine on drained peatlands – wood quality and suitability for the sawmill industry. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 35. 147 s.

Ryynänen, S. & Rönkkö, E. 2001. Harvennusharvestereiden tuottavuus ja kustannukset. Työtehoseuran julkaisuja 381. 67 s.

Salo, E. 2002. Sisäoksat ensiharvennusmännyn runkopuun osana Etelä-Suomessa. Mikkelin ammattikorkeakoulu, metsätalouden koulutusyksikkö. Opinnäytetyö. 52 s. + 2 s. liitteitä.

Salo, T. & Uusitalo, J. 2001. Ensiharvennusmännyn tehdashinnan kustannusrakenne. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja 127. 53 s.

Sauter, U. H., Mutz, R. & Munro, B. D. 1999. Determining juvenile-maturewood transition in Scots pine using latewood density. Wood and Fiber Science 31 (4): 416 - 425.

Senft, J. F., Quanci, M. J. & Bendtsen, B. A. 1986. Property profile of 60-year old Douglas-fir. In: Juvenile wood - What does it mean to forest management and forest products? Forest Research Society, Proceeding 47309.

Shepard, R. K. & Shottafer, J. K. 1992. Specific gravity and mechanical property – age relationships in red pine. Fores Products Journal 42(7/8): 60 - 66.

Spelter, H., Wang, R. & Ince, P. 1996. Economic feasibility of products from inland West small-diameter timber. General Technical Report FPL-GTR-92. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 17 s.

Stöd, R. 2000. Ensiharvennuskuusikoiden ja -männiköiden ulkoinen laatu ja pyöreän rakennuspuun kertymä. Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta. Pro gradu -työ. 67 s.

—. 2002a. Ensiharvennusmänniköiden ja -kuusikoiden teknillinen laatu käytössä pyöreänä rakennuspuuna. Julkaisussa: Nurmi, J., Verkasalo, E. & Kokko, A. (toim.). Pohjanmaan puunlaatu ja –käyttö. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 861. s. 25 - 30.

—. 2002b. Ensiharvennusmänniköiden ja –kuusikoiden teknillinen laatu sahauksessa. Julkaisussa: Riekkinen, M. & Verkasalo, E. (toim.). Itä-Suomen puunlaatu ja -käyttö. Tutkimuspäivä Kuopiossa 23.10.2001. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 855. s. 67 - 72.

—, Tanttu, V., Sirén, M. & Verkasalo, E. 2003. Jäävän puuston ja poistuman teknninen laatu ensiharvennusmänniköissä. Metsätieteen aikakauskirja – Folia Forestalia 4/2003. s. 439 - 464.

—, Wall, T., Kilpeläinen, H. & Verkasalo, E. 2002. Mänty- ja kuusipuustojen teknillinen laatu turvemailla puutuoteteollisuuden kannalta – nykytila ja tulevaisuuden näkymiä. Metsätieteen aikakauskirja – Folia Forestalia 4/2002. s. 624 - 633.

Usenius, A., Halinen, M., Hemmilä, P. & Sommardahl, K. O. 1987. Sahapuurunkojen apteerauksen kehittäminen. VTT Tutkimuksia 491. VTT Puulaboratorio. 116 s. + liitteet 4 s.

Uusitalo, J. 1994. Sahatavaran laadun ennustaminen mäntytukkirungoista. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 3. 53 s.

—. 1997. Pre-harvest measurement of pine stands for sawing productin planning. Acta Forestalia Fennica 259:1-56.

Uusvaara, O. 1981a. Viljelymänniköistä saadun sahatavaran laatu ja arvo. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 27. 107 s.

—. 1981b. Viljelymänniköiden puun tekninen laatu ja arvo. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 28. 47 s.

—. 1991. Havaintoja nuorten istutusmänniköiden oksikkuudesta ja puuaineen laadusta. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 377. 56 s.

—. 1993. Pystykarsituista männiköistä valmistetun sahatavaran laatu ja arvo. Folia Forestalia 816. s. 1 - 26.

—. 1995. Pystykarsittujen viljelymänniköiden oksikkuus, oksien kyljestyminen ja rungon laatu. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 584. s. 1 - 25.

Varhimo, A., Kojola, S., Penttilä, T. & Laiho, R. 2003. Quality and yield of pulpwood in drained peatland forests: pulpwood properties of Scots pine in stands of first commercial thinnings. Silva Fennica 37(3). s. 343 - 357.

Verkasalo, E. 2001. Havupienpuun käytön uudet haasteet. Julkaisussa: Riekkinen, M., Kärki, T. & Verkasalo, E. (toim.). Pienpuun käytön uudet haasteet. Seminaaripäivän esitelmät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 823. s. 7 - 15.

—. 2002. Turvemaiden mänty sahapuuna. Julkaisussa: Nurmi, J., Verkasalo, E. & Kokko, A. (toim.). Pohjanmaan puunlaatu ja -käyttö. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 861. s. 115 - 128.

— & Maltamo, M. 2002. Ojitettujen korpien ja kivennäismaiden kuusitukkirunkojen ja puuaineen laatu- ja arvoerot. Julkaisussa: Saranpää, P. & Verkasalo, E. (toim.). Kuusen laatu ja arvo. Vuosina 1994 - 2001 toteutettujen tutkimusten loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 841. s. 71 - 90.

Vesisenaho, T. 2003. Metsähakkeet. Julkaisussa: Knuuttila, K. (toim.). Puuenergia. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä. s. 37 - 40.

Vesterinen, R. 1996. Harvennusmänniköistäkin hyvää puuta huonekaluihin. Maaseudun tulevaisuus 13.2.1996. s. 12.

Vuokila, Y. 1976. Ensiharvennuskertymä. Folia Forestalia 264. 12 s.

—. 1981. Nuoren männikön kasvureaktio ensiharvennuksen jälkeen. Folia Forestalia 468. 13 s.

Wall, T. 2002. Havupienpuun käytön haasteet ja harvennusmännyn sahaus. Julkaisussa: Riekkinen, M. & Verkasalo, E. (toim.). Itä-Suomen puunlaatu ja -käyttö. Tutkimuspäivä Kuopiossa 23.10.2001. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 855. s. 57 - 65.

Ylipuranen, T. 2001. Pienpuun jalostaminen erikoisliimapuuksi. Julkaisussa: Riekkinen, M., Kärki, T. & Verkasalo, E. (toim.). Pienpuun käytön uudet haasteet. Seminaaripäivän esitelmät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 823. s. 41 - 44.

Yrttiaho, P. 1999. Pieniläpimittaisen puun hyödyntäminen mekaanisessa puunjalostuksessa ja sahauksen kehittäminen. Oulun yliopisto, Kajaanin kehittämiskeskus. REDEC Kajaani, Working Papers 23. 92 s.

Örn, J. 2002. Puunkorjuun ja puutavaran kaukokuljetuksen kustannukset vuonna 2001. Metsäteho 4/2002, tilastoliite. 4 s.

Yhteensä 92 kpl

LIITE 1. Hankekonsortion johtoryhmä.

Organisaatio	Jäsen	Varajäsen
Etelä-Savon TE-keskus	Teknologia-asiantuntija	
	Aki Hakala	
Fin Scan Oy	Toimitusjohtaja	
	Jaakko Riihinen	
Isojoen Saha Oy	Tuotantopäällikkö	Vientipäällikkö
	Esa Hakamäki	Pekka Salmi
Junnikkala Oy	Toimitusjohtaja	Metsäpäällikkö
	Heikki Junnikkala	Heikki Pietikäinen
Kaivospuu Oy	Toimitusjohtaja	
	Jari Suomalainen	
Maa- ja metsätalousministeriö	Metsäneuvos	
	Jouko Paloniemi	
Metla	Professori	
	Erkki Verkasalo (koordinaattori)	
Metsähallitus	Markkinointijohtaja	Korjuupäällikkö
	Martti Siirilä	Markku Eklund
Mikropuu Oy	Toimitusjohtaja	
	Esa Kuvaja	
Ponsse Oyj	Johtaja	
	Tommi Ruha (14.12.2000 asti)	
	Johtaja	
	Ari Särkiniemi (14.12.2000 alkaen)	
PRT-Wood Oy	Toimitusjohtaja	Hankintapäällikkö
	Vesa Heinonen	Reijo Piippo
Pölkky Oy	Metsänhoitaja	Metsäpäällikkö
	Sami Oinas (puheenjohtaja)	Hannu Virranniemi
Synerplan Oy	Toimitusjohtaja	
	Anssi Partanen	
Tekes	Teknologia-asiantuntija	
	Juha Vaajoensuu	
Tukista tuplasti – teknologiaohjelma	Ohjelmapäällikkö	
	Markku Lehtonen	
Veisto Group	Toimitusjohtaja	
	Rauno Suoniemi	
Wood Wisdom	Ohjelmakoordinaattori	
	Leena Paavilainen	
VTT Rakennus- ja yhdyskunta-tekniikka	Erikoistutkija	
	Jorma Fröblom	

LIITE 2. Metsikköinventoinneissa mitatut metsikkö- ja puustotunnukset.

Suure:	**Yksikkö tai luokat:**
Metsikkö eli kuvio	nro
Kasvupaikkaluokka	kivennäismaa, turvemaa
Kasvupaikkatyyppi	lehto, lehtomainen kangas, tuore kangas, kuivahko kangas, kuiva kangas, karukkokangas
Kehitysluokka	ensiharvennus, myöhempi harvennus
Koeala	nro
Koealan pinta-ala	kivennäismailla; ensiharvennukset 50 m^2 ja myöhempi harvennus 200 m^2 ympyräkoealat turvemailla; vähintään 80 m^2 suorakaide
Ikä kasvukairalla	vuotta
Ikä metsätaloussuunnitelmasta	vuotta
Pohjapinta-ala	m^2/ha
Runkoluku	kpl/ha
Koepuun numero ($d_{13} \geq 7{,}0$ cm)	nro
Puulaji	mänty, kuusi, koivu, muu lehtipuu
Turpeen paksuus (turvemailla)	cm
Puun sijainti ojaan nähden (turvemailla)	penkalla, alle 5 m sarkaojan keskeltä, yli 5 m sarkaojan keskeltä
Rinnankorkeusläpimitta (d_{13})	mm
Pituus	dm
Tuoreoksaraja	dm
Alimman kuolleen oksan korkeus ($\varnothing \geq 1{,}0$ cm)	dm
Paksuin elävä oksa	mm
Paksuin kuollut oksa	mm
Vikojen alkamiskorkeus	dm
Vikojen loppumiskorkeus	dm
Ulkoinen oksalaatu	elävä, kuollut
Sahapuun alkamiskorkeus	dm
Sahapuun loppumiskorkeus	dm

Koepuista silmämääräisesti määritetyt runkoviat:

Ei vikaa	Koro
Tyvilenko	Kääpä
Lenko	Tervasroso
Taipunut	Pahka, kyhmy
Mutka	Korjuuvaurio
Tyvimutka	Oksikas
Monivääryys	Poikaoksa
Latva katkennut	Yli 30 mm paksuinen oksa
Poikkeuksellinen tyvilaajentuma	Oksakiehkuroiden väli alle 15 cm
Monilatvainen	Kuiva
Toispuoleinen latvus	Kuoleva
Haara	Kuollut
Laho	

LIITE 3. Inventoitujen männiköiden simuloidussa apteerauksessa käytetyt puutavaralajien pituus- ja läpimittayhdistelmät ja niiden arvosuhteet (arvomatriisit).

Mäntytukki

Pituus (dm) \ Latvaläpimitta (mm)	<150	<160	<170	<180	<190	<200	<210	<220	<230	<240	<250	260+
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	300	300	300	300	300	350	350	350	350	350	350
40	0	300	300	300	300	300	350	350	350	350	350	350
43	0	300	300	300	300	300	350	350	350	350	350	350
46	0	300	300	300	300	300	350	350	350	350	350	350
49	0	300	300	300	300	300	350	350	350	350	350	350
52	0	300	300	300	300	300	400	400	400	400	400	400
55	0	300	300	300	300	300	400	400	400	400	400	400
58	0	300	300	300	300	300	350	350	350	350	350	350
61	0	300	300	300	300	300	350	350	350	350	350	350
64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Mäntytukki, tyvi

Pituus (dm) \ Latvaläpimitta (mm)	<180	<190	<200	<210	<220	<230	<240	<250	260+
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	400	400	400	400	400	400
34	0	0	0	400	400	400	400	400	400
37	0	0	0	400	400	400	400	400	400
40	0	0	0	400	400	400	400	400	400
43	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Mäntypikkutukki

Pituus (dm) \ Latvaläpimitta (mm)	<90	<100	<110	<120	<130	<140	<150	160+
28	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	160	180	180	0
34	0	0	0	0	170	180	180	0
37	0	0	0	0	180	180	180	0
40	0	0	0	0	180	180	180	0
43	0	0	0	0	195	195	195	0
46	0	0	0	0	180	180	180	0
49	0	0	0	0	0	0	0	0

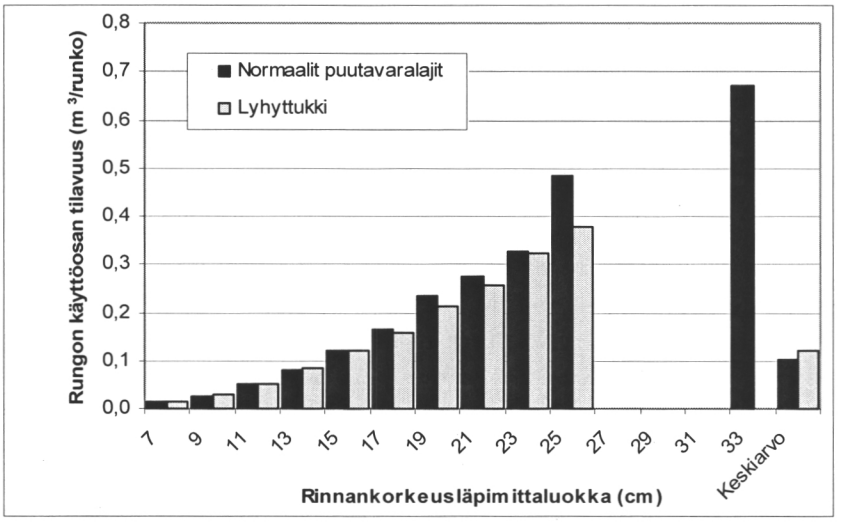
Mäntylyhyttukki

Pituus (dm) \ Latvaläpimitta (mm)	<90	<100	<110	<120	<130	<140	<150	<160	<170	<180	200+
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	125	125	130	130	130	130	130	130	0
28	0	0	130	130	130	130	130	130	130	130	0
31	0	0	140	140	140	140	140	0	0	0	0
34	0	0	140	140	140	140	140	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

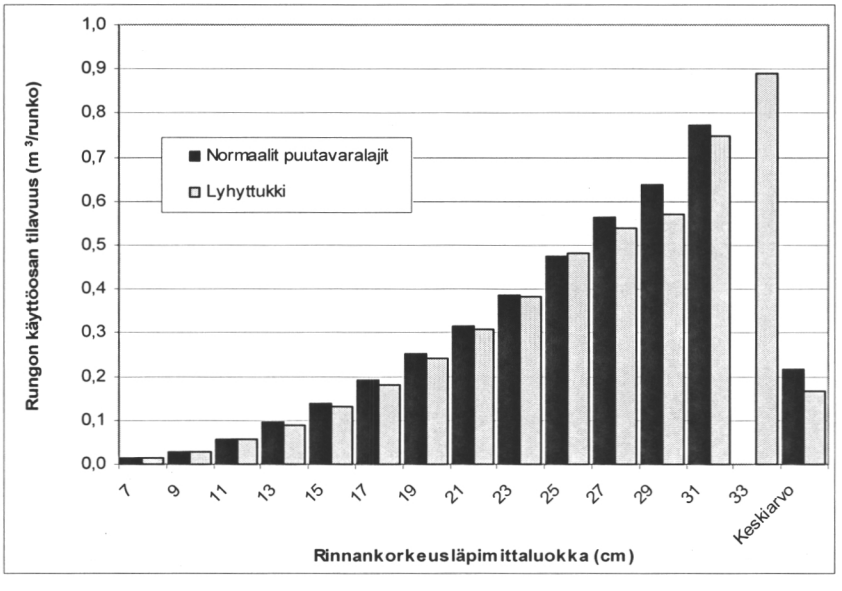
Mäntykuitupuu

Pituus (dm) \ Latvaläpimitta (mm)	<90	<100	<110	<120	<130	<140	<150	<160	<170	<190	210+
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
34	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
37	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
40	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
43	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
46	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
49	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
52	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
55	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

LIITE 4. Korjuututkimuksessa poistettujen runkojen keskimääräinen tilavuus ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa hakkuukonemittauksen mukaan.



Kuva 4.1. Poistettujen puiden tilavuusjakauma ensiharvennuksilla.



Kuva 4.2. Poistettujen puiden tilavuusjakauma myöhemmillä harvennuksilla.

LIITE 5. Kaatokoepuumetsiköiden puustotiedot.

Taulukko 5.1. Kaatokoepuumetsiköiden perustietoja. 5 kaatokoepuuta/metsikkö.

Metsikkö	$D_{1.3}$ (cm)	$D_{6.0}$ (cm)	Rungon 8 cm:n läpimitan sijaintikorkeus (m)	Pituus (m)	Ikä (v)	Oksaraja (m)		Suurimman oksan läpimitta (mm)		Suurimman oksan sijaintikorkeus (m)	
						Tuore	Kuiva	Elävä	Kuollut	Elävä	Kuollut
1	16,2	13,4	9,3	14,0	42,8	6,6	0,6	28,8	22,6	8,2	5,2
2	14,7	10,5	8,2	12,9	43,8	4,9	0,7	29,0	23,6	8,3	4,3
3	14,1	10,5	8,0	12,4	29,8	6,0	0,5	30,6	22,4	8,0	4,4
4	14,0	10,0	7,5	11,7	28,4	5,4	0,4	28,0	28,0	7,1	3,7
5	15,5	12,1	9,8	14,1	32,4	7,1	0,4	27,2	25,8	8,9	5,2
6	13,1	10,2	7,9	12,4	28,2	5,3	0,3	28,0	23,8	7,3	4,7
7	15,0	12,1	10,9	16,0	35,0	9,4	0,5	29,2	26,8	10,4	6,5
8	15,8	12,5	10,0	14,5	65,8	6,3	1,7	31,0	27,8	8,4	5,3
9	15,4	12,1	10,1	14,8	62,8	8,4	1,7	29,6	24,6	8,8	5,0
10	15,4	11,3	9,2	13,6	71,1	7,1	3,5	29,6	22,4	9,1	6,6
11	13,9	9,3	6,6	10,8	63,6	5,2	1,4	33,8	29,6	6,0	4,1
12	14,5	11,3	9,8	14,7	90,0	8,0	5,8	28,0	17,6	10,5	8,0
13	14,7	9,7	7,4	11,8	30,2	4,8	0,5	28,8	25,6	5,8	3,6
14	14,5	11,3	9,1	14,0	76,4	8,1	2,5	30,4	27,4	9,0	6,0
15	16,0	12,2	9,7	13,9	67,8	8,8	3,6	34,0	24,0	10,0	6,8
16	13,7	8,7	6,4	10,9	86,0	5,4	2,5	29,6	29,6	6,1	4,2
17	15,9	12,3	10,0	14,1	91,6	7,7	3,0	33,6	27,0	9,4	6,4
18	16,4	12,2	9,8	13,9	81,2	5,1	2,2	30,8	20,4	8,5	5,0
19	17,5	13,6	10,7	14,6	85,0	6,0	2,3	32,2	25,4	7,5	6,0
20	13,9	9,7	7,3	11,8	67,8	5,6	1,1	24,8	20,6	6,5	4,1
21	13,7	9,0	6,6	11,0	44,4	4,3	0,8	32,8	24,0	4,9	3,5
22	15,3	9,8	9,1	13,3	48,4	6,4	0,8	31,2	22,6	8,8	4,8
23	16,5	12,7	10,2	14,4	74,0	8,0	2,5	28,2	25,2	9,5	6,3
24	18,8	14,0	10,6	14,1	93,6	8,6	2,7	40,2	32,2	9,1	6,0
25	14,6	11,3	9,1	13,1	88,0	8,3	2,6	31,0	21,4	8,4	5,7
26	16,7	12,7	9,9	13,6	99,4	7,6	1,9	30,4	23,0	8,7	6,1
27	16,4	13,2	11,0	14,9	77,4	8,9	4,0	25,6	19,4	11,5	8,0
28	17,2	13,9	11,8	14,0	99,9	8,5	4,3	34,2	24,8	10,7	8,1
29	15,4	12,1	10,0	14,1	95,8	8,8	3,2	26,0	19,4	10,2	6,9
30	15,6	11,5	9,1	13,1	67,4	6,4	0,9	30,4	21,8	7,4	4,6
31	15,8	12,9	9,1	13,4	71,0	6,7	0,8	28,6	22,2	8,0	4,6
32	14,2	10,6	8,1	10,1	65,8	5,7	1,1	34,6	22,8	7,4	4,5
33	13,4	9,8	7,5	11,8	44,2	5,6	1,1	29,0	22,4	6,5	4,3
34	16,1	12,5	10,2	14,8	117,0	8,6	4,7	30,4	22,4	9,1	7,8
35	16,0	12,2	10,0	14,6	103,8	9,0	4,6	29,8	23,8	10,2	7,9
36	14,1	10,4	8,1	12,2	66,6	6,3	1,4	27,4	21,0	7,2	4,2
37	15,0	11,6	9,4	14,1	50,2	6,9	0,9	28,8	23,4	8,9	6,4
38	19,1	15,4	12,8	17,4	85,0	9,3	3,9	31,6	30,0	12,1	8,1
39	17,6	13,9	12,4	17,1	57,6	9,3	1,5	29,8	25,8	10,4	7,0
40	14,6	11,0	8,6	12,9	32,6	6,9	0,3	27,2	23,4	8,1	4,3

LIITE 6. Kaatokoepuiden tukkien sahaussimuloinneissa käytetyt asetesarjat ja mitat.

Taulukko 6.1. Lauta-asetesarja (mm).

Tukki-laatu	Tukki-luokan tunnus	Sydäntavara-asete							Sivulautamalli								
		Pelkan-korkeus	/Exlog	2.Paks	3.Paks	4.Paks	5.Paks	6.Paks	1. Kone			2. Kone vas			2. Kone oik		
									1	2	3	1	2	3	1	2	3
	80-89	63	2	16													
	90-99	75	2	16								19			19		
	100-109	75	2	19								19			19		
	110-119	75	2	25								19			19		
	120-129	100	2	25								19			19		
	130-139	100	2	32								19			19		
	140-149	115	2	32								25			25		
	150-159	125	2	32								25			25		
	160-169	125	2	38								25			25		
	170-179	125	2	44								25			25		
	180-189	150	2	38								19	19		19	19	
	190-215	150	3	32								19	19		19	19	

Taulukko 6.2. Sydäntavara-asetesarja (mm).

Tukki-laatu	Tukki-luokan tunnus	Sydäntavara-asete							Sivulautamalli								
		Pelkan-korkeus	/Exlog	2.Paks	3.Paks	4.Paks	5.Paks	6.Paks	1. Kone			2. Kone vas			2. Kone oik		
									1	2	3	1	2	3	1	2	3
	80-89	63	2	16													
	90-99	63	2	25													
	100-109	63	2	32													
	110-119	75	2	32													
	120-129	75	2	38													
	130-139	100	2	32													
	140-149	100	2	38													
	150-159	100	2	44													
	160-169	100	2	50													
	170-179	125	2	50													
	180-189	125	3	36													
	190-215	125	2	63													

Taulukko 6.3. Sahatavaran mitat (mm).

Leveysmitat		
Nimellis-leveys	Tuoreleveys	
	Sahaus	Särmäys
63	65,3	65,3
75	77,5	77,5
100	103,0	103,0
115	119,2	119,2
125	129,3	129,3
150	154,9	154,9

Syd.tavarapaksuudet	
Nimellis-paksuus	Tuore-paksuus
16	16,7
19	19,9
25	26,0
32	33,3
36	36,0
38	39,6
44	45,8
50	52,0
63	65,3

Lautapaksuudet	
Nimellis-paksuus	Tuore-paksuus
19	19,9
25	26,0

Sahausraot	
1. Kone	-
1. Kone uloin	4,5
2. Kone	4,5
2. Kone uloin	4,5
Särmäys	0,0

Taulukko 6.4. Terveoksaisen sahatavaran, sydäntavaran ja lautojen hinnat Pohjoismainen sahatavara –lajitteluoppaan mukaisella laatulajittelulla sahatavaradimensioittain.

Terveoksaisen sahatavaran hintataulukko (€/m^3).

Paksuus (mm)	Leveys (mm)	A1	A2	A3	A4	B	C	D
19	75	235	235	235	235	151	93	84
19	100	235	235	235	235	151	93	84
19	125	235	235	235	235	151	93	84
19	150	235	235	235	235	151	93	84
25	75	235	235	235	235	151	93	84
25	100	235	235	235	235	151	93	84
25	125	235	235	235	235	151	93	84
25	150	235	235	235	235	151	93	84
16	63	168	168	168	168	168	93	84
16	75	168	168	168	168	168	93	84
19	76	166	166	166	166	166	91	83
25	63	168	168	168	168	168	93	84
25	101	167	167	167	167	167	92	83
32	63	168	168	168	168	168	93	84
32	75	168	168	168	168	168	93	84
32	100	168	168	168	168	168	93	84
32	115	168	168	168	168	168	93	84
36	125	168	168	168	168	168	93	84
38	63	168	168	168	168	168	93	84
38	75	168	168	168	168	168	93	84
38	100	168	168	168	168	168	93	84
44	100	168	168	168	168	168	93	84
44	115	168	168	168	168	168	93	84
50	100	168	168	168	168	168	93	84
50	125	168	168	168	168	168	93	84
50	150	168	168	168	168	168	93	84
63	100	168	168	168	168	168	93	84
63	125	168	168	168	168	168	93	84

Sydäntavaroiden ja lautojen hintataulukko (€/m^3).

Paksuus (mm)	Leveys (mm)	A1	A2	A3	A4	B	C	D
19	75	235	235	235	235	151	93	84
19	100	235	235	235	235	151	93	84
19	125	235	235	235	235	151	93	84
19	150	235	235	235	235	151	93	84
25	75	235	235	235	235	151	93	84
25	100	235	235	235	235	151	93	84
25	125	235	235	235	235	151	93	84
25	150	235	235	235	235	151	93	84
16	63	202	202	202	202	135	93	84
16	75	202	202	202	202	135	93	84
19	76	199	199	199	199	133	91	83
25	63	202	202	202	202	135	93	84
25	101	200	200	200	200	133	92	83
32	63	202	202	202	202	135	93	84
32	75	202	202	202	202	135	93	84
32	100	202	202	202	202	135	93	84
32	115	202	202	202	202	135	93	84
36	125	202	202	202	202	135	93	84
38	63	202	202	202	202	135	93	84
38	75	202	202	202	202	135	93	84
38	100	202	202	202	202	135	93	84
44	100	202	202	202	202	135	93	84
44	115	202	202	202	202	135	93	84
50	100	202	202	202	202	135	93	84
50	125	202	202	202	202	135	93	84
50	150	202	202	202	202	135	93	84
63	100	202	202	202	202	135	93	84
63	125	202	202	202	202	135	93	84

LIITE 7. Sahaussimulointilaskelmien WoodCim® -mallin lähtöarvotiedot.

Taulukko 7.1. Sahauksen simuloinneissa käytetyt lautapaksuudet ja -leveydet.

Lautapaksuus (mm)			Lautaleveys (mm)	
Nimellismitta	Tuoremitta		Nimellismitta	Tuoremitta
	I-kone	II-kone		
19	20,2	20,2	75	77,8
25	26,4	26,4	100	103,5
			125	129,0
			150	155,0

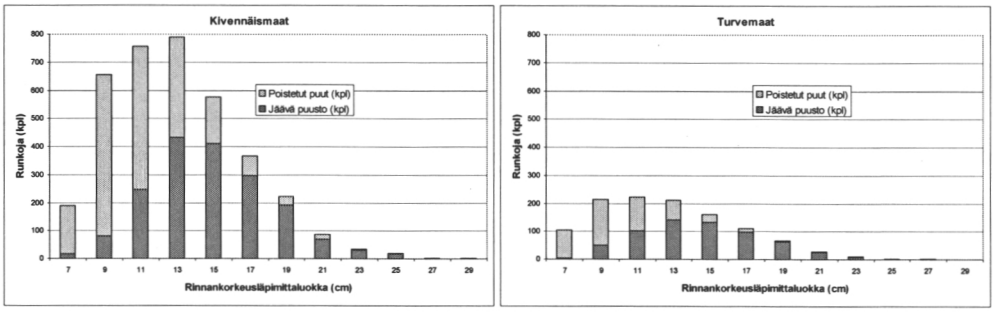
Taulukko 7.2. Sahauksen simuloinneissa käytetyt sydäntavarapaksuudet ja -leveydet.

Sydäntavarapaksuus (mm)		Sydäntavaraleveys (mm)	
Nimellismitta	Tuoremitta	Nimellismitta	Tuoremitta
19	20,2	50	52,5
22	23,3	60	62,6
25	26,4	70	72,6
28	29,5	75	77,6
32	33,6	80	82,6
36	37,6	85	87,7
38	40,0	90	92,8
42	43,3	95	97,9
45	46,5	100	103,0
50	52,5	105	108,1
63	65,8	110	113,2
		115	118,3
		120	123,3
		125	128,5
		130	133,6
		150	154,3
		175	179,0

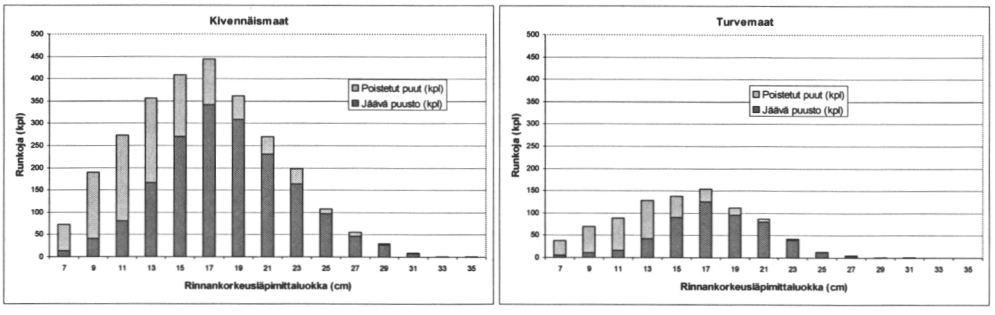
Taulukko 7.3. Sahauksen simuloinneissa käytetyt sivulautamallit.

Sivulautamalli I-kone				Sivulautamalli II-kone			
Malli	Ulommaisin lauta (mm)			Malli	Ulommaisin lauta (mm)		
1	0	0	0	1	0	0	0
2	19	0	0	2	19	0	0
3	25	0	0	3	19	19	0
				4	25	0	0
				5	25	19	0
				6	25	25	0

LIITE 8. Metsiköiden inventointiaineiston koko puuston, harvennuksessa poistetun ja jäävän puuston osan rinnankorkeusläpimittajakaumat.



Kuva 8.1. Ensiharvennusten koko puuston, poistettujen ja jäävien runkojen rinnankorkeusläpimittajakaumat kivennäis- ja turvemailla.



Kuva 8.2. Myöhempien harvennusten koko puuston, poistettujen ja jäävien runkojen rinnankorkeusläpimittajakaumat kivennäis- ja turvemailla.

LIITE 9. Koneellisen hakkuun käyttötuntituottavuuksien suhteelliset erot vertailluilla hakkuutekniikoilla ensiharvennuksissa ja myöhemmissä harvennuksissa korjuulohkoittain ja rinnankorkeusläpimittaluokittain. Tulokset koskevat vain tutkittuja hakkuumenetelmiä, puutavaralajeja ja olosuhteita.

Taulukko 9.1. Koneellisen hakkuun tuottavuuksien suhteelliset erot korjuulohkoittain ja keskimäärin harvennuksilla normaalein puutavaralajein ja lyhyttukkitekniikalla hakkuun välillä.

Rinnankorkeusläpimittaluokka (cm)	Ensiharvennukset	Myöhemmät harvennukset	Harvennukset keskimäärin
		Suhteellinen ero (%)	
7	-8,6	-21,6	-4,0
9	30,5	-7,5	12,5
11	13,7	-7,6	6,3
13	6,3	-11,7	-2,1
15	-9,6	-11,6	-11,3
17	-3,2	-11,4	-9,3
19	-7,2	-13,1	-11,2
21	-18,1	-9,4	-12,1
23	4,6	-5,0	-7,6
25	-32,2	-6,9	-11,4
27		-0,6	-0,6
29		-12,2	-12,2
31		0,9	0,9
33			51,8
Keskiarvo	**15,0**	**-22,7**	**-12,0**

LIITE 10. Metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuus (m^3/h) puutavaralajin ajouranvarsitiheyden, keskikuljetusmatkan ja maastoluokan mukaan. MäT = mäntytukki, MäK = mäntykuitupuu, MäLT = mäntylyhyttukki.

Taulukko 10.1. Metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuus puutavaralajin ajouranvarsitiheyden (m^3/100 m ajouraa) mukaan.

	Käyttötuntituottavuus (m^3/h) Puutavaralajin ajouratiheys (m^3/100 m ajouraa)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MäT	19,7	20,8	21,3	21,6	21,8	22,0	22,1	22,3	22,3	22,4
MäK	13,8	15,1	15,8	16,2	16,5	16,7	16,9	17,1	17,2	17,3
MäLT	10,8	12,3	13,1	13,6	14,0	14,3	14,5	14,7	14,9	15,0

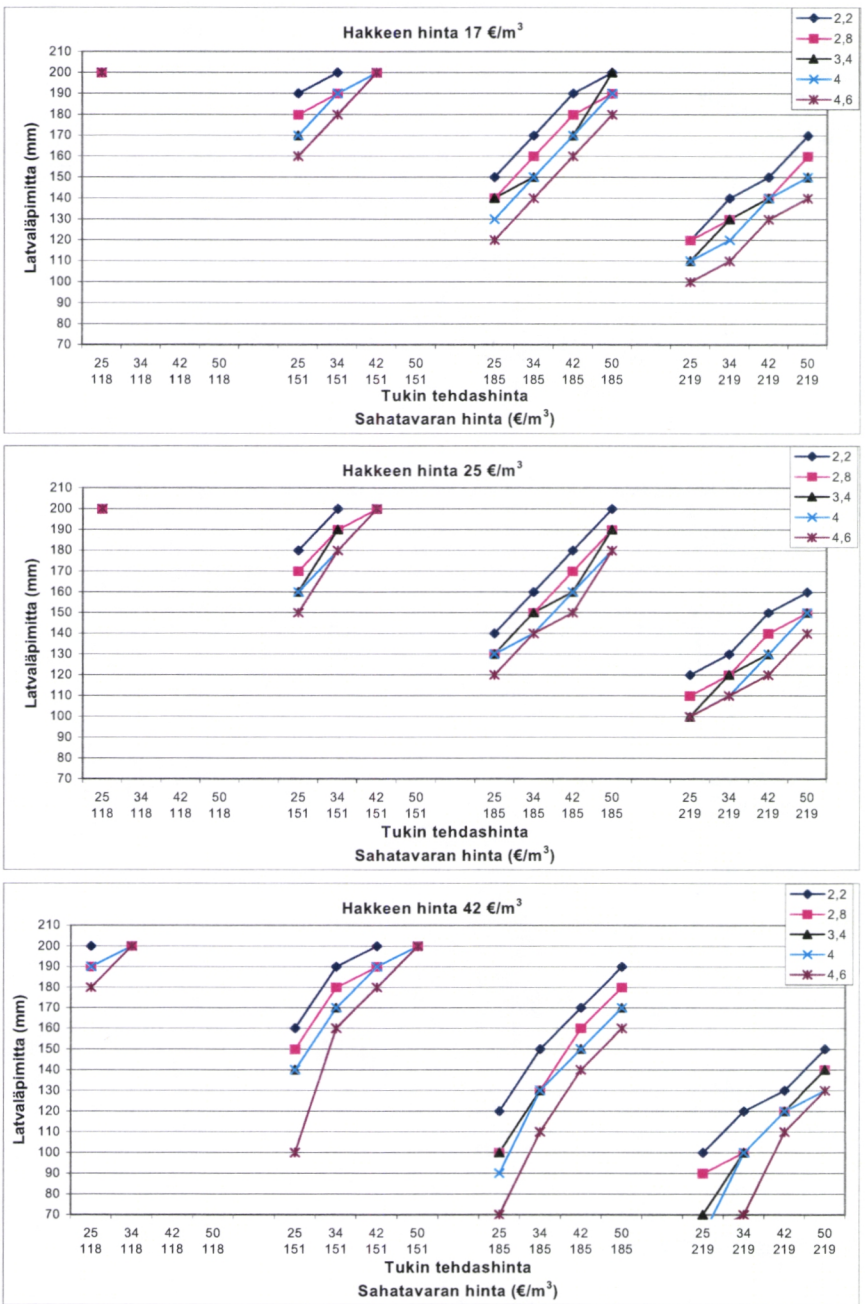
Taulukko 10.2. Metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuus keskikuljetusmatkan (m) mukaan.

	Käyttötuntituottavuus (m^3/h) Keskikuljetusmatka (m)									
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
MäT	23,5	22,1	20,4	19,1	18,0	17,1	16,3	15,6	15,0	14,5
MäK	17,9	16,9	15,7	14,7	13,9	13,2	12,6	12,1	11,7	11,3
MäLT	15,5	14,5	13,2	12,3	11,5	10,9	10,3	9,9	9,5	9,1

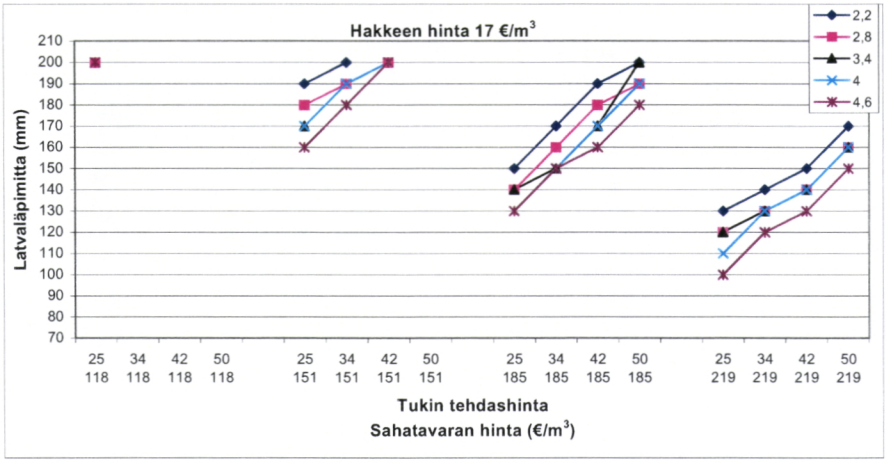
Taulukko 10.3. Metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuus maastoluokan (1 - 3) mukaan.

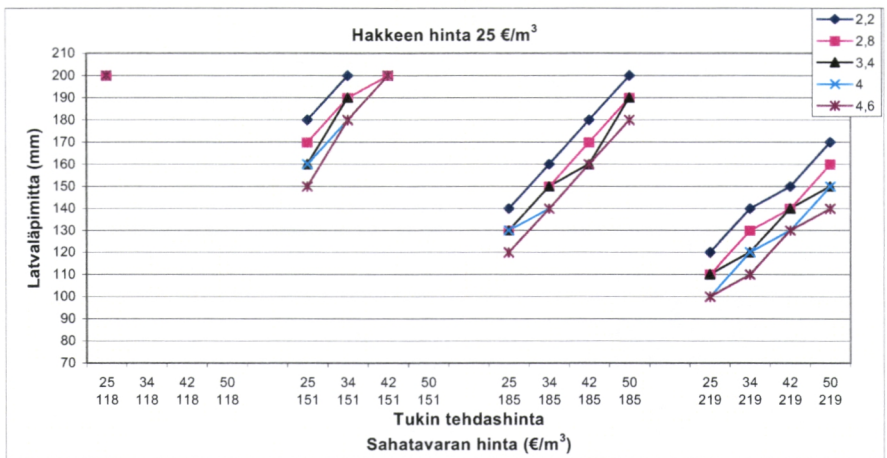
	Käyttötuntituottavuus (m^3/h) Maastoluokka		
	1	2	3
MäT	22,1	21,6	20,8
MäK	16,9	16,5	16,0
MäLT	14,5	14,1	13,6

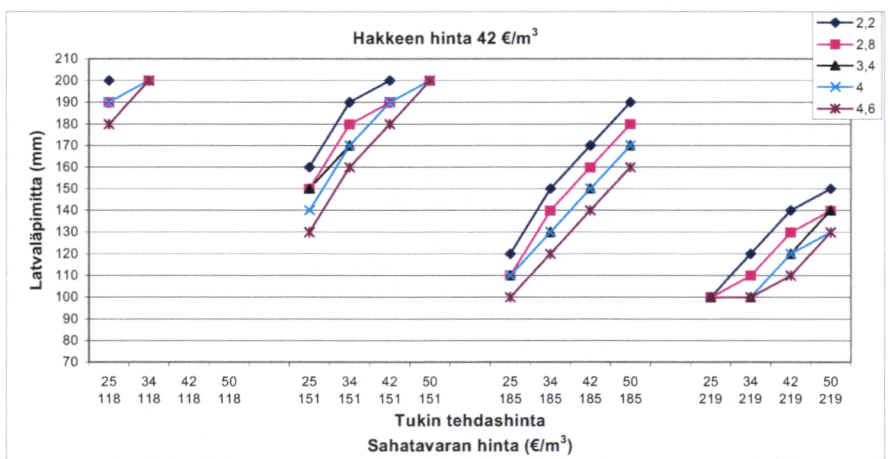
LIITE 11. Positiivisen tuloksen tuottavan tukin kuorettoman latvaläpimitan raja-arvot aihioita ja sahatavaraa tuotettaessa tukin eri pituuksilla (m) ja vaihtoehtoisilla tukin tehdashinnoilla ja tuotehinnoilla.



Kuva 11.1. Aihiotuotanto.







Kuva 11.2. Sahatavaratuotanto.

ISBN 951-40-1977-6
ISSN 0358-4283