

Puutavaran tilavuuspainon määrittäminen

Jari Marjomaa
Kimmo Uurtamo

Metsätehon raportti 7
5.12.1996

Osakkaiden yhteishanke

Asiasanat: puutavaran mittaus, tehdasmittaus,
puutavaran tuoreiheys

Helsinki 1997

SISÄLLYS

Sivu

1 TUTKIMUKSEN TAUSTA JA TAVOITE	4
2 KIRJALLISUUSTUTKIMUS	5
2.1 Tilavuuspainon komponentit	5
2.2 Kuivatuoretiheys	5
2.2.1 Rungon sisäinen vaihtelu	5
2.2.2 Runkojen välinen vaihtelu	6
2.2.3 Leimikoiden välinen vaihtelu	6
2.2.4 Rungon oksien ja kuoren tiheys	7
2.2.5 Kuivatuoretiheyden laskentamallit	7
2.2.6 Päätelmät	9
2.3 Kosteus	10
2.3.1 Käsitteitä	10
2.3.2 Rungon sisäinen vaihtelu	10
2.3.3 Runkojen välinen vaihtelu	11
2.3.4 Vuodenaikainen kosteuden vaihtelu	11
2.4 Männyn ja kuusen sydänpuuosuus	12
2.4.1 Rungon sisäinen vaihtelu	12
2.4.2 Runkojen välinen vaihtelu	12
2.5 Puutavaran tuoretiheyden vaihtelu	12
2.6 Puutavaran kosteuden muutos varastoinnin aikana	13
2.7 Tilavuuspainomalli	14
3 TILAVUUSPAINON MÄÄRITYS KÄYTÄNNÖN OLOSUHTEISSA	15
3.1 Aineisto	15
3.2 Tulokset	16
3.2.1 Tilavuuspainon vaihtelu	16
3.2.1.1 Puutavaralaji	16
3.2.1.2 Mittausajankohta	17
3.2.1.3 Pölkyn keskijäreys	18
3.2.1.4 Varastointiaika	18
3.2.1.5 Kasvupaikka	18
3.2.1.6 Hakkuutapa	20
3.2.1.7 Varastopaikka	20
3.2.2 Tilavuuspainomalli	21
4 PÄÄTELMÄT	22
KIRJALLISUUS	23

TIIVISTELMÄ

Puutavaran tilavuuspaino tarvitaan muunnettaessa puutavaraerän paino tilavuudeksi. Tilavuuspaino kuvaa myös puutavaran tuoreutta. Jotta painoon perustuvaa mittausta voitaisiin käyttää myös pienten erien mittaukseen, tulisi tilavuuspaino voida määrittää ilman otantaa, esim. sopivalla laskentamallilla. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kirjallisuuden perusteella mahdollisuudet männyn, kuusen ja koivun tilavuuspainon mallitukseen. Lisäksi kerättiin suppea tutkimusaineisto, jolla kokeiltiin puutavaraerän tilavuuspainon määrittystä puunhankinnan yhteydessä kerättävillä tunnuksilla.

Puutavaran tilavuuspainoon vaikuttavat tutkimusten mukaan eniten kuivatuoretiheys, sydänpuuosuus, pintapuun kosteus ja puutavaran kuivuminen varastoinnin aikana. Männyn, kuusen ja koivun kuivatuoretiheys voidaan ennustaa melko luotettavasti puun rinnankorkeusläpimitan, pituuden ja iän perusteella. Männyn ja kuusen sydänpuuosuuden määrittämiseksi on kehitetty mallit, joissa selittäjinä ovat leimikon keskipituus, rinnankorkeusläpimitta ja latvusrajan korkeus. Pintapuun kosteus vaihtelee vuodenajan ja sääolosuhteiden mukaan. Puutavaran tilavuuspaino alenee kesäaikana tasaisesti varastointiajan suhteen. Puutavaran kosteuden muutoksia ei ole toistaiseksi voitu riittävän tarkasti mallittaa.

Suppealla tutkimusaineistolla kokeiltiin mänty- ja koivukuitupuunipun tilavuuspainon määrittystä pölkkyjen keskijäreyden, kasvupaikan, mitausajankohdan ja varastointiajan perusteella. Yhtälöiden tarkkuus jäi melko heikoksi, keskivirhe oli noin ± 5 %. Tutkimustulokset osoittavat, että tilavuuspainomallin laatimista varten on jo olemassa melko hyvät perustiedot. Pintapuun kosteuden mallittamiseksi tarvitaan vielä tutkimusta.

1 TUTKIMUKSEN TAUSTA JA TAVOITE

Puutavaran tuoretiheys eli tilavuuspaino (kg/m^3) on keskeinen tunnus puunhankinnassa. Tilavuuspaino kuvaa puutavaran tuoreutta ja kosteutta, jotka ovat tärkeitä tekijöitä tuotantoprosessin kannalta. Alhainen tilavuuspaino kuvaa myös lahon aiheuttamaa kuiva-ainetappiota. Kuitupuun painoon perustuva mittaus on yleisin kuitupuun mittaamenetelmä tehtaalla. Puutavara punnitaan ajoneuvovaa'alla tai trukki-vaa'alla puutavaran vastaanoton yhteydessä. Puutavaraerän tilavuuspaino tarvitaan punnitustuloksen muuntamiseksi kuorelliseksi kiinto-tilavuudeksi. Puutavaran autokuljetuksissa tarvitaan tietoa puutavaran tilavuuspainosta kuormankoon optimoimiseksi ja kuljetusmaksun määrittämiseksi tapauksissa, joissa punnitus ei ole mahdollista toteuttaa.

Puutavaran tilavuuspaino määritetään tehtaalla tilavuuden mittausta varten otantamittauksella. Tämä soveltuu suurten puumäärien mittaukseen, mutta pienten puumäärien eräkohtaisen tai kuormakohtaisen tilavuuspainon määrittäminen otantamittauksin on työlästä ja kallista.

Jotta painoon perustuvaa mittausta voitaisiin käyttää myös pienten erien mittaukseen, tulisi tilavuuspaino voida määrittää ilman otantaa, esim. sopivalla laskentamallilla. Laskentamallilla määritettävän tilavuuspainon lisäksi erän tilavuuden määrittäminen vaatisi vain punnituksen. Tällaisen *tilavuuspainomallin* tulisi sisältää sellaisia tunnuksia, jotka ovat yksinkertaisella ja luotettavalla tavalla määritettävissä puutavaraerästä.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää aikaisempien tutkimusten perusteella mahdollisuudet männyn, kuusen ja koivun tilavuuspainon mallitukseen. Tätä varten kartoitettiin tiedot eri puulajien tilavuuspainon vaihtelusta ja siihen vaikuttavista tekijöistä. Tilavuuspainon vaihtelua tarkasteltiin rungossa sekä runkojen ja leimikoiden (alueiden) kesken. Lisäksi selvitettiin varastoinnin vaikutusta tilavuuspainoon. Mallin rakennetta ja käytettäviä tunnuksia tarkasteltaessa kiinnitettiin huomiota sellaisiin tunnuksiin, jotka ovat luotettavasti, helposti ja pienin kustannuksin määritettävissä puutavaraerästä.

Puutavaran tilavuuspainomallin määrittämistä koskevan kirjallisuustutkimuksen lisäksi projektissa kerättiin suppea tutkimusaineisto, jonka perusteella selvitettiin mahdollisuuksia ennustaa puutavaraerän tilavuuspaino puunhankinnan yhteydessä kerättävien tunnusten perusteella.

2 KIRJALLISUUSTUTKIMUS

2.1 Tilavuuspainon komponentit

Puun tuoretiheys eli tilavuuspaino muodostuu kahdesta tekijästä: puuaineen (ja kuoren) tiheydestä ja puun sisältämästä vesimäärästä, ts. kosteudesta. Puun (tai kuoren) tiheyttä kuvataan kuivatuoretiheydellä, jolla tarkoitetaan kuivan puun massan ja tuoreen puun tilavuuden suhdetta. Puun (ja kuoren) kosteutta kuvataan kosteussuhteella, %:lla, joka on puussa olevan veden ja puun painon suhde.

Puun tuoretiheydellä tarkoitetaan yleensä kaatotuoreen puutavaran tilavuuspainoa. Varastossa puu yleensä kuivuu ja tuoretiheys alenee. Puutavaran tuoretiheyttä punnitushetkellä kutsutaan tässä raportissa tilavuuspainoksi.

2.2 Kuivatuoretiheys

2.2.1 Rungon sisäinen vaihtelu

Jälsi eli kambium on puun paksuutta lisäävä kasvusolukko, jonka ominaisuudet heijastuvat siitä muodostuvissa soluissa. Jälsisolut tuottavat vanhetessaan entistä tiheämpää puuainetta.

Männyn puuaineen tiheys kasvaa jällen vanhenemisen seurauksena selvästi säteen suunnassa ytimeä pintaan päin. Tiheysero ytimen ja pinnan välillä on suurimmillaan rungon 10 %:n suhteellisella korkeudella, jossa se voi suurilla rungoilla olla jopa 100 kg/m^3 . Männyn tiheyden aleneminen myös rungon pituussuunnassa johtuu jällen iästä, sillä tyvestä latvaan päin jällen ikä laskee ja samalla sen tuottaman puuaineen tiheys pienenee. Tiheysero voi latvan ja tyven välillä olla jopa 20 %.

Koivulla rungon säteen- ja pituudensuuntaiset tiheyden muutokset ovat samansuuntaisia kuin männyllä. Samoin koivun tiheys pienenee tyvestä latvaan päin mentäessä, kuitenkin selvästi vähemmän kuin männyllä. Koivun tiheys rungon 25 %:n suhteellisella korkeudella vastaa parhaiten koko rungon keskimääräistä tiheyttä.

Jällen ikä selittää parhaiten männyllä ja koivulla rungon säteen ja pituuden suuntaisen tiheyden vaihtelun. Iän selityksasteesta on kuitenkin ristiriitaisia tuloksia. Osassa tutkimuksia männyn ikä selittää yksin tiheyden vaihtelun. Toisissa tutkimuksissa iän lisäksi puun kokoa ja kasvunopeutta kuvaavat muuttujat selittävät myös rungon sisäistä vaihtelua.

Kuusen tiheyden vaihtelu säteen suunnassa on epäsäännöllisempää kuin männyn. Ensin tiheys vähenee ytimeistä pintaan päin, mutta pintaa lähestyttäessä se alkaa jälleen kasvaa. Tiheyden kasvu johtuu jälleen vanhentumisesta ja kevätpuuta tiheämmän kesäpuun osuuden kasvusta vuosilustossa. Kuusen tiheys pienenee ensin tyvestä latvaan päin, mutta alkaa jälleen kohota latvaa lähestyttäessä.

2.2.2 Runkojen välinen vaihtelu

Männyn, kuusen ja koivun kuivatuoretiheys lisääntyy iän myötä. Nuoren kasvavan puuston kuivatuoretiheys on siten aina pienempi kuin päätehakkuikeisen puuston. Vanhetessaan jälsi muodostaa entistä tiheämpää puuta. Puun ikä ei kuitenkaan yksin selitä kuivatuoretiheyden vaihtelua, sillä regressioyhtälöiden selityksasteet jäävät alle 40 %:n.

Männyn ja kuusen puuaineen tiheys alenee selvästi kasvunopeuden lisääntyessä. Tiheyden aleneminen johtuu lähinnä kevätpuun määrän kasvusta vuosiluston paksuuden kasvaessa. Männyn vuosiluston paksuuden kasvaessa 1 mm kuivatuoretiheys alenee 20 - 30 kg/m³. Erot puuaineen tiheydessä ovat selvät eri metsätyypeillä. VT- ja OMT-tyypeillä on männyn puuaineen tiheysero puuston iästä riippuen 15 - 33 kg/m³. Männiköiden ja kuusikoiden harvennukset lisäävät jäävän puuston kasvua ja alentavat puuaineen tiheyttä. Koivulla kasvunopeus ei juuri vaikuta puuaineen tiheyteen.

2.2.3 Leimikoiden välinen vaihtelu

Ympäristötekijät, mm. kasvupaikka ja puuston tiheys, vaikuttavat puun kasvunopeuteen. Osa ympäristötekijöiden vaikutuksista kuivatuoretiheyteen voidaan selittää siten puuston iän ja järeyden avulla. Pelkästään niiden avulla ei kuitenkaan päästä kuivatuoretiheyden enustamisessa riittävään tarkkuuteen.

Maantieteellisen sijainnin vaikutus puuaineen tiheyteen johtuu pääosin ilmastotekijöiden aiheuttamasta erilaisesta kasvunopeudesta eri puolilla Suomea. Männyn tiheys muuttuu keskilämpötilan, lämpösumman ja kasvukauden pituuden mukaan ollen tiheintä Keski-Suomessa. Pohjoisessa tiheyden vaihtelua selittää erityisesti lämpötila. Etelä-Suomessa tiheyden vaihteluun vaikuttaa lämpötilan lisäksi kosteus. Kuusen puuaineen tiheys alenee pohjoisesta etelään kasvuedellytysten parantuessa. Koivulla ei ole havaittu maantieteellisestä sijainnista johtuvia merkittäviä tiheyseroja.

Maantieteellisen vaihtelun aiheuttaa osaksi myös puiden geneettinen perimä. Suomessa on todettu provinienssikokeissa parhaimman ja huonoimman alkuperän tiheyseroksi kaikilla puulajeilla yli 10 %.

2.2.4 Rungon oksien ja kuoren tiheys

Oksapuun kuivatuoretiheys on huomattavasti suurempi kuin muun runkopuun kuivatuoretiheys. Männyn oksapuun kuivatuoretiheys on noin 750 kg/m^3 ja kuusen noin 900 kg/m^3 . Koivulla oksapuun tiheys-ero runkopuuhun verrattuna on pienempi kuin havupuilla. Myös oksapuun ympärillä oleva puuaine on tiheämpää kuin oksakiehkuroiden välissä. Sisäoksien tiheyden vaikutus männyn, kuusen ja koivun runkojen keskimääräiseen kuivatuoretiheyteen on noin 1 %.

Havupuiden kuori voidaan jakaa kaarnaan ja tavalliseen kuoreen. Männyn kaarnaisen ja tavallisen kuoren välillä ei ole tiheyseroa. Kuoren kuivatuoretiheys on selvästi puuaineen tiheyttä pienempi, keskimäärin 305 kg/m^3 . Kuusen kaarnan ja tavallisen kuoren välillä on sen sijaan selvä tiheysero. Kaarnan kuivatuoretiheys on keskimäärin 360 kg/m^3 ja tavallisen kuoren 409 kg/m^3 . Kaarnaa alkaa kasvaa vasta rungon vanhemmalla iällä, joten kuusirungon kuoren tiheys on riippuvainen puun iästä. Koivun kuoren tiheys on jonkin verran puuaineen tiheyttä suurempi. Järeiden runkojen kuoren tiheys on suurempi kuin kuitupuurunkojen, joten kuoren tiheys riippuu todennäköisesti puun iästä.

2.2.5 Kuivatuoretiheyden laskentamallit

Kattavimman tutkimuksen männyn, kuusen ja koivun kuivatuoretiheydestä on tehnyt Hakkila (1979). Tutkimuksen aineisto kerättiin valtakunnan metsien inventoinnin koealoilta. Aineisto sisälsi 1 643 mäntyrunkoa, 1 368 kuusirunkoa ja 130 koivurunkoa, joista kustakin selvitettiin rinnankorkeudelta otetusta kairanlastusta puuaineen tiheys. Edellisten lisäksi kerättiin 150 männyn, 116 kuusen ja 40 koivun aineistot, joista selvitettiin runkojen kuivatuoretiheydet usealta suhteelliselta korkeudelta otettujen näytteiden perusteella. Rinnankorkeudelta määritetty tiheys muunnettiin koko rungon tiheydeksi regressioyhtälöllä.

TAULUKKO 1 Keskimääräiset kuivatuoretiheydet

Puulaji	Pystypuuaineisto		Kaadettujen puiden aineisto	
	keskiarvo, kg/m^3	keskihajonta, kg/m^3	keskiarvo, kg/m^3	keskihajonta, kg/m^3
Mänty	403,4	28,4	402,6	29,8
Kuusi	379,7	32,3	390,8	39,6
Koivu	483,1	23,8	484,3	29,0

Kun puun kuivatuoretiheys laskettiin puun iän sekä rinnankorkeusläpimitan ja pituuden avulla, saatiin regressioyhtälöille seuraavat tulokset.

TAULUKKO 2 Kuivatuoretiheyden regressioyhtälöiden selitysaste ja virheen keskihajonta

Puulaji	Selitysaste, %	Keskihajonta, kg/m ³	Keskihajonta, %
Mänty	23,1	24,9	6,2
Kuusi	63,8	19,5	5,1
Koivu	39,1	18,6	3,9

Hakkila (1979, 1995) on kehittänyt kuivatuoretiheyden laskentafunktioita. Funktioilla voidaan määrittää oksattoman ja kuorettoman runkopuun kuivatuoretiheys. Ilmastovyöhykejaon mukaisiin alueellisiin kuivatuoretiheysarvoihin, joissa on mukana rungon sisäoksien sekä kuoren tiheys, päästään korjaamalla funktioiden tuottamia arvoja kuori-, oksa- ja ilmastovyöhykekorjauskertoimilla.

Oksattoman runkopuun kuivatuoretiheisyhtälöt:

Lyhyet puut (2,5 - 7,4 m)

Mänty:

$$BD = 381,63 - 27,43 (d/a)^2 + 62,44 \ln (h/d) - 26,88 \ln (h/a) + 0,526 h$$

Kuusi:

$$BD = 307,21 - 67,35 \ln (d/a) - 0,270 a + 0,001679 h^3 + 167,7/a$$

-

$$9,837 V^2 + 17,79 (d/a)^3$$

Koivu:

$$BD = 379,99 + 22,84 \ln a + 2,771 (a/d)$$

Pitkät puut (yli 7,4 m)

Mänty:

$$BD = 341,77 + 92,930 (h/d) - 193,00 (h/a)^2 + 1,832 (a/h)$$

Kuusi:

$$BD = 303,37 - 67,95 \ln (d/a) - 0,2795 a + 0,619 h + 19,13 (d/a)^3$$

Koivu:

$$BD = 335,64 + 34,156 \ln a + 138,5/d$$

Missä:

$$BD = \text{rungon oksattoman puuaineen kuivatuoretiheys, kg/m}^3$$

$$d = \text{rinnankorkeusläpimitta, cm}$$

$$h = \text{rungon pituus, m}$$

a = ikä, vuosina
V = rungon tilavuus, m³

TAULUKKO 3 Kuori-, oksa- ja ilmastovyöhyketiheyskorjaus yhteensä

Puulaji		Ilmastovyöhyke					
		1	2	3	4	5	6
		tiheyskorjaus, %					
Mänty	lyhyet puut	-8,3	-3,0	-1,0	-1,0	-1,0	+0,9
	pitkät puut	-8,5	-3,2	-1,0	-1,0	-1,0	+1,2
Kuusi	lyhyet puut			+1,0	+1,0	+1,0	+1,0
	pitkät puut		-0,7	+1,0	+1,0	+2,0	+3,0
Koivu	lyhyet puut	+1,5	+1,5	+1,5	+1,5	+1,5	+2,7
	pitkät puut	+1,5	+1,5	+1,5	+1,5	+1,5	+2,7

Yhtälöiden selitysasteet ovat männyllä 37 %, kuusella 64 % ja koivulla 39 %. Hakkilan ym. vielä julkaisemattomassa tutkimuksessa on kehitetty regressioyhtälöt Etelä-Suomen ensiharvennusmännyn rungon ja leimikon puuston kuivatuoretiheyden määrittämiseksi.

	R^2	Keskiha-
jonta,		
kg/m^3		
Rungon (kuori mukaan lukien) kuivatuoretiheys:		
$BD = 399,6 - 144,8 (d/a)^2$	0,27	20,0
Leimikon keskimääräinen kuivatuoretiheys:		
$BD_1 = 402,7 - 2225,39 d_1/a_1^2$	0,56	10,3
BD = kuorellisen rungon keskimääräinen kuivatuoretiheys, kg/m^3		
d = rinnankorkeusläpimitta, cm		
a = ikä, vuosina		
BD_1 = kuorellisen puun kuivatuoretiheys leimikossa, kg/m^3		
d_1 = leimikon poistettavien puiden keskimääräinen rinnankorkeusläpimitta, cm		
a_1 = leimikon poistettavien puiden keskimääräinen ikä, vuosina		
R^2 = selitysaste		

2.2.6 Päätelmät

Puun kuivatuoretiheyden vaihtelu rungon sisällä ja runkojen välillä tunnetaan jo melko hyvin. Lisäksi maantieteellisen sijainnin vaikutuksesta kuivatuoretiheyteen on useita yhdensuuntaisia tutkimustuloksia. Vaihtelun syistä ei sen sijaan olla vielä kovinkaan hyvin selvillä. Kuivatuoretiheyden regressioyhtälöillä, joissa selittävinä muuttujina ovat puun ikä, rinnankorkeusläpimitta ja pituus sekä korjaustekijöinä kuori-, oksa- ja ilmastovyöhykekorjaukset, voidaan selittää tiheyden vaihtelusta puiden välillä puulajista riippuen 37 - 64 %. Selitysasteet eivät ole kovin korkeita. Yhtälöt on laskettu aineistoista, jotka edustavat koko puustoa, eivät siis pelkästään hakkuissa poistettavaa puustoa.

Niinpä ne antavat keskimäärin hieman liian pieniä tuoretiheyksiä alaharvennuksilla poistettaville rungoille.

Männyn yksittäisen rungon ja leimikon keskimääräisen tiheyden määrittämiseen laadittujen yhtälöiden selitysasteet osoittavat, että leimikkotasolla päästään miltei kaksinkertaiseen selitysasteeseen verrattuna yksittäisiin runkoihin. Tämän perusteella voidaan olettaa, että myös muilla puulajeilla leimikkokohtaisten mallien selitysasteet ovat selvästi paremmat. Selittämättä jääneestä vaihtelusta suurin osa johtunee puun perinnöllisestä vaihtelusta.

Yhtälöitä voitaneen käyttää puutavaran laadun ja määrän mittauksissa tilavuuspainomallin osana, koska mallien tarvitsemat leimikon puustotiedot ovat suhteellisen pienellä työpanoksella saatavissa.

Koska yhtälöt on laskettu koko rungolle, käyttöosan kuivatuoretiheyttä määritettäessä virhettä aiheuttaa hakkuutähteeksi jäävän latvan vaikutus kuivatuoretiheyteen. Latvan tilavuuden suhde rungon käyttöosan tilavuuteen on ensiharvennuspuuta lukuun ottamatta niin pieni, että sillä ei ole käytännössä merkitystä. Sen sijaan ensiharvennuspuun käyttöosan tiheyden määrittäminen yhtälöillä sisältää suuremman virhemahdollisuuden.

2.3 Kosteus

2.3.1 Käsitteitä

Puun elävät solut tarvitsevat vettä elintoimintojensa ylläpitämiseen. Puun rungossa on vettä myös paikoissa, joissa sillä ei ole välitöntä fysiologista merkitystä, esim. sydänpuussa. Puussa olevaa veden määrää kuvataan tavallisesti käsitteillä kosteus tai kosteussuhde. Kosteudella tarkoitetaan veden massan ja näytteen kokonaismassan suhdetta. Kosteussuhteella tarkoitetaan veden massan ja näytteen kuivan massan suhdetta.

2.3.2 Rungon sisäinen vaihtelu

Männyllä ja kuusella kosteuden vaihteluun rungossa vaikuttaa eniten pinta- ja sydänpuun kosteusero. Vesi kulkeutuu juurista latvukseen pintapuussa. Sydänpuun muodostumiseen liittyy voimakas kosteuden aleneminen. Koivulla ei ole vastaavaa ilmiötä.

Pinta- ja sydänpuun kosteusero on merkittävä. Suomessa ja Ruotsissa tehdyissä tutkimuksissa kuusen ja männyn pintapuun kosteussuhde on ollut 120 - 150 % ja sydänpuun 30 - 40 %. Rungon pituus-suuntainen kosteuden vaihtelu johtuu lähinnä sydänpuosuuden vaihtelusta. Männyllä ja kuusella kosteus alenee hieman tyvestä n. 10 - 20 %:n korkeudelle asti ja kohoaa sitten tasaisesti latvaan saakka.

Jos pinta- ja sydänpuun rungon pituuden suuntaisia kosteuden muutoksia tarkastellaan erikseen, eroavat tulokset toisistaan. Kuusen sy-

dänpuun kosteuden on todettu laskevan vain vähän tyvestä latvaan päin. Myös männyn sydänpuun kosteus rungon pituussuunnassa muuttuu vain vähän. Tutkimuksissa on mitattu muutaman prosentin kosteuden laskua tai nousua tyvestä latvaan päin. Männyn ja kuusen pintapuun kosteus nousee selvästi tyvestä latvaan päin. Männyllä kosteuden nousu on suurempi kuin kuusella. Pintapuun kosteuden vaihtelu selittyy puun elintoiminnoilla. Vesi liikkuu pintapuussa juurista latvukseen. Veden määrä pysyy samana aina latvukseen saakka. Kun pintapuun poikkipinta-ala vaihtelee rungon korkeuden mukaan ja veden määrä pysyy samana, veden konsentraatio eli kosteus muuttuu. Pintapuun poikkipinta-ala on tyvässä suurempi ja kosteus pienempi kuin ylempänä rungossa. Kosteuden kohoaminen johtuu myös puuaineen tiheyden alenemisesta samassa suunnassa.

Koivun kosteuden vaihtelu on epäsäännöllisempää kuin männyn ja kuusen. Kosteus alenee ytimeistä pintaan päin. Tämä johtunee tiheyden kasvusta samassa suunnassa. Tavallisesti kosteus kohoaa tyvestä latvaan päin; samassa suunnassa kuin vettä kuljettavan solukon pinta-ala pienenee ja puuaineen tiheys alenee. Keväällä puun ollessa kosteinta kosteusmuutokset ovat vähäisiä.

Kuoren kosteus muuttuu yleensä samalla tavalla kuin puuaineen. Se lisääntyy tyvestä latvaan päin. Havupuilla tämä johtuu kaarnan muodostumisesta puun ikääntyessä.

2.3.3 Runkojen välinen vaihtelu

Havupuilla runkojen väliseen kosteusvaihteluun vaikuttaa eniten puun ikä. Kuivaa sydänpuuta alkaa muodostua vasta rungon vanhemmalla iällä. Niinpä nuoret puut ovat huomattavasti kosteampia kuin sydänpuuta sisältävät vanhemmat puut. Koivulla iän vaikutus on samansuuntainen, mutta ei niin voimakas kuin havupuilla.

Osa runkojen välisestä kosteusvaihtelusta voidaan selittää kasvupaikan ja kasvunopeuden avulla. Kosteus kasvaa kasvupaikan ja kasvunopeuden parantuessa. Puun kosteuteen vaikuttaa myös geneettinen vaihtelu, minkä vuoksi runkojen kosteus voi vaihdella huomattavasti samalla kasvupaikalla.

2.3.4 Vuodenaikainen kosteuden vaihtelu

Vuodenaika vaikuttaa eniten puuaineen kosteuteen. Kosteussuhde vaihtelee vuoden aikana paljon. Metsätehon tutkimuksen (Metsätehon katsaus 4/1992) mukaan mäntykuitupuun tuoretiheys vaihteli Etelä-Suomessa vuoden aikana 825 - 915 kg/m³, kuusikuitupuun 812 - 900 kg/m³ ja koivukuitupuun 850 - 955 kg/m³. Vaihtelu johtunee runkojen kosteussuhteen muutoksista. Kosteus on korkeimmillaan keväällä tammi-maaliskuussa ja alimmillaan heinä-syyskuussa. Kosteus-

vaihtelua aiheuttaa puun elintoimintojen sopeutuminen vuodenaikojen vaihteluun. Se on suhteellisen pysyvä vuodesta toiseen esiintyvä ilmiö. Kosteusvaihtelun suuruuteen ja tietyn ajankohdan kosteustasoon vaikuttavat säätekijät, lähinnä sademäärä ja lämpötila.

2.4 Männyn ja kuusen sydänpuuosuus

2.4.1 Rungon sisäinen vaihtelu

Sydänpuun määrä ilmoitetaan sydänpuun osuutena rungon poikkileikkauspinta-alasta tai rungon tilavuudesta. Kuusen sydän- ja pintapuun välillä ei ole selvää värieroa, joten silmämääräinen rajapinnan määrittäminen on vaikeaa. Auringon valo saa aikaan värieron pinta- ja sydänpuun välillä. Samoin jäätyneen puun sydänpuu on vaaleampaa kuin kosteampi pintapu.

Männyllä sydänpuuosuus on suurimmillaan rungon alaosassa, 10 - 30 %:n korkeudella rungon pituudesta, josta se laskee sekä tyveen että latvaan päin mentäessä. Nuorilla männyillä sydänpuuosuus alenee nopeasti latvaan päin. Nylinderin (1959) tutkimuksen mukaan 50 vuotta vanhoilla männyillä sydänpuuosuuden maksimi, 25 % läpimitasta, saavutetaan 10 %:n korkeudella rungon pituudesta. Rungon puolivälissä osuus on alle 10 % ja 80 %:n korkeudella enää 0,5 %. Vanhoilla männyillä sydänpuuosuuden lasku ei ole näin voimakasta. Tämä johtuu siitä, että rungossa alkaa muodostua sydänpuuta aikaisemmin yläosassa kuin alaosassa, ja runko muuttuu iän myötä täyteläisemmäksi. Kuusella sydänpuuosuus vaihtelee rungossa suunnilleen samalla tavalla kuin männyllä. Maksimikohta on noin 20 %:n korkeudella.

2.4.2 Runkojen välinen vaihtelu

Rungon sydänpuosuuteen vaikuttaa eniten ikä. Iän kasvaessa sydänpuuosuus nousee. Kasvunopeus vaikuttaa sydänpuosuuteen siten, että nopeakasvuisilla puilla osuus on pienempi kuin hidaskasvuisilla. Läpimitan ollessa sama sydänpuuosuus on nopeakasvuisilla puilla pienempi kuin hidaskasvuisilla. Iän ollessa sama sydänpuuosuus on nopeakasvuisilla puilla suurempi kuin hidaskasvuisilla.

Kasvunopeuden ja sydänpuun negatiivista korreloitumista on selitetty mm. puun vesitaloudella. Suuri latvus tarvitsee paksun pintapuun veden johtamiseksi. Latvuksen koolla ja pintapuun osuudella on selvä riippuvuus.

Maantieteellisellä sijainnilla ja geneettisellä vaihtelulla on todennäköisesti vaikutusta sydänpuosuuteen. Maantieteellisen sijainnin ja perimän vaikutuksista sydänpuosuuteen ei ole kuitenkaan kovin paljon tutkimustietoa. Ruotsalaisen tutkimuksen mukaan sydänpuun muodostumisen alkamisikä männyllä kasvaa etelästä pohjoiseen päin.

2.5 Puutavaran tuoretiheyden vaihtelu

Mänty- ja kuusipuutavaran tuoretiheyteen vaikuttavat eniten sydänpuuosuus ja pintapuun kosteus, joka vaihtelee vuodenajan mukaan. Koivulla ei ole sydänpuuta, joten koivun tuoretiheyteen vaikuttaa selvimmin vuodenajan mukaan muuttuva puun kosteus. Vuodenajan vaikutus puun kosteuteen on vaikea tarkasti määrittää, koska vaihtelevat sääolosuhteet vaikuttavat puun kosteuden muutosrytmiin.

Leimikossa puutavaralajien tuoretiheyteen vaikuttavat runkojen kuivatuoretiheys, kosteus ja sydänpuuosuus, jotka muuttuvat runkojen iän, järeyden ja kasvunopeuden mukaan. Pölkkyjen välinen tuoretiheyden vaihtelu on todennäköisesti suurempi kuin runkojen välinen vaihtelu, koska pölkkyissä ilmenee myös runkojen pituussuuntainen tuoretiheyden muutos.

Puutavaralajierien sisäistä tuoretiheyden vaihtelua on selvitetty kahdessa Metsätehon tutkimuksessa: Osaupotusmenetelmä puutavaran mittauksessa tehtaalla (Metsätehon tiedotus 398) ja Metsätraktorin kuormainvaan käyttöön perustuva puutavaran tilavuuden mittaaminen (Metsätehon katsaus 14/1992). Edellisessä tutkimuksessa tarkasteltiin taakoittain mitatun tuoretiheyden vaihtelua puutavaranipussa ja jälkimmäisessä tutkimuksessa taakoittain mitatun tuoretiheyden vaihtelua leimikon puutavaralajierissä. Tulokset on esitetty taulukossa 4.

Tulokset osoittavat, että puutavaralajierän sisäinen tuoretiheyden vaihtelu on melko pientä. Koivukuitupuun tuoretiheys vaihtelee vähemmän kuin havupuutavaralajien tuoretiheydet. Vaihtelun suuruuteen vaikuttaa käytetty taakkakoko, joka oli osaupotusmenetelmää koskevassa tutkimuksessa suurempi kuin kuormainvaakamittauksen tutkimuksessa.

TAULUKKO 4 Puutavaralajierän/nipun tuoretiheyksien taakoittainen vaihtelu

Puutavaralaji	Taakkojen välinen tuoretiheyden keskihajonta	
	Puutavaranipussa, %	puutavaraerässä, %
Mäntytukki	-	4,6
Mäntykuitupuu	3,3	4,2
Kuusitukki	2,9	4,7
Kuusikuitupuu	4,7	4,0
Koivukuitupuu	3,1	3,2

2.6 Puutavaran kosteuden muutos varastoinnin aikana

Hakatun puutavaran kuivuminen varastomuodostelmassa vaikuttaa luonnollisesti sen tilavuuspainoon. Kuivumistapahtumassa puusta poistuu ensin kapillaarisesti soluonteloissa oleva ns. vapaa vesi. Kun soluonteloiden vesi on poistunut, on saavutettu ns. puunsiiden kylälästympiste. Kuivumisen jatkuessa tästä eteenpäin alkaa soluseinämissä oleva vesi poistua vesihöyryinä. Tämä vaatii enemmän energiaa kuin vapaan veden poistuminen, minkä vuoksi puun kuivuminen hidastuu selvästi.

Puutavaran kuivumisnopeuteen vaikuttavat lämpötila, tuulen nopeus, ilmanpaine ja ilman suhteellinen kosteus. Lämpötila ja ilman suhteellinen kosteus vaikuttavat myös puutavaran loppukosteuteen. Sään ja pienilmaston vaihteluun perustuen puutavaran varastointipaikka, -tapa ja -ajankohta vaikuttavat kuivumiseen.

Puulajien väliset kuivumiserot johtuvat puuaineen ja kuoren erilaisista veden liikkumiseen ja läpäisevyyteen vaikuttavista ominaisuuksista. Järeät pölkyt kuivuvat hitaammin kuin pienet pölkyt, koska haihduttava pinta-ala tilavuusyksikköä kohden kasvaa läpimitan pienentyessä. Pölkyn pituus vaikuttaa myös hieman, koska veden liike on puun siiden suunnassa suurin. Lyhyt pölkky kuivuu nopeammin kuin pitkä pölkky.

Kuoren hyvästä eristyskyvystä johtuen pölkyn kuoriutuminen vaikuttaa kuivumisnopeuteen. Koneellisesti hakattu puutavara kuoriutuu nila-aikana herkästi ja kuivuu siksi ehjäkuorista puutavaraa selvästi nopeammin.

Metsätehossa on tutkittu puutavaran kuivumista varastossa kesäaikana (Metsätehon katsaus 4/1992). Puutavaran varastointiaika (15.4. - 30.9. välisenä aikana) ja hakkuutapa (hakkuukone, metsuri) vaikuttivat kuivumisnopeuteen taulukon 5 mukaisesti.

TAULUKKO 5 Puutavaran varastoinnista aiheutuva tilavuuspainon aleneminen

Puulaji	Hakkuutapa	Varastointipaikka	
		metsä	aukea
		% / viikko	
Mäntykuitupuu	hakkuukone	1,22	1,50
	metsuri	1,01	1,30
Kuusikuitupuu	hakkuukone	0,69	0,57
	metsuri	0,69	0,57
Koivukuitupuu	hakkuukone	0,53	0,69
	metsuri	0,37	0,48

2.7 Tilavuuspainomalli

Tilavuuspainomallin muodostamisessa puuaineen kosteuden vaihtelu on ongelmallisinta. Puutavaran kuivatuoretiheys, pinta- ja sydänpuun osuudet sekä niiden kosteus määräävät mänty- ja kuusipuutavaran tuoretiheyden. Koivun pinta- ja sydänpuun välillä ei ole kosteuseroa, joten koivun tuoretiheys määritetään kuivatuoretiheyden ja kosteuden avulla. Puutavaran tilavuuspainon määrittämiseksi tulee vielä ottaa huomioon sen arvioitu kuivuminen varastointiaikana.

Männyn ja kuusen tilavuuspainon laskentamalli:

$$r_g = R \cdot \left(I + \frac{h \cdot u_h}{10000} + \frac{(100 - h) \cdot u_s}{10000} \right) \cdot k_p \cdot v_{ko} A$$

Koivun tilavuuspainon laskentamalli:

$$r_g = R \cdot (I + u_k) \cdot k_p \cdot v_{ko}$$

Missä: r_g = tilavuuspaino, kg/m³ (puun ja kuoren)
 u_h = sydänpuun kosteussuhde kaatohetkellä, %
 u_k = koko puun kosteussuhde kaatohetkellä, %
 u_s = pintapuun kosteussuhde kaatohetkellä, % (pintapuun ja
 h = sydänpuuosuus tilavuudesta, % kuoren)
 R = kuivatuoretiheys, kg/m³ (puuaineen ja kuoren)
 k_p = varastoinnin aikainen keveneminen viikossa, %
 v_{ko} = varastointiaika, viikkoa

Mallien käyttämiseksi on tunnettava puutavaran kuivatuoretiheys, sydänpuuosuus sekä sydän- ja pintapuun kosteussuhteet.

Kuivatuoretiheys voidaan määrittää rungoittain Hakkilan (1979, 1995) kehittämällä regressioyhtälöillä, joiden muuttujat ovat rungon tai leimikon keskimääräinen ikä, rinnankorkeusläpimitta, pituus ja leimikon maantieteellinen sijainti. Männyn sydänpuun tilavuusosuus voidaan määrittää Ojansuun ja Maltamon (1995) kehittämällä sydänpuun runkokäyrämallin ja Laasasenahon runkokäyrämallien avulla, joissa muuttujat ovat leimikon keskipituus, rinnankorkeusläpimitta ja latvusrajan korkeus. Kuusen sydänpuun runkokäyrämalli julkaistaan lähitulevaisuudessa. Männyn ja kuusen sydänpuun kosteutta voidaan pitää vakiona. Se on määritettävissä aiempien tutkimusten perusteella. Ongelmallisinta on männyn ja kuusen pintapuun sekä koivun koko puuaineen kosteuden määrittäminen. Sen mallittamista varten tarvitaan lisää tutkimustietoa. Käytännön mittauksiin ei ole tällä hetkellä riittävän tarkkoja ja kilpailukykyisiä vaihtoehtoja.

3 TILAVUUSPAINON MÄÄRITYS KÄYTÄNNÖN

OLOSUHTEISSA

3.1 Aineisto

Tutkimusaineisto kerättiin Oy Metsä-Botnia Ab:n Kemian tehtaan puunvastaanotossa. Aineisto sisälsi 19 nippua lyhyttä mäntykuitupuuta, 145 nippua pitkää mäntykuitupuuta, 26 nippua lyhyttä koivukuitupuuta ja 94 nippua pitkää koivukuitupuuta, jotka oli mitattu eräkohtaisella paino-otantamittauksella. Aineiston keruu toteutettiin 7.11. - 31.12.1995.

Otantaniput punnittiin ajoneuvovaa'alla ja niiden tilavuus mitattiin mittausta- ja laadutusasemalla. Tämän perusteella määritettiin otantanimien tilavuuspaino. Kerättävät leimikko- ja puustotunnukset olivat leimikon sijaintikunta, kasvupaikkaluokka, hakkuutapa (ensiharvennus, muu harvennus ja päätehakkuu), hakkuun toteutus (koneellinen, metsurihakkuu), hakkuuajankohta, lumisuus ja mittaustapa. Leimikon sijaintikunta kirjattiin kuljetusmääräyksestä. Kasvupaikat saatiin vain harvennusleimikoista. Hakkuuajankohta saatiin hakkuukoneiden työohjelmista.

Hakkuutapa määritettiin nipun mittauksen yhteydessä pölkkyjen järjestyksen perusteella. Ensiharvennusluokassa pölkkyjen keskiläpimitta oli alle 11 cm ja tyvipölkkyjen osuus yli 70 %. Muussa harvennuksessa pölkkyjen keskiläpimitta oli 11 - 14 cm ja tyvipölkkyjen osuus 30 - 70 %. Päätehakkuuluokassa keskiläpimitta oli yli 14 cm. Lumiseksi merkittiin sellaiset niput, joissa oli runsaasti tiivistä lunta tai jäätä.

3.2 Tulokset

3.2.1 Tilavuuspainon vaihtelu

3.2.1.1 Puutavaralaji

TAULUKKO 6 Tutkimusaineiston tilavuuspainot puutavaralajeittain

Puutavaralaji	Nippuja, kpl	Tilavuuspainon		
		keskiarvo, kg/m ³	keskihajonta, %	vaihteluväli
Mäntykuitupuuta				
- 3 m	19	887	6,8	740 - 977
- ranka	145	882	6,6	752 - 1 015
Yhteensä	164	882	6,6	740 - 1 015
Koivukuitupuuta				
- 3 m	26	986	5,5	879 - 1 079
- ranka	94	934	5,5	793 - 1 038

Yhteensä	120	945	6,0	793 - 1 079
----------	-----	-----	-----	-------------

Mäntykuitupuunipuista 11 % oli lyhyttä kuitupuuta ja loput rankanippuja. Vastaavasti koivukuitupuunipuista 22 % oli lyhyttä kuitupuuta ja loput rankanippuja. Lyhyen ja pitkän mäntykuitupuun keskimääräisten tilavuuspainojen välillä ei ollut suurta eroa. Lyhyt koivukuitupuu oli keskimäärin 5,6 % painavampaa kuin koivuranka. Tämä johtuu siitä, että lyhyt koivukuitupuu toimitettiin pääosin (24 nippua) viikoilla 47 - 51, jolloin tilavuuspainot olivat suuria. Tilavuuspainon vaihtelu oli koivukuitupuulla hieman pienempi kuin mäntykuitupuulla. Lyhyen ja pitkän kuitupuun välillä ei tilavuuspainon vaihtelussa ollut eroa kummallakaan puulajilla.

3.2.1.2 Mittausajankohta

Mäntykuitupuun tilavuuspaino kasvoi viikosta 43 viikolle 48 ja aleni viikosta 48 viikolle 51. Viikoittainen tilavuuspainon vaihteluväli oli noin 200 kg.

TAULUKKO 7 Mäntykuitupuun tilavuuspaino viikoittain

Viikko	Nippuja, kpl	Tilavuuspainon keskiarvo, kg/m ³	Tilavuuspainon vaihtelu, kg/m ³
43	2	796	776 - 816
44	-	-	-
45	22	868	740 - 956
46	26	861	752 - 971
47	30	901	807 - 1 012
48	15	914	830 - 997
49	25	907	774 - 1 015
50	26	864	765 - 946
51	18	877	756 - 955
Yhteensä	164	882	740 - 1 015

Koivukuitupuun tilavuuspaino kasvoi viikosta 44 viikolle 48 ja pysyi tämän jälkeen melko tasaisena viikolle 51 saakka. Viikoittainen tilavuuspainon vaihteluväli oli noin 150 kg.

TAULUKKO 8 Koivukuitupuun tilavuuspaino viikoittain

Viikko	Nippuja, kpl	Tilavuuspainon keskiarvo, kg/m ³	Tilavuuspainon vaihtelu, kg/m ³
43	-	-	-
44	3	900	864 - 939
45	20	904	850 - 984
46	21	937	805 - 1 017
47	17	965	878 - 1 079
48	8	989	950 - 1 059
49	16	940	793 - 1 043
50	20	956	846 - 1 078
51	15	966	904 - 1 019
Yhteensä	120	945	793 - 1 079

3.2.1.3 Pölkyn keskijäreys

Mäntykuitupuunipun pölkkyjen keskiläpimitan kasvaessa tilavuuspaino pieneni lineaarisesti. Regressioyhtälö on $1086,8 - 16,449 \cdot d$ ja selitysaste 0,2098.

Koivukuitupuunipun pölkkyjen keskiläpimitan kasvaessa tilavuuspaino sitä vastoin kasvoi vähän. Regressioyhtälö on $867,83 + 6,6306 \cdot d$ ja selitysaste vain 0,0471.

3.2.1.4 Varastointiaika

Varastointiaika laskettiin hakkuuajan ja vastaanottomittauksen ajankohdan perusteella 97 koivukuitupuunipusta ja 135 mäntykuitupuunipusta.

Varastointiaika oli enintään 10 viikkoa 94 %:ssa koivukuitupuunipuista ja 91 %:ssa mäntykuitupuunipuista. Kolmen koivukuitupuunipun varastointiaika oli 33 - 34 viikkoa eli ne olivat olleet kesän yli varastossa. Kaksi mäntykuitupuunippua oli ollut koko kesän varastossa (varastointiajat 23 ja 26 viikkoa). Varastointiajan kasvaessa koivukuitupuun tilavuuspaino pieneni enemmän kuin mäntykuitupuun tilavuuspaino. Kun tarkasteltiin enintään 10 viikkoa kuivuneita eriä, varastointiajan vaikutus oli koivukuitupuulla pienempi ja mäntykuitupuulla varastointiaika ei enää vaikuttanut tilavuuspainoon.

TAULUKKO 9 Tilavuuspainon regressioyhtälöt puutavaran varastointiajan suhteen

Aineisto	Vakio	Kerroin	Selitysaste
Mänty, kaikki	887,5	-1,4997	0,0119
Mänty, enintään 10 viikkoa	879,5	+0,3166	0,0002
Koivu, kaikki	964,8	-3,9414	0,1659
Koivu, enintään 10 viikkoa	962,6	-3,1221	0,0283

3.2.1.5 Kasvupaikka

Kasvupaikka oli rekisteröity 135 mäntykuitupuunipusta ja 97 koivukuitupuunipusta. Männyllä puun kuivatuoretiheys yleensä kasvaa kasvupaikan heiketessä, koska kevyen kevätpuun osuus puuaineessa pienenee. Toisaalta sydänpuuosuus samankokoisissa männyissä kasvaa kasvupaikan heiketessä, jolloin kosteaa ja painavaa pintapuuta on vähemmän karulla kasvupaikalla kuin hyvällä kasvupaikalla. Siten männyllä kasvupaikan vaikutusta tilavuuspainoon ei voi suoraan ennustaa.

Tutkimusaineiston niput olivat etupäässä tuoreelta, kuivahkolta tai kuivalta kankaalta. Kuivan kankaan niput olivat keskimäärin hieman yli 40 kg kevyempiä kuin tuoreen ja kuivahkon kankaan niput. Erot olivat tilastollisesti merkittäviä. Aineiston mukaan rämeeltä hakattu mäntykuitupuu olisi tilavuuspainoltaan lähes 40 kg painavampaa kuin korvesta hakattu mäntykuitupuu. Tosin nippuja oli näiltä kasvupaikoilta vain vähän.

TAULUKKO 10 Mäntykuitupuun tilavuuspaino kasvupaikoittain

Kasvupaikka	Nippuja, kpl	Tilavuuspainon	
		keskiarvo, kg/m ³	keskihajonta, kg/m ³
Lehto	1	1 015	-
Lehtomainen kangas	-	-	-
Tuore kangas	46	896	62,2
Kuivahko kangas	30	897	45,1
Kuiva kangas	45	854	44,6
Karukko kangas	-	-	-
Räme	9	873	15,8
Korpi	4	835	52,0

Hyvä kasvupaikka ei yleensä vaikuta koivun kuivatuoretiheyteen. Koivun tutkimusaineisto oli pääosin tuoreelta ja kuivahkolta kankaalta sekä rämeeltä ja korvesta. Tuoreen ja kuivahkon kankaan koivukuitupuun tilavuuspaino oli suunnilleen sama, mutta lehtomaisella kankaalla noin 50 kg suurempi, tosin nippuja oli tältä kasvupaikalta vain 3 kpl. Rämeen ja korven koivukuitupuu oli suunnilleen samanlaista, mutta tilavuuspaino oli 30 - 40 kg pienempi kuin kangasmaan kasvupaikoilla.

TAULUKKO 11 Koivukuitupuun tilavuuspaino kasvupaikoittain

Kasvupaikka	Nippuja, kpl	Tilavuuspainon	
		keskiarvo, kg/m ³	keskihajonta, kg/m ³

Lehto	-	-	-
Lehtomainen kangas	3	1 004	8,5
Tuore kangas	35	956	58,2
Kuivahko kangas	23	942	62,7
Kuiva kangas	1	956	-
Karukko kangas	-	-	-
Räme	15	919	61,5
Korpi	20	929	44,9

3.2.1.6 Hakkuutapa

Hakkuutapa vaikuttaa puun tilavuuspainoon puun iän myötä. Hakkuutapa oli rekisteröity 140 mäntykuitupuunipusta ja 97 koivukuitupuunipusta. Ensiharvennuskannan tilavuuspaino oli 15 kg suurempi kuin muun harvennuskannan ja lähes 40 kg suurempi kuin päätehakkuan mäntykuitupuun tilavuuspaino. Tilavuuspainon pieneminen kannalla iän myötä johtuu sydänpuosuuden kasvusta.

Koivukuitupuulla ei hakkuutapa vaikuttanut tilavuuspainoon, sillä harvennusten koivukuitupuun tilavuuspaino oli sama ja päätehakkuan koivukuitupuun oli keskimäärin vain 6 kg kevyempää.

TAULUKKO 12 Mänty- ja koivukuitupuun tilavuuspaino hakkuutavoittain

Hakkuutapa	Nippuja, kpl	Tilavuuspainon	
		keskiarvo, kg/m ³	keskihajonta, kg/m ³
Mänty			
- ensiharvennus	15	909	64,1
- muu harvennus	44	894	59,7
- päätehakkuu	81	870	50,5
Koivu			
- ensiharvennus	21	946	50,4
- muu harvennus	21	946	69,3
- päätehakkuu	55	940	56,9

3.2.1.7 Varastopaikka

Puutavaran varastopaikan varjoisuus tai aurinkoisuus vaikuttaa kuitupuun kuivumisnopeuteen kesäaikana. Tutkimuksessa varastopaikka luokitettiin kahteen luokkaan: metsä ja aukea. Varastopaikka oli rekisteröity 140 mäntykuitupuunipusta ja 97 koivukuitupuunipusta.

Metsään varastoidun mäntykuitupuun tilavuuspaino oli keskimäärin 32 kg suurempi kuin aukealle varastoidun mäntykuitupuun tilavuuspaino. Ero on tilastollisesti merkitsevä.

Metsään varastoidut koivukuitupuuniput olivat keskimäärin 25 kg painavampia kuin aukealle varastoidut niput. Ero on tilastollisesti merkitsevä.

TAULUKKO 13 Mänty- ja koivukuitupuun tilavuuspaino varastopaikoittain

Varastopaikka	Nippuja, kpl	Tilavuuspainon	
		keskiarvo, kg/m ³	keskihajonta, kg/m ³
Mänty			
- metsä	78	896	53,3
- aukea	62	864	55,6
Koivu			
- metsä	53	954	50,4
- aukea	44	929	63,9

3.2.2 Tilavuuspainomalli

Tutkimusaineiston muuttujien avulla pyrittiin rakentamaan mänty- ja koivukuitupuulle tilavuuspainomallit. Aineistosta poistettiin ne niput, joista ei kaikkia tietoja rekisteröity. Ensin tutkittiin eri muuttujien välistä riippuvuuksia korrelaatioanalyysillä, jonka jälkeen parhaat tunnuksset valittiin tilavuuspainomallin selittäviksi muuttujiksi.

Mäntykuitupuun tilavuuspainoa selittivät parhaiten pölkyn keskijäreys (-0,45), kasvupaikkatyyppi (-0,33) ja varastopaikka (-0,28). Kun aineistosta poistettiin 13 räme- ja korpimaan nippua, parani kasvupaikkatyyppin korrelaatiokerroin (-0,37). Mäntykuitupuun regressioyhtälöön valittiin selittäviksi muuttujiksi pölkyn keskijäreys ja kasvupaikkatyyppi (ei turvemaan kasvupaikkatyyppiä). Regressioyhtälöksi muodostui $1139 - 14,9 \times d - 17,4 \times b$, jossa d = pölkyn keskijäreys, cm ja b = kasvupaikkatyyppin koodi (1 = lehto ... 5 = kuiva kangas). Tilavuuspainoyhtälön selitysaste jäi heikoksi (31 %) ja yhtälön keskivirhe oli 47 kg. Lisämuuttujat paransivat vain vähän yhtälön tarkkuutta.

Männyn tilavuuspainomalli määritettiin myös siten, että laskettiin kolmannen asteen tasoituskäyrä mittaajankohdan suhteen ja tämän jäännösvaihtelua selitettiin pölkyn keskijäreiden ja kasvupaikan avulla. Tällä tavalla päästiin samaan keskivirheeseen (47 kg eli 5,3 %) kuin edellä. Nippukohtainen virhe vaihteli -14 %:sta +19 %:iin. Viimeksi

mainitulla tavalla laskettu tilavuuspainomalli antanee paremman tuloksen, kun aineisto ulottuu koko vuoden ajalle.

Koivukuitupuun tilavuuspainoa selittivät parhaiten varastointiaika (-0,41), mittausajankohta (0,28), kasvupaikkatyyppi (-0,25) ja varastopaikka (-0,23). Pölkyn keskijäreyden ja tilavuuspainon riippuvuus oli hyvin pieni (0,15). Koivukuitupuun regressioyhtälöön valittiin selittäviksi muuttujiksi mittausajankohta, kasvupaikkatyyppi ja varastointiaika. Regressioyhtälöksi muodostui $530 + 9,9 \times \text{vko} - 7,9 \times \text{b} - 3,9 \times \text{va}$, jossa vko = mittausviikko, b = kasvupaikkatyyppin koodi ja va = varastointiaika, viikkoa. Tilavuuspainoyhtälön selitysaste oli 32 % ja yhtälön keskivirhe 47 kg.

Tilavuuspainomalli määritettiin myös koivukuitupuulla siten, että laskettiin kolmannen asteen tasoituskäyrä mittausajankohdan suhteen ja tämän jäännösvaihtelua selitettiin kasvupaikan ja varastointiajan avulla. Tällä tavalla päästiin hieman pienempään keskivirheeseen (45 kg eli 4,8 %) kuin edellä. Nippukohtainen virhe vaihteli -11 %:sta +13 %:iin. Viimeksi mainitulla tavalla laskettu tilavuuspainomalli antanee myös koivukuitupuulla paremman tuloksen, kun aineisto ulottuu koko vuoden ajalle.

4 PÄÄTELMÄT

Kirjallisuustutkimuksen tulokset osoittavat, että puutavaran tilavuuspaino määräytyy melko monimutkaisesti monen vaikuttavan tekijän perusteella. Suppeassa tutkimusaineistossa ei mitattu suoraan kirjallisuusosassa mainittuja tilavuuspainomallin osatekijöitä, vaan sellaisia tunnuksia, jotka välillisesti vaikuttavat mallin tunnuksiin. Aineiston tunnuksien olivat karkeita luokituksia, jotka soveltuvat jatkuvia muuttujia huonommin mallin rakennusosiksi. Aineiston keruu-aika oli lyhyt, joten tilavuuspainon ajallista vaihtelua ei juuri ollut.

Edellä mainitut rajoitukset huomioiden aineistosta lasketut tulokset ovat pääosin tyydyttävät. Tilavuuspainon ja tunnusten väliset riippuvuudet olivat ennako-oletusten mukaiset. Aineiston perusteella laskettujen tilavuuspainojen tarkkuus ei ollut riittävän hyvä. Tilavuuspainon vaihtelu puutavaraerien välillä on pienempi kuin nippujen välillä, joten mallit antanevat hieman parempia tuloksia koko puutavaraerälle.

Tutkimustulosten perusteella todetaan, että tilavuuspainomallin kehittämiseksi on olemassa riittävät perustiedot. Riittävän tarkkuuden saavuttamiseksi tulisi mallin tunnuksien valita luokitustunnusten sijasta jatkuvista muuttujista, jotka voidaan määrittää riittävän tarkasti ja luotettavasti. Tällaisia tunnuksia ovat esim. puuston ikä, järeys ja sydänpuuosuus.

KIRJALLISUUS

HAKKILA, P. 1966. Investigations on the basic density of Finnish pine, spruce and birch wood. *Communicationes Institutum Forestale Fenniae* 61.5. 98 s.

–"– 1967. Vaihtelumalleja kuoren painosta ja painoprosentista. *Communicationes Institutum Forestale Fenniae* 62.5. 37 s.

–"– & UUSIVAARA, O.1968. On the basic density of plantationgrown norway spruce. *Communicationes Institutum Forestale Fenniae* 66.6. 23 s.

–"– 1968. Geographical variation of some properties of pine and spruce pulpwood in Finland. *Communicationes Institutum Forestale Fenniae* 66.8. 60 s.

–"– 1979. Wood density survey and dry weight tables for pine, spruce and birch stems in Finland. *Communicationes Institutum Forestale Fenniae* 96.3. 59 s.

–"– & KALAJA, H. & SAARENPÄÄ, P. 1995. Etelä-Suomen ensiharvennusmänniköt kuitu- ja energialähteenä. (Luonnos)

KELLOMÄKI, S. 1979. On geoclimatic variation in basic density of scots pine wood. *Silva Fennica* 13 (1). s. 55 - 64

KOKKOLA, J. 1991. Sulfaattikuitupuun varastoinnin kannattavuus Pohjois- Suomessa. Joensuun yliopiston opinnäytetyö. 56 s.

KORHONEN, K. & MALTAMO, M. 1990. Männyn maanpäällisten osien kuivamassat Etelä-Suomessa. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 371. 29 s.

KÄRKKÄINEN, M. 1972. Kuusen ja männyn sydänpuuosuudesta. *Silva Fennica* vol. 6 n:o 3. s. 193 - 208.

–"– 1976. Havutukkien painomittauksen edellytyksiä puutieteelliseltä kannalta. *Communicationes Institutum Forestale Fenniae* 89.1. 58 s.

–"– 1985. Puutiede. Sotkamo. Sallisen kustannus. s. 14 - 181, 267 - 278

LEINONEN, E. & PULLINEN, E. 1971. Tilavuuspaino-otanta kuitupuun mittauksessa. *Folia Forestalia* 100. 21 s.

LEINONEN, E. 1972. Tilavuuspaino-otanta sahatukkien mittauksessa. *Folia Forestalia* 145. 15 s.

LYÖTTYNIEMI, K. 1986. Männyn sydänpuu - luonnon kestopuuta. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 231. 49 s.

MARJOMAA, J. & OIJALA, T. 1990. Puutavaralajien tuoretiheyksien ja puutavaran autokuljetusmäärien vaihtelu. Metsätehon katsaus 10/1990. 6 s.

–"– 1992. Puutavaralajien tuoretiheyksien vaihtelu. Metsätehon katsaus 4/1992. 8 s.

SAIKKU, O. & RIKKONEN, P. 1976. Kuitupuun kuoren määrä ja siihen vaikuttavat tekijät. Folia Forestalia 262. 22 s.

SIKANEN, L. 1993. Metsätraktorin kuormainvaakaan perustuvan mittaus- menetelmän soveltuvuus puutavaran tilavuusmittaukseen. Joensuun yliopiston opinnäytetyö. 27 s.

UUSVAARA, O. 1974. Wood quality in plantationgrown scots pine. Communicationes Institutum Forestale Fenniae 80.2. 105 s.