



Timo Kärki



Kalle Eerikäinen



Jaakko Heinonen



Kari T. Korhonen

Timo Kärki, Kalle Eerikäinen, Jaakko Heinonen ja  
Kari T. Korhonen

## Harmaalepän (*Alnus incana*) tilavuustaulukot

**Kärki, T., Eerikäinen, K., Heinonen, J. & Korhonen, K.T.** 1999. Harmaalepän (*Alnus incana*) tilavuustaulukot. Metsätieteen aikakauskirja 1/1999: 39–49.

Tutkimuksessa esitetään harmaalepän tilavuusmalli yhtälön ja taulukoiden muodossa. Lisäksi tutkimuksessa esitetään kuoren osuuden malli ja dimensiovaatimusten mukaan lasketut tukkivilavuuden taulukot. Tukkitilavuudet vaihtelevat huomattavasti dimensiovaatimusten mukaan. Eri dimensiovaatimusten vertailtaessa on kuitenkin huomattava, että pienten latvaläpimittaluokkien käyttö sahauskassa edellyttää suoraa runkomuotoa, jotta pienten dimensioiden kannattava sahaus olisi mahdollista.

Harmaalepälle lasketut tilavuudet ovat pienempiä kuin vastaavan läpimittaisten koivujen tilavuudet, kun tarkastellaan läpimitaltaan suuria ( $d > 15$  cm) mutta pituudeltaan lyhyitä ( $h < 10$  m) puuluokkia. Tällöin harmaalepän taulukoidut runkotilavuudet suurimmissa läpimittaluokissa ovat enimmillään noin 10 prosenttia pienemmät kuin vastaavien läpimittaluokkien koivun runkotilavuudet. Kun tarkastelu kohdennetaan pituudeltaan suuriin mutta läpimitaltaan pieniin taulukoiden puuluokkiin, saadaan nyt esitetyllä harmaalepän tilavuustaulukolla suurempia runkotilavuuden ennusteita kuin koivun tilavuustaulukolla. Erot tilavuuksissa ovat tällöin enimmillään 11 prosenttia.

Asiasanat: harmaaleppä, tilavuustaulukot, kuorimallit

Yhteystiedot: *Kärki & Eerikäinen*, Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu; *Heinonen*, Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimusasema PL 68, 80101 Joensuu; *Korhonen*, Metsäntutkimuslaitos, Unioninkatu 40 A, 00170 Helsinki. Faksi (013) 251 3590, sähköposti [timo.karki@forest.joensuu.fi](mailto:timo.karki@forest.joensuu.fi)

Hyväksytty 20.11.1998

# 1 Johdanto

Nopeakasvuinen kaskimaiden pioneeripuu leppä on ollut tutkimusten kohteena jo 1930-luvulta lähtien, jolloin Miettinen (1933) julkaisi luonnontilaisena kehittyneiden harmaalepikoiden kasvu- ja tuotostaulukot. Ensimmäisiä harmaaleppää käsiteltyjä tutkimuksia oli myös Kalelan (1936) julkaisu, jossa selvitettiin kuusi-harmaaleppäsekametsiköiden kasvua. Harmaalepän soveltuvuutta paperin raaka-aineeksi on tutkittu useassa tutkimuksessa (mm. Routala ja Sihtola 1934, Bruun ja Slungaard 1957, Alestalo ja Hentola 1967). Harmaalepän on todettu olevan lyhytkuituisempaa kuin muut suomalaiset puulajit. Harmaalepällä sellun saanto ja repäisy-lujuus ovat huonompia kuin muilla puulajeillamme. Jännityslujuus ja opasiteetti, eli valoa läpäisemättömyys, ovat puolestaan harmaaleppäsellulla parempia kuin koivusellulla. Myös valkaisu on helpompaa harmaaleppäsellulla kuin koivusellulla, ja vaaleus on valkaisun jälkeen kestävämpää kuin koivusellulla. Sahateollisuuden raaka-aineena harmaalepän suosio on kasvanut voimakkaasti viime vuosien aikana mm. saunan lauteiden ja paneelien valmistuksessa (Kärki 1997a). Muita merkittäviä käyttökohteita leppälle ovat huonekalut, käyttö- ja koriste-esineiden valmistus sekä käyttö massa- ja kuitulevyteollisuudessa. Saksalaisessa huonekaluteollisuudessa leppää käytetään sopivissa kohteissa pähkinä- ja kirsikkapuun sekä mahongin korvikkeena (Grosser 1989). Taulukossa 1 on esitetty harmaalepän osuus kokonaispuustosta metsämaalla 15 eteläisimmän metsäkeskuksen alueella.

Harmaalepän osuus runkoluvusta on suurin Itä-Hämeen (18,2 %) ja Etelä-Savon metsäkeskusten alueella (16,3 %). Pohjapinta-alalla mitattuna Pohjois-Savon (4,2 %) ja Itä-Savon (3,9 %) metsäkeskusten alueilla harmaalepän osuus puustosta on suurimmillaan. Samanlainen on tilanne myös tilavuuden perusteella mitattuna. Tämä kertoo Itä-Suomen järeämmästä leppäpuustosta; osuus runkoluvusta on vähäisempi, mutta osuus tilavuudesta ja pohjapinta-alasta on tästä huolimatta suurempi kuin eteläisten ja läntisten metsäkeskusten alueella.

Harmaalepän teknisiä ominaisuuksia ja käyttöä lyhytkiertoviljelyssä on tutkittu Suomessa useassa eri yhteydessä. Harmaalepän tiheyttä ja kuiva-ainesisältöä ovat selvittäneet Hakkila (1970) ja Björk-

**Taulukko 1.** Harmaalepän %-osuus runkoluvusta, pohjapinta-alasta ja tilavuudesta 15 eteläisimmän metsäkeskuksen alueella (VMI8).

	Runkoluvusta (%)	Pohjapinta-alasta (%)	Tilavuudesta (%)
Ahvenanmaa	0,9	0,6	0,4
Helsinki	2,7	1	0,7
Lounais-Suomi	1,3	0,4	0,3
Satakunta	2,6	0,9	0,6
Uusimaa-Häme	10,2	2,7	1,5
Pirkka-Häme	5,7	1,5	0,9
Itä-Häme	18,2	3,7	2,2
Etelä-Savo	16,3	3,2	1,8
Etelä-Karjala	7,7	2	1,2
Itä-Savo	14,9	3,9	2,4
Pohjois-Karjala	15	3,1	2
Pohjois-Savo	13,7	4,2	2,7
Keski-Suomi	10,1	2	1,2
Etelä-Pohjanmaa	1,2	0,6	0,4
Pohjanmaa	1,8	1,2	0,8
Keski-Pohjanmaa	4	1,6	1,3

lund ja Ferm (1982) sekä ominaisuuksia ja saatauvuutta Grönros ym. (1995). Harmaalepikoiden biomassan tuotosta ja ravinteiden käyttöä ovat tutkineet Saarsalmi ym. (1983), Saarsalmi ym. (1985, 1991, 1992), Saarsalmi ja Mälkönen (1989) ja Saarsalmi (1995). Leppäpuun käyttöä ja markkinoita Suomessa ovat selvittäneet Louna ja Valkonen (1995) ja Kärki (1997a, 1997b).

Ensimmäiset laajat kotimaiset puiden tilavuustaulukot julkaisi Suomessa Ilvessalo (1947). Taulukoiden laadinta perustui graafiseen tasoitukseen. Laasasenahon (1982) julkaisemien männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöiden perusteella on julkaistu vastaavat tilavuustaulukot (Laasasenaho ja Snellman 1983). Kahteen muuttuunaan, rinnankorkeusläpimittaan ja pituuteen, perustuvien tilavuusyhtälöiden avulla lasketut taulukot sisältävät tilavuudet yli 3 m:n mittaisille puille. Samassa tutkimuksessa on esitetty myös muutamiin suhteellisilta korkeuksilta mitattuihin läpimittoihin ja pituuteen perustuvat tilavuusyhtälöt.

Harmaalepän hyödyntämisen ja kaupan kannalta on olennaista, että puun kauppaa ja määrien arvioimista varten on olemassa pystypuun kuutiointiin

soveltuvat tilavuustaulukot, kuten myös tukki/energiapuuosuuden arviointiin soveltuvat tilavuustaulukot. Harmaalepän runkomuotoa ja kuoritulavuuksia ovat tutkineet Mäkinen (1984) sekä Kärki ym. (1998). Viimeksi mainitussa tutkimuksessa selvitettiin runkomuodon lisäksi myös harmaaleppien runkomuotoa, laadun kehittymistä ja lahoisuutta. Harmaaleppätukeille on esitetty suomalaisessa kirjallisuudessa useampia eri laatuluokituksia. Keinänen ja Tahvanainen (1995) ovat esittäneet harmaaleppätukkien minimipituudeksi 21 dm:ä sekä minimilatvaläpimitaksi 13 cm:ä. Kärki (1997a) on esittänyt harmaaleppätukkien minimipituudeksi 20 dm:ä sekä minimilatvaläpimitaksi 8 cm:ä.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on

- laatia yksittäisen puun tilavuustaulukot
- selvittää eri laatukriteereissä esitettyjen läpimitta- ja pituusvaatimusten vaikutus teoreettiseen tukkiosuuteen
- laatia kuorimallit, joiden avulla voidaan estimoida kuoren osuus tilavuudesta millä tahansa rungon osalla.

## 2 Aineisto ja menetelmät

### 2.1 Aineisto

Tutkimuksen varsinaisena aineistona käytettiin touko–elokuussa 1996 harmaaleppämetsiköistä mitattua kertakoeala-aineistoa Savo-Karjalan alueelta (Pohjois-Savon ja Pohjois-Karjalan läänit). Mittaukset keskitettiin ko. alueelle, koska harmaalepän esiintyminen on runsaampaa ja harmaalepän taloudellinen merkitys on tällä alueella suurempaa kuin muualla Etelä-Suomessa (taulukko 1). Erillisiä luontaisesti syntyneitä metsiköitä mittauksissa oli 33 kappaletta, joista mitattiin 83 koealaa. Kultakin koealalta mitattiin kaatokoepuuna läpimitaltaan pienin ja suurin puu sekä pohjapinta-alamediaanipuu. Kaadetusta puusta mitattiin kaksi läpimittaa ristikkäin mm:n tarkkuudella 1, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 ja 90 %:n suhteellisilta korkeuksilta. Kuoren paksuus mitattiin kuorimittarilla 5, 20 ja 60 %:n suhteellisilta korkeuksilta kahdelta puolelta runkoa 0,5 mm:n tarkkuudella. Puun pituus mitattiin kaadon jälkeen mittanauhalla 10 cm:n tarkkuudella.

Kaatokoepuita kaadettiin yhteensä 230 kappaletta, joista 223 puuta käytettiin laskennassa (taulukko 2). Seitsemän kaatokoepuuta jouduttiin hylkäämään ilmeisten mitta- ja kirjausvirheiden vuoksi. Lopullisen tutkimusaineiston analyysipuiden rinnankorkeusläpimitta ( $d_{1,3}$ ) vaihteli 3,8 cm:stä 25,9 cm:iin keskiarvon ollessa 12,8 cm. Analyysipuiden kokonaispituuden ( $h$ ) vaihteluväli oli 2,6–20,4 m ja keskiarvo 12,7 m.

Mitatut kaatokoepuut edustavat hyvin harmaalepälle ominaista kokojakaumaa, jossa sahauskelpoisten puiden rinnankorkeusläpimitta asettuu yleensä välille 15–20 cm ja pituus välille 10–14 metriä.

Edellä kuvattua aineistoa kutsutaan jäljempänä varsinaiseksi aineistoksi. Tutkimuksessa käytettiin testiaineistona myös Pohjois-Karjalan Ilomantsissa mitattuja 88 leppäkoepuuta. Aineistossa kustakin puusta on mitattu puun rinnankorkeusläpimitta, pituus sekä kuorelliset läpimitat samoilta suhteellisilta korkeuksilta kuin edellä kuvatussa aineistossa. Lisäksi aineistossa on mitattu kuoren paksuudet kaikilta luettuilta suhteellisilta korkeuksilta. Aineisto edustaa maantieteellisesti suppeaa aluetta. Aineistossa havaittiin muutamia epäloogiselta vaikuttavia kuoren paksuuden arvoja. Tästä syystä aineistoa hyödynnettiin vain ennustettaessa varsinaiseen aineistoon puuttuvia kuoren paksuuksia. Jäljempänä aineistoa kutsutaan testiaineistoksi.

### 2.2 Tilavuustaulukoiden laadinta

Puusta mitattaviin pituus- ja läpimittatunnuksiin perustuvat tilavuusyhtälöt ovat usein tulomuotoisia (Laasasenaho 1982, Crow ja Schlaegel 1988). Ne ovat yksinkertaisia käyttää ja niiden avulla saadaan keskimäärin varsin tarkkoja tilavuusestimaatteja. Esimerkiksi Laasasenaho (1982) esittää männyn, kuusen ja koivun rinnankorkeusläpimittaan ja pituuteen perustuvien tilavuusyhtälöiden tilavuusestimaattien keskivirheiden vaihtelevan välillä 7,2–8,5 %.

Tilavuusyhtälö laadittiin 10 cm:n kannonkorkeudelta puun latvaan määritetyille kuorellisille runkotilavuuksille. Havaittuina eli mitattuina runkotilavuuksina käytettiin kuutiოსplinimenetelmällä estimoituja tilavuuksia (Lahtinen ja Laasasenaho 1979). Interpolaatiosplinin toimivuus ja luotettava käyttäytyminen todettiin splinirunkokäyrien runkokohtai-

**Taulukko 2.** Koepuiden jakautuminen rinnankorkeusläpimitta- ja pituusluokkiin.

<i>h</i> , m	<i>d</i> <sub>1,3</sub> , cm																										Σ
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26				
3		1																								1	
4																											
5																											
6	1	3								1	1					1											7
7			2	1	1																						4
8			2	3	1																						6
9		2	4	3	2					1																	12
10			1	3	6	1	6	3	1																		21
11				3	1	2	1	6		1	3	2	1														20
12					5	1	6	6	3	3	1	3	2	1	1			1									33
13						2	4	4	2	2	2	1	2	1	3	1											24
14						1	6	1	2	2	2	3	4	6	1	1	1				1						31
15						1	3	2			1	1	4	3	1	1	2	2			2						23
16											1	3	3	7		2				1					1		18
17										2	1	1	2	2	4	1			1								14
18											1	1			1			1		1							5
19																		1									1
20															1			1	1								3
Σ	1	6	9	13	16	8	26	23	9	13	14	18	21	12	13	6	7	3	1	3				1			223

nessa graafisessa tarkastelussa. Analyysipuuaineiston spatiaaliseen hierarkiarakenteesta johtuen oli perusteltua olettaa, että eri havaintojen virhetermit ovat keskenään korreloituneita. Tästä alkuoletuksesta johtuen parametrit estimoitiin yleistetyin pienimmän neliösumman menetelmällä (ks. Lappi 1993, s. 64–68) käyttäen SAS-tilasto-ohjelman PROC MIXED –proseduuria (SAS 1992). Sekamallin kiinteän osan selittäjät valittiin testaamalla läpimitan (*d*) ja pituuden (*h*) erilaisia muunnoksia sekä niiden eri kombinaatioita. Harmaalepän runkotilavuudelle laadittu lineaarinen sekamalli oli muotoa:

$$\ln(v) = c_0 + c_1d + c_2(d)^2 + c_3(\ln(d))^2 + c_4(\ln(h))^3 + b_i + w_{ij} + e_{ijk} \tag{1}$$

missä

- v* = kuorellinen runkotilavuus, dm<sup>3</sup>
- d* = rinnankorkeusläpimitta, cm
- h* = pituus, m
- b<sub>i</sub>* = metsikön *i* satunnainen metsikkövaikutus
- w<sub>ij</sub>* = metsikön *i* koealan *j* satunnainen koalavaikutus

*e<sub>ijk</sub>* = satunnainen virhetermi metsikön *i* koealan *j* puussa *k*

*c*<sub>0</sub>..*c*<sub>4</sub> = estimoitavia parametrejä.

Tilavuusyhtälön parametriestimaatit ja niiden luotettavuustunnukset esitetään taulukossa 3.

Mallin kokonaisjäännösvaihtelusta metsiköiden välisen vaihtelun varianssikomponentti  $\hat{\sigma}_m^2$  selittää

**Taulukko 3.** Tilavuusyhtälön parametriestimaatit ja niiden luotettavuustunnukset.

Parametri	Estimaatti	Keskivirhe	p-arvo
<i>c</i> <sub>0</sub>	0,6042	0,066	< 0,001
<i>c</i> <sub>1</sub>	-0,4641	-0,089	< 0,001
<i>c</i> <sub>2</sub>	0,0046	0,001	< 0,001
<i>c</i> <sub>3</sub>	1,2356	0,136	< 0,001
<i>c</i> <sub>4</sub>	0,0557	0,002	< 0,001
$\hat{\sigma}_m^2$	0,0005	0,002	0,36
$\hat{\sigma}_k^2$	0,0002	0,002	0,74
$\hat{\sigma}_e^2$	0,0078	0,002	< 0,001

**Taulukko 4.** Laadinta-aineistossa määritetyt läpimittaluokittaiset suhteellisen keskivirheen (RMSE<sub>i</sub>) sekä absoluuttisen ja suhteellisen harhan (B<sub>i</sub>) estimaatit tilavuus- (*i* = *t*) ja runkokäyräyhtälön (*i* = *r*) tilavuusestimaateille.

Läpimitta-lk	<i>n</i>	RMSE <sub>t</sub> , %	RMSE <sub>r</sub> , %	B <sub>t</sub> , dm <sup>3</sup>	B <sub>r</sub> , dm <sup>3</sup>	B <sub>t</sub> , %	B <sub>r</sub> , %
4	5	6,312	6,007	0,022	0,163	0,418	3,346
6	18	8,283	7,862	-0,221	-0,601	-1,789	-4,504
8	25	9,919	9,988	1,126	0,862	3,708	2,628
10	38	5,746	5,658	-1,038	-0,417	-1,887	-0,738
12	35	7,729	7,944	-0,546	0,512	-0,971	0,717
14	23	12,277	12,432	0,795	2,178	1,003	2,275
16	40	9,755	9,821	0,769	1,403	0,803	1,249
18	20	11,622	11,626	-2,953	-3,157	-2,258	-2,436
20	12	6,687	6,662	6,768	6,561	3,046	2,763
22–	7	4,257	2,796	-6,967	-1,767	-1,656	-0,288
Koko aineistossa	223	9,001	9,049	-0,053	0,552	-0,036	0,373

6 % ja metsiköiden sisäisen vaihtelun komponentti  $\hat{\sigma}_k^2$  2 % (taulukko 3). Metsiköiden välistä ja koealojen välistä vaihtelua kuvaavien satunnaistekijöiden estimaatit ovat lähellä nollaa. Mallin jäännös-vaihtelun voidaan tulkita olevan pääasiassa puukohtaista satunnaisvirhettä. Käytettäessä sekamallin kiinteää osaa runkotilavuuden ennustajana on malliin ennen logaritmin palautusta lisättävä harhatto-muuskorjaus (Baskerville 1972), joka yhtälön 1 tapauksessa on estimoitujen varianssikomponenttien summa jaettuna kahdella ( $0,0085/2 = 0,00425$ ).

Tilavuustaulukoissa esitettävät harmaalepän kuorelliset runkotilavuudet estimoitiin harmaalepälle laaditulla tilavuusyhtälöllä. Rungon puutavaralajiositteiden osuudet kokonaistilavuudesta määritettiin runkokäyräyhtälöllä. Tilavuustaulukoiden laskennassa käytetty runkokäyräyhtälö esitetään Kärjen ym. (1998) tutkimuksessa. Tilavuustaulukoissa esitettävät puukohtaiset käyttöosan tilavuusestimaatit ovat siten runkokäyrällä määritetyn käyttöosan suhteellisen tilavuuden ( $v_{ko}/v_{kok}$ ) ja tilavuusyhtälöllä ennustetun kokonaistilavuuden tuloja. Laskentamenetelmän valintaan oli vaikuttamassa se, että tilavuusyhtälö käyttäytyi loogisemmin kuin runkokäyräyhtälö aineiston pienimpien läpimittaluokkien äärialueilla ja aineiston ulkopuolella ekstrapolointitilanteissa.

Koska tilavuustaulukoiden laadinta suoritettiin käyttäen sekä tilavuus- että runkokäyräyhtälöä, kat-

sottiin tärkeäksi suorittaa molempien menetelmien läpimittaluokittainen luotettavuustarkastelu, jossa luokitellulle aineistolle määritettiin eri tilastollisia virhetunnuksia. Taulukossa 4 esitetään sekä runkokäyrä- että tilavuusyhtälöllä laadinta-aineistolle estimoitujen runkotilavuuksien läpimittaluokittaiset keskivirheen ja harhan estimaatit.

Läpimittaluokittaisten keskivirhetunnusten perusteella voidaan todeta (taulukko 4), että menetelmät ovat lähestulkoon yhtä luotettavia. Kummallakin menetelmällä laskettujen estimaattien suhteellisen jäännös- tai virheen vaihtelu eri läpimittaluokissa oli samaa suuruusluokkaa ja koko aineistossa suhteellinen jäännös- tai virhe oli noin 9 %. Tilavuusestimaattien läpimittaluokittaisten harhan estimaattien etumerkki vaihteli eri läpimittaluokissa ja harhan estimaatit olivat itseisarvoltaan suurimpia suurissa läpimittaluokissa, mutta selitettävissä satunnaisvaihtelulla. Suhteellisen harhan estimaatit olivat lähes saman suuruisia sekä pienissä että suurissa läpimittaluokissa.

### 2.3 Kuorimallien laadinta

Varsinaisessa aineistossa kuoren paksuudet oli mitattu kolmelta suhteelliselta korkeudelta. Läpimitat olivat tiedossa 10 suhteelliselta korkeudelta. Kuorimallien laadinnan ensimmäisenä vaiheena oli kuo-

ren paksuuden estimoiminen niille 7 suhteelliselle korkeudelle, joilta kuoren paksuuksia ei tunnettu. Testiaineiston epäluotettavuuden vuoksi kiinnitettiin kuoren paksuutta ennustavan mallin valinnassa erityistä huomiota mallin rakenteen loogisuuteen. Näin päädyttiin seuraavankaltaiseen osamalleista koostuvaan malliin.

1. Suhteellisen korkeuden 1 % kuoren paksuus ekstrapoloidaan mitatusta 5 % kuoren paksuudesta.
2. Suhteellisten korkeuksien 10 ja 15 % kuoren paksuudet interpoloidaan mitatuista 5 ja 20 %:n korkeuksien kuoren paksuuksista sekä korkeuksien 30, 40 ja 50 % kuoren paksuudet vastaavasti 20 ja 60 % korkeuksien kuoren paksuuksista.
3. Suhteellisten korkeuksien 70, 80 ja 90 % kuoren paksuudet interpoloidaan 60 %:n korkeudelta mitatun ja latvaan estimoidun kuoren paksuuksista.

Kohdan 1 ekstrapolointi tehtiin estimoimalla testiaineistosta regressiomalli:

$$b_{1\%} / b_{20\%} = a_1 b_{5\%} / b_{20\%} \quad (2)$$

missä  $b_x$  on suhteellisen korkeuden  $x$  kuoren paksuus (mm) ja  $a_1$  on parametri.

Kohdan 2 interpoloinnit tehtiin estimoimalla malli

$$b_x = a_{1(x)} b_{5\%} + (1 - a_{1(x)}) b_{20\%}, \quad (3)$$

tai malli

$$b_x = a_{1(x)} b_{20\%} + (1 - a_{1(x)}) b_{60\%}, \quad (4)$$

missä  $x = \{10\%, 15\%, 30\%, 40\%, 50\%\}$  ja  $a_{1(x)}$  on suhteellisen korkeuden  $x$  kuoren paksuuden malliin liittyvä parametri.

Kohdan 3 interpoloinnit tehtiin estimoimalla malli

$$b_x = a_{1(x)} b_{60\%} + (1 - a_{1(x)}) a_2, \quad (5)$$

missä  $x = \{70\%, 80\%, 90\%\}$  ja  $a_2$  on parametri, joka voidaan tulkita kuoren paksuudeksi puun latvassa.

Parametri  $a_2$  estimoitiin epälineaarilla regressiolla kullekin suhteelliselle korkeudelle (70, 80 ja 90 %) erikseen. Parametriestimaatit olivat lähes samat, kuten teorian mukaisesti tulee ollakin. Lopulliseksi parametriestimaatiksi valittiin korkeuden 90

**Taulukko 5.** Kuoren paksuuksien ekstrapoloinnissa ja interpoloinnissa eri suhteellisille korkeuksille ( $x$ ) käytettyjen mallien parametriestimaatit ( $a_1$  ja  $a_2$ ).

$x, \%$	$a_1$	$a_2$
1	1,198	-
10	0,6255	-
15	0,3686	-
30	0,6702	-
40	0,5861	-
50	0,4016	-
70	0,7920	0,4865
80	0,4463	0,4865
90	0,2533	0,4865

% kuorimallin parametrien estimoinnin yhteydessä saatu estimaatti parametrille  $a_2$ . Muut edellä esitettyjen mallien parametrit estimoitiin pienimmän neliosumman menetelmällä. Saadut parametriestimaatit ovat taulukossa 5.

Puun kuoretonta tilavuutta ennustavaa mallia valittaessa päädyttiin käyttämään selitettävänä muuttujana kuorettona tilavuuden osuutta kuorellisesta tilavuudesta. Tämän muuttujan havaittiin riippuvan lineaarisesti puun läpimitasta. Pituus tai muut mahdolliset selittäjät eivät tulleet tarkasteluissa tilastollisesti merkittäviksi selittäjiksi. Täten mallin muodoksi tuli yhtälö 6:

$$v_u / v = a_0 + a_1 d \quad (6)$$

Jotta kuorettona tilavuus voitaisiin estimoida mille tahansa rungon osalle (esimerkiksi tukkiosalle), estimoitiin mallin 6 parametrit myös suhteellisille korkeuksille 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 ja 90 %. Tällöin selitettävässä muuttujassa käytettiin kuorellista ja kuoretonta tilavuutta 1 % korkeudelta korkeuteen 5 %, 10 %, 15 % jne. Saatuja parametriestimaatteja selitettiin edelleen suhteellisella korkeudella. Sekä  $a_0$ - että  $a_1$ -parametriestimaattia selittävän mallin muodoksi valittiin kolmannen asteen polynomi:

$$a_0 = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3 \quad (7)$$

$$a_1 = b_4 + b_5 x + b_6 x^2 + b_7 x^3 \quad (8)$$

Täten kuorettoman ja kuorellisen tilavuuden suhdetta kannon ja suhteellisen korkeuden  $x$  välisellä rungolla kuvattiin yhtälöllä 9:

$$v_u/v = b_0 + b_1x + b_1x^2 + b_3x^3 + (b_4 + b_5x + b_6x^2 + b_7x^3)d \quad (9)$$

## 3 Tulokset

### 3.1 Tilavuustaulukot

Harmaalepän tilavuustaulukoissa 6, 7, 8 ja 9 esitetyt kuorelliset runkotilavuudet ( $\text{dm}^3$ ) on määritetty yhden desimaalin tarkkuudella tilavuudeltaan alle  $100 \text{ dm}^3$ :n rungoille ja  $\text{dm}^3$ :n tarkkuudella yli  $100 \text{ dm}^3$ :n rungoille.

### 3.2 Kuorettoman osuuden mallit

Kuorettoman tilavuuden osuuden malliksi estimoitii yhtälö:

$$v_u/v = 0,9415 - 0,00096 \times d \quad (10)$$

Mallin 10 selitysasteeksi saatiin 0,015 ja läpimitan  $p$ -arvoksi 0,035. Mallin selitysaste on alhainen, sillä kuoren osuus tilavuudesta on lähes vakio puun koosta riippumatta (ks. taulukko 10).

Taulukkoon 10 on estimoitu yhtälöllä 10 kuorettoman tilavuuden osuus kuorellisesta tilavuudesta eri läpimittaluokissa.

Kuorettoman tilavuuden osuutta mille tahansa korkeudelle estimoivaksi malliksi saatiin yhtälö 11:

$$v_u(x)/v(x) = 0,0489x^3 - 0,1166x^2 + 0,0867x + 0,9226 + (0,0001x^3 + 0,0003x^2 - 0,0005x - 0,0008) d \quad (11)$$

## 4 Tulosten tarkastelu

Harmaalepälle ei ole aiemmin esitetty puukohtaisia tilavuustaulukoita, siten tässä tutkimuksessa laaditun kokonaisrunkotilavuuden taulukon (taulukko 7) vertailukohdaksi valittiin Laasasenahon ja Snell-

**Taulukko 6.** Harmaalepän kuorellinen kokonaisrunkotilavuus ( $\text{dm}^3$ ) 10 cm:n kannonkorkeudelta määritettynä.

$h, \text{ m}$	$d_{1,3}, \text{ cm}$																									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
2	1,4	2,2	3,4	5,1																						
3	1,4	2,3	3,6	5,4	7,6	10,4																				
4	1,6	2,5	3,9	5,8	8,2	11,2	14,6																			
5	1,7	2,7	4,2	6,3	8,9	12,2	15,9	20,2	24,9																	
6	1,8	2,9	4,6	6,9	9,8	13,3	17,4	22,0	27,2	32,8	38,8															
7	2,0	3,2	5,0	7,5	10,7	14,5	19,0	24,1	29,7	35,9	42,4	49,3	56,6													
8		3,5	5,5	8,2	11,7	15,9	20,8	26,4	32,6	39,3	46,4	54,0	62,0	70,4	79,1											
9			6,0	9,0	12,8	17,4	22,8	28,9	35,6	43,0	50,8	59,1	67,8	77,0	86,5	96,5	107									
10				9,8	14,0	19,0	24,9	31,6	38,9	47,0	55,5	64,6	74,2	84,1	94,6	105	117	129	142							
11					15,3	20,8	27,2	34,5	42,5	51,3	60,6	70,5	81,0	91,9	103	115	128	141	155	169	185					
12						22,6	29,7	37,6	46,4	55,9	66,1	76,9	88,3	100	113	126	139	153	168	184	201	220	240			
13							32,3	40,9	50,5	60,9	72,0	83,8	96,1	109	123	137	152	167	183	201	219	239	261	284		
14								44,5	54,9	66,2	78,3	91,1	105	119	133	149	165	182	200	218	239	260	284	309		
15									59,6	71,9	85,0	98,9	114	129	145	161	179	197	217	237	259	283	308	336		
16										77,9	92,2	107	123	140	157	175	194	214	235	257	281	306	334	364		
17											99,8	116	133	151	170	190	210	232	254	278	304	332	362	394		
18												126	144	164	184	205	227	250	275	301	329	359	391	426		
19													156	177	199	221	245	270	297	325	355	387	422	460		
20														190	214	239	265	292	320	351	383	418	455	496		

**Taulukko 7.** Harmaalepän tukkiosan tilavuus (dm<sup>3</sup>) 10 cm:n kannonkorkeudelta määritettynä, kun rungon osituskriteerinä käytetään tukin minimipituutta 21 dm ja latvaläpimittaa 13 cm (Keinänen ja Tahvanainen 1995).

h, m	d <sub>1,3</sub> , cm											
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
8		44,1	55,5									
9		46,7	59,4	71,8	84,1							
10		49,4	64,0	77,6	91,1	105	119					
11	34,5	51,6	67,9	83,5	98,8	114	129	145	162			
12	35,2	54,1	72,3	89,7	107	123	141	158	176	196	216	
13	36,1	56,9	77,3	96,5	115	134	152	172	192	213	235	259
14	37,4	60,4	83,1	104	125	145	165	186	208	231	256	282
15	39,1	64,8	89,9	113	136	158	180	202	226	251	278	306
16	41,5	70,4	98,1	124	148	172	196	220	246	273	301	332
17	44,7	77,6	108	135	161	187	213	239	267	296	327	360
18	49,4	86,8	119	149	177	204	232	260	290	321	355	391
19	56,2	98,2	133	164	193	223	252	283	315	349	385	423
20		107	146	180	211	243	274	307	342	378	416	458

**Taulukko 8.** Harmaalepän tukkiosan tilavuus (dm<sup>3</sup>) 10 cm:n kannonkorkeudelta määritettynä, kun rungon osituskriteerinä käytetään tukin minimipituutta 30 dm ja latvaläpimittaa 13 cm.

h, m	d <sub>1,3</sub> , cm											
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
9			59,4	71,8	84,1							
10			64,0	77,6	91,1	105	119					
11			67,9	83,5	98,8	114	129	145	162			
12		54,1	72,3	89,7	107	123	141	158	176	196	216	
13		56,9	77,3	96,5	115	134	152	172	192	213	235	259
14		60,4	83,1	104	125	145	165	186	208	231	256	282
15		64,8	89,9	113	136	158	180	202	226	251	278	306
16		70,4	98,1	124	148	172	196	220	246	273	301	332
17		77,6	108	135	161	187	213	239	267	296	327	360
18	49,4	86,8	119	149	177	204	232	260	290	321	355	391
19	56,2	98,2	133	164	193	223	252	283	315	349	385	423
20		107	146	180	211	243	274	307	342	378	416	458

mannin (1983) esittämä koivun kuorellisen kokonaisrunkotilavuuden taulukko. Voidaan todeta, että harmaalepän tilavuusennusteet ovat pienempiä kuin vastaavat koivun tilavuudet, kun tarkastellaan läpimitaltaan suuria ( $d > 15$  cm) mutta pituudeltaan lyhyitä ( $h < 10$  m) puuluokkia. Tällöin harmaalepän taulukoidut runkotilavuudet suurimmissa läpimittaluokissa ovat enimmillään noin 10 prosenttia pie-

nemmät suhteessa vastaavien läpimittaluokkien koivun runkotilavuuksiin. Kun tarkastelu kohdennetaan pituudeltaan suuriin, mutta läpimitaltaan pieniin taulukoiden puuluokkiin, saadaan nyt esitetyllä harmaalepän tilavuustaulukolla suurempia runkotilavuuden ennusteita kuin koivun tilavuustaulukolla. Erotukset ovat enimmillään 11 prosentin luokkaa. Tämä ero pienenee kuitenkin noin kuuteen pro-



**Taulukko 9.** Harmaalepän tukkiosan tilavuus (dm<sup>3</sup>) 10 cm:n kannonkorkeudelta määritettynä, kun rungon osituskriteerinä käytetään tukin minimipituutta 20 dm ja latvaläpimitä 8 cm (Kärki 1997a).

h, m	d <sub>1,3</sub> , cm																
	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
5		19,6															
6		20,7	27,0	33,5													
7	14,8	22,0	29,0	36,2	43,6	51,4											
8	15,3	23,3	31,2	39,2	47,4	55,9	64,7	73,8									
9	15,7	24,7	33,6	42,5	51,6	60,9	70,5	80,5	90,8	102							
10	16,1	26,2	36,1	46,0	56,0	66,3	76,9	87,8	99,1	111	123	136					
11	16,6	27,9	39,0	49,9	61,0	72,3	83,8	95,8	108	121	134	149	163	179			
12	17,2	29,8	42,1	54,2	66,4	78,8	91,4	104	118	132	147	162	178	195	214	234	
13	18,1	32,0	45,7	59,0	72,3	85,9	99,7	114	129	144	160	177	194	213	233	255	278
14	19,2	34,6	49,7	64,3	78,8	93,6	109	124	140	157	174	192	211	232	254	277	303
15		37,8	54,2	70,1	85,9	102	118	135	153	171	189	209	230	252	276	301	329
16			59,3	76,5	93,6	111	129	147	166	185	206	227	250	274	299	327	357
17				83,5	102	121	140	160	180	201	223	246	271	297	325	355	387
18					111	131	152	173	195	218	242	267	293	321	351	384	419
19						142	165	188	211	236	262	289	317	347	380	415	453
20							178	203	228	255	283	312	342	375	410	448	489

**Taulukko 10.** Kuorettoman tilavuuden osuus kuorellisesta tilavuudesta läpimitan funktiona.

d, cm	vu/v
1	0,941
2	0,940
3	0,939
4	0,938
5	0,937
6	0,936
7	0,935
8	0,934
9	0,933
10	0,932
11	0,931
12	0,930
13	0,929
14	0,928
15	0,927
16	0,926
17	0,925
18	0,924
19	0,923
20	0,922
21	0,921
22	0,920
23	0,919
24	0,918
25	0,917

senttiin, kun puuluokan pituus on 20 m ja rinnan- korkeusläpimita saa arvon 20 cm. Edellä tehtyjen tarkastelujen lähtökohtana ovat olleet tilavuustaulukon äärialueiden runkotilavuudet, joita voidaan pitää ekstrapolointeina. Harmaalepälle laaditun taulukon keskiosissa ( $d = 10$ ,  $h = 10$ ) tilavuudet ovat lähes yhtenevät koivun taulukon vastaavien läpimita- ja pituusluokkien tilavuuksien kanssa. Läpimitaluokkaa 20 suurempien luokkien havaintojen vähydestä johtuen (ks. taulukko 2) on tälle alueelle tilavuustaulukoissa esitettyihin runkotilavuuden ennusteisiin suhtauduttava varauksella.

Taulukoitujen puulajeittaisten runkotilavuuksien erojen syitä voivat olla puulajien toisistaan poikkeava runkomuoto sekä eritoten suurten puiden kohdalla eroa mahdollisesti aiheuttava erilainen kannonkorkeuden ts. puun kaatokohdan määrittäminen, joka tässä tutkimuksessa oli kaikissa läpimitaluokissa 10 cm maanpinnan tasosta määritettynä. Vertailukohtana käytetyn koivun tilavuustaulukon (Laasasenaho ja Snellman 1983) tapauksessa tilavuuden integraalin aloittamiskohdaksi oli määrätty ylin kaa-toa häiritsevä juurenhaaran niska, joka oli ennustettu erillisellä yhtälöllä. Kannonkorkeuden minimiksi oli asetettu kuitenkin 10 cm.

Tässä työssä on esitetty rungon kokonaistilavuus-

den sekä eri dimensiokriteereiden mukaiset teoreettisen tukkiosan tilavuusestimaatit harmaalepälle (taulukot 6–9). Tukin latvaläpimitan ja pituuden minimivaatimuksilla on huomattava vaikutus teoreettisen tukkiosan tilavuusestimaattiin. Estimoidessa tilavuuksia Keinäsen ja Tahvanaisen (1995) asettamien minimidimensioiden mukaan tilavuudet muodostuvat huomattavasti pienemmiksi kuin Kärjen (1997a) asettamalla minimivaatimuksilla. Esimerkiksi 14 cm:n läpimitaisen lepän on oltava 11 m pitkä, jotta se tuottaisi tukkiosaa minimivaatimuksilla 13 cm / 21 dm ja peräti 18 m pitkä minimivaatimuksilla 13 cm / 30 dm. Minimivaatimuksilla 8 cm / 20 dm 14 cm:n paksuinen puu tuottaa tukki-osaa jo 7 m:n pituisena.

Eri dimensiokriteerejä vertailtaessa on kuitenkin huomattava, että pienten latvaläpimitaluokkien käyttö sahausessa edellyttää suoraa runkomuotoa. Muutoin pienidimensioista puuta on järkevämpi käyttää esimerkiksi pyöreänä puuna rakentamisessa (Boren ym. 1998).

Taulukon 10 ja mallin 10 mukaan lepällä kuoren osuus tilavuudesta kasvaa puun läpimitan kasvaessa. Tulos on päinvastainen kuin esimerkiksi Mäkisen (1984) tutkimuksessa saatu tulos. Ero selittyy pääosin sillä, että Mäkisen aineistossa suurimmat harmaalepät olivat alle 15 cm läpimitaltaan, kun taas tämän tutkimuksen aineistossa on lähes 30 cm:kin läpimitaisia puita.

## Kiitokset

Kirjoittajat haluavat kiittää prof. Jouko Laasasenahoja ja VTT Juha Lappia heidän tekemistään lukuisista merkityksellisistä korjauseityksistä, jotka on otettu huomioon käsikirjoituksessa.

## Kirjallisuus

- Alestalo, A. & Hentola, Y. 1967. Leppä sulfaattikeitossa. Paperi ja Puu 50: 25–27.
- Baskerville, G.L. 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. Canadian Journal of Forestry 2: 49–53.
- Björklund, T. & Ferm, A. 1982. Pienikokoisen koivun ja harmaalepän biomassa ja tekniset ominaisuudet. Folia Forestalia 500. 37 s.
- Boren, H., Kärki, T. & Lindblad, J. 1998. Pyöröpuutuotteiden markkinat Englannissa ja Saksassa. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, Tiedonantoja 72. 34 s.
- Bruun, H.H. & Slungaard, S. 1959. Investigation of porous wood as pulp raw material. 3. Fibre dimensions of several NW European wood species. Paper and Timber 2: 31–34.
- Crow, T.R. & Schlaegel, B.E. 1988. A guide to using regression equations for estimating tree biomass. Northern Journal of applied forestry 5: 15–22.
- Grosser, D. 1989. Einheimische Nutzhölzer und ihre Verwendungsmöglichkeiten. Institut für Holzforchung der Universität München, München. 46 s.
- Grönros, J., Merra, A. & Mali, J. 1995. Kotimaisten puulajien ominaisuudet ja saatavuus. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 59 s.
- Hakkila, P. 1970. Basic density, bark percentage and dry matter content of grey alder (*Alnus incana*). Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 71(5). 33 s.
- Ivessalo, Y. 1947. Pystypuiden kuutioimistaulukot. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 34(4). 149 s.
- Kalela, E.K. 1936. Tutkimuksia Itä-Suomen kuusi-harmaaleppä-sekametsiköiden kehityksestä. Suomalaisen Kirjallisuuden Seuran kirjapaino Oy, Helsinki. 179 s.
- Keinänen, E. & Tahvanainen, V. 1995. Pohjolan jalot puut. Pohjois-Savon erikoispuiden käytön lisäämisprojekti. 160 s.
- Kärki, T. 1997a. Sahauskelpoisen erikoispuun laatuvaatimukset ja käyttö Savo-Karjalan alueella. Metsätieteen aikakauskirja – Folia Forestalia 1/1997: 37–48.
- 1997b. Haapa- ja leppätukkien kysyntä, hankinta ja laatu. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, Tiedonantoja 53. 78 s.
- , Maltamo, M. & Eerikäinen, K. 1998. Static models for describing tree stock and quality of grey alder forests in eastern Finland. Käsikirjoitus.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Seloste: Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 108. 74 s.
- & Snellman, C-G. 1983. Männyn, kuusen ja koivun tilavuustaulukot. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 113. 91 s.
- Lahtinen, A. & Laasasenaho, J. 1979. On the constructions of taper curves by using spline functions. Seloste: Runkokäyrän muodostaminen splini-funktiolla. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 97(8). 63 s.

- Lappi, J. 1993. Metsäbiometrian menetelmiä. *Silva Carelica* 24. 182 s.
- Louna, T. & Valkonen, S. 1995. Kotimaisen raaka-aineen asema lehtipuiden teollisessa käytössä. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 553. 38 s.
- Miettinen, L. 1933. Tutkimuksia harmaalepiköiden kasvusta. *Metsätieteellisen tutkimuslaitoksen julkaisuja* 18(1). 100 s.
- Mäkinen, T. 1984. Harmaalepän ja tervalepän runkomuoto, kuorimallit ja runkokäyrämallit. *Metsänarvioimistieteen pro gradu -tutkielma*. Helsingin yliopisto. 60 s. + liitteet.
- Nousiainen, J., Puranen, J. & Tiihonen, P. 1973. Koivutukkipuiden kuutioimis-menetelmä. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 79. 53 s.
- Routala, O. & Sihtola, H. 1934. Tutkimuksia lepän käytömahdollisuuksista selluloosan raaka-aineena. *Acta Chemica Fennica* 7: 113–119.
- Saarsalmi, A. 1995. Nutrition of deciduous tree species grown in short rotation stands. *University of Joensuu, Faculty of Forestry, Research Notes* 37. 60 s.
- & Mälkönen, E. 1989. Harmaalepikön biomassan tuotos ja ravinteiden käyttö. *Folia Forestalia* 728. 16 s.
- , Palmgren, K. & Levula, T. 1983. Viljelylepikon alkukehitys ja biomassaan sitoutuneiden ravinteiden määrä. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 107. 33 s.
- , Palmgren, K. & Levula, T. 1985. Leppäviljelmän biomassan tuotos sekä ravinteiden ja veden käyttö. *Folia Forestalia* 628. 24 s.
- , Palmgren, K. & Levula, T. 1991. Harmaalepän vesojen biomassan tuotos ja ravinteiden käyttö. *Folia Forestalia* 768. 25 s.
- , Palmgren, K. & Levula, T. 1992. Harmaalepän ja rauduskoivun biomassan tuotos ja ravinteiden käyttö energiapuuviljelmällä. *Folia Forestalia* 797. 29 s.
- SAS. 1992. SAS/STAT software: changes and enhancements, release 6.07. SAS Institute Inc., Cary, N.C., Technical report P-229. 620 s.
- Schalin, I. 1966. Harmaalepän merkityksestä käytännön metsätaloudessa. *Metsätaloudellinen aikakauslehti* 83(9): 362–366 s.
- Varmola, M. & Vuokila, E. 1986. Pienten mäntyjen tilavuusyhtälöt ja -taulukot. *Folia Forestalia* 652. 24 s.
- Vuokila, Y. 1960. Lehtikuusen kuutioimis-yhtälöt ja -taulukot. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 51(10). 89 s.

### 34 viitettä