



Lauri Mehtätalo

Lauri Mehtätalo

Valtakunnalliset puukohtaiset tukki- vähennysmallit männylle, kuuselle, koivuille ja haavalle

Mehtätalo, L. 2002. Valtakunnalliset puukohtaiset tukki-
vähennysmallit männylle, kuuselle, koivuille
ja haavalle. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2002: 575–591.

Tutkimuksen tavoitteena oli estimoida metsätalouden laskentajärjestelmiin soveltuvat puukohtaiset tukki-
vähennysmallit. Mallien laadinta-aineistona käytettiin Etelä-Suomen osalta VMI9:n ja Pohjois-Suomen osalta VMI8:n kertakoealojen tukkikokoisia koepuita. Mallit laadittiin logistisella regressioanalyysillä. Selittäjien etsinnässä käytettiin hyväksi Suomessa julkaistuja metsätuhotutkimuksia. Tukki-
vähennyksen puukohtaisia selittäjiä malleissa ovat puun läpimitta, ikä ja syntytapa. Läpimitasta ja iästä on samassa mallissa useita muunnoksia, mikä mahdollistaa tukki-
vähennyksen u-muodon kuvaamisen näiden muuttujien suhteen. Metsikkökohtaisia selittäjiä malleissa olivat metsätyyppi ja soistuneisuus. Alueellista vaihtelua malleissa selittävät metsikön x- ja y-koordinaatit, lämpösomma, valemuuttujat Ahvenanmaa ja Pohjois-Suomi sekä erilaiset muunnokset korkeudesta meren pinnasta.

Mallien harhaa tarkasteltiin alueellisesti jakamalla Suomi pohjois-eteläsuunnassa 200 km:n le-
vyisiin vyöhykkeisiin. Mallit toimivat suhteellisen hyvin kaikilla vyöhykkeillä. Lisäksi mallia testattiin
eteläsuomalaisessa päätehakkuuleimikkoaineistossa, joka sisälsi mänty- ja kuusivaltaisia metsiköitä.
Tässä aineistossa tukki-
vähennysmallilla saatu tukkiosuus oli muutamia prosentteja pienempi kuin
hakuissa toteutunut tukkiosuus. Ero johtunee siitä, että metsiköt olivat metsäyhtiön mailla
sijaitsevia päätehakkuuleimikoita, ja siksi keskimääräistä hyvälaatuisempia. Mallit ovat sidoksissa
laadinta-aineiston mitta- ja laatuvaatimuksiin. Herkkyyksianalyysillä tutkittiin mittavaatimusten muu-
toksen vaikutusta mallin harhaan. Mallin sovellustilanteessa tukin minimiläpimitan muuttu-
minen vaikuttaa mallin harhaan vain vähän, mutta tukin minimipituuden kasvattaminen kasvattaa
mallin harhaa nopeasti. Laadittu tukki-
vähennysmalliperhe soveltuu käytettäväksi metsätalouden
laskentaohjelmistossa rungon tukkiosuuden ennustamiseen.

Asiasanat: tukki-
vähennys, tukkiosuus, logistinen regressio, metsätuhot
Yhteystiedot: Metla, Joensuun tutkimuskeskus, PL 68, 80101 Joensuu
Sähköposti lauri.mehtatalo@metla.fi
Hyväksytty 16.10.2002

I Johdanto

Puutavaran laatua on viime vuosina tutkittu paljon (esim. Mäkelä ym. 2000). Tutkimuksissa on keskitytty saheidien laatuun vaikuttaviin rungon ominaisuuksiin. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan yksittäisen rungon tukkiosuutta ja siihen vaikuttavia puu- ja metsikkökohtaisia sekä alueellisia tekijöitä. Metsikkökohtaisia tukkiosuusmalleja on laadittu aikaisemminkin (Nyysönen ja Ojansuu 1982, Päivinen 1983), mutta niissä ei voida ottaa huomioon metsikön rakennetta eikä sitä, että yksittäisiin puihin perustuvassa puujoukon kuvauksessa puu voidaan jakaa dimensioiden puolesta eri puutavaralajeihin runkokäyrän avulla, jolloin tukkivähennysmallin tehtäväksi jää pelkästään tukiksi kelpaamattoman laatuosan osuuden ennustaminen teoreettisesta tukkiosasta. Puukohtaisiin malleihin perustuvassa laskentajärjestelmässä puuston kuvaus perustuu metsikön ennustetusta läpimittajakaumasta poimituihin kuvauspuihin. Kunkin kuvauspuun teoreettinen tukkiosuus voidaan laskea runkokäyrän avulla ja tukkiosan vikojen aiheuttama tukkiosuuden pieneneminen ennustaa puukohtaisella tukkivähennysmallilla.

MELA-simulaattorin puukohtainen tukkivähennysmalli (Hynynen ym. 2001) perustuu valtakunnan metsien 7 inventoinnin aineistosta laskettuihin ikä- ja läpimittaluokittaisten tukkivähennysten keskiarvoihin, joita on verrattu runkokäyrältä saatuihin tukkiosuuksiin (Päivinen 1983). Näiden erotusten perusteella tukkivähennys lasketaan lineaarisella interpoloinnilla. VMI7:n jälkeen tukin laatuvaatimukset ovat kiristyneet huomattavasti ja vanhat MELA:n mallit ovat siksi harhaisia. Vähäsaari (1988) ennusti männyn ja kuusen tukkivähennystä Etelä-Suomessa. Aineiston suppeus rajoitti kuitenkin tarkasteltavat tekijät vain puukohtaisiin tunnuksiin, eivätkä muissa tutkimuksissa merkitseviksi tulleet selittäjät tulleet merkittäviksi. Männyn mallissa selittäjänä käytettiin vain läpimittaa ja kuusen mallissa päädyttiin käyttämään aineiston keskiarvoa. Estimoidussa varianssikomponenttimallissa n. 1% mallin jäännösvaihtelusta oli metsiköiden välistä vaihtelua, ja loput vaihtelusta jäi metsiköiden sisäiseksi satunnaisvaihteluksi.

Suomessa tukin laatuoluokituksen perustana on

yleensä ns. lopputuotelähtöinen apteeraus (Häyrynen 1997). Siinä tukit jaetaan kolmeen luokkaan, jotka ovat oksaton I-laatu, terveoksainen II-laatu ja kuivaoksainen III-laatu. Luokkien laatuvaatimukset eivät juurikaan vaihtele, mutta laatuoluokkien mitta-vaatimukset vaihtelevat paljonkin puun ostajien välillä ja eri aikoina. Jos jotain laatuoluokkaa on tarjolla niukasti, pienennetään ko. laadun minimimitkin kokovaatimuksia, jotta tätä laatua saataisiin enemmän. Rungon optimaalinen apteeraus ei välttämättä tarkoita tukin tilavuutta maksimoivaa apteerausta (ks. Laasasenaho ja Sevola 1972), vaan laatuoluokkien hintaerojen vuoksi voi olla kannattavaa tehdä osasta puuta hyvälaatuinen tukki, vaikka silloin osa tukkikokoisesta rungonosasta joudutaan tekemään kuiduksi. Tukkivähennysmallissa optimiapteerauksen ja mittavaatimusten muuttumista ei voida ottaa huomioon. Siksi laadinta-aineiston mitta- ja laatuvaatimuksista poikkeavia vaatimuksia käytettäessä mallilla saadut ennusteet ovat harhaisia.

MELA-järjestelmä on metsätalouden laskentajärjestelmä, jota voidaan käyttää metsälö, alue- tai suuraluetason metsäsuunnitteluun ja hakkuulaskelmien tekoon (Siitonen ym. 1999). Järjestelmällä voidaan simuloida alueen metsiköille annettujen ohjeiden perusteella käsittelyvaihtoehtoja, joista valitaan optimoimalla paras alueen käsittelyohjelma. Simulointi perustuu metsikköä kuvaaviin kuvauspuihin. Järjestelmää voidaan käyttää myös ilman optimointia, jolloin kullekin kuviolle voidaan pakottaa tietty käsittelyvaihtoehto.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli laatia puukohtaiset tukkivähennysmallit Suomen viidelle yleisimmälle puulajille. Malleilla voidaan ennustaa, kuinka suuri osa tukkikokoisesta rungonosasta ei kelpaa tukiksi, mutta ei tukin jakaantumista eri laatuoluokkiin eikä tukkien sijaintia rungossa. Malleille asetettiin seuraavat vaatimukset:

- a) mallit toimivat hyvin metsäsuunnittelujärjestelmässä (MELA) ja
- b) mallin on annettava kohtuullisia tuloksia myös ongelma-alueilla, joita ovat Etelä-Suomen tyvilahokuiset, rannikkometsät, Ahvenanmaa ja lakimetsät.

Hynynen ym. (2002) asettavat simulointiin ja optimointiin perustuvassa metsäsuunnittelujärjestelmässä käytettävälle mallille neljä vaatimusta: harhattomuus, yhteensopivuus käytettävän metsä-

varatiedon kanssa, järkevä toiminta pitkän aikavälin ennusteissa sekä toimenpideharhattomuus. Tässä tutkimuksessa tavoitteena on nimenomaan tukki-tilavuuden harhaton estimointi. Yhteensopivuus metsävaratiedon kanssa määrittää tiukasti sen, mitä muuttujia metsiköstä ja puusta voidaan olettaa tunnetuksi. Järkevä toiminta pitkän aikavälin ennusteissa edellyttää mallin muotoilua niin, että olennaiset tukkivähennykseen vaikuttavat tekijät voidaan mallissa ottaa huomioon. Pitkällä aikavälillä tärkein mallilta vaadittava ominaisuus on puun rappeutumisen ennustaminen puun ikääntyessä, jotta metsiköiden kasvattaminen yli-ikäisiksi ei tulisi metsikkösimulaattorissa kannattavaksi. Lisäksi mallin on käyttyäyttävä ekstrapolointitilanteessa konservatiivisesti niin, että se ei ennusta mahdottomia tukkiosuuksia missään tilanteessa. Toimenpideharhattomuudella tarkoitetaan sitä, että mallilla on pystyttävä kuvaamaan myös erilaisten simuloinnin kuluessa tehtävien toimenpiteiden vaikutus tukkivähennykseen.

Tässä tutkimuksessa asetetun tavoitteen (kohta b) tarkastaminen vaatisi testiaineistoja ongelma-alueilta, eikä sellaisia ole käytössä. Siksi riittää, että mallin selittäjiä ja niiden kertoimia tarkasteltaessa ongelma-alueiden tukkivähennyksen käyttäytymisen on järkevää muuhun maahan verrattuna.

2 Tukkivähennys

2.1 Tukkivähennyksen määrittely

Tukkivähennys kuvaa sitä, kuinka suuri osa tukki-kokoisesta puustosta ei laatunsa puolesta kelpaa tukiksi. Metsäsuunnittelun tiedonkeruussa tukkivähennys määritetään yleensä metsikkökohtaisena. Tässä tutkimuksessa tukkivähennys on puukohtainen. Tukkivähennys ja siihen liittyvät muut termit määritellään seuraavasti.

Teoreettinen tukkiosa: Se puun rungon osa, joka on läpimitaltaan suurempi kuin kyseisen puulajin tukin minimiläpimittana. Tässä tutkimuksessa tukin minimiläpimittana oli männyllä 15,0 cm, kuusella 16,0 cm ja lehtipuilla 18,0 cm.

Tukkirunko: Runko, jonka teoreettinen tukkiosa on niin pitkä, että siitä dimensioiden puolesta saadaan

ainakin yksi ko. puulajin mitta- ja laatuvaatimusten mukainen tukki (taulukko 1).

Raakki: Teoreettisen tukkiosan osa, josta ei laadun tai dimensioiden vuoksi saada tukkia.

Tukkivähennys: Raakin suhteellinen osuus puun teoreettisen tukkiosan tilavuudesta.

2.2 Tukkivähennys ilmiönä

Yksittäisen puun tukkivähennykseen vaikuttavat monet satunnaiset ilmiöt. Lumi tai tuuli on saattanut katkaista puun, esimerkiksi herbivorian tai ylitihedysten vuoksi puuhun on saattanut tulla latva- ja runkovaurioita ja ne edelleen ovat voineet aiheuttaa lahoa, istutustaimen kallistuminen on voinut aiheuttaa rungon lenkoutta jne. Tukkivähennys on monen tällaisen satunnaisen ilmiön summa. Yleensä ei voida osoittaa selkeää syy-seuraussuhdetta sille, miksi joku puu on vaikkapa joutunut lumen katkaisemaksi kun viereinen puu on terve. Tuhon todennäköisyys on kuitenkin jossain määrin ennustettavissa: tuulisilla alueilla tuulituhojen ja lumisilla alueilla lumituhojen todennäköisyys on suuri, määrätynlaisella maapohjalla lahon todennäköisyys on suurempi kuin muualla, hirvet viihtyvät tietyillä alueilla jne.

Usein tukkivähennys on tapahtuneen tuhon seuraus. Siksi metsätuhojen todennäköisyyteen vaikuttavat tekijät ovat luultavasti myös hyviä tukkivähennyksen selittäjiä. Metsätuhojen syitä on tutkittu paljon erikseen (Huuri 1976, Uusvaara 1981, Tamminen 1985, Norokorpi ja Kärkkäinen 1985, Laiho 1987, Ferm 1990, Lämsä ym. 1990, Jalkanen ja Mattila 2000, Mattila ym. 2001, Jalkanen 2001a ja b). Tutkimuksissa on selvitetty eri metsätuhojen esiintymistä, syitä ja estimoitu myös malleja tuhojen todennäköisyydelle.

2.3 Tukkivähennyksen syitä

Tärkeimpiä esteitä tukin saamiseksi tukki-kokoisesta rungonosasta ovat mutkat, haarat, korot, oksat, lenkous, laho, halkeamat ja vieraat esineet. Seuraavassa tarkastellaan näiden vikojen mahdollisia aiheuttajia hyvien tukkivähennyksen selittäjien löytämiseksi.

Rungon *mutkaisuutta*, *latvanvaihtoja*, *haaroja* ja *koroja* aiheuttavat ainakin tuuli, lumi, puiden

Taulukko I. Tukin minimikoot ja tärkeimmät tukin saantoon vaikuttavat maksimiviat Pohjois-Suomen VMI8- ja Etelä-Suomen VMI9-aineistossa (Valtakunnan... 1993, Valtakunnan... 1998). Latvalieriöön ulottuvia mutkia, koroja ym. vikoja ei tukissa ole sallittu.

	Laatuluokka/ latvaläpimitä	Mänty		Kuusi		Lehtipuut	
		Pohjois-Suomi, VMI8	Etelä-Suomi, VMI9	Pohjois-Suomi, VMI8	Etelä-Suomi, VMI9	Pohjois-Suomi, VMI8	Etelä-Suomi, VMI9
Tukin minimikoot	I	40*15	40*15	31*18	40*16	31*20	
		31*18	37*18	40*16			
			31*20				
	II	40*15	40*15	31*18	40*16	31*18	
		31*18	31*20	40*16			
			31*15				
	III	40*15	40*15	40*16	40*16	31*18	
			37*20				
Tuore oksa	d<20		50		40	70	
	21<d<28		60		50	70	
	d>29		70		60	70	
Kuiva oksa	d<20	30	40	30	40	30	40
	21<d<28		40		40	30	40
	d>29		50		50	30	40
Laho oksa		30		30		30	40
Poikaoksa		kuten kuiva oksa, 1kpl/tukki	40	kuten kuiva oksa, 1 kpl/tukki	40	ei sallita	
Lenkous	d<20		1cm/m		1cm/m	d<23cm: 2cm/1,5m	
	21<d<28		1cm/m		1cm/m	24<d<35cm: 4cm/1,5m	
	d>29		1cm/m	1,5cm/m	1cm/m	1,5cm/m	d>36cm: 5cm/1,5m

väläinen kilpailu, puutavaran korjuu, herbivoria ja erilaiset taudit. Mutkaisuus on yleensä vanhojen latvanvaihtojen seuraus, mutta se saattaa johtua myös rehevän kasvupaikan aiheuttamasta nopeakasvuisuudesta.

Jalkasen ja Mattilan (2000) malleissa tärkeimmät tuulituhon selittäjät olivat metsikön ikä ja keskiläpimitä. Myös metsikössä tehdyt harvennukset ja lannoitukset tai viereisissä metsiköissä tehdyt uudistushakkuut kohottavat tuulituhoriskiä (Laiho 1987, Jalkanen ja Mattila 2000). Merenrannat ovat keskimääräistä tuulisempia paikkoja. (Suomen kartasto 1987). Merenrantojen puut kestävät kovaakin tuulta, mutta jatkuva tuulisuus aiheuttaa puihin mutkia ja lenkoutta. Lisäksi mäen laet ja rinteet ovat alttiimpia tuulituhoilta kuin notkot ja tasamaat (Laiho 1987).

Alueellisesti lumituhoriskiin vaikuttavat meren läheisyys ja metsikön korkeus meren pinnasta (Nykänen ym. 1997, Jalkanen ja Mattila 2000). Erityisesti ns. tykkyrajan yläpuolella tykkylumen aiheuttamat

tuhot ovat selvästi suurempia kuin rajan alapuolella. Tykkyraja nousee pohjoiseen mentäessä, ja on Kuusamossa n. 300 m:n korkeudessa (Norokorpi ja Kärkkäinen 1985). Puutasolla lumituhoriskiin vaikuttavat kapeneminen, latvuksen muoto ja puulaji (Nykänen ym. 1997). Lehtipuissa lumituhoja ei ole niin paljon kuin havupuissa ja kuusi menestyy kapeamman latvuksensa vuoksi paremmin lumisilla alueilla kuin mänty (Norokorpi ja Kärkkäinen 1985, Nykänen ym. 1997).

Metsätalouden kannalta tärkein herbivori on hirvi, joka aiheuttaa tuhoja erityisesti nuorilla männyillä ja lehtipuilla, mutta myös myyrät, jänikset ja pienemmät sorkkaeläimet sekä Lapissa porot aiheuttavat tuhoja. Hirvituhot ovat suurimpia hirvien talvilaidunalueilla, mutta niitä ei metsäsuunnittelun tiedoista pystytä tunnistamaan. Jalkasen (2001a) mukaan hirvituhoriskiin vaikuttavat puulajisuhteiden, iän ja reunavaikutuksen lisäksi metsikön orgaaninen maalaji ja kasvupaikka.

Ravinnepuutokset ja erilaiset taudit aiheuttavat latvanvaihtoja nuorilla puilla. Ravinnepuutoksia on havaittu erityisesti ojitetuilla soilla (Kolari 1988). Eri tautien yleisyyteen vaikuttavat ainakin ilmasto ja männyn liian rehevä kasvupaikka (Kurkela 1989), joilla mänty usein on istutettua. Mattilan ym. (2001) mallissa haavan ja männyn määrä, kasvupaikka ja kivisyys selittivät männynversoruosteen esiintymistodennäköisyyttä nuorissa männiköissä.

Paksuksaisuus voi johtua joko oksien nopeakasvuudesta tai siitä, että oksat pysyvät pitkään elossa ja ehtivät siksi paksuiksi. Nopeakasvuilla puilla myös oksat kasvavat nopeasti (Mäkelä ym. 2000), ja siten kasvupaikan viljavuus selittää oksien nopeakasvuutta. Aukeiden ja metsänreunojen puiden oksat pysyvät pitempään elossa ja kasvavat siksi usein liian paksuiksi, kun taas metsikön sisällä oksat kuolevat varjostuksen vuoksi jo nuorina ja pieninä (Turkia ja Kellomäki 1987).

Lenkoutta esiintyy ainakin ojitetuilla soilla, jossa suon kuivumisen vaikutuksesta kallistuneet puut korjaavat kasvun suuntaa. Myös istutustaimikossa lenkoutta ja mutkaisuutta esiintyy tavallista enemmän (Huuri 1976, Uusvaara 1981, 1985). Pellonreunojen ja järvenrantojen puut ovat usein toispuoleisia ja sen vuoksi lenkoja.

Laho pääsee puuhun tuoreen runko- tai juuristovaurion kautta, ja on siksi yleistä metsikössä, joka on altis latvanvaihdolle ja koroille. Erityisesti lehtipuut saavat herkästi lahotartunnan jo pienestä runko- tai juuristovauriosta. Vesasyntyiset lehtipuut saavat usein lahotartunnan emäpuunsa juuristosta jo taimivaiheessa. Erityisesti kuusella laho on merkittävä puun tukkiosuutta pienentävä tekijä. Tärkein kuusen lahotajasieni on juurikäpää, joka ei tarvitse levitäkseen välttämättä mitään ulkoista vauriota, koska se leviää tehokkaasti juuriston kautta (Tamminen 1985). Juurikäpää esiintyy Etelä-Suomessa Kuopio–Tampere-linjan eteläpuolella ja Länsi-Suomessa aina Kokkolan korkeudelle saakka (Möykkyne 2000, Korhonen 1988), jossa se on yleinen rehevillä soistumattomilla maapohjilla (Tamminen 1985). Jalkanen (2001b) selitti metsikön lahoriskiä korkeudella meren pinnasta, pääpuulajilla, iällä, pohjapinta-alalla ja keskiläpimitalla. Myös männyllä esiintyy juurikäpää, mutta se tappaa puun lahottamalla juuret (Laine 1988), eikä siksi juuri-kaan pienennä elävien puiden tukkiosuutta.

Rungon solakkuus (pituuden ja läpimitan suhde) vaikuttaa puun lumen- ja tuulenkestävyyteen. Met-sikkösimulaattorissa simuloitavien puiden pituutta ei kuitenkaan tunneta, eikä solakkuutta siksi voida käyttää mallissa selittäjänä. Koska solakkuus vaihtelee alueittain (ks. Rikkonen 1987), voidaan se osittain ottaa huomioon metsikön sijainnista kertovien muuttujien avulla.

3 Aineisto ja menetelmät

3.1 Mallien laadinta-aineisto

Tutkimusaineistona käytettiin valtakunnan metsien 8. ja 9. inventoinnin koepuuaineistoja vuosilta 1992–2000. Aineisto kattaa koko Suomen Kalamajokilaaksoa lukuun ottamatta. Metsäkeskusrajojen muuttumisen vuoksi Kalajokilaakso on mitattu aikaisemmin kuin muu Pohjois-Suomi ja tukkien mitta- ja laatuvaatimukset sekä koepuiden apteeraus ovat muuttuneet merkittävästi tänä aikana.

Valtakunnan metsien inventoinnissa kaikki tukki-kokoiset koepuut jaetaan laatuosiin, joita ovat I, II ja III laadun tukki, haarapuun tukkiosa, raakki, pakkokatkaistu ja lehtipuilla lisäksi välivähennys (Valtakunnan... 1993). Havainnointi perustuu silmävaraisen arvion lisäksi yhteen rinnankorkeudelta tehtyyn kairaukseen. Tukki-laaduksi merkittävän osan on täytettävä tukin mitta- ja laatuvaatimukset (taulukko 1). Rungot jaetaan laatuosiin, joiden pituudet arvioidaan 1 dm:n tarkkuudella. Viimeisen laatuosan pituudeksi merkitään +, mikä tarkoittaa, että laatuosaa jatkuu teoreettisen tukkiosan loppuun asti.

Tilavuuden laskennassa käytettiin Laasasenahon (1982) läpimitaan, kuuden metrin läpimitaan ja pituuteen perustuvaa runkokäyrää. Runkokäyrältä määritettiin laskennallinen teoreettisen tukkiosan päättymiskorkeus ja tilavuus sekä eri laatuosien tilavuudet, joista laskettiin rungoille tukkivähennys. Laskennassa käytettiin Snellmannin (1984) runkokäyräaliohjelmaa ja kannonkorkeusfunktiota.

Mallien laadinta-aineistoksi poimittiin kaikki VMI-aineiston kertakoealojen tukkirungot. Aineiston tärkeimpien puustotunnusten keskiarvoja on esitelty taulukossa 2. Aineisto kattaa hyvin käytännössä vastaan tulevat läpimita-ikäyhdistelmät (kuva 1).

Taulukko 2. Aineiston keskiarvotietoja. n = havaintojen lukumäärä, d = rinnankorkeusläpimitta, t = rinnankorkeusikä, V = kokonaistilavuus (litraa) ja t_{UV} = tukkivähennys.

	n	d	t	V	t_{UV}
Mänty	13020	26,8	91	512	0,42
Kuusi	9753	27,5	80	598	0,29
Rauduskoivu	969	28,9	77	649	0,49
Hieskoivu	1054	25,5	81	453	0,64
Haapa	334	30,0	66	699	0,62

3.2 Menetelmät

Merkitään puun i teoreettisen tukkiosan tilavuutta V_i :llä ja tukkitilavuutta v_i :llä. Puun i tukkivähennys s_i lasketaan kaavalla

$$s_i = \frac{V_i - v_i}{V_i} \quad (1)$$

jossa s_i on suhteellinen osuus, joka saa arvoja väliltä $[0,1]$. Tukkivähennysennusteen on myös oltava tällä välillä. Logistisella mallilla (Hosmer ja Lemeshow 1989, Lappi 1993) ennusteet ovat aina välillä $[1,0]$. Menetelmää käytetään yleensä silloin, kun selitettävä muuttuja on binäärinen, eli saa vain arvoja 1 tai 0, mutta mallia voidaan käyttää myös silloin, kun on mitattu havaintoja jostakin ryhmästä, ja tunnetaan onnistumisten suhteellinen osuus kussakin ryhmässä sekä ryhmien koko. Tukkivähennyksen ennustamisessa on tällainen tilanne; puun teoreettisen tukkiosan tilavuus kuvaa ryhmän kokoa ja s_i on onnistumisten suhteellinen osuus.

Malli estimoitii kahdessa vaiheessa. Aluksi estimoitii lineaarinen logit-malli

$$\ln \frac{s_i^*}{1 - s_i^*} = l(\mathbf{x}) + \varepsilon_i \quad (2)$$

jossa

$$s_i^* = \begin{cases} 0.005 & s_i = 0 \\ s_i & 0 < s_i < 1 \\ 0.995 & s_i = 1 \end{cases} \quad (3)$$

Muunnos s_i^* tehtiin, koska mallin (2) selitettävä muuttuja ei ole määritelty silloin, kun $s_i = 1$ tai $s_i = 0$. Mallin (2) tilastollisesti merkitsevät selittäjät etsittiin estimoimalla se tavallisella pns-menetelmäl-

lä kokeilemalla eri selittäjäyhdistelmiä. Saaduilla parametristimaateilla ei kuitenkaan saada tukin tilavuudelle harhattomia estimaatteja.

Toisessa vaiheessa estimoitii logit-malli (Lappi 1993)

$$s_i(\mathbf{x}) = \frac{\exp(l(\mathbf{x}))}{1 + \exp(l(\mathbf{x}))} + \varepsilon_i \quad (4)$$

jossa $l(\mathbf{x})$ on selittävien muuttujien funktio

$$l(\mathbf{x}) = l(x_1, x_2, \dots, x_K) = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_Kx_K \quad (5)$$

ja ε_i virhetermi, jonka odotusarvo on 0 ja varianssi

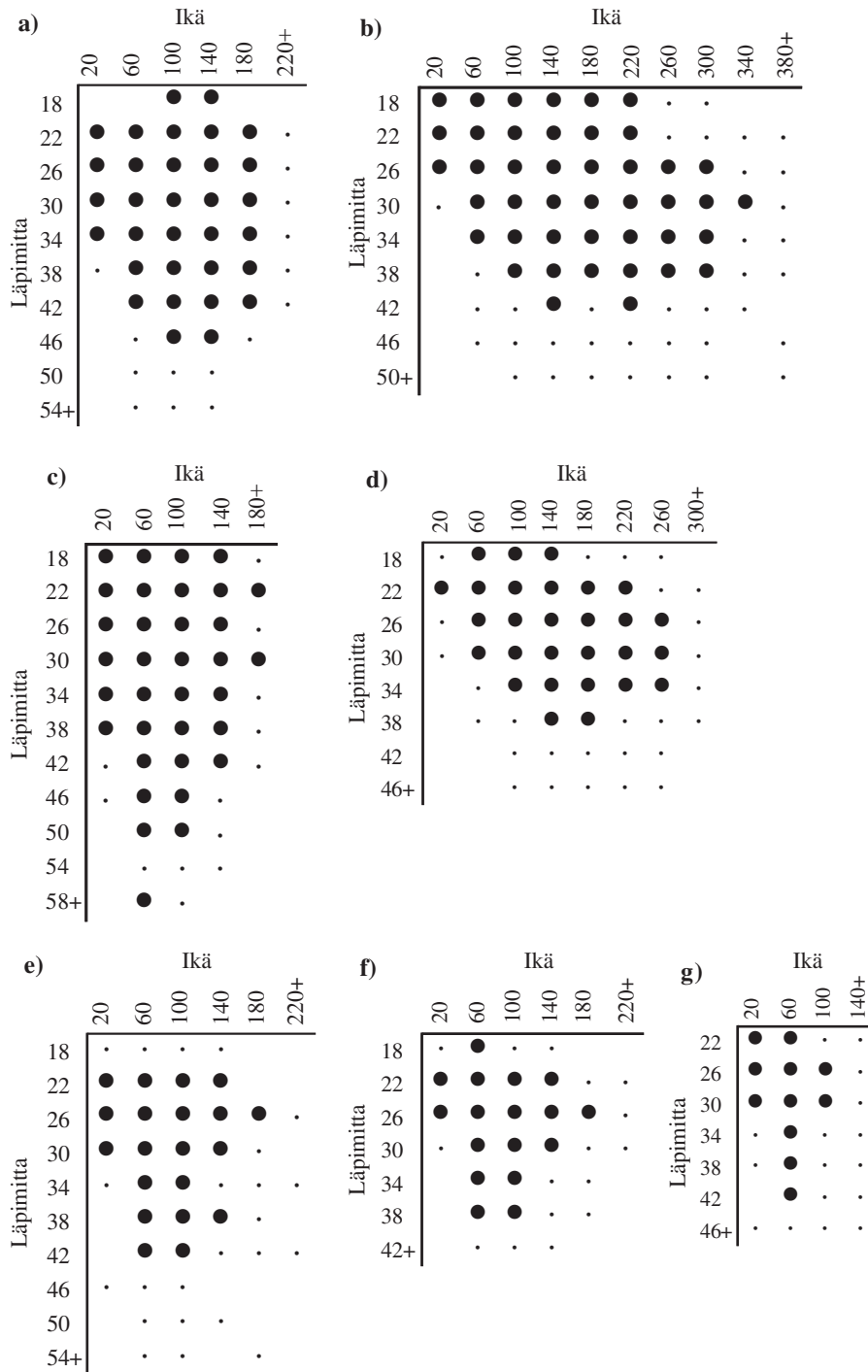
$$\frac{s_i(\mathbf{x})(1 - s_i(\mathbf{x}))}{V_i}$$

Koska virhetermin varianssi riippuu suhteellisesta osuudesta $s_i(\mathbf{x})$, jota ollaan mallittamassa, joudutaan mallin parametrit estimoimaan iteratiivisesti. Ensimmäisessä vaiheessa valitut selittäjät otettiin selittäjiksi malliin (4), josta saatiin lopulliset parametrien estimaatit. Kertoimet estimoitii SPSS:n probit-aliohjelmalla (SPSS 7.5 Statistical algorithms 1997), jolla saadaan suurimman uskottavuuden estimaatit logit-mallin kertoimille. Näillä parametristimaateilla saadaan tukkitilavuus estimoitua harhattomasti.

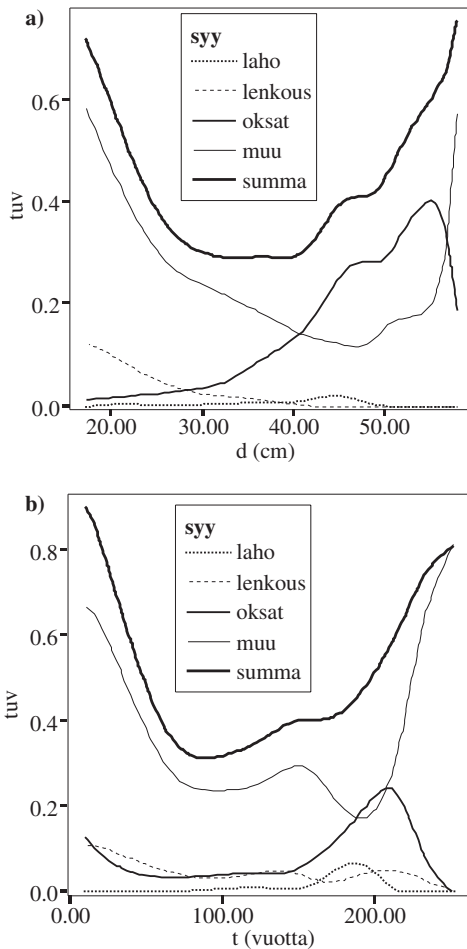
4 Tulokset

4.1 Tukkivähennys laadinta-aineistossa

Lähempää tarkastelua varten VMI-koepuiden tukkivähennys jaettiin apteraustietojen perusteella neljään komponenttiin: oksaisuudesta, lahosta, lenkoudesta ja muista syistä johtuvaan tukkivähennykseen. Muista syistä johtuva tukkivähennys johtuu pääasiassa mutkista, haaroista ja koroista. Puun vanhentuuessa ja kasvaessa tukkivähennyksen syy muuttuu (kuva 2). Pienillä puilla lenkous, mutkat, haarat ja korot ovat lähes aina tukkivähennyksen syynä, mutta iän ja läpimitan kasvaessa näiden merkitys pienenee kylestymisen seurauksena. Myös puun teoreettisen tukkiosan kasvaminen tuo lisää pelivaraa apteraukseen, eikä isoilla puilla suurikaan mutkaisuus estä tukin saamista kokonaan, kuten se



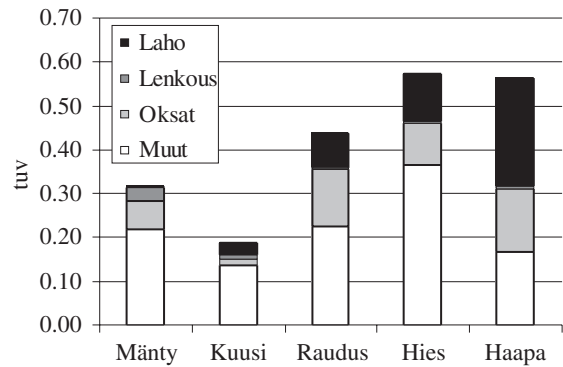
Kuva 1. Aineiston jakautuminen läpimitta- ja ikäluokittain. Iso pallo tarkoittaa, että solussa on havaintoja 10 tai enemmän ja pieni pallo, että havaintoja on 1–9. a) Etelä-Suomen männyt, b) Pohjois-Suomen männyt, c) Etelä-Suomen kuuset, d) Pohjois-Suomen kuuset, e) rauduskoivut, f) hieskoivut ja g) haavat.



Kuva 2. Eri syistä johtuva tukkivähennys puun rinnankorkeusläpimitan a) ja rinnankorkeusiän b) suhteen Etelä-Suomen mäntyaineistossa. Aineistoon on tasoitettu trendiviiva kernel-menetelmällä.

pienillä puilla voi tehdä. Puun rungon ja oksien järeytyessä niiden aiheuttama tukkivähennys kasvaa nopeasti ja puun ikääntyessä lahokin alkaa lisääntyä. Siten kokonaistukkivähennyksen kuvaaja läpimitan tai iän suhteen on loiva u-käyrä. Kuva 2 on piirretty männyn Etelä-Suomen aineistosta, mutta samat ilmiöt näkyvät myös Pohjois-Suomessa ja muilla puulajeilla.

Haapaa lukuun ottamatta kaikilla puulajeilla mutkat, haarat ja korot ovat selkeästi tärkeimmät tukkivähennyksen syyt, ja niiden osuus on selvästi yli puolet kokonaistukkivähennyksestä (kuva 3).



Kuva 3. Eri syistä johtuva tukkivähennys puulajeittain Etelä-Suomen VMI9-aineistossa. Muu tukkivähennys johdetaan pääasiassa mutkista, haaroista ja koroista.

Seuraavaksi tärkein syy on puulajista riippuen joko oksaisuus tai laho. Lahon merkitys on käytännössä suurempi, koska VMI:ssä kaikkia lahoja ei havaita. Lenkouden merkitys tukkivähennyksen aiheuttajana on merkittävä ainoastaan männyllä.

4.2 Tukkivähennysmallit

Havupuun mallit estimoitiin erikseen Etelä- ja Pohjois-Suomeen, koska Pohjois-Suomen aineisto oli peräisin VMI8:stä ja Etelä-suomen aineisto VMI9:stä ja eri inventoinneissa laatuvaatimukset ovat hieinan erilaiset (taulukko 1). Koska Pohjois-Suomen aineistossa ei olisi ollut riittävästi lehtipuita erillisen mallin laatimista varten, inventointien ero otettiin lehtipuilla huomioon valemuuttujan *pohj* avulla. Myös kitumaan puut poistettiin varsinaisesta aineistosta, ja männylle estimoitiin erikseen valtakunnallinen kitumaan malli ja kuuselle kitumaan Pohjois-Suomen malli. Koska Etelä-Suomen kuusiaineistossa oli vain 3 kitumaan puuta lounaisrannikolta, ei niitä käytetty kuusen kitumaan mallin estimoinnissa. Tukkivähennysennusteena Etelä-Suomessa voidaan käyttää näiden puiden tukkivähennysten teoreettisen tukkiosan tilavuudella painotettua keskiarvoa 0,442. Kaikilla kitumaan lehtipuilla (yhteensä 5 puuta) tukkivähennys oli 1,0.

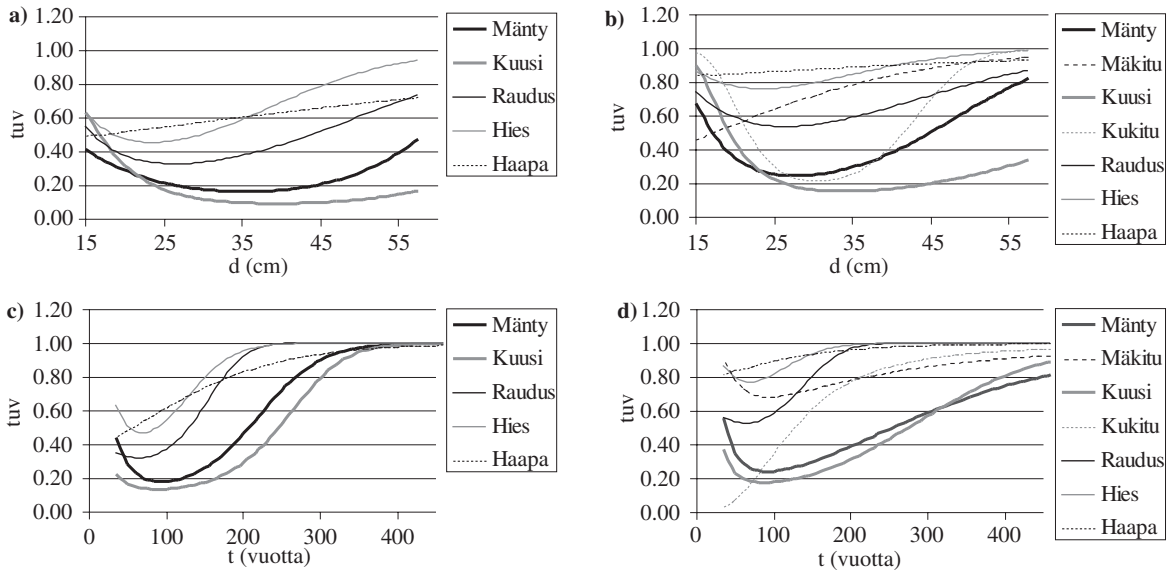
Tärkeimmät tukkivähennyksen selittäjät ovat puun rinnankorkeusikä ja rinnankorkeusläpimita (taulukko 3). Lisäksi puukohtaisista tunnuksista

Taulukko 3. Estimoidut tukkivähennysmallien kertoimet. Malli antaa yhtälön (5) arvon, joka sijoitetaan kaavaan (4) tukkivähennystä laskettaessa. Jatkuvat muuttujat: t = puun rinnankorkeusikä (vuotta), d = puun rinnankorkeusläpimitä (cm), y = metsikön y -koordinaatti yhteiskoordinaatistossa (km, vaihteluväli 6600–7800), x = metsikön x -koordinaatti yhtenäiskoordinaatistossa, (km, vaihteluväli 0–800), kmp = metsikön korkeus meren pinnasta (m), ktr = metsikön korkeus tykkyrajan yläpuolella (m), dd = lämpösusma. Dummymuuttujat: ist : 1, jos puu on istutettu, ahv : 1, jos puu sijaitsee Ahvenanmaan metsäkeskuksen alueella, $pohj$: 1, jos puu sijaitsee Pohjois-Pohjanmaan, Kainuun tai Lapin metsäkeskuksen alueella, suo : 1, jos metsikkö sijaitsee suolla, reh : 1, jos metsikön metsätyyppi on lehtomainen kangas tai rehevämpi tai vastaava suo, kar : 1, jos metsätyyppi on kuiva kangas tai karumpi tai vastaava suo. Alimmalla rivillä on mallin tukkipuun tilavuuden selityssaste.

	Mänty			Kuusi			Raudus Metsämaa Koko maa n = 966	Hies Metsämaa Koko maa n = 1053	Haapa Metsämaa Koko maa n = 333
	Metsämaa Etelä- Suomi n = 8545	Pohjois- Suomi n = 4194	Kitumaa Koko maa n = 281	Metsämaa Etelä- Suomi n = 8007	Kitumaa Pohjois- Suomi n = 1692	Kitumaa Pohjois- Suomi n = 51			
Vakio	-7,301	-21,95	-12,77	20,61	6,841	47,76	-13,21	-34,42	-6,205
t	0,03814	–	–	-0,004853	0,01229	–	-0,02215	0,05320	0,01137
$\ln(t)$	-3,568	5,144	2,227	–	–	2,668	–	-3,675	–
$1/t$	–	–	206,5	–	96,45	–	–	–	–
t^2	–	–	–	5,560E-05	–	–	1,727E-04	–	–
$1/\sqrt{t}$	–	98,19	–	–	–	–	–	–	–
d	-0,2184	0,1714	0,07324	0,1893	–	0,8221	0,1046	0,1460	0,02394
$\ln(d)$	–	–	–	-8,186	8,786	-25,11	–	–	–
$1/d$	–	131,9	–	–	298,1	–	73,49	81,25	–
d^2	0,003090	–	–	–	–	–	–	–	–
d/t	–	–	–	1,493	–	–	–	–	–
ist	–	–	–	0,2884	–	–	–	–	–
y	0,004176	–	–	–	–	–	0,001167	0,006610	–
$\ln(y-6600)$	-0,7974	–	–	–	–	–	–	-1,106	0,7191
x	–	-0,001280	–	–	-0,01602	–	–	–	–
$1/x$	–	–	–	–	-3407	–	–	–	–
$\ln(x)$	–	–	–	–	–	–	–	–	0,7884
kmp	–	–	-0,004133	–	-0,005684	–	0,006862	–	0,01686
$\ln(kmp+1)$	-0,4549	-0,2909	–	–	–	–	–	–	-1,186
$\min(kmp,60)$	–	–	–	-0,01600	–	–	–	–	–
$\min(kmp,120)$	–	–	–	–	–	–	-0,01092	–	–
ktr	–	0,02053	0,01416	–	0,01629	–	–	–	–
$\ln(dd)$	–	-2,939	–	–	-5,066	–	–	–	–
ahv	1,590	–	–	0,7182	–	–	1,401	1,871	–
$pohj$	–	–	–	–	–	–	0,6130	–	0,5157
suo	0,2832	0,5456	–	0,1538	0,3361	–	–	–	-0,7854
reh	0,4607	0,6029	–	3,638	–	–	–	–	–
kar	0,6323	–	–	–	–	–	2,239	–	–
$dd \times reh$	–	–	–	-0,002493	–	–	–	–	–
$kmp \times reh$	–	–	–	-0,003826	–	–	–	–	–
R^2	0,24	0,32	0,16	0,094	0,22	0,34	0,22	0,19	0,23

käytetään selittäjänä puun syntytapaa. Alueellinen puun laadun vaihtelu otetaan huomioon käyttämällä selittäjinä yhtenäiskoordinaatiston x - ja y -koordinaatteja, lämpösusmaa, korkeutta meren pinnasta sekä valemuuttujia Ahvenanmaa ja Pohjois-Suomi. Metsikkövaikutus otetaan mallissa huomioon suo-, rehevä- ja karuvalemuuttujien kautta.

Jotta malli voisi kuvata kuvassa 2 näkyvän u -muodon, kokeiltiin kaikkiin malleihin selittäjäksi useampaa läpimitan ja iän muunnosta. Tällöin toinen muunnoksista selittää tukkivähennyksen ko. muuttujan suhteen laskevaa komponenttia ja toinen muunnos nousevaa komponenttia, jolloin summana saadaan u -käyrä (kuva 4). Kaikilla puu-



Kuva 4. 80-vuotiaan puun tukkivähennysennuste puun läpimitan suhteen (kuvat a ja b) ja 28-senttisen puun tukkivähennysennuste iän suhteen (kuvat c ja d). Kuvien a ja c puut kasvavat Tampereen seudulla ja kuvien b ja d puut Pudasjärven eteläosassa. Sarjat Mäkitu ja Kukitu ovat männyn ja kuusen kitumaan mallien kuvaajat.

lajeilla haapaa lukuun ottamatta kertoimista saatiin sellaiset, että tukkivähennyksen kuvaaja on u-käyrä. Haavalla ja kitumaan männyllä käyrän muoto hukui aineiston pienuuden vuoksi satunnaisvaihteluun, ja malleihin otettiin vain yksi iän ja yksi läpimitan muunnos.

Laadinta-aineiston puiden pituus tunnettiin ja siksi puun solakkuutta olisi voitu käyttää selittäjänä. Solakkuus olisikin parantanut malleja huomattavasti, mutta sovellusvaiheessa olisi jouduttu käyttämään mitatun pituuden sijasta mallilla ennustettua pituutta. Mallilla ennustettu pituus on vain muiden selittäjien ja niiden epälineaaristen muunnosten lineaarikombinaatio, eikä se siksi tuo tukkivähennyksestä sellaista informaatiota, jota ei voida saada muiden selittäjien kautta. Siksi sovellusvaiheessa mallilla ennustetun pituuden käyttäminen todellisen mitatun pituuden tilalla tuottaa jopa huonompia tuloksia kuin pituuden jättäminen kokonaan mallista pois. Tätä testattiin Etelä-Suomen mänty- ja kuusiaineistoissa laatimalla kaksi mallia, joista toisessa solakkuutta käytettiin selittäjänä ja toisessa ei. Pituutta käyttävän mallin selitysaste oli 2 prosenttiyksikköä korkeampi kuin mallin, jossa pituutta ei käytetty. Kun puille ennustettiin tukkiosuus käyttäen pituusmalleilla

(Veltheim 1987) saatuja pituuksia, tukkitilavuuden keskineliövirhe nousi kuitenkin korkeammaksi kuin se oli mallilla, jossa solakkuus ei ollut selittäjänä.

Metsikkökohtaisia muuttujia malleissa ovat kasvupaikkatyyppi ja soisuus. Mallin selittäjänä ei ole mitään muuttujaa, joka kertoisi metsikön tiheydestä, puulajisuhteista tai puun asemasta metsikössä. Laadintavaiheessa selittäjiksi kokeiltiin myös metsikkökohtaisia puustotunnuksia sekä erilaisia kilpailuindeksejä (Hynynen ym. 2002). Kilpailuindeksit eivät tulleet mallissa merkitseviksi selittäjiksi ja puustotunnuksista merkitseviksi tulivat havupuuosuus, metsikön ikä ja keskiläpimita, joista havupuun osuus oli selvästi paras selittäjä. Nämä muuttujat paransivat mallien selitystasetta kuitenkin vain 0,4–1,1 %. Muuttujien huono selitysvoima johtunee siitä, että tukkivähennys on seurausta vuosikymmenien takaisesta ylitihedystä tai kilpailuasemasta ja aivan viime vuosina tapahtuneet latvavauriot tms. eivät ole vielä ehtineet edetä niin pitkälle, että ne vaikuttaisivat tukkisaantoon.

Jos metsikkökohtaisia puustotunnuksia käytetään mallissa selittäjänä, muuttuu tukkivähennyksen ennuste äkillisesti hakuun tai hoidon seurauksena. Tällainen toiminta saattaisi johtaa ihmeellisiin

tilanteisiin metsikön simuloinnissa. Esimerkiksi havupuun osuuden käyttäminen selittäjänä aiheuttaisi sen, että sekametsästä lehtipuita poistettaessa metsikön havutukkien määrä kasvaisi, vaikka havupuihin ei hakkuussa koskettaisi lainkaan. Keskiläpimitan käyttäminen selittäjänä puolestaan saattaisi vaikuttaa siten, että kun metsiköstä poistetaan parhaat puut yläharvennuksella pitää malli aikaisemmin alisteisina kasvaneita huonolaatuisia puita nyt hyvälaatuisina valtapuina ja ennustaa niille harvennuksen jälkeen suurta tukkiosuutta. Optimoinnissa juuri tällaiset käsittelyvaihtoehdot tulisivat helposti valituksi. Tämän riskin sekä metsikkökohtaisten puustotunnusien huonon selitysvuoksen vuoksi niitä ei otettu malliin selittäjiksi lainkaan.

Mallien selittäjiksi kokeiltiin myös metsikön hakkuusta kulunutta aikaa ja hakkuutapaa, mutta ne eivät tulleet merkitseviksi. Tämä viittaa siihen, että metsikön laadun parantuminen hakkuun seurauksena johtuu ennemminkin metsikön läpimittajakauden ja puulajisuhteiden muutoksesta kuin siitä, että puulajiltaan, läpimitaltaan ja iältään samanlaisista puista poistetaan ne, joista tukkia tulee vähemmän. Siksi toimenpiteiden vaikutus yksittäisen puun ennustettuun tukkiosuuteen jää pieneksi, vaikka metsikkötasolla tukkiosuus saattaa muuttua paljonkin metsikön rakenteen muuttumisen vuoksi.

Tukkivähennys vaihtelee myös alueellisesti, minkä vuoksi selittäjiksi kokeiltiin metsikön x- ja y-koordinaatteja, lämpösummaa ja korkeutta meren pinnasta. Korkeus meren pinnasta kertoo meren läheisyydestä ja selittää siksi merenrantojen tuulisuudesta johtuvia mutkia. Toisaalta, kun nousee tarpeeksi korkealle, ei merenranta enää ole lähellä eikä korkeus siksi enää vaikuta tukkivähennykseen. Tämän vuoksi laadinta-aineistosta etsittiin graafisen tarkastelun avulla raja, jota korkeammalla korkeus meren pinnasta ei enää näyttänyt vaikuttavan tukkivähennykseen, ja selittäjänä käytettiin muunnosta $\min(\text{raja}, \text{kmp})$. Tällaista muunnosta käytettäessä saadaan rannikon läheisyydessä erilaisia tukkivähennysennusteita kuin muualla Suomessa. Myös havusahatukkien yksikkötilavuuksia määrittäessä (Rikkonen 1987) aluejaossa erotettiin Pohjanlahden rannikkoalue erikseen, koska tällä alueella tukkien muotoluvut poikkesivat muun Suomen tukkien muotoluvuista.

Tykkylumi aiheuttaa ongelmia erityisesti korkeilla paikoilla jotka ovat ns. tykkyrajan yläpuolella. Graafisen tarkastelun perusteella etsittiin aineistosta tykkyraja eri osissa maata ja sille estimoituihin yhtälö

$$k_t = \frac{11}{80} \times y - 741,25 \quad (6)$$

jossa y on metsikön y-koordinaatti (km) yhtenäiskoordinaatistossa. Tukkivähennysmallin selittäjänä käytettiin metsikön korkeutta tykkyrajan yläpuolella. Muuttuja sai arvoksi 0, jos metsikkö oli tykkyrajan alapuolella.

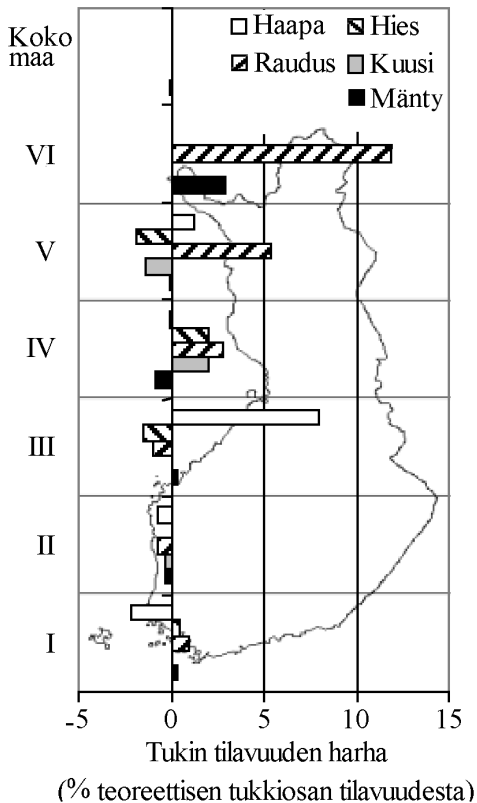
Kuusen tyvilahoriskin on todettu olevan suuri etelärannikon rehevien maiden kuusikossa. Tämän vuoksi kuusen mallissa selittäjäksi kokeiltiin dumymuuttujan rehevä ja korkeuden sekä lämpösumman yhteisvaikutustermejä.

4.3 Mallien harha laadinta-aineistossa

Mallien harhan tarkastelua varten laskettiin tukin tilavuuden harha prosentteina tukkiosan tilavuudesta kaavalla

$$b_v = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{v}_i - \sum_{i=1}^n v_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \times 100\% \quad (7)$$

jossa V_i on puun i teoreettisen tukkiosan tilavuus, v_i todellinen tukkitilavuus ja \hat{v}_i ennustettu tukkitilavuus. Tukin tilavuuden harha laskettiin koko maassa sekä kuudella 200 kilometrin levyisellä kaistaleella. Koko maan tasolla mallit ennustavat tukkitilavuuden harhattomasti (kuva 5). Kaistaleidenkin harhat ovat yleensä alle prosentin luokkaa. Pohjois-Suomessa harhat ovat suurempia kuin etelässä, mikä johtuu suurelta osin siitä, että kaistaleilla V ja VI on vain muutamia kymmeniä lehtipuita. IV-kaistaleella kaikkien puulajien harhat ovat positiivisia ja muutamien prosentin luokkaa. Muilla kaistaleilla harhat eivät ole havaintomäärät huomioiden merkittävän isoja.

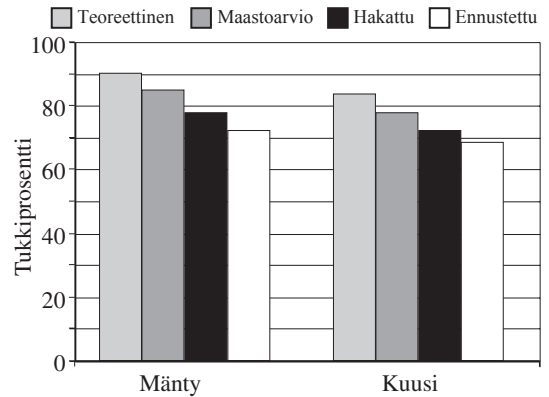


Kuva 5. Ennustetun tukkitilavuuden harha 200 km:n levyisissä kaistaleissa sekä koko maassa laadinta-aineistossa.

4.4 Mallien vertailu toteutuneeseen tukkikertymään

Mallien testauksessa käytettiin aineistoa, joka koostuu 37 kivennäismaan havupuuvaltaisesta päätehakkukuukiosta (Hyvönen 2001). Metsiköt sijaitsevat Keski-, Kaakkois- ja Itä-Suomessa kolmen eri metsäyhtiön mailla. Kultakin kuviolta on mitattu 3–5 koelaa ja koelalan pohjapinta-alamediaanipuun on mitattu koepuuna. Koepuusta on arvioitu tavanomaisten koepuutunnusten lisäksi tukkivähennysprosentti. Mitatut kuviot on hakattu metsäkoneella, ja koneen kuviokohtaisilta tulosteilta voitiin laskea kertymän tukkiprosentti.

Lukupuiden perusteella lasketun käyttöpuun tilavuuden ja hakkuukertymän tukkiprosentin avulla laskettiin kullekin metsikölle tukkipuuston tilavuus. Hakkuussa toteutunutta tilavuutta ei käytetty suo-



Kuva 6. Eri tukkivähennysmallilla saadut, maastoarvioon perustuvat sekä hakkuussa toteutuneet tukkiprosentit puulajeittain päätehakkueleimikkoaineistossa.

raan, jotta kokonaistilavuuden ja pinta-alan arviointivirheet eivät vaikuttaisi tuloksiin. Lukupuille ennustettiin tukkivähennys tukkivähennysmallilla ja saatujen tukkitilavuuksien avulla laskettiin kukin metsikön ennustettu tukkitilavuus. Koepuiden maastossa arvioidut tukkivähennykset yleistettiin lukupuille ja niiden avulla laskettiin maastoarvioon perustuva tukkitilavuus. Leimikoiden eri menetelmillä saadut tukkitilavuudet sekä kokonaistilavuudet summattiin puulajeittain ja niistä laskettiin aineiston toteutunut ja ennustettu tukkiprosentti.

Sekä kuusella että männyllä uudella tukkivähennysmallilla saatu tukkiprosentti on pienempi kuin toteutunut tukkitilavuus (kuva 6). Toisaalta maastoarvion perusteella laskettu tukkiprosenttikaan ei ole yhtään lähempänä toteutunutta tukkiprosenttia kuin mallilla saatu.

Käytetty testiaineisto koostuu päätehakkueleimikoista, joista huonot puut on jo harvennuksissa poistettu, kun taas mallin laadinta-aineisto sisältää kaikenlaisia metsiköitä. Siksi tukkivähennysmalli aliarvioi tukin määrää päätehakkueleimikoissa ja luultavasti vastaavasti yliarvioi tukin määrää harvennushakkueleimikoissa.

4.5 Mallien herkkyyks mittavaatimuksen muutoksille

Herkkyyksanalyysissä tukin minimipituutta tai minimiläpimittaa muutettiin ja VMI9-datan rungot

Tukkivähennysennuste puun läpimitan ja iän suhteen käyttäytyy järkevästi (kuva 4). Iän suhteen tarkasteltaessa (kuvat 4c ja 4d) haapaa ja kitumaan puita lukuun ottamatta kaikkien mallien kuvaaja on loiva u-käyrä ja kaikilla puulajeilla tukkivähennys lähestyy ykköstä puun vanhetessa. Sekä iän että läpimitan suhteen tarkasteltaessa nähdään, että kuusen ja männyn käyrät ovat lähellä toisiaan ja kaukana koivujen käyrästä. Hieskoivulla tukkivähennys on suurempi kuin rauduskoivulla. Kuusella tukkivähennys on pienillä puilla suurempi kuin männyllä, mutta laskee jo alle 25 cm:ssä männyn käyrän alle. Tämä johtuu puulajien tukin minimiläpimittojen eroista. Suurilla läpimitoilla männyn käyrä nousee selvästi korkeammalle kuin kuusella, mikä johtuu luultavasti siitä, että oksien paksuus kasvaa puun läpimitan kasvaessa ja männyllä oksaisuus estää tukin saamisen useammin kuin kuusella.

Koivuilla tukkivähennys kääntyy kasvuun (puut alkavat lahota) n. 70 vuoden iässä ja kuusella ja männyllä n. 100 vuoden iässä. 200-vuotiaista koivuista ei enää saada tukkia, mutta havupuilla tukkia voidaan saada vielä yli 300-vuotiaistakin puista. Vaikka kuusi on herkempi lahoamaan kuin mänty, pysyy kuusen käyrä Etelä-Suomessa koko ajan männyn käyrän alapuolella. Pohjois-Suomessa kuusen käyrä sen sijaan nousee n. 320 vuoden kohdalla männyn käyrän yläpuolelle. Tässä tarkastelussa on kuitenkin muistettava, että mallin laadinta-aineiston puissa lahon havainnointi perustuu rungon ulkoisten tekijöiden lisäksi vain yhteen rinnankorkeudelta kairattuun lastuun, eikä kaikkia lahoja inventoinnissa havaita. Tamminen (1985) mukaan valtakunnan metsien inventointiaineistossa vain 55%:ssa lahon vaurioittamista kuusista tuho havaitaan, ja nämä havainnot käsittävät 87% lahon vaurioittamasta puuaineesta. Siksi tämänkin tutkimuksen aineistossa laho on aliarvioitu, ja malli aliarvioi lahoa.

Haavan malli ei laadinta-aineiston pienuuden vuoksi kuvaa tukkivähennystä yhtä hyvin kuin männyn, kuusen ja koivujen mallit. Malli on kyllä laadinta-aineistossa harhaton (kuva 5) ja tärkeimmällä sovellusalueella (20–40 cm, 50–100 v) mallin antama tukkivähennys on järkevällä tasolla. Mallissa ei kuitenkaan ole u-muotoa ja kuvaaja nousee hyvin hitaasti. Tämä johtuu siitä, että laadinta-aineistossa ei ole ollut riittävästi vanhoja haapoja (kuva 1g). Mallin soveltaminen ennustamistilanteessa vaatii

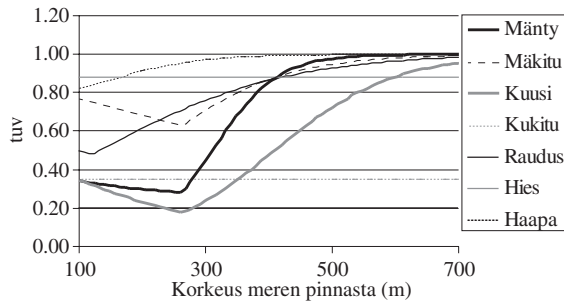
siksi enemmän tarkkaavaisuutta kuin muiden puulajien mallien soveltaminen.

Mallin laadinta-aineisto on otos kaikista Suomen metsissä kasvavista puista. Harvennushakkuilla on kuitenkin jo pitkään poistettu osa metsikön puista. Nämä keskimääräistä huonolaatuisemmat puut puutuvat laadinta-aineistosta. Siksi malli saattaa ennustaa esimerkiksi puun iänmukaisen rappeutumisen liian lievästi. Mallia voidaan kuitenkin soveltaa tukkiosuuden arvioimisessa silloin, kun kohdemetsikkö on normaali hakkuin käsitelty metsikkö.

Mallin laadinta-aineistossa ei ollut puita Kalajokilaaksosta. Alue on kuitenkin pieni eikä se poikkea ympäröivästä alueesta joten malleja voidaan soveltaa myös tällä alueella.

Malleihin sisältyy oletus tukkien mitta- ja laatuvaatimuksista. Herkkyysanalyysin perusteella ei näyttäisi olevan suurta haittaa, vaikka tukin latvaläpimitta poikkeaa muutamia senttimetrejä mallin laadinnassa käytetystä latvaläpimitasta. Sen sijaan jo 30 cm:n poikkeama tukin minimipituudessa aiheuttaa herkkyysanalyysin perusteella 2–6 prosenttiyksikön harhan ennusteeseen. Tässä tutkimuksessa laadittuja tukkivähennysmalleja voidaan käyttää ennustamaan tavanomaisten tukkien tilavuutta, mutta jos käytetyt mitta- ja laatuvaatimukset poikkeavat paljon VMI:ssä käytetyistä vaatimuksista (taulukko 1), on ero otettava huomioon malleja käytettäessä esimerkiksi sopivalla korjauskertoimella tai saatuun logit-muuttujan arvoon lisättävällä vakiolla.

Luonnossa tukkivähennys saa hyvin paljon arvoja 0 ja 1 ja vain osalla puista tukkivähennys on tällä välillä. Malli ei kuvaa ilmiötä samanlaisena kuin se luonnossa esiintyy, vaan yksittäisen puun tukkivähennysennuste on aina jotain nollan ja ykkösen väliltä. Käytännössä malli antaa, kuten mallit yleensä aina antavat, määrättyissä olosuhteissa kasvavan määrätynlaisen puun tukkivähennyksen odotusarvon estimaatin, jota käytetään tukkivähennyksen ennusteena. Mallin antamasta ennusteesta puuttuu se satunnaisvaihtelu, joka saa harvennushakkuuta tekävän metsurin valitsemaan kahdesta samankokoisesta, vierekkäin kasvavasta puusta sen, jossa on koro, paksuja oksia tai latva poikki. Siksi mallia ei sellaisenaan voida käyttää simulaattorissa harvennushakkuissa poistettavien puiden valintaan: näin käytettynä simulaattori saattaisi esimerkiksi eteläsuomalaisesta istutuskusikosta poistaa en-

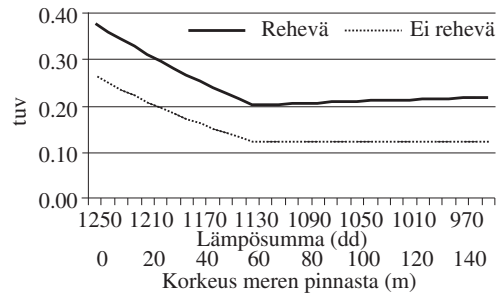


Kuva 8. Kuusamossa metsämaalla kasvavan 100-vuotiaan, 28-senttisen puun tukkivähennysennusteen kehitys korkeuden meren pinnasta kasvaessa.

simmäiseksi kaikki istutetut kuuset.

Malli soveltuu hyvin käytettäväksi metsätalouden laskentajärjestelmissä, kunhan edellä kuvatut mallin heikkoudet tiedostetaan ja otetaan huomioon. Mallit ovat koko maan tasolla harhattomia eivätkä harhat ole alueellisestikaan merkittävän suuria (kuva 5). Männy, kuusen ja koivujen mallien u-muoto (kuva 4) takaa sen, että mallit eivät ennusta liikaa tukkia yli-ikäiselle tai muuten poikkeavalle puulle, jollaisia metsikkösimulaattorissa saattaa tulla vastaan. Mallien selittäjinä on käytetty pelkästään yleensä metsäsuunnittelussa kerättäviä muuttujia. Kuviokohtaisia puustotunnuksia ei ole käytetty lainkaan, jolloin yksittäisen puun tukkivähennykseen iän suhteen ei tule esimerkiksi hakkuun seurauksena sekaannusta aiheuttavia hyppäyksiä. Toimenpiteiden vaikutus metsikön tukkiosuuteen tulee otettua huomioon toteuttamalla esimerkiksi hakkuut alaharvennuksina ja käyttämällä eri puulajeille eri harvennusvoimakkuuksia.

Toisena mallille asetettuna vaatimuksena oli, että sen tulisi antaa kohtuullisia tuloksia myös ongelma-alueilla. Kuusen ja männy Pohjois-Suomen malleissa mukana selittäjänä on metsikön sijainti tykkyrajan yläpuolella. Tykkyrajan vaikutus tukkivähennykseen on erittäin merkittävä, ja se nostaa lakialueiden tukkivähennystä selvästi suuremmaksi kuin alavammilla paikoilla (kuva 8). Tykkyrajan yläpuolella tukkivähennys lähtee heti jyrkkään nousuun ja nousee varsinkin männyllä hyvin nopeasti. Myös Norokorven ja Kärkkäisen (1985) mukaan tykkyvaurioprocentti nousee sijaintikorkeuden kasvaessa niin, että Kuusamossa 250 metrin korkeudessa



Kuva 9. Etelä-Suomalaisen 80-vuotiaan 30-senttisen kuusen tukkivähennysennuste siirryttäessä etelärannikolta pohjoiseen ja sisämaahan (lämpösomma pienenee ja samanaikaisesti korkeus meren pinnasta kasvaa). Sarja "Rehevä" kuvaa lehtomaisella kankaalla tai sitä rehevämällä paikalla kasvavan puun tukkivähennystä ja sarja "Ei rehevä" tuoreella kankaalla tai sitä karummalla paikalla kasvavan puun tukkivähennystä.

meren pinnasta tykkytuhoja ei juurikaan esiinny, mutta tämän rajan yläpuolella vaurioprocentti nousee lineaarisesti, ja 450 metrin korkeudessa yli 90%:ssa puista on tykkytuhoja. Kuvasta voidaan nähdä männy kuusta suurempi tykkytuhoriski.

Kuusen Etelä-Suomen mallissa valemuuttuja *reh* sekä lämpösoman ja korkeuden yhteisvaikutus valemuuttujan *reh* kanssa saavat aikaan sen, että rehevillä mailla kuusen tukkivähennysennuste on huomattavasti suurempi kuin muualla ja ero rehevien ja muiden maiden välillä on etelässä rannikon läheisyydessä suurempi kuin muualla (kuva 9). Tällainen käyttäytyminen oli aikaisempienkin tutkimusten valossa odotettavissa (esim. Tamminen 1985), tiedettiinhan tyvilahon olevan ongelma nimenomaan rannikon läheisyydessä rehevillä maapohjilla.

Ahvenanmaa, otettiin mallissa huomioon valemuuttujan avulla. Muuttuja tuli merkittäväksi männy ja kuusen Etelä-Suomen malleissa sekä koivujen malleissa ja kerroin on positiivinen, joten tukkivähennys on Ahvenanmaalla suurempi kuin muualla Suomessa. Rannikkometsät otettiin mallissa huomioon käyttämällä selittäjänä jotain korkeuden muunnosta. Korkeuden, korkeuden logaritmin tai muuttujan $\min(kmp, raja)$ kertoimista nähdään, että kaikilla puulajeilla meren läheisyydessä tukkivähennys pienenee korkeuden meren pinnasta kasvaessa.

Malli antaa siten rannikon läheisyydessä suurempia tukkivähennyksen ennusteita kun muualla.

Tukkivähennyksen merkitys metsän tuoton arvioinnissa on niin suuri, että se on laskennassa otettava huomioon. Tukkivähennyksen mittaaminen maastossa on työlästä, eikä sekään välttämättä johda kovin paljon mallia parempiin tuloksiin (kuva 6). Tukkivähennysmallinkaan käyttö ei ole ongelmatonta. Suurin ongelma on sen sidos käytettyihin tukin mitta- ja laatuvaatimuksiin. Parempi vaihtoehto puun tukkiosuuden arvioimiseen voisi olla eri tuhojen mallittaminen erikseen. Silloin metsäsimulaattorissa voitaisiin puuhun sitä kasvatettaessa simuloida myös tuhoja ja siten runkoon tulisi aina sattuneesta tuhosta jonkinlainen vika. Puut voitaisiin apteerata simulaattorissa millä tahansa mitta- ja laatuvaatimuksilla, ja vikaisuudet voitaisiin huomioida apteerauksessa. Tällaisen mallin tekeminen olisi kuitenkin suuri urakka: kunkin tuhon todennäköisyys pitäisi mallittaa simulaattoria varten. Lisäksi pitäisi jotenkin arvioida, millaisen ja kuinka vakavan vaurion kukin tuho puuhun aiheuttaa. Oksien kasvua ja karsiutumista varten tarvittaisiin oma mallinsa. Myös vian kylestyminen puun kasvaessa olisi jotenkin huomioitava jne. Tukkiisuuden ennustamisen malliketjusta tulisi pitkä ja siksi tuloksista tulisi helposti harhaisia. Kaikkien näiden mallien laadinnassa ongelmaksi tulisi vielä sopivan aineiston löytäminen: Suomessa lähes kaikkia metsiä on hakattu jossain määrin ja hakkuissa poistetaan aina huonolaatuisimpia puita, minkä vuoksi tuhon todennäköisyydet luultavasti aliarvioitaisiin. Hyvän tuhomallin laadinnan vaikeus huomioiden tukkivähennysmallia voidaankin pitää suhteellisen hyvänä kompromissiratkaisuna tukkiisuuden ennustamisongelmaan.

Kiitokset

Tutkimus toteutettiin Metsäntutkimuslaitoksen Joensuun tutkimuskeskuksessa. Työtä rahoittivat TEKES, MELA:n asiakasrahoitteinen hanke ja Suomen Akatemia (pääötönumero 73392). Kiitokset tutkimuksen rahoittajille. Tutkimuksen kuluessa työtä ovat kommentoineet ja vinkkejä antaneet MH Markku Siitonen, VTT Juha Lappi, Ph.D., MML

Tuula Nuutinen, MMT Anneli Jalkanen, MMM Henrik Heräjärvi ja VTM Jaakko Heinonen. Kiitän heitä sekä artikkelin esitarkastajia hyödyllisistä parannusehdotuksista.

Lähteet

- Ferm, A. 1990. Nuorten vesasyntyisten hieskoivikoiden kehitys ja lahoisuus turvemilla. Seloste: Development and decay of young *Betula pubescens* coppice stands on peatland. *Folia forestalia* 744. 17 s.
- Hosmer, D.W. & Lemeshow, S. 1989. Applied logistic regression. A Wiley interscience publication. John Wiley & Sons. New York. 307 s.
- Huuri, O. 1976. Kallistumisilmiö istutusmänniköissä; tiedustelun tuloksia. Seloste: Tilting of planted pinens; survey results. *Folia Forestalia* 265. 22 s.
- Hyvönen, P. 2001. Maastomittaukset ja MELA2000. Julkaisussa: Nuutinen, T. & Suokas, A. (toim.). MELA2000 ja muuttuva metsänkäsittely. MELA-käyttäjäpäivä 21.11.2000 Joensuu. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 814: 44–52.
- Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Salminen, H., Siipilehto, J. & Haapala, P. 2002. Models for predicting the stand development – description of biological processes in MELA system. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 835. 116 s.
- Häyrynen, M. (toim.) 1997. Tapion taskukirja, 23. uud. painos. Metsälehti kustannus, Helsinki. 638 s.
- Jalkanen, A. 2001a. The probability of moose damage at the stand level in southern Finland. *Silva Fennica* 35(2): 159–168.
- 2001b. Metsikön lahoisuuden ennustaminen Etelä-Suomessa. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2001: 461–463.
- & Mattila, U. 2000. Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the National Forest Inventory data. *Forest Ecology and Management* 135: 315–330.
- Kolari, K.K. 1988. Metsäpuiden kasvuhäiriöt: Kasvuhäiriöprojektin loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 310. 35 s.
- Korhonen, K. 1988. Juurikäpättyypit ja niiden esiintyminen. Julkaisussa: Jokinen, K. (toim.). Juurikäpät: metsänkäsittelyn ongelma. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 319. 20 s.
- Kurkela, T. 1989. Versosyöpäepidemioiden syyt. Julkaisussa: Laiho, O. & Kilponen, T. (toim.). Metsäntutkimuspäivä Tampereella 1988. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 337: 49–53.

- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108. 74 s.
- & Sevola, Y. 1972. Mänty- ja kuusirunkojen puutavarasuhteet ja kantoarvot. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 74(3). 87 s.
- Laiho, O. 1987. Metsiköiden alttius tuulituhoille Etelä-Suomessa. Summary: Susceptibility of forest stands to windthrow in southern Finland. *Folia Forestalia* 706. 24 s.
- Laine, L. 1988. Männentyvitervastaudin tuntomerkki ja levinneisyys Suomessa. Julkaisussa: Jokinen, K. (toim.). Juurikäypä: metsänkäsittelyn ongelma. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 319. 20 s.
- Lappi, J. 1993. Metsäbiometrian menetelmiä. *Silva Carelica* 24. 182 s.
- Lämsä, P., Kellomäki, S. & Väisänen, H. 1990. Nuorten mäntyjen oksikkuuden riippuvuus puuston rakenteesta ja kasvupaikan viljavuudesta. Branchiness of young Scots pines as related to stand structure and site fertility. *Folia Forestalia* 746. 22 s.
- Mattila, U., Jalkanen, R. & Nikula, A. 2001. The effects of forest structure and site characteristics on probability of pine twisting rust damage in young Scots pine stands. *Forest Ecology and Management* 142: 89–97.
- Mäkelä, A., Mäkinen, H., Vanninen, P., Hynynen, J., Kantola, A. & Mielikäinen, K. 2000. Männiköiden tuotoksen ja laadun ennustaminen. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 794. 89 s.
- Möykkynen, T. 2000. Spore dispersal of *Heterobasidion annosum* and simulations of the spread of butt rot in *Picea abies* stands in Finland. University of Joensuu. 38 s.
- Norokorpi, Y. & Kärkkäinen, S. 1985. Maaston korkeuden vaikutus puusto- ja kasvupaikkatunnuksiin sekä tykkytuhoihin Kuusamossa. Summary: The effect of altitude on stand and site characteristics and crown snow-load damages in Kuusamo in Northern Finland. *Folia Forestalia* 632. 26 s.
- Nykänen, M-L., Peltola, H., Quine, C.P., Kellomäki, S. & Broadgate, M. 1997. Factors affecting snow damage of trees with particular reference to European conditions *Silva Fennica* 31(2): 193–213.
- Nyysönen, A. & Ojansuu, R. 1982. Metsikön puutavaralajirakenteen, arvon ja arvokasvun arviointi. Summary: Assessment of timber assortments, value and value increment of tree stands. *Acta Forestalia Fennica* 179. 52 s.
- Päivinen, R. 1983. Metsikön tukkiosuuden arviointimenetelmä. A Method for estimating the sawlog percentage in Scots pine and Norway spruce stands. *Folia Forestalia* 564. 16 s.
- Rikkinen, P. 1987. Havutukkien kuorelliseen latvaläpimittaan perustuva tilavuuden määrittäminen. Seloste: Volume of coniferous saw logs based on top diameter over bark. *Folia Forestalia* 684. 47 s.
- Siitonen, M., Härkönen, K., Kilpeläinen, H. & Salminen, O. (toim.). 1999. Mela Handbook, 1999 edition, Metsäntutkimuslaitos, Helsingin tutkimuskeskus. 492 s.
- Snellman, C.-G. 1984. Runkokäyrät ja tilavuusfunktiot VAX:illa. Metsäntutkimuslaitos, matemaattinen osasto, 11.5.1984. Moniste. 9 s.
- SPSS 7.5 Statistical algorithms 1997. SPSS Inc, Chicago.
- Suomen Kartasto 1987. Kartta 12. Teoksessa: Alalampi, P. (toim.). Suomen kartasto, Vihko 131: Ilmasto. Maanmittauslaitos, Helsinki.
- Tamminen, P. 1985. Butt-rot in Norway spruce in southern Finland. Seloste: Kuusen tyvilahoisuus Etelä-Suomessa. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 127. 52 s.
- Turkia, K. & Kellomäki, S. 1987. Kasvupaikan viljavuuden ja puuston tiheyden vaikutus nuorten mäntyjen oksien läpimittaan. Influence of the site fertility and stand density on the diameter of branches in young Scots pine stands. *Folia Forestalia* 705.
- Uusvaara, O. 1985. The quality and value of sawn good from plantation-grown Scots pine. Seloste: Viljelymänniköstä saadun sahatavaran laatu ja arvo. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 130. 53 s.
- Valtakunnan metsien 8. inventointi, kenttätöiden ohjeet, Pohjois-Pohjanmaan versio 1993. Metsäntutkimuslaitos, Helsinki. 68 s. + liitteet.
- Valtakunnan metsien 9. inventointi (VMI9). Maastotyön ohjeet 1997. Etelä-Pohjanmaa, Keski-Pohjanmaa (eteläosa), Rannikko (länsiosa). Metsäntutkimuslaitos, Helsingin tutkimuskeskus. 150 s.
- Veltheim, T. 1987. Pituusmallit männylle, kuuselle ja koivulle. Metsänarvioimistieteen pro gradu. Helsingin yliopisto. 60 s.
- Vähäsaari, H. 1988. Puutavaralajirakenteen arviointi eri mittausmenetelmillä. Syventävien opintojen tutkielma. Joensuun yliopisto. 96 s.

37 viitettä