

**Rungon kapenemisen ennustaminen
hakkuukoneen mittalaitteella
Ennustusmenetelmien vertailu**

**Eero Lukkarinen
Jari Marjomaa**

Metsätehon raportti 35
15.12.1997

Konsortiohanke: A.Ahlström Osakeyhtiö, Aureskoski Oy,
Enso Oyj, Koskitukki Oy, Kuhmo Oy,
Metsäliitto Osuuskunta, Metsähallitus,
Pölkky Oy, UPM-Kymmene Oyj,
Vapo Timber Oy, Visuvesi Oy

Suomen Puututkimus Oy ja sen osakkaat

Osoite: PL 367 (Tekniikantie 12)
02151 Espoo

Puhelin: (09) 4354 2022

Telekopio: (09) 466 695

Asiasanat: kapenema, runkomuoto, mittaustarkkuus,
runkokäyrä, kasvukäyrä

© Metsäteho Oy

Helsinki 1998

| SISÄLLYS | sivu |
|--|-----------|
| ALKUSANAT | 3 |
| TIIVISTELMÄ | 4 |
| 1 TAUSTA JA TAVOITE | 5 |
| 2 ENNUSTAMISMENETELMÄT | 6 |
| 2.1 Yleistä | 6 |
| 2.2 Runkopankin hyödyntäminen | 7 |
| 2.3 Matemaattiset menetelmät | 7 |
| 2.3.1 Suoraviivainen eli lineaarinen malli | 8 |
| 2.3.2 Kasvukäyrä-malli | 9 |
| 2.3.3 Suhteellinen puunmuoto-malli | 9 |
| 2.4 Nykytilanne mittalaittevalmistajittain | 11 |
| 3 TUTKIMUSMENETELMÄ JA -AINEISTO | 12 |
| 4 TULOKSET | 14 |
| 4.1 Tukkiosan pituuden ennuste | 14 |
| 4.2 Läpimitan ennuste | 16 |
| 4.3 Case Kuorevesi | 21 |
| 4.3.1 Aineisto | 21 |
| 4.3.2 Pituuden mittaus | 22 |
| 4.3.3 Läpimitan mittaus | 23 |
| 4.3.4 Ennustemallin tarkkuus | 24 |
| 5 PÄÄTELMÄT | 27 |
| KIRJALLISUUTTA | 29 |

ALKUSANAT

Tämä tutkimus on tehty osana Tuotelähtöinen puunhankinta -projektia, jonka omistajina ovat Suomen Puututkimus Oy ja Metsäteho Oy osakkaineen. TEKES on rahoittanut projektia Puun mekaanisen jalostuksen teknologia-ohjelmasta. Projektia on johtanut yhteinen johtoryhmä. Tutkimukset on toteutettu seitsemässä eri osaprojektissa. Aineistojen hankinta on ollut pääosin yhteinen.

Tuotelähtöisessä puunhankinnassa korostuvat teollisuuden asiakaslähtöisyys korostuminen sekä integroituneen teollisuuden puuraaka-aineen tarkempi prosessiohjaus kannattavuuden mukaan. Tuotelähtöinen puunhankinta -projektissa on kehitetty hakkuukoneryhmän ja varannon ohjauksen toimintamalleja.

Hakkuukoneapteeraustekniikan kehittäminen -osaprojektin yhtenä osana selvitettiin hakkuukoneiden ennustemallien toimintaa. Hankkeessa kehitettiin myös hakkuukoneiden mittaustiedon perusteella toimiva runkomuodon ennustemalli. Hakkuukoneryhmän ohjaus -projektissa käytettiin ennustemallia jäljiteltäessä hakkuukoneiden toimintaa.

Projektissa olivat yhteistyökumppaneina Tampereen yliopiston matemaattisten tieteiden laitos ja Ponsse-tietojärjestelmät.

Helsingissä 15.12.1997

Eero Lukkarinen

Jari Marjomaa

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa selvitettiin rungon kapenemisen ennustamista hakkuukoneen mittalaitteella. Yksioteharvesterissa on tarkka rungon kapenemisen ennustumenetelmä välttämätön, jotta saavutetaan paras mahdollinen apteeraus. Puuteellisen tai virheellisen tiedon pohjalta arvoapteeraus- ja jakaumaohjausmenetelmät eivät voi toimia kunnolla.

Työssä selvitettiin eri mittalaittevalmistajien tällä hetkellä käytössä olevien ennustemallien toimintaperiaatteet. Samalla saatiin selville, että apteerausautomaatiikalla varustettuja hakkuukoneita on Suomessa noin 810 (marraskuu 1997).

Tutkimuksessa tarkasteltiin kahta teoreettisilta perusteiltaan erilaista runkokuodon ennustusmallia, joiden pohjalta on edelleen kehitetty hakkuukoneisiin soveltuvat ennustemallit. Tampereen yliopistossa kehitetty menetelmä on mukautettu toimimaan Ponsen hakkuukoneisiin. Metsätehon mallissa puolestaan on samoja piirteitä kuin Sisu-Loggingin tarkastelemassa runkokuodon ennustusmallissa. Ennustemalleja testattiin erimerkkisillä hakkuukoneilla kerätyillä runkoaineistoilla (STM). Lisäksi kerättiin erillinen aineisto, jossa saatiin käyttöön Ponsen hakkuukoneella rungon käsittelyn aikana tehdyt ennusteet.

Ennustemallien toiminnan tarkkuutta arvioitiin tukkiosan pituuden ja tukkien latvaläpimittojen ennusteiden perusteella.

Ponsen ennustemalli toimi tarkemmin kuin kumpikaan teoreettinen malli. Kuusella tukkiosan pituuden ennustevirheiden keskiarvo oli +11 cm ja männyllä -28 cm. Keskihajonta oli kuusella 140 cm ja männyllä 160 cm. Tukkien latvaläpimittojen ennustevirheiden keskiarvo oli kuusella +3 mm ja männyllä -9 mm. Keskihajonta oli männyllä 21 mm ja kuusella 13 mm. Teoreettisilla malleilla erityisesti keskihajonnat olivat suuremmat.

Keskimäärin Ponsen malli toimii koko rungolla hyvin. Yksittäistä ennuste-kohtaa tarkasteltaessa havaitaan ongelmia esimerkiksi männyllä, jossa ennusteet ovat selvästi aliarvioita sekä tukkiosan pituuden että latvaläpimittojen suhteen. Samaten suurehko keskihajonta kertoo, että yksittäisissä ennusteissa on selkeästi virheellisiä ennusteita.

Nykyisellä läpimitan mittaustarkkuudella ennustemallin toimintaa on vaikea parantaa. Parempi läpimitan mittaustarkkuus johtaisi parempiin ennusteisiin.

1 TAUSTA JA TAVOITE

Keskeistä tuotelähtöisessä puunhankinnassa on ohjata tukkien katkonnan ohjaus tuotantolaitosten tarpeiden mukaisesti. Rungon optimaalisen apteerauksen onnistumiseen vaikuttavat ratkaisevasti hakkuukoneen mittalaitteen läpimitan ja pituuden mittaustarkkuus sekä rungon kapenemisen ennustusmenetelmä.

Läpimitan ja pituuden mittaustarkkuus on kehittynyt yksioteharvestereissa yhtä hyväksi kuin parhaissa kaksioteharvestereissa. Mittaustarkkuus onkin nykyisin riittävä virallisten vaatimusten mukaiseen työ- ja luovutusmittaukseen. Samalla kuitenkin rungon apteerausta koskevat vaatimukset ovat kasvaneet, mikä merkitsee entistä tiukempia vaatimuksia erityisesti läpimitan mittaustarkkuudelle.

Yksioteharvesterissa on tarkka rungon kapenemisen ennustusmenetelmä välttämätön optimaalisen apteerauksen onnistumiseksi. Rungon tyveltä alkaen 3 – 4 metrin matkalta mitattujen läpimittojen perusteella mittalaite laskee ensimmäisen kapenemisen loppurungolle. Tämän ennusteen perusteella lasketaan rungolle katkontaehdotus, jota korjataan uusien ennusteiden perusteella rungon käsittelyn edetessä. Puun runkomuodon eli runkokäyrän ennustaminen on apteerauksen ohjauksen tärkein osa. Mikäli se ei toimi, eivät arvoapteeraus- ja jakaumaohjausmenetelmäkään voi toimia kunnolla, koska tällöin ne perustuvat virheelliseen tai puutteelliseen lähtötietoon. Apteerauksen onnistumiseksi on erityisen tärkeää, että rungon tukkiosan pituus eli etäisyys tukin vähimmäisläpimittaan ennustetaan riittävän tarkasti.

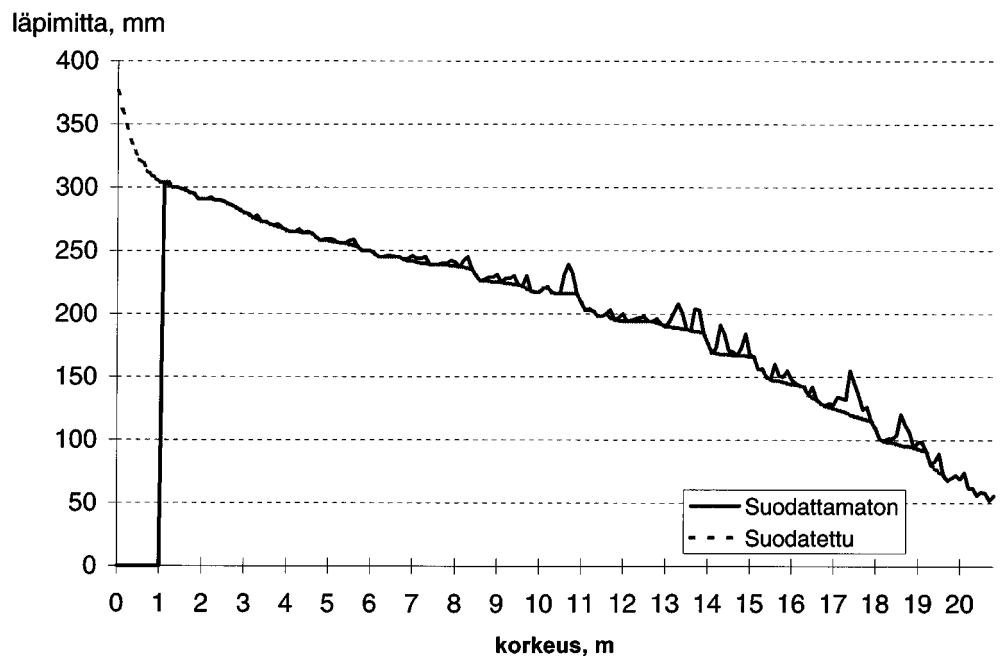
Hakkuukoneiden mittalaitteiden laskenta- ja muistikapasiteetin kehittyessä voidaan rungon kapenemisen ennustamisessa soveltaa yhä kehittyneempiä menetelmiä. Metsätehossa toteutetun Tuotelähtöinen puunhankinta -projektin osatehtävänä oli selvittää hakkuukoneiden mittalaitteiden apteerausohjelmien ominaisuuksia. Tässä osatehtävässä tarkasteltiin kahta rungon kapenemisen ennustamismenetelmää: Tampereen yliopistossa kehitettyä tilastollisiin toistomittausmatriiseihin perustuvaa menetelmää ja Metsätehossa kehitettyä polynomimalleihin perustuvaa menetelmää. Molemmilla menetelmillä laskettiin kapenemisen ennusteet laajalle runkojoukolle ja niitä verrattiin todellisiin mittaustuloksiin.

2 ENNUSTAMISMENETELMÄT

2.1 Yleistä

Hakkuukoneen tuottamat perättäiset mittaushavainnot vaihtelevat paljon. Ennustamista ja tilavuuden laskentaa varten hakkuukoneen mittaustietoa esikäsitellään eli suodatetaan. Läpimittahavainnoista pyritään poistamaan sellaiset yksittäiset arvot, jotka eivät kuvaa rungon todellisia läpimittoja. Poikkeamat voivat johtua esimerkiksi tavanomaista suuremmista oksista.

Läpimittahavaintojen suodatustavat vaihtelevat hakkuukone- ja mittalaitetyypeittäin. Hakkuukoneen kuljettajalla ei ole mahdollisuutta vaikuttaa suodatusrutiineihin, vaan ne ovat konevalmistajien laatimia vakiomenetelyjä. Suodatusrutiineissa määritellään mm. se kuinka paljon läpimitan mittaustulos saa poiketa edellisen mittaustuloksesta. Suodatuksen jälkeen läpimittojen mittaustiedot ovat kelpollisia rungon ennustamiseen (kuva 1).



Kuva 1. Suodatuksen vaikutus hakkuukoneen mittaustulokseen.

Kaikki menetelmät pyrkivät ennustamaan rungon tuntematonta osaa jo käsitellyn rungon osan perusteella. Ennustettavan rungon osan pituus vaihtelee konevalmistajittain ja on noin 2 – 5 kertaa tunnetun rungon osan pituus eli suurimmillaan noin 20 m. Hakkuukoneen apteerausalgoritmi tarvitsee toimia- kseen tiedon rungon läpimitoista. Ennustemallin avulla saadaan käsi- teltävästä rungosta läpimitan arvio kullekin korkeudelle. Kapenemisen ennustamismalleja voidaan tarkentaa puutavaran valmistuksen yhteydessä eli niistä voidaan tehdä joustavia ja oppivia. Tällöin niiden antamia

kapenemisennusteita voidaan tarkentaa jokaisen rungon kohdalla sen valmistuksen edetessä ja mittaustulosten määrän kasvaessa. Lisäksi jokaista valmistettua runkoa voidaan käyttää kapenemisennusteiden sovittamiseen kyseisen leimikon runkoihin.

Mittalaitte vertaa rungon käsittelyn aikana mitattuja ja ennustettuja läpimittoja toisiinsa. Mikäli nämä poikkeavat enemmän kuin ennalta asetetut rajat sallivat, lasketaan rungolle uusi ennuste. Ennusteen ja mittaustiedon välistä eroa voidaan seurata joko jatkuvasti tai tietyissä kohdissa, esimerkiksi ehdoteuissa katkontakohdissa.

Ennustamista varten tarvitaan vertailuläpimitta, joka hakkuukoneesta riippuen otetaan 2 – 3 metrin korkeudelta. Puun tyvilaajentuman vaikutus pienenee korkeammalle siirryttäessä, ja rungon läpimittojen mittauksesta katoaa tyven epäsäännöllisen muodon aiheuttama ylimääräinen vaihtelu. Runkokäyrän ennustaminen voidaan vertailuläpimitan mittauksen jälkeen tehdä erilaisilla tavoilla.

2.2 Runkopankin hyödyntäminen

Yksinkertaisimmillaan käsiteltävän leimikon puita kerätään mittalaitteen muistiin runkopankiksi, josta vertailuläpimitan tai -läpimittojen avulla haetaan käsiteltävänä olevan rungon kokoinen runko. Runkopankin rungosta tunnetaan läpimitat käyttöosan matkalta ja oletetaan, että käsiteltävänä oleva runko kapenee vastaavalla tavalla. Jokseenkin tällainen menetelmä on käytössä vanhemmissa Mitron Oy:n MOTOMIT-mittalaitteissa. Menetelmä on yksinkertainen eikä vaadi laskentaa, joten se ei aseta suuria vaatimuksia mittalaitteelle. Samankaan leimikon puut eivät aina kuitenkaan ole runkomuodoltaan samanlaisia. Erityisesti sekapuustoisissa, epätasaisissa leimikoissa absoluuttisin mitoin ilmaistu runkomuoto vaihtelee runsaasti. Mitron Oy on kehittänyt em. syistä ennustealgoritmiansa edelleen. Uudemmissa MOTOMIT4-mittalaitteissa runkomuodon ennustamiseen käytetään osittain suhteellisia läpimittoja ja korkeuksia.

Timberjackin TJ3000-mittalaitteen ennustemalli perustuu myös runkopankin käyttöön. Runkopankkiin tallennetaan todellisten runkojen tasoitettuja kapenemia. Käsittelyssä olevasta rungosta tiedetään läpimitta vertailukorkeudella ja tunnetun osan kapenemat eri korkeuksilla. Vertailuläpimitan avulla valitaan rungot, joiden haluttujen korkeuksien välisten kapenemien avulla valitaan käsittelyssä olevan rungon ennuste. Rungon käsittelyn edetessä taulukossa liikutaan solusta toiseen ja saadaan loppurungolle ennuste.

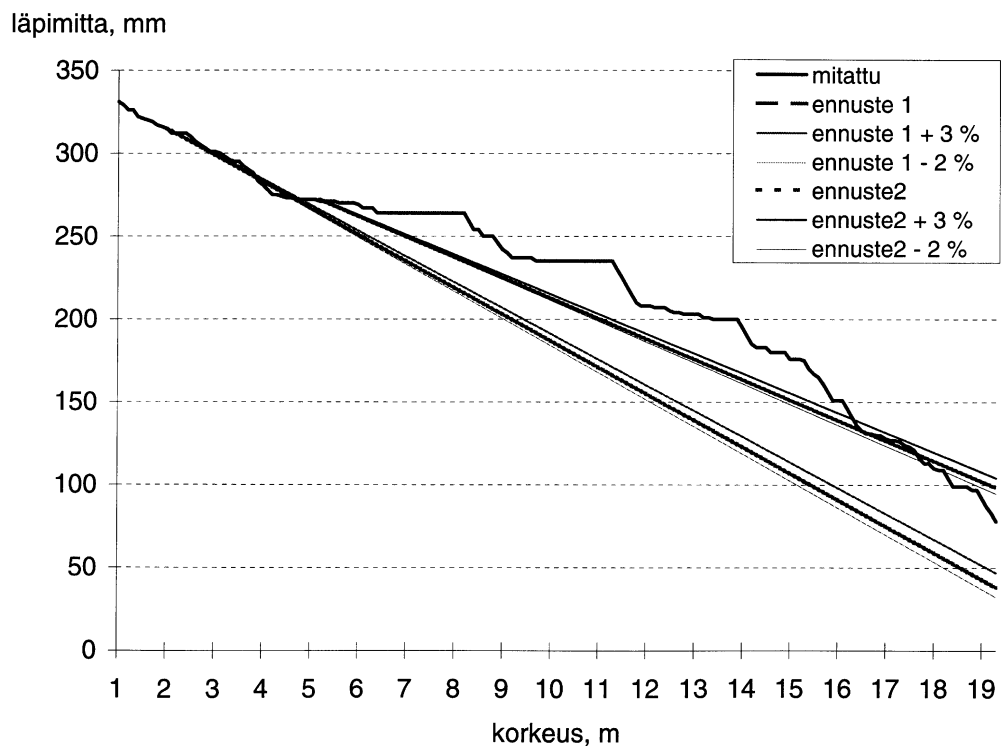
2.3 Matemaattiset menetelmät

Matemaattisen yhtälön avulla runkomuotoa ennustavia menetelmiä on Suomessa käytössä kolmea päätyyppiä. Niissä kussakin voidaan runkomuoto ennustaa joko pelkästään käsittelyssä olevan rungon avulla tai sen lisäksi hyödyntää aiemmin käsiteltyjä runkoja. Kehittyneimmät tavat perustuvat

leimikon edellisiin puihin ja käsiteltävänä olevan rungon tietojen käyttöön. Niissä kerätään kustakin leimikosta tietty määrä viimeiseksi käsiteltyjä runkoja puulajeittain hakkuukoneen mittalaitteen muistiin. Kokonaan mitattujen puiden sekä käsiteltävänä olevan puun mitatun osan avulla voidaan tehokkaasti ennustaa käsiteltävän puun vielä tuntemattomat läpimitat. Muistiin kerätään runkoja liukuvasti ja vanhin runko korvautuu aina juuri valmistetulla rungolla.

2.3.1 Suoraviivainen eli lineaarinen malli

Suoraviivaisessa ennustemallissa mitataan vähintään kaksi läpimittaa rungon eri korkeuksilta ja oletetaan rungon loppuosan kapenevan samalla tavoin. Koska runkomuoto on erityisesti tyvellä ja latvassa käyräviivainen, on menetelmästä jouduttu laatimaan kehittyneempiä versioita. Niissä vältytään joiltakin lineaarisen mallin heikkouksilta, kun mittalaite tunnistaa, missä kohdassa rungolla ollaan. Voidaan myös laskea vaihtoehtoisia runkokäyräennusteita muuttamalla ennusteen kapenemista ylös- ja alaspäin. Kapenemisviuhkan suorista valitaan sellainen, joka vastaa parhaiten toteutunutta kapenemista. Ennustemalliin voidaan myös lisätä leimikkoon mukautuvia termejä.



Kuva 2. Suoraviivaisen ennustemallin periaate.

Suoraviivaisen ennustemallin (kuva 2) hyviä puolia ovat sen yksinkertaisuus ja laskennallinen keveys, mistä johtuen se ei aseta mittalaitteelle niin suuria vaatimuksia kuin monimutkaisempaa yhtälöä käyttävät menetelmät. Huonoja puolia taas on herkkyys mittausrvirheille ja puun rungon poikkeavuuksille. Puun runkoa ei voida myöskään kuvata yhdellä ainoalla yhtälötyypillä.

Aikaisemman sukupolven ja kymmenkunta Timberjack TJ3000-mittalaitetta vanhimma päästä perustuvat suoraviivaisen ennustemallin jonkin variaation käyttöön.

2.3.2 Kasvukäyrä-malli

Tilastolliseen kasvukäyrään perustuvaa rungon kapenemisen ennustamismenetelmää käytetään Ponsse Opti -mittalaitteissa. Menetelmässä vertailuläpimitaan saakka mitattuihin eli tunnettuihin läpimitoihin sovitaan parhaiten sopiva puunmuotoa kuvaava runkokäyrä, joka on Ponsella kolmannen asteen polynomi. Yksittäisen rungon käsittelyn jälkeen mitatuista läpimitoista lasketaan polynomiyhtälö ja sen kertoimet tallennetaan mittalaitteen muistiin. Seuraavan puun käsittelyn aikana mittalaitteen muistista etsitään vertailuläpimitan avulla lähes vastaavan kokoiset rungot, joita otetaan laskentaan 20. Näiden runkojen yhtälöistä muodostetaan keskimääräinen runkokäyrä, jota käytetään kun ennustetaan käsiteltävän rungon tuntemattomat läpimitat. Mittalaitteen muistissa pidetään puulajeittain 60 viimeisen rungon tiedot.

Ruotsalaisten ja Tampereen yliopiston tekemien tutkimusten mukaan menetelmä sopii hyvin puun runkokäyrän ennustamiseen. Menetelmä on laskennallisesti raskas ja vaatii hakkuukoneen mittalaitteelta hyvää laskentakapasiteettia.

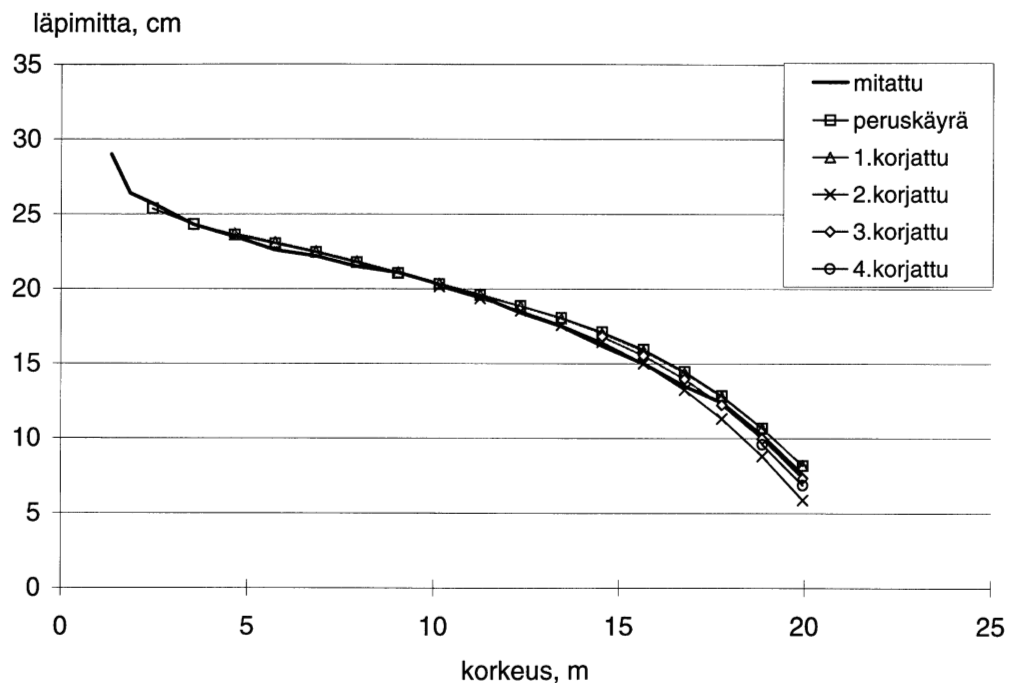
Kasvukäyrää ei välttämättä tarvitse sovittaa tilastollisesti. EPEC Oy:n kehittämässä menetelmässä käyräviivainen ennustemalli lasketaan jatkuvasti läpimitan mittaustiedon karttuessa. Runkoa kuvaavan käyrän alkuparametrien laskennassa hyödynnetään leimikosta aikaisemmin hakattuja runkoja.

2.3.3 Suhteellinen puunmuoto-malli

Suhteellisen puunmuototeorian mukaan leimikon puut ovat jokseenkin vakio-
muotoisia, kun niitä tarkastellaan suhteellisin mitoin. Puut vakioidaan siten, että puun pituus ja läpimitta saa 20 %:n suhteellisella korkeudella arvokseen yksi. Esimerkiksi 24,8 metriä pitkällä puulla 20 %:n suhteellinen korkeus tarkoittaa 4,96 metrin korkeutta. Saman puun muut suhteellisilta korkeuksilta mitatut läpimitat suhteutetaan edelleen 20 %:n korkeuden läpimittaan. Tyvellä läpimitat ovat suurempia kuin yksi, ja latvaa kohden ne pienenevät siten että latvan kärjessä ne saavat arvokseen nolla.

Runkokäyrämallin perusyhtälönä on polynomimalli, joka muodostetaan Fibonaccin lukusarjan pohjalta. Fibonaccin sarja on potenssisarja, jossa termin aste saadaan laskemalla sitä edeltävän kahden termin asteet yhteen, jolloin sarjan potenssit ovat: 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, jne. Laasasenahon (1982) valtakunnallisissa runkokäyräyhtälöissä käytettiin kahdeksaa ensimmäistä termiä sarjasta, eli runkokäyrät ovat 34. asteen polynomeja. Hakkuukoneympäristössä käytetään matalampiasteisia polynomeja; yleensä riittää sarjan viisi tai kuusi ensimmäistä termiä.

Yleiseen puumuototeoriaan perustuvassa ennustamisessa käsiteltävästä korjuukohteesta muodostetaan puolajeittain liukuva, määräkokoinen otostiedosto. Otostiedoston vanhin runko korvautuu aina juuri valmistetulla, uudella rungolla. Liukuvassa otostiedostossa on tietyiltä, puun pituuteen nähden suhteellisilta korkeuksilta mitattuja läpimittahavainnoja. Näistä havainnoista lasketaan seuraavalle käsittelyyn tulevalle rungolle runkokäyrä, jonka avulla voidaan hallita rungon kaikki eri läpimitta- tai pituusyhdistelmät ennen ensimmäistäkään katkaisua.



Kuva 3. Suhteellisen puumuoto-mallin toimintaperiaate.

Laasasenahon yhtälöt (kuva 3) ovat syrjäyttäneet pystypuuston runkojen tilavuuden ja puutavaralajien tilavuuksien laskennassa lähes täysin muut menetelmät. Polynomimalli soveltuu puun muodon kuvaamiseen hyvin, kun puun pituus tunnetaan. Hakkuukoneapteerauksessa puun pituus on ennustettava, mikä huonontaa jossakin määrin läpimittaennusteiden tarkkuutta.

Metsätehossa on tutkittu polynomimallin käyttämistä hakkuukoneissa Sisu Logging Oy:n toimeksiannosta. Kehitetyn mallin oikeudet ja ohjelmakoodi ovat Sisu-Logging Oy:n omaisuutta. Tästä syystä Metsätehossa laadittiin ja ohjelmoitiin erillinen ennustemalli C++-ohjelmointikielellä. Ennustemenetelmien perusidea on sama, mutta toteutus poikkeaa sen verran, että Sisu-Loggingille laaditun ennustemallin tarkkuudesta ei voi Metsätehon mallin pohjalta tehdä päätelmiä. Sisu-Logging jatkaa oman mallinsa kehitystyötä ja hakkuukoneympäristöön sovittamista.

Myös S. Pinomäki Ky:ssä on tehty ennustemallin laatimiseksi kehitystyötä, joka perustuu Laasasenahon runkokäyrien käyttöön.

2.4 Nykytilanne mittalaittevalmistajittain

Yhteenvedona on alla olevaan taulukkoon koottu eri mittalaitteiden käyttämä ennustemallin toimintaperiaate. Aikaisempien runkojen hyödyntäminen edellyttää jonkin muotoisen runkopankin käyttöä, joten lähes kaikissa markkinoilla olevissa, runkomuotoa ennustavissa mittalaitteissa kerätään runkopankkia.

TAULUKKO 1. Ennustemallin periaate laitevalmistajittain.

| | Käsiteltävänä oleva runko | Käsiteltävänä oleva runko ja aikaisemmat rungot |
|------------------------|---------------------------|---|
| Runkopankki | | Motomit |
| Muokattu runkopankki | | TJ3000, VMM2000 |
| Suoraviivainen | VMM1000 | TJ3000 vanhimmat |
| Kasvukäyrä | | Opti, EPEC 4W50 Apt |
| Suhteellinen puunmuoto | | PIKAMAT PC, VMM2000 |

Apteerausautomaattikalla varustettujen hakkuukoneiden määrä kasvaa konekannan ja hakkuulaitteiden uusiutuessa. Tällä hetkellä (marraskuu 1997) noin 80 prosentilla hakkuukoneista on jonkinlainen automaattikka, joskaan sitä ei hyödynnetä läheskään kaikissa (taulukko 2).

TAULUKKO 2. Apteerausautomaattikalla varustettujen mittalaitteiden lukumäärä Suomessa (11/97).

| Mittalaite | Mittalaitteiden kappalemäärä | Ominaisuuksista ainakin osa käytössä | Muuta |
|---------------------|---|--|---|
| EPEC 4W50 Apt | 42 | 42 | |
| Opti | 340 190 versio 3.x 150 versio 7.x | 240 190 versio 3.x 50 versio 7.x | Kaksi versiota, Vanhempi opti 7.x ja uudempi opti 3.x |
| PIKAMAT PC | Muutama | | Testikäytössä |
| TJ3000 | 300 | 200 | |
| VMM2000 | 100 | 50 | |
| MOTOMIT MOTOMIT4 | 10 20 | 10 18 | MOTOMIT on vanhempi versio. |
| Yhteensä | 810 | 560 | |

3 TUTKIMUSMENETELMÄ JA -AINEISTO

Tutkimuksessa hyödynnettiin Tuotelähtöinen puunhankinta -projektissa kerättyjä runkotietoja, jotka oli tallennettu hakkuukoneen mittalaitteella. Runkotiedot sisälsivät hakkuukoneen tiedonsiirtostandardin mukaisessa muodossa (STM-tiedosto) rungon läpimittatiedot sekä tehtyä katkontaa vastaavat pölkkyjen läpimitta- ja pituustiedot. Tutkimusaineistoksi valittiin tukkipuun kokoisia runkoja, joiden tiedot oli kerätty Timberjack TJ3000-, Ponsse Opti- ja Valmet VMM1000 -mittalaitteilla (taulukko 3).

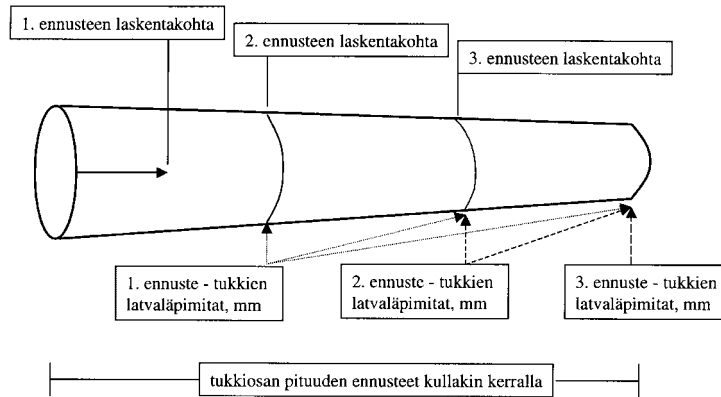
TAULUKKO 3. Tutkimusaineiston määrä mittalaitteittain ja kohteittain

| Mittalaite | Kohde | Kuusirunvoja | Mäntyrunvoja |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| Ponsse Opti | C - leimikko | 526 | 234 |
| Ponsse Opti | S - leimikko | 159 | 494 |
| Timberjack TJ3000 | F - leimikko | 313 | 249 |
| Timberjack TJ3000 | J - leimikko | 68 | 386 |
| Timberjack TJ3000 | K - leimikko | 132 | 65 |
| Valmet VMM1000 | V - leimikko | 126 | 48 |
| Yhteensä | | 1324 | 1476 |

Rungon kapenemisen ennustemenetelmän toimivuuden arvioimiseksi valittiin kaksi kriteeriä: tukkiosan pituus ja tukin latvaläpimitta. Tukkiosan pituuden ennustaminen on tärkeää, koska tukkiosa tulisi hyödyntää maksimaalisesti. Jos tukkiosa arvioidaan liian lyhyeksi ja siitä katkotaan kolmen tukin sijasta kaksi, osa tukista jää hyödyntämättä. Tukin latvaläpimitan ennustamisen oikeellisuus on vastaavasti tärkeä tekijä jakauma-apterauksen onnistumisen kannalta. Kun pyritään hakemaan tukkien tiettyjä dimensioita, huono läpimitan ennustetarkkuus vaikeuttaa halutun dimensiojakauman saavuttamista.

Metsätehossa laadittiin projektin kuluessa yleinen suhteelliseen puunmuoto-teoriaan pohjautuva ennustemalli, jossa hakkuukoneiden mittalaitteiden erityispiirteitä on otettu huomioon. Runkokäyrän laskennassa tarvittava pituus ennustetaan Henttosen laatimilla leimikkoon mukautuvilla pituusmalleilla. Pituusennustetta varten tarvitaan vertailuläpimitta, joka Metsätehon soveluksessa otetaan 2,5 metrin korkeudelta. Vertailuläpimitan ja sen mukaan lasketun pituuden avulla lasketaan ensimmäinen ennuste koko rungon kaikille läpimitoille. Ensimmäisessä katkaisukohdassa tarkistetaan, onko ennuste ollut riittävän lähellä ehdotetussa katkaisukohdassa mitattua läpimittaa. Tässä tutkimuksessa ennusteen tarkistamiseen käytetty ikkuna oli 0 – 4 mm, eli mikäli ennuste alittaa mitatun läpimitan tai on yli 4 mm suurempi, ennuste lasketaan uudelleen.

Tilastolliseen kasvukäyrään perustuvat ennusteet laskettiin Tampereen yliopistossa. Kapenemisenennusteen laskenta vastaa osittain Ponssen mittalaitteessa käytettävää ennustustapaa. Tampereen yliopiston menetelmä on ke-

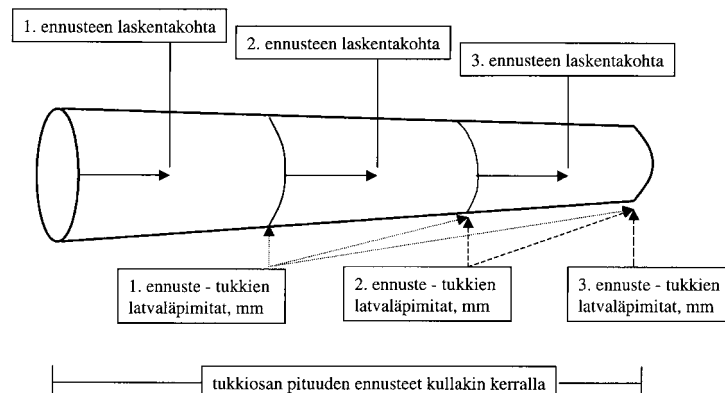


Kuva 4. Tukkien latvaläpimittojen ja tukkiosan pituuden ennusteiden laskenta Metsätehon mallissa.

hitetty siten, että tiettyjen tilastollisten optimaalisuuskriteerien perusteella tarkastellen saatiin aikaan tehokas menetelmä puun muodon ennustamiseen. Ponsen mittalaitteelle tehdyssä sovelluksessa on laskentaa yksinkertaistettu, mutta muutettu samalla vakaammaksi. Tampereen yliopiston ohjelmaan ei myöskään ole koodattu käytännössä tarpeellisia osia, kuten ennusteen tarkistusta katkaisukohtissa. Tampereen yliopiston menetelmä laadittiin kuusi-rungoille ja sitä testattiin nyt ensimmäisen kerran männyille.

Rungon ensimmäinen ennuste laskettiin, kun rungon mittaustietoja oli syötetty tyvestä lähtien kolme metriä. Ennuste laskettiin kyseisestä kohdasta eteenpäin jokaisen tukin katkaisukohtaan, tukkien välissä mahdollisesti oleviin kuitupölkkyjen katkaisukohtiin ja tukkiosan päättymisläpimitaan (150 mm).

Seuraavat ennusteet laskettiin, kun rungon mittaustietoja oli ensimmäisen tukin katkaisukohtaan jälkeen taas syötetty kolme metriä. Tällä tavoin ennusteiden laskentaa jatkettiin viimeisen tukin katkaisukohtaan saakka. Ennustelaskennan tulokset tallennettiin kukin ennustekerta erikseen. Läpimitat laskettiin 1 mm:n tarkkuudella, ennustekohtat ja tukkiosan pituudet 1 cm:n tarkkuudella (kuva 5).



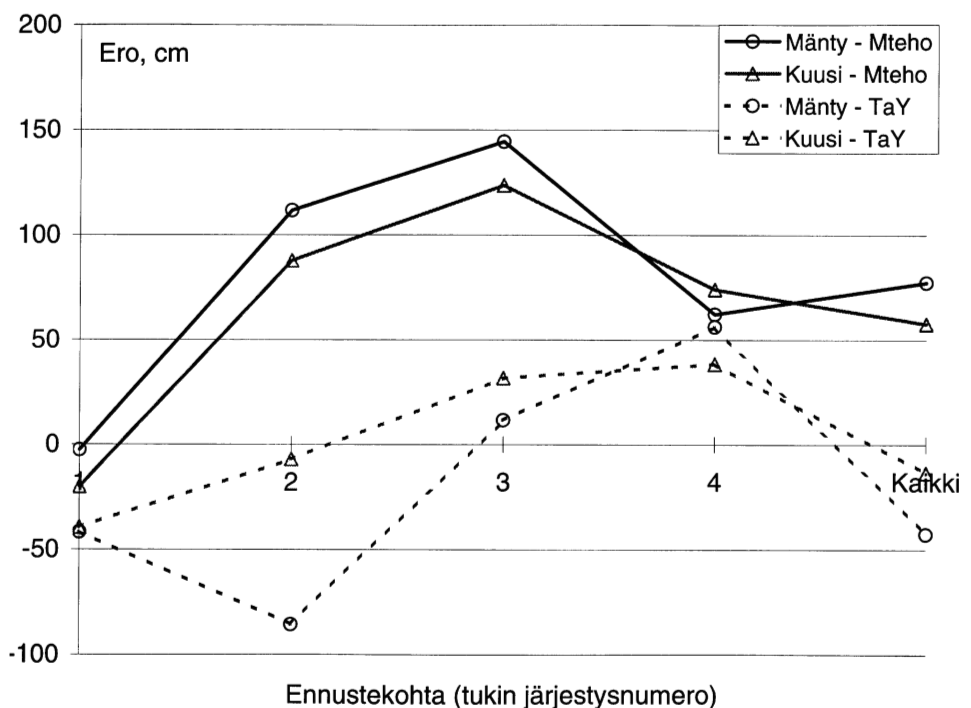
Kuva 5. Tukkien latvaläpimittojen ja tukkiosan pituuden ennusteiden laskenta Tampereen yliopiston mallilla.

4 TULOKSET

4.1 Tukkiosan pituuden ennuste

Tukkiosan pituuden ennuste laskettiin siten, että tukin tyvestä mitattiin etäisyys 15 cm:n läpimittaan saakka. Pituuden ennuste laskettiin uudelleen jokaisella ennustekerralla ja sitä verrattiin samalla tavoin määritettyyn todelliseen tukkiosan pituuteen. Ennusteiden erojen keskiarvot ja keskihajonnat laskettiin puulajeittain ja ennustekohdittain.

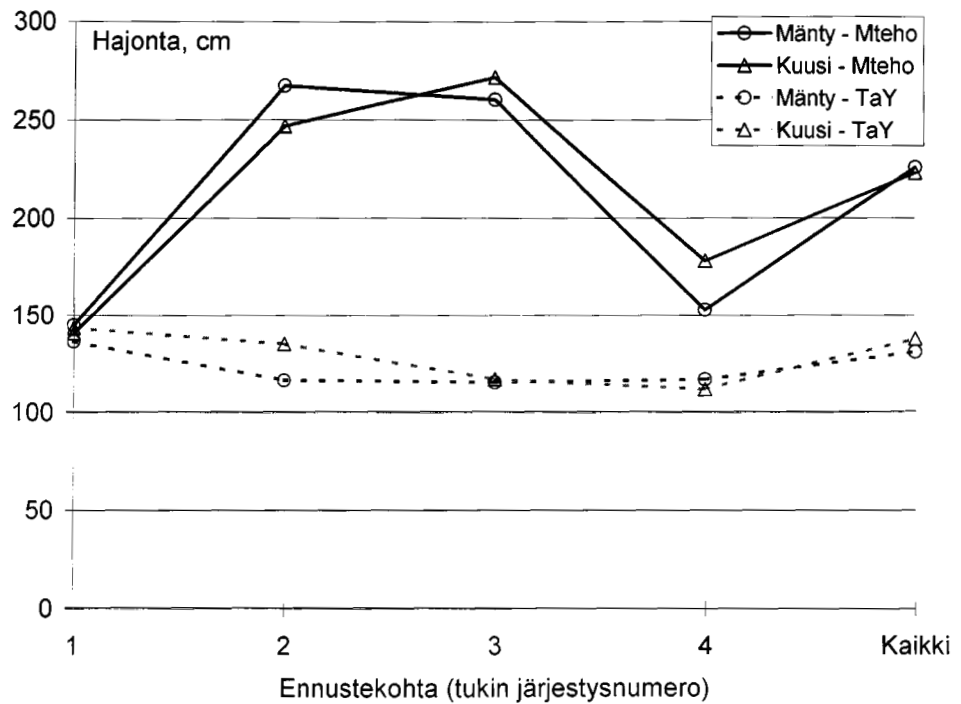
Kasvukäyrään pohjautuvalla mallilla rungon tyviosassa (kaksi ensimmäistä ennustetta) laskettu tukkiosan pituusennuste oli sekä männyllä että kuusella keskimäärin todellista tukkiosan pituutta pienempi. Männyllä toisen ennusteen systemaattinen ero oli jopa kaksinkertainen (–86 cm) ensimmäiseen ennusteeseen verrattuna. Tämä johtunee siitä, että mäntyjen paksun tyvikaaran muuttuessa kuoreksi runko kapenee nopeasti, ja ennustemalli mukautuu siihen hyvin. Rungon latvaosassa (3. – 5. ennusteet) tukkiosan pituuden ennuste antoi keskimäärin hieman liian suuren tuloksen. Ennusteiden keskimääräinen ero oli männyllä –43 cm ja kuusella –14 cm. (kuva 6)



Kuva 6. Tukkiosan pituuksien ja niiden ennusteiden erotuksien keskiarvot ennustekohdissa.

Suhteelliseen runkomuotoon perustuvaa mallia ei saatu projektin aikana toimimaan kunnolla. Tukkiosan pituuden ennusteen tulisi tarkentua, kun tieto rungosta lisääntyy. Metsätehon malli on kuitenkin tarkimmillaan tyvellä, jossa se toimii hyvin.

Ennuste-erot vaihtelivat molemmilla ennustemalleilla ja molemmilla puulajeilla paljon. Männyllä kaikkien ennusteiden erojen keskihajonta oli Tampereen yliopiston mallilla noin 130 cm ja Metsätehon mallilla noin 220 cm. Metsätehon mallin toimimattomuus näkyy myös alla olevassa hajontakuvassa.



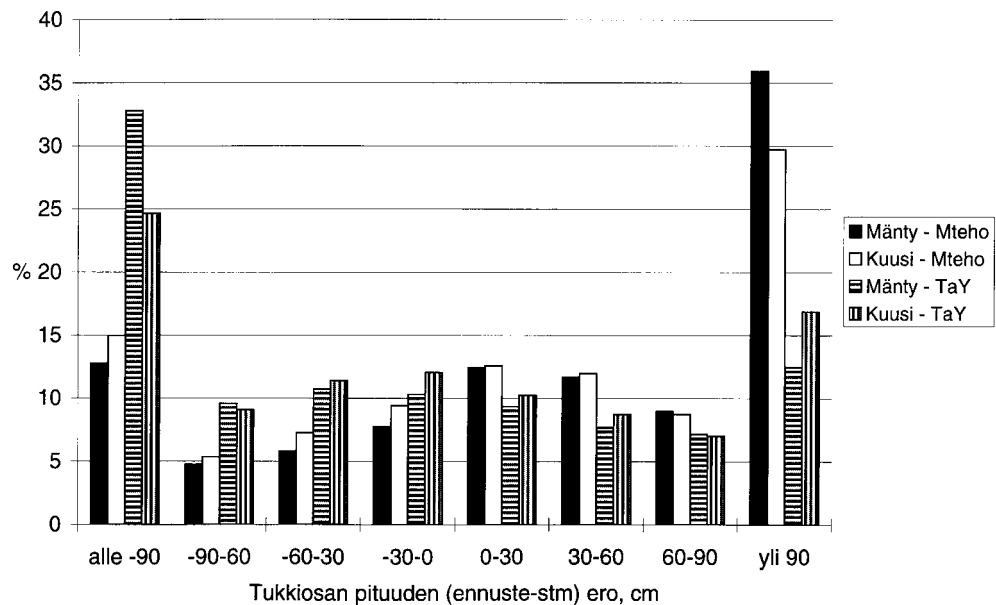
Kuva 7. Tukkiosan pituuksien ja niiden ennusteiden erotuksien keskihajonnat ennustekohdissa.

Tukkiosan pituuden ennustevirheen keskiarvo ja keskihajonta ovat tilastollisia suureita. Käytännössä ne tarkoittavat esimerkiksi Tampereen ennustemallilla sitä, että 68 % männyin toisen tukin ennusteista osuu väliin [-200, 30] cm, kun todellinen tukkiosan pituus on kohdassa 0 cm. Edelleen 95 % ennusteista on välissä [-320, 150] cm.

Tukkiosan pituuden ennustamisen onnistumista tarkasteltiin myös katkontamoduuleittain. Pituusennusteet luokitettiin nolasta alkaen 30 cm:n luokkiin ali- ja yliarvioihin.

Suuria virheitä, jollaiseksi arvioitiin yli 90 cm:n poikkeama todellisesta, on paljon molemmilla malleilla: Metsäteholla noin 45 % riippumatta puulajista ja Tampereen yliopistolla männyllä 45 % ja kuusella 40 %.

Ennusteista osuu yhden moduulin sisään ylös- tai alaspäin todellisesta noin viidennes ja kahden moduulin sisään (± 60 cm) noin 40 %. (Kuva 8)



Kuva 8. Tukkiosan pituuksien ja niiden ennusteiden erotukset.

Runkotiedon keruuseen käytetty mittalaitemerkki ei vaikuttanut paljon Tampereen yliopiston mallilla lasketun tukkiosan pituusennusteen tarkkuuteen. Ponsella kerätyllä runkotiedolla laskettujen ennusteiden erot vaihtelivat vain hieman vähemmän kuin Timberjackin tai Valmetin mittalaitteilla kerätyillä runkotiedoilla laskettujen ennusteiden erot.

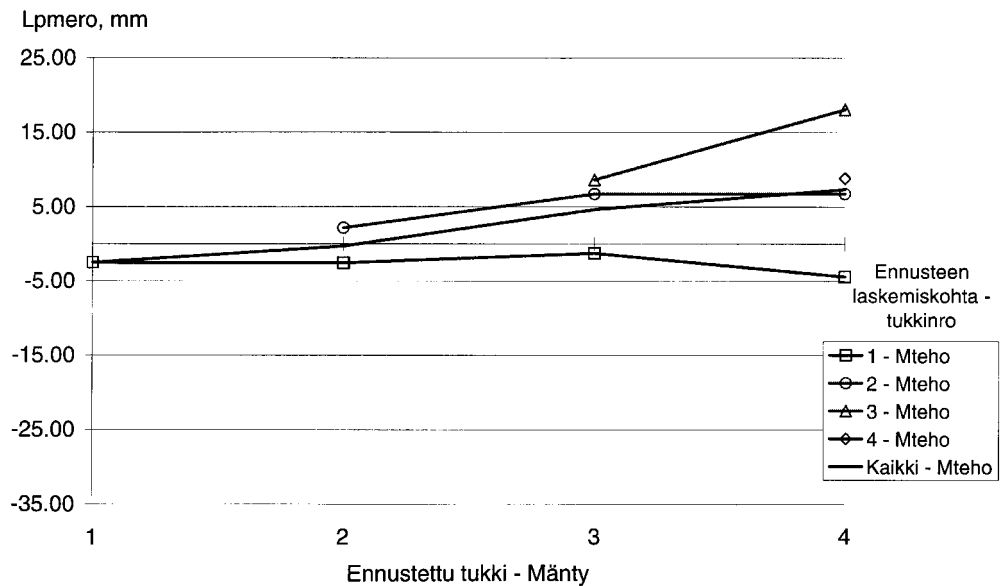
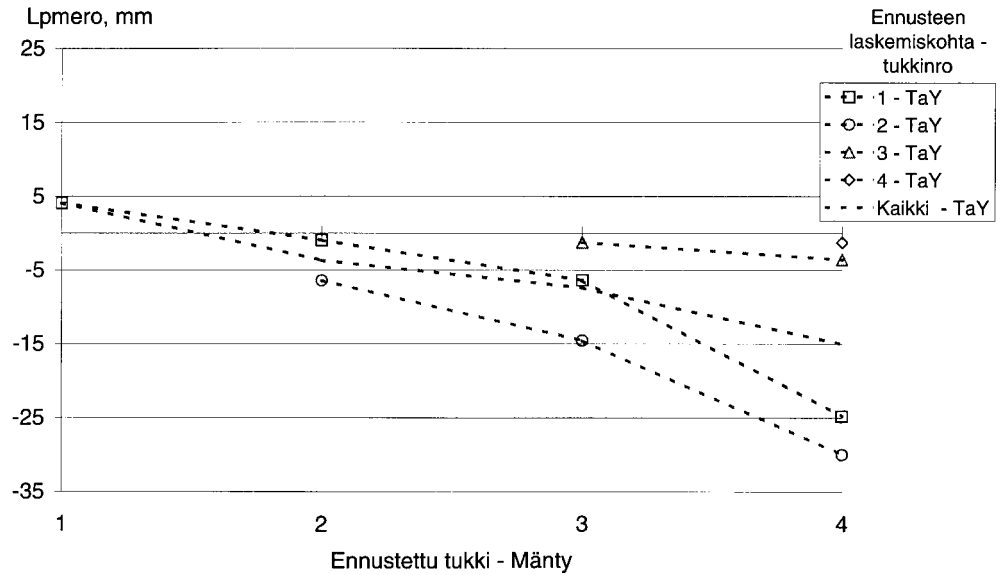
Metsätehon malli sen sijaan on herkempi runkotiedoissa oleville poikkeavuuksille, joita löytyi Ponsella kerätyistä runkotiedoista muita merkkejä enemmän. Timberjackilla ja Valmetilla kerätyillä aineistoilla Metsätehon mallin toiminta oli yhtä tarkkaa kuin Tampereen yliopiston mallilla.

4.2. Lämpimitan ennuste

Tukkien latvalämpimittojen ennusteet laskettiin kunkin tukin kohdalla laskentakohdasta latvaan päin olleisiin ennustekohtiin. Tukin latvalämpimittojen ennusteiden ja todellisten latvalämpimittojen erojen keskiarvot ja keskihajonnat laskettiin puolajettain, ennustekohdittain ja ennusteiden laskentakerroittain.

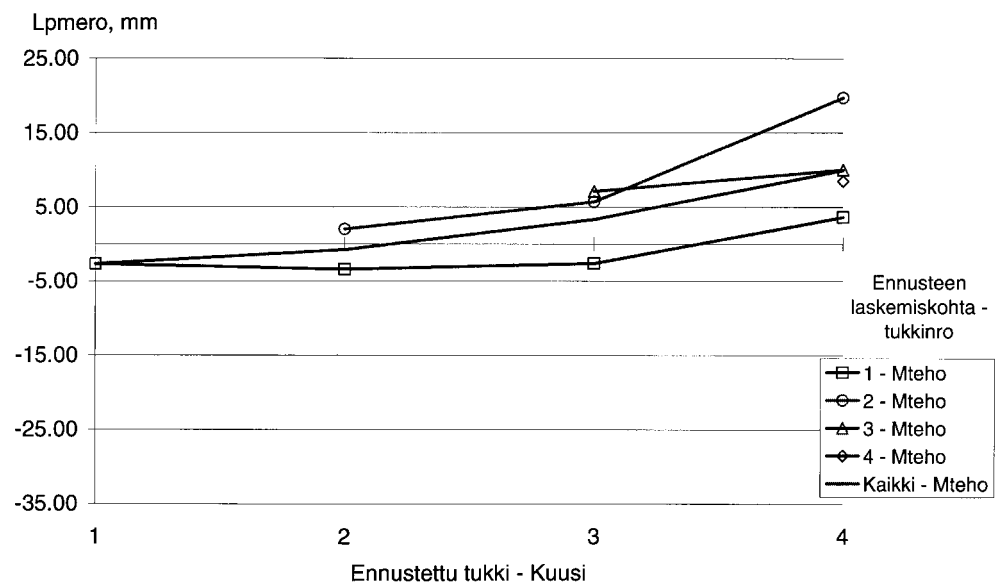
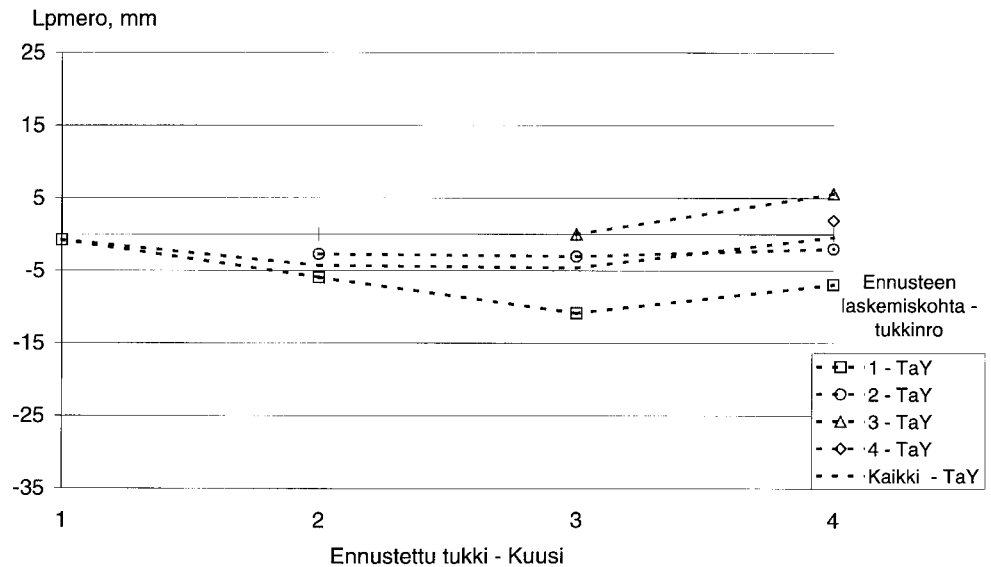
Männyllä ensimmäisen ja toisen tukin latvalämpimittojen ennusteet olivat keskimäärin melko tarkkoja. Rungon tyvellä tehdyt latvalämpimitan ennusteet kuitenkin huononivat sitä enemmän mitä kauemmas latvaan ennuste tehtiin. Metsätehon malli yliarvioi sekä tukkiosan pituutta että lämpimittoja. Tampe-

reen yliopiston malli puolestaan aliarvioi. Kaikista ennusteista laskettu ennustetun ja todellisen läpimitan ero oli männyllä keskimäärin +2 mm Metsätehon mallissa ja -5 mm Tampereen yliopiston mallissa. (kuva 9)



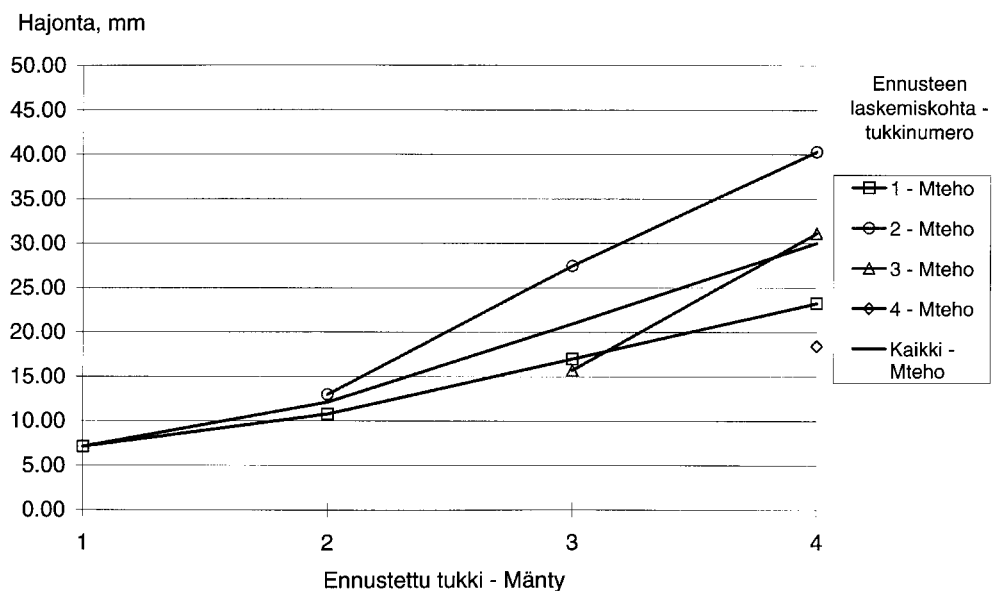
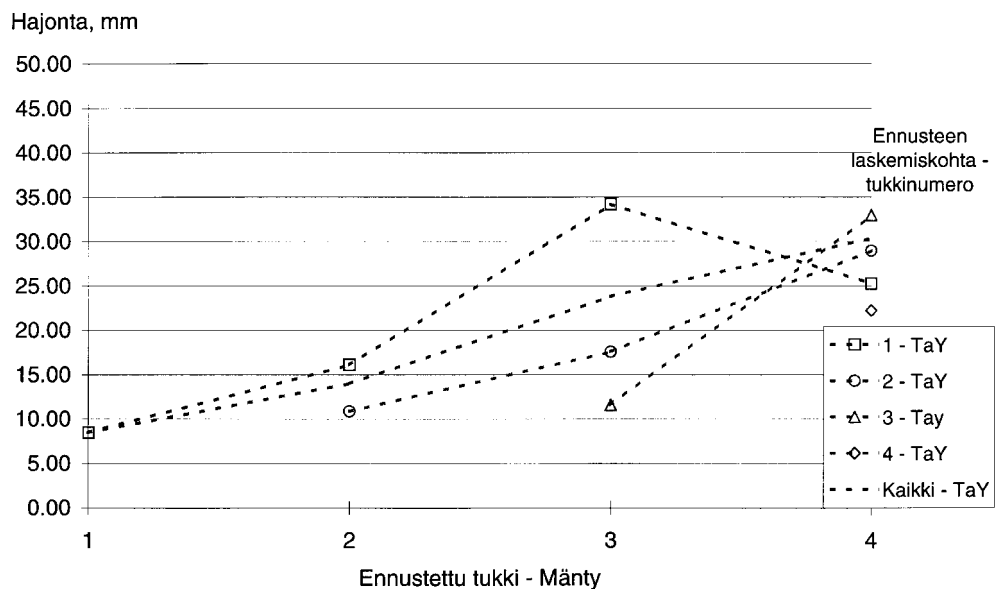
Kuva 9. Mäntytukkien latvaläpimittojen ja ennusteiden poikkeamien keskiarvot ennusteen laskentakohdan mukaan. Ylempi kuva Tampereen yliopiston malli, alempi Metsätehon malli.

Kuusella Tampereen yliopiston malli toimii paremmin, Metsätehon jokseenkin samalla tavoin kuin männyllä. Lämpimittaennusteiden keskimääräinen tarkkuus oli useimmissa ennustekohdissa melko hyvä. Ensimmäinen ennuste oli systemaattisesti todellista läpimittaa 5 – 10 mm pienempi, mutta myöhempien ennusteiden keskimääräiset erot olivat tätä pienemmät. Kaikista ennusteista laskettu ennustetun ja todellisen läpimitan ero oli kuusella keskimäärin Metsätehon mallilla noin +1 mm ja Tampereen yliopiston mallilla noin –3 mm. (kuva 10)



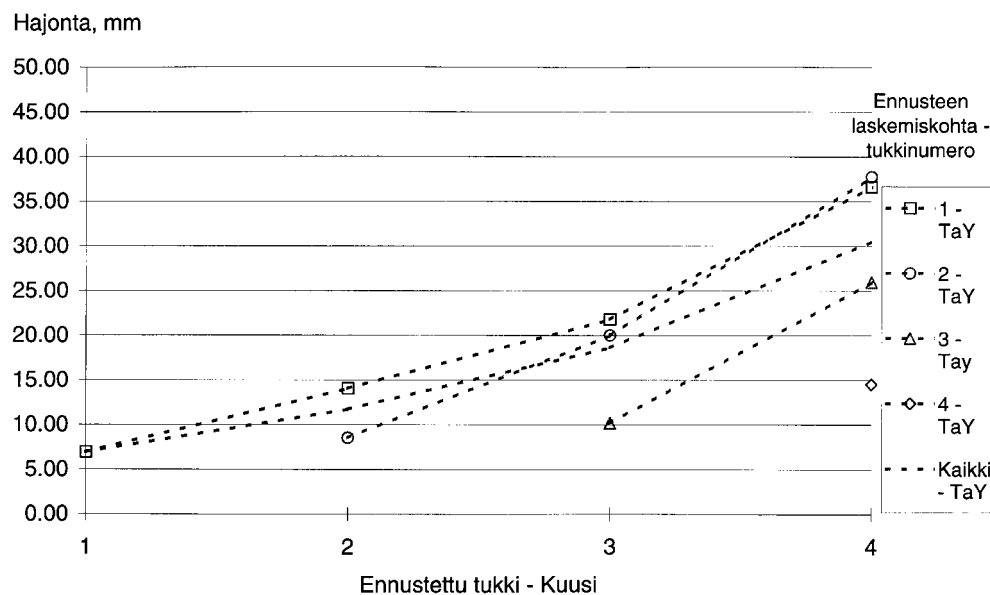
Kuva 10. Kuusitukkien latvaläpimittojen ja ennusteiden poikkeamien keskiarvot ennusteen laskentakohdan mukaan. Ylempi kuva Tampereen yliopiston malli, alempi Metsäteho.

Tukin latvaläpimitan ennuste-erojen keskihajonta on esitetty kuvissa 11 ja 12 siten, että ennusteen laskentakohdasta yhtä kaukana olevat ennustekohdat on yhdistetty viivalla. Kun ennusteen laskentakohta ja ennustettu latvaläpimita oli samassa tukissa, merkittiin kuvissa ennustetun tukin järjestysnumeroksi yksi. Männyllä läpimitan ennuste-erojen keskihajonta oli alle 10 mm, kun ennustettu kohta oli samassa tukissa kuin ennusteen laskentakohta. Kun ennusteen laskentakohdan ja ennustetun kohdan välinen etäisyys kasvoi, ennuste-erojen keskihajonta suureni. Ennuste-eron keskihajonta taas kasvoi, kun ennusteen laskentakohta siirtyi rungolla latvaan päin. Kaikista läpimitan ennusteista laskettujen erojen keskihajonta oli männyllä Metsätehon mallilla noin 18 mm ja Tampereen mallilla 20 mm. (kuva 11)



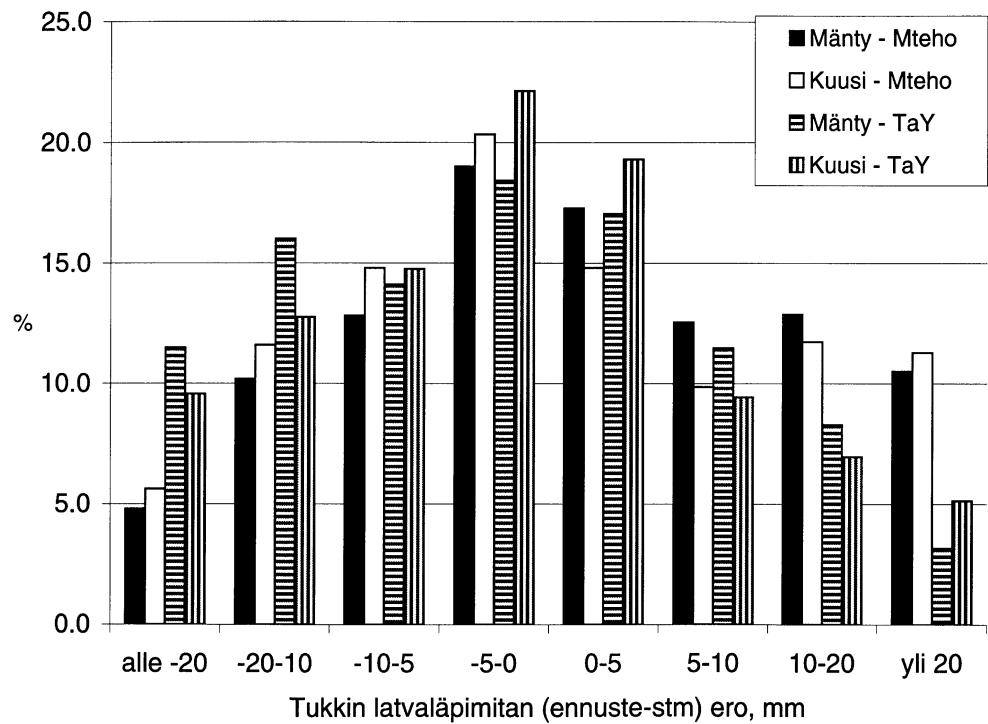
Kuva 11. Männytukien latvaläpimittojen ja ennusteiden poikkeamien keskihajonta rungon eri kohdissa. Yllä Tampereen yliopiston malli, alla Metsätehon malli.

Läpimittojen ennuste-erojen keskihajonta oli samanlainen kuusella ja männyllä. Metsätehon mallilla mänty ja kuusi eivät juuri poikenneet toisistaan. Tampereen mallissa kuusi sen sijaan käyttäytyy hieman loogisemmin, mikä on nähtävissä kuvasta 12. Kaikista läpimitan ennusteista laskettujen erojen keskihajonta oli kuusella Metsätehon mallilla noin 19 mm ja Tampereen yliopiston noin 18 mm.



Kuva 12. Kuusitukkien latvaläpimittojen ja ennusteiden poikkeamien keskihajonta rungon eri kohdissa, Tampereen yliopiston malli.

Ennusteiden tarkkuutta tarkasteltiin myös luokittamalla erot nollan molemmin puolin viiden millin luokkiin. Parhaimmillaan kaikista ennusteista 40 % osui väliin [-5, +5] mm Tampereen yliopiston mallilla kuusia ennustettaessa. Tampereen mallilla männyllä ja Metsätehon mallilla molemmilla puulajeilla vastaavaan väliin osui noin 35 % ennusteista. Suurien virheiden, joiksi voidaan lukea yli 10 mm:n poikkeama yli- tai aliarviona, määrä oli noin 40 %. Tässäkin Tampereen yliopiston malli kuuselle poikkasi edukseen, sillä suurien virheiden määrä oli 35 %. (Kuva 13)



Kuva 13. Tukin latvaläpimittojen ja niiden ennusteiden erot.

Tampereen yliopiston malli tuotti lisäksi 19 katkaisukohtaan negatiivisen läpimittaennusteen (0,15 % tapauksista). Näitä havaintoja ei otettu mukaan analyysiin. Metsätehon mallissa saadaan ainoastaan positiivisia läpimittaennusteita.

4.3. Case Kuorevesi

4.3.1 Aineisto

Ennustemallin käytännön toimivuutta testattiin Ponssen kanssa yhteistyössä Kuorevedellä. Koneeksi valittiin Nisula A & S Oy:n Ponsse HS15, jossa hakkuulaitteena oli H73. Konetta ajoi Pentti Partala, joka on osallistunut useisiin Ponssen kehittämishankkeisiin. Näin ollen voidaan hakkuukoneen mittalaitteen olettaa toimineen mahdollisimman hyvin. Samoin kerätty runkotieto (STM-tiedostot) oli hyvälaatuista.

Maastossa kerättiin 60 mäntyä ja 60 kuusta käsittävä aineisto. Kustakin rungosta otettiin talteen STM-tiedoston lisäksi kaikki hakkuukoneen rungon käsittelyn kuluessa tekemät ennusteet. Kukin ennuste kirjattiin ennustekohdasta ennustepituuden verran eteenpäin. Kaikista järeistä (yli 15 cm) puutavarakappaleista mitattiin pituus ja latvaläpimitta mittasaksilla ristiinmittauksella. Mitattuja pölkkyjä oli yhteensä 358, joista mäntyjä oli 185 ja kuusia 173.

Leimikkoa hakattiin jonkin verran ennen aineiston keruun aloittamista, jotta mittalaitteen muistiin ehti kertyä riittävästi runkoja kyseisestä leimikosta.

Ennustemallin käyttäytymiseen vaikuttaviksi parametreiksi asetettiin yleisesti Ponssen hakkuukoneissa käytettävät:

- ennustepituus 19,9 metriä
- ennusteen ja mitatun läpimitan maksimiero [0 – +4] mm, jonka ylittyessä ennuste lasketaan uudelleen
- katkontaikkuna nimellispituusmitasta ± 3 cm

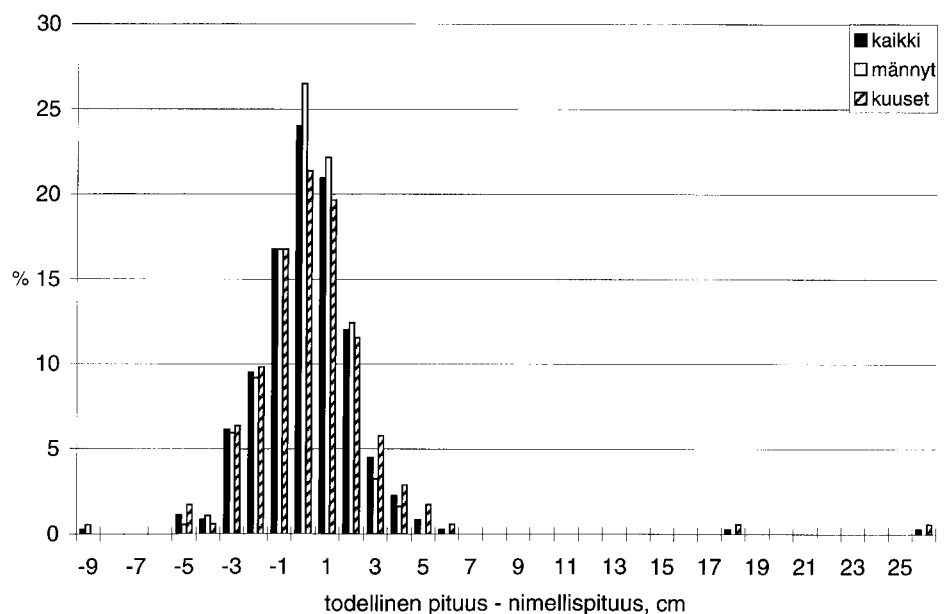
Leimikosta tehtiin sahatukkeja, joiden pituudet olivat kuusella 34 – 61 dm ja männyllä 37 – 61 dm. Lisäksi leimikosta tehtiin sorvikuisia, -mäntyjä ja männyn erikoistyyppiä.

4.3.2 Pituuden mittaus

Erityisesti pituuden mittaukseen hakkuukone oli kalibroitu hyvin. Pituusmittauksen tarkastelu kohdistui kahteen seikkaan: katkontatarkkuuteen, jolla tarkoitetaan tarkistusmitatun pituuden ja nimellispituuden välistä eroa, sekä pituusmittaustarkkuuteen, jolla tarkoitetaan tarkistusmitatun ja koneen mittaaman pituuden eroa.

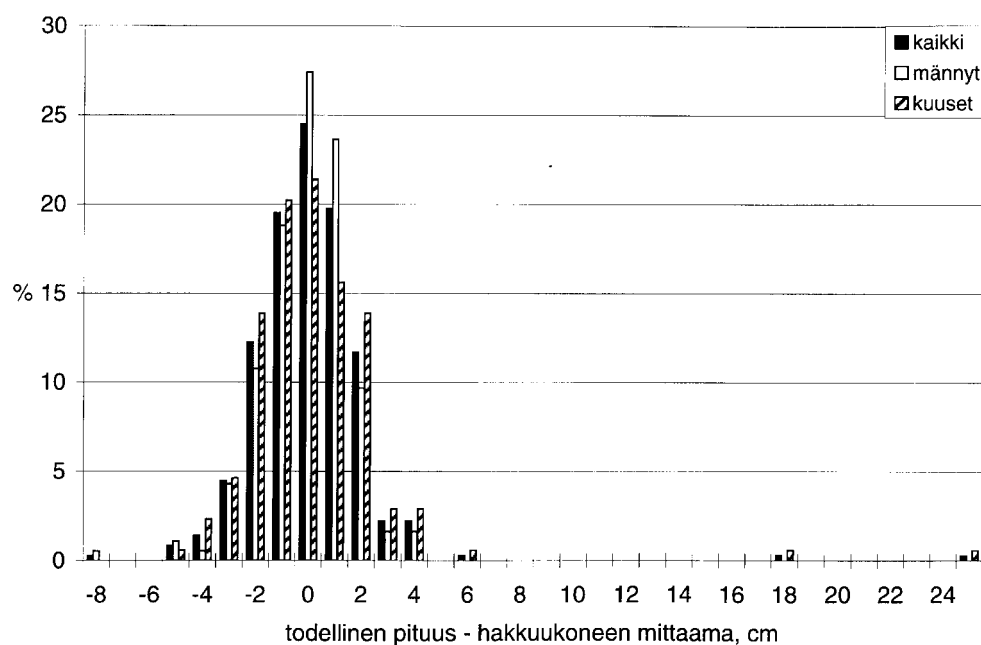
Katkonta onnistui keskimäärin hyvin. Kaikista havainnoista laskettu nimellispituuden ja maastossa mitatun pituuden erojen keskiarvo oli +0,2 cm ja keskihajonta 2,5 cm. Puulajeista männyn mittaus oli tarkempaa ja keskihajonta pienempää. Kuusen pituus yliarvioitui lievästi (0,4 cm) ja keskihajonta oli suurempi (3,1 cm).

Katkontaikkunan sisään [-3, +3] cm kaikista pölkyistä osui 94 % ja ± 5 cm väliin sattui melkein kaikki pölkyt, 99 %. Männyn parempi katkontatarkkuus (kuva 14) johtui paljolti siitä, että sille ei sattunut suuria virheitä kuten kuuselle.



Kuva 14. Katkontatarkkuus eli tarkistusmitatun pituuden ja nimellispituuden erotus.

Hakkuukone mittasi pituutta tarkasti. Kaikkien tarkastusmitattujen ja hakkuukoneen mittaamien pölkkyjen pituuksien erojen keskiarvo oli +0,03 cm ja keskihajonta 2,4 cm. Katkontatarkkuuden tapaan myös pituusmittaus oli tarkempaa männyillä. Katkontaikkunan [-3, +3] cm sisällä pölkkyistä katkottiin 94 %, ja lähestulkoon kaikilla loppuilla pölkkyillä ero oli alle 5 cm.



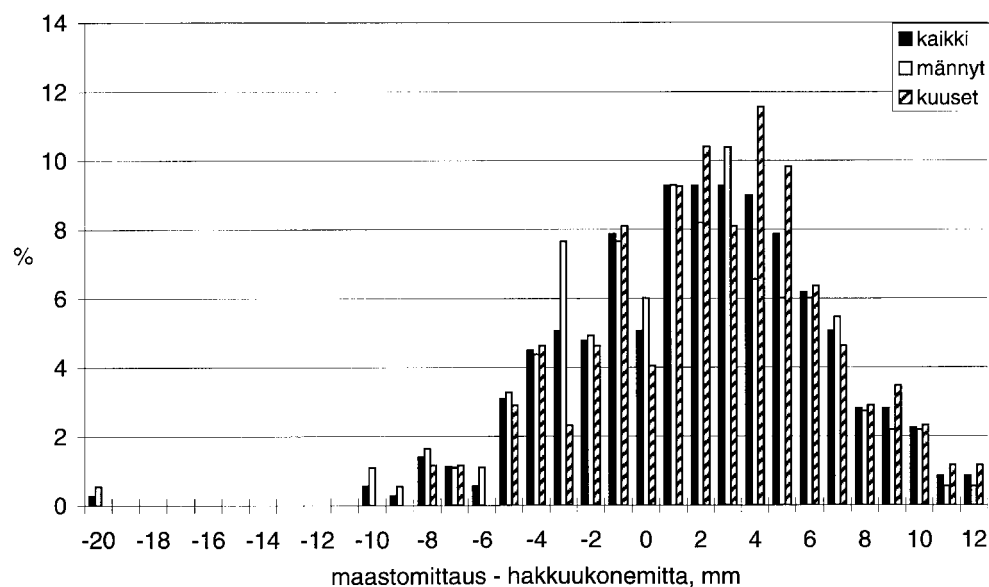
Kuva 15. Pituusmittaustarkkuus eli tarkastusmitatun pituuden ja hakkuukoneen mittaaman pituuden erotus.

4.3.3 Läpimitan mittaus

Kunkin pölkyn latvaläpimitta tarkistusmitattiin enintään kymmenen sentin päästä pölkyn latvasta. Mittasaksilla mitattiin kaksi läpimittaa kohtisuoraan toisiaan vasten ja niistä laskettiin keskiarvo. Tätä keskiarvoa verrattiin hakkuukoneen runkotietoihin (STM). Mittasaksilla mitatun yksittäisen pölkyn latvaläpimitta saattaa olla selvästi virheellinen, Metlan tutkimuksessa (Päivinen ym. 1992) mittausmenetelmän keskihajonnaksi saatiin noin 4 mm. Pääasiassa tämä johtuu runkojen soikeudesta, joka tässä aineistossa oli keskimäärin 5 mm ja suurimmillaan 20 mm. Toisin kuin pituutta mitattaessa, tarkistusmittauksessa ei välttämättä mitata samaa läpimittaa kuin hakkuukoneella.

Läpimitan mittaukseen hakkuukoneen kalibrointi ei ollut paras mahdollinen. Molemmilla puulajeilla läpimitta yliarvioitiin keskimäärin noin 2 mm ja keskihajonnaksi saatiin noin 4 mm. Lisäksi koneella oli taipumusta yliarvioida pieniä läpimittoja enemmän kuin suuria. Männyn latvatukit (18 kpl) poikkesivat selkeästi muusta aineistosta. Niiden läpimitta aliarvioitui hakkuukonemittauksessa keskimäärin -1,6 mm.

Hakkuukonemittaukselle on asetettu läpimitan mittaustarkkuudelle yleiseksi vaatimukseksi ± 2 mm (Halinen 1987). Tähän päästiin sekä kuusella että männyllä 36 %:lla pölkyistä. Puulajit eivät eronneet toisistaan väljemmilläkään vaateilla, vaan mittaustarkkuus oli ± 4 mm 64 %:lla pölkyistä. Lähes kaikki pölkyt (98 %) mitattiin ± 10 mm:n tarkkuudella. Jos kalibrointi olisi ollut kohdallaan, ± 4 mm:n mittaustarkkuus olisi saatu 69 % pölkyistä. Ruotsissa (Sondell 1996) on päädytty samansuuruisiin ja samankaltaisiin tuloksiin Ponssen läpimitan mittauksesta. Voitaneen todeta, että läpimitan mittaustarkkuus oli enintään tyydyttävää tasoa (kuva 16).



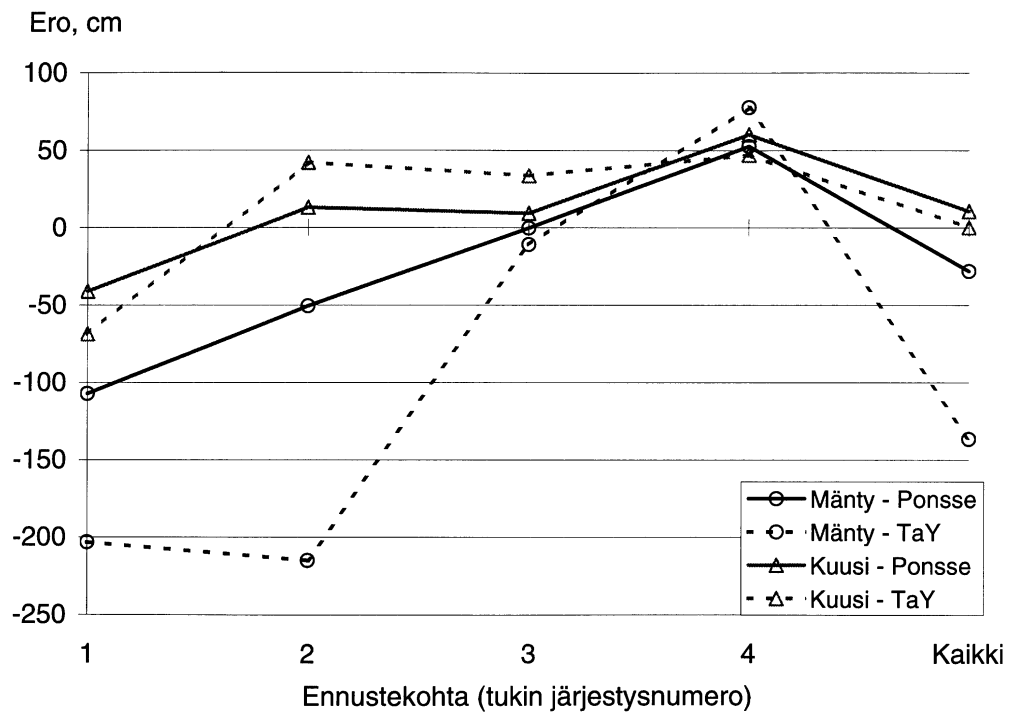
Kuva 16. Läpimitan mittaustarkkuus eli maastossa mitatun latvaläpimitan ja hakkuukoneen mittaaman läpimitan erotus.

Mittaustarkkuutta on edellä tarkasteltu varsin laveasti, sillä ennustemallin toiminta riippuu voimakkaasti mittalaitteelle tulevan pituus- ja läpimittatiedon laadusta. Hyväkään ennustemalli ei voi ennustaa kohdalleen huonoista lähtötiedoista. Teoreettisesti kiinnostavaa ja ennustemallin kehitystyössä olennaista kysymystä mittausvirheiden vaikutuksesta ennustemallin tarkkuuteen selvitetään Tampereen yliopistolla.

4.3.4 Ennustemallin tarkkuus

Ponssen ennustemallin tarkkuutta verrattiin Tampereen yliopiston ennustemallin tuloksiin. Käytännössä Ponssen ennustemalli osoittautui tarkemmaksi. Tukkiosan pituuden ennusteiden virheiden keskiarvot eri ennustekohdissa tarkasteltuna ovat lähempänä nollaa. Kuusella Ponssen ennustemallin toimi hyvin lukuun ottamatta neljännen tukin latvaa, jossa virhe yllättäen kasvaa mo-

ninkertaiseksi verrattuna edellisiin tukkeihin. Männyn tyvitukilla tehdyt tukkiosan pituusennusteet olivat selvästi aliarvioita. Toisella tukilla tilanne parantuu selkeästi. (kuva 17)



Kuva 17. Tukkiosan pituuden ennustetarkkuus.

Keskihajonnan suhteen molemmat mallit toimivat enintään tyydyttävästi. Hajonta Ponssen malleilla on keskimäärin 150 cm ja Tampereen yliopiston mallilla hieman suurempaa, keskimäärin 170 cm. Erityisesti tukkiosan pituuden hajonta on molemmilla malleilla suurta. Parhaiten Ponsse toimii kuusella. Kolmannella tukilla noin yhdentoista metrin korkeudella tehdyistä tukkiosan pituuden ennusteista 68 % osuu väliin [-67, +86] cm, kun todellinen pituus on kohdassa 0 cm. Huonoimmillaan väli on [-277, +62] cm männyn tyvitukilla 2,5 metrin korkeudella. Tampereen yliopiston mallilla vastaavat tarkastelut tuottavat leveämmät välit.

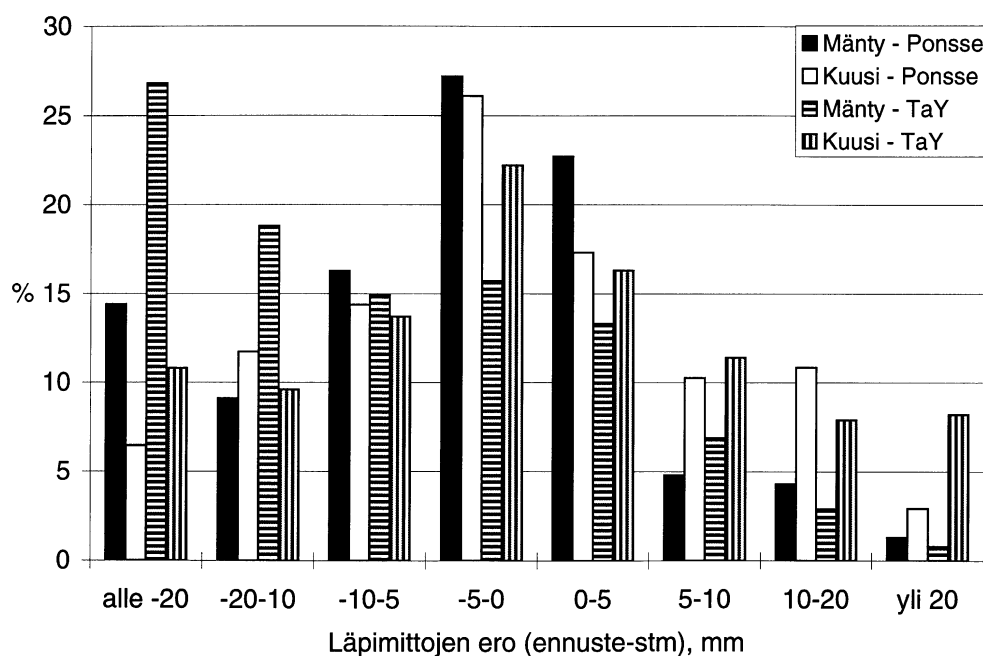
Metsätehon malli toimi männyllä keskimäärin hiukan tarkemmin kuin Tampereen yliopiston malli, ja keskihajonta oli jokseenkin samansuuruista. Kuusella sen sijaan Metsätehon malli toimi näistä kolmesta huonoimmin. Tukkienväläpimitan ennustamista tarkasteltiin siten, että hakkuukoneen ennustamaa tukin väläpimittaa verrattiin hakkuukoneen mittaamaan väläpimittaan. Samoin tarkasteltiin myös tukkiosan pituutta, jolloin myös haettiin 150 mm:n väläpimittaa vastaava korkeus hakkuukoneen mittatiedoista.

Väläpimitan ennustetarkkuus on selvästi huonompi kuin väläpimitan mittaus-tarkkuus. Erityisen paljon poikkeaa keskihajonta eli aineisto leviää laajemmalle, mikä näkyy sekä taulukosta 4.

TAULUKKO 4. Kaikkien pölkyjen latvaläpimitan ja ennusteen erojen keskiarvot ja keskihajonnat.

| | Ponsse – mänty | Ponsse – kuusi | TaY – mänty | TaY – kuusi |
|------------------|----------------|----------------|-------------|-------------|
| Keskiarvo, mm | 8.5 | +2.5 | -16.5 | -1.1 |
| Keskihajonta, mm | 21.3 | 12.9 | 25.2 | 19.2 |

Ponssen ennustemalli aliarvioi mäntytukkien latvaläpimittoja samoin kuin tukkiosan pituutta. Toisella tukilla tilanne paranee selvästi. Neljännen tukin latvan ennusteet olivat jälleen selvästi aliarvioita. (kuva 18)



Kuva 18. Läpimitan ennustetarkkuus eli hakkuukoneen mittaaman ja ennustaman läpimitan erotus.

5 PÄÄTELMÄT

Tilastolliseen kasvukäyrään perustuva ennustemalli on käytännössä osoittautunut toimivaksi ratkaisuksi. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella voidaan todeta, että ennustusmenetelmä ei sisällä merkittäviä systemaattisia virheitä, männyn tyvellä tehtävää ensimmäistä ennustetta lukuun ottamatta. Laskennassa käytetty aineisto oli laaja, ja ennustemallia testattiin myös muilla kuin vain Ponsella kerätyillä mittaustiedoilla.

Ennuste- tai katkontakohtien keskiarvoina tarkastellen ei havaittu sellaisia tapauksia, joissa ennustemalli toimisi erityisen huonosti. Sen sijaan on helposti löydettävissä yksittäisiä runkoja, joille tehtävät ennusteet ovat selvästi virheellisiä. Erityisesti teoreettiset mallit ovat liian joustavia, ja virheellinen läpimittatieto aiheuttaa niille ongelmia. Ponsen ennustemallin toimintaa huonolla läpimitta-aineistolla ei tutkimuksessa saatu tarkasteltua.

Kasvukäyrämalli on kehitetty Tampereen yliopistossa pelkästään kuusirunko-aineistolla. Tämä näkyikin mallin yliopisto-versiolla, jolla männyn ennustaminen sujui selkeästi kuusta huonommin. Hakkuukoneessa puulajeilla oli pieni ero: malli aliarvioi männyllä ja yliarvioi hienoisesti kuusella. Sinällään pieni aliarvio on tukkiosan hyödyntämisen näkökulmasta katsoen parempi kuin lievä yliarvio. Yliarvio voi joissakin tapauksissa aiheuttaa sen, että tukkiosa jää osittain hyödyntämättä.

Tukkiosan pituuden ennusteen tarkkuus riippuu siitä, miten tarkka läpimitan ennuste on rungon latvassa. Tukkiosan pituus ennustettiin rungon tyvessä keskimäärin liian lyhyeksi ja latvaan päin siirryttäessä keskimäärin liian pitkäksi. Keskimääräiset erot olivat kuitenkin melko pieniä. Tukkiosan pituuden ennusteen tulisi tarkentua, kun kyseisen rungon mittaustietoja on enemmän käytössä. Näin tapahtuikin, mutta tarkkuuden paraneminen oli odotettua vähäisempi.

Tukin latvaläpimitan ennusteissa oli männyllä suurempia systemaattisia eroja kuin kuusella. Männyn tyviosassa laskettujen ensimmäisten läpimitan ennusteiden systemaattinen aliarvio selitti myös sen, että tukkiosan pituus aliarvioitiin. Männyn latvaa kohti läpimitan ennusteen aliarvio pieneni, minkä vuoksi myös tukkiosan pituuden ennusteen tarkkuus parani. Myös kuusen ensimmäinen ennuste aliarvioi läpimitan ja samoin kuin männyllä aliarvio pieneni myöhemmissä ennusteissa.

Läpimitan ennuste-erojen keskihajonta kuvaa parhaiten ennustamismenetelmän tarkkuutta yksittäisessä rungossa. Kun läpimitan ennuste tehtiin laskentakohdasta kyseisen tukin latvaan, keskimäärin kahden metrin päähän, ennuste-eron keskihajonta oli noin 6 mm. Tällä etäisyydellä 2/3 ennusteista osui ± 6 mm:n tarkkuudella oikeaan läpimittaan. Seuraavan tukin latvaläpimitan ennusteen tarkkuus oli vastaavasti noin ± 12 mm ja sitä seuraavan tukin noin ± 20 mm. Viimeisen tukin latvaläpimitan ennustamisen hajonta oli

männyllä 35 mm. Tämä tarkkuus ei ole riittävä, kun pyritään tarkkaan tukkien dimensiojakauman ohjaukseen.

Käytännössä virheellinen läpimitan ennuste korjataan rungon katkonnan aikana siten, että ennustetta verrataan mitattuun läpimittaan karsinnan edetessä. Niinpä todellisuudessa hakkuukoneen ennuste muuttuu ennen ensimmäistä katkaisua useita kertoja. Sama toistuu myöhemmilläkin tukeilla, kun ennusteita tehdään useita katkontojen välissä. Ennustetta verrataan mitattuun läpimittaan ennen katkaisua, jolloin voidaan vielä kerran laskea katkontaehdotus uudelleen. Suuri ennuste-eron vaihtelu merkitsee sitä, että uudelleenlaskennan määrä kasvaa ja ehdotetusta katkontakohdasta joudutaan usein siirtymään. Tämä hidastaa hakkuuta jonkin verran.

Ensimmäisen ennusteen tarkkuuteen vaikuttaa paljon korkeus, jolla ennuste tehdään. Tutkimuksessa Metsätehon ennusteet laadittiin 2,5 metrin korkeudella kaatoleikkauksesta ja sekä Ponsella että Tampereen yliopiston mallilla kolmen metrin korkeudella. Tampereen yliopiston tutkimusten mukaan ennusteiden keskivirhe alenee heidän mallillaan muutaman prosentin, jos tunnetun rungon osan pituus lisääntyy 50 cm.

Nykyisellä läpimitan mittaustarkkuudella ennustemallin toimintaa on vaikea parantaa. Parempi läpimitan mittaustarkkuus johtaisi parempiin ennusteisiin kahta kautta. Kun runkopankkiin kerättävissä rungoissa on virheitä, laadittavasta ennusteesta tulee väistämättä virheellinen. Edelleen virheellisen läpimitan avulla tehdään ennusteet. Molemmat aiheuttavat ylimääräistä hajontaa ennusteisiin.

Yhteenvedona todetaan, että Ponsessa käytetty ennustemenetelmä toimii käytännön kokeissa tarkimmin. Siinäkin runkokohtaista tarkkuutta tulisi kuitenkin edelleen parantaa, kun pyritään entistä tarkempaan tukkien dimensiojakauman ohjaukseen. Teoreettisten mallien toiminnassa merkille pantavaa on suuri hajonta. Ero johtuu osaltaan siitä, että teoreettisista malleista puuttuu tuloksia parantavia osia. Näitä ovat Tampereen yliopiston mallissa runkopankkiin laitettavien runkojen valinta tietyin kriteerein. Metsätehon malli ei puolestaan nykymuodossaan mukaudu leimikkoon, vaan runkokäyrän laskennassa käytetään valtakunnallisia kertoimia. Teoreettisia malleja on kuitenkin jatkossakin syytä ylläpitää kehittämistarkoituksia varten.

KIRJALLISUUTTA

- Ahonen, O-P.** 1996. Puun muodon ennustaminen runkokäyrillä ja simuloimalla. Metsätehon katsaus 4/1996.
- Halinen, M.** 1987. Monitoimikoneiden puunmittauslaitteille asetettavia vaatimuksia. Metsätehon katsaus 12/1987.
- Karttunen, P.** 1993. Stokastinen monimuuttujasäätö. Tampereen teknillinen korkeakoulu.
- Korvenoja, H. & Nummi, T.** 1994. Sekamalli rungon kapeneman ennustamisessa metsätyökoneelle. Tampereen yliopisto. Matemaattisten tieteiden laitos.
- Laasasenaho, J.** 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108.
- Nummi, T.** 1995. Estimation and prediction in growth curve models with applications. *Acta Universitas Tamperensis ser A vol.* 436.
- Päivinen, R., Nousiainen M. & Korhonen K. T.** 1992. Puutunnusten mittauksen luotettavuus. *Folia Forestalia* 787.
- Sondell, J. & von Essen, I.** 1996. Apteringsdatortest 1995 – studier av sex apteringsystem. Redogörelse nr 4, 1996.