

## **Puuston ennakkotiedon hankinta- menetelmät ja käyttö**

**Tapio Räsänen**  
**Eero Lukkarinen**

Metsätehon raportti 43  
10.2.1998

Konsortiohanke: A.Ahlström Osakeyhtiö, Aureskoski Oy,  
Enso Oyj, Koskitukki Oy, Kuhmo Oy,  
Metsähallitus, Metsäliitto Osuuskunta,  
Metsäteollisuus ry, 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: puustotieto, leimikko, mittaus, ennakkomittaus,  
metsäsuunnittelu, kaukokartoitus, puunhankinta

© Metsäteho Oy

Helsinki 1998

## SISÄLTÖ

Sivu

<b>TIIVISTELMÄ .....</b>	<b>5</b>
<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>7</b>
<b>2 TAUSTA .....</b>	<b>7</b>
<b>3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET JA TEHTÄVÄT .....</b>	<b>9</b>
<b>4 ENNAKKOTIEDON KÄYTTÖTARPEET .....</b>	<b>11</b>
<b>5 TUTKIMUSMENETELMÄT JA -AINEISTOT .....</b>	<b>12</b>
<b>6 MILLAISTA ENNAKKOTIETO VOI OLLA? .....</b>	<b>13</b>
<b>7 LEIMIKON PUUSTOTUNNUSTEN ESTIMOINTI JA PUU- JOUKON MUODOSTUS .....</b>	<b>15</b>
7.1 Runkolukusarjan muodostamisen vaihtoehdot .....	15
7.2 Pituuden estimointi .....	17
7.3 Laatusarjat .....	18
7.3.1 Puutavaran laatuun vaikuttavat tekijät .....	18
7.3.2 Oksarajakorkeuksien ennustaminen .....	19
7.3.3 Laatujaumat ja katkonnan simulointi .....	23
<b>8 ENNAKKOMITTAUSMENETELMÄT .....</b>	<b>24</b>
8.1 Yleiskuvaukset menetelmistä ja sovelluksista .....	24
8.2 Tutkimuksessa käytetyt menetelmät .....	25
8.3 Menetelmien tarkkuudet tutkimusaineistossa .....	26
8.4 Ajanmenekki ja kustannukset .....	28
8.5 Ennakkomittausmenetelmien kehittämistarpeet .....	29
8.5.1 Mittausten tietosisältö .....	29
8.5.2 Runkolukusarjojen muodostaminen .....	30
8.5.3 Pinta-alan määrittäminen .....	30
8.5.4 Puujoukon ja STM-tiedostojen muodostaminen .....	31
8.5.5 Ennakkomittaukset ja puustotietovarastot .....	31
<b>9 METSÄSUUNNITTELUTIEDOT ENNAKKOTIETO- LÄHTEENÄ .....</b>	<b>31</b>
9.1 Solmu-metsäsuunnittelun puustotietojen kuvaus ja puusto- tunnusten laskenta .....	32

9.2	Tutkimusleimikoiden tulokset .....	32
9.3	Metsäsuunnittelutietojen käyttömahdollisuudet leimikon ennakkotietona .....	33
9.4	Kehittämistavoitteet puunhankinnan näkökulmasta .....	34
<b>10</b>	<b>PUUSTOTIETOVARASTOT LEIMIKON PUUSTO- TIETOJEN MÄÄRITTÄMISESSÄ .....</b>	<b>35</b>
10.1	Mittausaineistoista puustotietovarastoiksi .....	35
10.2	Runkopankin toiminnallinen ja aineistojen kuvaus .....	36
10.3	Leimikon puustotietojen määrittäminen .....	37
<b>11</b>	<b>KAUKOKARTOITUS METSIÄ KOSKEVAN TIEDON TUOT- TAMISESSA .....</b>	<b>38</b>
11.1	Yleistä kaukokartoituksesta .....	38
11.2	Numeeristen kuvien operatiiviset käyttömahdollisuudet .....	39
11.2.1	Satelliittikuvat .....	39
11.2.2	Numeeriset ilmakuvat .....	40
11.2.3	Muut numeeriset kaukokartoitustietolähteet .....	41
<b>12</b>	<b>YHTEENVETO .....</b>	<b>42</b>
	<b>LÄHDEKIRJALLISUUS .....</b>	<b>43</b>

## 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 sekä integroituneen teollisuuden puuraaka-aineen tarkempi prosessiohjaus kannattavuuden mukaan. Tuotelähtöinen puunhankinta-projektissa on kehitetty hakkuukoneryhmän sekä varannon ohjauksen toimintamalleja.

Leimikon ennakkomittausmenetelmät ja metsänmittaustiedot-osaprojektissa on pääsisältönä ollut varannon ohjauksessa tarvittavien leimikon puustotietojen hankintamenetelmien kehittäminen. Osaprojektissa pyrittiin erilaisin menetelmin tuottamaan tietoa leimikon puuston määrästä ja laatuominaisuuksista kohtuullisin kustannuksin ja riittävän tarkasti asiakaslähtöistä tuotantoa varten. Osaprojekti liittyy läheisesti Leimikoiden apteerausvaihtoehtojen optimointi ja hakkuujärjestys- sekä Hakkuukoneryhmän ohjaus-osaprojekteihin. Tutkimuksessa esille tulleiden kysymysten ja kehittämistavoitteiden pohjalta käynnistettiin Puustotiedon hankinta hakkuukoneella-projekti, jossa selvitetään pääosin hakkuukoneiden mittaustiedoista kootun puustotietovaraston käyttömahdollisuuksia ennakkotiedon tuottamisessa. Tässä osaprojektissa yhteistyökumppaneina ovat olleet Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, Sunit Oy ja Suomen Metsätieto Oy.

Helsingissä 10.2.1998

Tapio Räsänen

Eero Lukkarinen

## TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa selvitettiin, kuinka puustoa voidaan kuvata, jotta kuvaus täyttäisi tuotelähtöisen toiminnan asettamat vaatimukset, ja miten kuvauksissa tarvittavat perustiedot on mahdollista hankkia. Puuston kuvauksen lopputuotteena tulisi olla puujoukko, jossa ovat mukana ne arvioitavissa olevat tunnuksset, joilla on merkitystä ja käyttöä tuotantoketjun eri vaiheissa.

Ajantasainen ja ammattitaidolla tehty metsäsuunnittelutieto on kelvollista perustietoa, mutta sen tietosisältö ei vastaa puuston laatua kuvaavien tunnus-ten puutteen vuoksi tuotelähtöisyyden vaatimuksia. Metsäsuunnittelun tavoitteet ja tiedon käyttöperiaatteet vaatisivatkin puunhankinnan näkökulmasta perusteellista uudelleenarviointia. Ennakkotietolähteenä metsäsuunnittelutieto on joka tapauksessa kehittämisen arvoista, sillä se on ainoa ennen leimikon muodostamista metsiköstä oleva, mittauksia sisältävä tietolähde, joka voisi korvata leimikon suunnittelussa tehtävän ennakkomittauksen. Tutkimuksessa todettiin metsäsuunnittelun laskennassa käytettävien puujoukon muodostamismallien olevan varsin tarkkoja.

Ennakkomittausmenetelmillä on mahdollista saada riittävästi tietoa leimikon puuston määrästä, rakenteesta ja laatuominaisuuksista, mutta tulokset osoittivat, että mittauksien hajonta on hyvin suuri. Kokonaisuutena ennakkomittausmenetelmillä saatujen tulosten voidaan katsoa olevan enintään tyydyttäviä. Tutkittavina olleista mittausmenetelmistä yhtäkään ei voida pitää menetelmällisesti muita parempana. Selvää kehittämistarvetta on lähinnä runkolukusarjojen muodostamisessa ja pinta-alan määrittämisessä. Mittaustietojen perusteella voidaan muodostaa katkonnan simuloinnissa käytettävät tiedostot ja laatia katkonnan ohjaustiedostot. Menetelmien käytön esteenä on kuitenkin mittausresurssien vähäisyys. Kevyen ja nopean mittauksen ja laatu-  
tunnusten sisällyttämisen välillä on ristiriita, joka vaikeuttaa ennakkomittauksen käyttöönottoa niin kauan kuin mittauskustannukset arvotetaan tiedon olemassaoloa suuremmiksi.

Leimikon puujoukon muodostamisessa ovat tärkeimpiä runkolukusarjojen ja pituuksien estimointi, joihin on olemassa käyttökelpoisia metsikkömalleja. Laatutunnusten estimointi joko leimikon puustolle keskimääräisinä tunnuksina tai puukohtaisesti olisi tuotelähtöisyyden kannalta tärkeää. Puun sisäistä laatua indikoivien oksarajakorkeuksien ennustemallien laadinta on kuitenkin ilmiön luonteen vuoksi lähes mahdotonta lukuunottamatta männyn elävän latvuksen alarajan ennustemallia.

Tutkimuksessa ei pystytty toteuttamaan alkuperäisenä tavoitteena ollutta erilaisten leimikon ulkopuolisten koepuuaineistojen ja valinta- ja kohdentamismenetelmien käyttöä puustotietojen ennustamisessa, koska sopivia aineistoja ei ollut käytettävissä. Hakkuukoneiden tuottamien mittausaineistojen kokoaminen tietovarastoksi sekä datan muodostamis-, hallinta- ja käyttömenetelmien kehittäminen tietojärjestelmäksi arvioitiin sen sijaan potentiaalisesti vaihtoehdoksi leimikon puuston ennustamisessa. Tutkimuk-

sessä aloitettua työtä jatketaan Runkopankkiprototyyppi-projektissa, jossa vasta voidaan koota niin suuria määriä mittausaineistoja, että ennustamismenetelmien kehittäminen on mahdollista. Tavoitteena on luoda menetelmä, jossa perustiedoiksi riittäisivät metsäsuunnittelutiedot ja kaupanteossa muutoinkin tallennettavat tiedot. Tavoitteena on myös kehittää menetelmää ennakoimaan runkojen jalostusarvoa laatutunnusten perusteella, jolloin leimikon ennakkotieto vastaisi koko tuotantoketjun tarpeita.

# 1 JOHDANTO

Tuotelähtöisyyden toteuttamismahdollisuuksiin puunhankinnassa vaikuttaa olennaisesti tieto siitä, millaisia korjuuseen suunnitellut leimikot ovat puustoltaan ja millaisia hakkuukohteita on tarjolla ostettaviksi. Tieto sinänsä ei ole itseisarvo, vaan sitä tarvitaan suunnittelun perustaksi. Leimikoista saatavaa ennakkotietoa tuotetaan nykyisin edelleen pääasiassa erityyppisin arvioin ja kevyin mittauksin hakkuissa poistuvista puutavaralajikohtaisista tilavuuksista. Silmävaraiset arviot puuston ulkoisista ominaisuuksista ja kokemusperäinen tieto laadusta yhdessä määräävät sen, onko puusto toimitustavoitteisiin sopivaa ja mille laitokselle puutavaraerät ohjataan.

Nykyinen puustotiedon sisältö ja laatu eivät useimmiten vastaa tuotelähtöisen puunhankinnan vaatimuksia. Olemassa oleva tieto metsiköstä voi olla toki aivan riittävää, mutta usein se voi olla myös vanhentunutta, epätarkasti mitattua tai se on osin muusta metsiköstä kuin korjuun kohteena olevasta leimikosta. Laatuominaisuuksia kuvaavia tietoja on harvoin mukana ainakaan mitattuina. Leimikkoa suunniteltaessa ei resurssi- ja kustannussyistä ole usein mahdollisuuksia tehdä puustomittauksia. Kaukokartoitustekniikkakaan ei ole toistaiseksi tuonut leimikkotason puustotietojen arviointiin soveltamiskelpoisia vaihtoehtoja, joissa laatutunnukset olisivat mukana. Metsäntutkimuksessa on kehitetty erilaisia puustoa kuvaavia malleja, joiden avulla voidaan tehdä ennusteita puuston rakenteesta. Tärkeimpiä niistä ovat mallit, jotka kuvaavat läpimittajakaumia, pituutta, latvussuhdetta ja sahauslaatua.

Ennakkotiedon merkitystä ja hankintamenetelmiä tutkittiin Leimikon ennakkomittausmenetelmät ja metsänmittaustiedot-projektissa. Siinä pyrittiin erilaisin menetelmin kehittämään soveltuvia tapoja tuottaa tietoa leimikon puuston määristä, rakenteesta ja laatuominaisuuksista käytettäväksi puunhankinnan ohjauksen eri vaiheissa. Tässä raportissa esitetään projektin tulokset.

## 2 TAUSTA

Metsiämme mitataan ja arvioidaan erilaisia tarpeita varten monilla menetelmillä ja erilaisella intensiivisyydellä. Valtakunnallista ja alueellista tietoa puuvaroista saadaan Metlalta valtakunnan metsien inventoinneista. Yhdistämällä mittaustiedot satelliittikuvatulkintaan voidaan puustoennusteita tehdä puulajista ja tilavuudesta kuviokohtaisesti, mutta puutavaralajeja ja laatua kuvaaviin tuloksiin ei nyky menetelmällä vielä päästä. Menetelmää on kokeiltu oston apuvälineenä mm. halutunlaisten leimikoiden hakemisessa.

Tilakohtaiset metsäsuunnitelmat sisältävät kuviokohtaista puustotietoa yksityismetsien ja yhtiöiden omien metsien käytön suunnittelua varten. Tällä hetkellä n. 75 % yksityismetsien pinta-alasta on metsäsuunnittelun piirissä, mutta suunnittelun tulevaisuus on uhattuna yhteiskunnan rahoituksen vähen-

tyessä. Kuviokohtaiset puustotiedot ovat useinkin ainoa käytettävissä oleva tieto ostotilanteissa ja leimikon suunnitteluvaiheessa. Tieto voi kuitenkin olla vanhentunutta tai se ei ole tarpeeksi tarkkaa. Metsäsuunnittelussa ei ole myöskään tähän mennessä riittävästi kuvattu puuston laatua. Uudessa Solmu-metsäsuunnittelussa puuston kuvausta on parannettu, mutta vieläkin erilaisia laatutunnuksia ei kerätä riittävästi. Yhtiöiden omien metsäsuunnittelu-järjestelmien tietosisällössä eivät laatutiedot ole sen monipuolisempia. Yksityismetsien metsäsuunnittelutietojen käyttöoikeudesta on keskusteltu ajoittain, osin puukauppaan ja osin luontoarvojen kartoittamiseen liittyen. Monet seikat puoltaisivat tietojen nykyistä vapaampaa ja joustavampaa käyttöä tietoverkkojen avulla.

Leimikon oston apuvälineiksi puutavaralajikohtaisten tilavuuksien arviointiin ja laatutunnusten määrittämistä varten on kehitetty kevyen pystymittauksen tyyppisiä ennakkomittausmenetelmiä. Mm. puutavaralajien osuuksien arviointi on ollut ongelmallista, minkä vuoksi menetelmien käyttö on jäänyt vähäiseksi. Menetelmiä vieroksutaan myös niiden aiheuttaman ylimääräisen työn vuoksi.

Puustotietojen arvioinnissa ilma- ja satelliittikuvat ovat olleet keskeisiä apuvälineitä, joita on käytetty lähinnä ennakkokuvioinnissa, koealaotannan suunnittelussa ja osituksessa sekä maastotiedon yleistämisessä. Leimikkojen puustotietojen määrittämiseen niiden geometrinen tarkkuus ja erotuskyky ei ole kuitenkaan ollut riittävä, lukuunottamatta suurimittakaavaisia ilmakuvia. Numeeristen ilmakuvien käyttöä metsiköittäisten puustotietojen arviointiin ei ole tutkittu Suomessa kovin paljon. Uudentyyppiset kaukokartoitustekniikat tuonevat kuitenkin uusia mahdollisuuksia entistä pienipiirteisempään puustotunnusten määrittämiseen.

Hakkuukoneet tuottavat runsaasti mittaustietoa hakatuista rungoista ja puutavaroista normaalin hakkuutyön yhteydessä. Siten, että kootaan ja muokataan tieto tietovarastoksi ja tehdään käyttösovellukset, hakkuutietoa voitane käyttää hyväksi uusien leimikoiden puustotietoja ennustettaessa. Hakkuukohteesta olemassa olevan vähäisen tiedon perusteella leimikko tyypitetään ja puustotiedot tarkennetaan hakemalla tietovarastosta vastinleimikoita ja -koeputia. Ajatus runkopankin nimellä olevasta tietovarastosta syntyi projektin aikana ja sen kehittäminen on aloitettu erillisessä tutkimushankkeessa.



### 3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET JA TEHTÄVÄT

Projektin tavoitteena oli luoda menetelmiä, jotta riittävän tarkkoja tuoteryhmittäisiä puustotietoja saataisiin leimikoista kohtuullisin kustannuksin varannon ohjausta varten. Projekti jakaantui seuraaviin päätehtäviin:

- ennakkomittausmenetelmien kehittäminen
- metsäsuunnittelutietojen käyttö leimikon tuoteryhmittäisten puustotietojen arvioinnissa
- koepuupankki ja koepuutietojen kohdentaminen leimikoihin
- numeeristen ilmakuvien käyttö leimikon puuston määrän ja laadun arvioinnissa.

Ennakkomittausmenetelmien kehittämisessä tavoitteena oli selvittää erilaisien menetelmien tarkkuutta, joustavuutta ja kustannuksia sekä niiden heikkouksia ja vahvuuksia. Huomiota kiinnitettiin etenkin runkolukusarjan muodostamiseen, laatukohtaisten puutavaralajimäärien arviointiin ja koepuutietojen mittaukseen ja käytettävyyteen. Uusia ennakkomittausmenetelmiä ei ollut tarkoitus varsinaisesti tuottaa.

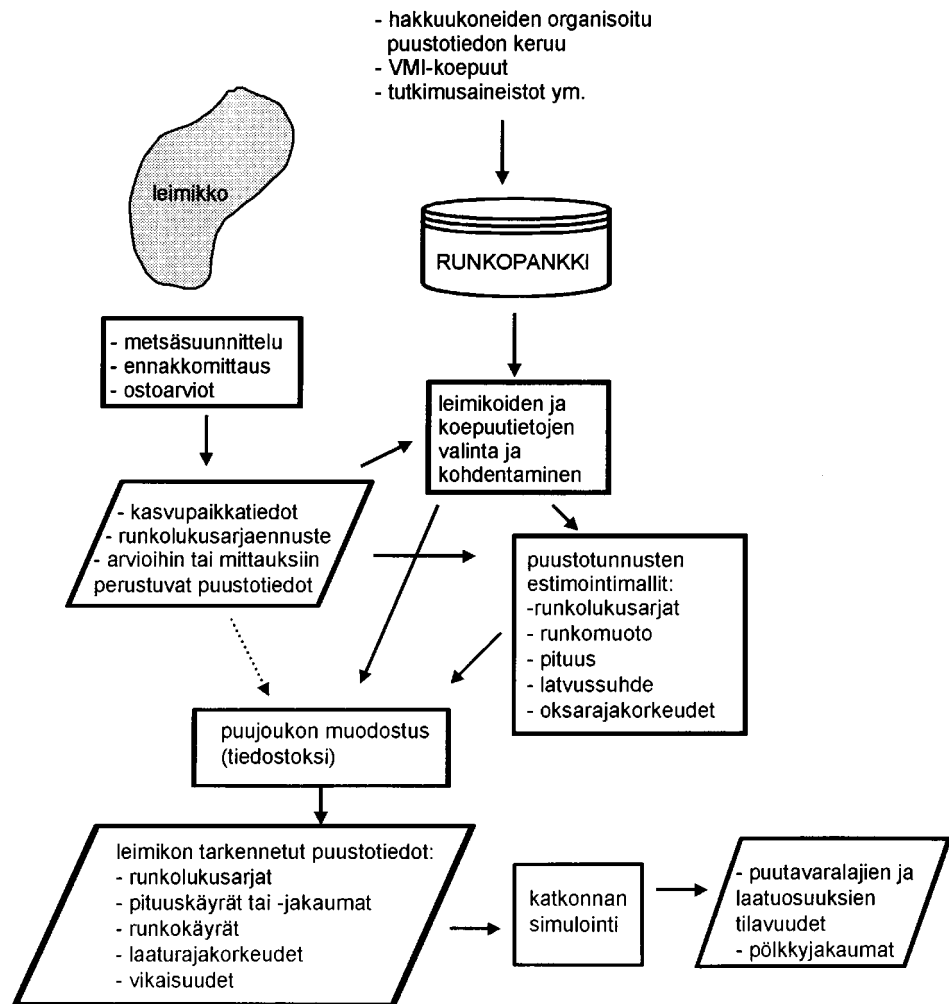
Projektissa selvitettiin yksityismetsien metsäsuunnittelujärjestelmän (Solmu) puustoa kuvaavien tietojen käyttömahdollisuuksia leimikon puutavaralajimäärien ja laadun määrittämisessä. Erityisesti kiinnosti puujoukon ja runkolukusarjojen muodostaminen. Toissijaisena tavoitteena oli vaikuttaa metsäsuunnittelun tietosisältöön, jotta jatkossa mitattaisiin entistä enemmän puuston laatua kuvaavia tunnuksia. Puunhankinnan kannalta tavoiteltavaa on myös uudenlainen suunnitteluideologia, jossa hakkuukypsien metsien puustotieto olisi tarkemmin mitattua, riittävän ajantasaista ja nykyistä paremmin saatavilla. Tämäntyyppisiin tavoitteisiin pääseminen vienee kuitenkin vielä aikaa.

Leimikon ulkopuolisen koepuu- ja puustotiedon käytöllä leimikon puuston ennusteiden tekemisessä arvioitiin olevan mielenkiintoisia tutkimusnäkyelmiä. Alkuperäisenä tavoitteena oli käyttää tehtävään VMI-koepuutietoja, mutta kustannussyistä se ei ollut mahdollista. Tällöin alettiin selvittää hakkuukoneiden tuottaman puustotiedon kokoamismahdollisuuksia ja tiedon käyttökelpoisuutta leimikko- ja aluetason puustotietojen ennustamisessa.

Kaukokartoitustekniikan käyttöä metsikkötasoisien puustotiedon tuottamiseen ei ole nähty toistaiseksi realistiseksi. Tulkintamenetelmissä on monia soveltamisen kannalta vaikeasti ratkaistavia kysymyksiä, samalla kun kuvaustekniikat ja -materiaalit jatkuvasti kehittyvät erotuskyvyltään paremiksi. Tästä syystä projektissa tehtiin vain suppea kirjallisuusselvitys lupaavimmilta vaikuttavista tekniikoista.

Tuotelähtöisessä toiminnassa ennakkotiedon sisällön ja tarkkuuden on vastattava tietotarpeita. Siksi ennakkotiedon hankintaa on tarkasteltava tiedon käy-

tön asettamista vaatimuksista. Eri tavoin hankittu tieto vaihtelee tietosisällöltään ja luotettavuudeltaan. Yksinkertaista tietoa voidaan tarkentaa ja monipuolistaa, jos halutaan. Erilaisia tietolähteitä ja menetelmiä voidaan käyttää yhdessä ennakkotiedon tuottamiseksi. Tämä tulee kyseeseen varsinkin käytettäessä runkopankin kaltaista tietovarastoa puustotietojen ennustamiseksi. Menetelmien ja tietolähteiden välisiä yhteyksiä on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Ennakkotietolähteet ja menetelmät puustotietojen muodostamisessa.

## 4 ENNAKKOTIEDON KÄYTTÖTARPEET

Leimikon puuston ennakkotiedolle on puunhankintaketjun eri vaiheissa monta käyttötarvetta. Puunhankinnan ohjauksessa ennakkotietoa voidaan käyttää

- leimikoiden valinnassa ja hinnanmäärityksessä
- korjuu- ja kuljetusohjelmien laadinnassa ja leimikoiden hakkuujärjestyksen määrityksessä
- hakkuukoneiden apteerauksen ohjauksessa ja simuloinneissa
- sahojen ja vaneritehtaiden tukkisuman ennakoinnissa.

Leimikon ostopäätös ja leimikosta maksettavan hinnan määrittäminen ovat tuotelähtöisen toiminnan ja sen kannattavuuden kannalta tärkeitä vaiheita. Markkinatilanteet vaihtelevat ja heijastuvat puun ostossa ensisijaisesti puulajin ja järeyden kysyntään. Tuotteiden raaka-aineelle asettamat laatuvaatimukset, varsinkin mekaanisen metsäteollisuuden tuotannossa, korostuvat hankinnan ohjauksessa sitä enemmän mitä erikoistuneempia tuotantolaitokset ovat. Sahalaitosten erikoistuminen tiettyyn puulajiin, laatuun ja mittoihin vaikuttaa ostettavien leimikoiden valintoihin ja aiheuttaa sen, että eri alueilla on kysyntää erityyppisistä leimikoista. Sahateollisuuden korkeasuhdanne lisää kilpailua leimikoista ja laadukkaasta raaka-aineesta. Tieto puuston määrästä ja laadullisesta rakenteesta on tällöin entistä tärkeämpää, jotta raaka-aine vastaisi tuotanto-ohjelmien mukaista tarvetta.

Tuotelähtöisessä toiminnassa tietoa leimikon puustosta tarvitaan, kun määrätään, minkä tuotantolaitoksen mitta- ja laatuvaatimusten mukaan puutavara katkotaan. Hakkuun ajankohdan ja hakkuujärjestyksen määrittämisellä haetaan joko tuotantoon parhaiten sopivia kohteita tai optimoidaan yrityksen puunhankintaa kokonaisuudessaan. Puutavaran kuljetusten optimointi onkin laajenemassa koko puunhankinnan optimoinniksi, jolloin kyse ei ole enää vain hakkuussa syntyvistä puutavaroista, vaan vaikuttamisesta siihen, miten käytettävissä olevasta raaka-aineesta saadaan paras kokonaishyöty. Erityisesti sahat, jotka tekevät tilausten mukaan vaihtelevia tuotteita, tarvitsevat tuotantonsa suunnittelua varten tietoa siitä, millainen on niille suunnittelujakson aikana toimitettavien tukkien odotettavissa oleva mitta- ja laatujauma.

Hakkuukoneiden tekemään katkontaan vaikutetaan ohjaustiedoilla, joihin määritetään arvoapteerauksessa puutavaralajeittain läpimitta- ja pituusluokkien arvomatriisit sekä jakauma-apteerauksessa lisäksi luokkayhdistelmien tavoitteet ja kielletyt yhdistelmät. Haluttujen apteerausparametrien määrittäminen on tehtävä pääasiassa ennen hakkuuta siten, että kokeillaan eri vaihtoehtoja ja testataan tuotantotavoitteiden toteutumista simuloimalla leimikoiden apteerausta. Jotta määrittäminen ja simulointi onnistuisivat, on kohteen puustosta oltava ennakkotietoa. Huono ennakkotieto aiheuttaa sen, että etukäteen määritetty ohjaustiedosto soveltuu huonosti leimikkoon ja sitä on korjattava hakkuun edetessä.

## 5 TUTKIMUSMENETELMÄT JA -AINEISTOT

Tuotelähtöinen puunhankinta -projektissa aineistohankinta tehtiin yhteisesti kaikille osaprojekteille. Aineistot on kuvattu Metsätehon raportissa 45.

Leimikon ennakkomittausmenetelmät ja metsänmittaustiedot -projektia varten tehtiin seuraavat mittaukset ja tiedonkeruut:

TAULUKKO 1. Tutkimusleimikoiden mittaukset ja tiedonkeruut.

MITTAUS	KOhteita
Puidenluku	16
Laatukoepuiden mittaus	16
Ennakkomittaus: Leima / Suomen Metsätieto Oy	16
Ennakkomittaus: Minileima / Suomen Metsätieto Oy	12
Ennakkomittaus: Sunit	14
Solmu-metsäsuunnittelutiedot	13
Sahauskoepuiden mittaus	9
Hakkuukoneen rungoittaiset mittaustiedot (STM)	15
Hakkuukoneen tuotantotiedot (PRD)	16

Yksittäinen tutkimuskohde rajattiin puustoltaan ja kasvupaikkaolosuhteiltaan mahdollisimman yhtenäiseksi ja tarvittaessa se jaettiin ositteisiin, jotka mitattiin erikseen. Kaikilta kohteilta kirjattiin olosuhde- ja yleistiedot lomakkeelle. Kohteen pinta-ala mitattiin bussolilla ja lankamittalaitteella. Puidenluku tehtiin 1 mm:n luokituksella yhdestä suunnasta kaikista rinnankorkeudeltaan yli 7 cm:n puista. Pystyyn jätetyt puut luettiin hakkuun jälkeen erikseen. Luku-puista valittiin osa (10 – 100 kpl/puulaji) ns. laatukoepuiksi, joista arvioitiin korkeudet alimpaan kuivaan oksaan ja elävän latvuksen alarajaan, puun pituus sekä vian tai muun syyn takia normaalista poikkeavan tukkiosan päättymiskorkeus. Laatukoepuista valittiin sahauskoepuut tarkempia runko-kohtaisia mittauksia ja koesahauksia varten. Ennakkomittaukset tehtiin kolmella erilaisella kaupallisella menetelmällä (Suomen Metsätieto Oy:n Leima ja Minileima sekä Sunit Oy:n menetelmä). Kaikilla kohteilla ei kuitenkaan pystytty käyttämään jokaista menetelmää. Kaikki em. mittaukset teki Metsätehon työntutkija. Solmu-metsäsuunnittelun kuviokohtaisen tiedonkeruun teki kohteille neljä metsäkeskusten suunnittelijaa.

## 6 MILLAISTA ENNAKKOTIETO VOI OLLA?

Leimikon puustotieto voi olla sisällöltään, tarkkuudeltaan ja ajantasaaisuudeltaan monentasoista. Mitatun ja arvioidun tiedon määrä ja hankintatapa vaihtelevat, ja tiedon muodostamisessa voidaan käyttää erilaisia puustotunnusmalleja. Puustotunnusten ennustamiseen liittyy aina epävarmuutta, jonka suuruus olisi kyettävä arvioimaan. Harha ja epävarmuus voivat kumuloitua lopputuloksiin, jos mallilla ennustettuja puustotietoja käytetään jonkin toisen mallin lähtötietoina.

Puujoukolla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa siten ennustettuja metsikön puustotietoja, että niistä voidaan muodostaa yksilöity puukohtainen tiedosto. Kustakin puusta on oltava puulajin lisäksi tietona vähintään rinnankorkeusläpimitta ja pituus. Niistä voidaan muodostaa puun runkokäyrä ja siitä edelleen tukki- ja kuitupuuosuuksien pituudet erilaisilla läpimittavaatimuksilla. Muina tunnuksina voivat olla oksarajakorkeudet, laatuosuuksien pituudet ja erilaisten vikojen esiintymistodennäköisyydet. Puujoukon tärkein käyttötarkoitus on leimikon apterauksen simulointi ja apterausparametrien määrittäminen.

Leimikosta ja sen puustosta saatavissa oleva ennakkotieto voidaan ryhmitellä tietosisällön tasoltaan ja hankintatavaltaan seuraaviin luokkiin:

### 1. Minimitieto

- ei puustoon tutustumista maastokäynnillä
- kokemusperäinen tai suulliseen kuvaukseen perustuva arvio
- karttatietoa voidaan käyttää
- leimikkotiedot: sijainti, pinta-ala, kasvupaikkatyyppi, hakkuutapa, lämpösumma-alue
- puustotiedot: kehitysluokka, pääpuulaji, puuston jaksoisuus, tilavuusarvio

### 2. Silmävaraiset arviot

- ei mittauksia
- leimikkotiedot kuten edellä
- puustotiedot: kehitysluokka, puuston jaksoisuus, puulajien osuudet tilavuudesta, tilavuus, tukki- ja kuitupuuosuudet, keskijäreys luokittain, runkojen jakautuminen karkeisiin läpimittaluokkiin, keskipituus, puuston laatu

### 3. Metsäsuunnittelutieto

- metsäsuunnittelun kuviotietoja varten tehtävä tiedonkeruu
- mittaukset yleensä relaskoopikoealoilta
- mahdollisuus kuvata puustoa varsin yksityiskohtaisesti ositteittain (puulaji, latvuskerros)
- puustoarviotiedot: pohjapinta-ala, keskiläpimitta, keskipituus, ikä
- johdetut tiedot: tilavuudet, runkolukusarjat ja pituuskäyrät

- leimikkotiedot kuten edellä, lisäksi muuta kasvupaikan kuvaustietoa
- leimikon tai lohkon rajat eivät välttämättä noudata kuvioinnin rajoja, jolloin tieto vaatii tarkistuksen
- vanhat tiedot tulisi päivittää puuston kasvun mukaan

#### 4. Ennakkomittaustieto

- mitattu otos ympyrä- tai relaskooppikoealoilta tai eteen sattuvista puista
- koeala- tai metsikkökohtainen tietojen käsittely kaikissa vaiheissa mahdollista, vaikka yleensä tulokset esitetään käsittely-yksiköittäin (lohko tai leimikko)
- leimikkotiedot kuten edellä, tarkennukset kasvupaikasta koealoittain ovat mahdollisia
- puustomittaustiedot: pohjapinta-ala, koepuista rinnankorkeusläpimitta, pituus, tukkiosan päättymiskorkeus, kuivaoksarajan ja elävän latvuksen alarajan korkeus, tukkilaatujen pituus, rungon vikaisuudet, ikä
- johdetut tiedot: runkolukusarjat, pituuskäyrät, puutavaralajien tilavuudet ja jakaumat laaduittain
- laskennallisten puujoukkojen muodostaminen mahdollista

#### 5. Puustotietovarasto

- vastinpuustojen hakeminen tietovarastosta olemassa olevia tietoja hakukriteereinä käyttäen
- tietovarasto voi olla toteutuneisiin hakkuisiin perustuva runkopankki, jossa on runkolukusarjat, runkomuototiedot, rungon laatuominaisuuksia kuvaavat tiedot ja katkontatiedot
- tuloksena puujoukko

#### 6. Kaukokartoitustieto

- kohteen puustotunnusten estimointi kaukokartoitusmateriaalien avulla, materiaalien spektrinen ja maastonerotuskyky ratkaisevia
- tarkka sijainti oltava tiedossa
- nyky menetelmillä kokonaistilavuus ja puulajisuhteet ovat luotettavimmin arvioitavia tunnuksia

## 7 LEIMIKON PUUSTOTUNNUSTEN ESTIMOINTI JA PUUJOUKON MUODOSTUS

### 7.1 Runkolukusarjan muodostamisen vaihtoehdot

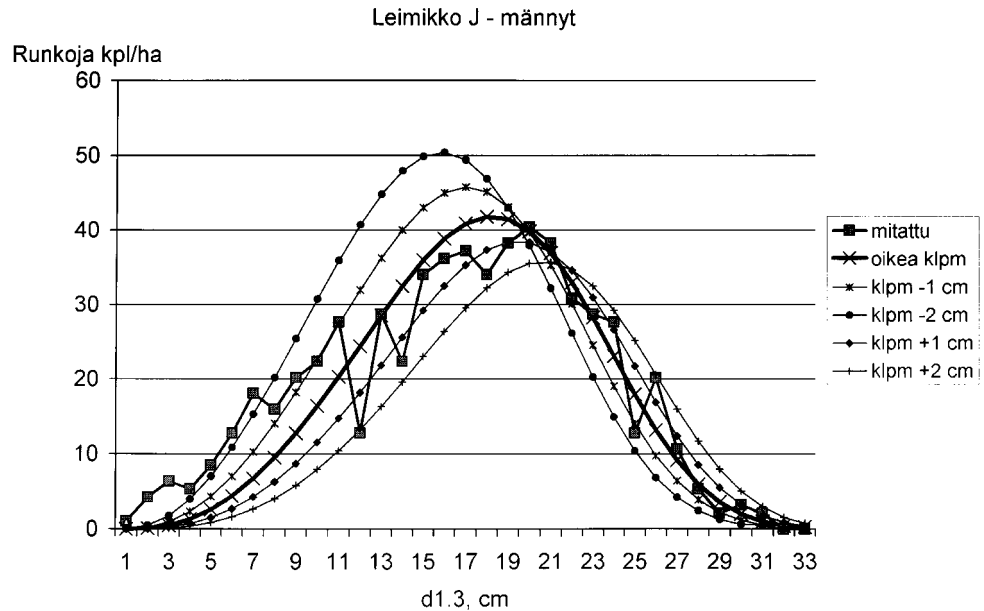
Rinnankorkeusläpimitta on tärkein ja yleisimmin puusta mitattu tunnus. Se on helppo ja luotettava mitata, ja se on hyvin riippuvainen monista muista puiden tunnuksista. Hakkuussa poistettavan puuston puulajeittainen läpimittajakauma eli runkolukusarja on puujoukon muodostamisen tärkein osa. Runkolukusarjat kuvaavat metsikön rakennetta, tiheyttä ja kehitysvaihetta ja ovat usein perusta metsikön käsittelypäätöksille. PMP-systeemissä runkolukusarjat saatiin mittaamalla kaikkien poistettavien runkojen rinnankorkeusläpimitat, mutta ennakkotietoja varten vastaavanlaista puidenlukua tehdään kustannussyistä vain koaloittaisella otannalla. Runkolukusarjat muodostetaan läpimittaluokittain, jolloin luokkaväli voi olla tasainen tai tärkeissä rungonkokuokissa muita pienempi. Luokkavälin suuruus vaikuttaa suoraan jakauman tarkkuuteen, ja se määritetään usein mittaustarkkuuden mukaiseksi. Runkoluku voidaan korvata jakaumassa pohjapinta-alalla tai tilavuudella, jolloin suurilla puilla on merkitystään paremmin kuvaava paino. Runkolukusarjan muodostamiseksi kuvataan seuraavassa lyhyesti kolmea menetelmää: koaloilta mitattujen koepuiden läpimittojen suoraa yleistystä ilman tasoitusta, jatkuvien parametrinen todennäköisyysjakaumien muodostamista ja kernel-tasoitettun jakauman muodostamista.

Ennakkomittausmenetelmissä voidaan mitata kiinteäsäteisillä ympyräkoaloilla koepuiden läpimitat. Koko leimikon tai hehtaariohtaisiksi muunnetut runkolukusarjat muodostetaan yksinkertaisesti kertomalla läpimittaluokittaiset määrät koalojen edustamalla osuudella pinta-alasta. Minkäänlaista tasoitusta ei tehdä. Runkolukusarjan edustavuus riippuu koepuiden ja koalojen määrästä. Vaihtoehtoisena tapana on läpimittajakauman graafinen tasoitus.

Matemaattisten jakaumayhtälöiden soveltuvuutta puustojen läpimittajakaumien kuvauksiin on tutkittu paljon. Hyvä jakaumamalli on joustava ja sen parametrien määrittämiseen tarvittavien tunnusten mittauksen täytyy olla mahdollista ja yksinkertaista. Suomessa eniten käytetyt estimointimallit ovat Weibull-jakaumiin perustuvia, joita ovat laatineet Mykkänen männylle sekä Kilkki ym. kuuselle. Niitä käytetään muun muassa metsäsuunnittelun puujoukkojen muodostamisessa ja MELA-ohjelmistossa. Tässä projektissa on myös käytetty ko. yhtälöitä.

Nämä mallit ovat helppokäyttöisiä, mutta ne eivät kuvaa hyvin monihuippuisia jakaumia. Kaksijaksoisten metsien jakaumat on laadittava jaksoille erikseen, ja siten myös tarvittavat tunnuksot on mitattava puujaksoittain. Jakaumien tarkkuus paranee myös siten, että ne laaditaan erikseen tukki- ja kuitupuille, vaikka puut olisivatkin samaa jaksoa. Männyn mallissa lähtötietoina annetaan mäntyjen pohjapinta-alamediaanipuun rinnan-

korkeusläpimitta, minimiläpimitta ja pohjapinta-ala hehtaariohtaisena sekä kohteen korkeus merenpinnasta, jolla mallissa on vain vähän merkitystä. Kuusen mallissa lähtötiedot ovat muuten samat, mutta kohteen korkeuden sijasta käytetään puuston ikää.



**Kuva 2.** Keskiläpimitan vaikutus mäntyjen Weibull-tasoitettuun läpimittajakaumaan esimerkileimikolla.

Malleissa käytettävistä tunnuksista tärkein on pohjapinta-alamediaanipuun läpimitta (kuva 2). Muiden tunnusten vaikutus jakaumien muodostamisessa on pienempi, eikä niiden määrittämisen tarkkuudella ole siksi yhtä suurta merkitystä. Puuston pohjapinta-alamediaanipuun läpimitta vastaa pohjapinta-alalla painotettua keskiläpimittaa, vaikka ei tarkkaan ottaen ole kuitenkaan sama asia. Tutkimusleimikoiden pääpuulajien pyöristetty pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta ei yhdessäkään tapauksessa poikennut 1 cm:ä enempää pohjapinta-alamediaanipuun läpimitasta. Siksi tunnus voidaan määrittää riittävän tarkasti koepuiden pohjapinta-alalla painotettuna keskiläpimittana. Tunnuksen laskenta on helppo ohjelmoida otantaohjelmaan esim. mittasaksille.

Männyn ja kuusen keskiläpimitan määrittämiseksi riittävää koepuumäärää selvitettiin 11 tutkimusleimikon lukupuutietojen avulla. Puulajeja, joita leimikon tilavuudesta oli vain vähän, ei tarkasteltu. Varsinaista koelaotantaa ei voitu simuloida, koska siihen olisi tarvittu puiden sijaintitietoja. Sen sijaan simuloitiin satunnaisesti valittujen koepuiden otantoja eri koepuumäärillä. Määrät olivat 15, 30, 50 ja 80 koepuuta. Koepuiksi hyväksyttiin kaikki rinnankorkeusläpimitaltaan yli 10 cm:n puut. Otannat toistettiin 200 kertaa ja niistä laskettiin keskiarvot ja keskihajonnat. Otantojen tuloksena saatuja puulajeittaisia keskiläpimittojen keskiarvoja verrattiin lukupuutietojen todel-



liseen pohjapinta-alalla painotettuun keskiläpimittaan eri koepuumäärillä. Alle 1 cm:n ero katsottiin hyväksyttäväksi. Kuusella 15 koepuun otos oli kaikissa leimikoissa riittävä hyväksyttävään tarkkuuteen kahta leimikkoa lukuun ottamatta. Männyllä 15 koepuuta oli riittävä määrä n. 45 %:lla leimikoista, 30 koepuuta 27 %:lla, ja 50 koepuuta tarvittiin 27 %:lla puustoista. Toiseksi kriteeriksi asetettiin, että 80 %:ssa otantatoistoista keskiläpimitta saa poiketa enintään  $\pm 3$  cm oikeasta. Tällöin kuusen koepuumääräksi riitti 30 tai vähemmän puolella leimikoista ja lopuilla tarvittiin 50 koepuuta. Männyllä 1/3:lla leimikoista riitti 30 koepuuta ja 2/3:lla 50 koepuuta. Vain yhdellä tarvittiin 80 koepuuta vaatimuksen täyttämiseksi.

Keskiläpimitan määrittämistä tarkasteltiin myös Leima-ennakkomittausmenetelmän koepuilla 10 leimikossa. Lähes kaikilla kohteilla oli mitattu 10 ympyräkoelaa, jolloin koepuita oli varsin paljon (34 – 153 kpl). Leimikoittain laskettiin männyillä ja kuusilla koepuiden keskiläpimitan ja oikean läpimitan välinen ero, joka oli keskimäärin  $-0,3$  cm ( $-0,7$  %) ja vaihteli välillä  $-3,5$  –  $+3,4$  cm.

Keskiläpimitan määrittäminen riippuu paljon puuston kokovaihtelusta ja koepuiden valinnasta. Tulosten perusteella 20 - 50 koepuuta riittää luotettavaan läpimitan määrittämiseen. Kaksi- tai useampijaksoisissa puustoissa mittaukset kannattaa tehdä kullekin jaksolle erikseen. Mittausohjelmissa tulisi olla jatkuva läpimitan keskihajonnan ja luottamusvälin laskenta, jolloin käyttäjä voisi minimikoepuumäärän mitattuaan lopettaa koepuiden mittauksen silloin, kun keskiläpimitta ei enää merkittävästi muutu.

Läpimittajakaumien muodostamiseksi voidaan käyttää myös kernel-funktiota erilaisilla tasoitusparametreilla. Siinä koepuumittauksista muodostetaan tasoitettu jakauma, joka voi olla monihuippuinen. Sama jakauma sopii siis puulajin kaikille jaksoille. Menetelmää on tutkinut Uusitalo (1995) ja todennut sen sopivan hyvin ennakkomittausmenetelmien runkolukusarjojen muodostamiseen. Tässä tutkimuksessa kernel-estimointia ei kokeiltu.

## 7.2 Pituuden estimointi

Pituuden merkitys puuston tilavuuden ja rakenteen arvioinnissa on läpimittaa ja siitä johdettuja tunnuksia pienempi. Siksi varsinaisia pituusjakaumia ei yleensä käytetäkään, vaan estimoidaan metsiköittäin tai koealoittain puulajin pituuskäyrät. Ne kuvaavat puun pituutta läpimittaluokittain. Yleisimmin käytettyjä pituusmalleja ovat Henttosen ja Veltheimin mallit, joissa pituuskoepuiden mittauksilla kalibroidaan perusmalli metsikköön sopivaksi. Henttosen mallin kalibroinnissa käytetään lisäksi kasvupaikkatyyppiä ja lämpösummaa. Veltheimin mallissa lähtötietoja tarvitaan enemmän.

Pituuden mittaaminen on työlästä, minkä vuoksi kalibrointi olisi tehtävä mahdollisimman vähäisellä määrällä koepuita. Niiden tulisi olla läpimittajakauman eri osista painottaen kuitenkin määrältään ja arvoltaan merkittävintä puuston

osaa. Uusitalon tutkimuksessa selvitettiin mäntyleimikoissa tarvittavaa kalibrointikoepuiden määrää Henttosen pituusmallissa. Koepuiden lisääminen kolmesta ei parantanut enää oleellisesti mallin keskivirhettä, joka oli n. 2 m. Lisäksi pituuden mittauksessa hypsometrillä on todettu olevan n. 1 metrin suuruinen keskimääräinen virhe.

Pituuskäyrän antaman pituuden käyttö läpimittaluokan kaikille puille ei ole totuudenmukaista, koska siinä sivuutetaan puuston pituusvaihtelu. Varsinaisia jakaumamalleja ei kuitenkaan ole tähän mennessä laadittu, sillä pituuden tarkka mittaus suuresta määrästä metsikön puita on työlästä. Tämän tutkimuksen aineistoilla asiaa ei myöskään tarkasteltu, koska laatukoepuumittausaineisto ei olisi jokaisella kohteella ollut riittävää. Jatkossa pituusvaihtelua voidaan tarkastella hakkuukoneen tuottamien puukohtaisten mittausten avulla, jolloin pituutta mitataan käyttöosan päättymiskohtaan saakka ja hukkalatvan pituus voidaan estimoida runkokäyräyhtälön avulla.

## **7.3 Laatutunnukset**

### **7.3.1 Puutavaran laatuun vaikuttavat tekijät**

Raaka-aineen ominaisuudet ja käyttökelpoisuus tuotantoon määräytyvät jo puunhankinnan eri vaiheissa. Leimikoiden valinta, tavoitemittojen ja ulkoisten laatuominaisuuksien mukainen katkonta, puutavaroiden merkintä ja lajittelu sekä kuljetus tuotantolaitoksille ovat vaiheita, joissa toimitetun raaka-aineen ominaisuuksiin ja laatuun voidaan vaikuttaa.

Puutavaran laatuun vaikuttavia runkovikoja ovat lenkous, mutkat, haarat ja epäpyöreys sekä puuaineen vioiksi luettavat oksaisuus (sisäiset oksat), korot ja muut haavat, reaktiopuu, kierteisyys, vesisilo ja laho. Oksaisuus on tärkein puutavaran laatuun vaikuttava tekijä ja valmiin sahatavaran laatuluokituksen peruste. Arvioitaessa oksaisuutta rungon oksikkuuden perusteella tunnuksina käytetään mm. oksien kokoa, laatua ja sijaintia. Yrityksissä on tukkien laatuvaatimusohjeissa määriteltä erilaatuisten oksien maksimikoot sekä muut sallitut tai kielletyt ominaisuudet. Tukkiisuuden katkonta oksattomaan, kuivaoksaiseen ja terveoksaiseen rungonosaan tehdään havaitun oksikkuuden ja sallittujen dimensioiden perusteella. Laatuositteiden määrittämisen perusteena käytetään laaturajoja eli korkeuksia alimpaan kuivaan oksaan ja elävän latvuksen alarajaan.

Sahatukkien laadusta ja runkojen laatutunnuksista puhuttaessa on tarkoitettu pääasiassa mäntyä, mikä näkyy myös tutkimuksissa ja kirjallisuudessa. Metsikkötekijöiden ja metsien käsittelyn vaikutusta männyn laadun kehittymiseen on selvitetty verrattain paljon. Puun laatu kehittyy oksien karsiutumisen myötä. Metsikön tiheyden kasvamisen on osoitettu pienentävän rungon oksikkuutta tiettyyn rajaan asti ja kasvupaikan ravinteisuuden lisäävän sitä. Metsätyyppiä ei kuitenkaan ole pidetty kovin hyvänä laadun ennustajana, ja usein se onkin jätetty pois oksikkuutta tai laatua kuvaavista malleista. Taimikonhoitotöillä ja harvennushakkuilla vaikutte-

taan puiden väliseen kilpailuun, latvuksen kehittymiseen ja alaoksien kuolemiseen valo-olosuhteita säätelemällä. Metsikön perustamistapa ei sinänsä vaikuta oksikkuuteen, vaan taimikon tiheys ja pituusjakauma ovat ratkaisevampia. Taimikon perkauksessa ja harvennuksessa poistetaan yleensä teknisesti huonolaatuisia puita, mutta pääasia on, että saavutetaan tasainen ja täystiheä taimikko. Laadun kehittymisen kannalta onkin ensiharvennus merkittävämpi toimenpide, koska silloin puiden väliset laatuerot ovat selvimmillään ja niihin voidaan vielä vaikuttaa. Myöhemmissä kehitysvaiheissa voidaan vielä pystykarsinnalla lisätä männyn ja koivun oksattoman tyvitukin määrää. Runkomuotoon ja oksikkuuteen vaikuttavat myös rodulliset tekijät, jotka männyllä ovat hyvinkin merkittävät.

Kun metsikkötekijät ovat riittämättömiä ennustamaan puuston laatua, on tarkasteltu erilaisia puutunnuksia. Alimman kuivan oksan korkeuden (kuivaoksarajan), puun nuoruusvaiheen kasvunopeuden ja rinnankorkeuslähpimitan on todettu ennustavan parhaiten mäntytyukkien laatua. Parhaana yksittäisenä indikaattorina on pidetty alimman kuivan oksan korkeutta. Alhaalla oleva kuiva oksa kertoo puun hitaasta karsiutumuksesta. Jos alin oksa on elävä, on se merkki männyn hyvästä laadusta. Nopea kasvu puun varhaiskehitysvaiheessa merkitsee paksuja oksia ja huonoa laatua myöhemmin. Nuoruuden kasvunopeutta kuvaava vuosilustojen paksuus on hankala mitata rungon tyveltä, eikä sitä käytännössä tehdä. Elävän latvuksen alarajan korkeus on toinen rungon laatuosituksessa käytettävä tunnus, josta voidaan edelleen johtaa puun latvussuhde.

### 7.3.2 Oksarajakorkeuksien ennustaminen

Kuivaoksaraja määritellään yleisesti rinnankorkeudeltaan yli 16,5 cm:n paksuisilla puilla siten, että mitataan alimman vähintään 15 mm:n paksuisen kuivan oksan korkeus maanpinnan tasosta. Pienemmillä puilla alimman oksan täytyy olla 10 mm paksu. Käytännössä kuivaoksaraja voi olla vaikea määrittää tarkasti tulkintaongelmien vuoksi. Myöskään elävän latvuksen alarajan korkeuden määrittäminen ei ole pystyvuista aina helppoa. Määritelmänä on käytetty sitä, että elävän oksan yläpuolella ei saa olla kahta täysin kuolleiden oksien muodostamaa oksakiehkuraa (yksi sallitaan). Usein runko onkin vaihettumisvyöhykkeellään sekaoksaainen. Kun oksien kuolemista on kulu-  
nut vasta vähän aikaa, ovat oksat puuaineessa lähes pintaa myöten terveitä.

Leimikon puujoukon ja laatu jakaumien muodostamista varten tarvitaan ennusteet kuivaoksarajan ja elävän latvuksen alarajan korkeuksista puutasolla. Oksarajakorkeuksien ennustamiseen muiden puu- ja metsikkötunnusten avulla on yritetty kehittää malleja, mutta niiden riippuvuudet muista tunnuksista ovat varsin heikkoja lukuunottamatta elävän latvuksen alarajan ja puun pituuden välistä korrelaatiota männyllä. Rinnankorkeudeltaan yli 16 cm:n paksuiset puut käsittävässä VMI-koepuuaineistossa osasta Etelä-Suomea (11 000 mäntyä ja 12 000 kuusta) korrelaatiokertoimet olivat seuraavat:

<u>Mänty</u>		<u>d13</u>	<u>puunpituus</u>
	kuivaoksaraja	0,29	0,48
	elävän latvuksen alaraja	0,44	0,81
<u>Kuusi</u>			
	kuivaoksaraja	-0,07	0,21
	elävän latvuksen alaraja	0,11	0,42

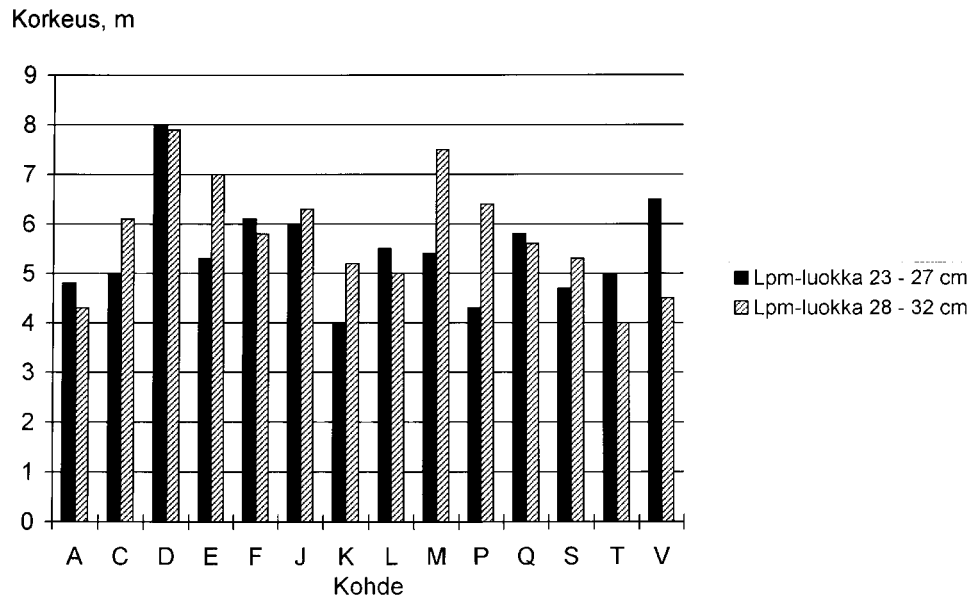
Tämän tutkimuksen aineistoissa vastaavat korrelaatiot laskettiin erikseen sekä 189 kaadetusta sahauskoepuusta että 398 pystyyn mitatusta mäntylaatu-koepuusta. Sahauskoepuiden oksarajakorkeuksien ja pituuksien mittaukset tehtiin laatukoepuita tarkemmin. Korrelaatiokertoimet olivat männyllä seuraavat:

		<u>d13</u>	<u>puunpituus</u>
<u>Laatukoepuut</u>	kuivaoksaraja	-0,04	-0,04
	elävän latvuksen alaraja	0,05	0,56
<u>Sahauskoepuut</u>	kuivaoksaraja	0,12	0,26
	elävän latvuksen alaraja	0,04	0,62

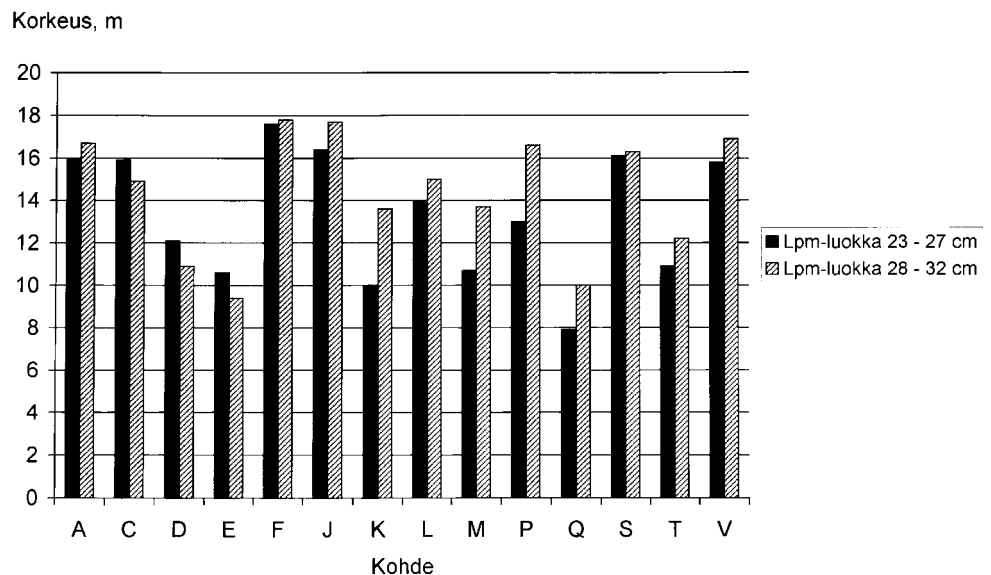
Kuuselle laskettiin sahauskoepuista vain kiinnostavin korrelaatio elävän latvuksen alarajan korkeuden ja puun pituuden välille, ja se oli 0,33. Korrelaatiokertoimet laskettiin koko aineiston lisäksi leimikoittain. Vaikka tulosten mukaan oksarajakorkeudet eivät korreloi lainkaan rinnankorkeusläpimitan kanssa, oli leimikoittaisissa tuloksissa kuitenkin kohteita, joissa korrelaatiot olivat VMI-aineiston tasoa ja parempiakin.

Oksien karsiutumiseen ja kuivaoksarajan korkeuteen vaikuttavia tekijöitä ovat ainakin puuston tiheys, puun pituus, latvussuhde, asema metsikössä, ikä, kasvupaikka, maantieteellinen asema ja rotu. Monet tekijät yhteisvaikutuksineen aiheuttavat sen, että kuivaoksarajan korkeuden mallintaminen on vaikeaa. Koivusen kehittämässä puukohtaisissa sekamalleissa männyn kuivaoksarajan ja elävän latvuksen alarajan suhteelliselle korkeudelle selittävinä muuttujina käytetään mm. rinnankorkeusläpimittaa, keskimääräistä rinnankorkeusläpimitan kasvua sekä metsikön rinnankorkeusikää, pohjapinta-alaa ja koordinaatteja. Mallien keskineliövirhe on kuitenkin varsin suuri ja selitysaste varsin vaatimaton. Koivusen malleja ei testattu TULP-aineistolla. Rouvinen ym. laativat männyn kuivaoksarajalle puukohtaisen sekamallin valtakunnallisen puututkimuksen (VAPU) 65 mäntykoealan 1085 puun aineistolla. Siinä selittävinä tekijöinä ovat rinnankorkeusläpimitta, pituus, metsikön ikä, pohjapinta-ala ja pohjapinta-alamediaanipuun läpimitta. Mallia testattiin 5 TULP-leimikon 157 laatukoepuulla ja 79 tarkemmin mitatulla sahauskoepuulla. Mallilla ennustetun kuivaoksarajan ero todelliseen oli keskimäärin -6,8 dm, ja residuaalien keskihajonta oli varsin suuri, -23,9 dm. Sahauskoepuilla mallin antama ero oli vielä suurempi (-9,5 dm) ja residuaalien keskihajonta samaa tasoa.

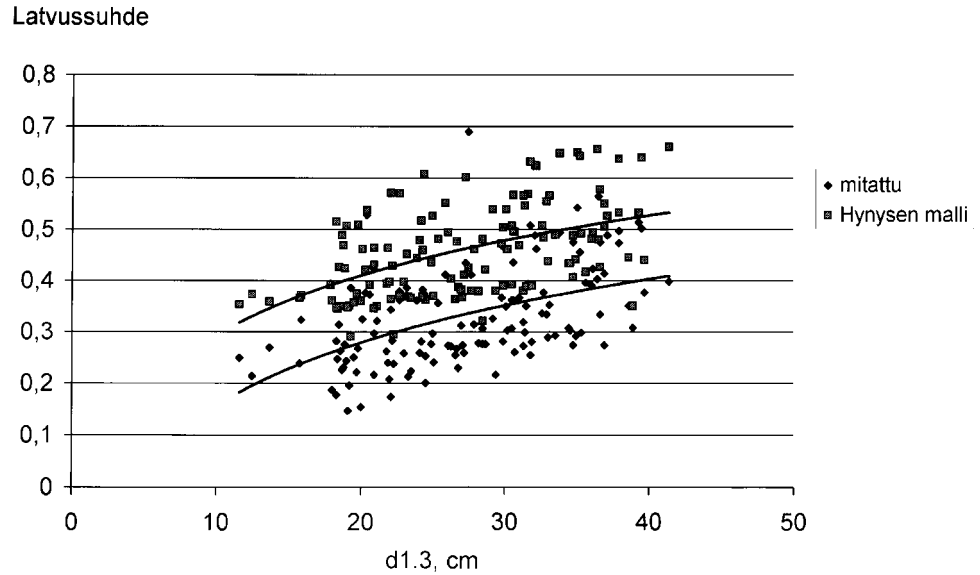
Metsikön kuivaoksarajan keskimääräisen korkeuden sekä vaihteluvälin vaihtelu johtuu em. tekijöistä. Keskimääräinen TULP-leimikoiden laatu- ja sahauskoepuista laskettu männyn kuivaoksarajan korkeus kahdessa rinnankorkeusläpimittaluokassa on esitetty kuvassa 3. Se vaihteli leimikoissa 4 – 8 metriin. Männyn elävän latvuksen keskimääräinen alaraja vaihteli samoissa leimikoissa 8 – 18 metriin (kuva 4). Puiden koot vaikuttivat melko vähän korkeuksiin leimikon sisällä.



**Kuva 3.** Keskimääräinen männyn kuivaoksarajan korkeus TULP-leimikoissa.



**Kuva 4.** Keskimääräinen männyn elävän latvuksen alarajan korkeus TULP-leimikoissa.



**Kuva 5.** Mäntysahauskoepuiden mitatut ja Hynysen mallilla lasketut latvussuhteet.

Männyn elävän latvuksen alarajan ennustamiseksi yksittäisellä puulla kokeiltiin Hynysen latvussuhteen ennustemallia. Siinä latvussuhdetta estimoidaan puun rinnankorkeusläpimitan ja pituuden sekä metsikön pohjapinta-alan ja valtapituuden avulla. Tulokset laskettiin 129 sahauskoepuulle, joista oli mitattu tarkasti elävän latvuksen alaraja ja puun pituus. Malli antoi poikkeuksetta liian suuria latvussuhteen arvoja, ja koko aineistossa sen keskivirhe oli 47 % (kuva 5). Hynysen mallin laadinta-aineistona ovat pääasiassa VT-tyypin kasvatusmänniköt, joissa on tehty harvennus- ja lannoituskokeita. TULP-leimikot painottuvat MT-tyypeille ja huomattavasti järeämpiin ja iäkkäämpiin puustoihin, ja siksi ne eivät sopine mallin soveltamisalueelle.

Oksarajakorkeuksien mittaukset otantana koealoilta tai eteen sattuvista koepuista ennakkomittauksissa tai metsäsuunnittelussa ovat yksi mahdollisuus, jolla voidaan selvittää metsikön keskimääräinen taso ja vaihteluväli. Oksarajakorkeuksien esittäminen jakaumina voisi olla puujoukon kuvauksen kannalta tavoiteltavaa. Tähän mennessä ei kuitenkaan varsinaisia malleja ole laadittu, mutta Uusitalo on kokeillut tutkimuksessaan männyn kuivaoksarajan jakaumien estimointia kernel-tasoituksella (vrt. runkolukusarjat) käyttäen erilaisia tasoitusparametreja. Simulointien perusteella todettiin 10 – 20 koepuun olevan riittävä määrä jakauman muodostamiseksi. Uusitalon mukaan normaalijakauma ei kuvaa hyvin kuivaoksarajan jakautumista. Sama havaittiin tarkasteltaessa TULP-leimikoiden laatukoepuista mitattuja kuivaoksarajojen jakaumia läpimittaluokittain, jossa luokkaväli oli 3 – 5 cm.

Mittaukset koepuista lisäävät melkoisesti työmäärää, joten on luultavaa, että kovin suuriin koepuumääriin ei ole käytännössä mahdollisuuksia. Korkeuksien määrittäminen silmävaraisesti esimerkiksi keskipuista voi sen

sijaan olla mahdollista toteuttaa. Kiviluoma ja Uusitalo selvittivät männyn kuivaoksa- ja latvusrajan silmävaraisen arvioinnin tarkkuutta kahdessa kokeessa, joissa oli mukana 7 ja 10 arvioijaa Aureskoski Oy:n metsäosaston toimihenkilöistä. Molemmissa kokeissa oksarajoja systemaattisesti yliarvioitiin: kuivaoksarajan yliarvioinnit olivat 0,5 – 1,1 m ja latvusrajan yliarvioinnit 0,4 – 0,6 m. Mittaajakohtainen vaihtelu oli suurta. Toista koetta edeltänyt lyhyt koulutus vähensi merkittävästi varsinkin kuivaoksarajan arvioinnin systemaattista virhettä.

Puustotiedon hankinta hakkuukoneella-projektissa selvitettiin hakkuukoneiden ja kuljettajien mahdollisuuksia määrittää hakkuun yhteydessä mäntyrungoista oksarajakorkeudet. Tulokset osoittivat, että huolellisella työllä oksarajakorkeuksia voidaan tuottaa ja ne riittävät varsinkin leimikon keskimääräisen tason määrittämiseksi. Arvot hajosivat kuitenkin melko paljon. Ajatuksena on, että runkopankin kaltaiseen tietovarastoon voidaan tallentaa leimikoista otantana oksarajakorkeuksia, joita voitaisiin käyttää tyyppileimikkoluokitteluissa sekä uuden leimikon keskimääräisten oksarajakorkeuksien ja jakaumien ennustamisessa. Tavoitteena on niistä johtamalla saada kullekin laskettavana olevalle puujoukon rungolle oksarajakorkeuksien ja latvussuhteen estimaatit.

### **7.3.3 Laatujaakaumat ja katkonnan simulointi**

Leimikon puuston tuotelaatujen määrä arvioidaan ja puutavaralajien laadun mukaiset jakaumat muodostetaan siten, että runkojen katkontaa simuloidaan ottaen huomioon oksarajakorkeuksien mukaan määritetyt laatuosuudet puujoukossa rungoittain. Laatuosuuksia ovat oksaton, kuivaoksainen ja terveoksainen rungonosuus. Simuloinnissa voidaan käyttää muuten haluttuja pölkyjen tavoiteläpimittoja ja -pituuksia. Muita käytännön katkontaan vaikuttavia vikaisuuksia, kuten mutkia ja lenkoutta, ei voida ottaa millään ennustemalleilla huomioon puujoukkoa muodostettaessa. Kokemusperäisen arvion mukaan ne voidaan kuitenkin satunnaistekijöinä sisällyttää puujoukon rungoille.

Tyvilahon esiintymistä kuusella lienee helpompi ennustaa leimikon maantieteellisen sijainnin, kasvupaikkatyypin, iän ja aiempien käsittelyjen mukaan. Tyvilahon määrää kuvaavia malleja ei tässä tutkimuksessa selvitetty. Tavoitteena on saada runkopankin kaltaiseen laajaan tietovarastoon kootuksi ajan myötä hakkuuaineistoja niin paljon, että tyvilahon esiintymisen todennäköisyyttäkin voitaisiin ennustaa. Alueittain laho on joka tapauksessa niin merkittävä apteraukseen ja tukkisaantoon vaikuttava tekijä, että sitä ei voida jättää huomiotta. Tarkemmat ennustemallit voitaneen korvata katkonnan simuloinneissa karkeasti arvioiduilla todennäköisyyksillä lahon määrästä.

Simuloinneissa katkontaa ohjataan määrittämällä erilaatuisille ja -mittaisille pölkyille niiden käyttöä vastaavat jalostusarvot arvomatriisiin. Simulointiohjelmassa on oltava ominaisuus, jolla rungonosan laatu kullakin



korkeudella on tiedossa. Arvot määritetään niiden tuotantolaitosten mukaan, joiden raaka-aineeksi leimikon puusto on ohjattu. Antamalla korkeampia arvoja halutunlaatuksille ja -mittaisille pölkyille, voidaan katkontaa ohjata simuloinnissa kohti tavoitejakaumaa ja siten tarkastella, onko leimikosta saatavissa riittävästi tavoitteiden mukaisia pölkyjä kokonaistuloksen silti muuttumatta epäedulliseksi tai kokonaistoimitustavoitteisiin sopimattomaksi. Tässä tutkimuksessa kuvatuista katkontan simulointia laatuosuuksien mukaan ei tehty, vaan sen kehittäminen jätettiin tehtäväksi Runkopankki-prototyyppi-hankkeessa. Siinä tavoitteena on mm. puustojen oksarajakorkeuksien ennustaminen tietovarastoon vietyjen, hakkuissa tallennettujen oksarajamerkintöjen pohjalta.

## **8 ENNAKKOMITTAUSMENETELMÄT**

### **8.1 Yleiskuvaukset menetelmistä ja sovelluksista**

Leimikon suunnittelun yhteydessä käytettäviä puuston mittausmenetelmiä kutsutaan joko ennakko- tai suunnittelumittaukseksi. Ensimmäiset selvitykset menetelmien käytöstä tehtiin Metsätehossa 1990-92. Sen jälkeen niitä on tutkittu mm. Uusitalon väitöskirjatyössä sekä useissa opinnäytetöissä. Myös yrityskohtaisia selvityksiä on tehty ja menetelmien käyttöä kokeiltu useissa puunhankintaorganisaatioissa. Markkinoilla on ollut kolme järjestelmätuotetta: Sunit Oy:n suunnittelumittaus sekä Suomen Metsätieto Oy:n Leima ja Mini-Leima. Lisäksi Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksella on kehitetty EMO-ohjelmistoa, joka ei ole vielä toistaiseksi kaupallinen tuote.

Menetelmien pääasialliset erot ovat käytettävät koealatyypit, koealojen otantatavat sekä tarvittava maastovarustus. Koealat voivat olla kiinteäläisiä ympyräkoealoja, relaskooppikoealoja tai kiinteään koepuumäärään perustuvia vaihtuva-alaisia koealoja (n lähintä puuta mitataan). Esimerkiksi Mini-Leimassa käytetään pohjapinta-alan määrittämiseksi relaskooppikoealoja, mutta koepuut voidaan mitata myös lähimpien puiden periaatteella. Otannassa ei ole käytetty kiinteitä linja- ja koealavälejä, vaan koealojen sijoittelu on ollut menetelmissä yksinomaan vapaavalintaista. Menettely on ymmärrettävää sen yksinkertaisemman toteutettavuuden ja nopeamman mittauksen vuoksi. Subjektiivinen koealavalinta voi kuitenkin johtaa siihen, että leimikon eri osista ja puustoista ei saada mittaustietoja niiden osuuksien mukaisesti. Puustoltaan vaihtelevissa kohteissa tuloksiin voidaan vaikuttaa osittamalla kohde pienempiin ja yhtenäisempiin alueisiin ja tekemällä niille omat mittaukset.

Ennakkomittausmenetelmät eivät ole vakiintuneet käytäntöön ennen kaikkea siksi, että selvityksissä saatujen tulosten perusteella menetelmien antamat tulokset eivät ole olleet riittävän tarkkoja ja hajonta on ollut suurta. Vaikka



kokonaistilavuuskin olisi siedettävän tarkka, ovat puutavaralajeittaiset arviot voineet olla liian epätarkkoja. Selvityksissä kokonaistilavuuksien yliarvio on ollut keskimäärin 0 – 20 %.

Mittauksiin tarvittava aika on ollut menetelmästä ja kohteesta riippuen 15 min – 2 h/leimikko, joten mittaukset vievät usein liikaa aikaa etenkin kiireisinä kausina. Erillisen tiedonkeruulaitteen käyttö mittasaksien lisäksi ei myöskään ole innostanut ottamaan menetelmiä käyttöön. Eräät ohjelmista on toteutettu ohjelmitaviin mittasaksiin, mikä vähentää tarvittavaa maastovarustusta. Tämän hetkisistä menetelmistä Mini-Leiman tiedonkeruu ja mittaukset tehdään niin kevyellä maastovarustuksella, että sitä on enää vaikea kuvitella vähäisemmäksi.

Menetelmien tulosten tarkkuuteen ja luotettavuuteen vaikuttavat koeala- ja koepuuotantojen edustavuus leimikon eri osien kuvauksessa, mittaustietojen perusteella tehtävät puustotunnusten muodostamiset, ohjelmissa käytettävät runkojen pölkytykset sekä mittaustietojen yleistäminen koko leimikkoon pinta-alan perusteella. Pölkytyksessä voidaan määritellä runkolajeittain eri puutavaralajien sallitut dimensiot. Erilaisia ohjaustiedostoja voidaan määrittellä erityyppisille puustoille, hakkuutavoille ja vaikkapa eri hakkuukoneille. Hakkuun tuloksiin perustuva vertailutieto auttaa säätämään pölkytyksessä käytettäviä arvoja vastaamaan paremmin todellisuutta.

Yksittäisistä tekijöistä pinta-ala vaikuttaa paljon kokonaistuloksen tarkkuuteen. Leimikoiden pinta-alatiedot ovat usein karttapiirrosten mukaan tehtyjä arvioita tai metsäsuunnitelmista peräisin olevia kuviodien pinta-aloja. Jos hakkuukuviot poikkeavat niistä, ei pinta-alankaan määrittäminen ole enää tarkkaa. Uusissa puunhankinnan tietojärjestelmissä leimikoiden ja lohkojen rajat muodostetaan paikkatietosovelluksella, jolloin pinta-ala saadaan lasketuksi automaattisesti. Rajojen sijoittaminen tietokoneen ruudulla sen sijaan voi olla epätarkkaa. Pinta-alan mittausta maastossa ei käytännössä tehdä lainkaan sen vaatiman ajan vuoksi. Tarkkaa pinta-alatietoa ei myöskään välttämättä tarvita korjuun suunnittelussa mihinkään.

## 8.2 Tutkimuksessa käytetyt menetelmät

Tässä tutkimuksessa mitattiin tutkimusleimikot seuraavasti:

Sunit Oy:n suunnittelumittaus	10 leimikkoa
Leima	12 leimikkoa
Mini-Leima	8 leimikkoa

Mittaukset teki Metsätehon työntutkija kertaalleen, joten vertailua eri henkilöiden tai eri mittauskertojen välillä ei voida tehdä. Joka kohteella ei myöskään ollut käytettävissä kaikkia menetelmiä, eikä koealoja mitattu kaikkia menetelmiä varten samasta paikasta. Ympyräkoaloja käytävissä menetel-

missä koealoja mitattiin pääsääntöisesti 10 kpl/leimikko. Tuloksissa ei ole pinta-aloista johtuvaa virhettä, sikäli kun maastossa suuntiin ja etäisyyksiin perustuvaa pinta-alan mittaustulosta voidaan pitää luotettavimpana arviona.

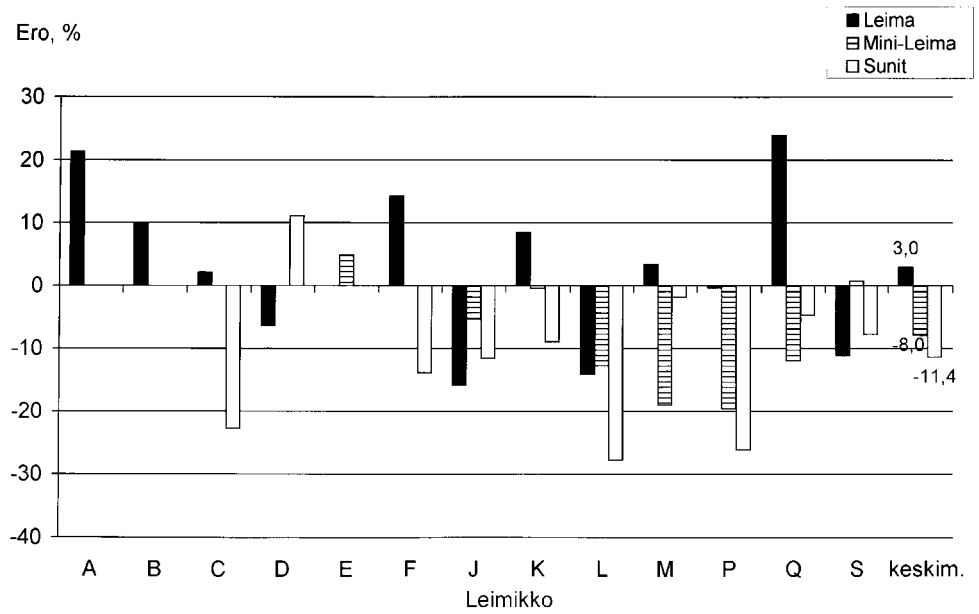
### 8.3 Menetelmien tarkkuudet tutkimusaineistossa

Ennakkomittausmenetelmien tuloksista kokonaistilavuuden ja pääpuutavarylajin (kuusi- tai mäntytukki) tilavuuksien prosentuaaliset erot on esitetty kuvassa 6. Menetelmittain keskimääräinen kokonaistilavuuden ero oli -11,4 – +3,0 % ja keskihajonta 9 – 13 %. Pääpuutavarylajissa keskiarvo oli -8,7 – +6,6 % ja keskihajonta 33 – 38 %, jota voidaan pitää suurena. Pääpuutavarylajin tilavuusero vaihteli koeleimikoissa välillä -55 – +64 %. Puutavarylajeittain tilavuudella painotetut tilavuuseroprosentit koko aineistossa olivat menetelmittain seuraavat:

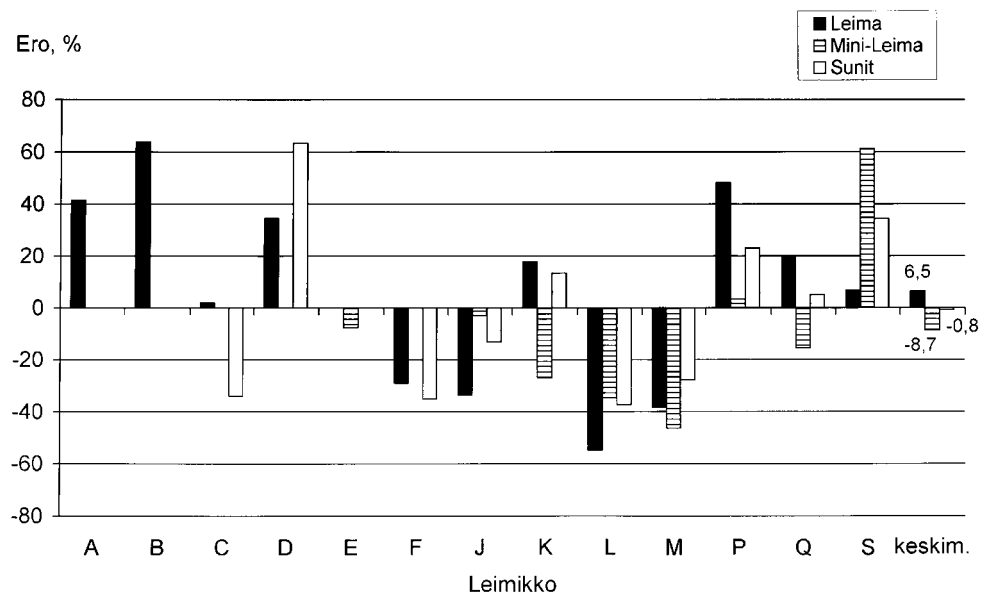
TAULUKKO 2. Ennakkomittausmenetelmien tilavuudella painotetut puutavarylajeittaiset tilavuuserot (%) mitattuun verrattuna koko aineistossa.

	MÄT	MÄK	KUT	KUK
Leima	21,8	0,0	3,9	- 14,4
Mini-Leima	-11,9	- 0,2	- 30,8	76,8
Sunit	7,6	- 47,0	- 18,1	- 6,5

Puutavarylajikohtaiset hajonnat ja vaihteluvälit huomioiden mitään kolmesta menetelmästä ei voitane pitää muita parempana. Aiemmissä selvityksissä on saatu lähes poikkeuksetta tilavuuksien yliarviota, jonka on arveltu johtuvan pääosin virheellisestä pinta-alasta. Tässä tutkimuksessa pinta-alavirhettä ei ole, ja ilmeisesti sen vuoksi tilavuuksissakaan ei ole systemaattista yliarviota. Puulajien väliset tilavuuserot johtuvat otannasta ja vaihtelevat jonkin verran kohteittain.

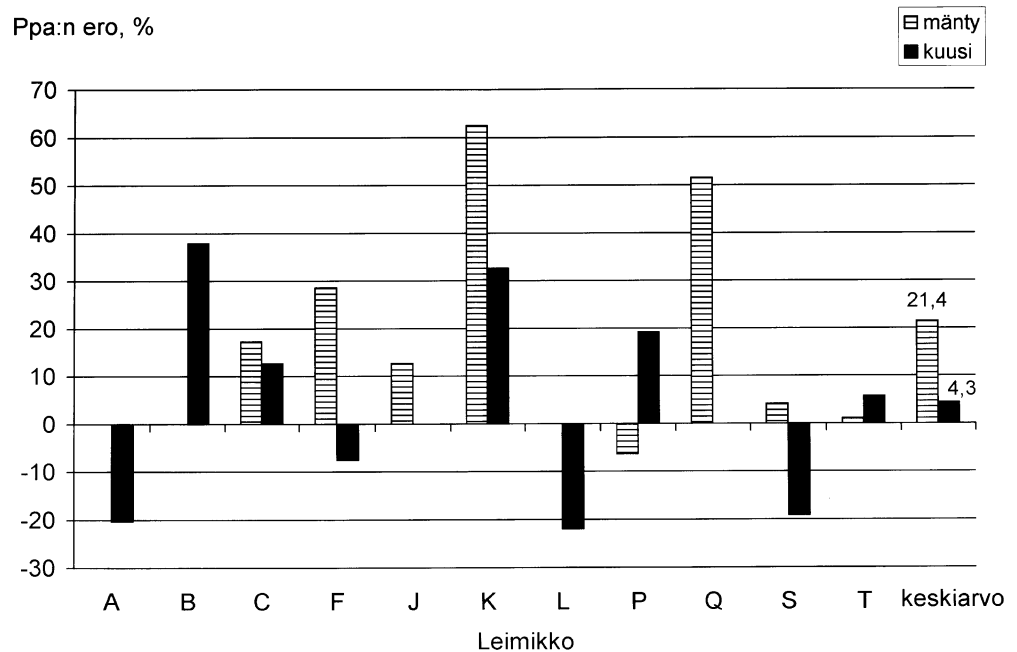


**Kuva 6a.** Kokonaistilavuuden erot ennakkomittausmenetelmillä.



**Kuva 6b.** Pääpuutavaralajin tilavuuserot ennakkomittausmenetelmillä.

Runkolukusarjan muodostaminen on yksi tärkeimmistä syistä tulosten tilavuuseroissa. Esimerkkinä laskettiin Leimalla tuotettujen pohjapinta-alan läpimittajakaumien erot lukupuista laskettuihin jakaumiin leimikoittain ja puulajeittain (kuva 7). Laskennasta on jätetty pois tapaukset, joissa jonkin puulajin osuus koko leimikon puustosta on vähäinen. Männyllä pohjapinta-alan erot olivat keskimäärin 21,4 % ja kuusella 4,3 %. Luvut vastaavat puulajeittaisia tilavuuseroja Leimalla mitatuissa leimikoissa.



**Kuva 7.** Leima-menetelmällä muodostettujen pohjapinta-alan läpimittajakaumien erot todellisiin jakaumiin tutkimusleimikoissa.

## 8.4 Ajanmenekki ja kustannukset

Ennakkomittausmenetelmien ajanmenekki jakaantuu seuraaviin työvaiheisiin:

- leimikkoon tutustuminen ja osittaminen mittausalueisiin
- koealojen paikkojen valinta ja siirtymiset
- koealojen ja koepuiden mittaukset
- kohteen pinta-alan mittaus
- tulosten laskenta ja tiedonsiirto.

Tässä tutkimuksessa ei ajanmenekkiä erityisesti mitattu, koska mittaajia oli vain yksi. Aiemmissä selvityksissä eri osatehtäviin on arvioitu kuluvan aikaa kohteesta, mittaajasta ja menetelmästä riippuen seuraavasti:

### TAULUKKO 3. Ennakkomittausmenetelmien ajanmenekki.

Leimikkoon tutustuminen ja osittaminen	5 – 45 min
Siirtymiset ja mittaukset	15 – 90 min
Pinta-alan mittaus	30 – 90 min
Tulosten laskenta ja tiedonsiirto	5 – 15 min

Vähimmillään kohteen mittauksiin menee aikaa n. 15 min ja enimmillään ilman pinta-alan mittausta n. 2 h. Potentiaalisia ennakkomittauskohteita ovat päätehakuuleimikot ja sellaiset harvennusleimikot, joista tukkipuuta on hakattavissa. Mikäli mittauksen tekevät ostosta tai korjuusta vastaavat toimihenkilöt, mittaukset kannattaa tehdä välttämättömien työmaakäyntien yhteydessä matkakustannusten vähentämiseksi. Useiden lähekkäisten kohteiden mittauksia voidaan myös yhdistää töiden järjestämiseksi mielekkäästi. Arvioidun ajanmenekin ja toimihenkilökustannusten mukaan laskettuna ennakkomittauskustannukset ilman pinta-alamittauksia ovat 0,3 – 0,8 mk/m<sup>3</sup>. Pinta-alamittaukset kaksinkertaistavat kustannukset.

## 8.5 Ennakkomittausmenetelmien kehittämistarpeet

### 8.5.1 Mittausten tietosisältö

Ennakkomittausmenetelmillä voidaan saada mittauksiin perustuvaa tietoa leimikon puustosta joko yksinomaiseksi ennakkotiedoksi tai lähtötiedoksi muulla tavoin tehtävää puustotietojen muodostamista varten. Keskeisten puustotunnusten ja niistä laskettujen tilavuuksien ja laatujaumien tarkkoihin tuloksiin voidaan päästä siten, että tutustutaan kohteeseen huolellisesti, suunnitellaan mittaukset ja tehdään työ tarkasti. Mittauksiin on siis myös käytettävä aikaa. Jos käytettävissä on vain vähän aikaa, silloin voidaan joitakin perustunnuksia ja tehdä silmävaraisia arvioita. Luotettaviin tuloksiin pääsemiseksi puuston tulisi silloinkin olla keskeisiltä tunnuksiltaan yhtenäistä.

Maastossa mitattavien tunnusten määrä on sovitettava tietotarpeiden ja mittausmenetelmän halutun vaativuustason mukaan. Silloin kysymys on lähinnä siitä, miten puuston laatuominaisuudet mitataan. Koepuut voidaan mittauksissa laaduttaa tai esimerkiksi männyn laatu tyvet käsitellä omana runkolajinaan. Runkojen laatuosuuksien pituuksien määrittäminen on kuitenkin varsin hidasta. Laatua kuvaavia tunnuksia, esimerkiksi oksarajakorkeuksia ja rungossa esiintyviä vikoja, voidaan myös rekisteröidä. Oksarajakorkeuksista voidaan saada metsiköittäinen tai koelaitteellinen keskimääräinen taso ja vaihteluväli selville. Puukohtaisten ennusteiden teko runkolukusarjan kaikenkokoisille puille tai muodostettavalle puujoukolle on sen sijaan hyvin epävarmaa, sillä esimerkiksi kuivaoksa korkeus ei korreloi riittävästi minkään muun mitattavan tunnuksen kanssa. Nykyisin käytössä olevissa ennakkomittausmenetelmissä on melko hyvin vaihtoehtoja laatuominaisuuksien mittaukseen.

### 8.5.2 Runkolukusarjojen muodostaminen

Runkolukusarjojen muodostamista ennakkomittausmenetelmissä olisi syytä kehittää. Sillä, että tasoitetut jakaumat muodostetaan aiemmin esitetyillä vaihtoehtoisilla tavoilla (parametriset mallit tai kernel-tasointu), on saavutettavissa läpimittajakaumaennusteita, joissa yksittäisten koepuiden vaikutus ei ole niin suuri. Vaikutus ennusteisiin korostuu silloin, kun koepuita on suhteellisen vähän. Läpimittatieto mitataan aina mittasaksilla, jolloin läpimitat saadaan 1 mm:n tarkkuudella. Siksi ei laskennassa ja tulosteissakaan ole järkevää käsitellä läpimittoja ainakaan 2 cm:ä suurempina luokkina, kuten esim. Mini-Leiman tulostuksessa on tehty.

### 8.5.3 Pinta-alan määrittäminen

Pinta-alan riittävän tarkka määrittäminen on ehdoton edellytys, jotta saadaan luotettavia tuloksia. Leimikon pinta-alan määrittämismenetelmiä ovat

- metsäsuunnittelutiedoista saadut kuvioiden pinta-alat ja niiden korjaus leimikoiden rajojen mukaan karttojen ja ilmakuvien avulla
- leimikoiden rajaukset kuvaruudulla puunhankinnan suunnittelujärjestelmien paikkatietosovelluksissa
- GPS-mittaukset maastossa ja tietojen siirto sovelluksiin
- suuntiin ja etäisyyksiin perustuva murtoviivamittaus.

Ongelmana toistaiseksi yleisimmässä pinta-alan määrittämismenetelmässä eli kuviotietojen käytössä on se, että hakkuukuviot poikkeavat varsin usein suunnittelukuvioista. Tällöin pinta-aloja ei aina muisteta tai vaivauduta korjaamaan suunniteltua leimikkoa vastaaviksi. Karttojen erilaiset mittakaavat vielä vaikeuttavat määrittäystä. Puunhankintaorganisaatioissa on otettu viime aikoina käyttöön paikkatietopohjaisia korjuun ja kuljetuksen suunnittelu- ja ohjausjärjestelmiä, joita voidaan käyttää apuna mm. työmaakarttojen teossa ja pinta-alojen automaattisessa laskennassa. Ostosta tai korjuusta vastaava henkilö digitoi tai piirtää kuvaruudulla leimikon ja lohkojen rajat käytettävissä olevan tiedon perusteella. Tieto voi kuitenkin olla riittämätöntä tai rajoja on vaikea muodostaa, mikäli taustamateriaalina ovat pelkästään perus- tai GT-kartta ja numeeriset kiinteistörajat. Ajantasaiset ilma- tai satelliittikuvat auttaisivat huomattavasti paremmin hahmottamaan kohteen rajat.

GPS:n käyttöä pinta-alamäärittämisessä metsässä on selvitetty melko paljon mm. Suomessa, Ruotsissa ja Kanadassa, ja tulokset ovat olleet varsin hyviä. Murtoviivamittaukseen verrattuna päästään vähintään yhtä hyvään tarkkuuteen. Alueen rajat ja pistetiedot saadaan numeerisessa muodossa siirrettäviksi suoraan tietokantoihin tai käyttösovelluksiin, jolloin niitä voidaan helposti korjata ja tehdä varsinainen pinta-alan laskenta. Toistaiseksi hankaluutena on ollut raskas ja melko kallis laitteisto, jonka tehokkaalle käytölle ei ole ollut vielä riittäviä toimintamalleja. Maastomikrolle tai mittasaksiin integroitua GPS-kortteja ei ole ollut käytössä. GPS-mittaus on lisäksi aikaa vievää, sillä pinta-alan saamiseksi kohde on kierrettävä rajoja myöten tai ainakin kulma-

pisteissä käyden. Kevyellä varustuksella GPS voisi kuitenkin olla varsin toimiva menetelmä pinta-alan määrittämiseksi varsinkin silloin, kun leimikon rajat joka tapauksessa kierretään tarkastamassa ja merkitsemässä.

#### **8.5.4 Puujoukon ja STM-tiedostojen muodostaminen**

Ennakkomittausmenetelmien käytettävyys lisääntyisi, jos niistä olisi muodostettavissa puujoukkoja, esim. hakkuukoneen tiedonsiirtostandardin mukaisia valmiita STM-tiedostoja, kuten Suomen Metsätiedon uusimmassa ohjelmistoversiossa jo on. Niitä voitaisiin silloin käyttää hakkuukone-simulaattoreissa apterauksen ohjaustiedostojen määrittämiseksi. Puujoukkojen muodostamisessa puutunnuksiin olisi sisällytettävä ainakin pituuden ja laatu-tunnusten satunnaisvaihtelua.

#### **8.5.5 Ennakkomittaukset ja puustotietovarastot**

Yksi tapa tarkentaa ennakkomittaustietoja voivat olla puustotietovarastot, jotka saadaan toteutuneiden hakkuiden runkokohtaisista mittauksista. Tällöin kevyillä mittauksilla saatuja puustotunnuksia ja leimikkoa kuvaavia tietoja hyväksi käyttäen voidaan kohde sijoittaa sitä lähinnä vastaavaan tyyppileimikkoryhmään. Ryhmittelyssä tarvittavia tietoja ovat esimerkiksi puulajeittainen pohjapinta-ala, keski- ja minimiläpimitta, keskipituus, kasvupaikkatyyppi, hakkuutapa ja kohteen sijaintitiedot (kappale 10).

## **9 METSÄSUUNNITTELUTIEDOT ENNAKKOTIETOLÄHTEENÄ**

### **9.1 Solmu-metsäsuunnittelun puustotietojen kuvaus ja puustotunnusten laskenta**

Solmu-suunnittelussa puustotiedot voidaan kuvata puustojaksojen ja puulajien mukaisina ositteina. Tämä mahdollistaa tarkemman keskitunnusten määrittämisen silloin, kun tunnuksot ovat selvästi erilaisia jaksojen ja puulajien välillä. Ositteilta määritetään puuston keski-ikä, pohjapinta-ala tai runkoluku, keskiläpimitta, keskipituus, puulajin osuus ja puulajin tukkiosuus. Määrittämisessä tarvittavat mittaukset tehdään relaskooppikoealoilta. Lisäksi määritetään kuvioittain muita laskennassa tarvittavia tunnuksia. Puusta ei mitata minkäänlaisia laatu kuvaavia tunnuksia, vaan laatu voidaan huomioida maastossa arvioitaessa puutavaralajeittaista hakkuukertymää ja puulajin tukkiosuutta.

Laskennassa muodostetaan tiedoista puujoukot MELA-simulaattorin syöttötiedostoiksi. Runkolukusarjat muodostetaan jokaisen ositteen jokaiselle puulajille Weibull-jakaumia käyttävien mallien avulla. Jakauma jaetaan 10 kuvauspuuksi, joille määritetään keskipituudet Veltheimin pituusmallilla, jota kalibroidaan mitatulla mediaanipuun pituudella. Lisäksi kuvauspuille

määritetään ikä. Hakkuukertymän laskennassa tukkiosuus määritetään PMP-pölkytysalgoritmeilla ja kuitupuuosuus lasketaan 7 cm:iin asti. Kuvauspuut päivitetään kasvunlaskentamalleilla ja hakkuukertymät lasketaan MELAlla haluttuun tai optimoituun hakkuuajankohtaan.

## 9.2. Tutkimusleimikoiden tulokset

Tutkimuksessa verrattiin 12 koeleimikolla puuston kokonaistilavuuksia, männyn ja kuusen tilavuuksia sekä pääpuutavaralajien (kuusi- tai mänty-tukki) tilavuuksia Solmun tulosten ja yhteenlaskettujen hakkuukone-mittauksen sekä pystyyn jätettyjen puiden tilavuuksien välillä. Yhdeksällä leimikolla käytettiin puidenluvusta saatuja oikeita keskiläpimittoja ja pohjapinta-aloja Solmun puujoukon muodostamisessa ja verrattiin siten saatuja tilavuuksia mitattuihin tilavuuksiin (taulukko 4). Kokonaistilavuuden ja pääpuutavaralajin tilavuuden erot laskettiin painottamattomina ja puulajeittaisia tilavuuseroja painotettiin leimikon mitatulla ko. puulajin tilavuudella.

TAULUKKO 4. Solmun puujoukkojen ja mitattujen tulosten välisten suhteellisten tilavuuserojen keskiarvot ja keskihajonnat tutkimusleimikoissa.

	Puujoukko suunnittelijan mittauksilla	Puujoukko puidenluvun mittauservoilla
Kokonaistilavuus		
Keskiarvo, %	-12,1	-0,4
Keskihajonta, %	15,7	5,7
Männyn tilavuus		
Keskiarvo, %	-4,1	-2,7
Keskihajonta, %	36,1	10,4
Kuusen tilavuus		
Keskiarvo, %	-17,1	0,6
Keskihajonta, %	20,7	4,2
Pääpuutavaralajin tilavuus		
Keskiarvo, %	-10,6	-4,2
Keskihajonta, %	31,8	19,3

Suunnittelijoiden mittaaman tai arvioiman keskiläpimitan ja pohjapinta-alan tarkkuutta verrattiin puidenluvusta saatuihin tuloksiin. Kuusen keskiläpimittaero oli koko aineistossa keskimäärin +0,1 cm. Läpimittaeron keskihajonta sen sijaan oli melko suuri, 2,6 cm. Männyllä keskiläpimittaero oli -0,8 cm ja keskihajonta 1,6 cm. Pohjapinta-alan keskimääräinen ero oli kuusella -4,0 m<sup>2</sup>/ha ja keskihajonta 4,5 m<sup>2</sup>/ha. Männyllä ero oli keskimäärin +0,2 m<sup>2</sup>/ha ja keskihajonta 3,0 m<sup>2</sup>/ha. Tutkimusleimikoissa aivan kaikki suunnittelijat eivät olleet määrittäneet keskiläpimittaa ja pohjapinta-alaa puulajeittain, vaan koko puustojaksolle yhteisenä. Vertailuissa tunnuksia oli tehtävä laskennallisiksi ilmoitettujen puulajiosuuksien mukaan. Suunnittelijakohtaiset erot tuloksissa eivät olleet suuria.



Kuusen tilavuuden aliarviot johtuvat pääasiassa pohjapinta-alan aliarvioista. Männyn pohjapinta-ala sen sijaan näyttäisi olevan helpommin mitattavissa oikein. Keskiläpimitan arvioinnissa oli kuusella yllättävän paljon hajontaa, vaikka keskiarvo onkin hyvin lähellä oikeaa. Puulajeittaisia tukkiosuuksia vertailtaessa ei käytetty suunnittelijan mahdollisesti maastossa määrittämää osuutta, vaan vertailut tehtiin laskennassa PMP-pölkkytysalgoritmilla muodostettujen tukkiosuuksien ja hakkuussa toteutuneiden osuuksien välillä. Männyn tukkiosuuden aliarvio oli puudenluvun mitta-arvojen mukaan muodostetuissa puujoukoissa keskimäärin -6,6 %-yksikköä, mikä osoittaa, että pölkkytysalgoritmi aliarvioi tukkiosuutta. Suunnittelijan määrittämällä arvoilla ero oli -8,7 %-yksikköä. Mukana on tällöin pohjapinta-alan virhe. Kuusella vastaavat luvut olivat -1,7 %-yksikköä ja -0,1 %-yksikköä eli mäntyä paremmat.

Vuonna 1995 selvitettiin kahdella leimikolla Pohjois-Karjalassa yhdeksän suunnittelijan puustomittausten tarkkuutta hakkuukonemittaukseen verrattuna. Leimikoiden kokonaistilavuuden erot olivat keskimäärin hyvin pienet: +3,5 ja -4,7 %. Erojen keskihajonnat olivat 5,3 ja 9,6 %. Pohjapinta-alan aliarvio kuusella ja koivulla tuli esille myös ko. selvityksessä. Tukkiisuus oli männyllä hyvin lähellä oikeaa, mutta kuusella sen sijaan n. 10 %-yksikköä liian suuri, mikä tasoitti pohjapinta-alan aliarviota kokonaistilavuudessa.

### **9.3 Metsäsuunnittelutietojen käyttömahdollisuudet leimikon ennakkotietona**

Tulokset osoittavat, että puujoukkojen muodostamisessa ei sinänsä ole puutteita, jos ositetieto on tarkasti inventoitu. Jäykkä pölkkytysalgoritmi ei kuitenkaan aina vastaa hakkuissa käytettäviä vaihtelevia mitta- ja laatuvaatimuksia eikä siten toteutunutta katkontaa. Laatuvaatimusten puuttuminen vähentää myös metsäsuunnittelutiedon käytettävyyttä ennakkotietona. Kasvumalleilla päivitetty alkuperäiset puusto-ositteiden mittaustiedot voivat olla käyttökelpoisempia kuin niistä johdetut tilavuudet ja hakkuukertymät. Runkolukusarjojen uudelleen muodostamisessa alkuperäinen tieto olisi tarpeellista, sillä valmiissa metsäsuunnitelmissa ne eivät enää ole mukana. Alkuperäisten inventointitietojen pitäminen suunnitelman mukana voisi olla mahdollista, jolloin ne olisivat kasvulla päivitettyinä leimikon suunnittelijan käytettävissä milloin tahansa.

Kun tarkastellaan tuotelähtöisyyden vaatimuksia, metsäsuunnittelutiedot eivät sinänsä ole riittäviä esimerkiksi katkontavaihtoehtojen tarkastelua varten. Kuviotietoina esitettäviä puujoukkojen muodostamisen ja pölkkytyksen mukaisia laskentatuloksia voidaan hyvin käyttää leimikon suunnittelun perustietoina ja hinnan määrittämisessäkin, mutta niistä ei voida enää uudestaan muodostaa puujoukkoja vaihtoehtoisia yrityksen käyttämiä pölkkytyksiä varten. Tutkimatta on myös vielä se, miten metsäsuunnittelun puuston kasvupaikkaa, tilavuuksia ja muulla tavoin puuston rakennetta kuvaavia tietoja voi-

daan käyttää, kun haetaan leimikon puustoa vastaavaa tyyppi-leimikkoluokkaa laajasta puustotietovarastosta tai määritetään puustoa tarkemmin kuvaavat tunnukset tietovaraston aineistoista.

## 9.4 Kehittämistavoitteet puunhankinnan näkökulmasta

Metsäkeskukset tuottavat 85 % yksityismetsien metsäsuunnitelmista. Tila-kohtaisia metsäsuunnitelmia on voimassa n. 155 000 kpl, ja niiden kattavuus on n. 55 % yksityismetsien pinta-alasta. Voimassa olevan aluesuunnittelun peittävyys on 76 %. Alueellista suunnittelua on rahoitettu tähän asti metsäkeskusten saamalla valtionavulla, jolloin tilasuunnitelmien hinta on ollut metsänomistajalle vain noin puolet todellisista kustannuksista. Tulevaisuuden uhkana on valtiontuen väheneminen tai loppuminen kokonaan, mikä nostanee suunnitelmien hintaa ja vaikuttanee suunnitelmatilauksia vähentävästi.

Metsäsuunnittelussa ollaan siirtymässä TASO-järjestelmästä uuteen Solmu-suunnittelujärjestelmään, joka on osa metsäkeskusten käyttöön tulevaa luonnonvaratietojärjestelmää (Luotsi). Siirtymäaika on varsin pitkä, ja vanhalla järjestelmällä tuotettuja suunnitelmia on käytössä vielä vajaat 10 vuotta. Solmussa tavoitteena on laatia sisällöltään ja ulkoasultaan aiempaa yksilöllisempiä metsäsuunnitelmia, jotka vastaisivat paremmin metsänomistajan tavoitteita. Puuston kuvauksen lisäksi metsän monimuotoisuuden ja erikoispiirteiden kuvaamiseksi on lisätty runsaasti vaihtoehtoja. Solmussa on mahdollista tuottaa päivitettyjä tilakohtaisia suunnitelmia myös suunnittelukierron aikana inventointitietoja kasvumalleilla päivittäen. Kattavaan ajantasaistukseen ei kuitenkaan käytännössä ole mahdollisuuksia.

Puunhankinnan näkökulmasta hyvin tehty, ajantasainen ja tietosisällöltään yksityiskohtainen metsäsuunnittelutieto voisi olla ihanteellinen tietolähde. Koska toimenpidekuviot eivät aina vastaa suunnittelun kuvioita, tulisi suunnittelukuvioiden olla tärkeimmissä puustotunnuksissa mahdollisimman yhtenäisiä. Puustotietojen tietosisällön osalta toivottavia parannuksia olisivat erilaiset laatua kuvaavat tunnukset, joiden inventointi voisi kohdistua vain suunnitelmakaudella hakkuuehdotuksen sisältäviin kuvioihin. Laatuominaisuuksista tärkeimmät ovat sekä männyn kuivaokсарajan korkeus, joka voitaisiin esittää ositteen puiden keskiarvona ja vaihteluvälinä, että elävän latvuksen alarajan korkeus samalla tavoin esitettynä. Muita laatutietoja voivat olla erilaiset lahon esiintymistä ja runkovikoja koskevat tiedot.

Suunnitelmatietojen käytettävyyteen ja tietosuojaan liittyy paljon kysymyksiä ja kehittämistavoitteita. Lienee selvää, että tiedot eivät voi olla täysin vapaasti kenen tahansa saatavissa. Sen sijaan silloin, kun niitä käytetään leimikoiden myynnissä informaationa tarjottavasta puustosta ja sopimuksen-teen jälkeen toimenpiteiden suunnittelussa, tulisi käyttäjien saada tiedot joustavasti standardimuodossa. Yksinkertaisimmillaan sekä kuvioiden rajat että kuviotiedot voisivat olla levykkeellä suunnitelman mukana. Tietojen ylläpidon ja ajantasaisuusvaatimuksen vuoksi luontevinta olisi, että ne sijaitsisivat palvelimella, johon myönnettäisiin käyttöoikeuksia mm. puunhankinta-

yriyksille. Maanomistaja voisi antaa yksittäistä tilaa koskevat luvat tietojen luovuttamiseen. Kehitettäessä leimikkopörssin kaltaista puukaupan informaatiopalvelua olisi jo alusta alkaen pyrittävä siihen, että metsäsuunnittelutiedot sisältyisivät ko. palveluun.

## **10 PUUSTOTIETOVARASTOT LEIMIKON PUUSTOTIETOJEN MÄÄRITTÄMISESSÄ**

### **10.1 Mittausaineistoista puustotietovarastoiksi**

Puustotietovarastolla tarkoitetaan tässä erilaisia metsän tai valmiin puutavaran mittausaineistoja, joista voidaan muodostaa yhtenäisessä muodossa oleva tietovarasto, esimerkiksi tietokanta. Käytettäessä aineistoja leimikon puustotietojen ennustamiseen, muodostetaan puujoukko tai puustoa kuvaavat tunnukset tietovaraston vastaavanlaisten kohteiden ja puustojen tiedoista erilaisilla menetelmillä. Ennustettavasta kohteesta on oltava jonkintasoista tietoa, jota käytetään menetelmissä valintaperusteena tai selittävinä muuttujina. Puustotietovarastojen aineistoja voivat olla:

- hakkuukoneiden tuottamat mittaustiedot
- tehdasvastaanoton mittaustiedot
- muut valmiin puutavaran mittaustiedot (metsurimittaus ym.)
- koesahausaineistot
- PMP-aineistot
- VMI-koepuutiedot
- erilaiset tutkimusaineistot.

Sekä tässä tutkimuksessa että Metsätehon Puustotiedon hankinta hakkuukoneella -projektissa on selvitetty runkopankiksi nimetyn tietovaraston muodostamis- ja käyttömahdollisuuksia pääasiassa hakkuukoneiden tuottamista mittaustiedoista. Esitutkimuksen tulokset on raportoitu erillisessä julkaisussa (Metsätehon raportti 44), ja siksi ne esitetään tässä vain suppeasti.

Sahojen tukkimittaritiedon ja leimikoiden kauppakirjatiedon käyttöä puustotietojen ennustamisessa on selvitetty Joensuun yliopistossa tehdyssä tutkimuksessa. Mallissa käytetyllä k-lähimmän naapurin menetelmällä leimikon tukkiosuudet arvioitiin hiukan suunnittelumittauksia heikommin. Mallia käytettiin myös männyn ja kuusen läpimittajakauman, kuusen pituusjakauman ja männyn laatujaakauman ennustamiseen.

Koesahausaineistoja tai muita puun sisäisten laatuominaisuuksien aineistoja ei ole kovin paljon, ja ne ovat runko- tai tukkimääriltään melko pieniä ja yleensä melko paikallisesti hankittuja. Suurin ongelma aineistoissa lienee se, että koesahauksissa syntyneitä pintoja ja kappaleita ei ole kuvattu tavalla, joka mahdollistaisi jälkepäin erilaiset vaihtoehdotiset laatuoluokitukset. Esi-

merkiksi yksittäisten oksien sijaintia, kokoa ja laatua ei ole mitattu ja rekisteröity. Sen sijaan sahauspinnat on yleensä luokitettu sellaista laatuluokitusta käyttäen, joka on ollut tutkimuksen kannalta tarkoituksenmukaisin. Myös vähäiset puun ulkoisia ominaisuuksia sekä kasvupaikkaa ja ympäröivää puustoa kuvaavat tunnukset voivat olla aineistoissa puutteena. Puustotietovarastoja ajatellen on todennäköisesti lähes mahdotonta koota ja yhtenäistää erilaisia koesahausaineistoja. Puiden sisäiset ominaisuudet ovat kuitenkin tuotannonohjauksen kannalta niin tärkeitä, että niiden ennustamisella leimikkotasolla on merkitystä. Tavoitteena onkin, että kehitettävänä olevaan runkopankkiin voitaisiin sisällyttää myös puiden sisäistä laatua kuvaavia aineistoja ja menetelmiä laadun ennustamiseksi sahauksen, sorvauksen ja mekaanisen kuidutuksen vaatimusten mukaan.

PMP-leimikoiden luku- ja koepuutietoja on olemassa n. 2 400 kohteelta 1980-luvun loppupuolelta 1990-luvun alkuun, jolloin pystymittaus loppui. Niitä on tarkoitus käyttää osana runkopankin tietovarastoa, mikäli niiden käyttöarvo puustotietojen ennustustarkkuuden lisäämisessä osoittautuu riittäväksi. VMI-koepuuaineisto on mittava valtakunnallinen tietovarasto, ja se on laajempia aluetason tarkasteluja varten riittävä ja otannallisesti kestävällä pohjalla. Aineiston hinnoitteluperusteet kuitenkin vaikeuttavat sen käyttöä Metlan ulkopuolisissa hankkeissa. VMI-koepuutietoja on käytetty mm. alueellisissa puuston laatuominaisuuksien ja apteerausvaihtoehtojen tarkasteluissa. Metlassa tehdyssä tutkimuksessa koepuutietoja on käytetty mm. silloin, kun puiden tilavuuksia ja pituuksia on ennustettu k-lähimmän naapurin menetelmän avulla.

## **10.2 Runkopankin toiminnallinen ja aineistojen kuvaus**

Runkopankki on hakkuukoneiden mittaustiedoista muodostettu tietovarasto, johon kootaan normaalin hakkuutoiminnan yhteydessä syntyvää runkokohtaista mittaustietoa (STM), leimikoiden hakkuun yhteenvetotietoja (PRD) ja kohteiden yleistietoa. Myös muut aineistot ovat mahdollisia. Runkopankkeja voi olla paikallistason puunhankinnan ohjaukseen tarkoitettua yrityskohtaisesta puustotietovarastosta laajaan valtakunnalliseen tietovarastoon, jolla voidaan tehdä aluetason tarkasteluja ja erikoisselvityksiä. Runkopankin tietosisältö voi myös olla tasoltaan vaihteleva. Tietoaineistojen lisäksi runkopankkiin kuuluvat olennaisesti myös tiedonhallinta- ja analysointimenetelmät sekä sovellukset, jotta tietoja voidaan käyttää eri tarpeita varten. Leimikon puustotietojen ennustaminen, apterauksen ohjausparametrien määrittäminen ja simulointi ovat olleet runkopankin kehittämisessä ensisijaisia käyttöalueita.

Hakkuukohteen yleistiedot sijainnista, kasvupaikkaolosuhteista, puustosta, hakkuusta ja metsikön historiasta ovat perustietoa, jota tarvitaan kohteiden ja puiden luokittelussa ja analysoinnissa. Tiedot hankitaan kohteella tehdyin maastohavainnoin ja tarvittaessa yksinkertaisin mittauksin. Osa tiedoista on oston yhteydessä kirjattavaa kauppakirjatietoa.

Yksittäisestä rungosta saadaan hakkuukoneiden mittaustietona läpimittoja, joista voidaan muodostaa rungon muotoa kuvaava runkokäyräyhtälö. Rungoista voidaan tallentaa sekä alkuperäinen pölkytystieto, joka on sidoksissa leimikolla käytettyyn apterauksen ohjauksen APT-tiedostoon, että simuloidun apterauksen mukainen pölkkytieto. Hakkuun yhteydessä rungoista voidaan otantana tallentaa oksarajojen korkeustietoa.

### 10.3 Leimikon puustotietojen määrittäminen

Tavoitteena on, että runkopankista voidaan hakea leimikon perustietojen (sijainti, kasvupaikkatyyppi, pääpuulaji, hakkuutapa tai kehitysluokka jne.) perusteella vastinleimikoita, jotka toleranssien puitteissa täyttävät annetut kriteerit. Perustietojen lisäksi valinnassa voidaan käyttää mittauksilla saatuja tietoja kohteen puuston määrästä ja rakenteesta, esim. pohjapinta-ala, pituus, puustomääräarviot ja puulajiosuudet. Valitut vastinleimikot saavat erilaisia painotuksia sen mukaan, kuinka hyvin ne vastaavat annettuja kriteerejä. Leimikon tukkiosuuden, puutavaralajeittaisten tilavuuksien, pituus-, läpimita- ja laatujaumien tai muiden haluttujen tunnusten estimaatit voidaan johtaa vastinleimikoiden vastaavista tunnuksista. Estimaatit voidaan johtaa myös muodostamalla vastinleimikoista puujoukkoja, joiden apterausta simuloidaan erilaisilla APT-tiedostoilla. Puujoukko voidaan muodostaa myös valitsemalla vastinpuita, jolloin leimikon runkolukusarja ja pituustiedot voivat olla todellisiin mittauksiin perustuvia. Tällöin haetaan runkopankista vain runkomuototiedot ja mahdolliset laatu tiedot.

Kun erilaisten ominaisuuksien perusteella luokitellaan runkopankin leimikoita ja puita ja haetaan ennustettavaa leimikkoa vastaavia kohteita, voidaan käyttää neuraalilaskentaa ja neuroverkkotekniikoita. Niistä SOM-tekniikka (Self-Organizing Maps = itseorganisoivat kartat) on erityisen mielenkiintoinen. Muita menetelmiä ovat erilaiset sumean logiikan sovellutukset, klusterointialgoritmit ja ei-parametriset lähimmän naapurin menetelmät. Näiden menetelmien käytettävyyttä tutkitaan Runkopankkiprototyyppi-hankkeessa. Menetelmät ovat dataorientoituneita, ja siksi niiden tutkimus ja käyttö edellyttävät runsaasti tietovaraston mittaustietoa. Tähän mennessä tehdyissä hankkeissa massiiviseen aineistohankintaan ei ole ollut mahdollisuuksia, minkä vuoksi pidemmälle meneviä arvioita menetelmien käyttökelpoisuudesta leimikkotietojen ennustamisessa tai muissa käyttötarkoituksissa ei ole voitu tehdä.

## 11 KAUKOKARTOITUS METSIÄ KOSKEVAN TIEDON TUOTTAMISESSA

### 11.1 Yleistä kaukokartoituksesta

Kaukokartoituksessa hankitaan tietoa tutkittavasta kohteesta siten, että käytetään hyväksi heijastuvaa tai kohteen itsensä lähettämää sähkömagneettista säteilyä. Passiiviset kaukokartoitusilmaisimet, kuten ilmavalokuvaukseen käytetyt kamerat, ainoastaan tallentavat säteilyä. Aktiiviset menetelmät, kuten tutka, lähettävät itse säteilyä ts. valaisevat kohteen ja tallentavat tutkittavasta kohteesta takaisin heijastuneen säteilyn.

Kaikista kaukokartoitusmenetelmistä löytyvät samat osiot: kaukokartoitustiedon hankinta, maastotiedon hankinta, tietojen tallennus ja siirto, esikäsitteily, tulkinta ja esittäminen. Ilmavalokuvausta lukuunottamatta loppukäyttäjän, jollaiseksi metsäalan käyttäjät voidaan lukea, ei tarvitse huolehtia tulkintaa edeltävistä vaiheista. Niissä kuville tehdään erilaisia korjauksia esikäsitteilyn yhteydessä ja kuvat myös usein oikaistaan käyttäjän haluamaan koordinaatistoon.

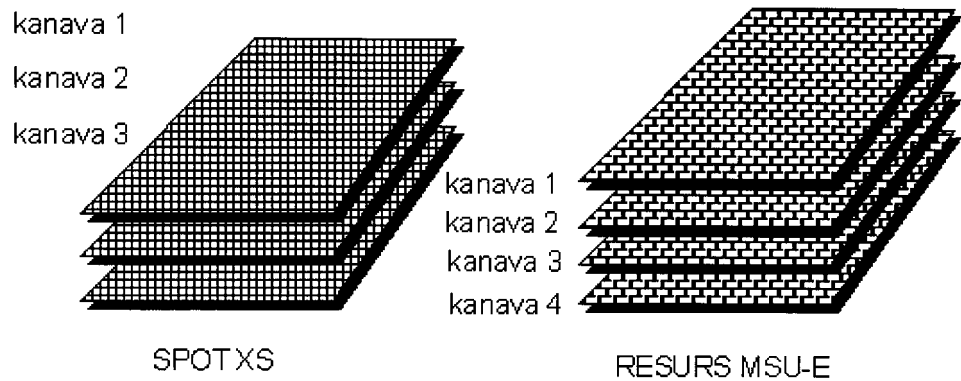
Kaukokartoitustietoa voidaan tulkita kahdella tavalla – silmävaraisesti tai numeerisin menetelmin. Silmävaraisella tulkinnalla on metsäalalla perinteitä; kuvioittaisen arvioinnin ennakkokuvioinnin laatiminen on tyypillisin esimerkki tästä. Myös satelliittikuvia voidaan tulkita paperille tulostettuna silmävaraisesti, esimerkiksi Metsähallitus on kokeillut Pohjois-Suomessa SPOT-satelliitin kuvia avohakkuukuvioiden rajojen tarkistamiseen. Silmävaraisen tulkinnan menetelmiin voidaan myös laskea stereokartoituskojeella tehtävä koealojen mittaaminen ilmakuvista. Esimerkiksi Sveitsin valtakunnan metsien inventoinnissa tulkitaan mm. latvuspeittävyyttä näin. Myös puiden pituuksien ja latvusten leveyksien mittaaminen on mahdollista tällä tavalla.

Silmävaraisilla menetelmillä saadut tulokset vaihtelevat tulkitsijoittain, mikä on jossain määrin ongelmallista. Numeerisia tulkintamenetelmiä käyttämällä vaihtelua ei synny. Edelleen numeeriset menetelmät soveltuvat silmävaraisia paremmin suuralueiden tulkintaan, ja niinpä tässä käsitellään lähinnä numeerisia menetelmiä. Numeeristen kuvien yhteydessä puhutaan erotuskyvystä eli resoluutiosta. Sitä on neljää lajia:

1. Maaston erotuskyky eli *spatiaalinen resoluutio* ilmaisee, minkä kokoisia kohteita voidaan havaita. Se ilmaisee pienimmän yksikön, jolta tietoa maasta rekisteröidään. Usein puhutaan myös kuvaelementin koosta tai pikselikoosta. Esimerkiksi Landsat TM-satelliitin maaston erotuskyky on 30 metriä x 30 metriä.
2. *Spektrinen resoluutio* ilmaisee, kuinka monta ja miten laajaa aallonpituus- aluetta voidaan mitata. Landsat TM:ssä on 7 kanavaa, joiden leveydet vaihtelevat.



3. *Radiometrinen resoluutio* ilmaisee, kuinka monella luokalla säteilymäärää rekisteröidään (esim. Landsat TM 256 luokkaa). Säteilyn mittauksen ”mittayksikkö”.
4. Ajallinen erotuskyky eli *temporaalinen resoluutio* ilmaisee, kuinka usein sama kohta maasta rekisteröidään.



**Kuva 8.** Kaaviokuva satelliittikuvan spektrisestä ja spatiaalisesta resoluutiosta.

Numeerista kuvaa voidaan verrata nippuun numeroituja ruutupapereita, jossa ruudut vastaavat kuvaelementtejä ja paperiarkit eri aallonpituuskanavia. Esimerkiksi SPOTin XS-havaintolaite on kolmikanavainen ja sen maastonerotuskyky on 20 metriä x 20 metriä. Vieressä RESURSin nelikanavainen MSU-E-havaintolaite, jonka maastonerotuskyky on 45 metriä x 33 metriä.

Kaukokartoitusmenetelmissä käytetään yleisesti apuna maastossa mitattua tietoa, jota kutsutaan usein referenssi- tai ground truth-tiedoksi. Tulkintamenetelmät voidaan jakaa maastotiedon käyttötavan perusteella kahteen luokkaan: ohjaamattomat ja ohjatut tulkintamenetelmät. Ohjatussa tulkinnassa ihminen osoittaa tietokoneelle tulkintaa varten ominaisuuksiltaan tunnettuja tukialueita, joista tiedetään kiinnostuksen kohteena olevat ominaisuudet. Ohjattua tulkintaa on käytetty runsaasti maankäyttöluokitusten tekemiseen alueille, joilla ei ole saatavissa ajantasaista karttamateriaalia. Suomessa yleisimmin käytössä olevat tulkintamenetelmät ovat ohjaamattomia. Näissä maastotieto on usein kerätty koelaitoilta tai olemassa oleva tieto muunnetaan koelaitoittaiseen muotoon. Maastotieto yhdistetään kaukokartoituksella hankittuun säteilytietoon ja tiedot yleistetään myös niille kuvan osille, joista ei ole maastotietoa. Sekä yleistämiseen että maasto- ja kaukokuvatiedon yhdistämiseen on olemassa erilaisia menetelmiä.

## 11.2 Numeeristen kuvien operatiiviset käyttömahdollisuudet

### 11.2.1 Satelliittikuvat

Satelliittikuvien käyttöä luonnonvarojen kartoitukseen on selvitetty pitkään. Satelliittikuviin pohjautuvat metsien kartoitus- ja inventointisovellukset ovat pisimmälle kehittyneet. Suomessa laajimmin käytetty ja tunnetuin sovellus on valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) yhteydessä tehtävä perus-

inventointia pienempien alueiden metsävarojen laskenta. VMI:ssä lasketaan koko Suomen alueelle jokaiselle satelliittikuvan kuvaelementille puustotiedot, joten yksittäisen kuvion puustotietojen laskenta on periaatteessa mahdollista. VTT Automaatio on myös kehittänyt laskentamenetelmiä metsiä koskevan tiedon tuottamiseksi suuralueille. Kuvioittaisen ja pienalueittaisen tiedon tuottamista on tutkittu Helsingin ja Joensuun yliopistoissa.

Satelliittikuvat soveltuvat parhaiten suuralueiden inventointiin. Tuhansien hehtaarien alueen tiedot saadaan satelliittikuviin ja maasto-otantaan perustavalla inventoinnilla varsin tarkasti. Sen sijaan pienemmän tilan tai yksittäisen kuvion tulokset ovat lähinnä suuntaa-antavia. Satelliittikuvia käytettäessä tyypillistä on pinta-alaltaan pienten kohteiden häviäminen. Tyypillistä on myös tulosten keskiarvoistuminen, jolloin esimerkiksi usein kiinnostavien runsaspuustoisten kohteiden tilavuus aliarvioidaan. Metsissä tapahtuneiden voimakkaiden muutosten tunnistamiseen satelliittikuvat sopivat varsin hyvin. Esimerkiksi avohakatut kuviot sekä lehvästöön vaikuttavat tuhot pystytään havainnoimaan ja paikantamaan varsin luotettavasti ja tarkasti satelliittikuvista.

Kaupallisesti saatavilla olleet numeeriset satelliittikuva-aineistot ovat viime vuosiin saakka olleet maastonerotuskyyvyltään selkeästi ilmakuvia huonompia. Vuonna 1996 laukaistulla IRS-satelliitilla saadaan lähes ilmakuvien verroisia kuvia, satelliitin maastonerotuskyky on 5,8 metriä näkyvän valon alueelta rekisteröivällä kanavalla. Lähitulevaisuudessa satelliittikuvat ovat yhtä hyviä kuin ilmakuvat; silloin maastonerotuskyky on metrin luokkaa. Jotta parantunut erotuskyky saataisiin hyödynnettyä täysimääräisesti, tulkintamenetelmiä joudutaan kehittämään. Aikaisemmin yksi pikseli on kuvannut metsikön heijastusta keskimäärin. Uudet laitteet rekisteröivät harvemmasta metsästä valossa olevat latvukset ja varjossa olevan metsämaan. Samat tulkinta-algoritmit eivät ole uudella datalla todennäköisesti kuitenkaan tehokkaimmat mahdolliset.

### **11.2.2 Numeeriset ilmakuvat**

90-luvulla skannaustekniikan kehittymisen ja halventumisen myötä on ollut yhä enemmän mahdollista käyttää numeerisia ilmakuvia. Aivan viime aikoina on markkinoille myös tullut riittävän tarkkoja, kohtuuhintaisia digitaalika-meroita, joista saadaan suoraan numeerisessa muodossa olevaa kuvaa. Ilmakuvien numeerisen tulkinnan suurimpia ongelmia ovat kuvan sisäinen ja kuvien välinen sävyarvojen vaihtelu, minkä vuoksi samanlainen metsä saa erilaisia sävyarvoja saman kuvan eri osissa tai vierekkäisillä kuvilla.

Numeeristen ilmakuvien parissa tehdään runsaasti tutkimustyötä Suomessa. VTT Automaatio yhdessä Enso Forest Development Ltd:n kanssa kehittää digitaalikameraan perustuvaa operatiivista menetelmää. Helsingin ja Joensuun yliopistoissa tutkitaan edellä mainittujen ongelmien poistamista. Normaalia ilmakuvausta alemmaa otetuista kuvista tutkitaan mahdollisuutta tunnistaa yksittäisten puiden latvukset ja saada näin aikaan puukartta. Puukartan



latvuksista on mahdollista johtaa latvuksen koon ja puun muiden mittojen välisen riippuvuuden avulla puuta koskevaa tietoa.

Numeeriset ilmakuvat soveltuvat tällä hetkellä parhaiten metsän havainnollistamiseen. Tutkimuksissa numeeristen ilmakuvien avulla on saatu satelliittikuvia tarkempia tuloksia pienalueille. Tulokset eivät kuitenkaan toistaiseksi ole olleet niin merkittävästi parempia, että numeeristen ilmakuvien käsittelyyn kuluva aika tulisi katetuksi.

### 11.2.3 Muut numeeriset kaukokartoitustietolähteet

Kuvaavat spektrometrit ovat lentokoneeseen asennettavia laitteita, jotka tallentavat metsistä heijastunutta säteilyä numeeriseen muotoon. Niiden maastonerotuskyky riippuu lentokorkeudesta, mutta se on yleensä noin metrin luokkaa. Myös spektrinen erotuskyky on hyvä, tallennettavia aallonpituusalueita on kymmeniä ja käyttäjä voi valita, mitä alueita mitataan. Suomalaisen kehittämä AISA (Airborne Imaging Spectrometer) on tarkoitettu operatiiviseen käyttöön VMI:ssä. Maailmalla on tarjolla toinenkin sovellys, kanadalaisten kehittämä CASI (Compact Airborne Spectrometric Imager). Molemmilla on saatu satelliittikuvia parempia tuloksia erityisesti tilavuuden arvioinnista.

Puiden pituuden mittaamiseen lentokoneesta tai helikopterista käsin on tarjolla kaksi lupaavaa tekniikkaa. Tutkan käyttöön perustuva systeemi on rakennettu Teknillisessä korkeakoulussa Espoossa. Profiloiva kaukokartoitustutka mittaa etäisyyttä puiden latvuksiin ja maahan. Puiden keskipituus kuviolla saadaan erotuksena lähes yhtä tarkasti kuin maastossa hypsometrillä mitaten. Myös pituuden hajonnasta kuviolla saadaan tietoa. Laitteella on mahdollista mitata myös lähinnä elävän latvusrajan korkeus, mutta toistaiseksi alarajan korkeuden määrittämisen tarkkuutta ei ole tutkittu. Pohjapinta-alan määrittäminen onnistuu kohtuullisen tarkasti, ja kuvion keskitilavuuden keskivirhe on tutkimuksissa ollut 30 %:n luokkaa eli hiukan kuvioittaista arviointia epätarkempaa. Puiden pituutta voidaan mitata lentokoneeseen asennetulla, laseriin perustuvalla etäisyysmittarilla. Pituuden mittauksen osalta tulokset ovat tälläkin tekniikalla varsin hyviä. Molempien menetelmien ongelma tällä hetkellä on pieni peitto lennettyä matkaa kohden. Esimerkiksi tutkamittausten edellä kuvatut tulokset saatiin mittauksista, joissa lentolinjat sijaitsivat 150 metrin välein.

Uudet tarkempaa kaukokartoitustietoa tuottavat laitteet kaipaavat menetelmäkehitystä, ennen kuin ne soveltuvat operatiiviseen käyttöön ja pystyvät korvaamaan satelliittikuvat. Tällä hetkelläkin niitä voitaisiin käyttää osana tiedonkeruuta. Koko alueen perustieto saadaan halvalla satelliittikuvista. Inventoitava alue voidaan satelliittikuvan avulla jakaa osiin, joista osa on kiinnostavampia. Nämä alueet voitaisiin edelleen kuvata esimerkiksi tutkalla tai spektrometrillä. Lopulta maastosta kerättävä tieto kohdentuu alueille, joista tiedetään jo kohtuullisella tarkkuudella, mitä ne ovat.

## 12 YHTEENVETO

Puustokuvauksia tarvitaan tuotelähtöisessä puunhankinnassa halutunlaisten leimikoiden hankkimiseksi, korjuuohjelman suunnitteluun ja optimointiin sekä leimikon katkontaparametrien määrittämiseen ja testaukseen. Kuvauksen taso voi vaihdella sisällöltään ja tarkkuudeltaan. Tuotelähtöisyys asettaa puujoukon kuvaukselle tiettyjä minimivaatimuksia, joita ovat mm. runkolukusarjan ja pituuksien estimointi. Laatutunnusten määrittäminen lisää puustotiedon käytettävyyttä, mutta on myös muiden tunnusten määrittämistä vaativampaa ja epävarmempaa, koska hyviä malleja ei ole olemassa.

Käyttökelpoisia ennakkotietolähteitä on vähän, ja niiden kehittämisellä on omat rajoituksensa. Silmävaraiset arviot leimikon puustosta eivät riitä kuvauksien perustaksi. Metsäsuunnittelutieto on hyvää perustietoa leimikosta, mutta senkään tietosisältö ei vastaa puuston laatua kuvaavien tunnusten puutteen vuoksi tuotelähtöisyyden vaatimuksia. Puunhankinnan näkökulmasta metsäsuunnittelun kehittämistavoitteista tärkeimpiä ovat juuri tukkipuuvaltaisten metsiköiden laatutunnusten kuvaus, alkuperäisten mittaustietojen säilyttäminen valmiin suunnitelman mukana ja kuviotietojen joustava hallinta ja käyttöönsaanti puukaupan teon yhteydessä. Ennakkomittausmenetelmillä voidaan mitata ja arvioida puuston kuvauksessa tarvittavia tunnuksia riittävän tarkasti. Eniten kehittämistarvetta on runkolukusarjojen muodostamismenetelmissä ja käytännössä merkittävästi virhettä aiheuttavassa pinta-alan määrittämisessä. Luultavasti kuitenkin tulevaisuudessakin resurssien vähäisyys estää menetelmien laajemman käytön.

Vaihtoehtona leimikon puustotunnusten mittauksille tai arvioinneille on tunnusten ennustaminen tietovaraston aineistoista. Hakkuukoneiden tuottamat mittaustiedot ovat kehitettävän tietojärjestelmän perusta, jota on mahdollista täydentää mm. puiden sisäistä laatua kuvaavilla mittaustietojen aineistoilla. Metsätehon jatkohankkeissa tavoitteena on luoda puustotietojen ennustamismenetelmä, jossa perustiedoiksi riittäisivät metsäsuunnittelutiedot tai kaupanteossa muutoinkin tallennettavat tiedot, mutta tuloksena olisi tuotelähtöisyyden vaatimuksia vastaava puujoukon kuvaus.

## LÄHDEKIRJALLISUUS

- Droessler, T.D. & Burk, T.E.**, 1989. A Test of Nonparametric Smoothing of Diameter Distributions. *Scandinavian Journal of Forest Research* 4 (1989).
- Halinen, M.**, 1985. Männyn nuoruusvaiheen kasvunopeuden vaikutus sahatavaran laatuun. *Silva Fennica* Vol. 19 (4).
- Hynnen, J.**, 1995. Modelling tree growth for managed stands. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 576.
- Hyyppä, J., Hyyppä, H. & Inkinen, M.**, 1997. Capabilities of Multi-Source Remote Sensing for Forest Inventory. *Proceedings of 3rd International Airborne Remote Sensing Conference & Exhibition*.
- Inkinen, M.**, 1997. Numeerisen ilmapalokuvan ja profiloivan tutkan soveltuvuus puustotunnusten kuvioittaiseen arviointiin. *Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu*.
- Jalkanen, P.**, 1996. Otantamenetelmien vaikutuksia leimikon hinnoitteluun ja menetelmä puunostajan hinnoittelukustannusten laskemiseksi. *Folia Forestalia* 1996 (2).
- Kangas, A. & Kangas, J.**, 1997. Mallit, ennusteet ja simulointi metsätalouden laskentajärjestelmissä. *Metsätieteen aikakauskirja – Folia Forestalia* 3/1997.
- Kangas, A. & Korhonen, K.T.**, 1995. Generalizing Sample Tree Information with Semiparametric and Parametric Models. *Silva Fennica* Vol. 29 (2).
- Kilkki, P., Maltamo, M., Mykkänen, R. & Päivinen, R.**, 1989. Use of the Weibull function in estimating the basal area dbh-distribution. *Silva Fennica* Vol. 23 (4).
- Kiviluoma, P. & Uusitalo, J.**, 1997. Männyn kuivaoksa- ja latvusrajan silmävaraisen arvioinnin tarkkuus. *Metsätieteen aikakauskirja – Folia Forestalia* 4/1997.
- Koivunen, J.**, 1989. Männyn ja koivun kuivien ja elävien oksien alkamiskorkeuden ennustaminen. *Pro gradu-työ. Helsingin yliopiston maatalous-metsätieteellinen tiedekunta*.
- Korhonen, K.T. & Kangas, A.**, 1995. Application of nearest-neighbor regression for generalizing sample tree information. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 569.

- Kärkkäinen, M.** 1980. Mäntytukkirunkojen laatuluokitus. Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja 96.5.
- Kärkkäinen, M.** 1986. Malli männyn, kuusen ja koivun puuaineen oksaisuudesta. *Silva Fennica* Vol. 20 (2).
- Laasasenaho, J.**, 1997. Puun elävän latvuksen alarajan määrittämisestä ja käytöstä. *Metsätieteen aikakauskirja - Folia Forestalia* 1/1997.
- Lemmetty, J.**, 1991. Leimikon hinnoittelu- ja suunnittelumenetelmän tarkkuus. *Metsätehon katsaus* 12/1991.
- Lemmetty, J. & Mäkelä, M.**, 1992. Suunnittelumittauksen perusteet ja toteutus. *Metsätehon katsaus* 11/1992.
- Maltamo, M.** 1997. Comparing Basal Area Diameter Distributions Estimated by Tree Species and for the Entire Growing Stock in a Mixed Stand. *Silva Fennica* Vol. 31 (1).
- Maltamo, M., Puumalainen, J. & Päivinen, R.**, 1995. Comparison of Beta and Weibull Functions for Modelling Basal Area Diameter Distribution in Stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 10 (1995).
- Mykkänen, R.**, 1986. Weibull-funktion käyttö puuston läpimittajakauman estimoinnissa. Pro gradu-työ. Joensuun yliopiston metsätieteellinen tiedekunta.
- Mäkelä, M.**, 1990. Menetelmä leimikon hinnoittelu- ja suunnittelutietojen määrittämiseksi. *Metsätehon katsaus* 7/1990.
- Mäkisara, K., Heikkinen, J., Henttonen, H., Tuomainen, T. & Tomppo, E.**, 1997. Experiments with Imaging Spectrometer Data in Large-Area Forest Inventory Context. *Proceedings of 3rd International Airborne Remote Sensing Conference & Exhibition*.
- Oksanen-Peltola, L. & Paananen, R.**, 1995. Metsäsuunnittelu - yksityismetsätalouden suunnittelun perusta. *Työtehosteuran metsätiedote* 8/1995.
- Puumalainen, J.**, 1994. Beta and Weibull functions and the grid method in estimating the diameter distribution of a conifer stand. Pro gradu-työ. Joensuun yliopiston metsätieteellinen tiedekunta.
- Rouvinen, S., Kangas, A., & Maltamo, M.**, 1997. Männikön laatuajakauman kuvaaminen oksarajatiedon avulla kuvioittaisessa arvioinnissa. *Metsätieteen aikakauskirja - Folia Forestalia* 4/1997.

- Saastamoinen, T.,** 1997. Kuusitukkien läpimittajakauman ennustaminen osto-otannon koepuista. Pro gradu-työ. Helsingin yliopiston maatalous-metsätieteellinen tiedekunta.
- Tommola, M.,** 1997. Leimikkotunnusten ennustaminen puunhankinta-organisaation tietojärjestelmän avulla. Pro gradu-työ. Joensuun yliopiston metsätieteellinen tiedekunta.
- Uusitalo, J.,** 1995. Pre-harvest measurement of pine stands for sawing production planning. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 9.
- Vuokila, Y.,** 1982. Metsien teknisen laadun kehittäminen. Folia Forestalia 523.
- Ärölä, E.,** 1996. Männyn elävän latvuksen alarajan ja neulasmassan ennustaminen. Pro gradu-työ. Helsingin yliopiston maatalous-metsätieteellinen tiedekunta.