

FOLIA FORESTALIA 356

METSÄNTUTKIMUSLAITOS • INSTITUTUM FORESTALE FENNIAE • HELSINKI 1978

MIKKO HYPPÖNEN JA PENTTI ROIKO-JOKELA

KOEPUIDEN MITTAUKSEN TARKKUUS
JA TEHOKKUUS

ON THE ACCURACY AND EFFECTIVITY
OF MEASURING SAMPLE TREES

- No 282 Yrjö Vuokila: Pystypuun kairaus vikojen aiheuttajana.
The boring of standing trees as a source of defects.
- No 283 Leevi Pajunen: Metsurin työvälinekustannukset 1975—1976.
Forest worker's equipment costs 1975—1976.
- No 284 Paavo Juutinen, Timo Kurkela ja Sakari Lilja: Ruohokaskas, *Cicadella viridis* (L.), lehtipuun vioittajana sekä vioitusten sienisaastunta.
Cicadella viridis (L.) as a wounder of hardwood saplings and infection of wounds by pathogenic fungi.
- No 285 Timo Nyrhinen: Kaksivaiheisen metsän inventoinnin koe Lounais-Suomessa.
A test of two-step forest inventory in South-West Finland.
- No 286 Matti Kärkkäinen: Pohjoissuomalaisen koivukuitupuun tilavuusmittauksia.
Volume measurement of birch pulpwood in Northern Finland.
- No 287 Veijo Heiskanen ja Juhani Salmi: Koivutukkien latvamuotoluvut ja yksikkökuutiot.
Top form factors and unit volumes of birch logs.
- No 288 Matti Leikola: Taimitarhamaan lämpöolot muovihuoneessa ja avomaalla.
Soil temperature conditions in plastic greenhouse and in open nursery.
- No 289 Lehkoinen, Tapio: Pohjois- ja Etelä-Suomen väliset kantohintaerot.
Stumpage price differences between Northern and Southern Finland.
- No 290 Heiskanen, Veijo: Tarkistetut havusahatukkien kuorelliset yksikkökuutioluvut.
The checked unit volumes for pine and spruce sawlogs.
- No 291 Uusitalo, Matti: Puun kasvatuksen kulut vuosina 1972—74.
Costs of timber production in Finland in 1972—74.
- No 292 Hakkila, Pentti: Kantopuu metsäteollisuuden raaka-aineena.
Stumpwood as industrial raw material.
- No 293 Lehtonen, Irja: Puu polttoaineena. Kirjallisuuteen perustuva tarkastelu.
Wood as a fuel. A study based on literature.
- No 294 Harstela, Pertti & Tervo, Leo: Männyn taimikon ja riukuasteen metsikön korjuun tuotos ja ergonomia.
Work output and ergonomical aspects in harvesting of sapling and pole-stage stands (Scots pine).
- No 295 Metsätilastollinen vuosikirja 1975.
Yearbook of Forest Statistics 1975.

- No 296 Heiskanen, Veijo: Etelä-Suomen ja Pohjois-Suomen puutavaran laatuerot.
Quality differences of timber between Southern and Northern Finland.
- No 297 Paavilainen, Eero & Virtanen, Jaakko: Metsänlannoituksen vaikutuksen riippuvuus levitysmenetelmästä.
Effect of spreading method on forest fertilization results.
- No 298 Vuokila, Yrjö: Harsintaharvennus puuntuotantoon vaikuttavana tekijänä.
Selective thinning from above as a factor of growth and yield.
- No 299 Vuokila, Yrjö: Hyvän kasvupaikan haavikoiden kasvukyvystä.
On the growth capacity of aspen stands on good sites.
- No 300 Paavilainen, Eero: Helppoliukoisten lannoitteiden vaikutuksen riippuvuus levityssajan kohdasta turvemaalla.
Effect of application time on growth response to easily dissolving fertilizers on peatlands.
- No 301 Tiihonen, Paavo: Männyn ja kuusen tukkipuutaulukot. Tukkien minimiläpimittaluokka männyllä 13 cm ja kuusella 13 ja 15 cm.
Massentafeln für Kiefern- und Fichtenblochholz. Mindestdurchmesserklassen der Blöcher für Kiefer 13 cm und für Fichte 13 und 15 cm.
- No 302 Simola, Paavo: Pienikokoisen lehtipuuston biomassa.
The biomass of small-sized hardwood trees.
- No 303 Vuokila, Yrjö: Talvikkityypin puuntuotannollinen asema metsätyyppijärjestelmässä.
Position of the Pyrola type in the forest site type system of Cajander.
- No 304 Puro, Tiina: Operaatio metsänlannoitus II. Tuloksia uusintalannoituksesta.
Results of the second fertilization with nitrogen.
- No 305 Virtanen, Jaakko & Ylinen, Mikko: Ojitusaluiden lentolannoitus.
Aerial spreading of fertilizers on peatlands.
- No 306 Astorga S., Luis E.: Effectuating possibilities of waste wood utilization in Finland.
Step 1.
Jätepuun käytön tehostamismahdollisuudet Suomessa. Osa 1.
- No 307 Kilkki, Pekka, Kuusela, Kullervo & Siitonen, Markku: Puuntuotanto-ohjelmat Etelä-Suomen piirimetsälautakuntien alueille.
Timber production programs for the forestry board districts of Southern Finland.
- No 308 Huttunen, Terho: Suomen puunkäyttö, poistuma ja metsätase 1974—76.
Wood consumption, total drain and forest balance in Finland, 1974—76.
- No 309 Mäkelä, Markku: Hakkuutähteen ominaisuuksien muuttuminen.
Changes in the quality of logging residues.
- No 310 Harstela, Pertti, Järvinen, Juhani, Tervo, Leo & Aholainen, Raimo: Tutkimus eräistä harvennushakkuumenetelmistä (Levälle teko ja LEKA-menetelmä).
The study of some short wood methods of cutting in thinnings (Cutting without bunching and SCAPE method).

FOLIA FORESTALIA 356

Metsäntutkimuslaitos. Institutum Forestale Fenniae. Helsinki 1978

Mikko Hyppönen ja Pentti Roiko-Jokela

KOEPUIDEN MITTAUKSEN TARKKUUS JA TEHOKKUUS

On the accuracy and effectivity of measuring sample trees

HYPPÖNEN, M. & ROIKO-JOKELA, P. 1978. Koepuiden mittauksen tarkkuus ja tehokkuus. Summary: On the accuracy and effectivity of measuring sample trees. *Folia For.* 356:1—25.

Tutkimuksessa selvitetään virhelähteitä, virhekomponentteja sekä virheiden yhdistämistä koskevan tarkastelun jälkeen männyn kuutiomistunnusten mittaamiseen käytettyjen välineiden tarkkuutta ja ajanmenekkejä. Näitä hyväksi käyttäen määritetään tehokkain mittausvälineyhdistelmä koepuun mittaukseen Peräpohjan oloihin. Lisäksi analysoidaan mittausvirheiden osuutta koepuun kuutiomäärän varianssista sekä tarkastellaan mittausvirheiden vaikutusta koepuuotoksen kokoon.

Mittatanko oli tarkin puun pituuden mittaukseen käytettävistä välineistä. Sillä systemaattinen yliarvio oli 0,08 m ja poikkeamien keskihajonta 0,20 m. Välineellä pystyttiin mittaamaan vain alle 17 m:n puita. Tarkkuudeltaan mittatankoa heikompi, mutta ajanmenekiltään ja kustannuksiltaan parempi käsivarainen Suunto-hypsometri osoittautui kenttäolosuhteissa tehokkaimmaksi pituudenmittausvälineeksi. Virheiden keskihajonta oli 0,80 m ja harha $-0,38$ m. Aikaa puun pituuden mittaukseen Suunto-hypsometrillä kului keskimäärin yksi minuutti.

Optimaaliseen mittausvälineyhdistelmään kuuluu Suunto-hypsometrin lisäksi tavallinen latvakaulain sekä mittasakset. Tiheissä, alle 12 m:n puustoissa on mittatangon käyttö perusteltua. Tutkimustarkoituksissa optinen suuntakehä puoltaa paikkaansa hyvällä pituudenmittaustarkkuudellaan.

Koepuuotoksen kokoa määritettäessä tulee ottaa huomioon myös mittausvirheet, koska niiden osuus kuutiomäärän varianssista on optimaalisella välineyhdistelmällä mitattaessa merkittävä. Muussa tapauksessa koepuiden lukumäärä jää 10 % liian pieneksi.

The study examines the sources of errors, error components and combined errors involved in the measurement of sample trees. The precisions and biases of the instruments used and the time consumption characteristics of each instrument when measuring stem volume parameters for Scots pine are then examined. With this information an optimum instrument combination for Finnish Lapland is proposed. In addition, an analysis is made of the significance of measurement errors in the variance occurring in sample tree volume calculations. Finally, the effect of measurement errors on sampling intensity is examined.

The sectional measuring pole was found to be the most accurate of the instruments used in measuring tree height. It gave a systematic over-estimate of 0,08 m and a standard deviation of 0,20 m. However, it was only suitable for measuring trees less than 17 m in height. The hand-held Suunto-altimeter, though less accurate than the measuring pole, was better in terms of time consumption and cost. Of the height meters studied, the Suunto-altimeter was found to be the most effective, the standard deviation for errors was 0,80 m and bias was $-0,38$ m. The average time spent in measuring the height of a tree with the Suunto-altimeter was about one minute.

The optimum instrument combination consists of the Suunto-altimeter, curved upper-diameter caliper and steel caliper. In dense stands less than 12 metres in height it is advisable to use a sectional measuring pole. The Suuntakehä is recommended for research purposes.

In determining the sampling intensity, measurement errors should be attended to, as they make up a significant part of the variance of the volume when measuring trees with the optimum instrument combination. If this is not done, sampling intensity will turn out to be insufficient.

ALKUSANAT

Tämä tutkimus liittyy osana maastomittausmenetelmien kehittämiseen, jota on tehty tuotostutkimuksen ja liiketaloudellisen metsäekonomian tutkimuksen yhteistyönä Metsäntutkimuslaitoksen Rovaniemen tutkimusasemalla. Työ jakautui tekijöiden kesken siten, että Pentti Roiko-Jokela valvoi ja ohjasi tutkimuksen kulkua ja Mikko Hyppönen suunnitteli ja johti kenttämittaukset sekä kirjoitti alustavan käsikirjoituksen metsänarvioimistieteen pro gradu-tutkielmaksi. Lopullinen käsikirjoitus laadittiin yhdessä.

Prof. Aarne Nyysönen, vt. apulaisprof. Jouko Laasasena ja MMT Eljas Pohtila ovat tehneet huomioonotettuja korjaus ehdotuksia opinnäytetyöhön. Käsikirjoituksen ovat lukeneet professorit Yrjö Vuokila, Jouko Hämäläinen

ja Risto Seppälä sekä MMT Pekka Kilki ja FK Olavi Laakkonen tehden hyödyllisiä parannusehdotuksia.

Aineiston keräys- ja laskentatöissä ovat olleet fil.yo. Erkki Kaila, silloiset metsäylioppilaat Leevi Lohi ja Mauri Timonen sekä tutkimus- ja koeapulaiset Matti Aho, Urpo Kainulainen, Erkki Oinas ja Veikko Stöckel. Käsikirjoituksen ovat kirjoittaneet puhtaaksi toimistosihtööri Vuokko Pitkänen ja konekirjoittaja Helena Poikajärvi. Kuvat on piirtänyt kanslisti Ritva Schroderus. Englanninkielisen tekstin on kääntänyt MH Erkki Pekkinen ja tarkastanut B. Sc. Ashley Selby.

Esitämme parhaat kiitoksemme kaikille työhön osallistuneille.

Rovaniemellä toukokuussa 1978

Mikko Hyppönen

Pentti Roiko-Jokela

SISÄLLYS

1. JOHDANTO	5
2. VIRHETEORIASTA	6
21. Mittausvirhe	6
22. Luokitusvirhe	7
23. Taulukkovirhe	8
24. Virhetekijöiden yhdistäminen	8
3. TUTKIMUSMENETELMÄ JA -AINEISTO	9
31. Koejärjestelyt	9
Mittausvälineet	9
Koepuuryhmät	10
Tarkkuusmittaukset	10
Aikatutkimukset	10
32. Optimointi	11
Menetelmä	11
Sovellutusmetsiköt	12
4. TULOKSET	13
41. Mittaustarkkuus	13
Pituuden mittaus	13
Läpimitan d_6 mittaus	14
Rinnankorkeusläpimitan mittaus	14
42. Ajanmenekit ja kustannukset	15
43. Tehokkuus	16
5. TULOSTEN TARKASTELU	18
6. YHDISTELMÄ	20
7. LÄHDELUETTELO	21
8. SUMMARY	22
LIITTEET	23

1. JOHDANTO

Koepuiden mittaus on keskeinen vaihe puuston kuutiomäärää arvioitaessa. Se vie nykyisillä arviointimenetelmillä 18—45 % mittauksen kokonaisajasta (Pennanen 1978). Eri mittausvälineiden vaatiman ajankäytön ja mittaustarkkuuden vaihtelu aiheuttaa ongelman optimaalisen l. tehokkaimman mittausmenetelmän valinnassa. Tehokkuudella tarkoitetaan ajankäytön ja mittaustarkkuuden ottamista samanaikaisesti huomioon (ks. Loetsch ym. 1973, s. 345).

Puuston kuutiomäärän arvioinnissa joudutaan yleensä käyttämään kaksivaiheista otantaa. Otosyksiköiden joukko muodostuu esimerkiksi ympyräkoaloista, jotka jakautuvat systemaattisesti arvioitavalle metsäalueelle. Koska systemaattinen koelaverkosto sijoitetaan satunnaisesti, antavat ensimmäisessä vaiheessa koaloilta mitatut rinnankorkeusläpimitat (d) edustavan otoksen arviotavan puuston runkolukujakaumasta. Vasta otannan toinen vaihe käsittää tämän tutkimuksen kannalta tärkeät objektiivisesti valitut koepuut, joista mitataan pituus (h) ja läpimitta kuuden metrin korkeudelta (d_6). Käyttäen hyväksi saatuja tunnuksia koepuut kuutioidaan joko taulukoiden (Ilvesalo 1947) tai funktioiden (Laasasenaho 1976) avulla, ja näin saadut kuutiomäärät tasoitetaan rinnankorkeusläpimitan suhteen ns. yksikkökuutioluvuiksi (Schmid — Haas 1976). Runkolukujakauman ja yksikkökuutiolukujen (-funktion) perusteella lasketaan puuston kuutiomäärä.

Puuston arvioinnissa pyritään saavuttamaan tietty tarkkuus määrätyllä todennäköisyydellä. Tämä edellyttää otoksen tarkkaa suunnittelua ja otoskoon optimaalista kiintiöintiä. Tehtävän helpottamiseksi Nyysönen ym. (1967, 1971) ovat selvittäneet systemaattiseen otantaan perustuvan inventoinnin tarkkuutta ja tehokkuutta. Tutkimukset antavat viitteitä vaadittavan tarkkuuden edellyttämästä koelamäärästä ja koalojen optimisuuruudesta otantavirheen perusteella. Koepuiden otantaa ovat

tutkineet Seppälä (1971) ja Laasasenaho (1973). Tuloksena on menetelmä, jossa yhdistyvät toisaalta koepuiden poimintamenettelyn vaivattomuus ja toisaalta puustotunnusten estimaattien hyvä tarkkuus.

Tiedot otoskoon määrittämiseen sekä koalojen että koepuiden osalta ovat saatavissa. Kriittinen tarkastelu kuitenkin osoittaa, että koepuiden mittauksessa on pyritty vain hyvään tarkkuuteen. Tehokkain menetelmä johtaisi tähän tavoitteeseen kuitenkin pienimmillä kustannuksilla. Lisäksi nykyinen käytäntö ja otantateoriassa tehdyt oletukset eivät pidä täysin yhtä. Otoskoko määritetään pelkästään otantavirheiden perusteella. Otannasta riippumattomat virheet, kuten koepuiden mittausvirheet, on jätetty tarkastelun ulkopuolelle, vaikka esim. Schmidin ym. (1971) mukaan kuutioimistunnusten mittauksessa syntyvä virhe on vähintään taulukkovirheen suuruinen. Tähän virhekomponenttiin pyritään tässä työssä saamaan lisäselvitystä. Samalla analysoidaan virhekomponentin osuutta koepuun kuutiomäärän kokonaisvaihtelusta, joka on eräs koepuukiintiöinnin perusta.

Tutkimuksen tarkoituksena on

- käsitellä koepuiden mittausvirheitä ja virheiden yhdistämistä,
- tutkia eräiden koepuun kuutioimistunnusten mittausvälineiden tarkkuutta,
- tutkia välineiden ja välineyhdistelmien vaatimia ajanmenekkejä ja kustannuksia,
- laskea sovellutusmetsiköiden avulla otannasta riippumattomien virheiden merkitys koepuumäärään ja
- selvittää samalla tarkkuuden ja kustannusten suhteen optimaalinen mittausvälineyhdistelmä Peräpohjolan oloihin.

Tutkimus on mittausmenetelmien kehittämistä varten pyritty muokkaamaan menetelmätutkimukseksi. Lisäksi sen tarkoituksena on antaa käytäntöä hyödyttäviä viitteitä eri mittausvälineiden ja välineyhdistelmien tarkkuudesta, ajanmenekistä sekä tehokkuudesta.

2. VIRHETEORIASTA

21. Mittausvirhe

Mittausvirhe on tyypillinen otannasta riippumaton virhe, joka syntyy kaikissa mittauksissa, koska absoluuttisen tarkkaa mittausten menetelmää ei ole. Käytännössä mittausten virhe aiheutuu inhimillisistä tekijöistä, välineiden heikosta kunnosta ja epäedullisista mittaolosuhteista. Puiden läpimittojen mittauksessa väärä mittauskorkeus on yleinen virheen aiheuttaja (esim. Tischen-dorf 1927). Mittausvälineen painuminen puun kuoreen (Kennel 1959, 1964), epäsymmetrinen puun poikkileikkaus (esim. Matern 1956) ja mittausvälineen asennon poikkeaminen vaakasuorasta (Tischendorf 1927) aiheuttavat myös virheitä. Ylempien läpimittojen mittauksessa oksisto häiritsee mittauksen teknistä toteutusta ja kaulaimen asteikon lukemista. Asteikon lukeminen voi vaikeutua myös epäsuotuisien valaistusolosuhteiden takia. Puun pituutta mitattaessa virhettä aiheuttavat maanpinnan kaltevuus, optisia mittareita käytettäessä

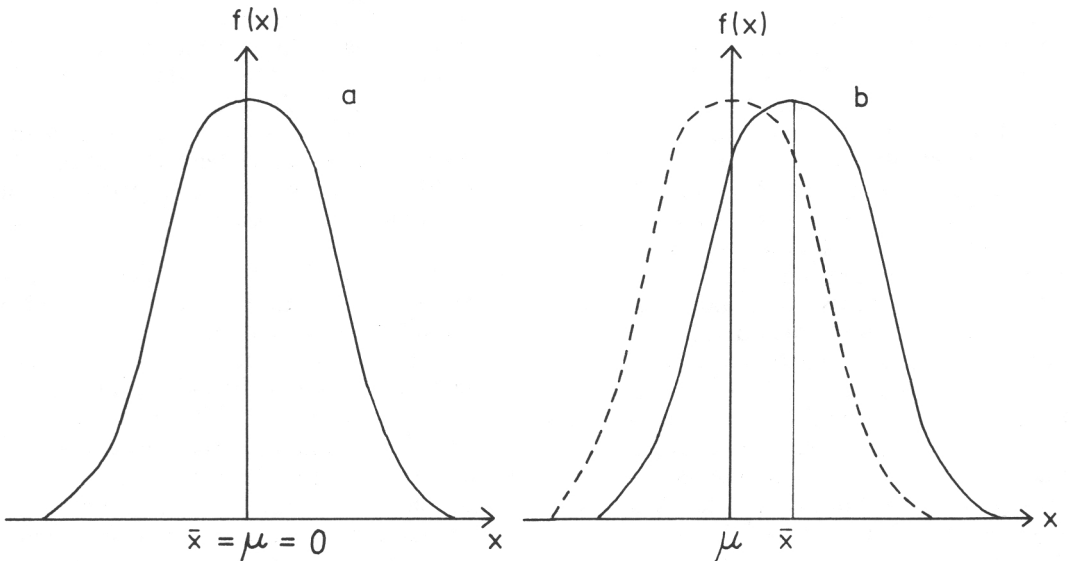
sä väärä mittaustäisyys, puun tasalatvaisuus, vino asento, huojuminen sekä latvuksen huipun peittyminen toisten puiden taakse (Schmid ym. 1971).

Tarkasteltaessa esim. puiden läpimitan mittausta voidaan havaita, että toistettujen mittausten tulokset poikkeavat samaakin välinettä käytettäessä toisistaan. Mittaustapahtuman tavoite onkin, että mitta-arvojen ($\hat{d}$) virheet 1. poikkeamat todellisesta läpimitasta (d) olisivat mahdollisimman pieniä:

$$\min \sum (\hat{d} - d)^2. \quad (1)$$

Mittausvirheille on tyypillistä jakaumaluonne. Niistä voidaan helposti todeta, että

- pienet poikkeamat ovat yleisempiä kuin suuret,
- positiiviset poikkeamat ovat yhtä yleisiä kuin negatiiviset ja
- positiivisten ja negatiivisten sekä pienten ja suurten poikkeamien välillä ei ole kromologista järjestystä.



Kuva 1. Mittausvirheiden harhaton (a) ja harhainen (b) jakauma.
Figure 1. Distribution of unbiased (a) and biased (b) measurement errors.

Välineeseen liittyvät mittausvirheet ($x = \hat{d} - d$) on perinteisesti kuvattu normaalijakaumana, jossa virheet jakautuvat niiden perusjoukon keskiarvon μ ympärille keskihajonnan δ mukaan (kuva 1a). Mittausvirheiden todennäköisyyttä $f(x)$ voidaan tällöin kuvata niiden suhteellisenä jakaumana funktiolla

$$f(x) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\delta}\right)^2} \quad (2)$$

Koska kuvan 1a tapauksessa $\bar{x} = \mu = 0$ eli poikkeamien jakauman odotusarvo on sama kuin perusjoukon vastaava parametri, mittausmenetelmän tulos on harhaton. Jos virheiden keskiarvo $\bar{x}$ kuitenkin poikkeaa nolasta, jakauman kuvaaja asettuu $\bar{x}$:n ympärille (kuva 1b). Tällöin $\bar{x}$ poikkeaa perusjoukon vastaavasta parametrin μ , jolloin kyseiseen mittausmenetelmään liittyy harha (engl. *bias*), jota mittauksen yhteydessä kutsutaan systemaattiseksi virheeksi.

Koska mittausvirheet usein tiedostetaan, pyritään siihen, että ainakin toistettujen mittauksen keskiarvo vastaisi todellista läpimittaa. Tarkasteltaessa asiaa yhtälön (1) avulla saadaan mittaustarkkuudelle A (engl. *accuracy*) odotusarvoyhtälö

$$A^2 = \text{MSE}(\hat{d}) = E(\hat{d} - d)^2, \text{ jossa} \quad (3)$$

MSE = keskineliöpoikkeama
(engl. *mean square error*).

Vietäessä läpimitan mittauksen keskiarvo $E(\hat{d}) = \bar{d}$ lausekkeeseen (3) saadaan edelleen (Cochran 1977, s. 15):

$$A^2 = E[(\hat{d} - \bar{d}) + (\bar{d} - d)]^2 \quad (4)$$

$$= E(\hat{d} - \bar{d})^2 + 2(\bar{d} - d)E(\hat{d} - \bar{d}) + (\bar{d} - d)^2$$

$$= E(\hat{d} - \bar{d})^2 + (\bar{d} - d)^2$$

$$= P^2 + B^2 \quad (5)$$

$$= \text{varianssi} + (\text{harha})^2.$$

Ristitulo supistuu pois, koska tekijä $E(\hat{d} - \bar{d}) = 0$.

Mittaustarkkuus voidaan siis jakaa kahteen virhekomponenttiin. Ensimmäinen komponentti P käsittää satunnaiset poikkeamat mittauksen keskiarvosta. Se kuvaa mittausmenetelmän täsmällisyyttä (engl. *precision*) 1. rinnakkaismittauksen samanlaisuutta. Tätä virhekomponenttia käytetään myös sellaisenaan tarkkuuden kuvaajana. Tällöin oletetaan, että harha on eliminoitavissa mitausohjeita täsmäntämällä. Jos menetelmään

ei liity harhaa ($B^2 \approx 0$), täsmällisyys on sama kuin tarkkuus.

Toinen komponentti B johtuu toistettujen mittauksen keskiarvon poikkeamisesta todellisesta läpimitasta. Mitä paremmin keskiarvo ($\bar{d}$) täsmää todellisen läpimitan (d) kanssa, sitä pienempi virhekomponentti B on. Kyseessä on systemaattinen virhe, joka syntyy mittausvälineen aiheuttamasta harhasta, joka taas aiheuttaa yksittäisen mittauksen poikkeamisen todellisesta arvosta. Virheen suuruus on yleensä vakio, mutta voi vaihdella muuttujan arvon mukaan (Cochran 1977, s. 377—379). Harhaa ei voida poistaa mittausta toistamalla, vaan ainoastaan mittausmenetelmää parantamalla. Sen vuoksi harhan poistaminen on mittausvälineiden ja menetelmien kehittämisen keskeisimpiä tehtäviä.

Edellä esitetyn perusteella voidaan tarkkuudelle ja sen eri komponenteille, harhalle ja täsmällisyydelle, laskea estimaatit. Tarkkuus voidaan laskea keskineliöpoikkeamana yhtälön 5 mukaan. Harhaa kuvaa poikkeamien keskiarvo ja täsmällisyyttä poikkeamien keskihajonta tai yksittäisen poikkeaman keskivirhe.

22. Luokitusvirhe

Mittauksessa päästään vain tiettyyn mitatarkkuuteen, joka riippuu käytetystä mitatasteikosta. Siksi mittauks tulokset ilmaistaan usein luokkina. Mittaustyön ja tulosten rekisteröinnin helpottamiseksi käytetään kuitenkin huomattavasti laajempia luokkia kuin mitä mittaustarkkuus edellyttäisi. Tästä syystä syntyy ns. luokitusvirhettä.

Luokitusvirhettä ovat käsitelleet mm. Tiren (1929), Meyer (1934), Prodan (1965) ja Loetsch ym. (1973). Laasasena ho (1973) on tutkimuksessaan selvästi osoittanut luokitusvirheen merkittävyyden käytettäessä esim. 1 cm:n luokituksen sijasta 2 cm:n luokkia. Luokituksesta aiheutuva varianssi kohosi tällöin nelinkertaiseksi ja kokonaiskuutiomäärän varianssi noin kaksinkertaiseksi.

Mittausvirheiden ehkäiseminen karkeampaa mitta-asteikkoa käyttäen ei siis onnistu, vaan virhe siirtyy luokitusvirheeksi. Sen suuruus riippuu luokakeskiarvojen laskentavasta ja luokkien sisäisestä vaihtelusta. Luokitusvirhettä voidaankin pitää mittausvirheen sellaisena osana, joka tehdään tietoi-

sesti. Sen seurauksia ei ole kuitenkaan käytännössä otettu huomioon. Koepuiden kuutiosisällön määrittämisessä luokitusvirhe sisältyy mittausvirheeseen.

23. Taulukkovirhe

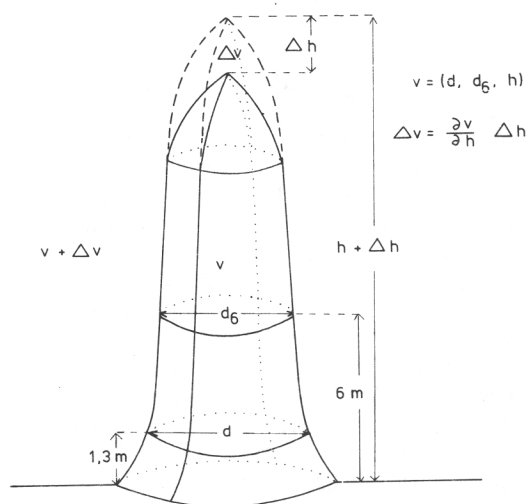
Taulukkovirheellä tarkoitetaan laajojen aineistojen keskiarvoa ilmaisevien taulukoiden ja matemaattisten yhtälöiden sisältämiä virheitä. Se mittaa yksittäisten puiden kuutiosisällön satunnaisten poikkeamien suuruutta niille lasketuista taulukko- tai funktioarvoista. Virhe riippuu pääasiassa sellaisten puiden kuutiomäärävaihtelusta, joilla on samat kuutioimistunnukset (d , d_6 , h). Erot johtuvat runkomuodon vaihtelusta. Taulukkovirhe voi vielä kasvaa taulukoiden ja yhtälöiden laadintavaiheessa. Virheen pienentäminen on mahdollista vain mittaamalla koepuista lisätunnuksia, jotka tuovat olennaista uutta informaatiota kuutiosisällön määrittämiseen. Synä lisätunnusten puuttumiseen ovat mittausvaikeudet tai -kustannukset. Tunnukset voivat olla myös toistaiseksi tuntemattomia, tai niiden vaikutustapaa ei ole vielä kyetty selvittämään taulukoiden tai funktioiden laadinnassa käytetyillä menetelmillä.

Laasasenahon (1976) kuutioimis-yhtälöillä, joissa mittautunnuksina ovat d , d_6 ja h , päästään puulajista riippuen keskimäärin 3,5–5,0 %:n arvion keskivirheeseen puuta kohti. Kahden tunnuksen (d , h) yhtälöissä vastaavat arvot vaihtelevat 7,1–8,3 %:n ja yhden tunnuksen (d) yhtälöissä 18,4–19,0 %:n välillä. Lasketun kuutiomäärän poikkeama oikeasta jää näiden lukujen alapuolelle 68 tapauksessa sadasta.

Ilvessalon (1947) pystypuiden kuutioimistaulukoiden antamat arvot poikkeavat todellisista, päätettiin kuutioimalla saaduista arvoista taulukoiden pohjana olevassa mäntyaineistossa 68 tapauksessa sadasta alle 5 %. Ollinmaa (1953) on käyttänyt kriteerinä Ilvessalon taulukoiden tarkkuutta tutkiessaan poikkeamien itseisarvojen keskiarvoa 1. keskipoikkeamaa. Vertailupuiden keskipoikkeamat ovat seuraavat: mänty 5,0 %, kuusi 4,1 % ja koivu 5,8 %. Ollinmaan tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että poikkeamat ovat em. keskipoikkeamien alapuolella vain 55 tapauksessa sadasta (ks. Loetsch ym. 1973, s. 13).

24. Virhetekijöiden yhdistäminen

Käytännössä on puiden kuutioinnin eri vaiheissa syntyvien virhetekijöiden varianssien määrittäminen vaikeaa. Tämä on johtanut siihen, että yksittäisten puiden osalta on tyydytty vain taulukkovirheeseen. Mittausvirheiden merkitystä on vähätelty siksi, ettei niiden vaikutusta kuutiomäärään ole riittävästi selvitetty.



Kuva 2. Pituuden mittausvirheen (Δh) vaikutus puun kuutiomäärään (v).
Figure 2. The effect of height measurement error (Δh) on stem volume (v).

Tavoiteltua tunnusta, kuten puun kuutiomäärää (v), ei yleensä saada suoraan mittauksen tuloksena, vaan se on useiden yksittäisten mitattujen tunnusten funktio: $v = v(d, d_6, h)$. Jos esim. Δh on puun pituuden mittauksen virhe (kuva 2), on virheelle voimassa likimääräinen riippuvuus

$$\Delta v = \frac{\partial v}{\partial h} \cdot \Delta h, \text{ jossa} \quad (6)$$

$$\Delta v = \text{virhe puun kuutiomäärässä}$$

$$\frac{\partial v}{\partial h} = \text{funktion } v \text{ osittaisderivaatta } h:n \text{ suhteen.}$$

Koska riippuvuus koskee yksittäistä poikkeamaa, se on voimassa myös poikkeamien keskihajonnalle s_h . Osittaisderivaattojen avulla voidaan johtaa myös muiden kuutioimistunnusten mittausvirheiden vaikutukset kuutiomäärään.

Koska mittausvirheet ovat riippumattomia paitsi toisistaan myös taulukkovirheeseen.

tä, voidaan koepuun kuutioimisen virhekomponentit yhdistää virhetekijöiden varianssien kautta (vrt. Roiko-Jokela 1976):

$$s_v^2 = s_t^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial d} \cdot s_d\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial d_6} \cdot s_{d_6}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial h} \cdot s_h\right)^2 \quad (7)$$

jossa

s_v^2 = kuutiomääräarvion varianssi

s_t^2 = taulukkovirheen varianssi

$s_d \cdot \frac{\partial v}{\partial d}$ = rinnankorkeusläpimitan mittauksen virheen vaikutus kuutiomäärään

$s_{d_6} \cdot \frac{\partial v}{\partial d_6}$ = läpimitan d_6 mittauksen virheen vaikutus kuutiomäärään

$s_h \cdot \frac{\partial v}{\partial h}$ = pituuden mittauksen virheen vaikutus kuutiomäärään.

3. TUTKIMUSMENETELMÄ JA -AINEISTO

31. Koejärjestelyt

Mittausvälineet

Koetta suunniteltaessa puun tunnusten mittaukseen pyrittiin valitsemaan eri periaatteilla toimivia laitteita. Kokeiltaviksi valittiin mittauskohteen mukaan kuvassa 3 esitetyt välineet.

Pituudenmittauslaitteista Lönnrothin hypsometri edustaa yksinkertaisia vertailutangon käyttöön perustuvia välineitä. Se on tasajakoinen viivotin, joka asetetaan pystysuorana sellaiselle etäisyydelle silmästä, että puun tyvellä oleva vertailutanko on hypsometrin asteikon osoittamassa välissä. Puun pituus luetaan hypsometrin asteikolta latvan huipun kohdalta. Hypsometrin asteikko jakautuu metrin luokkiin. Tässä tutkimuksessa pyrittiin pituus kuitenkin arvioimaan 10 cm:n tarkkuudella.

Suunto-hypsometrillä mitattaessa tähdätään määrättyä etäisyydeltä puun tyveen ja latvaan. Kummankin tähtäyksen antamat kulmalukemat luetaan asteikosta metreinä. Niiden summa antaa puun pituuden. Mittarin lukematarckuus on 0,25 m. Laitteeseen sisältyy optinen etäisyyden mittari. Suunto-hypsometri on periaatteeltaan samanlainen kuin Blume-Leissin hypsometri, mutta poikkeaa siitä rakenteeltaan. Tavallisesti laitetta pidetään mitattaessa kädessä. Tässä tutkimuksessa Suunto-hypsometri asennettiin lisäksi kameran jalustalle, jolla voitiin parantaa laitteen vakavuutta käsitteeseen verrattuna. Etäisyys puusta mitattiin mittanauhalla.

Mittatanko koostuu n. 1,5 m pitkistä, mitta-asteikolla varustetuista alumiiniputkista, joita liitetään ruuvamalla yhteen niin monta kuin puun pituuden mittaaminen vaatii. Tangon yläpään tähystykseen tarvitaan toinen mittamies. Kun yläpää on puun latvan tasalla, lue-

Schmidin ym. (1971) mukaan pituuden mittauksen virheet ja niiden keskihajonta voivat suurenta puun pituuden kasvaessa. Tällöin keskihajonta on ilmaistava esim. regressioestimaattorilla puun pituuden funktiona.

taan puun pituus rinnankorkeudelle kalibroidusta tangon asteikosta. Laite on tarkoitettu lyhyehköjen puiden mittaukseen, koska pitkän tangon käsittely on hankalaa. Yläpään tähystämiseen voidaan käyttää kiikaria. Mittatangon lukematarckuus on 1 cm.

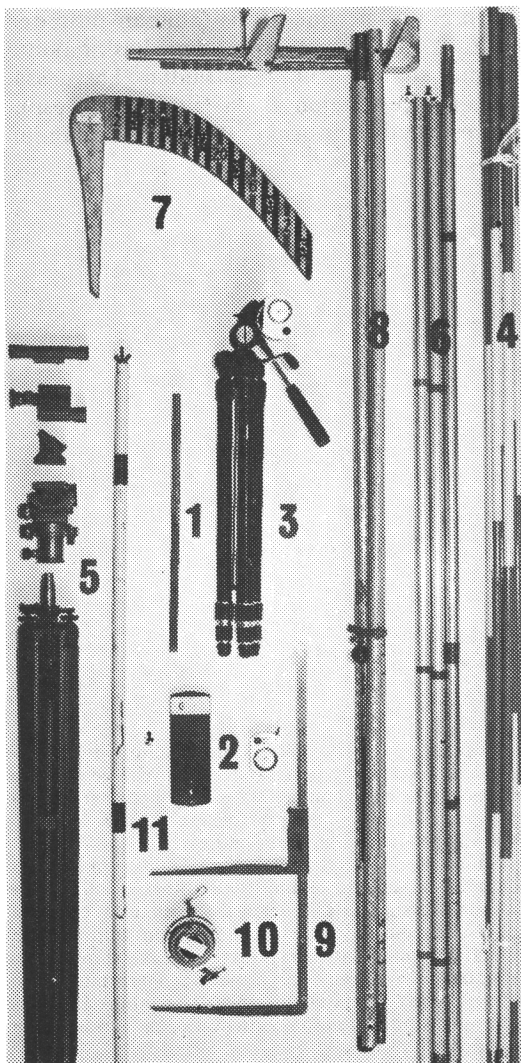
Suuntakehä on optinen laite, jolla voidaan mitata sekä puun pituus että läpimittoja eri korkeuksilta. Laite koostuu varsinaisesta asteikolla varustetusta optisesta tähtäyslaitteesta ja jalustasta. Pituuden mittauksessa tähdätään puun latvaan ja tyveen. Lisäksi mitataan mittanauhalla kojeen etäisyys puusta. Puun pituus lasketaan kulma- ja etäisyyslukemista. Jos pituuksia ei lasketa maastossa, tulosten silmävarainen tarkistus on mahdotonta.

Suuntakehällä läpimittoja mitattaessa tarvittava mitauskorkeus on osoitettava rungolta. Se voidaan tehdä vertailutangolla, esim. latvakaulaimen varrella. Läpimittoja mitattaessa tähdätään rungon laitoihin. Saadut kulmalukemat ja laitteen etäisyys puusta rekisteröidään. Lopullinen läpimita lasketaan niiden avulla. Tulokset voidaan laskea myös maastossa taskulaskimella, johon on talletettu tarvittavat ohjelmat.

Latvakaulain on perinteellinen suomalainen kuuden metrin läpimitan mittausväline, jossa läpimita luetaan kaulaimessa olevalta asteikolta 1 cm:n tasaava luokitusta käyttäen. Kaulaimen tanko on tavallisesti viisi metriä.

Tarkkuuskaulain eroaa latvakaulaimesta siten, että kaulaimen sakaroita voidaan siirtää varren sisällä kulkevan vaijerin avulla. Vaijeria alhaalta kiristettäessä sakarat painuvat runkoa vasten. Mittaustulos voidaan lukea paitsi kaulaimelta (1 cm:n tasaava luokitus) myös varren alapäässä olevalta asteikolta 1 mm:n tarkkuudella.

Rinnankorkeusläpimitan mittauksessa käytettiin tavallisia teräksisiä millimetriasteikolla varustettuja mittasaksia.



Kuva 3. Mittausvälineet. Pituuden mittaus: 1) Lönnrothin hypsometri, 2) Suunto-hypsometri ja latta (= Suunto I), 3) Suunto-hypsometri + kameran jalusta (Suunto II), 4) mittatanko, 5) optinen suuntakehä. Läpimitan d_6 mittaus: 5) optinen suuntakehä, 6 ja 7) latvakaulain ja sen varsi, 8) tarkkuuskaulain. Muut välineet: 9) mittasakset, 10) mittanauha, 11) rinnankorkeuskeppi.

Figure 3. The measuring instruments studied. Height measurement: 1) Lönnroth's hypsometer 2) Suunto altimeter with reference standard for basic distance determination (= Suunto I) 3) Suunto altimeter attached to a tripod (= Suunto II) 4) sectional measuring pole 5) Suuntakehä (an aiming apparatus used in artillery, that can be used as a dendrometer). Upper-diameter measurement: 6) and 7) curved caliper attached to a staff 8) precision caliper. Other instruments: 9) steel caliper 10) tape measure 11) pole for determining breast height.

Koepuuryhmät

Mittauskohteiksi etsittiin Rovaniemen kaupungin männiköistä viisi koepuuryhmää. Ne sijaitsivat yhtä lukuunottamatta n. 300 m:n etäisyydellä toisistaan. Ryhmät pyrittiin valitsemaan siten, että ne edustaisivat tiheydeltään erilaisia metsiköitä, ja että saman metsikön puiden pituudet vaihtelisivat mahdollisimman paljon. Vaatimuksista jouduttiin kuitenkin tinkimään, sillä pisimmät puut sisältävä puuryhmä mitattiin tasaikäisestä ja -pituudesta männiköstä. Ryhmien puiden lukumäärä vaihteli kuudesta kymmeneen. Kaikkiaan mitattaviksi valittiin 38 koepuuta, jotka jakautuivat puuryhmiin taulukon 1 mukaan. Puuryhmien tunnuksista pituuk-sien vaihteluväli edustaa vain mitattuja puita, kun muut koskevat metsikköä.

Tarkkuusmittaukset

Mittauskohteiksi valitut koeput mitattiin kolmella kaksimiehisellä ryhmällä. Koehenkilöitä oli kolme (A, B, C), jotka muodostivat kolme mittausryhmää siten, että kukin toimi sekä mittamiehenä että apumiehenä (A-B, B-C, C-A). Ryhmä mittasi koeputa kuutiomistunnukset d , d_6 ja h . Mittaustilanne pyrittiin saamaan todelliseksi koeputien mittauksen kannalta. Yleensä apumies mittasi puun läpimitat ja mittamies pituuden. Koska koeputien pituuden mittaukseen oli käytettävissä viisi välinettä, ryhmä mittasi kaikki koepuuryhmät peräkkäin samalla välineyhdistelmällä ja vaihtoi sen jälkeen yhdistelmään uuden pituudenmittausvälineen. Läpimitat d mitattiin aina mittasaksilla ja d_6 tarkkuuskaulaimella. Latvakaulaimen ja suuntakehän läpimitan d_6 mittauksen tarkkuus ja ajanmenekki tutkittiin erikseen.

Ennen mittauksen aloittamista koehenkilöt perehtyivät mittausvälineisiin yhtä kauan. Aikaisempaa mittauskokemusta kaikilla koehenkilöillä oli mittasaksien, kaulaimien ja Suunto-hypsometrin käytössä. Kokemus muista välineistä vaihteli. Suuntakehä ja Lönnrothin hypsometri olivat kaikille koehenkilöille outoja ennen harjoittelua.

Koeputien todelliset tunnukset mitattiin vasta koe-keen jälkeen. Pituus kontrolloitiin mittatangolla ja suuntakehällä kahden tarkistusmittaajan toimesta. Läpimitat d_6 tarkistettiin kiipeämällä ja mittasaksia käytäten. Rinnankorkeusläpimittaa ei mitattu enää tarkistusmittauksen yhteydessä, koska mittauksessa selvitetiin vain satunnaisvaihtelu. Suunto-hypsometrin optinen etäisyyssmittari tarkistettiin erillisin mittauksin. Kaiken kaikkiaan pituus h ja läpimitat d mitattiin 540 kertaa ja läpimitat d_6 654 kertaa (taulukko 2).

Käytettävissä olleella mittatangolla ei voitu mitata yksinkertaisia puita, joten koeputien lukumääräksi jäi 28. Suuntakehän pituudenmittauksista poistettiin lopullisessa laskennassa kymmenen havaintoa karkeiden luvunvirheiden vuoksi.

Aikatutkimukset

Mittausryhmän ajanmenekit mitattiin samanaikaisesti koeputien mittauksen yhteydessä, koska tarkoituksena oli selvittää todellista mittaustilannetta vastavia ajanmenekkejä. Mittausryhmän kumpaakin jäsentä seurasi oma aikatutkija, joka kirjasi koehenkilön työvaiheiden ajanmenekit. Mittausajat rekisteröitiin osavaiheittain siksi, että kaksimiehisessä ryhmässä mittaustulokset

Taulukko 1. Puuryhmien metsikkötunnuksia.
Table 1. Stand parameters for the tree groups.

Puuryhmä Tree group	Pohja- pinta-ala, m ² /ha Basal area, m ² /ha	Keski- läpimitta, cm Mean diameter, cm	Runko- luku/ha Number of stems per ha	Keski- pituus, m Mean height, m	Pituuksien vaihteluväli, m Height variation, m	Mitattuja puita, kpl Number of trees measured
1	13	17,7	627	12,4	9,1—14,8	7
2	19	25,6	443	15,1	14,0—19,2	6
3	28	15,6	3843	12,1	9,1—16,6	8
4	24	16,8	2348	11,5	8,6—14,2	7
5	22	26,8	431	17,7	16,8—18,2	10

Taulukko 2. Mittausten lukumäärä eri välineillä.
Table 2. Number of measurements taken with the various instruments.

Puun tunnus ja mittausväline Tree parameter and measuring instrument	Koehenkilö — Observer			Yhteensä Total
	A	B	C	
Pituus — Height				
Lönnroth	38	38	38	114
Suunto I	38	38	38	114
Suunto II	38	38	38	114
Mittatanko Measuring pole	28	28	28	84
Suuntakehä	33	35	36	104
Läpimitta d ₆ Upper-diameter				
Latvakaulain Curved caliper	38	38	38	114
Tarkkuuskaulain Precision caliper	142	142	142	426
Suuntakehä	38	38	38	114
Läpimitta d — D.b.h. Mittasakset Steel caliper	180	180	180	540

ta voitaisiin muodostaa kolmimiehisen mittausryhmän puukohtaiset ajanmenekit osa-aikoja yhdistelemällä. Menetelmien kehittämistä varten osa-aikojen selvittäminen oli myös tarpeen. Aikatutkimustulosten laskennassa ei otettu huomioon maaston vaikeutta eikä puuston tiheyttä. Niiden vaikutus on ajanmenekeissä erittelemättömänä mukana. Aikatutkimusaineisto koostuu samoista mittauskerroista kuin tarkkuusmittaukset, koska ajat rekisteröitiin tarkkuusmittausten yhteydessä.

32. Optimointi

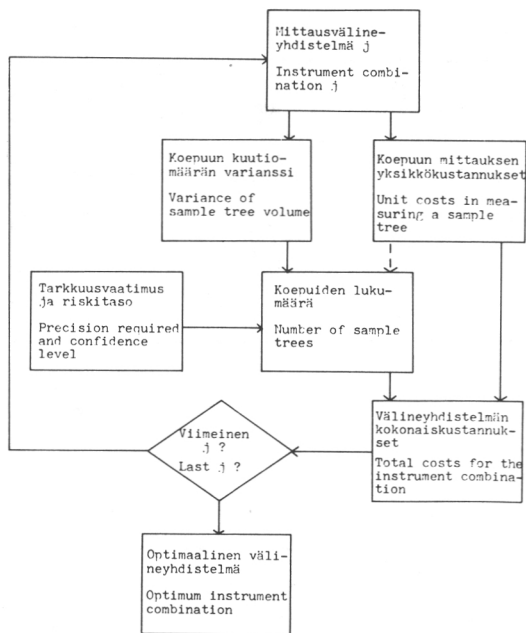
Menetelmä

Edellä kuvatuista aineistoista on selvitettävissä koepuun mittauksen varianssit ja vastaavat ajanmenekit, joista päästään puukohtaisiin yksikkökustannuksiin. Eri mittausvälineyhdistelmät voidaan tulosten laskennan jälkeen asettaa paremmuusjärjestykseen mittaus-tarkkuuden ja ajankäytön perusteella. Tunnetaan tark-in koepuun mittausmenetelmä ja myös halvin mene-telmä. Tavoitteena on kuitenkin optimaalinen välineyh-distelmä, jolloin kysymys on siitä, miten tarkkuus ja ai-

ka saadaan yhteismitalliseksi.
Ongelman ratkaisemiseksi on siirryttävä koepuusta koko metsikön kuutiomäärän arviointiin ja siinä erityi-sesti otantavaiheeseen (kuva 4). Tämä on aiheellista sii-tä syystä, että harvoin ollaan kiinnostuneita metsikön yksittäisen puun kuutiomäärästä. Mielenkiinto kohdis-tuu yleensä metsikön koko puustoon, joka arvioidaan johdannossa esitetyn kaksivaiheisen otannan periaat-tein. Tavoitteena on metsikön keskikuutiomäärän arvi-ointi sellaisella mittausvälineyhdistelmällä, joka johtaa haluttuun tarkkuuteen mahdollisimman pienin kustan-nuksin.
Metsikön keskikuutiomäärän keskivirhe ($s_{\bar{v}}$) riippuu yksittäisen koepuun kuutiomääräarvion varianssista (s_v^2 ; ks. yhtälö 7, s. 9) ja koepuiden lukumäärästä (n):

$$s_{\bar{v}}^2 = \frac{s_v^2}{n}$$
 (9)

Riittävän suurelle puujoukolle voidaan jokaisella mit-tausvälineyhdistelmällä saavuttaa sama tarkkuus. Tar-vittavien koepuiden lukumäärä riippuu tällöin puun mittauksen tarkkuudesta ja on suoraan verrannollinen



Kuva 4. Optimaalisen mittausvälineyhdistelmän ratkaisukaavio.
Figure 4. Schematic solution to finding optimum instrument combination.

kuutiomäärän varianssiin (Schmid ym. 1971). Tämä otantateorian tarjoama yhteys tekee koepuunmittauksen tarkkuuden ja ajankäytön keskenään vertailukelpoisiksi ja mahdollistaa optimaalisen välineyhdistelmän ratkaisun.

Koska tavoitteeksi on asetettu metsikön keskikuutiomäärän arvio tietyllä tarkkuudella ja riskillä, eikä tarkkuusvaatimusta aseteta kullekin läpimittaluokalle erikseen, on ensin ratkaistava mitä koepuukiintiöintiä käytetään. Jos koepuiden mittausvirheiden ohella myös mittausaika muuttuu puiden koon funktiona, joudutaan koepuut kiintiöimään optimaalisesti läpimittaluokkiin kustannukset huomioon ottaen.

Optimaalinen kiintiöinti takaa pienimmät kokonaiskustannukset metsikön keskikuutiomäärän arvioinnissa eri välineyhdistelmille, mutta se ei ratkaise vielä niiden keskinäistä paremmuutta. Siksi tulokset on laskettava kaikille mittausvälineyhdistelmille käyttämällä samaa tarkkuusvaatimusta ja riskitasoa. Silloin niiden kokonaiskustannukset ovat keskenään vertailukelpoisia. Pienimmät kustannukset antava välineyhdistelmä on optimaalinen koepuiden mittausmenetelmä.

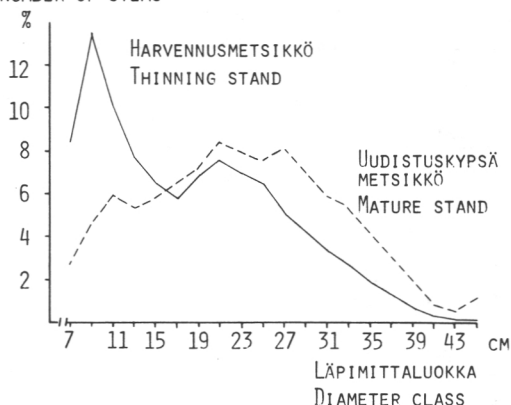
Sovellutusmetsiköt

Otannasta riippumattomien virheiden vaikutusta koepuumääriin sekä mittausvälineyhdistelmien tehokkuutta tutkittiin edellisen luvun mukaan soveltamalla saatuja tarkkuus- ja ajankäyttötuloksia kahteen erilaiseen peräpohjolaiseen puustoon. Koska käytettävissä ei ollut valmiita Peräpohjolan mäntymetsiköiden läpimita-, pituus- ja yksikkökuutioaineistoja, muodostettiin puustot käyttäen hyväksi metsähallituksen PMP-lei-

mikko-olosuhteita käsittelevää erittäin laajaa koepuua-ineistoa (PMP-leimikoiden...) sekä Laasasen-ahon (1976) mäännyn kuutioimisfunctioita.

PMP-aineistosta saatiin peräpohjolaisten tukkipuuvastaisten avohakkuuleimikoiden sekä ensimmäisellä harvennuksella käsiteltyjen leimikoiden läpimittaluokittaiset runkoluvut ja yksikkökuutioluvut. Yksikkökuutioluvut tasoitettiin käyriksi käyttäen parhaaksi osoittautunutta mallia $V = e(a + b \ln d + c (\ln d)^4)$ (Schmid-Haas 1976). Yksikkökuutiot osoittautuivat kummassakin aineistossa niin samanlaisiksi, että lopullinen tasoitus tehtiin vain avohakkuuaineistolle ja samaa tasoituskäyrää käytettiin kummassakin puustossa.

RUNKOLUKU NUMBER OF STEMS



Kuva 5. Sovellutusmetsiköiden suhteelliset runkolukusarjat.

Figure 5. The relative stem-diameter distributions for the stands used in the study.

Läpimittaluokittainen pituuskäyrä tasoitettiin piehekköstä PMP-aineiston osasta Prodanin kehittämällä mallilla $d^2/h - 1,3 = a + bd + cd^2$ (ks. Schmid 1967, s. 372). Myös pituuskäyrä oli yhteinen kummallekin puustolle. Peräpohjolan avohakkuuaineistosta muodostettua puustoa kutsutaan tässä tutkimuksessa uudistuskypsäksi metsiköksi ja se vastaa keskimääräisiä peräpohjolaista uudistuskypsiä männiköitä. Ensimmäisellä harvennuksella käsitellyistä leimikoista muodostettua puustoa kutsutaan harvennusmetsiköksi ja se vastaa puolestaan peräpohjolaista kasvatusmänniköitä. Metsiköiden suhteelliset runkolukusarjat selviävät kuvasta 5 ja läpimittaluokittaiset yksikkökuutiot, läpimitat d_6 ja pituudet liitteestä 1.

4. TULOKSET

41. Mittaustarkkuus

Pituuden mitta

Pituuden mittaussvälineiden ja koehenkilöiden mittaussvirheiden välisiä eroja tarkasteltiin kaksisuuntaisella varianssianalyysillä (liite 2). Mittatanko jätettiin analyysistä pois sen vuoksi, että se ei ollut vertailukelpoinen muiden välineiden kanssa, koska sillä ei pystytty mittaamaan yli 17 metrin puita.

Välineiden välivaihtelu oli analyysissä erittäin merkitsevä, koehenkilöiden merkitsevä ja yhteisvaihtelu erittäin merkitsevä. Koska yhteisvaikutus oli merkitsevä, ei välineiden ja koehenkilöiden välisiä eroja voitu testata tavanomaisesti toisistaan riippumatta. Siksi analysointia jatkettiin vertaamalla vielä välivaihtelua yhteisvaihteluun (vrt. Mäkinen 1974, s. 97). Kumpikaan F-arvo ei ollut merkitsevä. Tämä tarkoittaa sitä, että vaikka F-testin tulokset eroavat merkittävästi mittaussvälineen ja koehenkilön suhteen, erot johtuvat erittäin merkitsevistä yhteisvaikutuksesta. Mittaussvälineiden väliset erot selittävät kaikkea huolimatta kolme viidesosaa kokonaisvaihtelusta.

Koehenkilöiden ja koepuiden välisiä eroja tutkittiin myös mittaussvälineittäin kaksisuuntaisella varianssianalyysillä, jossa kussakin ruudussa oli yksi havainto (liite 3). Ainoastaan Lönnrothin hypsometrillä koehenkilöiden väliset erot olivat merkitseviä. Puiden väliset erot olivat merkitseviä vain mittatangolla. Systemaattinen virhe l. harha oli

suuri pitkillä puilla, koska tanko kiemurtelee jonkin verran. Mittaussvälineiden harhat esitetään taulukossa 3. Ne testattiin t-testillä.

Harha oli suurin Suunto-hypsometrillä käsiteltä mitattaessa, $-0,38$ m. Eräänä syynä aliarvion oli käytetyn hypsometrin optinen etäisyysmittari, joka erikseen tutkittuna antoi $0,24$ m liian pitkän mittaussäilyyden mittaussäilyyden puuhun. Etäisyysmittari ei kuitenkaan selitä koko virhettä, koska Suunto II, jota käytettäessä etäisyys puuhun mitattiin mittanauhalla, antoi $-0,12$ m:n systemaattisen aliarvion. Mittatangon yliarvio oli keskimäärin $0,08$ m. Myös Lönnrothin hypsometrin harha oli merkitsevä koehenkilön C suurten yliarvioiden takia.

Harhan riippuvuutta puun pituudesta tutkittiin regressioanalyysillä. Mittaussvirhe riippui merkittävästi puun pituudesta vain kahdella välineellä, Suunto II:lla ja suuntakehällä, joilla regressiosuoran kulmakerroin poikkesi t-testissä jokseenkin merkittävästi nolasta. Suunto II:n mittaajista kahdella kulmakerroin ei ollut merkitsevä, mutta kolmannella niin merkitsevä, että koehenkilöiden yhteinen regressiosuora oli merkitsevä 5 %:n riskillä. Regressiosuorien kertoimet, korrelaatiokertoimet ja kulmakertoimien t-arvot ilmenevät liitteestä 4.

Mittaussvälineiden täsmällisyyttä tutkittiin poikkeamien keskihajonnan avulla (taulukko 4). Pienin keskihajonta saatiin mittatan-

Taulukko 3. Pituuden mittaussvälineiden harha.
Table 3. Bias of the height meters.

Koehenkilö Observer	Lönnroth	Suunto I	Suunto II	Mittatanko Measuring pole	Suuntakehä
Poikkeamien keskiarvo, m — Mean of the errors, m					
A	-0,16	-0,40*	-0,18	0,07	0,04
B	0,15	-0,37**	-0,14	0,05	0,09
C	0,90***	-0,38**	-0,03	0,11*	-0,05
Kaikki Average	0,30**	-0,38***	-0,12*	0,08**	0,03

* ero jokseenkin merkitsevä ($P < 0,05$)

difference nearly significant

** ero merkitsevä ($P < 0,01$)

difference significant

*** ero erittäin merkitsevä ($P < 0,001$)

difference very significant

Taulukko 4. Pituuden mittausvälineiden täsmällisyys.
Table 4. Precision of the height meters.

Koehenkilö Observer	Lönnroth	Suunto I	Suunto II	Mittatanko Measuring pole	Suuntakehä
Poikkeamien keskihajonta, m — Standard deviation of the errors, m					
A	1,18	0,90	0,73	0,18	0,66
B	0,58	0,81	0,49	0,16	0,28
C	1,11	0,71	0,43	0,25	0,47
Kaikki Average	1,08	0,80	0,56	0,20	0,49

golla, jolla se vaihteli alle 17 metrin puilla 0,16–0,25 m:n välillä. Kaikkien koehenkilöiden hajonta oli 0,20 m, joka on 1,6 % mitattangolla mitattujen puiden keskipituudesta (12,5 m). Toiseksi pienin hajonta saatiin suuntakehällä, jolla se oli 0,49 m. Keskihajonta oli suurin Lönnrothin hypsometrillä, 1,08 m eli 7,7 % mitattujen puiden keskipituudesta (14,0 m). Koehenkilöillä hajonta vaihteli 0,58–1,18 m:n välillä.

Poikkeamien keskihajonnan riippuvuutta puun pituudesta tarkasteltiin jakamalla ensin puut neljään pituusluokkaan. Sen jälkeen laskettiin luokille virheiden keskihajonnat. Hajonnan riippuvuus puun pituudesta ei näyttänyt millään välineellä selvältä. Keskihajonnat vaihtelivat epäsäännöllisesti luokkien välillä.

Läpimitan d_6 mittaus

Läpimitan d_6 mittauksessa osoittautuivat tavallinen latvakaulain ja tarkkuuskaulain suunnilleen yhtä tarkkoiksi. Tarkkuuskaulaimella ilmeni kuitenkin t-testissä erittäin merkitsevä –0,4 cm:n harha. Suuntakehä oli selvästi epätarkin (taulukko 5).

Latva- ja tarkkuuskaulaimen välisiä eroja testattiin koehenkilöittäin t-testillä. Suuntakehä poikkesi niin selvästi muista välineistä,

ettei sitä otettu analyysiin mukaan. Koehenkilöillä A ja C erot kaulaimien välillä eivät olleet merkitseviä. Sen sijaan koehenkilöllä B ero oli erittäin merkitsevä. Tämä aiheutti sen, että kaikkien koehenkilöiden yhdistetyissä tuloksissa ero oli myös erittäin merkitsevä. Koehenkilöiden välisiä eroja tutkittiin välineittäin yksisuuntaisella varianssianalyysillä. Erot eivät olleet merkitseviä.

Poikkeamien keskihajonta oli suurin suuntakehällä, jolla se oli 3,47 cm. Latvakaulaimen ja tarkkuuskaulaimen virheet olivat huomattavasti pienemmät, 0,80 ja 0,84 cm.

Rinnankorkeusläpimitan mittaus

Rinnankorkeusläpimitan mittauksen tarkkuutta tutkittiin mittasaksilla, joissa oli mm-jaotus. Tarkastelussa rajoituttiin täsmällisyyteen, koska läpimittojen todellisia arvoja ei mitattu, eikä harhaa näin ollen voitu selvittää. Poikkeamien keskihajonta koehenkilöiden välillä vaihteli seuraavan asetelman mukaan:

Koehenkilö	Keskihajonta, cm
A	0,28
B	0,28
C	0,26
Kaikki	0,27

Taulukko 5. Läpimitan d_6 mittausvälineiden harha (B) ja täsmällisyys (P) senttimetreinä.
Table 5. Bias (B) and precision (P) of the upper-diameter instruments (in centimeters).

Koehenkilö Observer	Latvakaulain Curved caliper		Tarkkuuskaulain Precision caliper		Suuntakehä	
	B	P	B	P	B	P
A	–0,50**	1,01	–0,28**	1,01	1,23*	3,19
B	0,11	0,61	–0,43***	0,74	1,86***	2,19
C	0,27**	0,49	–0,49***	0,73	3,10***	4,47
Kaikki Average	–0,04	0,80	–0,40***	0,84	2,06***	3,47

Taulukko 6. Pituuden mittauksen puukohtaisten ajanmenekkien keskiarvot ($\bar{x}$, cmin) ja variaatiokertoimet (C, %). Mittatangon ajat laskettu vain alle 17 m:n puista.

Table 6. Time consumption averages ($\bar{x}$, cmin) and coefficients of variation (C, %) in measuring tree height. Times for the measuring pole are calculated only for trees less than 17 metres in height.

Koehenkilö Observer	Lönnroth		Suunto I		Suunto II		Mittatanko Measuring pole		Suuntakehä	
	$\bar{x}$	C	$\bar{x}$	C	$\bar{x}$	C	$\bar{x}$	C	$\bar{x}$	C
A	128	40	116	37	208	24	359	35	300	40
B	90	49	112	28	150	26	350	37	281	49
C	86	53	93	34	161	24	266	34	210	34
Kaikki Average	101	50	107	34	173	29	325	38	264	44

1 cmin = 1 min/100

Mittasaksien hajonta oli 0,27 cm, joka on 1,4 % mitattujen puiden keskiläpimitasta (19,4 cm). Eräs syy mittauskorkeuden vaihteluun oli mittauskorkeuden määrittämisen vaikeus, joka todettiin puun kylkeen mitausten yhteydessä tehdyistä merkkiraapaisuista.

42. Ajanmenekit ja kustannukset

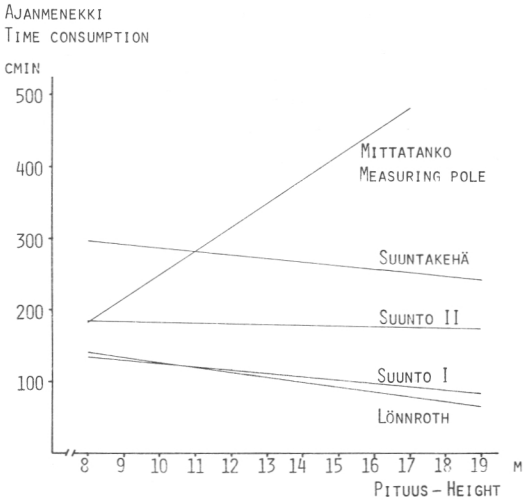
Pituudenmittauksessa pienin puukohtainen ajanmenekki saavutettiin Lönnrothin hypsometrillä. Aikaa kului puuta kohden keskimäärin 101 cmin. Suunto I:llä ja Suunto II:lla ajat olivat 107 ja 173 cmin. Suurin ajanmenekki syntyi mittatangolla, jolla aikaa kului yli kolme minuuttia puuta kohden, vaikka sillä ei kyetty kaikkia puita edes mittaamaan (taulukko 6).

Pituuden mittauksen ajanmenekkien välistä eroja testattiin varianssianalyysillä, jossa tekijöinä olivat mittausväline ja koehenkilö. Mittatanko jätettiin pois samasta syystä kuin aikaisemmista analyyseistä (liite 5).

Koska välineiden ja koehenkilöiden yhdysvaikutus oli jokseenkin merkitsevä, välineiden väliset erot erittäin merkitseviä ja koehenkilöiden väliset erot merkitseviä, jatkettiin analyysiä vertaamalla välivaihteluja yhdysvaihteluun. Koska näin saadut F-arvot olivat merkitseviä, on sekä mittausvälineiden välillä että koehenkilöiden välillä merkitseviä eroja, vaikka välineiden ja koehenkilöiden välillä onkin yhdysvaikutusta. Suurimman osan vaihtelusta selitti mittausväline.

Pituuden mittauksen ajanmenekin riippuvuutta puun pituudesta tutkittiin regressio-

analyysillä (kuva 6). Pituus vaikutti eniten mittatangon ajanmenekkiin, joka lisääntyi jyrkästi puun pituuden kasvaessa. Muilla välineillä ajanmenekki päinvastoin väheni loivasti. Mittatangon lisäksi regressioorien kulmakertoimet poikkesivat merkitsevästi nolasta vain Lönnrothin hypsometrillä ja Suunto I:llä. Ajanmenekin pieneneminen puun pituuden kasvaessa johtuu tässä aineistossa siitä, että puusto oli niillä koealoilla harvempaa, joilla puut olivat pitkiä. Näillä koealoilla mittaus oli helpompaa ja ajanmenekit saattoivat myös tästä syystä jäädä pienemmiksi.



Kuva 6. Pituuden mittausajan riippuvuus puun pituudesta.
Figure 6. Time consumed in height measurement as affected by tree height.

Esitutkimuksessa läpimitan d_6 mittausai-
ka oli yhtä suuri tarkkuuskaulaimella ja lat-
vakaulaimella. Läpimitan d_6 mittaus kesti
eri koehenkilöillä keskimäärin 30—35 cmin.
Suuntakehällä mitattaessa ajanmenekit oli-
vat vastaavasti 73—141 cmin. Mittaustulok-
set tarkistettiin mittasaksilla tikapuita käyt-
täen, jolloin myös kiipeämisaajanmenekit tut-
kittiin. Siirtymiseen puulta puulle, kiipeämi-
seen ja läpimitan mittaukseen kului tarkis-
tusmittaajalla aikaa keskimäärin 241 cmin.

Koepuumittauksen puukohtaiset ajanme-
nekit sovellettiin koskemaan kolmimiehistä
mittausryhmää, vaikka aikatutkimukset
suoritettiin kaksimiehisellä ryhmällä. Ryh-
mien käyttämissä välineyhdistelmissä mitat-
tiin aina d mittasaksilla ja d_6 tarkkuuskau-
laimella. Tarkasteltavat välineyhdistelmät
poikkesivat siten toisistaan vain pituuden-
mittausvälineen suhteen. Ryhmän ajanme-
nekit muodostuivat suuntakehää, mittatan-
koa, Suunto I ja Suunto II käytettäessä pel-
kästään pituudenmittaajan ajanmenekistä,
koska näillä välineillä mitattaessa pituuden-
mittaaja oli selvästi hitain työryhmän jäsen.
Sen sijaan Lönnrothin hypsometriyhdistel-
mässä ryhmän ajanmenekki muodostui apu-
miehen ajanmenekistä, joka oli 109 cmin/
puu.

Puuston kuutiomäärän arvioinnissa koe-
puiden mittaus on vain yksi osavaihe. Esim.
pystymittauksen muut vaiheet ovat leimikon
suunnittelu, leimaus ja puiden luku, lasken-
nan valmistelu ja matkat (P e n n a n e n
1978). Koska muut kuin koepuumittausvai-
heen kustannukset ovat koepuumäärästä
riippumattomia, ei niitä oteta optimointiso-
vellutuksessa huomioon. Koepuumittauksen
suhteellisina kustannuksina käytetään ajan-
menekkejä (vrt. S c h m i d ym. 1971).

43. Tehokkuus

Tehokkain välineyhdistelmä koepuiden
mittaukseen ratkaistiin sovellutusmetsiköi-
den avulla. Niiden läpimittaluokittaiset run-
kolukujakaumat muodostivat laskennan pe-
rustan. Läpimittaluokittaiset taulukkovi-
rheiden varianssit saatiin L a a s a s e n -
a h o n (1976) kuutioimisfunktioista. Mit-
tausvirheiden aiheuttamat välineittäiset vir-
hevaikutukset laskettiin osittaisderivaattojen
(liite 1) avulla (taulukko 7). Näistä saatiin eri
välineyhdistelmien varianssit yhtälön 7 mu-
kaan.

Taulukko 7. Puukohtaiset eri virhelähteiden keski-
määräiset varianssit esimerkkimetsi-
köissä.

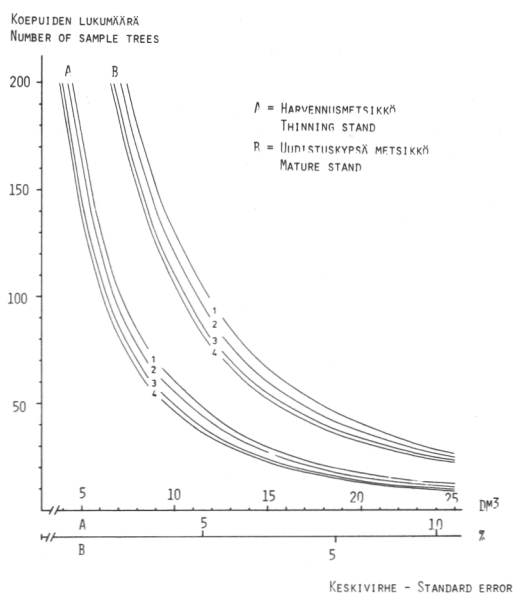
Table 7. Mean variances for the various sources
of errors per tree in the stands used in
the study.

Virhelähde Source of error	Harvennusmetsikkö Thinning stand	Uudistuskypsä metsikkö Mature stand
	Varianssi, Variance, [dm ³]	
h		
Lönnroth	202	422
Suunto I	112	234
Suunto II	54	114
Suuntakehä	42	87
d_6		
Latvakaulain Curved caliper	192	350
Tarkkuuskaulain Precision caliper	212	386
Suuntakehä	3589	6528
d		
Mittasakset Steel caliper	7	10
Funktio Function	154	316

Mittausvirhe käsivaraisella Suunto-hypso-
metrillä vaikuttaa koepuun kuutiosisältöön
huomattavasti. Sen varianssi on vain neljän-
neksen pienempi kuin kuutioimisfunktion
aiheuttama varianssi. Suurin varianssi pi-
tuuden mittauksessa on Lönnrothin hypso-
metrillä ja pienin suuntakehällä. Virhe lat-
vakaulaimella aiheuttaa tuntuvasti suurem-
man virheen kuutiosisältöön kuin funktio.
Tarkkuuskaulaimen mittausvirhe on vaiku-
tukseltaan samaa suuruusluokkaa. Mitta-
saksien varianssi on muihin verrattuna mer-
kitykseltään vähäinen. Funktion aiheuttama
varienssi on mittausvälineestä riippuen vain
noin kolmannes koepuun koko varianssista.
Uudistuskypsässä metsikössä varianssi on
kaksinkertainen harvennusmetsikköön ver-
rattuna. Tämä jää usein huomaamatta, kos-
ka tarkastelu suoritetaan suhteellisenä.

Välineyhdistelmä, jossa puun pituus mi-
tattiin mittatangolla, poistettiin lopullisesta
tarkastelusta, koska sillä ei voitu mitata so-
vellutusmetsiköiden pisimpiä puita. Näin
optimointiin otettiin vain neljä välineyhdis-
telmää, jotka poikkesivat toisistaan pituu-
den mittausvälineen suhteen. Läpimittojen
mittaus perustui mittasaksien ja latvakaulai-
men käyttöön.

Yhdistelmille laskettiin läpimittaluokittaiset kokonaisvarianssit. Siinä turvauduttiin jälleen sovellutusmetsiköihin, koska kokonaisvarianssit riippuvat paitsi edellä selvitetystä puun mittaustarkkuudesta ja kuutiointitavasta, myös puiden pituuden ja muodon vaihtelusta sekä läpimittaluokituksista. Metsiköissä puiden kuutiosisältö vaihteli suhteellisesti kussakin läpimittaluokassa likimain yhtä paljon. Samanpaksuisten puiden variaatiokerroin oli 15 %. Esimerkkitaipauksissa käytettiin yhden ja kahden senttimetrin luokitusta, jonka aiheuttama varianssi perustui tasajakumaoletukseen (L a a s a s e n a h o 1973). Yhdistämällä eri tekijät päädyttiin läpimittaluokkien kokonaisvariansseihin, joita käytettiin koepuiden lukumäärän selvityksessä.



Kuva 7. Koepuiden lukumäärän riippuvuus tarkkuusvaatimuksesta.
Figure 7. Sampling intensity as affected by degree of precision.

Sovellutusmetsiköissä koepuut kiintiöitiin tuhannelle puulle (ks. C o c h r a n 1977, s. 105). Näin suuressa puujoukossa voitiin kaikille välineyhdistelmille asettaa sama tarkkuusvaatimus 5 %:n riskitasolla. Kuvassa 7 esitetään koepuiden lukumäärän riippuvuus keskimääräisen yksikkökuution keskivirheestä. Kysymyksessä on välineyhdistelmä, jossa pituus on mitattu Suunto I:llä. Tarkasteluun sisältyy eri virhetekijöiden vaikutus koepuumäärään. Ylin käyrä (1) ilmaisee koepuutarpeen kaikkien tekijöiden ollessa mukana ja käytettäessä 2 cm:n luokitusta. Seuraavasta (2) puuttuu mittausvirheiden vaikutus, jonka osuus on n. 10 % koepuumäärästä. Kolmannessa on lisäksi vähennetty luokituksen (8 %) ja neljännessä kuutiointifunktion vaikutus koepuumäärään. Alin käyrä kuvaa näin koepuutarvetta pelkästään puiden koon ja muodon vaihteluun perustuen. Tämä vaihtelu riippuu puuston rakenteen tasaisuudesta ja on siten kullekin metsikölle ominainen.

Jokaiselle välineyhdistelmälle iteroitiin koepuiden lukumäärät. Kokonaiskustannukset saatiin kertomalla yksikkökustannukset koepuumäärällä (taulukko 8). Taulukossa 8 on pienintä uudistuskypsän metsikön arvoa merkitty yhdellä.

Suunto I-välineyhdistelmä osoittautui kokonaiskustannuksiltaan halvimmaksi l. optimaaliseksi koepuun mittaamenetelmäksi. Huolimatta siitä, että esim. Suunto II-yhdistelmällä koepuumäärä oli pienempi, ratkaisi mittausaika menetelmien lopullisen järjestyksen. Suunto II-yhdistelmä on jopa 58 % kalliimpi kuin optimaalinen yhdistelmä, jäädessä selvästi huonommaksi kuin Lönnrothyhdistelmä, joka kilpaili tasavertaisesti optimaalisen yhdistelmän kanssa.

Kokonaiskustannussuhteet säilyvät käytettäessä tavanomaisia tarkkuusvaatimustasoja. Ne ovat myös likimain samat uudistus-

Taulukko 8. Mittausvälineyhdistelmien suhteelliset kokonaiskustannukset.
Table 8. Relative total costs of the instrument combinations.

Välineyhdistelmä pituusmittarin mukaan Instrument combination according to height meter	Suhteelliset kokonaiskustannukset Relative total costs	
	Uudistuskypsä metsikkö Mature stand	Harvennismetsikkö Thinning stand
Lönnroth	1,04	0,47
Suunto I	1,00	0,45
Suunto II	1,58	0,72
Suuntakehä	2,41	1,10

kypsälle ja harvennusmetsikölle, jos käytetään molemmille samaa suhteellista tarkkuutta. Tilanne muuttuu olennaisesti, jos metsiköissä pyritään samaan absoluuttiseen

tarkkuuteen, jolloin harvennusmetsikön kokonaiskustannukset ovat vajaa puolet uudistuskypsän metsikön kustannuksista.

5. TULOSTEN TARKASTELU

Puun pituuden mittaukseen tarkoitettujen laitteiden tarkkuutta on tutkittu runsaasti eri maissa. Useissa tutkimuksissa tarkkuutta ei ole selvitetty käytännön olosuhteissa, joten tulokset ovat vain teoreettisia. Tässä tutkimuksessa tavoiteltiin todellisissa kenttäolosuhteissa tapahtuvaa mittauksia, jossa saataisiin esille niin laitteesta, koehenkilöstä kuin mittauskohteesta johtuvat virheet.

Lönnrothin hypsometrilla puun pituutta mitattaessa sekä harha että täsmällisyys vaihtelivat paljon koehenkilöiden kesken. Keskimääräinen 2,1 %:n (0,30 m) systemaattinen yliarvio johtui suureksi osaksi koehenkilöön C liittyvästä suuresta harhasta. *Vuokilan* (1960) mukaan systemaattinen yliarvio oli samalla välineellä vain 0,5–1,0 % mitattujen puiden keskipituudesta (19,3 m). Arvion keskivirheeksi *Vuokila* sai 2,8 % (0,54 m). Tulos poikkeaa huomattavasti nyt saadusta tuloksesta: 7,7 % (1,08 m) puiden keskipituudesta (14,0 m). Tämä antaa aiheen epäillä, että välineen käyttöä ei oltu harjoiteltu riittävästi.

Suunto-hypsometrilla mitattaessa systemaattinen aliarvio oli kaikilla koehenkilöillä lähes sama, keskimäärin 2,7 % (—0,38 m). Suurin osa harhasta selittyy optisen etäisyysmittarin antamasta 0,24 m:n yliarviosta. Tämä ei kuitenkaan selitä koko harhaa, koska aliarvio oli mitattaessa etäisyys mittanauhalla 0,9 % (—0,12 m). Lopun selittää mittajien päännliike latvaan tähdättäessä. Poikkeamien keskihajonta oli melkein sama kaikilla koehenkilöillä, keskimäärin 5,7 % (0,80 m). Käyttämällä *Suunto-hypsometriä* asennettuna kameran jalustaan ja mittaamalla etäisyys puuhun mittanauhalla, harha pieneni 0,9 %:iin (—0,12 m) ja poikkeamien keskihajonta 4,0 %:iin (0,56 m). Hajonnan pieneminen johtuu siitä, että jalustalta on tukevampi mitata kuin käsivaralta. Em. tulokset vastaavat hyvin *Fitjen* (1967) tulok-

sia, joissa systemaattinen yliarvio oli 1,7 % (0,35 m) ja keskihajonta 4,0 % (n. 0,85 m). Sen sijaan *Erikssonin* (1970) tulokset poikkeavat jonkin verran tämän tutkimuksen tuloksista täsmällisyyden osalta. *Erikssonin* mittauksissa harha oli 0,8 % (n. 0,20 m) ja poikkeamien keskihajonta 1,8 % (n. 0,43 m). *Erikssonin* mukaan myös puulaji vaikuttaa mittaus-tarkkuuteen.

Mittatanko oli tarkin kokeen pituuden mittausvälineistä, sillä harha oli kaikilla koehenkilöillä keskimäärin 0,6 % (0,08 m) ja keskihajonta 1,6 % (0,20 m) mitattujen puiden keskipituudesta (12,5 m). Tanko tuntui erityisen käyttökelpoiselta lyhyissä, alle 12 m:n pituisissa tiheissä metsiköissä. Samantapaiseen tulokseen päätyivät *Brenneman* (1951) sekä *Aird ja Stone* (1954), joiden mukaan teleskooppivartisilla bambu- ja alumiinitangoilla voidaan mitata 30–50 jalan (9–15 m) puita. Laitteita suositeltiin nuoriin, tiheisiin metsiköihin.

Suuntakehä oli toiseksi tarkin kokeiluista mittausvälineistä. Sillä mitattaessa toistuvat samat ongelmat ja edut, jotka optisilla laitteilla yleensä tulevat esille. Optisten laitteiden tarkkuutta puun tunnusten mittauksessa on tutkittu runsaasti, esim. *Hunt* (1959), *Fricke* (1967), *Bruce* (1975) ja *Brickel* (1976). Tämän tutkimuksen tärkein tulos suuntakehämittauksessa on harhan puuttuminen lähes täysin. Laitteen käyttöä tutkimustehtävissä voidaan näin perustella.

Läpimitan d_6 mittauksessa oli yllättävintä se, että tavallinen latvakaulain oli yhtä tarkka kuin tarkkuuskaulain. Keskihajonnat (0,80 ja 0,84 cm) olivat suunnilleen samat, mutta tarkkuuskaulaimella esiintyi erittäin merkitsevää systemaattista aliarviota (—0,40 cm). Vaijerin venyminen oli todennäköisin syy aliarvioon, koska kuoren painumista ja

kulumista mittauskohdissa ei sanottavasti havaittu. Vuokila (1960) toteaa latvakaulaimen systemaattiseksi yliarvioksi 0,5—1,5 %. Tässä tutkimuksessa systemaattinen aliarvio oli 0,3 % (—0,04 cm). Arvion keski-
virheeksi Vuokila sai 3,25 % (0,66 cm), joka on vähemmän kuin nyt saatu tulos 5,3 % (0,81 cm). Suuntakehällä mitatun yläläpimitan systemaattinen yliarvio oli varsin suuri, 2,06 cm eli 13,6 % keskiläpimitasta, samoin kuin poikkeamien keskihajonta, joka oli 3,47 cm eli 22,8 % keskiläpimitasta. Suuntakehän läpimitan mittaustarkkuus oli siis huono.

Koepuumittausryhmän puukohtaiset ajanmenekit noudattivat mittatangolla, suuntakehällä ja Suunto II:lla mitattaessa pituudenmittaajan ajanmenekkiä. Sen sijaan nopeilla välineillä, Lönnrothin hypsometrilla ja Suunto I:llä, pituuden mittaus kävi niin nopeasti, että apumiesten läpimitojen mittaukseen käyttämä aika muodostui mittausryhmässä minimitekijäksi tietyn suuruisilla puilla. Vaikka pituuden mittaus Lönnrothin hypsometrilla oli jonkin verran nopeampaa kuin Suunto I:llä, tilanne oli päinvastainen tarkasteltaessa koko ryhmän aikoja. Tämä johtuu siitä, että latan kuljetaminen (Suunto I) ja kiinnittäminen on helpompaa kuin vertailutangon (Lönnroth). Jos latvakaulain lisäksi on vertailutankona, kuten tässä tutkimuksessa, jää mittamiehelle ja apumiehelle turhaa odotusaikaa, ellei työtä kyetä paremmin rationalisoimaan. Tässä mielessä Suunto on joustavampi kuin Lönnroth. Välineiden väliset erot eivät ajankäytön suhteen ole kuitenkaan suuret.

Erikssonin (1970) mukaan kuluu Suunto-hypsometrilla pituuden mittaukseen aikaa puuta kohden 2—4 min. Tulosta ei voitane yleistää todelliseen kenttäolosuhteissa tapahtuvaan koepuumittaukseen. Pennasen (1978) kuutiometriä kohden laske-
tusta ajanmenekkiaineistosta runkokohtaisiksi muunnetut koepuumittauksen ajat vaihtelevat korjuuteknisten olosuhteiden mukaan 0,24—1,40 min:n välillä. Ajanmenekit ovat suhteellisen pienet verrattuna tämän tutkimuksen keskimääräisiin puukoh-
taisiin aikoihin. Tästä huolimatta koepuumittaukseen kuluu Pennasen mukaan 18—45 % pystymittauksen kokonaisajasta. Koepuumittaus on siis merkittävä vaihe puuston arvioinnissa.

Tutkittaessa koepuumittaukseen käytetty-

jen välineiden tarkkuutta ja tehokkuutta on tavallisesti selvitetty erikseen laitteiden har-
ha ja täsmällisyys sekä ajanmenekki, mutta varsinaista optimaalista tai tehokkainta väli-
neyhdistelmää ei ole Suomen oloihin määri-
tetty. Koepuotannassa ei myöskään mit-
tausvirheiden vaikutusta ole otettu huomi-
oon, vaikka se on lähes kolminkertainen
kuutioimisfunktion aiheuttamaan varians-
siin verrattuna. Seurauksena on koepuiden
määrän aliarvio, joka käytetyissä sovellutus-
metsiköissä oli 10 %. Koepuiden lisäys on
paljolti riippuvainen siitä perusvaihtelusta,
joka vallitsee puiden välillä.

Homogeenisessa metsikössä mittausvirhei-
den osuus suhteellisesti kasvaa. Sama pätee
luokitusvirheeseen, jolle on käytännössä an-
nettu liian vähän painoa. Siirtyminen kah-
den senttimetrin luokituksesta yhteen vä-
hentää koepuiden määrää merkittävästi
(8 %), eikä toimenpide vaadi lisäkustannuk-
sia.

Tehokkaimmaksi mittausvälineyhdistel-
mäksi osoittautui kummassakin peräpohjo-
laisessa sovellutusmetsikössä välineyhdistel-
mä, joka koostui Suunto-hypsometrillä (kä-
sivaralta), latvakaulaimesta ja mittasaksista.
Tulos on ehkä jossain määrin odotettu, kos-
ka käytännön mittauksissa on päädytty
usein kyseiseen yhdistelmään. Lähes samaan
tulokseen päästäneen, vaikka käytettäisiin
tarkkuuskaulainta ja Lönnrothin hypsomet-
riä edellisten asemesta. Koska Suunto I-yh-
distelmä oli edullisin kahdessa hyvinkin eri-
laisessa peräpohjolaishuoneen metsikössä, voi-
daan sitä suositella Pohjois-Suomeen. Poik-
keuksena ovat nuoret, tiheät keskipituudel-
taan alle 12 m:n mittaiset metsiköt, joissa
voidaan suositella pituudenmittaukseen mit-
tatankoa. Näissä metsiköissä sen käyttö pää-
see oikeuksiinsa.

Tässä tutkimuksessa ei ole lähemmin
puututtu tutkimusaiheeseen olennaisesti liit-
tyvään koepuiden otantateoriaan, koska
otanta muodostaa sellaisenaan oman ongel-
makenttensä. Saadut tulokset viittaavat kui-
tenkin siihen, että koepuiden otantaa olisi
kehitettävä luomalla puiden pituus- ja muo-
tovaihteluun aputunnuksia, jotka selittävät
osan varianssista. Mittausvälineiden kehite-
lyssä tulisi mittaukseen kuluvaan ajanme-
nekkiiin kiinnittää suurempaa huomiota
kuin mittaustarkkuuteen, sillä aika vaikut-
taa lineaarisesti kustannuksiin, mittaustark-
kuus sen sijaan neliöjuuren kautta.

6. YHDISTELMÄ

Tutkimuksessa selvitettiin virhelähteitä, virhekomponentteja sekä virheiden yhdistämistä koskevan tarkastelun jälkeen männyn kuutiomistunnusten mittaamiseen käytettyjen välineiden tarkkuutta ja ajanmenekkejä. Sen jälkeen määritettiin näitä hyväksi käytetään tehokkain mittausvälineyhdistelmä koepuun mittaukseen Peräpohjolan oloihin. Lisäksi analysoitiin mittausvirheiden osuutta koepuun kuutiomäärän varianssista sekä tarkasteltiin mittausvirheiden vaikutusta koepuutoksen kokoon.

Puun pituuden mittaukseen käytettävistä välineistä oli tarkin mittatanko, jolla systemaattinen yliarvio oli 0,08 m ja poikkeamien keskihajonta 0,20 m. Välineellä pysyttiin mittaamaan vain alle 17 m:n puita. Toiseksi tarkin oli suuntakehä, joka antoi käytännöllisesti katsoen harhattomia mitaustuloksia. Sen hajonta oli noin puoli metriä. Lähes samaan täsmällisyyteen ylsi kameran jalustaan asennettu Suunto-hypsometri (Suunto II), jolla kuitenkin ilmeni lievää harhaa. Käsivaraisella Suunnolla (Suunto I) keskihajonta kohosi jo 0,8 m:iin. Heikoimman tuloksen antoi Lönnrothin hypsometri, jolla sekä harha että täsmällisyys vaihtelivat paljon koehenkilöiden välillä. Sen hajonta oli noin metri.

Läpimitan d₆ mittauksessa tavallinen latvakaulain osoittautui yhtä tarkaksi kuin tarkkuuskaulain. Niiden hajonta oli noin 0,8 cm. Tarkkuuskaulaimella esiintyi kuitenkin systemaattista aliarviota. Suuntakehän läpimitan mitaustarkkuus oli huono. Mittasaksien tarkkuus rinnankorkeusläpimitan mittauksessa oli hyvä. Sen hajonta (0,3 cm) johtui mitaustarkkuuden vaihtelusta.

Mittausvälineyhdistelmien puukohtaiset ajanmenekit riippuivat yleensä pituuden mittauksesta. Vain nopeimmalla välineellä, Lönnrothin hypsometrillä, apumiehen ajanmenekki muodosti ryhmän mittausajan.

Suunto I oli lähes yhtä nopea kuin Lönnroth. Niillä kului aikaa puuta kohden runsas minuutti. Suunto II:lla aika kohosi yli 1,7 min:n ja suuntakehällä 2,6 min:n. Hitain väline oli mittatanko (3,2 min), jolla ajanmenekki riippui selvästi puun pituudesta. Muilla välineillä vastaavaa riippuvuutta ei todettu. Tarkkuus- ja latvakaulaimen ajanmenekit olivat yhtä suuret.

Tehokkaimmaksi muodostui välineyhdistelmä, jossa koepuu mitattiin käsivaraisella Suunto-hypsometrillä, tavallisella latvakaulaimella ja mittasaksilla. Lähes samaan tulokseen päästään, vaikka käytettäisiin tarkkuuskaulainta ja Lönnrothin hypsometriä kahden ensin mainitun asemesta. Suunto II-yhdistelmä on n. 60 % ja suuntakehä-yhdistelmä 140 % kalliimpi kuin optimaalinen yhdistelmä. Tiheissä alle 12 m:n puustoissa on mittatangon käyttö perusteltua. Tutkimustarkoituksissa suuntakehä puoltaa myös paikkaansa hyvällä pituudenmittaustarkkuudellaan.

Koepuutoksen kokoa määritettäessä tuli ottaa huomioon myös mittausvirheet, koska niiden vaikutus optimaalisella välineyhdistelmällä mitattaessa on noin kolminkertainen esim. taulukkovirheeseen verrattuna. Muussa tapauksessa koepuiden lukumäärä jää liian pieneksi: tässä tutkimuksessa 10 %. Rakenteeltaan tasaisissa metsiköissä mittausvirheiden merkitys suhteellisesti kasvaa. Sama pätee läpimittaluokituksista aiheutuvaan virheeseen, jolle on käytännössä pantu myös liian vähän painoa. Siirtyminen kahden senttimetrin luokituksista yhteen vähensi käytetyissä metsiköissä koepuiden määrää 8 %.

Mittausvälineiden käytön perusteellinen harjoittelu on erittäin tärkeää. Samoin välineiden huolto ja säännöllinen tarkistus on välttämätöntä. Näin välttyään harhalta ja voidaan parantaa mittauksen täsmällisyyttä.

7. LÄHDELUETTELO

- AIRD, P.L. & STONE, E.L. 1954. A 45-foot tree measuring pole. *J. For.* 52(3):203—204.
- BRENNEMAN, D.L. 1951. Measuring tree heights in dense young stands. *J. For.* 49(6):445—447.
- BRICKEL, J.E. 1976. Bias and precision of the Barr and Stroud dendrometer under field conditions. USDA For. Serv. Res. Paper. INT—186. Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- BRUCE, D. 1975. Evaluating accuracy of tree measurements made with optical instruments. *For. Sci.* 21:421—426.
- COCHRAN, W.G. 1977. Sampling techniques. 3rd edition. John Wiley & Sons.
- ERIKSSON, H. 1970. Om mättningsfel vid höjdmätning av stående träd med olika instrument. Summary: On measuring errors in tree height determination with different altimeters. *Rapp. Uppsats. Instn. Skogshögsk.* 19.
- FITJE, A. 1967. Feil ved høydemåling på enkelttraer. Summary: Errors in the height measurement of individual trees. *Medd. Norske Skogsforsøksv.* 84:103—137.
- FRICKE, H.-P. 1967. Ein Instrument zur Messung stehenden Bäume. *Rapp. Uppsats. Instn. Skogshögsk.* 13.
- HUNT, E.V. Jr. 1959. A time and accuracy test of some hypsometers. *J. For.* 57(9):641—643.
- ILVESSALO, Y. 1947. Pystypuiden kuutiomistaulukot. Summary: Volume tables for standing trees. *Commun. Inst. For. Fenn.* 34.4.
- KENNEL, R. 1959. Die Genauigkeit von Kluppung und Umfangsmessung nach einem Vergleichsversuch. *Forstwiss. Cbl.* 78(7/8):243—251.
- 1964. Erfahrungen mit der Umfangsmessung. *Forstwiss. Cbl.* 83(8/10):314—320.
- LAASASENAHO, J. 1973. Unequal probability sampling by DBH cumulator. Seloste: Koepuiden valinta kuutiomäärän summaajalla. *Commun. Inst. For. Fenn.* 79.6.
- 1976. Männyn, kuusen ja koivun kuutiomisyhtälöt. Julkaisematon lisensiaattityö. Moniste. Metsänarvioimistieteen laitos. Helsingin yliopisto. Helsinki.
- LOETSCH, F., ZÖHRER, F. & HALLER, K.E. 1973. Forest inventory. Volume II. München.
- MATERN, B. 1956. On the geometry of the cross-section of a stem. *Meddelanden från statens skogsforskningsinstitut.* 46(11).
- MEYER, H.A. 1934. Die rechnerischen Grundlagen der Kontrollmethoden. Zürich.
- MÄKINEN, Y. 1974. Tilastotiedettä biologeille. Tilastotieteen ja tietojenkäsittelyn alkeet. 3. painos. Moniste. Turku.
- NYSSÖNEN, A., KILKKI, P. & MIKKOLA, E. 1967. On the precision of some methods of forest inventory. Seloste: Eräiden metsänarvioimismenetelmien tarkkuudesta. *Acta For. Fenn.* 81(4):1—60.
- ROIKO-JOKELA, P. & KILKKI, P. 1971. Studies on improvement of the efficiency of systematic sampling in forest inventory. Seloste: Systemaattiseen otantaan perustuvan metsän inventoinnin tehokkuudesta. *Acta For. Fenn.* 116.
- OLLINMAA, P.J. 1953. Kuutiomiskaavojen ja kuutiomistaulukoiden tarkkuudesta kokonaisten runkojen kuutiomisessa. Summary: The accuracy of some volume formulas and volume tables in the cubing of entire trunks. *Metsätaloudellinen Aikakauslehti* 1:22—28 ja 2:56—60.
- PENNANEN, O. 1978. Pysty- ja jälkimittauksen ajamenekki. Summary: Expenditure of time in measurement on the stump and after cutting. *Metsätalon tiedotus* 347. Helsinki.
- PMP-leimikoiden korjuutekniset olosuhteet. (ei vuosil.) V. 1976 lasketut leimikot. Metsähallitus, kehittämisjaosto. Hirvas.
- PRODAN, M. 1965. Holzmesslehre. Frankfurt.
- ROIKO-JOKELA, P. 1976. Die Schaftformfunktion der Fichte und die Bestimmung der Sortimentsanteile am stehenden Baum. *Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchsw.* 52(1):1—84.
- SCHMID, P., ROIKO-JOKELA, P., MINGARD, P. & ZOBEIRY, M. 1971. The optimal determination of the volume of standing trees. *Mitt. Forstl. Vers. Anst.* 91:31—48.
- SCHMID-HAAS, P. 1976. Zur Anwendung von Schaftformfunktionen in der forstlichen Praxis. *Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchsw.* 52(1):87—97.
- SCHMIDT, A. 1967. Der rechnerische Ausgleich von Bestandeshöhenkurven. *Forstwiss. Cbl.* 86(6):370—382.
- SEPPÄLÄ, R. 1971. Variable probabilities in sample-tree selection. Seloste: Vaihtelevat poimintatodennäköisyydet koepuuotannassa. *Commun. Inst. For. Fenn.* 74.4.
- TIREN, L. 1929. Über Grundflächenberechnung und ihre Genauigkeit. *Meddelanden från statens skogsförsöksanstalt* 25:229—304.
- TISCHENDORF, W. 1927. Lehrbuch der Holzmassenermittlung. Berlin.
- VUOKILA, Y. 1960. Pituus- ja kapenemismittausten tarkkuudesta. Summary: On the accuracy of height and taper measurements. *Metsätaloudellinen Aikakauslehti* 11:381—382, 411.

8. SUMMARY

The study examines the sources of errors, error components and combined errors involved in the measurement of sample trees. The precisions and biases of the instruments used and the time consumption characteristics of each instruments when measuring stem volume parameters for Scots pine are then examined. With this information an optimum instrument combination for Finnish Lapland is proposed. In addition, an analysis is made of the significance of measurement errors in the variance occurring in sample tree volume calculations. Finally, the effect of measurement errors on sampling intensity is examined.

The sectional measuring pole was found to be the most accurate of the instruments used in measuring tree height. It gave a systematic over-estimate of 0,08 m and a standard deviation of 0,20 m. However, it could only be used for measuring trees less than 17 m in height. Next in order of accuracy was the Suuntakehä which gave practically unbiased results. The standard deviation for the Suuntakehä was about half a metre. Nearly the same order of accuracy was obtained with the Suunto altimeter attached to a camera tripod (Suunto II) although a small bias was observed with this instrument. In the case of the hand-held Suunto (Suunto I) the standard deviation rose as high as 0,8 m. The poorest results were obtained with the Lönnroth hypsometer, bias and accuracy varied widely between observers taking part in the experiment. Deviation for the Lönnroth hypsometer was about a metre.

The common curved caliper was as accurate as the precision caliper in measuring upper-diameters at 6 m. Its deviation was approximately 0,8 cm. A systematic under-estimation was noted with the precision caliper. Diameter readings obtained with the Suuntakehä were quite inaccurate. The steel caliper was accurate in measuring the d.b.h. A standard deviation of 0,3 cm was caused by variations in the elevation of the point of measurement.

Time consumption per tree for the instrument combinations was generally dependent on height measurement. It was only in the case of quickest instrument (the Lönnroth hypsometer) that the assistant's time con-

sumption featured in the group's measurement time. The Suunto I was almost as fast as the Lönnroth hypsometer. The time spent per tree with these instruments was a little over one minute. With Suunto II it rose to 1,7 min and with the Suuntakehä 2,6 min. The sectional measuring pole was the slowest (3,2 min) with time consumption being clearly linked to tree height. No such dependence was observed with the other instruments. The precision caliper and common curved caliper were equal to one another with regard to time consumption.

The most effective instrument combination was that of the hand-held Suunto-altimeter, common curved caliper and steel caliper. Almost the same can be achieved even if the first two are replaced by Lönnroth hypsometer and precision caliper. The Suunto II-combination is about 60 % and the Suuntakehä-combination 140 % more expensive than the optimum combination.

The sectional measuring pole is applicable in dense stands up to 12 m in height. The Suuntakehä is well suited for research purposes owing to its high degree of accuracy in height measurement.

Measurement errors should be attended to when determining sample size. Their effect when measuring with the optimum instrument combination is, to take an example, approximately triple that of the table error. If this not considered the sample tree number will turn out to be too small (in the case of this study by 10 %). The significance of measurement errors increases in stands possessing an even structure. The same holds for the errors occurring during diameter classification. This is also given insufficient attention in practice. In consequence of narrowing the diameter class from 2 cm down to 1 cm the sample tree number was decreased by 8 %.

Through schooling in the use of measurement instruments is of extreme importance. The instruments also require regular servicing and inspection. These things having been achieved, bias is circumvented and precision improved.

Liite 1. Sovellutusmetsiköiden läpimittaluokittaiset tunnusten d_6 , h ja v arvot sekä Laasasenahon funktioiden osittaisderivaattojen arvot (dm^3) kuutioimistunnusten suhteen.
Appendix 1. The values obtained for the parameters d_6 , h and v by diameter class in the stands used in the study. The partial derivatives (in dm^3) of Laasasenaho's functions in relation to volume determination parameters are also given.

d cm	d_6 cm	h m	v dm^3	$\frac{\partial v}{\partial d}$	$\frac{\partial v}{\partial d_6}$	$\frac{\partial v}{\partial h}$
7	—	5,9	14,0	4,0	—	— 1,6
9	2,8	7,2	26,3	5,3	1,7	— 0,5
11	5,6	8,5	44,9	6,4	3,4	0,2
13	8,0	9,6	69,8	7,3	5,3	1,3
15	10,2	10,5	101,3	8,2	7,5	2,7
17	12,3	11,4	139,9	9,1	9,9	4,4
19	14,3	12,3	185,9	9,9	12,5	6,3
21	16,3	13,0	239,4	10,6	15,3	8,6
23	18,3	13,7	300,7	11,3	18,2	11,2
25	20,2	14,3	369,8	12,0	21,2	14,0
27	22,1	14,9	446,8	12,6	24,3	17,1
29	24,0	15,4	531,7	13,2	27,4	20,6
31	25,9	15,9	624,6	13,8	30,7	24,3
33	27,8	16,4	725,4	14,3	34,0	28,2
35	29,6	16,8	834,1	14,8	37,4	32,5
37	31,5	17,2	950,6	15,3	40,8	37,0
39	33,4	17,5	1074,9	15,7	44,3	41,8
41	35,2	17,9	1206,7	16,1	47,8	46,8
43	37,0	18,2	1346,2	16,5	51,3	52,1
45	38,9	18,5	1493,0	16,8	54,9	57,6

Liite 2. Mittausvirheiden varianssitaulu.
Appendix 2. Analysis of variance of measurement errors.

Vaihtelun aiheuttaja <i>Source of variation</i>	Neliösumma <i>Sum of squares</i>	Vapaus- asteet <i>Degrees of freedom</i>	Varianssi <i>Variance</i>	F-arvo <i>F-value</i>
Väline <i>Instrument</i>	27,206	3	9,069	16,253***
Koehenkilö <i>Observer</i>	6,358	2	3,179	5,697**
Väline x koehenkilö <i>Instrument x observer</i>	16,915	6	2,819	5,052***
Jäännös <i>Residual</i>	241,979	434	0,558	

* ero jokseenkin merkitsevä (P< 0,05)
difference nearly significant
** ero merkitsevä (P< 0,01)
difference significant
*** ero erittäin merkitsevä (P< 0,001)
difference very significant

Liite 3. Mittausvirheiden välineittäinen varianssitalau.
Appendix 3. Analysis of variance of measurement errors, by instruments.

Väline <i>Instrument</i>	Vaihtelun aiheuttaja <i>Source of variation</i>	Neliö- summa <i>Sum of squares</i>	Vapaus- asteet <i>Degrees of freedom</i>	Varianssi <i>Variance</i>	F-arvo <i>F-value</i>
Lönnroth	Puu — <i>Tree</i>	27,958	37	0,776	0,705
	Henkilö <i>Observer</i>	22,382	2	11,252	10,220***
	Jäännös <i>Residual</i>	81,443	74	1,101	
	Yhteensä <i>Total</i>	131,783	113	1,166	
Suunto I	Puu — <i>Tree</i>	28,849	37	0,780	1,302
	Henkilö <i>Observer</i>	0,017	2	0,009	0,015
	Jäännös <i>Residual</i>	44,298	74	0,599	
	Yhteensä <i>Total</i>	73,164	113	0,648	
Suunto II	Puu — <i>Tree</i>	14,081	37	0,380	1,343
	Henkilö <i>Observer</i>	0,448	2	0,224	0,792
	Jäännös <i>Residual</i>	20,963	74	0,283	
	Yhteensä <i>Total</i>	35,492	113	0,314	
Mittatanko <i>Measuring pole</i>	Puu — <i>Tree</i>	1,822	26	0,070	2,800**
	Henkilö <i>Observer</i>	0,054	2	0,027	1,080
	Jäännös <i>Residual</i>	1,306	52	0,025	
	Yhteensä <i>Total</i>	3,183	80	0,040	
Suuntakehä	Puu — <i>Tree</i>	11,144	37	0,301	1,440
	Henkilö <i>Observer</i>	0,321	2	0,161	0,770
	Jäännös <i>Residual</i>	13,345	64	0,209	
	Yhteensä <i>Total</i>	24,810	103	0,241	

Liite 4. Mittausvirheen (d,m) riippuvuus puun pituudesta (h,m) eri välineillä. Regressio-suoran $d = a + bh$ kertoimet, kulmaker-toimen t-arvo ja korrelaatiokerroin r.

Appendix 4. Dependence of measurement error (d,m) on tree height (h,m), by instruments. Coefficients for the regression equation $d = a + bh$, t-value for the slope and correlation coefficient r are given.

Mittaus- väline <i>Instrument</i>	Kertoimen arvo Value of coefficient		t-arvo t-value	r
	a	b		
Lönnroth	0,613	-0,023	0,715	0,067
Suunto I	0,311	-0,047	1,985*	0,184
Suunto II	0,040	-0,011	0,694	0,065
Mittatanko	0,017	0,005	0,530	0,060
Suuntakehä	-0,440	0,033	2,300*	0,222*

Liite 5. Pituuden mittauksen puukohtaisten ajanmenekkien varianssitaulu.
Appendix 5. Analysis of variance of time consumed in tree height measurement.

Vaihtelun aiheuttaja <i>Source of variation</i>	Neliösumma <i>Sum of squares</i>	Vapausasteet <i>Degrees of freedom</i>	Varianssi <i>Variance</i>	F-arvo <i>F-value</i>
Väline — <i>Instrument</i>	176,883	3	58,961	149,250***
Koehenkilö <i>Observer</i>	18,393	2	9,196	23,279**
Väline x koehenkilö <i>Instrument x observer</i>	8,507	6	1,418	3,589*
Jäännös <i>Residual</i>	180,949	434	0,417	

ODC 524

ISBN 951-40-0344-6

ISSN 0015-5543

HYPPÖNEN, M. & ROIKO-JOKELA, P. 1978. Koepuiden mittauksen tarkkuus ja tehokkuus. Summary: On the accuracy and effectivity of measuring sample trees. *Folia For.* 356:1—25.

The study examines the sources of errors, error components and combined errors involved in the measurement of sample trees. The precisions and biases of the instruments used and the time consumption characteristics of each instrument when measuring stem volume parameters for Scots pine are then examined. With this information an optimum instrument combination for Finnish Lapland is proposed. In addition, an analysis is made of the significance of measurement errors in the variance occurring in sample tree volume calculations. Finally, the effect of measurement errors on sampling intensity is examined.

Authors' address: The Finnish Forest Research Institute, Rovaniemi Research Station, Eteläranta 55, SF-96300 Rovaniemi 30.

ODC 524

ISBN 951-40-0344-6

ISSN 0015-5543

HYPPÖNEN, M. & ROIKO-JOKELA, P. 1978. Koepuiden mittauksen tarkkuus ja tehokkuus. Summary: On the accuracy and effectivity of measuring sample trees. *Folia For.* 356:1—25.

The study examines the sources of errors, error components and combined errors involved in the measurement of sample trees. The precisions and biases of the instruments used and the time consumption characteristics of each instrument when measuring stem volume parameters for Scots pine are then examined. With this information an optimum instrument combination for Finnish Lapland is proposed. In addition, an analysis is made of the significance of measurement errors in the variance occurring in sample tree volume calculations. Finally, the effect of measurement errors on sampling intensity is examined.

Authors' address: The Finnish Forest Research Institute, Rovaniemi Research Station, Eteläranta 55, SF-96300 Rovaniemi 30.

ODC 524

ISBN 951-40-0344-6

ISSN 0015-5543

HYPPÖNEN, M. & ROIKO-JOKELA, P. 1978. Koepuiden mittauksen tarkkuus ja tehokkuus. Summary: On the accuracy and effectivity of measuring sample trees. *Folia For.* 356:1—25.

The study examines the sources of errors, error components and combined errors involved in the measurement of sample trees. The precisions and biases of the instruments used and the time consumption characteristics of each instrument when measuring stem volume parameters for Scots pine are then examined. With this information an optimum instrument combination for Finnish Lapland is proposed. In addition, an analysis is made of the significance of measurement errors in the variance occurring in sample tree volume calculations. Finally, the effect of measurement errors on sampling intensity is examined.

Authors' address: The Finnish Forest Research Institute, Rovaniemi Research Station, Eteläranta 55, SF-96300 Rovaniemi 30.

ODC 524

ISBN 951-40-0344-6

ISSN 0015-5543

HYPPÖNEN, M. & ROIKO-JOKELA, P. 1978. Koepuiden mittauksen tarkkuus ja tehokkuus. Summary: On the accuracy and effectivity of measuring sample trees. *Folia For.* 356:1—25.

The study examines the sources of errors, error components and combined errors involved in the measurement of sample trees. The precisions and biases of the instruments used and the time consumption characteristics of each instrument when measuring stem volume parameters for Scots pine are then examined. With this information an optimum instrument combination for Finnish Lapland is proposed. In addition, an analysis is made of the significance of measurement errors in the variance occurring in sample tree volume calculations. Finally, the effect of measurement errors on sampling intensity is examined.

Authors' address: The Finnish Forest Research Institute, Rovaniemi Research Station, Eteläranta 55, SF-96300 Rovaniemi 30.

- No 311 Takalo, Sauli & Sauvala, Kari: Havaintoja metsurin suojainten kestävyyydestä ja sen mittaamisesta.
Observations on the durability and testing of protective clothing for chain saw workers.
- No 312 Leikola, Matti, Metsämuuronen, Markku, Räsänen, Pentti K. & Taimisto, Erkki: Männyn viljelytaimistojen kehitys Lounais-Suomessa vv. 1967—1975.
The development of Scots pine plantations in south-western Finland in 1967—1975.
- No 313 Kolari, Kimmo, Paavilainen, Eero & Raitio, Hannu: Männyn juuristosuhteista Kivisuon kasvuhäiriöalueella.
Pine root condition and growth disturbances.
- No 314 Anttila, Tuula & Lähde, Erkki: Lannoituksen vaikutus paperikenoissa kasvatettujen männyn taimien kehitykseen taimitarhassa.
Effect of fertilization on the development of containerized pine seedlings in a nursery.
- No 315 Kanninen, Kaija: Palkkausmuodot ja niiden vaikutus metsätoissa.
Forms of remuneration and their influence on forest work.
- No 316 Mäkelä, Markku: Leimikoittainen metsätähdemäärä.
The amounts of logging residues and stump and root wood at certain work sites.
- No 317 Kaunisto, Seppo: Ojituksen tehokkuuden ja lannoituksen vaikutus männyn viljelytaimistojen kehitykseen karuilla avosoilla.
Effect of drainage intensity and fertilization on the development of pine plantations on oligotrophic treeless Sphagnum bogs.
- No 318 Kinnunen, Kaarlo: Istutuksen onnistuminen ja taimistojen alkukehitys Länsi-Suomen yksityismetsissä.
The survival and initial development of plants in private forests in western Finland.
- No 319 Ferm, Ari & Pohtila, Eljas: Pintakasvillisuuden kehittyminen ja muokkausjäljen tasoituminen auratuilla metsänuudistusaloilla Lapissa.
Succession of ground vegetation and levelling of ploughed tracks on reforestation areas in Finnish Lapland.
- No 320 Kuusela, Kullervo: Suomen metsien kasvu ja puutavaralajirakenne sekä niiden alueellisuus vuosina 1970—1976.
Increment and timber assortment structure and their regionality of the forests of Finland in 1970—1976.
- No 321 Heikinheimo, Lauri, Jaatinen, Esko, Kellomäki, Seppo, Lovén, Lasse & Saastamoinen, Olli: Metsien virkistyskäyttö Suomessa. Esitutkimusraportti.
Forest recreation in Finland. Pilot study.
- No 322 Talkamo, Tero: Markkinapuun alueittaiset hankintamäärät ja kulkuvirrat vuonna 1973 (1970).
Removal and flow of commercial roundwood in Finland during 1973 (1970) by districts.
- No 323 Erkkilä, Pentti, Silander, Soini, Tiihonen, Paavo & Örn, Jouko: Pystymittaus ja runkojen luku hakkuupalkan laskentaperusteina työvaikeuspaikalla.
Massenermittlung am stehenden Holz und Stamzahl als Unterlage für die Berechnung des Arbeitslohns auf grösseren Schlaglosen mit gleichmässigen Arbeitsbedingungen.
- No 324 Vuokila, Yrjö: Puolukkatyyppi kuusen kasvupaikkana.
Vaccinium type as a spruce site.
- No 325 Raulo, Jyrki & Lähde, Erkki: Rauduskoivun istutustuloksia Lapissa.
Reforestation results with *Betula pendula* Roth in Finnish Lapland.
- No 326 Paavilainen, Eero: Männyn istutus suopeltojen metsityksessä.
Planting of Scots pine in afforestation of abandoned swampy fields.
- No 327 Paavilainen, Eero: Jatkolannoitus vähäravinteisilla rämeillä. Ennakkotuloksia.
Refertilization on oligotrophic pine swamps. Preliminary results.
- No 328 Laitinen, Jorma & Takalo, Sauli: Moottorisahavintturin käytöstä pienten puiden ja tukkien esijuonossa.
Preliminary skidding of small trees and sawlogs by power saw winch.
- No 329 Kinnunen, Kaarlo & Linnimäki, Jorma: Metsänuudistamisen onnistuminen ja taimistojen alkukehitys Pohjois-Karjalassa.
Success of forest regeneration and initial development of sapling stands in northern Karelia.
- No 330 Huttunen, Terho: Suomen puunkäyttö, poistuma ja metsätase 1975—77.
Wood consumption, total drain and forest balance in Finland, 1975—77.
- No 331 Gustavsen, Hans G.: Valtakunnalliset kuutiokasvuyhtälöt.
Finnish volume increment functions.
- No 332 Helander, Matti & Simula, Anna-Leena: Metsäalan toimihenkilöiden kysyntä ja tarjonta vuoteen 1985.
Demand and supply of professional forestry staff by 1985.
- No 333 Hakkilä, Pentti, Kalaja, Hannu, Salakari, Martti & Valonen, Paavo: Whole-tree harvesting in the early thinning of pine.
Kokopuun korjuu männikön ensiharvennuksessa.
- No 334 Järveläinen, Veli-Pekka: Mielipiteet yksityismetsätaloudessa. Metsänomistajien ja metsäammattimiesten käsityksiä metsätaloudesta ja sen edistämisestä.
Opinions in Finnish private forestry. On the opinions of the private forest owners and the forestry experts concerning forestry and its promotion.

- No 335 Juutinen, Paavo: Kuitupuupinot pystynävertäjän (*Tomicus piniperda* L.) lisääntymispaikkoina Pohjois-Suomessa.
Pulpwood stacks as breeding sites for pine shoot beetle (*Tomicus piniperda* L.) in northern Finland.
- No 336 Kärkkäinen, Matti: Menetelmiä likipituisten kuitupuupölkkyjen keskipituuden mittaamiseksi
Methods for measuring the average length of pulpwood bolts estimated during logging by eye.
- No 337 Kuusela, Kullervo & Salminen, Sakari: Koillis-Suomen metsävarat vuonna 1976 ja Lapin metsävarat vuosina 1970 ja 1974—76.
Forest resources in the Forestry Board Districts of Koillis-Suomi in 1976 and Lappi in 1970 and 1974—76.
- No 338 Lähde, Erkki: Väliavarastoinnin vaikutus männyn paakkutaimien viljelyn onnistumiseen.
Effect of intermediate storage of containerized Scots pine planting stock on reforestation success.
- No 339 Teivainen, Terttu: Eräiden poppelikloonien myyrätuhoalttius ruokintakokeiden mukaan.
Resistance of some poplar clones to vole damage through feeding experiments.
- No 340 Laitinen, Jorma & Takalo, Sauli: Kantokäsittelylaittein varustettujen raivaussahojen vertailua.
Comparison of clearing saws equipped with stump spraying devices.
- No 341 Uusvaara, Olli: Teollisuushakkeen ja purun painomittaus.
Weight scaling of industrial chips and sawdust.
- No 342 Hakki, Pentti: Pienpuun korjuu polttoaineeksi.
Harvesting small-sized wood for fuel.
- No 343 Paavilainen, Eero: PK-lannoitus Lapin ojitetuilla rämeillä. Ennakkotuloksia.
PK-fertilization on drained pine swamps in Lapland. Preliminary results.
- No 344 Lehtonen, Irja, Pekkala, Osmo & Uusvaara, Olli: Tervalepän (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) ja raidan (*Salix caprea* L.) puu- ja massateknisiä ominaisuuksia.
Technical properties of black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) and great willow (*Salix caprea* L.) wood and pulp.
- No 345 Metsätalastollinen vuosikirja 1976.
Yearbook of Forest Statistics 1976.
- No 346 Parviainen, Jari: Taimisto- ja riukuvaiheen männikön harvennus.
Durchforstung im Kiefernbestand in der Jungwuchs- und Stangenholzphase.
- No 347 Vuorinen, Heikki: Metsätraktorin kuljettajan kuormittumisen mittaamahdollisuudet.
Possibilities of measuring the strain on forest tractor drivers.
- No 348 Löytyniemi, Kari: Metsänlannoituksen vaikutuksesta ytimenävertäjiin (*Tomicus* spp., Col., Scolytidae).
Effect of forest fertilization on pine shoot beetles (*Tomicus* spp., Col., Scolytidae).
- No 349 Metsämuuronen, Markku, Kaila, Simo & Räsänen, Pentti K.: Männyn paakkutaimien alkukehitys vuoden 1973 istutuksissa.
First-year planting results with containerized Scots pine seedlings in 1973.
- No 350 Oikarinen, Matti: Viljelymetsiköiden puuston vaihtelu ja kasvukoealojen edustavuus.
Variations in growing stock in cultivated stands and the representation of growth sample plots.
- No 351 Heikkilä, Risto: Mäntykuitupuupinojen suojaaminen pystynävertäjän iskeytymistä vastaan Pohjois-Suomessa.
Protection of pine pulpwood stacks against the common pine-shoot beetle in northern Finland.
- No 352 Saramäki, Jussi: Kainuun vajaapuustoisten kuusikoiden lannoitus ja sen kannattavuus.
Profitability of fertilization in the understocked spruce stands of Kainuu, Finland.
- No 353 Päivinen, Risto: Kapenemis- ja kuorimallit männylle, kuuselle ja koivulle.
Taper and bark thickness models for pine, spruce and birch.
- No 354 Järveläinen, Veli-Pekka: Yksityismetsätalouden seuranta. Metsälöötökseen perustuvan tietojärjestelmän kokeilu.
Monitoring the development of Finnish private forestry. A test of an information system based on a sample of forest holdings.
- No 355 Kärkkäinen, Matti & Salmi, Juhani: Tutkimuksia haapatukkien mittauksesta ja teknisistä ominaisuuksista.
Studies on the measurement and technical properties of aspen logs.
- No 356 Hyppönen, Mikko & Roiko-Jokela, Pentti: Koepuiden mittauksen tarkkuus ja tehokkuus.
On the accuracy and effectivity of measuring sample trees.