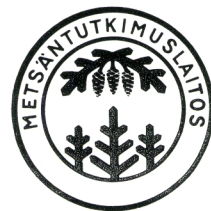


10.06.92



FOLIA FORESTALIA

METSÄNTUTKIMUSLAITOS
THE FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE
HELSINKI 1992

787

Risto Päivinen, Merja Nousiainen & Kari T. Korhonen

PUUTUNNUSTEN MITTAAMISEN LUOTETTAVUUS

Accuracy of certain tree measurements

FOLIA FORESTALIA

Julkaisija — *Publisher*

Metsäntutkimuslaitos

The Finnish Forest Research Institute

Toimitus — *Editors*

Päätoimittaja — *Editor in chief:*

Erkki Annila

Toimittaja — *Editor:*

Seppo Oja

Toimittaja — *Editor:*

Tommi Salonen

Unioninkatu 40 A, SF-00170 Helsinki, Finland

tel. +358-0-857 051, fax +358-0-625 308

Toimituskunta — *Editorial Board*

Erkki Annila (pj. — *chairman*), Pentti Hakkila, Seppo Kaunisto, Jari Kuuluvainen, Juha Lappi, Eino Mälkönen

Tavoitteet ja tarkoitus — *Aim and Scope*

Sarjassa julkaistaan tutkimuksia, tilastoja ja kirjallisuuskatsauksia, joilla on ensisijaisesti kotimaista merkitystä. Julkaisukielenä on kotimainen kieli, mutta julkaisut sisältävät englanninkielisen selosteen tärkeimmistä tutkimustuloksista.

Folia Forestalia publishes research reports, statistics and literature reviews relevant to Finnish forestry.

Tilaukset — *Subscriptions*

Tilaukset ja tiedustelut pyydetään osoittamaan Metsäntutkimuslaitoksen kirjastolle. *Subscriptions and orders for back issues should be addressed to the Library of the Institute.*

FOLIA FORESTALIA 787

Metsäntutkimuslaitos. Institutum Forestale Fenniae. Helsinki 1992

Risto Päivinen, Merja Nousiainen & Kari T. Korhonen

PUUTUNNUSTEN MITTAAMISEN LUOTETTAVUUS

Accuracy of certain tree measurements

Approved on 16.12.1991

SISÄLLYS

Merkinnät — Symbols	3
1. JOHDANTO	3
2. MITTAUSTAVAT JA VIRHELÄHTEET	3
21. Rinnankorkeusläpimitta	3
22. Yläläpimitta	5
23. Kantoläpimitta	5
24. Pituus	5
25. Pituuskasvu	6
3. AINEISTO JA MENETELMÄT	7
31. Aineisto	7
32. Menetelmät	8
4. TULOKSET	8
41. Rinnankorkeusläpimitan mittausvirheet	8
42. Kantoläpimitan mittausvirheet	11
43. Yläläpimitan mittausvirheet	11
44. Pituuden mittausvirheet	11
45. Pituuskasvun mittausvirheet	12
5. RINNANKORKEUSLÄPIMITAN JA PITUUDEN MITTAUSVIRHEIDEN VAIKUTUS TILAVUUS- JA KASVUESTIMAATTEIHIN	13
51. Puittaiset estimaatit	13
52. Koealoittaiset estimaatit	14
6. PÄÄTELMÄT	15
KIRJALLISUUS — REFERENCES	16
SUMMARY	17

Päivinen, R., Nousiainen, M. & Korhonen, K.T. 1992. Puutunnusten mittaamisen luotettavuus. Summary: Accuracy of certain tree measurements. *Folia Forestalia* 787. 18 p.

Tutkimuksessa selvitettiin pystypuiden mittausten systemaattisia ja satunnaisia virheitä sekä virheiden riippuvuutta puutunnuksista, mittaajasta ja puulajista. Tutkittavia tunnuksia olivat rinnankorkeuslöpimitta, kuuden metrin löpimitta, kantolöpimitta, puun pituus ja pituuskasvu. Lisäksi selvitettiin simulointimenetelmällä rinnankorkeuslöpimitan ja pituuden mittausvirheiden vaikutusta erotusmenetelmällä laskettavaan kasvuarvioon pysyville koaloilla. Tutkimusaineistona käytettiin Metsäntutkimuslaitoksen metsänarvioimisen tutkimusosastolla järjestettyä kahdeksaa mittauskoetta, joissa kussakin oli mukana 8–14 koehenkilöä.

Rinnankorkeuslöpimitan virheet laskettiin erikseen kahdelle aineistolle. Ensimmäisessä aineistossa oli löpimitan systemaattinen yliarvio 0,8 mm ja poikkeamien keskihajonta 6,9 mm. Toisessa aineistossa löpimitan poikkeamien keskihajonta oli ristiin mitattaessa 2,3 mm, kun mittauskorkeus oli vakioitu. Kun mittaaja itse määrittä mittauskohdan, oli keskihajonta 3,5 mm.

Kantolöpimitan poikkeamien keskihajonta oli 11,6 mm. Ylälöpimitan systemaattinen poikkeama vertailuarvosta oli -0,1 cm ja keskihajonta 0,7 cm. Pituuden systemaattinen poikkeama oli kaatopuista saatun vertailuarvoon nähden -3,2 dm ja poikkeamien keskihajonta 6,7 dm. Viiden vuoden pituuskasvun yliarvio oli keskimäärin 1,4 dm ja poikkeamien keskihajonta 2,7 dm.

Pituuden ja löpimitan satunnaisvirheet aiheuttivat löpimitaltaan 15 cm:n puulle 9 %:n keskihajonnan ja 25 cm:n puulle 6 %:n keskihajonnan runkotilavuuteen. 600 m²:n koelalla IB veroluokan männikössä mittausvirheet aiheuttivat erotusmenetelmällä saatavaan männikön kasvuarvioon 20,5 %:n keskihajonnan viiden vuoden kasvujaksolla ja 6,8 %:n keskihajonnan 15 vuoden kasvujaksolla.

The paper presents random errors and bias occurring in some tree measurements. The characteristics studied were diameters at breast height and at six meters' height, stump diameter, height of the tree and height increment. The study material consists of eight measurement experiments carried out by the Finnish Forest Research Institute. The surveyors, 8–14 in each experiment, were crewleaders of the National Forest Inventory.

Breast height diameter was measured in two data sets. In the first one, consisting of 64 trees, an overestimation of 0.8 mm was found, and the standard deviation of differences between measurements and the checked diameter was 6.9 mm. In another data set of 83 trees, only random errors were studied. The standard deviation was 4.6 mm. When the diameter was an average of two measurements, the standard deviation was 3.5 mm. If the breast height was marked in the stems, the standard deviation was 2.3 mm. The standard deviation of the differences in stump diameter was 1.2 cm and in diameter at six meters' height 0.7 cm. There was also a bias of -0.1 cm in the latter measurement.

The standard deviation of height measurements was 67 cm and the average difference between measurements and the value obtained after felling the tree showed an overestimation and underestimation of 32 cm. The 5 years height increment of Scots pine and Norway spruce was overestimated by 14 cm with a standard deviation of 27 cm.

The random errors in breast height diameter and height measurements cause a standard deviation of 9 % in the volume estimate of a pine with dbh 15 cm. According to the simulation studies, in a permanent sample plot of 600 sq.m. measurement errors cause a 20.5 % standard deviation in the estimate of volume increment of the past five years in a 65 years old Scots Pine stand. If the growing period is 15 years the standard deviation is 6.8 %.

Keywords: measurement errors, forest inventory, accuracy.
FDC 5-015

Correspondence: The Finnish Forest Research Institute, Department of Forest Resources, Unioninkatu 40 A, SF-00170 Helsinki, Finland.

ISBN 951-40-1197-X
ISSN 0015-5543

Tampere 1992. Tammer-Paino Oy

1. Johdanto

Metsän inventoinnin virheet johtuvat otannasta, tulosten laskennassa käytettävistä malleista sekä itse mittauksesta. Inventoinnin eri työvaiheisiin käytettävä osuus resursseista voidaan määrittää optimaalisesti ainoastaan silloin, kun tunnetaan kaikkien eri virhelähteiden suuruus (Päivinen 1987). Tässä työssä tutkitaan pystypuiden tunnusten mittausvirheitä.

Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää eräiden puutunnusten mittauksen luotettavuutta. Tutkimuksessa käsiteltäviä tunnuksia ovat rinnankorkeusläpimitta, yläläpimitta, kantoläpimit-

ta, puun pituus ja pituuskasvu, jotka mitataan yleisimmin käytössä olevilla mittauslaitteilla. Tutkimuksessa mittausvirhe jaetaan systemaattiseen komponenttiin eli harhaan ja satunnaiseen komponenttiin eli täsmällisyyteen. Edelleen selvitetään mittausvirheen yhteyttä puulajiin, puutunnuksiin ja koehenkilöihin. Lopuksi arvioidaan simulointikokeiden avulla mittausvirheiden vaikutuksia koelan kasvun arviointiin. Tutkimus perustuu Nousiaisen (1986) opinäytetyöhön, jota tekijät ovat yhdessä täydentäneet ja viimeistelleet tutkimusraportiksi.

2. Mittaustavat ja virhelähteet

2.1. Rinnankorkeusläpimitta

Kaikissa mittauskokeissa rinnankorkeusläpimitta on mitattu teräksisillä mittasaksilla millimetrin tasaavaa luokitusta käyttäen. Mittasaksissa on kaksi yhdensuuntaista sakaraa ja niitä vasten kohtisuorassa oleva selkä (kuva 1). Toinen sakaroista on kiinteä ja toinen liikkuva. Molempien sakaroiden tulee olla yhdensuuntaisia ja samassa tasossa. Rinnankorkeuden mittauksen lähtöpiste on maanpinta tai puun syntypiste. Syntypiste sijaitsee sillä korkeudella, missä puun sivujuurien välissä oleva runkopuu alkaa voimakkaasti kaventua maanpintaa lähestyttyä. Puun syntypistettä käytetään, kun maanpinnan taso on vaikeasti määritettävissä tai puu kasvaa kiven tai kannon päällä (kuva 2). Rinteessä mit-

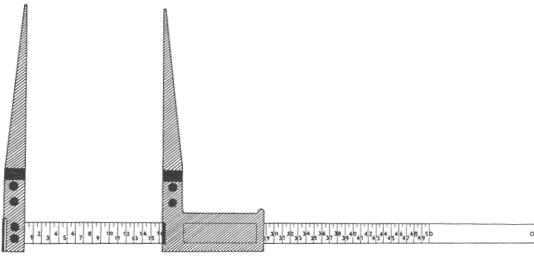
tauskorkeus määritetään ylärinteen puolelta. Risut ja paksu karikekerros puun tyvellä eivät saa vaikuttaa mittauskorkeuteen (Laasasenaho 1979).

Mittasaksista aiheutuva systemaattinen virhe on useimmiten seurausta saksien liikkuvan sakaran suunnan poikkeamisesta kohtisuorasta selkään nähden. Yhden asteen suuruinen poikkeama kohtisuorasta aiheuttaa pohjapinta-alassa lähes 2 %:n aliarvion (Loetsch ym. 1973).

Mittasaksien käytöstä aiheutuvien virheiden syynä voi olla mittavälineen kallistuminen, virheellinen mittauskorkeus tai mittavälineen liiallinen tai liian vähäinen painamisvoimakkuus. Keväällä puun kuori on pehmeimmillään, mikä vaikuttaa erityisesti kuusen mittaukseen. Tirenin (1929) mukaan mittaajien väliset erot

Merkinnät — *Symbols*

- $d_{1,3}$ = rinnankorkeusläpimitta 1,3 m:n korkeudella maanpinnan tasosta, cm
diameter at breast height, cm
- d_6 = läpimitta 6 metrin korkeudella maanpinnan tasosta, cm
upperstem diameter at 6 m height, cm
- d_k = kantoläpimitta, cm
stump diameter, cm
- h = puun pituus maanpinnan tasosta latvaan, m
height of the tree, m
- i_h = 5 vuoden pituuskasvu, dm
5 year's height increment, dm
- v = rungon tilavuus, dm³
volume of the stem, dm³



Kuva 1. Mittasaksset.

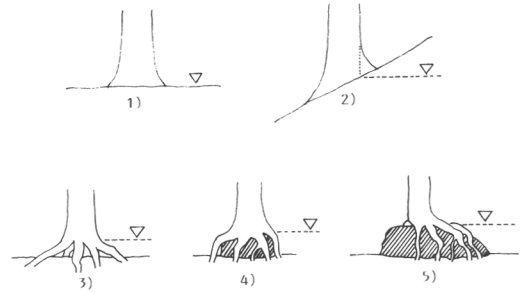
Figure 1. Metallic beam for measuring diameters.

mittausvoimassa saattavat aiheuttaa jopa 3,5 %:n eron pohjapinta-alassa. Jos mittasaksien selkä ei ole kohtisuorassa puun pituusakselia vasten, läpimitta yliarvioidaan. Esimerkiksi viiden asteen kallistuma aiheuttaa pohjapinta-alassa 0,75 %:n yliarvion. Mittasaksien selkä saattaa olla kohtisuorassa pituusakselia vasten, mutta saksien sakarat ovat vinoissa. Tällöin mittauskohta siirtyy kallistamisesta riippuen joko tyveen tai latvaan päin, josta seuraa vastaavasti yli- tai aliarvio (Loetsch ym. 1973, Kärkkäinen 1984).

Vastaavasti mittauskorkeuden virheellinen määrittäminen aiheuttaa yliarvion, jos mittauskohta on liian alhaalla ja aliarvion, jos mittauskohta on liian korkealla. Virheen suuruus riippuu rungon kapenemisesta.

Ympyrän alan kaavalla laskettu pohjapinta-ala on aina yliarvio, jos poikkileikkaus ei ole ympyrä. Ellipsin muotoisten puiden virhettä voidaan pienentää mittaamalla läpimitta kahdelta ristikkäiseltä suunnalta ja laskemalla tuloksista keskiarvo tai mittaamalla ympärysmitta (Brickell 1970, Matérn 1956). Kahden läpimitan mittaaminen ei kuitenkaan ole aina suositeltavaa suuremman ajanmenekin vuoksi (ks. esim. Loetsch ym. 1973, s. 95).

Yleensä luokittelussa käytetään tasaavaa luokitusta, jolloin luokkaan kuuluvat havainnot pyöristetään luokan keskipisteeseen. Jos havainnot eivät ole jakaantuneet symmetrisesti luokan keskipisteen ympärille, aiheuttaa tasaavan luokituksen käyttö systemaattisen yli- tai aliarvion läpimittojen jakauman vinouden suunnasta riippuen. Systemaattinen virhe voi syntyä myös mitaajan taipumuksesta pyöristää mittaustulos yksipuolisesti joko ylös- tai alaspäin (Loetsch ym. 1973). Kärkkäisen (1984) mukaan millimetrijaotteista kaulainta käytettäessä tulos pyöristetään helposti alempaan luokkaan. Myös symmetrisesti jakautuneessa aineistossa luokitettua läpimitan käyttö aiheuttaa harhaa laskettaessa läpi-



Kuva 2. Puun syntypisteen määrittäminen rinnankorkeuden mittaamista varten.

Figure 2. The determination of the starting point for measuring breast height.

mitasta epälineaarisesti riippuvia tunnuksia, kuten pohjapinta-alaa ja tilavuutta.

Hyppösen & Roiko-Jokelan (1978) tutkimuksessa mitattiin rinnankorkeusläpimitta 540 kertaa pohjoissuomalaisista männyistä. Rinnankorkeusläpimitan keskihajonnaksi kolmen henkilön mittauksista saatiin 0,27 cm, joka oli 1,4 % keskiläpimitasta (19,4 cm). Tarkistusmittausta ei tehty, joten todellisena arvona pidettiin mittaustulosten puittaisia keskiarvoja (Hyppönen 1977).

Valtakunnan metsien inventoinnissa kesällä 1979 tarkistettiin kenttäryhmien keväällä tekemiä mittauksia (Kujala 1979). Alkuperäinen mittaus sekä 950 puun tarkistusmittaus tehtiin mittasaksilla millimetrin tarkkuudella, molemmat samalta mittauskorkeudelta. Mittaussuunta määräytyi koealan keskipisteen perusteella. Puitaiseksi poikkeamaksi vertailuarvosta saatiin 0,1 mm:n yliarvio. Poikkeamien keskihajonta oli 3,9 mm. Männyllä oli 0,5 mm:n yliarvio, kuusella 0,2 mm:n aliarvio ja lehtipuilla 0,1 mm:n aliarvio. Poikkeamien keskihajonnaksi saatiin männyllä ja kuusella 4,0 mm ja lehtipuilla 3,5 mm (Kujala 1979).

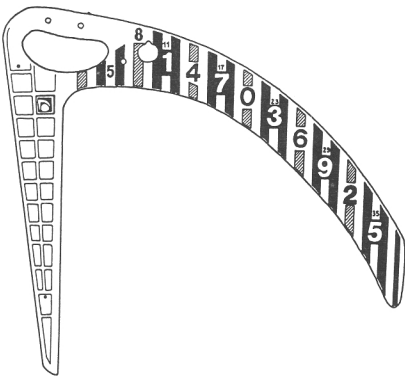
Ruotsin valtakunnan metsien inventointien 12 223 puuta käsittäneessä kontrollimittauksessa saatiin $d_{1,3}$:n systemaattiseksi virheeksi -0,1 mm (0,0 % keskiläpimitasta) ja satunnaisvirheeksi 6,1 mm (2,9 %). Systemaattinen virhe oli männyllä 0,0 mm, kuusella -0,3 mm ja koivulla 0,1 mm. Satunnaisvirhe oli männyllä 6,2 mm, kuusella 5,8 mm ja koivulla 6,4 mm. Puut mitattiin tarkistuksessa huolellisemmin kuin tavallisessa inventoinnissa, kuitenkin käyttäen samoja mittavälineitä (Daamen 1980). Suomen valtakunnan metsien inventoinnissa tehtävien puumittausten luotettavuutta on selvittänyt myös Ihalainen (1987).

22. Yläläpimitta

Yläläpimitta mitataan yleensä latvakaulaimella kuuden metrin korkeudelta maanpinnan tasosta tai puun syntypisteestä (kuva 3). Läpimitta mitataan senttimetrin tarkkuudella tasaavaa luokitusta käyttäen. Latvakaulain asetetaan viiden metrin mittaisen varren päähän. Varren alapään kohta eli metrin korkeus maasta määritetään puussa olevan rinnankorkeusmerkin avulla.

Yläläpimitan mittausta vaikeuttavat puun pinnan epätasaisuudet, hilseilevä kuori ja jäkälä, jotka hankaloittavat rungon todellisen pinnan näkemistä maasta käsin. Näkyvyyttä haittaavat myös erityisesti kuusella tiheässä olevat oksat. Yläläpimittaa maasta käsin luettaessa aiheutuu tähtäyskulmasta harha, koska todellisuudessa näkösäde leikkaa puun kylkeä kaulainta ylemmänä. Toinen yläläpimitan lukuvirhe syntyy, jos kaulaimen asteikkoa ei katsota asteikon viivojen suunnassa.

Hyyposen & Roiko-Jokelan (1978) tutkimuksessa saatiin kuuden metrin läpimitan mittauksen systemaattiseksi virheeksi latvakaulaimella mitattaessa 0,04 cm:n aliarvio sekä satunnaisvirheeksi 0,80 cm. Tutkimus käsitti kolmen henkilön suorittamana 114 mittauskertaa. Kaikki puut olivat mäntyjä. Valtakunnan metsien inventoinnissa järjestetyssä tarkistusmittauksessa mitattiin 900 puuta uudelleen, jolloin tulokseksi saatiin 0,19 cm:n systemaattinen aliarvio ja satunnaisvirheeksi 0,77 cm (Kujala 1979). Systemaattinen virhe oli männyllä -0,14 cm, kuusella -0,30 cm ja lehtipuulla -0,11 cm. Vastaavat satunnaisvirheet olivat 0,73 cm, 0,69 cm ja 0,94 cm.



Kuva 3. Yläläpimitan mittauskaulain.
Figure 3. Caliper for measuring diameter at six meters.

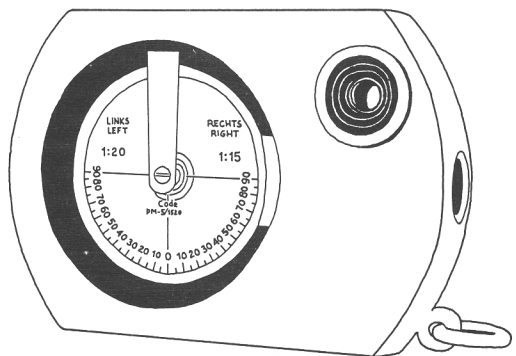
23. Kantoläpimitta

Kantoläpimitta mitataan mittasaksilla millimetrin tarkkuudella kohtisuoraan koealan sädetä vastaan ylimmän kaatoa haittaavan juurenniskan kohdalta. Kantoläpimitan mittausvirheet aiheutuvat samoista syistä kuin rinnankorkeusläpimitan mittauksessa, erityisesti rungon epäpyöreyydestä kannon korkeudella.

Ruotsissa tehdyissä valtakunnan metsien inventoinnin kontrollimittauksissa saatiin 6 856 kannon läpimitan systemaattiseksi poikkeamaksi vertailuarvosta 2,6 mm:n yliarvio, joka oli 1,4 % keskimääräisestä kantoläpimitasta. Satunnaisvirhe oli 21,6 mm eli 16,7 %. Männyllä systemaattinen virhe oli 2,4 mm, kuusella 2,6 mm ja koivulla 3,3 mm. Vastaavat satunnaisvirheet olivat 15,9 mm, 23,8 mm ja 27,1 mm (Daamen 1980).

24. Pituus

Puun pituus mitataan yleisimmin Suunto-hypsometrillä desimetrin tarkkuudella (kuva 4). Mittaus tehdään joko 15 tai 20 metrin etäisyydeltä puusta. Tavoitteena on, että mittausetäisyys olisi korkeintaan puun pituuden suuruisen. Etäisyys määritetään optisesti hypsometrin runkoon sijoitetun prisman ja latan avulla. Korkeusmittarilla tähdätään puun korkeimpaan kohtaan sekä maanpinnan tasoon tai puun syntypisteeseen. Molempien tähtäyksien kulmalukemat luetaan asteikolta suoraan pituusmittana. Maanpinnan tasosta saatava lukema vähennetään tai lisätään latvalukemaan riippuen mittajaan ase-



Kuva 4. Suunto-hypsometri.
Figure 4. The Suunto-hypsometer.

masta puun tyveen nähden. Jos maanpinnan tasoa puun tyvellä ei nähdä, mittauksen alkukohta määritetään näyttämällä 1,0 tai 1,3 metrin korkeus puun tyveltä tai kiinnittämällä latta aina tietylle korkeudelle.

Pituuden mittauksessa kohteesta aiheutuvia virheitä ovat oikean mittauskohdan löytymistä haittaava latvan tasapaisuus sekä puun kallistuminen. Mitä lähempänä puuta mittaaja työskentelee, sitä suurempi on mittauskulma ja sitä enemmän virheet korostuvat. Puun kallistuminen mittaajaan päin aiheuttaa pituuden yliarvion, kun taas kallistuminen mittaajasta pois päin tai sivulle päin aliarvion (Loetsch ym. 1973).

Hypsometri on herkkä optinen laite, jonka käytössä erityisesti etäisyyden mittaus prisman ja latan avulla aiheuttaa helposti virheitä. Mittausetäisyyteen syntyy puun säteen suuruinen virhe, jos latta asetetaan rungon etukyljelle eikä keskipisteen kohdalle.

Sää- ja valaistusolosuhteet sekä ympäristö vaikuttavat näkyvyyteen puun pituutta mitattaessa. Yleisiä virheitä ovat asteikon virheellinen lukeminen ja väärä mittausetäisyyden määrittäminen. Mittaajan pään liike taaksepäin aiheuttaa pituuden aliarviota.

Suunto-hypsometrin käyttöä puun pituuden mittauksessa ovat tutkineet muun muassa Fitje (1967), Eriksson (1970), Hyppönen & Roiko-Jokela (1978), Kujala (1979) sekä Daamen (1980). Seuraavassa asetelmassa on esitetty näiden tutkimusten tuloksia. Asetelmassa negatiivinen systemaattinen virhe tarkoittaa aliarviota.

	Pituuden vaihteluväli	Systemaattinen virhe	Satunnaisvirhe
Fitje	11–30 m	+3,5 dm	8,0 dm
Eriksson	11–27 m	+2,0 dm	3,9 dm
Hyppönen & Roiko-Jokela	9–19 m	–3,8 dm	8,0 dm
Kujala	–	–1,1 dm	7,7 dm
Daamen	2–40 m	–0,3 dm	9,7 dm

Kujalan, Daamenin sekä Hyppösen ja Roiko-Jokelan tutkimuksissa tarkistusmittaus tapahtui samalla menetelmällä kuin alkuperäinen mittaus (Suunto-hypsometrillä). Erikssonin tutkimuksessa puut kaadettiin ja tarkistusmittaus tehtiin mittanauhalla.

25. Pituuskasvu

Havupuiden pituuskasvun mittavälineenä on asteikollinen kiikari. Asteikolta saatu lukema muutetaan mittausetäisyyden ja puun pituuden

avulla pituuskasvuksi. Muutettaessa kiikarilukema varsinaiseksi pituuskasvuarvioksi käytetään taulukkoa, joka perustuu kaavaan (Matern 1967):

$$i_h = (a + h^2/a) \times \frac{s}{1000 + h \times s/a}, \quad (1)$$

missä

i_h = pituuskasvu, m,

a = etäisyys puun tyveltä mittaajaan, m

s = kiikarilukema ja

h = puun pituus, m (tähtäystason yläpuolinen osa).

Oikea pituuskasvun mittaus edellyttää aputaulukossa tarvittavien puun pituuden ja mittausetäisyyden oikeaa mittausta. Pituuskasvun mittaus tehdään yleensä samalta paikalta kuin pituuden mittaus.

Havupuilla syntyy kasvukauden aikana latvakasvain ja sen huippuun päätesilmu. Seuraavana kesänä päätesilmusta syntyy uusi pituuskasvain ja päätesilmiä ympäröivistä sivusilmuista oksakiehkura. Vuosittaiset pituuskasvut erottuvat männyllä yleensä selvästi, mutta kuusella syntyy oksakiehkuroiden väliin lisäoksia, jotka vaikeuttavat havainnointia. Pakkanen tai tuholaiset saattavat tappa kokonaisen vuosikasvun, eikä tuhoa pystytä myöhemmin maasta käsin näkemään. Latvakasvainten kuolema pystytään kaatokoepuistakin havaitsemaan yleensä vain runkoanalyysin avulla.

Pituuskasvun mittausta vaikeuttaa tiheässä metsässä huono näkyvyys puun latvaan. Näkyvyyttä estää myös latvuksen pyöreä tai epäsäännöllinen muoto. Mittaasteikon luku kiikarista on huonoissa valaistusoloissa vaikeaa, samoin kosteus hämärtää asteikkoa.

Latvakasvukiikarin käyttö on ollut vähäistä Pohjoismaiden ulkopuolella, minkä vuoksi tämän mittaustavan luotettavuudesta on niukasti tutkimuksia. Tiihosen (1967a, 1967b) tutkimus viiden vuoden pituuskasvun mittauksesta käsitti 120 puuta, jotka kaadettiin tarkistusta varten. Viiden vuoden pituuskasvu yliarvioitiin keskimäärin 31,8 %. Pituuskasvun alaraja asetettiin todennäköisesti todellista alemmaksi. Osa eroista johtui käytetyistä taulukoista, jotka yliarvioivat pituuskasvun.

Alalammin tutkimuksessa (1968) havaittiin kiikariarvioinnissa systemaattinen yliarvio, joka johtui osaksi sievennettyyn kaavaan perustuvan taulukon sisältämästä virheestä. Systemaattinen yliarvio oli kuusilla 16 % ja männyillä 39 % sekä toisessa aineistossa kuusilla 14 % ja män-

nyillä 15 % pituuskasvusta. Tarkistusmittaus tehtiin yhteensä 610 kaadetusta puusta. Myös Mielikäinen (1985) on todennut kiikariarvioinnilla

saatavan 25–34 %:n yliarvion havupuiden pituuskasvussa. Tarkastelun kohteena olivat 30–100 -vuotiaiden metsiköiden valtapuut.

3. Aineisto ja menetelmät

31. Aineisto

Tutkimuksen aineistona on Metsäntutkimuslaitoksen metsänarvioimisen tutkimusosaston metsäninventoinnin tutkimussuunnalla vuosina 1977–1984 järjestetyt kahdeksan mittauskoetta. Mittauskokeet järjestettiin valtakunnan metsien inventoinnissa (VMI) toimivien ryhmänjohtajien koulutustilaisuuksissa. Koehenkilöinä olivat kunakin vuonna VMI:ssä mukana olleet ryhmänjohtajat. Ryhmänjohtajat ovat koulutukseltaan metsätalouden insinöörejä, metsänhoitajia tai opintojen loppuvaiheessa olevia metsäylioppilaita. VMI:ssä ryhmänjohtajien vastuulla on tutkimusapulaisten kouluttaminen mittauksiin ja työn valvonta. Usein myös puun pituuden ja pituuskasvun mittaaminen kuuluu ryhmänjohtajien tehtäviin.

Mittauskokeiden tarkoituksena on ollut tutustuttaa VMI:n ryhmänjohtajat tulevan kesän mittausalueiden koepuiden erikoispiirteisiin erityisesti pystyapteenauksen harjoittelemiseksi. Toisena tarkoituksena on ollut kerätä aineistoa mittausmenetelmien luotettavuudesta. Mittauskokeissa on ollut mukana kahdeksasta neljääntoista koehenkilöä, joista osa on tutkimusajanjakson kuluessa vaihtunut. Ainoastaan viisi ryhmänjohtajaa oli mukana jokaisessa mittauskokeessa.

Tutkimusaineisto jakaantuu kahteen osaan, yhdistettyyn aineistoon ja Juupajoen aineistoon (ks. taulukko 1). Yhdistetty aineisto koostuu Solbölen, Punkaharjun, Kauhajoen, Paltamon, Kannuksen, Taivalkosken ja Rova-

niemen mlk:n mittauskokeista. Yhdistetyssä aineistossa koepuihin on etukäteen asetettu 1,3 metrin korkeudelle merkki, joka määrää rinnankorkeusläpimitan mittauskorkeuden ja -suunnan. Tarkistusmittaus on tehty merkityltä korkeudelta. Mittausvälineenä ovat tarkistuksessa-kin olleet mittasakset. Juupajoen mittauskokeessa oli 33 puussa mittauskorkeus vakioitu puussa olevan merkin avulla (Juupajoki II) ja 50 puussa mittauskorkeus määritettiin rinnankorkeuskepin avulla lähtöpisteestä maanpinnan taso tai puun syntypiste (Juupajoki I).

Juupajoki II -aineistossa koehenkilöt ovat merkinneet muistiin myös valitsemansa mittauskorkeuden etäisyyden puussa satunnaisella korkeudella olevasta merkistä. Mittasaksien välisen vaihtelun poistamiseksi jokainen koehenkilö käytti samoja koealakohtaisia mittasaksia.

Juupajoella mittaus suunnan määräyksessä on käytetty apuna ympyräkoelan kepillä merkittyä keskipistettä. Rinnankorkeusläpimita mitattiin kahdelta suunnalta: kohtisuoraan koelan sädettä vastaan sekä säteen suuntaisesti. Kantoläpimittojen mittauksessa Juupajoen kokeessa ei tehty erillistä tarkistusmittausta, vaan vertailuarvona oli mittausten keskiarvo.

Pituusmittauskokeissa koepuut kaadettiin tarkistusmittausta varten ja pituus mitattiin mittanauhalla. Mittausetäisyyden vaikutusta pituuden mittausvirheeseen ei kokeissa selvitetty. Puun oikea pituuskasvu on mitattu kaadetuista puista latvan huipun ja viidennen oksakiehkuran välisenä etäisyytenä.

Taulukko 1. Mittauskertojen ja puiden lukumäärä mittauskokeittain.
Table 1. Number of trees and measurements in each experiment.

Koe Experiment	Puita (kpl) — Number of trees				Mittauskertoja (kpl) — Number of measurements				
	Mänty Pine	Kuusi Spruce	Koivu Birch	Kaikki All	d _{1,3}	d ₆	h	i _h	d _k
Solböle	17	22	—	39	—	—	350	350	—
Punkaharju	22	4	6	32	—	—	308	—	—
Kauhajoki	19	5	—	24	192	192	192	192	—
Paltamo	13	3	1	17	—	—	131	—	—
Kannus	8	7	—	15	150	150	150	150	—
Taivalkoski	5	1	—	6	26	26	26	26	—
Rovaniemi	14	5	—	19	152	152	152	—	—
Yht. — Subtotal	98	47	7	152	520	520	1309	718	—
Juupajoki I	17	25	8	50	700	—	—	—	700
Juupajoki II	13	20	—	33	462	—	—	—	462
Yht. — Subtotal	30	45	8	83	1162	—	—	—	1162

32. Menetelmät

Estimaatin luotettavuutta kuvataan keskineliövirheen (MSE) avulla.

$$\text{MSE}(\hat{\mu}) = E(\hat{\mu} - \mu)^2, \quad (2)$$

missä $\hat{\mu}$ = mitattu arvo ja
 μ = todellinen arvo.

Jos mitattavan tunnuksen todellinen arvo tunnetaan, MSE:stä voidaan edelleen erottaa estimaatin varianssi ja harha (ks. esim. Cochran 1963, s. 15)

$$\begin{aligned} \text{MSE}(\hat{\mu}) &= E(\hat{\mu} - \mu)^2 \\ &= E(\hat{\mu} - \bar{x})^2 + (\bar{x} - \mu)^2 = \\ &\hat{\mu}:n \text{ varianssi} + \text{harha}^2, \end{aligned} \quad (3)$$

koska $E(\hat{\mu} - \bar{x}) = 0$,

missä \bar{x} = mittausten keskiarvo.

Mittaustarkkuutta kuvaava mittausvirhe jaetaan kahteen komponenttiin: systemaattiseen ja satunnaiseen virheeseen. Systemaattinen virhe aiheuttaa estimaatin harhaisuuden, jonka seurauksena mittausten keskiarvo (\bar{x}) ei vastaa todellista keskiarvoa (μ). Systemaattinen virhe eli harha lasketaan tässä tutkimuksessa mitattujen ja todellisten arvojen erotusten eli poikkeamien keskiarvona. Tällöin positiiviset arvot kuvissa ja taulukoissa ovat yli-

arvioita ja negatiiviset aliarvioita.

$$\bar{z} = \sum_{i=1}^n \frac{\hat{x}_i - x_i}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{n}, \quad (4)$$

missä

\bar{z} = poikkeamien keskiarvo,

z_i = poikkeama,

\hat{x}_i = mitattu tunnuksen arvo havainnossa i ,

x_i = tunnuksen tarkastettu arvo havainnossa i ja

n = mittausten lukumäärä.

Systemaattisen virheen laskeminen edellyttää, että todellinen tunnuksen arvo on pystytty mittaamaan.

Tässä tutkimuksessa systemaattisen virheen merkitsevyyttä testattiin t-testillä. Mittausten poikkeamien riippuvuutta koepuutunnuksista, esimerkiksi puun pituuden poikkeaman riippuvuutta puun pituudesta, tutkittiin korrelaatioanalyysillä. Korrelaatiokerroin testattiin t-testillä.

Koehenkilöiden välisiä sekä puulajeittaisia eroja mitaustarkkuudessa tutkittiin muun muassa varianssianalyysillä. Rinnankorkeusläpimitalle ja pituudelle estimoi- tiin mittausvirheiden mittaajien väliset ja mittaajien sisäiset komponentit. Estimoinnissa käytettiin Searlen (1971, ks. sivu 474) epätasapainoiselle aineistolle esittämiä kaavoja.

Tutkimuksen lopuksi selvitettiin pituuden, rinnankorkeusläpimitan ja pituuskasvun mittausvirheiden vaikutusta puun ja koealan tilavuusarvioon simulointimene- telmällä.

4. Tulokset

41. Rinnankorkeusläpimitan mittausvirheet

Yhdistetyn aineiston neljän eri mittauskokeen 520 rinnankorkeusläpimitan mittauksen systemaattinen yliarvio oli 0,8 mm, joka oli 0,3 % keskiläpimitasta. Mittausvirheiden keskihajonta oli 6,9 mm eli 2,8 % keskiläpimitasta. Kuvassa 5 on esitetty mittausvirhe todellisen läpimitan funktiona.

Mittauksissa mittaussuunta ja -korkeus oli vakioitu, joten mittausvirheiden syynä jäi joko mittasaksien kallistuminen, asteikon virheellinen lukeminen tai mittasaksien liian voimakas tai liian vähäinen puristaminen. Mittasaksissa olevaa mahdollista harhaa ei tuloksista näy, koska tarkistusmittaukset tehtiin samalla mittavälineellä. Aineistosta poistettiin luultavasti kirjaimisvirheestä johtuva mittaustulos, jonka poikkeama tarkistusmittauksesta oli -16,4 cm. Eri mitauskokeista saadut tulokset ovat taulukossa 2.

Juupajoen mittauskokeen tulokset laskettiin erikseen normaalilla tavalla mitatulle aineistolle (Juupajoki I) ja aineistolle, jossa mittauskorkeus oli vakioitu (Juupajoki II). Juupajoki I:n mitauksia kertyi 700 kappaletta ja II:n mittauksia 462 kappaletta. Rinnankorkeusläpimitat mitat-

Taulukko 2. Harha ja satunnaisvirhe $d_{1,3}$ -mittauksissa absoluuttisena ja prosentteina keskiläpimitasta.

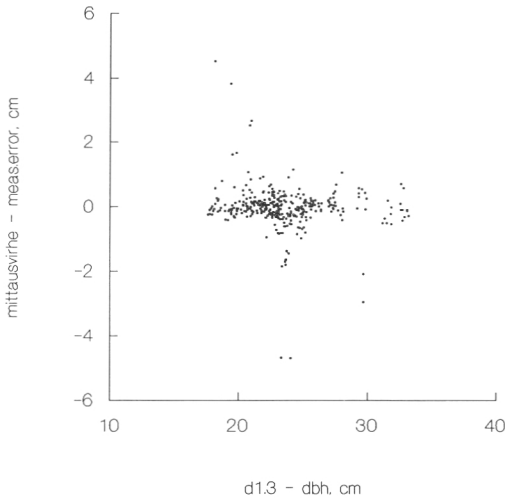
Table 2. The bias and random errors of $d_{1,3}$ measurements in different experiments.

Koe Experiment	Harha Bias (\bar{z})		Sat.virhe Random error		Mittauksia, kpl Number of measurements
	mm	%	mm	%	
Kauhajoki	-0,6	0,2	3,0	1,3	192
Kannus	-0,5	0,2	10,1	4,3	150
Taivalkoski	-0,6	0,2	1,1	0,3	26
Rovaniemi	3,9	1,4	6,3	2,3	152
Yht. — Total	0,8	0,3	6,9	2,8	520

Taulukko 3. Rinnankorkeuslöpimitan mittauksen täsmällisyys eri puulajeilla ja mittaus-tavoilla. s = virheen keskihajonta, % = variaatiokerroin.

Table 3. The precision of $d_{1,3}$ measurements with different measuring methods by tree species. s = standard deviation of the error, % = coefficient of variation.

	Mänty — Pine		Kuusi — Spruce		Koivu — Birch	
	s, mm	%	s, mm	%	s, mm	%
1) Koealan sädettä vastaan — <i>Perpendicular to the plot radius</i>						
Juupajoki I	5,3	1,5	3,6	1,6	6,0	2,4
Juupajoki II	5,1	1,6	1,8	0,7	—	—
2) Koealan säteen suunnassa — <i>Parallel to the plot radius</i>						
Juupajoki I	5,5	1,6	3,2	1,5	4,8	1,8
Juupajoki II	4,6	1,5	2,3	1,0	—	—
1) ja 2):n keskiarvo — <i>Mean of 1) and 2)</i>						
Juupajoki I	4,2	1,2	3,0	1,4	3,4	1,3
Juupajoki II	3,1	1,0	1,6	0,7	—	—



Kuva 5. Rinnankorkeuslöpimitan mittausvirhe todellisen löpimitan funktiona.

Figure 5. The error of measured $d_{1,3}$ as a function of diameter. In all figures, errors are presented as a function of checked values.

tiin kahdelta ristikkäiseltä suunnalta mitatun löpimitan aritmeettisena keskiarvona. Vertailuarvoksi otettiin koehenkilöiden puittaisten mitaustulosten keskiarvo. Juupajoki I:stä poistettiin kaksi merkintäsekaannukseksi tulkittua mitaushavaintoa, joiden poikkeamat vertailuarvosta olivat 96 mm ja -92 mm.

Juupajoki I:ssä oli koealan säteen suuntaisesti tehdyissä $d_{1,3}$:n mittauksissa poikkeamien keskihajonta 4,3 mm, joka oli 1,6 % keskilöpimitasta. Vastaavasti koealan sädettä vastaan koh-tisuorasti tehdyissä mittauksissa oli poikkeamien keskihajonta 4,6 mm (1,7 %). Ristikkäismitta-

usten keskiarvosta laskettujen poikkeamien keskihajonta oli 3,5 mm (1,3 %).

Juupajoki I:ssä eli normaalisti mitatuissa puissa ristikkäismitausten keskiarvoista 27,2 % antoi saman tuloksen millimetrin luokkiin pyöristet-tyinä kuin vertailuarvo. Poikkeama jäi välille (-5,0– +5,0) 94,1 %:ssa mittauksista. Juupajoki II:ssa poikkeama oli 28,8 %:ssa nolla ja 97,2 %:ssa -5,0– +5,0 mm.

Poikkeamien keskihajonnat ovat puulajeittain taulukossa 3. Kuusen löpimitan poikkeaman keskihajonta on kaikissa tapauksissa pienin, mikä johtunee kuusen mittauskorkeuden poikkeami-en pienemmästä hajonnasta koivuun ja mäntyyn verrattuna sekä kuusen mäntyä tasaisemmasta kuoresta.

Rinnankorkeuslöpimitan poikkeamat vertailu-arvosta laskettiin myös koehenkilöittäin (tau-lukko 4). Koehenkilöiden välisiä eroja tutkittiin varianssianalyysillä. Juupajoki I:lle saatiin seu-raavat keskineliösummat:

Vaihtelulähde	Keskineliösumma	F-arvo
Henkilöiden välinen	0,226	1,98*
Henkilöiden sisäinen	0,118	

Juupajoki II:lle vastaavat tunnusluvut olivat:

Henkilöiden välinen	0,194	4,02***
Henkilöiden sisäinen	0,048	

Juupajoki I:ssä erot koehenkilöiden välillä oli-ivat tilastollisesti melkein merkitsevät ja II:ssa erittäin merkitsevät. Juupajoki I:ssä koehenkilö merkitsi muistiin oikeana pitämänsä mittauskorkeuden. Vertailuarvona oli mittauskorkeuk-sien keskiarvo. Aineiston perusteella ei voida selvittää, vastaako keskimääräinen mittauskor-keus keskimääräistä rinnankorkeusarvoa. Mit-

Taulukko 4. Ristikkäisen rinnankorkeuslöpimitan mittausvirheen keskiarvo (\bar{z}) ja keskihajonta (s) koehenkilöittäin (suluissa yhdeltä suunnalta, koealan sädetä vastaan mitattuna).
 Table 4. Mean (\bar{z}) and standard deviation (s) of errors of $d_{1,3}$ measurements by surveyors (in brackets results obtained from measurements from one direction only).

Koehenkilö Surveyor	Juupajoki I		Juupajoki II	
	\bar{z} , mm	s, mm	\bar{z} , mm	s, mm
1	0,7 (0,7)	3,2 (5,2)	1,3 (1,0)	1,7 (2,1)
2	0,3 (0,3)	3,0 (3,9)	-0,1 (0,0)	1,6 (1,7)
3	-0,1 (-0,3)	3,3 (3,8)	0,0 (1,3)	1,7 (6,8)
4	-1,1 (-1,1)	2,0 (3,0)	-0,5 (-0,6)	1,4 (2,0)
5	-1,6 (-2,1)	2,7 (3,6)	-1,3 (-0,7)	2,8 (4,2)
6	-0,1 (0,5)	2,9 (4,3)	-0,7 (-0,6)	1,4 (2,5)
7	-0,4 (-0,4)	2,6 (4,4)	0,2 (-0,2)	2,0 (3,0)
8	-0,2 (-0,1)	2,0 (2,6)	-0,7 (-0,6)	1,7 (2,4)
9	0,1 (-0,2)	4,3 (5,1)	0,1 (-0,6)	1,9 (2,7)
10	0,3 (0,0)	2,2 (2,8)	0,2 (0,0)	1,2 (1,6)
11	0,8 (0,9)	6,6 (7,2)	1,3 (1,6)	3,9 (4,3)
12	-0,3 (-0,8)	3,2 (4,5)	-0,6 (-0,6)	1,7 (2,7)
13	0,5 (0,0)	3,8 (4,9)	-0,1 (-0,3)	1,4 (2,1)
14	0,5 (-0,1)	3,6 (6,0)	0,1 (0,1)	4,0 (5,7)

tauskorkeuden poikkeamien keskihajonta oli 3,6 cm ja vaihteluväli -17,1–+16,8 cm.

Keskimääräisen mittauskorkeuden erot koehenkilöiden välillä olivat enimmillään 5,4 cm (taulukko 5). Suurin mitaajakohmainen mittauskorkeuden keskihajonta oli 5,2 cm ja pienin 2,4 cm. Varianssianalyysin perusteella mittauskorkeuden poikkeama riippuu erittäin merkitsevästi mitaajasta. Testiarvoiksi saatiin:

Vaihtelulähde	Keskineliösumma	F-arvo
Henkilöiden välinen	119.399	10.68***
Henkilöiden sisäinen	11.185	

Rinnankorkeuslöpimitan poikkeamalle ja mittauskorkeuden poikkeamalle saatiin negatiivinen korrelaatio ($r = -0,25$). Liian alhaalta mitattaessa löpimita yliarvioidaan ja liian ylhäältä mitattaessa aliarvioidaan.

Oletetaan, että rinnankorkeuslöpimitan vaihtelu jakaantuu kahteen osaan: mittauskorkeuden vaihtelusta johtuvaan ja muista syistä, esimerkiksi epäpyöreyydestä ja mittasaksien käsittelystä, johtuvaan vaihteluun. Juupajoki I -aineistossa, jossa mittauskorkeutta ei ollut vakioitu, mittausvirheen keskihajonnaksi saatiin 3,52 cm. Juupajoki II -aineistossa, jossa mittauskorkeus oli vakioitu, mittausvirheen keskihajonta oli 2,32 mm. Olettamalla kaksi eri virhelähdettä toisistaan riippumattomiksi, saadaan mittauskorkeuden osuus kokonaisvaihtelusta yhtälöstä (5).

$$3,52^2 = 2,32^2 + s_n^2, \quad (5)$$

missä s_n = mittauskorkeuden vaihtelun aiheuttaman virheen keskihajonta.

Taulukko 5. Koehenkilöittäisen mittauskorkeuden poikkeaman keskiarvo (\bar{z}) ja keskihajonta (s).

Table 5. The errors in measuring breast height by surveyors (\bar{z} = mean, s = standard deviation).

Koehenkilö Surveyor	\bar{z} , cm	s, cm
1	-0,9	3,9
2	-2,5	2,6
3	0,3	3,1
4	2,5	2,8
5	2,9	4,3
6	0,1	2,6
7	-1,6	3,1
8	-0,6	2,8
9	-1,0	3,1
10	0,2	3,9
11	0,4	3,2
12	0,6	2,6
13	-1,7	2,4
14	1,4	5,2

Yhtälön (5) perusteella mittauskorkeuden vaihtelu selittää 57 % rinnankorkeuslöpimitan kokonaisvirhevarianssista. Männyllä mittauskorkeuden vaihtelu selitti 46 % ja kuusella 72 % kokonaisvirhevarianssista. Syynä eroon lienee männyen epätasaisempi kuori ja kuusen tyven voimakkaampi kapeneminen.

Mittauskorkeuden poikkeamien sekä ristikkäin mitatun rinnankorkeuslöpimitan mittausvirheiden puulajeittaisia eroja tutkittiin yksisuuntaisella varianssianalyysillä. Virheille ei löytynyt merkitsevästi puulajeista johtuvia eroja.

Taulukko 6. Koehenkilöittäisen kantoläpimitan (d_k) ja yläläpimitan (d_6) poikkeamien keskiarvo (\bar{z}) ja keskihajonta (s).

Table 6. The errors of measured stump diameters (d_k) and upper diameters (d_6) by surveyors (\bar{z} = mean, s = standard deviation).

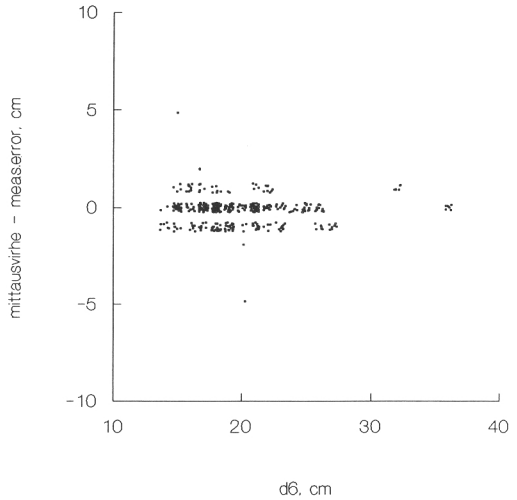
Koehenkilö Surveyor	d_k		d_6	
	\bar{z} , mm	s , mm	\bar{z} , cm	s , cm
1	-5,2	9,0	-0,1	0,7
2	8,0	9,2	0,1	0,5
3	-0,9	9,6	0,1	1,3
4	4,9	8,7	-0,1	0,5
5	14,5	12,0	0,1	0,5
6	-1,5	10,0	-	-
7	1,4	11,0	-	-
8	-0,3	8,1	-	-
9	4,0	10,3	-	-
10	0,5	9,0	-	-
11	4,6	15,4	-	-
12	-6,8	9,2	-	-
13	-2,2	9,4	-	-
14	0,6	11,6	-	-

42. Kantoläpimitan mittausvirheet

Juupajoen kantoaineistosta poistettiin kolme vääristä asteikon lukemisesta tai kirjaamisesta johtuvaa yli 8 cm:n mittauseroa, jolloin jäljelle jäi 1 159 mittaukskertaa. Keskihajonta kantoläpimittojen poikkeamissa oli 11,6 mm, joka oli 3,4 % kantoläpimittojen keskiarvosta (34,4 cm). Mittauksista 95,3 %:ssa kantoläpimitan poikkeama sijoittuu -25– +25 mm:n välille.

Männyllä kantoläpimitan poikkeaman keskihajonta oli 13,8 mm (3,2 % kantoläpimittojen keskiarvosta), kuusella 9,5 mm (3,2 %) ja koi-vulla 14,5 mm (4,2 %). Puulajien ja kantoläpimitan poikkeamien välille ei varianssianalyysia käyttäen löydetty merkitsevää riippuvuutta. Mittauksen poikkeamat johtuvat tyven epäsäännöllisestä muodosta sekä mittauskohdan epätarkasta määrittämisestä.

Koehenkilöiden taipumus joko yli- tai aliarvi-oon suhteessa koko joukon keskiarvoon näkyy taulukosta 6. Suurimman keskimääräisen yli- ja aliarvion välillä oli eroa 21,3 mm. Suurin henkilökohtainen poikkeamien keskihajonta oli 15,4 mm ja pienin 8,1 mm. Mittaajan harhan hajonta oli 5,6 mm.



Kuva 6. Yläläpimitan mittausvirhe todellisen yläläpimitan funktiona.

Figure 6. The error of measured d_6 as a function of d_6 .

43. Yläläpimitan mittausvirheet

Kuuden metrin läpimitan mittauksessa oli 0,1 cm:n aliarvio, joka on 0,5 % yläläpimittojen keskiarvosta (20,3 cm). Satunnaisvirhe oli 0,7 cm (3,2 %). Vertailuarvon kanssa samaan 1 cm:n luokkaan sattui 68,8 % mittauksista. Poikkeama oli enimmillään 5 cm ja 98,8 % poikkeamista sijoittui välille -1,0– +1,0 cm (ks. kuva 6).

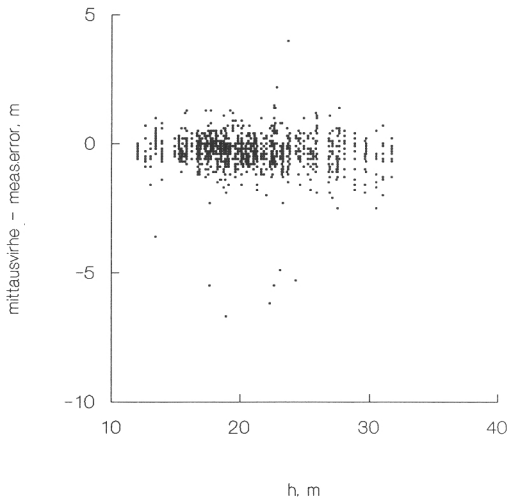
Puulajittaiset systemaattiset ja satunnaisvirheet sekä niiden suhteelliset osuudet keskimääräisestä yläläpimitasta näkyvät seuraavasta asetelmasta:

	Systemaattinen virhe		Satunnaisvirhe		Mittauksia kpl
	cm	%	cm	%	
Mänty	-0,1	0,5	0,6	3,1	366
Kuusi	-0,1	0,4	0,7	3,4	154

Koehenkilöittäiset mittausvirheiden keskiarvot ja keskihajonnat ovat taulukossa 6.

44. Pituuden mittausvirheet

Mittaustulosten systemaattiseksi poikkeamaksi kaadetuista puista mitatuista vertailuarvoista saatiin 3,2 dm:n aliarvio, joka oli 1,6 % puiden pituuksien keskiarvosta (20,4 m). Mittaustuloksista 8,6 % oli täysin oikeita dm:n luokissa mitattuna. Poikkeamista 95 % sijoittui välille -15– +9 dm. Poikkeamien vaihteluväli oli



Kuva 7. Pituuden mittausvirhe puun todellisen pituuden funktiona.

Figure 7. The error of measured height as a function of the height of the tree.

-67– +40 dm ja keskihajonta 6,7 dm (ks. kuva 7). T-testin mukaan systemaattinen poikkeama oli erittäin merkitsevä ($t = 17,28^{***}$).

	Systemaattinen virhe	Satunnaisvirhe	Keskipituus kpl	Mittauksia
Mänty	-3,1 dm	7,1 dm	20,5 dm	826
Kuusi	-3,3 dm	5,5 dm	19,4 dm	415
Koivu	-3,2 dm	7,9 dm	25,3 dm	68

Taulukosta 7 nähdään pituusmittausten poikkeamat eri mittauskokeissa. Tulokset eri kokeissa ovat yhteneväisiä Taivalkosken pientä aineistoa lukuunottamatta.

Koehenkilöistä verrattiin viittä kaikissa mittauskokeissa mukana ollutta (taulukko 8). He olivat mitanneet yhteensä 463 kertaa pituuden. Koehenkilöiden väliset erot mitausten poikkeamissa olivat erittäin merkitseviä ($F = 25.03^{***}$).

45. Pituuskasvun mittausvirheet

Tässä tutkimuksessa havupuiden viiden vuoden pituuskasvu yliarvioitiin vertailuarvoon nähden keskimäärin 1,4 dm (21,2 % pituuskasvujen keskiarvosta). Poikkeamien hajonta oli 2,7 dm (40,9 %). Mittauksista 21,0 %:ssa saatiin desimetrin tarkkuudella sama tulos kuin tarkistuksessa. Poikkeama jäi välille -4– +6 dm 95,9 %:ssa mittauksista. Enimmillään poikkeama oli 16 dm.

Pituuskasvumittauksen poikkeaman ja puun

Taulukko 7. Pituusmittausten harhat (\bar{z}) ja satunnaisvirheet (s) eri mittauskokeissa.

Table 7. Bias (\bar{z}) and random errors (s) of height measurements by experiments.

Koe Experiment	\bar{z} , dm	s, dm	Mittauksia No. of measurements
Solböle	-3,3	6,4	350
Punkaharju	-4,1	6,8	308
Kauhajoki	-3,6	8,6	192
Paltamo	-1,5	4,8	131
Kannus	-2,9	7,3	150
Taivalkoski	2,4	5,0	26
Rovaniemi	-3,2	4,3	152

Taulukko 8. Pituusmittausten harhat (\bar{z}) ja satunnaisvirheet (s) koehenkilöittäin.

Table 8. Bias (\bar{z}) and random errors (s) of height measurements by surveyors.

Koehenkilö Surveyors	\bar{z} , dm	s, dm
1	-4,6	5,6
2	-0,7	4,7
3	-1,3	5,3
4	-1,8	4,0
5	2,7	4,5

pituuden välillä oli erittäin merkitsevä positiivinen korrelaatio ($r = 0,116^{***}$). Pitkillä puilla pituuskasvun yliarvio oli suurempi kuin lyhyillä puilla (ks. kuva 8).

Puulajeittaiset pituuskasvun systemaattiset ja satunnaiset virheet sekä niiden suhteelliset osuudet pituuskasvusta olivat seuraavat:

	Systemaattinen virhe		Satunnaisvirhe		Mittauksia kpl
	dm	%	dm	%	
Mänty	1,0	18,0	2,2	39,6	407
Kuusi	1,9	24,0	3,3	41,8	311

Varianssianalyysillä puulajien välille saatiin erittäin merkitsevä ero.

Taulukosta 9 nähdään pituuskasvumittausten poikkeamat vertailuarvosta eri mittauskokeissa. Eri mittauskokeiden välillä ei ole huomattavia eroja.

Lopuksi vertailtiin kaikissa mittauskokeissa mukana ollutta viittä koehenkilöä, jotka olivat tehneet yhteensä 283 pituuskasvumittausta. Koehenkilöiden välinen ero pituuskasvumittausten poikkeamissa oli erittäin merkitsevä varianssianalyysillä testattaessa. Henkilöiden välinen keskineliösumma oli 36,58 (F -arvo 5,34^{***}) ja henkilöiden sisäinen 6,85.

5. Mittausvirheiden vaikutus tilavuus- ja kasvuestimaatteihin

51. Puittaiset estimaatit

Simuloiteja varten Juupajoki I:n aineistosta laskettiin läpimitan mittausvirheen mittaajien välinen ja sisäinen varianssikomponentti (ks. Searle 1971, s. 474). Laskennassa käytettiin ainoastaan koealan säteeseen nähden kohtisuoraan mitattua läpimittaa. Mittaajien väliseksi keskihajonnaksi saatiin männyllä 0,76 mm ja kuusella 0,93 mm. Mittaajakohtainen keskihajonta oli männyllä 4,98 mm ja kuusella 3,80 mm. Mittaustulosten vaihtelusta pääosa on mittaajakohtaista vaihtelua.

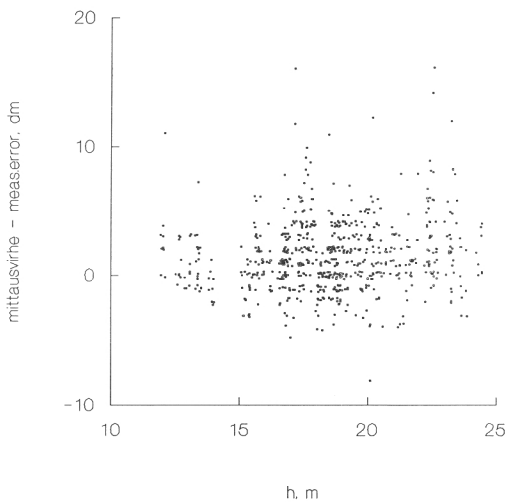
Pituuden mittausvirheen mittaajien välinen ja mittaajakohtainen komponentti estimoitiin Solbölen VMI-retkeilyn yhteydessä kerätystä aineistosta, joka oli tähän tarkoitukseen laajin. Aineistossa 9 eri mittaajaa oli mitannut pituuden 17 männystä ja 22 kuusesta. Mittaajien väliseksi keskihajonnaksi saatiin männyllä 1,75 dm ja kuusella 2,86 dm. Mittaajakohtainen keskihajonta oli männyllä 6,70 dm ja kuusella 5,17 dm. Tulosten mukaan pituuden mittausvirheen vaihtelusta pääosa on mittaajakohtaista vaihtelua,

mutta henkilöiden väliset erot ovat suhteellisesti suurempia kuin läpimitan mittauksessa.

Rinnankorkeusläpimitan ja pituuden mittausvirheiden vaikutusta runkotilavuuden estimaattiin simuloitiin mallilla, jossa männyn läpimitaan lisättiin mittaajakohtainen satunnaisvirhe 5,0 mm kerrottuna normaalijakauman (0,1) satunnaistekijällä. Samaten pituuteen lisättiin satunnaisvirhe 0,7 m kerrottuna normaalijakauman satunnaistekijällä. Simuloitavia puita oli 100 kappaletta. Mallin perusteella läpimitan ja pituuden mittauksen satunnaisvirheet aiheuttivat 15 ja 25 cm läpimitaisten mäntyjen runkotilavuuteen (v) seuraavanlaisen hajonnan (s_v):

d _{1,3} cm	h m	v dm ³	dm ³	s _v %
15	14	126	11	9
25	21	481	28	6

Puukohtaiset kasvut laskettiin 15 ja 25 cm:n puille viiden ja kymmenen vuoden jaksoilla. Puille laskettiin oikea tilavuus sekä mittausvirheet sisältävä tilavuusestimaatti jakson alussa ja lopussa. Kasvu laskettiin erotusmenetelmällä eli



Kuva 8. Pituuskasvun mittausvirhe puun pituuden funktiona.

Figure 8. The error of measured height increment as a function of the height of the tree.

Taulukko 9. Viiden vuoden pituuskasvun mittausten harhat (z̄) ja satunnaisvirheet (s) puulajeittain eri mittauskokeissa.

Table 9. Bias (z̄) and random errors (s) of measurements of 5 years height increment by experiments and tree species.

Koe Experiment	z̄, dm	s, dm	Mittauksia No. of measurements
Solböle			
Mänty — Pine	0,6	2,1	153
Kuusi — Spruce	2,4	3,5	197
Yht. — Total	1,6	3,1	350
Kauhajoki			
Mänty — Pine	1,8	2,0	152
Kuusi — Spruce	1,8	2,2	40
Yht. — Total	1,8	2,0	192
Kannus			
Mänty — Pine	0,6	2,5	80
Kuusi — Spruce	0,6	2,8	70
Yht. — Total	0,6	2,6	150
Taivalkoski			
Mänty — Pine	0,7	1,5	22
Kuusi — Spruce	0,0	0,0	4
Yht. — Total	0,6	1,4	26

Taulukko 10. Rinnankorkeusläpimitan ja pituuden mittauksen satunnaisvirheen aiheuttama runkofilavuuden kasvu-estimaatin hajonta männyllä.

Table 10. Effect of random measurement errors on the volume increment estimate of a Scots pine.

1)	2) cm	3) cm	4) cm	5) m	6) m	7) m	8) dm ³	9) dm ³	10) %
5	15	16,5	0,5	14	15,2	0,7	37,4	17,6	47,1
5	25	26,0	0,5	21	21,7	0,7	51,4	38,4	74,7
10	15	17,9	0,5	14	16,3	0,7	77,8	19,5	25,1
10	25	26,8	0,5	21	22,3	0,7	95,4	39,5	41,4

- | | | |
|---|--|---|
| 1) kasvujakso, n vuotta
<i>time interval between measurements</i> | 5) pituus jakson alussa
<i>height at the beginning of the period</i> | 8) oikea tilavuuskasvu
<i>true volume increment</i> |
| 2) rinnankorkeusläpimita jakson alussa
<i>d_{1,3} at the beginning of the period</i> | 6) pituus jakson lopussa
<i>height at the end of the period</i> | 9) kasvuestimaatin keskihajonta
<i>standard deviation of the increment estimate</i> |
| 3) rinnankorkeusläpimita jakson lopussa
<i>d_{1,3} at the end of the period</i> | 7) pituuden mittauksen satunnaisvirhe
<i>standard deviation of the height measurement error</i> | 10) kasvuestimaatin variaatiokerroin
<i>coefficient of variation of the increment estimate</i> |
| 4) rinnankorkeusläpimitan mittauksen satunnaisvirhe
<i>standard deviation of the d_{1,3} measurement error</i> | | |

loppu- ja alkutilavuuden erotuksena. Laskennassa oletettiin, että sama mittaaja oli mitannut läpimitan ja pituuden jakson alussa ja lopussa. Täten satunnaisvirheeksi valittiin mittaajakohdainen virhekomponentti, eli läpimitalle 5 mm ja pituudelle 7 dm. Tulokset ovat taulukossa 10.

Pituuskasvumittausten virheiden vaikutusta puun tilavuuskasvun luotettavuuteen tutkittiin olettamalla läpimitaltaan 26 cm:n puusta mitatuksi läpimitan ja pituuden kasvu menneellä 5-vuotiskaudella. Nykyhetken läpimita (26 cm) ja pituus (21,7 m) sekä läpimitan kasvu (10 mm) oletettiin mitatuksi virheettä. Todelliseksi pituuskasvuksi oletettiin 70 cm. Pituuskasvumittaukseen oletettiin 18 cm:n yliarvio ja 21 cm:n satunnaisvirhe. Valitut virheet saatiin laskemalla aineiston 20–25 -metristen puiden pituuskasvumittausten keskimääräinen virhe ja virheen keskihajonta.

Edellä mainituilla oletuksilla puun todelliseksi tilavuuskasvuksi saatiin 51,5 dm³. Pituuskasvumittausten virheet aiheuttivat tilavuuskasvuestimaattiin 3,23 dm³:n (6,3 % todellisesta kasvusta) yliarvion. Läpimitan kasvun suurentuessa pituuskasvun mittausrvirheen suhteellinen merkitys luonnollisesti pienenee. Jos edellä kuvatussa tilanteessa läpimitan kasvuksi olisi oletettu 20 mm, tilavuuskasvuestimaatin harhaksi olisi saatu 3,2 %.

52. Koealoittaiset estimaatit

Koealakohtaiset tilavuudet simuloitiin 60–75 -vuotiaalle puolukkatyyppin männikölle ja samankäiselle mustikkatyyppin kuusikolle. Puulaji,

Taulukko 11. Rinnankorkeusläpimitan ja pituuden satunnaisten ja systemaattisten mittausrvirheiden vaikutus tilavuuskasvun estimaatin luotettavuuteen 60–75 -vuotiaassa metsikössä 600 m²:n koealalla.

Table 11. Standard deviation of volume increment estimate caused by random errors and biases in *d_{1,3}* and height measurements in a 60–75 years old stand. (Plot size is 600 sq.m.)

1) a	2) n	3) m ³ /ha	4) m ³ /ha	5) m ³ /ha	6) %
Männikkö — Scots pine stand					
60	0	263,3			
			26,0	5,33	20,5
65	5	288,3			
			54,0	5,83	10,8
70	10	316,7			
			83,5	5,67	6,8
75	15	346,7			
Kuusikko — Norway spruce stand					
60	0	275,0			
			27,3	7,67	28,0
65	5	301,7			
			56,8	7,83	13,8
70	10	331,7			
			88,2	8,00	9,1
75	15	363,3			

- 1) Metsikön ikä
Age of the stand
- 2) Jakson pituus
Length of the period
- 3) Puuston tilavuus
Mean volume of the sample plot
- 4) Kumulatiivinen tilavuuskasvu
Cumulative volume increment
- 5) Tilavuuskasvun estimaatin keskihajonta
Standard deviation of the volume increment estimate
- 6) Kasvuestimaatin variaatiokerroin
Coefficient of variation

puuston keskiläpimitta, keskipituus ja ikä, metsikön pohjapinta-ala sekä suurin ja pienin puu lähtötietoina laskettiin läpimittajakaumaa kuvaavaa betajakauma (Päivinen 1980). Läpimitan vaihteluväli jaettiin 20 läpimittaluokkaan, joille laskettiin frekvenssi. Läpimittaluokkien runkotilavuudet laskettiin Laasasenahon (1982) runkoikäyrillä.

Koealojen puille laskettiin oikeat tilavuudet sekä mittausvirheen sisältävät tilavuudet 5, 10 ja 15 vuoden kasvujaksoilla. Kullekin läpimittaluokalle laskettiin mittausvirheen sisältävä läpimitta seuraavasti:

$$d_i' = d_i + \frac{s}{\sqrt{n_i}} \times e_1 + B \times e_2, \quad (6)$$

missä

d_i' = läpimittaluokan i mitattu keskipiste,

d_i = läpimittaluokan i oikea keskipiste,

s = läpimitan mittauksen satunnaisvirhe,

B = läpimitan mittauksen systemaattinen virhe,

n_i = puiden lukumäärä läpimittaluokassa i ,

e_1 ja e_2 ovat satunnaislukuja, joiden odotusarvo = 0 ja hajonta = 1.

Pituus laskettiin vastaavalla tavalla.

Mittausvirheen sisältävä tilavuuden laskenta toistettiin samalla runkolukusarjalla, mutta eri satunnaistekijöillä kerrottuna 50 kertaa jakson alussa ja lopussa. Simuloinnissa oletettiin, että kulloisenkin kasvujakson lopussa puuston mitattiin eri henkilö kuin jakson alussa. Tällöin mit-

tausvirheeseen otettiin mukaan sekä mitaajien välinen että sisäinen komponentti.

Läpimitan mittausvirheet olivat männyllä 0,76 mm (mittaajien välinen) ja 4,98 mm (mittaaja-kohtainen). Kuusella vastaavat luvut olivat 0,93 ja 3,80 mm. Pituuden mittausvirheiksi oletettiin männyllä 1,75 dm (mittaajien sisäinen) ja 6,70 dm (mittaaja-kohtainen). Kuusella vastaaviksi luvuiksi otettiin 2,86 ja 5,17 dm.

Koealan puuston tilavuus on saatu laskemalla yhteen eri läpimittaluokkien keskimääräiset runkotilavuudet kerrottuna läpimittaluokan runkoluvulla. Koealan kooksi oletettiin 600 m². Koealan puuston kasvu laskettiin erotusmenetelmällä kahden ajankohdan välisenä puuston tilavuuden muutoksena. Puuston kasvu simuloitiin virheettömänä sekä systemaattisen ja satunnaisvirheen sisältävänä. Tulokset on esitetty taulukossa 11.

Taulukon 11 mukaan kasvuarvion hajonnan suhteellinen osuus kasvusta on sitä pienempi, mitä pidempi mitattava kasvujakso on. Männikössä kasvuarvion hajonta on 20,5% viiden vuoden kasvusta ja 6,8 % 15 vuoden kasvusta. Vastaavat luvut kuusikossa olivat 28,0 % ja 9,1 %.

Satunnaisvirheen vaikutus puuston tilavuuden estimaattiin on kääntäen verrannollinen koealan runkoluvun neliöjuureen. Sitä vastoin mitaaja-kohtaisen virheen vaikutus ei pienene runkoluvun kasvaessa. Mittaaja-kohtaisen virheen merkitystä voidaan vähentää lisäämällä mitaajien määrää ja koulutusta.

6. Päätelmät

Tutkimuksessa saatujen tulosten mukaan sekä läpimitan että pituuden mittausvirheestä pääosa on mitaajien sisäistä virhettä ja vain pieni osa mitaajien välistä vaihtelua. Tästä voidaan päätellä, ettei pysyviä koealoja mitattaessa ole kovin suurta merkitystä sillä, onko ensimmäisen ja toisen mittauskerran mitaaja sama henkilö. Suuri merkitys sen sijaan on mittauskorkeuden ja -suunnan vakiona pitämisellä sekä luonnollisesti mitaajan huolellisuudella ja ammattitaidolla.

Lyhyellä kasvujaksolla (esimerkiksi 5 vuotta) mittausvirheet aiheuttavat sen, että tilavuuskasvun estimointi peräkkäisten mittausten avulla on epäluotettavaa. Puutasolla tilavuuskasvun estimaatin keskivirhe voi olla lähes 75 % ja koealatasollakin yli 20 %. Jos koealoja on useita, virheet kumoavat toisensa ja keskivirhe lähenee nollaa. Jos peräkkäisten mittausten systemaatti-

set virheet ovat vastakkaismerkkisiä, kasvun estimaatti säilyy kuitenkin harhaisena myös koealamäärän kasvaessa.

Estimoitaessa puun menneen kauden kasvua rinnankorkeusläpimitan kasvu mitataan kairanlastusta ja pituuskasvu kiikarilla. Pituuskasvun mittauksissa havaittu systemaattinen yliarviot suurilla puilla aiheuttaa selvää yliarviota myös tilavuuskasvuestimaattiin. Metsikkötasolla tai suurilla alueilla harhan suuruus riippuu pituuden ja läpimitan kasvujen suhteesta sekä puuston kokojakaumasta: pienillä puilla systemaattista mittausvirhettä aineistossa ei havaittu.

Tarkasteltaessa tämän tutkimuksen kasvuestimaattien luotettavuudesta esitettyjä tuloksia on otettava huomioon, että kasvun laskennassa puun muodon on oletettu kehittyvän $d_{1,3}$:n ja h :n kehityksen funktiona samalla tavoin kuin muoto on

kehittynyt $d_{1,3:n}$ ja $h:n$ funktiona siinä aineistossa, josta Laasasenahon (1982) runkokäyrämallit on laadittu. Esimerkiksi VMI:n tulosten laskennassa puun muodon kehittyminen iän mukana estimoidaan pituden kehityksen avulla, joten pituuskasvumittausten virhe ei välttämättä vaikuta siellä samalla tavoin kuin tässä käytetyssä erotusmenetelmässä.

Tuloksista voidaan päätellä, että metsän in-

ventoijien on tarkkailtava erityisesti pituuskasvun mittauksen harhaa ja satunnaisvirhettä. On todennäköistä, että jos käytettävissä olisi edustava kaatokoepuista mitattu aineisto, pituuskasvumittaukset kannattaisi korvata malleilla. Pituuskasvuaineiston puuttuessa pituden kehitystä voidaan yrittää estimoida myös poikkileikkausaineiston avulla laatimalla regressiomallit puun pituudelle puun iän ja läpimitan funktiona.

Kirjallisuus — References

- Alalammi, E. 1968. Puun pituuskasvun arvioimistarkkuudesta ja sen vaikutuksesta kasvun arvioon. *Laudaturtyö*. Helsingin yliopisto, metsänarvioimistieteen laitos. 43 s.
- Brickell, J.E. 1970. More on diameter tape and calipers. *Journal of Forestry* 68(3): 169–170.
- Cochran, W.G. 1963. *Sampling techniques*. 2. painos. John Wiley & Sons, New York. 413 s.
- Daamen, W. 1980. Kontrolltaxeringen åren 1973–1977. Sveriges Landbruksuniversitet. Institutionen för Skogstaxering. Rapport 27. 189 s.
- Eriksson, H. 1970. Om mättningsfel vid höjdmätning av stående träd med olika instrument. Skogshögskolan, institutionen för skogsproduktion, rapporter och uppsatser 19. 42 s.
- Fitje, A. 1967. Feil ved hojdemåling av enkeltraer. Summary: Errors in the height measurement of individual trees. *Meddelelser, Norske Skogforsoksvesen*, Bind 22, Hefte 84:103–137.
- Hyppönen, M. 1977. Koepuiden mittauksen tehokkuus. Pro gradu -työ. Helsingin yliopisto, metsänarvioimistieteen laitos. 67 s.
- & Roiko-Jokela, P. 1978. Koepuiden mittauksen tarkkuus ja tehokkuus. Summary: On the accuracy and effectivity of measuring sample trees. *Folia Forestalia* 356. 25 s.
- Ihalainen, A. 1987. Puukohtaisten mittausten ja arviointien luotettavuudesta valtakunnan metsien 8. inventoinnissa pysyvillä koealoilla. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 267. 37 s.
- Kujala, M. 1979. Mittaustarkkuus valtakunnan metsien inventoinnissa. Moniste. Metsäntutkimuslaitos, metsänarvioimisen tutkimusosasto. 8 s.
- Kärkkäinen, M. 1984. Puutavaran mittauksen perusteet. Helsingin yliopisto, metsäteknologian laitos. 252 s.
- Laasasenaho, J. 1979. Maanpinta tai juurenniska puunmittauksen lähtöpisteeksi. *Metsä ja Puu* 12: 40–41.
- 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Seloste: Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrätilavuusyhtälöt. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108. 74 s.
- Loetsch, F., Zöhrer, F. & Haller, K.E. 1973. *Forest inventory Volume II*. BLV Verlagsgesellschaft. München. 469 s.
- Matérn, B. 1967. Om mätning av höjdtillväxt med kikkare. Moniste. 2 s.
- Mielikäinen, K. 1985. Koivusekoituksen vaikutus kuusikon rakenteeseen ja kehitykseen. Summary: Effect of an admixture of birch on the structure and development of Norway spruce stands. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 133. 79 s.
- Nousiainen, M. 1986. Metsän koelaininventoinnissa tarvittavien koepuumittausten luotettavuus. Pro gradu -työ. Helsingin yliopisto, metsänarvioimistieteen laitos. 60 s.
- Päivinen, R. 1980. Puiden läpimitajakauman estimointi ja siihen perustuva puustotunnusten laskenta. Summary: On the estimation of the stem-diameter distribution and stand characteristics. *Folia Forestalia* 442. 28 s.
- 1987. Metsän inventoinnin suunnittelumalli. Summary: A planning model for forest inventory. *Joen-suun yliopiston luonnontieteellisiä julkaisuja* 11. 179 s.
- Searle, S.R. 1971. *Linear models*. John Wiley, New York. 532 s.
- Tiihonen, P. 1971. Ergebnisse von Versuchen zur Bestimmung der Genauigkeit bei der Schätzung des Höhenzuwachses XIV IUFRO-kongress. München. Referate VI, Section 25: 532–545.
- 1967b. Pituuskasvun arvioimisesta. *Metsätaloudellinen Aikauslehti* 5–6: 190–191.
- Tiren, L. 1929. Über Grundflächenberechnung und ihre Genauigkeit. Resume: Om grundytberäkning och dess noggrannhet. *Meddelanden, Statens Skogsför-söksanst.* 25: 229–304.

Total of 23 references

Summary

Accuracy of certain tree measurements

In the estimation of the volume of growing stock, errors may arise due to the sampling, the use of the tables or functions, and due to the measurements. In this study, measurement errors of certain tree measurements are discussed. The characteristics studied were diameters at breast height and at six meters' height, stump diameter, height of the tree and height increment of past five years. The aim of the paper is to present bias and random errors in the measurements and their dependence on the measurement result itself, the surveyor and tree species. Correlation analysis and analysis of variance were applied. For $d_{1,3}$ and height measurements errors between surveyors and within surveyors were estimated using formulae for estimation of variance components (see e.g. Searle 1971 p. 474).

Finally, simulation experiments were carried out in order to study the effect of the random measurement errors on the volume and on the volume increment estimates.

The study material consists of eight measurement experiments carried out by The Finnish Forest Research Institute during the years 1977–1984. The surveyors, 8–14 in each experiment, were crewleaders of the National Forest Inventory. Five crewleaders were present in all experiments.

The measurement methods and equipment used in the experiments were those employed in the field work of the Finnish National Forest Inventory. The breast height diameter and stump diameter were measured using a metallic beam (Fig. 1) divided into 1 mm classes, while diameter at the height of six meters was measured in 1 cm classes using a parabolic caliper with a 5-meter rod (Fig. 3).

The height of a tree was measured with Suunto hypsometer (Fig. 4). The heights were generally classified in 1 meter and sometimes in 1 dm classes. Height increment was measured using binoculars with a measurement scale.

Two different data sets were collected for diameter measurement studies. In the first data set, combined from several experiments, $d_{1,3}$ was measured 520 times from 64 trees. A carefully measured diameter was considered to be the 'checked' value. In the data labelled Juupajoki I, 14 surveyors measured diameters of 50 trees from two directions at right angles to each other. In addition, surveyors registered the measurement height according to a scale on the stem. In the data set labelled

Juupajoki II, 33 trees were measured so that breast height was marked on the trees in advance. In both of the Juupajoki experiments, the average of all results was taken as the checked value.

In the combined data, the standard deviation of the differences between the checked and measured values was 6.9 mm. (Table 3, Fig. 5). The average difference showed an overestimation of 0.8 mm. In the data set Juupajoki I, the standard deviation of breast height diameter measurements was 4.6 mm when measured in one direction and 3.5 mm when calculated as a mean of diameters at two directions. The standard deviation of the error of the breast height estimate was 3.6 cm (Table 5).

In the data set Juupajoki I, also the variance components of the $d_{1,3}$ measurement error were estimated. For pine the standard deviation of errors between surveyors was 0.76 mm and within surveyors 4.98 mm. For spruce standard deviations were 0.93 and 3.80 mm, respectively.

Stump diameter, defined as the diameter measured at a certain direction, was measured 1162 times from 83 trees in Juupajoki. The standard deviation was 1.2 cm. The diameter at the height of six meters was measured 520 times from 64 trees. The checked value was obtained by felling the trees and measuring the diameter with a metallic caliper. On average, measured diameters were 0.1 cm lower than the checked diameters. The standard deviation of the differences was 0.7 cm, including the errors due to the grouping into 1 cm classes.

The height of a tree was measured from 15 trees 1309 times using the Suunto hypsometer. Checked values were measured with a measuring tape after felling the tree. An under estimation of 32 cm was found. The standard deviation of the measurement errors was 67 cm (Fig. 7). A positive correlation between the difference and the height of the tree was found. The standard deviation between surveyors was 1.75 dm for pine, and 2.86 dm for spruce. The standard deviations within surveyors were 6.70 dm and 5.17 dm, respectively.

The height increment of the past 5 years was measured 718 times from 84 Scots pines and Norway spruces. Increments were measured with binoculars with a scale and tables to convert the obtained values into decimeters. Trees were felled for checking the measurements. The height increment was overestimated by 14 cm (21 %) with a standard deviation of 27 cm (41 %). Using

classes of 1 dm, every fifth measurement was equal to the checked value. The differences were greater in tall trees than in small trees, and the overestimation was greater for spruce than for pine (Table 9, Fig 8). Differences between the surveyors were significant.

In a simulation study, the effect of the random errors in $d_{1.3}$ and height measurements on the volume were examined. The standard deviation of measurement errors was assumed to be 0.69 cm for the $d_{1.3}$ and 67 cm for the height of the tree. It was estimated that these measurement errors cause a standard deviation of 9 % in the volume estimate of a pine with $d_{1.3}$ 15 cm and a standard deviation of 6 % for pine width d_{13} 25 cm.

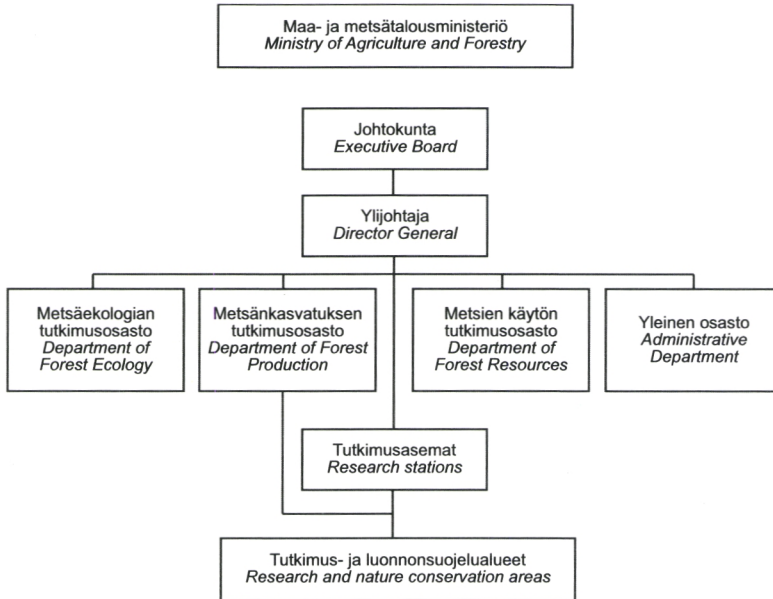
The effect of measurement errors on the estimation of growth with successive measurement was studied, also. Measurements were simulated on a plot of 600 square meters in a 60 years old Scots pine stand and a similar Norway spruce stand. Remeasurements were assumed after 5, 10 and 15 years. It was assumed that the measurer at the beginning of the 5, 10 or 15 years period was not the same as at the end of the period. Thus, both between and within surveyor errors were assumed to be present. For pine these errors were 0.76 mm and 4.98

mm for the diameter and 1.75 dm and 6.70 dm for the height. For spruce the errors were 0.93 mm, 3.80 mm, 2.86 dm and 5.17 dm, respectively.

The standard deviation of the errors of the growth estimates are presented in Table 11. For example, when the time interval between the two measurements is 5 years, the error is 20.5 % for the pine stand. With an interval of 15 years the error is only 6.8 %.

The results show, that the estimation of growth as a difference between two adjacent measurements is not reliable when the time interval is short. An alternative method is to measure the diameter and height increments directly. Since the reliability of measuring the diameter increment with an increment borer could not be studied with this study material, it was not possible to compare these two methods. However, the effect of systematic and random errors in the measurement of the height increment was studied. For a pine with $d_{1.3}$ 26 cm a systematic measurement error of 18 cm and a random error of 21 cm caused an overestimation of 3–6 % in the volume increment estimate. The bias depends on the diameter and height increment and the size of the tree.

METSÄNTUTKIMUSLAITOS — *THE FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE*



Metsäntutkimuslaitos — *The Finnish Forest Research Institute*

Unioninkatu 40 A, SF-00170 Helsinki, Finland

tel. +358-0-857 051, fax +358-0-625 308, telex 121298 metla sf

Ylijohtaja — *Director General*
Hallintojohtaja — *Administrative Director*
Tiedotuspäällikkö — *Head of Information*

Eljas Pohtila
Tero Oksa
Marja Ruutu

Metsäekologian tutkimusosasto — *Department of Forest Ecology*

Tutkimusjohtaja — *Research Director* Eero Paavilainen

Metsänkasvatuksen tutkimusosasto — *Department of Forest Production*

Tutkimusjohtaja — *Research Director* Jari Parviainen

Metsien käytön tutkimusosasto — *Department of Forest Resources*

Tutkimusjohtaja — *Research Director* Risto Seppälä (Aarne Reunala)

Tutkimusasemat — *Research Stations*

Joensuu	Parkano
Kannus	Punkaharju
Kolari	Rovaniemi
Muhos	Suonenjoki



- No 781 Hökkä, Hannu, Piironen, Marja-Leena & Penttilä, Timo: Läpimittajakau-
man ennustaminen Weibull-jakaumalla Pohjois-Suomen mänty- ja koivu-
valtaisissa ojitusaluemetsiköissä.
The estimation of basal area-dbh distribution using the Weibull-function for
drained pine- and birch dominated and mixed peatland stands in north
Finland.
- No 782 Niemistö, Pentti. Hieskoivikoiden kasvatustiheys ja harvennusmallit
Pohjois-Suomen turvemilla.
Growing density and thinning models for *Betula pubescens* stands on
peatlands in northern Finland.
- 1992
- No 783 Riihinen, Arto & Uotila, Antti: Versosurman vaikutus varttuneiden männi-
köiden kasvuun.
Effect of Scleroderris canker on the growth of middle-aged Scots pine
stands.
- No 784 Siekkinen, Virpi & Pajuoja, Heikki: Suomen piensahat 1990.
Small sawmills in Finland, 1990.
- No 785 Kinnunen, Kaarlo: Kylvöalustan, ajankohdan ja menetelmän vaikutus
männyn kylvön onnistumiseen.
Effect of substratum, date and method on the post-sowing survival of
Scots pine.
- No 786 Ihalainen, Antti, Korhonen, Kari T. & Varjo, Jari: Puiden käyttöosan
mittauksiin perustuva metsurimittaus.
Estimation of harvested timber volume using treewise measurements
made during felling.
- No 787 Päivinen, Risto, Nousiainen, Merja & Korhonen, Kari, T.: Puutunnusten
mittaamisen luotettavuus.
Accuracy of certain tree measurements.
- No 788 Saarilahti, Martti: Turpeen kokoonpuristuvuus ja tiealueen kuivatuspainu-
man arviointi.
Compressibility of peat and estimation of drainage settlement of a road
right-of-way.