

METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 750

METSÄNTUTKIMUSLAITOS  
Uotsinkylän koulutussäsema  
Metsäentie 230  
01500 MAISALA

# YKSIOTEHARVESTERIN MITTAUSTARKKUUDEN RIIPPUVUUS RUNGON OMINAISUUKSISTA

Jari Ala-Ilomäki







**METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 450**

**YKSIOTEHARVESTERIN MITTAUSTARKKUUDEN RIIPPUVUUS  
RUNGON OMINAISUUKSISTA**

Jari Ala-Ilomäki

Metsäntutkimuslaitos - Metsänkasvatuksen tutkimusosasto

---

Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 450  
Helsinki 1993

Ala-Ilomäki, J. 1993. Yksioteharvesterin mittaustarkkuuden riippuvuus rungon ominaisuuksista. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 450. 44 s. ISBN 951-40-1275-5, ISSN 0358-4283.

Tutkimuksessa selvitetään yksioteharvestereiden pätkittäin kuutioivien puutavaran mittalaitteiden mittaustarkkuuden riippuvuutta valmistettavan puutavaran ominaisuuksista kesäaikana. Valmistettava puutavara valittiin etukäteen niin, että aineistoon saatiin normaalia enemmän puutavaran koneelliselle mittaukselle oletettavasti vaikeuksia aiheuttavia puiden ominaisuuksia. Koepuut luokiteltiin silmävaraisesti oksaisuuden ja arvioidun käsittelyn vaikeuden suhteen ennen kaatoa.

Pölkyyittäisen tutkimusaineiston yhteistilavuus oli 132,2 m<sup>3</sup>. Puiden käsittelyn sujuminen arvioitiin silmävaraisesti. Koepölkyyistä mitattiin valmistuksen jälkeen 0,16 m välein ristiin mitattujen läpimittojen sekä pituuden lisäksi mm. oksaisuutta, haaraisuutta, poikaoksia, karsintaa, epäsuoruutta, epäpyöreyyttä ja kuoren laatua kuvaavia tunnuksia.

Pölkyyittäisen mittaustarkkuuden todettiin riippuvan erityisesti pölkyn oksaisuudesta, epäsuoruudesta, haaraisuudesta, poikaoksista, tilavuudesta ja puulajista sekä puutavaran valmistuksessa käytettävästä harvesteri-mittalaite -yhdistelmästä. Minkään yksittäisen tekijän vaikutus ei ollut voimakas, eikä mittausvirheen vaihtelua pystytty tyhjentävästi selittämään. Puittaisen mittausvirheen ennustaminen puittaisten tunnusten tai puutavaran valmistuksen sujuvuuden perusteella oli epätarkkaa.

Avainsanat: puutavaran mittaus, koneellinen puunkorjuu, yksioteharvesterit, rungon ominaisuudet.

The paper deals with the effect of tree properties on the accuracy the scaling devices of one-grip harvesters in summer operations. The trees to be cut were selected in advance to ensure adequate variation in their properties. Before cutting, the trees were classified visually according to branchiness and estimated difficulty in mechanical cutting.

The timber produced totalled to 132.2 m<sup>3</sup>. The processing of each tree was estimated visually. The diameter of the produced bolts was measured manually in two perpendicular directions at 0.16 m intervals. The length was also measured manually. Other variables assessed included among others the occurrence of knots, forks, crookedness, sweep and ovality, and delimiting quality.

The scaling accuracy assessed per each bolt was found to be dependent on branches, crookedness, sweep, forks, volume and tree species, and on the combination of scaling device and harvesting head used in cutting, yet no single variable was decisive. The variation in scaling error could not be thoroughly explained. Predicting scaling error by visually estimating the tree properties or the cutting process proved to be inaccurate.

Keywords: timber scaling, mechanical cutting, one-grip harvesters, tree properties.

Kirjoittajan yhteystiedot / Correspondence: Jari Ala-Ilomäki, Metsäntutkimuslaitos, metsänkasvatuksen tutkimusosasto, Unioninkatu 40 A, FIN-00170 Helsinki

Julkaisija / Publisher: Metsäntutkimuslaitos; Hanke 3035-1. Hyväksynyt: Jari Parviainen, tutkimusjohtaja 8.2.1993.

Jakaja / Distribution: Metsäntutkimuslaitos, metsänkasvatuksen tutkimusosasto, Unioninkatu 40 A, FIN-00170 Helsinki



## Sisällysluettelo

	Sivu
1 Johdanto .....	4
2 Tutkimuksen tarkoitus .....	5
3 Puutavaran mittaus yksiotetarvesterilla.....	5
3.1 Aikaisemmat tutkimukset .....	5
3.2 Mittaustapahtuma .....	6
4 Tutkimusmenetelmä ja -aineisto.....	8
4.1 Koepuiden valinta .....	8
4.2 Puutavaraerien koneellinen valmistus ja sen havainnointi .....	9
4.3 Puutavaran tarkastusmittaus.....	9
4.4 Tutkitut mittalaitteet .....	10
4.5 Tutkimusaineisto .....	12
4.6 Aineiston käsittely.....	13
5 Tulokset.....	14
5.1 Aineiston normaalijakautuneisuus ja selittävien muuttujien ositteittaiset keskiarvot.....	14
5.2 Pölkyittäinen mittausvirhe .....	16
5.3 Pölkyittäistä mittausvirhettä selittävät muuttujat .....	17
5.3.1 Koko aineisto.....	17
5.3.2 Puulajeittain jaettu aineisto .....	24
5.3.3 Konetyypeittäin jaettu aineisto.....	26
5.4 Rungoittainen mittausvirhe.....	29
5.5 Rungoittaista mittausvirhettä selittävät muuttujat.....	29
5.5.1 Koko aineisto.....	29
5.5.2 Puulajeittain jaettu aineisto .....	32
5.5.3 Konetyypeittäin jaettu aineisto.....	33
5.6 Puulajin vaikutus mittauserän 6 pölkyittäiseen mittausvirheeseen.....	35
5.7 Mittauserittäinen sekä koko aineiston mittausvirhe .....	37
6 Tulosten tarkastelu.....	38
6.1 Tulosten luotettavuus.....	38
6.2 Pölkyn tekniset ominaisuudet mittaustarkkuuden selittäjinä.....	39
6.3 Pölkyn teknisten ominaisuuksien vaikutus mittaustarkkuuteen .....	39
6.4 Puulajin vaikutus pölkyittäiseen mittaustarkkuuteen .....	40
6.5 Mittalaitteiden väliset erot .....	41
6.6 Arvioitujen runkotunnusten vaikutus rungoittaiseen mittaustarkkuuteen .....	43
7 Tulosten perusteella tehtävät suositukset .....	43
Kirjallisuus .....	44

## 1 Johdanto

Puunkorjuun koneellistuminen on edennyt viime vuosina ripeästi. Vuonna 1991 koneellisesti hakattiin 55 % teollisuuden ja Metsähallituksen hakkuista sekä 43 % markkinahakkuista (Laajalahti & Säteri 1992, Aarne 1992). Erään ennusteen mukaan vuosituhannen loppuun mennessä jopa 90% markkinahakkuista on koneellistettu (Örn 1990). Hakkuukonetyypeistä yksioteharvesteri on osoittautunut puunkorjuun nykyisiä vaatimuksia parhaiten vastaavaksi. Kaikki vuonna 1991 myydyt hakkuukoneet olivat yksiotetyyppejä (Säteri 1992).

Hakkuun koneellistamisessa puutavaran mittaaminen on siirtymässä hakkuukoneiden mittalaitteille. Vuonna 1991 hakkuukoneilla arvioidaan mitatun jo yli 2/3 koneellisesti korjatusta puutavarasta ja miltei kolmannes markkinahakkuista.

Koneellinen mittaus on rationalisointitoimenpide, joka antaa mittaustuloksen viipeettä, alentaa puunhankinnan kustannuksia ja lisää sen joustavuutta. Uudet hakkuukoneet hankitaan poikkeuksetta puutavaran tilavuuden mittalaitteella varustettuina, joten koneellisen mittauksen yleistyminen on nopeata varsinkin, kun puukaupan osapuolet ovat jo hyväksyneet sitä koskevat ohjeet (Hakkuukonemittauksen...1991, Puutavarapölkkyjen...1992).

Koneellisen mittauksen tulee kuitenkin saavuttaa puunmyyjien luottamus, eikä se saa muodostua taloudelliseksi rasitteeksi hakkuukoneyrittäjille. Ensimmäinen vaatimus edellyttää koneelliselta mittaukselta vähintään nykyisin yleisimpien menetelmien tasoista tarkkuutta ja toinen riittävää korvausta mittauksesta sekä mittalaitteiden luotettavaa toimintaa.

Tutkimus kuuluu Metsäntutkimuslaitoksen metsänkasvatuksen tutkimusosaston Hakkuun koneellistaminen muuttuvassa metsätaloudessa -tutkimushankkeeseen. Tutkimuksen suunnittelusta, aineistonkäsittelystä ja raportin kirjoituksesta vastasi Jari Ala-Ilomäki. Tutkimusaineiston keräsivät Tapio Järvinen, Tapio Nevalainen, Erkki Salo ja Veijo Salo Metsäntutkimuslaitoksen metsänkasvatuksen tutkimusosastolta.

Laittevalmistajien taholta tutkimukseen myötävaikuttivat erityisesti Veikko Rintamäki ja Jaakko Reinilä E-P Elektroniikka Oy:stä sekä Juha Vainio FMG Lokomo Forest Oy:stä. Tutkimuksen puutavaran valmistivat ja maastokuljetuksen suorittivat Velj. Lehtomäki Ky, Koneurakointi Vainionpää Ky sekä Jämsänkosken Metsäoppilaitos. Tutkimustyömaiden järjestelyyn osallistuivat erityisesti Olli Laitinen ja Martti Lahtinen Metsäliitosta, Johannes Hakamäki Hakamäen Puu Oy:stä sekä Ari Salmela Jämsänkosken Metsäoppilaitoksesta.

Käsikirjoituksen lukivat ja arvokkaita parannusehdotuksia tekivät prof. Pentti Hakkila sekä tutkijat Olli Eeronheimo, Kaija Kanninen, Arto Rummukainen ja Erkki Verkasalo, kaikki Metsäntutkimuslaitoksen metsänkasvatuksen tutkimusosastolta.

Lausun kaikille edellä mainituille sekä muille tutkimukseen myötävaikuttaneille henkilöille parhaat kiitokseni.



## 2 Tutkimuksen tarkoitus

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on ensinnäkin selvittää yksioteharvesterin mittaustapahtumaan vaikuttavia tekijöitä ja erityisesti tilavuuden mittausrvirheen riippuvuutta rungon ominaisuuksista puutavaran kesäaikaisessa valmistuksessa.

Oletuksena on, että tilavuuden suhteellinen mittaustarkkuus on parhaimmillaan yksirunkoisilla pölkyillä, joiden poikkileikkaus on pyöreä ja symmetria-akseli suora. Tällöin mitattava pölky vastaa parhaiten laskentaohjelmien lähtöoletuksia, ja mittavien dimensioiden tunnusteluun käytettävien kone-elinten ideaaliseen toimintaan on parhaat edellytykset. Vastaavasti voidaan olettaa, että poikkeamat teoreettisesta ideaalipölkystä lisäävät mittausrvirheen itseisarvoa, sillä kone-elinten kyky tunnustella mitattavia dimensioita laskentaohjelmissa oletetulla tavalla heikkenee luvussa 3.2 kuvatulla tavalla. Lisäksi poikkeamat ideaalipölkystä saattavat vaikeuttaa puutavaran valmistusta. Tällöin tunnusteluun käytettävät kone-elimet joutuvat toimimaan suunnitelluista poikkeavissa olosuhteissa tai poikkeavalla tavalla, mikä saattaa huonontaa mittaustarkkuutta. Poikkeamat ideaalipölkystä ovat puulajiriippuvia, joten myös puulajilla on oletettavasti vaikutusta mittausrvirheen itseisarvoon.

Myös pölkyn tilavuuden vaikutus mittaustarkkuuteen on teoreettisesti tarkasteltuna ilmeinen, sillä pölkyn kuorellisen ulkovaipan sijainnin määrittymisen tietynsuuruisen virheen tai piteuden mittauksen satunnaisvirheen vaikutus tilavuuden laskennassa on sitä suurempi mitä pienemmät mitattavat dimensiot ovat.

Tutkimuksessa selvitetään lisäksi, voidaanko mittausrvirhettä ennustaa hakattavan puuston silmävaraisen rungoittaisen ennakoarvioinnin avulla.

## 3 Puutavaran mittausr yksiotheharvesterilla

### 3.1 Aikaisemmat tutkimukset

Hakkuukoneiden mittalaitteet tuottivat aiemmin tietoa katkonnan ja apterauksen ohjaukseen. Nykyiset mittalaitteet laskevat lisäksi piteus- ja läpimitahavaintojen perusteella puutavaraerä- tai puutavarakappalekohtaisen tilavuuden. Piteuden ja läpimitan mittaustarkkuudesta on tehty vuosien mittaan useita tutkimuksia. Myös tilavuuden mittausta hakkuukoneilla on tutkittu.

Tähänastiset tilavuuden mittausta koskeneet tutkimukset ovat selvittäneet ennen kaikkea mittauksen keskimääräistä tarkkuutta, eli tarkkuutta puutavaraerän mittauksessa. Tarkastelutapa tuottaa nopeasti käytännön puunkorjuuta hyvin palvelevaa tietoa, mutta ei kykene selvittämään mittausrvirheiden syitä. Esimerkiksi Halinen (1990) toteaa, että tutkimuksen mukaan tutkittujen hakkuukoneiden mittalaitteiden "keskimääräinen tilavuudenmittaustarkkuus oli tässä tutkimuksessa sekä kokonaistilavuuden että puutavaraeräkohtaisen tilavuuden osalta yhtä hyvä kuin aiemmissa tutkimuksissa". Lisäksi mittaustarkkuus on Halisen (1990) mukaan riippumaton puulajista.

Riepon (1989a) tutkimuksessa on selvitetty myös pölkyittäistä mittaustarkkuutta ja sen riippuvuutta läpimitasta ja oksaisuusluokasta. Tutkimuksen mukaan molemmat tekijät

vaikuttavat tarkkuuteen. Myös puulajin ja rungonosan on epäilty (Rieppo 1989b) ja havaittu (Rieppo 1991) vaikuttavan mittaustarkkuuteen. Bergin (1992) mukaan pituuden ja läpimitan mittausvirheet riippuvat laitesidonnaisten seikkojen lisäksi mm. oksaisuudesta, rungonosasta, epäpyöreystä ja puulajista.

Laitteiden kehityksen myötä mittaustarkkuus on parantunut, ja viimeaikaisten tutkimustulosten mukaan nykyisen mittaussopimuksen (Hakkuukonemittauksen...1991, Puutavarapölkkyjen... 1992) 4%:n erakohtainen tarkkuusvaatimus on realistinen oikein kalibroidulle mittalaitteelle myös puutavaralajeittain tarkasteltuna (Halinen 1990, Kivinen 1990, Poikela & Rieppo 1991, Rieppo 1991). Perttolan ja Riepon (1991) mukaan koneellinen mittaus voi olla jopa manuaalista tarkastusmittausta tarkempaa. Peruserona mainittujen menetelmien välillä on erilainen tilavuudenmääritysteoria. Myös vanhemmat mittalaitteet perustuvat manuaalisen mittauksen tilavuudenmääritysteoriaan. Eri menetelmillä saatuja tuloksia vertailtaessa on tärkeää, että ne ovat periaatteiltaan vertailukelpoisia.

### 3.2 Mittaustapahtuma

Puutavaran tilavuuden mittaus yksioteharvesterilla perustuu vielä toistaiseksi käsiteltävän rungon läpimitan ja pituuden mekaaniseen tunnusteluun sähköisesti anturoiduilla kone-elimillä. Puuta koskettamattomia mittalaitteita on kuitenkin kehitteillä (Rieppo & Jokinen 1988). Mittausjärjestelmän tekninen toteutus vaihtelee tuotannossa olevien mittalaitteharvesteri -yhdistelmien välillä.

Pituuden mittaus perustuu yleensä käsiteltävän puun pinnan kanssa kosketuksessa olevaan erilliseen hammastettuun metallirullaan, johon on yhdistetty pulssianturi. Puuta syötettäessä rulla pyörii ja pulssianturi tuottaa sähköisiä pulsseja. Läpimittaa tunnustellaan yleisimmin karsintaterillä, joista toinen tai molemmat on sähköisesti anturoitu. Toinen yleisesti käytetty ratkaisu on tunnustella läpimittaa puunsyöttöelimillä.

Mittauksen mekaaninen tarkkuus riippuu tunnusteluun käytettävien kone-elinten kyvystä seurata tarkasteltavaa dimensiota halutulla tavalla. Läpimitan mittauksen osalta tämä tarkoittaa tunnustelevien kone-elinten kykyä seurata puun kuorellisen ulkovaipan pintaa tai jotain siitä laskennallisesti johdettua pintaa. Kone-elimen asema puun pintaan nähden saattaa poikketta oletetusta, mikä aiheuttaa mittausvirhettä. Mikäli läpimittaa tunnustellaan karsintaterillä, on niiden kyettävä pitämään käsiteltävä puu oikeassa asemassa kosketuksessa monitoimiosan runkoa vasten. Oksakymyt ja oksantygät ulkonevat säännöllisestä ulkovaipasta, joten oksaisuuden voidaan olettaa aiheuttavan positiivista mittausvirhettä.

Pituuden mittauksen mekaaninen tarkkuus riippuu ensinnäkin pituusmittarullan luistosta rungon pintaan nähden ja sen puun pintaa pitkin kulkeman matkan pituudesta, joka riippuu rullan seurantakyvystä sekä pölkyn pinnan epätasaisuudesta. Pinnan epätasaisuudet, kuten esimerkiksi oksakymyt ja oksantygät, lisäävät teoriassa mittarullan kulkemaa matkaa. Epätasaisuuksien johdosta rulla saattaa kuitenkin seurata puun pintaa epätäydellisesti, mikä voi aiheuttaa joko positiivista tai negatiivista mittausvirhettä. Lisäksi rullan teoreettisen ja todellisen vierintäsäteen ero vaikuttaa suoraan rullan kierroslukuun tietyllä matkalla. Mainittu ero riippuu rullan hammastuksen uppoamasta puun pintaan, tai tarkemmin sanottuna siitä, miten tarkasti uppoama pystytään pitämään vakiona eri olosuhteissa.



Mekaanisten virheiden lisäksi dimensioiden mittaamisessa voi syntyä myös tunnusteluelinten sähköisistä antureista aiheutuvaa virhettä. Tämä voi johtua mm. antureiden epälineaarisuudesta, huonosta erotuskyvystä tai lämpötilariippuvuudesta.

Myös tilavuuden laskennassa mittalaitteen mikrotietokoneessa voi aiheutua virheitä, jotka riippuvat laskentaohjelman oletuksien oikeellisuudesta sekä laitteiston kalibroinnista. Laskentaohjelmat perustuvat joko pölkyn tilavuuden laskemiseen kuorellisten yksikkötilavuuslukujen avulla tai nykyisin yhä useammissa laitteissa tilavuuden laskemiseen pölkyn koko pituutta lyhempien osien tilavuuksien summana, ns. pätkittäin kuutioimalla. Ensinmainittu menetelmä vastaa periaatteeltaan täysin manuaalista pölkkyjen kappaleittaista mittausta.

Osatilavuuksien summan menetelmää voidaan pitää tarkempänä ja käytössä vaivattomampana. Mittaustulos perustuu tyveä lukuun ottamatta yksittäisten pölkkyjen mitattuihin dimensioiden, joten keskiarvo-oletuksia tai yksikkötilavuuslukuihin liittyviä alueellisia tai ajallisia päivityksiä ei tarvita. Pölkkyistä mitataan useita läpimittoja, joten yksittäisen virheellisen läpimittahavainnon vaikutus on pienempi, kuin pelkästään yhtä läpimittahavaintoa käytettäessä. Puun tyveä lähinnä olevan pölkynosan tilavuuden määrityksessä käytetään apuna oletuksia, sillä tyvileikkauksen läpimittaa ei mitata.

Osatilavuuksien summan menetelmään perustuvat laskentaohjelmat pyrkivät yleensä tasoittamaan tai poistamaan läpimitan äkillistä tai epäloogista vaihtelua. Mainitut korjaukset ovat tarpeen mittausvirheen minimoimiseksi laskentaohjelmien asettamien rajoitusten puitteissa samoin kuin mekaanisen tunnustelun epätäydellisestä toiminnasta aiheutuvien virheiden poistamiseksi. Ne saattavat juontaa juurensa osittain myös manuaalisen kappaleittain mittauksen perinteestä, sillä kappaleen rajapinnan on oletettu noudattavan tiettyjä säännöllisiä muotoja. Sen sijaan esimerkiksi hydrostaattisessa tai tarkassa stereometrisessä tilavuudenmittausmenetelmässä oksakyhmyt ja läpimitan tilapäinen kasvu tyveltä latvaan päin määräävät rajapintaa tasavertaisina muiden puutavarakappaleen osien kanssa.

Laitteiston kalibroinnissa voidaan erottaa ensinnäkin laskentaohjelman parametrien muuttaminen siten, että laskennassa käytettävä arvo vastaa mittaajien tunnustelemaa. Lisäksi kalibroinnilla on otettava huomioon esimerkiksi vuodenaikasta ja puiden ominaisuuksista aiheutuvat muutokset tunnustelutapahtumassa.

Puutavarakappaleen tilavuuden mittaustulosta määrítettäessä koneellista mittaustulosta verrataan tarkastusmittauksen tulokseen, jota siis pidetään halutun tarkkuuden puitteissa oikeana. Tästä seuraa, että tarkastusmenetelmän tulisi olla tarkkuudeltaan vähintään yhtä hyvä kuin koneellisen mittaustuloksen.

Mittausvirhe koneellisessa mittauksessa voidaan esittää seuraavasti:

$$\begin{aligned} E_{\text{tot}} &= E_m + E_c \\ E_{\text{tot}} &= f(z_1, z_2, z_3, \dots, z_4) + E_c \\ E_{\text{tot}} &= f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, y_1, y_2, y_3, \dots, y_m) + E_c \end{aligned} \quad (1)$$

missä  $E_{\text{tot}}$  = tilavuuden kokonaisvirhe  
 $E_m$  = mittausvirheistä aiheutuva virhe  
 $E_c$  = laskentamenetelmästä aiheutuva virhe  
 $z_1 \dots z_4$  = tilavuuden mittausvirheeseen vaikuttavat muuttujat  
 $x_1 \dots x_n$  = läpimitan mittausvirheeseen vaikuttavat muuttujat  
 $y_1 \dots y_m$  = pituuden mittausvirheeseen vaikuttavat muuttujat.

Tilavuuden mittausvirhe johtuu siis mittaustulosten osalta läpimitan ja pituuden mittausvirheestä. Jatkuvassa läpimitan mittauksessa mittauspisteitä on pölkkyssä useita, joko säännöllisin tai epäsäännöllisin välimatkoin. Läpimittahavaintojen tarkastaminen on vaikeaa, sillä niiden sijainti pölkyn pituusakselilla tiedetään ainoastaan suhteessa mittalaitteen pituusmittaukseen. Tämän virheen käyttäytymisestä rungon pituudella ei ole tietoa.

## 4 Tutkimusmenetelmä ja -aineisto

### 4.1 Koepuiden valinta

Hakattavat koepuut valittiin etukäteen. Tällä haluttiin varmistaa aineiston kattavuus, sillä tutkimushypoteesin mukaan puiden koneellista hakkuuta vaikeuttavat tekijät aiheuttavat mittausvirhettä mutta todellisuudessa valtaosa puista ei kuitenkaan koneellista hakkuuta vaikeuta.

Koepuut valittiin siten, että aineisto kattoi pölkkyttäisten ominaisuuksien vaihtelun mahdollisimman laajasti. Puuta valittaessa ne luokiteltiin silmävaraisesti puulajeittain oletettavasti tärkeimpien käsittelyyn ja mittaukseen vaikuttavien teknisten ominaisuuksien suhteen helppoihin, normaaleihin ja vaikeisiin. Luokittelu perustui kokemukseräiseen tietoon yksiotteharvestereiden kyvystä käsitellä runkoja, joten se ei ollut sama kuin manuaalisen hakkuun vaikeusluokittelussa käytetty.

Koepuiden valintalomakkeelle merkittiin arvioitu oksaisuusluokka (1 helppo, 2 normaali, 3 vaikea), rungon käsittelyä vaikeuttavien ongelmakohtien (poikaoksat, haarat, mutkat) arvioitu korkeus sekä rungon arvioitu vaikeusluokka käsittelyä ja mittausta ajatellen (1 helppo, 2 normaali, 3 vaikea). Ongelmakohtien sijaintikorkeuden arvioinnilla pyrittiin kohdistamaan etenkin poikaoksat, joita puutavaran valmistuksen jälkeen on vaikea havaita, ja niistä mahdollisesti aiheutuvat mittausvirheet vastaaville pölkyille. Lisäksi kirjattiin asiaan mahdollisesti vaikuttavia satunnaisia tekijöitä. Koepuut numeroitiin valinnan yhteydessä.

Puun sijoittaminen luokkaan "vaikea" saattoi johtua pelkästään yhdestä tekijästä (esim. haarautuneisuus) muiden ollessa normaalilla tasolla, kun taas luokassa "helppo" todennäköisesti mikään tekijä ei vaikeuttaisi käsittelyä tai mittausta. Luokkaan "vaikea"

valittiin tämän johdosta eniten puita, jotta kaikki käsittelyä ja mittausta vaikeuttavat tekijät olisivat hyvin edustettuina.

## 4.2 Puutavaraerien koneellinen valmistus ja sen havainnointi

Koepuut käsiteltiin erillään, yleensä kyseisen leimikonosan hakkuun ja maastokuljetuksen jälkeen. Tutkimuskoneiden kuljettajat olivat kokeneita ja heidän arvioitiin työskentelevän huolellisesti. Mittalaitteet oli kalibroitu luvussa 45 kuvatulla tavalla koelooja vastaaviksi.

Koepuiden koneellista hakkuuta havainnoitiin ja sen kulusta merkittiin tietoja havainnointilomakkeelle. Puutavaran valmistuksen vaikeudet kirjattiin pölkkyittäin, joten niiden vaikutusta mittausvirheeseen pystyttiin selvittämään myös pölkkykohtaisesti. Koepuut valmistettiin vuorokauden valoisana aikana.

Puutavaran valmistuksen havainnointilomakkeelle merkittiin seuraavat tiedot.

### Mittauseräkohtaisesti:

- sää (1 aurinkoinen, 2 pilvipouta, 3 sade)
- lämpötila.

### Runkokohtaisesti:

- arvio rungon käsittelyn sujuvuudesta kokonaisuutena (1 erittäin hyvä, 2 normaali, 3 huono).

### Pölkkykohtaisesti:

- puutavaran valmistuksen ongelmat (syötön luisto, karsintaterien aukaisu, taaksepäin syöttö, pölkyn pudotus) ja niiden sijainti kullakin pölkkyllä.

Koepuut jäivät maahan käsittelyjärjestykseen. Tämän jälkeen pölkkyt numeroitiin, mikäli niitä jouduttiin siirtämään.

## 4.3 Puutavaran tarkastusmittaus

Tutkittujen hakkuukoneiden mittalaitteissa oli erilaisia tulostusvaihtoehtoja, pölkkyittäinen tulostus mukaan luettuna. Tutkimuksessa jokaisen koneellisesti mitatun pölkyn tilavuus mitattiin myös manuaalisesti. Manuaalinen vertailumenetelmä oli periaatteeltaan yhtä tarkka kuin tarkin tutkittu koneellinen menetelmä.

Pölkkyjen läpimitat mitattiin 0,16 m välein 1 mm nimellistarkkuudella ristiin kääntäen pölkkyä niin, että ristiinmittauksen ensimmäinen havaintosarja voitiin mitata mahdollisimman rikkoutumattoman kuoren päältä. Pölkkyjen pituus mitattiin 10 mm tarkkuudella. Latvaan päätyvän osuuden pituus saatiin pölkyn pituuden ja 0,16 m jaksojen summan erotuksena, ja sen latvaläpimita mitattiin siis tarvittaessa alle 0,16 m etäisyydeltä edellisestä läpimitahavainnosta.

Ristiinmitattujen läpimitahavaintojen perusteella laskettiin pölkyn epäpyöreyttä kuvaava suhdeluku. Huomattakoon, että tämä tunnus poikkeaa läpimittojen mittaussuuntien suhteen varsinaisesta epäpyöreyydestä, joka lasketaan pölkyn poikkileikkauksen suurimman ja

pienimmän läpimitan erotuksen prosentiosuutena läpimittojen keskiarvosta (Kärkkäinen 1984). Jatkossa tätä pölkyn epäpyöreyyttä kuvaavaa suhdelukua kutsutaan epäpyöreudeksi.

Läpimittojen mittauksen yhteydessä mitattiin pölkyn lenkous. Lenkous määriteltiin suurimmaksi poikkeamaksi pölkyn symmetria-akselin ja tyvi- ja latvaleikkauksen keskipisteitä yhdistävän janan välillä (Kärkkäinen 1984). Mutkista mitattiin alku- ja loppukohdan sijainti pölkyltä sekä symmetria-akselin ja alun sekä lopun poikkileikkauksien keskipisteitä yhdistävän janan suurin etäisyys. Jatkossa epäsuoruuteen luetaan sekä mutkaisuus että lenkous.

Pölkyn oksien lukumäärä laskettiin erikseen sen vaipan ylä- ja alapinnoilta. Karsinnassa jäljelle jääneet oksatyngät luokiteltiin puolittain jakaen pölkky metrin pituisiin osuuksiin luokkiin 1 (pinnanmyötäinen karsinta), 2 (enintään 10 mm pituisia tynkiä), 3 (10...50 mm pituisia tynkiä), 4 (yli 50 mm pituisia tynkiä) ja 5 (karsiutumattomia oksia). Kultakin metrin osuudelta mitattiin erikseen vaipan ylä- ja alapinnoilta suurimman oksaleikkauksen halkaisija. Viimeiseltä vajaalta osuudelta mitattiin oksaisuustiedot, jos sen pituus oli yli 0,5 m, tai jos se poikkesi huomattavasti muusta pölkystä.

Kuori luokiteltiin luokkiin 0 (irrationaalinen, keloutunut), 1 (rosoinen, kaarna), 2 (rosoisen ja sileän välimuoto) ja 3 (sileä).

Mittauslomakkeelle merkittiin myös pölkyn sijainti rungossa (tyvi, keskirunko, latva). Jokaiselle pölkylle annettiin koodimerkintä, jonka perusteella pystyttiin erottelemaan mm. normaalisti valmistetut ja koneellisesti mitatut yksirunkoiset pölkkyt, haarapölkkyt, mittaamatta jätetyt käsitellyt pölkkyt, vaikeutensa vuoksi käsittelemättä jätetyt pölkkyt, käsittelemättä jääneet puutavaralle asetetut laatuvaatimukset täyttävät pölkkyt ym. Siis myös ne pölkkyt, joita kone ei mitannut, tarkastusmitattiin. Tällöin läpimitta mitattiin kuitenkin vain yhdeltä puolelta tyvestä, keskeltä ja latvasta. Tilavuus laskettiin tällöinkin katkaistun kartion kaavalla.

#### 4.4 Tutkitut mittalaitteet

Näin yksityiskohtaiseen tarkasteluun ei luonnollisesti voitu ottaa mukaan kaikkia markkinoilla olevia mittalaitteita. Tutkittavien mittalaitteiden valintakriteerinä oli ennen kaikkea pätkittäiseen kuutiointiin perustuva mittausperiaate, joka on periaatteeltaan tarkin menetelmä ja joka tutkimuksen suunnitteluajankohtana näytti yleistyvältä.

Tutkimukseen valittiin kaksi mittalaitetta: FMG Lokomo Forest Oy:n valmistama Lokomatic 90 läpimitan yhdestä ja kahdesta suunnasta mittaavina versioina sekä E-P Elektroniikka Oy:n valmistama Harvemeter 4000. Mittalaitteet oli asennettu hakkuukoneisiin taulukon 1 mukaisesti. Jatkossa mittalaitte-hakkuukone -yhdistelmistä käytetään taulukon 1 mukaisia koneyksilö- ja konetyyppinumeroita.

Taulukko 1. Tutkitut mittalaitteet ja hakkuukoneet.

Mittalaite	Hakkuukone	Harvesteriosan käyttötuntimäärä, h	Koneyksilö	Konetyyppi
Lokomatic 90	FMG 990/762	6000	1	1
(1-suunt. lpm mittaus)	FMG 990/746	4500	3	2
Lokomatic 90	FMG 990/762	1200	2	1
(2-suunt. lpm mittaus)				
Harvemeter 4000	Keto 150	5500	4	3

Lokomatic 90 mittausjärjestelmä FMG 746 ja 762 yksioteharvestereihin asennettuna tunnusteleo rungon läpimittaa vanhemmassa tutkitussa versiossa yhdellä anturoidulla karsintaterällä yhdessä suunnassa ja uudemmassa kahdella karsintaterällä kahdessa suunnassa. Mittaussuunnat eivät kuitenkaan aina ole kohtisuorassa toisiinsa nähden, joten kyseessä ei siis ole varsinainen ristiinmittaus. Karsintaterien kulma-anturit ovat resistiivisiä. Läpimitan mittauksen erottelukyky on 1 mm. Pituutta tunnustellaan digitaalisesti anturoidulla hammastetulla mittarullalla, jota painetaan rungon pintaa vasten hydraulisesti. Mittarullan hampaat ovat teräväkärkiset ja niiden väli on profiililtaan pohjalle saakka kaareva. Pituusmittauksen erottelukyky on 5 mm.

Mittausjärjestelmän toiminta perustuu puun läpimitan ja pituuden jatkuvaan mittaukseen, jossa läpimita luetaan aina, kun pituusmitta-anturilta saadaan pulssi. Laskentajärjestelmä poistaa nopeasti suurenevat havainnot esikäsitellyssä epäloogisina, ja laskee sen jälkeen runkokäyrän.

Puutavarakappaleen tilavuus lasketaan katkaistuina kartioina 0,15...0,16 m pätkissä. Laskennassa käytettävät läpimita-arvot luetaan runkokäyrältä. Ensimmäinen läpimitahavainto saadaan 0,3 m päästä puun tyveltä, ja tyven läpimita lasketaan olettaen läpimitan lisääntyvän 1 mm pituuden 0,1 m kohden. Kunkin pölkyn viimeisen pätkän pituutena käytetään sen todellista pituutta.

Harvemeter 4000 mittausjärjestelmä Keto 150 yksioteharvesteriin asennettuna tunnusteleo rungon läpimittaa yhdessä suunnassa syöttöteleillä, joiden välistä kulmaa mitataan digitaalisella anturilla. Läpimitan mittauksen erottelukyky on 2,5...4,0 mm läpimitan suuruudesta riippuen. Pituutta tunnustellaan digitaalisesti anturoidulla hammastetulla mittarullalla, jota jousivoima painaa rungon pintaa vasten. Pituudenmittauksessa saadaan 100 pulssia/m, ja sen erottelukyky on 10 mm. Mittarullan teräväkärkisten hampaiden välit ovat matalia, millä on pyritty vakioimaan uppoamaa puuhun ja pitämään vierintäsäde muuttumattomana.

Mittausjärjestelmän toiminta perustuu puun läpimitan ja pituuden jatkuvaan mittaukseen. Laskentajärjestelmä olettaa puun kapenevan latvaa kohti, joten peräkkäisistä läpimitahavainnoista kauempana tyvestä olevan on aina oltava pienempi. Läpimita luetaan

silloin, kun läpimitta-anturi vaihtaa tilaa, joten periaatteellinen tarkkuus on hyvä. Toimintaperiaatteen johdosta läpimittahavaintojen väli vaihtelee. Pienimmillään väli on 0,1 m, mutta mikäli läpimitta ei pienene, teoreettinen maksimi on 32 m. Mikäli pölkystä ei lueta ensimmäistä läpimittaa pienempää arvoa, käytetään sitä myös latvapään katkaisuläpimittana. Läpimitta luetaan vain eteenpäin syötön aikana. Puu voidaan mitata vain tyvestä latvaan päin.

Puutavarakappaleen tilavuus lasketaan katkaistuina kartioina pienimmillään 0,1 m pätkissä todellisten läpimittahavaintojen perusteella. Ensimmäinen läpimittahavainto saadaan 0,46 m päästä puun tyveltä. Tyven läpimitta lasketaan kertomalla 0,46 m tyvestä mitattu läpimitta kertoimella  $(1+0,46/5)$ . Kunkin pölkyn viimeisen pätkän pituutena käytetään sen todellista pituutta.

#### 4.5 Tutkimusaineisto

Tutkimusaineisto kerättiin kolmella erityyppisellä yksiotetarvesteri-mittalaite -yhdistelmällä männyllä, kuusella ja koivulla. Aineisto kerättiin elo-marraskuussa, ja tutkimuspäivien lämpötila vaihteli  $\pm 0^{\circ}\text{C}$  ja  $+19^{\circ}\text{C}$  välillä. Tutkimusajankohtana nila-aika oli ohi ja rungot olivat sulia. Tutkimusleimikot sijaitsivat Keuruulla, Multialla, Jämsässä ja Isojoella.

Koska tavoitteena oli selvittää pölkyn ominaisuuksien vaikutusta mittausvirheeseen, poistettiin aineistosta puutteelliset ja selvästi virheelliset, muista kuin pölkyittäisistä tekijöistä aiheutuvat havainnot. Tähän ryhmään kuuluivat ensinnäkin pölköt, joista ei jostakin syystä saatu koneellista mittaustulosta. Tämä johtui mm. normaalin koneellisen valmistuksen estävistä pölkyn ominaisuuksista, lumpsauksesta tai siitä, että pölkky ei täyttänyt ainespuulle asetettavia laatuvaatimuksia. Osa pölkkyistä jäi valmistamatta inhimillisen virheen johdosta. Pölköt, joista ei saatu koneellista mittaustulosta, käsittivät  $2,3 \text{ m}^3$  eli 1,7 % manuaalisesti mitatuista pölkkyistä.

Toisen aineistosta poistettavien pölkkyjen ryhmän muodostivat konetyypin 1 valmistamat pölköt, joissa tilavuuden laskennassa oli käytetty tyviläpimittaa selvästi suurempaa latvaläpimittaa. Koneellisen mittauksen virhe oli näillä pölkkyillä keskimäärin 100 %, ja tulos oli siten selvästi virheellinen. Tämän ryhmän pölköt käsittivät  $0,5 \text{ m}^3$ , eli 0,7 % konetyypillä 1 käsitellyistä pölkkyistä ja 0,4 % koneellisesti valmistetuista pölkkyistä yhteensä.

Rungoittaista mittausvirhettä laskettaessa aineistosta poistettiin rungot, joiden jostakin pölkystä ei ollut saatu koneellista mittaustulosta tai mittaustulosta ei voitu pitää virheettömänä. Poistettujen runkojen muut pölköt otettiin kuitenkin mukaan pölkyittäiseen aineistoon, vaikka pölkyittäinen aineisto muodostuikin tämän johdosta suhteellisesti rungoittaista helpommaksi, sillä nämä tavallisesti valmistusta ajatellen vaikeat pölköt toivat lisää havaintoja aineiston ääripäihin.

Tutkimusaineistoa kertyi kaikkiaan 261 runkoa eli 1063 pölkkyä, yhteistilavuudeltaan  $139,9 \text{ m}^3$ . Pölkyittäiseen mittausvirheeseen vaikuttavien tekijöiden selvitykseen käytetty aineisto käsitti 967 pölkkyä, joiden yhteistilavuus oli  $132,2 \text{ m}^3$ . Rungoittainen aineisto käsitti 215 runkoa, yhteistilavuudeltaan  $106,6 \text{ m}^3$ . Rungoista 43% sijoitettiin luokkaan "vaikea", 37% luokkaan "normaali" ja 20% luokkaan "helppo". Analyysiin käytetyn aineiston jakautuminen on esitetty taulukossa 2.



Taulukko 2. Analyysiin käytetyn aineiston jakautuminen.

Osite	Rungoitaiset tunnuksset		Pölkyittäiset tunnuksset		
	N	$\bar{v}$ , dm <sup>3</sup>	N	$\bar{v}$ , dm <sup>3</sup>	$\Sigma v$ , m <sup>3</sup>
Mänty, tyyppi 1	20	782	126	174	22,0
tyyppi 3	35	451	125	129	16,2
yhteensä	55	571	251	152	38,2
Kuusi, tyyppi 1	36	706	159	185	29,5
tyyppi 2	31	230	99	90	8,9
tyyppi 3	31	484	161	130	21,0
yhteensä	98	485	419	142	59,4
Koivu, tyyppi 1	33	551	148	145	22,0
tyyppi 3	29	326	149	85	12,7
yhteensä	62	445	297	117	34,7
Koko aineisto	215	496	967	137	132,2

Tutkimuksessa konetyypit 1 ja 2 (Lokomatic 90) oli kalibroitu tutkittavalle puulajille normaalin työskentelyn tarkistusmittausten perusteella. Konetyyppi 3 (Harvemeter 4000) kalibroitiin kahden mittauserän puutavaraa valmistettaessa laitevalmistajan ohjeiden mukaan tutkittavalle puulajille sekä yhdellä kolmen puulajin muodostamalla mittauserällä kuuselle. Viimeksi mainitulla mittauserällä pyrittiin saamaan selville puulajeista johtuvat absoluuttiset erot tilavuudenmäärittäyksessä ja sen tuloksia esitetään erikseen luvussa 5.6.

#### 4.6 Aineiston käsittely

Tilavuuden mittauksen tarkkuutta tarkastellaan mittausvirheenä (koneellisen mittauksen ja tarkastusmittauksen tulosten erotuksen prosentuaalinen osuus tarkastusmittauksen tuloksesta) sekä mittausvirheen itseisarvona (edellä mainitun prosentiosuuden itseisarvo).

Aineiston käsittely aloitettiin tutkimalla aineiston normaalijakautuneisuutta mittausvirheen ja mittausvirheen itseisarvon suhteen. Selittävien muuttujien keskiarvojen yhtäsuuruutta konetyypeittäin ja puulajeittain muodostetuissa ositteissa selvitettiin t-testillä ja varianssianalyysillä. Jatkossa ositteilla tarkoitetaan konetyypeittäin ja puulajeittain muodostettuja ositteita.

Mittaustarkkuuteen vaikuttavien tekijöiden löytämiseksi tarkasteltiin aluksi selittävien ja selitettävien muuttujien keskinäisiä korrelaatioita. Jatkossa esitettäviin asetelmiin on otettu merkitsevyystasolla 0,05 merkitseviä korrelaatioita, joissa  $|r| > 0,1$ .

Korrelaation voimakkuuden ja korrelaatiokertoimen merkitsevyystason perusteella valittiin selittävät muuttujat askeltavaan regressioanalyysiin. Selittäviä muuttujia etsittiin myös varianssianalyysillä. Lopullisiin regressiomalleihin otettiin merkitsevyystasolla 0,05 merkitseviä muuttujia. Regressiomalleihin otettiin teknisiä pölkyn ominaisuuksia suoraan

kuvaavia primäärimuuttujia, kuten mutkan poikkeama/pituus tai pölkyn haarojen lukumäärä, johdettujen muuttujien, kuten taaksepäin syöttöjen lukumäärä tai valmistuksen vaikeuksien lukumäärä, asemesta, vaikka selityssaste yleensä jäikin hieman alhaisemmaksi. Ristiinkorreloituneista muuttujista valittiin mukaan vaikutussuunnaltaan looginen.

Seuraavassa on selitetty eräitä regressiomalleissa esiintyviä muuttujia:

Pölkyn laskennallinen oksaleikkausten pinta-alojen summa perustuu kultakin metrin pituiselta pölkyn jaksolta mitattuihin suurimman oksaleikkauksen halkaisijaan ja oksaleikkausten lukumäärään. Suurimman oksaleikkauksen halkaisija kerrottiin 0,5:lla, minkä jälkeen laskettiin vastaava pinta-ala, joka kerrottiin leikkausten lukumäärällä. Pölkyn oksaleikkausten summa saatiin laskemalla metreittaiset oksaleikkausten summat yhteen.

Pölkyn suurimpien oksaleikkausten poikkipinta-alojen summa laskettiin summaamalla metrin pituisilta pölkyn jaksoilta havaitut suurimpien oksaleikkausten poikkipinta-alat.

Oksaisuutta kuvattiin useilla suurimman oksaleikkauksen pinta-alaan ja/tai oksien lukumäärään perustuvilla muuttujilla, ja aineiston käsittelyn yhteydessä oksaisuudella terminä tarkoitetaan oksaisuusmuuttujia yleensä.

Pölkyyttäin laskettu käsitellyn puuosan latvussuhde saatiin laskemalla oksallisen pituuden osuus rungosta valmistetusta puutavarasta. Lämpimältäan käyttöpuuta pienempää latvuksen osaa ei siis otettu huomioon rungon latvussuhdetta laskettaessa.

Epäsuoruudesta puutavaran koneelliselle valmistukselle aiheutuva vaikeus määriteltiin mutkan tai lenkouden poikkeaman (katso luku 4.3) ja vastaavan pölkynosan pituuden osamääränä. Vastaavasti määriteltiin myös mutkaisuudesta ja lenkoudesta aiheutuva vaikeus.

## 5 Tulokset

### 5.1 Aineiston normaalijakautuneisuus ja selittävien muuttujien ositteittaiset keskiarvot

Pölkyyttäinen aineisto oli kokonaisuutena ja ositteittain tarkasteltuna selitettävien muuttujien suhteen normaalijakautunut merkitsevyystasolla 0,01. Myös rungoittaisessa aineistossa merkitsevyystaso oli 0,01 lukuun ottamatta männyn sekä konetyypin 2 ositteita, joista ensinmainittu oli normaalijakautunut merkitsevyystasolla 0,09 ja jälkimmäinen merkitsevyystasolla 0,20.

Puulajit poikkeavat yleisesti nyt tarkasteltujen ominaisuuksien suhteen toisistaan. Myös tässä aineistossa tärkeimpien selittävien muuttujien puulajeittaiset keskiarvot poikkesivat tilastollisesti merkitsevästi toisistaan.

Mäntypölkkyjen (taulukko 3) keskitilavuus sekä suurimman oksaleikkauksen pinta-ala oli tutkimusaineistossa suurin. Mäntyjä käsiteltäessä sattui pölkkyä kohden eniten syötön luistoja. Kuusipölkkyissä oli keskimäärin eniten oksia, mutta keskimääräinen suurimman

oksaleikkauksen pinta-ala oli mäntyä ja koivua pienempi. Koivupölkkyt olivat tilavuudeltaan keskimäärin pienempiä ja niissä oli vähiten oksia. Suurimman oksaleikkauksen pinta-ala oli miltei yhtä suuri kuin männyllä. Koivupölkkyt olivat selvästi epäsuorimpia ja niiden epäpyöreys oli suurin. Koivuja käsiteltäessä tapahtui pölkkyä kohden eniten taaksepäin syöttöjä, karsintaterien aukaisuja sekä käsittelyn vaikeuksia yleensä.

Eri konetyypeillä pölkky populaatiot poikkesivat tilastollisesti merkitsevästi toisistaan, joten konetyyppejä ei voida vertailla. Myös puittaisessa aineistossa useiden selittävien muuttujien ositteittaiset keskiarvot poikkesivat merkitsevästi toisistaan.

Konetyypillä 1 (taulukko 4) valmistetut pölkkyt olivat keskitilavuudeltaan selvästi suurimpia. Suurimman oksaleikkauksen pinta-ala sekä mutkaisuuden ja epäsuoruuden arvot olivat yhdessä konetyypin 3 kanssa suurimmat. Karsintateriä aukaistiin useimmin pölkkyjä konetyypillä 1 valmistettaessa. Suurimman oksaleikkauksen pinta-alan ja mutkaisuuden tai epäsuoruuden tulon arvo oli suurempi kuin konetyypillä 3, eli mainitut muuttujat esiintyivät samassa pölkkyssä keskimäärin useammin. Konetyypillä 2 valmistettujen pölkkyjen keskitilavuus oli pienin. Pölkkyissä oli eniten oksia, mutta suurimman oksaleikkauksen pinta-ala oli selvästi konetyyppien 1 ja 2 vastaavaa pienempi. Pölkkyt olivat selvästi suorimpia. Konetyypin 3 valmistamat pölkkyt olivat suurimman oksaleikkauksen pinta-alan ja epäsuoruuden suhteen tyyppin 1 pölkkyjen luokkaa. Pölkkykohtaisten syötön luistojen, taaksepäin syöttöjen sekä yhteenlaskettujen valmistuksen vaikeuksien lukumäärä oli konetyypeista suurin. Karsintaterien aukaisujen lukumäärä oli hieman konetyypin 1 vastaavaa pienempi.

Taulukko 3. Eräiden selittävien pölkkyttäisten muuttujien tilastollisia tunnuksia puulajeittain.

Muuttuja	Mänty		Puulaji Kuusi		Koivu	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Tilavuus, dm <sup>3</sup>	152	113	142	121	117	94
Keskipituus, m	4,25	0,9	4,31	1,0	3,93	1,1
Oksien lukumäärä, kpl	14,0	10,5	24,9	11,0	7,5	8,2
Oksien lukumäärä, kpl/m	3,6	3,2	5,9	2,6	2,7	7,2
Suurimman oksaleikkauksen pinta-ala, cm <sup>2</sup>	19,2	22,5	12,5	11,4	18,3	21,9
Suurimman mutkan poikkeama/pituus, mm/cm	0,08	0,16	0,09	0,20	0,25	0,27
Suurimman lenkouden poikkeama/pituus, mm/cm	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07	0,1
Suurimman epäsuoruuden poikkeama/pituus, mm/cm	0,10	0,17	0,12	0,20	0,32	0,27
Epäpyöreys, %	2,68	1,74	2,31	1,33	3,95	2,16
Haarojen lukumäärä, kpl	0,11	0,31	0,18	0,38	0,23	0,52
Poikaoksien lukumäärä, kpl	0,12	0,45	0,28	0,61	0,38	0,75
Taaksepäin syöttöjen lukumäärä, kpl	0,19	0,43	0,21	1,03	0,46	1,67
Syötön luistojen lukumäärä, kpl	0,26	0,82	0,08	0,33	0,14	0,38
Karsintaterien aukaisujen lukumäärä, kpl	0,04	0,22	0,09	0,35	0,12	0,65
Puutavaran valmistuksen vaikeuksien lukumäärä, kpl	0,49	1,04	0,38	1,13	0,74	1,84

Taulukko 4. Eräiden selittävien pölkyttäisten muuttujien tilastollisia tunnuksia konetyypeittäin.

Muuttuja	Konetyyppi					
	1		2		3	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Tilavuus, dm <sup>3</sup>	170	127	90	66	115	94
Keskipituus, m	4,71	0,85	4,37	0,94	3,61	0,84
Oksien lukumäärä, kpl	15,8	13,9	22,8	10,8	16,2	11,2
Oksien lukumäärä, kpl/m	3,5	3,7	5,1	2,2	4,9	6,0
Suurimman oksaleikkauksen pinta-ala, cm <sup>2</sup>	16,8	21,2	7,7	7,5	17,1	17,0
Suurimman mutkan poikkeama/pituus, mm/cm	0,15	0,26	0,03	0,14	0,15	0,21
Suurimman lenkouden poikkeama/pituus, mm/cm	0,03	0,04	0,02	0,03	0,05	0,09
Suurimman epäsuoruuden poikkeama/pituus, mm/cm	0,18	0,25	0,05	0,14	0,21	0,23
Epäpyöreys, %	2,87	1,85	2,54	1,71	3,04	1,90
Haarojen lukumäärä, kpl	0,18	0,44	0,17	0,38	0,17	0,40
Poikaoksien lukumäärä, kpl	0,15	0,44	0,19	0,49	0,41	0,78
Taaksepäin syöttöjen lukumäärä, kpl	0,14	0,41	0,24	1,07	0,43	1,61
Syötön luistojen lukumäärä, kpl	0,07	0,53	0,00	0,00	0,26	0,54
Karsintaterien aukaisujen lukumäärä, kpl	0,11	0,58	0,02	0,14	0,08	0,30
Valmistuksen vaikeuksien lukumäärä, kpl	0,33	0,97	0,26	1,07	0,77	1,70

## 5.2 Pölkyittäinen mittausvirhe

Pölkyittäinen keskimääräinen mittausvirhe ja sen itseisarvo sekä vastaavat keskihajonnat on esitetty taulukossa 5. Mittalaitteet olivat luokitelleet pölkyt oikeisiin puutavaralajeihin.

Taulukko 5. Pölkyittäisen mittausvirheen tilastollisia tunnuslukuja.

Osite	N	Virhe, %		Virheen itseisarvo, %	
		$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Mänty, konetyyppi 1	126	2,2	7,7	5,4	6,0
konetyyppi 3	125	-3,3	9,7	7,0	7,4
yhteensä	251	-0,5	9,2	6,2	6,7
Kuusi, konetyyppi 1	159	-1,8	7,8	5,4	5,9
konetyyppi 2	99	-2,7	9,9	6,6	7,9
konetyyppi 3	161	-7,3	11,3	8,7	10,3
yhteensä	419	-4,2	10,1	6,9	8,4
Koivu, konetyyppi 1	148	9,6	27,9	11,5	27,2
konetyyppi 3	149	-2,9	13,6	9,8	9,9
yhteensä	297	3,4	22,7	10,6	20,4
Koko aineisto	967	-0,9	15,3	7,9	13,2

## 5.3 Pölyttäistä mittausvirhettä selittävät muuttujat

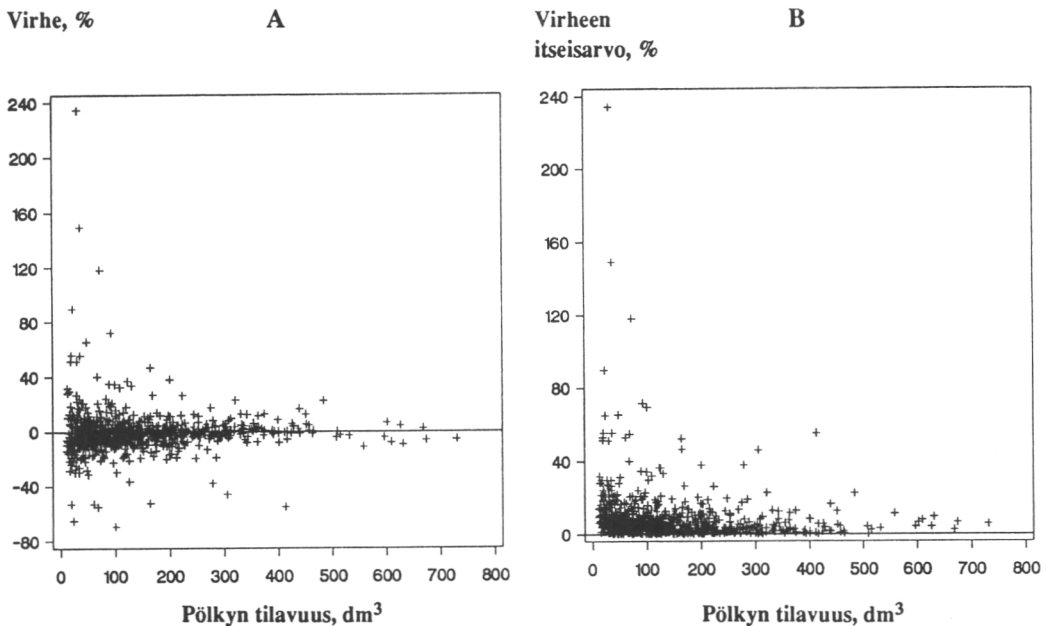
### 5.3.1 Koko aineisto

Mittausvirhe ja sen itseisarvo pölkyn tilavuuden funktiona koko aineistolle on esitetty kuvassa 1. Kuvien perusteella mittausvirheen suuruus ja hajonta ovat selvästi riippuvaisia pölkyn tilavuudesta. Sama riippuvuus on havaittavissa myös oksaisilla pölkkyillä (kuva 2). Oksattomien pölkkyjen mittausvirheen riippuvuus tilavuudesta ei kuvan 3 perusteella ole yhtä selkeää. Mittausvirheen suuruus ja hajonta ovat oksaisten pölkkyjen vastaavia pienemmät.

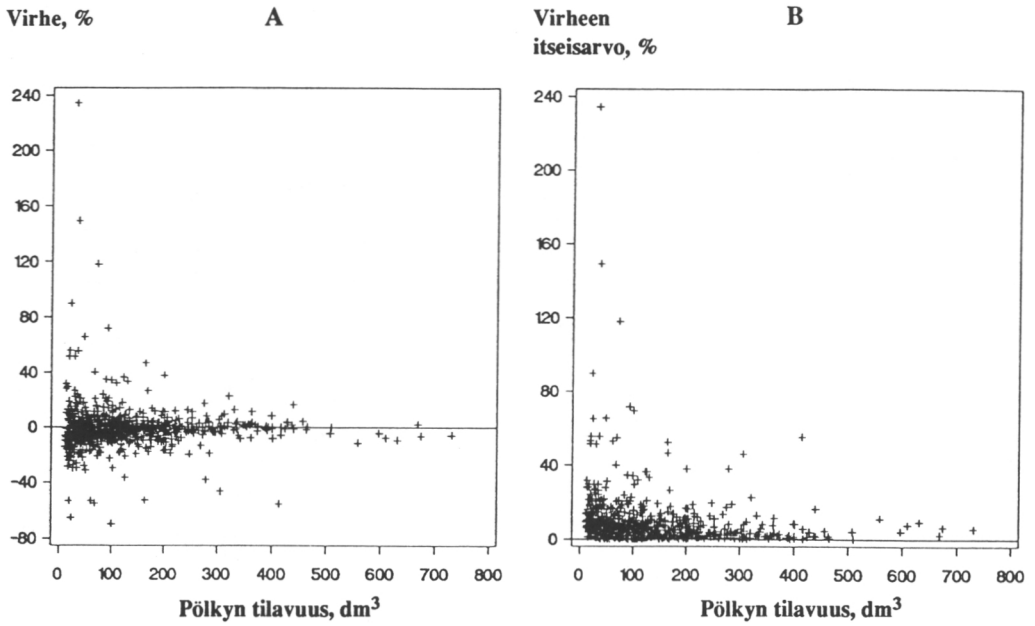
Mittausvirhe ja sen itseisarvo pölkyn suurimman oksaleikkauksen pinta-alan funktiona on esitetty kuvassa 4.

Mittausvirhe ja sen itseisarvo pölkyn tilavuuden funktiona puulajeittain jaoteltuna on esitetty kuvissa 5, 6 ja 7. Koivun mittaus on kuvien perusteella selvästi epätarkinta.

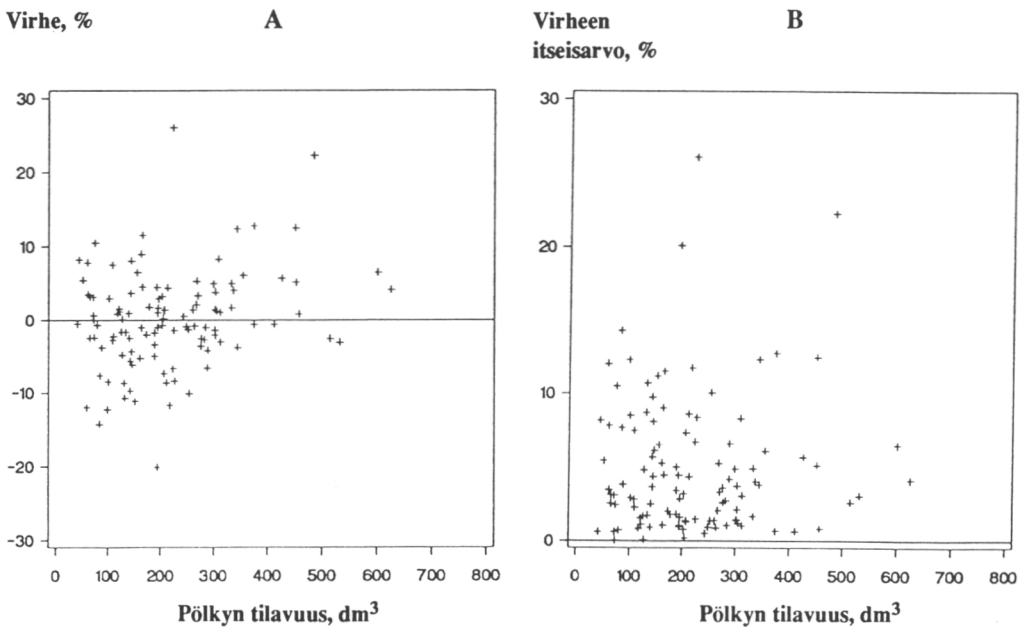
Mittausvirhe pölkyn tilavuuden funktiona konemalleittain ja puulajeittain jaoteltuna on esitetty kuvissa 8 ja 9. Kuvista havaitaan puulajin lisäksi myös konemallin vaikuttavan mittausvirheeseen.



Kuva 1. Koko aineiston mittausvirhe (A) ja sen itseisarvo (B) pölkyn tilavuuden funktiona.

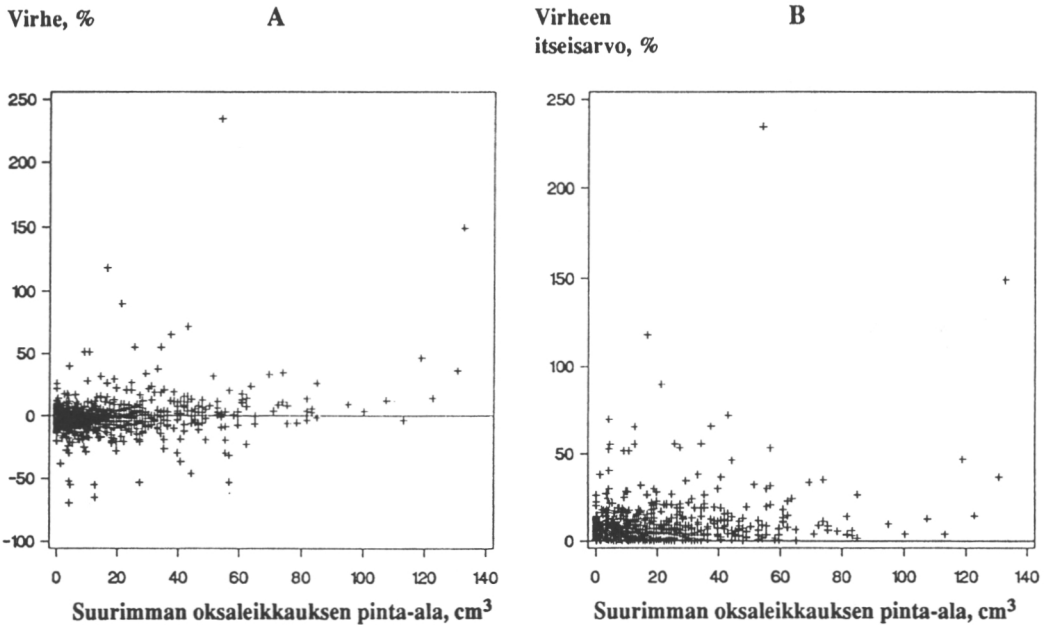


Kuva 2. Oksaisten pölkkyjen mittausvirhe (A) ja sen itseisarvo (B) pölkyn tilavuuden funktiona.

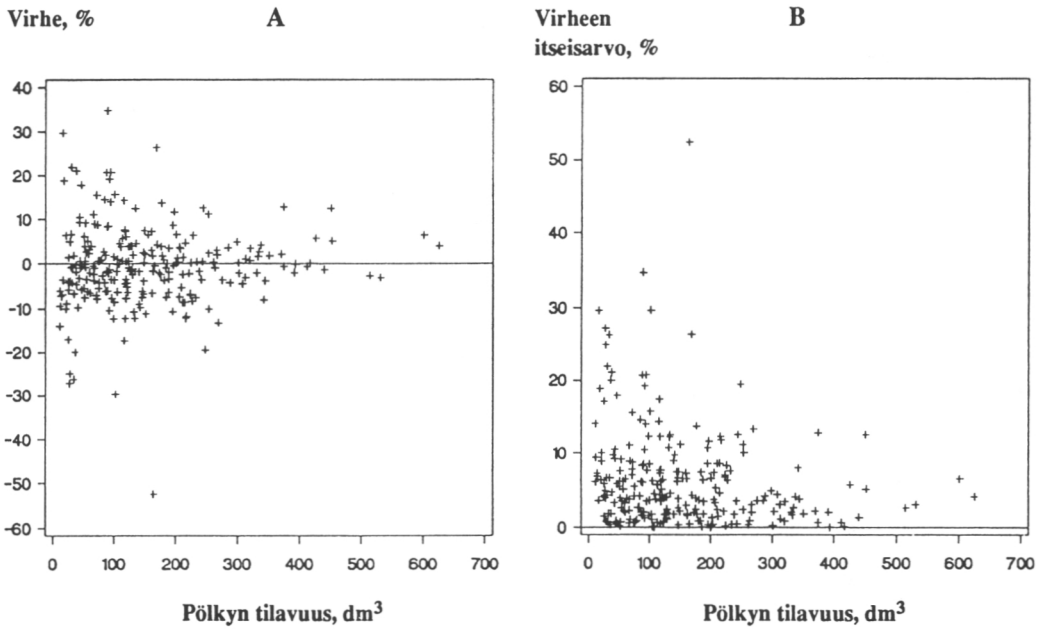


Kuva 3. Oksattomien pölkkyjen mittausvirhe (A) ja sen itseisarvo (B) pölkyn tilavuuden funktiona.





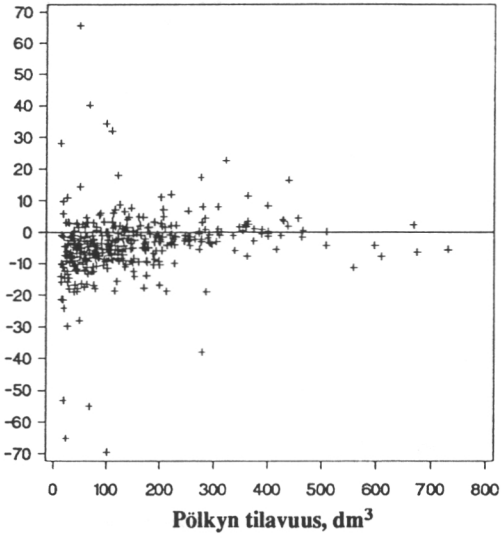
Kuva 4. Mittausvirhe (A) ja sen itseisarvo (B) pölkyn suurimman oksaleikkauksen pinta-alan funktiona.



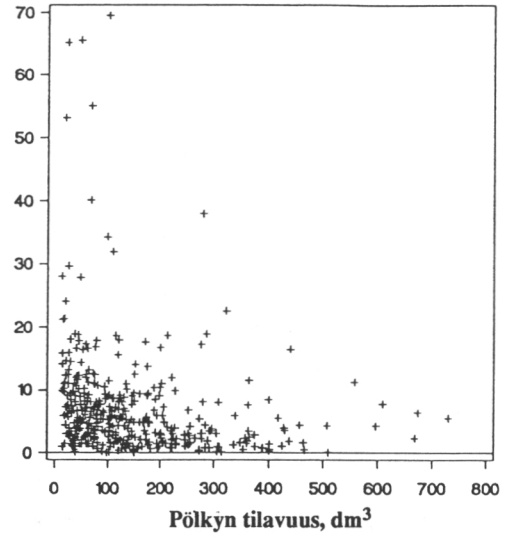
Kuva 5. Mäntypölkkyjen mittausvirhe (A) ja sen itseisarvo (B) pölkyn tilavuuden funktiona.

Virhe, %

A

Virheen  
itseisarvo, %

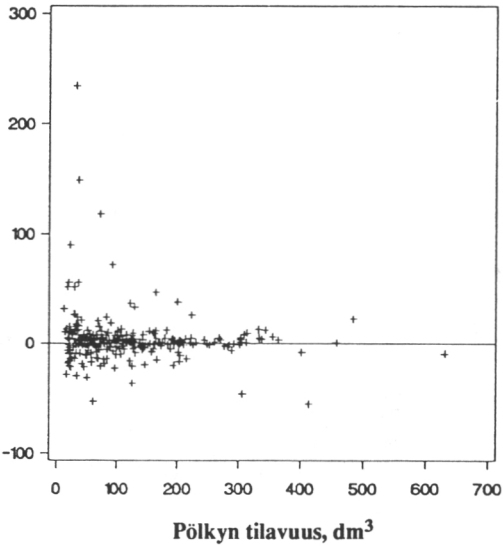
B



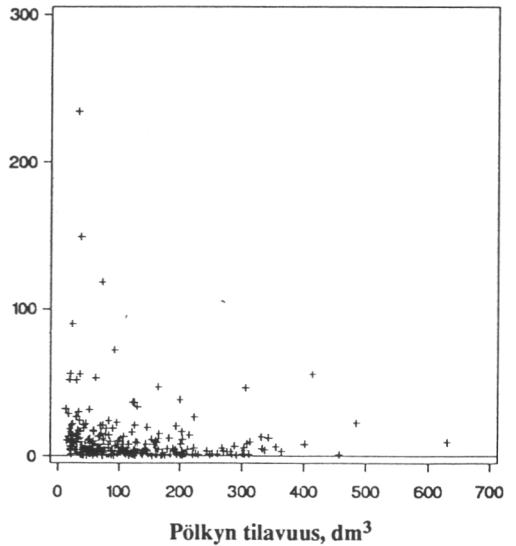
Kuva 6. Kuusipölkkyjen mittausvirhe (A) ja sen itseisarvo (B) pölkyn tilavuuden funktiona.

Virhe, %

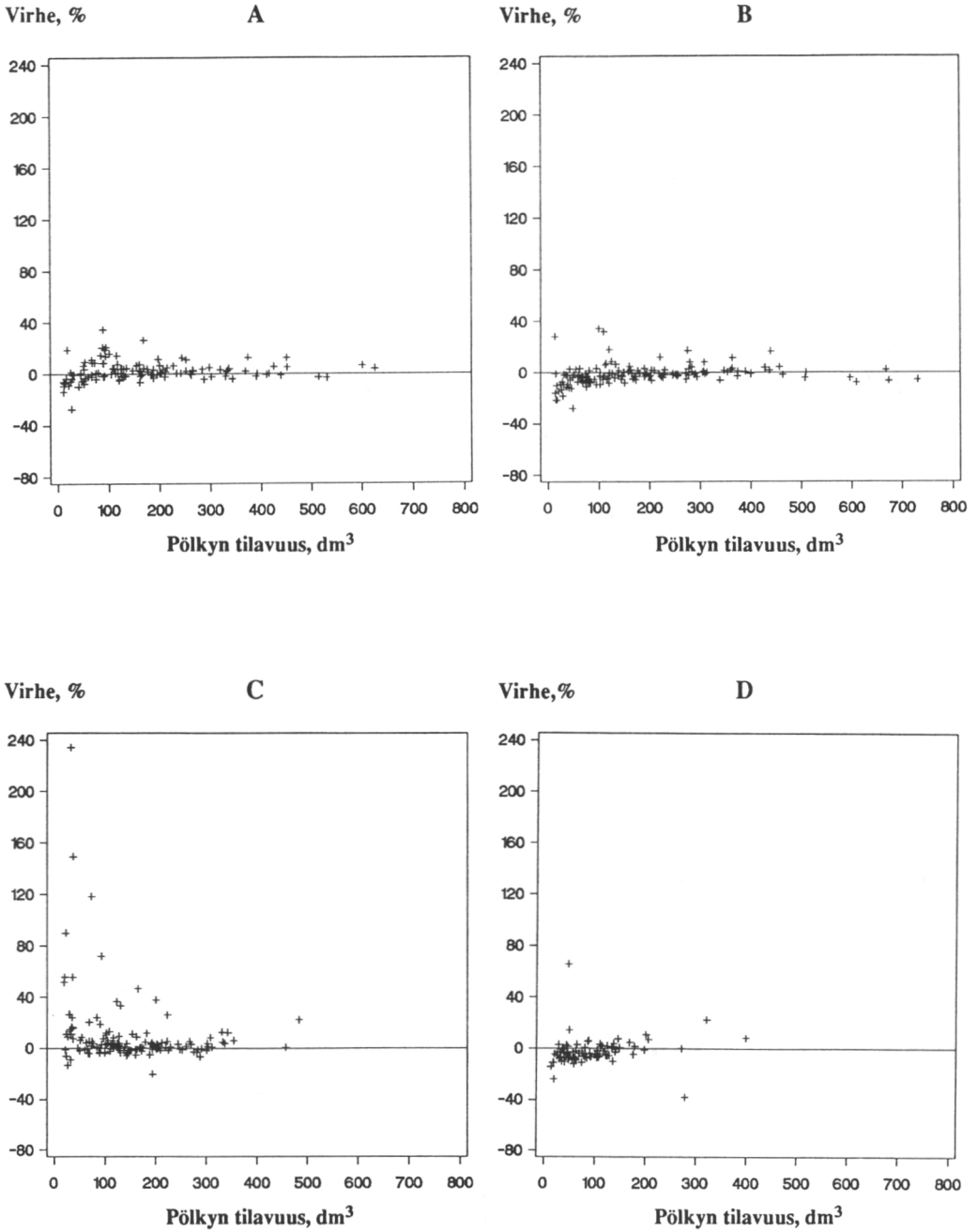
A

Virheen  
itseisarvo, %

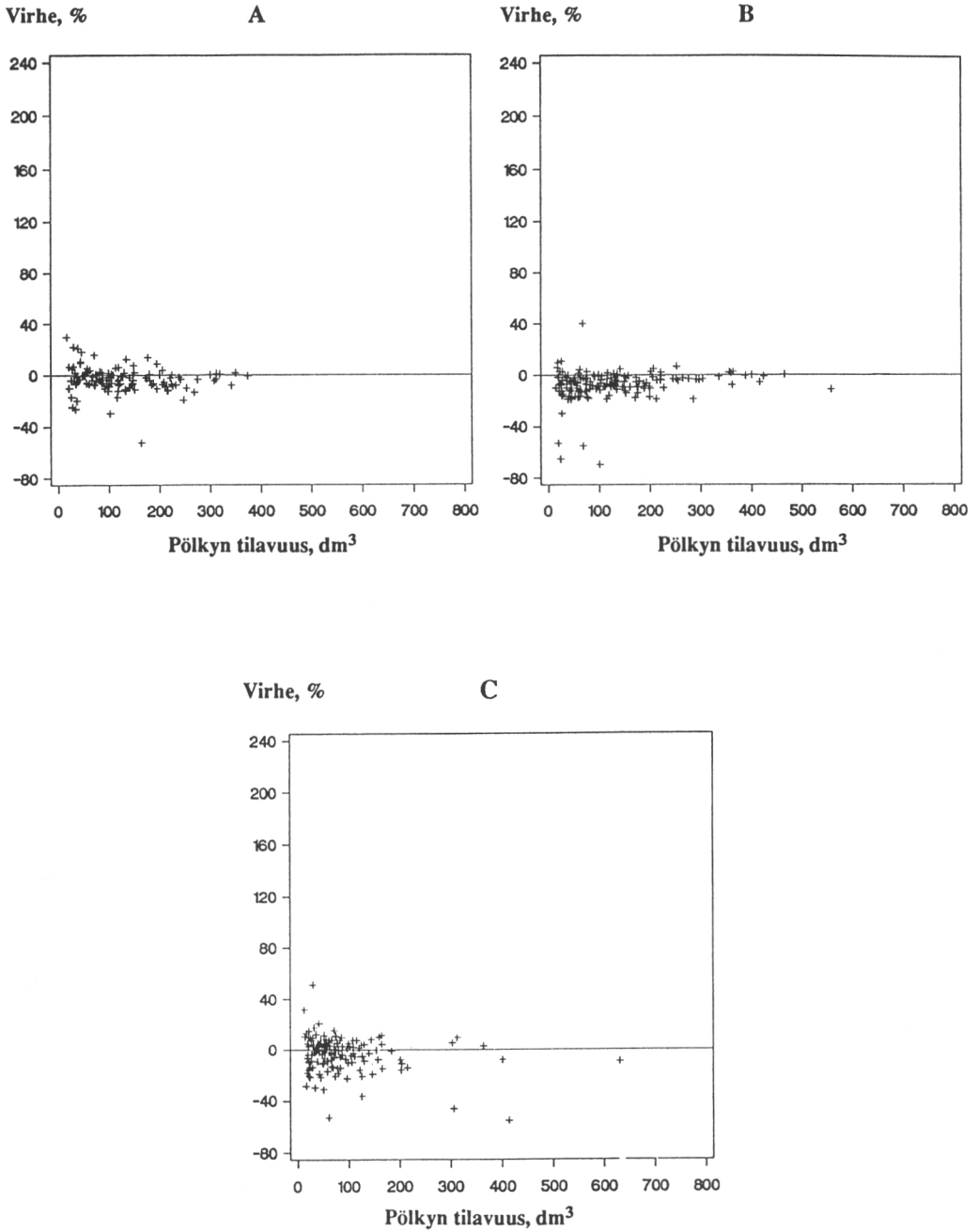
B



Kuva 7. Koivupölkkyjen mittausvirhe (A) ja sen itseisarvo (B) pölkyn tilavuuden funktiona.



Kuva 8. Mittausvirhe tilavuuden funktiona konemallilla 1 valmistetuilla mäntypölkkyillä (A), kuusipölkkyillä (B), koivupölkkyillä (C) sekä konemallilla 2 valmistetuilla kuusipölkkyillä (D).



Kuva 9. Mittausvirhe tilavuuden funktiona konemallilla 3 valmistetuilla mäntypölkkyillä (A), kuusipölkkyillä (B) ja koivupölkkyillä (C).

Pölkkyittäisessä aineistossa sekä kokonaisuutena että ositteittain tarkasteltuna oksaisuutta kuvaavat muuttujat korreloivat yleensä virhemuuttujien kanssa. Oksaisuutta kuvaavista muuttujista voimakkain korrelaatio oli tavallisesti suurimman oksaleikkauksen pinta-alalla. Seuraavassa asetelmassa tarkastellaan pölkkyittäisten virhemuuttujien tai niiden yhdistelmien sekä selittävien muuttujien välisiä voimakkaimpia korrelaatioita aineistoa kokonaisuutena tarkasteltaessa.

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Suurimman oksaleikkauksen pinta-ala	+	+
Epäsuoruuden poikkeama/pituus	+	+
Epäsuoruuden poikkeama/pituus * suurimman oksaleikkauksen pinta-ala	+	+
Tilavuuden logaritmi		-
Epäpyöreys		+
Haarojen lukumäärä		+
Yksirunkoisen pölkyn valemuuttuja	-	-
Koivun valemuuttuja	+	+
Kuusen valemuuttuja	-	
Puutavaran valmistuksen vaikeuksien valemuuttuja		+

Puutavaran valmistuksen vaikeuksiin vaikuttivat seuraavan asetelman mukaiset tekijät. Näistä ainoastaan haarat ja poikaoksat korreloivat merkitsevästi suoraan mittausvirhemuuttujien kanssa muiden vaikuttaessa puutavaran valmistuksien valemuuttujan kautta.

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki		
	Syötön luistot	Taaksepäin syötöt	Karsintaterien aukaisut
Oksaisuus	+	+	
Mutkaisuus		+	+
Oksaisuus * mutkaisuus		+	+
Poikaoksien lukumäärä		+	
Haarojen lukumäärä			+
Pölkyn tilavuus	-		
Männyn valemuuttuja	+		
Kuusen valemuuttuja	-		
Koivun valemuuttuja		+	

Varianssianalyysin perusteella mittausvirheen keskiarvoon vaikuttivat merkitsevästi koneyksilö, koneyyppi, puulaji, mittauseriä ja pölkyn mutkien lukumäärä. Itseisarvoon vaikuttivat merkitsevästi koneyyppiä lukuun ottamatta samat muuttujat ja lisäksi pölkyn sijainti puussa.

Regressioanalyysissä mittausvirhettä selittivät erityisesti suurimman oksaleikkauksen pinta-alan ja mutkaisuuden tulo, konetyyppin 1 valemuuttuja sekä haarapölkyn valemuuttuja. Virheen itseisarvoa selitti erityisesti suurimman oksaleikkauksen pinta-alan ja epäsuoruuden tulo sekä haarapölkyn valemuuttuja.

Aineiston pohjalta lasketut regressiomallit on esitetty yhtälöissä 2 ja 3.

$$y = 0,7 + 18,5x_6 - 6,3x_{12} + 24,7(x_1/x_4)^2 - 22,3x_{17}/x_{18} + 0,1x_3 + 4,8x_5 + 0,3x_3x_1/x_4 - 3,6x_7 \quad R^2=25,4\% \quad N=967 \quad (2)$$

$$|y| = 16,2 + 0,3x_3x_{17}/x_{18} + 19,9x_6 - 5,1\log x_2 + 0,1x_5x_3 + 20,1(x_1/x_4)^2 - 16,0x_1/x_4 \quad R^2=27,6\% \quad N=967 \quad (3)$$

Pölkyyttäisten regressioyhtälöiden (2...15) muuttujat:

$y$  = pölkyn mittausvirhe, %

$|y|$  = pölkyn mittausvirheen itseisarvo, %

$x_1$  = mutkan suurin poikkeama, mm

$x_2$  = tilavuus tarkastusmittauksessa, dm<sup>3</sup>

$x_3$  = pölkyn suurimman oksaleikkauksen pinta-ala, cm<sup>2</sup>

$x_4$  = mutkan pituus, cm

$x_5$  = koivun valemuuttuja

$x_6$  = haarapölkyn valemuuttuja

$x_7$  = kuusen valemuuttuja

$x_8$  = konetyypin 1 valemuuttuja

$x_9$  = pölkyn pituus, cm

$x_{10}$  = koneyksilön 1 valemuuttuja

$x_{11}$  = pölkyn laskennallinen oksaleikkausten poikkipinta-alojen summa, cm<sup>2</sup>

$x_{12}$  = konetyypin 3 valemuuttuja

$x_{13}$  = latvapölkyn valemuuttuja

$x_{14}$  = epäpyöreys, %

$x_{15}$  = pölkyn suurimpien oksaleikkausten poikkipinta-alojen summa, cm<sup>2</sup>

$x_{16}$  = lenkouden poikkeama, mm

$x_{17}$  = pölkyn epäsuoruuden poikkeama, mm

$x_{18}$  = epäsuoran pölkynosan pituus, cm

$x_{19}$  = pölkyn vaipan pinta-ala, cm<sup>2</sup>

$x_{20}$  = pölkyn haarojen lukumäärä

$x_{21}$  = pölkyn poikaoksien lukumäärä

$x_{22}$  = normaalisti valmistetun yksirunkoisen pölkyn valemuuttuja.

### 5.3.2 Puulajeittain jaettu aineisto

Puulajeittain aineistoa tarkasteltaessa saatiin esille koko aineiston virhettä selittävien muuttujien lisäksi kullakin puulajilla erityisesti mittausvirheeseen vaikuttavat tekijät.



Pölkyyttäisten virhemuuttujien ja selittävien muuttujien välisiä voimakkaimpia korrelaatioita puulajeittain tarkastellaan seuraavassa asetelmassa. Mikäli useampi tiettyyn ominaisuuteen liittyvistä muuttujista korreloi virhemuuttujan kanssa, asetelmassa on mainittu vain ko. ominaisuus, esimerkiksi "oksaisuus".

### Mänty

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Oksaisuus	+	+
Mutkan poikkeama/pituus		+
Mutkan poikkeama/pituus * suurimman oksaleikkauksen pinta-ala	+	+
Lenkous	-	+
Syötön luistojen lukumäärä	+	+
Taaksepäin syöttöjen lukumäärä	+	+
Valmistuksen vaikeuksien lukumäärä	+	+

Männyllä puutavaran valmistuksen vaikeuksiin vaikuttivat seuraavat tekijät: pölkyn haarojen lukumäärä korreloi positiivisesti karsintaterien aukaisujen lukumäärän kanssa ja oksaisuus syötön luistojen sekä taaksepäin syöttöjen lukumäärän kanssa.

### Kuusi

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Tilavuus	+	-
Epäpyöreys		+
Mutkan poikkeama/pituus		+
Poikaoksien lukumäärä		+
Haarojen lukumäärä		+

### Koivu

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Oksaisuus	+	+
Mutkan poikkeama/pituus	+	+
Epäsuoruuden poikkeama/pituus * suurimman oksaleikkauksen pinta-ala	+	+
Haarojen lukumäärä	+	+
Karsintaveitsien aukaisujen lukumäärä	+	+
Latvapölkyn valemuuttuja	+	+

Koivulla karsintaveitsien aukaisujen lukumäärän kanssa korreloivat positiivisesti oksaisuus, mutkaisuus ja niiden tulo.

Regressiomallin mukaan männyllä mittausvirhettä selittivät erityisesti koneyksilön 1 valemuuttuja, oksaisuus ja mutkaisuus. Virheen itseisarvoa selittivät latvapölkyn valemuuttuja, oksaisuus ja epäsuoruus. Kuusen mittausvirhettä selittävistä tekijöistä tärkeimmät olivat konetyypin 3 valemuuttuja, tilavuus, oksaisuus ja mutkaisuus. Virheen itseisarvoa selittivät epäpyöreys, tilavuus ja puutavaran valmistuksen vaikeuksien valemuuttuja. Koivulla mittausvirheen vaihtelua parhaiten selittivät haarapölkyn valemuuttuja, oksaisuus, mutkaisuus ja konetyypin 3 valemuuttuja. Virheen itseisarvon regressiomallissa parhaita selittäjiä olivat haara- ja latvapölkkyjen valemuuttajat sekä mutkaisuus.

Puulajeittaiset regressiomallit on esitetty yhtälöissä 4...9.

#### Mänty

$$y = -17,7 + 6,4x_{10} + 0,2x_3x_1/x_4 + 5,2\log x_2 + 3,1x_{11}/x_{19} \quad R^2=26,3\% \quad N=251 \quad (4)$$

$$|y| = 3,7 + 3,7x_{13} + 0,2x_3x_{17}/x_{18} + 28,6x_{16}/x_9 \quad R^2=14,5\% \quad N=251 \quad (5)$$

#### Kuusi

$$y = -16,3 - 5,0x_{12} + 6,7\log x_2 + 0,4x_3x_1/x_4 \quad R^2=14,2\% \quad N=419 \quad (6)$$

$$|y| = 11,9 + 1,5x_{14} - 4,9\log x_2 + 3,6x_{20} + 0,2x_3x_1/x_4 + 1,5x_{21} \quad R^2=21,0\% \quad N=419 \quad (7)$$

#### Koivu

$$y = 31,1 + 43,8x_6 + 32,4(x_1/x_4)^2 - 36,6x_{17}/x_{18} - 9,9x_{12} + 0,4x_3x_1/x_4 - 10,2\log x_2 \quad R^2=38,9\% \quad N=297 \quad (8)$$

$$|y| = 4,4 + 37,0x_6 + 6,3x_{13} + 28,6(x_1/x_4)^2 - 21,2x_1/x_4 + 0,5x_3 - 0,1x_{15} \quad R^2=39,3\% \quad N=297 \quad (9)$$

### 5.3.3 Konetyypeittäin jaettu aineisto

Virhemuuttujien kanssa korreloivat selittävät muuttujat vaihtelivat myös konetyypeittäin tarkasteltuina. Seuraavissa asetelmissa esitetään konetyyppien 1, 2 ja 3 selittävien ja selitettävien muuttujien voimakkaimpia korrelaatioita.

Konetyyppi 1

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Suurimman oksaleikkauksen pinta-ala	+	+
Mutkan poikkeama/pituus	+	+
Mutkan poikkeama/pituus * suurimman oksaleikkauksen pinta-ala	+	+
Karsintaterien aukaisujen lukumäärä	+	+
Valmistuksen vaikeuksien lukumäärä	+	+
Haarojen lukumäärä	+	+
Haarapölkyn valemuuttuja	+	+
Koivun valemuuttuja	+	+
Koivun valemuuttuja * suurimman oksaleikkauksen pinta-ala	+	+
Kuusen valemuuttuja	-	
Latvapölkyn valemuuttuja	+	+

Konetyypillä 1 syötön luistojen lukumäärä oli korreloitunut oksaisuuden kanssa, taaksepäin syöttöjen lukumäärä oksaisuuden sekä oksaisuuden ja mutkaisuuden tulon kanssa ja karsintaterien aukaisujen lukumäärä lisäksi pölkyn haarojen ja poikaoksien lukumäärän kanssa.

Konetyyppi 2

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Suurimman oksaleikkauksen pinta-ala	+	+
Mutkan poikkeama/pituus	+	+
Mutkan poikkeama/pituus * suurimman oksaleikkauksen pinta-ala	+	+
Epäpyöreys	+	+
Poikaoksien lukumäärä	+	+
Taaksepäin syöttöjen lukumäärä	+	+

Konetyypillä 2 taaksepäin syöttöjen lukumäärä oli korreloitunut oksaisuuden ja mutkaisuuden ja niiden tulon sekä poikaoksien lukumäärän kanssa.

### Konetyyppi 3

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Haarojen lukumäärä	-	+
Karsinteterien aukaisujen lukumäärä		+
Kuusen valemuuttuja	-	

Konetyypillä 3 karsintaveitsien aukaisujen lukumäärä oli korreloitunut pölkyn haarojen lukumäärän kanssa.

Regressioyhtälöissä konetyypin 1 mittausvirhettä selittivät parhaiten koivun ja haarapölkyn valemuuttajat sekä mutkaisuus. Mittausvirheen itseisarvon parhaita selittäjiä olivat oksaisuus, epäsuoruus sekä latvapölkyn valemuuttuja. Mainittakoon, että koneyksilön 1 virheprosentin askeltavalla regressioanalyysillä muodostetussa selitysmallissa, josta muuttujia ei ollut poistettu, epäpyöreys selitti 0,4% vaihtelusta, joten se ei muodostunut kovin merkittäväksi selittäjäksi.

Konetyypin 2 mittausvirheestä taaksepäin syöttöjen lukumäärä ja suurimman oksaleikkauksen pinta-ala selittivät 55%. Mittausvirheen itseisarvosta taaksepäin syöttöjen lukumäärä epäpyöreiden kanssa selittivät lähes 59%.

Konetyypillä 3 kuusen valemuuttuja, oksaisuus ja epäsuoruus selittivät mittausvirheen vaihtelua parhaiten. Mittausvirheen itseisarvon mallissa parhaita selittäjiä olivat normaalisti valmistetun yksirunkoisen pölkyn valemuuttuja sekä epäpyöreys.

Mittausvirheiden regressiomallit konetyypeittäin on esitetty yhtälöissä 10...15.

Konetyyppi 1:

$$y = -1,7 + 0,3x_5x_3 + 36,2x_6 + 29,4(x_1/x_4)^2 - 21,5x_1/x_4 + 0,1x_3 \quad R^2=39,4\% \quad N=433 \quad (10)$$

$$|y| = 3,4 + 31,3x_6 + 25,7(x_1/x_4)^2 + 0,2x_5x_3 - 23,8x_1/x_4 + 5,3x_{13} + 0,3x_3x_{17}/x_{18} \quad R^2=39,3\% \quad N=433 \quad (11)$$

Konetyyppi 2:

$$y = -6,9 + 5,4x_{17} + 0,4x_3 \quad R^2=55,0\% \quad N=99 \quad (12)$$

$$|y| = 2,9 + 4,9x_{17} + 1,0x_{14} \quad R^2=58,7\% \quad N=99 \quad (13)$$

Konetyyppi 3:

$$y = 12,2 - 0,3x_3x_{17}/x_{18} - 4,9x_{20} - 3,9x_7 - 6,4\log x_2 - 4,0x_{13} \quad R^2=10,2\% \quad N=435 \quad (14)$$

$$|y| = 12,1 + 1,0x_{14} - 8,1x_{22} + 2,9x_{13} + 2,9x_{20} \quad R^2=13,5\% \quad N=435 \quad (15)$$

## 5.4 Rungoittainen mittausvirhe

Rungoittainen mittausvirhe oli ositteittain tarkasteltuna itseisarvoltaan pölkyittäistä pienempi lukuun ottamatta männyn eri ositteita. Rungoittainen virheen itseisarvon keskihajonta sekä virheen itseisarvo ja sen keskihajonta olivat pölkyittäistä pienemmät. Mittausvirheen tilastollisia tunnuslukuja on esitetty taulukossa 6.

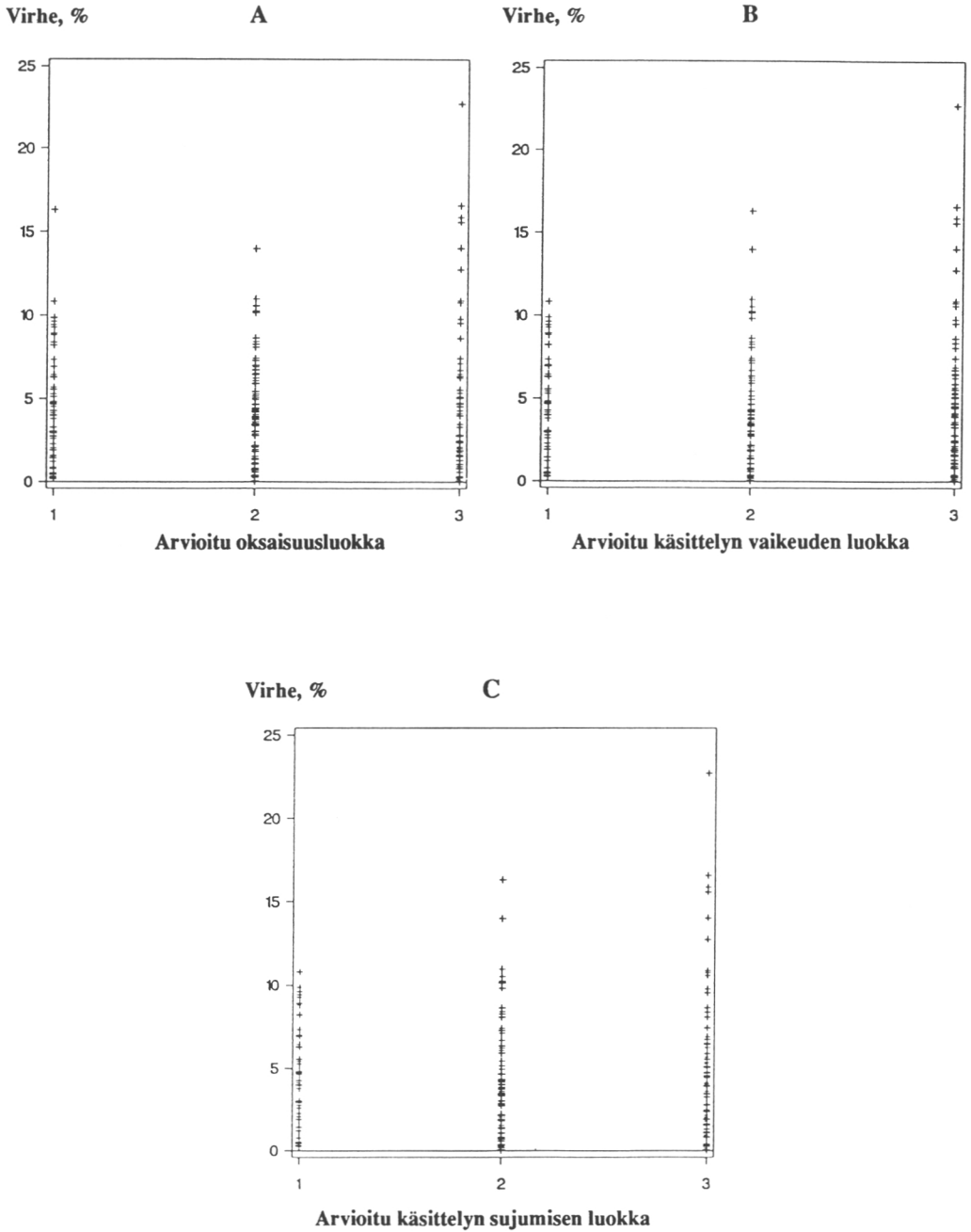
Taulukko 6. Rungoittaisen mittausvirheen tilastollisia tunnuslukuja.

Osite	N	Virhe, %		Virheen itseisarvo, %	
		$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Mänty, tyyppi 1	20	2,2	3,0	3,0	2,1
tyyppi 3	35	-4,1	5,5	5,5	4,1
yhteensä	55	-1,8	5,6	4,6	3,7
Kuusi, tyyppi 1	36	-0,6	3,9	3,3	2,1
tyyppi 2	31	-3,4	6,3	5,3	4,7
tyyppi 3	31	-4,3	4,7	5,3	3,5
yhteensä	98	-2,7	5,2	4,6	3,6
Koivu, tyyppi 1	33	2,6	3,6	3,3	2,9
tyyppi 3	29	-0,2	7,0	5,3	4,5
yhteensä	62	1,3	5,6	4,2	3,8
Koko aineisto	215	-1,3	5,7	4,5	3,7

## 5.5 Rungoittaista mittausvirhettä selittävät muuttujat

### 5.5.1 Koko aineisto

Käsiteltävän puun arvioidun oksaisuusluokan, käsittelyn vaikeuden luokan ja käsittelyn sujumisen luokan vaikutus mittausvirheen itseisarvoon on esitetty kuvassa 10. Mittausvirheen itseisarvon voidaan todeta kasvavan arvioitujen tunnusten vaikeutuessa, joskin riippuvuus on heikko. Kaikkien tunnusten luokkaan 3 kuuluu runsaasti myös tarkasti mitattuja puita.



Kuva 10. Mittausvirheen itseisarvo käsiteltävän puun arvioidun oksaisuusluokan funktiona (A), arvioidun käsittelyn vaikeuden luokan funktiona (B) ja arvioidun käsittelyn sujumisen luokan funktiona (C) koko rungoittaisessa aineistossa.



Seuraavassa asetelmassa esitetään rungoittaisten mittausvirheiden kanssa korreloivia runkotekijöitä.

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Tilavuus	+	-
Käsittelyn rungonosan latvussuhde	-	
Poikaoksien lukumäärä		+
Konetyypin 1 valemuuttuja	+	-
Konetyypin 2 valemuuttuja	-	
Konetyypin 3 valemuuttuja	-	+
Arvioidun käsittelyn sujumisen luokkien 1 ja 2 valemuuttuja		-
Kuusen valemuuttuja	-	
Koivun valemuuttuja	+	

Tilavuus (-) ja poikaoksien lukumäärä (+) korreloivat loogisesti mittausvirheen itseisarvon kanssa. Voimakkaimmin virhemuuttujien kanssa korreloivat konetyyppien valemuuttajat.

Regressioanalyysissä puittaista mittausvirhettä selittivät konetyypin 1 valemuuttuja, koivun valemuuttuja sekä arvioidun käsittelyn vaikeuden luokan 1 valemuuttuja. Regressiomalli on esitetty yhtälössä 16. Mittausvirheen itseisarvon regressiomallin selitysaste jäi alhaiseksi.

Koko aineisto:

$$y = -3,4 + 3,2x_8 + 3,1x_5 - 1,9x_{27} \quad R^2=21,7\% \quad N=215 \quad (16)$$

Rungoittaisten regressioyhtälöiden muuttujat:

$y$  = rungon mittausvirhe, %

$|y|$  = rungon mittausvirheen itseisarvo, %

$x_5, x_7, x_8, x_{12}$ : kuten pölkyittäisessä tarkastelussa

$x_{23}$  = arvioidun käsittelyn sujumisen luokan 1 valemuuttuja

$x_{24}$  = arvioidun käsittelyn sujumisen luokkien 1 ja 2 valemuuttuja

$x_{25}$  = rungon arvioidun oksaisuusluokan 1 valemuuttuja

$x_{26}$  = rungon arvioidun oksaisuusluokan 3 valemuuttuja

$x_{27}$  = rungon arvioidun käsittelyn vaikeuden luokan 1 valemuuttuja

$x_{28}$  = käsittelyä vaikeuttavien tekijöiden yhteismäärä.

### 5.5.2 Puulajeittain jaettu aineisto

Rungoittaisten virhemuuttujien kanssa korreloineita runkotunnuksia puulajeittain tarkasteltuna on esitetty seuraavissa asetelmissa. Konetyyppien 1 ja 3 valemuuttajat korreloivat samansuuntaisesti kaikilla puulajeilla. Männyllä mutkien lukumäärä ja valmistusta vaikeuttavien tekijöiden, kuten mutkat, haarat ja poikaokset, lukumäärä korreloivat positiivisesti mittausvirheen itseisarvon kanssa. Männyllä myös arvioidun käsittelyn sujumisen korrelaatio mittausvirheen itseisarvon kanssa oli looginen. Muilta osin mitään selkeitä yhtenäisiä korrelaatioita ei puulajeittaisessa tarkastelussa löytynyt.

#### Mänty

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Tilavuus	+	
Mutkien lukumäärä		+
Käsittelyä vaikeuttavien tekijöiden yhteismäärä		+
Konetyypin 1 valemuuttuja	+	-
Konetyypin 3 valemuuttuja	-	+
Arvioidun käsittelyn sujumisen luokkien 1 ja 2 valemuuttuja		-
Arvioidun käsittelyn sujumisen luokan 3 valemuuttuja		+

#### Kuusi

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Tilavuus		-
Konetyypin 1 valemuuttuja	+	-
Konetyypin 3 valemuuttuja	-	

Koivu

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Käsittelyn rungonosan latvussuhde	-	
Konetyypin 1 valemuuttuja	+	-
Konetyypin 3 valemuuttuja	-	+
Arvioidun käsittelyn vaikeuden luokan 2 valemuuttuja	+	
Arvioidun käsittelyn vaikeuden luokan 3 valemuuttuja	-	
Arvioidun oksaisuusluokan 2 valemuuttuja	+	
Arvioidun oksaisuusluokan 3 valemuuttuja	-	

Regressioanalyysissä männyn puittaista mittausvirhettä selittivät konetyypin 3 valemuuttuja, oksaisuusluokan 1 valemuuttuja sekä käsittelyä vaikeuttavien tekijöiden yhteismäärä ja virheen itseisarvoa käsittelyn sujumisen luokkien 1 ja 2 sekä tyyppin 1 valemuuttujat. Kuusella virhettä selittivät tyyppin 1 valemuuttuja sekä arvioidun oksaisuusluokan 1 valemuuttuja. Mittausvirheen itseisarvon regressiomallin selitysaste jäi alhaiseksi. Koivun molempien regressiomallien selitysasteet jäivät alhaisiksi. Puulajeittaiset regressiomallit on esitetty yhtälöissä 17...19.

Mänty

$$y = 4,2 - 6,6x_{12} - 3,7x_{25} - 1,3x_{28} \quad R^2=41,0\% \quad N=55 \quad (17)$$

$$|y| = 7,4 - 3,0x_{24} - 2,1x_8 \quad R^2=25,2\% \quad N=55 \quad (18)$$

Kuusi

$$y = -3,1 + 3,2x_8 - 3,0x_{25} \quad R^2=15,3\% \quad N=98 \quad (19)$$

**5.5.3 Konetyypeittäin jaettu aineisto**

Konetyypeittäin jaetun rungoittaisen aineiston virhemuuttujien korrelaatioita runkotunnusten kanssa tarkastellaan seuraavissa asetelmissa. Selkeitä korrelaatioita ei konetyypeittäisessä tarkastelussa löytynyt, ja erityisen merkillepantavaa on, että mikään muuttuja ei korreloinut mittausvirheen itseisarvon kanssa.

Konetyyppi 1

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Tilavuus	+	
Käsittelyn rungonosan latvussuhde	-	
Kuusen valemuuttuja	-	
Koivun valemuuttuja	+	

Konetyyppi 2

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Arvioidun käsittelyn sujumisen luokkien 1 ja 2 valemuuttuja	-	
Arvioitu käsittelyn sujumisen luokan 3 valemuuttuja	+	

Konetyyppi 3

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Koivun valemuuttuja	+	

Regressioanalyysissä konetyypillä 1 mittausvirhettä selittivät kuusen, arvioidun käsittelyn sujumisen luokan 1 ja arvioidun oksaisuusluokan 1 valemuuttajat. Mittausvirheen itseisarvon regressiomallin selitysaste jäi alhaiseksi. Konetyypin 2 mittausvirhettä selitti arvioidun käsittelyn sujumisen luokkien 1 ja 2 valemuuttuja. Mikään muuttujista ei ollut kyllin merkitsevä tullakseen valituksi mittausvirheen itsesarvon regressiomalliin. Konetyypillä 3 mikään muuttujista ei ollut kyllin merkitsevä tullakseen valituksi kumpaankaan regressiomalliin. Konetyypeittaiset puittaiset regressiomallit on esitetty yhtälöissä 20...21.

Konetyyppi 1:

$$y = 3,6 - 3,2x_7 - 2,5x_{23} - 1,9x_{25} \quad R^2=32,1\% \quad N=89 \quad (20)$$

Konetyyppi 2:

$$y = 5,3 - 9,7x_{24} \quad R^2=21,4\% \quad N=31 \quad (21)$$

## 5.6 Puulajin vaikutus mittauserän 6 pölkyittäiseen mittausvirheeseen

Mittauserän 6 puulajeina olivat mänty, kuusi ja koivu. Konetyypin 3 mittalaite kalibroitiin kuuselle, ja kalibrointi pidettiin samana myös muita puulajeja käsiteltäessä. Mittauserän 6 tunnuksia esitetään seuraavassa asetelmassa:

Puulaji	Tilavuus, m <sup>3</sup>	Erän mittausvirhe, %
Mänty	12,8	-5,5
Kuusi	18,1	-6,4
Koivu	9,4	-9,3
Yhteensä	40,3	-6,8

Mäntypölkkyerän mittaustulos suhteessa tarkastusmittauksen tulokseen oli suurin ja koivun pienin. Myös keskimääräinen pölkyittäinen mittaustulos suhteessa tarkastusmittaukseen oli männyllä suurin kuusen tuloksen ollessa vastaavasti pienin. Pölkyittäiset tunnusluvut on esitetty taulukossa 7.

Pölkyittäiset virhemuuttajat olivat normaalijakautuneita mittauserän 6 aineistossa kokonaisuutena sekä puulajeittain tarkasteltuina. Pölkyittäinen virhe ja sen itseisarvo olivat pienimmillään männyllä, vaikka laite olikin kalibroitu kuuselle. Myös vastaavat keskihajonnat olivat pienimmät männyllä. Koivun mittausta oli epätarkinta. Koivupölkkyt olivat mänty- ja kuusipölkkyjä pienempiä

Seuraavassa asetelmassa tarkastellaan virhemuuttajien korrelaatioita mittauserän 6 pölkyittäisten tunnuksien kanssa.

Taulukko 7. Mittauserän 6 pölkyittäisiä tunnuksia.

Puulaji	Pölkkyjen				Virhe, %		Virheen itseisarvo, %	
	N	$\bar{l}$ , cm	$\bar{v}$ , dm <sup>3</sup>	$\Sigma v$ , m <sup>3</sup>	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Mänty	98	4,06	131	12,8	-5,2	8,8	7,0	7,5
Kuusi	134	3,82	135	18,1	-7,8	11,4	9,3	10,3
Koivu	89	3,17	106	9,4	-6,9	14,7	11,2	11,7
Koko erä	321	3,72	125	40,3	-6,8	11,7	9,1	10,1

Koko mittauserä 6

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Epäsuoruuden poikkeama/pituus	-	+
Suurimman oksaleikkauksen pinta-ala *	-	+
epäsuoruuden poikkeama/pituus		
Pölkyn haarojen lukumäärä	-	+
Pölkyn poikaoksien lukumäärä	-	+
Karsintaterien aukaisujen lukumäärä		+
Epäpyöreys		+
Suurimman oksaleikkauksen pinta-ala *	-	+
koivun valemuuttuja		
Koivun valemuuttuja		+
Männyn valemuuttuja		-

Koko mittauserän 6 korrelaatiokertoimien perusteella tarkasteltuna erityisesti koivulla ja koivuun liittyvillä pölkyn ominaisuuksilla on mittaustarkkuutta heikentävä vaikutus.

Mittauserän 6 mäntypölkkyt

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Lenkouden poikkeama/pituus	-	+
Oksaisuus	+	

Mittauserän 6 kuusipölkkyt

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Tilavuus	+	
Oksaisuus		-
Karsintaterien aukaisujen lukumäärä		+
Epäpyöreys		+
Pölkyn haarojen lukumäärä	-	+
Vaikeuksitta valmistetun yksirunkoisen pölkyn valemuuttuja		..

### Mittauserän 6 koivupölkkyt

Selittävä muuttuja	Korrelaatiokertoimen etumerkki	
	Mittausvirhe	Mittausvirheen itseisarvo
Oksaisuus	-	+
Epäsuoruuden poikkeama/pituus	-	+
Epäsuoruuden poikkeama/pituus * oksaisuus	-	+
Pölkyn poikaoksien lukumäärä	-	+
Karsintaterien aukaisujen lukumäärä		+
Puutavaran valmistuksen vaikeuksien valemuuttuja	-	+
Lumppipölkyn valemuuttuja	-	+
Haarapölkyn valemuuttuja	+	
Vaikeuksista valmistetun yksirunkoisen pölkyn valemuuttuja		-

Koivulla karsintaterien aukaisujen lukumäärä korreloi positiivisesti haarapuun valemuuttujan kanssa. Kuusella oksaisuuden korrelaatio mittausvirheen itseisarvon kanssa oli poikkeuksellisesti negatiivinen.

Regressiomallien selityssasteet mittauserän 6 aineistossa jäivät alhaisiksi.

### **5.7 Mittauserittäinen sekä koko aineiston mittausvirhe**

Ilman lämpötila vaihteli mitattujen puutavaraerien hakkuun aikana välillä  $\pm 0 \dots +19^{\circ}\text{C}$ . Syksyllä erityistä huomiota kiinnitettiin siihen, että käsiteltävät rungot olivat sulia. Mittauserittäinen virhe vaihteli välillä  $-6,8 \dots 6,1\%$ . Sen keskiarvo oli  $0,7\%$  ja keskihajonta  $3,8\%$ . Erittäisen virheen itseisarvon keskiarvo oli  $2,7\%$  ja keskihajonta  $2,7\%$ . Suurimmat virheet olivat konetyypin 3 mittaus tuloksissa, joskin mittauserän 4 tilavuus oli pieni, vain  $3,3 \text{ m}^3$ , ja sekapuustoisen erän 6 puutavara valmistettiin mittalaitteen ollessa kalibroituina kuuselle. Koko aineiston mittausvirhe oli  $-0,8\%$ . Mittauserittaiset ja koko aineiston tunnuksat on esitetty taulukossa 8.

Verrattaessa keskimääräistä pölkkyttäistä, rungoittaista ja mittauserittäistä mittausvirhettä, voidaan todeta erittäisen virheen olevan itseisarvoltaan pienimmän mutta puittaisen suurimman. Tähän vaikuttanee luvussa 5.4 (s. 29) mainittu menettely, jossa runko, jonka kaikkia pölkkyjä ei pystytty koneellisesti valmistamaan, poistettiin aineistosta, kun taas muut ko. rungon pölkkyt otettiin mukaan pölkkyttäiseen aineistoon. Virheen keskihajonta sekä virheen itseisarvo ja sen keskihajonta ovat loogisesti pienimmät mittauserittäin ja suurimmat pölkkyttäin tarkasteltuina.

Taulukko 8. Mittauserittäisiä ja koko aineiston tunnuksia (\* = mittalaite kalibroitu kuuselle).

Mittaus- erä	Puulaji	Lämpötila hakkuun aikana, °C	Kone- yksilö	Kone- tyyppi	Virhe, %	Virheen itseisarvo, %	$v$ , m <sup>3</sup>
1	mä	19	1	1	2,3	2,3	21,3
2	ku	14	3	2	-1,1	1,1	8,9
3	ku	10	1	1	-0,5	0,5	19,7
4	ku	5	4	3	6,1	6,1	3,3
5	ko	5	4	3	0,0	0,0	6,2
6*	mä,ku,ko	6	4	3	-6,8	6,7	40,3
7	ku	0	2	1	0,0	0,0	10,6
8	ko	0	2	1	5,5	5,5	21,9
Erät keskim.	-	-	-	-	0,7	2,7	16,5
Koko aineisto	-	-	-	-	-0,8	-	132,2

## 6 Tulosten tarkastelu

### 6.1 Tulosten luotettavuus

Tässä tutkimuksessa rajoituttiin neljään harvesteri-mittalaite -yhdistelmään sekä kesäaikaiseen korjuuseen, mikä on pidettävä mielessä tuloksia yleistettäessä. Käytettyä tarkastusmittausmenetelmää voidaan pitää erittäin tarkkana, joten koneellisen mittauksen tarkkuudesta saatiin tässä suhteessa luotettavia tuloksia. Myös aineiston kokonaismäärää voidaan pitää riittävänä.

Tulosten luotettavuuden kannalta olisi ollut suotavaa, että ilman lämpötilan vaihtelu tutkimuksen aikana olisi ollut pienempi. Vaikka rungot olivatkin käsittelyn aikana sulia, on todennäköistä, että etenkin kuoren sisäinen lujuus ja kuoren sitoutumislujuus puuaineeseen muuttuu tutkimuksessa esiintyneellä lämpötilavälillä. Lämpötila ei kuitenkaan muodostunut mittausvirhettä selittäväksi tekijäksi johtuen ehkä osittain siitä, että mittalaitetta kalibroitaessa lämpötilan vaihtelut otetaan usein aikaisempaan kokemukseen perustuen huomioon.

Havaintomateriaalin etukäteisvalinta oli tulosten luotettavuutta ajatellen oikeaan osunut. Tutkimusaineisto ei tosin ollut edustava otos normaalista leimikosta, minkä johdosta tulosten ei voida katsoa vastaavan käytännön koneellisessa mittauksessa saavutettavia. Tämä on otettava huomioon erityisesti mittauseräkohtaisia tuloksia tarkasteltaessa. Etukäteisvalinnan ansiosta selittävien muuttujien arvoihin saatiin kuitenkin enemmän vaihtelua.

Etukäteisvalinnasta huolimatta joistakin mittausvirhettä selittävästä tekijöistä, lähinnä puiden vioista sekä puutavaran valmistuksen häiriöistä, saatiin luotettavaa selittämistä ajatellen liian



vähän havaintoja. Tämä koskee erityisesti puulajeittaisia tai konetyypeittäisiä ositteita. Konetyypin 2 aineisto on suppea.

Myös kalibrintimenetelmien erilaisuus ja epätarkkuus tai huono luotettavuus heikentävät tarkkuushavaintojen luotettavuutta sinänsä. Tutkimuksessa saavutettu mittaustarkkuus vastaa todennäköisesti sitä, mikä ominaisuuksiltaan samankaltaisten puutavaraerien valmistuksessa olisi käytännön työskentelyssä saavutettu. Pölkyn ominaisuuksien vaikutuksen selvittämistä ositetasolla eivät kalibrintimenetelmien epäkohdat kuitenkaan haittaa.

Teoreettisesti epätarkempaa kalibrintimenetelmää ei voida pitää loogisesti mielekkäänä. Toisaalta mittalaittevalmistajan suorittama tarkka kalibrintikaan ei tässä tutkimuksessa johtanut tarkkaan koneelliseen mittaukseen. On ilmeistä, että kalibrintimenetelmiä kehittämällä mittaustarkkuutta on mahdollista parantaa.

## 6.2 Pölkyn tekniset ominaisuudet mittaustarkkuuden selittäjinä

Pölkyn teknisten ominaisuuksien vaikutusta mittaustarkkuuteen selvittäessä ongelmaksi muodostuu niiden keskinäinen riippuvuus. Esimerkiksi tilavuudeltaan pienet pölköt, elleivät ne ole tukkiosuudesta valmistettuja lumppipölkkyjä, ovat yleensä suuria pölkkyjä oksaisempia. Koivupölköt ovat yleensä mänty- tai kuusipölkkyjä mutkaisempia, haaraisempia sekä oksaisuudeltaan koneellista valmistusta ajatellen vaikeampia. Lisäksi koivupölkkyjen keskimääräinen tilavuus oli tutkimusaineistossa pienin. Teknisten ominaisuuksien välillä ei kuitenkaan voida katsoa olevan varsinaista ristiinkorreloituneisuutta.

Kokonaisuutena teknisten ominaisuuksien korrelaatiot mittausringemuuttujien kanssa olivat heikkoja. Myös regressiomallien, joissa konetyyppien valemuuttujat olivat usein teknisten ominaisuuksien kanssa tasavertaisia selittäjiä, selitysasteet jäivät alhaisiksi. Malleja ei voida ajatella käytettävän mittausringemuuttujan ennustamiseen. Mittausringemuuttujan vaihtelua ei tässä tutkimuksessa pystytty tyhjentävästi selittämään.

## 6.3 Pölkyn teknisten ominaisuuksien vaikutus mittaustarkkuuteen

Minkään yksittäisen pölkyn teknisen ominaisuuden vaikutus mittaustarkkuuteen ei tullut hallitsevana esille. Koko aineiston tasolla tärkeimmät mittaustarkkuuteen vaikuttavat pölkyn tekniset ominaisuudet olivat tilavuus, oksaisuus, epäsuoruus, epäpyöreys, puulaji sekä haaraisuus. Tutkimuksen hypoteesi siis piti paikkansa. Puulajeittain tai konetyypeittain muodostetuissa ositteissa selittävät muuttujat tai niiden tärkeys saattoivat vaihdella.

Pölkyn tilavuuden vaikutuksen mittaustarkkuuteen todettiin teoreettisessa tarkastelussa olevan ilmeinen. Koko aineiston tasolla tarkasteltuna tämä pitääkin osittain paikkansa. Mittaustarkkuus paranee tilavuuden kasvaessa ja erityisesti mittausringemuuttujan hajonta pienenee tilavuuden kasvaessa (kuva 1).

Pienien pölkkyjen mittausringemuuttujan hajontaa lisää se, että osa niistä on peräisin pienistä puista ja osa suurten puiden latvoista. Ensin mainitut ovat hento-oksaisia, joten oksaisuuden puutavaran valmistusta vaikeuttava vaikutus on pieni ja tarkalle mittaaukselle on sen suhteen hyvät edellytykset. Suurten puiden latvapölköt sen sijaan ovat tavallisesti vahvaoksaisia ja siten vaikeampia valmistaa ja mitata koneellisesti. Suurimmat pölköt ovat tyvitukkeja, jotka

tavallisesti ovat oksattomia tai ainakin rungon seuraavaa pölkkyä vähäoksisempia. Tällöin edellytykset tarkkaan mittaukseen ovat hyvät. Jos oksaisuuden vaikutus erotetaan tilavuuden vaikutuksesta ja tarkastellaan oksattomien pölkkyjen aineistoa (kuva 3), havaitaan, että mittausvirheen riippuvuus tilavuudesta ei ole enää voimakas.

Edellä mainituista seikoista johtuen odotetunkaltaista selvää riippuvuutta tilavuuden ja mittaustarkkuuden välillä ei havaittu, vaikka mittaustarkkuus tilavuuden kasvaessa yleensä paranikin. Ainoastaan kuusella tilavuus oli tärkein yksittäinen mittausvirhettä selittävä ominaisuus, mikä saattaa johtua muita puulajeja vähäisemmästä oksaisuuden vaihtelusta eri rungonosissa.

Tärkeimmat mittaustarkkuutta heikentävät pölkyn tekniset ominaisuudet olivat oksisuus ja mutkaisuus, erityisesti esiintyessään samassa pölkkyssä. Oksaisuus kasvatti yleensä mittausvirheen arvoa, joskaan pelkkä oksaisuus ei vaikuta mittausvirheeseen kovin voimakkaasti, kuten kuvasta 4 voidaan havaita. Kyseessä lieneekin ainakin suurien mittausvirheiden osalta oksaisuudesta ja mutkaisuudesta, joko yhdessä tai erikseen, johtuvien koneellisen puunkäsittelyn vaikeuksien mittaustarkkuutta heikentävä yhteisvaikutus.

Teknisten ominaisuuksien yhteisvaikutus ilmenee osaltaan siinä, että vaikeuksitta käsitellyn yksirunkoisen pölkyn mittaustarkkuus oli parempi kuin haarapölkyn, lumppipölkyn tai pölkyn, jonka valmistuksessa oli vaikeuksia.

Epäpyöreydellä oli lievä mittaustarkkuutta heikentävä vaikutus.

#### 6.4 Puulajin vaikutus pölkkyittäiseen mittaustarkkuuteen

Männyn mittaus oli tarkinta ja koivun epätarkinta. Konetyypillä 3 kuusen keskimääräinen mittausvirhe tosin oli koivun vastaavaa suurempi, mutta kun tarkastellaan mittausvirheen itseisarvoa, joka kuvaa mittaustarkkuutta paremmin, voidaan todeta mittausvirheen olleen suurin koivulla. Sekä mittausvirheen että sen itseisarvon keskihajonta oli konetyypin 3 aineistossa suurin koivulla. Koko aineistossa koivun mittausvirheen itseisarvon keskihajonta oli männyn vastaavaan verrattuna yli kolminkertainen. Kuusen mittaustarkkuutta kuvaavat tilastolliset tunnuksot olivat jonkin verran männyn vastaavia huonompia.

Männyn, kuusen ja koivun muodostamaa mittauserän 6 puutavaraa valmistettaessa konetyypin 3 mittalaite kalibroitiin kuuselle. Männyn koneellisen mittauksen eräkohtainen tulos oli suhteessa tarkastusmittaukseen suurin ja koivun pienin. Keskimääräinen pölkkyittäinen mittaustulos suhteessa tarkastusmittaukseen oli männyllä suurin ja kuusella pienin. On huomattava, että varsinkin koivun mittaustulosten suhde muihin olisi saattanut muuttua, jos mittauserän 6 puutavara olisi valmistettu harvesterilla, jossa läpimitan tunnusteluun käytetään karsintateriä. Puulajin vaikutus tilavuuden mittausvirheen suuntaan jäi tässä suhteessa epävarmaksi. Huomattakoon, että tulokset männyn ja kuusen osalta poikkeavat Riepon (1991) tutkimuksesta, jossa kuusen mittaus oli mäntyä tarkempaa ja kuusen pölkkyittäinen mittaustulos suhteessa tarkastusmittaukseen oli mäntyä suurempi. Oksaisuuden negatiivista korrelaatiota mittausvirheen itseisarvon kanssa kuusella mittauserän 6 aineistossa ei pystytty selittämään.

Mittaustarkkuuteen vaikuttavat tekijät erosivat eri puulajeilla jonkin verran. Koko aineistossa männyn mittaustarkkuutta heikensivät oksaisuus, mutkaisuus, syötön luistojen ja taaksepäin syöttöjen lukumäärä sekä lenkous. Oksaisuus kasvatti mittausvirheen arvoa. Latvapölkkyjen mittaustarkkuus oli tyvi- tai keskirungon pölkkyjä huonompi.

Kuusen mittaustarkkuus parani tilavuuden kasvaessa ja heikkeni epäpyöreiden sekä pölkyn valmistuksen vaikeuksien lukumäärän lisääntyessä. Oksaisuudella ja mutkaisuudella ei aineiston käsittelyssä havaittu olevan selkeää vaikutusta mittaustarkkuuteen muuten kuin mahdollisesti niistä aiheutuneiden puutavaran valmistuksen vaikeuksien muodossa. Kuusen oksaisuus jakautuu mäntyyn ja koivuun verrattuna tasaisesti koko rungon mitalle. Tämä saattoi osaltaan korostaa varsinkin tilavuuden vaikutusta mittausvirheeseen etenkin, kun oksaisuus huononsi mittaustarkkuutta eniten esiintyessään yhdessä epäsuoruden kanssa.

Oksaisuus ja mutkaisuus huononsivat selvimmin koivun mittaustarkkuutta. Oksaisuus kasvatti mittausvirheen arvoa. Mäntyyn verrattuna (taulukko 3) koivun pölkyn oksien keskimääräinen pölkyyittäinen sekä pituusyksikköä kohden laskettu lukumäärä on pienempi ja suurimman oksaleikkauksen pinta-ala samaa suuruusluokkaa. Oksaisuuden suuri vaikutus koivulla saattaa johtua sen oksien puuaineen suuremmasta lujudesta sekä mäntyä pienemmästä oksakulmasta (Kärkkäinen 1985). Puuaineen suuremman leikkauslujuuden lisäksi leikkausvastusta kasvattaa pienemmästä oksakulmasta johtuva leikkauspinta-alan kasvu. Oksakulman ja puuaineen lujuden johdosta myös karsintaterää rungon pinnasta irti nostava voima kasvaa.

Latva- ja haarapölkkyjen mittaustarkkuus koivulla oli muita pölkkyjä huonompi. Puulajeista koivun mittausvirhemuuttujien vaihtelu pystyttiin selvittämään regressiomallilla parhaiten. Koivulle tyypilliset tekniset ominaisuudet, kuten mäntyä ja kuusta suurempi oksakulma, puuaineen lujuus, suurempi epäsuoruus sekä runsaampi haaraisuus, siis mitä ilmeisimmin heikentävät saavutettavaa mittaustarkkuutta.

## 6.5 Mittalaitteiden väliset erot

Tutkittujen mittalaitte-harvesteri -yhdistelmien vertailun estää se, että mittauserät erosivat merkittävästi toisistaan tärkeimpien selittävien muuttujien keskiarvojen suhteen. Nämä erot saattavat konetyyppien absoluuttisten tarkkuuserojen lisäksi olla eräs tekijä, jonka vuoksi konetyyppi oli usein merkittävä mittaustarkkuuteen vaikuttava tekijä aineistoa kokonaisuutena tai puulajeittain tarkasteltaessa. Pölkyn teknisten ominaisuuksien vaikutusta mittaustarkkuuteen voidaan sen sijaan aineiston asettamien rajoitusten puitteissa tarkastella luotettavammin.

Mittaustarkkuuden reagointi pölkyn teknisiin ominaisuuksiin poikkesi eri konetyypeillä toisistaan. Tyypillä 1 oksaisuus, epäsuoruus sekä puulaji koivu olivat tärkeimmät mittaustarkkuutta heikentävät tekijät. Oksaisuus kasvatti mittausvirheen arvoa. Latva- ja haarapölkkyjen mittaustarkkuus oli loogisesti muita rungonosia tai yksirunkoisia pölkkyjä huonompi. Karsintaterien aukaisut sekä puutavaran valmistuksen vaikeudet heikensivät mittaustarkkuutta. Männyn ja kuusen keskimääräinen pölkyyittäinen mittaustarkkuus oli yhtä hyvä, kun taas koivun selvästi huonompi.

Koivun mittaaminen tyypillä 1 tuotti selviä vaikeuksia. Kaikki yli 25% pölkyyittaiset mittausvirheet koivulla olivat yliarvioita. Syynä koivun mittaamisen vaikeuteen ja virheen

suuntaan saattaa olla läpimitan tunnustelu karsintaterillä. Konetyypillä 1 karsintaterien aukaisujen keskimääräinen pölkkykohtainen lukumäärä oli muita tyyppejä suurempi, karsintaterien aukaisujen lukumäärä lisäsi mittausvirhettä ja sen itseisarvoa sekä karsintateriä jouduttiin aukaisemaan eniten koivua käsiteltäessä.

Myös konetyypillä 2, jonka aineisto koostui ainoastaan kuusipölkystä, oksaisuus ja epäsuoruus heikensivät mittaustarkkuutta. Oksaisuus kasvatti mittausvirheen arvoa. Lisäksi mittaustarkkuutta heikensivät epäpyöreys, pölkyn poikaoksien lukumäärä ja taaksepäin syöttöjen lukumäärä. Mittausvirheen ja sen itseisarvon regressiomallien selityksasteet olivat konetyypeistä selvästi korkeimmat.

Pölkyn keskikoko oli konetyypin 2 aineistossa selvästi alhaisin, joskin pölkyt olivat muilta ominaisuuksiltaan muiden tyyppien pölkkyjä helpompia. Tyyppiin 1 verrattuna korostui oksaisuuden sekä erityisesti poikaoksien ja niistä aiheutuvien taaksepäin syöttöjen mittaustarkkuutta huonontava vaikutus. Tämä saattoi johtua pienemmästä harvesteriyksiköstä sekä poikaoksallisten pölkkyjen suuremmasta osuudesta aineistossa. Tässä tutkimuksessa saadut tulokset pölkyn teknisten ominaisuuksien vaikutuksesta antavat olettaa, että mittaustarkkuus vahvaoksisemmilla ja epäsuoremmilla pölkyillä olisi ollut huonompi.

Konetyypillä 3 pölkyn haarat ja niistä aiheutuvat karsintaterien aukaisuut heikensivät mittaustarkkuutta. Oksaisuuden ja epäsuoruuden vaikutus mittaustarkkuuteen ei ollut yhtä voimakas kuin muilla konetyypeillä. Männyn mittaus oli tarkinta. Kuusen ja koivun mittaustarkkuudessa ei ollut suurta eroa.

Konetyypin 3 mittaustarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä ei pystytty luotettavasti selvittämään. Tämä saattoi johtua pölkyn teknisten ominaisuuksien vähäisestä vaikutuksesta mittalaitteen toimintaan. Toisena mahdollisuutena on telamaton piikkien hallitsemattomasta uppoamisesta kuoreen tai harvesteriosan kuluneisuudesta aiheutuvista välyksistä johtuva mittausvirheen suuri hajonta. Edellä esitetyt mahdolliset syyt liittyvät siihen, että konetyypissä 3 läpimitan tunnusteluun käytetään syöttöteloja. Mittalaitteen hyvä tarkkuus koivulla, konetyypin 1 aineistoa selvästi pienempi pölkyn keskikoko, samalla tasolla oleva oksaisuus ja epäsuoruus sekä selvästi suurin taaksepäin syöttöjen ja syötön luistojen määrä tukee ensimmäistä oletusta. Toista oletusta tukee se, että virheen hajonta muilla puulajeilla oli muiden tutkittujen koneiden hajontaa suurempi.

Pölkkyä konetyypillä 3 valmistettaessa karsiutumaton tai huonosti karsiutunut oksa jäi toisinaan syöttötelan ja rungon väliin. Miltei kaikki itseisarvoltaan yli 25% mittausvirheet olivat kuitenkin aliarvioita, joten edellä mainittukaan ei ole looginen selittäjä. Konetyypillä 3 poikaoksat ja haarat niistä aiheutuvine karsintaterien aukaisuineen korreloivat negatiivisesti absoluuttisen mittausvirheen kanssa, ts. aiheuttivat tilavuuden aliarviota, kun taas muilla tyypeillä korrelaatio oli positiivinen. Vaikka vaikeita pölkkyjä käsiteltäessä toisinaan välttämätön karsintaterien aukaisu oli konetyypillä 3 eräs mittaustarkkuutta parhaiten selittävistä tekijöistä, sen vaikutus tarkkuuteen ei kuitenkaan ollut kovin suuri. Tämä saattoi olla vaikuttamassa siihen, että koivun mittaustarkkuus tyyppillä 3 on samalla tasolla muiden puulajien tarkkuuden kanssa, kun taas koivun mittaus tyyppillä 1 on selvästi muita puulajeja epätarkempaa.

Konetyypit 1 ja 2 aliarvioivat pienten mänty- ja kuusipölkkyjen tilavuutta ja yliarvioivat pienten koivupölkkyjen tilavuutta (kuva 8). Kuvassa 6a näkyvään pienten kuusipölkkyjen tilavuuden aliarvioon vaikuttaa se, että kappaleittain laskettuna n. 62% pölkkyistä oli valmistettu tyypeillä 1 ja 2.

## 6.6 Arvioitujen runkotunnusten vaikutus rungoittaiseen mittaustarkkuuteen

Tutkimustulosten mukaan arvioituilla runkotunnuksilla on vaikutusta rungoittaiseen mittaustarkkuuteen, joskaan mitään selviä johtopäätöksiä yksittäisten tunnusten vaikutuksesta ei voida tehdä. Haara- ja poikaoksapuita jouduttiin poistamaan aineistosta, mikä saattoi olla syynä siihen, että haarojen ja poikaoksien lukumäärän vaikutus ei tullut analysissä selvästi esille. Regressiomallit, joissa selittäjinä olivat sekä arvioidut että mitatut tunnuksot, selittivät parhaimmillaan noin 40% puittaisen mittaustarkkuuden vaihtelusta. Virheen itseisarvon regressiomallien selitysasteet olivat alhaisia. Muodostetut mallit ovat liian epätarkkoja mittaustarkkuuden ennustamiseen.

## 7 Tulosten perusteella tehtävät suositukset

Keskimääräisen pölkkyittaisen virheen itseisarvo koko aineistossa oli 7,9%, puittaisen 5,8% ja eräkohtaisen 2,7%. Viisi kahdeksasta mittauserästä täytti puutavaran mittaukselle asetetun (Hakkuukonemittauksen...1991, Puutavarapölkkyjen...1992)  $\pm 4\%$  tarkkuusvaatimuksen. Yksi sallitun virherajan ylittäneistä eristä oli tilavuudeltaan huomattavan pieni. Koepuut olivat leimikkojen keskimääräisiä olosuhteita vaikeampia käsitellä, joten käytännön leimikkotyöskentelyssä mittaustarkkuuden voidaan tässä suhteessa olettaa olevan parempi. Tarkkuus ei tämän tutkimuksen valossa näyttäisi olevan esteenä koneellisen mittauksen yleistymiselle. Toisaalta tämän tutkimuksen mittaustarkkuuden tason saavuttaminen edellyttää, että mittalaitte toimii valmistajan tarkoittamalla tavalla ja että se on kalibroitu vastaamaan työskentelyoloja.

Mittalaitteet ovat vielä kehityskaarensa alkupuolella, joten ne todennäköisesti kehittyvät tulevaisuudessa huomattavasti. Konetyypin 3 valmistaja on tutkimuksen jälkeen kehittänyt läpimitan tunnustelussa käytetyn telan rakennetta siten, että sen uppoama puuhun on paremmin hallittavissa. Tämä parannettu telatyyppi ei kuitenkaan ehtinyt tähän tutkimukseen.

Tutkimustulosten perusteella myös mittalaitteiden kalibrointimenettelyssä on kehittämisen varaa. Käytännössä kalibrointi suoritetaan usein periaatteeltaan tutkittuihin mittalaitteisiin verrattuna epätarkemman tarkistusmittauksen tulosten perusteella.

Periaatteellinen heikkous nykyisessä tarkistusmittauskäytännössä on tarkistusmenetelmän koneellista mittausta huonompi periaatteellinen tarkkuus. Pölkkyittäisten tulokset antavat olettaa, että kohdentamalla tarkistusmittausta hakattavan leimikon vaikeuden mukaan niin, että helpoissa leimikoissa otoskoko olisi pienempi kuin vaikeissa, voitaisiin tarkistusmittauksen keskimääräistä eräkokoja ehkä pienentää ja mittauksen tarkkuutta parantaa.

Tarpeellisista jatkotutkimuksista tärkeimpänä on Metsäntutkimuslaitoksen metsänkasvatuksen tutkimusosastolla jo meneillään vuodenajan vaikutusta selvittävä tutkimus. Pölkyn teknisten ominaisuuksien vaikutuksen tarkempi ja luotettavampi selvittäminen saattaisi onnistua laboratoriomaisemmissa olosuhteissa, joissa muuttujien käyttäytyminen pystyttäisiin hallitsemaan paremmin.

### Kirjallisuus

- Aarne, M (toim.) 1992. Metsätalostollinen vuosikirja 1990-91. Yearbook of forest statistics 1990-91. SVT Maa- ja metsätalous 1992:3. Folia Forestalia 790. 281 s.
- Berg, P. 1992. Utrustningar för berörande längd- och diamettermätning på skogsmaskiner. Träteck, rapport P 9111071. 97 s.
- Hakkuukonemittauksen ohje. 1991. Mittausneuvosto. Moniste. 10 s.
- Halinen, M. 1990. Monitoimikoneiden yleisimpien puunmittauslaitteiden tarkkuus. Metsätehon tiedotus 403. 16 s.
- Kivinen, V-P. 1990. Tutkimus monitoimikoneiden mittalaitteista. Helsingin yliopisto, metsäteknologian laitos. Tiedonantoja 53. 49 s.
- Kärkkäinen, M. 1984. Puutavaran mittauksen perusteet. 252 s. ISBN 951-99582-3-1
- 1985. Puutiede. Sallisen Kustannus Oy, Sotkamo. 415 s.
- Laajalahti, T. & Säteri, L. 1992. Metsäteollisuuden raakapuun korjuun ja kaukokuljetuksen puumäärät ja kustannukset vuonna 1991. Metsätehon moniste 16.3.1992. 5 s.
- Perttola, S. & Rieppo, K. 1991. Hakkuukoneiden mittalaitteiden tilavuudenmittauksen tarkastusmittaus. Summary: Checking of volume measurement accuracy of harvester-mounted measurement devices. Metsätehon katsaus 17. 8 s.
- Poikela, A. & Rieppo, K. 1991. Valmet MD21VMU -mittalaite ja sen mittaustarkkuus. Summary: The Valmet MD21VMU measuring device and its measurement accuracy. Metsätehon moniste 9. 8 s.
- Puutavarapölkkyjen mittaus. 1992. Puutavaranmittauslain (364/91) 17 §:n 1 momentissa tarkoitettujen mittausten vahvistaminen. Maa- ja metsätalousministeriö. Moniste. 12 s.
- Rieppo, K. 1989a. Locomatic 90 -mittausjärjestelmä ja sen tarkkuus. Metsätehon katsaus 3. 6 s.
- 1989b. Kajaani 1024 -mittalaite ja sen mittaustarkkuus. Metsätehon katsaus 7. 6 s.
- 1991. Harvemeter 4000 -mittalaite ja sen mittaustarkkuus. Summary: The Harvemeter 4000 measuring device and its measurement accuracy. Metsätehon katsaus 13. 7 s.
- & Jokinen, H. 1988. Puuta koskematon läpimitan mittalaite monitoimikoneeseen. Summary: Electronic device for measurement of stem diameter. Metsätehon katsaus 11. 4 s.
- Säteri, L. 1992. Metsäkoneiden myyntitilasto 1991. Metsätehon moniste 3.2.1992. 7 s.
- Örn, J. 1990. Metsätyön ja metsätyövoiman kehityssuuntia. Metsätehon moniste 12.2.1990. 9 p.













ISBN 951-40-1275-5  
ISSN 0358-4283