



Jani Heikkilä



Jari Lindblad



Samuli Hujo



Erkki Verkasalo

Jani Heikkilä, Jari Lindblad, Samuli Hujo ja Erkki Verkasalo

Pienten kuitupuuerien mittaaminen puutavara-auton kuormainvää'alla

Heikkilä, J., Lindblad, J., Hujo, S. & Verkasalo, E. 2004. Pienten kuitupuuerien mittaaminen puutavara-auton kuormainvää'alla. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2004: 527–540.

Suurin osa puutavarasta mitataan Suomessa nykyisin joko hakkuun yhteydessä tai käyttöpaikalla. Erityisesti pienten hankinta- ja käteiskauppaerien mittaamisessa on tiettyjä ongelmia. Tehdasmittausmenetelmien käyttö edellyttää erien erillään pitoa kuormassa ja tehdasvastaanotossa. Hakkuukonemittaus ei tule aina kysymykseen korjuumenetelmän tai kaluston rajoitteiden vuoksi. Tienvarsimittaus on pienten erien kyseessä ollessa epätarkkaa ja sen kustannukset voivat nousta puutavaran arvoon nähden korkeiksi.

Tässä tutkimuksessa tutkittiin puutavara-autojen kuormainvaakojen käyttöä pienten puutavaraerien työ- ja luovutusmittauksessa. Kuormainvaakamittausmenetelmässä mitataan kunkin erän massa kuormainvää'alla kuormauksen yhteydessä. Käyttöpaikalla mitataan koko kuorman tilavuus käytössä olevalla perusmittausmenetelmällä. Kokonaistilavuus jaetaan erille kuormainvää'alla mitattujen massojen suhteissa. Neljällä Etelä-, Länsi- ja Itä-Suomessa sijaitsevalla tehtaalla kerätty tutkimusaineisto koostui yhteensä 503 mänty-, kuusi-, koivu- ja havukuitupuuerästä. Kuormainvaakamittauksen eräkohtaista tilavuutta verrattiin upotusmittauksen tulokseen.

Talvella mm. lumi ja jää aiheuttivat keskimäärin noin kahden prosentin positiivisen mittaeron, kesällä mittaero oli lähes nolla. Mittaeron keskihajonta oli kesällä puutavaran kuivumisesta johtuen hieman suurempi kuin talvella. Mänty- ja koivukuitupuun mittaeron keskihajonta oli suurin, n. 9 prosenttiyksikköä, kuusella hajonta oli noin yhden prosenttiyksikön pienempi. Koko aineistossa keskihajonta oli kuormainvaakamittauksessa 8,9 prosenttiyksikköä ja pinomittauksessa 16,9 prosenttiyksikköä. Mittaerojen hajonta kasvoi selvästi erän tilavuuden pienentyessä.

Kuormainvaakamittauksen virhelähteitä ovat puutavaran tuoretiheyden vaihtelu ja satunnaiset punnitusvirheet erien välillä samassa punnitusyksikössä, sekä tehtaan perusmittauksen toteutuksesta aiheutuva virhe. Menetelmällä on tarkkuutensa puolesta hyvät käyttöedellytykset, kun samaan kuormaan (punnitusyksikköön) koottavien kuitupuuerien tuoretiheyden vaihtelu ei ole suurta. Tulokset voidaan yleistää Suomen eteläosan kuitupuulle.

Asiasanat: puutavaran mittaaminen, mittaustarkkuus, kuormainvaaka, tuoretiheys

Yhteystiedot: Metla, Joensuun tutkimuskeskus, PL 68, 80101 Joensuu

Sähköposti: jani.heikkila@metla.fi, jari.lindblad@metla.fi

Hyväksytty 17.11.2004

I Johdanto

I.1 Nykyongelmat pienten puutavaraerien mittauksessa

Puutavaran mittaaminen on muuttunut maassamme huomattavasti 1990-luvulta lähtien. Puunhankintaorganisaatioiden tavoitteina ovat olleet puutavaran nopea virtauttaminen ja puutavaravarojen pienentäminen, mikä on asettanut uusia vaatimuksia myös puutavaran mittaukselle. Pyrkimyksenä on ollut moninkertaisen mittauksen välttäminen ja ihmistyön osuuden vähentäminen edelleen. Pystymittauksesta luovutus- ja työmittausmenetelmänä on luovuttu kokonaan, samoin tienvarsimittaus on vähentynyt. Tilalle ovat tulleet automatisoidut hakkuukone- ja tehdasmittausmenetelmät.

Muuttuvan puunhankinnan mittaukselle asettamat vaatimukset ja yleiset toimintaympäristön muutokset ovat säädelleet voimakkaasti mittausmenetelmien käyttöä ja niiden kehittämistä. Puutavaran mittaaminen tehdään nykyisin useimmiten joko hakkuun yhteydessä tai puutavaran käyttöpaikalla. Hakkuukonemittaus on nykyisin vallitseva pystykauppapuun työ- ja luovutusmittausmenetelmä, sen osuus oli 88 % mitattavasta puumäärästä vuonna 2003 (Hujon 2004). Hankinta- ja käteiskauppojen luovutusmittauksessa tienvarsimittauksen osuus on vielä huomattava, joskin tehdasmittaus on lisääntynyt jatkuvasti. Vuonna 2003 jo hieman yli puolet niiden kokonaispuumäärästä mitattiin tehdasmittauksella, tienvarsimittauksen osuus oli noin 40 % (Hujon 2004). Hankinta- ja käteiskauppaerät ovat tyypillisesti pieniä (esim. Voipio ja Korpilahti 1988) ja niiden mittaaminen tienvarressa on usein kohtuuttoman työlästä, kallista ja epätarkkaa (esim. Heiskanen 1973, Nikkilä ym. 1974, Sairanen 1990, 1995, Nevalainen ym. 1997, Lehtimäki 2001). Pienten puutavaraerien välittömät mittauskustannukset saattavat joissakin tapauksissa olla jopa suuremmat kuin mitattavan puutavaraerän arvo, minkä vuoksi näiden erien mittaaminen on pyritty siirtämään tehtaalle. Tällöin luovutusmittauserät on pidettävä erillään toisistaan kaukokuljetuksessa ja tehdasvastaanotossa eräkohtaisen mittauksen mahdollistamiseksi. Ajoneuvokuormissa samassa nipussa olevat mittauserät erotellaan liinoilla tai aluspuilla, mikä vaikeuttaa kaukokuljetusta ja hidastaa puutavaran tehdasvastaanottoa.

I.2 Kuormainvaakamittauksen käyttö nykyisin

Kuormainvaakamittaukset tulivat käyttöön puutavara-autoihin ja osin myös kuormatraktoreihin jo yli kymmenen vuotta sitten. Vaakoja on käytetty kuorman massan määrittämiseen ylikuormien välttämiseksi ja toisaalta mahdollisimman suurten hyötykuormien kuljettamiseksi ajoneuvon ja teiden painorajoitukset huomioiden ottaen. Joissakin tapauksissa kuormainvaakoja on käytetty kaukokuljetusmaksujen määrittämiseen (Parkkonen suull.). Maa- ja metsätalousministeriö vahvisti vuonna 1999 kuormainvaakamittausmenetelmän työ- ja luovutusmittaukseen (Metsäntutkimuslaitos 1998, Maa- ja metsätalousministeriön... 1999). Menetelmässä puutavaraerä punnitaan ja määritetään kerroin puutavaran massan muuntamiseksi tilavuudeksi (tilavuuspaino eli tuoretiheys, kg/m³). Tuoretiheys määritetään joko taulukkoarvona tai otantataakoista mitattujen tilavuuksien ja massojen perusteella. Kuormatraktoreihin asennettuja vaakoja on käytetty metsurityönä tehdyn hakkuun ja metsäkuljetuksen työmittauksessa. Sen sijaan luovutusmittauksessa kuormainvaakamittaukseen ei ole toistaiseksi käytetty. Kuvatun menetelmän pääasiallinen käyttäjä on ollut Metsähallitus (Vuollet ja Tiuranniemi 1993, Naasko 1997).

Huomattava osa hankinta- ja käteiskauppojen eristä on pienempiä kuin 20 m³. Vahvistetun kuormainvaakamittausohjeen mukaisesti mainitun suuruisilla ja sitä pienemmillä erillä tuoretiheys on määritettävä eräkohtaisesti tehtävien otantamittausten perusteella (Maa- ja metsätalousministeriön... 1999). Otantataakkojen punnitseminen ja tarkkan tilavuuden määrittäminen on työlästä ja kallista. Kyseisen menetelmän käyttö tässä muodossaan pienten erien luovutusmittauksessa on epätarkoituksenmukaista puutavaran arvoon nähden suhteettoman suurten mittauskustannusten vuoksi.

I.3 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia puutavara-autojen kuormainvaakojen käyttöä pienten kuitupuuerien luovutus- ja työmittauksessa kuormainvaakojen punnitustarkkuuden, tilavuuden määrittämisen tarkkuuden ja menetelmän toimivuuden kannalta.

Taustalla oli pyrkimys vähentää tienvarsimittauksen osuutta ja pienten puutavaraerien erillään pidosta aiheutuvia haittoja silloin, kun erät mitataan tehdasmittauksella.

Osatavoitteena oli tutkia, miten tarkasti useista eristä koostuvan ajoneuvokuorman tilavuus käytännölliset näkökohdat huomioon ottaen pystytään jakamaan kuormainvaa'alla määritettyjen erien massojen suhteiden perusteella eri luovutusmittauserille. Keskeinen suure tässä on puutavaran tuoretiheys. Tässä määritettiin tuoretiheydeltään samantasoisiksi ennakolta arvioitujen kuitupuuerien tuoretiheyksien vaihtelu ja sen hallintamahdollisuudet, vaikuttavina tekijöinä puulaji, puutavaralaji, kaukokuljetusvuodenaika (kesä/talvi), hakkuutapa (ensiharvennus, muu harvennus, päätehakkuu, muu hakkuu) ja kasvupaikkaryhmä (kivennäismaa, turvemaa).

2 Tutkimusaineisto ja menetelmät

2.1 Kuormainvaakamittausmenetelmän kuvaus

Tutkitussa mittausmenetelmässä määritetään kuitupuuerien massat tienvarsivarastolla puutavara-auton kuormainvaa'alla taakoittain kuormauksen yhteydessä. Käyttöpaikalla mitataan ajoneuvokuorman kokonaistilavuus tai punnitusyksikkökohtainen tilavuus tehtaan perusmittausmenetelmällä. Tilavuus mitataan erikseen kummallekin punnitusyksikölle (veto- ja perävaunu), jos yksiköissä on puulajiltaan tai tuoretiheydeltään etukäteisarvion perusteella

erilaista puutavaraa. Kuorman tai punnitusyksikön tilavuus jaetaan mittauserille kuormainvaa'alla punnittujen erien massojen suhteissa.

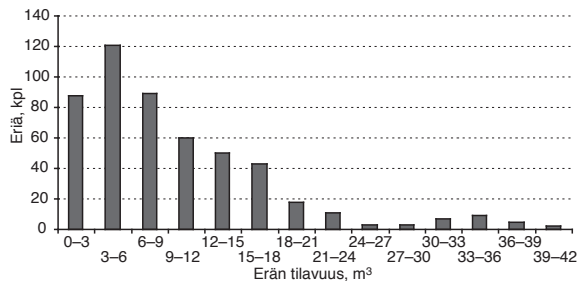
2.2 Tutkimuserien määrä, laatu ja valinta

Tutkimusaineisto kerättiin tutkimukseen osallistuneiden metsäkonsernien tuotantolaitoksilta Imatran ja Summan tehtailta (Stora Enso Oyj), Pietarsaaren tehtailta (UPM-Kymmene Oyj) ja Äänekosken tehtailta (Oy Metsä-Botnia Ab). Maantieteellisesti aineisto jakautui 27 kunnan alueelle Etelä- ja Keski-Pohjanmaalla, Keski-Suomessa, Etelä-Karjalassa ja Kymenlaaksossa. Tutkimusaineisto rajattiin puutavaralajeista kuitupuueriin. Erät olivat joko likimäärin 30 dm:n pituisen kuitupuun tai 35–55 dm:n kuitupuun eli kuitupuuran eriä. Hiomokuusikuitupuuta oli katkottu määräpituiseksi 29,5, 39,5 ja 49,5 dm:n pituuksiin.

Tutkimusaineisto jakautui ajallisesti kahteen osaan, 18.1.–30.4.2002 kerättyyn ns. talviaineistoon ja 1.5.–30.9.2002 kerättyyn ns. kesäaineistoon. Aineiston keruu ulotettiin pitkälle aikavälille puutavaran tuoretiheyden vuodenajoittaisen vaihtelun ja lumen ja jään aiheuttamien mittausolosuhteiden vaihtelun vuoksi. Suurin osa tutkimuskuormista oli tilavuudeltaan täyden vetovaunun kokoisia ja yhdessä kuormassa oli keskimäärin 2,5 mittauserän kuitupuuta. Kokonaisuudessaan aineisto koostui 503 mittauserästä. Mittauserien lukumäärät puutavaralajeittain ja tehtaittain on esitetty taulukossa 1. Yhteensä tutkimuksessa mitattiin 1995 m³ mäntykuitupuuta, 1082 m³ kuusikuitupuuta ja 1290 m³ koivukuitupuuta. Lisäksi kerättiin näitä puutavaralajeja pienempi aineisto Pohjanmaalla ja Pohjois-

Taulukko 1. Tutkimusaineiston puutavaraerien lukumäärät kuitupuutavaralajeittain ja tehtaittain talvi- ja kesäaineistossa. Havupuerät sisältävät mäntyä ja kuusta vaihtelevin osuuksiin.

Tehtas	Talvi				Kesä				Yhteensä
	Mänty	Kuusi	Koivu	Havupuu	Mänty	Kuusi	Koivu	Havupuu	
Imatra	23		12		47		32		114
Pietarsaari	20		28	16	45		20	14	143
Summa		56				28			84
Äänekoski	45		15		45		57		162
Yhteensä	88	56	55	16	137	28	109	14	503



Kuva 1. Kuitupuuerien frekvenssijakauma kolmen kuutiometrin tilavuusluokissa.

Suomessa yleisesti käytetystä, mäntyä ja kuusta vaihtelevin osuuksin sisältävästä havukuitupuusta, yhteensä 612 m³.

Aineiston tutkimuserien hankinta ei vaatinut erityisjärjestelyjä, vaan puunhankintaorganisaatioiden kaukokuljetuksesta vastaavat toimihenkilöt valitsivat tutkimuserät normaalisti kuljetukseen tulevasta puusumasta. Aineiston keruu ositettiin mahdollisimman moniin eri puulajeista ja leimikoiden erilaisista korjuuajankohdista muodostuviin ositteisiin edustavuuden varmistamiseksi. Aineistoon otettiin vain pieniä, alle 40 m³:n hankinta- tai käteiskauppapuu-eriä, joiden mittaukseen tutkittua mittaumenetelmää on suunniteltu käytettävän. Aineistoon haluttiin erityisesti alle 20 m³:n eriä. Mukaan otettiin aineiston täydentämiseksi joitakin pystykauppapuu-eriä, koska sopivista hankintapueristä oli pulaa varsinkin kesällä. Tulosten laskentaan käytetyssä aineistossa oli yhteensä 335 hankintakaupan ja 152 pystykaupan puutavaraa.

Tutkimuserät kuljetettiin tehtaalle yleensä yhdessä kuormassa, ainoastaan isoimmat pystykauppapuerät kuljetettiin useissa eri kuormissa. Eräkoon mediaani oli talvella 8,4 m³ (7 600 kg), kesällä 6,8 m³ (5 288 kg) ja koko aineistossa 7,4 m³ (6 397 kg). Pienin erä oli 0,35 m³ (315 kg) ja suurin 55,5 m³ (46 600 kg). Kuvassa 1 on esitetty mitattujen erien tilavuuden mukainen frekvenssijakauma kolmen kuutiometrin tilavuusluokissa. Suurin osa eristä oli alle yhden ajoneuvokuorman nipun kokoisia.

2.3 Taustatiedot ja mittaukset eristä

Kuormainvaakamenetelmässä on oleellista pystyä hallitsemaan mitattavien kuitupuuerien välistä tuoretiheyden vaihtelua ajoneuvokuormassa tai sen punnitusyksikössä taloudellisesti järkevällä tavalla. Tämän vuoksi mitattiin kaikkien tutkimuserien tuoretiheydet ja kerättiin eräkohtaiset tuoretiheyteen vaikuttavat taustatiedot. Puunhankintaorganisaatioiden puun ostosta ja kuljetuksesta vastaavat henkilöt hankkivat tutkimuseristä seuraavat tiedot:

- puu- ja puutavaralaji
- varastopaikka (aukea, metsäinen)
- hakkuun aloitusviikko
- hakkuun lopetusviikko
- hakkuutapa (ensiharvennus, muu harvennus, päätehakkuu, muu hakkuu)
- korjuumenetelmä (metsuri, hakkuukone)
- kasvupaikkaryhmä (kivennäismaa, turvema)
- leimikon ja varaston sijainti (sijaintikunta ja koordinaatit)
- muut mahdolliset tuoretiheyteen vaikuttavat tekijät (mm. lumi, jää, tavanomaisesta poikkeava kuoren määrä, vajaalaatuisten pölkkyjen esiintyminen)

Erien massat ja tilavuudet ja näihin perustuvat tuoretiheydet määritettiin tehtailla upotusmittauksella. Näiden tulosten lisäksi merkittiin erityiseen lomakkeeseen tehtaan perusmittauksen tiedot jokaisen kokonaisen punnitusyksikön tilavuuden selvillem saamiseksi. Perusmittausmenetelmä oli kaikilla tutkimukseen osallistuneilla tehtailla paino-otantatai paino-ositemittaus. Paino-otanta- ja paino-ositemittauksessa puutavaraerän tilavuus saadaan erän massan ja tuoretiheyden suhteena. Punntitusyksikön puutavaran massa määritettiin tämän tutkimuksen tehtailla ajoneuvovaa-illa punntitusyksiköittäin ja tuoretiheys tehdaskohtaisten otantamittausten tuoretiheyksien liukuvana keskiarvona. Tutkimuslomakkeeseen kirjattiin seuraavat tiedot:

Autoilija kirjasi:

- Erän numero
- Puutavaralaji
- Erän sijainti kuormassa (vetoauto/perävaunu)
- Erän massa kuormainvaa'alla (yhden kg:n tarkkuudella)

Tehdasvastaanotossa kirjattiin:

- Punnitusyksikön massa tyhjänä ja kuormattuna ajoneuvovääällä (Imatralla, Summassa ja Äänekoskella 20 kg:n, Pietarsaassa 50 kg:n tarkkuudella)
- Erän puutavaran tilavuuden laskennassa käytettävän kollektiivin tuoreiheys (yhden kg/m³ tarkkuudella)
- Erän puutavaran keskiläpimitta (yhden cm:n tarkkuudella)
- Erän puutavaran massa upotusaltaan vääällä (Imatralla ja Äänekoskella yhden kg:n, Pietarsaassa 50 kg:n ja Summassa 100 kg:n tarkkuudella)
- Erän puutavaran tuoreiheys (yhden kg/m³ tarkkuudella)
- Lisätiedot ja huomautukset erästä (mm. lumi ja jää, erilaiset tuoreiheyteen vaikuttavat poikkeavuudet erässä)

Tuoreiheyden eroja puutavaralajien, kaukokuljetusvuodenaikojen, hakkuutapojen ja kasvupaikkar ryhmien välillä testattiin t-testillä ja varianssianalyysillä.

2.4 Kuormainvääät ja punnitustarkkuuden määrittäminen

Tutkimuksessa käytettiin Ponsse Oyj:n valmistamia Ponsse Load Optimizer- kuormainvääkoja. Mukana oli kahdeksan vääkää, jotka oli valmistettu vuosina 1995–2001. Väään toiminta perustuu nosturin riipukkeeseen sijoitettuun kiihtyvyyssanturiin ja kahteen venymäliuska-anturiin. Lisäksi vaakalaitteeseen kuuluu nosturin kääntöpuomin tyveen sijoitettu asemantunnistin, jonka kääntöanturit tarkkailevat nosturin asemaa suhteessa kuormatilaan. Väään keskusyksikkö näyttö- ja hallintalaitteeseen on sijoitettu nosturin hyttiin tai istuimen läheisyyteen.

Venymäliuska-anturi lähettää taakan noston aikana sähköisesti mittaushavaintoja väään keskusyksikölle useita kertoja sekunnissa. Väään tietokone laskee havainnoista taakan massan ja summaa taakojen massat puutavaraerän massan selville saamiseksi. Asemantunnistimen avulla vain kuormatilaan nostetut puut tulevat lasketuksi erän massa, joten kuorman tai pinon järjestely nosturilla ei lisää kuormassa olevan erän massaa. Tutkimuksessa mukana olleissa vääoissa on 24 muistipaikkaa, joissa erien

punnitustiedot säilyvät seuraavaan kuormaamiseen asti. Vääoissa on mahdollisuus punnitustulosten tulostamiseen.

Kuormainvääkojen punnitustarkkuuden määrittämiseksi eräkohtaisia punnitustuloksia verrattiin kurottajavääällä, upotusaltaan kuormainvääällä tai upotusaltaan ajoneuvovääällä mitattuihin erien massoihin. Vertailuvääät olivat tehtaiden puustaanotossa käytettyjä vääkoja, joiden punnitustarkkuutta seurataan jatkuvasti. Punnitustarkkuuden eroja testattiin t-testillä puutavaralajien ja vuodenaikojen välillä.

2.5 Puutavaran tilavuuden mittauksen tarkkuuden määrittäminen

Kuormainvääkamenetelmän eräkohtainen tilavuuden mittaustarkkuus määritettiin vertaamalla saatuja tilavuuksia upotusmittauksella saatuihin tilavuuksiin. Upotusmittauksessa ilmassa ja vedessä mitattujen punnitustulosten erotus ilmaisee taakan syrjäyttämän veden massan, josta voidaan edelleen laskea tilavuus. Mittauksessa otetaan huomioon veteen uponneen kurottajan kahmarin tai nosturin kouran tilavuus. Upotusmittauksessa käytettiin aineiston keruussa mukana olleiden tehtaiden kuormain-, kurottaja- ja ajoneuvovääkoja.

Kuorman muodostamista erilaisista kuitupuueristä tutkittiin laskemalla tutkimusaineistosta erien tuoreiheyksien keskiarvot ja keskihajonnat erilaisille puutavaralajiryhmille. Tämän jälkeen simuloitiin mittausvirheen vaihtelu erilaisissa ryhmissä tuoreiheydet ja punnitusvirheet huomioon ottaen. Tämän avulla selvitettiin, mikä mittaustarkkuus saavutettaisiin, jos kuormattaisiin samoihin kuormiin muun muassa eri puutavaralajeja ja eri paikkakuntien puuta. Simuloinnissa käytetty punnitusvirheiden sekä perusmittauksen virheiden suuruus ja hajonta laskettiin tutkimuksen mittausaineistosta ryhmitteilyn mukaan. Tutkituille kuormanmuodostustavoille simuloitiin 5000 erää tässä tutkimuksessa mitatusta aineistosta lasketun parametrien avulla käyttäen Microsoft® Excel-taulukkolaskentaohjelman satunnaislukugeneraattoria.

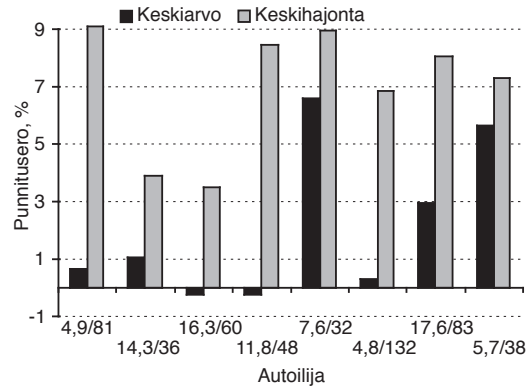
Taulukko 2. Puutavara-autojen kuormainvaakojen eräkohtainen punnitustarkkuus tuoremassaa määritettäessä, %.

Vuodenaika	n	Mittaeron keskiarvo, %	Keskihajonta %-yksikköä	Yksisuunt. t-testi t	p
Talvi	215	4,2	8,1	7,756	0,000
Talvi (lumikorjaus)	215	2,5	7,1	5,069	0,000
Kesä	288	-0,5	6,5	-1,322	0,187
Yhteensä	503	1,5	7,6	4,526	0,000
Punnitusyksiköiden sisällä keskim.	181	-	4,3	-	-

3 Tulokset

3.1 Kuormainvaakojen punnitustarkkuus

Taulukossa 2 on esitetty kuormainvaakojen eräkohtainen punnitustarkkuus talvella ja kesällä, kun mahdollisimman tarkkoina vertailuarvoina on pidetty tehtaiden vaailla saatuja punnitustuloksia. Ero punnitustuloksissa oli kesällä useammin yliarvio kuin aliarvio. Talvella esiintyi systemaattisesti suurehkoja yliarvioita. Tämä johtui pääasiassa siitä, että osa talvella mitatuista puutavaraeristä oli lumisia. Tienvarsivarastolla taakkoja punnittaessa nostettiin kuorman siten myös lunta, josta osa varisi kuitenkin kaukokuljetuksen aikana pois kuormasta. Tämän vuoksi vaakojen punnitustarkkuus laskettiin talvella kerätystä aineistosta myös lumikorjauksen jälkeen. Lumen vaikutus otettiin tässä huomioon laskemalla kuormainvaa'an ja upotusaltaan vaa'an välinen suhteellinen eräkohtainen massan mittaustuloksen ero ja vähentämällä saadusta tuloksesta tehtaan vastaanoton ajoneuvovaa'an ja upotusaltaan vaa'an välinen suhteellinen punnitusyksikkökohtainen massan mittaustulosten ero. Mittaeron keskiarvo punnitustuloksissa pieneni tällöin liki puoleen ja keskihajonta yhden prosenttiyksikön alkuperäisestä. Mittaero oli t-testin mukaan tilastollisesti merkitsevä talvella sekä lumikorjauksen kanssa että ilman sitä. Kesällä ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Punnituserojen keskihajonnat olivat kesällä ja talvella lumikorjattuna lähellä toisiaan.



Kuva 2. Kuitupuuerän punnituseron keskiarvo puutavara-auton kuormainvaa'alla ja eräkohtaisten punnituserojen keskihajonta autoilijoittain. Pylväiden alla on mainittu kunkin autoilijan erien tilavuuden keskiarvo (m³) ja lukumäärä.

Erän koko on tärkeä kuormainvaa'an punnitustarkkuuteen vaikuttava tekijä. Erän keskikoon kasvamisen voi olettaa pienentävän suhteellisten mittausrvirheiden hajontaa. Yksittäisen taakan mittausrvirhe osuu todennäköisesti keskimääräiseen mittausrvirheeseen ja keskihajontaan perustavalle luottamusvälille. Mittausrvirheen keskihajonta (keskiarvon keskivirhe) pienenee eräkoon, ja samalla punnittavien taakkojen lukumäärän kasvaessa taakkojen lukumäärän neliöjuuren suhteessa, jolloin mittausrvirheen luottamusväli kapenee. Toisin sanoen useita kymmeniä kourataakkoja sisältävässä erässä yksittäisten taakkojen punnituksessa tapahtuvat virheet vaikuttavat koko erän mittaustulokseen suhteellisesti vähemmän kuin vain muutaman kourataakan erässä.

Punnituseroissa oli mukana sekä vaaosta että niiden käyttäjistä aiheutuvaa poikkeamaa. Mittauksen olosuhteet ja muun muassa erän keskikoko vaihtelivat autoilijoittain. Kuvassa 2 on esitetty tutkimuksessa mukana olleiden vaakojen tarkkuudet suhteessa tehtaiden upotusaltaan vaakoihin sekä mitattujen erien keskitilavuudet ja lukumäärät autoilijoittain. Kahden autoilijan vaakojen kalibrointi puutavaraeriä punnittaessa ei ole ollut kunnossa.

3.2 Puutavaraerien tuoretiheyden vaihtelu

Taulukossa 3 on esitetty tutkimusaineiston erien tuoretiheyden keskiarvot, keskihajonnat ja variaatiokerroin puutavaraerittäin talvi- ja kesäaineistossa. Kuten tunnettua, puuaineen kosteus ja siten myös tuoretiheys on talvella suurempi kuin kesällä. Tässä tutkimuksessa vuodenaikojen välinen ero tuoretiheydessä oli mänty-, kuusi- ja koivukuitupuulla keskimäärin 73–82 kg/m³, mutta havukuitupuulla selvästi pienempi, 44 kg/m³. Tuoretiheyden vaihtelu on kesällä puun kuivumisesta johtuen suurempaa kuin talvella. Tämä ilmeni kesäaineistossa tuoretiheyden suurempana keskihajontana.

Taulukko 3. Kuitupuuerien tuoretiheys puolajittain talvella ja kesällä ja samassa punnitusyksikössä kuljetettujen erien tuoretiheyksien keskihajonta ja variaatiokerroin. Havukuitupuuerät sisältävät mäntyä ja kuusta vaihtelevin osuuksin.

Puulaji		n	Keskiarvo, kg/m ³	Keskihajonta, kg/m ³	Variaatiokerroin, %
Mänty	Talvi	88	872	54	6,2
	Kesä	137	790	64	8,1
Kuusi	Talvi	56	859	40	4,6
	Kesä	28	784	52	6,6
Havu	Talvi	16	905	48	5,3
	Kesä	14	761	72	9,5
Koivu	Talvi	55	897	43	4,8
	Kesä	109	824	55	6,7

Taulukko 4. Mänty- ja koivukuitupuuerien tuoretiheys tehtaille toimitettuina ja kaatotuoreta vastaavassa kosteus-tilassa hakkuutavan ja kasvupaikkaryhmän mukaisissa tarkasteluissa.

	Eriä, kpl	Mäntykuitupu			Eriä, kpl	Koivukuitupu		
		Mitattu ¹ Keskiarvo, kg/m ³	Variaatiokerroin, %	Kuivumismalleilla laskettu ² , kg/m ³		Mitattu ¹ Keskiarvo, kg/m ³	Variaatiokerroin, %	Kuivumismalleilla laskettu ² , kg/m ³
<i>Hakkuutapa</i>								
Ensiharvennus	48	847	9,9	869	42	867	9,1	876
Muu harvennus	128	821	8,1	850	82	856	7,8	885
Päätihakkuu	24	780	11,4	839	24	840	7,6	879
Muu hakkuu	19	900	12,1	873	14	903	6,4	882
<i>Kasvupaikka</i>								
Kangas	175	831	9,5	854	115	857	7,8	882
Suo	44	821	11,5	860	46	871	9,1	881

¹ Perustuvat empiirisiin eräkohtaisiin mittaustuloksiin tehtaille toimitettaessa (tuoretiheys toimitustilassa)

² Perustuvat kuivumismalleilla (ks. asetelma seuraavalla sivulla) kaatotuoreta vastaavaan kosteustilaan muunnettuihin arvoihin

Hakkuutavan vaikutusta mänty- ja koivukuitupuuerien tuoretiheyteen tehtaalle toimitettaessa tutkittiin jakamalla erät ensiharvennuksista, muista harvennuksista, päätihakkuista ja muista hakkuista (esim. oja- ja tienlinjahakkuut, tuulenskaadot) peräisin olevaan puutavaraan (taulukko 4). Lisäksi tarkasteltiin kasvupaikan vaikutusta tuoretiheyteen jakamalla leimikot kivennäis- ja turvemaiden leimikkoihin. Tuoretiheys oli selvästi suurin leimikkotyypissä ”muu hakkuu” ja pienin päätihakkuissa, ilmeisesti lähinnä muita leimikkotyyppisiä suuremman sydänpuosuuden vuoksi. Harvennusleimikoissa tuoretiheys oli ensiharvennuksissa hieman pienempi kuin muissa harvennuksissa. Leimikkotyyppien väliset erot tuoretiheydessä olivat tilastollisesti merkitseviä (mänty: $df = 3$, $F = 9,9$, $p < 0,001$, koivu: $df = 3$, $F = 2,7$, $p = 0,046$). Sen sijaan kasvupaikkaryhmien välillä ei kummallakaan puolajilla ilmennyt tuoretiheydessä tilastollisesti merkitseviä eroja (mänty: $df = 1$, $F = 0,5$, $p = 0,481$, koivu: $df = 1$, $F = 1,3$, $p = 0,260$).

Tutkimuksessa kerättyjen varastointaikoja koskevien tietojen perusteella laskettiin kuitupuun kuivumisnopeus tienvarsivarastolla kesäaikana (viikot 16–43). Seuraavassa asetelmassa on esitetty mänty- ja koivukuitupuun tuoretiheyden (kg/m³) ja kuivumisajan välille lasketut yhden selittävän muuttujan lineaariset regressiomallit.

Puutavaralaji	Mallin tunnusluvut	Muuttuja	Kerroin
Mänty- kuitupu	Estimaatin keskivirhe: 22,1 Selitysaste (R ²):0,799	Vakio T *)	846 -6,86
Koivu- kuitupu	Estimaatin keskivirhe: 19,6 Selitysaste (R ²): 0,824	Vakio T *)	869 -5,47

*) T: Kuivumisaika, viikkoa

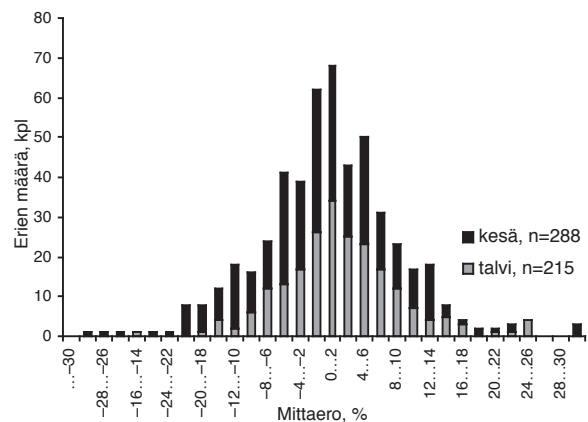
Mallit soveltuvat lähinnä tämän aineiston perusteella laskettujen tuoretiheystulosten tasoitukseen. Kuivumisajalla tarkoitetaan tässä hakkuun päättymisen ja tehdasmittauksen välistä aikaa. Taulukkoon 4 on laskettu ao. malleilla mänty- ja koivukuitupuun kaatotuoretta vastaavat keskimääräiset tuoretiheydet leimikko- ja kasvupaikkatyypeittäin tehtaalla määritetyistä tuoretiheyksistä. Tuoretiheyksien vaihtelu oli kaatotuoretta vastaavassa kosteustilassa leimikkotyyppin ja kasvupaikkaryhmän mukaan huomattavasti pienempi kuin kosteustilassa tehtaalle toimitettaessa.

3.3 Puutavaraerien tilavuuden mittaus-tarkkuus

Mittaerojen otosjakaumat olivat normaalijakautuneita, mikä viittasi satunnaisvirheiden vallitsevuuteen. Kesällä esiintyi suuria tilavuuden aliarvioita enemmän kuin talvella mutta yliarvioita vähemmän kuin talvella, mikä johtui lähinnä puutavaran kuivumisen aiheuttamasta tuoretiheyden vaihteluista.

3.3.1 Kuormainvaakamittaus

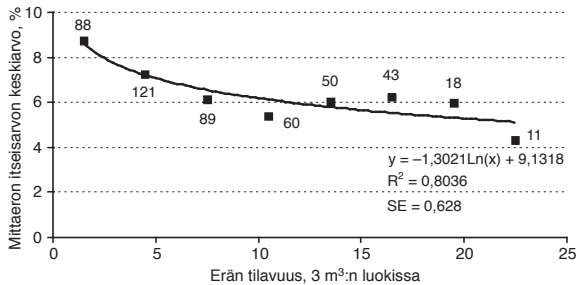
Tehtaan perusmittauksessa saatu kuorman kokonaistilavuus jaettiin mittauserille kuormainvaaoilla määritettyjen massojen suhteissa. Näitä tilavuuksia verrattiin upotusmittauksella saatuihin eräkohtaisiin tilavuuksiin. Kuvassa 3 on esitetty kuormainvaaka- ja upotusmittauksen välisen suhteellisen eräkohtaisen mittaeron frekvenssijakaumat talvella ja kesällä. Taulukossa 5 on esitetty vastaavan jakauman keski- ja hajontaluvut ja puutavaran mittausten menetelmien yleisenä vaatimuksena pidetyn $\pm 4\%$:n enimmäisvirheen täyttäneiden erien osuudet. Talvella mittaeron keskiarvo oli suurempi kuin kesällä, mikä johtui mm. talvella mitattujen erien sisältämästä lumesta



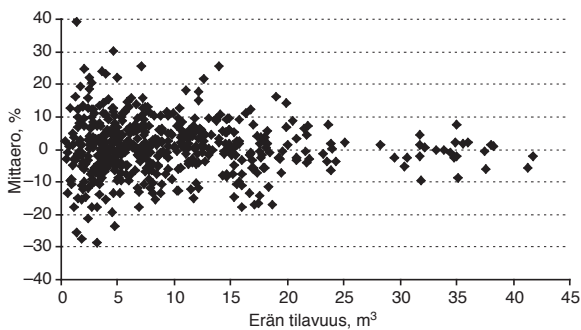
Kuva 3. Kuitupuuerien suhteellisen tilavuuden mittaeron mukaiset frekvenssijakaumat kuormainvaakamittauksessa verrattuna upotusmittaukseen kesä- ja talviaineistossa.

Taulukko 5. Kuormainvaakamittauksella määritetyn eräkohtaisen tilavuuden tarkkuus puutavaralajeittain ja vuodenaikojittain upotusmittaukseen verrattuna. Havukuitupuerät sisältävät mäntyä ja kuusta vaihtelevin osuuksin.

Puutavaralaji / vuodenaika	n	Mittaeron keskiarvo, %	Keskihajonta %-yksikköä	Tarkkuusvaatimuksen täyttäneiden osuus, %		Yksisuuntainen t-testi	
				$\pm 4\%$	$\pm 10\%$	t	p
Mäntykuitupu	224	-0,3	9,3	41	75	-0,472	0,638
Kuusikuitupu	84	2,1	7,9	38	83	2,394	0,019
Havukuitupu	30	-1,8	7,0	60	77	-1,374	0,181
Koivukuitupu	165	2,3	9,0	41	78	3,168	0,002
Talvi	215	2,2	7,5	47	85	4,145	0,000
Kesä	288	-0,2	9,8	38	73	-0,407	0,684
Kaikki	503	0,8	8,9	42	78	1,943	0,053



Kuva 4. Kuitupuuerän suhteellisen mittaeron absoluuttiset ja regressiomallilla tasoitettut itseisarvot erän tilavuusluokan mukaan kuormainvaakamittauksessa verrattuna upotusmittaukseen.



Kuva 5. Kuitupuuerän suhteellinen mittaero erän tilavuuden mukaan kuormainvaakamittauksessa verrattuna upotusmittaukseen.

ja jäästä. Vastaavasti mittaeron keskihajonta oli hie-man suurempi kesällä mitatuissa erissä. Tämä johtui todennäköisesti puutavaran varastoinnin aikaisesta kuivumisesta ja siten suuremmasta tuoretiheyden vaihtelusta kesällä kaukokuljetetuissa kuormissa. Vain alle puolessa eristä päästiin $\pm 4\%$:n tarkkuuteen tilavuuden määrittämisessä. Tämä osuus oli talvella mittaeron keskihajontojen mukaisesti suurempi kuin kesällä. Puutavaran mittausmenetelmien yleiseen tarkkuusvaatimukseen nähden mittaerojen keskiarvoja voidaan kuitenkin pitää kohtalaisen pieninä.

Mittaerot olivat kuusi- ja koivukuitupuulla tilastollisesti merkitseviä, vaikka tuoretiheyden vaihtelu kuusikuitupuulla on yleensä pienempi kuin mänty- ja koivukuitupuulla. Kuitupuutavaralajien välillä oli tilastollisesti merkitsevä ero mittaustarkkuudessa ($df = 3$, $F = 4,0$, $p = 0,008$).

Taulukko 6. Kuitupuutavaralajien eräkohtainen mittaustarkkuus kuormainvaakamittauksessa erilaisten simuloitujen kuormanmuodostamistapojen mukaan.

Kuormanmuodostamistapa	Mittaeron keskiarvo, %	Keskihajonta %-yksikköä	$\pm 4\%$:n tarkkuudella mitattujen erien osuus
Mänty ja koivu samassa kuormassa	1,2	10,1	33
Mänty, koivu, kuusi ja havupuu samassa kuormassa	0,8	10,0	32
Mänty ja koivu samassa kuormassa, sekaisin talvi- ja kesäpuuta	1,0	12,2	27
Mänty ja koivu samassa kuormassa, sekaisin talvi- ja kesäpuuta, erät koko Etelä-Suomen alueelta	0,8	13,1	27
Sekaisin eri puutavaralajeja, talvi- ja kesäpuuta, erät koko Etelä-Suomen alueelta	0,6	12,4	26

Puutavaraerien välisen tuoretiheyden vaihtelun voidaan olettaa olevan pienillä erillä kuivumisesta ja puutavaran laadun vaihtelusta johtuen suurempaa kuin isoilla. Pienillä erillä kuivuminen on epätasaisempaa kuin suurilla. Lisäksi pienten erien varastointiajat saattavat olla pitkiäkin. Nämä tekijät heijastuvat tilavuuden määrittämisessä tarkkuuteen kuormainvaakamittauksessa puukauppojen priorisoinnin ja kaukokuljetuksen järjestelyjen vuoksi. Kuvassa 4 on tarkasteltu kuormainvaakamittauksen tarkkuutta mittaeron itseisarvon perusteella erän tilavuuden mukaan luokitellussa aineistossa. Mittaeron itseisarvo suureni kasvavalla nopeudella eräkoon pienentyessä. Kuvassa 5 on tarkasteltu mittaustarkkuutta mittaeron hajonnan perusteella erän tilavuuden suhteen. Hajonta pieneni selvästi eräkoon kasvaessa.

Taulukossa 6 on esitetty simuloinneissa saatujen eräkohtaisten tilavuuden mittaustarkkuuksien keskiarvot ja keskihajonnat erilaisilla kuormanmuodostustavoilla. Millään kuormanmuodostamistavalla ei päästy yhtä hyvään mittaustarkkuuteen kuin alkuperäisessä empiirisessä aineistossa, koska erien tuoretiheyden vaihtelu kasvoi kaikissa tapauksissa. Kaikkien neljän kuitupuutavaralajin sekoittaminen

samaan kuormaan ei lisännyt paljonkaan mittaeroa suhteessa mänty–koivu sekakuormiin. Talvi- ja ke- säpuun sekoittaminen samaan kuormaan lisäsi varsin paljon mittaeron hajontaa. Kuormien muodostaminen alkuperäistä suuremmilta maantieteellisiltä alueilta ei lisännyt hajontaa kovin paljon.

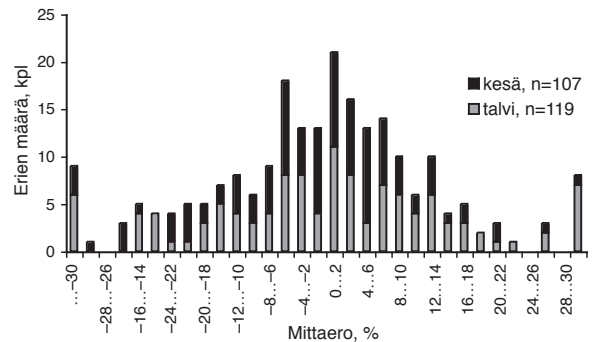
Tutkimuksessa kerätystä aineistosta hylättiin jonkin verran eriä, jotka oli kuljetettu kahden puutaralajin punnitusyksiköissä. Nämä sekakuormat olivat lähes kokonaan mänty-lahokuusikuormia. Lahokuusen tuoretiheys vaihtelee laajoissa rajoissa lahon määrän mukaan, joten lahoa kuusta sisältävien kuormien tilavuuden mittaus kuormainvaakamenetelmällä on epätarkkaa. Sekakuormina kuljetettujen mänty-lahokuusierien (66 kpl) tilavuuden määrittämisessä syntyi keskimäärin 0,7 %:n aliarvio, mittaeron keskihajonta oli 17,3 prosenttiyksikköä ja ± 4 %:n ja ± 10 %:n tarkkuudella mitattujen kuormien osuudet olivat vain 14 % ja 52 %.

3.3.2 Kuormainvaakamittauksen ja pinomittauksen erot

Osa tutkimusaineiston eristä (107 kesäaineiston erää, 119 talviaineiston erää) mitattiin kuormainvaakamenetelmän lisäksi pinomittausmenetelmällä joko tienvarsvaarastolla tai tehdasvastaanotossa. Tarkoitus ei ollut arvioida sinänsä pinomittauksen tarkkuutta, mutta menetelmien suhteellisen mittaustarkkuuden vertailemiseksi oli kuitenkin perusteltua esittää myös pinomittaukseen koskevat tulokset suhteessa kuormainvaakamittaukseen. Merkille pantavaa on, että tutkimuksen mittauserät olivat keskimääräisiä kuitupuueriä pienempiä (mediaani 5,7 m³) ja vaikeasti mitattavissa pinoissa.

Eräkohtaisesti tilavuuden määrittäminen oli tässä osaineistossa kuormainvaakamittauksessa keskimäärin hyvin tarkkaa (mittaerojen keskiarvo ≈ 0) ja pinomittauksessa lievästi aliarvioivaa (mittaerojen keskiarvo $-0,3$ %). Mittaeron keskihajonta oli kuormainvaakamittauksessa 7,9 % ja pinomittauksessa 16,9 %. Kuormainvaakamittauksella voitiin mitata 41 % ja pinomittauksella 28 % eristä ± 4 %:n tarkkuudella ja vastaavasti 81 % ja 59 % ± 10 %:n tarkkuudella.

Kuvassa 6 esitetyt frekvenssijakaumat havainnollistavat pinomittauksen suurta mittaeron hajontaa suhteessa kuormainvaakamittaukseen (kuva 3).



Kuva 6. Kuitupuuerien suhteellisen tilavuuden mittaeron mukainen frekvenssijakauma pinomittauksessa verrattuna upotusmittaukseen. Laskennassa on käytetty talvi- ja kesäaineistoista muodostettua osa-aineistoa, jonka kuormat mitattiin sekä kuormainvaaka- että pinomittauksessa.

Pinomittauksen jakauma on leveämpi kuin kuormainvaakamittauksessa, ja havaintoja on runsaasti myös suurten, yli 30 %:n virheiden luokissa. Kuvien perusteella mittaeron osajakaumat noudattavat myös pinomittauksessa normaalijakaumaa. Mittausmenetelmät eivät sinällään sisällä systemaattista mittausvirhettä, mutta esimerkiksi lumi ja jää saattavat johtaa tuloksia systemaattisesti johonkin suuntaan.

4 Tulosten tarkastelu

4.1 Tulosten luotettavuus ja yleistettävyyttä

Pienten hankinta- ja käteiskauppaerien mittaus on nykyisin käytetyillä mittausmenetelmillä ongelmallista. Erien pieni koko ja puun laadun vaihtelu johtuen mm. vaihtelevista ja pitkistä varastointiajoista heikentävät mittaustarkkuutta riippumatta käytettyä mittausmenetelmää. Tutkimuksen keskeisenä tavoitteena oli selvittää kuormainvaakamittauksen käyttömahdollisuuksia nimenomaan pienten kuitupuuerien työ- ja luovutusmittausmenetelmänä. Tulokset voidaan yleistää puutavara-autokuormaa (n. 45–50 m³) pienemmille erille ja ne pätevät mukana olleille kuitupuutavara-erille. Tulokset voidaan pienin varauksin ulottaa koskemaan kaikkia puutavara-eräjä, joilla tuoretiheyden vaihteluväli ja keskihajonta ovat samoissa rajoissa kuin aineistossa mukana olleilla puutavara-erillä.

Tutkimuksen aineistot kerättiin laajalta maantieteelliseltä alueelta ja kolmen metsäkonsernin neljältä eri tuotantolaitokselta. Aineistoa ei kerätty Pohjois-Suomesta, jossa kuormainvaakamittausta ei tultane käyttämään pienten mittauserien verraten vähäisen osuuden ja jo nyt melko yleisesti käytetyn eräkohtaiseen paino- tai kehysotantamittaukseen perustuvan tehdasmittauksen vuoksi. Tutkimuksen tulokset voidaan siis yleistää koskemaan Suomen eteläosasta (pl. Lapin ja Oulun läänit) hankittavaa kuitupuuta.

Mänty- ja koivukuitupuun koe-eriä mitattiin kolmella tehtaalla ja etenkin kesäaineistojen määrät olivat molemmilla tavaralajeilla kohtalaisen suuria. Kuusikuitupuuta ja havukuitupuuta (mäntyä ja kuusta sekaisin vaihtelevin osuuksin) mitattiin vain yhdellä tehtaalla ja havukuitupuueriä oli suhteellisen vähän. Mekaanisen massan (hioke ja hierre) valmistusprosessi asettaa käytettävälle kuituraaka-aineelle ehdottoman tuoreusvaatimuksen, jolloin tehtaalle kuljetettavan kuusikuitupuun tuoretiheyden voidaan olettaa vaihtelevan suhteellisen vähän. Täten kuusikuitupuulla päästään oletettavasti parempaan mittaustarkkuuteen kuin mihin tässä tutkimuksessa saadut tulokset viittaavat. Havukuitupuuerien tuoretiheys vaihteli hieman enemmän kuin puhtaiden mänty- ja kuusikuitupuuerien. Näin ollen puhtaiden mänty- ja kuusikuitupuuerien mittauksen voidaan arvioida olevan kuormainvaakamenetelmällä tarkempaa kuin havukuitupuuerien mittauksen.

Tutkimuksessa esiintyi virhelähteitä, jotka eivät vaikuta kuormainvaakamittauksen tarkkuuteen käytännön työssä. Joissakin tapauksissa puutavaraeriä jouduttiin varastoimaan ennen upotusmittausta. Talvella upotusmittauksessa saatu punnitustulos ei ollut vertailukelpoinen kuormainvaalla saatuun tulokseen nähden, mikäli erän sisältämä lumi ja jää olivat sulaneet osaksi tai kokonaan varastoinnin aikana (Nisula 1974, Björklund 1986). Varastointi kesällä ennen erän upotusmittausta johti siihen, että puutavaraerä kuivui ja upotusallasmittaus ali-arvioi massaa. Aineiston suurehkon koon ansiosta näiden virheiden vaikutus ei ollut kuitenkaan kovin suuri. On myös todettava, että vertailutilavuuksien määrittämisessä käytetty upotusallasmittaus ei ole absoluuttisen tarkkaa (esim. Nisula 1967, Leinonen 1972, Kärkkäinen 1984, Halinen 1987).

Kuorma-autojen kuormainvaakojen punnitustark-

kuus oli tässä tutkimuksessa hieman huonompi kuin aikaisemmissa selvityksissä, jotka ovat koskeneet yhtäältä kuormatraktoreiden vaakoja (Sikanen 1992, Sikanen ja Marjomaa 1992; ks. myös Naasko 1997, Metsäntutkimuslaitos 1998) ja toisaalta kuorma-autojen vaakoja (Heikka 1990, Vuollet ja Tiuraniemi 1993). Suurin syy tähän lienevät tämän tutkimuksen hyvin pienet puutavaraerät. Niiden keskimääräiset tuoretiheydet ja tiheyden hajonnat olivat suunnilleen samansuuruisia tai hieman pienempiä kuin aiemmissa tutkimuksissa (esim. Leinonen 1972, Marjomaa 1992; ks. myös Maa- ja metsätalousministeriön... 1999). Näillä perusteilla tutkimuksen tulokset vaikuttavat yleistettäviltä.

4.2 Kuormainvaakamittauksen edut ja vaatimukset

Kuormainvaakamittaus osoittautui pinomittausta tarkemmaksi pienten kuitupuuerien mittausmenetelmäksi. Kustannuksiltaan edullisempaan kuormainvaakamittaus on käyttökelpoinen menetelmä korvaamaan ja vähentämään suhteellisen työlästä ja epätarkkaa pinomittausta tienvarressa. Pinomittauksen kustannusten on yleisesti arvioitu olevan suuruusluokaltaan 8–9 €/m³ pienillä, noin 10 m³:n suuruisilla erillä; tosin kustannus alenee huomattavasti eräkoon kasvaessa (Metsäteho Oy, suull.). Heikkilä (2002) arvioi kuormainvaakamittauksen kustannusten olevan 0,5–1 €/m³ vaihdellen mm. vaa'an hankintahinnan, pitoajan ja vuotuisen mitattavan puumäärän mukaan.

Yhtenä puutavaran mittauksen kehittämistarpeena on moninkertaisen mittauksen vähentäminen lisäkustannusten ja tarpeettomien epäselvyyksien välttämiseksi. Kuormainvaakamittausmenetelmää käytettäessä puutavaran tilavuus mitataan vain keran. Lisäksi kuormainvaakamittaus nivoutuu puunhankinnan logistiikkaan joustavasti, koska mittaus toteutetaan kaukokuljetuksen ja puutavaran tehdasvastaanoton yhteydessä. Menetelmän käyttö ei näin ollen vaadi erillistä käyntiä varastopaikalla, kuten tienvarsimittaus. Kuormainvaakamittaus mahdollistaa myös tehokkaiden ja verraten luotettavien painomittausmenetelmien käytön laajentamisen pienille mittauseriille tehtaalla tapahtuvassa perusmittauksessa.

Kuvatussa menetelmässä eräkohtaisen mittaustuloksen keskeisiä virhelähteitä ovat puutavaran tuoretiheyden satunnaisvaihtelu erien välillä, kuormainvaa'alla tehtävässä punnituksessa syntyvät satunnaisvirheet sekä tehtaan perusmittauksessa syntyvät virheet punnitussyksikön kokonaistilavuuden määrittämisessä. Kaikki kolme virhelähdettä vaikuttivat tutkimuksessa lähes samansuuruisesti satunnaiseen mittaeroon eli eräkohtaisten mittaerojen keskihajontaan. Perusmittaus aiheutti mittaustulokseen keskimäärin noin yhden prosentin yliarvion ja kaikkien kolmen virhelähteen aiheuttama keskihajonta oli viiden prosenttiyksikön tasolla (taulukko 7). Tuoretiheyden vaihtelu oli merkittävä virhelähde erityisesti kesällä, jolloin varastointi alentaa tuoretiheyttä nopeasti. Talvella lumi ja jää aiheuttavat satunnaista mittaustulovirhettä, mikäli samassa puutavara-auton punnitussyksikössä kuljetetaan lumisuusasteeltaan erilaisia puutavaraeriä.

Kuormainvaakamittauksella päästiin alle puolessa koe-eristä yleisenä vaatimuksena pidettyyn mittaustarkkuuteen ($\pm 4\%$). On kuitenkin otettava huomioon tutkimuksen kohteena olleet pienet puutavaraerät, jolloin em. suhteellista mittaustarkkuusvaatimusta voidaan pitää tiukkana. Mittausmenetelmästä riippumatta toteutunut mittaustarkkuus huononee eräkoon pienentyessä. Kuormainvaakamittausta voidaan tarkkuutensa puolesta pitää parannuksena pinomittaukseen nähden ja vertailukelpoisena muiden mittausten toteutuneeseen mittaustarkkuuteen nähden.

Kuormainvaakamittausta käytettäessä mittaustarkkuudesta huolehtiminen ei ole vain tehdasvastaanoton tehtävä, vaan myös puutavara-autoilijan on syytä kiinnittää huomiota kuormainvaa'an punnitustarkkuuteen. Tätä voidaan seurata esimerkiksi vertaamalla säännöllisesti kuormainvaa'alla saatuja kuormien massoja tehtaan ajoneuvovaa'alla saatuihin. Kuormainvaa'an eräkohtaisia punnitustuloksia voidaan tarvittaessa seurata, jos tehtaalta on käytössä kurottajavaaka tai punnitsemalla yksittäisiä eriä erikseen ajoneuvovaa'alla.

Kuormainvaakamittauksen tarkkuuden eräkohtainen valvonta ei ole tutkitussa menetelmässä mahdollista jälkikäteen. Kuormaa tehtäessä kirjataan erien massat, mutta eriä ei erotella kuormassa toisistaan. Tämän vuoksi samaa erää ei voida mitata jälkikäteen. Tilanne on samankaltainen nykyisissä tehdas-

Taulukko 7. Kuormainvaakamittauksen virhelähteet kuitupuuerän tilavuuden määrittämisessä talvi- ja kesäaineistoissa.

Virhelähde		Mittaeron keskiarvo, %	Keskihajonta, %-yksikköä
Tuoretiheyden vaihtelu erien välillä samassa punnitussyksikössä	Talvi	0,1	3,7
	Kesä	-0,3	5,5
	Yhteensä	-0,2	4,8
Punnitusvirheet erien välillä samassa punnitussyksikössä	Talvi	0,2	4,9
	Kesä	0,0	5,4
	Yhteensä	0,1	5,2
Tehtaan perusmittauksessa syntyvät virheet	Talvi	1,9	4,6
	Kesä	0,1	6,1
	Yhteensä	0,9	5,6

mittausten menetelmissä, koska tuotannossa käytettyjä puutavaraeriä ei voida yksilöidä jälkikäteen.

Tutkimuksessa kuvatusta mittausten menetelmästä on laadittu kokeiluohje ja puutavaran mittauksen sopijapuolelta on tehty puutavaranmittauslain mukaisen koekäytösopimuksen kehittäminen olevan mittausten ottamisesta koekäyttöön (Kuormainvaakamittaus II, 2003). Täten menetelmää on ollut mahdollista käyttää luovutus- ja työmittauksessa 1.4.2003 alkaen. Tällä hetkellä puunhankintaorganisaatiot tekevät tarvittavia päivityksiä kuljetustenhajauksen- ja puutavaranvastaanoton tietojärjestelmiinsä menetelmän käyttöönottamiseksi. Viimeisen parin vuoden aikana Suomen markkinoille on tullut uusia kuormainvaakamerkkejä, joiden ja myös jo pidempään käytössä olleiden vaakamerkkien punnitustarkkuudesta ja toimintavarmuudesta on käynnistetty jatkotutkimus Metsäteho Oy:ssä.

Tukki- ja energiapuu rajattiin tämän tutkimuksen ulkopuolelle, koska tarve pienten puutavaraerien mittauksen kehittämiseen on suurin kuitupuulla. Sahojen tukkimittarit ovat yleisiä ja ne mittaavat tarkasti, ja tukkien mittaaminen kappaleittain tienvaristostolla on loppunut lähes kokonaan. Sellaisten sahojen tukkien mittauksessa, joilla ei ole tukkimittaria, kuormainvaakamenetelmä on potentiaalinen vaihtoehto. Lisäksi kuormainvaakamenetelmä voisi olla toimiva ratkaisu kerättäessä pieniä tukkieräitä välivarastoon ennen lopullista kaukokuljetusta. Energiapuun hankintaketju ja siten myös mittausten menetelmät ovat vielä ainakin osittain vakiintumattomia.

Kuormainvaakamenetelmä voisi soveltua karsitun pienpuurangan ja tietyin varauksin karsimattoman pienkokopuun mittaukseen. Erityisiä esteitä ei ole mitata jatkossa myös tukkipuuta tai energiapuurankaa tai kokopuuta kuitupuun tavoin kuormainvaakamenetelmällä.

Kiitokset

Tämän tutkimusartikkelin pohjana oli Jani Heikkilän (2002) metsäteknologian pro gradu -työ Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitokselle. Alkuperäisen tutkimuksen toteuttamisen mahdollistivat henkilöstöllään ja rahoituksellaan Metsäntutkimuslaitos sekä Metsäliitto Osuuskunta, Stora Enso Oyj Metsä ja UPM-Kymmene Metsä ja näiden toimihenkilöt ja yrittäjät. Tutkimuksen ohjausryhmän ja Ponsse Oyj:n kuormainvaakojen kehitystyöstä vastaavien henkilöiden panokset olivat myös merkittäviä. Kiitämme teitä kaikkia vaivannäöstänne, samoin kuin tämän artikkelin esitarkastajia hyvistä ja huomioon otetuista kommentteista ja parannusehdotuksista käsikirjoitukseen.

Kirjallisuus

- Björklund, L. 1986. Snö och is i massavedsleveranser. Sveriges lantbruksuniversitet. Institutionen för virkeslära. Rapport 182. 27 s.
- Halinen, M. 1987. Osapuomenetelmä puutavaran mittauksessa tehtaalla. Metsätehon tiedotus 398. 16 s.
- Heikka, T. 1990. Kuorman painon määrittäminen puutavaran autokuljetuksessa. Metsätehon katsaus 11/1990. 8 s.
- Heikkilä, J. 2002. Puutavara-auton kuormainvaa'an käyttö pienten puutavaraerien mittauksessa. Helsingin yliopisto, maatalous-metsätieteellinen tiedekunta, metsävarojen käytön laitos. Metsäteknologian pro gradu -tutkielma. 54 s. + liitteet 2 s.
- Heiskanen, V. 1973. Pinotiheysluvun ja pinotiheystekijöiden arviointi ja sen tarkkuus. Folia Forestalia 170. 26 s.
- Hujo, S. 2004. Puutavaran mittausmenetelmien osuudet 2003. www-dokumentti. <http://www.metsateho.fi> (6.4.2004).
- Kuormainvaakamittaus II. 2003. Kokeiluohje. 14.3.2003. Metsäteho Oy. 2 s.
- Kärkkäinen, M. 1984. Puutavaran mittauksen perusteet. Helsingin yliopiston monistepalvelu. 252 s.
- Lehtimäki, J. 2001. Lyhyen kuitupuun kehä- ja pinomittauksen tarkkuus. Amk-metsätalousinsinöörin tutkinnon opinnäytetyö. Hämeen ammattikorkeakoulu, metsätalouden koulutusohjelma. 52 s.
- Leinonen, E. 1972. Puutavaran mittaus kuorma- ja otantamenetelmällä. Folia Forestalia 144. 38 s.
- Maa- ja metsätalousministeriön määräykset 47/99. 13.4.1999. Kuormainvaakamittaus. 4 s.
- Marjomaa, J. 1992. Puutavaralajien tuoretiheyksien vaihtelu. Metsätehon katsaus 4/1992. 8 s.
- Metsäntutkimuslaitos. 1998. Kuormainvaakamittaus. Lausunto puutavaran mittauksen neuvottelukunnalle 7.9.1998. 6 s. + liitteet.
- Naasko, L. 1997. Puutavaran työmittaus metsätraktorin kuormainvaaoilla Metsähallituksessa. Puutavaran mittauksen neuvottelukunnalle laadittua lausuntoa varten pyydettyjä tietoja. Moniste. 2 s. + liitteet. Metsähallitus, Kajaani.
- Nevalainen, M., Sairanen, P. & Verkasalo, E. 1997. Pitkän kuitupuun ajoneuvokuormien pinomittauksen kehittäminen. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 653. 41 s. + liitteet 3 s.
- Nikkilä, H., Rikkonen, P. & Heiskanen, V. 1974. Suomalaisen kuitupuun pinotiheys ja siihen vaikuttavat tekijät. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 82(1). 96 s.
- Nisula, P. 1967. Käytäntöön soveltuvia menetelmiä puutavaran kiintokuutiomäärän määrittämiseksi tilavuuspainon avulla. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 64(6). 28 s.
- 1974. Makroilmaston vaikutus puutavaran painoon. Folia Forestalia 218. 23 s.
- Sairanen, P. 1990. Pitkän kuitupuun pinomittausmenetelmän tarkkuus. Metsäntutkimuslaitos, Metsäteknologian tutkimusosasto. Moniste 12 s.
- 1995. Pitkän kuitupuun pinomittaus tienvarsivarastoissa. Julkaisussa: Verkasalo, E. (toim.). Puutavaran mittauksen kehittämistutkimuksia 1989–93. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 558: 24–53.
- Sikanen, L. 1992. Metsätraktorin kuormainvaakaan perustuvan mittausmenetelmän soveltuvuus puutavaran tilavuusmittaukseen. Pro gradu -työ. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 28 s.
- & Marjomaa, J. 1992. Metsätraktorin kuormainvaa'an

- käyttöön perustuva puutavaran tilavuuden mittaust.
Metsätehon katsaus 14/1992. 9 s.
- Voipio, V. & Korpilahti, A. 1998. Puutavaran tienvarsi-
varastojen ominaisuuksia. Metsätehon tiedotus 400.
16 s.
- Vuollet, E. & Tiuraniemi, K. 1993. Kuormainvaaka käyttö-
kelpoinen autokuljetuspuun mittaukseen. Metsähalli-
tuksen kehittämissyksikön tiedote 7/1993. 4 s.

24 viitettä

Suulliset tiedonannot

- Metsäteho Oy. 10.3.2004.
Parkkonen, Heikki. Metsätalouden kuljetusyrittäjät ry.,
8.1.2002 ja 21.5.2002.