



Petri Ronkainen



Seija Sirkiä



Jari Lindblad

Petri Ronkainen, Seija Sirkiä ja Jari Lindblad

Harvennusenergiapuun ja latvusmassan kosteuden määrittäminen metsäkuljetuksessa

Ronkainen, P., Sirkiä, S. & Lindblad, J. 2014. Harvennusenergiapuun ja latvusmassan kosteuden määrittäminen metsäkuljetuksessa. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2014: 211–228.

Kuormainvaakamittauksessa metsäkuljetuksen yhteydessä punnittu energiapuun paino muunnetaan tilavuudeksi keskimääräisillä tuoretiheysluvuilla (kg/m^3). Metsäkuljetuksen yhteydessä tehtävä kosteuden määrittäminen mahdollistaisi luotettavamman energiapuun tuoretiheysluvun määrittämisen.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia energiapuuerien kosteuden määrittämisen edellytyksiä raaka-aineominaisuuksien, ominaisuuksien luontaisen vaihtelun ja otannalla saavutettavissa olevan mittauserävarmuuden tason kannalta. Tutkimuksessa määritettiin harvennusenergiapuun ja latvusmassan kosteuden tasoa ja vaihtelua erilaisilla korjuukohteilla, näistä tavaralajeista otettavien sahanpurunäytteiden edustavuutta kosteuden määrittämisen kannalta ja tapaustutkimuksena tutkittiin kosteusmittareiden mittaustarkkuutta.

Harvennusenergiapuulla sahanpurunäytteiden kosteuksien ja vertailuarvona käytettyjen kiekonäytteiden kosteuksien ero oli tilastollisesti merkitsevä. Samoin latvusmassalla sahanpurunäytteiden ja vertailuarvona käytettyjen hakenäytteiden kosteuksien ero oli tilastollisesti merkitsevä. Erot olivat kuitenkin pieniä ja käytännön sovellusmahdollisuuksien kannalta sahanpurunäytteitä voidaan pitää edustavina.

Harvennusenergiapuulla ja latvusmassalla kosteuden luontainen vaihtelu energiapuuerialueen sisällä oli melko suurta. Energiapuuerialueiden kosteuden määrittämisessä suuri hajonta johtaa suuriin otosmääriin, jotta voidaan saavuttaa riittävä luotettavuus. Suurten otosmäärien vuoksi manuaalinen näytteenotto ei tule kysymykseen.

Kosteusmittareille laadituissa mittausmalleissa selittäjinä olivat puuaineen kuivatuoretiheys ja puulaji. Energiapuun kosteuden mittaamisen kannalta kosteusmittareiden kyky tuottaa sahanpurunäytteillä toistuvia ja todenmukaisia mittaustuloksia on hyvällä tasolla.

Asiasanat: energiapuu, harvennuspuu, kosteusmittarit, kosteusmittaus

Yhteystiedot: Metsäntutkimuslaitos, Joensuu

Sähköposti jari.lindblad@metla.fi

Hyväksytty 17.9.2014

Saatavana <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff14/ff144211.pdf>

I Johdanto

I.1 Kosteus energiapuun laadun määrittäjänä

Kosteus on lämpö- ja voimalaitoksissa käytettävän energiapuun tärkein laatuominaisuus (Alakangas 2000). Energiapuun lämpöarvo (MJ/kg) ja edelleen tehollinen energiasisältö laskevat suoraviivaisesti kosteuden kasvaessa (Hillebrand ja Nurmi 2001; Kärkkäinen 2007). Kosteus ja sen avulla määritetyt määrä- ja laatusuuret kuvaavat energiapuun käyttöarvoa loppukäyttäjän kannalta parhaiten.

Energiapuun kosteus on yleensä mahdollista määrittää vasta käyttöpaikalle toimituksen yhteydessä. Määrittäminen perustuu tyypillisesti kosteusnäytteiden otantaan ja uunikuivausmenetelmällä tehtävään kosteuden määrittämiseen. Kosteuden määrittäminen yhdistettynä painon mittaukseen mahdollistaa energiapuun määrän määrittämiseen painon ja energian mittayksiköinä. Mittaustuloksia käytetään muun muassa energiapuun kaupan perusteena.

Energiapuun hankintaketjussa määrän mittaus tehdään useilla mittausten menetelmillä, mahdollisesti useissa eri vaiheissa ja perustuen eri mittausuureisiin ja mittayksiköihin. Tyypillisimmillään energiapuun mittaus on hakkeen tilavuuden mittauksella kuljetuskontissa. Lisäksi yleisesti käytetään energiapuun pinomittauksella tienvarsivarastossa. Viime vuosina kuormainvaakamittaus on yleistynyt nopeasti energiapuun työ- ja luovutusmittauksessa. Kuormainvaakojen määrä on lisääntynyt puutavara-autojen ohella myös metsätraktoreissa ja niiden punnitustarkkuudessa on tapahtunut kehitystä (Heikkilä ym. 2004; Hujo 2006; Melkas 2010; Petty ja Melkas 2013 ja 2014). Viimeisimmän arvion perusteella kuormainvaakoja on noin 850 kuormatrukkissa (Metsäteho 2014, suullinen tieto, kartoitettu kyselyllä, joka suunnattiin Metsäteho Oy:n osakkaille).

Energiapuun kuormainvaakamittausmenetelmä perustuu metsäkuljetusvaiheessa tehtävään mittauksen punnitukseen. Tarvittaessa mittauksen paino muunnetaan kiintotilavuudeksi muuntoluvuilla, niin sanotuilla tuoretiheysluvuilla (kg/m^3) (Lindblad ym. 2014). Lähtökohdiltaan mittausten menetelmä on hyvä, sillä se nivoutuu työvaiheena osaksi metsäkuljetusta. Lisäksi painon mittaukseen perustuva menetelmä

soveltuu hyvin monimuotoisen ja mitattavuudeltaan heikon energiapuun mittaukseen.

Tuoretiheys on laskennallisesti määritettävissä puutavaran kuivatuoretiheyden ja kosteuden perusteella. Mittauksessa käytettävät tuoretiheysluvut ovat yleistyksiä tuoretiheyden tasosta ja niihin sisältyy energiapuun puuaineen kuivatuoretiheyden ja kosteuden vaihtelusta aiheutuvaa mittauserävarmuutta. Parhaimmillaan tuoretiheysluvut edustavat tavaralajin, ajankohdan ja varastointiajan mukaista keskitasoa, mutta eivät ota huomioon mittauserien välistä satunnaisvaihtelua tuoretiheydessä. Oleellinen tekijä ovat myös alueellisesti ja vuosittain vaihtelevat olosuhdetekijät, joita taulukoiduissa tuoretiheysluvuissa ei pystytä ottamaan huomioon. Esimerkiksi tietyn aikajakson poikkeavat lumisuus- tai kuivumisolosuhteet voivat johtaa siihen, että tuoretiheyslukujen käyttöön perustuva mittausten menetelmä tuottaa jatkuvasti systemaattista virhettä mittauksessa.

Energiapuun mittauksessa käytettävien menetelmien tarkkuuteen olisi kosteuden oikea-aikaisella ja luotettavalla määrittämisellä saavutettavissa huomattava parannus. Kosteuden mittaus yhdistettynä kuormainvaakamittaukseen mahdollistaa mittauserän tuorepainon lisäksi kuivapainon, lämpöarvon, energiasisällön, mittauseräkohtaisen tuoretiheysluvun ja edelleen tilavuuden huomattavasti nykyistä tarkemman määrittämisen. Luotettavampi ja monipuolisempi mittaus tarjoaisi hyötyjä paitsi kauppahinnan ja työsuorituksen määrittämisen perusteena olevassa perusmittauksessa, myös muutoin energiapuun hankinnassa ja laadun hallinnassa. Puun laatuominaisuuksien hallinnalla läpi koko hankinta- ja jalostusketjun on saavutettavissa etuja sekä energiasta ainespuulla. Energiapuulla korjuun yhteydessä tehty kosteuden määrittäminen antaa paremmat edellytykset arvioida tienvarsivaraston laatua ja valita käyttöpaikalle toimitettavia eriä (Korpilahti ja Melkas 2010). Kuitupuulla kosteus vaikuttaa muun muassa käyttökohteen valintaan ja massan valmistusprosessin ohjaukseen (Hokka ja Vuorenpää 2001).

Energiapuun kosteuden määrittäminen on haastavaa yhtäältä mitattavan raaka-aineen fyysisten ominaisuuksien vuoksi ja toisaalta mittaustekniikan kannalta. Energiapuutavaralajit ja niiden raaka-aine on usein heterogeenista ja kosteuden jakautuminen on epätasaista. Lisäksi saatavilla ei ole ollut ener-

giapuun kosteuden mittaamiseen kehitettyjä ja riittävästi testattuja mittauslaitteita, joilla mittaus voitaisiin tehdä maastossa, vaan kosteuden luotettava määrittäminen on vaatinut laboratorio-olosuhteita. Energiapuun maasto-olosuhteissa tehtävälle kosteuden määrittämiselle ei ole ollut kustannusten, tekniikan tai menetelmien suhteen kelvollista toimintatapaa.

Energiapuun sisäisen, sen eri ositteiden välisen kosteuden vaihtelun lisäksi puun kosteus tuoreena vaihtelee ajankohdan mukaan siten, että kosteus on alimmillaan kesällä, minkä jälkeen se kasvaa syksyä kohti laskien jälleen seuraavana keväänä (Hakkila 1962). Vastaavalla tavalla palstalla tai välivarastossa kuivuvan puun kosteus on pienin kesällä, mutta sen loppukosteus syksyllä on kuitenkin huomattavasti tuoreen puun kosteutta pienempi (Hakkila 1962; Uusvaara ja Verkasalo 1987; Hillebrand ja Nurmi 2004). Tähän vuodenaikojen mukaiseen vaihteluun ja sen suuruuteen vaikuttavat lisäksi vallitsevat sääolosuhteet sekä puulaji (Hakkila 1962).

1.2 Kosteuden mittausmenetelmät

Kuitupuun kosteuden määrittäminen sahanpurunäytteiden otannalla on kehitetty jo 1960-luvulla Norjassa sekä Saksassa (Björklund 1988). Björklund (1988) tutki Ruotsissa kuitupuukuormista tehdasolosuhteissa tehtävää kosteusnäytteiden ottoa, näytteenottotekniikoita ja näytteiden edustavuutta. Tuolloin menetelmän yleistymistä kuitupuun kosteuden mittauksessa hidastivat lähinnä puutteet kosteusnäytteiden edustavuudessa ja työturvallisuudessa (Björklund 1988). Menetelmän kehitystyötä on sittemmin tehty Ruotsissa Hulnäsissä (2012) väitöskirjatutkimuksessa. Kuitupuukuormista otettaviin sahanpurunäytteisiin perustuvaa kosteuden määrittämistä käytetään yleisesti ainakin Itävallassa (suullinen tieto, Michael Golser, Holzforschung, Austria, European timber measurement meeting 2011, Uppsala Sweden). Itse kosteuden määrittäminen on jo pitkään perustunut uunikuivausmenetelmään.

Puun kosteuden mittaustekniikat voidaan jakaa yksi- ja kaksivaiheisiin menetelmiin. Yksivaiheisissa menetelmissä puun kosteus määritetään suoraan, kun taas kaksivaiheisissa puun ja sen sisältämän veden paino määritetään erikseen (Kärkkäinen 2007). Eniten sovelluksia yksivaiheisista kosteuden mitta-

usmenetelmistä on puun sähköisiin ominaisuuksiin perustuen. Yleistä näille menetelmille on, että ne mittaavat materiaalin ominaisuutta, joka on riippuvainen kosteudesta (Jensen ym. 2006). Yksinkertaisin ja eniten käytetty kaksivaiheinen menetelmä on gravimetrinen uunikuivausmenetelmä (Kärkkäinen 2007). Eri kosteusmittausmenetelmiä ja -laitteita ovat kattavasti kuvanneet muun muassa Hokka ja Vuorenpää (2001), Järvinen ym. (2007) ja Korpilahti ja Melkas (2010).

Kapasitiivinen kosteuden mittaus perustuu puun dielektristen ominaisuuksien mittaamiseen. Mittauksessa puu on dielektrinen väliaine elektrodien muodostamassa kondensaattorissa (Järvinen ym. 2007), jonka sähkökentässä tapahtuvat muutokset havaitaan. Kapasitiivisella kosteuden mittauksella voidaan mitata verraten laaja kosteuden vaihtelualaue ja myös puun syiden kyllästymispistettä korkeampien kosteuksien mittaus on mahdollista. Tosin mittauksen tarkkuuden on havaittu heikenevän puun syiden kyllästymispisteen yläpuolella (Jensen ym. 2006).

Mittattavan materiaalin tiheys vaikuttaa merkittävästi kapasitiivisen mittauksen tarkkuuteen (Forsén ja Tarvainen 2000; Jensen ym. 2006). Puulajilla ei kuitenkaan yleensä ole vaikutusta, mikäli tiheys on vakio (Kärkkäinen 2007). Tämän vuoksi käytettävä mittari tulisi kalibroida ja virittää mitattavalle materiaalille paikallisesti sen sijaan, että käytettäisiin yleisiä useille materiaaleille tarkoitettuja kalibrointialgoritmeja (Jensen ym. 2006).

Kapasitiivisen kosteuden mittauksen suurin haaste energiapuun mittauksen kannalta liittyy jäätyneen puun mittaukseen. Koska mittaus perustuu kuivan puun ja vapaan veden dielektrisyysvakion huomattavaan eroon, ovat vaikeudet huomattavat, kun jään dielektrisyysvakio on lähes sama kuin kuivalla puulla (Järvinen ym. 2007). Kapasitiivisella mittauksella puun kosteutta voidaan mitata noin 50–60 prosentin kosteuteen saakka, mikä pääsääntöisesti on riittävä käyttöalue energiapuun kosteuden mittauksessa. Tässä tutkimuksessa käytettiin kapasitiiviseen kosteuden mittaukseen perustuvia mittareita. Tutkitut mittauslaitteet olivat markkinoilla olevia, hinnaltaan ja käytettävyydeltään mahdollisesti sopivia energiapuuerien kosteuden määrittämiseen.

1.3 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

Tämän tutkimuksen taustalla oli pyrkimys metsäkuljetusvaiheessa käytettävien energiapuun painonmittaukseen perustuvien mittausten menetelmien kehittämiseen ja näiden mittausten tarkkuuden parantamiseen.

Tutkimuksen tavoitteena oli

- tutkia latvusmassan kosteuden tasoa ja vaihtelua erilaisilla korjuukohteilla,
- tutkia latvusmassasta ja harvennusenergiapuusta otettavien sahanpurunäytteiden edustavuutta kosteuden määrittämisen kannalta,
- tutkia tapaustutkimuksena sahanpuru- ja hakenäytteiden kosteuden mittauksessa käytettävien kosteusmittareiden mittaustarkkuutta,
- määrittää energiapuuerien kosteuden määrittämisen edellytyksiä raaka-aineominaisuuksien, niiden luontaisen vaihtelun ja otannan aiheuttaman mittausepävarmuuden kannalta,
- arvioida energiapuuerien kosteuden määrittämisen teknisiä edellytyksiä sahanpurunäytteen ottamisen ja kosteuden mittauksen kannalta.

Latvusmassalla tarkoitetaan ainespuuhakuun sivutuotetta, johon kuuluvat latvat, oksat, neulas ja lehdet. Latvusmassa on synonyymi latvuksille ja oksille (Alakangas ja Impola 2013). Harvennusenergiapuulla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa harvennusenergiä tavallisesti energiakäyttöön korjattavaa kokopuuta ja rankaa.

Mittausmenetelmiä ja -laitteiden tarkkuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä on tässä tutkimuksessa tarkasteltu käyttämällä mittaustieteen (metrologia) menetelmiä ja käsitteitä.

2 Aineistot ja menetelmät

2.1 Harvennusenergiapuun kenttäkoekäytännöt

Harvennusenergiapuun aineistot kerättiin kolmelta korjuukohteelta Pohjois-Karjalassa kesällä 2005. Kullakin korjuukohteella koepuiksi valittiin harvennuksessa poistettavia mäntyjä, koivuja ja

leppiä, 20 koeputa jokaisesta puulajista. Kaadon jälkeen koeputat katkaistiin moottorisahalla pituuden puolivälistä. Katkaisukohtasta otettiin noin kolmen senttimetrin paksuinen kiekkonäyte ja katkaisusaha-uksista – kiekkonäytteen rinnalta – sahanpurunäyte. Sahanpurunäytteet olivat kooltaan 200–400 gramman suuruisia. Kaikilla korjuukohteilla kosteusnäytteitä kerättiin kolmen puulajin (mänty, koivu, leppä) karsimattomista koeputista.

Saman puulajin koeputien karsimattomat latvat tyviosat koottiin kolmeen koenippuun siten, että niput muodostuivat 6–7 koeputasta. Koenipuilla jäljiteltiin metsätraktorin kerrallaan käsittelemää kourataakkaa. Jokaisesta koenipusta otettiin purunäytteet katkaisemalla niput moottorisahalla tyveltä, puolivälistä ja latvapäästä. Koska niput koostuivat runkojen latva- ja tyviosista, saatiin nipun tyviosan sahanpurunäytteeseen puuainetta sekä rungon tyviosasta että latvaosan tyvestä, siis rungon puolivälistä. Vastaavasti nipun puolivälistä otettuun sahanpurunäytteeseen tuli puuainetta rungon tyviosan sekä latvaosan puolivälistä ja nipun latvasta otettuun sahanpurunäytteeseen molempien rungonosien latvapäästä. Eri kohdista otetuissa näytteissä oli näin ollen eri osuudet runkopuuta, oksapuuta, kuorta sekä neulasia ja lehtiä.

Koe toistettiin jokaisella kolmella korjuukohteella kaikilla puulajeilla. Aineisto koostui siten 180 koeputasta (60 mäntyä, 60 koivua ja 60 leppää, 20 koeputa/puulaji/leimikko) ja näistä kerätyistä sahanpuru- ja kiekkonäytteistä. Lisäksi koeputista muodostetuista yhteensä 27 koenipusta (9 mäntynippua, 9 koivunippua ja 9 leppänippua, 3 koenippua/puulaji/leimikko) kerättiin kolmella puulajilla yhteensä 81 sahanpurun laboratorionäytettä. Koenipuista kerätyillä näytteillä kosteus määritettiin rinnakkaisista analyysinäytteistä (162 määrittystä).

Koeputien rinnankorkeusläpimitan ($D_{1,3}$) keskiarvo oli mänyllä 94 millimetriä ja koivulla ja lepällä 93 millimetriä. Koeputien pituuden keskiarvot olivat mänyllä 119, koivulla 120 ja lepällä 113 desimetriä. Koeputien runkopuun tilavuudet määritettiin Laasasenahon (1982) kolmen muuttujan ($D_{1,3}$, D_6 ja h) tilavuusyhtälöillä. Koeputien tilavuuksien keskiarvot olivat mänyllä 47, koivulla 39 ja lepällä 38 kuutiodesimetriä.

2.2 Latvusmassan kenttäkoeaineisto

Latvusmassan aineistot kerättiin metsäkuljetuksen yhteydessä yhteensä 14 kuusen uudistushakkuualalta Pohjois-Karjalassa ja Pohjois-Savossa kesän 2009 aikana. Aineistonkeruu ja kohteiden valinta toteutettiin yhteistyössä alueella energiapuun hankintaa ja korjuuta tekevien yritysten kanssa. Korjuukohteista 12:ssa hakkuu oli päättynyt metsäkuljetusta ja aineiston keruuta edeltäneellä talvikaudella, kahdella kohteella latvusmassan metsäkuljetus tehtiin pian hakkuun jälkeen. Hakkuualoilta kerätyn latvusmassan varastointiaika palstakasoissa oli ollut keskimäärin 29 viikkoa.

Kosteusnäytteiden keruu tehtiin metsäkuljetuskuormien tienvarsivarastoon purkamisen yhteydessä. Näytteet kerättiin kuormaimen kourataakoista, joita valittiin systemaattisesti kuorman päältä, keskiosasta ja pohjalta, yksi jokaisesta kuorman osasta. Sahanpurunäytteiden keräämisessä käytettiin moottorisahaa, johon oli kiinnitetty purunkeräin. Näytteenotossa käytetty moottorisaha oli muilta osin muuntelematon ja siinä oli normaali teräketju. Moottorisahassa käytettiin mineraalipohjaista teräketjuöljyä.

Sahanpurunäytteet otettiin sahaamalla kuormaimen kouraan puristettu latvusmassataakka poikki kouran molemmilta puolilta. Kouran sisään jäänyt osa latvusmassataakasta hakettiin puutarhahakurilla. Hakkeesta otettiin 55 dm³ kokoomanäyte, josta edelleen otettiin noin 10 dm³ laboratorionäyte. Kosteusnäytteitä kerättiin 73 metsäkuljetuskuormasta yhteensä 192 hakenäytettä ja 193 sahanpurunäytettä. Näytteet varastoitiin tiiviissä näytepusseissa pakkasvarastossa ennen laboratoriomittauksia. Hakenäytteistä määritettiin uunikuivauksella kourataakan kosteuden oikeana pidettävä vertailuarvo, johon sahanpurunäytteiden kosteutta verrattiin.

2.3 Kosteuden mittaus kosteusmittareilla

Kosteuden mittauksessa käytettiin nopeaan kosteuden mittaukseen tarkoitettuja Wile BioMoisture -kosteusmittareita. Harvennusenergiapuusta ja latvusmassasta otettujen sahanpurunäytteiden mittaamiseen käytettiin mittakupilla ja latvusmassasta otettujen hakenäytteiden kosteuden mittaamiseen

lautasanturilla varustettua kosteusmittaria.

Latvusmassan hakenäytteiden kosteuden mittaus lautasanturimittarilla tehtiin näytteiden keruun yhteydessä maastossa 55 dm³ kokoomanäytteestä, sillä kyseisen kosteusmittarin käyttö vaatii verraten suureen hakemäärän. Mittaus toistettiin jokaisella kokoomanäytteellä neljä kertaa ja tulosten keskiarvoa käytettiin mittauksen lopullisena tuloksena. Aineisto koostui 168 hakenäytteen kosteushavainnosta.

Sahanpurun kosteuden mittaukset tehtiin laboratorioissa sekä harvennusenergiapuulla että latvusmassalla. Ennen mittauksia sahanpurunäytteistä seulottiin metsämarjojen puhdistamiseen käytettävällä marjaseulalla purunlastua merkittävästi suuremmat partikkelit, jotta näytteet vastaisivat palakooltaan paremmin moottorisahan purua. Suuret partikkelit, muun muassa neulasen saattavat aiheuttaa virhettä mittakupilla varustetun mittauslaitteen mittaustulokseen.

Harvennusenergiapuunäytteen koepuista ja koenipuista kerätyt sahanpurunäytteet mitattiin kukin kerran kosteusmittarilla. Havaintoja mitattiin koepuunäytteistä 180 kappaletta ja nipuista kerätyistä näytteistä 162 kappaletta. Latvusmassa-aineiston sahanpurunäytteiden kosteuden mittaus uusittiin kolme kertaa ottamalla laboratorionäytteestä oma näyte jokaista mittauksia varten. Sahanpurunäytteen lopullinen mittaustulos määritettiin näiden neljän mittaustuloksen keskiarvona. Lisäksi kosteusmittarin mittaustuloksen toistuvuutta testattiin toistamalla saman mittakupillisen mittaus. Latvusmassa-aineiston sahanpurunäytteistä mitattiin yhteensä 193 kosteushavaintoa. Mittaus toistettiin 135 sahanpurunäytteellä.

2.4 Kosteuden ja puuaineen kuivatuoretiheyden määrittäminen

Kaikkien kosteusnäytteiden, mukaan lukien harvennusenergiapuun sahanpuru- ja kiekkonäytteet ja latvusmassan sahanpuru- ja hakenäytteet, kosteudet määritettiin uunikuivausmenetelmällä. Kosteuden määrittäminen tehtiin kahdesta rinnakkaisesta analyysinäytteestä. Näytteiden uunikuivauksessa käytettiin lämpökaappeja, jossa oli vakiolämpötila (+105°C) ja koneellinen ilmankierto. Uunikuivausmenetelmässä noudatettiin teknistä spesifikaatiota CEN/TS 14774-

1:2004 (Suomen standardisoimisliitto 2004).

Harvennusenergiapuuaineiston koepuista kerätyistä kuorellisista kiekkonäytteistä määritettiin kosteuden lisäksi kuivatuoretiheys. Näytteiden tuorepainon mittauksen ja vesipaljussa tehdyn liottamisen jälkeen tuoretilavuus määritettiin upotuspunnitusmenetelmällä. Edelleen näytteiden kuivapainot mitattiin uunikuivauksen jälkeen. Kuivatuoretiheyden määrittämisessä noudatettiin SCAN-test-standardia (Scan CM 43:95 Scandinavian pulp, paper and board testing committee 1995).

2.5 Aineistojen analysointi ja tulosten laskenta

2.5.1 Mittausepävarmuus ja otosmäärä

Mittauksen kokonaisepävarmuus muodostuu mittausepävarmuuden eri tekijöistä. Latvusmassan tai harvennusenergiapuun kosteuden määrittämisessä kokonaisepävarmuus muodostuu näytteiden käsittelystä, mittauksesta, mittauslaitteesta ja mittausmallista aiheutuvista mittausepävarmuuksista. Näiden lisäksi kokonaisepävarmuuteen vaikuttaa näytteiden ottamisesta eli otannasta aiheutuva mittausepävarmuus. Mittauksen yhdistetty standardiepävarmuus voidaan yksinkertaistetusti esittää kaavan 1 mukaisesti. (Suomen standardisoimisliitto 2010, GUM 1995, Hiltunen ym. 2011)

$$u_k = \sqrt{u_o^2 + u_m^2} \quad (1)$$

jossa

u_k = yhdistetty standardiepävarmuus

u_o = otannasta aiheutuva mittausepävarmuus

u_m = mittauksista (näytteiden käsittely, mittaus, mittauslaitte, mittausmalli) aiheutuva mittausepävarmuus

Jos kosteuden määrittäminen tehdään yhdestä näytteestä yhdellä mittauksella, voidaan mittauksen yhdistetty mittausepävarmuus (yhdistetty standardiepävarmuus) esittää kaavan 2 mukaisesti. Kaava 2 pätee silloin, kun käsitellään mittausepävarmuuden tilastollisesti käsiteltäviä, mittauksissa saatuihin havaintoihin perustuvia tekijöitä. Tällöin mittausepävarmuudet voidaan ilmaista keskihajonnan arvoina.

$$u_k = \sqrt{\left(\frac{s_o}{w_o}\right)^2 + \left(\frac{s_m}{w_m}\right)^2} = \sqrt{s_{o\%}^2 + s_{m\%}^2} \quad (2)$$

jossa

u_k = yhdistetty mittausepävarmuus

s_o = kosteuden otoskeskihajonta, % (absoluuttinen arvo)

s_m = mittauksesta aiheutuva kosteuden keskihajonta, % (absoluuttinen arvo)

w_o = kosteuden otoskeskiarvo, %

w_m = kosteuden mittaustulosten keskiarvo, %

$s_{o\%}$ ja $s_{m\%}$ = variaatiokertoimet (suhteellinen keskihajonta)

Jos lopullinen mittaustulos määritetään useiden otosyksiköiden keskiarvona tai mittaustuloksen tulos määritetään useiden havaintojen keskiarvona, pienenee mittausepävarmuus. Tällöin mittauksen yhdistetty standardiepävarmuus voidaan esittää kaavan 3 mukaisesti.

$$u_k = \sqrt{\frac{s_{o\%}^2}{n_o} + \frac{s_{m\%}^2}{n_m}} \quad (3)$$

jossa

n_o = otosmäärä

n_m = toistettujen mittausten lukumäärä

Mittaustieteessä (metrologia) käytetty termi kattavuuskerroin (k) vastaa tilastotieteessä yleisemmin käytettyä t-jakauman arvoa valitulla luotettavuustasolla (Suomen standardisoimisliitto 2010; esimerkiksi Hiltunen ym. 2011). Mittausepävarmuuden perusteella voidaan määrittää kattavuusväli, joka terminä vastaa tilastotieteessä käytettyä termiä luottamusväli (Suomen standardisoimisliitto 2010). Yhdistetyn standardiepävarmuuden perusteella saadaan mittauksen kokonaisepävarmuus kaavalla 4.

$$U_k = k u_k \quad (4)$$

jossa

U_k = mittauksen kokonaisepävarmuus (laajennettu yhdistetty epävarmuus)

k = kattavuuskerroin ($k=2$, kun luotettavuustaso on 95 %)

Latvusmassan otantaan perustuvaa kosteuden määrittämistä tutkittiin otannasta aiheutuvan mittausepävarmuuden ja valittuun mittausepävarmuuden tavoitetasoon vaadittavaan otosmäärän (kosteusnäyttei-

den määrä) kannalta. Otannan mittausepävarmuuden ja otosmäärän määrittämisessä on käytetty kaavaa 5 (Liedes ja Manninen 1975). Otannan mittausepävarmuus tarkoittaa tässä kosteuden otoskeskiarvon oletettua vaihtelua valitulla kattavuuskertoimella.

$$n = \left(\frac{k s_o}{u_o w_o} \times 100\% \right)^2 \quad (5)$$

jossa

n = otosmäärä, näytteiden kappalemäärä

k = kattavuuskerroin ($k = 2$, kun luotettavuustaso on 95%)

s_o = kosteuden otoskeskihajonta, % (absoluuttinen arvo)

w_o = kosteuden otoskeskiarvo, %

u_o = otannasta aiheutuvan mittausepävarmuuden tavoitetaso, %

2.5.2 Kosteuden vaihtelu ja kosteusnäytteiden edustavuus

Sahanpurunäytteiden edustavuutta tutkittiin näytteenottotekniikasta ja -menetelmästä mahdollisesti aiheutuvan systemaattisen ja satunnaisen mittausepävarmuuden kannalta. Harvennusenergiapuun aineistossa yksittäisestä koepuusta sahatun sahanpurunäytteen kosteutta verrattiin kiekkonäytteestä määritettyyn kosteuteen, jota voitiin pitää mahdollisimman oikeana kosteuden vertailuarvona. Vastaavalla tavalla latvusmassan aineistossa sahanpurunäytteet ja samoista kourataakoista otetut hakenäytteet muodostivat vertailuparin. Erityyppisten näytteiden kosteushavaintojen eroa testattiin molemmissa aineistoissa parittaisella t-testillä ja lineaarisella regressioanalyysillä.

2.5.3 Kosteusmittareiden mittaussmallit ja kosteusmittauksen tarkkuus

Tutkimuksessa käytettyjen kosteusmittareiden havainnot mitattiin laitteiden kalibrointiin tarkoitettulla asteikolla, jolla mittauksen tulokseksi saatiin nelinumeroinen, näytteen sähköisiin ominaisuuksiin perustuva näyttämä. Kosteusmittareille laadittiin regressioanalyysillä mittaussmallit, joissa uunikui-vauksella määritettyjä kosteuksia selitettiin kos-

teusmittareiden mittaustuloksilla. Laadittuja mittaussmalleja käytettiin edelleen kunkin kosteusmittarin näyttämien (mittausmallin lähtösuure) muuttamises- sa kosteusarvoiksi (mittausmallin tulossuure).

Harvennusenergiapuun tutkimusaineisto koostui kolmen eri puulajin sahanpurunäytteistä. Puulajien tiheyserojen vaikutus kosteuden mittaukseen huomioitiin regressioanalyysissä luokittelumuuttujilla (dummy-muuttuja) avulla. Koepuista mitatuille havainnoille laaditussa mallissa puulajien vaikutusta kuvattiin kosteusmittarin näyttämän ja puulajin yhteisvaikutus-muuttujilla. Lisäksi mallissa otettiin huomioon sahanpurunäytettä vastaavan kiekkonäytteen kuivatuoretiheys.

Kourataakkojen sahanpurunäytteistä kosteusmittarilla mitatuille havainnoille laadittiin koepuita vastaavalla tavalla regressiomalli, jossa puulajin vaikutus otettiin huomioon luokittelumuuttujilla. Mittarin näyttämän ja puulajin yhteisvaikutuksen lisäksi malliin sisällytettiin katkaisukohdan vaikutusta kuvaava muuttuja, koska eri näytteenkeruukohtien puuaineen oletettiin olevan tiheydeltään eritasoista.

Latvusmassan tutkimusaineistosta laadittiin mittaussmallit sekä hakkeen että sahanpurun kosteutta mitaaville kosteusmittareille. Koska aineisto koostui kuusen latvusmassasta kerätyistä näytteistä, oletettiin mitattavan puuaineen tiheyden olevan likimain vakio. Tämän vuoksi kosteusmittareille voitiin sovitaa regressiomallit koko havaintoaineistolla ilman luokittelevia muuttujia.

Kosteuden mittauksen mittaustarkkuutta analysoitiin vertaamalla kosteusmittarin mittaustuloksia uunikuivausmenetelmällä saatuihin mittaustuloksiin. Vertailun perusteella määritettiin mittauksen todenmukaisuutta ja täsmällisyyttä kuvaavat keski- ja hajontaluvut.

Taulukko 1. Harvennusenergiapuun ja latvusmassan näytemäärät sekä uunikuivausmenetelmällä määritettyjen kosteuksien tunnusluvut.

Näyteyksikkö	Näytetyyppi	Näytemäärä n	Pienin arvo	Suurin arvo	Keskiarvo %	Keskihajonta
<i>Harvennusenergiapuu</i>						
runko	kiekko	180	36,9	60,8	47,8	5,9
	sahanpuru	180	36,7	59,9	48,3	5,0
kourataakka	sahanpuru	162	41,0	57,2	48,8	3,6
<i>Latvusmassa</i>						
kourataakka	hake	192	19,7	60,2	40,5	8,2
kourataakka	sahanpuru	193	19,1	62,9	38,3	8,9

Taulukko 2. Harvennusenergiapuun ja latvusmassan sahanpurunäytteiden kosteuksien ja vertailuarvojen erotusten jakauma.

Näyteyksikkö	Vertailuarvo	±0,5 %	Suhteellinen ero ±1 % ±5 % osuus havainnoista, %		±10 %
<i>Harvennusenergiapuu</i>					
runko	kiekkonäyte	8,3	13,9	77,2	97,2
<i>Latvusmassa</i>					
kourataakka	hakenäyte	2,6	7,3	26,0	45,3

3 Tulokset

3.1 Kosteuden vaihtelu ja kosteusnäytteiden edustavuus

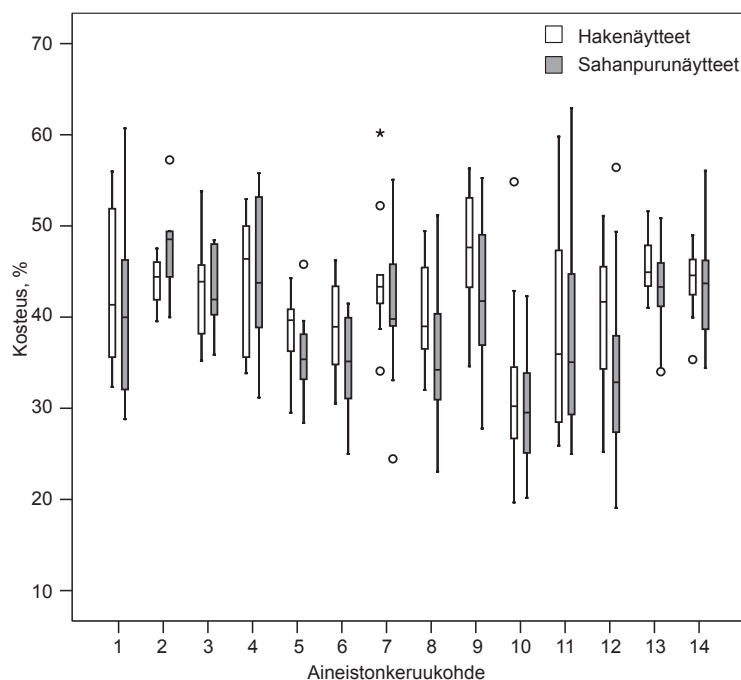
Kosteuden tasoa ja vaihtelua koskevissa tuloksissa kosteuden vertailuarvojen erotukset, näiden keskiluvut ja kosteuden hajontaluvut ovat absoluuttisia arvoja, ellei toisin ole mainittu. Taulukossa 1 on esitetty näytemäärät ja kosteushavaintojen tunnusluvut näytetyypeittäin. Harvennusenergiapuulla kiekkonäytteiden kosteuden keskiarvo oli 47,8 prosenttia ja keskihajonta 5,9 prosenttiyksikköä. Sahanpurunäytteillä vastaavat arvot olivat 48,3 ja 5,0. Kiekko- ja sahanpurunäytteiden kosteuksien välisen eron keskiarvo oli -0,5 prosenttiyksikköä ja keskihajonta 2,1 prosenttiyksikköä. Kosteuksien välinen ero oli koko aineistossa tilastollisesti merkitsevä ($p=0,001$; $t=-3,292$). Kiekko- ja sahanpurunäytteiden kosteuksien vaihteluväli oli lähes yhtenevä; kiekkonäytteillä vaihteluväli oli 23,9 prosenttiyksikköä (36,9–60,8 %) ja sahanpurunäytteillä 23,2 prosenttiyksikköä (36,7–59,9 %).

Harvennusenergiapuun sahanpurunäytteiden kosteuksien suhteellinen ero kiekkonäytteiden kosteuk-

siin verrattuna oli enintään puoli prosenttia vajaassa kymmenessä prosentissa (8,3 %) havainnoista (taulukko 2). Enintään yhden prosentin ero vertailuarvoon oli noin 14 prosentissa havainnoista ja enintään viiden prosentin ero noin kolmessa neljänneksessä havainnoista. Enintään kymmenen prosentin eron sisällä olivat lähes kaikki havainnot.

Harvennusenergiapuun kourataakoista kerätyillä sahanpurunäytteillä kosteuden keskiarvo oli 48,8 prosenttia ja keskihajonta oli 3,6 prosenttiyksikköä (taulukko 1). Kosteuden vaihteluväli oli 41,0–57,2 prosenttia. Harvennusenergiapuun kourataakkojen eri osista sahatuilla purunäytteillä kosteuden keskiarvo oli tyviosassa 46,9 prosenttia, keskiosassa 49,3 prosenttia ja latvosassa 50,2 prosenttia. Erot olivat tilastollisesti merkitseviä. Kourataakkojen kosteuden keskiarvo oli männyllä 51,7 prosenttia, koivulla 45,0 prosenttia ja lepällä 49,5 prosenttia (9 kourataakkaa/puulaji). Puulajien väliset erot olivat tilastollisesti merkitseviä.

Latvusmassalla uunikuivausmenetelmällä määritetty kosteuden keskiarvo oli hakenäytteillä 40,5 prosenttia ja sahanpurunäytteillä 38,3 prosenttia (taulukko 1). Hakenäytteiden ja sahanpurunäytteiden kosteuden eron keskiarvo oli 2,4 prosenttiyksikköä ja eron keskihajonta 6,5 prosenttiyksikköä.



Kuva 1. Latvusmassan hake- ja sahanpurunäytteiden kosteuden laatikkokaaviot (boxplot) korjuukohteittain. Laatikon sisällä oleva viiva on havaintojen mediaani. Laatikon yläreuna osoittaa havaintojen yläkvartiiliin ja alareuna alakvartiiliin. Janat osoittavat havaintojen vaihteluvälin kuitenkin siten, että janojen ulkopuolella olevat yksittäiset havainnot ovat tilastollisesti poikkeavia havaintoja.

Parittaisen t-testin perusteella ero oli tilastollisesti merkitsevä (t-arvo: 5,045; p-arvo: 0,000).

Latvusmassalla sekä hake- että sahanpurunäytteillä kosteuden vaihtelu oli suurta. Kosteuden keskihajonta oli hakkeella 8,2 ja sahanpurulla 8,9 prosenttiyksikköä (taulukko 1). Kosteushavaintojen vaihteluväli oli hakkeella 40,5 prosenttiyksikköä (19,7–60,2%) ja sahanpurulla 43,8 prosenttiyksikköä (19,1–62,9%). Kosteuden tasossa ja sisäisessä kosteusvaihtelun laajuudessa oli suuria eroja korjuukohteiden välillä. Hakkeen kosteuden keskihajonnan pienin arvo oli 2,7 prosenttiyksikköä ja suurin arvo 10,1 prosenttiyksikköä.

Latvusmassan sahanpurunäytteiden kosteuksien suhteellinen ero hakenäytteiden kosteuksiin verrattuna oli enintään puoli prosenttia vajaassa kolmessa prosentissa (2,6%) havainnoista (taulukko 2). Enintään yhden prosentin ero vertailuarvoon oli noin seitsemässä prosentissa havainnoista ja enintään viiden prosentin ero noin neljänneksessä

havainnoista. Enintään kymmenen prosentin eron sisällä oli vajaa puolet havainnoista. Sahanpuru- ja hakenäytteiden kosteusnäytteiden mediaanit ja vaihteluväli korjuukohteittain on esitetty kuvassa 1.

Sahanpurunäytteiden edustavuutta tutkittiin regressioanalyysillä. Harvennusenergiapuulla laadittiin lineaarinen regressiomalli, jossa vertailuarvona käytettävää kiekkonäytteiden kosteutta selitettiin sahanpurunäytteiden kosteudella. Vastaavasti latvusmassalla vertailuarvona käytettävää hakenäytteen kosteutta selitettiin sahanpurunäytteiden kosteudella. Mallien yleinen muoto on esitetty kaavassa 6.

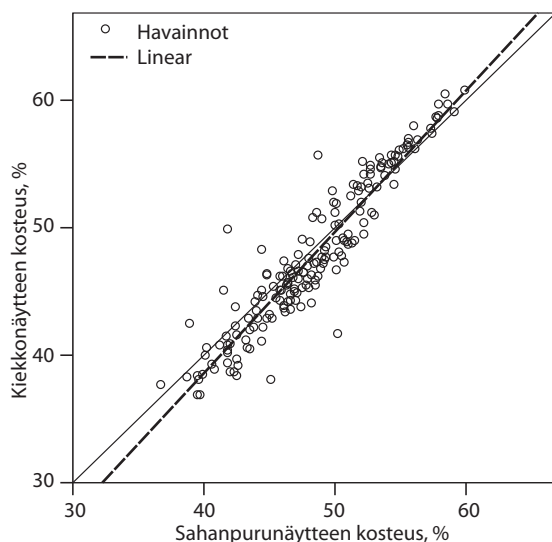
$$w_{vi} = \beta_1 w_{si} + a \quad (6)$$

jossa

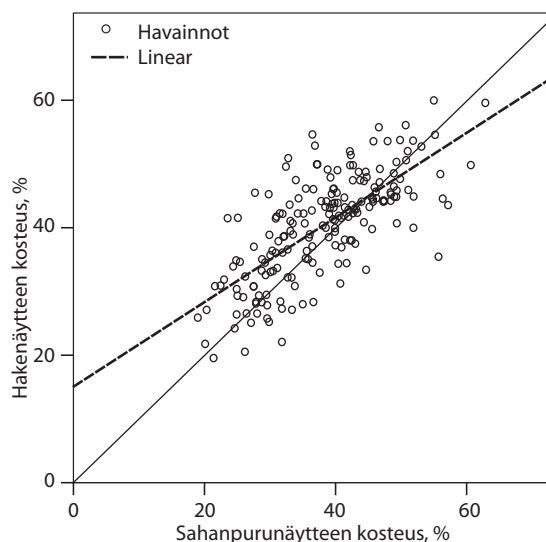
w_{vi} = kiekko- tai hakenäytteen kosteus, % (kosteuden vertailuarvo)

w_{si} = sahanpurunäytteen kosteus, %

β_1 ja a ovat mallin parametreja



Kuva 2. Harvennusenergiapuuaineiston kiekkonäytteiden kosteudet sahanpurunäytteiden kosteuksien funktiona ja lineaarinen regressiosuora ($w_v = 1,108 \times w_s - 5,738$). Kuvaajan lävistäjä ($w_v = w_s$) kuvaa tilannetta, jossa näytteiden kosteudet vastaisivat täysin toisiaan.



Kuva 3. Latvusmassa-aineiston hakenäytteiden kosteudet sahanpurunäytteiden kosteuksien funktiona ja lineaarinen regressiosuora ($w_v = 0,666 \times w_s + 15,109$). Kuvaajan lävistäjä ($w_v = w_s$) kuvaa tilannetta, jossa näytteiden kosteudet vastaisivat täysin toisiaan.

Regressiomallin parametrien arvojen perusteella voidaan arvioida sahanpurunäytteiden kosteuksien ja niiden vertailuarvojen vastaavuutta. Parhaassa tilanteessa parametrin β_1 arvo olisi yksi ja parametrin a arvo nolla, jolloin sahanpurunäytteen kosteudet ja vertailuarvot vastaisivat täysin toisiaan ($w_{vi} = w_{si}$).

Harvennusenergiapuulla regressiomallin parametrin β_1 arvo oli 1,108 ja parametrin a arvo $-5,738$ (kuva 2). Mallin selitysaste oli 0,883 ja mallin keskivirhe 2,0 kosteusprosenttiyksikköä. Sahanpurunäytteiden kosteudet vastasivat hyvin kiekkonäytteiden kosteuksia.

Latvusmassalla regressiomallin parametrin β_1 arvo oli 0,666 ja parametrin a arvo 15,109 (kuva 3). Mallin selitysaste oli 0,517 ja mallin keskivirhe 5,7 kosteusprosenttiyksikköä. Sahanpurunäytteiden kosteudet eivät täysin vastanneet hakenäytteiden kosteuksia (kuva 3).

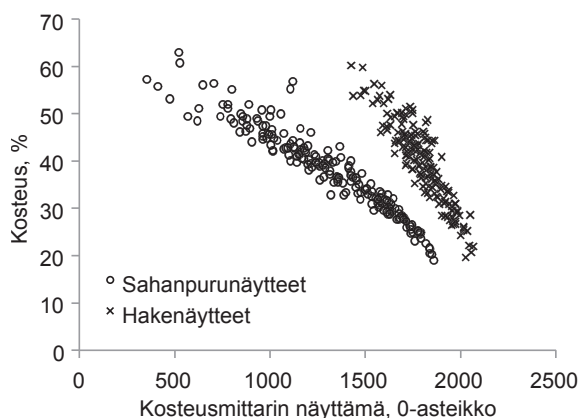
3.2 Kosteusmittareiden mittausmallit

Kosteusmittareille laadittiin regressiomallit (mittausmallit), joissa kosteusnäytteiden unikuiva-

usmenetelmällä määritettyjä kosteuksia selitettiin kosteusmittareiden mittaustuloksilla (perusasteikon näyttämän arvot). Harvennusenergiapuulla mittausmallit laadittiin sekä koepuista että kourataakoista kerätyille sahanpurunäytteille. Latvusmassalla mittausmallit laadittiin erikseen hakenäytteille ja sahanpurunäytteille, joiden kosteuden mittauksessa oli käytetty eri kosteusmittareita. Kuvan 4 hajontakaaviossa on esitetty latvusmassan sahanpuru- ja hakenäytteiden unikuivausmenetelmällä määritetyt kosteushavainnot kosteusmittareiden perusasteikon arvojen suhteen.

Harvennusenergiapuun koepuista kerätyille sahanpurunäytteille laadittu mittausmalli on esitetty kaavassa 7 ja harvennusenergiapuun koepuista kerätyille sahanpurunäytteille laadittu mittausmalli kaavassa 8. Latvusmassalla sekä hake- että sahanpurunäytteille laadittujen mittausmallien yleinen muoto on kaavan 9 mukainen. Mittausmallit ovat parametriensa suhteen lineaarisia toisen asteen yhtälöitä.

Kaavoissa 7–9 käytetyt muuttujat ovat seuraavat:



Kuva 4. Latvusmassan kosteusnäytteiden uunikuivaustulokset kosteusmittareiden 0-asteikon näyttämien funktiona.

w_i = kosteuden vertailuarvo, joka on määritetty uunikuivausmenetelmällä

x_i = kosteusmittarin näyttämä mittarin perusasteikolla

$R_{0,g}$ = puuaineen kuivatuoretiheys, kg/m^3

PL_i = puulajin kuvaava dummy-muuttuja ($PL_{Mä}$ = mänty, PL_{Ko} = koivu, PL_{Le} = leppä)

K_i = nipun katkaisukohtaa kuvaava dummy-muuttuja (K_T = nipun tyviosa, K_K = nipun keskiosa)

$\beta_{1...6}$ ja a = mallien parametreja

$$w_i = \beta_1 x_i^2 + \beta_2 x_i PL_{Mä} + \beta_3 x_i PL_{Ko} + \beta_4 x_i PL_{Le} + \beta_5 R_{0,gi} + a \quad (7)$$

$$w_i = \beta_1 x_i^2 + \beta_2 x_i PL_{Mä} + \beta_3 x_i PL_{Ko} + \beta_4 x_i PL_{Le} + \beta_5 K_T + \beta_6 K_K + a \quad (8)$$

$$w_i = \beta_1 x_i^2 + \beta_2 x_i + a \quad (9)$$

Harvennusenergiapuulla kuivatuoretiheyden keskiarvot olivat männyllä 394 kg/m^3 (keskihajonta 28, vaihteluväli 337–394), koivulla 474 kg/m^3 (keskihajonta 28, vaihteluväli 423–544) ja lepällä 402 kg/m^3 (keskihajonta 32, vaihteluväli 336–495).

Harvennusenergiapuun yksittäisille koepuille laaditussa mittausmallissa (kaava 7) sahanpurunäytteen kosteutta selittäviä muuttujia ovat kosteusmittarin näyttämän neliö, näyttämän ja puulajin yhteisvaikutusmuuttuja ja puuaineen kuivatuoretiheys. Mallin parametrien arvot on esitetty taulukossa 3. Laskettaessa kosteuden arvoa, käytetään vain kyseisen puulajin yhteisvaikutusmuuttujaa ja sen parametrien arvoa. Siten esimerkiksi jos kosteusmittarin näyttämä on 1000, korjataan kosteuden arvoa männyllä +13 prosenttiyksikköä ja koivulla ja lepällä +9 prosenttiyksikköä. Edellisellä tavalla kosteuden arvoa korjataan myös kuivatuoretiheyden perusteella, jonka parametrien arvon mukaisesti kosteus pienenee 3,6 prosenttiyksiköllä kun kuivatuoretiheys kasvaa 100 kg/m^3 .

Harvennusenergiapuun koenipuilla laaditussa mittausmallissa (kaava 8) sahanpurunäytteen kosteutta selittäviä muuttujia ovat kosteusmittarin näyttämän neliö, näyttämän ja puulajin yhteisvaikutusmuuttuja ja nipun katkaisukohtaan muuttuja. Mallin tulossuurena saatavan kosteuden arvoa korjataan puulajin yhteisvaikutusmuuttujalla samalla tavalla kuin koepuille laaditussa mittausmallissa (kaava 7). Malli eroaa koepuille laaditusta mittausmallista siten, että muuttujana ei käytetä puuaineen kuivatuoretiheyttä. Mittausmallien (kaavat 7 ja 8) käyttö johtaa likimäärin yhtä suuriin puulajien välisiin eroihin kosteuden arvoissa.

Harvennusenergiapuun koenippujen mittausmallissa (kaava 8) kosteuden arvoa korjataan sen

Taulukko 3. Regressiomallien parametrit aineistoittain ja näytetyypeittäin. Malleja käytettiin kosteusmittareiden havaintojen ennustamisessa kosteusprosentteiksi.

	Kaava	Mallien parametrit						R^2	SEE	
		β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6			
Harvennusenergiapuu										
runko	7	-8,506E-06	0,013	0,009	0,009	-0,036		64,406	0,809	2,199
kourataakka	8	7,797E-07	-0,008	-0,012	-0,01	-0,307	0,609	58,456	0,820	1,555
Latvusmassa										
hake	9	-4,363E-05	0,097					7,673	0,836	3,504
sahanpuru	9	-7,631E-06	-0,006					60,418	0,923	2,495

Taulukko 4. Harvennusenergiapuun aineiston koepuista ja koenipuista kerättyjen sahanpurunäytteiden ja kosteusmittarin havainnoista ennustettujen kosteuksien välisen suhteellisen mittaeron luokittaiset osuudet havainnoista.

Aineisto		±0,5 %	Suhteellinen ero		
			±1 %	±5 %	±10 %
		Osuus havainnoista, %			
Koepuu	Sahanpuru – kosteusmittari	6,1	19,4	76,1	97,2
Koenippu	Sahanpuru – kosteusmittari	16,7	29,6	90,1	99,4

perusteella, mistä kohdasta nippua kosteusnäyte otetaan. Mallissa tämä on esitetty nipun katkaisukohtaa kuvaavana dummy-muuttujana. Tämän muuttujan ja kyseisten parametrien arvojen mukaisesti jos sahanpurunäytteet kerätään nipun keskeltä, kosteuden arvoon lisätään arvo 0,609 prosenttiyksikköä (taulukko 3, kaava 8, parametri β_6). Jos sahanpurunäytteet kerätään nipun tyveltä, kosteuden arvosta vähennetään arvo $-0,307$ prosenttiyksikköä (taulukko 3, kaava 8, parametri β_5). Latvusmassalla sekä hakkeelle että sahanpurulle laadituissa mittausmalleissa kosteuden selittävänä muuttujana oli kosteusmittarin näyttämän neliö ja kosteusmittarin näyttämä (kaava 9).

Mittausmallien parametrien arvot, selitysasteet ja ennusteen keskivirheet (SEE, *standard error of the estimate*) on esitetty taulukossa 3. Kaikki mittausmallit selittivät yli 80 prosenttia kosteuden vaihtelusta, latvusmassan sahanpurulla yli 90 prosenttia. Ennusteen keskivirhe voidaan tässä käsittää myös mittauksesta aiheutuvana mittaustuloksen satunnaisena mittauserpävarmuutena. Tähän mittauserpävarmuuteen vaikuttavat paitsi mittauslaitteesta, myös vertailumenetelmästä (uunikuivausmenetelmä), mittauksen tekemisestä ja näytteiden käsittelystä aiheutuvat mittauserpävarmuuden osatekijät. Mittauksen mittauserpävarmuuden pienin arvo oli noin 1,5 prosenttiyksikköä ja suurin noin 3,5 prosenttiyksikköä.

3.3 Kosteusmittareiden tarkkuus

Sahanpuru- ja hakenäytteille määritettiin kosteusprosentti (%) tutkimuksessa laadituilla mittausmalleilla. Määrittäessä käytettiin kosteusnäytteille mitattuja kosteusmittareiden perusasteikon ja näytteille määritettyjä kuivatuoretiheyden arvoja sekä nipun katkaisukohtia.

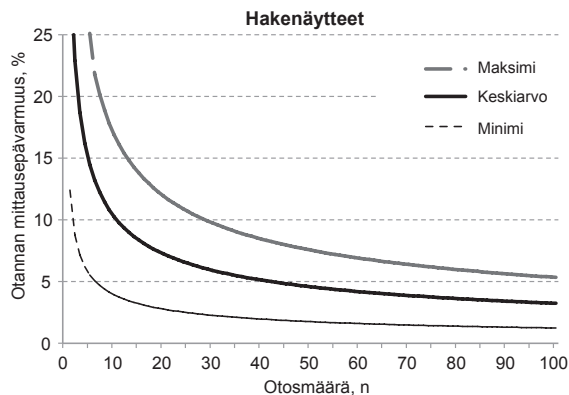
Taulukko 5. Latvusmassa-aineiston hake- ja sahanpurunäytteiden kosteuksien ja kosteusmittareiden havainnoista ennustettujen kosteuksien välisen suhteellisen mittaerojen luokittaiset osuudet havainnoista näytetyypeittäin.

Aineisto	±0,5 %	Suhteellinen ero		
		±1 %	±5 %	±10 %
		Osuus havainnoista, %		
Hakenäytteet	5,4	10,7	44,6	69,6
Sahanpurunäytteet	6,7	14,5	59,6	89,6

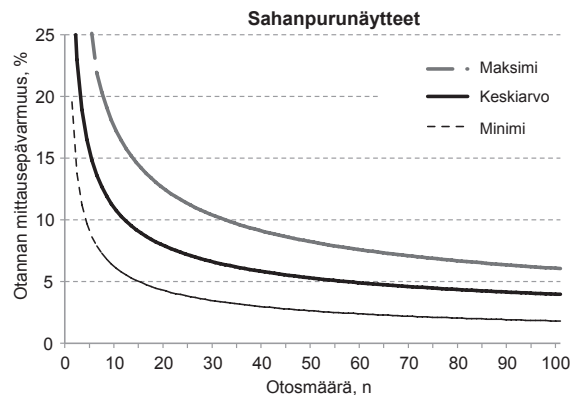
Taulukossa 4 on esitetty kosteusmittareilla ja uunikuivausmenetelmällä määritettyjen kosteuksien suhteellisten erojen jakauma harvennusenergiapuulla. Sekä koepuista että koenipuista kerättyissä aineistoissa lähes kaikki havainnot olivat enintään kymmenen prosentin etäisyydellä uunikuivausmenetelmällä määritetystä kosteudesta. Taulukossa 5 on esitetty vastaava kosteuksien suhteellisten erojen jakauma latvusmassan sahanpuru- ja hakenäytteillä. Sahanpurulla erojen jakauma oli samankaltainen harvennusenergiapuulle määritettyihin jakaumiin nähden. Hakkeella ero oli enintään kymmenen prosenttia noin kahdessa kolmanneksessa havainnoista.

Latvusmassan sahanpurunäytteillä tutkittiin kosteuden mittauksen toistettavuutta määrittämällä saman näytteen kosteus kaksi kertaa muuttumattomissa olosuhteissa. Ensimmäisen mittauksen toisto tehtiin 135 kosteusnäytteelle. Kosteuden keskiarvo oli ensimmäisessä mittauksessa 38,1 prosenttia ja toisessa 38,6 prosenttia. Näitä vastaavat kosteuksien keskihajonnat olivat 8,3 ja 8,6 prosenttiyksikköä. Eron keskiarvo oli 0,5 prosenttiyksikköä ja keskihajonta 1,1 prosenttiyksikköä. Suhteellisten mittaerojen jakauma on esitetty taulukossa 5.

Mittauksen toistettavuuden tilastollinen testaaminen tehtiin kosteusmittarin perusasteikon mukaisil-



Kuva 5. Latvusmassan hakenäytteiden otannan kokonaisuusvarmuus (95 % luottamustaso) otosmäärän suhteen. Keskiarvo (korjuukohteiden näytemäärällä painotettu otoskeskihajonnan keskiarvo) kuvaa tutkimusaineiston perusteella tyypillistä latvusmassan korjuukohdetta. Minimi ja maksimi kuvaavat tutkimusaineiston yksittäisten korjuukohteiden vaihteluväliä.



Kuva 6. Latvusmassan sahanpurunäytteiden otannan kokonaisuusvarmuus (95 % luottamustaso) otosmäärän suhteen. Keskiarvo (korjuukohteiden näytemäärällä painotettu otoskeskihajonnan keskiarvo) kuvaa tutkimusaineiston perusteella tyypillistä latvusmassan korjuukohdetta. Minimi ja maksimi kuvaavat tutkimusaineiston yksittäisten korjuukohteiden vaihteluväliä.

le mittaustuloksille, jolloin mittausmallin käyttö ei vaikuttanut tulokseen. Kosteuden mittauksen tulos oli toistomittauksessa keskimäärin ensimmäistä suurempi. Ero oli tilastollisesti merkitsevä ($p < 0,001$; $t = 6,205$). Mittauksen täsmällisyys, jota keskihajonta kuvaa, oli varsin hyvä. Mittauksen toisto voi aiheuttaa mittaukseen systemaattista virhettä.

Latvusmassan sahanpurunäytteillä tutkittiin kosteuden mittauksen uusittavuutta ottamalla samasta näytteestä mitattavaksi neljä analyysinäytettä. Neljän mittauksen variaatiokertoimen (suhteellinen keskihajonta) keskiarvo laboratorionäytteiden välillä oli 2,6 prosenttia. Latvusmassan hakenäytteillä kosteuden määrittäminen tehtiin mittaamalla kosteus neljä kertaa kokoomänäytteestä. Hakkeella neljän mittauksen variaatiokertoimen keskiarvo oli 2,0 prosenttia.

3.4 Mittausepävarmuus ja otosmäärä

Latvusmassan hake- ja sahanpurunäytteiden otannan laajennettua ($k = 2$) mittausepävarmuutta on tarkasteltu kuvissa 5 ja 6. Laskennassa on käytetty kaavaa 5. Laskennassa käytetyt kosteuden otoskeskihajonnat (s_o) on määritetty tutkimusaineistojen uunikuivausmenetelmällä määritetyistä kosteushavainnoista. Tällöin tarkastelussa ei ole mukana kosteusmittareiden

käytöstä aiheutuvaa mittausepävarmuutta.

Kuvissa 5 ja 6 keskiarvo -kuvaajat on määritetty käyttämällä laskennassa korjuukohteiden sisäisen kosteuden keskihajonnan (variaatiokerroin) painotettua keskiarvoa. Painotus tehtiin käyttämällä laskennassa tutkimusaineiston korjuukohteiden näytemääriä. Hakenäytteillä painotettu keskihajonnan keskiarvo oli 16,2 prosenttia ja sahanpurunäytteillä 19,1 prosenttia. Siten sahanpurunäytteiden otoksen on oltava suurempi, jotta saavutettaisiin sama otannan epävarmuus kuin hakenäytteillä. Hakkeella otannan mittausepävarmuudessa saavutettiin kymmenen prosenttia (suhteellinen) noin kymmenellä näytteellä ja viisi prosenttia noin 40 näytteellä. Sahanpurunäytteillä kymmenen prosentin tasoon päästiin 14 näytteellä ja viiden prosentin tasoon 55 näytteellä. On huomattava, että tässä esitetty mittausepävarmuus kuvaa kosteuden satunnaisvaihtelusta aiheutuvaa epävarmuutta. Mahdolliset otannasta aiheutuvat systemaattiset virheet on otettava huomioon kokonaisuusvarmuutta arvioitaessa.

Kosteuden keskiarvo ja keskihajonta vaihtelivat merkittävästi korjuukohteiden välillä. Kuvissa 5 ja 6 on esitetty latvusmassan hake- ja sahanpurunäytteiden otannan mittausepävarmuus niillä kohteilla, joissa kosteuden keskihajonta oli suurin tai pienin. Hakkeella korjuukohteella, jossa variaatiokerroin

oli pienin, otannan viiden prosentin suhteellinen mittausepävarmuus saavutettiin kuudella näytteen otosmäärällä. Vastaavasti korjuukohteella, jossa kosteuden variaatiokerroin oli suurin, viiden prosentin mittausepävarmuus saavutettiin 110 näytteen otosmäärällä. Sahanpurulla vastaavat näytteiden otosmäärät olivat 14 ja 130.

4 Tulosten tarkastelu

4.1 Kosteuden vaihtelu ja kosteusnäytteiden edustavuus

Harvennusenergiapuulla kosteusnäytteitä kerättiin yksittäisistä koerungoista ja koerunkojen muodostamista koenipuista. Koerungoista määritetyn kosteuden keskiarvo oli männyllä 51,7, koivulla 45,0 ja lepällä 49,5 prosenttia. Kosteuden taso vastasi kohtalaisen hyvin aiempien tutkimusten tuloksia tuoreen puun kosteudesta. Hakkilan ym. (1995) tutkimuksessa ensiharvennusmännyn kuorellisen runkopuun kosteus oli lumettomana aikana 57–60 prosenttia. Hakkilan (1962) tutkimuksessa määritettiin pienikokoisen kaatotuoreen harvennusenergiapuun kosteuden vaihtelua vuodenajoin. Vuoden eri kuukausina kosteus vaihteli männyllä 50–55, koivulla 38–50 ja lepällä 45–53 prosenttia. Vastavan tasoisia tuoreen puun kosteuksia ovat esittäneet myös Simola ja Mäkelä (1976), Nisula (1980), Uusvaara ja Verkasalo (1987), sekä Hillebrand ja Nurmi (2004).

Harvennusenergiapuun koepuilla kiekko- ja sahanpurunäytteiden kosteuksien ero oli tilastollisesti merkitsevä. Ero oli kuitenkin pieni ja sillä ei ole merkitystä käytännön sovellusmahdollisuuksien kannalta. Harvennusenergiapuun yksittäisistä koepuista otettujen ja kourataakoista otettujen sahanpurunäytteiden kosteudet olivat lähellä toisiaan.

Harvennusenergiapuun kourataakoista kerätyillä näytteillä havaittiin merkitsevät erot näytteiden kosteuden tasossa näytteenottokohdan mukaan. Suurin kosteus havaittiin taakkojen latvaosissa, josta kosteus aleni kourataakan tyveä kohti. Tulos oli johdonmukainen siihen useissa tutkimuksissa määritettyyn tulokseen nähden, että puurunkojen kosteus kasvaa tyvestä latvaan päin (mm. Hakkila 1962; Björklund

ja Ferm 1982).

Tässä tutkimuksessa kaatotuoreen latvusmassan kosteuden keskiarvot olivat 44–46 prosenttia. Tulos vastasi hyvin muiden tutkimusten tuloksia. Kärkkäisen (1976) tutkimuksessa kuusen oksien kosteus oli 46 prosenttia. Hakkilan (1991) tutkimuksessa kaatotuoreen latvusmassan kosteus Etelä-Suomessa oli kuusella 51 prosenttia. Uusvaaran ja Verkasalon (1987) tutkimuksessa puolestaan kesällä haketetun latvusmassahakkeen kosteus oli vihreällä materiaalilla 48,5 prosenttia. Lisäksi kosteuksien hajonnat ja leimikkokohtaiset vaihteluvälit vastasivat tässä tutkimuksessa havaittuja. Kärkkäisen (1976) mukaan puuaineen kosteus oli kuusella eripaksuisista oksapaloista määritettynä 45,5 prosenttia. Nurmen (1994) tutkimuksessa palstalla varastoidun latvusmassan kosteus oli 47 prosenttia. Samoin Lindbladin ym. (2013) tutkimuksessa kahdeksan latvusmassan korjuukohdetta käsittäneessä tutkimuksessa kaatotuoreen latvusmassan kosteuden keskiarvo oli 47 prosenttia. Tässä tutkimuksessa latvusmassan kosteuden hajonta näytteiden välillä oli selvästi suurempaa palstalla jo varastoidulla latvusmassalla kuin kaatotuoreella, juuri hakatulla latvusmassalla. Tulos tukee käytännön latvusmassan korjuussa ja hankinnassa saatuja havaintoja latvusmassan epätasaisesta kuivumisesta palstalla.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia sahanpurunäytteen soveltuvuutta latvusmassan kosteuden määrittämiseen. Kosteuden mahdollisimman oikeana pidettävät vertailuarvot määritettiin hakenäytteistä. Hake- ja sahanpurunäytteiden kosteuksien ero oli tilastollisesti merkitsevä. Todennäköisin yksittäinen sahanpurunäytteiden kosteuksiin vaikuttava tekijä tämän tutkimuksen aineistossa oli niiden käsittelyssä. Sahanpurunäytteet seulottiin laboratoriossa näytteiden tasalaatuisuuden ja kosteusmittarilla tehdyn mittauksen teknisen toteutettavuuden parantamiseksi. Seulonnan yhteydessä näytteistä poistettiin lähes yksinomaan vihreää materiaalia eli neulasia ja versoja yhdessä erikokoisten oksankappaleiden kanssa. Latvusmassan kosteus on suurinta lehdissä ja oksan ohuiden osien kuoreissa (Hakkila 1989 ja 1991). Lisäksi havupuiden neulasten kosteus on yleisesti 50–60 % (Hakkila 1989). Edelleen neulasten osuus tuoreen latvusmassan kuivamassasta on noin kolmannes ja neulasmassa pienentyy varastointiajan suhteen siten, että vuoden varastoinnin

jälkeen syyskuussa neulasten osuuden on raportoitu olleen enää 6,9 % (Nurmi 1999a,b; Hakkila 1991). Tämän vuoksi on mahdollista, että neulasmassaan kohdistunut seulonta on vaikuttanut systemaattisesti sahanpurunäytteiden kosteustasoon.

Sahanpurunäytteillä kosteuden keskihajonta oli suurempi kuin hakenäytteillä. Sahanpurunäytteiden käyttö kosteuden määrittämisessä ei edellyttää suurempaa näytemäärää saman tilastollisen mittauspävarmuuden saavuttamiseksi. Oleellista on myös sulkea pois systemaattisen virheen mahdollisuudet näytteen otossa ja näytteiden käsittelyssä.

4.2 Kosteusmittareiden mittausmallit

Aineistojen pienuudesta johtuen tässä tutkimuksessa ei ollut edellytyksiä puulajikohtaisten mallien laatimiseen. Kun kuitenkin mitattavan materiaalin tiheyden tiedettiin vaikuttavan mittauksen tarkkuuteen kapasitiivisen toimintaperiaatteen kosteusmittareissa (Forsén ja Tarvainen 2000; Jensen ym. 2006) otettiin kuivatuoretiheyden vaihtelu harvennusenergiapuulla huomioon mallintamalla puulajin vaikutus. Koepuiden havainnoille mallinnettiin puulajin lisäksi kiekkonäytteiden kuivatuoretiheyden vaikutus. Puulajin, puuaineen tiheyden ja nippujen katkaisukohdan vaikutukset mittaustulokseen ovat verraten pieniä. Koska ne kuitenkin vaikuttavat mittaustulokseen systemaattisesti, on käytännön sovelluksissa otettava huomioon näiden tekijöiden edellyttämät mittaustuloksen korjaukset.

Latvusmassalla näytteet kerättiin yhden puulajin materiaalista, eikä havaintoaineistoja tarkastelemalla havaittu mittauksen tarkkuuteen vaikuttavia luokittelevia tekijöitä. Sen sijaan harvennusenergiapuulla puulajikohtaiset kosteushavainnot olivat merkittävästi eri tasoilla, minkä vuoksi tämä otettiin huomioon kosteusmittarivaihtojen mallintamisessa.

Kosteusmittareilla hake- ja sahanpurunäytteistä mitatut havainnot korreloivat vahvasti näytteiden uunikuivaustulosten kanssa. Mittareille laadittujen regressiomallien selitysasteet olivat korkeat ja ennusteiden keskivirheet verraten pieniä.

4.3 Kosteusmittareiden tarkkuus

Kosteusmittareiden mittaussmalleilla määritettyjä kosteusarvoja verrattiin mahdollisimman oikeana pidettävään vertailuarvoon, uunikuivausmenetelmällä määritettyyn kosteuteen. Koska vertailu tehtiin kosteusmittareiden mittaussmallien laskenta-aineistossa, tarkastelu ilmentää lähinnä mittauksen ja mittaussmallien täsmällisyyttä.

Sekä harvennusenergiapuun että latvusmassan laskenta-aineistoissa sahanpurumittarilla mittaustulosten suhteellinen ero oli enintään ± 10 prosenttia vähintään 90 prosentissa havainnoista, kun hakenäytteillä vastaava luku oli noin 70 prosenttia havainnoista. Sahanpurumittarin parempi tulos suhteellisen mittaeron tarkastelussa selittynee mittaolosuhteilla ja käytetyllä regressiomallilla. Sahanpurumittarilla mittaukset tehtiin laboratorioissa vakioilämpötilassa. Lisäksi mittajaan vaikutus mittaustulokseen on todennäköisesti pienempi sahanpuru- kuin hakemittarilla, koska sahanpurumittarilla mittausta vakioidaan kierrettävällä korkilla, kun taas hakemittarilla vakiointi tapahtuu mittajaan painaessa mittaria näytettä vasten. Jensen ym. (2006) ovat tehneet vastaavan päätelmän. Toisaalta kosteuksien ennustamiseen käytetyn regressiomallin selityskyky oli sahanpurunäytteillä hakenäytteiden vastaavaa parempi. Havaintojen pisteparvista voidaan kuitenkin päätellä, että myös mittareiden herkkyyksissä havaita näytteen kosteuden muutoksia on eroja (kuva 4).

Harvennusenergiapuaineistossa mittaasepävarmuus oli vastaavalla tasolla kuin Forsénin ja Tarvaisen (2000) vertailemilla kapasitiivisen toimintaperiaatteen kosteusmittareilla. Näin siitäkin huolimatta, että tässä tutkimuksessa mittaukset tehtiin kosteuden hajonnaltaan ja vaihteluväliltään suuremmalle sahanpurulle, eikä säännellyissä olosuhteissa valmistetuille puutavaranäytteille. Forsénin ja Tarvaisen (2000) mukaan mittarin näyttämille tehty mitattavan materiaalin tiheyskorjaus paransi mittauksen tarkkuutta merkittävästi. Tämän vuoksi tässä tutkimuksessa tiheyden vaikutus otettiin huomioon mittarille laadituissa regressiomalleissa, joissa tiheyttä kuvattiin puulajimuuttujilla.

Sahanpurunäytteiden havaintoaineistossa ilmeni heteroskedastisuutta, kun mittarin havaintojen hajonta kasvoi eli toisin sanoen mittarin mittaasepävarmuus kasvoi mitattavan näytteen kosteuden kasvaes-

sa. Saman ovat havainneet muun muassa Jensen ym. (2006) ja Fridh (2012). Lisäksi tarkkuus heikkenee kosteuden ylittäessä puun syiden kyllästymispisteen. Tämän tutkimuksen aineistossa puun syiden kyllästymispisteen vaikutus tuloksiin lienee pieni, koska näytteiden kosteudet olivat pääosin reilusti sitä suurempia. Kärkkäisen (2007) mukaan puun syiden kyllästymispiste on kuusella huoneenlämpötilassa alle 30 %:n kosteudessa.

Kapasitiivisella toimintaperiaatteella toimiville kosteusmittareille on raportoitu tuloksia, joissa testattujen mittareiden mittaustuloksista 1–20 prosentissa poikkeama on ollut enintään $\pm 0,5$ prosenttia (Forsén ja Tarvainen 2000). Tutkimus on kuitenkin tehty kuivatulle sahatavaralle, eivätkä esitetyt tulokset ole täysin vertailukelpoisia tämän tutkimuksen kanssa, koska latvusmassanäytteet ovat heterogeenisempiä ja kosteuden vaihtelu on niissä huomattavasti suurempaa. Muuten tämän tutkimuksen tulokset kosteusmittareille ovat osin vastaavia Forsénin ja Tarvaisen tulosten kanssa. Fridh (2012) tutki samanlaisen hakemittarin mittaustarkkuutta kuin tässä tutkimuksessa. Fridh käytti mittarin sisäänrakennettuja mittaussalleja ja niiden mukaisesti mittarin tuottamia kosteuden arvoja. Fridhin tutkimuksessa hakemittari tuotti selvästi useammin kosteuden positiivisia kuin negatiivisia mittausrvirheitä. Tuunasen tutkimuksissa (2013 ja Tuunanen ym. 2014), joissa käytettiin samanlaisia hake- ja sahanpurumittareita, mittarit tuottivat sekä positiivisia että negatiivisia systemaattisia mittausrvirheitä sen mukaisesti, mistä puutavaralajista (latvusmassa, energiaranka) näyte oli otettu. Tämän tutkimuksen perusteella voidaan arvioida, että käyttämällä mitattavalle puutavaralajille sopivaa mittaussmallia, jossa otetaan huomioon puulajin ja puuaineen tiheyden vaihtelu, edellisen kaltaiset systemaattiset virheet voidaan korjata.

Kosteusmittarin mittaustuloksien toistuvuus oli sahanpurunäytteillä hyvä. Kolmannes toistojen tuloksista oli korkeintaan prosentin etäisyydellä ensimmäisen mittauksen tuloksesta. Tulos kertoo kosteusmittarista ja mittauksen tekemisestä johtuvasta satunnaisesta mittausepävarmuudesta, joka siten sisältyy myös kosteuden määrittämisen kokonaisvirheeseen. Mittarin satunnaisvirheen lisäksi kosteuden määrittämisen tarkkuuteen vaikuttavat mittaolosuhteet, jotka osaltaan selittävät myös eroa mittauksen tarkkuudessa hake- ja sahanpurunäytteiden välillä.

Lämpötilan vaikutuksen kapasitiivisen toimintaperiaatteen kosteusmittareiden tarkkuuteen on kuitenkin todettu olevan hyvin pieni. Sen sijaan mitattavan materiaalin tiheys vaikuttaa oleellisesti mittauksen tarkkuuteen (Forsén ja Tarvainen 2000; Jensen ym. 2006). Lisäksi tässä tutkimuksessa mittareiden kosteustulosten mallintamiseen käytetyt regressiomallit sisältävät virhelähteen.

4.4 Mittausepävarmuus ja otosmäärä

Kosteuden määrittämiseen tarvittava otosmäärä riippuu vahvasti otannalle sallitun virheen suuruudesta, toisin sanoen raja-arvoksi asetetusta otannan mittausepävarmuudesta. Mitä tarkemmin latvusmassan keskikosteus halutaan määrittää sitä suuremmaksi muodostuu tarvittavien näytteiden määrä. Kosteuden keskihajonta mittauserässä vaikutti kuitenkin vaadittavaan otosmäärään suhteellisesti eniten. Verkasalon (1987) mukaan metsähakkeen kosteuden keskihajonta oli 4,3 prosenttiyksikköä, kun se tämän tutkimuksen hakenäytteissä oli 8,2. Tämän vuoksi nyt esitetyt otosmäärät ovat vaaditusta otantatarkkuudesta riippumatta 30 prosenttia Verkasalon esittämiä suuremmat. Vastaavasta syystä sahanpurunäytteillä lasketut otosmäärät ovat suurempia kuin hakenäytteillä.

Metsäkuljetuksen yhteydessä tehtävää latvusmassan kosteuden määrittämistä ajatellen tässä tutkimuksessa määritetyt otosmäärät ovat suuria. Tarkoituksenmukaisen otannan mittausepävarmuuden saavuttaminen edellyttää välttämättä sellaisia otosmääriä, joita on haasteellista saavuttaa kohtuullisella työmäärällä ja kustannuksilla. Käytännön mittaus toiminnan kannalta tulisi ensin määrittää otantavirhetaso, jolla mittaukselta saadaan vielä lisäarvoa ja tämän jälkeen harkita, onko riittävän otannan järjestämiselle edellytyksiä.

4.5 Johtopäätökset

Harvennusenergiapuulla ja etenkin latvusmassalla kosteuden luontainen vaihtelu on melko suurta. Ajatellen käytännön sovelluksia puutavaraerien kosteuden määrittämisessä suuri hajonta johtaa melko suuriin otosmääriin, jotta tarkoituksenmukaiseen

otannan mittausepävarmuuteen päästäisiin. Lisäksi esimerkiksi palstalla varastointi tyypillisesti lisää kosteuden vaihtelua ja siten lisää tarvittavaa otosmäärää. Käytännössä otosmäärät ovat aina niin suuria, että manuaalinen näytteenotto ei tule kysymykseen. Riittävä otosmäärä sen sijaan voisi olla mahdollinen jo kehitteillä olevalla koneellisella näytteenottolaitteella (Holopainen ym. 2012). Menetelmän kustannuksia sekä otannan, näytteiden käsittelyn ja työajanmenekin kannalta on tutkinut Tuunanen (2013).

Tilastollisen mittausepävarmuuden ja siihen perustuvan otosmäärän lisäksi otannassa on otettava huomioon näytteiden edustavuus. Oleellista on otannan puulajien ja puun eri osien (kuori, puuaine, oksat, neulaset, lehdet) oikea suhde näiden tiheys- ja kosteuserojen vuoksi. Edustavuuden lisäksi näytteen ottamisessa on otettava huomioon kosteusmittarin edellytykset: näytteen tulee olla riittävän tasalaatuinen ja kapasitiiviseen kosteuden määrittämiseen merkittävästi vaikuttavan materiaalin tiheyden tulee olla vakio (Forsén ja Tarvainen 2000). Sahanpurunäytteiden käsittely, muun muassa mittauslaitteen käytön kannalta ylipitkien jakeiden tai neulasten poistaminen voi johtaa systemaattisiin tosin verraten pieniin mittausvirheisiin.

Energiapuun kosteuden mittauksen kannalta kosteusmittareiden kyky tuottaa sahanpurunäytteillä toistuvia ja todenmukaisia mittaustuloksia on hyvällä tasolla. Sen sijaan edustavan näytteen kerääminen on haasteellista onnistuneen kosteuden määrittämisen kannalta.

Kirjallisuus

- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettyjen polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Tiedotteita 2045. 172 s. + liitteet.
- & Impola, R. 2013. Puupolttolaitteiden laatuohje. VTT-M-07608-13. Bioenergia ry, Energiateollisuus ry ja Metsäteollisuus ry. 64 s.
- Björklund, L. 1988. Vägning av massaved med torrhaltsbestämning. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för virkeslära, Uppsala.
- Björklund, T. & Ferm, A. 1982. Pienikokoisen koivun ja harmaalepän biomassan ja tekniset ominaisuudet. Folia Forestalia 500. 37 s.
- Forsén, H. & Tarvainen, V. 2000. Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters. VTT Publications 420.
- Fridh, L. 2012. Utvärdering av portabla fukthaltsmätare. Evaluation of portable moisture meters. Skogsforsk. Arbetsrapport 782/2012. 34 s.
- GUM 1995. (2013). Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty on measurement. SFS-Käsikirja 40. Mittausepävarmuus.
- Hakkila, P. 1962. Polttohakepuun kuivuminen metsässä. Metsätutkimuslaitoksen julkaisuja – Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 54(4). 82 s.
- 1989. Utilization of residual forest biomass. New York: Springer-Verlag.
- 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa. Folia Forestalia 773.
- , Kalaja, H. & Saranpää, P. 1995. Etelä-Suomen ensiharvennuskannikot kuitu- ja energialähteenä. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 582. 99 s.
- Heikkilä, J., Lindblad, J., Hujo, S. & Verkasalo, E. 2004. Pienten kuitupuuerien mittaus puutavara-auton kuormainva'alla. Metsätieteen aikakauskirja 4/2004: 527–540.
- Hillebrand, K. & Nurmi, J. 2001. Hakkuutähteiden laadunhallinta. VTT Energian raportteja 2001(2). 51 s. + liitt. 11 s.
- & Nurmi, J. 2004. Nuorista metsistä korjatun energiapuun kuivatus ja varastointi. VTT Prosessit, Projektiraportti PRO2/P6014/04.
- Hiltunen, E., Linko, L., Hemminki, S., Hägg, M., Järvenpää, E., Saarinen, P., Simonen, S. & Kärhä, P. 2011. Laadukkaan mittaamisen perusteet. Metrologian neuvottelukunta. MIKES julkaisu J4/2011. 134 s.
- Hokka, T. & Vuorenperä, T. 2001. Kuitupuun tehdasmittauksen kehittäminen. Metsätehon raportti 103. 57 s.
- Holopainen, M., Melkas, T. & Lindblad, J. 2012. Energiapuun kosteuden määrittäminen metsäkuljetuksen yhteydessä. Metsätehon tulosalvosarja 8/2012.
- Hujo, S. 2006. Kuormainvaakojen punnitustarkkuus. Metsätehon tulosalvosarja 02/2006. http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tulosalvosarja/Tulosalvosarja_2006_02.pdf
- Hultnäs, M. 2012. Weight scaling – methods to determine the quantity of pulpwood. Doctoral thesis, SLU, Department of Forest Products, Uppsala. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae 2012:34. 64 s.
- Jensen, P.D., Hartmann, H., Böhm, T., Temmerman, M., Rabier, F. & Morsing, M. 2006. Moisture content de-

- termination in solid biofuels by dielectric and NIR reflection methods. *Biomass & Bioenergy* 2006(30): 935–943.
- Järvinen, T., Malinen, J., Tiitta, M. & Teppola, P. 2007. State of art – selvitys puun kosteusmittauksesta. VTT, Tutkimusraportti VTT-R-013325-07. 90 s.
- Korpilahti, A. & Melkas, T. 2010. Kosteuden online-mittaus metsätähdehakeesta. *Metsätalon raportti* 213.
- Kärkkäinen, M. 1976. Puun ja kuoren tiheys ja kosteus sekä kuoren osuus koivun, kuusen ja männyn oksissa. *Silva Fennica* 10(3): 212–236.
- 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. *Metsäkustannus Oy*. 468 s.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Männyn, kuusen ja koivun tilavuusyhtälöt. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108. 74 s.
- Liedes, M. & Manninen, P. 1975. Otantamenetelmät. *Gaudeamus*.
- Lindblad, J., Jahkonen, M. & Sirkiä, S. 2013. Latvusmassan tuoretiheyslukujen uudistaminen. Raportti Energiapuun mittaustoimikunnalle 19.3.2013. 16 s.
- , Korri, J., Äijälä, O. & Koistinen, A. 2014. Energiapuun mittaaminen. Puutavaranmittauksen neuvottelukunnan hyväksymä opas. 27 s.
- Melkas, T. 2010. Markkinoilla olevat kuormainvaat ja niiden ominaisuudet. *Metsätalon tulosalvosarja* 4/2010. http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2010_04_Markkinoilla_olevat_kuormainvaat_ja_niiden_ominaisuudet_tm.pdf
- Nisula, P. 1980. Näkökohtia polttohakeen kuivaamisesta. *Folia Forestalia* 440. 14 s.
- Nurmi, J. 1994. Työtavan vaikutus hakkuukoneen tuotokseen ja hakkuutähteen kasautumiseen. *Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja* 2/1994: 113–122.
- 1999a. Hakkuutähteen ominaisuuksista. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 722. 32.
- 1999b. The storage of logging residue for fuel. *Biomass and Bioenergy* 17: 41–47.
- Petty, A. & Melkas, T. 2013. Kuormainvaakojen punnitustarkkuus. Case-tutkimus: Kuormainvaakamittaus puutavara-autoissa ja kuormatraktoreissa. *Metsätalon tulosalvosarja* 6a/2013. http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2013_06a_Kuormainvaakojen_punnitustarkkuus_apetty_tm.pdf
- & Melkas, T. 2014. Economic and technical importance of crane scale accuracy: a case study on timber truck and forwarder crane scale measurement. Liite-artikkeli väitöskirjassa: Petty, A.: Opportunities for cost mitigation and efficiency improvements through rationalization of small-diameter energy wood supply chains. *Dissertationes Forestalis* 175. 47 s.
- Scandinavian pulp, paper and board testing committee. 1995. Massanvalmistuksessa käytettävä hake – Kuiva-tuoretiheys. *SCAN-CM* 43:95.
- Simola, P. & Mäkelä, M. 1976. Rasiinkaato kokopuiden korjuussa. *Folia Forestalia* 273. 18 s.
- Suomen standardisoimisliitto SFS. 2004. Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittämenetelmät. Uunikuivausmenetelmä. Osa1: Kokonaiskosteus. Vertailumenetelmä. *CEN/TS* 14774-1.
- Suomen standardisoimisliitto SFS. 2010. Kansainvälisen metrologian sanasto (VIM). Perus- ja yleiskäsitteet sekä niihin liittyvät termit. *International vocabulary of metrology. Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. SFS-OPAS 99. 96 s.
- Tuunanen, L. 2013. Energiarangan ja latvusmassankosteuden mittaaminen leimikolla. *Metsätieteen pro gradu, Itä-Suomen yliopisto, luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta, metsätieteiden osasto, metsä-, energia- ja puuteknologian erikoistumisala*. 80 s.
- , Melkas, T., Hämäläinen, J. & Palander, T. 2014. Menetelmä energiapuun kosteuden mittaamiseen metsäkuljetuksen yhteydessä. *Metsätalon tulosalvosarja* 4/2014. http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2014_04_Menetelma_energiapuun_kosteuden_mittaamiseen_tm_ym.pdf
- Uusvaara, O. & Verkasalo, E. 1987. Metsähakeen tiiviys ja muita teknisiä ominaisuuksia. *Folia Forestalia* 683. 53 s.
- Verkasalo, E. 1987. Metsähakeen kosteuden ja kuivamassan mittaaminen kuormaotantamenetelmillä. *Folia Forestalia* 694. 35 s.

43 viitettä